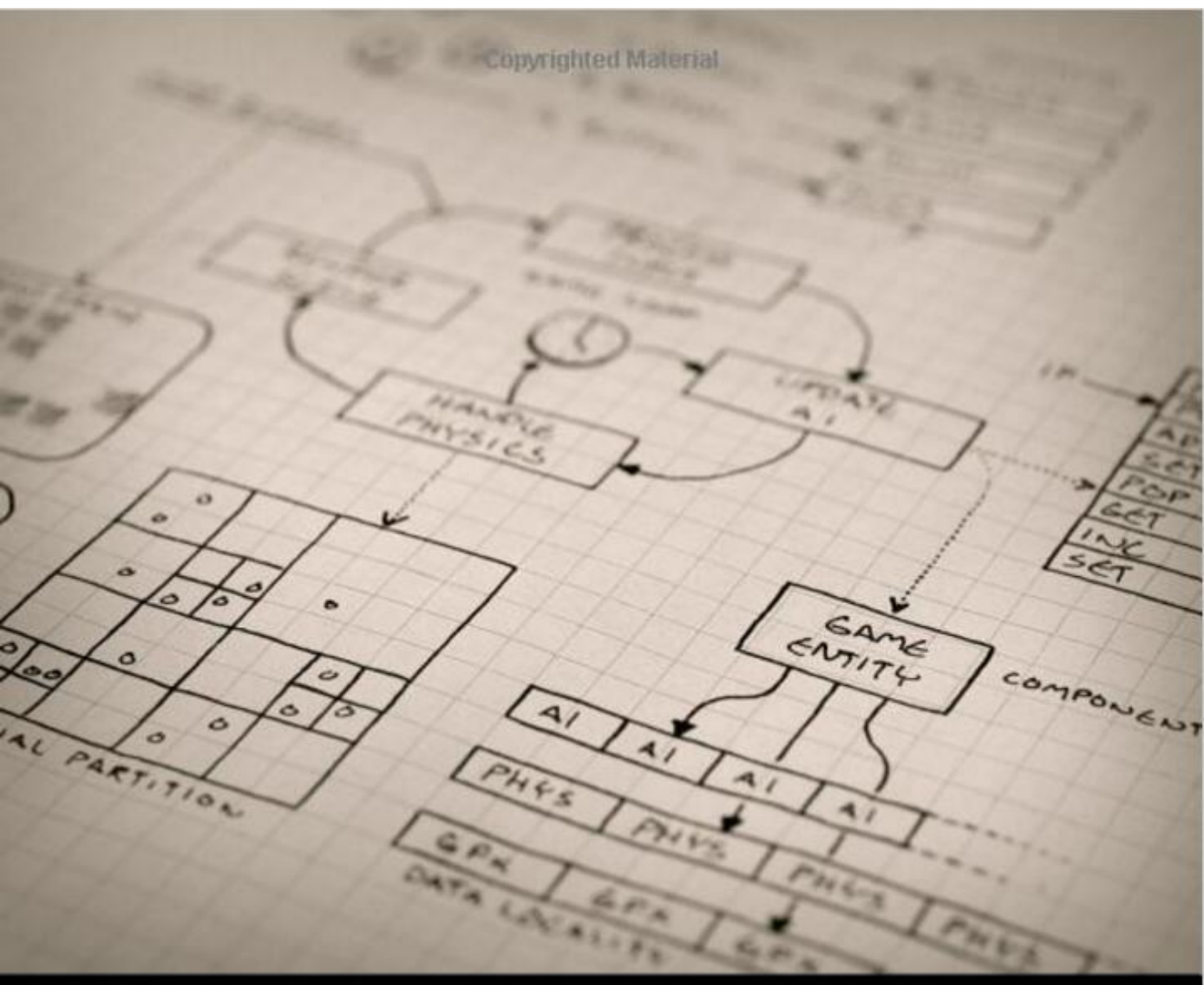
Copyrighted Material



Game Programming Patterns

Robert Nystrom

gb

Copyrighted Material

游戏编程模式

> 译者：tkchu
>
> 来源：游戏编程模式

嘿，游戏开发者们！

- 为代码整体规划而苦苦挣扎？
- 发现随着代码库增长不容易做出改动？
- 感觉你的游戏就是一个大毛线球？任何东西都和其他所有东西绕在一起？
- 考虑有什么设计模式可以应用到游戏中？
- 听说过“缓存一致性”和“对象池”，但却不知道如何使用来加速你的游戏？

我来帮忙！我写了这本书来回答这些问题。这是我在游戏中使用模式的总结，它们能让代码更整洁，更易懂，运行起来更快！

免费在线阅读！

这是我在开始做游戏时想要的书！现在，我也想让你拥有一本！

开始阅读！

作者是谁？

Bob Nystrom。他在EA工作时，就开始写这本书了。在那工作的8年里，他见过很多优美的代码，也见过很多可怕的代码。他希望能将从优美的代码中学到的东西写下来，并教大家怎样写出这样好的代码。

如果你想与他交流，你可以在Twitter上(`@munificentbob`).

有反馈?

如果对中文版有任何问题意见，不要犹豫，提交issues或者pull request.

目录

- 致谢
- 序
  - 架构，性能和游戏

- 重访设计模式
  - 命令模式
  - 享元模式
  - 观察者模式
  - 原型模式
  - 单例模式
  - 状态模式
- 序列模式
  - 双缓冲模式
  - 游戏循环
  - 更新方法
- 行为模式
  - 字节码
  - 子类沙箱
  - 类型对象
- 解耦模式
  - 组件模式
  - 事件队列
  - 服务定位器
- 优化模式
  - 数据局部性
  - 脏标识模式
  - 对象池模式
  - 空间分区

致谢

游戏设计模式

据说只有作家知道写作中会遇到什么， 但还有另外一群人知道内情——那些不幸与作家有亲密关系的人。 我的妻子Megan从岩石般致密的生活中，为我开凿出写作时间。 洗盘子，给孩子洗澡也许不是“写作”， 但没有她的这些付出，这本书永远没法写出来。

我在EA做程序员时开始写作这本书。 我认为公司不知道这回事， 我要感谢Michael Malone, Olivier Nallet, 以及Richard Wifall。 他们为书籍的前几章提供了详尽有益的建议。

写到一半时，我决定放弃传统的出版方式。 我知道，这意味着没有编辑的指导，但有成打的读者通过邮件告诉我书该怎么写； 这意味着没有校对，但有超过250个bug报告来帮我改进； 这意味着没有写作期限的鼓舞，但当我完成一章，读者会拍着我的背鼓励，我会有更强的动力。

我没有失去文字编辑。Lauren Briese在我需要的时候出现并杰出地完成了工作。

人们称之为“自出版”，但是“众出版”更加接近事实。 写作是件孤独的事，但我从没感到孤单。 哪怕是我停止写作两年后，仍有人来鼓励我。 没有那些提醒我他们期待更多章节的人，我不会重拾工作并完成此书。

特别感谢Colm Sloan，完全出于内心的善意，他认真阅读了书中每个章节*两遍*，给了我众多超赞的反馈。我欠他一份人情，也许是两份。

那些写过邮件或者发过评论的人， 那些点过赞或者收藏的人， 那些发过推特的人，那些与我交流的人， 那些向朋友宣传这本书的人，那些向我发送错误报告的人， 我要对你们说：我心中充满了对你的感激。 完成这本书是我人生中最大的目标之一，是你让我梦想成真。

谢谢！

序

游戏设计模式

在五年级时，我和我的朋友被准许使用一间存放有几台非常破旧的TRS-80s的房间。 为了鼓舞我们，一位老师给我们找了一些简单的BASIC程序打印文档。

电脑的磁带驱动器已经坏掉了，所以每当我们想要运行代码，就得小心地从头开始输入代码。 因此，我们更喜欢那些只有几行长的程序：

```
10 PRINT "BOBBY IS RADICAL!!!"
20 GOTO 10
```

如果电脑打印的次数足够多，也许这句话就会魔法成真。

哪怕这样，过程也充满了困难。我们不知道如何编程，所以小小的语法错误对我们也是天险。 如果程序没有工作——这经常发生——我们就得从头再来一遍。

文档的最后几页是个真正的怪物：一个占据了几页篇幅的程序。 我们得花些时间才能鼓起勇气去试一试，但它实在太诱人——它的标题是“地道与巨魔”。 我们不知道它能做什么，但听起来像是个游戏，还有什么比自己编个电脑游戏更酷的吗?

我们从来没能让它运行起来，一年以后，我们离开了那间教室。 （很久以后，当我真的学会了点BASIC，我意识到那只是个桌面游戏角色生成器，而不是游戏。） 但是命运的车轮已经开始转动——自那时起，我就想要成为一名游戏程序员。

青少年时，我家有了一台能运行QuickBASIC的Macintosh，之后THINK C也能在其上运行。 几乎整个暑假我都在用它编游戏。 自学缓慢而痛苦。 我能轻松地编写并运行某些部分——地图或者小谜题——但随着程序代码量的增长，这越来越难。

暑假中的不少时间我花在路易斯安那州南部的沼泽里逮蛇和乌龟上了。 如果外面不是那么酷热，很有可能这是一本讲爬虫而不是编程的书了。

起初，挑战之处仅仅在于让程序成功运行。然后，是搞明白怎样写出内容超出我大脑容量的代码。 我不再只阅读关于“如何用C++编程”的书籍，而开始尝试找那些讲如何*组织*程序的书。

几年过后，一位朋友给我一本书：《设计模式：可复用面向对象软件的基础》。 终于！正是我从青年时期就在寻找的书。 我一口气从头读到尾。虽然我仍然与自己的程序挣扎，但看到别人也在挣扎并提出了解决方案是一种解脱。 我意识到手无寸铁的我终于有件像样的*工具*了。

那是我首次见到这位朋友，相互介绍五分钟后，我坐在他的沙发上，接下来几个小时，无视他并全神贯注地阅读。 我想自那以后我的社交技能还是有所提高的。

在2001年，我获得了梦想中的工作：EA的软件工程师。 我等不及要看看真正的游戏，还有专业人士是如何将组织一切的。 像实况足球这样的大型游戏使用了什么样的架构？不同的系统是如何交互的？一套代码库是如何在多个平台上运行的？

分析理解源代码是种震颤的体验。图形，AI，动画，视觉效果皆有杰出代码。 有专家知道如何榨干CPU的最后一个循环并好好使用。 那些我都不知道是否*可行*的事情，这些人在午饭前就能完成。

但是这些杰出代码依赖的*架构*通常是事后设计。 他们太注重*功能*而忽视了架构。耦合充斥在模块间。 新功能被塞到任何能塞进去的地方。 在梦想幻灭的我看来，这和其他程序员没什么不同， 如果他们阅读过《设计模式》，最多也就用用 单例。

当然，没那么糟。我曾幻想游戏程序员坐在白板包围的象牙塔里，为架构冷静地讨论上几周。 而实际情况，我看到的代码是努力应对紧张截止期限的人赶工完成的。 他们已经竭尽全力，而且，就像我慢慢意识到的那样，他们的全力以赴的结果通常很好。 我花在游戏代码上的时间越多，我越能发现藏在表面下的天才之处。

不幸的是，“藏”是普遍现象。 宝石埋在代码中，但人们从未意识到它们的存在。 我看到同事重复寻找解决方案，而需要的示例代码就埋在他们所用的代码库中。

这个问题正是这本书要解决的。 我挖出了游戏代码库中能找到的设计模式，打磨然后在这里展示它们，这样可以节约时间用于在发明新事物上，而非*重新*发明它们。

书店里已有的书籍

书店里已经有很多游戏编程书籍了。为什么要再写一本呢？

我看到的很多编程书籍可以归为这两类：

- **特定领域的书籍。** 这些关于细分领域的书籍带你深入理解游戏开发某一特定层面。 它们会教授你3D图形，实时渲染，物理模拟，人工智能，或者音频播放。 那些很多程序员穷其一生研究的细分领域。
- **完整引擎的书籍。** 另一个方向，还有书籍试图包含游戏引擎的各个部分。 它们倾向于构建特定种类游戏的完整引擎，通常是3D FPS游戏。

这两种书我都喜欢，但我认为它们并未覆盖全部空间。 特定领域的书籍很少告诉你这些代码如何与游戏的其他部分打交道。 你擅长物理或者渲染，但是你知道怎么将两者优雅地组合吗?

第二类书包含这些，但是发现完整引擎的书籍通常过于整体，过于专注某类游戏了。 特别是，随着手游和休闲游戏的兴起，我们正处于众多游戏类型欣欣向荣的时刻。 我们不再只是复制Quake了。如果*你的*游戏与该类游戏不同，那些介绍单一引擎的书就不那么有用了。

相反，我在这里做的更*à la carte* 。 每一章都是独立的，可应用到代码上的思路。 这样，你可以用*你*认为最好的方式组合这些思路，用到你的游戏上去。

另一个广泛使用这种*à la carte*风格的例子是*Game Programming Gems*系列。

和设计模式的关联

任何名字中有“模式”的编程书 都与Erich Gamma，Richard Helm，Ralph Johnson，和John Vlissides（通常被称为GoF）合著的经典书籍： 《设计模式：可复用面向对象软件要素》相关。

《设计模式》也受到之前的书籍的启发。 创建一种模式语言来描述问题的开放式解法， 这思路来自 *A Pattern Language*， 作者是Christopher Alexander (还有Sarah Ishikawa和Murray Silverstein).

他们的书是关于架构的（建筑和墙那样的*真正的*框架结构）， 但他们希望其他人能使用相同的方法描述其他领域的解决方案。 《设计模式》正是是GoF用这一方法在软件业做出的努力。

称这本书为“游戏编程模式”，我不是暗示GoF的模式不适用于游戏编程。 相反：本书重返设计模式一节包含了《设计模式》中的很多模式， 但强调了这些模式在游戏编程的特定使用。

同样的，我认为本书也适用于非游戏软件。 我可以依样画瓢称本书为《更多设计模式》，但是我认为举游戏编程为例子更为契合。 你真的想要另一本介绍员工记录和银行账户的书吗?

也就是说，虽然这里介绍的模式在其他软件上也很有用，但它们更合适于处理游戏中常见的工程挑战：

- 时间和顺序通常是游戏架构的核心部分。事物必须在正确的时间按正确的顺序发生。
- 高度压缩的开发周期，大量程序员需要能快速构建和迭代一系列不同的行为，同时保证不烦扰他人，也不污染代码库。
- 在定义所有的行为后，游戏开始互动。怪物攻击英雄，药物相互混合，炸弹炸飞敌人或者友军。 实现这些互动不能把代码库搞成一团乱麻。
- 最后，游戏中性能很重要。 游戏开发者处于一场榨干平台性能的竞赛中。 节约CPU循环的技巧区分了A级百万销量游戏和掉帧差评游戏。

如何阅读这本书

《游戏设计模式》分为三大块。 第一部分介绍并划分本书的框架。包含你现在阅读的这章和下一章。

第二部分，重放设计模式，复习了GoF书籍里的很多模式。 在每一章中，我给出我对这个模式的看法，以及我认为它和游戏编程有什么关系。

最后一部分是这本书最肥美的部分。 它展示了十三种我发现有用的模式。它们被分为四类： 序列模式, 行为模式, 解耦模式,和优化模式。

每种模式都使用固定的格式表述，这样你可以将这本书当成引用，快速找到你需要的：

- **意图** 部分提供这个模式想要解决什么问题的简短介绍。 将它放在首位，这样你可以快速翻阅，找到你现在需要的模式。
- **动机** 部分描述了模式处理的问题示例。 不同于具体的算法，模式通常不针对某个特定问题。 不用示例教授模式，就像不用面团教授烘烤。动机部分提供了面团，而下部分会教你烘烤。
- **模式** 部分将模式从示例中剥离出来。 如果你想要一段对模式的教科书式简短介绍，那就是这部分了。 如果你已经熟悉了这种模式，想要确保你没有拉下什么，这部分也是很好的提示。
- 到目前为止，模式只是用一两个示例解释。但是如何知道模式对*你的*问题有没有用呢？ **何时使用** 部分提供了这个模式在何时使用何时不用的指导。 **记住** 部分指出了使用模式的结果和风险。

- 如果你像我一样需要具体的例子真正来*理解*某物，那么**示例代码**部分能让你称心如意。它描述模式的一步步具体实现，来展现模式是如何工作的。
- 模式与算法不同的是它们是开放的。 每次你使用模式，可以不同的方式实现。 下一部分**设计决策**，讨论这些方式，告诉你应用模式时可供考虑的不同选项。
- 作为结尾，这里有**参见**部分展示了这一模式与其他模式的关联，以及那些使用它的真实代码。

关于示例代码

这本书的示例代码使用C++写就，但这并不意味着这些模式只在C++中有用，或C++比其他语言更适合使用这些模式。 这些模式适用于几乎每种编程语言，虽然有的模式假设编程语言有对象和类。

我选择C++有几个原因。首先，这是在游戏制作中最流行的语言，是业界的*通用语*。 通常，C++基于的C语法也是Java，C#，JavaScript和其他很多语言的基础。 哪怕你不懂C++，你也只需一点点努力就能理解这里的示例代码。

这本书的目标*不是*教会你C++。 示例代码尽可能的简单，不一定符合好的C++风格或规范。 示例代码展示的是意图，而不是代码。

特别的，代码没用“现代的”——C++11或者更新的——标准。 没有使用标准库，很少使用模板。 它们是“糟糕”C++代码，但我希望保持这样，这样那些使用C，Objective-C，Java和其他语言的人更容易理解它们。

为了避免花费时间在你已经看过或者是与模式无关的代码上，示例中省略了部分代码。 如果是那样，示例代码中的省略号表明这里隐藏了一些代码。

假设有个函数，做了些工作然后返回值。 而用它作示例的模式只关心返回的值，而不是完成了什么工作。那样的话，示例代码长的像这样：

```
bool update()
{
  // 做点工作……
  return isDone();
}
```

接下来呢

设计模式在软件开发过程中不断地改变和扩展。 这本书继续了GoF记录分享设计模式的旅程，而这旅程也不会终于本书。

你是这段旅程的关键部分。改良（或者否决）了这本书中的模式，你就是为软件开发社区做贡献。 如果你有任何建议，更正，或者任何反馈，保持联络!

架构，性能和游戏

游戏设计模式Introduction

在一头扎入一堆设计模式之前，我想先讲一些我对软件架构和其应用到游戏之中的理解，这也许能帮你更好地理解这本书的其余部分。 至少，在你被卷入一场关于设计模式和软件架构有多么糟糕（或多么优秀）的辩论时， 这可以给你一些火力支援。

注意我没有建议你在战斗中选哪一边。就像任何军火贩子一样，我愿意向作战双方出售武器。

什么是软件架构?

如果把本书从头到尾读一遍， 你不会学会3D图形背后的线性代数或者游戏物理背后的微积分。 这书不会告诉你如何用α-β修剪你的AI树，也不会告诉你如何在音频播放中模拟房间中的混响。

Wow，这段给这本书打了个糟糕的广告啊。

相反，这本书告诉你在这些*之间*的事情。 与其说这本书是关于如何写代码，不如说是关于如何*架构*代码的。 每个程序都有*一定*架构，哪怕这架构是“将所有东西都塞到`main()`中看看如何”， 所以我认为讲讲什么造成了*好*架构是很有意思的。我们如何区分好架构和坏架构呢?

我思考这个问题五年了。当然，像你一样，我有对好设计有一种直觉。 我们都被糟糕的代码折磨的不轻，你唯一能做的好事就是删掉它们，结束它们的痛苦。

承认吧，我们中大多数人都该对一些糟糕代码*负责*。

少数幸运儿有相反的经验，有机会在好好设计的代码库上工作。 那种代码库看上去是间豪华酒店，里面的门房随时准备满足你心血来潮的需求。 这两者之间的区别是什么呢?

什么是*好的*软件架构?

对我而言，好的设计意味着当我作出改动，整个程序就好像正等着这种改动。 我可以加使用几个函数调用完成任务，而代码库本身无需改动。

这听起来很棒，只是完全不可行。“把代码写到改动不会影响其平静表面。”够了。

让我们通俗些。第一个关键点是*架构是有关于改动的*。 总有人改动代码。如果没人碰代码——无论是因为代码至善至美， 还是因为代码糟糕透顶以至于没人会为了修改它而玷污自己的文本编辑器——那么它的架构设计就无关紧要。 评价架构设计的好坏就是评价它应对改动有多么轻松。 没有了改动，架构好似永远不会离开起跑线的运动员。

你如何处理改动?

在你改动代码去添加新特性，去修复漏洞，或者随便什么需要使用文本编辑器的时候， 你需要理解代码正在做什么。当然，你不需要理解整个程序， 但你需要将所有相关的东西装进你的大脑。

有点诡异，这字面上是一个OCR过程。

我们通常无视了这步，但这往往是编程中最耗时的部分。 如果你认为将数据从磁盘上分页到RAM上很慢， 那么试试通过一对神经纤维将数据分页到大脑中。

一旦把所有正确的上下文都记到了你的大脑里， 想一会，你就能找到解决方案。 可能需要反复斟酌的时刻，但通常比较简单。 一旦理解了问题和需要改动的代码，实际的编码工作有时是微不足道的。

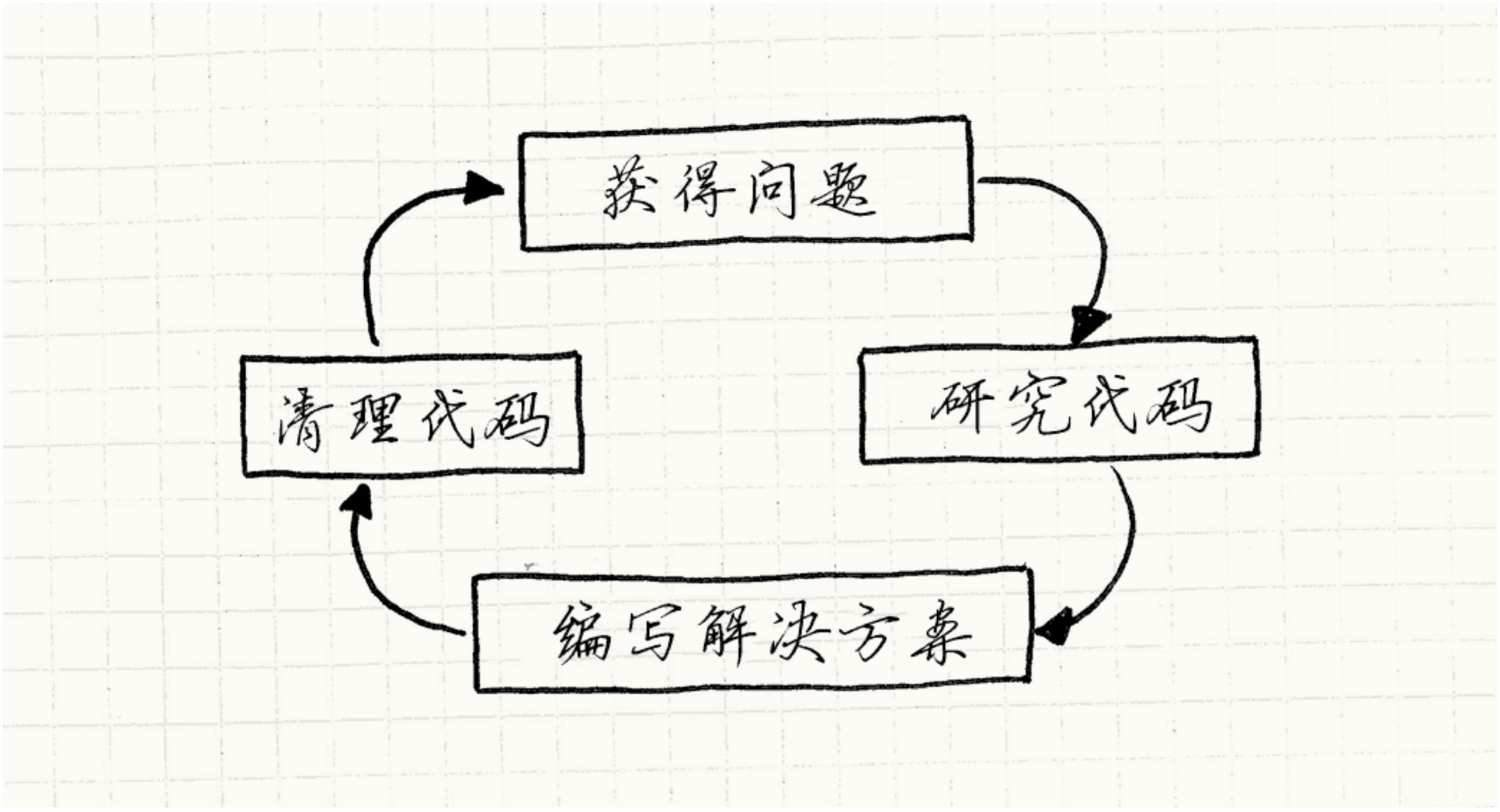
你用手指在键盘上敲打一阵，直到屏幕上闪着正确的光芒， 搞定了，对吧？还没呢！ 在你为之写测试并发送到代码评审之前，你通常有些清理工作要做。

我是不是说了“测试”？噢，是的，我说了。为有些游戏代码写单元测试很难，但代码库的大部分是完全可以测试的。

我不会在这里发表演说，但是我建议你，如果还没有做自动测试，请考虑一下。 除了手动验证以外你就没别的事要做了吗?

你将一些代码加入了游戏，但不想下一个人被留下来的小问题绊倒。 除非改动很小，否则就还需要一些工作去微调新代码，使之无缝对接到程序的其他部分。 如果你做对了，那么下个编写代码的人无法察觉到哪些代码是新加入的。

简而言之，编程的流程图看起来是这样的:



令人震惊的死循环，我看到了。

解耦帮了什么忙?

虽然并不明显，但我认为很多软件架构都是关于研究代码的阶段。 将代码载入到神经元太过缓慢，找些策略减少载入的总量是件很值得做的事。 这本书有整整一章是关于*解耦模式*， 还有很多*设计模式*是关于同样的主题。

可以用多种方式定义“解耦”，但我认为如果有两块代码是耦合的， 那就意味着无法只理解其中一个。 如果*解*耦了它俩，就可以独自地理解某一块。 这当然很好，因为只有一块与问题相关， 只需将*这一块*加载到你的大脑脑中而不需要加载另外一块。

对我来说，这是软件架构的关键目标： **最小化在编写代码前需要了解的信息**。

当然，也可以从后期阶段来看。另一种解耦的定义是：当一块代码有*改动*时，没必要修改另一块的代码。肯定需要修改*一些东西*，但耦合程度越小，改动会波及的范围就越小。

代价呢?

听起来很棒，对吧？解耦任何东西，然后像风一样编码。每个改动都只需修改一两个特定方法，在代码库上行云流水地编写代码。

这就是人们对抽象，模块化，设计模式和软件架构兴奋的原因。在架构优良的程序上工作是极佳的体验，每个人都希望能更有效率地工作。好架构能造成生产力上*巨大的*不同。它影响大得无以复加。

但是，天下没有免费的午餐。好的设计需要汗水和纪律。每次做出改动或是实现特性，你都需要将它优雅的集成到程序的其他部分。需要花费大量的努力去管理代码，在开发过程中面对数千次变化仍然*保持*它的结构。

第二部分——管理代码——需要特别关注。我看到无数程序有优雅的开始，然后死于程序员一遍又一遍添加的“微小黑魔法”。

就像园艺，仅仅种植是不够的，还需要除草和修剪。

你得考虑程序的哪部分需要解耦，然后再引入抽象。同样，你需要决定哪部分能支持扩展来应对未来的改动。

人们对这点变得狂热。他们设想，未来的开发者（或者他们自己）进入代码库，发现它极为开放，功能强大，只需扩展。他们想要有“至尊代码应众求”。（译著：这里是“至尊魔戒御众戒”的梗，很遗憾翻译不出来）

但是，事情从这里开始变得棘手。每当你添加了抽象或者扩展支持，你是*赌*以后这里需要灵活性。你向游戏中添加了代码和复杂性，这需要时间来开发，调试和维护。

如果你赌对了，后来使用了这些代码，那么功夫不负有心人。但预测未来*很难*，模块化如果最终无益，那就有害。毕竟，你得处理更多的代码。

有些人喜欢使用术语“YAGNI”——You aren't gonna need it（你不需要那个）——来对抗这种预测将来需求的强烈冲动。

当你过分关注这点时，代码库就失控了。接口和抽象无处不在。插件系统，抽象基类，虚方法，还有各种各样的扩展点，它们遍地都是。

你要消耗无尽的时间回溯所有的脚手架，去找真正做事的代码。 当需要作出改动，当然，有可能某个接口能帮上忙，但能不能找到就只能听天由命了。 理论上，解耦意味着在修改代码之前需要了解更少的代码， 但抽象层本身也会填满大脑。

像这样的代码库让人*反对*软件架构，特别是设计模式。 人们很容易沉浸在代码中，忽略目标是要发布*游戏*。 无数的开发者听着加强可扩展性的警报，花费多年时间制作“引擎”， 却没有搞清楚做引擎是*为了什么*。

性能和速度

软件架构和抽象有时因损伤性能而被批评，而游戏开发尤甚。 让代码更灵活的许多模式依靠虚拟调度、 接口、 指针、 消息和其他机制， 它们都会加大运行时开销。

一个有趣的反面例子是C++中的模板。模板编程有时可以给你抽象接口而无需运行时开销。

这是灵活性的两极。 当写代码调用类中的具体方法时，你在*写*的时候指定类——硬编码了调用的是哪个类。 通过虚方法或接口，直到*运行*时才知道调用的类。这更加灵活但增加了运行时开销。

模板编程是在两极之间。*在编译时*初始化模板，决定调用哪些类。

还有一个原因。很多软件架构的目的是使程序更加灵活，作出改动需要更少的付出，编码时对程序有更少的假设。 你可以使用接口，让代码可与*任何*实现了接口的类交互，而不仅仅是*现在*写的类。 今天，你可以使用观察者和消息让游戏的两部分交流， 以后可以很容易地扩展为三个或四个部分相互交流。

但性能与假设相关。实现优化需要基于确定的限制。 敌人永远不会超过256个？好，可以将敌人ID编码为一个字节。 只在这种类型上调用方法吗？好，可以做静态调度或内联。 所有实体都是同一类？太好了，可以使用 连续数组存储它们。

但这并不意味着灵活性不好！它可以让我们快速改进游戏， *开发* 速度是获取有趣开发经验的绝对重要因素。 没有人，哪怕是Will Wright，能在纸面上构建一个平衡的游戏。这需要迭代和实验。

越快尝试想法看看效果，就能尝试越多东西，越可能找到有价值的东西。 就算找到正确的机制，你也需要足够的时间调整。 一个微小的不平衡就有可能破坏整个游戏的乐趣。

这里没有普适的答案。 让你的程序更加灵活，在损失一点点性能的前提下更快地做出原型。 或者，优化代码，损失一些灵活性。

就我个人经验而言，让有趣的游戏变得高效比让高效的游戏变有趣简单得多。 一种折中的办法是保持代码灵活直到确定设计，再去除抽象层来提高性能。

糟糕代码的优势

下一观点：不同的代码风格各有千秋。 这本书的大部分是关于保持干净可控的代码，所以我坚持应该用*正确*方式写代码，但糟糕的代码也有一定的优势。

编写良好架构的代码需要仔细地思考，这会消耗时间。 在项目的整个周期中*保持*良好的架构需要花费大量的努力。 你需要像露营者处理营地一样小心处理代码库：总是保持其优于你刚刚接触它的时候。

当你要在项目上花费很久时间的话，这很好。 但，就像早先提到的，游戏设计需要很多实验和探索。 特别是在早期，写一些你*知道*要扔掉的代码是很普遍的事情。

如果只想试试游戏的某些点子是否可行的， 良好的架构意味着在屏幕上看到和获取反馈之前要消耗很长时间。 如果最后证明这点子不对，那么删除代码时，那些让代码更优雅的时间就付之东流了。

原型——一坨勉强拼凑在一起，只能完成某个点子的简单代码——是个完全合理的编程实践。 虽然当你写一次性代码时，*必须* 保证将来可以扔掉它。 我见过很多次糟糕的经理人在玩这种把戏：

> 老板：“嗨，我有些想试试的点子。只要原型，不需要做的很好。你能多快搞定？”
>
> 开发者：“额，如果删掉这些部分，不测试，不写文档，允许很多的漏洞，那么几天能给你临时的代码文件。”
>
> 老板：“太好了。”

几天后

> 老板：“嘿，原型很棒，你能花上几个小时清理一下然后变为成品吗？”

你得让人们清楚，可抛弃的代码即使看上去能工作，也不能被*维护*，*必须* 重写。 如果*有可能*要维护这段代码，就得防御性好好编写它。

一个小技巧能保证原型代码不会变成真正用的代码：使用和游戏实现不同的编程语言。 这样，在将其实际应用于游戏中之前必须重写。

保持平衡

有些因素在相互角力：

1. 为了在项目的整个生命周期保持其可读性，需要好架构。 2. 需要更好的运行时性能。 3. 需要让现在的特性更快的实现。

有趣的是，这些都是速度：长期开发的速度，游戏运行的速度，和短期开发的速度。

这些目标至少是部分对立的。 好架构长期来看提高了生产力， 也意味着每个改动都需要消耗更多努力保持代码整洁。

草就的代码很少是*运行时*最快的。 相反，提升性能需要很多的编程时间。 一旦完成，它就会污染代码库：高度优化的代码不灵活，很难改动。

总有今日事今日毕的压力。但是如果尽可能快地实现特性， 代码库就会充满黑魔法，漏洞和混乱，阻碍未来的产出。

没有简单的答案，只有权衡。 从我收到的邮件看，这伤了很多人的心，特别是那些只是想做个游戏的人。 这似乎是在恐吓，“没有正确的答案，只有不同的错误。”

但，对我而言，这让人兴奋！看看任何人们从事的领域， 你总能发现某些相互抵触的限制。无论如何，如果有简单的答案，每个人都会那么做。 一周就能掌握的领域是很无聊的。你从来没有听说过有人讨论挖坑。

也许你会讨论挖坑；我没有深究这个类比。 可能有挖坑热爱者，挖坑规范，以及一整套亚文化。 我算什么人，能在此大放厥词?

对我来说，这和游戏有很多相似之处。 国际象棋之类的游戏永远不能被掌握，因为每个棋子都很完美的与其他棋子相平衡。 这意味你可以花费一生探索广阔的可选策略。糟糕的游戏就像井字棋，玩上几遍就会厌倦就退出。

简单

最近，我感觉如果有什么能简化这些限制，那就是*简单*。 在我现在的代码中，我努力去写最简单，最直接的解决方案。 你读过这种代码后，完全理解了它在做什么，想不到其他完成的方法。

我的目标是正确获得数据结构和算法（大致是这样的先后），然后在从那里开始。 我发现如果能让事物变得简单，就有更少的代码， 就意味着改动时有更少的代码载入脑海。

它通常跑的很快，因为没什么开销，也没什么代码需要执行。 （虽然大部分时候事实并非如此。你可以在一小段代码里加入大量的循环和递归。）

但是，注意我并没有说简单的代码需要更少的时间*编写*。 你会这么觉得是因为最终得到了更少的代码，但是好的解决方案不是往代码中注水，而是*蒸干*代码。

Blaise Pascal有句著名的信件结尾，“我没时间写的更短。”

另一句名言来自Antoine de Saint-Exupery：“臻于完美之时，不是加无可加，而是减无可减。”

言归正传，我发现每次重写本书，它就更短。有些章节比刚完成时短了20%。

我们很少遇到优雅表达的问题，一般反而是一堆用况。 你想要X在Z情况下做Y，在A情况下做W，诸如此类。换言之，一长列不同行为。

最节约心血的方法是为每段用况编写一段代码。 看看新手程序员，他们经常这么干：为每个手头的问题编写条件逻辑。

但这一点也不优雅，那种风格的代码遇到一点点没想到的输入就会崩溃。 当我们想象优雅的代码时，想的是*通用*的那一个： 只需要很少的逻辑就可以覆盖整个用况。

找到这样的方法有点像模式识别或者解决谜题。 需要努力去识别散乱的用例下隐藏的规律。 完成时你会感觉好得不能再好。

就快完了

几乎每个人都会跳过介绍章节，所以祝贺你看到这里。 我没有太多东西回报你的耐心，但还有些建议给你，希望对你有用：

- 抽象和解耦让扩展代码更快更容易，但除非确信需要灵活性，否则不要在这上面浪费时间。
- 在整个开发周期中考虑并为性能设计，但是尽可能推迟那些底层的，基于假设的优化，那会锁死代码。

相信我，发布前两个月*不是*开始思考“游戏运行只有1FPS”问题的时候。

- 快速地探索游戏的设计空间，但不要跑的太快，在身后留下烂摊子。毕竟，你总得回来打扫。
- 如果打算抛弃这段代码，就不要尝试将其写完美。摇滚明星将旅店房间弄得一团糟，因为他们知道明天他们就走人了。

- 但最重要的是，**如果你想要做出让人享受的东西，那就享受做它的过程。**

重访设计模式

游戏设计模式

《设计模式：可复用面向对象软件的基础》出版已经二十年了。 除非你比我从业还久，否则《设计模式》已经酝酿成一坛足以饮用的老酒了。 对于像软件行业这样快速发展的行业，它已经是老古董了。 这本书的持久流行证明了设计方法比框架和方法论更经久不衰。

虽然我认为*设计模式*仍然有意义，但在过去几十年我们学到了很多。 在这一部分，我们会遇到GoF记载的一些模式。 对于每个模式，我希望能讲些有用有趣的东西。

我认为有些模式被过度使用了（单例模式）， 而另一些被冷落了（命令模式）。 有些模式在这里是因为我想探索其在游戏上的特殊应用（享元模式和观察者模式）。 最后，我认为看看有些模式在更广的编程领域是如何运用的是很有趣的（原型模式和状态模式）。

模式

- 命令模式
- 享元模式
- 观察者模式
- 原型模式
- 单例模式
- 状态模式

命令模式

游戏设计模式Design Patterns Revisited

命令模式是我最喜欢的模式之一。 大多数我写的大型程序，游戏或者别的什么，都会在某处用到它。 当在正确的地方使用时，它可以将复杂的代码清理干净。 对于这样一个了不起的模式，不出所料，GoF有个深奥的定义：

> 将一个请求封装为一个对象，从而使你可用不同的请求对客户进行参数化； 对请求排队或记录请求日志，以及支持可撤销的操作。

我想你也会觉得这个句子晦涩难懂。 第一，它的比喻难以理解。 在软件之外的狂野世界，词语可以指代任何事物，“客户”是一个人——那些和你做生意的人。 据我查证，人类不能被“参数化”。

然后，句子余下的部分介绍了可能会使用这个模式的场景。 如果你的场景不在这个列表中，那么这对你就没什么用处。 *我的*命令模式精简定义为：

命令是*具现化的方法调用*。

“Reify（具现化）”来自于拉丁语“res”，意为“thing”（事物），加上英语后缀“-fy”。 所以它意为“thingify”，没准用“thingify”更合适。

当然，“精简”往往意味着“缺少必要信息”，所以这可能没有太大的改善。 让我扩展一下。“具现化”，如果你没有听说过的话，它的意思是“实例化，对象化”。 另外一种具现化的解释方式是将某事物作为“第一公民”对待。

在某些语言中的*反射*允许你在程序运行时命令式地和类型交互。 你可以获得类的类型对象，可以与其交互看看这个类型能做什么。换言之，反射是*具现化类型的系统*。

两种术语都意味着将*概念*变成*数据*——一个对象——可以存储在变量中，传给函数。 所以称命令模式为“具现化方法调用”，意思是方法调用被存储在对象中。

这听起来有些像“回调”，“第一公民函数”，“函数指针”，“闭包”，“偏函数”， 取决于你在学哪种语言，事实上大致上是同一个东西。GoF随后说：

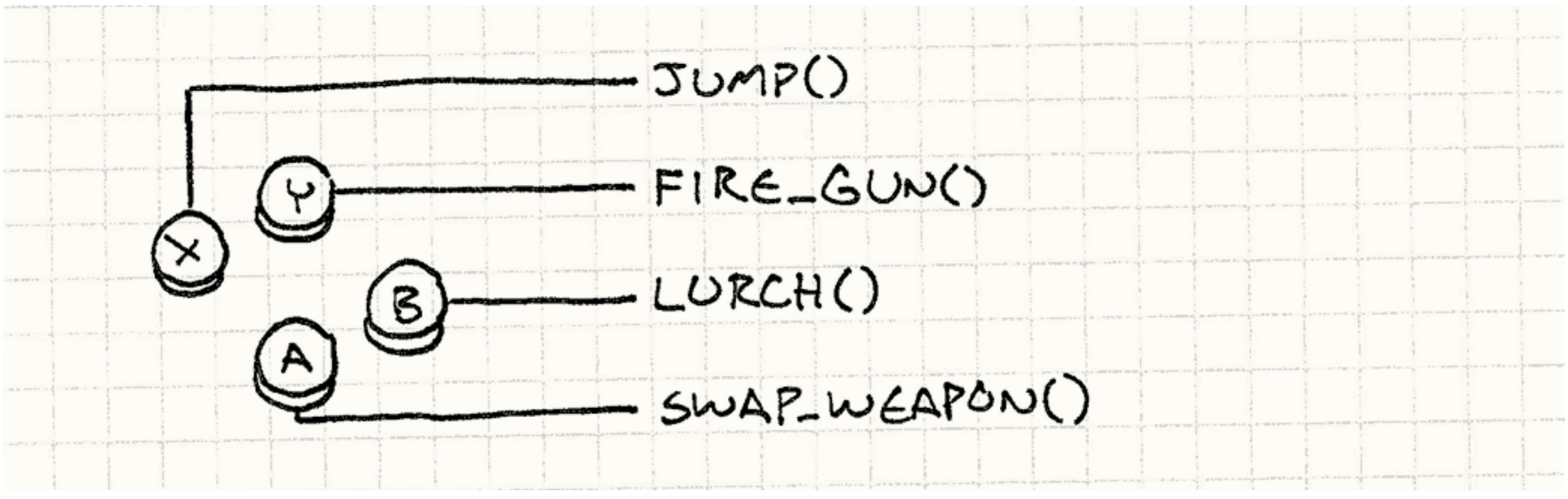
> 命令模式是一种回调的面向对象实现。

这是一种对命令模式更好的解释。

但这些都既抽象又模糊。我喜欢用实际的东西作为章节的开始，不好意思，搞砸了。 作为弥补，从这里开始都是命令模式能出色应用的例子。

配置输入

在每个游戏中都有一块代码读取用户的输入——按钮按下，键盘敲击，鼠标点击，诸如此类。 这块代码会获取用户的输入，然后将其变为游戏中有意义的行为：



下面是一种简单的实现：

```
void InputHandler::handleInput()
{
  if (isPressed(BUTTON_X)) jump();
  else if (isPressed(BUTTON_Y)) fireGun();
  else if (isPressed(BUTTON_A)) swapWeapon();
  else if (isPressed(BUTTON_B)) lurchIneffectively();
}
```

专家建议：不要太经常地按B。

这个函数通常在游戏循环中每帧调用一次，我确信你可以理解它做了什么。 在我们想将用户的输入和程序行为硬编码在一起时，这段代码可以正常工作，但是许多游戏允许玩家*配置*按键的功能。

为了支持这点，需要将这些对`jump()`和`fireGun()`的直接调用转化为可以变换的东西。“变换”听起来有点像变量干的事，因此我们需要表示游戏行为的*对象*。进入：命令模式。

我们定义了一个基类代表可触发的游戏行为：

```
class Command
{
public:
  virtual ~Command() {}
  virtual void execute() = 0;
};
```

当你有接口只包含一个没有返回值的方法时，很可能你可以使用命令模式。

然后我们为不同的游戏行为定义相应的子类：

```
class JumpCommand : public Command
{
public:
  virtual void execute() { jump(); }
};

class FireCommand : public Command
{
public:
  virtual void execute() { fireGun(); }
};

// 你知道思路了吧
```

在代码的输入处理部分，为每个按键存储一个指向命令的指针。

```
class InputHandler
{
public:
  void handleInput();

  // 绑定命令的方法……

private:
  Command* buttonX_;
  Command* buttonY_;
  Command* buttonA_;
  Command* buttonB_;
};
```

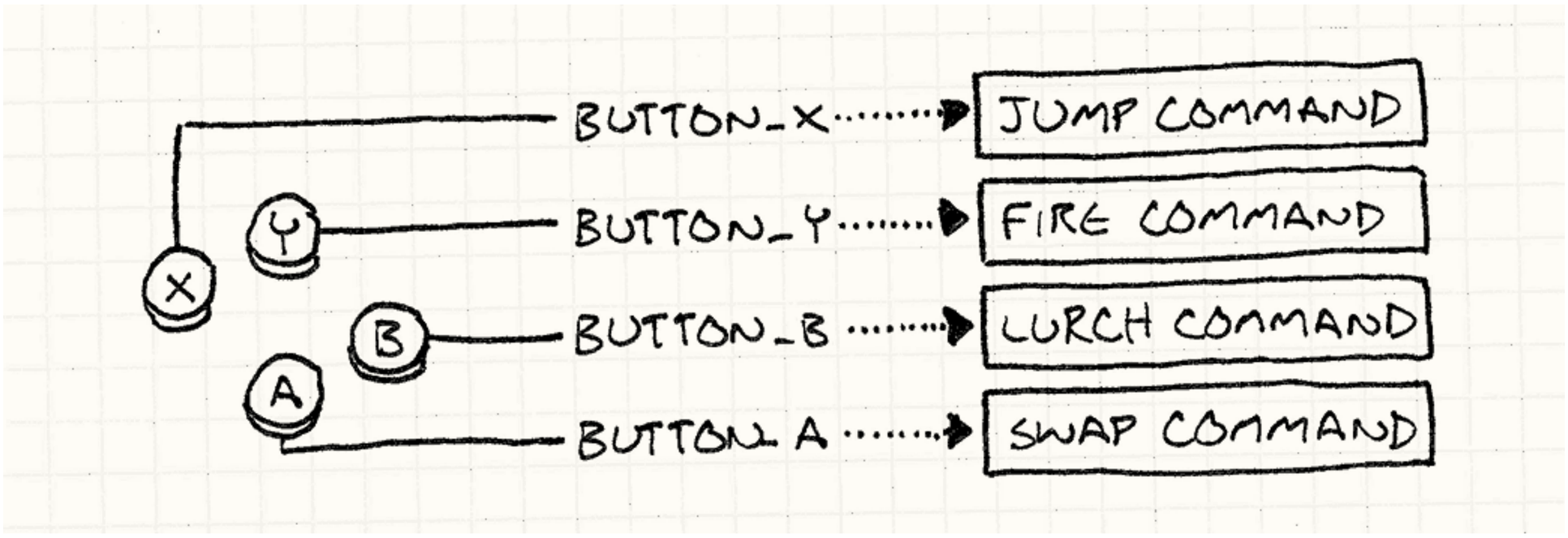
现在输入处理部分这样处理：

```
void InputHandler::handleInput()
{
  if (isPressed(BUTTON_X)) buttonX_->execute();
  else if (isPressed(BUTTON_Y)) buttonY_->execute();
  else if (isPressed(BUTTON_A)) buttonA_->execute();
  else if (isPressed(BUTTON_B)) buttonB_->execute();
}
```

注意在这里没有检测`NULL`了吗？这假设每个按键都与*某些*命令相连。

如果想支持不做任何事情的按键又不想显式检测`NULL`，我们可以定义一个命令类，它的`execute()`什么也不做。这样，某些按键处理器不必设为`NULL`，只需指向这个类。这种模式被称为空对象。

以前每个输入直接调用函数，现在会有一层间接寻址：



这是命令模式的简短介绍。如果你能够看出它的好处，就把这章剩下的部分作为奖励吧。

角色说明

我们刚才定义的类可以在之前的例子上正常工作，但有很大的局限。 问题在于假设顶层的`jump()`，`fireGun()`之类的函数可以找到玩家的角色，然后像操纵木偶一样操纵它。

这些假定的耦合限制了这些命令的用处。`JumpCommand`*只能* 让玩家的角色跳跃。让我们放松这个限制。 不让函数去找它们控制的角色，我们将函数控制的角色对象*传进去*：

```
class Command
{
public:
  virtual ~Command() {}
  virtual void execute(GameActor& actor) = 0;
};
```

这里`GameActor`是代表游戏世界中角色的“游戏对象”类。 我们将其传给`execute()`，这样可以在命令的子类中添加函数，来与我们选择的角色关联，就像这样：

```
class JumpCommand : public Command
{
public:
  virtual void execute(GameActor& actor)
  {
    actor.jump();
  }
};
```

现在，我们可以使用这个类让游戏中的任何角色跳来跳去了。 在输入控制部分和在对象上调用命令部分之间，我们还缺了一块代码。 第一，我们修改`handleInput()`，让它可以*返回*命令：

```
Command* InputHandler::handleInput()
{
  if (isPressed(BUTTON_X)) return buttonX_;
  if (isPressed(BUTTON_Y)) return buttonY_;
  if (isPressed(BUTTON_A)) return buttonA_;
  if (isPressed(BUTTON_B)) return buttonB_;

  // 没有按下任何按键，就什么也不做
  return NULL;
}
```

这里不能立即执行，因为还不知道哪个角色会传进来。 这里我们享受了命令是具体调用的好处——`延迟`到调用执行时再知道。

然后，需要一些接受命令的代码，作用在玩家角色上。像这样：

```
Command* command = inputHandler.handleInput();
if (command)
{
  command->execute(actor);
}
```

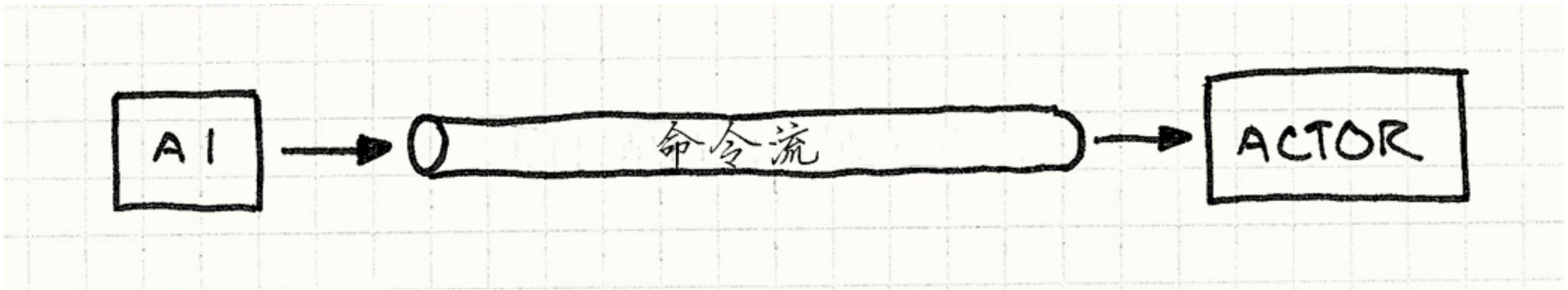
将`actor`视为玩家角色的引用，它会正确的按着玩家的输入移动， 所以我们赋予了角色和前面例子中相同的行为。 通过在命令和角色间增加了一层重定向， 我们获得了一个灵巧的功能：*我们可以让玩家控制游戏中的任何角色，只需向命令传入不同的角色。*

在实践中，这个特性并不经常使用，但是*经常*会有类似的用例跳出来。 到目前为止，我们只考虑了玩家控制的角色，但是游戏中的其他角色呢？ 它们被游戏AI控制。我们可以在AI和角色之间使用相同的命令模式；AI代码只需生成`Command`对象。

在选择命令的AI和展现命令的游戏角色间解耦给了我们很大的灵活度。 我们可以对不同的角色使用不同的AI，或者为了不同的行为而混合AI。 想要一个更加有攻击性的同伴？插入一个更加有攻击性的AI为其生成命令。 事实上，我们甚至可以为*玩家角色*加上AI， 这在原型阶段，游戏需要自动演示时是很有用的。

把控制角色的命令变为第一公民对象，去除直接方法调用中严厉的束缚。 将其视为命令队列，或者是命令流：

队列能为你做的更多事情，请看事件队列。



为什么我觉得需要为你画一幅“流”的图像？又是为什么它看上去像是管道？

一些代码（输入控制器或者AI）产生一系列命令放入流中。 另一些代码（调度器或者角色自身）调用并消耗命令。 通过在中间加入队列，我们解耦了消费者和生产者。

如果将这些指令*序列化*，我们可以通过网络流传输它们。 我们可以接受玩家的输入，将其通过网络发送到另外一台机器上，然后重现之。这是网络多人游戏的基础。

撤销和重做

最后的这个例子是这种模式最广为人知的使用情况。 如果一个命令对象可以*做*一件事，那么它亦可以*撤销*这件事。 在一些策略游戏中使用撤销，这样你就可以回滚那些你不喜欢的操作。 在人们*创造*游戏时，这是*必不可少的*工具。 一个不能撤销误操作导致的错误的编辑器，肯定会让游戏设计师恨你。

这是经验之谈。

没有了命令模式，实现撤销非常困难，有了它，就是小菜一碟。 假设我们在制作单人回合制游戏，想让玩家能撤销移动，这样他们就可以集中注意力在策略上而不是猜测上。

我们已经使用了命令来抽象输入控制，所以每个玩家的举动都已经被封装其中。 举个例子，移动一个单位的代码可能如下：

```
class MoveUnitCommand : public Command
{
public:
  MoveUnitCommand(Unit* unit, int x, int y)
  : unit_(unit),
    x_(x),
    y_(y)
  {}

  virtual void execute()
  {
    unit_->moveTo(x_, y_);
  }

private:
  Unit* unit_;
  int x_, y_;
};
```

注意这和前面的命令有些许不同。 在前面的例子中，我们需要从修改的角色那里*抽象*命令。 在这个例子中，我们将命令*绑定*到要移动的单位上。 这条命令的实例不是通用的“移动某物”命令；而是游戏回合中特殊的一次移动。

这展现了命令模式应用时的一种情形。 在某些情形中，就像之前例子，指令是可重用的对象，代表了*可执行的事件*。 我们早期的输入控制器将其实现为一个命令对象，然后在按键按下时调用其`execute()`方法。

这里的命令更加特殊。它们代表了特定时间点能做的特定事件。 这意味着输入控制代码可以在玩家下决定时*创造*一个实例。就像这样：

```
Command* handleInput()
{
  Unit* unit = getSelectedUnit();

  if (isPressed(BUTTON_UP)) {
    // 向上移动单位
    int destY = unit->y() - 1;
    return new MoveUnitCommand(unit, unit->x(), destY);
  }

  if (isPressed(BUTTON_DOWN)) {
    // 向下移动单位
    int destY = unit->y() + 1;
    return new MoveUnitCommand(unit, unit->x(), destY);
  }

  // 其他的移动……

  return NULL;
}
```

当然，在像C++这样没有垃圾回收的语言，这意味着执行命令的代码也要负责释放内存。

命令是一次性为我们很快地赢得了一个优点。 为了让指令可被取消，我们为每个类定义另一个需要实现的方法：

```
class Command
{
public:
  virtual ~Command() {}
  virtual void execute() = 0;
  virtual void undo() = 0;
};
```

`undo()`方法回滚了`execute()`方法造成的游戏状态改变。 这里是添加了撤销功能后的移动命令：

```
class MoveUnitCommand : public Command
{
public:
  MoveUnitCommand(Unit* unit, int x, int y)
  : unit_(unit),
    xBefore_(0),
    yBefore_(0),
    x_(x),
    y_(y)
  {}

virtual void execute()
{
  // 保存移动之前的位置
  // 这样之后可以复原。

  xBefore_ = unit_->x();
  yBefore_ = unit_->y();

  unit_->moveTo(x_, y_);
}

virtual void undo()
{
  unit_->moveTo(xBefore_, yBefore_);
  }

private:
  Unit* unit_;
  int xBefore_, yBefore_;
  int x_, y_;
};
```

注意我们为类添加了更多的状态。 当单位移动时，它忘记了它之前是什么样的。 如果我们想要撤销这个移动，我们需要记得单位之前的状态，也就是`xBefore_`和`yBefore_`的作用。

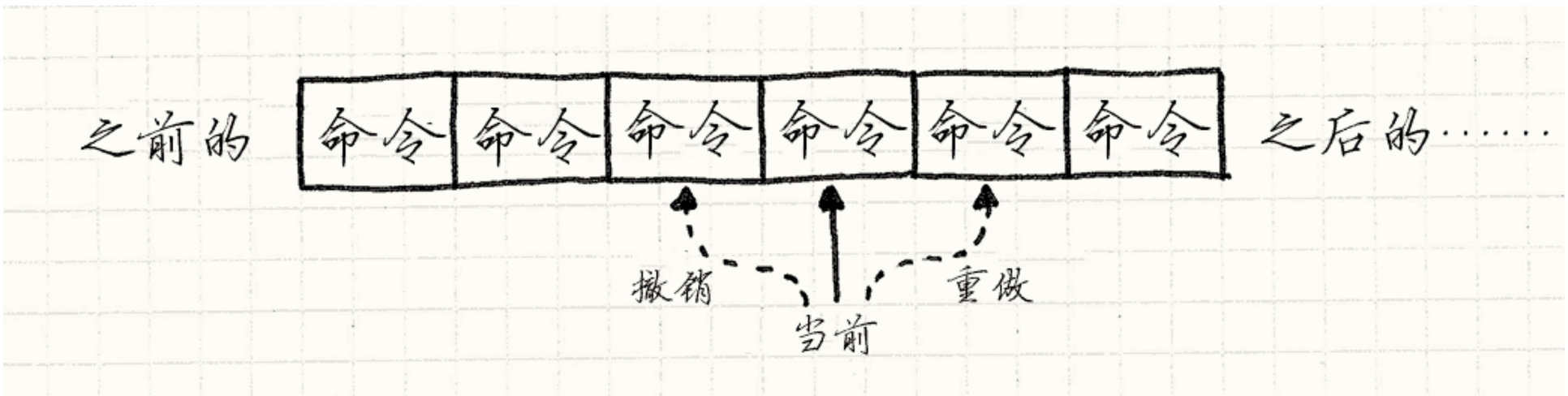
这看上去是备忘录模式使用的地方，它从来没有有效的工作过。 由于命令趋向于修改对象状态的一小部分，对数据其他部分的快照就是浪费内存。手动存储改动的部分消耗更小。

*持久化数据结构*是另一个选项。 使用它，每次修改对象都返回一个新对象，保持原来的对象不变。巧妙的实现下，这些新对象与之前的对象共享数据，所以比克隆整个对象开销更小。

使用持久化数据结构，每条命令都存储了命令执行之前对象的引用，而撤销只是切换回之前的对象。

为了让玩家撤销移动，我们记录了执行的最后命令。当他们按下`control+z`时，我们调用命令的`undo()`方法。 （如果他们已经撤销了，那么就变成了“重做”，我们会再一次执行命令。）

支持多重的撤销也不太难。 我们不单单记录最后一条指令，还要记录指令列表，然后用一个引用指向“当前”的那个。 当玩家执行一条命令，我们将其添加到列表，然后将代表“当前”的指针指向它。



当玩家选择“撤销”，我们撤销现在的命令，将代表当前的指针往后退。 当他们选择“重做”，我们将代表当前的指针往前进，执行该指令。 如果在撤销后选择了新命令，那么清除命令列表中当前的指针所指命令之后的全部命令。

第一次在关卡编辑器中实现这点时，我觉得自己简直就是个天才。 我惊讶于它如此的简明有效。 你需要约束自己，保证每个数据修改都通过命令完成，一旦你做到了，余下的都很简单。

重做在游戏中并不常见，但重*放*常见。 一种简单的重放实现是记录游戏每帧的状态，这样它可以回放，但那会消耗太多的内存。

相反，很多游戏记录每个实体每帧运行的命令。 为了重放游戏，引擎只需要正常运行游戏，执行之前存储的命令。

用类还是用函数?

早些时候，我说过命令与第一公民函数或者闭包类似， 但是在这里展现的每个例子都是通过类完成的。 如果你更熟悉函数式编程，你也许会疑惑函数都在哪里。

我用这种方式写例子是因为C++对第一公民函数支持非常有限。 函数指针没有状态，函子很奇怪而且仍然需要定义类， 在C++11中的lambda演算需要大量的人工记忆辅助才能使用。

这并*不是*说你在其他语言中不可以用函数来完成命令模式。 如果你使用的语言支持闭包，不管怎样，快去用它！ 在某种程度上，命令模式是为一些没有闭包的语言模拟闭包。

(我说*某种程度上*是因为，即使是那些支持闭包的语言， 为命令建立真正的类或者结构也是很有用的。 如果你的命令拥有多重操作（比如可撤销的命令）， 将其全部映射到同一函数中并不优雅。)

定义一个有字段的真实类能帮助读者理解命令包含了什么数据。 闭包是自动包装状态的完美解决方案，但它们过于自动化而很难看清包装的真正状态有哪些。

举个例子，如果我们使用javascript来写游戏，那么我们可以用这种方式来写让单位移动的命令:

```
function makeMoveUnitCommand(unit, x, y) {
  // 这个函数就是命令对象:
  return function() {
    unit.moveTo(x, y);
  }
}
```

我们可以通过一对闭包来为撤销提供支持:

```
function makeMoveUnitCommand(unit, x, y) {
  var xBefore, yBefore;
  return {
    execute: function() {
      xBefore = unit.x();
      yBefore = unit.y();
      unit.moveTo(x, y);
    },
    undo: function() {
      unit.moveTo(xBefore, yBefore);
    }
  };
}
```

如果你习惯了函数式编程风格，这种做事的方法是很自然的。 如果你没有，我希望这章可以帮你了解一些。 对于我而言，命令模式展现了函数式范式在很多问题上的高效性。

参见

- 你最终可能会得到很多不同的命令类。 为了更容易实现这些类，定义一个具体的基类，包含一些能定义行为的高层方法，往往会有帮助。 这将命令的主体`execute()`转到子类沙箱中。
- 在上面的例子中，我们明确地指定哪个角色会处理命令。 在某些情况下，特别是当对象模型分层时，也可以不这么简单粗暴。 对象可以响应命令，或者将命令交给它的从属对象。 如果你这样做，你就完成了一个职责链模式。

* 有些命令是无状态的纯粹行为，比如第一个例子中的`JumpCommand`。 在这种情况下，有多个实例是在浪费内存，因为所有的实例是等价的。 可以用享元模式解决。

你可以将其实现为单例，但真朋友不会让你用单例。

享元模式

游戏设计模式Design Patterns Revisited

迷雾散尽，露出了古朴庄严的森林。古老的铁杉，在头顶编成绿色穹顶。 阳光在树叶间破碎成金色顶棚。从树干间远眺，远处的森林渐渐隐去。

这是我们游戏开发者梦想的超凡场景，这样的场景通常由一个模式支撑着，它的名字低调至极：享元模式。

森林

用几句话就能描述一片巨大的森林，但是在实时游戏中做这件事就完全是另外一件事了。当屏幕上需要显示一整个森林时，图形程序员看到的是每秒需要送到GPU六十次的百万多边形。

我们讨论的是成千上万的树，每棵都由上千的多边形组成。 就算有足够的*内存*描述森林，渲染的过程中，CPU到GPU的部分也太过繁忙了。

每棵树都有一系列与之相关的位：

- 定义树干，树枝和树叶形状的多边形网格。
- 树皮和树叶的纹理。
- 在森林中树的位置和朝向。
- 大小和色彩之类的调节参数，让每棵树都看起来与众不同。

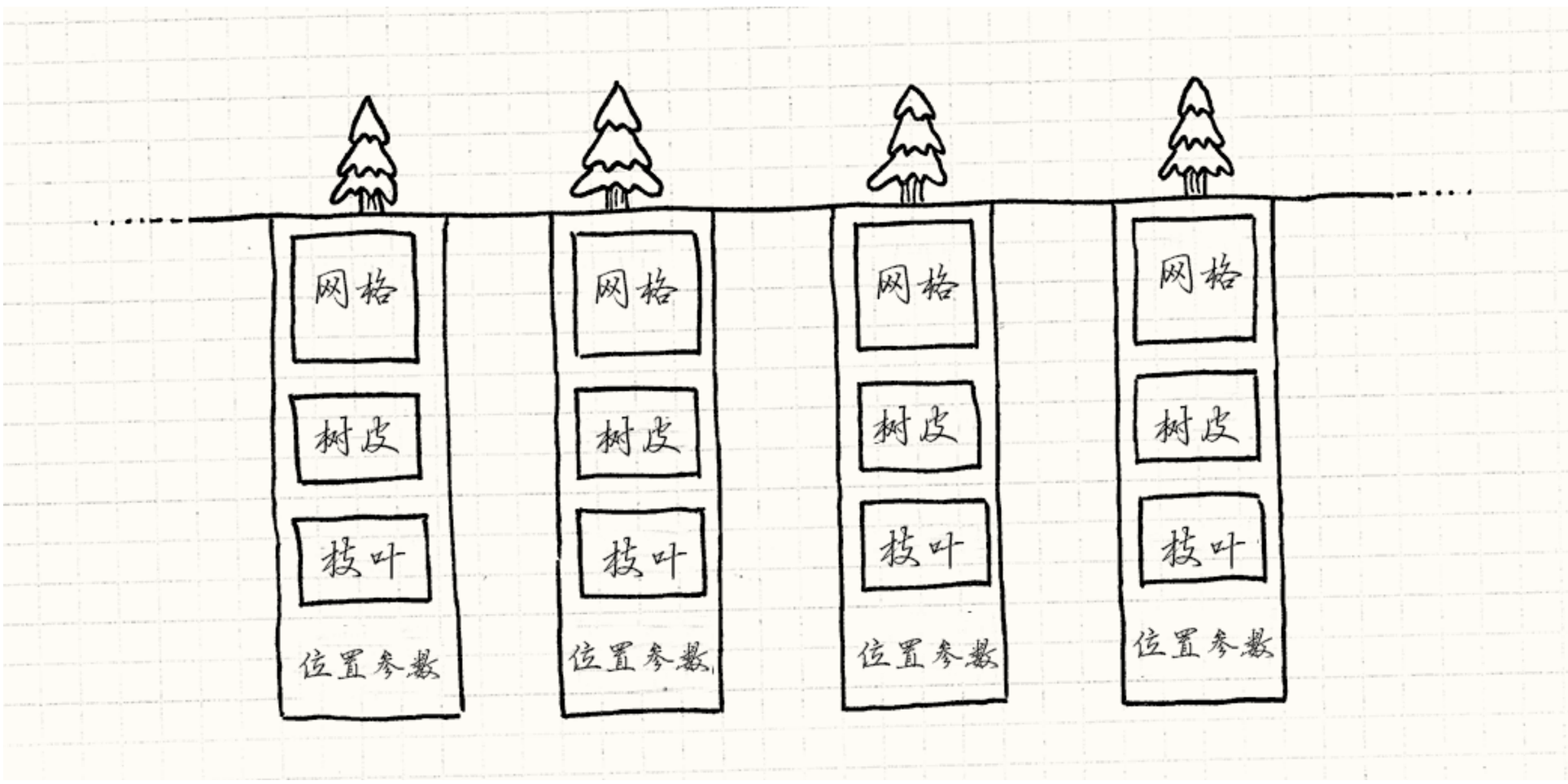
如果用代码表示，那么会得到这样的东西：

```
class Tree
{
private:
  Mesh mesh_;
  Texture bark_;
  Texture leaves_;
  Vector position_;
  double height_;
  double thickness_;
  Color barkTint_;
  Color leafTint_;
};
```

这是一大堆数据，多边形网格和纹理体积非常大。 描述整个森林的对象在一帧的时间就交给GPU是太过了。 幸运的是，有一种老办法来处理它。

关键点在于，哪怕森林里有千千万万的树，它们大多数长得一模一样。 它们使用了相同的网格和纹理。 这意味着这些树的实例的大部分字段是*一样的*。

你要么是疯了，要么是亿万富翁，才能让美术给整个森林的每棵树建一个独立模型。



注意每一棵树的小盒子中的东西都是一样的。

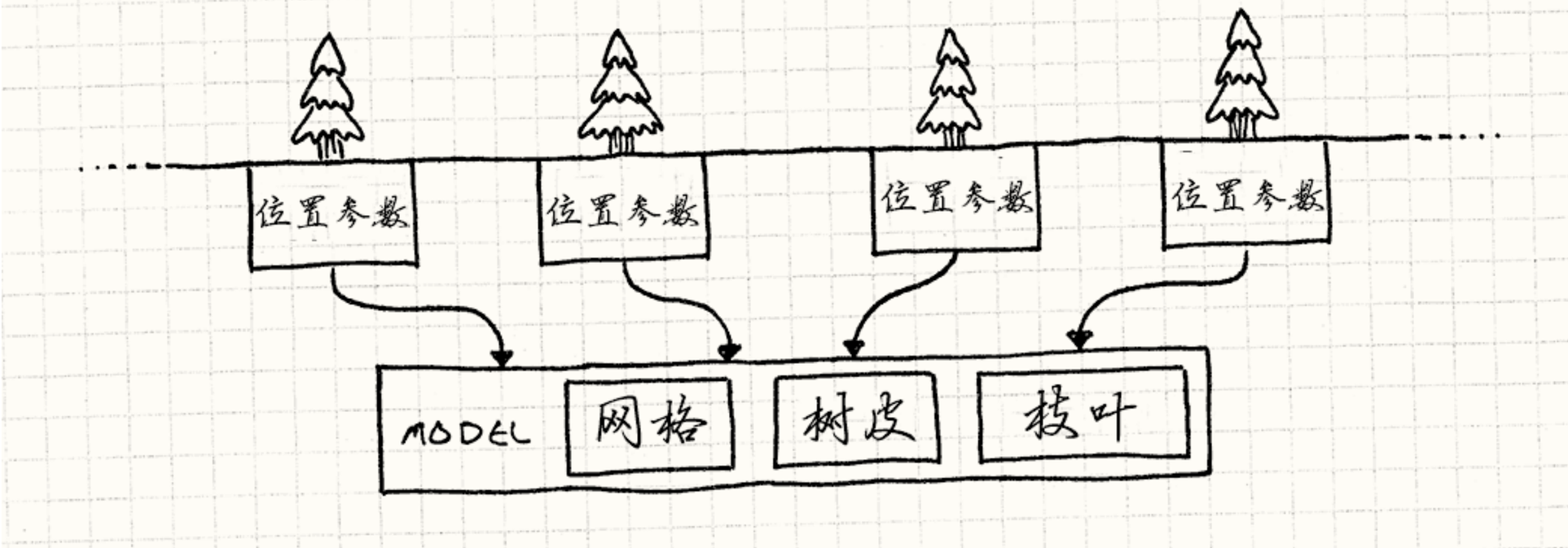
我们可以通过显式将对象切为两部分来更加明确地模拟。 第一，将树共有的数据拿出来分离到另一个类中：

```
class TreeModel
{
private:
  Mesh mesh_;
  Texture bark_;
  Texture leaves_;
};
```

游戏只需要一个这种类， 因为没有必要在内存中把相同的网格和纹理重复一千遍。 每个游戏世界中树的实例只需有一个对这个共享`TreeModel`的*引用*。 留在`Tree`中的是那些实例相关的数据：

```
class Tree
{
private:
  TreeModel* model_;

  Vector position_;
  double height_;
  double thickness_;
  Color barkTint_;
  Color leafTint_;
};
```

你可以将其想象成这样：



这有点像类型对象模式。 两者都涉及将一个类中的状态委托给另外的类，来达到在不同实例间分享状态的目的。 但是，这两种模式背后的意图不同。

使用类型对象，目标是通过将类型引入对象模型，减少需要定义的类。 伴随而来的内容分享是额外的好处。享元模式则是纯粹的为了效率。

把所有的东西都存在主存里没什么问题，但是这对渲染也毫无帮助。 在森林到屏幕上之前，它得先到GPU。我们需要用显卡可以识别的方式共享数据。

一千个实例

为了减少需要推送到GPU的数据量，我们想把共享的数据——`TreeModel`——只发送一次。然后，我们分别发送每个树独特的数据——位置，颜色，大小。 最后，我们告诉GPU，“使用同一模型渲染每个实例”。

幸运的是，今日的图形接口和显卡正好支持这一点。 这些细节繁琐且超出了这部书的范围，但是Direct3D和OpenGL都可以做*实例渲染*。

在这些API中，你需要提供两部分数据流。 第一部分是一块需要渲染多次的共同数据——在例子中是树的网格和纹理。 第二部分是实例的列表以及绘制第一部分时需要使用的参数。 然后调用一次渲染，绘制整个森林。

这个API是由显卡直接实现，意味着享元模式也许是唯一的有硬件支持的GoF设计模式。

享元模式

好了，我们已经看了一个具体的例子，下面我介绍模式的通用部分。 享元，就像它名字暗示的那样， 当你需要共享类时使用，通常是因为你有太多这种类了。

实例渲染时，每棵树通过总线送到GPU消耗的更多的是*时间*而非内存，但是基本要点是一样的。

这个模式通过将对象的数据分为两种来解决这个问题。 第一种数据没有特定指明是哪个对象的*实例*，因此可以在它们间分享。 Gof称之为*固有*状态，但是我更喜欢将其视为“上下文无关”部分。 在这里的例子中，是树的网格和纹理。

数据的剩余部分是*变化*状态，那些每个实例独一无二的东西。 在这个例子中，是每棵树的位置，拉伸和颜色。 就像这里的示例代码块一样，这种模式通过在每个对象出现时共享一份固有状态，来节约内存。

就目前而言，这看上去像是基础的资源共享，很难被称为一种模式。 部分原因是在这个例子中，我们可以为共享状态划出一个清晰的*身份*：`TreeModel`。

我发现，当共享对象没有有效定义的实体时，使用这种模式就不那么明显（使用它也就越发显得精明）。 在那些情况下，这看上去是一个对象同时被魔术般的分配到了多个地方。 让我展示给你另外一个例子。

扎根之所

这些树长出来的地方也需要在游戏中表示。 这里可能有草，泥土，丘陵，湖泊，河流，以及其它任何你可以想到的地形。 我们*基于区块*建立地表：世界的表面被划分为由微小区块组成的巨大网格。 每个区块都由一种地形覆盖。

每种地形类型都有一系列特性会影响游戏玩法：

- 决定了玩家能够多快的穿过它的移动开销。
- 表明能否用船穿过的水域标识。
- 用来渲染它的纹理。

因为我们游戏程序员偏执于效率，我们不会在每个区块中保存这些状态。 相反，一个通用的方式是为每种地形使用一个枚举。

再怎么样，我们已经从树的例子吸取教训了。

```
enum Terrain
{
  TERRAIN_GRASS,
  TERRAIN_HILL,
  TERRAIN_RIVER
  // 其他地形
};
```

然后，世界管理巨大的网格：

```
class World
{
private:
  Terrain tiles_[WIDTH][HEIGHT];
};
```

这里我使用嵌套数组存储2D网格。 在C/C++中这样很有效率的，因为它会将所有元素打包在一起。 在Java或者其他内存管理语言中，那样做会实际给你一个数组，其中每个元素都是对数组的列的*引用*，那就不像你想要的那样内存友好了。

反正，隐藏2D网格数据结构背后的实现细节，能使代码能更好的工作。 我这里这样做只是为了让其保持简单。

为了获得区块的实际有用的数据，我们做了一些这样的事情：

```
int World::getMovementCost(int x, int y)
{
  switch (tiles_[x][y])
  {
    case TERRAIN_GRASS: return 1;
    case TERRAIN_HILL:  return 3;
    case TERRAIN_RIVER: return 2;
      // 其他地形……
  }
}

bool World::isWater(int x, int y)
{
  switch (tiles_[x][y])
  {
    case TERRAIN_GRASS: return false;
    case TERRAIN_HILL:  return false;
    case TERRAIN_RIVER: return true;
      // 其他地形……
  }
}
```

你知道我的意思了。这可行，但是我觉得很丑。 移动开销和水域标识是区块的*数据*，但这里它们散布在代码中。 更糟的是，简单地形的数据被众多方法拆开了。 如果能够将这些包裹起来就好了。毕竟，那是我们设计对象的目的。

如果我们有实际的地形*类*就好了，像这样：

```
class Terrain
{
public:
  Terrain(int movementCost,
          bool isWater,
          Texture texture)
  : movementCost_(movementCost),
    isWater_(isWater),
    texture_(texture)
  {}

  int getMovementCost() const { return movementCost_; }
  bool isWater() const { return isWater_; }
  const Texture& getTexture() const { return texture_; }

private:
  int movementCost_;
  bool isWater_;
  Texture texture_;
};
```

你会注意这里所有的方法都是`const`。这不是巧合。 由于同一对象在多处引用，如果你修改了它， 改变会同时在多个地方出现。

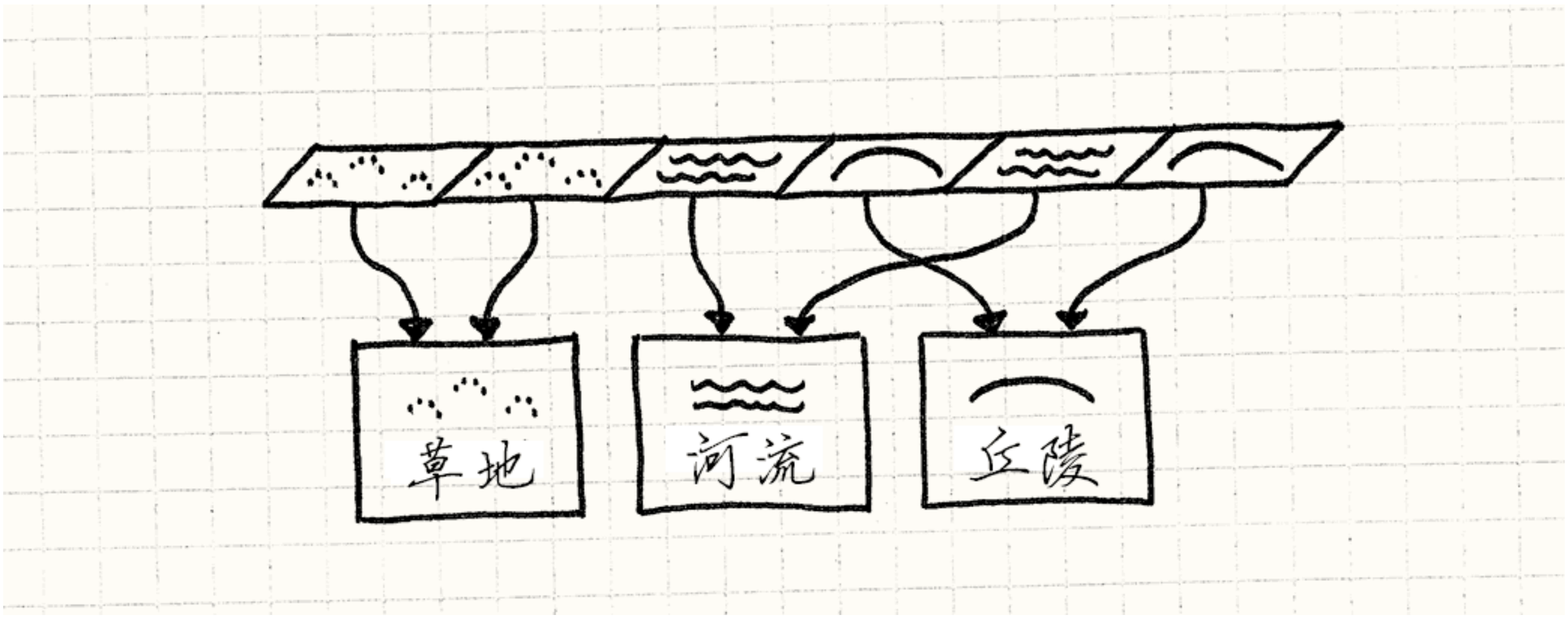
这也许不是你想要的。 通过分享对象来节约内存的这种优化，不应该影响到应用的显性行为。 因此，享元对象几乎总是不可变的。

但是我们不想为每个区块都保存一个实例。 如果你看看这个类里面，你会发现里面实际上*什么也没有*， 唯一特别的是区块在*哪里*。 用享元的术语讲，区块的*所有*状态都是“固有的”或者说“上下文无关的”。

鉴于此，我们没有必要保存多个同种地形类型。 地面上的草区块两两无异。 我们不用地形区块对象枚举构成世界网格，而是用`Terrain`对象*指针*组成网格：

```
class World
{
private:
  Terrain* tiles_[WIDTH][HEIGHT];

  // 其他代码……
};
```

每个相同地形的区块会指向相同的地形实例。



由于地形实例在很多地方使用，如果你想要动态分配，它们的生命周期会有点复杂。 因此，我们直接在游戏世界中存储它们。

```
class World
{
public:
  World()
  : grassTerrain_(1, false, GRASS_TEXTURE),
    hillTerrain_(3, false, HILL_TEXTURE),
    riverTerrain_(2, true, RIVER_TEXTURE)
  {}

private:
  Terrain grassTerrain_;
  Terrain hillTerrain_;
  Terrain riverTerrain_;

  // 其他代码……
};
```

然后我们可以像这样来描绘地面：

```
void World::generateTerrain()
{
  // 将地面填满草皮.
  for (int x = 0; x < WIDTH; x++)
  {
    for (int y = 0; y < HEIGHT; y++)
    {
      // 加入一些丘陵
      if (random(10) == 0)
      {
        tiles_[x][y] = &hillTerrain_;
      }
      else
      {
        tiles_[x][y] = &grassTerrain_;
      }
    }
  }

  // 放置河流
  int x = random(WIDTH);
  for (int y = 0; y < HEIGHT; y++) {
    tiles_[x][y] = &riverTerrain_;
  }
}
```

我承认这不是世界上最好的地形生成算法。

现在不需要`World`中的方法来接触地形属性，我们可以直接暴露出`Terrain`对象。

```
const Terrain& World::getTile(int x, int y) const
{
  return *tiles_[x][y];
}
```

用这种方式，`World`不再与各种地形的细节耦合。 如果你想要某一区块的属性，可直接从那个对象获得：

```
int cost = world.getTile(2, 3).getMovementCost();
```

我们回到了操作实体对象的API，几乎没有额外开销——指针通常不比枚举大。

性能如何?

我在这里说几乎，是因为性能偏执狂肯定会想要知道它和枚举比起来如何。 通过解引用指针获取地形需要一次间接跳转。 为了获得移动开销这样的地形数据，你首先需要跟着网格中的指针找到地形对象， 然后再找到移动开销。跟踪这样的指针会导致缓存不命中，降低运行速度。

对于更多指针追逐和缓存不命中，看看数据局部性这章。

就像往常一样，优化的金科玉律是*需求优先*。 现代计算机硬件过于复杂，性能只是游戏的一个考虑方面。 在我这章做的测试中，享元较枚举没有什么性能的优势。 享元实际上明显更快。但是这完全取决于内存中的事物是如何排列的。

我*可以*自信使用享元对象而不会搞到不可收拾。 它给了你面向对象的优势，而且没有产生一堆对象。 如果你创建了一个枚举，又在它上面做了很多分支跳转，考虑一下这个模式吧。 如果你担心性能，在把代码编程为难以维护的风格之前，至少先做些性能分析。

参见

- 在区块的例子中，我们只是为每种地形创建一个实例然后存储在`World`中。 这也许能更好找到和重用这些实例。 但是在多数情况下，你不会在一开始就创建*所有*享元。

如果你不能预料哪些是实际上需要的，最好在需要时才创建。 为了保持共享的优势，当你需要一个时，首先看看是否已经创建了一个相同的实例。 如果确实如此，那么只需返回那个实例。

这通常意味需要将构造函数封装在查询对象是否存在的接口之后。 像这样隐藏构造指令是工厂方法的一个例子。

- 为了返回一个早先创建的享元，需要追踪那些已经实例化的对象池。 正如其名，这意味着对象池是存储它们的好地方。
- 当使用状态模式时， 经常会出现一些没有任何特定字段的“状态对象”。 这个状态的标识和方法都很有用。 在这种情况下，你可以使用这个模式，然后在不同的状态机上使用相同的对象实例。

观察者模式

游戏设计模式Design Patterns Revisited

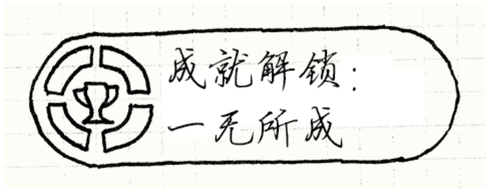
随便打开电脑中的一个应用，很有可能它就使用了MVC架构， 而究其根本，是因为观察者模式。 观察者模式应用广泛，Java甚至将其放到了核心库之中（`java.util.Observer`），而C#直接将其嵌入了*语法*（`event`关键字）。

就像软件中的很多东西，MVC是Smalltalkers在七十年代创造的。 Lisp程序员也许会说其实是他们在六十年代发明的，但是他们懒得记下来。

观察者模式是应用最广泛和最广为人知的GoF模式，但是游戏开发世界与世隔绝， 所以对你来说，它也许是全新的。 假设你与世隔绝，让我给你举个形象的例子。

成就解锁

假设我们向游戏中添加了成就系统。 它存储了玩家可以完成的各种各样的成就，比如“杀死1000只猴子恶魔”，“从桥上掉下去”，或者“一命通关”。



我发誓画的这个没有第二个意思，笑。

要实现这样一个包含各种行为来解锁成就的系统是很有技巧的。 如果我们不够小心，成就系统会缠绕在代码库的每个黑暗角落。 当然，“从桥上掉落”和物理引擎相关， 但我们并不想看到的在处理撞击代码的线性代数时， 有个对`unlockFallOffBridge()`的调用是不?

这只是随口一说。 有自尊的物理程序员绝不会允许像*游戏玩法*这样的平凡之物玷污他们优美的算式。

我们喜欢的是，照旧，让关注游戏一部分的所有代码集成到一块。 挑战在于，成就在游戏的不同层面被触发。怎么解耦成就系统和其他部分呢?

这就是观察者模式出现的原因。 这让代码宣称有趣的事情发生了，*而不必关心到底是谁接受了通知。*

举个例子，有物理代码处理重力，追踪哪些物体待在地表，哪些坠入深渊。 为了实现“桥上掉落”的徽章，我们可以直接把成就代码放在那里，但那就会一团糟。 相反，可以这样做：

```
void Physics::updateEntity(Entity& entity)
{
  bool wasOnSurface = entity.isOnSurface();
  entity.accelerate(GRAVITY);
  entity.update();
  if (wasOnSurface && !entity.isOnSurface())
  {
    notify(entity, EVENT_START_FALL);
  }
}
```

它做的就是声称，“额，我不知道有谁感兴趣，但是这个东西刚刚掉下去了。做你想做的事吧。”

物理引擎确实决定了要发送什么通知，所以这并没有完全解耦。但在架构这个领域，通常只能让系统变得*更好*，而不是*完美*。

成就系统注册它自己为观察者，这样无论何时物理代码发送通知，成就系统都能收到。 它可以检查掉落的物体是不是我们的失足英雄， 他之前有没有做过这种不愉快的与桥的经典力学遭遇。 如果满足条件，就伴着礼花和炫光解锁合适的成就，而这些都无需牵扯到物理代码。

事实上，我们可以改变成就的集合或者删除整个成就系统，而不必修改物理引擎。 它仍然会发送它的通知，哪怕实际没有东西接收。

当然，如果我们永久移除成就，没有任何东西需要物理引擎的通知， 我们也同样可以移除通知代码。但是在游戏的演进中，最好保持这里的灵活性。

它如何运作

如果你还不知道如何实现这个模式，你可能可以从之前的描述中猜到，但是为了减轻你的负担，我还是过一遍代码吧。

观察者

我们从那个需要知道别的对象做了什么事的类开始。 这些好打听的对象用如下接口定义：

```
class Observer
{
public:
  virtual ~Observer() {}
  virtual void onNotify(const Entity& entity, Event event) = 0;
};
```

`onNotify()`的参数取决于你。这就是为什么是观察者*模式*， 而不是“可以粘贴到游戏中的真实代码”。 典型的参数是发送通知的对象和一个装入其他细节的“数据”参数。

如果你用泛型或者模板编程，你可能会在这里使用它们，但是根据你的特殊用况裁剪它们也很好。 这里，我将其硬编码为接受一个游戏实体和一个描述发生了什么的枚举。

任何实现了这个的具体类就成为了观察者。 在我们的例子中，是成就系统，所以我们可以像这样实现：

```
class Achievements : public Observer
{
public:
  virtual void onNotify(const Entity& entity, Event event)
  {
    switch (event)
    {
    case EVENT_ENTITY_FELL:
      if (entity.isHero() && heroIsOnBridge_)
      {
        unlock(ACHIEVEMENT_FELL_OFF_BRIDGE);
      }
      break;

      // 处理其他事件，更新heroIsOnBridge_变量……
    }
  }

private:
  void unlock(Achievement achievement)
  {
    // 如果还没有解锁，那就解锁成就……
  }

  bool heroIsOnBridge_;
};
```

被观察者

被观察的对象拥有通知的方法函数，用GoF的说法，那些对象被称为“主题”。 它有两个任务。首先，它有一个列表，保存默默等它通知的观察者：

```
class Subject
{
private:
  Observer* observers_[MAX_OBSERVERS];
  int numObservers_;
};
```

在真实代码中，你会使用动态大小的集合而不是一个定长数组。 在这里，我使用这种最基础的形式是为了那些不了解C++标准库的人们。

重点是被观察者暴露了公*开的*API来修改这个列表：

```
class Subject
{
public:
  void addObserver(Observer* observer)
  {
    // 添加到数组中……
  }

  void removeObserver(Observer* observer)
  {
    // 从数组中移除……
  }

  // 其他代码……
};
```

这就允许了外界代码控制谁接收通知。 被观察者与观察者交流，但是不与它们*耦合*。 在我们的例子中，没有一行物理代码会提及成就。 但它仍然可以与成就系统交流。这就是这个模式的聪慧之处。

被观察者有一*列表*观察者而不是单个观察者也是很重要的。 这保证了观察者不会相互干扰。 举个例子，假设音频引擎也需要观察坠落事件来播放合适的音乐。 如果客体只支持单个观察者，当音频引擎注册时，就会*取消*成就系统的注册。

这意味着这两个系统需要相互交互——而且是用一种极其糟糕的方式， 第二个注册时会使第一个的注册失效。 支持一列表的观察者保证了每个观察者都是被独立处理的。 就它们各自的视角来看，自己是这世界上唯一看着被观察者的。

被观察者的剩余任务就是发送通知：

```
class Subject
{
protected:
  void notify(const Entity& entity, Event event)
  {
    for (int i = 0; i < numObservers_; i++)
    {
      observers_[i]->onNotify(entity, event);
    }
  }

  // 其他代码.....
};
```

注意，代码假设了观察者不会在它们的`onNotify()`方法中修改观察者列表。 更加可靠的实现方法会阻止或优雅地处理这样的并发修改。

可被观察的物理系统

现在，我们只需要给物理引擎和这些挂钩，这样它可以发送消息， 成就系统可以和引擎连线来接受消息。 我们按照传统的*设计模式*方法实现，继承`Subject`：

```
class Physics : public Subject
{
public:
  void updateEntity(Entity& entity);
};
```

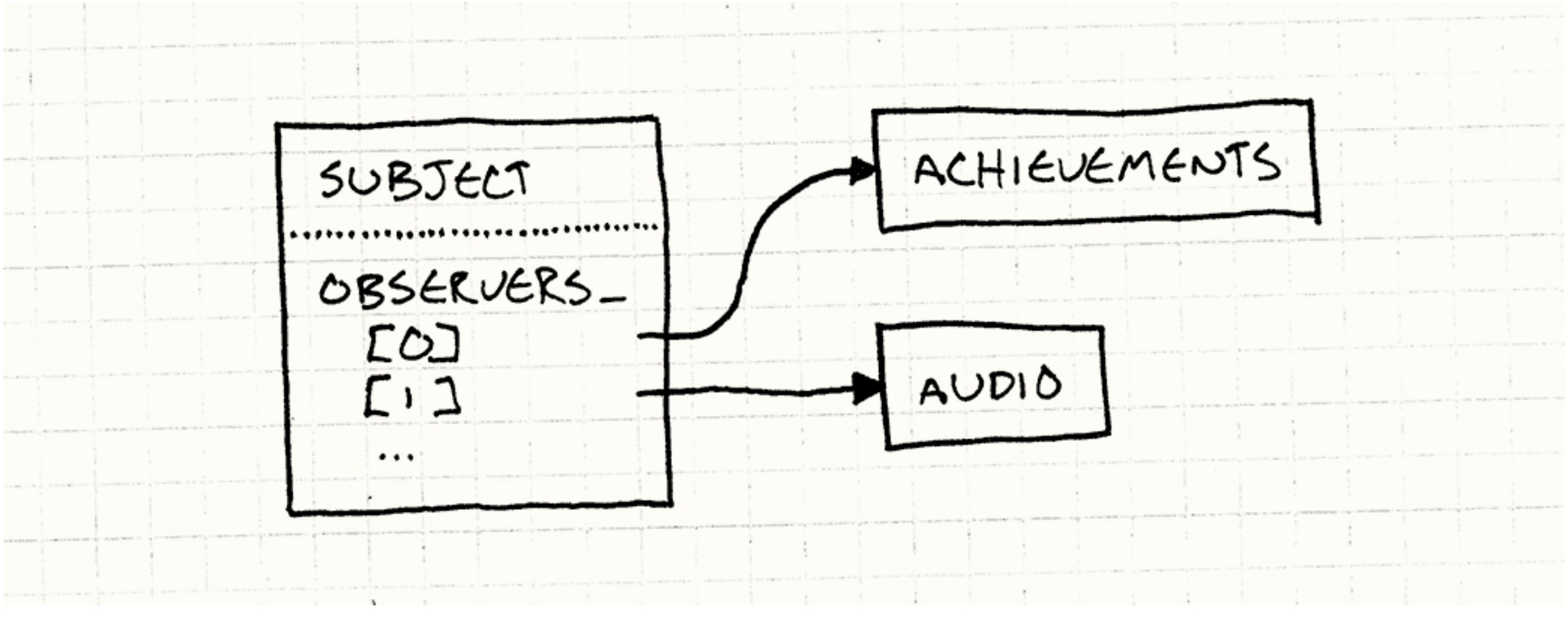
这让我们将`notify()`实现为了`Subject`内的保护方法。 这样派生的物理引擎类可以调用并发送通知，但是外部的代码不行。 同时，`addObserver()`和`removeObserver()`是公开的，所以任何可以接触物理引擎的东西都可以观察它。

在真实代码中，我会避免使用这里的继承。 相反，我会让`Physics` *有* 一个`Subject`的实例。 不再是观察物理引擎本身，被观察的会是独立的“下落事件”对象。 观察者可以用像这样注册它们自己：

```
physics.entityFell()
  .addObserver(this);
```

对我而言，这是“观察者”系统与“事件”系统的不同之处。 使用前者，你观察*做了有趣事情的事物*。 使用后者，你观察的对象代表了*发生的有趣事情*。

现在，当物理引擎做了些值得关注的东西，它调用`notify()`，就像之前的例子。 它遍历了观察者列表，通知所有观察者。



很简单，对吧？只要一个类管理一列表指向接口实例的指针。 难以置信的是，如此直观的东西是无数程序和应用框架交流的主心骨。

观察者模式不是完美无缺的。当我问其他程序员怎么看，他们提出了一些抱怨。 让我们看看可以做些什么来处理这些抱怨。

太慢了

我经常听到这点，通常是从那些不知道模式具体细节的程序员那里。 他们有一种假设，任何东西只要沾到了“设计模式”，那么一定包含了一堆类，跳转和浪费CPU循环其他行为。

观察者模式的名声特别坏，一些坏名声的事物与它如影随形， 比如“事件”，“消息”，甚至“数据绑定”。 其中的一些系统*确实会*慢。（通常是故意的，出于好的意图）。 他们使用队列，或者为每个通知动态分配内存。

这就是为什么我认为设计模式文档化很重要。 当我们没有统一的术语，我们就失去了简洁明确表达的能力。 你说“观察者”，我以为是“事件”，他以为是“消息”， 因为没人花时间记下差异，也没人阅读。

而那就是在这本书中我要做的。 本书中也有一章关于事件和消息：事件队列.

现在你看到了模式是如何真正被实现的， 你知道事实并不如他们所想的这样。 发送通知只需简单地遍历列表，调用一些虚方法。 是的，这比静态调用慢一点，除非是性能攸关的代码，否则这点消耗都是微不足道的。

我发现这个模式在代码性能瓶颈以外的地方能有很好的应用， 那些你可以承担动态分配消耗的地方。 除那以外，使用它几乎毫无限制。 我们不必为消息分配对象，也无需使用队列。这里只多了一个用在同步方法调用上的额外跳转。

太*快*?

事实上，你得小心，观察者模式*是*同步的。 被观察者直接调用了观察者，这意味着直到所有观察者的通知方法返回后， 被观察者才会继续自己的工作。观察者会阻塞被观察者的运行。

这听起来很疯狂，但在实践中，这可不是世界末日。 这只是值得注意的事情。 UI程序员——那些使用基于事件的编程的程序员已经这么干了很多年了——有句经典名言：“远离UI线程”。

如果要对事件同步响应，你需要完成响应，尽可能快的返回，这样UI就不会锁死。 当你有耗时的操作要执行时，将这些操作推到另一个线程或工作队列中去。

你需要小心地在观察者中混合线程和锁。 如果观察者试图获得被观察者拥有的锁，游戏就进入死锁了。 在多线程引擎中，你最好使用事件队列来做异步通信。

“它做了太多动态分配”

整个程序员社区——包括很多游戏开发者——转向了拥有垃圾回收机制的语言， 动态分配今昔非比。 但在像游戏这样性能攸关的软件中，哪怕是在有垃圾回收机制的语言，内存分配也依然重要。 动态分配需要时间，回收内存也需要时间，哪怕是自动运行的。

很多游戏开发者不怎么担心分配,但很担心*分页*。 当游戏需要不崩溃的连续运行多日来获得发售资格，不断增加的分页堆会影响游戏的发售。

对象池模式一章介绍了避免这点的常用技术，以及更多其他细节。

在上面的示例代码中，我使用的是定长数组，因为我想尽可能保证简单。 在真实的项目中中，观察者列表随着观察者的添加和删除而动态地增长和缩短。 这种内存的分配吓坏了一些人。

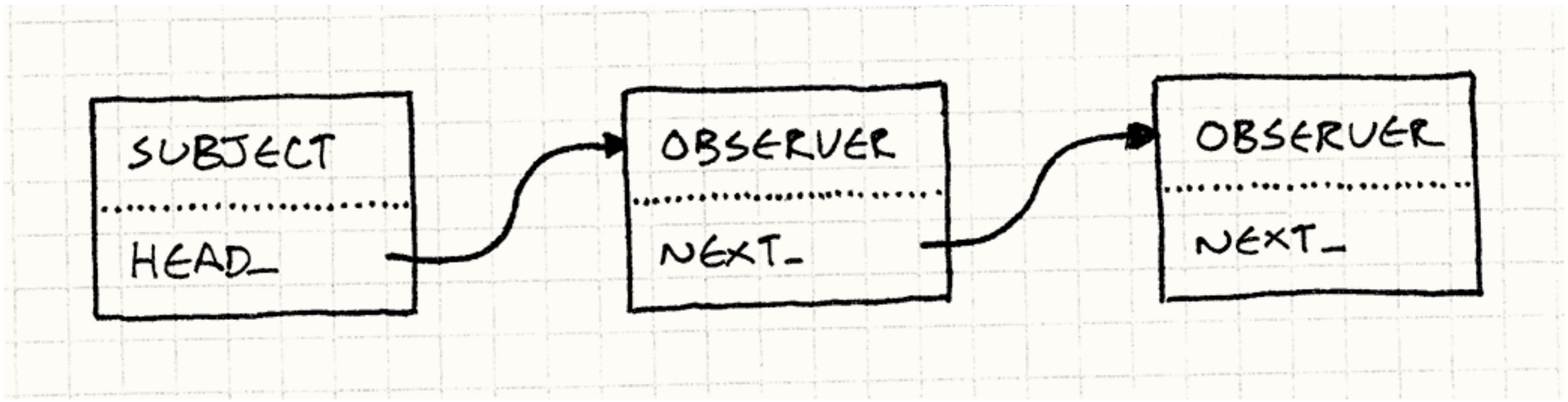
当然，第一件需要注意的事情是只在观察者加入时分配内存。 *发送* 通知无需内存分配——只需一个方法调用。 如果你在游戏一开始就加入观察者而不乱动它们，分配的总量是很小的。

如果这仍然困扰你，我会介绍一种无需任何动态分配的方式来增加和删除观察者。

链式观察者

我们现在看到的所有代码中，`Subject`拥有一列指针指向观察它的`Observer`。 `Observer`类本身没有对这个列表的引用。 它是纯粹的虚接口。优先使用接口，而不是有状态的具体类，这大体上是一件好事。

但是如果我们*确实*愿意在`Observer`中放一些状态， 我们可以将观察者的列表分布到*观察者自己*中来解决动态分配问题。 不是被观察者保留一列表分散的指针，观察者对象本身成为了链表中的一部分：



为了实现这一点，我们首先要摆脱`Subject`中的数组，然后用链表头部的指针取而代之：

```
class Subject
{
  Subject()
  : head_(NULL)
  {}

  // 方法……
private:
  Observer* head_;
};
```

然后，我们在`Observer`中添加指向链表中下一观察者的指针。

```
class Observer
{
  friend class Subject;

public:
  Observer()
  : next_(NULL)
  {}

  // 其他代码……
private:
  Observer* next_;
};
```

这里我们也让`Subject`成为了友类。 被观察者拥有增删观察者的API，但是现在链表在`Observer`内部管理。 最简单的实现办法就是让被观察者类成为友类。

注册一个新观察者就是将其连到链表中。我们用更简单的实现方法，将其插到开头：

```
void Subject::addObserver(Observer* observer)
{
  observer->next_ = head_;
  head_ = observer;
}
```

另一个选项是将其添加到链表的末尾。这么做增加了一定的复杂性。 `Subject`要么遍历整个链表来找到尾部，要么保留一个单独`tail_`指针指向最后一个节点。

加在在列表的头很简单，但也有另一副作用。 当我们遍历列表给每个观察者发送一个通知， 最*新*注册的观察者最*先*接到通知。 所以如果以A，B，C的顺序来注册观察者，它们会以C，B，A的顺序接到通知。

理论上，这种还是那种方式没什么差别。 在好的观察者设计中，观察同一被观察者的两个观察者互相之间不该有任何顺序相关。 如果顺序*确实*有影响，这意味着这两个观察者有一些微妙的耦合，最终会害了你。

让我们完成删除操作：

```
void Subject::removeObserver(Observer* observer)
{
  if (head_ == observer)
  {
    head_ = observer->next_;
    observer->next_ = NULL;
    return;
  }

  Observer* current = head_;
  while (current != NULL)
  {
    if (current->next_ == observer)
    {
      current->next_ = observer->next_;
      observer->next_ = NULL;
      return;
    }

    current = current->next_;
  }
}
```

如你所见，从链表移除一个节点通常需要处理一些丑陋的特殊情况，应对头节点。 还可以使用指针的指针，实现一个更优雅的方案。

我在这里没有那么做，是因为半数看到这个方案的人都迷糊了。 但这是一个很值得做的练习：它能帮助你深入思考指针。

因为使用的是链表，所以我们得遍历它才能找到要删除的观察者。 如果我们使用普通的数组，也得做相同的事。 如果我们使用*双向*链表，每个观察者都有指向前面和后面的指针，就可以用常量时间移除观察者。在实际项目中，我会这样做。

剩下的事情只有发送通知了，这和遍历列表同样简单；

```
void Subject::notify(const Entity& entity, Event event)
{
  Observer* observer = head_;
  while (observer != NULL)
  {
    observer->onNotify(entity, event);
    observer = observer->next_;
  }
}
```

这里，我们遍历了整个链表，通知了其中每一个观察者。 这保证了所有的观察者相互独立并有同样的优先级。

我们可以这样实现，当观察者接到通知，它返回了一个标识，表明被观察者是否应该继续遍历列表。 如果这样做，你就接近了职责链模式。

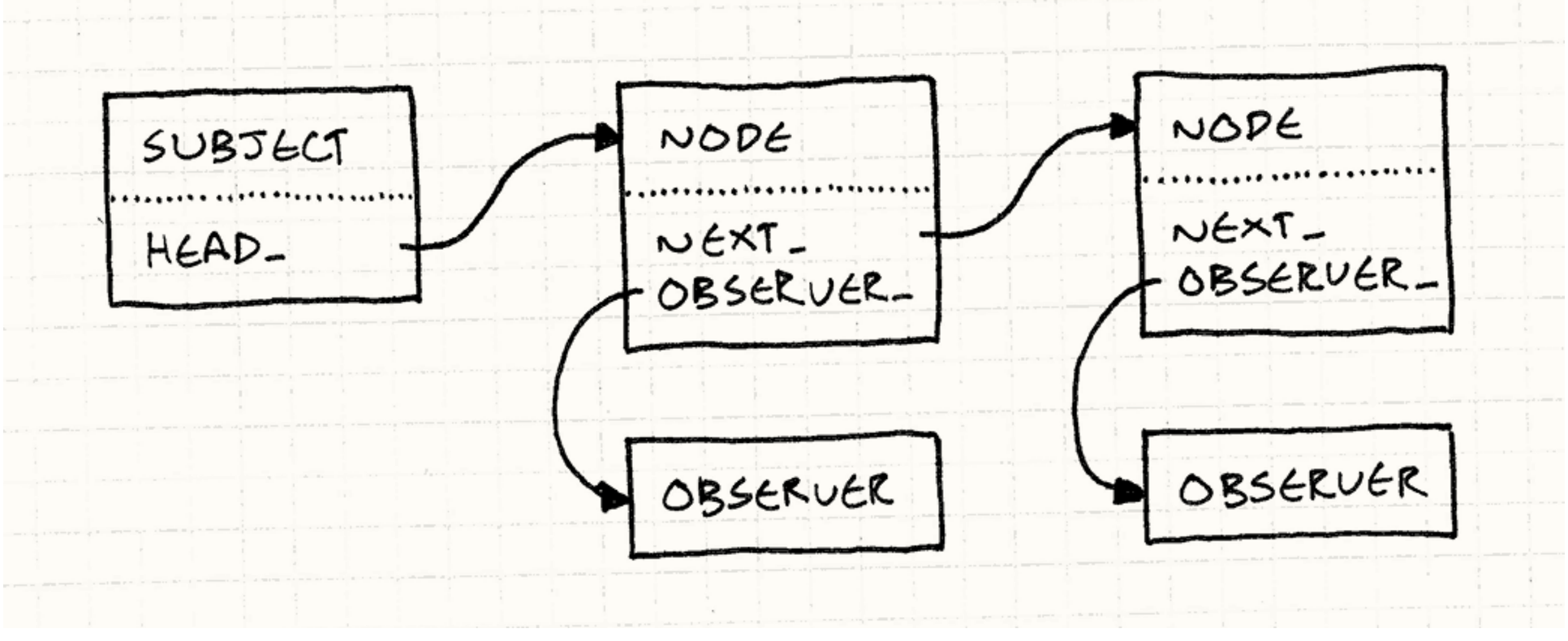
不差嘛，对吧？被观察者现在想有多少观察者就有多少观察者，无需动态内存。 注册和取消注册就像使用简单数组一样快。 但是，我们牺牲了一些小小的功能特性。

由于我们使用观察者对象作为链表节点，这暗示它只能存在于一个观察者链表中。 换言之，一个观察者一次只能观察一个被观察者。 在传统的实现中，每个被观察者有独立的列表，一个观察者同时可以存在于多个列表中。

你也许可以接受这一限制。 通常是一个*被观察者*有多个*观察者*，反过来就很少见了。 如果这*真是*一个问题，这里还有一种不必使用动态分配的解决方案。 详细介绍的话，这章就太长了，但我会大致描述一下，其余的你可以自行填补……

链表节点池

就像之前，每个被观察者有一链表的观察者。 但是，这些链表节点不是观察者本身。 相反，它们是分散的小“链表节点”对象， 包含了指向观察者的指针和指向链表下一节点的指针。



由于多个节点可以指向同一观察者，这就意味着观察者可以同时在超过多个被观察者的列表中。 我们可以同时观察多个对象了。

链表有两种风格。学校教授的那种，节点对象包含数据。 在我们之前的观察者链表的例子中，是另一种： *数据*（这个例子中是观察者）包含了*节点*（`next_`指针）。

后者的风格被称为“侵入式”链表，因为在对象内部使用链表侵入了对象本身的定义。 侵入式链表灵活性更小，但如我们所见，也更有效率。 在Linux核心这样的地方这种风格很流行。

避免动态分配的方法很简单：由于这些节点都是同样大小和类型， 可以预先在对象池中分配它们。 这样你只需处理固定大小的列表节点，可以随你所需使用和重用， 而无需牵扯到真正的内存分配器。

剩余的问题

我认为三个该模式将人们吓阻的主要问题已经被搞定了。 它简单，快速，对内存管理友好。 但是这意味着你总该使用观察者吗?

现在，这是另一个的问题。 就像所有的设计模式，观察者模式不是万能药。 哪怕可以正确高效的实现，它也不一定是好的解决方案。 设计模式有坏名声的原因之一就是人们将好模式用在错问题上，得到了糟糕的结果。

还有两个挑战，一个是关于技术，另一个更偏向是可维护性。 我们先处理关于技术的挑战，因为关于技术的问题总是更容易处理。

销毁被观察者和观察者

我们看到的样例代码健壮可用，但有一个严重的副作用： 当删除一个被观察者或观察者时会发生什么？ 如果你不小心的在某些观察者上面调用了`delete`，被观察者也许仍然持有指向它的指针。 那是一个指向一片已释放区域的悬挂指针。 当被观察者试图发送一个通知，额……就说发生的事情会出乎你的意料之外吧。

不是谴责，但我注意到*设计模式*完全没提这个问题。

删除被观察者更容易些，因为在大多数实现中，观察者没有对它的引用。 但是即使这样，将被观察者所占的字节直接回收也许会造成一些问题。 这些观察者也许仍然期待在以后收到通知，而这是不可能的了。 它们没法继续观察了，真的，它们只是认为它们可以。

你可以用好几种方式处理这点。 最简单的就是像我做的那样，以后一脚踩空。 在被删除时取消注册是观察者的职责。 多数情况下，观察者*确实*知道它在观察哪个被观察者， 所以通常需要做的只是给它的析构器添加一个`removeObserver()`。

通常在这种情况下，难点不在如何做，而在*记得*做。

如果在删除被观察者时，你不想让观察者处理问题，这也很好解决。 只需要让被观察者在它被删除前发送一个最终的“死亡通知”。 这样，任何观察者都可以接收到，然后做些合适的行为。

默哀，献花，挽歌……

人——哪怕是那些花费在大量时间在机器前，拥有让我们黯然失色才能的人——也是绝对地不可靠。 这就是为什么我们发明了电脑：它们不像我们那样经常犯错误。

更安全的方案是在每个被观察者销毁时，让观察者自动取消注册。 如果你在观察者基类中实现了这个逻辑，每个人不必记住就可以使用它。 这确实增加了一定的复杂度。 这意味着每个*观察者*都需要有它在观察的*被观察者*的列表。 最终维护一个双向指针。

别担心，我有垃圾回收器

你们那些装备有垃圾回收系统的孩子现在一定很洋洋自得。 觉得你不必担心这个，因为你从来不必显式删除任何东西？再仔细想想！

想象一下：你有UI显示玩家角色情况的状态，比如健康和道具。 当玩家在屏幕上时，你为其初始化了一个对象。 当UI退出时，你直接忘掉这个对象，交给GC清理。

每当角色脸上（或者其他什么地方）挨了一拳，就发送一个通知。 UI观察到了，然后更新健康槽。很好。 当玩家离开场景，但你没有取消观察者的注册，会发生什么？

UI界面不再可见，但也不会进入垃圾回收系统，因为角色的观察者列表还保存着对它的引用。 每一次场景加载后，我们给那个不断增长的观察者列表添加一个新实例。

玩家玩游戏时，来回跑动，打架，角色的通知发送给*所有*的界面。 它们不在屏幕上，但它们接受通知，这样就浪费CPU循环在不可见的UI元素上了。 如果它们会播放声音之类的，这样的错误就会被人察觉。

这在通知系统中非常常见，甚至专门有个名字：*失效监听者问题*。 由于被观察者保留了对观察者的引用，最终有UI界面对象僵死在内存中。 这里的教训是要及时删除观察者。

它甚至有专门的维基条目。

然后呢?

观察者的另一个深层次问题是它意图直接导致的。 我们使用它是因为它帮助我们放松了两块代码之间的耦合。 它让观察者与没有静态绑定的观察者间接交流。

当你要理解被观察者的行为时，这很有价值，任何不相关的事情都是在分散注意力。 如果你在处理物理引擎，你根本不想要编辑器——或者你的大脑——被一堆成就系统的东西而搞糊涂。

另一方面，如果你的程序没能运行，漏洞散布在多个观察者之间，理清信息流变得更加困难。 显式耦合中更易于查看哪一个方法被调用了。 这是因为耦合是静态的，IDE分析它轻而易举。

但是如果耦合发生在观察者列表中，想要知道哪个观察者被通知到了，唯一的办法是看看哪个观察者在列表中，而且*处于运行中*。 不再是理清程序的*静态*交流结构，你得理清它的*命令式，动态*行为。

如何处理这个的指导原则很简单。 如果为了理解程序的一部分，两个交流的模块*都*需要考虑， 那就不要使用观察者模式，使用其他更加显式的东西。

当你在某些大型程序上用黑魔法时，你会感觉这样处理很笨拙。 我们有很多术语用来描述，比如“关注点分离”，“一致性和内聚性”和“模块化”， 总归就是“这些东西待在一起，而不是与那些东西待在一起。”

观察者模式是一个让这些不相关的代码块互相交流，而不必打包成更大块的好方法。 这在专注于一个特性或层面的单一代码块*内*不会太有用。

这就是为什么它能很好地适应我们的例子： 成就和物理是几乎完全不相干的领域，通常被不同人实现。 我们想要它们之间的交流最小化， 这样无论在哪一个上工作都不需要另一个的太多信息。

今日观察者

*设计模式*源于1994。 那时候，面向对象语言*正是* 热门的编程范式。 每个程序员都想要“30天学会面向对象编程”， 中层管理员根据程序员创建类的数量为他们支付工资。 工程师通过继承层次的深度评价代码质量。

同一年，Ace of Base的畅销单曲发行了*三首*而不是一首，这也许能让你了解一些我们那时的品味和洞察力。

观察者模式在那个时代中很流行，所以构建它需要很多类就不奇怪了。 但是现代的主流程序员更加适应函数式语言。 实现一整套接口只是为了接受一个通知不再符合今日的美学了。

它看上去是又沉重又死板。它*确实*又沉重又死板。 举个例子，在观察者类中，你不能为不同的被观察者调用不同通知方法。

这就是为什么被观察者经常将自身传给观察者。 观察者只有单一的`onNotify()`方法， 如果它观察多个被观察者，它需要知道哪个被观察者在调用它的方法。

现代的解决办法是让“观察者”只是对方法或者函数的引用。 在函数作为第一公民的语言中，特别是那些有闭包的， 这种实现观察者的方式更为普遍。

今日，几乎*每种*语言都有闭包。C++克服了在没有垃圾回收的语言中构建闭包的挑战， 甚至是Java都在JDK8中引入了闭包。

举个例子，C#有“事件”嵌在语言中。 通过这样，观察者是一个“委托”， （“委托”是方法的引用在C#中的术语）。 在JavaScript事件系统中，观察者*可以*是支持了特定`EventListener`协议的类， 但是它们也可以是函数。 后者是人们常用的方式。

如果设计今日的观察者模式，我会让它基于函数而不是基于类。 哪怕是在C++中，我倾向于让你注册一个成员函数指针作为观察者，而不是`Observer`接口的实例。

这里的一篇有趣博文以某种方式在C++上实现了这一点。

明日观察者

事件系统和其他类似观察者的模式如今遍地都是。 它们都是成熟的方案。 但是如果你用它们写一个稍微大一些的应用，你会发现一件事情。 在观察者中很多代码最后都长得一样。 通常是这样：

1. 获知有状态改变了。
2. 下命令改变一些UI来反映新的状态。

就是这样，“哦，英雄的健康现在是7了？让我们把血条的宽度设为70像素。 过上一段时间，这会变得很沉闷。 计算机科学学术界和软件工程师已经用了*很长*时间尝试结束这种状况了。 这些方式被赋予了不同的名字：“数据流编程”，“函数反射编程”等等。

即使有所突破，一般也局限在特定的领域中，比如音频处理或芯片设计，我们还没有找到万能钥匙。 与此同时，一个更脚踏实地的方式开始获得成效。那就是现在的很多应用框架使用的“数据绑定”。

不像激进的方式，数据绑定不再指望完全终结命令式代码， 也不尝试基于巨大的声明式数据图表架构整个应用。 它做的只是自动改变UI元素或计算某些数值来反映一些值的变化。

就像其他声明式系统，数据绑定也许太慢，嵌入游戏引擎的核心也太复杂。 但是如果说它不会侵入游戏不那么性能攸关的部分，比如UI，那我会很惊讶。

与此同时，经典观察者模式仍然在那里等着我们。 是的，它不像其他的新热门技术一样在名字中填满了“函数”“反射”， 但是它超简单而且能正常工作。对我而言，这通常是解决方案最重要的条件。

原型模式

游戏设计模式Design Patterns Revisited

我第一次听到“原型”这个词是在*设计模式*中。 如今，似乎每个人都在用这个词，但他们讨论的实际不是设计模式。 我们会讨论他们所说的原型，也会讨论术语“原型”的有趣之处，和其背后的理念。 但首先，让我们重访传统的设计模式。

“传统的”一词可不是随便用的。 *设计模式*引自*1963年* Ivan Sutherland的Sketchpad传奇项目，那是这个模式首次出现。 当其他人在听迪伦和甲壳虫乐队时，Sutherland正忙于，你知道的，发明CAD，交互图形和面向对象编程的基本概念。

看看这个demo，跪服吧。

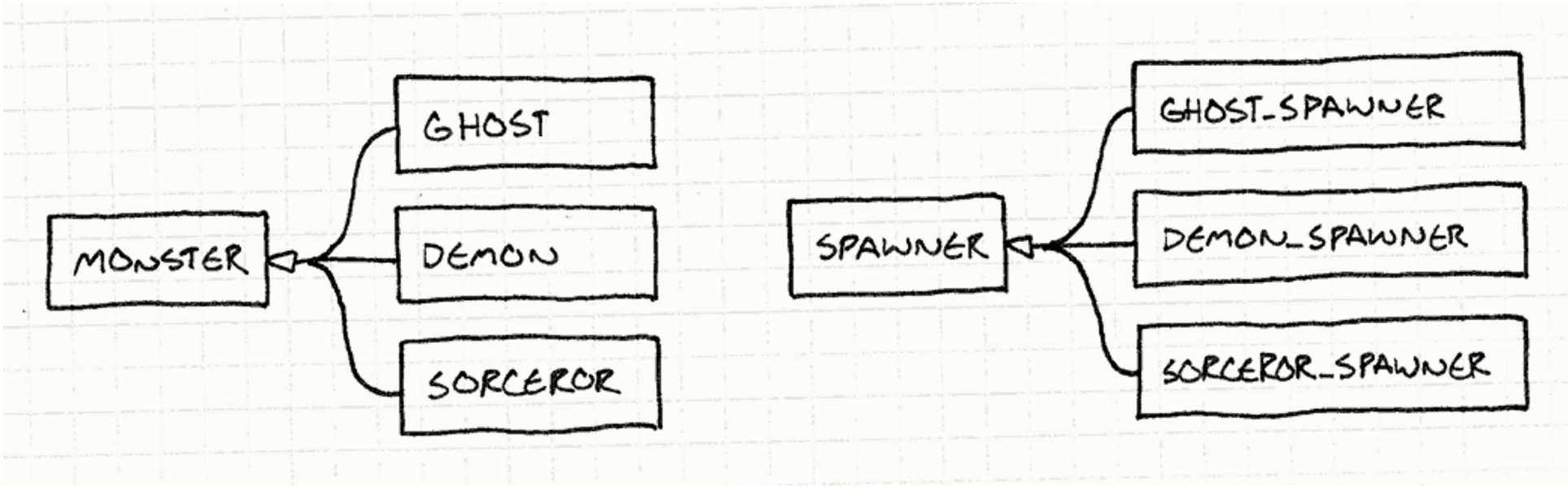
原型设计模式

假设我们要用《圣铠传说》的风格做款游戏。 野兽和恶魔围绕着英雄，争着要吃他的血肉。 这些可怖的同行者通过“生产者”进入这片区域，每种敌人有不同的生产者。

在这个例子中，假设我们游戏中每种怪物都有不同的类——`Ghost`，`Demon`，`Sorcerer`等等，像这样：

```
class Monster
{
  // 代码……
};

class Ghost : public Monster {};
class Demon : public Monster {};
class Sorcerer : public Monster {};
```

生产者构造特定种类怪物的实例。 为了在游戏中支持每种怪物，我们*可以*用一种暴力的实现方法， 让每个怪物类都有生产者类，得到平行的类结构：



我得翻出落满灰尘的UML书来画这个图表。 代表“继承”。

实现后看起来像是这样：

```
class Spawner
{
public:
  virtual ~Spawner() {}
  virtual Monster* spawnMonster() = 0;
};

class GhostSpawner : public Spawner
{
public:
  virtual Monster* spawnMonster()
  {
    return new Ghost();
  }
};

class DemonSpawner : public Spawner
{
public:
  virtual Monster* spawnMonster()
  {
    return new Demon();
  }
};

// 你知道思路了……
```

除非你会根据代码数量来获得工资， 否则将这些焊在一起很明显不是好方法。 众多类，众多引用，众多冗余，众多副本，众多重复自我……

原型模式提供了一个解决方案。 关键思路是*一个对象可以产出与它自己相近的对象*。 如果你有一个恶灵，你可以制造更多恶灵。 如果你有一个恶魔，你可以制造其他恶魔。 任何怪物都可以被视为*原型*怪物，产出其他版本的自己。

为了实现这个功能，我们给基类`Monster`一个抽象方法`clone()`：

```
class Monster
{
public:
  virtual ~Monster() {}
  virtual Monster* clone() = 0;

  // 其他代码……
};
```

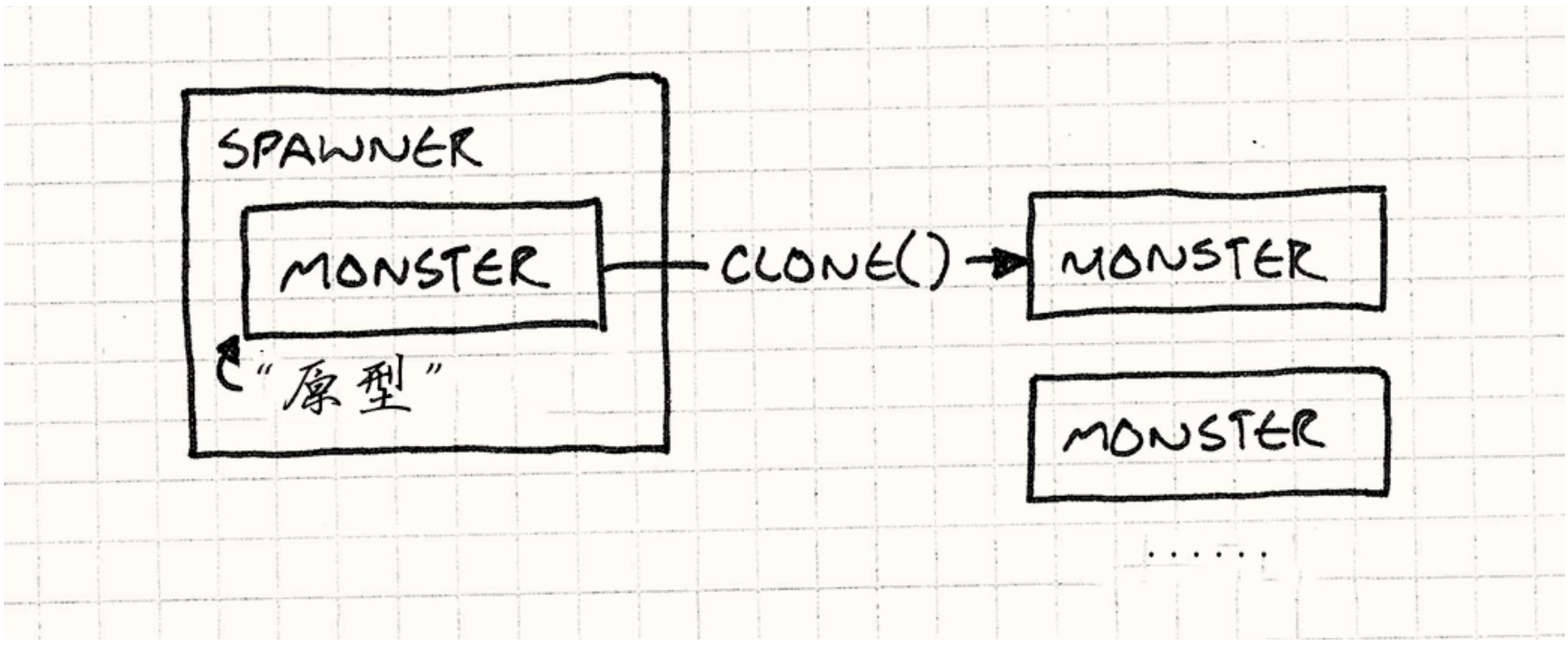
每个怪兽子类提供一个特定实现，返回与它自己的类和状态都完全一样的新对象。举个例子：

```
class Ghost : public Monster {
public:
  Ghost(int health, int speed)
  : health_(health),
    speed_(speed)
  {}

  virtual Monster* clone()
  {
    return new Ghost(health_, speed_);
  }

private:
  int health_;
  int speed_;
};
```

一旦我们所有的怪物都支持这个， 我们不再需要为每个怪物类创建生产者类。我们只需定义一个类：

```
class Spawner
{
public:
  Spawner(Monster* prototype)
  : prototype_(prototype)
  {}

  Monster* spawnMonster()
  {
    return prototype_->clone();
  }

private:
  Monster* prototype_;
};
```

它内部存有一个怪物，一个隐藏的怪物， 它唯一的任务就是被生产者当做模板，去产生更多一样的怪物， 有点像一个从来不离开巢穴的蜂后。



为了得到恶灵生产者，我们创建一个恶灵的原型实例，然后创建拥有这个实例的生产者：

```
Monster* ghostPrototype = new Ghost(15, 3);
Spawner* ghostSpawner = new Spawner(ghostPrototype);
```

这个模式的灵巧之处在于它不但拷贝原型的*类*，也拷贝它的*状态*。 这就意味着我们可以创建一个生产者，生产快速鬼魂，虚弱鬼魂，慢速鬼魂，而只需创建一个合适的原型鬼魂。

我在这个模式中找到了一些既优雅又令人惊叹的东西。 我无法想象自己是如何创造出它们的，但我更无法想象*不知道*这些东西的自己该如何是好。

效果如何?

好吧，我们不需要为每个怪物创建单独的生产者类，那很好。 但我们*确实*需要在每个怪物类中实现`clone()`。 这和使用生产者方法比起来也没节约多少代码量。

当你坐下来试着写一个正确的`clone()`，会遇见令人不快的语义漏洞。 做深层拷贝还是浅层拷贝呢? 换言之，如果恶魔拿着叉子，克隆恶魔也要克隆叉子吗?

同时，这看上去没减少已存问题上的代码， 事实上还增添了些*人为的问题*。 我们需要将每个怪物有独立的类作为前提条件。 这绝对*不是*当今大多数游戏引擎运作的方法。

我们中大部分痛苦地学到，这样庞杂的类层次管理起来很痛苦， 那就是我们为什么用组件模式和类型对象为不同的实体建模，这样无需一一建构自己的类。

生产函数

哪怕我们确实需要为每个怪物构建不同的类，这里还有其他的实现方法。 不是使用为每个怪物建立分离的生产者*类*，我们可以创建生产*函数*，就像这样：

```
Monster* spawnGhost()
{
  return new Ghost();
}
```

这比构建怪兽生产者类更简洁。生产者类只需简单地存储一个函数指针：

```
typedef Monster* (*SpawnCallback)();

class Spawner
{
public:
  Spawner(SpawnCallback spawn)
  : spawn_(spawn)
  {}

  Monster* spawnMonster()
  {
    return spawn_();
  }

private:
  SpawnCallback spawn_;
};
```

为了给恶灵构建生产者，你需要做：

```
Spawner* ghostSpawner = new Spawner(spawnGhost);
```

模板

如今，大多数C++开发者已然熟悉模板了。 生产者类需要为某类怪物构建实例，但是我们不想硬编码是哪类怪物。 自然的解决方案是将它作为模板中的*类型参数*：

我不太确定程序员是学着喜欢C++模板还是完全畏惧并远离了C++。 不管怎样，今日我见到的程序员中，使用C++的也都会使用模板。

这里的`Spawner`类不必考虑将生产什么样的怪物， 它总与指向`Monster`的指针打交道。

如果我们只有`SpawnerFor<T>`类，模板类型没有办法共享父模板， 这样的话，如果一段代码需要与产生多种怪物类型的生产者打交道，就都得接受模板参数。

```
class Spawner
{
public:
  virtual ~Spawner() {}
  virtual Monster* spawnMonster() = 0;
};

template <class T>
class SpawnerFor : public Spawner
{
public:
  virtual Monster* spawnMonster() { return new T(); }
};
```

像这样使用它：

```
Spawner* ghostSpawner = new SpawnerFor<Ghost>();
```

第一公民类型

前面的两个解决方案使用类完成了需求，`Spawner`使用类型进行参数化。 在C++中，类型不是第一公民，所以需要一些改动。 如果你使用JavaScript，Python，或者Ruby这样的动态类型语言， 它们的类*是*可以传递的对象，你可以用更直接的办法解决这个问题。

某种程度上， 类型对象也是为了弥补第一公民类型的缺失。 但那个模式在拥有第一公民类型的语言中也有用，因为它让*你*决定什么是“类型”。 你也许想要与语言内建的类不同的语义。

当你完成一个生产者，直接向它传递要构建的怪物类——那个代表了怪物类的运行时对象。超容易的，对吧。

综上所述，老实说，我不能说找到了一种情景，而在这个情景下，原型*设计模式*是最好的方案。 也许你的体验有所不同，但现在把它搁到一边，我们讨论点别的：将原型作为一种*语言范式*。

原型语言范式

很多人认为“面向对象编程”和“类”是同义词。 OOP的定义却让人感觉正好相反， 毫无疑问，*OOP让你定义“对象”，将数据和代码绑定在一起。* 与C这样的结构化语言相比，与Scheme这样的函数语言相比， OOP的特性是它将状态和行为紧紧地绑在一起。

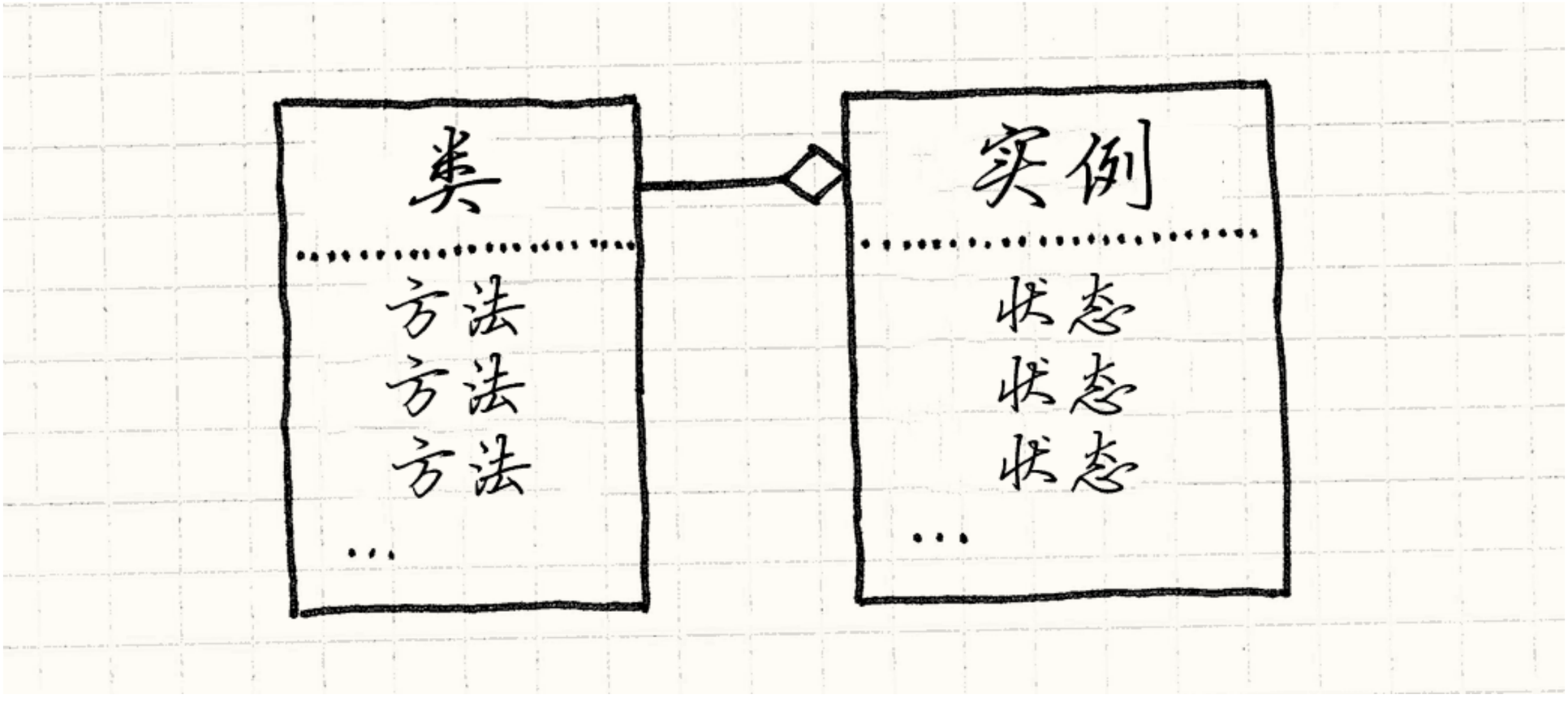
你也许认为类是完成这个的唯一方式方法， 但是包括Dave Ungar和Randall Smith的一大堆家伙一直在拼命区分OOP和类。 他们在80年代创建了一种叫做Self的语言。它不用类实现了OOP。

Self语言

就单纯意义而言，Self比基于类的语言*更加*面向对象。 我们认为OOP将状态和行为绑在一起，但是基于类的语言实际将状态和行为割裂开来。

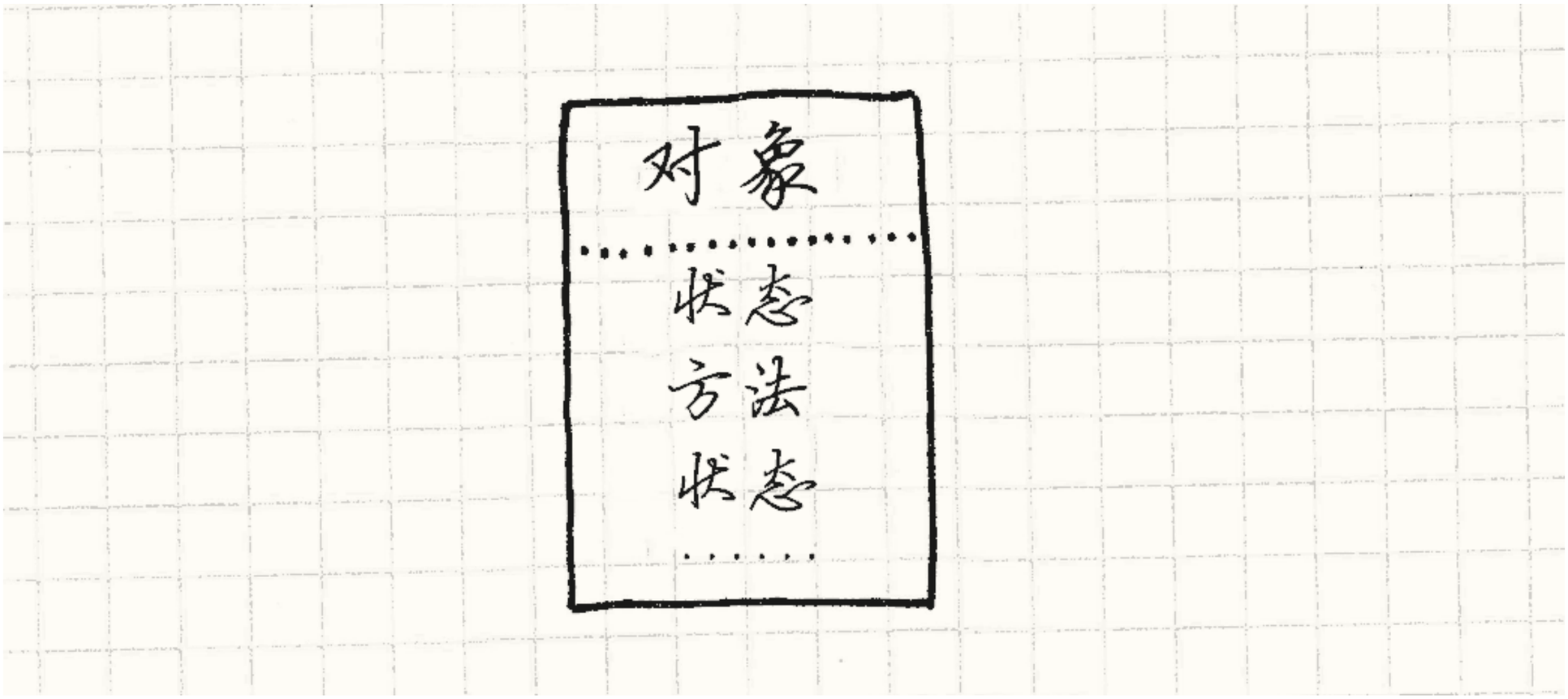
拿你最喜欢的基于类的语言的语法来说。 为了接触对象中的一些状态，你需要在实例的内存中查询。状态*包含*在实例中。

但是，为了调用方法，你需要找到实例的类， *然后在那里*调用方法。行为包含在*类*中。 获得方法总需要通过中间层，这意味着字段和方法是不同的。



举个例子，为了调用C++中的虚方法，你需要在实例中找指向虚方法表的指针，然后再在那里找方法。

Self结束了这种分歧。*无论你要找啥*，都只需在对象中找。 实例同时包含状态和行为。你可以构建拥有完全独特方法的对象。

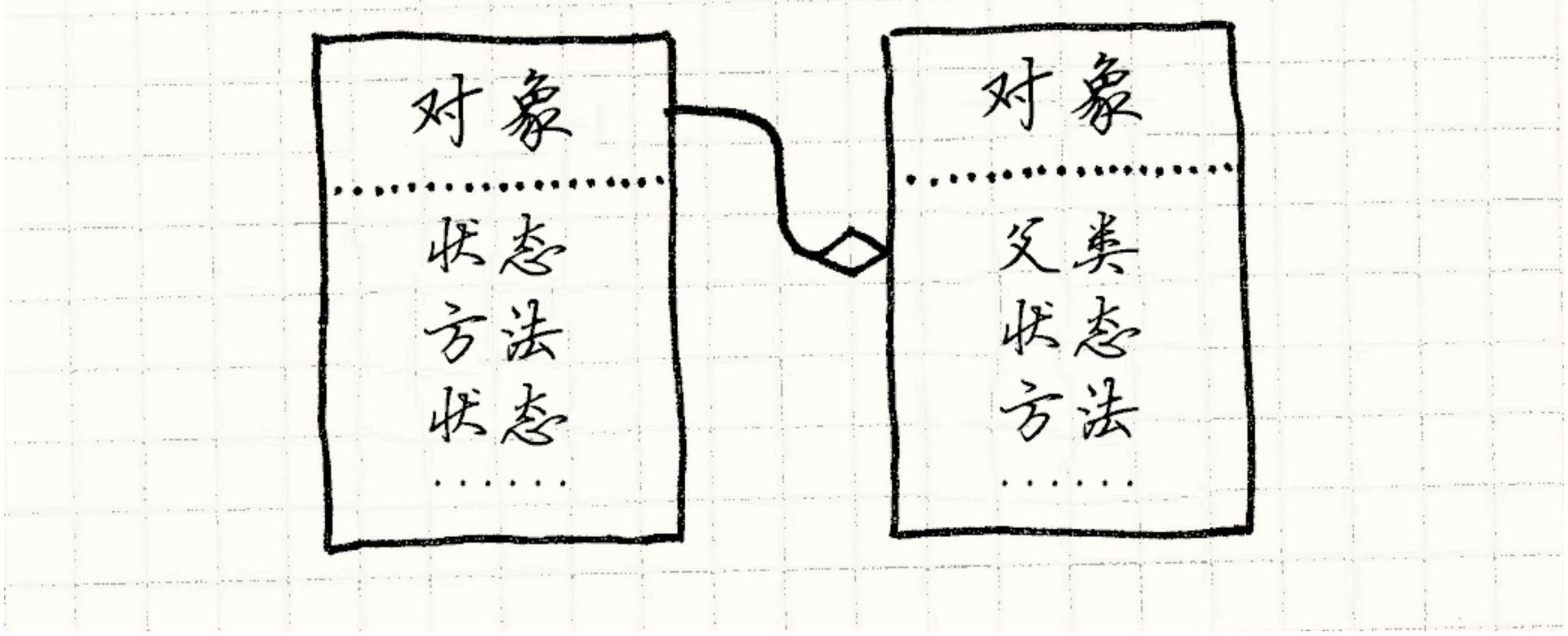


没有人能与世隔绝，但这个对象是。

如果这就是Self语言的全部，那它将很难使用。 基于类的语言中的继承，不管有多少缺陷，给了有用的机制来重用代码，避免重复。 为了不使用类而实现一些类似的功能，Self语言加入了*委托*。

如果要在对象中寻找字段或者调用方法，首先在对象内部查找。 如果能找到，那就成了。 如果找不到，在对象的*父对象*中寻找。 这里的父类仅仅是一个对其他对象的引用。 当我们没能在第一个对象中找到属性，我们尝试它的父对象，然后父类的父对象，继续下去直到找到或者没有父对象为止。 换言之，失败的查找被*委托*给对象的父对象。

我在这里简化了。Self实际上支持多个父对象。 父对象只是特别标明的字段，意味着你可以继承它们或者在运行时改变他们， 你最终得到了“动态继承”。



父对象让我们在不同对象间重用行为（还有状态！），这样就完成了类的公用功能。 类做的另一个关键事情就是给出了创建实例的方法。 当你需要新的某物，你可以直接`new Thingamabob()`，或者随便什么你喜欢的表达法。 类是实例的生产工厂。

不用类，我们怎样创建新的实例？ 特别的，我们如何创建一堆有共同点的新东西？ 就像这个设计模式，在Self中，达到这点的方式是使用*克隆*。

在Self语言中，就好像*每个*对象都自动支持原型设计模式。 任何对象都能被克隆。为了获得一堆相似的对象，你：

1. 将对象塑造成你想要的状态。你可以直接克隆系统内建的基本`Object`，然后向其中添加字段和方法。
2. 克隆它来产出……额……随你想要多少就克隆多少个对象。

无需烦扰自己实现`clone()`；我们就实现了优雅的原型模式，原型被内建在系统中。

这个系统美妙，灵巧，而且小巧， 一听说它，我就开始创建一个基于原型的语言来进一步学习。

我知道从头开始构建一种编程语言语言不是学习它最有效率的办法，但我能说什么呢？我可算是个怪人。 如果你很好奇，我构建的语言叫Finch.

它的实际效果如何?

能使用纯粹基于原型的语言让我很兴奋，但是当我真正上手时， 我发现了一个令人不快的事实：用它编程没那么有趣。

从小道消息中，我听说很多Self程序员得出了相同的结论。 但这项目并不是一无是处。 Self非常的灵活，为此创造了很多虚拟机的机制来保持高速运行。

他们发明了JIT编译，垃圾回收，以及优化方法分配——这都是由同一批人实现的—— 这些新玩意让动态类型语言能快速运行，构建了很多大受欢迎的应用。

是的，语言本身很容易实现，那是因为它把复杂度甩给了用户。 一旦开始试着使用这语言，我发现我想念基于类语言中的层次结构。 最终，在构建语言缺失的库概念时，我放弃了。

鉴于我之前的经验都来自基于类的语言，因此我的头脑可能已经固定在它的范式上了。 但是直觉上，我认为大部分人还是喜欢有清晰定义的“事物”。

除去基于类语言自身的成功以外，看看有多少游戏用类建模描述玩家角色，以及不同的敌人、物品、技能。 不是游戏中的每个怪物都与众不同，你不会看到“洞穴人和哥布林还有雪混合在一起”这样的怪物。

原型是非常酷的范式，我希望有更多人了解它， 但我很庆幸不必天天用它编程。 完全皈依原型的代码是一团浆糊，难以阅读和使用。

这同时证明，*很少*有人使用原型风格的代码。我查过了。

JavaScript又怎么样呢?

好吧，如果基于原型的语言不那么友好，怎么解释JavaScript呢？ 这是一个有原型的语言，每天被数百万人使用。运行JavaScript的机器数量超过了地球上其他所有的语言。

Brendan Eich，JavaScript的缔造者， 从Self语言中直接汲取灵感，很多JavaScript的语义都是基于原型的。 每个对象都有属性的集合，包含字段和“方法”（事实上只是存储为字段的函数）。 A对象可以拥有B对象，B对象被称为A对象的“原型”， 如果A对象的字段获取失败就会委托给B对象。

作为语言设计者，原型的诱人之处是它们比类更易于实现。 Eich充分利用了这一点，他在十天内创建了JavaScript的第一个版本。

但除那以外，我相信在实践中，JavaScript更像是基于类的而不是基于原型的语言。 一个要点是JavaScript移除了一些基

在JavaScript中没有方法来克隆一个对象。 最接近的方法是`Object.create()`，允许你创建新对象作为现有对象的委托。 这个方法在ECMAScript5中才添加，而那已是JavaScript出现后的十四年了。 相对于克隆，让我带你参观一下JavaScript中定义类和创建对象的经典方法。 我们从*构造器函数*开始：

```
function Weapon(range, damage) {
  this.range = range;
  this.damage = damage;
}
```

这创建了一个新对象，初始化了它的字段。你像这样引入它：

```
var sword = new Weapon(10, 16);
```

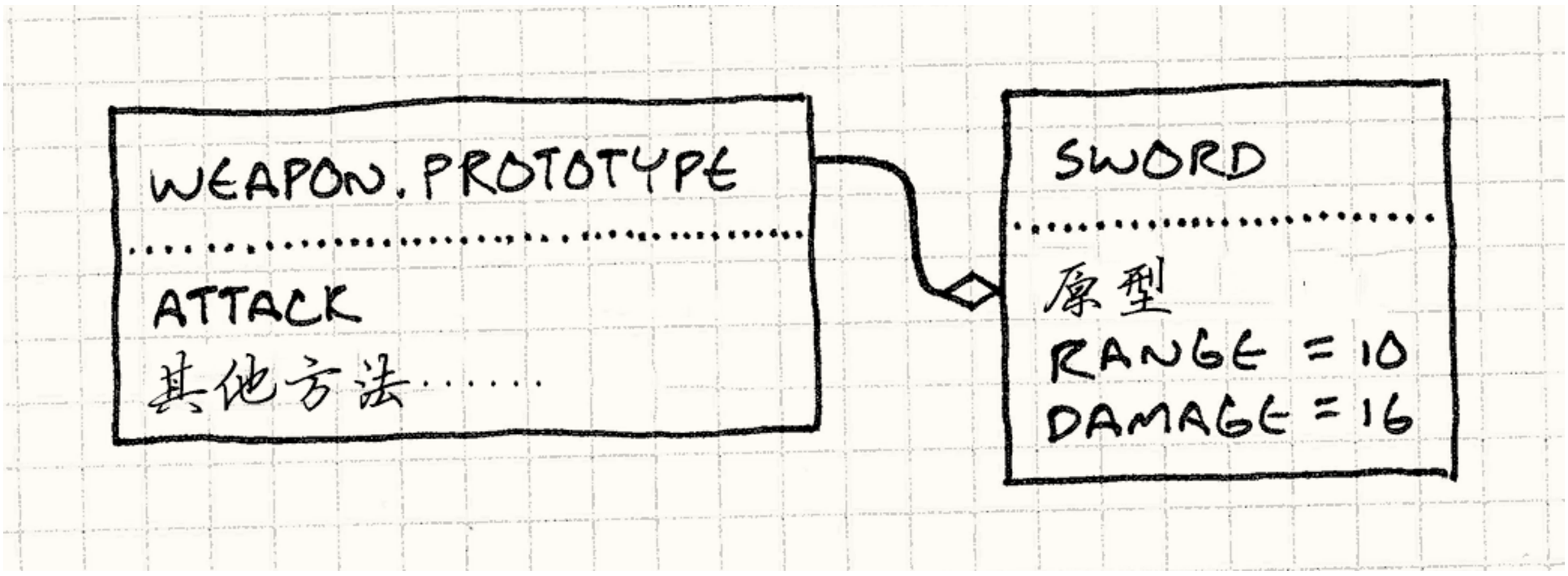
这里的`new`调用`Weapon()`函数，而`this`绑定在新的空对象上。 函数为新对象添加了一系列字段，然后返回填满的对象。

`new`也为你做了另外一件事。 当它创建那个新的空对象时，它将空对象的委托和一个原型对象连接起来。 你可以用`Weapon.prototype`来获得原型对象。

在构造器中添加属性，而通常向原型对象添加方法来定义*行为*。就像这样：

```
Weapon.prototype.attack = function(target) {
  if (distanceTo(target) > this.range) {
    console.log("Out of range!");
  } else {
    target.health -= this.damage;
  }
}
```

这给武器原型添加了`attack`属性，其值是一个函数。 由于`new Weapon()`返回的每一个对象都有给`Weapon.prototype`的委托， 你现在可以调用`sword.attack()`，这样调用那个函数。 看上去像是这样：



让我们复习一下：

- 通过“new”操作创建对象，该操作引入代表类型的对象——构造器函数。
- 状态存储在实例中。
- 行为通过间接层——原型的委托——被存储在独立的对象中，代表了一系列特定类型对象的共享方法。

说我疯了吧，但这听起来很像是我之前描述的类。 你*可以*在JavaScript中写原型风格的代码（*不用* 克隆）， 但是就语法和惯用法更推荐基于类的实现。

个人而言，我认为这是好事。 就像我说的，我发现一切都使用原型，那么很难编写代码，所以我喜欢JavaScript，它将整个核心语义包上了一层糖衣。

为数据模型构建原型

好吧，我之前不断的讨论我*不喜欢*原型的原因，这让这一章读起来令人沮丧。 我认为这本书该更欢乐些，所以在最后，让我们讨论讨论原型*确实*有用，或者更加精确，*委托*有用的地方。

随着编程的进行，如果你比较程序与数据的字节数， 那么你会发现数据的占比稳定地增长。 早期的游戏在程序中生成几乎所有东西，这样程序可以塞进磁盘和老式游戏卡带。 在今日的游戏中，代码只是驱动游戏的“引擎”，游戏是完全由数据定义的。

这很好，但是将内容推到数据文件中并不能魔术般解决组织大项目的挑战。 它只能把这挑战变得更难。 我们使用编程语言就因为它们有办法管理复杂性。

不再是将一堆代码拷来拷去，我们将其移入函数中，通过名字调用。 不再是在一堆类之间复制方法，我们将其放入单独的类中，让其他类可以继承或者组合。

当游戏数据达到一定规模时，你真的需要考虑一些相似的方案。 我不指望在这里能说清数据模式这个问题， 但我确实希望提出个思路，让你在游戏中考虑考虑：使用原型和委托来重用数据。

假设我们为早先提到的山寨版《圣铠传说》定义数据模型。 游戏设计者需要在很多文件中设定怪物和物品的属性。

这标题是我原创的，没有受到任何已存的多人地下城游戏的影响。 请不要起诉我。

一个常用的方法是使用JSON。 数据实体一般是*字典*，或者*属性集合*，或者其他什么术语，因为程序员就喜欢为旧事物发明新名字。

我们重新发明了太多次，Steve Yegge称之为“通用设计模式”.

所以游戏中的哥布林也许被定义为像这样的东西：

```
{
  "name": "goblin grunt",
  "minHealth": 20,
  "maxHealth": 30,
  "resists": ["cold", "poison"],
  "weaknesses": ["fire", "light"]
}
```

这看上去很易懂，哪怕是最讨厌文本的设计者也能使用它。 所以，你可以给哥布林大家族添加几个兄弟分支：

```
{
  "name": "goblin wizard",
  "minHealth": 20,
  "maxHealth": 30,
  "resists": ["cold", "poison"],
  "weaknesses": ["fire", "light"],
  "spells": ["fire ball", "lightning bolt"]
}

{
  "name": "goblin archer",
  "minHealth": 20,
  "maxHealth": 30,
  "resists": ["cold", "poison"],
  "weaknesses": ["fire", "light"],
  "attacks": ["short bow"]
}
```

现在，如果这是代码，我们会闻到了臭味。 在实体间有很多的重复，训练优良的程序员*讨厌*重复。 它浪费了空间，消耗了作者更多时间。 你需要仔细阅读代码才知道这些数据*是不是*相同的。 这难以维护。 如果我们决定让所有哥布林变强，需要记得将三个哥布林都更新一遍。糟糕糟糕糟糕。

如果这是代码，我们会为“哥布林”构建抽象，并在三个哥布林类型中重用。 但是无能的JSON没法这么做。所以让我们把它做得更加巧妙些。

我们可以为对象添加`"prototype"`字段，记录委托对象的名字。 如果在此对象内没找到一个字段，那去委托对象中查找。

这让`"prototype"`不再是数据，成为了*元*数据。 哥布林有绿色疣皮和黄色牙齿。 它们没有原型。 原型是*表示哥布林的数据模型*的属性，而不是哥布林本身的属性。

这样，我们可以简化我们的哥布林JSON内容：

```
{
  "name": "goblin grunt",
  "minHealth": 20,
  "maxHealth": 30,
  "resists": ["cold", "poison"],
  "weaknesses": ["fire", "light"]
}

{
  "name": "goblin wizard",
  "prototype": "goblin grunt",
  "spells": ["fire ball", "lightning bolt"]
}

{
  "name": "goblin archer",
  "prototype": "goblin grunt",
  "attacks": ["short bow"]
}
```

由于弓箭手和术士都将grunt作为原型，我们就不需要在它们中重复血量，防御和弱点。 我们为数据模型增加的逻辑超级简单——基本的单一委托——但已经成功摆脱了一堆冗余。

有趣的事情是，我们没有更进一步，把哥布林委托的*抽象*原型设置成“基本哥布林”。 相反，我们选择了最简单的哥布林，然后委托给它。

在基于原型的系统中，对象可以克隆产生新对象是很自然的， 我认为在这里也一样自然。 这特别适合记录那些只有一处不同的实体的数据。

想想Boss和其他独特的事物，它们通常是更加常见事物的重新定义， 原型委托是定义它们的好方法。 断头魔剑，就是一把拥有加成的长剑，可以像下面这样表示：

```
{
  "name": "Sword of Head-Detaching",
  "prototype": "longsword",
  "damageBonus": "20"
}
```

只需在游戏引擎上多花点时间，你就能让设计者更加方便的添加不同的武器和怪物，而这些增加的丰富赌能够取悦玩家。

单例模式

游戏设计模式Design Patterns Revisited

这个章节不同寻常。 其他章节展示如何使用某个个设计模式。 这个章节展示如何*避免*使用某个设计模式。

尽管它的意图是好的，GoF描述的单例模式通常弊大于利。 他们强调应该谨慎使用这个模式，但在游戏业界的口口相传中，这一提示经常被无视了。

就像其他模式一样，在不合适的地方使用单例模式就好像用夹板处理子弹伤口。 由于它被滥用得太严重了，这章的大部分都在讲如何*回避*单例模式， 但首先，让我们看看模式本身。

当业界从C语言迁移到面向对象的语言，他们遇到的首个问题是“如何访问实例？”他们知道有要调用的方法，但是找不到实例提供这个方法。 单例（换言之，全局化）是一条简单的解决方案。

单例模式

设计模式 像这样描述单例模式：

> 保证一个类只有一个实例，并且提供了访问该实例的全局访问点。

我们从“并且”那里将句子分为两部分，分别进行考虑。

保证一个类只有一个实例

有时候，如果类存在多个实例就不能正确的运行。 通常发生在类与保存全局状态的外部系统互动。

考虑封装文件系统的API类。 因为文件操作需要一段时间完成，所以类使用异步操作。 这就意味着可以同时运行多个操作，必须让它们相互协调。 如果一个操作创建文件，另一个操作删除同一文件，封装器类需要同时考虑，保证它们没有相互妨碍。

为了实现这点，对我们封装器类的调用必须接触之前的每个操作。 如果用户可以自由的创建类的实例，这个实例就无法知道另一实例之前的操作。 而单例模式提供的构建类的方式，在编译时保证类只有单一实例。

提供了访问该实例的全局访问点

游戏中的不同系统都会使用文件系统封装类：日志，内容加载，游戏状态保存，等等。 如果这些系统不能创建文件系统封装类的实例，它们如何访问该实例呢?

单例为这点也提供了解决方案。 除了创建单一实例以外，它也提供了一种获得它的全局方法。 使用这种范式，无论何处何人都可以访问实例。 综合起来，经典的实现方案如下：

```
class FileSystem
{
public:
  static FileSystem& instance()
  {
    // 惰性初始化
    if (instance_ == NULL) instance_ = new FileSystem();
    return *instance_;
  }

private:
  FileSystem() {}

  static FileSystem* instance_;
};
```

静态的`instance_`成员保存了一个类的实例， 私有的构造器保证了它是*唯*一的。 公开的静态方法`instance()`让任何地方的代码都能访问实例。 在首次被请求时，它同样负责惰性实例化该单例。

现代的实现方案看起来是这样的：

```
class FileSystem
{
public:
  static FileSystem& instance()
  {
    static FileSystem *instance = new FileSystem();
    return *instance;
  }

private:
  FileSystem() {}
};
```

哪怕是在多线程情况下，C++11标准也保证了本地静态变量只会初始化一次， 因此，假设你有一个现代C++编译器，这段代码是线程安全的，而前面的那个例子不是。

当然，你单例类本身的线程安全是个不同的问题！这里只保证了它的*初始化*没问题。

为什么我们使用它

看起来已有成效。 文件系统封装类在任何需要的地方都可用，而无需笨重地到处传递。 类本身巧妙地保证了我们不会实例化多个实例而搞砸。它还具有很多其他的优良性质：

- **如果没人用，就不必创建实例。** 节约内存和CPU循环总是好的。 由于单例只在第一次被请求时实例化，如果游戏永远不请求，那么它不会被实例化。

- **它在运行时实例化。** 通常的替代方案是使用含有静态成员变量的类。 我喜欢简单的解决方案，因此我尽可能使用静态类而不是单例，但是静态成员有个限制：自动初始化。 编译器在`main()`运行前初始化静态变量。 这就意味着不能使用在程序加载时才获取的信息（举个例子，从文件加载的配置）。 这也意味着它们的相互依赖是不可靠的——编译器可不保证以什么样的顺序初始化静态变量。

  惰性初始化解决了以上两个问题。 单例会尽可能晚的初始化，所以那时它需要的所有信息都应该可用了。 只要没有环状依赖，一个单例在初始化它自己的时甚至可以引用另一个单例。

-

可继承单例。 这是个很有用但通常被忽视的能力。 假设我们需要跨平台的文件系统封装类。 为了达到这一点，我们需要它变成文件系统抽象出来的接口，而子类为每个平台实现接口。 这是基类:

```
class FileSystem
{
public:
  virtual ~FileSystem() {}
  virtual char* readFile(char* path) = 0;
  virtual void  writeFile(char* path, char* contents) = 0;
};
```

然后为一堆平台定义子类:

```
class PS3FileSystem : public FileSystem
{
public:
  virtual char* readFile(char* path)
  {
    // 使用索尼的文件读写API……
  }

  virtual void writeFile(char* path, char* contents)
  {
    // 使用索尼的文件读写API……
  }
};

class WiiFileSystem : public FileSystem
{
public:
  virtual char* readFile(char* path)
  {
    // 使用任天堂的文件读写API……
  }

  virtual void writeFile(char* path, char* contents)
  {
    // 使用任天堂的文件读写API……
  }
};
```

下一步，我们把`FileSystem`变成单例：

```
class FileSystem
{
public:
  static FileSystem& instance();

  virtual ~FileSystem() {}
  virtual char* readFile(char* path) = 0;
  virtual void  writeFile(char* path, char* contents) = 0;

protected:
  FileSystem() {}
};
```

灵巧之处在于如何创建实例：

```
FileSystem& FileSystem::instance()
{
  #if PLATFORM == PLAYSTATION3
    static FileSystem *instance = new PS3FileSystem();
  #elif PLATFORM == WII
    static FileSystem *instance = new WiiFileSystem();
  #endif

  return *instance;
}
```

通过一个简单的编译器转换，我们把文件系统包装类绑定到合适的具体类型上。 整个代码库都可以使用`FileSystem::instance()`接触到文件系统，而无需和任何平台相关的代码耦合。耦合发生在为特定平台写的`FileSystem`类实现文件中。

大多数人解决问题到这个程度就已经够了。 我们得到了一个文件系统封装类。 它工作可靠，它全局有效，只要请求就能获取。 是时候提交代码，开怀畅饮了。

为什么我们后悔使用它

短期来看，单例模式是相对良性的。 就像其他设计决策一样，我们需要从长期考虑。 这里是一旦我们将一些不必要的单例写进代码，会给自己带来的麻烦：

它是一个全局变量

当游戏还是由几个家伙在车库中完成时，榨干硬件性能比象牙塔里的软件工程原则更重要。 C语言和汇编程序员前辈能毫无问题的使用全局变量和静态变量，发布好游戏。 但随着游戏变得越来越大，越来越复杂，架构和管理开始变成瓶颈， 阻碍我们发布游戏的，除了硬件限制，还有*生产力*限制。

所以我们迁移到了像C++这样的语言， 开始将一些从软件工程师前辈那里学到的智慧应用于实际。 其中一课是全局变量有害的诸多原因：

- **理解代码更加困难。** 假设我们在查找其他人所写函数中的漏洞。 如果函数没有碰到任何全局状态，脑子只需围着函数转， 只需搞懂函数和传给函数的变量。

  计算机科学家称不接触不修改全局状态的函数为“纯”函数。 纯函数易于理解，易于编译器优化， 易于完成优雅的任务，比如记住缓存的情况并继续上次调用。

  完全使用纯函数是有难度的，但其好处足以引诱科学家创造像Haskell这样*只*使用纯函数的语言。

  现在考虑函数中间是个对`SomeClass::getSomeGlobalData()`的调用。为了查明发生了什么，得追踪整个代码库来看看什么修改了全局变量。你真的不需要讨厌全局变量，直到你在凌晨三点使用`grep`搜索数百万行代码，搞清楚哪一个错误的调用将一个静态变量设为了错误的值。

- **促进了耦合的发生。** 新加入团队的程序员也许不熟悉你们完美，可维护，松散耦合的游戏架构， 但还是刚刚获得了第一个任务：在岩石撞击地面时播放声音。 你我都知道这不需要将物理和*音频*代码耦合，但是他只想着把任务完成。 不幸的是，我们的`AudioPlayer`是全局可见的。 所以之后一个小小的`#include`，新队员就打乱了整个精心设计的架构。

  如果不用全局实例实现音频播放器，那么哪怕他*确实*用`#include`包含了头文件，他还是啥也做不了。 这种阻碍给他发送了一个明确的信号，这两个模块不该接触，他需要另辟蹊径。*通过控制对实例的访问，你控制了耦合。*

- **对并行不友好。** 那些在单核CPU上运行游戏的日子已经远去。 哪怕完全不需要并行的优势，现代的代码至少应考虑在多线程环境下*工作*。 当我们将某些东西转为全局变量时，我们创建了一块每个线程都能看到并访问的内存， 却不知道其他线程是否正在使用那块内存。 这种方式带来了死锁，竞争状态，以及其他很难解决的线程同步问题。

像这样的问题足够吓阻我们声明全局变量了， 同理单例模式也是一样，但是那还没有告诉我们*应该*如何设计游戏。 怎样不使用全局变量构建游戏?

有几个对这个问题的答案（这本书的大部分都*是*由答案构成）， 但是它们并非显而易见。 与此同时，我们得发布游戏。 单例模式看起来是万能药。 它被写进了一本关于面向对象设计模式的书中，因此它*肯定*是个好的设计模式，对吧? 况且我们已经借助它做了很多年软件设计了。

不幸的是，它不是解药，它是安慰剂。 如果浏览全局变量造成的问题列表，你会注意到单例模式解决不了其中任何一个。 因为单例*确实是*全局状态——它只是被封装在一个类中。

它能在你只有一个问题的时候解决两个

在GoF对单例模式的描述中，“并且”这个词有点奇怪。 这个模式解决了一个问题还是两个问题呢? 如果我们只有其中一个问题呢? 保证实例是唯一存在的很有用的，但是谁告诉我们要让*每个人*都能接触到它? 同样，全局接触很方便，但是必须禁止存在多个实例吗?

这两问题中的后者，便利的访问，是使用单例模式几乎全部的原因。 想想日志类。大部分模块都能从记录诊断日志中获益。 但是，如果将`Log`类的实例传给每个需要这个方法的函数，那就混杂了产生的数据，模糊了代码的意图。

明显的解决方案是让`Log`类成为单例。 每个函数都能从类那里获得一个实例。 但当我们这样做时，我们无意地制造了一个奇怪的小约束。 突然之间，我们不再能创建多个日志记录者了。

起初，这不是一个问题。 我们记录单独的日志文件，所以只需要一个实例。 然后，随着开发周期的逐次循环，我们遇到了麻烦。 每个团队的成员都使用日志记录各自的诊断信息，大量的日志倾泻在文件里。 程序员需要翻过很多页代码来找到他关心的记录。

我们想将日志分散到多个文件中来解决这点。 为了达到这点，我们得为游戏不同的领域创造单独的日志记录者： 网络，UI，声音，游戏，玩法。 但是我们做不到。 `Log`类不再允许我们创建多个实例，而且调用的方式也保证了这一点：

```
Log::instance().write("Some event.");
```

为了让`Log`类支持多个实例（就像它原来的那样）， 我们需要修改类和提及它的每一行代码。 之前便利的访问就不再那么便利了。

这可能更糟。想象一下你的`Log`类是在多个*游戏*间共享的库中。 现在，为了改变设计，需要在多组人之间协调改变， 他们中的大多数既没有时间，也没有动机修复它。

惰性初始化从你那里剥夺了控制权

拥有虚拟内存和软性性能需求的PC里，惰性初始化是一个小技巧。 游戏则是另一种状况。初始化系统需要消耗时间：分配内存，加载资源，等等。 如果初始化音频系统消耗了几百个毫秒，我们需要控制它何时发生。 如果在第一次声音播放时惰性初始化它自己，这初始化有可能发生游戏的高潮，导致可见的掉帧和断续的游戏体验。

同样，游戏通常需要严格管理在堆上分配的内存来避免碎片。 如果音频系统在初始化时分配到了堆上，我们需要知道*何时*初始化发生了， 这样我们可以控制内存待在堆的*哪里*。

对象池模式一节中有内存碎片的其他细节。

因为这两个原因，我见到的大多数游戏都不使用惰性初始化。 相反，它们像这样实现单例模式：

```
class FileSystem
{
public:
  static FileSystem& instance() { return instance_; }

private:
  FileSystem() {}

  static FileSystem instance_;
};
```

这解决了惰性初始化问题，但是损失了几个单例*确实*比原生的全局变量优良的特性。 静态实例中，我们不能使用多态，在静态初始化时，类也必须是可构建的。 我们也不能在不需要这个实例的时候，释放实例所占的内存。

与创建一个单例不同，这里实际上是一个简单的静态类。 这并非坏事，但是如果你需要的是静态类，为什么不完全摆脱`instance()`方法， 直接使用静态函数呢？ 调用`Foo::bar()`比`Foo::instance().bar()`更简单， 也更明确地表明你在处理静态内存。

通常使用单例而不是静态类的理由是， 如果你后来决定将静态类改为非静态的，你需要修改每一个调用点。 理论上，用单例就不必那么做，因为你可以将实例传来传去，像普通的实例方法一样使用。

实践中，我从未见过这种情况。 每个人都在使用`Foo::instance().bar()`。 如果我们将Foo改成非单例，我们还是得修改每一个调用点。 鉴于此，我更喜欢简单的类和简单的调用语法。

那该如何是好

如果我现在达到了目标，你在下次遇到问题使用单例模式之前就会三思而后行。 但是你还是有问题需要解决。你*应该*使用什么工具呢？ 这取决于你试图做什么，我有一些你可以考虑的选项，但是首先……

看看你是不是真正地需要类

我在游戏中看到的很多单例类都是“管理器”——那些类存在的意义就是照顾其他对象。 我曾看到一些代码库中，几乎*所有*类都有管理器： 怪物，怪物管理器，粒子，粒子管理器，声音，声音管理器，管理管理器的管理器。 有时候，它们被叫做“系统”或“引擎”，但是思路还是一样的。

管理器类有时是有用的，但通常它们只是反映出作者对OOP的不熟悉。思考这两个特制的类：

```
class Bullet
{
public:
  int getX() const { return x_; }
  int getY() const { return y_; }

  void setX(int x) { x_ = x; }
  void setY(int y) { y_ = y; }

private:
  int x_, y_;
};

class BulletManager
{
public:
  Bullet* create(int x, int y)
  {
    Bullet* bullet = new Bullet();
    bullet->setX(x);
    bullet->setY(y);

    return bullet;
  }

  bool isOnScreen(Bullet& bullet)
  {
    return bullet.getX() >= 0 &&
           bullet.getX() < SCREEN_WIDTH &&
           bullet.getY() >= 0 &&
           bullet.getY() < SCREEN_HEIGHT;
  }

  void move(Bullet& bullet)
  {
    bullet.setX(bullet.getX() + 5);
  }
};
```

也许这个例子有些蠢，但是我见过很多代码，在剥离了外部的细节后是一样的设计。 如果你看看这个代码，`BulletManager`很自然应是一个单例。 无论如何，任何有`Bullet`的对象都需要管理，而你又需要多少个`BulletManager`实例呢?

事实上，这里的答案是零。 这里是我们如何为管理类解决“单例”问题：

```
class Bullet
{
public:
  Bullet(int x, int y) : x_(x), y_(y) {}

  bool isOnScreen()
  {
    return x_ >= 0 && x_ < SCREEN_WIDTH &&
           y_ >= 0 && y_ < SCREEN_HEIGHT;
  }

  void move() { x_ += 5; }

private:
  int x_, y_;
};
```

好了。没有管理器，也没有问题。 糟糕设计的单例通常会“帮助”另一个类增加代码。 如果可以，把所有的行为都移到单例帮助的类中。 毕竟，OOP就是让对象管理好自己。

但是在管理器之外，还有其他问题我们需要寻求单例模式帮助。 对于每种问题，都有一些后续方案可供参考。

将类限制为单一的实例

这是单例模式帮你解决的一个问题。 就像在文件系统的例子中那样，保证类只有一个实例是很重要的。 但是，这不意味着我们需要提供对实例的*公众全局*访问。 我们想要减少某部分代码的公众部分，甚至让它在类中是私有的。 在这些情况下，提供一个全局接触点消弱了整体架构。

举个例子，我们也许想把文件系统包在*另*一层抽象中。

我们希望有种方式能保证同事只有一个实例而*无需*提供全局接触点。 有好几种方法能做到。这是其中之一：

```
class FileSystem
{
public:
  FileSystem()
  {
    assert(!instantiated_);
    instantiated_ = true;
  }

  ~FileSystem() { instantiated_ = false; }

private:
  static bool instantiated_;
};

bool FileSystem::instantiated_ = false;
```

这个类允许任何人构建它，如果你试图构建超过一个实例，它会断言并失败。 只要正确的代码首先创建了实例，那么就保证了没有其他代码可以接触实例或者创建自己的实例。 这个类保证满足了它关注的单一实例，但是它没有指定类该如何被使用。

断言 函数是一种向你的代码中添加限制的方法。 当`assert()`被调用时，它计算传入的表达式。 如果结果为`true`，那么什么都不做，游戏继续。 如果结果为`false`，它立刻停止游戏。 在debug build时，这通常会启动调试器，或至少打印失败断言所在的文件和行号。

`assert()`表示，“我断言这个总该是真的。如果不是，那就是漏洞，我想*立刻*停止并处理它。”这样你在代码区域之间定义约束。 如果函数断言它的某个参数不能为`NULL`，那就是说，“我和调用者定下了协议：传入的参数不会`NULL`。”

断言帮助我们在游戏发生预期以外的事时立刻追踪漏洞， 而不是等到错误最终显现在用户可见的某些事物上。 它们是代码中的栅栏，围住漏洞，这样漏洞就不能从制造它的代码边逃开。

这个实现的缺点是只在*运行时*检查并阻止多重实例化。 单例模式，正相反，通过类的自然结构，在编译时就能确定实例是单一的。

为了给实例提供方便的访问方法

便利的访问是我们使用单例的一个主要原因。 这让我们在不同地方获取需要的对象更加容易。 这种便利是需要付出代价的——在我们*不想*要对象的地方，也能轻易地使用。

通用原则是在能完成工作的同时，将变量写得尽可能局部。 对象影响的范围越小，在处理它时，我们需要放在脑子里的东西就越少。 在我们拿起有*全局*范围影响的单例对象前，先考虑考虑代码中其他获取对象的方式：

- **传进来。** 最简单的解决办法，通常也是最好的，把你需要的对象简单地作为参数传给需要它的函数。 在用其他更加繁杂的方法前，考虑一下这个解决方案。

有些人使用术语“依赖注入”来指代它。不是代码*出来*调用某些全局量来确认依赖， 而是依赖通过参数被*传进*到需要它的代码中去。 其他人将“依赖注入”保留为对代码提供更复杂依赖的方法。

考虑渲染对象的函数。为了渲染，它需要接触一个代表图形设备的对象，管理渲染状态。 将其传给所有渲染函数是很自然的，通常是用一个名字像`context`之类的参数。

另一方面，有些对象不该在方法的参数列表中出现。 举个例子，处理AI的函数可能也需要写日志文件，但是日志不是它的核心关注点。 看到`Log`出现在它的参数列表中是很奇怪的事情，像这样的情况，我们需要考虑其他的选项。

像日志这样撒布在代码库各处的是“横切关注点”(cross-cutting concern)。 小心地处理横切关注点是架构中的持久挑战，特别是在静态类型语言中。

面向切面编程被设计出来应对它们。

- **从基类中获得。** 很多游戏架构有浅层但是宽泛的继承层次，通常只有一层深。 举个例子，你也许有`GameObject`基类，每个游戏中的敌人或者对象都继承它。 使用这样的架构，很大一部分游戏代码会存在这些“子”推导类中。 这就意味着这些类已经有了对同样事物的相同获取方法：它们的`GameObject`基类。 我们可以利用这点：

  ```
  class GameObject
  {
  protected:
    Log& getLog() { return log_; }

  private:
    static Log& log_;
  };

  class Enemy : public GameObject
  {
    void doSomething()
    {
      getLog().write("I can log!");
    }
  };
  ```

  这保证任何`GameObject`之外的代码都不能接触`Log`对象，但是每个派生的实体确实能使用`getLog()`。 这种使用protected函数，让派生对象使用的模式， 被涵盖在子类沙箱这章中。

  这也引出了一个新问题，“`GameObject`是怎样获得`Log`实例的？”一个简单的方案是，让基类创建并拥有静态实例。

  如果你不想要基类承担这些，你可以提供一个初始化函数传入`Log`实例， 或使用服务定位器模式找到它。

- **从已经是全局的东西中获取。** 移除*所有*全局状态的目标令人钦佩，但并不实际。 大多数代码库仍有一些全局可用对象，比如一个代表了整个游戏状态的`Game`或`World`对象。

  我们可以让现有的全局对象捎带需要的东西，来减少全局变量类的数目。 不让`Log`，`FileSystem`和`AudioPlayer`都变成单例，而是这样做：

```
class Game
{
public:
  static Game& instance() { return instance_; }

  // 设置log_, et. al. ……

  Log&          getLog()          { return *log_; }
  FileSystem&   getFileSystem()   { return *fileSystem_; }
  AudioPlayer& getAudioPlayer() { return *audioPlayer_; }

private:
  static Game instance_;

  Log          *log_;
  FileSystem   *fileSystem_;
  AudioPlayer *audioPlayer_;
};
```

这样，只有`Game`是全局可见的。 函数可以通过它访问其他系统。

```
Game::instance().getAudioPlayer().play(VERY_LOUD_BANG);
```

纯粹主义者会声称这违反了Demeter法则。我则声称这比一大坨单例要好。

如果，稍后，架构被改为支持多个`Game`实例（可能是为了流处理或者测试），`Log`，`FileSystem`，和`AudioPlayer`都不会被影响到——它们甚至不知道有什么区别。 缺陷是，当然，更多的代码耦合到了`Game`中。 如果一个类简单地需要播放声音，为了访问音频播放器，上例中仍然需要它知道游戏世界。

我们通过混合方案解决这点。 知道`Game`的代码可以直接从它那里访问`AudioPlayer`。 而不知道的代码，我们用上面描述的其他选项来提供`AudioPlayer`。

- **从服务定位器中获得。** 目前为止，我们假设全局类是具体的类，比如`Game`。 另一种选项是定义一个类，存在的唯一目标就是为对象提供全局访问。 这种常见的模式被称为服务定位器模式，有单独讲它的章节。

单例中还剩下什么

剩下的问题，何处我们*应该*使用真实的单例模式？ 说实话，我从来没有在游戏中使用全部的GoF模式。 为了保证实例是单一的，我通常简单的使用静态类。 如果这无效，我使用静态标识位，在运行时检测是不是只有一个实例被创建了。

书中还有一些其他章节也许能有所帮助。 子类沙箱模式通过分享状态， 给实例以类的访问权限而无需让其全局可用。 服务定位器模式*确实*让一个对象全局可用， 但它给了你如何设置对象的灵活性。

状态模式

游戏设计模式Design Patterns Revisited

忏悔时间：我有些越界，将太多的东西打包到了这章中。 它表面上关于状态模式， 但我无法只讨论它和游戏，而不涉及更加基础的*有限状态机*（FSMs）。 但是一旦讲了那个，我发现也想要介绍*层次状态机*和*下推自动机*。

有很多要讲，我会尽可能简短，这里的示例代码留下了一些你需要自己填补的细节。 我希望它们仍然足够清晰，能让你获取一份全景图。

如果你从来没有听说过状态机，不要难过。 虽然在AI和编译器程序很出名，但它在其他编程圈就没那么知名了。 我认为应该有更多人知道它，所以在这里我将其运用在不同的问题上。

这些状态机术语来自人工智能的早期时代。 在五十年代到六十年代，很多AI研究关注于语言处理。 很多现在用于分析程序语言的技术在当时是发明出来分析人类语言的。

感同身受

假设我们在完成一个卷轴平台游戏。 现在的工作是实现玩家在游戏世界中操作的女英雄。这就意味着她需要对玩家的输入做出响应。按B键她应该跳跃。简单实现如下：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  if (input == PRESS_B)
  {
    yVelocity_ = JUMP_VELOCITY;
    setGraphics(IMAGE_JUMP);
  }
}
```

看到漏洞了吗?

没有东西阻止“空中跳跃”——当角色在空中时狂按B，她就会浮空。 简单的修复方法是给`Heroine`增加`isJumping_`布尔字段，追踪它跳跃的状态。然后这样做：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  if (input == PRESS_B)
  {
    if (!isJumping_)
    {
      isJumping_ = true;
      // 跳跃……
    }
  }
}
```

这里也应该有在英雄接触到地面时将`isJumping_`设回`false`的代码。 我在这里为了简明没有写。

接下来，当玩家按下下方向键时，如果角色在地上，我们想要她卧倒，而松开按键时站起来：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  if (input == PRESS_B)
  {
    // 如果没在跳跃，就跳起来……
  }
  else if (input == PRESS_DOWN)
  {
    if (!isJumping_)
    {
      setGraphics(IMAGE_DUCK);
    }
  }
  else if (input == RELEASE_DOWN)
  {
    setGraphics(IMAGE_STAND);
  }
}
```

这次看到漏洞了吗?

通过这个代码，玩家可以:

1. 按下键卧倒。
2. 按B从卧倒状态跳起。
3. 在空中放开下键。

英雄跳一半贴图变成了站立时的贴图。是时候增加另一个标识了……

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  if (input == PRESS_B)
  {
    if (!isJumping_ && !isDucking_)
    {
      // 跳跃……
    }
  }
  else if (input == PRESS_DOWN)
  {
    if (!isJumping_)
    {
      isDucking_ = true;
      setGraphics(IMAGE_DUCK);
    }
  }
  else if (input == RELEASE_DOWN)
  {
    if (isDucking_)
    {
      isDucking_ = false;
      setGraphics(IMAGE_STAND);
    }
  }
}
```

下面，如果玩家在跳跃途中按下下方向键，英雄能够做跳斩攻击就太酷了：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  if (input == PRESS_B)
  {
    if (!isJumping_ && !isDucking_)
    {
      // 跳跃……
    }
  }
  else if (input == PRESS_DOWN)
  {
    if (!isJumping_)
    {
      isDucking_ = true;
      setGraphics(IMAGE_DUCK);
    }
    else
    {
      isJumping_ = false;
      setGraphics(IMAGE_DIVE);
    }
  }
  else if (input == RELEASE_DOWN)
  {
    if (isDucking_)
    {
      // 站立……
    }
  }
}
```

又是检查漏洞的时间了。找到了吗?

跳跃时我们检查了字段，防止了空气跳，但是速降时没有。又是另一个字段……

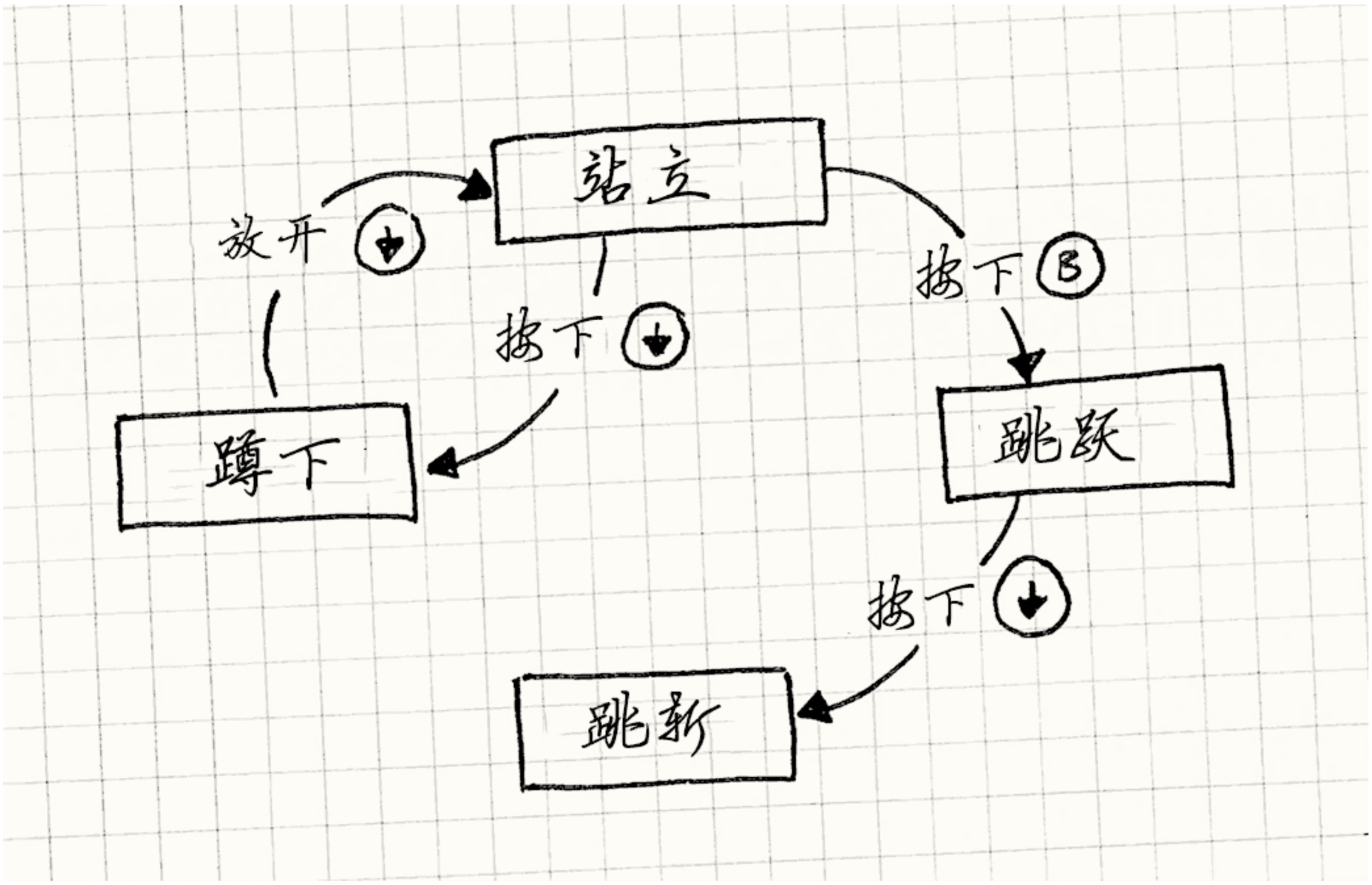
我们的实现方法很明显有错。 每次我们改动代码时，就破坏些东西。 我们需要增加更多动作——*行走* 都还没有加入呢——但以这种做法，完成之前就会造成一堆漏洞。

那些你崇拜的、看上去永远能写出完美代码的程序员并不是超人。 相反，他们有*哪种*代码易于出错的直觉，然后避开。

复杂分支和可变状态——随时间改变的字段——是两种易错代码，上面的例子覆盖了两者。

有限状态机前来救援

在经历了上面的挫败之后，把桌子扫空，只留下纸笔，我们开始画流程图。 你给英雄每件能做的事情都画了一个盒子：站立，跳跃，俯卧，跳斩。 当角色在能响应按键的状态时，你从那个盒子画出一个箭头，标记上按键，然后连接到她变到的状态。



祝贺，你刚刚建好了一个*有限状态机*。 它来自计算机科学的分支*自动理论*，那里有很多著名的数据结构，包括著名的图灵机。 FSMs是其中最简单的成员。

要点是：

- **你拥有状态机所有可能*状态*的集合。** 在我们的例子中，是站立，跳跃，俯卧和速降。
- **状态机同时只能在一个状态。** 英雄不可能同时处于跳跃和站立。事实上，防止这点是使用FSM的理由之一。
- **一连串的*输入*或*事件*被发送给状态机。** 在我们的例子中，就是按键按下和松开。
- **每个状态都有*一系列的转移*，每个转移与输入和另一状态相关。** 当输入进来，如果它与当前状态的某个转移相匹配，机器转换为所指的状态。

  举个例子，在站立状态时，按下下方向键转换为俯卧状态。 在跳跃时按下下方向键转换为速降。 如果输入在当前状态没有定义转移，输入就被忽视。

这就是核心部分的全部了：状态，输入，和转移。 你可以用一张流程图把它画出来。不幸的是，编译器不认识流程图， 所以我们如何*实现*一个？ GoF的状态模式是一个方法——我们会谈到的——但先从简单的开始。

对FSMs我最喜欢的类比是那种老式文字冒险游戏，比如Zork。 你有世界由屋子组成，屋子彼此通过出口相连。你输入像“去北方”的导航指令探索屋子。

这其实就是状态机：每个屋子都是一个状态。 你现在在的屋子是当前状态。每个屋子的出口是它的转移。 导航指令是输入。

枚举和分支

`Heroine`类的问题在于它不合法地捆绑了一堆布尔量： `isJumping_`和`isDucking_`不会同时为真。 但有些标识同时只能有一个是`true`，这提示是你真正需要的其实是`enum`（枚举）。

在这个例子中的`enum`就是FSM的状态的集合，所以让我们这样定义它：

```
enum State
{
  STATE_STANDING,
  STATE_JUMPING,
  STATE_DUCKING,
  STATE_DIVING
};
```

不需要一堆标识，`Heroine`只有一个`state_`状态。 这里我们同时改变了分支顺序。在前面的代码中，我们先在判断输入，*然后*判断状态。 这让处理某个按键的代码集中到了一处，但处理某个状态的代码分散到了各处。 我们想让处理状态的代码聚在一起，所以先对状态做分支。这样的话：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  switch (state_)
  {
    case STATE_STANDING:
      if (input == PRESS_B)
      {
        state_ = STATE_JUMPING;
        yVelocity_ = JUMP_VELOCITY;
        setGraphics(IMAGE_JUMP);
      }
      else if (input == PRESS_DOWN)
      {
        state_ = STATE_DUCKING;
        setGraphics(IMAGE_DUCK);
      }
      break;

  case STATE_JUMPING:
    if (input == PRESS_DOWN)
    {
      state_ = STATE_DIVING;
      setGraphics(IMAGE_DIVE);
    }
    break;

    case STATE_DUCKING:
      if (input == RELEASE_DOWN)
      {
        state_ = STATE_STANDING;
        setGraphics(IMAGE_STAND);
      }
      break;
  }
}
```

这看起来很普通，但是比起前面的代码是个很大的进步。 我们仍有条件分支，但简化了状态变化，将它变成了字段。 处理同一状态的所有代码都聚到了一起。 这是实现状态机最简单的方法，在某些情况下，这也不错。

重要的是，英雄不再会处于*不合法*状态。 使用布尔标识，很多可能存在的值的组合是不合法的。 通过`enum`，每个值都是合法的。

但是，你的问题也许超过了这个解法的能力范围。 假设我们想增加一个动作动作，英雄可以俯卧一段时间充能，之后释放一次特殊攻击。 当她俯卧时，我们需要追踪充能的持续时间。

我们为`Heroine`添加了`chargeTime_`字段，记录充能的时间长度。 假设我们已经有一个每帧都会调用的`update()`方法。在那里，我们添加：

```
void Heroine::update()
{
  if (state_ == STATE_DUCKING)
  {
    chargeTime_++;
    if (chargeTime_ > MAX_CHARGE)
    {
      superBomb();
    }
  }
}
```

如果你猜这就是更新方法模式，恭喜你答对了！

我们需要在她开始俯卧的时候重置计时器，所以我们修改`handleInput()`：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  switch (state_)
  {
    case STATE_STANDING:
      if (input == PRESS_DOWN)
      {
        state_ = STATE_DUCKING;
        chargeTime_ = 0;
        setGraphics(IMAGE_DUCK);
      }
      // 处理其他输入……
      break;

      // 其他状态……
  }
}
```

总而言之，为了增加这个充能攻击，我们需要修改两个方法， 添加一个`chargeTime_`字段到`Heroine`，哪怕它只在俯卧时有意义。 我们更喜欢的是让所有相关的代码和数据都待在同一个地方。GoF完成了这个。

状态模式

对于那些思维模式深深沉浸在面向对象的人，每个条件分支都是使用动态分配的机会（在C++中叫做虚方法调用）。 我觉得那就太过于复杂化了。有时候一个`if`就能满足你的需要了。

这里有个历史遗留问题。 原先的面向对象传教徒，比如写《设计模式》的GoF和写《重构》的Martin Fowler都使用Smalltalk。 那里，`ifThen:`是你只是使用条件的方法，该方法在`true`和`false`对象中以不同的方式实现。

但是在我们的例子中，面向对象确实是一个更好的方案。 这带领我们走向状态模式。在GoF中这样描述状态模式：

> 允许一个对象在其内部状态 发生变化时改变自己的行为，该对象看起来好像修改了它的类型

这可没太多帮助。我们的`switch`也完成了这一点。 它们描述的东西应用在英雄的身上实际是：

一个状态接口

首先，我们为状态定义接口。 状态相关的行为——之前用`switch`的每一处——都成为了接口中的虚方法。 在我们的例子中，那是`handleInput()`和`update()`：

```
class HeroineState
{
public:
  virtual ~HeroineState() {}
  virtual void handleInput(Heroine& heroine, Input input) {}
  virtual void update(Heroine& heroine) {}
};
```

为每个状态写个类

对于每个状态，我们定义一个类实现接口。它的方法定义了英雄在状态的行为。 换言之，从之前的`switch`中取出每个`case`，将它们移动到状态类中。举个例子：

```
class DuckingState : public HeroineState
{
public:
  DuckingState()
  : chargeTime_(0)
  {}

  virtual void handleInput(Heroine& heroine, Input input) {
    if (input == RELEASE_DOWN)
    {
      // 改回站立状态……
      heroine.setGraphics(IMAGE_STAND);
    }
  }

  virtual void update(Heroine& heroine) {
    chargeTime_++;
    if (chargeTime_ > MAX_CHARGE)
    {
      heroine.superBomb();
    }
  }

private:
  int chargeTime_;
};
```

注意我们也将`chargeTime_`移出了`Heroine`，放到了`DuckingState`类中。 这很好——那部分数据只在这个状态有用，现在我们的对象模型显式反映了这一点。

状态委托

接下来，向`Heroine`添加指向当前状态的指针，放弃庞大的`switch`，转向状态委托：

```
class Heroine
{
public:
  virtual void handleInput(Input input)
  {
    state_->handleInput(*this, input);
  }

  virtual void update()
  {
    state_->update(*this);
  }

  // 其他方法……
private:
  HeroineState* state_;
};
```

为了“改变状态”，我们只需要将`state_`声明指向不同的`HeroineState`对象。 这就是状态模式的全部了。

这看上去有些像策略模式和类型对象模式。 在三者中，你都有一个主对象委托给下属。区别在于*意图*。

- 在策略模式中，目标是解耦主类和它的部分行为。
- 在类型对象中，目标是通过*共享*一个对相同类型对象的引用，让一*系列*对象行为相近。
- 在状态模式中，目标是让主对象通过*改变*委托的对象，来*改变*它的行为。

状态对象在哪里？

我这里掩掩藏了一些细节。为了改变状态，我们需要声明`state_`指向新的状态， 但那个新状态又是从哪里来呢？ 在`enum`实现中，这都不用过脑子——`enum`实际上就像数字一样。 但是现在状态是类了，意味着我们需要指向实例。通常这有两种方案：

静态状态

如果状态对象没有其他数据字段， 那么它存储的唯一数据就是指向虚方法表的指针，用来调用它的方法。 在这种情况下，没理由产生多个实例。毕竟每个实例都完全一样。

如果你的状态没有字段，只有一个虚方法，你可以再简化这个模式。 将每个状态类替换成状态*函数*——只是一个普通的顶层函数。 然后，主类中的`state_`字段变成一个简单的函数指针。

在那种情况下，你可以用一个*静态*实例。 哪怕你有一堆FSM同时在同一状态上运行，它们也能指向同一实例，因为状态没有与状态机相关的部分。

这是享元模式。

在*哪里*放置静态实例取决于你。找一个合理的地方。 没什么特殊的理由，在这里我将它放在状态基类中。

```
class HeroineState
{
public:
  static StandingState standing;
  static DuckingState ducking;
  static JumpingState jumping;
  static DivingState diving;

  // 其他代码……
};
```

每个静态字段都是游戏状态类的一个实例。为了让英雄跳跃，站立状态会这样做：

```
if (input == PRESS_B)
{
  heroine.state_ = &HeroineState::jumping;
  heroine.setGraphics(IMAGE_JUMP);
}
```

实例化状态

有时没那么容易。静态状态对俯卧状态不起作用。 它有一个`chargeTime_`字段，与正在俯卧的英雄特定相关。 在游戏中，如果只有一个英雄，那也行，但是如果要添加双人合作，同时在屏幕上有两个英雄，就有麻烦了。

在那种情况下，转换时需要创建状态对象。 这需要每个FSM拥有自己的状态实例。如果我们分配*新*状态， 那意味着我们需要释放*当前的*状态。 在这里要小心，由于触发变化的代码是当前状态中的方法，需要删除`this`，因此需要小心从事。

相反，我们允许`HeroineState`中的`handleInput()`返回一个新状态。 如果它那么做了，`Heroine`会删除旧的，然后换成新的，就像这样：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  HeroineState* state = state_->handleInput(*this, input);
  if (state != NULL)
  {
    delete state_;
    state_ = state;
  }
}
```

这样，直到从之前的状态返回，我们才需要删除它。 现在，站立状态可以通过创建新实例转换为俯卧状态：

```
HeroineState* StandingState::handleInput(Heroine& heroine,
                                         Input input)
{
  if (input == PRESS_DOWN)
  {
    // 其他代码……
    return new DuckingState();
  }

  // 保持这个状态
  return NULL;
}
```

如果可以，我倾向于使用静态状态，因为它们不会在状态转换时消耗太多的内存和CPU。但是，对于更，额，*多状态的事物*，需要耗费一些精力来实现。

当你为状态动态分配内存时，你也许会担心碎片。 对象池模式可以帮上忙。

入口行为和出口行为

状态模式的目标是将状态的行为和数据封装到单一类中。 我们完成了一部分，但是还有一些未了之事。

当英雄改变状态时，我们也改变她的贴图。 现在，那部分代码在她转换*前*的状态中。 当她从俯卧转为站立，俯卧状态修改了她的贴图：

```
HeroineState* DuckingState::handleInput(Heroine& heroine,
                                        Input input)
{
  if (input == RELEASE_DOWN)
  {
    heroine.setGraphics(IMAGE_STAND);
    return new StandingState();
  }

  // 其他代码……
}
```

我们想做的是，每个状态控制自己的贴图。这可以通过给状态一个*入口行为*来实现：

```
class StandingState : public HeroineState
{
public:
  virtual void enter(Heroine& heroine)
  {
    heroine.setGraphics(IMAGE_STAND);
  }

  // 其他代码……
};
```

在`Heroine`中，我们将处理状态改变的代码移动到新状态上调用：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  HeroineState* state = state_->handleInput(*this, input);
  if (state != NULL)
  {
    delete state_;
    state_ = state;

    // 调用新状态的入口行为
    state_->enter(*this);
  }
}
```

这让我们将俯卧代码简化为:

```
HeroineState* DuckingState::handleInput(Heroine& heroine,
                                        Input input)
{
  if (input == RELEASE_DOWN)
  {
    return new StandingState();
  }

  // 其他代码……
}
```

它做的所有事情就是转换到站立状态，站立状态控制贴图。 现在我们的状态真正地封装了。 关于入口行为的好事就是，当你进入状态时，不必关心你是从哪个状态转换*来的*。

大多数真正的状态图都有转为同一状态的多个转移。 举个例子，英雄在跳跃或跳斩后进入站立状态。 这意味着我们在转换发生的最后重复相同的代码。 入口行为很好地解决了这一点。

我们能，当然，扩展并支持*出口行为*。 这是在我们*离开*现有状态，转换到新状态之前调用的方法。

有什么收获?

我花了这么长时间向您推销FSMs，现在我们来捋一捋。 我到现在讲的都是真的，FSM能很好解决一些问题。但它们最大的优点也是它们最大的缺点。

状态机通过使用有约束的结构来理清杂乱的代码。 你只需一个固定状态的集合，单一的当前状态，和一些硬编码的转换。

一个有限状态机甚至不是*图灵完全的*。 自动理论用一系列抽象模型描述计算，每种都比之前的复杂。 *图灵机* 是其中最具有表现力的模型之一。

“图灵完全”意味着一个系统（通常是编程语言）足以在内部实现一个图灵机， 也就意味着，在某种程度上，所有的图灵完全具有同样的表现力。 FSMs不够灵活，并不在其中。

如果你需要为更复杂的东西使用状态机，比如游戏AI，你会撞到这个模型的限制上。 感谢上天，我们的前辈找到了一些方法来闪避这些限制。我会在这一章的最后简单地浏览一下它们。

并发状态机

我们决定给英雄拿枪的能力。 当她拿着枪的时候，她还是能做她之前的任何事情：跑动，跳跃，跳斩，等等。 但是她在做这些的同时也要能开火。

如果我们执着于FSM，我们需要*翻倍*现有状态。 对于每个现有状态，我们需要另一个她持枪状态：站立，持枪站立，跳跃，持枪跳跃， 你知道我的意思了吧。

多加几种武器，状态就会指数爆炸。 不但增加了大量的状态，这也增加了大量的冗余： 持枪和不持枪的状态是完全一样的，只是多了一点负责射击的代码。

问题在于我们将两种状态绑定——她*做的*和她*携带的*——到了一个状态机上。 为了处理所有可能的组合，我们需要为每一*对*组合写一个状态。 修复方法很明显：使用两个单独的状态机。

如果她在做什么有n个状态，而她携带了什么有m个状态，要塞到一个状态机中， 我们需要$n \times m$个状态。使用两个状态机，就只有$n + m$个。

我们保留之前记录她在做什么的状态机，不用管它。 然后定义她携带了什么的单独状态机。 `Heroine`将会有*两个*“状态”引用，每个对应一个状态机，就像这样：

```
class Heroine
{
  // 其他代码……

private:
  HeroineState* state_;
  HeroineState* equipment_;
};
```

为了便于说明，她的装备也使用了状态模式。 在实践中，由于装备只有两个状态，一个布尔标识就够了。

当英雄把输入委托给了状态，两个状态都需要委托：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  state_->handleInput(*this, input);
  equipment_->handleInput(*this, input);
}
```

功能更完备的系统也许能让状态机*销毁*输入，这样其他状态机就不会收到了。 这能阻止两个状态机响应同一输入。

每个状态机之后都能响应输入，发生行为，独立于其它机器改变状态。 当两个状态集合几乎没有联系的时候，它工作得不错。

在实践中，你会发现状态有时需要交互。 举个例子，也许她在跳跃时不能开火，或者她在持枪时不能跳斩攻击。 为了完成这个，你也许会在状态的代码中做一些粗糙的`if`测试*其他*状态来协同， 这不是最优雅的解决方案，但这可以搞定工作。

分层状态机

再充实一下英雄的行为，她可能会有更多相似的状态。 举个例子，她也许有站立，行走，奔跑，和滑铲状态。在这些状态中，按B跳，按下蹲。

如果使用简单的状态机实现，我们在每个状态中的都重复了代码。 如果我们能够实现一次，在多个状态间重用就好了。

如果这是面向对象的代码而不是状态机的，在状态间分享代码的方式是通过继承。 我们可以为“在地面上”定义一个类处理跳跃和速降。 站立，行走，奔跑和滑铲都从它继承，然后增加各自的附加行为。

它的影响有好有坏。 继承是一种有力的代码重用工具，但也在两块代码间建立了非常强的耦合。 这是重锤，所以请小心使用。

你会发现，这是个被称为*分层状态机*的通用结构。 状态可以有*父状态*（这让它变为*子状态*）。 当一个事件进来，如果子状态没有处理，它就会交给链上的父状态。 换言之，它像重载的继承方法那样运作。

事实上，如果我们使用状态模式实现FSM，我们可以使用继承来实现层次。 定义一个基类作为父状态：

```
class OnGroundState : public HeroineState
{
public:
  virtual void handleInput(Heroine& heroine, Input input)
  {
    if (input == PRESS_B)
    {
      // 跳跃……
    }
    else if (input == PRESS_DOWN)
    {
      // 俯卧……
    }
  }
};
```

每个子状态继承它：

```
class DuckingState : public OnGroundState
{
public:
  virtual void handleInput(Heroine& heroine, Input input)
  {
    if (input == RELEASE_DOWN)
    {
      // 站起……
    }
    else
    {
      // 没有处理输入，返回上一层
      OnGroundState::handleInput(heroine, input);
    }
  }
};
```

这当然不是唯一实现层次的方法。 如果你没有使用GoF的状态模式，这可能不会有用。 相反，你可以显式的使用状态*栈*而不是单一状态来表示当前状态的父状态链。

栈顶的状态是当前状态，在他下面是它的直接父状态， 然后是*那个*父状态的父状态，以此类推。 当你需要状态的特定行为，你从栈的顶端开始， 然后向下寻找，直到某一个状态处理了它。（如果到底也没找到，就无视它。）

下推自动机

还有一种有限状态机的扩展也用了状态栈。 容易混淆的是，这里的栈表示的是完全不同的事物，被用作解决不同的问题。

要解决的问题是有限状态机没有任何*历史*的概念。 你记得*正在*什么状态中，但是不记得*曾在*什么状态。 没有简单的办法重回上一状态。

举个例子：早先，我们让无畏英雄武装到了牙齿。 当她开火时，我们需要新状态播放开火动画，发射子弹，产生视觉效果。 所以我们拼凑了一个`FiringState`，不管现在是什么状态，都能在按下开火按钮时跳转为这个状态。

这个行为在多个状态间重复，也许是用层次状态机重用代码的好地方。

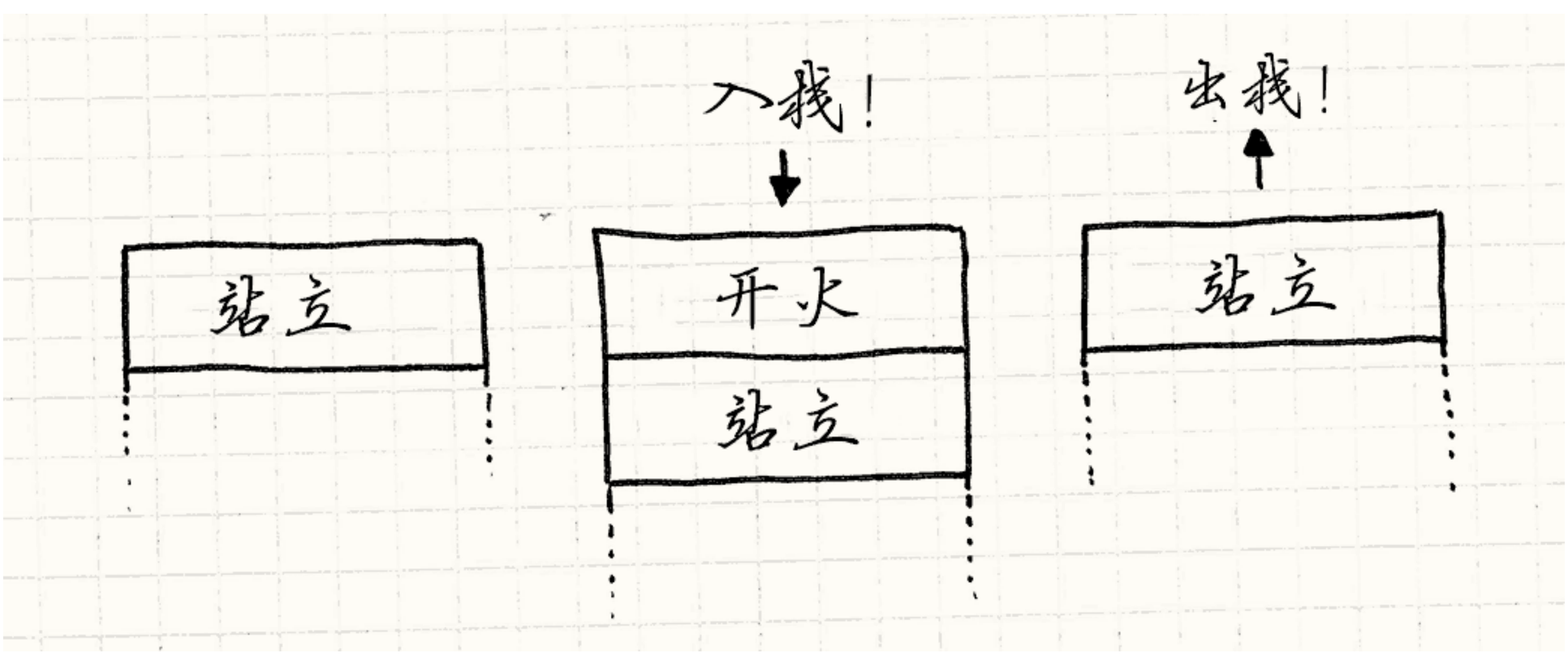
问题在于她射击*后*转换到的状态。 她可以在站立，奔跑，跳跃，跳斩时射击。 当射击结束，应该转换为她之前的状态。

如果我们固执于纯粹的FSM，我们就已经忘了她之前所处的状态。 为了追踪之前的状态，我们定义了很多几乎完全一样的类——站立开火，跑步开火，跳跃开火，诸如此类—— 每个都有硬编码的转换，用来回到之前的状态。

我们真正想要的是，它会*存储*开火前所处的状态，之后能*回想*起来。 自动理论又一次能帮上忙了，相关的数据结构被称为*下推自动机*。

有限状态机有*一个*指向状态的指针，下推自动机有*一栈*指针。 在FSM中，新状态*代替*了之前的那个状态。 下推自动机不仅能完成那个，还能给你两个额外操作：

1. 你可以将新状态*压入*栈中。“当前的”状态总是在栈顶，所以你能转到新状态。 但它让之前的状态待在栈中而不是销毁它。
2. 你可以*弹出*最上面的状态。这个状态会被销毁，它下面的状态成为新状态。



这正是我们开火时需要的。我们创建*单一的*开火状态。 当开火按钮在其他状态按下时，我们*压入*开火状态。 当开火动画结束，我们*弹出*开火状态，然后下推自动机自动转回之前的状态。

所以它们有多有用呢?

即使状态机有这些常见的扩展，它们还是很受限制。 这让今日游戏AI移向了更加激动人心的领域，比如*行为树*和*规划系统* 。 如果你关注复杂AI，这一整章只是为了勾起你的食欲。你需要阅读其他书来满足你的欲望。

这不意味着有限状态机，下推自动机，和其他简单的系统没有用。 它们是特定问题的好工具。有限状态机在以下情况有用:

- 你有个实体，它的行为基于一些内在状态。
- 状态可以被严格的分割为相对较少的不相干项目。
- 实体响应一系列输入或事件。

在游戏中，状态机因在AI中使用而闻名，但是它也常用于其他领域， 比如处理玩家输入，导航菜单界面，分析文字，网络协议以及其他异步行为。

序列模式

游戏设计模式

电子游戏之所有有趣，很大程度上归功于它们会将我们带到别的地方。 几分钟后（或者，诚实点，可能会更长），我们活在一个虚拟的世界。 创造那样的世界是游戏程序员至上的欢愉。

大多数游戏世界都有的特性是*时间*——虚构世界以其特定的节奏运行。 作为世界的架构师，我们必须发明时间，制造推动游戏时间运作的齿轮。

这本篇的模式是建构这些的工具。 游戏循环是时钟的中心轴。 对象通过更新方法来聆听时钟的滴答声。 我们可以用双缓冲模式存储快照来隐藏计算机的顺序执行，这样看起来世界可以进行同步更新。

模式

- 双缓冲模式
- 游戏循环
- 更新方法

双缓冲模式

游戏设计模式Sequencing Patterns

意图

用序列的操作模拟瞬间或者同时发生的事情。

动机

电脑具有强大的序列化处理能力。 它的力量来自于将大的任务分解为小的步骤，这样可以一步接一步的完成。 但是，通常用户需要看到事情发生在瞬间或者让多个任务同时进行。

使用线程和多核架构让这种说法不那么正确了，但哪怕使用多核，也只有一些操作可以同步运行。

一个典型的例子，也是每个游戏引擎都得掌控的问题，渲染。 当游戏渲染玩家所见的世界时，它同时需要处理一堆——远处的山，起伏的丘陵，树木，每个都在各自的循环中处理。 如果在用户*观察*时增量做这些，连续世界的幻觉就会被打破。 场景必须快速流畅地更新，显示一系列完整的帧，每帧都是立即出现的。

双缓冲解决了这个问题，但是为了理解其原理，让我们首先的复习下计算机是如何显示图形的。

计算机图形系统是如何工作的（概述）

在电脑屏幕上显示图像是一次绘制一个像素点。 它从左到右扫描每行像素点，然后移动至下一行。 当抵达了右下角，它退回左上角重新开始。 它做得飞快——每秒六十次——因此我们的眼睛无法察觉。 对我们来说，这是一整张静态的彩色像素——一张图像。

这个解释是，额，“简化过的”。 如果你是底层软件开发人员，跳过下一节吧。 你对这章的其余部分已经了解的够多了。 如果你不是，这部分的目标是给你足够的背景知识，理解等要讨论的设计模式。

你可以将整个过程想象为软管向屏幕喷洒像素。 独特的像素从软管的后面流入，然后在屏幕上喷洒，每次对一个像素涂一点颜色。 所以软管怎么知道哪种颜色要喷到哪里?

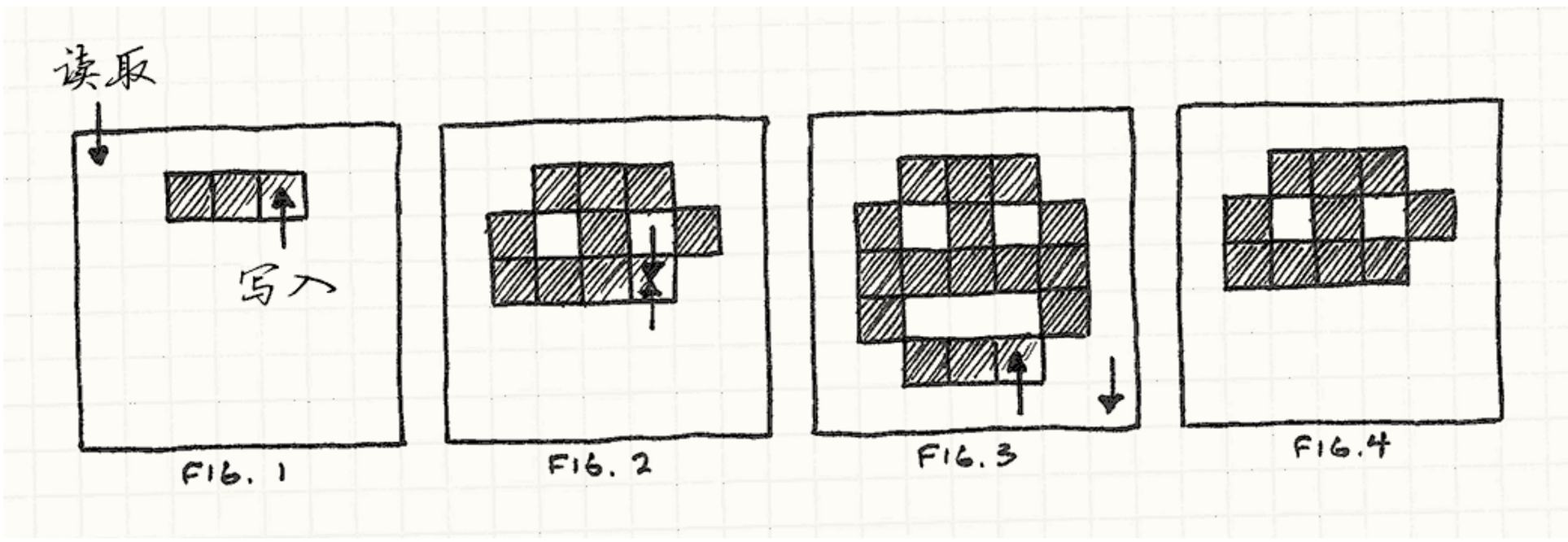
在大多数电脑上，答案是从*帧缓冲*中获知这些信息。 帧缓冲是内存中的色素数组，RAM中每两个字节代表表示一个像素点的颜色。 当软管向屏幕喷洒时，它从这个数组中读取颜色值，每次一个字节。

在字节值和颜色之间的映射通常由系统的*像素格式*和*色深*来指定。 在今日多数游戏主机上，每个像素都有32位，红绿蓝三个各占八位，剩下的八位保留作其他用途。

最终，为了让游戏显示在屏幕中，我们需要做的就是写入这个数组。 我们疯狂摆弄的图形算法最终都到了这里：设置帧缓冲中的字节值。 但这里有个小问题。

早先，我说过计算机是顺序处理的。 如果机器在运行一块渲染代码，我们不指望它同时还能做些别的什么事。 这通常是没啥问题，但是有些事*确实*在程序运行时发生。 其中一件是，当游戏运行时，视频输出正在*不断*从帧缓冲中读取数据。 这可能会为我们带来问题。

假设我们要在屏幕上显示一张笑脸。 程序在帧缓冲上开始循环，为像素点涂色。 我们没有意识到的是，在写入的同时，视频驱动正在读取它。 当它扫描过已写的像素时，笑脸开始浮现，但是之后它进入了未写的部分，就将没有写的像素绘制到了屏幕上。结果就是*撕裂*，你在屏幕上看到了绘制到一半的图像，这是可见的可怕漏洞。



显卡设备读取的缓冲帧正是我们绘制像素的那块(Fig. 1)。 显卡最终追上了渲染器，然后越过它，读取了还没有写入的像素(Fig. 2)。 我们完成了绘制，但驱动没有收到那些新像素。

结果(Fig. 4)是用户只看到了一半的绘制结果。 我称它为“哭脸”，笑脸看上去下半部是撕裂的。

这就是我们需要这个设计模式的原因。 程序一次渲染一个像素，但是显示需要一次全部看到——在这帧中啥也没有，下一帧笑脸全部出现。 双缓冲解决了这个问题。我会用类比来解释。

表演1，场景1

想象玩家正在观看我们的表演。 在场景一结束而场景二开始时，我们需要改变舞台设置。如果让场务在场景结束后进去拖动东西，在场景的连贯性就被打破了。 我们可以减弱灯光（这是剧院真正所做的），但是观众还是知道*有什么*在进行，而我们想在场景间毫无跳跃的转换。

消耗一些地皮，我们想到了一个聪明的解决方案：建*两个*舞台，观众两个都能看到。 每个有它自己的一组灯光。我们称这些舞台为舞台A和舞台B。 场景一在舞台A上。同时场务在处于黑暗之中的舞台B布置场景二。 当场景一完成后，切断场景A的灯光，将打开场景B的灯光。观众看向新舞台，场景二立即开始。

同时，场务到了黑咕隆咚的舞台*A*，收拾了场景一然后布置场景三。 一旦场景二结束，将灯光转回舞台A。 我们在整场表演中进行这样的活动，使用黑暗的舞台作为布置下一场景的工作区域。 每一次场景转换，只是在两个舞台间切换灯光。 观众获得了连续的体验，场景转换时没有感到任何中断。他们从来没有见到场务。

使用单面镜以及其他的巧妙布置，你可以真正的在同一*位置*布置两个舞台。 随着灯光切换，观众看到了不同的舞台，无需看向不同的地方。 如何这样布置舞台就留给读者做练习吧。

重新回到图形

这就是双缓冲的工作原理， 这就是你看到的几乎每个游戏背后的渲染系统。 不只用一个帧缓冲，我们用*两个*。其中一个代表现在的帧，即类比中的舞台A，也就是说是显卡读取的那一个。 GPU可以想什么时候扫就什么时候扫。

但不是*所有*的游戏主机都是这么做的。 更老的简单主机中，内存有限，需要小心的同步绘制和渲染。那很需要技巧。

同时，我们的渲染代码正在写入*另一个*帧缓冲。 即黑暗中的舞台B。当渲染代码完成了场景的绘制，它将通过*交换*缓存来切换灯光。 这告诉图形硬件开始从第二块缓存中读取而不是第一块。 只要在刷新之前交换，就不会有任何撕裂出现，整个场景都会一下子出现。

这时可以使用以前的帧缓冲了。我们可以将下一帧渲染在它上面了。超棒！

模式

定义*缓冲类*封装了**缓冲**：一段可改变的状态。 这个缓冲被增量的修改，但我们想要外部的代码将修改视为单一的原子操作。 为了实现这点，类保存了*两个*缓冲的实例：**下一缓冲**和**当前缓冲**。

当信息*从*缓冲区中读取，它总是读取*当前的*缓冲区。 当信息需要*写到*缓存，它总是在*下一*缓冲区上操作。 当改变完成后，一个**交换**操作会立刻将当前缓冲区和下一缓冲区交换， 这样新缓冲区就是公共可见的了。旧的缓冲区成为下一个重用的缓冲区。

何时使用

这是那种你需要它时自然会想起的模式。 如果你有一个系统需要双缓冲，它可能有可见的错误（撕裂之类的）或者行为不正确。 但是，“当你需要时自然会想起”没提提供太多有效信息。 更加特殊的，以下情况都满足时，使用这个模式就很恰当：

- 我们需要维护一些被增量修改的状态。
- 在修改到一半的时候，状态可能会被外部请求。
- 我们想要防止请求状态的外部代码知道内部的工作方式。
- 我们想要读取状态，而且不想等着修改完成。

记住

不像其他较大的架构模式，双缓冲模式位于底层。 正因如此，它对代码库的其他部分影响较小——大多数游戏甚至不会感到有区别。 尽管这里还是有几个警告。

交换本身需要时间

在状态被修改后，双缓冲需要一个*swap*步骤。 这个操作必须是原子的——在交换时，没有代码可以接触到*任何一个*状态。 通常，这就是修改一个指针那么快，但是如果交换消耗的时间长于修改状态的时间，那可是毫无助益。

我们得保存两个缓冲区

这个模式的另一个结果是增加了内存的使用。 正如其名，这个模式需要你在内存中一直保留*两个*状态的拷贝。 在内存受限的设备上，你可能要付出惨痛的代价。 如果你不能接受使用两份内存，你需要使用别的方法保证状态在修改时不会被请求。

示例代码

我们知道了理论，现在看看如何它在实践中如何应用。 我们编写了一个非常基础的图形系统，允许我们在缓冲帧上描绘像素。 在大多数主机和电脑上，显卡驱动提供了这种底层的图形系统， 但是在这里手动实现有助于理解发生了什么。首先是缓冲区本身：

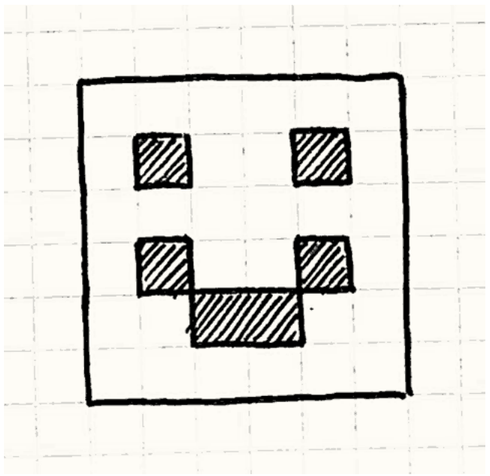
```
class Framebuffer
{
public:
  Framebuffer() { clear(); }

  void clear()
  {
    for (int i = 0; i < WIDTH * HEIGHT; i++)
    {
      pixels_[i] = WHITE;
    }
  }

  void draw(int x, int y)
  {
    pixels_[(WIDTH * y) + x] = BLACK;
  }

  const char* getPixels()
  {
    return pixels_;
  }

private:
  static const int WIDTH = 160;
  static const int HEIGHT = 120;

  char pixels_[WIDTH * HEIGHT];
};
```

它有将整个缓存设置成默认的颜色的操作，也将其一像素设置为特定颜色的操作。 它也有函数`getPixels()`，读取保存像素数据的数组。 虽然在这个例子没有出现，但在实际中，显卡驱动会频繁调用这个函数，将缓存中的数据输送到屏幕上。

我们将整个缓冲区封装在`Scene`类中。渲染某物需要做的是在这块缓冲区上调用一系列`draw()`。

```
class Scene
{
public:
  void draw()
  {
    buffer_.clear();

    buffer_.draw(1, 1);
    buffer_.draw(4, 1);
    buffer_.draw(1, 3);
    buffer_.draw(2, 4);
    buffer_.draw(3, 4);
    buffer_.draw(4, 3);
  }

  Framebuffer& getBuffer() { return buffer_; }

private:
  Framebuffer buffer_;
};
```

特别的，它画出来这幅旷世杰作：



每一帧，游戏告诉场景去绘制。场景清空缓冲区然后一个接一个绘制一大堆像素。 它也提供了`getBuffer()`获得缓冲区，这样显卡可以接触到它。

这看起来直截了当，但是如果就这样做，我们会遇到麻烦。 显卡驱动可以在*任何*时间调用`getBuffer()`，甚至在这个时候：

```
buffer_.draw(1, 1);
buffer_.draw(4, 1);
// <- 图形驱动从这里读取像素!
buffer_.draw(1, 3);
buffer_.draw(2, 4);
buffer_.draw(3, 4);
buffer_.draw(4, 3);
```

当上面的情况发生时，用户就会看到脸的眼睛，但是这一帧中嘴却消失了。 下一帧，又可能在某些别的地方发生冲突。最终结果是糟糕的闪烁图形。我们会用双缓冲修复这点：

```
class Scene
{
public:
  Scene()
  : current_(&buffers_[0]),
    next_(&buffers_[1])
  {}

  void draw()
  {
    next_->clear();

    next_->draw(1, 1);
    // ...
    next_->draw(4, 3);

    swap();
  }

  Framebuffer& getBuffer() { return *current_; }

private:
  void swap()
  {
    // 只需交换指针
    Framebuffer* temp = current_;
    current_ = next_;
    next_ = temp;
  }

  Framebuffer  buffers_[2];
  Framebuffer* current_;
  Framebuffer* next_;
};
```

现在`Scene`有存储在`buffers_`数组中的两个缓冲区，。 我们并不从数组中直接引用它们。 而是通过两个成员，`next_`和`current_`，指向这个数组。 当绘制时，我们绘制在`next_`指向的缓冲区上。 当显卡驱动需要获得像素信息时，它总是通过`current_`获取*另一个*缓冲区。

通过这种方式，显卡驱动永远看不到我们正在施工的缓冲区。 解决方案的的最后一片碎片就是在场景完成绘制一帧的时候调用`swap()`。 它通过交换`next_`和`current_`的引用完成这一点。 下一次显卡驱动调用`getBuffer()`，它会获得我们刚刚完成渲染的新缓冲区， 然后将刚刚描绘好的缓冲区放在屏幕上。没有撕裂，也没有不美观的问题。

不仅是图形

双缓冲解决的核心问题是状态有可能在被修改的同时被请求。 这通常有两种原因。图形的例子覆盖了第一种原因——另一线程的代码或者另一个中断的代码直接访问了状态。

但是，还有一个同样常见的原因：*负责修改的*代码试图访问同样正在修改状态。 这可能发生在很多地方，特别是实体的物理部分和AI部分，实体在相互交互。 双缓冲在那里也十分有用。

人工不智能

假设我们正在构建一个关于趣味喜剧的游戏的行为系统。 这个游戏包括一堆跑来跑去寻欢作乐的角色。这里是我们的基础角色：

```
class Actor
{
public:
  Actor() : slapped_(false) {}

  virtual ~Actor() {}
  virtual void update() = 0;

  void reset()      { slapped_ = false; }
  void slap()       { slapped_ = true; }
  bool wasSlapped() { return slapped_; }

private:
  bool slapped_;
};
```

每一帧，游戏要在角色身上调用`update()`，让角色做些事情。 特别的，从玩家的角度，*所有的角色都看上去应该同时更新*。

这是更新方法模式的例子。

角色也可以相互交互，这里的“交互”，我指“可以互相扇对方巴掌”。 当更新时，角色可以在另一个角色身上调用`slap()`来扇它一巴掌，然后调用`wasSlapped()`看看自己是不是被扇了。

角色需要一个可以交互的舞台，让我们来布置一下：

```
class Stage
{
public:
  void add(Actor* actor, int index)
  {
    actors_[index] = actor;
  }

  void update()
  {
    for (int i = 0; i < NUM_ACTORS; i++)
    {
      actors_[i]->update();
      actors_[i]->reset();
    }
  }

private:
  static const int NUM_ACTORS = 3;

  Actor* actors_[NUM_ACTORS];
};
```

`Stage`允许我们向其中增加角色， 然后使用简单的`update()`调用来更新每个角色。 在用户看来，角色是同时移动的，但是实际上，它们是依次更新的。

这里需要注意的另一点是，每个角色的“被扇”状态在更新后就立刻被清除。 这样才能保证一个角色对一巴掌只反应一次。

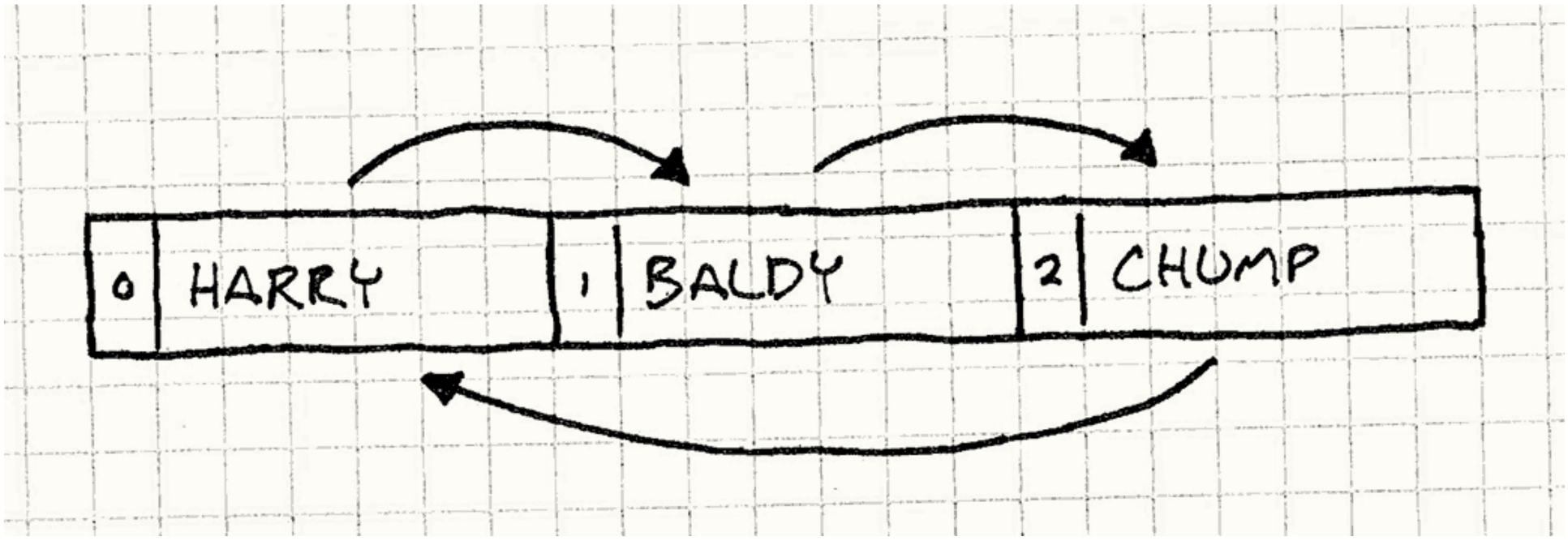
作为一切的开始，让我们定义一个具体的角色子类。 这里的喜剧演员很简单。 他只面向一个角色。当他被扇时——无论是谁扇的他——他的反应是扇他面前的人一巴掌。

```
class Comedian : public Actor
{
public:
  void face(Actor* actor) { facing_ = actor; }

  virtual void update()
  {
    if (wasSlapped()) facing_->slap();
  }

private:
  Actor* facing_;
};
```

现在我们把一些喜剧演员丢到舞台上看看发生了什么。 我们设置三个演员，第一个面朝第二个，第二个面朝第三个，第三个面对第一个，形成一个环：

```
Stage stage;

Comedian* harry = new Comedian();
Comedian* baldy = new Comedian();
Comedian* chump = new Comedian();

harry->face(baldy);
baldy->face(chump);
chump->face(harry);

stage.add(harry, 0);
stage.add(baldy, 1);
stage.add(chump, 2);
```

最终舞台布置如下图。箭头代表角色的朝向，然后数字代表角色在舞台数组中的索引。



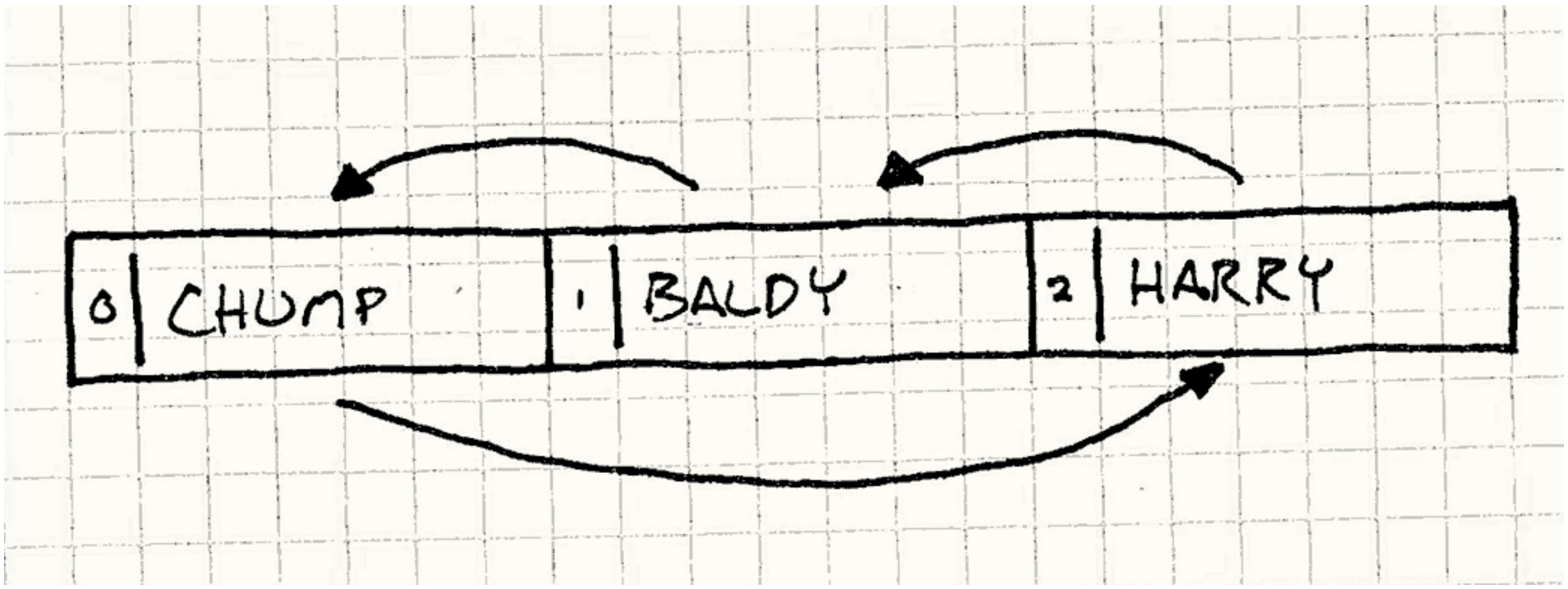
我们扇哈利一巴掌，为表演拉开序幕，看看之后会发生什么：

```
harry->slap();

stage.update();
```

记住`Stage`中的`update()`函数轮流更新每个角色， 因此如果检视整个代码，我们会发现事件这样发生：

```
Stage updates actor 0 (Harry)
  Harry was slapped, so he slaps Baldy
Stage updates actor 1 (Baldy)
  Baldy was slapped, so he slaps Chump
Stage updates actor 2 (Chump)
  Chump was slapped, so he slaps Harry
Stage update ends
```

在单独的一帧中，初始给哈利的一巴掌传给了所有的喜剧演员。 现在，让事物复杂起来，让我们重新排列舞台数组中角色的排序， 但是继续保持面向对方的方式。



我们不动舞台的其余部分，只是将添加角色到舞台的代码块改为如下：

```
stage.add(harry, 2);
stage.add(baldy, 1);
stage.add(chump, 0);
```

让我们看看再次运行时会发生什么：

```
Stage updates actor 0 (Chump)
  Chump was not slapped, so he does nothing
Stage updates actor 1 (Baldy)
  Baldy was not slapped, so he does nothing
Stage updates actor 2 (Harry)
  Harry was slapped, so he slaps Baldy
Stage update ends
```

哦不。完全不一样了。问题很明显。 更新角色时，我们修改了他们的“被扇”状态，这也是我们在更新时*读取*的状态。 因此，在更新中早先的状态修改会影响之后*同*一状态的修改的步骤。

如果你继续更新舞台，你会看到巴掌在角色间逐渐传递，每帧传递一个。 在第一帧 Harry扇了Baldy。下一帧，Baldy扇了Chump，如此类推。

而最终的结果是，一个角色对被扇作出反应可能是在被扇的*同*一帧或者*下*一帧， 这完全取决于两个角色在舞台上是如何排序的。 这没能满足我角色同时反应的需求——它们在同一帧中更新的顺序不该对结果有影响。

缓存巴掌

幸运的是，双缓冲模式可以帮忙。 这次，不是保存两大块“缓冲”，我们缓冲更小粒度的事物：每个角色的“被扇”状态。

```
class Actor
{
public:
  Actor() : currentSlapped_(false) {}

  virtual ~Actor() {}
  virtual void update() = 0;

  void swap()
  {
    // 交换缓冲区
    currentSlapped_ = nextSlapped_;

    // 清空新的“下一个”缓冲区。.
    nextSlapped_ = false;
  }

  void slap()        { nextSlapped_ = true; }
  bool wasSlapped() { return currentSlapped_; }

private:
  bool currentSlapped_;
  bool nextSlapped_;
};
```

不再使用一个`slapped_`状态，每个演员现在使用两个。 就像我们之前图形的例子一样，当前状态为读准备，下一状态为写准备。

`reset()`函数被替换为`swap()`。 现在，就在清除交换状态前，它将下一状态拷贝到当前状态上， 使其成为新的当前状态，这还需要在`Stage`中进行小小的改变：

```
void Stage::update()
{
  for (int i = 0; i < NUM_ACTORS; i++)
  {
    actors_[i]->update();
  }

  for (int i = 0; i < NUM_ACTORS; i++)
  {
    actors_[i]->swap();
  }
}
```

`update()`函数现在更新所有的角色，*然后*交换它们的状态。 最终结果是，角色在实际被扇*之后*的那帧才能看到巴掌。 这样一来，角色无论在舞台数组中如何排列，都会保持相同的行为。 无论外部的代码如何调用，所有的角色在一帧内同时更新。

设计决策

双缓冲很直观，我们上面看到的例子也覆盖了大多数你需要的场景。 使用这个模式之前，还有需要做两个主要的设计决策。

缓冲区是如何被交换的?

交换操作是整个过程的最重要的一步， 因为在其发生时，我们必须锁住两个缓冲区上的读取和修改。 为了让性能最优，我们需要它进行得越快越好。

- **交换缓冲区的指针或者引用：** 这是我们图形例子中的做法，这也是大多数双缓冲图形通用的解决方法。
  - *速度快。* 不管缓冲区有多大，交换都只需赋值一对指针。很难在速度和简易性上超越它。
  - *外部代码不能存储对缓存的永久指针。* 这是主要限制。 由于我们没有真正地移动数据，本质上做的是周期性地通知代码库的其他部分去别处去寻找缓存， 就像前面的舞台类比一样。这就意味着代码库的其他部分不能存储指向缓冲区中数据的指针—— 它一段时间后可能就指向了错误的部分。

这会严重误导那些期待缓冲帧永远在内存中的固定地址的显卡驱动。在这种情况下，我们不能这么做。

  - *缓冲区中的数据是两帧之前的数据，而不是上一帧的数据。* 接下来的那帧绘制在帧缓冲区上，而不是在它们之间拷贝数据，就像这样：

```
Frame 1 drawn on buffer A
Frame 2 drawn on buffer B
Frame 3 drawn on buffer A
...
```

    你会注意到，当我们绘制第三帧时，缓冲区上的数据是*第一帧*的，而不是第二帧的。大多数情况下，这不是什么问题——我们通常在绘制之前清空整个帧。但如果想沿用某些缓存中已有的数据，就需要考虑数据其实比期望的更旧。

    旧帧中缓存数据的经典用法是模拟动态模糊。 当前的帧混合一点之前的帧，看起来更像真实的相机捕获的图景。

- **在缓冲区之间拷贝数据：** 如果我们不能重定向到其他缓存，唯一的选项就是将下帧的数据实实在在的拷贝到现在这帧上。 这是我们的扇巴掌喜剧的工作方法。 这种情况下，使用这种方法因为拷贝状态——一个简单的布尔标识——不比修改指向缓存的指针开销大。
  - *下一帧的数据和之前的数据相差一帧。* 拷贝数据与在两块缓冲区间跳来跳去正相反。如果我们需要前一帧的数据，这样我们可以处理更新的数据。
  - *交换也许更花时间。* 这个，当然，是最大的缺点。交换操作现在意味着在内存中拷贝整个缓冲区。 如果缓冲区很大，比如一整个缓冲帧，这需要花费可观的时间。 由于交换时没有东西可以读取或者写入*任何一个*缓冲区，这是一个巨大的限制。

缓冲的粒度如何?

这里另一问题是缓冲区本身是如何组织的——是单个数据块还是散布在对象集合中? 图形例子是前一种，而角色例子是后一种。

大多数情况下，你缓存的方式自然而然会引导你找到答案，但是这里也有些灵活度。 比如，角色总能将消息存在独立的消息块中，使用索引来引用。

- **如果缓存是一整块:**
  - *交换操作更简单。* 由于只有一对缓存，一个简单的交换就完成了。 如果可以改变指针来交换，那么不必在意缓冲区大小，只需几部操作就可以交换整个缓冲区。
- **如果很多对象都持有一块数据:**
  - *交换操作更慢。* 为了交换，需要遍历整个对象集合，通知每个对象交换。

    在喜剧的例子中，这没问题，因为反正需要清除被扇状态 ——每块缓存的数据每帧都需要接触。 如果不需要接触较旧的帧，可以用一个优化在多个对象间分散状态，获得使用整块缓存一样的性能。

    思路是将“当前”和“下一”指针概念，将它们改为对象相关的*偏移量*。就像这样:

```
class Actor
{
public:
  static void init() { current_ = 0; }
  static void swap() { current_ = next(); }

  void slap()        { slapped_[next()] = true; }
  bool wasSlapped()  { return slapped_[current_]; }

private:
  static int current_;
  static int next()  { return 1 - current_; }

  bool slapped_[2];
};
```

角色使用`current_`在状态数组中查询，获得当前的被扇状态， 下一状态总是数组中的另一索引，这样可以用`next()`来计算。 交换状态只需改动`current_`索引。 聪明之处在于`swap()`现在是*静态*函数，它只需被调用一次，*每个*角色的状态都会被交换。

参见

- 你可以在几乎每个图形API中找到双缓冲模式。举个例子，OpenGL有`swapBuffers()`，Direct3D有”swap chains”, Microsoft的XNA框架有`endDraw()`方法。

游戏循环

游戏设计模式Sequencing Patterns

意图

将游戏的进行和玩家输入解耦，和处理器速度解耦。

动机

如果本书中有一个不可或缺模式，那非这个模式莫属了。 游戏循环是“游戏设计模式”的精髓。 几乎每个游戏都有，两两不同，而在非游戏的程序几乎没有使用。

为了看看它多有用，让我们快速缅怀一遍往事。 每个编写计算机程序的人都留着胡子的时代，程序像洗碗机一样工作。 你输入一堆代码，按个按钮，等待，然后获得结果，完成。 程序全都是*批处理模式*的——一旦工作完成，程序就停止了。

Ada Lovelace和Rear Admiral Grace Hopper是女程序员，并没有胡子。

你在今日仍然能看到这些程序，虽然感谢上天，我们不必在打孔纸上面编写它们了。 终端脚本，命令行程序，甚至将Markdown翻译成这本书的Python脚本都是批处理程序。

采访CPU

最终，程序员意识到将批处理代码留在计算办公室，等几个小时后拿到结果才能开始找程序漏洞的方式实在低效。 他们想要立即的反馈。*交互式* 程序诞生了。 第一批交互式程序中的就有游戏：

```
YOU ARE STANDING AT THE END OF A ROAD BEFORE A SMALL BRICK
BUILDING . AROUND YOU IS A FOREST. A SMALL
STREAM FLOWS OUT OF THE BUILDING AND DOWN A GULLY.

> GO IN
YOU ARE INSIDE A BUILDING, A WELL HOUSE FOR A LARGE SPRING.
```

这是Colossal Cave Adventure，史上首个冒险游戏。

你可以和这个程序进行实时交互。 它等待你的输入，然后进行响应。 你再输入，这样一唱一和，就像相声一样。 当轮到你时，它停在那里啥也不做。像这样：

```
while (true)
{
  char* command = readCommand();
  handleCommand(command);
}
```

这程序会永久循环，所以没法退出游戏。 真实的游戏会做些`while (!done)`进行检查，然后通过设置`done`为真来退出游戏。 我省去了那些，保持简明。

事件循环

如果你剥开现代的图形UI的外皮，会惊讶地发现它们与老旧的冒险游戏差不多。 文本处理器通常呆在那里什么也不做，直到你按了个键或者点了什么东西：

```
while (true)
{
  Event* event = waitForEvent();
  dispatchEvent(event);
}
```

这与冒险游戏主要的不同是，程序不是等待*文本指令*，而是等待*用户输入事件*——鼠标点击、按键按下之类的。 其他部分还是和以前的老式文本冒险游戏一样，程序*阻塞*等待用户的输入，这是个问题。

不像其他大多数软件，游戏即使没有玩家输入时也继续运行。 如果你站在那里看着屏幕，游戏不会冻结。动画继续动着。视觉效果继续闪烁。 如果不幸的话，怪物继续吞噬你的英雄。

件循环有“空转”事件，这样你可以无需用户输入间歇地做些事情。 对于闪烁的光标或者进度条已经足够了，但对于游戏就太原始了。

这是真实游戏循环的第一个关键部分：*它处理用户输入，但是不等待它*。循环总是继续旋转：

```
while (true)
{
  processInput();
  update();
  render();
}
```

我们之后会改善它，但是基本的部分都在这里了。 `processInput()`处理上次调用到现在的任何输入。 然后`update()`让游戏模拟一步。 运行AI和物理（通常是这种顺序）。 最终，`render()`绘制游戏，这样玩家可以看到发生了什么。

就像你可以从名字中猜到的， `update()`是使用更新方法模式的好地方。

时间之外的世界

如果这个循环没有因为输入而阻塞，这就带来了明显的问题，要运转*多快*呢？ 每次进行游戏循环都会推动一定的游戏状态的发展。 在游戏世界的居民看来，他们手上的表就会滴答一下。

运行游戏循环一次的常用术语就是“滴答”(tick)和“帧”(frame)。

同时，*玩家的*真实手表也在滴答着。 如果我们用实际时间来测算游戏循环运行的速度，就得到了游戏的“帧率”(FPS)。 如果游戏循环的更快，FPS就更高，游戏运行的更流畅更快。 如果循环得过慢，游戏看上去就像是慢动作电影。

我们现在写的这个循环是能转多快转多快，两个因素决定了帧率。 一个是*每帧要做多少工作*。复杂的物理，众多游戏对象，图形细节都让CPU和GPU繁忙，这决定了需要多久能完成一帧。

另一个是*底层平台的速度*。 更快的芯片可以在同样的时间里执行更多的代码。 多核，GPU组，独立声卡，以及系统的调度都影响了在一次滴答中能够做多少东西。

每秒的帧数

在早期的视频游戏中，第二个因素是固定的。 如果你为NES或者Apple IIe写游戏，你*明确*知道游戏运行在什么CPU上。 你可以（也必须）为它特制代码。 你只需担忧第一个因素：每次滴答要做多少工作。

早期的游戏被仔细地编码，一帧只做一定的工作，开发者可以让游戏以想要的速率运行。 但是如果你想要在快些或者慢些的机器上运行同一游戏，游戏本身就会加速或减速。

这就是为什么老式计算机通常有“turbo”按钮。 新的计算机运行得太快了，无法玩老游戏，因为游戏也会运行的过快。 *关闭* turbo按钮，会减慢计算机的运行速度，就可以运行老游戏了。

现在，很少有开发者可以奢侈地知道游戏运行的硬件条件。游戏必须自动适应多种设备。

这就是游戏循环的另一个关键任务：*不管潜在的硬件条件，以固定速度运行游戏。*

模式

一个**游戏循环**在游玩中不断运行。 每一次循环，它无阻塞地**处理玩家输入**，**更新游戏状态**，**渲染游戏**。 它追踪时间的消耗并**控制游戏的速度。**

何时使用

使用错误的模式比不使用模式更糟，所以这节通常告诫你不要过于热衷设计模式。 设计模式的目标不是往代码库里尽可能的塞东西。

但是这个模式有所不同。我可以很自信的说你会使用这个模式。 如果你使用游戏引擎，你不需要自己编写，但是它还在那里。

对于我，这是“引擎”与“库”的不同之处。 使用库时，你拥有游戏循环，调用库代码。 使用引擎时，引擎拥有游戏循环，调用*你的*代码。

你可能认为在做回合制游戏时不需要它。 但是哪怕是那里，就算*游戏状态*到玩家回合才改变，*视觉*和*听觉*状态仍会改变。 哪怕游戏在“等待”你进行你的回合，动画和音乐也会继续运行。

记住

我们这里谈到的循环是游戏代码中最重要的部分。 有人说程序会花费90%的时间在10%的代码上。 游戏循环代码肯定在这10%中。 你必须小心谨慎，时时注意效率。

“真正的”工程师，比如机械或电子工程师，不把我们当回事，大概就是因为我们像这样使用统计学是。

你也许需要与平台的事件循环相协调

如果你在操作系统的顶层或者有图形UI和内建事件循环的平台上构建游戏， 那你就有了两个应用循环在同时运作。 它们需要很好的协调。

有时候，你可以进行控制，只运行你的游戏循环。 举个例子，如果舍弃了Windows的珍贵API，`main()`可以只用游戏循环。 其中你可以调用`PeekMessage()`来处理和分发系统的事件。 不像`GetMessage()`，`PeekMessage()`不会阻塞等待用户输入， 因此你的游戏循环会保持运作。

其他的平台不会让你这么轻松地摆脱事件循环。 如果你使用网页浏览器作为平台，事件循环已被内建在浏览器的执行模型深处。 这样，你得用事件循环作为游戏循环。 你会调用`requestAnimationFrame()`之类的函数，它会回调你的代码，保持游戏继续运行。

示例代码

在如此长的介绍之后，游戏循环的代码实际上很直观。 我们会浏览一堆变种，比较它们的好处和坏处。

游戏循环驱动了AI，渲染和其他游戏系统，但这些不是模式的要点， 所以我们会调用虚构的方法。在实现了`render()`，`update()`之后， 剩下的作为给读者练习（挑战！）。

跑，能跑多快跑多快

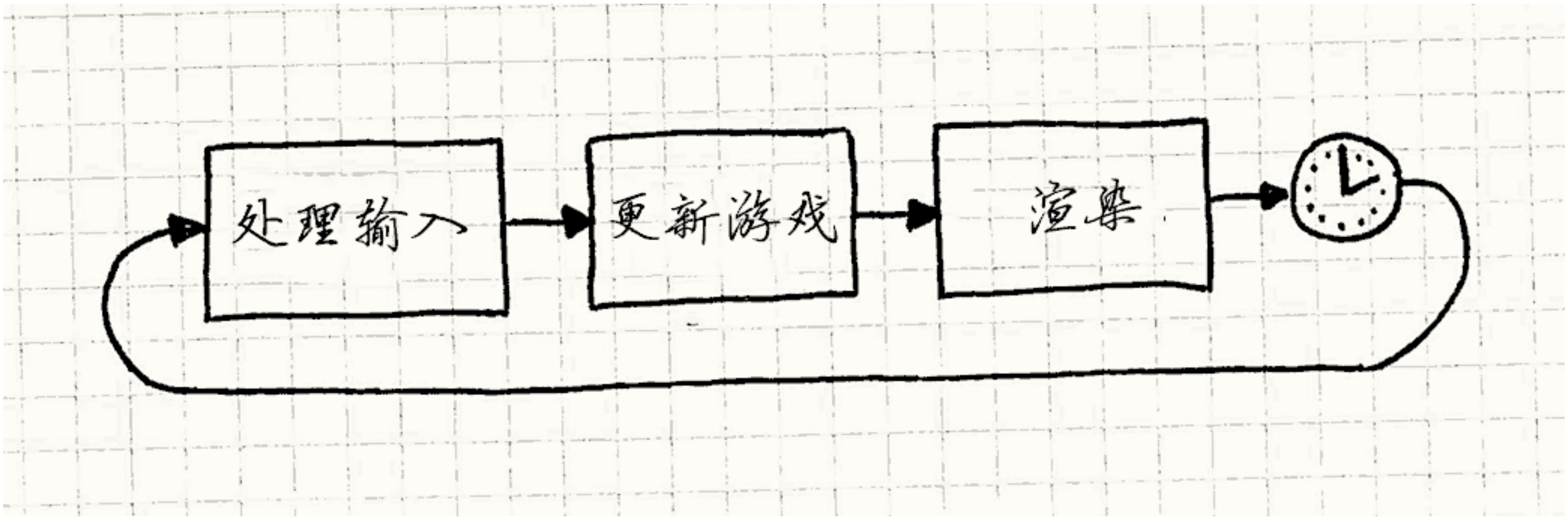
我们已经见过了可能是最简单的游戏循环：

```
while (true)
{
  processInput();
  update();
  render();
}
```

它的问题是你不能控制游戏运行的有多快。 在快速机器上，循环会运行的太快，玩家看不清发生了什么。 在慢速机器上，游戏慢的跟在爬一样。 如果游戏的一部分有大量内容或者做了很多AI或物理运算，游戏就会慢一些。

休息一下

我们看看增加一个简单的小修复如何。 假设你想要你的游戏以60FPS运行。这样每帧大约16毫秒。 只要你用少于这个时长进行游戏所有的处理和渲染，就可以以稳定的帧率运行。 你需要做的就是处理这一帧然后*等待*，直到处理下一帧的时候，就像这样：



代码看上去像这样：

1000 毫秒 / 帧率 = 毫秒每帧.

```
while (true)
{
  double start = getCurrentTime();
  processInput();
  update();
  render();

  sleep(start + MS_PER_FRAME - getCurrentTime());
}
```

如果它很快的处理完一帧，这里的`sleep()`保证了游戏不会运行太*快*。 如果你的游戏运行太*慢*，这无济于事。 如果需要超过16ms来更新并渲染一帧，休眠的时间就变成了*负的*。 如果计算机能回退时间，很多事情就很容易了，但是它不能。

相反，游戏变慢了。 可以通过每帧少做些工作来解决这个问题——减少物理效果和绚丽光影，或者把AI变笨。 但是这影响了那些有快速机器的玩家的游玩体验。

一小步，一大步

让我们尝试一些更加复杂的东西。我们拥有的问题基本上是：

1. 每次更新将游戏时间推动一个固定量。
2. 这消耗一定量的*真实*时间来处理它。

如果第二步消耗的时间超过第一步，游戏就变慢了。 如果它需要超过16ms来推动游戏时间16ms，那它永远也跟不上。 但是如果一步中推动游戏时间*超过*16ms，那我们可以减少更新频率，就可以跟得上了。

接着的思路是基于上帧到现在有多少*真实*时间流逝来选择前进的时间。 这一帧花费的时间越长，游戏的间隔越大。 它总能跟上真实时间，因为它走的步子越来越大。 有人称之为变*化的*或者*流动的*时间间隔。它看上去像是：

```
double lastTime = getCurrentTime();
while (true)
{
  double current = getCurrentTime();
  double elapsed = current - lastTime;
  processInput();
  update(elapsed);
  render();
  lastTime = current;
}
```

每一帧，我们计算上次游戏更新到现在有多少*真实*时间过去了（即变量`elapsed`）。 当我们更新游戏状态时将其传入。 然后游戏引擎让游戏世界推进一定的时间量。

假设有一颗子弹跨过屏幕。 使用固定的时间间隔，在每一帧中，你根据它的速度移动它。使用变化的时间间隔，你*根据过去的时间拉伸速度*。 随着时间间隔增加，子弹在每帧间移动的更远。 无论是二十个快的小间隔还是四个慢的大间隔，子弹在*真实*时间里移动*同样多*的距离。 这看上去成功了：

- 游戏在不同的硬件上以固定的速度运行。

- 使用高端机器的玩家获得了更流畅的游戏体验。

但是，悲剧，这里有一个严重的问题： 游戏不再是确定的了，也不再稳定。 这是我们给自己挖的一个坑：

“确定的”代表每次你运行程序，如果给了它同样的输入，就获得同样的输出。 可以想得到，在确定的程序中追踪漏洞更容易——一旦找到造成漏洞的输入，每次你都能重现之。

计算机本身是确定的；它们机械地执行程序。 在纷乱的真实世界加入时，非确定性出现了。 例如，网络，系统时钟，和线程调度都依赖于超出程序控制的外部世界。

假设我们有个双人联网游戏，Fred的游戏机是台性能猛兽，而George正在使用他祖母的老爷机。 前面提到的子弹在他们的屏幕上飞行。 在Fred的机器上，游戏跑的超级快，每个时间间隔都很小。 比如，我们塞了50帧在子弹穿过屏幕的那一秒。 可怜的George的机器只能塞进大约5帧。

这就意味着在Fred的机器上，物理引擎每秒更新50次位置，但是George的只更新5次。 大多数游戏使用浮点数，它们有*舍入误差*。 每次你将两个浮点数加在一起，获得的结果就会有点偏差。 Fred的机器做了10倍的操作，所以他的误差要比George的更大。 *同样* 的子弹最终在他们的机器上到了*不同的位置*。

这是使用变化时间可引起的问题之一，还有更多问题呢。 为了实时运行，游戏物理引擎做的是实际机制法则的近似。 为了避免飞天遁地，物理引擎添加了阻尼。 这个阻尼运算被小心地安排成以固定的时间间隔运行。 改变了它，物理就不再稳定。

“飞天遁地”在这里使用的是它的字面意思。当物理引擎卡住，对象获得了完全错误的速度，就会飞到天上或者掉入地底。

这种不稳定性太糟了，这个例子在这里的唯一原因是作为警示寓言，引领我们到更好的东西……

追逐时间

游戏中渲染通常*不会*被动态时间间隔影响到。 由于渲染引擎表现的是时间上的一瞬间，它不会计算上次到现在过了多久。 它只是将当前事物渲染在所在的地方。

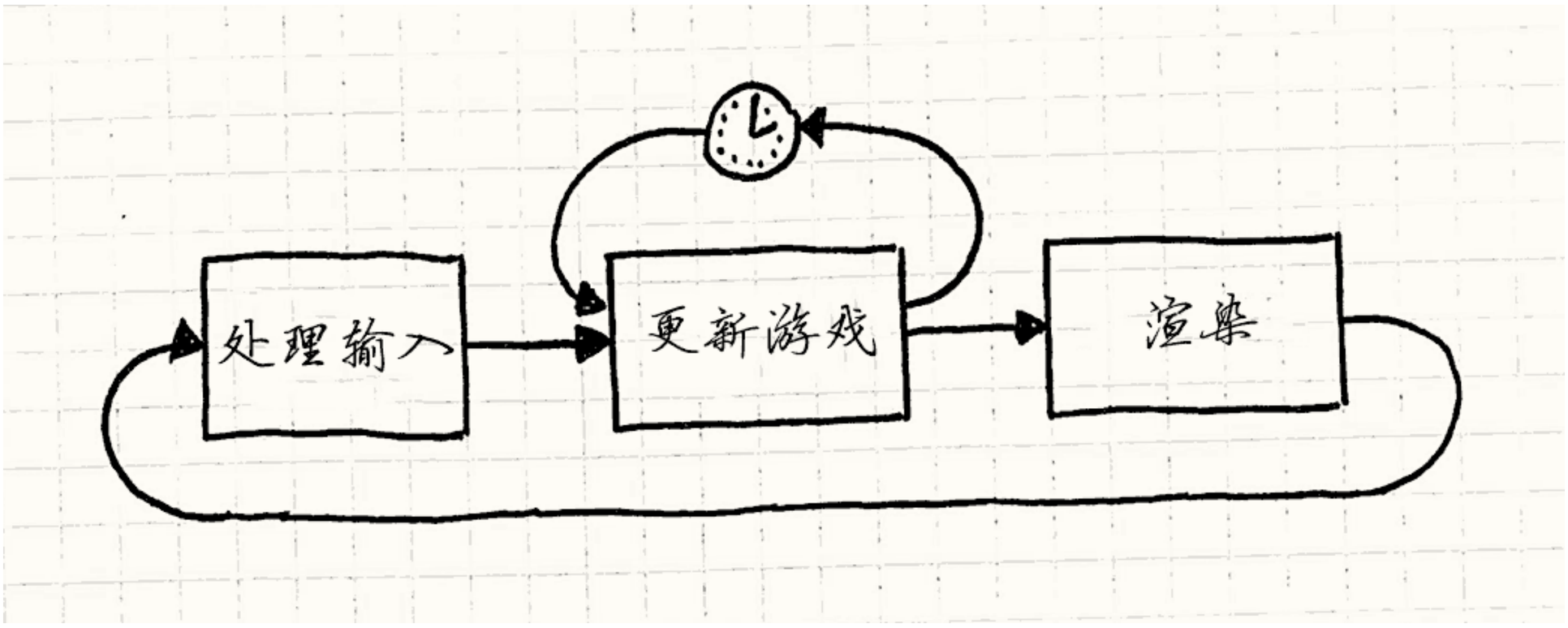
这或多或少是成立的。像动态模糊的东西会被时间间隔影响，但如果有一点延迟，玩家通常也不会注意到。

我们可以利用这点。 以固定的时间间隔*更新*游戏，因为这让所有事情变得简单，物理和AI也更加稳定。 但是我们允许灵活调整*渲染*的时刻，释放一些处理器时间。

它像这样运作：自上一次游戏循环过去了一定量的真实时间。 需要为游戏的“当前时间”模拟推进相同长度的时间，以追上玩家的时间。 我们使用一*系列*的*固定*时间步长。 代码大致如下：

```
double previous = getCurrentTime();
double lag = 0.0;
while (true)
{
  double current = getCurrentTime();
  double elapsed = current - previous;
  previous = current;
  lag += elapsed;

  processInput();

  while (lag >= MS_PER_UPDATE)
  {
    update();
    lag -= MS_PER_UPDATE;
  }

  render();
}
```

这里有几个部分。 在每帧的开始，根据过去了多少真实的时间，更新`lag`。 这变量表明了游戏世界时钟比真实世界落后了多少，然后我们使用一个固定时间步长的内部循环进行追赶。 一旦我们追上真实时间，我们就渲染然后开始新一轮循环。 你可以将其画成这样：



注意这里的时间步长不是*视觉上的*帧率了。 `MS_PER_UPDATE`只是我们更新游戏的*间隔*。 这个间隔越短，就需要越多的处理次数来追上真实时间。 它越长，游戏抖动的越厉害。 理想上，你想要它足够短，通常快过60FPS，这样游戏在高速机器上会有高效的表现。

但是小心不要把它整得*太短了*。 你需要保证即使在最慢的机器上，这个时间步长也超过处理一次`update()`的时间。 否则，你的游戏就跟不上现实时间了。

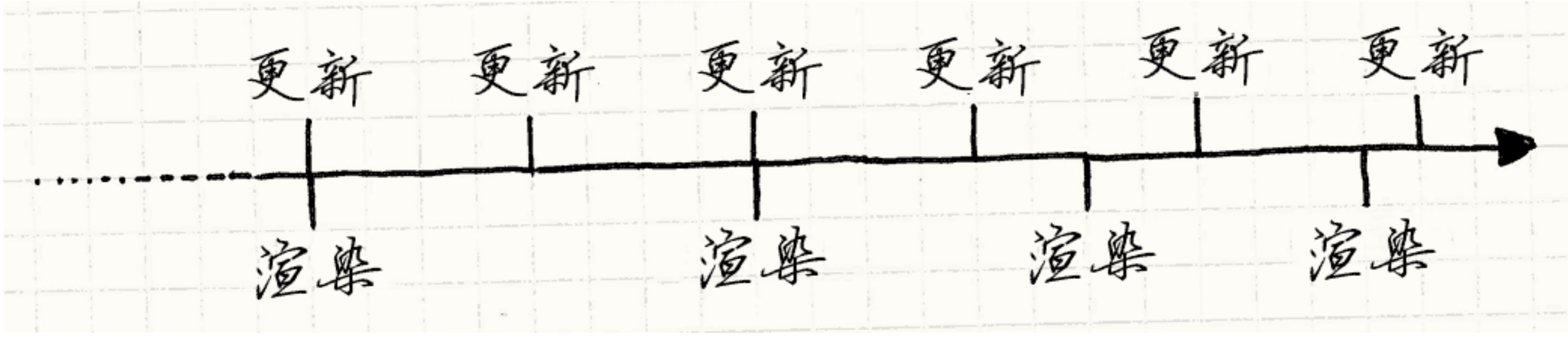
我不会详谈这个，但你可以通过限定内层循环最大次数来保证这一点。 游戏会变慢，但是比完全卡死要好。

幸运的是，我们给自己了一些喘息的空间。 技巧在于我们将*渲染拉出了更新循环*。 这释放了一大块CPU时间。 最终结果是游戏以固定时间步长*模拟*，该时间步长与硬件不相关。 只是使用低端硬件的玩家*看到的*会有抖动。

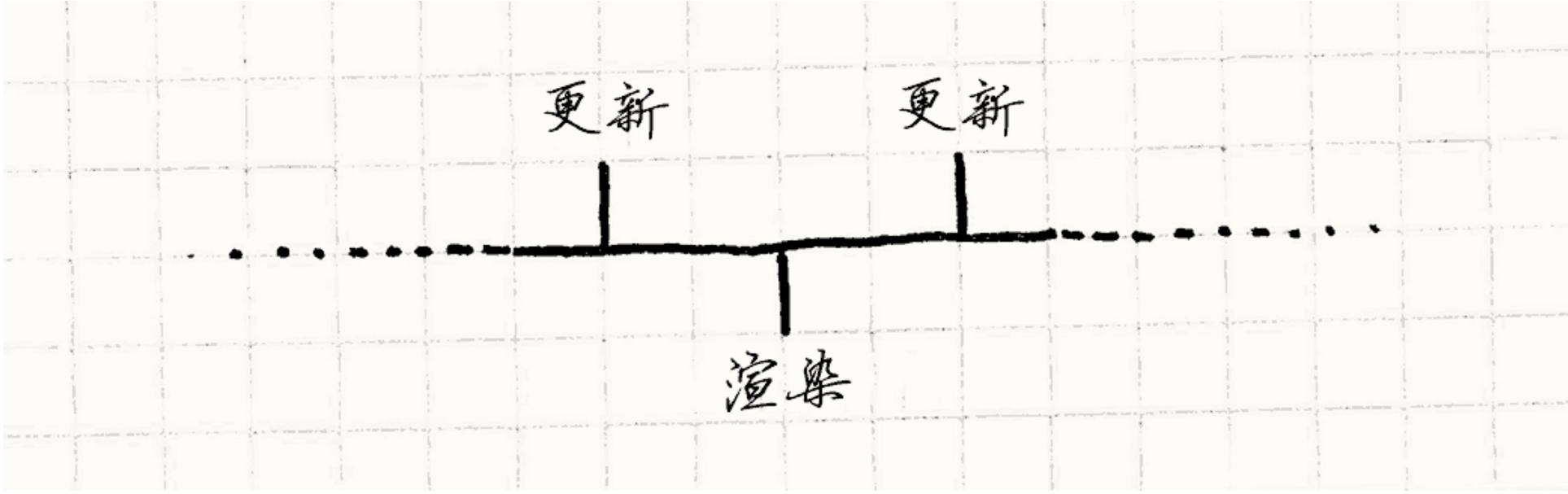
卡在中间

我们还剩一个问题，就是剩下的延迟。 以固定的时间步长更新游戏，在任意时刻渲染。 这就意味着从玩家的角度看，游戏经常在两次更新之间时显示。

这是时间线：



就像你看到的那样，我们以紧凑固定的时间步长进行更新。 同时，我们在任何可能的时候渲染。 它比更新发生的要少，而且也不稳定。 两者都没问题。糟糕的是，我们不总能在正确的时间点渲染。 看看第三次渲染时间。它发生在两次更新之间。



想象一颗子弹飞过屏幕。第一次更新时，它在左边。 第二次更新将它移到了右边。 这个游戏在两次更新之间的时间点渲染，所以玩家期望看到子弹在屏幕的中间。 而现在的实现中，它还在左边。这意味着看上去移动发生了卡顿。

方便的是，我们*实际*知道渲染时距离两次更新的时间：它被存储在`lag`中。 我们在`lag`比更新时间间隔小时，而不是`lag`是零时，跳出循环进行渲染。 `lag`的剩余量？那就是到下一帧的时间。 n we go to render, we'll pass that in:

当我们要渲染时，我们将它传入：

```
render(lag / MS_PER_UPDATE);
```

我们在这里除以`MS_PER_UPDATE`来*归一化*值。 不管更新的时间步长是多少，传给`render()`的值总在0（恰巧在前一帧）到1.0（恰巧在下一帧）之间。 这样，渲染引擎不必担心帧率。它只需处理0到1的值。

渲染器知道每个游戏对象*以及它当前的速度*。 假设子弹在屏幕左边20像素的地方，正在以400像素每帧的速度向右移动。 如果在两帧正中渲染，我们会给`render()`传0.5。 它绘制了半帧之前的图形，在220像素，啊哈，平滑的移动。

当然，也许这种推断是错误的。 在我们计算下一帧时，也许会发现子弹碰撞到另一障碍，或者减速，又或者别的什么。 我们只是在上一帧位置和我们*认为的*下一帧位置之间插值。但只有在完成物理和AI更新后，我们才能知道真正的位置。

所以推断有猜测的成分，有时候结果是错误的。 但是，幸运的，这种修正通常不可感知。最起码，比你不使用推断导致的卡顿更不明显。

设计决策

虽然这章我讲了很多，但是有更多的东西我没讲。 一旦你考虑显示刷新频率的同步，多线程，多GPU，真正的游戏循环会变得更加复杂。 即使在高层，这里还有一些问题你需要回答：

拥有游戏循环的是你，还是平台?

这个选择通常已经是平台决定的。 如果你在做浏览器中的游戏，很可能你*不能*编写自己的经典游戏循环。 浏览器本身的事件驱动机制阻碍了这一点。 类似的，如果你使用现存的游戏引擎，你很可能依赖于它的游戏循环而不是自己写一个。

- **使用平台的事件循环：**
    - *简单*。你不必担心编写和优化自己的游戏核心循环。
    - *平台友好*。 你不必明确地给平台一段时间让它处理它自己的事件，不必缓存事件，不必管理任何平台输入模型和你的不匹配之处。
    - *你失去了对时间的控制*。 平台会在它方便时调用代码。 如果这不如你想要的那样平滑或者频繁，太糟了。 更糟的是，大多数应用的事件循环并未为游戏设计，通常*是*又慢又卡顿。
- **使用游戏引擎的循环：**
    - *不必自己编写*。 编写游戏循环非常需要技巧。 由于是每帧都要执行的核心代码，小小的漏洞或者性能问题就对游戏有巨大的影响。 稳固的游戏循环是使用现有引擎的原因之一。
    - *不必自己编写*。 当然，硬币的另一面是，如果引擎无法满足你*真正的*需求，你也没法获得控制权。
- **自己写：**
    - *完全的控制*。 你可以做任何想做的事情。你可以为游戏的需求订制开发。
    - *你需要与平台交互*。 应用框架和操作系统通常需要时间片去处理自己的事件和其他工作。 如果你拥有应用的核心循环，平台就没有这些时间片了。 你得显式定期检查，保证框架没有挂起或者混乱。

如何管理能量消耗?

在五年前这还不是问题。 游戏运行在插到插座上的机器上或者专用的手持设备上。 但是随着智能手机，笔记本以及移动游戏的发展，现在需要关注这个问题了。 画面绚丽，但会耗干三十分钟前充的电，并将手机变成空间加热器的游戏，可不能让人开心。

现在，你需要考虑的不仅仅是让游戏看上去很棒，同时也要尽可能少的使用CPU。 你需要设置一个性能的*上限*：完成一帧之内所需的工作后，让CPU休眠。

- **尽可能快的运行：**

  这是PC游戏的常态（即使越来越多的人在笔记本上运行游戏）。 游戏循环永远不会显式告诉系统休眠。相反，空闲的循环被划在提升FPS或者图像显示效果上了。

  这会给你最好的游戏体验。 但是，也会尽可能多的使用电量。如果玩家在笔记本电脑上游玩，他们就得到了一个很好的加热器。

- **固定帧率**

  移动游戏更加注意游戏的体验质量，而不是最大化图像画质。 很多这种游戏都会设置最大帧率（通常是30或60FPS）。 如果游戏循环在分配的时间片消耗完之前完成，剩余的时间它会休眠。

  这给了玩家“足够好的”游戏体验，也让电池轻松了一点。

你如何控制游戏速度?

游戏循环有两个关键部分：不阻塞用户输入和自适应的帧时间步长。 输入部分很直观。关键在于你如何处理时间。 这里有数不尽的游戏可运行的平台， 每个游戏都需要在其中一些平台上运行。 如何适应平台变化就是关键。

创作游戏看来是人类的天性，因为每当我们建构可以计算的机器，首先做的就是在上面编游戏。 PDP-1是一个仅有4096字内存的2kHz机器，但是Steve Russell和他的朋友还是在上面创建了Spacewar!。

- **固定时间步长，没有同步：**

  见我们第一个样例中的代码。你只需尽可能快地运行游戏。

  - *简单*。这是主要的（好吧，唯一的）好处。
  - *游戏速度直接受到硬件和游戏复杂度影响*。 主要的缺点是，如果有所变化，会直接影响游戏速度。游戏速度与游戏循环紧密相关。

- **固定时间步长，有同步：**

  对复杂度控制的下一步是使用固定的时间间隔，但在循环的末尾增加同步点，保证游戏不会运行得过快。

  - *还是很简单。* 这比过于简单不可行的例子只多了一行代码。 在多数游戏循环中，你可能*总*需要做一些同步。 你可能需要双缓冲图形并将缓冲块与更新显示的频率同步。
  - *电量友好。* 这对移动游戏至关重要。你不想消耗不必要的电量。 通过简单的休眠几个毫秒而不是试图每帧塞入更多的处理，你节约了电量。
  - *游戏不会运行的太快。* 这解决了固定循环速度的一半问题。
  - *游戏可能运行的太慢。* 如果花了太多时间更新和渲染一帧，播放也会减缓。 因为这种方案没有分离更新和渲染，它比更高级的方案更容易遇到这点。 没法扔掉*渲染*帧来追上真实时间，游戏本身会变慢。

- **动态时间步长：**

  我把这个方案放在这里作为问题的解决办法之一，附加警告：大多数我认识的游戏开发者反对它。 不过记住*为什么*反对它是很有价值的。

  - *能适应并调整，避免运行得太快或者太慢。* 如果游戏不能追上真实时间，它用越来越长的时间步长更新，直到追上。
  - *让游戏不确定而且不稳定。* 这是真正的问题，当然。在物理和网络部分使用动态时间步长会遇见更多的困难。

- **固定更新时间步长，动态渲染：**

  在示例代码中提到的最后一个选项是最复杂的，但是也是最有适应性的。 它以固定时间步长更新，但是如果需要赶上玩家的时间，可以扔掉一些*渲染*帧。

  - *能适应并调整，避免运行得太快或者太慢。* 只要能实时*更新*，游戏状态就不会落后于真实时间。如果玩家用高端机器，它会回以更平滑的游戏体验。
  - *更复杂。* 主要负面问题是需要在实现中写更多东西。 你需要将更新的时间步长调整的尽可能小来适应高端机，同时不至于在低端机上太慢。

参见

- 关于游戏循环的经典文章是Glenn Fiedler的”Fix Your Timestep“。如果没有这篇文章，这章就不会是这个样子。
- Witters关于game loops的文章也值得阅读。
- Unity框架有一个复杂的游戏循环，细节在这里有详尽的解释。

更新方法

游戏设计模式Sequencing Patterns

意图

通过每次处理一帧的行为模拟一系列独立对象。

动机

玩家操作强大的女武神完成考验：从死亡巫王的栖骨之处偷走华丽的珠宝。 她尝试接近巫王华丽的地宫门口，然后遇到了……*啥也没遇到*。 没有诅咒雕像向她发射闪电，没有不死战士巡逻入口。 她直捣黄龙，拿走了珠宝。游戏结束。你赢了。

好吧，这可不行。

地宫需要守卫——一些英雄可以杀死的敌人。 首先，我们需要一个骷髅战士在门口前后移动巡逻。 如果无视任何关于游戏编程的知识， 让骷髅蹒跚着来回移动的最简单的代码大概是这样的：

如果巫王想表现得更加智慧，它应创造一些仍有脑子的东西。

```
while (true)
{
  // 向右巡逻
  for (double x = 0; x < 100; x++)
  {
    skeleton.setX(x);
  }

  // 向左巡逻
  for (double x = 100; x > 0; x--)
  {
    skeleton.setX(x);
  }
}
```

这里的问题，当然，是骷髅来回打转，可玩家永远看不到。 程序锁死在一个无限循环，那可不是有趣的游戏体验。 我们事实上想要的是骷髅*每帧*移动一步。

我们得移除这些循环，依赖外层游戏循环来迭代。 这保证了在卫士来回巡逻时，游戏能响应玩家的输入并进行渲染。如下：

当然，游戏循环是本书的另一个章节。

```
Entity skeleton;
bool patrollingLeft = false;
double x = 0;

// 游戏主循环
while (true)
{
  if (patrollingLeft)
  {
    x--;
    if (x == 0) patrollingLeft = false;
  }
  else
  {
    x++;
    if (x == 100) patrollingLeft = true;
  }

  skeleton.setX(x);

  // 处理用户输入并渲染游戏……
}
```

在这里前后两个版本展示了代码是如何变得复杂的。 左右巡逻需要两个简单的`for`循环。通过指定哪个循环在执行，我们追踪了骷髅在移向哪个方向。 现在我们每帧跳出到外层的游戏循环，然后在跳回继续我们之前所做的，我们使用`patrollingLeft`显式地追踪了方向。

但或多或少这能行，所以我们继续。 一堆无脑的骨头不会对你的女武神提出太多挑战， 下一个我们添加的是魔法雕像。它们一直会向她发射闪电球，这样可让她保持移动。

继续我们的“用最简单的方式编码”的风格，我们得到了：

```
// 骷髅的变量……
Entity leftStatue;
Entity rightStatue;
int leftStatueFrames = 0;
int rightStatueFrames = 0;

// 游戏主循环：
while (true)
{
  // 骷髅的代码……

  if (++leftStatueFrames == 90)
  {
    leftStatueFrames = 0;
    leftStatue.shootLightning();
  }

  if (++rightStatueFrames == 80)
  {
    rightStatueFrames = 0;
    rightStatue.shootLightning();
  }

  // 处理用户输入，渲染游戏
}
```

你会发现这代码渐渐滑向失控。 变量数目不断增长，代码都在游戏循环中，每段代码处理一个特殊的游戏实体。 为了同时访问并运行它们，我们将它们的代码混杂在了一起。

一旦能用“混杂”一词描述你的架构，你就有麻烦了。

你也许已经猜到了修复这个所用的简单模式了： *每个游戏实体应该封装它自己的行为。* 这保持了游戏循环的整洁，便于添加和移除实体。

为了做到这点需要*抽象层*，我们通过定义抽象的`update()`方法来完成。 游戏循环管理对象的集合，但是不知道对象的具体类型。 它只知道这些对象可以被更新。 这样，每个对象的行为与游戏循环分离，与其他对象分离。

每一帧，游戏循环遍历集合，在每个对象上调用`update()`。 这给了我们在每帧上更新一次行为的机会。 在所有对象上每帧调用它，对象就能同时行动。

死抠细节的人会在这点上揪着我不放，是的，它们没有*真的同步*。 当一个对象更新时，其他的都不在更新中。 我们等会再说这点。

游戏循环维护动态的对象集合，所以从关卡添加和移除对象是很容易的——只需要将它们从集合中添加和移除。 不必再用硬编码，我们甚至可以用数据文件构成这个关卡，那正是我们关卡设计者需要的。

模式

游戏世界管理**对象集合**。 每个对象实现一个**更新方法**模拟对象在**一帧**内的行为。每一帧，游戏循环更新集合中的每一个对象。

何时使用

如果游戏循环模式是切片面包， 那么更新方法模式就是它的奶油。 很多玩家交互的游戏实体都以这样或那样的方式实现了这个模式。 如果游戏有太空陆战队，火龙，火星人，鬼魂或者运动员，很有可能它使用了这个模式。

但是如果游戏更加抽象，移动部分不太像活动的角色而更加像棋盘上的棋子， 这个模式通常就不适用了。 在棋类游戏中，你不需要同时模拟所有的部分， 你可能也不需要告诉棋子每帧都更新它们自己。

你也许不需要每帧更新它们的*行为*，但即使是棋类游戏， 你可能也需要每帧更新*动画*。 这个设计模式也可以帮到你。

更新方法适应以下情况：

- 你的游戏有很多对象或系统需要同时运行。
- 每个对象的行为都与其他的大部分独立。
- 对象需要跟着时间进行模拟。

记住

这个模式很简单，所以没有太多值得发现的惊喜。当然，每行代码还是有利有弊。

将代码划分到一帧帧中会让它更复杂

当你比较前面两块代码时，第二块看上去更加复杂。 两者都只是让骷髅守卫来回移动，但与此同时，第二块代码将控制权交给了游戏循环的一帧帧中。

几乎 这个改变是游戏循环处理用户输入，渲染等几乎必须要注意的事项，所以第一个例子不大实用。 但是很有必要记住，将你的行为切片会增加很高的复杂性。

我在这里说几乎是因为有时候鱼和熊掌可以兼得。 你可以直接为对象编码而不进行返回，保持很多对象同时运行并与游戏循环保持协调。

你需要的是允许你同时拥有多个“线程”执行的系统。 如果对象的代码可以在执行中暂停和继续，而不是总得*返回*，你可以用更加命令式的方式编码。

真实的线程太过重量级而不能这么做， 但如果你的语言支持轻量协同架构比如generators，coroutines或者fibers，那你也许可以使用它们。

字节码模式是另一个在应用层创建多个线程执行的方法。

当离开每帧时，你需要存储状态，以备将来继续。

在第一个示例代码中，我们不需要用任何变量表明守卫在向左还是向右移动。 这显式的依赖于哪块代码正在运行。

当我们将其变为一次一帧的形式，我们需要创建`patrollingLeft`变量来追踪行走的方向。当从代码中返回时，就丢失了行走的方向，所以为了下帧继续，我们需要显式存储足够的信息。

状态模式通常可以在这里帮忙。 状态机在游戏中频繁出现的部分原因是（就像名字暗示的），它能在你离开时为你存储各种你需要的状态。

对象逐帧模拟，但并非真的同步

在这个模式中，游戏遍历对象集合，更新每一个对象。 在`update()`调用中，大多数对象都能够接触到游戏世界的其他部分， 包括现在正在更新的其他对象。这就意味着你更新对象的*顺序*至关重要。

如果对象更新列表中，A在B之前，当A更新时，它会看到B之前的状态。 但是当B更新时，由于A已经在这帧更新了，它会看见A的*新*状态。 哪怕按照玩家的视角，所有对象都是同时运转的，游戏的核心还是回合制的。 只是完整的“回合”只有一帧那么长。

如果，由于某些原因，你决定*不*让游戏像这样顺序更新，你需要双缓冲模式。 那么AB更新的顺序就没有关系了，因为*双方*都会看对方之前那帧的状态。

当关注游戏逻辑时，这通常是件好事。 同时更新所有对象将把你带到一些不愉快的语义角落。 想象如果国际象棋中，黑白双方同时移动会发生什么。 双方都试图同时往同一个空格子中放置棋子。这怎么解决?

序列更新解决了这点——每次更新都让游戏世界从一个合法状态增量更新到下一个，不会出现引发歧义而需要协调的部分。

这对在线游戏也有用，因为你有了可以在网上发送的行动指令序列。

在更新时修改对象列表需小心

当你使用这个模式时，很多游戏行为在更新方法中纠缠在一起。 这些行为通常包括增加和删除可更新对象。

举个例子，假设骷髅守卫被杀死时掉落物品。 使用新对象，你通常可以将其增加到列表尾部，而不引起任何问题。 你会继续遍历这张链表，最终找到新的那个，然后也更新了它。

但这确实表明新对象在它产生的那帧就有机会活动，甚至有可能在玩家看到它之前。 如果你不想发生那种情况，简单的修复方法就是在游戏循环中缓存列表对象的数目，然后只更新那么多数目的对象就停止：

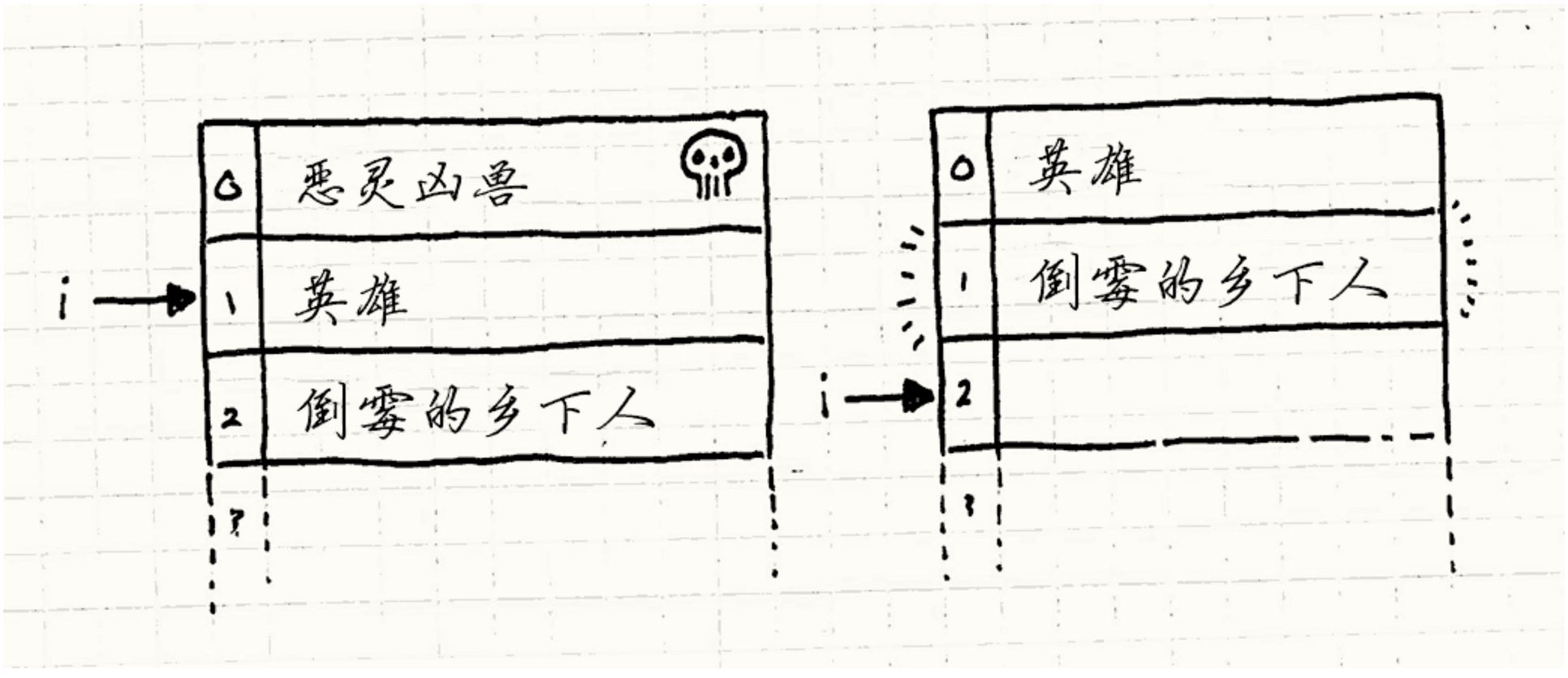
```
int numObjectsThisTurn = numObjects_;
for (int i = 0; i < numObjectsThisTurn; i++)
{
  objects_[i]->update();
}
```

这里，`objects_`是可更新游戏对象的数组，而`numObjects_`是数组的长度。 当添加新对象时，这个数组长度变量就增加。 在循环的一开始，我们在`numObjectsThisTurn`中存储数组的长度， 这样在这帧的遍历循环会停在新添加的对象之前。

一个更麻烦的问题是在遍历时*移除*对象。 你击败了邪恶的野兽，现在它需要被移出对象列表。 如果它正好位于你当前更新对象之前，你会意外地跳过一个对象：

```
for (int i = 0; i < numObjects_; i++)
{
  objects_[i]->update();
}
```

这个简单的循环通过增加索引值来遍历每个对象。 下图的左侧展示了在我们更新英雄时，数组看上去是什么样的：



我们在更新她时，索引值`i`是1。 邪恶野兽被她杀了，因此需要从数组移除。 英雄移到了位置0，倒霉的乡下人移到了位置1。 在更新英雄之后，`i`增加到了2。 就像你在右图看到的，倒霉的乡下人被跳过了，没有更新。

一种简单的解决方案是在更新时*从后往前*遍历列表。 这种方式只会移动已经被更新的对象。

一种解决方案是小心地移除对象，任何对象被移除时，更新索引。 另一种是在遍历完列表后再移除对象。 将对象标为“死亡”，但是把它放在那里。 在更新时跳过任何死亡的对象。 然后，在完成遍历后，遍历列表并删除尸体。

如果在更新循环中有多个线程处理对象， 那么你可能更喜欢推迟任何修改，避免更新时同步线程的开销。

示例代码。

这个模式太直观了，代码几乎只是在重复说明要点。 这不意味着这个模式没*有用*。它*因为*简单而有用：这是一个无需装饰的干净解决方案。

但是为了让事情更具体些，让我们看看一个基础的实现。 我们会从代表骷髅和雕像的`Entity`类开始：

```
class Entity
{
public:
  Entity()
  : x_(0), y_(0)
  {}

  virtual ~Entity() {}
  virtual void update() = 0;

  double x() const { return x_; }
  double y() const { return y_; }

  void setX(double x) { x_ = x; }
  void setY(double y) { y_ = y; }

private:
  double x_;
  double y_;
};
```

我在这里只呈现了我们后面所需东西的最小集合。 可以推断在真实代码中，会有很多图形和物理这样的其他东西。 上面这部分代码最重要的部分是它有抽象的`update()`方法。

游戏管理实体的集合。在我们的示例中，我会把它放在一个代表游戏世界的类中。

```
class World
{
public:
  World()
  : numEntities_(0)
  {}

  void gameLoop();

private:
  Entity* entities_[MAX_ENTITIES];
  int numEntities_;
};
```

在真实世界程序中，你可能真的要使用集合类，我在这里使用数组来保持简单

现在，万事俱备，游戏通过每帧更新每个实体来实现模式：

```
void World::gameLoop()
{
  while (true)
  {
    // 处理用户输入……

    // 更新每个实体
    for (int i = 0; i < numEntities_; i++)
    {
      entities_[i]->update();
    }

    // 物理和渲染……
  }
}
```

正如其名，这是游戏循环模式的一个例子。

子类化实体？！

有很多读者刚刚起了鸡皮疙瘩，因为我在`Entity`主类中使用继承来定义不同的行为。 如果你在这里还没有看出问题，我会提供一些线索。

当游戏业界从6502汇编代码和VBLANKs转向面向对象的语言时， 开发者陷入了对软件架构的狂热之中。 其中之一就是使用继承。他们建立了遮天蔽日的高耸的拜占庭式对象层次。

最终证明这是个糟点子，没人可以不拆解它们来管理庞杂的对象层次。 哪怕在1994年的GoF都知道这点，并写道：

> 多用“对象组合”，而非“类继承”。

只在你我间聊聊，我认为这已经是一朝被蛇咬十年怕井绳了。 我通常避免使用它，但教条地不用和教条地使用一样糟。 你可以适度使用，不必完全禁用。

当游戏业界都明白了这一点，解决方案是使用组件模式。 使用它，`update()`是实体的*组件*而不是在`Entity`中。 这让你避开了为了定义和重用行为而创建实体所需的复杂类继承层次。相反，你只需混合和组装组件。

如果我真正在做游戏，我也许也会那么做。 但是这章不是关于组件的， 而是关于`update()`方法，最简单，最少牵连其他部分的介绍方法， 就是把更新方法放在`Entity`中然后创建一些子类。

组件模式在这里。

定义实体

好了，回到任务中。 我们原先的动机是定义巡逻的骷髅守卫和释放闪电的魔法雕像。 让我们从我们的骷髅朋友开始吧。 为了定义它的巡逻行为，我们定义恰当地实现了`update()`的新实体：

```
class Skeleton : public Entity
{
public:
  Skeleton()
  : patrollingLeft_(false)
  {}

  virtual void update()
  {
    if (patrollingLeft_)
    {
      setX(x() - 1);
      if (x() == 0) patrollingLeft_ = false;
    }
    else
    {
      setX(x() + 1);
      if (x() == 100) patrollingLeft_ = true;
    }
  }

private:
  bool patrollingLeft_;
};
```

如你所见，几乎就是从早先的游戏循环中剪切代码，然后粘贴到`Skeleton`的`update()`方法中。 唯一的小小不同是`patrollingLeft_`被定义为字段而不是本地变量。 通过这种方式，它的值在`update()`两次调用间保持不变。

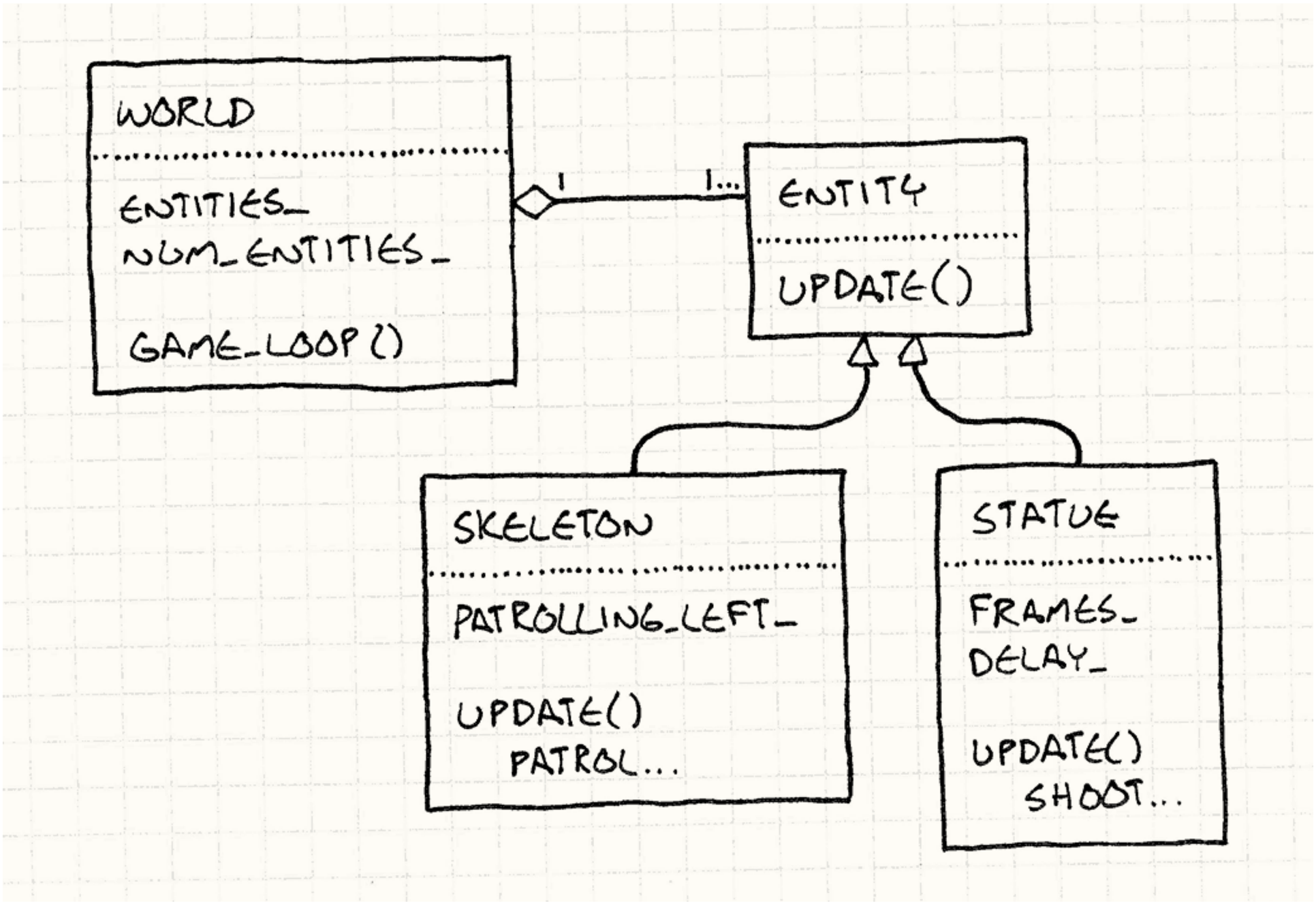
让我们对雕像如法炮制：

```
class Statue : public Entity
{
public:
  Statue(int delay)
  : frames_(0),
    delay_(delay)
  {}

  virtual void update()
  {
    if (++frames_ == delay_)
    {
      shootLightning();

      // 重置计时器
      frames_ = 0;
    }
  }

private:
  int frames_;
  int delay_;

  void shootLightning()
  {
    // 火光效果……
  }
};
```

又一次，大部分改动是将代码从游戏循环中移动到类中，然后重命名一些东西。 但是，在这个例子中，我们真的让代码库变简单了。 先前讨厌的命令式代码中，存在存储每个雕像的帧计数器和开火的速率的分散的本地变量。

现在那些都被移动到了`Statue`类中，你可以想创建多少就创建多少实例了， 每个实例都有它自己的小计时器。 这是这章背后的真实动机——现在为游戏世界增加新实体会更加简单， 因为每个实体都带来了它需要的全部东西。

这个模式让我们分离了游戏世界的*构建*和*实现*。 这同样能让我们灵活地使用分散的数据文件或关卡编辑器来构建游戏世界。



还有人关心UML吗？如果还有，那就是我们刚刚建的。

Passing time

传递时间

这是模式的关键，但是我只对常用的部分进行了细化。 到目前为止，我们假设每次对`update()`的调用都推动游戏世界前进一个固定的时间。

我更喜欢那样，但是很多游戏使用*可变时间步长*。 在那种情况下，每次游戏循环推进的时间长度或长或短， 具体取决于它需要多长时间处理和渲染前一帧。

游戏循环一章讨论了更多关于固定和可变时间步长的优劣。

这意味着每次`update()`调用都需要知道虚拟的时钟转动了多少， 所以你经常可以看到传入消逝的时间。 举个例子，我们可以让骷髅卫士像这样处理变化的时间步长：

```
void Skeleton::update(double elapsed)
{
  if (patrollingLeft_)
  {
    x -= elapsed;
    if (x <= 0)
    {
      patrollingLeft_ = false;
      x = -x;
    }
  }
  else
  {
    x += elapsed;
    if (x >= 100)
    {
      patrollingLeft_ = true;
      x = 100 - (x - 100);
    }
  }
}
```

现在，骷髅卫士移动的距离随着消逝时间的增长而增长。 也可以看出，处理变化时间步长需要的额外复杂度。 如果一次需要更新的时间步长过长，骷髅卫士也许就超过了其巡逻的范围，因此需要小心的处理。

设计决策

在这样简单的模式中，没有太多的调控之处，但是这里仍有两个你需要决策的地方：

更新方法在哪个类中?

最明显和最重要的决策就是决定将`update()`放在哪个类中。

- **实体类中：**

  如果你已经有实体类了，这是最简单的选项， 因为这不会带来额外的类。如果你需要的实体种类不多，这也许可行，但是业界已经逐渐远离这种做法了。

  当类的种类很多时，一有新行为就建`Entity`子类来实现是痛苦的。 当你最终发现你想要用单一继承的方法重用代码时，你就卡住了。

- **组件类：**

  如果你已经使用了组件模式，你知道这个该怎么做。 这让每个组件独立更新它自己。 更新方法用了同样的方法解耦游戏中的实体，组件让你进一步解耦了*单一实体中的各部分*。 渲染，物理，AI都可以自顾自了。

- **委托类：**

  还可将类的部分行为委托给其他的对象。 状态模式可以这样做，你可以通过改变它委托的对象来改变它的行为。 类型对象模式也这样做了，这样你可以在同“种”实体间分享行为。

  如果你使用了这些模式，将`update()`放在委托类中是很自然的。 在那种情况下，也许主类中仍有`update()`方法，但是它不是虚方法，可以简单的委托给委托对象。就像这样：

  ```
  void Entity::update()
  {
    // 转发给状态对象
    state_->update();
  }
  ```

  这样做让你改变委托对象来定义新行为。就像使用组件，这给了你无须定义全新的子类就能改变行为的灵活性。

如何处理隐藏对象?

游戏中的对象，不管什么原因，可能暂时无需更新。 它们可能是停用了，或者超出了屏幕，或者还没有解锁。 如果状态中的这种对象很多，每帧遍历它们却什么都不做是在浪费CPU循环。

一种方法是管理单独的“活动”对象集合，那些存储真正需要更新的对象。 当一个对象停用时，从那个集合中移除它。当它启用时，再把它添回来。 用这种方式，你只需要迭代那些真正需要更新的东西：

- 如果你使用单个包括了所有不活跃对象的集合：
  - *浪费时间*。对于不活跃对象，你要么检查一些“是否启用”的标识，要么调用一些啥都不做的方法。

  检查对象启用与否然后跳过它，不但消耗了CPU循环，还报销了你的数据缓存。 CPU通过从RAM上读取数据到缓存上来优化读取。 这样做是基于刚刚读取内存之后的内存部分很可能等会也会被读取到这个假设。

  当你跳过对象，你可能越过了缓存的尾部，强迫它从缓慢的主存中再取一块。

- 如果你使用单独的集合保存活动对象：
    - *使用了额外的内存管理第二个集合。* 当你需要所有实体时，通常又需要一个巨大的集合。在那种情况下，这集合是多余的。 在速度比内存要求更高的时候（通常如此），这取舍仍是值得的。

    另一个权衡后的选择是使用两个集合，除了活动对象集合的另一个集合只包含*不活跃*实体而不是全部实体。

    - *得保持集合同步。* 当对象创建或完全销毁时（不是暂时停用），你得修改全部对象集合和活跃对象集合。

方法选择的度量标准是不活跃对象的可能数量。 数量越多，用分离的集合，避免在核心游戏循环中用到它们就更有用。

参见

- 这个模式，以及游戏循环模式和组件模式，是构建游戏引擎核心的三位一体。
- 当你关注在每帧中更新实体或组件的缓存性能时，数据局部性模式可以让它跑到更快。
- Unity框架在多个类中使用了这个模式，包括 `MonoBehaviour`。
- 微软的XNA平台在 `Game` 和 `GameComponent` 类中使用了这个模式。
- Quintus，一个JavaScript游戏引擎在它的主`Sprite`类中使用了这个模式。

行为模式

游戏设计模式

一旦做好游戏设定，挂满了角色和道具，剩下的就是启动场景。 为了完成这点，你需要行为——告诉游戏中每个实体做什么的剧本。

当然，所有代码都是“行为”，并且所有软件都是定义行为， 但在游戏中有所不同的是，行为通常很多。 文字处理器也许有很长的特性清单， 但特性的数量与角色扮演游戏中的居民，物品和任务数量相比，那就相形见绌了。

本章的模式帮助快速定义和完善大量的行为。 类型对象定义行为的类别而无需完成真正的类。 子类沙盒定义各种行为的安全原语。 最先进的是字节码，将行为从代码中拖出，放入数据文件中。

模式

- 字节码
- 子类沙箱
- 类型对象

字节码

游戏设计模式Behavioral Patterns

意图

将行为编码为虚拟机器上的指令，赋予其数据的灵活性。

动机

制作游戏也许很有趣，但绝不容易。 现代游戏的代码库很是庞杂。 主机厂商和应用市场有严格的质量要求， 小小的崩溃漏洞就能阻止游戏发售。

我曾参与制作有六百万行C++代码的游戏。作为对比，控制火星漫游者的软件还没有其一半大小。

与此同时，我们希望榨干平台的最后一点性能。 游戏推动硬件的发展首屈一指，坚持不懈的优化只是为了跟上竞争。

为了保证稳定和性能需求，我们使用如C++这样的重量级编程语言， 它兼容多数硬件的底层结构的同时，还拥有防止漏洞的强类型系统。

我们为此感到自豪，但其亦有代价。 专业程序员需要多年的训练，之后又要对抗代码规模的增长。 构建大型游戏的时间长度在“喝杯咖啡”和 “烤咖啡豆，手磨咖啡豆，弄杯espresso，打奶泡，在拿铁咖啡里拉花。”之间。

除开这些挑战，游戏多了个苛刻的限制：“乐趣”。 玩家需要仔细权衡过的新奇体验。 那需要不断的迭代，但是如果每个调整都需要让工程师调整底层代码，然后等待漫长的编译结束，那就毁掉了创作流程。

法术战斗！

假设我们在完成一个基于法术的格斗游戏。 两个敌对的巫师互相丢法术，直到分出胜负。 我们可以将这些法术都定义在代码中，但这就意味着每当法术修改就会牵扯到工程师。 当设计者想修改几个数字感觉一下效果，就要重新编译整个工程，重启，然后进入战斗。

像现在的许多游戏一样，需要在发售之后更新游戏，修复漏洞或是添加新内容。 如果所有法术都是硬编码的，那么每次修改都意味着发行一个可以运行的游戏版本。

再扯远一点，我们还想支持*模组*。我们想让*玩家*创造自己的法术。 如果这些法术都在代码中，那么意味着每个模组制造者都得拥有编译游戏的整套工具链， 我们就得开源代码，如果他们的自创法术上有个漏洞，那么会把其他人的游戏也搞崩溃。

数据 > 代码

很明显实现引擎的编程语言不是个好选择。 我们需要将法术放在与游戏核心隔绝的沙箱中。 我们想要它们易于修改，易于加载，并与其他可执行部分相隔离。

我不知道你怎么想，但这听上去让我觉得有点像是*数据*。 如果能在分离的数据文件中定义行为，游戏引擎还能加载并“执行”它们，就可以实现所有目标。

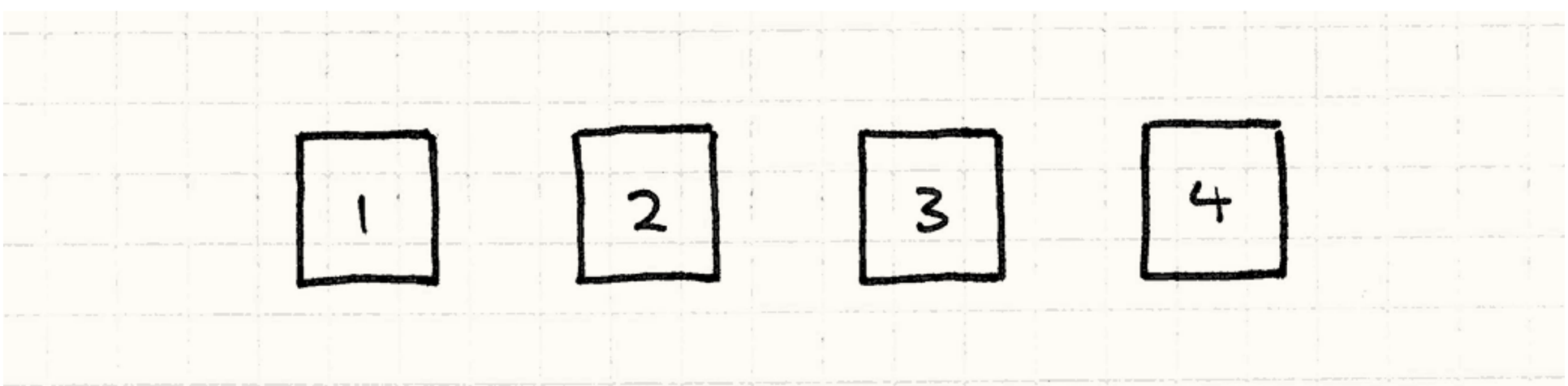
这里需要指出“执行”对于数据的意思。如何让文件中的数据表示为行为呢？这里有几种方式。 与编译模式对比着看会好理解些。

解释器模式

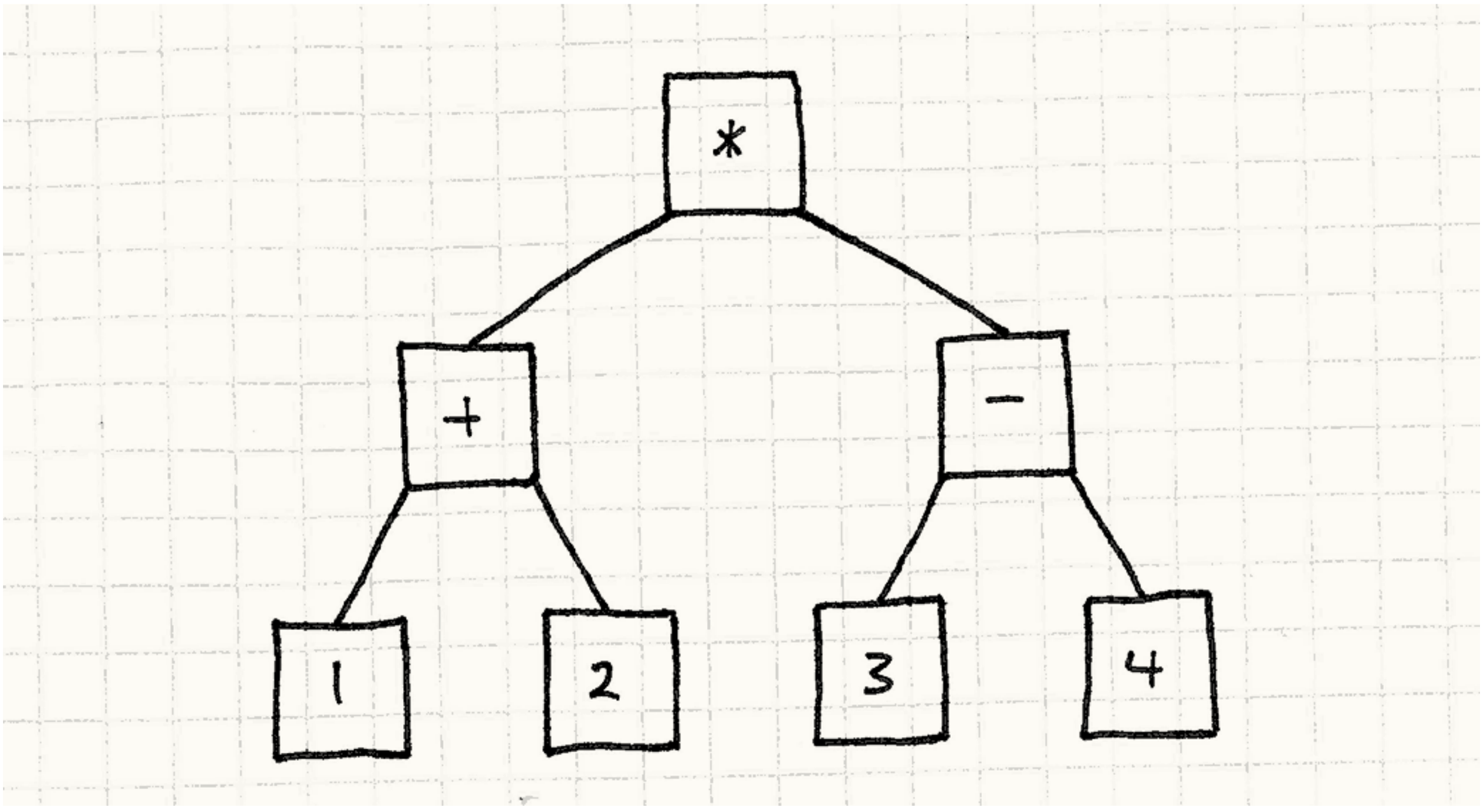
关于这个模式我就能写一章，但是有四个家伙的工作早涵盖了这一切， 所以，这里给一些简短的介绍。 从一种语言开始——想想*编程*语言——从你想要执行的语言开始。 比如，它支持这样的算术表达式

```
(1 + 2) * (3 - 4)
```

然后，把每块表达式，每条语言规则，都装到*对象*中去。数字字面量都变成对象：



基本上，它们在原始值上做了个小封装。 运算符也是对象，它们拥有操作的值的引用。 如果你考虑了括号和优先级，那么表达式就魔术般变成这样的小树：



这里的“魔术”是什么？很简单——*语法分析*。 语法分析器接受一串字符作为输入，将其转为*抽象语法树*，即一个包含了表示文本语法结构的对象集合。

完成这个你就完成了编译器的一半。

解释器模式与*创建*这棵树无关，它只关于*执行*这棵树。 它工作的方式非常巧妙。树中的每个对象都是表达式或子表达式。 用真正面向对象的方式描述，我们会让表达式自己对自己求值。

首先，我们定义所有表达式都实现的基本接口：

```
class Expression
{
public:
  virtual ~Expression() {}
  virtual double evaluate() = 0;
};
```

然后，我们定义一个类，语法中的每种表达式都实现这个接口。最简单的是数字：

```
class NumberExpression : public Expression
{
public:
  NumberExpression(double value)
  : value_(value)
  {}

  virtual double evaluate()
  {
    return value_;
  }

private:
  double value_;
};
```

一个数字表达式就等于它的值。加法和乘法有点复杂，因为它们包含子表达式。 在递归地计算其子表达式之后，才能计算自己的值。像这样：

```
class AdditionExpression : public Expression
{
public:
  AdditionExpression(Expression* left, Expression* right)
  : left_(left),
    right_(right)
  {}

  virtual double evaluate()
  {
    // 计算操作数
    double left = left_->evaluate();
    double right = right_->evaluate();

    // 把它们加起来
    return left + right;
  }

private:
  Expression* left_;
  Expression* right_;
};
```

我确信你知道乘法的实现是什么样的。

整齐漂亮吧？只需几个简单的类，现在我们可以表示和计算任意复杂的算术表达式。 只需要创建正确的对象，并正确连起来。

Ruby实现这样的东西已经十五年了。在1.9版本，他们转换到了这章描述的字节码。看看我省了你多少时间！

这是个优美简单的模式，但有自己的问题。 看看插图，看到了什么？大量的小盒子，以及它们之间大量的箭头。 代码被表示为小物体组成的巨大分形树。这会带来些令人不快的后果：

- 从磁盘上加载它需要实例化并连接大量这种小对象。

* 这些对象和之间的指针会占据大量的内存。在32位机上，那个小的算术表达式至少要占据68字节，这还没考虑内存对其呢。

```
<aside markdown="1" name="vtable">

如果你想自己算算，别忘了算上虚函数表指针。
```

```
</aside>
```

- 遍历子表达式的指针是在谋杀数据缓存。同时，虚函数调用是在屠杀指令缓存。

  查看数据局部性一章，看看什么是缓存以及它是如何影响游戏性能的。

将这些拼到一起，怎么念？M-A-N。 这就是为什么大多数广泛应用的编程语言不基于解释器模式。 太慢了，也太消耗内存了。

虚拟的机器码

想想我们的游戏。玩家电脑在运行时并不会遍历一堆C++语法结构树。 我们提前将其编译成了机器码，CPU基于机器码运行。机器码有什么好处呢？

- *密集的。* 它是一块坚实连续的二进制数据块，没有一位被浪费。
- *线性的。* 指令被打成包，一条接一条的执行。不会在内存里到处乱跳（除非你控制代码流这么干）。
- *底层的。* 每条指令都做一件小事，有趣的行为从*组合*中诞生。
- *速度快。* 在以上所有的要素作用下（当然，还要算上机器码是直接在硬件上实现的），机器码跑得跟风一样快。

这听起来很好，但我们不希望为法术提供真正的机器码。 让玩家提供游戏运行时的机器码简直是在自找麻烦。 我们需要的是机器代码性能和解释器模式的安全性之间的一种妥协方案。

如果不是加载机器码并直接执行，而是定义自己的*虚拟*机器码呢？ 然后，在游戏中写个小模拟器。 这与机器码类似——密集，线性，相对底层——但也由游戏直接掌控，所以可以放心地将其放入沙箱。

这就是为什么很多游戏主机和iOS不允许程序在运行时生成并加载机器码。 这是一种拖累，因为最快的编程语言实现就是那么做的。 它们包含了一个“即时（just-in-time）”编译器，或者*JIT*，在运行时将语言翻译成优化的机器码。

我们将小模拟器称为*虚拟机*（或简称“VM”），它运行的二进制机器码叫做*字节码*。 它有数据的灵活性和易用性，但比解释器模式有更好的性能。

在程序语言编程圈，“虚拟机”和“解释器”是同义词，我在这里交替使用。 当指代GoF的解释器模式，我会加上“模式”来表明区别。

这听起来有点吓人。 这章其余部分的目标是为了展示一下，如果把功能列表缩减下来，它实际上相当通俗易懂。 即使最终没有使用这个模式，你至少对Lua和其他许多语言有更好的了解。

模式

指令集 定义了可执行的底层操作。 一系列的指令被编码为**字节序列**。 **虚拟机** 使用 **中间值堆栈** 依次执行这些指令。 通过组合指令，可以定义复杂的高层行为。

何时使用

这是本书中最复杂的模式，无法轻易地加入游戏中。 当需要定义很多行为，而游戏实现语言因为以下原因不能很好地完成任务时使用它：

- 过于底层，繁琐易错。
- 编译时间长，迭代缓慢。
- 安全性依赖编程者。如果想保证行为不会破坏游戏，你需要将其与代码的其他部分隔开。

当然，该列表描述了一堆特性。谁不希望有更快的迭代循环和更多的安全性？ 然而，世上没有免费的午餐。字节码比本地代码慢，所以不适合引擎的性能攸关部分。

记住

创建自己的语言或者建立系统中的系统是很有趣的。 我在这里做的是小演示，但在现实项目中，这些东西会像藤蔓一样蔓延。

对我来说，游戏开发也正因此而有趣。 不管哪种情况，我都创建了虚拟空间让他人游玩。

每当我看到有人定义小语言或脚本系统，他们都说，“别担心，它很小。”于是，不可避免地，他们增加更多小功能，直到完成了一个完整的语言。 除了，和其它语言不同，它是定制的并拥有棚户区的建筑风格。

例如每一种模板语言。

当然，完成完整的语言并没有什么*错*。只是保证你是故意这么做的。 否则，小心的控制字节码可以表达的含义。在其失控前为其系上皮带。

你需要一个前端

底层的字节码指令有利于性能，但是二进制的字节码格式*不是*用户能写的。 我们将行为移出代码的一个原因是想要在*高层*表示它。 如果说写C++太过底层，那么让用户写汇编——虽然是你设计的——可不是一个改进方案！

一个反例的是游戏RoboWar。 在游戏中，*玩家* 编写类似汇编的语言控制机器人，我们这里也会讨论这种指令集。

这是我介绍类似汇编的语言的首选。

就像GoF的解释器模式，它假设有一些方法来*生成*字节码。 通常情况下，用户在更高层编写行为，再用工具将其翻译为虚拟机能理解的字节码。 这里的工具就是编译器。

我知道，这听起来很吓人。丑话说在前头， 如果没有资源制作编辑器，那么字节码不适合你。 但是，接下来你会看到，也可能没你想的那么糟。

你会想念调试器

编程很难。我们知道想要机器做什么，但并不总能正确地传达——所以我们会写出漏洞。为了查找和解决漏洞，我们已经积累了一堆工具来了解代码做错了什么，以及如何修正。我们有调试器，静态分析器，反编译工具等。 所有这些工具都是为现有的语言设计的：无论是机器码还是某些更高层次的东西。

当你定义自己的字节码虚拟机时，你离开了这些工具。 当然，可以通过调试器调试虚拟机，但它告诉你虚拟机*本身*在做什么，而不是字节码被翻译成了什么。 它不能把字节码映射回原先的高层次的形式。

如果你定义的行为很简单，可能无需太多工具帮忙调试就能勉强坚持下来。 但随着内容规模增长，花些时间完成些功能，让用户看到字节码在做什么。 这些功能也许不随游戏发布，但它们至关重要，它们能确保你确实*能*发布你的游戏。

当然，如果你想要让游戏支持mod，那你会发布这些特性，它们就更加重要了。

[示例代码]

经历了前面几个章节后，你也许会惊讶于它的实现是多么直接。 首先需要为虚拟机设定一套指令集。 在开始考虑字节码之类的东西前，先像思考API一样思考它。

法术的API

如果直接使用C++代码定义法术，代码需要调用何种API呢？ 在游戏引擎中，构成法术的基本操作是什么样的？

大多数法术最终改变一个巫师的状态，因此先从这样的代码开始。

```
void setHealth(int wizard, int amount);
void setWisdom(int wizard, int amount);
void setAgility(int wizard, int amount);
```

第一个参数指定哪个巫师被影响，`0`代表玩家而`1`代表对手。 以这种方式，治愈法术可以治疗玩家的巫师，而伤害法术伤害他的敌人。 这三个小方法覆盖了出人意料多的法术。

如果法术只是默默地调整数据，游戏逻辑就已经完成了， 但玩这样的游戏会让玩家无聊得要哭。让我们修复这点：

```
void playSound(int soundId);
void spawnParticles(int particleType);
```

这并不影响游戏玩法，但它们增强了游戏的*体验*。 我们可以增加一些镜头晃动，动画之类的，但这已经足以作为开始了。

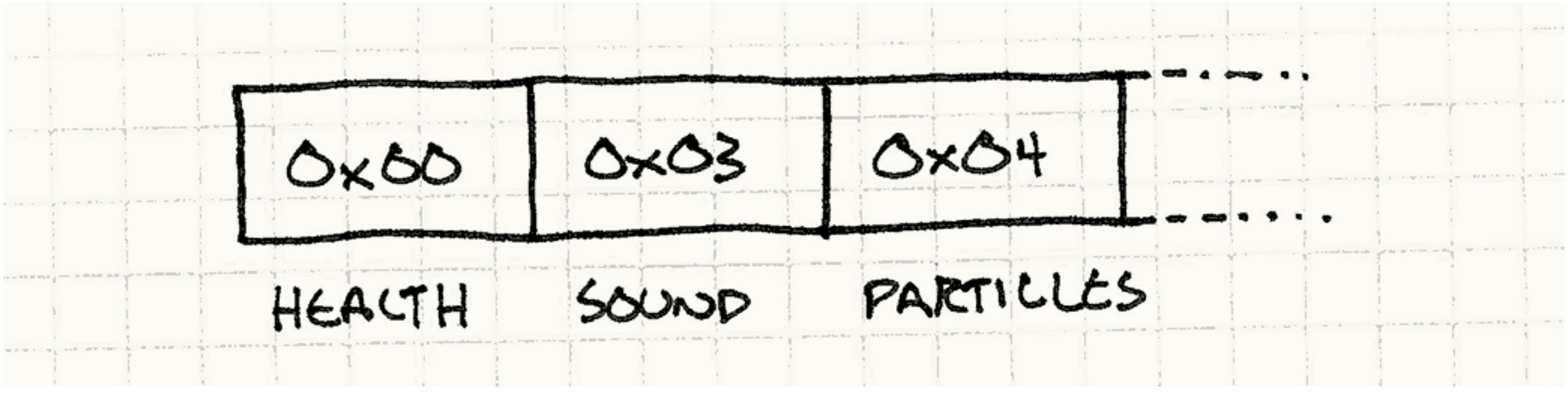
法术指令集

现在让我们把这种*程序化*的API转化为可被数据控制的东西。 从小处开始，然后慢慢拓展到整体。 现在，要去除方法的所有参数。 假设`set__()`方法总影响玩家的巫师，总直接将状态设为最大值。 同样，FX操作总是播放一个硬编码的声音和粒子效果。

这样，一个法术就只是一系列指令。 每条指令都代表了想要呈现的操作。我们可以枚举如下：

```
enum Instruction
{
  INST_SET_HEALTH       = 0x00,
  INST_SET_WISDOM       = 0x01,
  INST_SET_AGILITY      = 0x02,
  INST_PLAY_SOUND       = 0x03,
  INST_SPAWN_PARTICLES = 0x04
};
```

为了将法术编码进数据，我们存储了一数组`enum`值。 只有几个不同的基本操作原语，因此`enum`值的范围可以存储到一个字节中。 这就意味着法术的代码就是一系列字节——也就是“字节码”。



有些字节码虚拟机为每条指令使用多个字节，用更加复杂的规则译解它们。 事实上，在常见芯片上，比如x86上，的机器码更加复杂。

但单字节对于Java虚拟机和支撑了.NET平台的Common Language Runtime已经足够了，对我们也应该足够了。

为了执行一条指令，我们看看它的基本操作原语是什么，然后调用正确的API方法。

```
switch (instruction)
{
  case INST_SET_HEALTH:
    setHealth(0, 100);
    break;

  case INST_SET_WISDOM:
    setWisdom(0, 100);
    break;

  case INST_SET_AGILITY:
    setAgility(0, 100);
    break;

  case INST_PLAY_SOUND:
    playSound(SOUND_BANG);
    break;

  case INST_SPAWN_PARTICLES:
    spawnParticles(PARTICLE_FLAME);
    break;
}
```

用这种方式，解释器建立了沟通代码世界和数据世界的桥梁。我们可以将执行法术的虚拟机实现如下：

```
class VM
{
public:
  void interpret(char bytecode[], int size)
  {
    for (int i = 0; i < size; i++)
    {
      char instruction = bytecode[i];
      switch (instruction)
      {
        // 每条指令的跳转分支……
      }
    }
  }
};
```

输入它，你就完成你的首个虚拟机。 不幸的是，它并不灵活。 我们不能设定攻击对手的法术，也不能减少状态上限。我们只能播放声音！

为了真正有一点语言的感觉，我们需要在这里引入参数。

栈式机器

要执行复杂的嵌套表达式，得先从最里面的子表达式开始。 计算完里面的，结果向外作为参数流向包含它们的表达式， 直到得出最终结果，整个表达式就算完了。

解释器模式将其明确的表现为嵌套对象组成的树，但我们需要指令速度达到列表的速度。 我们仍然需要确保子表达式的结果流向正确的表达式。 但由于数据是平面的，我们使用指令的*顺序*来控制这一点。 用CPU同样的方式完成这点——用栈。

这种架构不出所料的被称为*栈式计算机*。编程语言像Forth，PostScript，和Factor 直接将这点暴露给用户。

```
class VM
{
public:
  VM()
  : stackSize_(0)
  {}

  // 其他代码……

private:
  static const int MAX_STACK = 128;
  int stackSize_;
  int stack_[MAX_STACK];
};
```

虚拟机用内部栈保存值。在例子中，指令交互的值只有一种，那就是数字， 所以可以使用简单的`int`数组。 每当数据需要从一条指令传到另一条，它得通过栈。

顾名思义，值可以压入栈或者从栈弹出，所以让我们加一对方法。

```
class VM
{
private:
  void push(int value)
  {
    // 检查栈溢出
    assert(stackSize_ < MAX_STACK);
    stack_[stackSize_++] = value;
  }

  int pop()
  {
    // 保证栈不是空的
    assert(stackSize_ > 0);
    return stack_[--stackSize_];
  }

  // 其余的代码
};
```

当一条指令需要接受参数，将参数从栈弹出，如下所示：

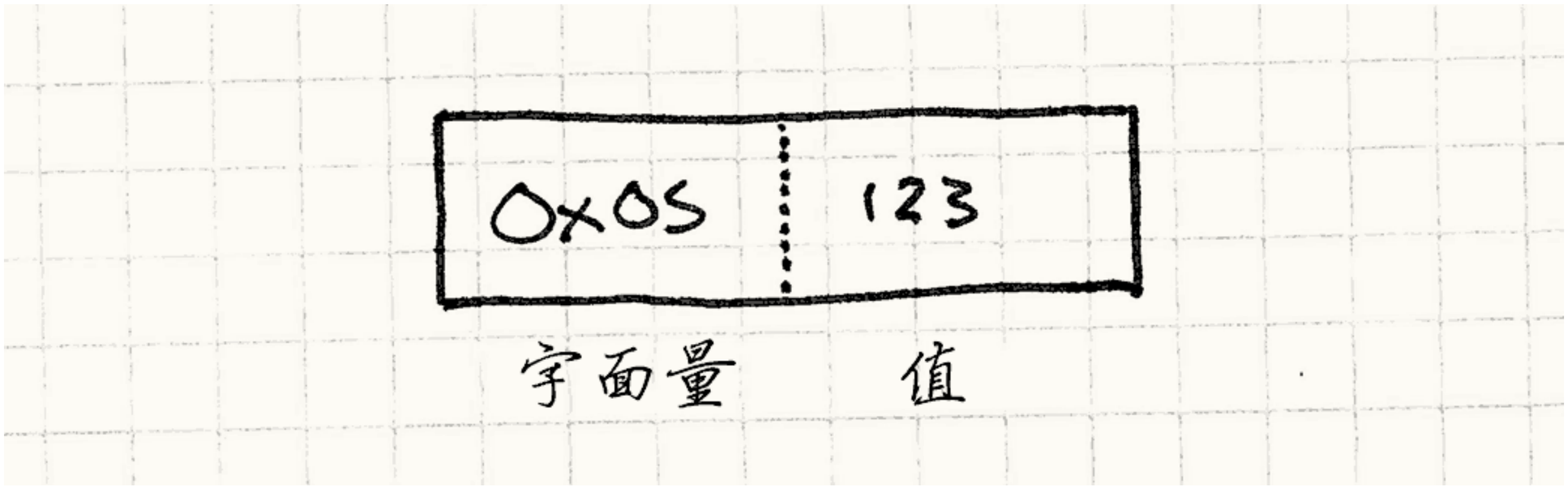
```
switch (instruction)
{
  case INST_SET_HEALTH:
  {
    int amount = pop();
    int wizard = pop();
    setHealth(wizard, amount);
    break;
  }

  case INST_SET_WISDOM:
  case INST_SET_AGILITY:
    // 像上面一样……

  case INST_PLAY_SOUND:
    playSound(pop());
    break;

  case INST_SPAWN_PARTICLES:
    spawnParticles(pop());
    break;
}
```

为了将一些值*存入*栈中，需要另一条指令：字面量。 它代表了原始的整数值。但是*它*的值又是从哪里来的呢？ 我们怎么样避免这样追根溯源到无穷无尽呢？

技巧是利用指令是字节序列这一事实——我们可以直接将数值存储在字节数组中。 如下，我们为数值字面量定义了另一条指令类型：

```
case INST_LITERAL:
{
  // 从字节码中读取下一个字节
  int value = bytecode[++i];
  push(value);
  break;
}
```

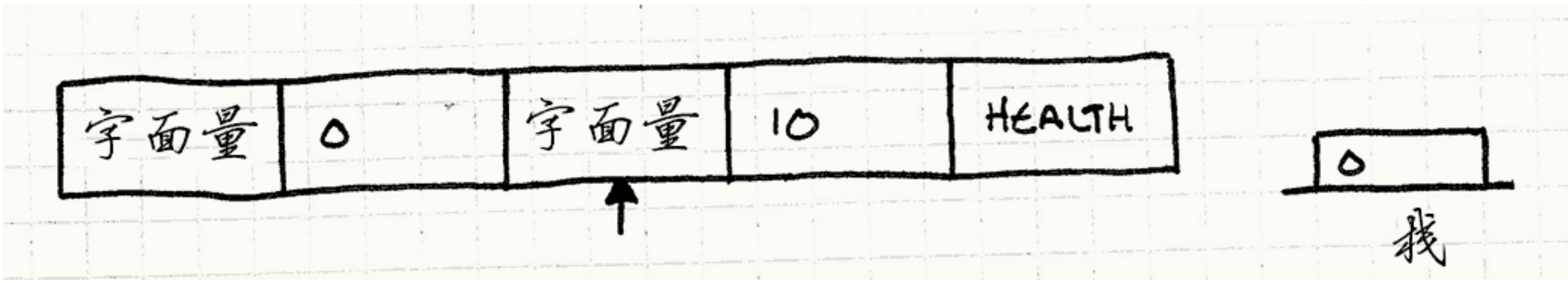
这里，从单个字节中读取值，从而避免需要解码多字节整数的精巧代码， 但在真实实现中，你会需要支持整个数域的字面量。



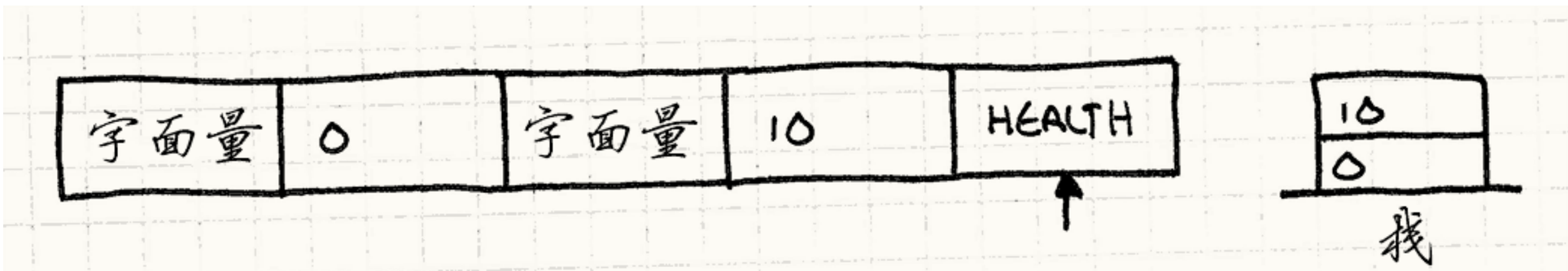
它读取字节码流中的字节*作为数值*并将其压入栈。

让我们串起来其中的几条指令，看看解释器如何执行它们，感受下栈是如何工作的。 从空栈开始，解释器指向第一个指令：

首先，它执行第一条`INST_LITERAL`，读取字节码流的下一个字节(`0`)并压入栈中。



然后，它执行第二条`INST_LITERAL`，读取`10`然后压入。



最后，执行`INST_SET_HEALTH`。这弹出`10`存进`amount`，弹出`0`存进`wizard`。然后用这两个参数调用`setHealth()`。

完成！我们获得了将玩家巫师血量设为10点的法术。 现在我们拥有了足够的灵活度，来定义修改任一巫师的状态到任意值的法术。 我们还可以放出不同的声音和粒子效果。

但是……这感觉还是像*数据*格式。比如，不能将巫师的血量提升为他智力的一半。 设计师想要有能力为法术设计*规则*，而不仅仅是*数值*。

行为 = 组合

如果我们视小虚拟机为编程语言，现在支持的只有一些内置函数，以及常量参数。 为了让字节码感觉像*行为*，我们缺少的是*组合*。

设计师需要能以有趣的方式组合不同的值，来创建表达式。 举个简单的例子，他们想让法术*变化*一个数值而不是*变到*一个数值。

这需要考虑到状态的当前值。 我们有指令来*修改*状态，现在需要添加方法*读取*状态：

```
case INST_GET_HEALTH:
{
  int wizard = pop();
  push(getHealth(wizard));
  break;
}

case INST_GET_WISDOM:
case INST_GET_AGILITY:
  // 你知道思路了吧……
```

正如你所看到的，这以两种方式与堆栈交互。 弹出一个参数来确定获取哪个巫师的状态，然后查找状态的值并压入栈中。

这允许我们写复制状态的法术。 我们可以创建一个法术，根据巫师的智慧设定敏捷度，或者让巫师的血量等于对方的血量。

有改进，但仍有限制。接下来，我们需要算术。 是时候让小虚拟机学习如何计算1 + 1了，我们将添加更多的指令。 现在，你可能已经知道如何去做，猜到了大概的模样。我只展示加法：

```
case INST_ADD:
{
  int b = pop();
  int a = pop();
  push(a + b);
  break;
}
```

像其他指令一样，它弹出数值，做点工作，然后压入结果。 直到现在，看起来每个新指令是在逐步改善，但其实我们已完成大飞跃。 这并不显而易见，但现在可以处理各种复杂的，深层嵌套的算术表达式。

来看个稍微复杂点的例子。 假设我们希望有个法术，能让巫师的血量增加敏捷和智慧的平均值。 用代码表示如下：

```
setHealth(0, getHealth(0) +
    (getAgility(0) + getWisdom(0)) / 2);
```

你可能会认为我们需要指令来处理括号造成的分组，但栈隐式支持了这一点。可以手算如下：

1. 获取巫师当前的血量并记录。
2. 获取巫师敏捷并记录。
3. 对智慧执行同样的操作。
4. 获取最后两个值，加起来并记录。
5. 除以二并记录。
6. 回想巫师的血量，将它和这结果相加并记录。
7. 取出结果，设置巫师的血量为这一结果。

你看到这些“记录”和“回想”了吗？每个“记录”对应一个压入，“回想”对应弹出。 这意味着可以很容易将其转化为字节码。例如，第一行获得巫师的当前血量：

```
LITERAL 0
GET_HEALTH
```

这些字节码将巫师的血量压入堆栈。 如果我们机械地将每行都这样转化，最终得到一大块等价于原来表达式的字节码。 为了让你感觉这些指令是如何组合的，我在下面给你做个示范。

为了展示堆栈如何随着时间推移而变化，我们举个代码执行的例子。 巫师目前有45点血量，7点敏捷，和11点智慧。 每条指令的右边是栈在执行指令之后的模样，再右边是解释指令意图的注释：

```
LITERAL 0     [0]              # 巫师索引
LITERAL 0     [0, 0]           # 巫师索引
GET_HEALTH    [0, 45]          # 获取血量()
LITERAL 0     [0, 45, 0]       # 巫师索引
GET_AGILITY   [0, 45, 7]       # 获取敏捷()
LITERAL 0     [0, 45, 7, 0]    # 巫师索引
GET_WISDOM    [0, 45, 7, 11]   # 获取智慧()
ADD           [0, 45, 18]      # 将敏捷和智慧加起来
LITERAL 2     [0, 45, 18, 2]   # 被除数: 2
DIVIDE        [0, 45, 9]       # 计算敏捷和智慧的平均值
ADD           [0, 54]          # 将平均值加到现有血量上。
SET_HEALTH    []               # 将结果设为血量
```

如果你注意每步的栈，你可以看到数据如何魔法一般流动在其中。 我们最开始压入`0`来查找巫师，然后它一直挂在栈的底部，直到最终的`SET_HEALTH`才用到它。

也许“魔法”在这里的门槛太低了。

一台虚拟机

我可以继续下去，添加越来越多的指令，但是时候适可而止了。 如上所述，我们已经有了一个可爱的小虚拟机，可以使用简单，紧凑的数据格式，定义开放的行为。 虽然“字节码”和“虚拟机”的听起来很吓人，但你可以看到它们往往简单到只需栈，循环，和switch语句。

还记得我们最初让行为呆在沙盒中的目标吗？ 现在，你已经看到虚拟机是如何实现的，很明显，那个目标已经完成。 字节码不能把恶意触角伸到游戏引擎的其他部分，因为我们只定义了几个与其他部分接触的指令。

我们通过控制栈的大小来控制内存使用量，很小心地确保它不会溢出。 我们甚至可以控制它使用多少*时间*。 在指令循环里，可以追踪已经执行了多少指令，如果遇到了问题也可以摆脱困境。

控制运行时间在例子中没有必要，因为没有任何循环的指令。 可以限制字节码的总体大小来限制运行时间。 这也意味着我们的字节码不是图灵完备的。

这里还有一个问题：创建字节码。 到目前为止，我们使用伪代码，再手工编写为字节码。除非你有*很多*的空闲时间，否则这种方式并不实用。

语法转换工具

最初的目标是创造更*高层*方式来控制行为，但是，我们却创造了比C++更*底层*的东西。 它具有我们想要的运行性能和安全性，但绝对没有对设计师友好的可用性。

为了填补这一空白，我们需要一些工具。 我们需要一个程序，让用户定义法术的高层次行为，然后生成对应的低层栈式机字节码。

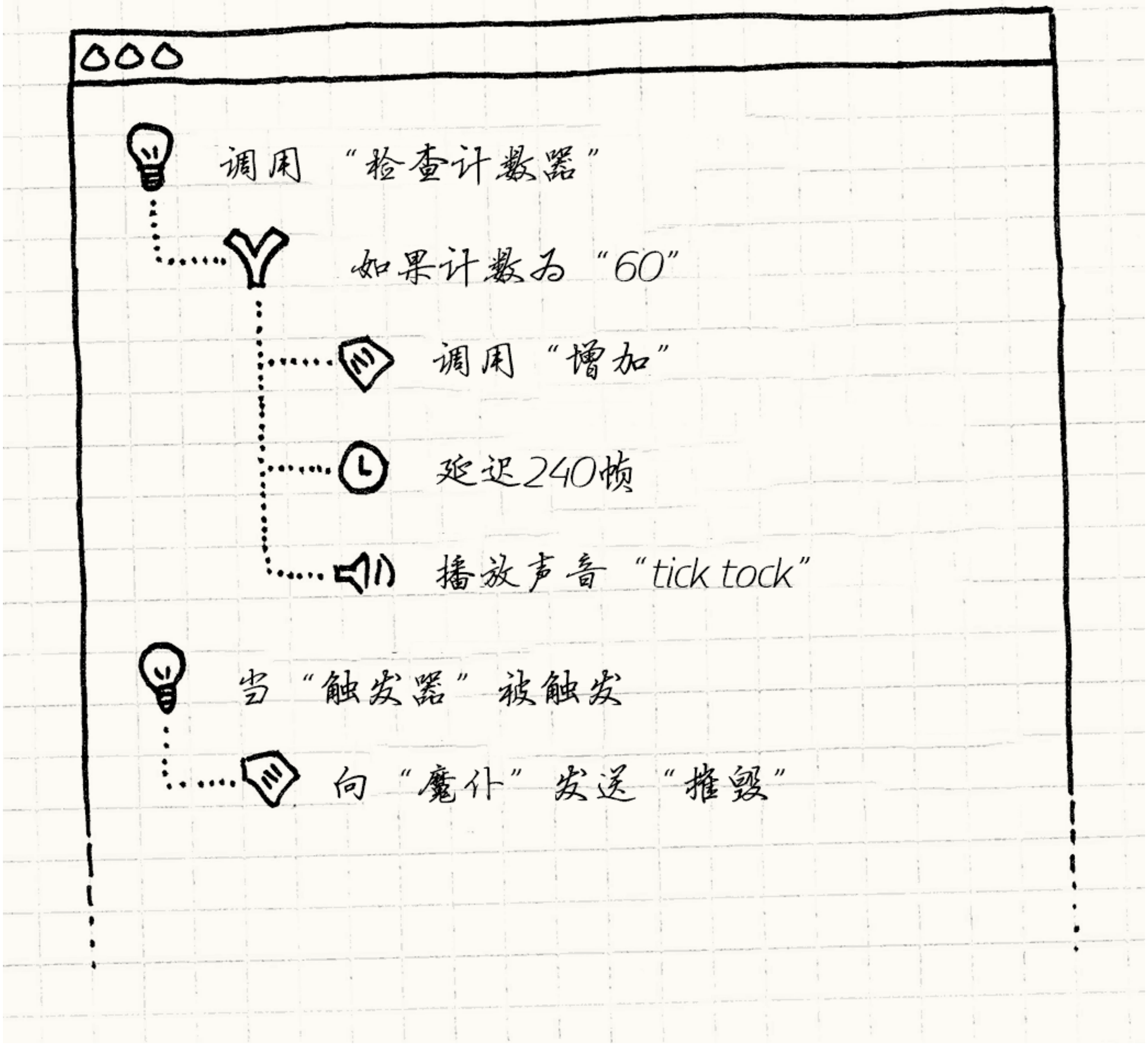
这可能听起来比虚拟机更难。 许多程序员都在大学参加编译器课程，并被龙书或者”lex“和”yacc”引发了PTSD。

我指的，当然，是经典教材*Compilers: Principles, Techniques, and Tools*。

事实上，编译一个基于文本的语言并不那么糟糕，可能有*一点*糟糕。 那需要补习研究众多话题。但是，你不需要那么做。 我说，我们需要的是*工具*——它并不一定是个输入格式是*文本文件*的*编译器*。

相反，我建议你考虑构建图形界面让用户定义自己的行为， 尤其是使用它的人没有很高的技术。 没有花几年时间习惯编译器怒吼的人很难写出没有语法错误文本。

你可以建立一个应用程序，用户通过单击拖动小盒子，下拉菜单项，或任何有意义的行为创建“脚本”，从而创建行为。


调用“检查计数器”
如果计数为“60”
调用“增加”
延迟240帧
播放声音“tick tock”
当“触发器”被触发
向“魔仆”发送“摧毁”

我为Henry Hatsworth in the Puzzling Adventure编写的脚本系统就是这么工作的。

这样做的好处是，你的UI可以保证用户无法创建“无效的”程序。 与其向他们喷射错误警告，不如主动关闭按钮或提供默认值， 以确保他们创造的东西在任何时间点上都有效。

我想要强调错误处理是多么重要。作为程序员，我们趋向于将人类错误视为想要终结的个人耻辱。

为了制作用户享受的系统，你需要拥抱人性，*包括他们的失败*。 制造错误是人们固有的，同时也是创作的固有基础。 用撤销这样的特性优雅地处理它们，这能让用户更有创意，创作出更好的成果。

这免去了设计语法和编写解析器的工作。 但是，我知道，你可能会发现UI设计同样令人不快。 好吧，如果这样，我没啥办法啦。

毕竟，这种模式是关于使用对用户友好的高层方式表达行为。 你必须精心设计用户体验。要有效地执行行为，又需要将其转换成底层形式。这是必做的，但如果你准备好迎接挑战，这终会有所回报。

设计决策

我尽可能让本章简短，但我们真正做的事情是创造语言。 那有开放的设计空间，你可以从中获得很多乐趣，所以别忘了完成你的游戏。

这是本书中最长的章节，我看来失败了。

指令如何访问堆栈?

有两种主要的字节码虚拟机：基于栈的和基于寄存器的。 栈式虚拟机中，指令总是操作栈顶，如同我们的示例代码所示。 例如，`INST_ADD`弹出两个值，将它们相加，将结果压入。

基于寄存器的虚拟机也有栈。唯一不同是指令可以从栈的深处读取值。 不像`INST_ADD`始终*弹出*其操作数， 它在字节码中存储两个索引，指示了从栈的何处读取操作数。

- **基于栈的虚拟机：**
  - *指令短小。* 由于每个指令隐式认定在栈顶寻找参数，不需要为任何数据编码。 这意味着每条指令可能会非常短，一般只需一个字节。
  - *易于生成代码。* 当你需要为生成字节码编写编译器或工具时，你会发现更容易生成基于栈的字节码。 由于每个指令隐式在栈顶工作，你只需要以正确的顺序输出指令就可以在它们之间传递参数。
  - *会生成更多的指令。* 每条指令只能看到栈顶。这意味着，产生像`a = b + c`这样的代码， 你需要单独的指令将`b`和`c`压入栈顶，执行操作，再将结果压入`a`。
- **基于寄存器的虚拟机：**
  - *指令较长。* 由于指令需要参数记录栈偏移量，单个指令需要更多的位。 例如，一个Lua指令——可能是最著名的基于寄存器的虚拟机——占用完整的32位。 它采用6位做指令类型，其余的是参数。

    Lua作者没有指定Lua的字节码格式，它每个版本都会改变。现在描述的是Lua 5.1。 要深究Lua的内部构造， 读读这个。
  - *指令较少。* 由于每个指令可以做更多的工作，你不需要那么多的指令。 有人说，性能会得以提升，因为不需要将值在栈中移来移去了。

所以，应该选一种？我的建议是坚持使用基于栈的虚拟机。 它们更容易实现，也更容易生成代码。 Lua转换为基于寄存器的虚拟机从而变得更快，这为寄存器虚拟机博得了声誉，但是这*强烈*依赖于实际的指令和虚拟机的其他大量细节。

你有什么指令?

指令集定义了在字节码中可以干什么，不能干什么，对虚拟机性能也有很大的影响。 这里有个清单，记录了不同种类的，你可能需要的指令：

- **外部基本操作原语。** 这是虚拟机与引擎其他部分交互，影响玩家所见的部分。 它们控制了字节码可以表达的真实行为。 如果没有这些，你的虚拟机除了消耗CPU循环以外一无所得。
- **内部基本操作原语** 这些语句在虚拟机内操作数值——文字，算术，比较操作，以及操纵栈的指令。

- **控制流。** 我们的例子没有包含这些，但当你需要有条件执行或循环执行，你需要控制流。 在字节码这样底层的语言，它们出奇的简单：跳转。

  在我们的指令循环中，需要索引来跟踪到了字节码的哪里。 跳转指令做的是修改这个索引并改变将要执行的。 换言之，这是`goto`。你可以基于它制定各种更高级别的控制流。

- **抽象。** 如果用户开始在数据中定义*很多*的东西，最终要重用字节码的部分位，而不是复制和粘贴。 你也许需要可调用过程这样的东西。

  最简单的形式中，过程并不比跳转复杂。 唯一不同的是，虚拟机需要管理另一个*返回*的栈。 当执行“call”指令时，将当前指令索引压入栈中，然后跳转到被调用的字节码。 当它到了“return”，虚拟机从堆栈弹出索引，然后跳回索引指示的位置。

数值是如何表示的?

我们的虚拟机示例只与一种数值打交道：整数。 回答这个问题很简单——栈只是一栈的`int`。 更加完整的虚拟机支持不同的数据类型：字符串，对象，列表等。 你必须决定在内部如何存储这些值。

- **单一数据类型：**
  - *简单易用* 你不必担心标记，转换，或类型检查。
  - *无法使用不同的数据类型。* 这是明显的缺点。将不同类型成塞进单一的表示方式——比如将数字存储为字符串——这是找打。

- **带标记的类型：**

  这是动态类型语言中常见的表示法。 所有的值有两部分。 第一部分是类型标识——一个`enum`——标识存储了数据的类型。这些位的其余部分会被解释为这种类型：

```
enum ValueType
{
  TYPE_INT,
  TYPE_DOUBLE,
  TYPE_STRING
};

struct Value
{
  ValueType type;
  union
  {
    int    intValue;
    double doubleValue;
    char*  stringValue;
  };
};
```

  - *数值知道其类型。* 这个表示法的好处是可在运行时检查值的类型。 这对动态调用很重要，可以确保没有在类型上面执行其不支持的操作。
  - *消耗更多内存。* 每个值都要带一些额外的位来标识类型。在像虚拟机这样的底层，这里几位，那里几位，总量就会快速增加。

- **无标识的union：**

  像前面一样使用union，但是*没有*类型标识。 你可以将这些位表示为不同的类型，由你确保没有搞错值的类型。

  这是静态类型语言在内存中表示事物的方式。 由于类型系统在编译时保证没弄错值的类型，不需要在运行时对其进行验证。

  这也是*无类型*语言，像汇编和Forth存储值的方式。 这些语言让*用户*保证不会写出误认值类型的代码。毫无服务态度！

  - *结构紧凑。* 找不到比只存储需要的值更加有效率的存储方式。
  - *速度快。* 没有类型标识意味着在运行时无需消耗周期检查它们的类型。这是静态类型语言往往比动态类型语言快的原因之一。
  - *不安全。* 这是真正的代价。一块错误的字节码，会让你误解一个值，把数字误解为指针，会破坏游戏安全导致崩溃。

    如果你的字节码是由静态类型语言编译而来，你也许认为它是安全的，因为编译不会生成不安全的字节码。 那也许是真的，但记住恶意用户也许会手写恶意代码而不经过你的编译器。

    这就是为什么，举个例子，Java虚拟机在加载程序时要做*字节码验证*。

- **接口：**

  多种类型值的面向对象解决方案是通过多态。接口为不同的类型测试和转换提供虚方法，如下：

```
class Value
{
public:
  virtual ~Value() {}

  virtual ValueType type() = 0;

  virtual int asInt() {
    // 只能在int上调用
    assert(false);
    return 0;
  }

  // 其他转换方法……
};
```

然后你为每个特定的数据类型设计特定的类，如：

```
class IntValue : public Value
{
public:
  IntValue(int value)
  : value_(value)
  {}

  virtual ValueType type() { return TYPE_INT; }
  virtual int asInt() { return value_; }

private:
  int value_;
};
```

- *开放*。可在虚拟机的核心之外定义新的值类型，只要它们实现了基本接口就行。

- *面向对象。* 如果你坚持OOP原则，这是做事情“正确”的方式，为特定类型使用多态分配行为，而不是在标签上做switch之类的。
- *冗长。* 必须定义单独的类，包含了每个数据类型的相关行为。 注意在前面的例子中，这样的类定义了*所有*的类型。在这里，只包含了一个！
- *低效。* 为了使用多态，必须使用指针，这意味着即使是短小的值，如布尔和数字，也得裹在堆中的对象里。 每使用一个值，你就得做一次虚方法调用。

  在虚拟机核心之类的地方，像这样的性能影响会迅速叠加。 事实上，这引起了许多我们试图在解释器模式中避免的问题。 只是现在的问题不在*代码*中，而是在*值*中。

我的建议是，如果你可以只用单一数据类型，那就这么做。 除此以外，使用带标识的union。这是世界上几乎每个语言解释器做的事情。

如何生成字节码?

我将最重要的问题留到最后。我们已经完成了*消耗*和*解释*字节码， 但需要你写*制造*字节码的工具。 典型的解决方案是写个编译器，但它不是唯一的选择。

- **如果你定义基于文本的语言：**
  - *必须定义语法。* 业余和专业的语言设计师小看这件事情的难度。让解析器快乐很简单，让*用户*快乐很*难*。

    语法设计是用户界面设计，当你将用户界面限制到字符构成的字符串，这可没把事情变简单。

  - *必须实现解析器。* 不管名声如何，这部分其实非常简单。无论使用ANTLR或Bison，还是——像我一样——手写递归下降，都可以完成。
  - *必须处理语法错误。* 这是最重要和最困难的部分。 当用户制造了语法和语义错误——他们总会这么干——引导他们返回到正确的道路是你的任务。 解析器只知道接到了意外的符号，给予有用的的反馈并不容易。
  - *可能会对非技术用户关上大门。* 我们程序员喜欢文本文件。结合强大的命令行工具，我们把它们当作计算机的乐高积木——简单，有百万种方式组合。

    大部分非程序员不这样想。 对他们来说，输入文本文件就像为愤怒机器人审核员填写税表，如果忘记了一个分号就会遭到痛斥。

- **如果你定义了一个图形化创作工具：**
  - *必须实现用户界面。* 按钮，点击，拖动，诸如此类。 有些人畏惧它，但我喜欢它。 如果沿着这条路走下去，设计用户界面和工作核心部分同等重要——而不是硬着头皮完成的乱七八糟工作。

    每点额外工作都会让工具更容易更舒适地使用，并直接导致了游戏中更好的内容。 如果你看看很多游戏制作过程的内部解密，经常会发现制作有趣的创造工具是秘诀之一。
  - *有较少的错误情况。* 由于用户通过交互式一步一步地设计行为，应用程序可以尽快引导他们走出错误。

    而使用基于文本的语言时，直到用户输完整个文件*才能*看到用户的内容，更难预防和处理错误。
  - *更难移植。* 文本编译器的好处是，文本文件是通用的。编译器简单地读入文件并写出。跨平台移植的工作实在微不足道。

    除了换行符。还有编码。

    当你构建用户界面，你必须选择要使用的架构，其中很多是基于某个操作系统。 也有跨平台的用户界面工具包，但他们往往要为对所有平台同样适用付出代价——对所有的平台上同样不适用。

参见

- 这一章节的近亲是GoF的解释器模式。两种方式都能让你用数据组合行为。

  事实上，最终你两种模式*都*会使用。你用来构造字节码的工具会有内部的对象树。这也是解释器模式所能做的。

  为了编译到字节码，你需要递归回溯整棵树，就像用解释器模式去解释它一样。 *唯一的*不同在于，不是立即执行一段行为，而是生成整个字节码再执行。
- Lua是游戏中最广泛应用的脚本语言。 它的内部被实现为一个非常紧凑的，基于寄存器的字节码虚拟机。
- Kismet是个可视化脚本编辑工具，应用于Unreal引擎的编辑器UnrealEd。
- 我的脚本语言Wren，是一个简单的，基于栈的字节码解释器。

子类沙箱

游戏设计模式Behavioral Patterns

意图

用一系列由基类提供的操作定义子类中的行为。

动机

每个孩子都梦想过变成超级英雄，但是不幸的是，高能射线在地球上很短缺。 游戏是让你扮演超级英雄最简单的方法。 因为我们的游戏设计者从来没有学会说“不”，*我们的* 超级英雄游戏中有成百上千种不同的超级能力可供选择。

我们的计划是创建一个`Superpower`基类。然后由它派生出各种超级能力的实现类。 我们在程序员队伍中分发设计文档，然后开始编程。 当我们完成时，我们就会有上百种超级能力类。

当你发现像这个例子一样有*很多*子类时，那通常意味着数据驱动的方式更好。 不再用*代码*定义不同的能力，用*数据*吧。

像类型对象，字节码，和解释器模式都能帮忙。

我们想让玩家处于拥有无限可能的世界中。无论他们在孩童时想象过什么能力，我们都要在游戏中展现。 这就意味着这些超能力子类需要做任何事情： 播放声音，产生视觉刺激，与AI交互，创建和销毁其他游戏实体，与物理打交道。没有哪处代码是它们不会接触的。

假设我们让团队信马由缰地写超能力类。会发生什么?

- *会有很多冗余代码。* 当超能力种类繁多，我们可以预期有很多重叠。 很多超能力都会用相同的方式产生视觉效果并播放声音。 当你坐下来看看，冷冻光线，热能光线，芥末酱光线都很相似。 如果人们实现这些的时候没有协同，那就会有很多冗余的代码和重复劳动。

- *游戏引擎中的每一部分都会与这些类耦合。* 没有深入了解的话，任何人都能写出直接调用子系统的代码，但子系统从来没打算直接与超能力类绑定。 就算渲染系统被好好组织成多个层次，只有一个能被外部的图形引擎使用， 我们可以打赌，最终超级能力代码会与每一个接触。

- *当外部代码需要改变时，一些随机超能力代码有很大几率会损坏。* 一旦我们有了不同的超能力类绑定到游戏引擎的多个部分，改变那些部分必然影响超能力类。 这可不合理，因为图形，音频，UI程序员很可能不想*也*成为玩法程序员。

- *很难定义所有超能力遵守的不变量。* 假设我们想保证超能力播放的所有音频都有正确的顺序和优先级。 如果我们几百个类都直接调用音频引擎，就没什么好办法来完成这点。

我们要的是给每个实现超能力的玩法程序员一系列可使用的基本单元。 你想要播放声音? 这是你的`playSound()`函数。 你想要粒子效果? 这是你的`spawnParticles()`函数。 我们保证了这些操作覆盖了你要做的事情，所以你不需要`#include`随机的头文件，干扰到代码库的其他部分。

我们实现的方法是通过定义这些操作为`Superpower`*基类*的*protected方法*。 将它们放在基类给了每个子类直接便捷的途径获取方法。 让它们为protected（很可能不是虚方法）方法暗示了它们存在就是为了被子类*调用*。

一旦有了这些东西来使用，我们需要一个地方使用他们。 为了做到那点，我们定义*沙箱方法*，这是子类必须实现的抽象的protected方法。 有了那些，要实现一种新的能力，你需要:

1. 创建从`Superpower`继承的新类。
2. 重载沙箱方法`activate()`。
3. 通过调用`Superpower`提供的protected方法实现主体。

我们现在可以使用这些高层次的操作来解决冗余代码问题了。 当我们看到代码在多个子类间重复，我们总可以将其打包到`Superpower`中，作为它们都可以使用的新操作。

我们通过将耦合约束到一个地方解决了耦合问题。 `Superpower`最终与不同的系统耦合，但是继承它的几百个类不会。 相反，它们*只*耦合基类。 当游戏系统的某部分改变时，修改`Superpower`也许是必须的，但是众多的子类不需要修改。

这个模式带来浅层但是广泛的类层次。 你的继承链不*深*，但是有*很多*类与`Superpower`挂钩。 通过使用有很多直接子类的基类，我们在代码库中创造了一个支撑点。 我们投入到`Superpower`的时间和爱可以让游戏中众多类获益。

最近，你发现很多人批评面向对象语言中的继承。 继承*是*有问题——在代码库中没有比父类子类之间的耦合更深的了——但我发现*扁平的*继承树比起*深的*继承树更好处理。

模式

基类定义抽象的**沙箱方法**和几个**提供的操作**。 将操作标为protected，表明它们只为子类所使用。 每个推导出的**沙箱子类**用提供的操作实现了沙箱函数。

何时使用

子类沙箱模式是潜伏在代码库中简单常用的模式，哪怕是在游戏之外的地方亦有应用。 如果你有一个非虚的protected方法，你可能已在用类似的东西了。 沙箱方法在以下情况适用：

- 你有一个能推导很多子类的基类。
- 基类可以提供子类需要的所有操作。
- 在子类中有行为重复，你想要更容易的在它们间分享代码。
- 你想要最小化子类和程序的其他部分的耦合。

记住

“继承”在很多编程圈子近来为人诟病，原因之一是基类趋向于增加越来越多的代码 这个模式特别容易染上这个毛病。

由于子类通过基类接触游戏的剩余部分，基类最后和子类需要的*每个*系统耦合。 当然，子类也紧密的与基类相绑定。这种蛛网耦合让你很难在不破坏什么的情况下改变基类——你得到了（脆弱的基类问题）brittle base class problem。

硬币的另一面是由于你耦合的大部分都被推到了基类，子类现在与世界的其他部分分离。理想的情况下，你大多数的行为都载子类中。这意味着你的代码库大部分是孤立的，很容易管理。

如果你发现这个模式正把你的基类变成一锅代码糊糊， 考虑将它提供的一些操作放入分离的类中， 这样基类可以分散它的责任。组件模式可以在这里帮上忙。

示例代码

因为这个模式太简单了，示例代码中没有太多东西。 这不是说它没用——这个模式关键在于“意图”，而不是它实现的复杂度。

我们从`Superpower`基类开始：

```
class Superpower
{
public:
  virtual ~Superpower() {}

protected:
  virtual void activate() = 0;

  void move(double x, double y, double z)
  {
    // 实现代码……
  }

  void playSound(SoundId sound, double volume)
  {
    // 实现代码……
  }

  void spawnParticles(ParticleType type, int count)
  {
    // 实现代码……
  }
};
```

`activate()`方法是沙箱方法。由于它是抽象虚函数，子类*必须*重载它。 这让那些需要创建子类的人知道要做哪些工作。

其他的protected函数`move()`，`playSound()`，和`spawnParticles()`都是提供的操作。 它们是子类在实现`activate()`要调用的。

在这个例子中，我们没有实现提供的操作，但真正的游戏在那里有真正的代码。 那些代码中，`Superpower`与游戏中其他部分的耦合——`move()`也许调用物理代码，`playSound()`会与音频引擎交互，等等。 由于这都在基类的*实现*中，保证了耦合封闭在`Superpower`中。

好了，拿出我们的放射蜘蛛，创建个能力。像这样：

```
class SkyLaunch : public Superpower
{
protected:
  virtual void activate()
  {
    // 空中滑行
    playSound(SOUND_SPROING, 1.0f);
    spawnParticles(PARTICLE_DUST, 10);
    move(0, 0, 20);
  }
};
```

好吧，也许*跳跃*不是*超级能力*，但我在这里讲的是基础知识。

这种能力将超级英雄射向天空，播放合适的声音，扬起尘土。 如果所有的超能力都这样简单——只是声音，粒子效果，动作的组合——那么就根本不需要这个模式了。 相反，`Superpower`有内置的`activate()`能获取声音ID，粒子类型和运动的字段。 但是这只在所有能力运行方式相同，只在数据上不同时才可行。让我们精细一些：

```
class Superpower
{
protected:
  double getHeroX()
  {
    // 实现代码……
  }

  double getHeroY()
  {
    // 实现代码……
  }

  double getHeroZ()
  {
    // 实现代码……
  }

  // 退出之类的……
};
```

这里我们增加了些方法获取英雄的位置。我们的`SkyLaunch`现在可以使用它们了：

```
class SkyLaunch : public Superpower
{
protected:
  virtual void activate()
  {
    if (getHeroZ() == 0)
    {
      // 在地面上，冲向空中
      playSound(SOUND_SPROING, 1.0f);
      spawnParticles(PARTICLE_DUST, 10);
      move(0, 0, 20);
    }
    else if (getHeroZ() < 10.0f)
    {
      // 接近地面，再跳一次
      playSound(SOUND_SWOOP, 1.0f);
      move(0, 0, getHeroZ() + 20);
    }
    else
    {
      // 正在空中，跳劈攻击
      playSound(SOUND_DIVE, 0.7f);
      spawnParticles(PARTICLE_SPARKLES, 1);
      move(0, 0, -getHeroZ());
    }
  }
};
```

由于我们现在可以访问状态，沙箱方法可以做有用有趣的控制流了。 这还需要几个简单的`if`声明， 但你可以做任何你想做东西。 使用包含任意代码的成熟沙箱方法，天高任鸟飞了。

早先，我建议以数据驱动的方式建立超能力。 这里是你可能不想那么做的原因之一。 如果你的行为复杂而使用命令式风格，它更难在数据中定义。

设计决策

如你所见，子类沙箱是一个“软”模式。它表述了一个基本思路，但是没有很多细节机制。这意味着每次使用都面临着一些有趣的选择。这里是一些需要思考的问题。

应该提供什么操作?

这是最大的问题。这深深影响了模式感觉上和实际上有多好。 在一种极端中，基类几乎不提供*任何*操作。只有一个沙箱方法。 为了实现功能，总是需要调用基类外部的系统。如果你这样做，很难说你在使用这个模式。

另一个极端，基类提供了*所有*子类也许需要的操作。 子类*只*与基类耦合，不调用任何外部系统的东西。

具体来说，这意味着每个子类的源文件只需要`#include`它的基类头文件。

在这两极端之间，操作由基类提供还是向外部直接调用有很大的操作余地。 你提供的操作越多，外部系统与子类耦合越少，但是与基类耦合*越多*。 从子类中移除了耦合是通过将耦合推给基类完成的。

如果你有一堆与外部系统耦合的子类的话，这很好。 通过将耦合移到提供的操作中，你将其移动到了一个地方：基类。但是你越这么做，基类就越大越难管理。

所以分界线在哪里？这里是一些首要原则：

- 如果提供的操作只被一个或几个子类使用，将操作加入基类获益不会太多。 你向基类添加了会影响所有事物的复杂性，但是只有少数几个类受益。

  让该操作与其他提供的操作保持一致或许有价值，但让使用操作的子类直接调用外部系统也许更简单明了。

- 当你调用游戏中其他地方的方法，如果方法没有修改状态就有更少的干扰。 它仍然制造耦合，但是这是“安全的”耦合，因为它没有破坏游戏中的任何东西。

  “安全的”在这里打了引号是因为严格来说，接触数据也能造成问题。 如果你的游戏是多线程的，读取的数据可能正在被修改。如果你不小心，就会读入错误的数据。

  另一个不愉快的情况是，如果你的游戏状态是严格确定性的（很多在线游戏为了保持玩家同步都是这样的）。 接触了游戏同步状态之外的东西会造成极糟的不确定性漏洞。

  另一方面，修改状态的调用会和代码库的其他方面紧密绑定，你需要三思。打包他们成基类提供的操作是个好的候选项。

- 如果操作只是增加了向外部系统的转发调用，那它就没增加太多价值。那种情况下，也许直接调用外部系统的方法更简单。

  但是，简单的转发也是有用的——那些方法接触了基类不想直接暴露给子类的状态。 举个例子，假设`Superpower`提供这个：

  ```
  void playSound(SoundId sound, double volume)
  {
    soundEngine_.play(sound, volume);
  }
  ```

  它只是转发调用给`Superpower`中`soundEngine_`字段。 但是，好处是将字段封装在`Superpower`中，避免子类接触。

方法应该直接提供，还是包在对象中提供?

这个模式的挑战是基类中最终加入了很多方法。 你可以将一些方法移到其他类中来缓和。基类通过返回对象提供方法。

举个例子，为了让超能力播放声音，我们可以直接将它们加到`Superpower`中：

```
class Superpower
{
protected:
  void playSound(SoundId sound, double volume)
  {
    // 实现代码……
  }

  void stopSound(SoundId sound)
  {
    // 实现代码……
  }

  void setVolume(SoundId sound)
  {
    // 实现代码……
  }

  // 沙盒方法和其他操作……
};
```

但是如果`Superpower`已经很庞杂了，我们也许想要避免这样。 取而代之的是创建`SoundPlayer`类暴露该函数：

```
class SoundPlayer
{
  void playSound(SoundId sound, double volume)
  {
    // 实现代码……
  }

  void stopSound(SoundId sound)
  {
    // 实现代码……
  }

  void setVolume(SoundId sound)
  {
    // 实现代码……
  }
};
```

`Superpower`提供了对其的接触：

```
class Superpower
{
protected:
  SoundPlayer& getSoundPlayer()
  {
    return soundPlayer_;
  }

  // 沙箱方法和其他操作……

private:
  SoundPlayer soundPlayer_;
};
```

将提供的操作分流到辅助类可以为你做一些事情：

- *减少了基类中的方法。* 在这里的例子中，将三个方法变成了一个简单的获取函数。
- *在辅助类中的代码通常更好管理。* 像`Superpower`的核心基类，不管意图如何好，它被太多的类依赖而很难改变。 通过将函数移到耦合较少的次要类，代码变得更容易被使用而不破坏任何东西。
- *减少了基类和其他系统的耦合度。* 当`playSound()`方法直接在`Superpower`时，基类与`SoundId`以及其他涉及音频代码直接绑定。 将它移动到`SoundPlayer`中，减少了`Superpower`与`SoundPlayer`类的耦合，这就封装了它其他的依赖。

基类如何获得它需要的状态?

你的基类经常需要将对子类隐藏的数据封装起来。 在第一个例子中，`Superpower`类提过了`spawnParticles()`方法。 如果方法的实现需要一些粒子系统对象，怎么获得呢?

- **将它传给基类构造器：**

  最简单的解决方案是让基类将其作为构造器变量：

```
class Superpower
{
public:
  Superpower(ParticleSystem* particles)
  : particles_(particles)
  {}

  // 沙箱方法和其他操作……

private:
  ParticleSystem* particles_;
};
```

这安全地保证了每个超能力在构造时能得到粒子系统。但让我们看看子类：

```
class SkyLaunch : public Superpower
{
public:
  SkyLaunch(ParticleSystem* particles)
  : Superpower(particles)
  {}
};
```

我们在这看到了问题。每个子类都需要构造器调用基类构造器并传递变量。这让子类接触了我们不想要它知道的状态。

这也让造成了维护的负担。如果我们后续向基类添加了状态，每个子类都需要修改并传递这个状态。

- **使用两阶初始化：**

  为了避免通过构造器传递所有东西，我们可以将初始化划分为两个部分。 构造器不接受任何参数，只是创建对象。然后，我们调用定义在基类的分离方法传入必要的数据：

```
Superpower* power = new SkyLaunch();
power->init(particles);
```

  注意我们没有为`SkyLaunch`的构造器传入任何东西，它与`Superpower`中想要保持私有的任何东西都不耦合。 这种方法的问题在于，你要保证永远记得调用`init()`，如果忘了，你会获得处于半完成的，无法运行的超能力。

  你可以将整个过程封装到一个函数中来修复这一点，就像这样：

```
Superpower* createSkyLaunch(ParticleSystem* particles)
{
  Superpower* power = new SkyLaunch();
  power->init(particles);
  return power;
}
```

  使用一点像私有构造器和友类的技巧，你可以保证`createSkylaunch()`函数是唯一能够创建能力的函数。 这样，你不会忘记任何初始化步骤。

- **让状态静态化：**

  在先前的例子中，我们用粒子系统初始化每一个`Superpower`*实例*。 在每个能力都需要自己独特的状态时这是有意义的。但是如果粒子系统是单例，那么每个能力都会分享相同的状态。

  如果是这样，我们可以让状态是基类私有而*静态*的。 游戏仍然要保证初始化状态，但是它只需要为整个游戏初始化`Superpower`*类*一遍，而不是为每个实例初始化一遍。

  记住单例仍然有很多问题。你在很多对象中分享了状态（所有的`Superpower`实例）。 粒子系统被封装了，因此它不是全局*可见的*，这很好，但它们都访问同一对象，这让分析起来更加困难了。

```
class Superpower
{
public:
  static void init(ParticleSystem* particles)
  {
    particles_ = particles;
  }

  // 沙箱方法和其他操作……

private:
  static ParticleSystem* particles_;
};
```

  注意这里的`init()`和`particles_`都是静态的。 只要游戏早先调用过一次`Superpower::init()`，每种能力都能接触粒子系统。 同时，可以调用正确的推导类构造器来自由创建`Superpower`实例。

  更棒的是，现在`particles_`是*静态*变量， 我们不需要在每个`Superpower`中存储它，这样我们的类占据的内存更少了。

- **使用服务定位器：**

  前一选项中，外部代码要在基类请求前压入基类需要的全部状态。 初始化的责任交给了周围的代码。另一选项是让基类拉取它需要的状态。 而做到这点的一种实现的方法是使用服务定位器模式：

  ```
  class Superpower
  {
  protected:
    void spawnParticles(ParticleType type, int count)
    {
      ParticleSystem& particles = Locator::getParticles();
      particles.spawn(type, count);
    }

    // 沙箱方法和其他操作……
  };
  ```

  这儿，`spawnParticles()`需要粒子系统，不是外部系统给它，而是它自己从服务定位器中拿了一个。

参见

- 当你使用更新模式时，你的更新函数通常也是沙箱方法。
- 这个模式与模板方法正相反。 两种模式中，都使用一系列受限操作实现方法。 使用子类沙箱时，方法在推导类中，受限操作在基类中。 使用模板方法时，*基类*有方法，而受限操作在*推导*类中。
- 你也可以认为这个模式是外观模式的变形。 外观模式将一系列不同系统藏在简化的API后。使用子类沙箱，基类起到了在子类前隐藏整个游戏引擎的作用。

类型对象

游戏设计模式Behavioral Patterns

意图

创造一个类A来允许灵活的创造新“类型”，类A的每个实例都代表了不同的对象类型。

动机

想象我们在制作一个奇幻RPG游戏。 我们的任务是为一群想要杀死英雄的恶毒怪物编写代码。 怪物有多个的属性：生命值，攻击力，图形效果，声音表现，等等。 但是为了说明介绍的目的我们先只考虑前面两个。

游戏中的每个怪物都有当前血值。 开始时是满的，每次怪物受伤，它就下降。 怪物也有一个攻击字符串。 当怪物攻击我们的英雄，那个文本就会以某种方式展示给用户。 （我们不在乎这里怎样实现。）

设计者告诉我们怪物有不同*品种*，像“龙”或者“巨魔”。 每个品种都描述了一*种*存在于游戏中的怪物，同时可能有多个同种怪物在地牢里游荡。

品种决定了怪物的初始健康——龙开始的血量比巨魔多，它们更难被杀死。 这也决定了攻击字符——同种的所有怪物都以相同的方式进行攻击。

传统的面向对象方案

想着这样的设计方案，我们启动了文本编辑器开始编程。 根据设计，龙是一种怪物，巨魔是另一种，其他品种的也一样。 用面向对象的方式思考，这引导我们创建`Monster`基类。

这是一种“是某物”的关系。 在传统OOP思路中，由于龙“是”怪物，我们用`Dragon`是`Monster`的子类来描述这点。 如我们将看到的，继承是一种将这种关系表示为代码的方法。

```
class Monster
{
public:
  virtual ~Monster() {}
  virtual const char* getAttack() = 0;

protected:
  Monster(int startingHealth)
  : health_(startingHealth)
  {}

private:
  int health_; // 当前血值
};
```

在怪物攻击英雄时，公开的`getAttack()`函数让战斗代码能获得需要显示的文字。 每个子类都需要重载它来提供不同的消息。

构造器是protected的，需要传入怪物的初始血量。 每个品种的子类的公共构造器调用这个构造器，传入对于该品种适合的起始血量。

现在让我们看看两个品种子类：

```
class Dragon : public Monster
{
public:
  Dragon() : Monster(230) {}

  virtual const char* getAttack()
  {
    return "The dragon breathes fire!";
  }
};

class Troll : public Monster
{
public:
  Troll() : Monster(48) {}

  virtual const char* getAttack()
  {
    return "The troll clubs you!";
  }
};
```

感叹号让所有事情都更刺激！

每个从`Monster`派生出来的类都传入起始血量，重载`getAttack()`返回那个品种的攻击字符串。 所有事情都一如所料的运行，不久以后，我们的英雄就可以跑来跑去杀死各种野兽了。 我们继续编程，在意识到之前，我们就有了酸泥怪到僵尸羊的众多怪物子类。

然后，很奇怪，事情陷入了困境。 设计者最终想要*几百个*品种，但是我们发现所有的时间都花费在写这些只有七行长的子类和重新编译上。 这会继续变糟——设计者想要协调已经编码的品种。我们之前富有产出的工作日退化成了：

1. 收到设计者将巨魔的血量从48改到52的邮件。
2. 签出并修改`Troll.h`。
3. 重新编译游戏。
4. 签入修改。

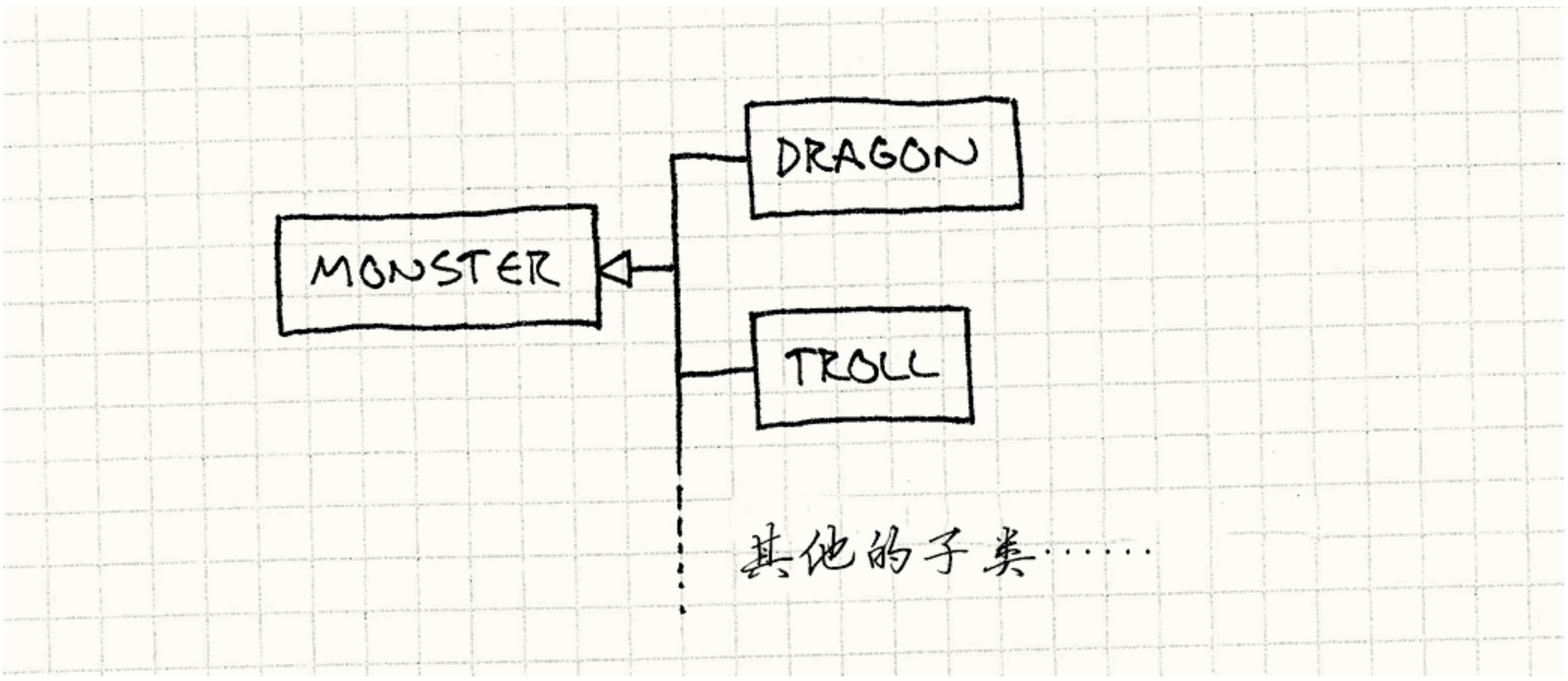
5. 回复邮件。
6. 重复。

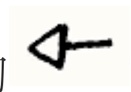
我们度过了失意的一天，因为我们变成了填数据的猴子。 设计者也感到挫败，因为修改一个数据就要老久。 我们需要的是一种无需每次重新编译游戏就能修改品种的状态。 如果设计者创建和修改品种时无需*任何*程序员的介入那就更好了。

为类型建类

从较高的层次看来，我们试图解决的问题非常简单。 游戏中有很多不同的怪物，我们想要在它们之间分享属性。 一大群怪物在攻击英雄，我们想要它们中的一些使用相同的攻击文本。 我们声明这些怪物是相同的“品种”，而品种决定了攻击字符串。

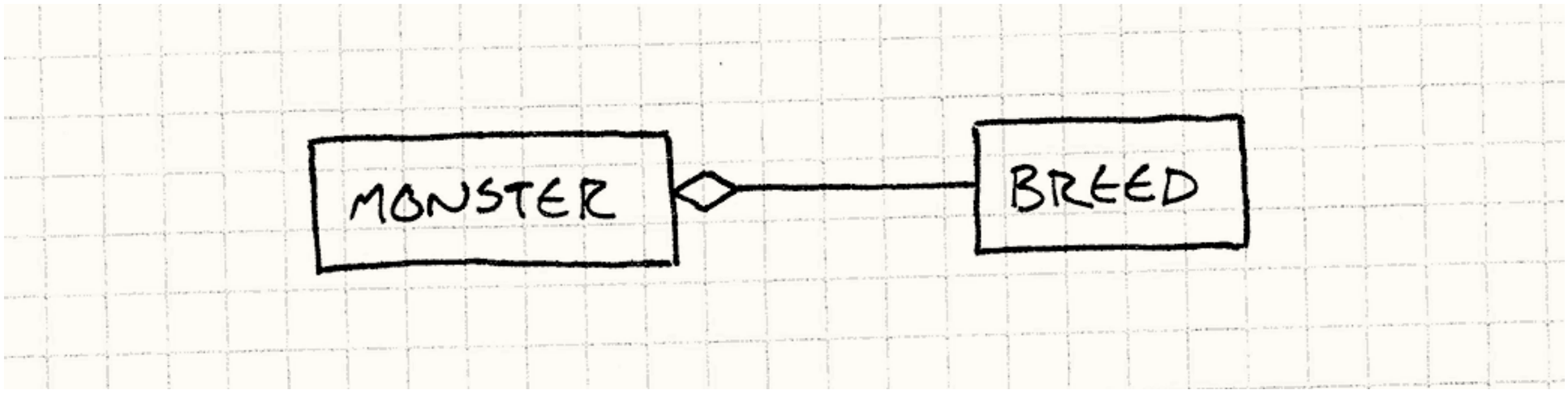
这种情况下我们很容易想到类，那就试试吧。 龙是怪物，每条龙都是龙“类”的实例。 定义每个品种为抽象基类`Monster` 的子类，让游戏中每个怪物都是子类的实例反映了那点。最终的类层次是这样的：

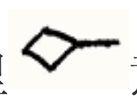


这里的  意为“从……继承”。

每个怪物的实例属于摸个继承怪物类的类型。 我们有的品种越多，类层次越高。 这当然是问题：添加新品种就需要添加新代码，而每个品种都需要被编译为它自己的类型。

这可行，但不是唯一的选项。 我们也可以重构代码让每个怪物*有*品种。 不是让每个品种继承`Monster`，我们现在有单一的`Monster`类和`Breed`类。



这里  意为“被……引用”。

这就成了，就两个类。注意这里完全没有继承。 通过这个系统，游戏中的每个怪物都是`Monster`的实例。 `Breed`类包含了在不同品种怪物间分享的信息：开始血量和攻击字符串。

为了将怪物与品种相关联，我们给了每个`Monster`实例对包含品种信息的`Breed`对象的引用。 为了获得攻击字符串，一个怪兽可以调用它品种的方法。 `Breed`类本质上定义了一个怪物的*类型*，这就是为啥这个模式叫做类型对象。

这个模式特别有用的一点是，我们现在可以定义全新的*类型*而无需搅乱代码库。 我们本质上将部分的类型系统从硬编码的继承结构中拉出，放到可以在运行时定义的数据中去。

我们可以通过用不同值实例化`Monster`来创建成百上千的新品种。 如果从配置文件读取不同的数据初始化品种，我们就有能力完全靠数据定义新怪物品种。 这么容易，设计者也可以做到！

模式

定义

类型对象类和**有类型的对象**类。每个类型对象实例代表一种不同的逻辑类型。 每种有类型的对象保存**对描述它类型的类型对象的引用**。

实例相关的数据被存储在有类型对象的实例中，被同种类分享的数据或者行为存储在类型对象中。 引用同一类型对象的对象将会像同一类型一样运作。 这让我们在一组相同的对象间分享行为和数据，就像子类让我们做的那样，但没有固定的硬编码子类集合。

何时使用

在任何你需要定义不同“种”事物，但是语言自身的类型系统过于僵硬的时候使用该模式。尤其是下面两者之一成立时：

- 你不知道你后面还需要什么类型。（举个例子，如果你的游戏需要支持资料包，而资料包有新的怪物品种呢？）
- 修改或添加新类型不想改变代码或者重新编译就能。

记住

这个模型是关于将“类型”的定义从命令式僵硬的语言世界移到灵活但是缺少行为的对象内存世界。 灵活性很好，但是将类型提到数据丧失了一些东西。

需要手动追踪类型对象

使用像C++类型系统这样的好处之一就是编译器自动记录类的注册。 定义类的数据自动编译到可执行的静态内存段然后就运作起来了。

使用类型对象模式，我们现在不但要负责管理内存中的怪物，同时要管理它们的*类型*——我们要保证，只要我的怪物需要，所有的品种对象都能实例化并保存在内存中。 无论何时创建新的怪物，由我们来保证能初始化为有含有品种的引用。

我们从编译器的限制中解放了自己，但是代价是需要重新实现一些它以前为我们做的事情。

C++内部使用了“虚函数表”（“vtable”）实现虚方法。 虚函数表是个简单的`struct`，包含了一集合函数指针，每个对应一个类中的虚方法。 在内存中每个类有一个虚函数表。每个类的实例有一个指针指向它类的虚函数表。

当你调用一个虚函数，代码首先在虚函数表中查找对象，然后调用表中函数指针指向的函数。

听起来很熟悉？虚函数表就是个品种对象，而指向虚函数表的指针是怪物保留的、指向品种的引用。 C++的类是C中的类型对象，由编译器自动处理。

更难为每种类型定义*行为*

使用子类派生，你可以重载方法，然后做你想做的事——用程序计算值，调用其他代码，等等。 天高任鸟飞。如果我们想的话，可以定义一个怪物子类，根据月亮的阶段改变它的攻击字符串。（我觉得就像狼人。）

当我们使用类型对象模式时，我们将重载的方法替换成了成员变量。 不再让怪物的子类重载方法，用不同的*代码*来*计算*攻击字符串，我们的品种对象而是在不同的*变量*中*存储*攻击字符串。

这让使用类型对象定义类型相关的*数据*变得容易，但是定义类型相关的*行为*变得困难。 如果，举个例子，不同品种的怪物需要使用不同的AI算法，使用这个模式就面临着挑战。

有很多方式可以让我们跨越这个限制。 一个简单的方式是使用预先定义的固定行为， 然后类型对象中的数据简单的*选择*它们中的一个。 举例，假设我们的怪物AI总是处于“站着不动”、“追逐英雄”或者“恐惧地呜咽颤抖”（嘿，他们不可能都是强势的龙）。 我们可以定义函数来实现每种行为。 然后，我们在方法中存储合适函数的引用，将AI算法与品种相关联。

听起来很熟悉？这是在*我们的*类型对象中实现虚函数表。

另一个更加彻底的解决方案是真正地在数据中支持定义行为。 解释器模式和字节码模式让我们定义有行为的对象。 如果我们读取数据文件并用上面两种模式之一构建数据结构，我们就将行为完全从代码中移出，放入了数据之中。

时过境迁，游戏越来越多的由数据驱动。 硬件更为强大，我们发现比起能榨干多少硬件的性能，瓶颈更多在能完成多少内容。 使用64K的软盘的时代，挑战是将游戏*塞入*其中。 而在使用双面DVD的时代，挑战是用游戏*填满*它。

脚本语言和其他高层定义游戏行为的方式能给我们提供必要的生产力，同时只消耗可预期的运行时性能。 由于硬件越来越好，而大脑并非如此，这种交换越来越有意义。

示例代码

在第一遍实现中，让我们从简单的开始，只构建动机那节提到的基础系统。 我们从`Breed`类开始：

```
class Breed
{
public:
  Breed(int health, const char* attack)
  : health_(health),
    attack_(attack)
  {}

  int getHealth() { return health_; }
  const char* getAttack() { return attack_; }

private:
  int health_; // 初始血值
  const char* attack_;
};
```

很简单。它基本上只是两个数据字段的容器：起始血量和攻击字符串。 让我们看看怪物怎么使用它：

```
class Monster
{
public:
  Monster(Breed& breed)
  : health_(breed.getHealth()),
    breed_(breed)
  {}

  const char* getAttack()
  {
    return breed_.getAttack();
  }

private:
  int    health_; // 当前血值
  Breed& breed_;
};
```

当我们建构怪物时，我们给它一个品种对象的引用。 它定义了怪物的品种，取代了之前的子类。 在构造函数中，`Monster`使用的品种决定了起始血量。 为了获得攻击字符串，怪物简单的将调用转发给它的品种。

这段非常简单的代码是这章的核心思路。剩下的任何东西都是红利。

让类型对象更像类型：构造器

现在，我们可以直接构造怪物并负责传入它的品种。 和常用的OOP语言实现的对象相比这有些退步——我们通常不会分配一块空白内存，*然后*赋予它类型。 相反，我们根据类调用构造器，它负责创建一个新实例。

我们可以在类型对象上应用同样的模式。

```
class Breed
{
public:
  Monster* newMonster() { return new Monster(*this); }

  // Previous Breed code...
};
```

“模式”一词用在这里正合适。我们讨论的是设计模式中经典的模式：工厂方法。

在一些语言中，这个模式被用来构造*所有*的对象。 在Ruby，Smalltalk，Objective-C以及其他类是对象的语言中，你通过在类对象本身上调用方法来构建实例。

以及那个使用它们的类：

```
class Monster
{
  friend class Breed;

public:
  const char* getAttack() { return breed_.getAttack(); }

private:
  Monster(Breed& breed)
  : health_(breed.getHealth()),
    breed_(breed)
  {}

  int health_; // 当前血值
  Breed& breed_;
};
```

不同的关键点在于`Breed`中的`newMonster()`。 这是我们的“构造器”工厂方法。使用我们原先的实现，就像这样创建怪物：

这里还有一个小小的不同。 因为样例代码由C++写就，我们可以使用一个小小的特性：*友类*。

我们让`Monster`的构造器成为私有，防止了任何人直接调用它。 友类放松了这个限制，`Breed`仍可接触它。 这意味着构造怪物的*唯*一方法是通过`newMonster()`。

```
Monster* monster = new Monster(someBreed);
```

在我们改动后，它看上去是这样：

```
Monster* monster = someBreed.newMonster();
```

所以，为什么这么做？创建一个对象分为两步：内存分配和初始化。 `Monster`的构造器让我们做完了所有需要的初始化。 在例子中，那只存储了类型，但是在完整的游戏中，那需要加载图形，初始化怪物AI以及做其他的设置工作。

但是，那都发生在内存分配*之后*。 在构造器调用前，我们已经找到了内存放置怪物。 在游戏中，我们通常也想控制对象创造这一环节： 我们通常使用自定义的分配器或者对象池模式来控制对象最终在内存中的位置。

在`Breed`中定义“构造器”函数给了我们地方实现这些逻辑。 不是简单的调用`new`,`newMonster()`函数可以在将控制权传递给`Monster`初始化之前，从池中或堆中获取内存。 通过在*唯*一有能力创建怪物的`Breed`函数中放置这些逻辑， 我们保证了所有怪物变量遵守了内存管理规范。

通过继承分享数据

我们现在已经实现了能完美服务的类型对象系统，但是它非常基础。 我们的游戏最终有*上百*种不同品种，每种都有成打的特性。 如果设计者想要协调30中不同的巨魔，让它们变得强壮一点，他会的处理很多数据。

能帮上忙的是在不同*品种*间分享属性的能力，一如品种在不同的*怪物*间分享属性的能力。 就像我们在之前OOP方案中做的那样，我们可以使用派生完成这点。 只是，这次，不使用语言的继承机制，我们用类型对象实现它。

简单起见，我们只支持单继承。 就像类可以有一个父类，我们允许品种有一个父品种：

```
class Breed
{
public:
  Breed(Breed* parent, int health, const char* attack)
  : parent_(parent),
    health_(health),
    attack_(attack)
  {}

  int          getHealth();
  const char* getAttack();

private:
  Breed*       parent_;
  int          health_; // 初始血值
  const char* attack_;
};
```

当我们构建一个品种，我们先传入它继承的父品种。 我们可以为基础品种传入`NULL`表明它没有祖先。

为了让这有用，子品种需要控制它从父品种继承了哪些属性，以及哪些属性需要重载并由自己指定。 在我们的示例系统中，我们可以说品种用非零值重载了怪物的健康，用非空字符串重载了攻击字符串。 否则，这些属性要从它的父品种里继承。

实现方式有两种。 一种是每次属性被请求时动态处理委托，就像这样：

```
int Breed::getHealth()
{
  // 重载
  if (health_ != 0 || parent_ == NULL) return health_;

  // 继承
  return parent_->getHealth();
}

const char* Breed::getAttack()
{
  // 重载
  if (attack_ != NULL || parent_ == NULL) return attack_;

  // 继承
  return parent_->getAttack();
}
```

如果品种在运行时修改种类，不再重载，或者不再继承某些属性时，这能保证做正确的事。另一方面，这要更多的内存（它需要保存指向它的父品种的指针）而且更慢。 每次你查找属性都需要回溯继承链。

如果我们可以保证品种的属性不变，一个更快的解决方案是在*构造时*使用继承。 这被称为“复制”委托，因为在创建对象时，我们*复制*继承的属性*到*推导的类型。它看上去是这样的：

```
Breed(Breed* parent, int health, const char* attack)
: health_(health),
  attack_(attack)
{
  // 继承没有重载的属性
  if (parent != NULL)
  {
    if (health == 0) health_ = parent->getHealth();
    if (attack == NULL) attack_ = parent->getAttack();
  }
}
```

注意现在我们不再需要给父品种的字段了。 一旦构造器完成，我们可以忘了父品种，因为我们已经拷贝了它的所有属性。 为了获得品种的属性，我们现在直接返回字段：

```
int          getHealth() { return health_; }
const char* getAttack() { return attack_; }
```

又好又快！

假设游戏引擎从品种的JSON文件加载设置然后创建类型。它看上去是这样的：

```
{
  "Troll": {
    "health": 25,
    "attack": "The troll hits you!"
  },
  "Troll Archer": {
    "parent": "Troll",
    "health": 0,
    "attack": "The troll archer fires an arrow!"
  },
  "Troll Wizard": {
    "parent": "Troll",
    "health": 0,
    "attack": "The troll wizard casts a spell on you!"
  }
}

:::json
{
  "Troll": {
    "health": 25,
    "attack": "The troll hits you!"
  },
  "Troll Archer": {
    "parent": "Troll",
    "health": 0,
    "attack": "The troll archer fires an arrow!"
  },
  "Troll Wizard": {
    "parent": "Troll",
    "health": 0,
    "attack": "The troll wizard casts a spell on you!"
  }
}
```

我们有一段代码读取每个品种，用新数据实例化品种实例。 就像你从`"parent": "Troll"`字段看到的， `Troll Archer`和`Troll Wizard`品种都由基础`Troll`品种继承而来。

由于派生类的初始血量都是0，所以该值从基础`Troll`品种继承。 这意味着无论怎么调整`Troll`的血量，三个品种的血量都会被更新。 随着品种的数量和属性的数量增加，这节约了很多时间。 现在，通过一小块代码，系统给了设计者控制权，让他们能好好利用时间。 与此同时，我们可以回去编码其他特性了。

设计决策

类型对象模式让我们建立类型系统，就好像在设计自己的编程语言。 设计空间是开放的，我们可以做很多有趣的事情。

在实践中，有些东西打破了我们的幻想。 时间和可维护性阻止我们创建特别复杂的东西。 更重要的是，无论如何设计类型系统，用户（通常不是程序员）要能轻松地理解它。 我们将其做的越简单，它就越有用。 所以我们在这里谈到的是已经反复探索的领域，开辟新路就留给学者和探索者吧。

类型对象是封装的还是暴露的?

在我们的简单实现中，`Monster`有一个对品种的引用，但是它没有显式暴露这个引用。 外部代码不能直接获取怪物的品种。 从代码库的角度看来，怪物事实上是没有类型的，事实上它们拥有品种只是个实现细节。

我们可以很容易的改变这点，让`Monster`返回它的`Breed`：

```
class Monster
{
public:
  Breed& getBreed() { return breed_; }

  // 当前的代码……
};
```

在本书的另一个例子中，我们遵守了惯例，返还对象的引用而不是对象的指针，保证了永远不会返回`NULL`。

这样做改变了`Monster`的设计。 事实是所有怪物都拥有品种是API的可见部分了，下面是这两者各自的好处：

- **如果类型对象是封装的：**
  - *类型对象模式的复杂性对代码库的其他部分是隐藏的。* 它成为了只有有类型的对象才需要考虑的实现细节。
  - *有类型的对象可以选择性地修改类型对象的重载行为。* 假设我们想要怪物在它接近死亡时改变它的攻击字符串。 由于攻击字符串总是通过`Monster`获取的，我们有一个方便的地方放置代码：

    ```
    const char* Monster::getAttack()
    {
      if (health_ < LOW_HEALTH)
      {
        return "The monster flails weakly.";
      }

      return breed_.getAttack();
    }
    ```

    如果外部代码直接调用品种的`getAttack()`，我们就没有机会能插入逻辑。
  - *我们得为每个类型对象暴露的方法写转发。* 这是这个设计的冗长之处。如果类型对象有很多方法，对象类也得为每一个方法建立属于自己的公共可见方法。
- **如果类型对象是暴露的：**
  - *外部代码可以与类型对象直接交互，无需拥有类型对象的实例。* 如果类型对象是封装的，那么没有一个拥有它的对象就没法使用它。 这阻止我们使用构造器模式这样的方法，在品种上调用方法来创建新怪物。 如果用户不能直接获得品种，他们就没办法调用它。
  - *类型对象现在是对象公共API的一部分了。* 大体上，窄接口比宽接口更容易掌控——你暴露给代码库其他部分的越少，你需要处理的复杂度和维护工作就越少。 通过暴露类型对象，我们扩宽了对象的API，包含了所有类型对象提供的东西。

有类型的对象是如何创建的?

使用这个模式，每个“对象”现在都是一对对象：主对象和它的类型对象。 所以我们怎样创建并绑定两者呢?

- 构造对象然后传入类型对象：
  - *外部代码可以控制分配。* 由于调用代码也是构建对象的代码，它可以控制其的内存位置。 如果我们想要UI在多种内存场景中使用（不同的分配器，在栈中，等等），这给了完成它的灵活性。
- 在类型对象上调用“构造器”函数：
  - *类型对象控制了内存分配。* 这是硬币的另一面。如果我们*不想*让用户选择在内存中何处创建对象， 在类型对象上调用工厂方法可以达到这一点。 如果我们想保证所有的对象都来自具体的对象池或者其他的内存分配器时也有用。

能改变类型吗?

到目前为止，我们假设一旦对象创建并绑定到类型对象上，这永远不会改变。 对象创建时的类型就是它销毁时的类型。这其实没有必要。 我们*可以*允许对象随着时间改变它的类型。

让我们回想下我们的例子。 当怪物死去时，设计者告诉我们，有时它的尸体会复活成僵尸。 我们可以通过在怪物死亡时产生僵尸类型的新怪兽，但另一个选项是拿到现有的怪物，然后将它的品种改为僵尸。

- **如果类型不改变：**
  - *编码和理解都更容易。* 在概念上，大多数人不期望“类型”会改变。这符合大多数人的理解。
  - *更容易查找漏洞。* 如果我们试图追踪怪物进入奇怪状态时的漏洞，*现在*看到的品种就是怪物始终保持的品种可以大大简化工作。
- **如果类型可以改变：**
  - *需要创建的对象更少。* 在我们的例子中，如果类型不能改变，我们需要消耗CPU循环创建新的僵尸怪物对象， 把原先对象中需要保留的属性都拷贝过来，然后删除它。 如果我们可以改变类型，所有的工作都被一个简单的声明取代。
  - *我们需要小心地做约束。* 在对象和它的类型间有强耦合是很自然的事情。 举个例子，一个品种也许假设怪物*当前的*血量永远高于品种中的初始血量。

    如果我们允许品种改变，我们需要确保已存对象满足新品种的需求。 当我们改变类型时，我们也许需要执行一些验证代码保证对象现在的状态对新类型是有意义的。

它支持何种继承?

- **没有继承:**
  - *简单。* 最简单的通常是最好的。如果你在类型对象间没有大量数据共享，为什么要为难自己呢?
  - *这会带来重复的工作。* 我从未见过看到哪个编码系统中设计者不想要继承的。 当你有十五种不同的精灵时，协调血量就要修改十五处同样的数字真是糟透了。
- **单继承:**
  - *还是相对简单。* 它易于实现，但是，更重要的是，也易于理解。如果非技术用户正在使用这个系统，要操作的部分越少越好。 这就是很多编程语言只支持单继承的原因。这看起来是能力和简洁之间的平衡点。
  - *查询属性更慢。* 为了在类型对象中获取一块数据，我们也许需要回溯继承链寻找是哪一个类型最终决定了值。 在性能攸关的代码上，我们也许不想花时间在这上面。
- **多重继承:**
  - *可以避免绝大多数代码重复。* 使用优良的多继承系统，用户可以为类型对象建立几乎没有冗余的层次。 改变数值时，我们可以避免很多复制和粘贴。
  - *复杂。* 不幸的是，它的好处更多的是理论上的而非实际上的。多重继承很难理解。

    如果僵尸龙继承僵尸和龙，哪些属性来自僵尸，哪些来自于龙? 为了使用系统，用户需要理解如何继承图的遍历，还需要有设计优秀层次的远见。

    我看到的大多数C++编码标准趋向于禁止多重继承，Java和C#完全移除了它。 这承认了一个悲伤的事实：它太难掌握了，最好根本不要用。 尽管值得考虑，但你很少想要在类型对象上实现多重继承。就像往常一样，简单的总是最好的。

参见

- 这个模式处理的高层问题是在多个对象间分享数据和行为。 另一个用另一种方式解决了相同问题的模式是原型模式。

- 类型对象是享元模式的近亲。 两者都让你在实例间分享代码。使用享元，意图是节约内存，而分享的数据也许不代表任何概念上对象的“类型”。 使用类型对象模式，焦点在组织性和灵活性。

- 这个模式和状态模式有很多相似之处。 两者都委托对象的部分定义给另外一个对象。 通过类型对象，我们通常委托*是什么*：不变的数据概括描述对象。 通过状态，我们委托*现在是什么*：暂时描述对象当前状态的数据。

  当我们讨论对象改变它的类型时，你可以将其认为类型对象起到了和状态相似的职责。

解耦模式

游戏设计模式

一旦你掌握了编程语言，编写想要写的东西就会变得相当容易。 困难的是编写适应需求*变化*的代码，在我们用文本编辑器开火之前，通常没有完美的特性表供我们使用。

能让我们更好适应变化的工具是*解耦*。 当我们说两块代码“解耦”时，是指修改一块代码一般不会需要修改另一块代码。 当我们修改游戏中的特性时，需要修改的代码越少，就越容易。

组件模式将一个实体拆成多个，解耦不同的领域。 事件序列解耦了两个互相通信的事物，稳定而且*及时*。 服务定位器让代码使用服务而无需绑定到提供服务的代码。

模式

- 组件模式
- 事件序列
- 服务定位器

组件模式

游戏设计模式Decoupling Patterns

意图

允许单一的实体跨越多个领域而不会导致这些领域彼此耦合。

动机

让我们假设我们正构建平台跳跃游戏。 意大利水管工已经有人做了，因此我们将出动丹麦面包师，Bj?rn。 照理说，会有一个类来表示友好的糕点厨师，包含他在比赛中做的一切。

像这样的游戏创意导致了我是程序员而不是设计师。

由于玩家控制他，这意味着需要读取控制器的输入然后转化为动作。 而且，当然，他需要与关卡相互作用，所以要引入物理和碰撞。 一旦这样做了，他必须在屏幕上出现，所以要引入动画和渲染。 他可能还会播放一些声音。

等一下，这在失控。软件体系结构101课程告诉我们，程序的不同领域应保持分离。 如果我们做一个文字处理器，处理打印的代码不应该受加载和保存文件的代码影响。 游戏和企业应用程序的领域不尽相同，但该规则仍然适用。

我们希望AI，物理，渲染，声音和其他领域域尽可能相互不了解， 但现在我们将所有这一切挤在一个类中。 我们已经看到了这条路通往何处：5000行的巨大代码文件，哪怕是你们团队中最勇敢的程序员也不敢打开。

这工作对能驯服他的少数人是有趣的，但对其他人是地狱。 这么大的类意味着，即使是看似微不足道的变化亦可有深远的影响。 很快，为类添加*错误*的速度明显快于添加*功能*的速度。

快刀斩乱麻

比起单纯的规模问题，更糟糕的是耦合。 在游戏中所有不同的系统被绑成了一个巨大的代码球：

```
if (collidingWithFloor() && (getRenderState() != INVISIBLE))
{
  playSound(HIT_FLOOR);
}
```

任何试图改变上面代码的程序员，都需要物理，图形和声音的相关知识，以确保没破坏什么。

这样的耦合在*任何*游戏中出现都是个问题，但是在使用并发的现代游戏中尤其糟糕。 在多核硬件上，让代码同时在多个线程上运行是至关重要的。 将游戏分割到线程的一种通用方法是通过领域划分——在一个核上运行AI代码，在另一个上播放声音，在第三个上渲染，等等。

一旦你这么做了，在领域间保持解耦就是至关重要的，这是为了避免死锁或者其他恶魔般的并发问题。 如果某个函数从一个线程上调用`UpdateSounds()`方法，从另一个线程上调用`RenderGraphics()`方法，那它是在自找麻烦。

这两个问题互相混合;这个类涉及太多的域，每个程序员都得接触它， 但它又太过巨大，这就变成了一场噩梦。 如果变得够糟糕，程序员会黑入代码库的其他部分，仅仅为了躲开这个像毛球一样的`Bjorn`类。

快刀斩乱麻

我们可以像亚历山大大帝一样解决这个问题——快刀斩乱麻。 按领域将`Bjorn`类切片成相互独立的部分。 例如，我们抽出所有处理用户输入的代码，将其移动到一个单独的`InputComponent`类。 `Bjorn`拥有这个部件的一个实例。我们将对`Bjorn`接触的每个领域重复这一过程。

当完成后，我们将`Bjorn`大多数的东西都抽走了。 剩下的是一个薄壳包着所有的组件。 通过将类划分为多个小类，我们已经解决了这个问题。但我们完成了远远不止这些。

宽松的结果

我们的组件类现在解耦了。 尽管`Bjorn`有`PhysicsComponent`和`GraphicsComponent`， 但这两部分都不知道对方的存在。 这意味着处理物理的人可以修改组件而不需要了解图形，反之亦然。

在实践中，这些部件需要在它们之间有*一些*相互作用。 例如，AI组件可能需要告诉物理组件Bj?rn试图去哪里。 然而，我们可以限制这种交互在*确实*需要交互的组件之间， 而不是把它们围在同一个围栏里。

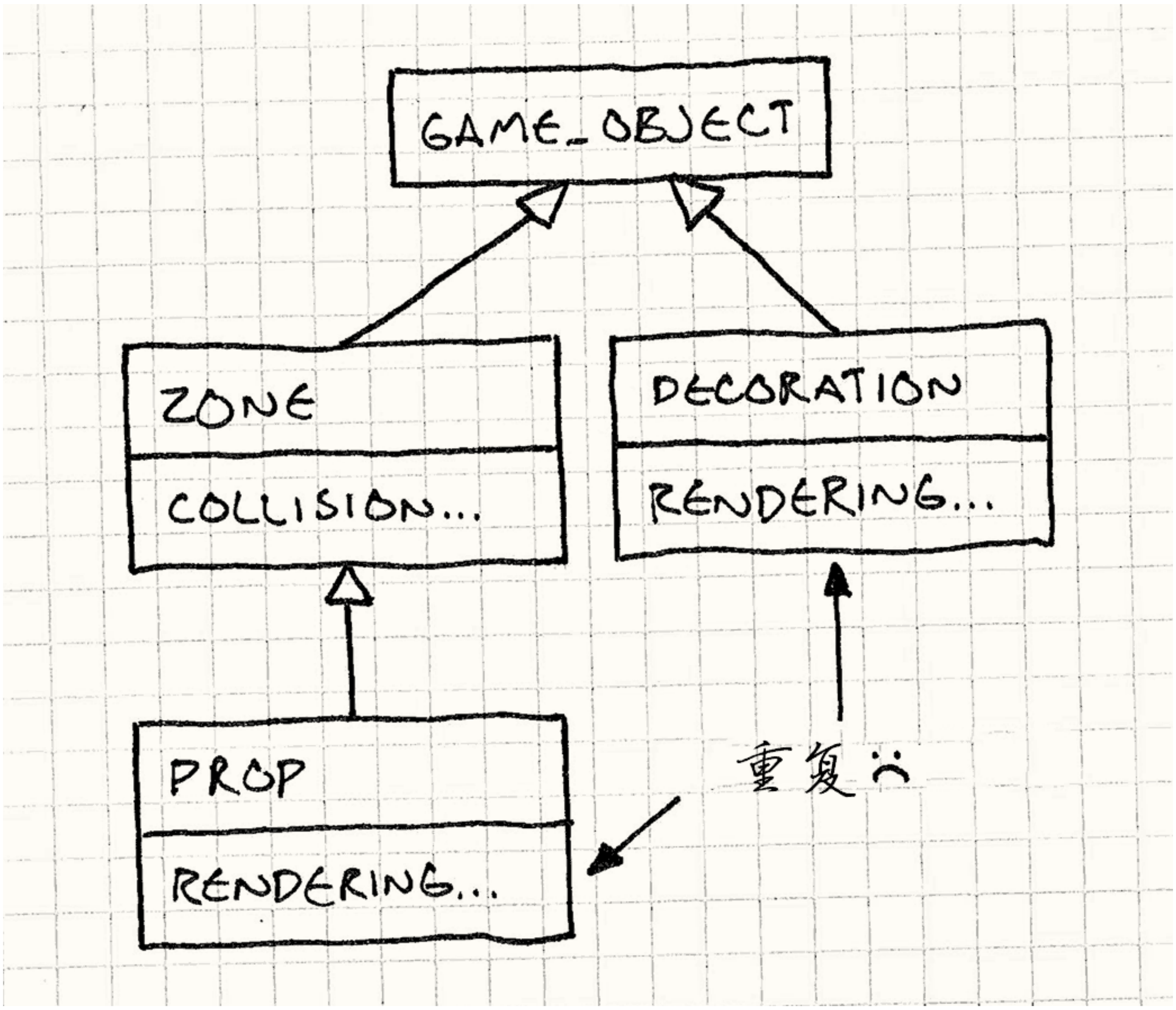
绑到一起

这种设计的另一特性是，组件现在是可复用的包。 到目前为止，我们专注于面包师，但是让我们考虑几个游戏世界中其他类型的对象。 *装饰* 是玩家看到但不能交互的事物：灌木，杂物等视觉细节。 *道具* 像*装饰*，但可以交互：箱，巨石，树木。 *区域* 与装饰相反——无形但可互动。 它们是很好的触发器，比如在Bj?rn进入区域时触发过场动画。

当面向对象语言第一次接触这个场景时，继承是它箱子里最闪耀的工具。 它被认为是代码无限重用之锤，编程者常常挥舞着它。 然而我们痛苦地学到，事实上它是一把重锤。 继承有它的用处，但对简单的代码重用太过复杂。

相反，在今日软件设计的趋势是尽可能使用组件代替继承。 不是让两个类*继承*同一类来分享代码，而是让它们*拥有同一个类的实例*。

现在，考虑如果不用组件，我们将如何建立这些类的继承层次。第一遍可能是这样的：


GAME_OBJECT
ZONE
COLLISION...
DECORATION
RENDERING...
PROP
RENDERING...
重复:(

我们有`GameObject`基类，包含位置和方向之类的通用部分。 `Zone`继承它，增加了碰撞检测。 同样，`Decoration`继承`GameObject`，并增加了渲染。 `Prop`继承`Zone`，因此它可以重用碰撞代码。 然而，`Prop`不能*同时*继承`Decoration`来重用*渲染*， 否则就会造成致命菱形结构。

“致命菱形”发生在类继承了多个类，而这多个类中有两个继承同一基类时。 介绍它造成的痛苦超过了本书的范围，但它被称为“致命”是有原因的。

我们可以反过来让`Prop`继承`Decoration`，但随后不得不重复*碰撞检测*代码。 无论哪种方式，没有干净的方式重用碰撞和渲染代码而不诉诸多重继承。 唯一的其他选择是一切都继承`GameObject`， 但随后`Zone`会浪费内存在并不需要的渲染数据上， `Decoration`在物理效果上有同样的浪费。

现在，让我们尝试用组件。子类将彻底消失。 取而代之的是一个`GameObject`类和两个组件类：`PhysicsComponent`和`GraphicsComponent`。 装饰是个简单的`GameObject`，包含`GraphicsComponent`但没有`PhysicsComponent`。 区域与其恰好相反，而道具包含两种组件。 没有代码重复，没有多重继承，只有三个类，而不是四个。

可以拿饭店菜单打比方。如果每个实体是一个类，那就只能订套餐。 我们需要为每种*可能*的组合定义各自的类。 为了满足每位用户，我们需要十几种套餐。

组件是照单点菜——每位顾客都可以选他们想要的，菜单记录可选的菜式。

对对象而言，组件是即插即用的。 将不同的可重用部件插入对象，我们就能构建复杂具有丰富的行为实体。 就像软件中的战神金刚。

模式

单一实体跨越了多个领域。为了保持领域之间相互分离，将每部分代码放入**各自的组件类**中。 *实体被简化为组件的容器*。

“组件”，就像“对象”，在编程中意味任何东西也不意味任何东西。 正因如此，它被用来描述一些概念。 在商业软件中，“组件”设计模式描述通过网络解耦的服务。

我试图从游戏中找到无关这个设计模式的另一个名字，但“组件”看来是最常用的术语。 由于设计模式是关于记录已存的实践，我没有创建新术语的余地。 所以，跟着XNA，Delta3D和其他人的脚步，我称之为“组件”。

何时使用

组件通常在定义游戏实体的核心部分中使用，但它们在其他地方也有用。 这个模式在如下情况中可以使用：

- 有一个涉及了多个领域的类，而你想保持这些领域互相隔离。
- 一个类正在变大而且越来越难以使用。
- 想要能定义一系列分享不同能力的类，但是使用继承无法让你精确选取要重用的部分。

记住

组件模式比简单地向类中添加代码增加了一点点复杂性。 每个概念上的“对象”要组成真正对象需要实例化，初始化，然后正确的连接。 不同组件间沟通会有些困难，而控制它们如何使用内存就更加复杂。

对于大型代码库，为了解耦和重用而付出这样的复杂度是值得的。 但是在使用这种模式之前，保证你没有为了不存在的问题而“过度设计”。

使用组件的另一后果是，需要多一层跳转才能做要做的事。 拿到容器对象，获得相应的组件，*然后* 你才能做想做的事情。 在性能攸关的内部循环中，这种跳转也许会导致糟糕的性能。

这是硬币的两面。组件模式通常可以*增进*性能和缓存一致性。 组件让使用数据局部性模式的CPU更容易地组织数据。

示例代码

我写这本书的最大挑战之一就是搞明白如何隔离各个模式。 许多设计模式包含了不属于这种模式的代码。 为了将提取模式的本质，我尽可能的消减代码， 但是在某种程度上，这就像没有衣服还要说明如何整理衣柜。

说明组件模式尤其困难。 如果看不到它解耦的各个领域的代码，你就不能获得正确的体会， 因此我会多写一些有关于Bj?rn的代码。 这个模式事实上只关于将组件变为类，但类中的代码可以帮助表明类是做什么用的。 它是伪代码——它调用了其他不存在的类——但这应该可以让你理解我们正在做什么。

单块类

为了清晰的看到这个模式是如何应用的， 我们先展示一个`Bjorn`类， 它包含了所有我们需要的事物，但是*没有*使用这个模式：

我应指出在代码使用角色的名字总是个坏主意。市场部有在发售之前改名字的坏习惯。“焦点测试表明，在11岁到15岁的男性不喜欢‘Bj?rn’，请改为‘Sven&rsquo”。

这就是为什么很多软件项目使用内部代码名。 而且比起告诉人们你在完成“Photoshop的下一版本”，告诉他们你在完成“大电猫”更有趣。

```
class Bjorn
{
public:
  Bjorn()
  : velocity_(0),
    x_(0), y_(0)
  {}

  void update(World& world, Graphics& graphics);

private:
  static const int WALK_ACCELERATION = 1;

  int velocity_;
  int x_, y_;

  Volume volume_;

  Sprite spriteStand_;
  Sprite spriteWalkLeft_;
  Sprite spriteWalkRight_;
};
```

`Bjorn`有个每帧调用的`update()`方法。

```
void Bjorn::update(World& world, Graphics& graphics)
{
  // 根据用户输入修改英雄的速度
  switch (Controller::getJoystickDirection())
  {
    case DIR_LEFT:
      velocity_ -= WALK_ACCELERATION;
      break;

    case DIR_RIGHT:
      velocity_ += WALK_ACCELERATION;
      break;
  }

  // 根据速度修改位置
  x_ += velocity_;
  world.resolveCollision(volume_, x_, y_, velocity_);

  // 绘制合适的图形
  Sprite* sprite = &spriteStand_;
  if (velocity_ < 0)
  {
    sprite = &spriteWalkLeft_;
  }
  else if (velocity_ > 0)
  {
    sprite = &spriteWalkRight_;
  }

  graphics.draw(*sprite, x_, y_);
}
```

它读取操纵杆以确定如何加速面包师。 然后，用物理引擎解析新位置。 最后，将Bj?rn渲染至屏幕。

这里的示例实现平凡而简单。 没有重力，动画，或任何让人物有趣的其他细节。 即便如此，我们可以看到，已经出现了同时消耗多个程序员时间的函数，而它开始变得有点混乱。想象增加到一千行，你就知道这会有多难受了。

分离领域

从一个领域开始，将`Bjorn`的代码去除一部分，归入分离的组件类。 我们从首个执行的领域开始：输入。 `Bjorn`做的头件事就是读取玩家的输入，然后基于此调整它的速度。 让我们将这部分逻辑移入一个分离的类：

```
class InputComponent
{
public:
  void update(Bjorn& bjorn)
  {
    switch (Controller::getJoystickDirection())
    {
      case DIR_LEFT:
        bjorn.velocity -= WALK_ACCELERATION;
        break;

      case DIR_RIGHT:
        bjorn.velocity += WALK_ACCELERATION;
        break;
    }
  }

private:
  static const int WALK_ACCELERATION = 1;
};
```

很简单吧。我们将`Bjorn`的`update()`的第一部分取出，放入这个类中。 对`Bjorn`的改变也很直接：

```
class Bjorn
{
public:
  int velocity;
  int x, y;

  void update(World& world, Graphics& graphics)
  {
    input_.update(*this);

    // 根据速度修改位置
    x += velocity;
    world.resolveCollision(volume_, x, y, velocity);

    // 绘制合适的图形
    Sprite* sprite = &spriteStand_;
    if (velocity < 0)
    {
      sprite = &spriteWalkLeft_;
    }
    else if (velocity > 0)
    {
      sprite = &spriteWalkRight_;
    }

    graphics.draw(*sprite, x, y);
  }

private:
  InputComponent input_;

  Volume volume_;

  Sprite spriteStand_;
  Sprite spriteWalkLeft_;
  Sprite spriteWalkRight_;
};
```

`Bjorn`现在拥有了一个`InputComponent`对象。 之前它在`update()`方法中直接处理用户输入，现在委托给组件：

```
input_.update(*this);
```

我们才刚开始，但已经摆脱了一些耦合——`Bjorn`主体现在已经与`Controller`无关了。这会派上用场的。

将剩下的分割出来

现在让我们对物理和图像代码继续这种剪切粘贴的工作。 这是我们新的`PhysicsComponent`：

```
class PhysicsComponent
{
public:
  void update(Bjorn& bjorn, World& world)
  {
    bjorn.x += bjorn.velocity;
    world.resolveCollision(volume_,
        bjorn.x, bjorn.y, bjorn.velocity);
  }

private:
  Volume volume_;
};
```

为了将物理*行为*移出`Bjorn`类，你可以看到我们也移出了*数据*：`Volume`对象已经是组件的一部分了。

最后，这是现在的渲染代码：

```
class GraphicsComponent
{
public:
  void update(Bjorn& bjorn, Graphics& graphics)
  {
    Sprite* sprite = &spriteStand_;
    if (bjorn.velocity < 0)
    {
      sprite = &spriteWalkLeft_;
    }
    else if (bjorn.velocity > 0)
    {
      sprite = &spriteWalkRight_;
    }

    graphics.draw(*sprite, bjorn.x, bjorn.y);
  }

private:
  Sprite spriteStand_;
  Sprite spriteWalkLeft_;
  Sprite spriteWalkRight_;
};
```

我们几乎将所有的东西都移出来了，所以面包师还剩下什么？没什么了：

```
class Bjorn
{
public:
  int velocity;
  int x, y;

  void update(World& world, Graphics& graphics)
  {
    input_.update(*this);
    physics_.update(*this, world);
    graphics_.update(*this, graphics);
  }

private:
  InputComponent input_;
  PhysicsComponent physics_;
  GraphicsComponent graphics_;
};
```

`Bjorn`类现在基本上就做两件事：拥有定义它的组件，以及在不同域间分享的数据。 有两个原因导致位置和速度仍然在`Bjorn`的核心类中： 首先，它们是“泛领域”状态——几乎每个组件都需要使用它们， 所以我们想要提取它出来时，哪个组件*应该*拥有它们并不明确。

第二，也是更重要的一点，它给了我们无需让组件耦合就能沟通的简易方法。 让我们看看能不能利用这一点。

机器人Bj?rn

到目前为止，我们将行为归入了不同的组件类，但还没将行为*抽象*出来。 `Bjorn`仍知道每个类的具体定义的行为。让我们改变这一点。

取出处理输入的部件，将其藏在接口之后，将`InputComponent`变为抽象基类。

```
class InputComponent
{
public:
  virtual ~InputComponent() {}
  virtual void update(Bjorn& bjorn) = 0;
};
```

然后，将现有的处理输入的代码取出，放进一个实现接口的类中。

```
class PlayerInputComponent : public InputComponent
{
public:
  virtual void update(Bjorn& bjorn)
  {
    switch (Controller::getJoystickDirection())
    {
      case DIR_LEFT:
        bjorn.velocity -= WALK_ACCELERATION;
        break;

      case DIR_RIGHT:
        bjorn.velocity += WALK_ACCELERATION;
        break;
    }
  }

private:
  static const int WALK_ACCELERATION = 1;
};
```

我们将`Bjorn`改为只拥有一个指向输入组件的指针，而不是拥有一个内联的实例。

```
class Bjorn
{
public:
  int velocity;
  int x, y;

  Bjorn(InputComponent* input)
  : input_(input)
  {}

  void update(World& world, Graphics& graphics)
  {
    input_->update(*this);
    physics_.update(*this, world);
    graphics_.update(*this, graphics);
  }

private:
  InputComponent* input_;
  PhysicsComponent physics_;
  GraphicsComponent graphics_;
};
```

现在当我们实例化`Bjorn`，我们可以传入输入组件使用，就像下面这样：

```
Bjorn* bjorn = new Bjorn(new PlayerInputComponent());
```

这个实例可以是任何实现了抽象`InputComponent`接口的类型。 我们为此付出了代价——`update()`现在是虚方法调用了，这会慢一些。这一代价的回报是什么?

大多数的主机需要游戏支持“演示模式”。 如果玩家停在主菜单没有做任何事情，游戏就会自动开始运行，直到接入一个玩家。 这让屏幕上的主菜单看上去更有生机，同时也是销售商店里很好的展示。

隐藏在输入组件后的类帮我们实现了这点， 我们已经有了具体的`PlayerInputComponent`供在玩游戏时使用。 现在让我们完成另一个：

```
class DemoInputComponent : public InputComponent
{
public:
  virtual void update(Bjorn& bjorn)
  {
    // 自动控制Bjorn的AI……
  }
};
```

当游戏进入演示模式，不像之前演示的那样构造Bj?rn， 我们将它和一个新组件连接起来：

```
Bjorn* bjorn = new Bjorn(new DemoInputComponent());
```

现在，只需要更改组件，我们就有了为演示模式而设计的电脑控制的玩家。 我们可以重用所有Bj?rn的代码——物理和图像都不知道这里有了变化。 也许我有些奇怪，但这就是每天能让我从起床的事物。

那个，还有咖啡。热气腾腾的咖啡。

删掉Bj?rn?

如果你看看现在的`Bj?rn`类，你会意识到那里完全没有“Bj?rn”——那只是个组件包。 事实上，它是个好候选人，能够作为*每个*游戏中的对象都能继承的“游戏对象”基类。 我们可以像弗兰肯斯坦一样，通过挑选拼装部件构建任何对象。

让我们将剩下的两个具体组件——物理和图像——像输入那样藏到接口之后。

```
class PhysicsComponent
{
public:
  virtual ~PhysicsComponent() {}
  virtual void update(GameObject& obj, World& world) = 0;
};

class GraphicsComponent
{
public:
  virtual ~GraphicsComponent() {}
  virtual void update(GameObject& obj, Graphics& graphics) = 0;
};
```

然后将`Bj?rn`改为使用这些接口的通用`GameObject`类。

```
class GameObject
{
public:
  int velocity;
  int x, y;

  GameObject(InputComponent* input,
             PhysicsComponent* physics,
             GraphicsComponent* graphics)
  : input_(input),
    physics_(physics),
    graphics_(graphics)
  {}

  void update(World& world, Graphics& graphics)
  {
    input_->update(*this);
    physics_->update(*this, world);
    graphics_->update(*this, graphics);
  }

private:
  InputComponent* input_;
  PhysicsComponent* physics_;
  GraphicsComponent* graphics_;
};
```

有些人走的更远。 不使用包含组件的`GameObject`，游戏实体只是一个ID，一个数字。 每个组件都知道它们连接的实体ID，然后管理分离的组件。

这些实体组件系统将组件发挥到了极致，让你向实体添加组件而无需通知实体。 数据局部性一章有更多细节。

我们现有的具体类被重命名并实现这些接口：

```
class BjornPhysicsComponent : public PhysicsComponent
{
public:
  virtual void update(GameObject& obj, World& world)
  {
    // 物理代码……
  }
};

class BjornGraphicsComponent : public GraphicsComponent
{
public:
  virtual void update(GameObject& obj, Graphics& graphics)
  {
    // 图形代码……
  }
};
```

现在我们无需为Bj?rn建立具体类，就能构建拥有所有Bj?rn行为的对象。

```
GameObject* createBjorn()
{
  return new GameObject(new PlayerInputComponent(),
                        new BjornPhysicsComponent(),
                        new BjornGraphicsComponent());
}
```

这个`createBjorn()`函数是，当然，经典GoF工厂模式的例子。

通过用不同组件实例化`GameObject`，我们可以构建游戏需要的任何对象。

设计决策

这章中你最需要回答的设计问题是“我需要什么样的组件？”回答取决于你游戏的需求和风格。 引擎越大越复杂，你就想将组件划分得更细。

除此之外，还有几个更具体的选项要回答：

对象如何获取组件?

一旦将单块对象分割为多个分离的组件，就需要决定谁将它们拼到一起。

- **如果对象创建组件：**
  - *这保证了对象总是能拿到需要的组件。* 你永远不必担心某人忘记连接正确的组件然后破坏了整个游戏。容器类自己会处理这个问题。
  - *重新设置对象比较困难。* 这个模式的强力特性之一就是只需重新组合组件就可以创建新的对象。 如果对象总是用硬编码的组件组装自己，我们就无法利用这个特性。
- **如果外部代码提供组件：**
  - *对象更加灵活。* 我们可以提供不同的组件，这样就能改变对象的行为。 通过共用组件，对象变成了组件容器，我们可以为不同目的一遍又一遍重用它。
  - *对象可以与具体的组件类型解耦。* 如果我们允许外部代码提供组件，好处是也可以传递*派生*的组件类型。 这样，对象只知道组件*接口*而不知道组件的具体类型。这是一个很好的封装结构。

组件之间如何通信?

完美解耦的组件不需要考虑这个问题，但在真正的实践中行不通。 事实上组件属于*同*一对象暗示它们属于需要相互协同的更大整体的一部分。 这就意味着通信。

所以组件如何相互通信呢？ 这里有很多选项，但不像这本书中其他的“选项”，它们相互并不冲突——你可以在一个设计中支持多种方案。

- *通过修改容器对象的状态：*

  - *这保持组件解耦。* 当我们的`InputComponent`设置了Bj?rn的速度，而后`PhysicsComponent`使用它， 这两个组件都不知道对方的存在。在它们的理解中，Bj?rn的速度是被黑魔法改变的。

  - *需要将组件分享的任何数据存储在容器类中。* 通常状态只在几个组件间共享。比如，动画组件和渲染组件需要共享图形专用的信息。 将信息存入容器类会让*所有*组件都获得这样的信息。

    更糟的是，如果我们为不同组件配置使用相同的容器类，最终会浪费内存存储不被*任何*对象组件需要的状态。 如果我们将渲染专用的数据放入容器对象中，任何隐形对象都会无益的消耗内存。

  - *这让组件的通信基于组件运行的顺序。* 在同样的代码中，原先一整块的`update()`代码小心地排列这些操作。 玩家的输入修改了速度，速度被物理代码使用并修改位置，位置被渲染代码使用将Bj?rn绘到该有的地方。 当我们将这些代码划入组件时，还是得小心翼翼的保持这种操作顺序。

    如果我们不那么做，就引入了 微妙而难以追踪的漏洞。 比如，我们*先*更新图形组件，就错误地将Bj?rn渲染在他*上一帧*而不是这一帧所处的位置上。 如果你考虑更多的组件和更多的代码，那你可以想象要避免这样的错误有多么困难了。

    大量这样共享状态的代码很难正确完成读写的相同数据。 这就是为什么学术界花时间研究完全函数式语言，比如Haskell，那里根本没有可变状态。

- *通过它们之间相互引用：*

  这里的思路是组件有要交流的组件的引用，这样它们直接交流，无需通过容器类。

  假设我们想让Bj?rn跳跃。图形代码想知道它需要用跳跃图像还是不用。 这可以通过询问物理引擎它当前是否在地上来确定。一种简单的方式是图形组件直接知道物理组件的存在：

```
class BjornGraphicsComponent
{
public:
  BjornGraphicsComponent(BjornPhysicsComponent* physics)
  : physics_(physics)
  {}

  void Update(GameObject& obj, Graphics& graphics)
  {
    Sprite* sprite;
    if (!physics_->isOnGround())
    {
      sprite = &spriteJump_;
    }
    else
    {
      // 现存的图形代码……
    }

    graphics.draw(*sprite, obj.x, obj.y);
  }

private:
  BjornPhysicsComponent* physics_;

  Sprite spriteStand_;
  Sprite spriteWalkLeft_;
  Sprite spriteWalkRight_;
  Sprite spriteJump_;
};
```

当构建Bj?rn的`GraphicsComponent`时，我们给它相应的`PhysicsComponent`引用。

- *简单快捷。* 通信是一个对象到另一个的直接方法调用。组件可以调用任一引用对象的方法。做什么都可以。

    - *两个组件紧绑在一起。* 这是什么都可以的坏处。我们向使用整块类又退回了一步。 这比只用单一类好一点，至少我们现在只是把需要通信的类绑在一起。

- *通过发送消息：*

    - 这是最复杂的选项。我们可以在容器类中建小小的消息系统，允许组件相互发送消息。

      下面是一种可能的实现。我们从每个组件都会实现的`Component`接口开始：

```
class Component
{
public:
  virtual ~Component() {}
  virtual void receive(int message) = 0;
};
```

它有一个简单的`receive()`方法，每个需要接受消息的组件类都要实现它。 这里，我们使用一个`int`来定义消息，但更完整的消息实现应该可以附加数据。

然后，向容器类添加发送消息的方法。

```
class ContainerObject
{
public:
  void send(int message)
  {
    for (int i = 0; i < MAX_COMPONENTS; i++)
    {
      if (components_[i] != NULL)
      {
        components_[i]->receive(message);
      }
    }
  }

private:
  static const int MAX_COMPONENTS = 10;
  Component* components_[MAX_COMPONENTS];
};
```

现在，如果组件能够接触容器，它就能向容器发送消息，直接向所有的组件广播。（包括了原先发送消息的组件，小心别陷入消息的无限循环中！）这会造成一些结果：

如果你真的乐意，甚至可以将消息存储在*队列*中，晚些发送。 要知道更多，看看事件队列。

- *同级组件解耦。* 通过父级容器对象，就像共享状态的方案一样，我们保证了组件之间仍然是解耦的。 使用了这套系统，组件之间唯一的耦合是它们发送的消息。

  GoF称之为中介模式——两个或更多的对象通过中介对象通信。 现在这种情况下，容器对象本身就是中介。

- *容器类很简单。* 不像使用共享状态那样，容器类无需知道组件使用了什么数据，它只是将消息发送出去。 这可以让组件发送领域特有的数据而无需打扰容器对象。

不出意料的，这里没有最好的答案。这些方法你最终可能都会使用一些。 共享状态对于每个对象都有的数据是很好用的——比如位置和大小。

有些不同领域仍然紧密相关。想想动画和渲染，输入和AI，或物理和粒子。 如果你有这样一对分离的组件，你会发现直接相互引用也许更加容易。

消息对于“不那么重要”的通信很有用。 发送后不管的特性对物理组件发现事物碰撞后发送消息，让音乐组件播放声音这种事情是很有效的。

就像以前一样，我建议你从简单的开始，然后如果需要的话，加入其他的通信路径。

See Also

参见

- Unity核心架构中`GameObject`类完全根据这样的原则设计components。
- 开源的Delta3D引擎有`GameActor`基类通过`ActorComponent`实现了这种模式。
- 微软的XNA游戏框架有一个核心的`Game`类。它拥有一系列`GameComponent`对象。我们在游戏实体层使用组件，XNA在游戏主对象上实现了这种模式，但意图是一样的。

- 这种模式与GoF的策略模式类似。 两种模式都是将对象的行为取出，划入单独的重述对象。 与对象模式不同的是，分离的策略模式通常是无状态的——它封装了算法，而没有数据。 它定义了对象*如何*行动，但没有定义对象*是*什么。

  组件更加重要。它们经常保存了对象的状态，这有助于确定其真正的身份。 但是，这条界限很模糊。有一些组件也许根本没有任何状态。 在这种情况下，你可以在不同的容器对象中使用相同的组件*实例*。这样看来，它的行为确实更像一种策略。

事件队列

游戏设计模式Decoupling Patterns

意图

解耦发出消息或事件的时间和处理它的时间。

动机

除非还呆在一两个没有互联网接入的犄角旮旯，否则你很可能已经听说过“事件序列”了。 如果没有，也许“消息队列”或“事件循环”或“消息泵”可以让你想起些什么。 为了唤醒你的记忆，让我们了解几个此模式的常见应用吧。

这章的大部分里，我交替使用“事件”和“消息”。 在两者的意义有区别时，我会表明的。

GUI事件循环

如果你曾做过任何用户界面编程，你就会很熟悉*事件*。 每当用户与你的程序交互——点击按钮，拉出菜单，或者按个键——操作系统就会生成一个事件。 它会将这个对象扔给你的应用程序，你的工作就是获取它然后将其与有趣的行为相挂钩。

这个程序风格非常普遍，被认为是一种编程范式：*事件驱动编程*。

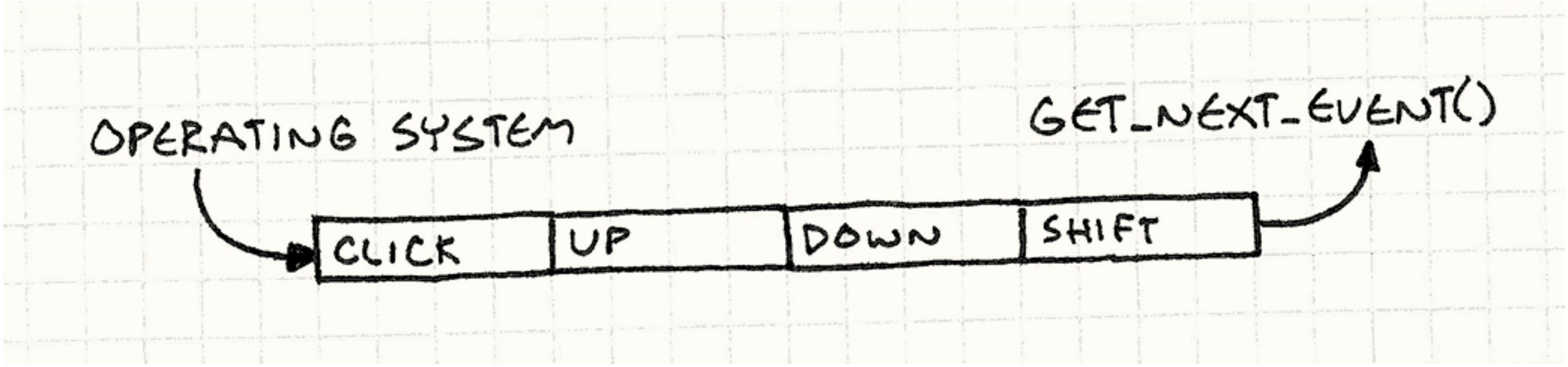
为了获取这些事件，代码底层是*事件循环*。它大体上是这样的：

```
while (running)
{
  Event event = getNextEvent();
  // 处理事件……
}
```

对`getNextEvent()`的调用将一堆未处理的用户输出传到应用程序中。 你将它导向事件处理器，之后应用魔术般获得了生命。 有趣的部分是应用在*它*想要的时候*获取*事件。 操作系统在用户操作时不是直接跳转到你应用的某处代码。

相反，操作系统的*中断*确实是直接跳转的。 当中断发生时，操作系统中断应用在做的事，强制它跳到中断处理。 这种唐突的做法是中断很难使用的原因。

这就意味着当用户输入进来时，它需要到某处去， 这样操作系统在设备驱动报告输入和应用去调用`getNextEvent()`之间不会漏掉它。 这个“某处”是一个*队列*。



当用户输入抵达时，操作系统将其添加到未处理事件的队列中。 当你调用`getNextEvent()`时，它从队列中获取最旧的事件然后交给应用程序。

中心事件总线

大多数游戏不是像这样事件驱动的，但是在游戏中使用事件循环来支撑中枢系统是很常见的。 你通常听到用“中心”“全局”“主体”描述它。 它通常被用于想要相互保持解耦的高层模块间通信。

如果你想知道*为什么*它们不是事件驱动的，看看游戏循环一章。

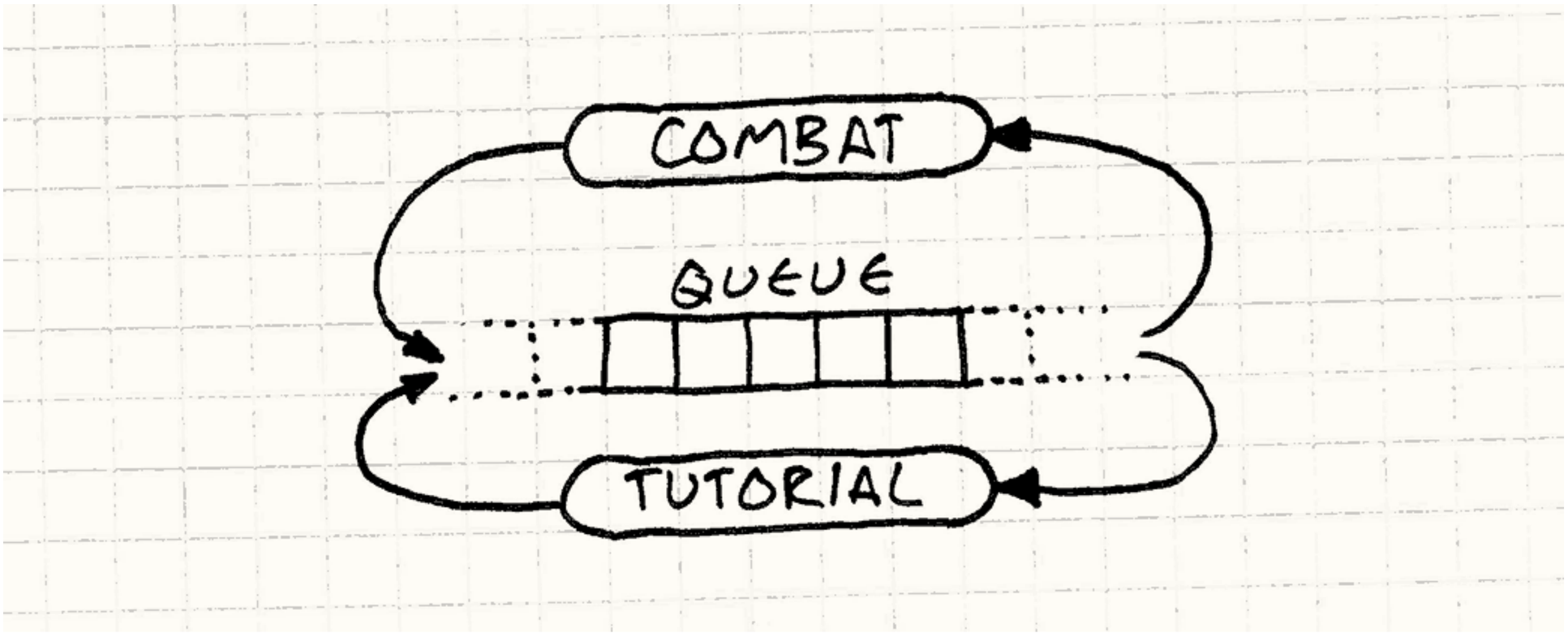
假设游戏有新手教程系统，在某些特定游戏事件后显示帮助框。 举个例子，当玩家第一次击败了邪恶野兽，你想要一个显示着“按X拿起战利品！”的小气泡。

新手教程系统很难优雅地实现，大多数玩家很少使用游戏内的帮助，所以这感觉上吃力不讨好。 但对那些*使用*教程的玩家，这是无价之物。

游戏玩法和战斗代码也许像上面一样复杂。 你最不想做的就是检查一堆教程的触发器。 相反，你可以使用中心事件队列。 任何游戏系统都可以发事件给队列，这样战斗代码可以在砍倒敌人时发出“敌人死亡”事件。

类似的，任何游戏系统都能从队列*接受*事件。 教程引擎在队列中注册自己，然后表明它想要收到“敌人死亡”事件。 用这种方式，敌人死了的消息从战斗系统传到了教程引擎，而不需要这两个系统直接知道对方的存在。

实体可以发送和收到消息的模型很像AI界的blackboard systems。



我本想将这个作为这章其他部分的例子，但是我真不喜欢这样巨大的全局系统。 事件队列不需要在整个游戏引擎中沟通。在一个类或者领域中沟通就足够有用了。

你说什么?

所以说点别的，让我们给游戏添加一些声音。 人类是视觉动物，但是听觉强烈影响到情感系统和空间感觉。 正确模拟的回声可以让漆黑的屏幕感觉上是巨大的洞穴，而适时的小提琴慢板可以让心弦拉响同样的旋律。

为了获得优秀的音效表现，我们从最简单的解决方法开始，看看结果如何。 添加一个“声音引擎”，其中有使用标识符和音量就可以播放音乐的API：

我总是离单例模式远远的。 这是少数它可以使用的领域，因为机器通常只有一个声源系统。 我使用更简单的方法，直接将方法定为静态。

```
class Audio
{
public:
  static void playSound(SoundId id, int volume);
};
```

它负责加载合适的声音资源，找到可靠的播放频道，然后启动它。 这章不是关于某个平台真实的音频API，所以我会假设在其他某处魔术般实现了一个。 使用它，我们像这样写方法：

```
void Audio::playSound(SoundId id, int volume)
{
  ResourceId resource = loadSound(id);
  int channel = findOpenChannel();
  if (channel == -1) return;
  startSound(resource, channel, volume);
}
```

我们签入以上代码，创建一些声音文件，然后在代码中加入一些对`playSound()`的调用。 举个例子，在UI代码中，我们在选择菜单项变化时播放一点小音效：

```
class Menu
{
public:
  void onSelect(int index)
  {
    Audio::playSound(SOUND_BLOOP, VOL_MAX);
    // 其他代码……
  }
};
```

这样做了之后，注意到有时候你改变菜单项目，整个屏幕就会冻住几帧。 我们遇到了第一个问题：

- **问题一：API在音频引擎完成对请求的处理前阻塞了调用者。**

我们的`playSound()`方法是*同步*的——它在从播放器放出声音前不会返回调用者。 如果声音文件要从光盘上加载，那就得花费一定时间。 与此同时，游戏的其他部分被卡住了。

现在忽视这一点，我们继续。 在AI代码中，我们增加了一个调用，在敌人承受玩家伤害时发出痛苦的低号。 没有什么比在虚拟的生物身上施加痛苦更能温暖玩家心灵的了。

这能行，但是有时玩家打出暴击，他在同一帧可打到两个敌人。 这让游戏同时要播放两遍哀嚎。 如果你了解一些音频的知识，那么就知道要把两个不同的声音混合在一起，就要加和它们的波形。 当这两个是*同一*波形时，它与*一个*声音播放*两倍响*是一样的。那会很刺耳。

我在完成Henry Hatsworth in the Puzzling Adventure遇到了同样的问题。解决方法和这里的很相似。

在Boss战中有个相关的问题，当有一堆小怪跑动制造伤害时。 硬件只能同时播放一定数量的音频。当数量超过限度时，声音就被忽视或者切断了。

为了处理这些问题，我们需要获得音频调用的整个*集合*，用来整合和排序。 不幸的是，音频API独立处理每一个`playSound()`调用。 看起来这些请求是从针眼穿过一样，一次只能有一个。

- **问题二：请求无法合并处理。**

这个问题与下面的问题相比只是小烦恼。 现在，我们在很多不同的游戏系统中散布了`playSound()`调用。 但是游戏引擎是在现代多核机器上运行的。 为了使用多核带来的优势，我们将系统分散在不同线程上——渲染在一个，AI在另一个，诸如此类。

由于我们的API是同步的，它在*调用者*的线程上运行。 当从不同的游戏系统调用时，我们从多个线程同时使用API。 看看示例代码，看到任何线程同步性吗？我也没看到。

当我们想要分配一个*单独的*线程给音频，这个问题就更加严重。 当其他线程都忙于互相跟随和制造事物，它只是傻傻待在那里。

- **问题三：请求在错误的线程上执行。**

音频引擎调用`playSound()`意味着，“放下任何东西，现在就播放声音！”*立即*就是问题。游戏系统在*它们*方便时调用`playSound()`，但是音频引擎不一定能方便去处理这个请求。为了解决这点，我们需要将*接受*请求和*处理*请求解耦。

模式

事件队列在队列中按先入先出的顺序存储一系列**通知或请求**。发送通知时，**将请求放入队列并返回**。处理请求的系统之后稍晚**从队列中获取请求**并处理。这**解耦了发送者和接收者**，既**静态**又**及时**。

何时使用

如果你只是想解耦*接收者*和发送者，像观察者模式 和命令模式都可以用较小的复杂度进行处理。在解耦某些需要*及时*处理的东西时使用队列。

我在之前的几乎每章都提到了，但这值得反复提。复杂度会拖慢你，所以要将简单视为珍贵的财宝。

用推和拉来考虑。有一块代码A需要另一块代码B去做些事情。对A自然的处理方式是将请求*推*给B。

同时，对B自然的处理方式是在*B*方便时将请求*拉*入。当一端有推模型另一端有拉模型，你需要在它们间放缓存。这就是队列比简单的解耦模式多提供的部分。

队列给了代码对拉取的控制权——接收者可以延迟处理，合并或者忽视请求。但队列做这些事是通过将控制权从发送者那里*拿走*完成的。发送者能做的就是向队列发送请求然后祈祷。当发送者需要回复时，队列不是好选择。

记住

不像这书中的其他模式，事件队列很复杂，会对游戏架构引起广泛影响。这就意味着你仔细考虑如何——或者要不要——使用它。

中心事件队列是一个全局变量

这个模式的常用方法是一个大的交换站，游戏中的每个部分都能将消息送过这里。这是很有用的基础架构，但是*有用*并不代表*好用*。

可能要走一些弯路，但是我们中的大多数最终学到了全局变量是不好的。 当有一小片状态，程序的每部分都能接触到，会产生各种微妙的相关性。 这个模式将状态封装在协议中，但是它还是全局的，仍然有全局变量引发的全部危险。

世界的状态可以因你改变

假设在虚拟的小怪结束它一生时，一些AI代码将“实体死亡”事件发送到队列中。 这个事件在队列中等待了谁知有多少帧后才排到了前面，得以处理。

同时，经验系统想要追踪英雄的杀敌数，并对他的效率加以奖励。 它接受每个“实体死亡”事件，然后决定英雄击杀了何种怪物，以及击杀的难易程度，最终计算出合适的奖励。这需要游戏世界的多种不同状态。 我们需要死亡的实体以获取击杀它的难度。 我们也许要看看英雄的周围有什么其他的障碍物或者怪物。 但是如果事件没有及时处理，这些东西都会消失。 实体可能被清除，周围的东西也有可能移开。

当你接到事件时，得小心，不能假设*现在的*状态反映了*事件发生时*的世界。 这就意味着队列中的事件比同步系统中的事件需要存储更多数据。 在后者中，通知只需说“某事发生了”然后接收者可以找到细节。 使用队列时，这些短暂的细节必须在事件发送时就被捕获，以方便之后使用。

会陷于反馈系统环路中

任何事件系统和消息系统都得担心环路：

1. A发送了一个事件
2. B接收然后发送事件作为回应。
3. 这个事件恰好是A关注的，所以它收到了。为了回应，它发送了一个事件。
4. 回到2.

当消息系统是*同步的*，你很快就能找到环路——它们造成了栈溢出并让游戏崩溃。 使用队列，异步地使用栈，即使虚假事件晃来晃去时，游戏仍然可以继续运行。 避免这个的通用方法就是避免在*处理*事件的代码中*发送*事件。

在你的事件系统中加一个小小的漏洞日志也是一个好主意。

示例代码

我们已经看到一些代码了。它不完美，但是有基本的正确功能——公用的API和正确的底层音频调用。 剩下需要做的就是修复它的问题。

第一个问题是我们的API是*阻塞的*。 当代码播放声音时，它不能做任何其他事情，直到`playSound()`加载完音频然后真正地开始播放。

我们想要推迟这项工作，这样 `playSound()` 可以很快的返回。 为了达到这一点，我们需要*具体化*播放声音的请求。 我们需要一个小结构存储发送请求时的细节，这样我们晚些时候可以使用：

```
struct PlayMessage
{
  SoundId id;
  int volume;
};
```

下面我们需要给`Audio`一些存储空间来追踪正在播放的声音。 现在，你的算法专家也许会告诉你使用激动人心的数据结构， 比如Fibonacci heap或者skip list或者最起码*链表*。 但是在实践中，存储一堆同类事物最好的办法是使用一个平凡无奇的经典数组：

算法研究者通过发表新奇数据结构的研究获得收入。 他们不鼓励使用基本的结构。

- 没有动态分配。
- 没有为记录信息造成额外的开销或者多余的指针。
- 对缓存友好的连续存储空间。

更多“缓存友好”的内容，见数据局部性一章。

所以让我们开干吧：

```
class Audio
{
public:
  static void init()
  {
    numPending_ = 0;
  }

  // 其他代码……
private:
  static const int MAX_PENDING = 16;

  static PlayMessage pending_[MAX_PENDING];
  static int numPending_;
};
```

我们可以将数组大小设置为最糟情况下的大小。 为了播放声音，简单的将新消息插到最后：

```
void Audio::playSound(SoundId id, int volume)
{
  assert(numPending_ < MAX_PENDING);

  pending_[numPending_].id = id;
  pending_[numPending_].volume = volume;
  numPending_++;
}
```

这让`playSound()`几乎是立即返回，当然我们仍得播放声音。 那块代码在某处，即`update()`方法中：

```
class Audio
{
public:
  static void update()
  {
    for (int i = 0; i < numPending_; i++)
    {
      ResourceId resource = loadSound(pending_[i].id);
      int channel = findOpenChannel();
      if (channel == -1) return;
      startSound(resource, channel, pending_[i].volume);
    }

    numPending_ = 0;
  }

  // 其他代码……
};
```

就像名字暗示的，这是更新方法模式。

现在我们需要从方便时候调用。 这个“方便”取决于你的游戏。 它也许要从主游戏循环中或者专注于音频的线程中调用。

这可行，但是这假定了我们在对`update()`的单一调用中可以处理*每个*声音请求。 如果你做了像在声音资源加载后处理异步请求的事情，这就没法工作了。 `update()`一次处理一个请求，它需要有完成一个请求后从缓存中再拉取一个请求的能力。 换言之，我们需要一个真实的队列。

环状缓存

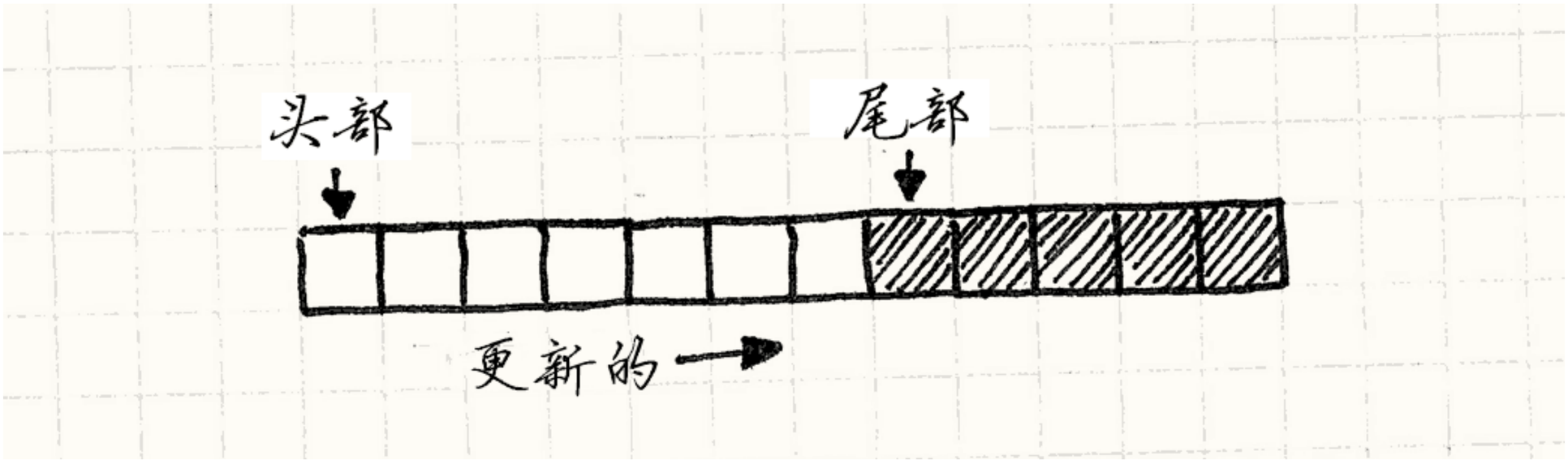
有很多种方式能实现队列，但我最喜欢的是*环状缓存*。 它保留了数组的所有优点，同时能让我们不断从队列的前方移除事物。

现在，我知道你在想什么。 如果我们从数组的前方移除东西，不是需要将所有剩下的部分都移动一次吗？ 这不是很慢吗？

这就是为什么要学习链表——你可以从中移除一个节点，而无需移动东西。 好吧，其实你可以用数组实现一个队列而无需移动东西。 我会展示给你看，但是首先预习一些术语：

- 队列的**头部**是*读取*请求的地方。头部存储最早发出的请求。
- **尾部** 是另一端。它是数组中下个*写入*请求的地方。注意它指向队列终点的下一个。你可以将其理解为一个半开半闭区间，如果这有帮助的话。

由于 `playSound()` 向数组的末尾添加了新的请求，头部开始指向元素0而尾部向右增长。



让我们开始编码。首先，我们显式定义这两个标记在类中的意义：

```
class Audio
{
public:
  static void init()
  {
    head_ = 0;
    tail_ = 0;
  }

  // 方法……
private:
  static int head_;
  static int tail_;

  // 数组……
};
```

在`playSound()`的实现中，`numPending_`被`tail_`取代，但是其他都是一样的：

```
void Audio::playSound(SoundId id, int volume)
{
  assert(tail_ < MAX_PENDING);

  // Add to the end of the list.
  pending_[tail_].id = id;
  pending_[tail_].volume = volume;
  tail_++;
}
```

更有趣的变化在`update()`中：

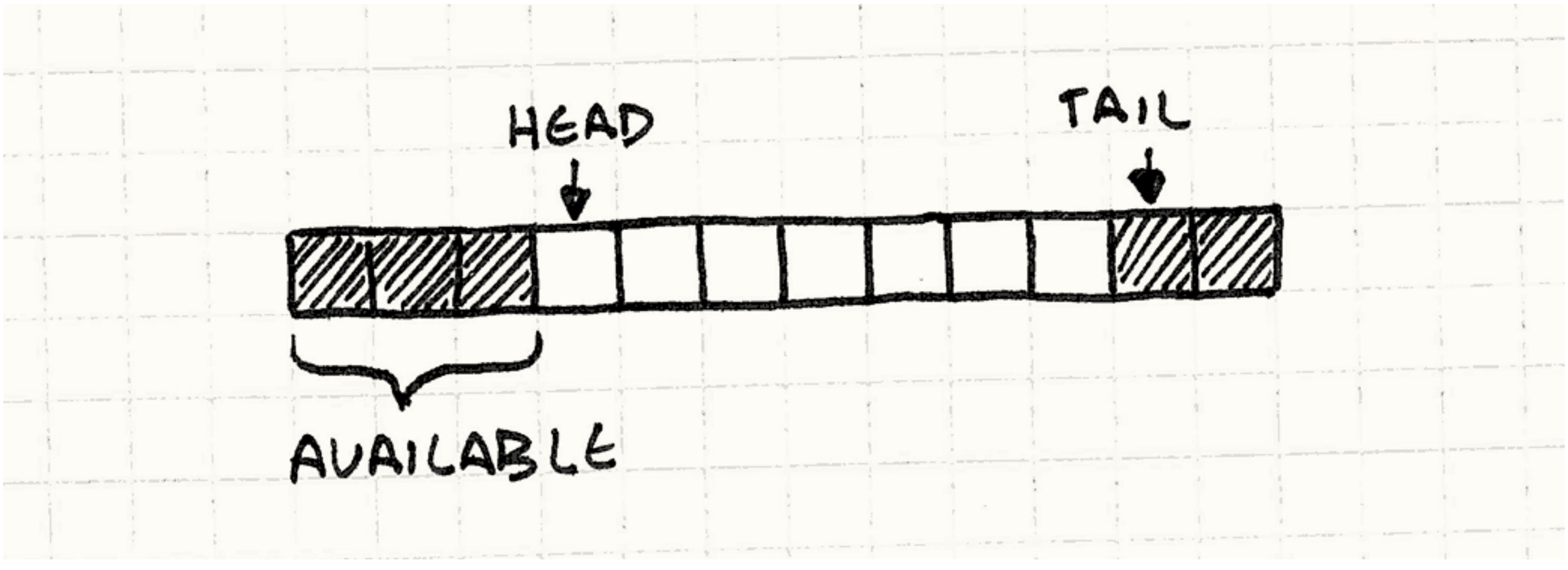
```
void Audio::update()
{
  // 如果这里没有待处理的请求
  // 那就什么也不做。
  if (head_ == tail_) return;

  ResourceId resource = loadSound(pending_[head_].id);
  int channel = findOpenChannel();
  if (channel == -1) return;
  startSound(resource, channel, pending_[head_].volume);

  head_++;
}
```

我们在头部处理，然后通过将头部指针向右移动来消除它。 我们定义头尾之间没有距离的队列为空队列。

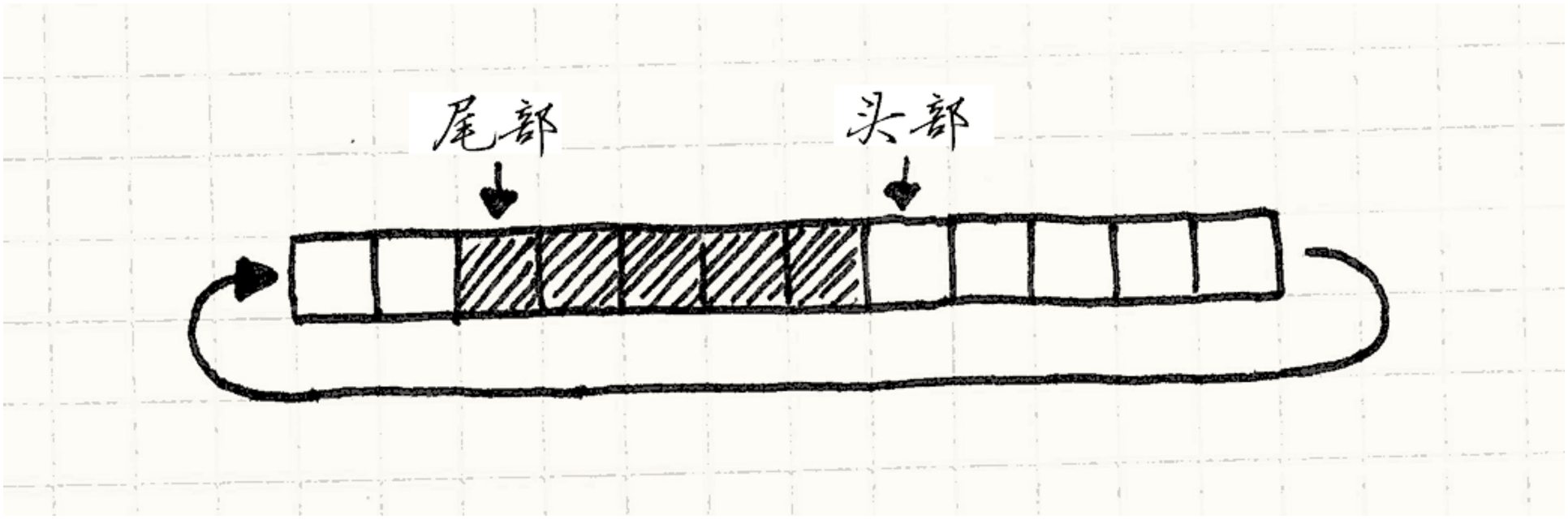
这就是为什么我们让尾部指向最后元素*之后*的那个位置。 这意味着头尾相等则队列为空。

现在，我们获得了一个队列——我们可以向尾部添加元素，从头部移除元素。 这里有很明显的问题。在我们让队列跑起来后，头部和尾部继续向右移动。 最终`tail_`碰到了数组的尾部，欢乐时光结束了。 接下来是这个方法的灵巧之处。

你想结束欢乐时光吗？不，你不想。



注意当尾部移动时，*头部*也是如此。 这就意味着在数组*开始*部分的元素不再被使用了。 所以我们做的就是，当抵达末尾时，将尾部回折到数组的头部。 这就是为什么它被称为*环状*缓存，它表现的像是一个环状的数组。



这个的实现非常简单。 当我们入队一个事物时，只需要保证尾部在抵达结束的时候回折到数组的开头：

```
void Audio::playSound(SoundId id, int volume)
{
  assert((tail_ + 1) % MAX_PENDING != head_);

  // 添加到列表的尾部
  pending_[tail_].id = id;
  pending_[tail_].volume = volume;
  tail_ = (tail_ + 1) % MAX_PENDING;
}
```

替代`tail++`，将增量设为数组长度的模，这样可将尾部回折回来。 另一个改变是断言。我们得保证队列不会溢出。 只要这里有少于`MAX_PENDING`的请求在队列中，在头部和尾部之间就有没有使用的间隔。 如果队列满了，那就不会有了，就像古怪的衔尾蛇一样，尾部会遇到头部然后覆盖它。 断言保证了这不会发生。

在`update()`中，头部也回折了：

```
void Audio::update()
{
  // 如果没有待处理的请求，就啥也不做
  if (head_ == tail_) return;

  ResourceId resource = loadSound(pending_[head_].id);
  int channel = findOpenChannel();
  if (channel == -1) return;
  startSound(resource, channel, pending_[head_].volume);

  head_ = (head_ + 1) % MAX_PENDING;
}
```

这样就好——没有动态分配，没有数据拷贝，缓存友好的简单数组实现的队列完成了。

如果最大容量影响了你，你可以使用增长的数组。 当队列满了后，分配一块当前数组两倍大的数组（或者更多倍），然后将对象拷进去。

哪怕你在队列增长时拷贝，入队仍然有常数级的*摊销*复杂度。

合并请求

现在有队列了，我们可以转向其他问题了。 首先来解决多重请求播放同一音频，最终导致音量过大的问题。 由于我们知道哪些请求在等待处理，需要做的所有事就是将请求和早先等待处理的请求合并：

```
void Audio::playSound(SoundId id, int volume)
{
  // 遍历待处理的请求
  for (int i = head_; i != tail_;
       i = (i + 1) % MAX_PENDING)
  {
    if (pending_[i].id == id)
    {
      // 使用较大的音量
      pending_[i].volume = max(volume, pending_[i].volume);

      // 无需入队
      return;
    }
  }

  // 之前的代码……
}
```

当有两个请求播放同一音频时，我们将它们合并成只保留声音最大的请求。 这一“合并”非常简陋，但是我们可以用同样的方法做很多有趣的合并。

注意在请求*入队*时合并，而不是*处理*时。 在队列中处理更加容易，因为不需要在最终会被合并的多余请求上浪费时间。 这也更加容易被实现。

但是，这确实将处理的职责放在了调用者肩上。 对`playSound()`的调用返回前会遍历整个队列。 如果队列很长，那么会很慢。 在`update()`中合并也许更加合理。

避免$O(n)$的队列扫描代价的另一种方式是使用不同的数据结构。 如果我们将`SoundId`作为哈希表的键，那么我们就可以在常量时间内检查重复。

这里有些要记住的要点。 我们能够合并的“同步”请求窗口只有队列长度那么大。 如果我们快速处理请求，队列长度就会保持较短，我们就有更少的机会合并东西。 同样的，如果处理慢了，队列满了，我们能找到更多的东西合并。

这个模式隔离了请求者和何时请求被处理，但如果你将整个队列交互视为与数组结构交互，那么发出请求和处理它之间的延迟会显式的影响行为。 确认这么做之前保证这不会造成问题。

分离线程

最终，最险恶的问题。 使用同步的音频API，调用`playSound()`的线程就是处理请求的线程。 这通常不是我们想要的。

在今日的多核硬件上，你需要不止一个线程来最大程度使用芯片。 有无数的编程范式在线程间分散代码，但是最通用的策略是将每个独立的领域分散到一个线程——音频，渲染，AI等等。

单线程代码同时只在一个核心上运行。 如果你不使用线程，哪怕做了流行的异步风格编程，能做的极限就是让一个核心繁忙，那也只发挥CPU能力的一小部分。

服务器程序员将他们的程序分割成多个独立*进程*作为弥补。 这让系统在不同的核上同时运行它们。 游戏几乎总是单进程的，所以增加线程真的有用。

我们很容易就能做到这一点是因为三个关键点：

1. 请求音频的代码与播放音频的代码解耦。
2. 有队列在两者之间整理它们。
3. 队列与程序其他部分是隔离的。

剩下要做的事情就是写修改队列的方法——`playSound()`和`update()`——使之线程安全。 通常，我会写一写具体代码完成之，但是由于这是一本关于架构的书，我不想着眼于一些特定的API或者锁机制。

从高层看来，我们只需保证队列不是同时被修改的。 由于`playSound()`只做了一点点事情——基本上就是声明字段。——不会阻塞线程太长时间。 在`update()`中，我们等待条件变量之类的东西，直到有请求需要处理时才会消耗CPU循环。

设计决策

很多游戏使用事件队列作为交流结构的关键部分，你可以花很多时间设计各种复杂的路径和消息过滤器。 但是在构建洛杉矶电话交换机之类的东西之前，我推荐你从简单开始。这里是几个需要在开始时思考的问题：

队列中存储了什么?

到目前为止，我交替使用“事件”和“消息”，因为大多时候两者的区别并不重要。 无论你在队列中塞了什么都可以获得解耦和合并的能力，但是还是有几个地方不同。

- **如果你存储事件：**

  “事件”或者“通知”描绘*已经*发生的事情，比如“怪物死了”。 你入队它，这样其他对象可以对这个事件作出*回应*，有点像异步的观察者模式。

  - *很可能允许多个监听者。* 由于队列包含的是已经发生的事情，发送者可能不关心谁接受它。 从这个层面来说，事件发生在过去，早已被遗忘。

  - *访问队列的模块更广。* 事件队列通常*广播*事件到任何感兴趣的部分。为了最大程度允许哪些部分能兴趣，队列一般是全局可见的。

- **如果你存储消息：**

  “消息”或“请求”描绘了*想要发生在未来*的事情，比如“播放声音”。可以将其视为服务的异步API。

  另一个描述“请求”的词是“命令”，就像在命令模式中那样，队列也可以在那里使用。

  - *更可能只有一个监听者。* 在这个例子中，存储的消息只请求*音频API*播放声音。如果引擎的随便什么部分都能从队列中拿走消息，那可不好。

    我在这里说“更可能”，因为只要像期望的*那样*处理消息，消息入队时可以不必担心哪块代码处理它。 这样的话，你在做的事情类似于服务定位器。

谁能从队列中读取?

在例子中，队列是密封的，只有`Audio`类可以从中读取。 在用户交互的事件系统中，你可以在核心内容中注册监听器。 有时可以听到术语“单播”和“广播”来描述它，两者都很有用。

- **单播队列：**

  在队列是类API的一部分时是，单播很自然的。 就像我们的音频例子，从调用者的角度，它们只能看到可以调用的`playSound()`方法。

  - *队列变成了读取者的实现细节。* 发送者知道的所有事就是发条消息。
  - *队列更封装。* 其他都一样时，越多封装越方便。
  - *无须担心监听者之间的竞争。* 使用多个监听者，你需要决定每个队列中的事物*一对多*分给全部的监听者（广播） 还是*每个*队列中的事物*一对一*分给单独的监听者（更加像工作队列）。

    在两种情况下，监听者最终要么做了多余的事情要么在相互干扰，你得谨慎考虑想要的行为。 使用单一的监听者，这种复杂性消失了。

- **广播队列：**

  这是大多数“事件”系统工作的方法。如果你有十个监听者，一个事件进来，所有监听者都能看到这个事件。

  - 事件可能无人接收。 *前面那点的必然推论就是如果有*零个*监听者，没有谁能看到这个事件。 在大多数广播系统中，如果处理事件时没有监听者，事件就消失了。
  - *也许需要过滤事件。* 广播队列经常对程序的所有部分可见，最终你会获得一系列监听者。 很多事件乘以很多监听者，你会获取一大堆事件处理器。

    为了削减大小，大多数广播事件系统让监听者筛出其需要接受的事件。 比如，可能它们只想要接受鼠标事件或者在某一UI区域内的事件。

- **工作队列：**

  类似广播队列，有多个监听器。不同之处在于每个队列中的东西只会投到监听器*其中的一个*。 常应用于将工作打包给同时运行的线程池。

  - *你得规划。* 由于一个事物只有一个监听器，队列逻辑需要指出最好的选项。 这也许像round robin算法或者乱序选择一样简单，或者可以使用更加复杂的优先度系统。

谁能写入队列?

这是前一个设计决策的另一面。 这个模式兼容所有可能的读/写设置：一对一，一对多，多对一，多对多。

你有时听到用“扇入”描述多对一的沟通系统，而用“扇出”描述一对多的沟通系统。

- **使用单个写入器：**

  这种风格和同步的观察者模式很像。 有特定对象收集所有可接受的事件。

  - *你隐式知道事件是从哪里来的。* 由于这里只有一个对象可向队列添加事件，任何监听器都可以安全的假设那就是发送者。
  - *通常允许多个读取者。* 你可以使用单发送者对单接收者的队列，但是这样沟通系统更像纯粹的队列数据结构。

- **使用多个写入器：**

  这是例子中音频引擎工作的方式。 由于`playSound()`是公开的方法，代码库的任何部分都能给队列添加请求。“全局”或“中心”事件总线像这样工作。

  - *得更小心环路。* 由于任何东西都有可能向队列中添加东西，这更容易意外地在处理事件时添加事件。 如果你不小心，那可能会触发反馈循环。
  - *很可能需要在事件中添加对发送者的引用。* 当监听者接到事件时，它不知道是谁发送的，因为可能是任何人。 如果它确实需要知道发送者，你得将发送者打包到事件对象中去，这样监听者才可以使用它。

对象在队列中的生命周期如何?

使用同步的通知，当所有的接收者完成了消息处理才会返回发送者。 这意味着消息本身可以安全的存在栈的局部变量中。 使用队列，消息比让它入队的调用活得更久。

如果你是用有垃圾回收的语言，你无需过度担心这个。 消息存到队列中，会一直存到需要它的时候。 而在C或C++中，得由你来保证对象活的足够长。

- **传递所有权：**

  这是手动管理内存的传统方法。当消息入队时，队列拥有了它，发送者不再拥有它。 当它被处理时，接收者获取了所有权，负责销毁他。

  在C++中，`unique_ptr<T>`给了你同样的语义。

- **共享所有权：**

  现在，甚至C++程序员都更适应垃圾回收了，分享所有权更加可接受。 这样，消息只要有东西对其有引用就会存在，当被遗忘时自动释放。

  同样的，C++的风格是使用`shared_ptr<T>`。

- **队列拥有它：**

  另一个选项是让消息*永远*存在于队列中。 发送者不再自己分配消息的内存，它向内存请求一个“新的”消息。 队列返回一个队列中已经在内存的消息的引用，接收者引用队列中相同的消息。

  换言之，队列存储的背后是一个对象池模式。

参见

- 我在之前提到了几次，很大程度上， 这个模式是广为人知的观察者模式的异步实现。
- 就像其他很多模式一样，事件队列有很多别名。 其中一个是“消息队列”。这通常指代一个更高层次的实现。 事件队列在应用*中*，消息队列通常在应用*间*交流。

  另一个术语是“发布/提交”，有时被缩写为“pubsub”。 就像“消息队列”一样，这通常指代更大的分布式系统，而不是现在关注的这个模式。

- 确定状态机，很像GoF的状态模式，需要一个输入流。如果想要异步响应，可以考虑队列存储它们。

  当你有一对状态机相互发送消息时，每个状态机都有一个小小的未处理队列（被称为一个*信箱*）， 然后你需要重新发明actor model。

- Go语言内建的“通道”类型本质上是事件队列或消息队列。

服务定位器

游戏设计模式Decoupling Patterns

提供服务的全局接入点，避免使用者和实现服务的具体类耦合。

动机

一些游戏中的对象或者系统几乎出现在程序库中的每一个角落。 很难找到游戏中的哪部分永远不需要内存分配，记录日志，或者随机数字。 像这样的东西可以被视为整个游戏都需要的*服务*。

我们考虑音频作为例子。 它不需要接触像内存分配这么底层的东西，但是仍然要接触一大堆游戏系统。 滚石撞击地面（物理）。 NPC狙击手开了一枪，射出子弹（AI）。 用户选择菜单项需要响一声确认（用户界面）。

每处都需要用像下面这样的东西调用音频系统：

```
// 使用静态类?
AudioSystem::playSound(VERY_LOUD_BANG);

// 还是使用单例?
AudioSystem::instance()->playSound(VERY_LOUD_BANG);
```

尽管每种都能获得想要的结果，但是我们会绊倒在一些微妙的耦合上。 每个调用音频系统的游戏部分直接引用了具体的`AudioSystem`类，和访问它的机制——是静态类还是一个单例。

这些调用点，当然，需要耦合到*某些东西*上来播放声音， 但是直接接触到具体的音频实现，就好像给了一百个陌生人你家的地址，只是为了让他们在门口放一封信。 这不仅仅有*隐私*问题，在你搬家后，需要告诉每个人新地址是个更加痛苦的问题。

有个更好的解决办法：一本电话薄。 需要联系我们的人可以在上面查找并找到现在的地址。 当我们搬家时，我们通知电话公司。 他们更新电话薄，每个人都知道了新地址。 事实上，我们甚至无需给出真实的地址。 我们可以列一个转发信箱或者其他“代表”我们的东西。 通过让调用者查询电话薄找我们，我们获得了一个*控制找我们的方法的方便地方*。

这就是服务定位模式的简短介绍——它解耦了需要服务的代码和服务由*谁*提供（那个具体的实现类）以及服务在*哪里*（我们如何获得它的实例）。

模式

服务 类定义了一堆操作的抽象接口。 具体的**服务提供者**实现这个接口。 分离的**服务定位器**提供了通过查询获取服务的方法，同时隐藏了服务提供者的具体细节和定位它的过程。

何时使用

你需要让某物在程序的各处都能被访问时，你就是在找麻烦。 这是单例模式的主要问题，这个模式也没有什么不同。 我对何时使用服务定位器的最简单建议是：*少用*。

与其使用全局机制让某些代码接触到它，首先*考虑将它传给代码*。 这超简单，也明显保持了解耦，能覆盖你大部分的需求。

但是…… 有时候手动传入对象是不可能的或者会让代码难以阅读。 有些系统，比如日志或内存管理，不该是模块公开API的一部分。 传给渲染代码的参数应该与*渲染*相关，而不是与日志之类的相关。

同样，代表外设的系统通常只存在一个。 你的游戏可能只有一个音频设备或者显示设备。 这是周围环境的属性，所以将它传过十个函数让一个底层调用能够使用它会为代码增加不必要的复杂度。

如果是那样，这个模式可以帮忙。 就像我们将看到的那样，它是更加灵活，更加可配置的单例模式。 如果用得好，它能以很小的运行时开销，换取很大的灵活性。

相反，如果用得不好，它会带来单例模式的所有缺点以及更多的运行时开销。

记住

使用服务定位器的核心难点是它将依赖——在两块代码之间的一点耦合——推迟到运行时再连接。 这有了更大的灵活度，但是代价是更难在阅读代码时理解你依赖的是什么。

服务必须真的可定位

如果使用单例或者静态类，我们需要的实例不可能*不*可用。 调用代码保证了它就在那里。但是由于这个模式是在*定位*服务，我们也许要处理失败的情况。 幸运的是，我们之后会介绍一种处理它的策略，保证我们在需要时总能获得*某些*服务。

服务不知道谁在定位它

由于定位器是全局可访问的，任何游戏中的代码都可以请求服务，然后使用它。 这就意味着服务必须在任何环境下正确工作。 举个例子，如果一个类只能在游戏循环的模拟部分使用，而不能在渲染部分使用，那它不适合作为服务——我们不能保证在正确的时间使用它。所以，如果你的类只期望在特定上下文中使用，避免模式将它暴露给整个世界更安全。

示例代码

重回我们的音频系统问题，让我们通过服务定位器将代码暴露给代码库的剩余部分。

服务

我们从音频API开始。这是我们服务要暴露的接口：

```
class Audio
{
public:
  virtual ~Audio() {}
  virtual void playSound(int soundID) = 0;
  virtual void stopSound(int soundID) = 0;
  virtual void stopAllSounds() = 0;
};
```

当然，一个真实的音频引擎比这复杂的多，但这展示了基本的理念。 要点在于它是个没有实现绑定的抽象接口类。

服务提供者

只靠它自己，我们的音频接口不是很有用。 我们需要具体的实现。这本书不是关于如何为游戏主机写音频代码，所以你得想象这些函数中有实际的代码，了解原理就好：

```
class ConsoleAudio : public Audio
{
public:
  virtual void playSound(int soundID)
  {
    // 使用主机音频API播放声音……
  }

  virtual void stopSound(int soundID)
  {
    // 使用主机音频API停止声音……
  }

  virtual void stopAllSounds()
  {
    // 使用主机音频API停止所有声音……
  }
};
```

现在我们有接口和实现了。 剩下的部分是服务定位器——那个将两者绑在一起的类

一个简单的定位器

下面的实现是你可以定义的最简单的服务定位器:

```
class Locator
{
public:
  static Audio* getAudio() { return service_; }

  static void provide(Audio* service)
  {
    service_ = service;
  }

private:
  static Audio* service_;
};
```

这里用的技术被称为*依赖注入*，一个简单思路的复杂行话表示。 假设你有一个类依赖另一个。 在例子中，是我们的`Locator`类需要`Audio`的实例。 通常，定位器负责构造实例。 依赖注入与之相反，它指外部代码负责向对象*注入*它需要的依赖。

静态函数`getAudio()`完成了定位工作。 我们可以从代码库的任何地方调用它，它会给我们一个`Audio`服务实例使用：

```
Audio *audio = Locator::getAudio();
audio->playSound(VERY_LOUD_BANG);
```

它“定位”的方式十分简单——依靠一些外部代码在任何东西使用服务前已注册了服务提供者。 当游戏开始时，它调用一些这样的代码：

```
ConsoleAudio *audio = new ConsoleAudio();
Locator::provide(audio);
```

这里需要注意的关键部分是调用`playSound()`的代码没有意识到任何具体的`ConsoleAudio`类； 它只知道抽象的`Audio`接口。 同样重要的是，*定位器* 类没有与具体的服务提供者耦合。 代码中只有初始化代码*唯一*知道哪个具体类提供了服务。

这里有更高层次的解耦： `Audio`接口没有意识到它在通过服务定位器来接受访问。 据它所知，它只是常见的抽象基类。 这很有用，因为这意味着我们可以将这个模式应用到*现有的*类上，而那些类无需为此特殊设计。 这与单例形成了对比，那个会影响“服务”类本身的设计。

一个空服务

我们现在的实现很简单，而且也很灵活。 但是它有巨大的缺点：如果我们在服务提供者注册前使用服务，它会返回`NULL`。 如果调用代码没有检查，游戏就崩溃了。

我有时听说这被称为“时序耦合”——两块分离的代码必须以正确的顺序调用，才能让程序正确运行。 有状态的软件某种程度都有这种情况，但是就像其他耦合一样，减少时序耦合让代码库更容易管理。

幸运的是，还有一种设计模式叫做“空对象”，我们可用它处理这个。 基本思路是在我们没能找到服务或者程序没以正确的顺序调用时，不返回`NULL`， 而是返回一个特定的，实现了请求对象一样接口的对象。 它的实现什么也不做，但是它保证调用服务的代码能获取到对象，保证代码就像收到了“真的”服务对象一样安全运行。

为了使用它，我们定义另一个“空”服务提供者：

```
class NullAudio: public Audio
{
public:
  virtual void playSound(int soundID) { /* 什么也不做 */ }
  virtual void stopSound(int soundID) { /* 什么也不做 */ }
  virtual void stopAllSounds()        { /* 什么也不做 */ }
};
```

就像你看到的那样，它实现了服务接口，但是没有干任何实事。 现在，我们将服务定位器改成这样：

```
class Locator
{
public:
  static void initialize() { service_ = &nullService_; }

  static Audio& getAudio() { return *service_; }

  static void provide(Audio* service)
  {
    if (service == NULL)
    {
      // 退回空服务
      service_ = &nullService_;
    }
    else
    {
      service_ = service;
    }
  }

private:
  static Audio* service_;
  static NullAudio nullService_;
};
```

你也许注意我们用引用而非指针返回服务。 由于C++中的引用（理论上）永远不是`NULL`，返回引用是提示用户：总可以期待获得一个合法的对象。

另一件值得注意的事是我们在`provide()`而不是访问者中检查`NULL`。 那需要我们早早调用`initialize()`，保证定位器可以正确找到默认的空服务提供者。 作为回报，它将分支移出了`getAudio()`，这在每次使用服务时节约了检查开销。

调用代码永远不知道“真正的”服务没找到，也不必担心处理`NULL`。 这保证了它永远能获得有效的对象。

这对*故意*找不到服务也很有用。 如果我们想暂时停用系统，现在有更简单的方式来实现这点了： 很简单，不要在定位器中注册服务，定位器会默认使用空服务提供器。

在开发中能关闭音频是很便利的。它释放了一些内存和CPU循环。 更重要的，当你使用debugger时正好爆发巨响，它能防止你的鼓膜爆裂。 没有什么东西比二十毫秒的最高音量尖叫循环更能让你血液逆流的了。

日志装饰器

现在我们的系统非常强健了，让我们讨论这个模式允许的另一个好处——装饰服务。 我会举例说明。

在开发过程中，记录有趣事情发生的小小日志系统可助你查出游戏引擎正处于何种状态。 如果你在处理AI，你要知道哪个实体改变了AI状态。 如果你是音频程序员，你也许想记录每个播放的声音，这样你可以检查它们是否是以正确的顺序触发。

通常的解决方案是向代码中丢些对`log()`函数的调用。 不幸的是，这是用一个问题取代了另一个——现在我们有太多日志了。 AI程序员不关心什么时候声音在播放，声音程序员也不在乎AI状态转换，但是现在都得在对方的日志中跋涉。

理念上，我们应该可以选择性的为关心的事物启动日志，而游戏成品中，不应该有任何日志。 如果将不同的系统条件日志改写为服务，那么我们就可以用装饰器模式。 让我们定义另一个音频服务提供者的实现：

```
class LoggedAudio : public Audio
{
public:
  LoggedAudio(Audio &wrapped)
  : wrapped_(wrapped)
  {}

  virtual void playSound(int soundID)
  {
    log("play sound");
    wrapped_.playSound(soundID);
  }

  virtual void stopSound(int soundID)
  {
    log("stop sound");
    wrapped_.stopSound(soundID);
  }

  virtual void stopAllSounds()
  {
    log("stop all sounds");
    wrapped_.stopAllSounds();
  }

private:
  void log(const char* message)
  {
    // 记录日志的代码……
  }

  Audio &wrapped_;
};
```

如你所见，它包装了另一个音频提供者，暴露同样的接口。 它将实际的音频行为转发给内部的提供者，但它也同时记录每个音频调用。 如果程序员需要启动音频日志，他们可以这样调用：

```
void enableAudioLogging()
{
  // 装饰现有的服务
  Audio *service = new LoggedAudio(Locator::getAudio());

  // 将它换进来
  Locator::provide(service);
}
```

现在，对音频服务的任何调用在运行前都会记录下去。 同时，当然，它和我们的空服务也能很好的相处，你能*启用*音频，也能继续记录如果音频被启用时*将会*播放的声音。

设计决策

我们讨论了一种典型的实现，但是对核心问题的不同回答有着不同的实现方式：

服务是如何被定位的?

- **外部代码注册：**

  这是样例代码中定位服务使用的机制，这也是我在游戏中最常见的设计方式：

  - *简单快捷。* `getAudio()`函数简单的返回指针。这通常会被编译器内联，所以我们几乎没有付出性能损失就获得了很好的抽象层。
  - *可以控制如何构建提供者。* 想想一个接触游戏控制器的服务。我们使用两个具体的提供者：一个是给常规游戏，另一个给在线游戏。 在线游戏跨过网络提供控制器的输入，这样，对游戏的其他部分，远程玩家好像是在使用本地控制器。

    为了能正常工作，在线的服务提供者需要知道其他远程玩家的IP。 如果定位器本身构建对象，它怎么知道传进来什么? `Locator`类对在线的情况一无所知，更不用说其他用户的IP地址了。

    外部注册的提供者闪避了这个问题。定位器不再构造类，游戏的网络代码实例化特定的在线服务提供器， 传给它需要的IP地址。然后把服务提供给定位器，而定位器只知道服务的抽象接口。
  - *可以在游戏运行时改变服务。* 我们也许在最终的游戏版本中不会用到这个，但是这是个在开发过程中有效的技巧。 举个例子，在测试时，即使游戏正在运行，我们也可以切换音频服务为早先提到的空服务来临时地关闭声音。
  - *定位器依赖外部代码。* 这是缺点。任何访问服务的代码必须假定在某处的代码已经注册过服务了。 如果没有做初始化，要么游戏会崩溃，要么服务会神秘的不工作。

- **在编译时绑定：**

  这里的思路是使用预处理器，在编译时间处理“定位”。就像这样：

  ```
  class Locator
  {
  public:
    static Audio& getAudio() { return service_; }

  private:
    #if DEBUG
      static DebugAudio service_;
    #else
      static ReleaseAudio service_;
    #endif
  };
  ```

  像这样定位服务暗示了一些事情：

  - *快速。* 所有的工作都在编译时完成，在运行时无需完成任何东西。 编译器很可能会内联`getAudio()`调用，这是我们能达到的最快方案。
  - *能保证服务是可用的。* 由于定位器现在拥有服务，在编译时就进行了定位，我们可以保证游戏如果能完成编译，就不必担心服务不可用。
  - *无法轻易改变服务。* 这是主要的缺点。由于绑定发生在编译时，任何时候你想要改变服务，都得重新编译并重启游戏。

- **在运行时设置：**

  企业级软件中，如果你说“服务定位器”，他们脑中第一反应就是这个方法。 当服务被请求时，定位器在运行时做一些魔法般的事情来追踪请求的真实实现。

  反射 是一些编程语言在运行时与类型系统打交道的能力。 举个例子，我们可以通过名字找到类，找到它的构造器，然后创建实例。

  像Lisp，Smalltalk和Python这样的动态类型语言自然有这样的特性，但新的静态语言比如C#和Java同样支持它。

  通常而言，这意味着加载设置文件确认提供者，然后使用反射在运行时实例化这个类。这为我们做了一些事情：

  - *我们可以更换服务而无需重新编译。* 这比编译时绑定多了小小的灵活性，但是不像注册那样灵活，那里你可以真正的在运行游戏的时候改变服务。
  - *非程序员也可改变服务。* 这对于设计者师很好的，他们想要开关某项游戏特性，但修改源代码并不舒服。 （或者，更可能的，*编程者* 对设计者介入感到不舒服。）
  - *同样的代码库可以同时支持多种设置。* 由于从代码库中完全移出了定位处理，我们可以使用相同的代码来同时支持多种服务设置。

    这就是这个模型在企业网站上广泛应用的原因之一： 只需要修改设置，你就可以在不同的服务器上发布相同的应用。 历史上看来，这在游戏中没什么用，因为主机硬件本身是好好标准化了的， 但是很多游戏的目标是大杂烩般的移动设备，这点就很有关系了。

    - *复杂。* 不像前面的解决方案，这个方案是重量级的。 你得创建设置系统，也许要写代码来加载和粘贴文件，通常*要做些事情*来定位服务。 花时间写这些代码上，就没法花时间写其他的游戏特性。
    - *加载服务需要时间。* 现在你眉会头紧蹙了。在运行时设置意味着你在消耗CPU循环加载服务。 缓存可以最小化消耗，但是仍暗示着在首次使用服务时，游戏需要暂停花点时间完成。 游戏开发者*讨厌*消耗CPU循环在不能提高游戏体验的地方。

如果服务不能被定位怎么办?

- **让使用者处理它：**

  最简单的解决方案就是把责任推回去。如果定位器不能找到服务，只需返回`NULL`。这暗示着：

  - *让使用者决定如何掌控失败。* 使用者也许在收到找不到服务的关键错误时应该暂停游戏。 其他时候可能可以安全地忽视并继续。 如果定位器不能定义全面的政策应对所有的情况，那么就将失败传回去，让每个使用者决定什么是正确的回应。
  - *使用服务的用户必须处理失败。* 当然，这个的必然结果是每个使用者都*必须*检查服务的失败。 如果它们都以相同方式来处理，在代码库中就有很多重复的代码。 如果一百个中有一个忘了检查，游戏就会崩溃。

- **挂起游戏：**

  我说过，我们不能*保证*服务在编译时总是可用的，但是不意味着我们不能*声明*可用性是游戏定位器运行的一部分。 最简答的方法就是使用断言：

```
class Locator
{
public:
  static Audio& getAudio()
  {
    Audio* service = NULL;

    // Code here to locate service...

    assert(service != NULL);
    return *service;
  }
};
```

  如果服务没有被找到，游戏停在试图使用它的后续代码之前。 这里的`assert()`调用没有解决无法定位服务的问题，但是它确实明确了问题是什么。 通过这里的断言，我们表明，“无法定位服务是定位器的漏洞。”

  如果你没见过`assert()`函数，单例模式一章中有解释

  那么这为我们做了什么呢？

  - *使用者不必处理缺失的服务。* 也许简单的服务在成百上千的地方使用，这节约了很多代码。 通过声明定位器永远能够提供服务，我们节约了使用者处理它的精力。
  - *如果服务没有找到，游戏会挂起。* 在极少的情况下，服务真的找不到，游戏就会挂起。 强迫我们解决定位服务的漏洞是好事（比如一些本该调用的初始化代码没有被调用）， 但被阻塞的所有人都得等到漏洞修复时。与大型开发团队工作时，当这种事情发生时，会增加痛苦的停工时间。

- **返回空服务：**

  我们在样例中实现中展示了这种修复。使用它意味着：

  - *使用者不必处理缺失的服务。* 就像前面的选项一样，我们保证了总是会返回可用的服务，简化了使用服务的代码。
  - *如果服务不可用，游戏仍将继续。* 这有利有弊。让我们在没有服务的情况下依然能运行游戏是很有用的。 在大团队中，当我们工作依赖的其他特性或者依赖的其他系统还没有就位时，这也是很有用的。

    缺点在于，较难查找无意缺失服务的漏洞。 假设游戏用服务去获取数据，然后基于数据做出决策。 如果我们无法注册真正的服务，代码获得了空服务，游戏也许不会像期望的那样行动。 需要在这个问题上花一些时间，才能发现我们以为可用的服务是不存在的。

    我们可以让空服务被调用时打印一些debug信息来缓和这点。

在这些选项中，我看到最常使用的是会找到服务的简单断言。 在游戏发布的时候，它经历了严格的测试，会在可信赖的硬件上运行。 无法找到服务的机会非常小。

在更大的团队中，我推荐使用空服务。 这不会花太多时间实现，可以减少开发中服务不可用的缺陷。 这也给你了一个简单的方式去关闭服务，无论它是有漏洞还是干扰到了现在的工作。

服务的服务范围有多大?

到目前为止，我们假设定位器给*任何*需要服务的地方提供服务。 当然这是这个模式的典型的使用方式，另一选项是服务范围限制到类和它的依赖类中，就像这样：

```
class Base
{
  // 定位和设置服务的代码……

protected:
  // 派生类可以使用服务
  static Audio& getAudio() { return *service_; }

private:
  static Audio* service_;
};
```

通过这样，对服务的访问被收缩到了继承`Base`的类。这两种各有千秋：

- **如果全局可访问：**
  - *鼓励整个代码库使用同样的服务。* 大多数服务都被设计成单一的。 通过允许整个代码库接触到相同的服务，我们可以避免代码因不能获取“真正的”服务而到处实例化提供者，。
  - *我们失去了何时何地使用服务的控制权。* 这是让某物全局化的明显代价——任何东西都能接触它。单例模式一章讲了全局变量是多么的糟糕。
- **如果接触被限制在某个类中：**
  - *我们控制了耦合。* 这是主要的优点。通过显式限制服务到继承树的一个分支上，应该解耦的系统保持了解耦。
  - *可能导致重复的付出。* 潜在的缺点是如果一对无关的类*确实*需要接触服务，每个类都要拥有服务的引用。 无论是谁定位或者注册服务，它也需要在这些类之间重复处理。

    另一个选项是改变类的继承层次，给这些类一个公共的基类，但这引起的麻烦也许多于收益。）

我的通用准则是，如果服务局限在游戏的一个领域中，那么限制它的服务范围在一个类上面。 举个例子，获取网络接口的服务可能限制于在线联网类中。 像日志这样更加广泛应用的服务应该是全局的。

参见

- 服务定位模式在很多方面是单例模式的兄弟，在应用前值得看看哪个更适合你的需求。
- Unity框架在它的`GetComponent()`方法中使用这个模式，协调它的组件模式
- 微软的XNA游戏开发框架在它的核心`Game`类中内建了这种模式。 每个实体都有一个`GameServices`对象可以用来注册和定位任何种类的服务。

优化模式

游戏设计模式

虽然越来越快的硬件解除了大部分软件在性能上的顾虑，对游戏却并非如此。 玩家总是想要更丰富的，更真实的，更激动人心的体验。 到处都是争抢玩家注意力——还有金钱——的游戏，能将硬件的功能发挥至极致的游戏往往获胜。

优化游戏性能是一门高深的艺术，接触到软件的各个层面。 底层程序员掌握硬件架构的种种特质。同时，算法研究者争先恐后地证明谁的过程是最有效率的。

这里，我描述了几个加速游戏的中间层模式。 数据局部性介绍了计算机的存储层次以及如何使用其以获得优势。 脏标识帮你避开不必要的计算。 对象池帮你避开不必要的内存分配。 空间分区加速了虚拟世界和其中元素的空间布局。

模式

- 数据局部性
- 脏标识
- 对象池
- 空间分区

数据局部性

游戏设计模式Optimization Patterns

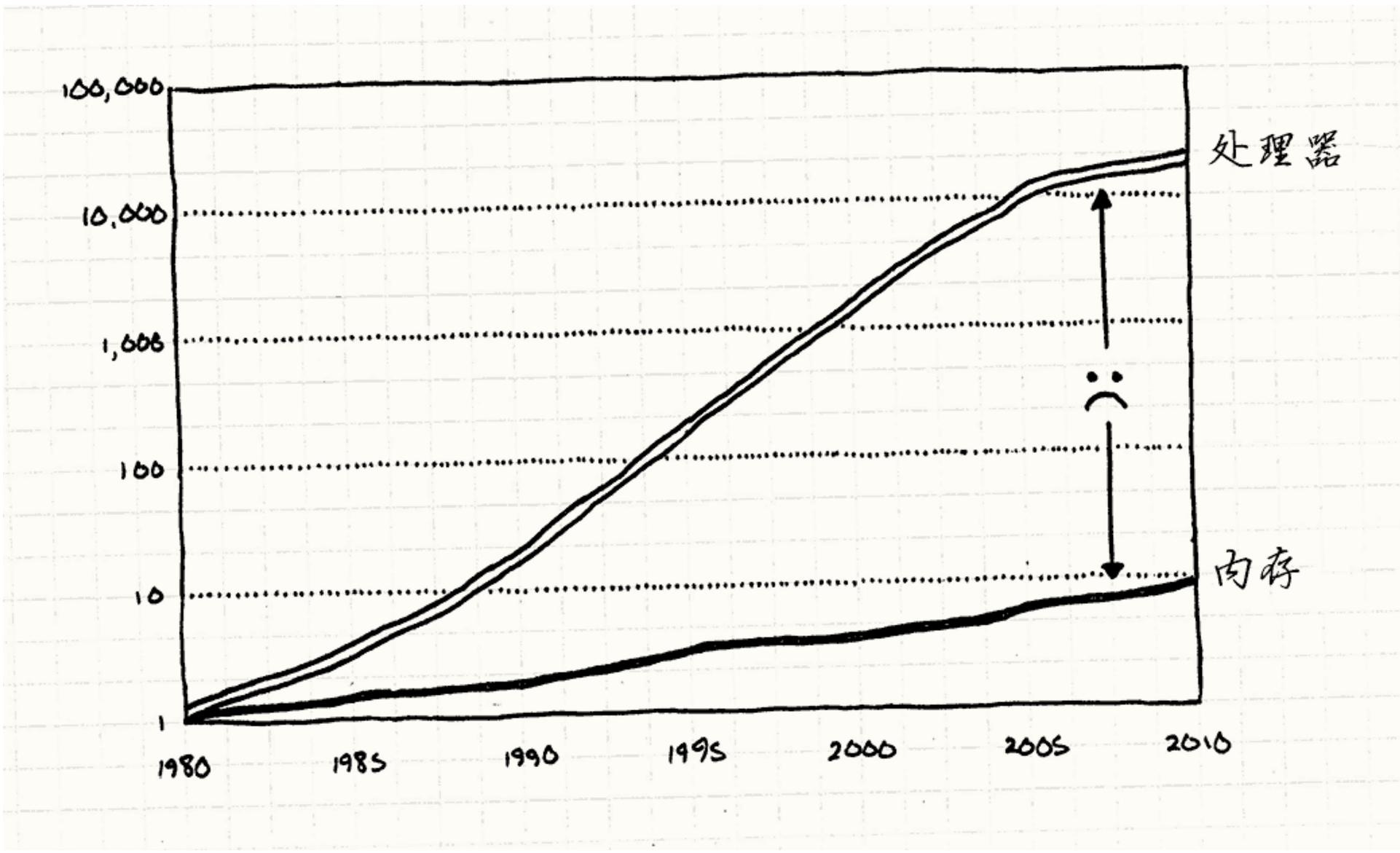
意图

合理组织数据，充分使用CPU的缓存来加速内存读取。

动机

我们被欺骗了。 他们一直向我们展示CPU速度每年递增的图表，就好像摩尔定律不是观察历史的结果，而是某种定理。 无需吹灰之力，软件凭借着新硬件就可以奇迹般的加速。

芯片*确实*越来越快（就算现在增长的速度放缓了），但硬件巨头没有提到某些事情。 是的，我们可以更快地*处理*数据，但不能更快地*获得*数据。



处理器和RAM发展速度从1980开始不同。如你所见，CPU飞跃式发展，RAM读取速度被远远甩到了后面。

这个数据来自*Computer Architecture: A Quantitative Approach* 由John L. Hennessy, David A. Patterson, Andrea C. Arpaci-Dusseau基于Tony Albrecht的“Pitfalls of Object-Oriented Programming”写就。

为了让你超高速的CPU刮起指令风暴， 它需要从内存获取数据加载到寄存器。 如你所知，RAM没有紧跟CPU的速度增长，差远了。

借助现代的硬件，要消耗*上百个*周期才能从RAM获得一比特的数据。 如果大部分指令需要的数据都需要上百个周期去获取， 那么为什么我们的CPU没有在99%的时间空转着等待数据?

事实上，等待内存读取*确实*消耗很长时间，但是没有那么糟糕。 为了解释为什么，让我们看一看这一长串类比……

它被称为“乱序存储器（RAM，random access memory）”是因为， 不像光驱，理论上你从某块获取数据的速度和从其他块获取数据的速度是一样的。你不需要像光盘那样考虑连续读取。

或者，你*现在不需要*。就像接下来看到的，RAM不是那么乱序地读取。

数据仓库

想象一下，你是小办公室里的会计。 你的任务是拿盒文件，然后做一些会计工作——把数据加起来什么的。 你必须根据一堆只有会计能懂的晦涩逻辑，取出特定标记的文件盒并工作。

我也许不应该在例子中用我一无所知的职业打比方。

感谢辛勤地工作，天生的悟性，还有进取心，你可以在一分钟内处理一个文件盒。 但是这里有一个小小的问题。所有这些文件盒都存储在分离的仓库中。 想要拿到一个文件盒，需要让仓库管理员带给你。 他开着叉车在传送带周围移动，直到找到你要的文件盒。

这会消耗他，认真的，一整天才能完成。 不像你，他下个月就不会被雇佣了。 这就意味着无论你有多快，一天只能拿到一个文件盒。 剩下的时间，你只能坐在那里，质疑自己怎么选了这个折磨灵魂的工作。

一天，一组工业设计师出现了。 他们的任务是提高操作的效率——比如让传送带跑得更快。 在看着你工作几天后，他们发现了几件事情：

- 通常，当你处理文件盒时，下一个需要处理的文件盒就在仓库同一个架子上。
- 叉车一次只取一个文件盒太愚蠢了。
- 在你的办公室角落里还是有些空余空间的。

描述访问刚刚访问事物旁边的位置的术语是*引用局部性*。

他们想出来一个巧妙的办法。 无论何时你问仓库要一个盒子，他都会带给你一托盘的盒子。 他给你想要的盒子，以及它周围的盒子。 他不知道你是不是想要这些（而且，根据工作条件，他根本不在乎）； 他只是尽可能的塞满托盘，然后带给你。

无视工作场地的安全，他直接将叉车开到你的办公室，然后将托盘放在办公室的角落。

当你需要新盒子，你需要做的第一件事就是看看它在不在办公室角落的托盘里。 如果在，很好！你只需要几分钟拿起它然后继续计算数据。 如果一个托盘中有五十个盒子，而幸运的你需要*所有*盒子，你可以以五十倍的速度工作。

但是如果你需要的盒子*不在*托盘上，就要一新托盘的盒子。 由于你的办公室里只能放一托盘的盒子，你的仓库朋友只能将旧的拿走，带给你一托盘全新的盒子。

CPU的托盘

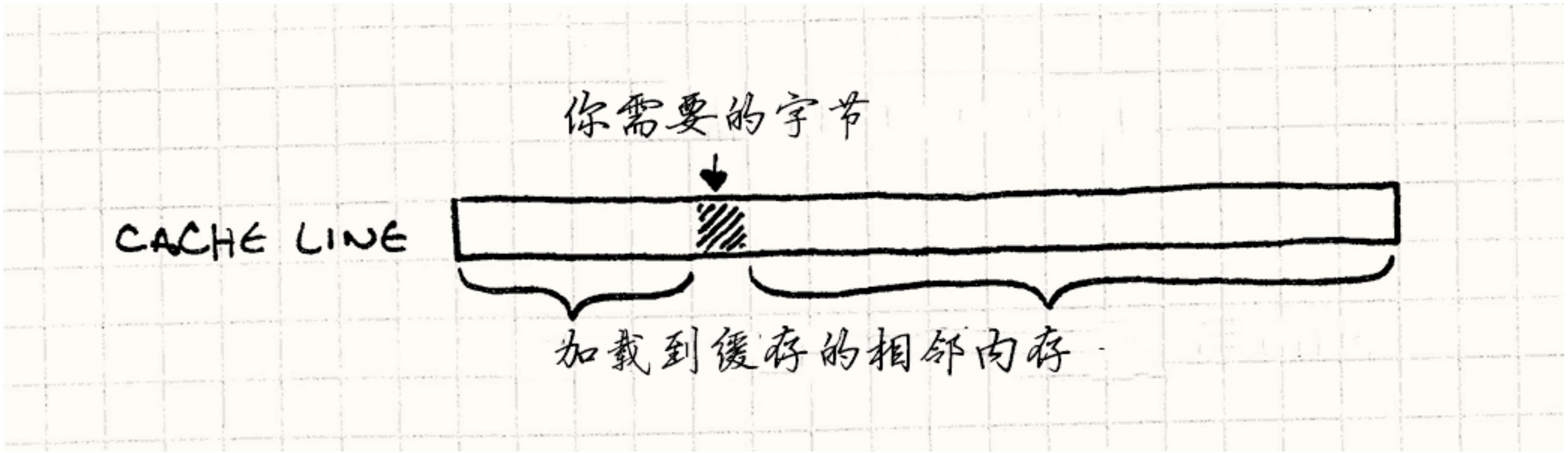
奇怪的是，这就是现代CPU运转的方式。如果还不够明显，你是CPU。 你的桌子是CPU的寄存器，一盒文件就是寄存器能放下的数据。 仓库是机器的RAM，那个烦人的仓库管理员是从主存加载数据到寄存器的总线。

如果我在三十年前写这一章，这个比喻就到此为止了。 但是芯片越来越快，而RAM，好吧，“没有跟上”，硬件工程师开始寻找解决方案。 他们想到的是*CPU缓存*技术。

现代的电脑在芯片内部有一小块存储器。 CPU从那上面取数据比从内存取数据快得多。 它很小，因为需要放在芯片上，它很快，因为使用的（静态RAM，或称SRAM）内存更贵。

现代硬件有多层缓存，就是你听到的“L1”，“L2”，“L3”之类的。 每一层都更大也更慢。在这章里，我们不关心内存是不是多层的，但了解一下还是很有必要的。

这一小片内存被称为*缓存*（特别的，芯片上的被称为*L1级缓存*）， 在比喻中，它是由托盘扮演的。 无论何时芯片需要从RAM取一字节的数据，它自动将一整块内存读入——通常是64到128字节——然后将其放入缓存。 这些一次性传输的字节被称为*cache line*。



如果你需要的下一字节数据就在这块上， CPU从缓存中直接读取，比从RAM中读取*快得多*。 成功从缓存中找到数据被称为“缓存命中”。 如果不能从中获得而得去主存里取，这就是一次*缓存不命中*。

我在类比中掩盖了（至少）一个细节。在办公室里，只能放一个托盘，或者一个cache line。 真实的缓存包含多个cache line。关于这点的细节超出了本书的范围，搜索“缓存关联性”来了解相关内容。

当缓存不命中时，CPU*空转*——它不能执行下一条指令，因为它没有数据。 它坐在那里，无聊的等待几百个周期直到取到数据。 我们的任务是避免这一点。想象你在优化一块性能攸关的游戏代码，长得像这样：

```
for (int i = 0; i < NUM_THINGS; i++)
{
  sleepFor500Cycles();
  things[i].doStuff();
}
```

你会做的第一个改动是什么？对了。 将那个无用的，代价巨大的函数调用拿出来。 这个调用等价于一次缓存不命中的代价。 每次跳到内存，都会延误你的代码。

等等，数据是性能？

当着手写这一章时，我花费了一些时间制作一个类似游戏的小程序，用于收集缓存使用最好情况和最坏情况。 我想要缓存速度的基准，这样可以得到缓存失效造成的性能浪费。

当看到一些工作的结果时，我惊到了。 我知道这是一个大问题，但眼见为实。 两个程序完成*完全相同*的计算，唯一的区别是它们会造成缓存不命中的数量。 较慢的程序比较快的程序慢*五十*倍。

这里有很多警告。特别的，不同的计算机有不同的缓存设置，所以我的机器可能和你的不同， 专用的游戏主机与个人电脑不同，而二者都与移动设备不同。

你得自己测测看。

这让我大开眼界。我一直从*代码*的角度考虑性能，而不是*数据*。 一个字节没有快慢，它是静态的。但是因为缓存的存在，*组织数据的方式直接影响了性能*。

现在真正的挑战是将这些打包成一章内可以讲完的东西。 优化缓存使用是一个很大的话题。 我还没有谈到*指令缓存*呢。 记住，代码也在内存上，而且在执行前需要加载到CPU上。 有些更熟悉这个主题的人可以就这个问题写一整本书。

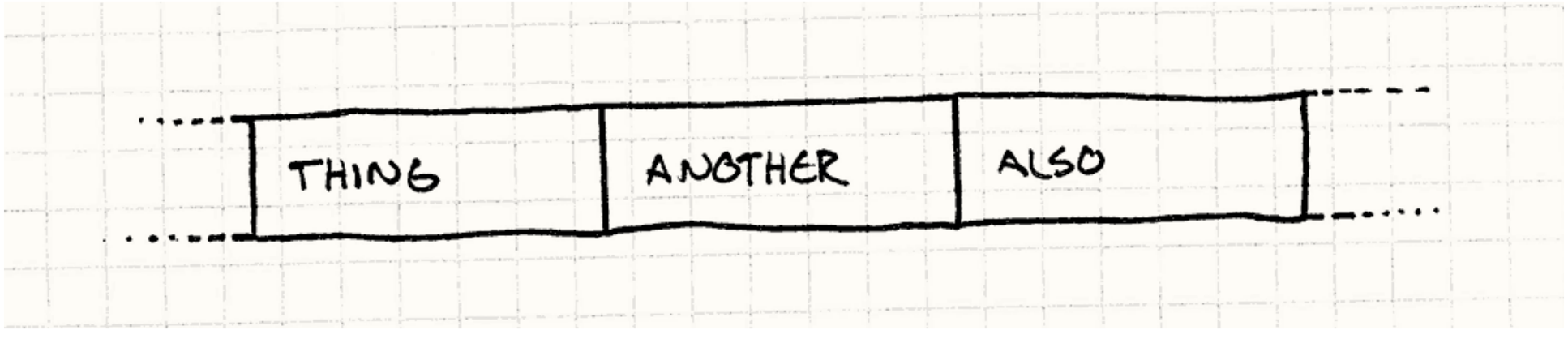
事实上，有人*确实*写了一本书：*Data-Oriented Design*，作者Richard Fabian.

既然你已经在阅读*这本书*了， 我有几个基本技术帮你考虑数据结构是如何影响性能的。

这可以归结成很简单的事情：芯片读内存时总是获得一整块cache line。 你能从cache line读到越多你要的东西，跑得就越快。 所以目标是*组织数据结构，让要处理的数据紧紧相邻。*

这里有一个核心假设：单线程。 如果在多线程上处理邻近数据，让它在多个*不同*的cache line上更好。 如果两个线程争夺同一cache line上的数据，两个核都得花些时间同步缓存。

换言之，如果你正处理`Thing`，然后`Another`然后`Also`，你需要它们这样呆在内存里：



注意，不是`Thing`，`Another`，和`Also`的*指针*，而是一个接一个的真实数据，。 CPU读到`Thing`，也会读取`Another`和`Also`（取决于数据的大小和cache line的大小）。 当你开始下一个时，它们已经在缓存上了。芯片很高兴，你也很高兴。

模式

现代的CPU有**缓存来加速内存读取**。 它可以**更快的读取最近访问过的内存的毗邻内存**。通过**提高内存局部性**来提高性能——保证数据**以处理顺序排列在连续内存**上。

何时使用

就像大多数优化方案，使用数据局部性的第一准则是*在遇到性能问题时使用*。 不要将其应用在代码库不经常使用的角落上。 优化代码不会让你过得更轻松，因为其结果往往更加复杂，更加缺乏灵活性。

就本模式而言，还得确认你的性能问题*确实由缓存不命中*引发。 如果代码是因为其他原因而缓慢，这个模帮不上忙。

简单的估算方案是手动添加指令，检查代码中两点间消耗的时间，寄希望于精确的计时器。为了找到糟糕的缓存使用，你需要使用更加复杂的东西。 你想要知道有多少缓存不命中，又是在哪里发生的。

幸运的是，有现成的工具做这些。 在数据结构上做大手术前，花一些时间了解这些工具是如何工作， 理解它们抛出的一大堆数据（令人惊讶的复杂）是很有意义的。

不幸的是，这些工具大部分不便宜。如果在一个主机开发团队，你可能已经有了使用它们的证书。

如果没有，一个极好的替代选项是Cachegrind。 它在模拟的CPU和缓存结构上运行你的程序，然后报告所有的缓存交互。

话虽这么说，缓存不命中*仍会*影响游戏的性能。 虽然不应该花费大量时间提前优化缓存的使用，但是在设计过程中仍要思考数据结构是不是对缓存友好。

记住。

软件体系结构的特点之一是*抽象*。 这本书很多的章节都在谈论如何解耦代码块，这样可以更容易的进行改变。 在面向对象的语言中，这几乎总是意味着接口。

在C++中，使用接口意味着通过指针或者引用访问对象。 但是使用指针就意味在内存中跳跃，这就带来了这章想要避免的缓存不命中。

接口的另一半是*虚方法调用*。 这需要CPU查找对象的虚函数表，找到调用方法的真实指针。 所以，你又一次追踪指针，造成缓存不命中。

为了讨好这个模式，你需要牺牲一些宝贵的抽象。 你越围绕数据局部性设计程序，就越放弃继承、接口和它们带来的好处。 没有银弹，只有挑战性的权衡。这就是乐趣所在!

示例代码

如果你真的要一探数据局部性优化的深处，那么你会发现有无数的方法去分割数据结构，将其切为CPU更好处理的小块。 为了热热身，我会先从一些最通用的分割方法开始。 我们会在游戏引擎的特定部分介绍它们， 但是（像其他章节一样）记住这些通用方法也能在其他部分使用。

连续数组

让我们从处理一系列游戏实体的游戏循环开始。 实体使用了组件模式，被分解到不同的领域——AI，物理，渲染。 这里是`GmaeEntity`类。

```
class GameEntity
{
public:
  GameEntity(AIComponent* ai,
             PhysicsComponent* physics,
             RenderComponent* render)
  : ai_(ai), physics_(physics), render_(render)
  {}

  AIComponent* ai() { return ai_; }
  PhysicsComponent* physics() { return physics_; }
  RenderComponent* render() { return render_; }

private:
  AIComponent* ai_;
  PhysicsComponent* physics_;
  RenderComponent* render_;
};
```

每个组件都有相对较少的状态，也许只有几个向量或一个矩阵， 然后会有方法去更新它。这里的细节无关紧要，但是想象一下，大概是这样的：

就像名字暗示的，这些是更新方法模式的例子。 甚至`render()`也是这个模式，只是换了个名字。

```
class AIComponent
{
public:
  void update() { /* 处理并修改状态…… */ }

private:
  // 目标，情绪，等等……
};

class PhysicsComponent
{
public:
  void update() { /* 处理并修改状态…… */ }

private:
  // 刚体，速度，质量，等等……
};

class RenderComponent
{
public:
  void render() { /* 处理并修改状态…… */ }

private:
  // 网格，纹理，着色器，等等……
};
```

游戏循环管理游戏世界中一大堆实体的指针数组。每个游戏循环，我们都要做如下事情：

1. 为每个实体更新他们的AI组件。
2. 为每个实体更新他们的物理组件。
3. 为每个实体更新他们的渲染组件。

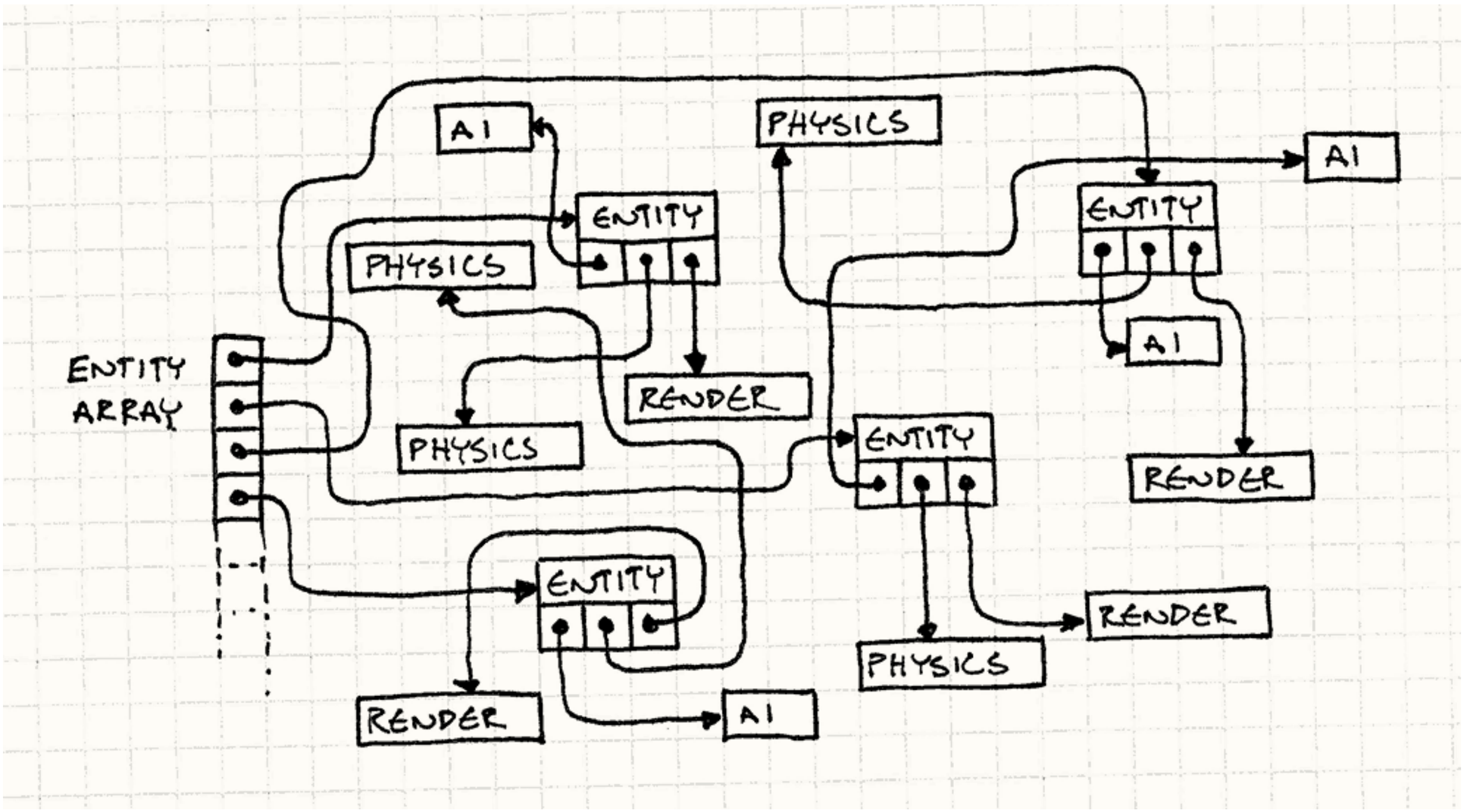
很多游戏引擎以这种方式实现：

```
while (!gameOver)
{
  // 处理AI
  for (int i = 0; i < numEntities; i++)
  {
    entities[i]->ai()->update();
  }

  // 更新物理
  for (int i = 0; i < numEntities; i++)
  {
    entities[i]->physics()->update();
  }

  // 绘制屏幕
  for (int i = 0; i < numEntities; i++)
  {
    entities[i]->render()->render();
  }

  // 其他和时间有关的游戏循环机制……
}
```

在你听说CPU缓存之前，这些看上去完全无害。 但是现在，你得看到这里有隐藏着的不对之处。 这不是在颠簸缓存，这是在四处乱晃然后猛烈地敲击。看看它做了什么：

1. 游戏实体的数组存储的是*指针*，所以为了获取游戏实体，我们得转换指针。缓存不命中。
2. 然后游戏实体有组件的指针。又一次缓存不命中。
3. 然后我们更新组件。
4. 再然后我们退回第一步，为*游戏中的每个实体*做这件事。

令人害怕的是，我们不知道这些对象是如何在内存中布局的。 我们完全任由内存管理器摆布。 随着实体的分配和释放，堆会组织更加乱。



每一帧，游戏循环得追踪这些指针来获取数据。

如果我们目标是在游戏地址空间中四处乱转，完成“256MB内存四晚廉价游”，这也许是一个很好的决定。 但是我们的目标是让游戏跑得尽可能快，而在主存四处乱逛*不是*一个好办法。 记得`sleepFor500Cycles()`函数吗？ 上面的代码效率和它也差不多了。

描述浪费时间转换指针这一行为的术语是“追逐指针”，那并不像听上去那么有趣。

我们能做得更好。 第一个发现是，之所以跟着指针去寻找游戏实体，是因为可以立刻跟着*另一个*指针去获得组件。 `GameEntity`本身没有有意义的状态和有用的方法。*组件*才是游戏循环需要的。

众多实体和组件不能像星星一样散落在黑暗的天空中，我们得脚踏实地。 我们将每种组件存入巨大的数组：一个数组给AI组件，一个给物理，另一个给渲染。

就像这样：

```
AIComponent* aiComponents =
    new AIComponent[MAX_ENTITIES];
PhysicsComponent* physicsComponents =
    new PhysicsComponent[MAX_ENTITIES];
RenderComponent* renderComponents =
    new RenderComponent[MAX_ENTITIES];
```

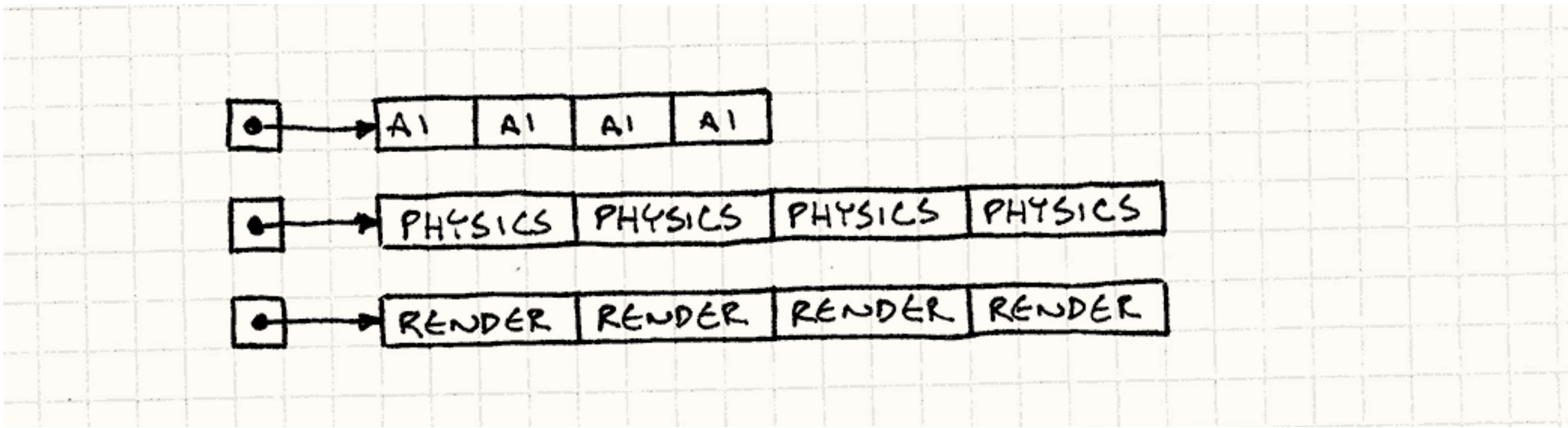
使用组件时，我最不喜欢的就是组件这个单词的长度。

让我强调一点，这些都是*组件*的数组，而不是*指向组件的指针*。数据都在那里一个接着一个排列。 游戏循环现在可以直接遍历它们了。

```
while (!gameOver)
{
  // 处理AI
  for (int i = 0; i < numEntities; i++)
  {
    aiComponents[i].update();
  }

  // 更新物理
  for (int i = 0; i < numEntities; i++)
  {
    physicsComponents[i].update();
  }

  // 绘制屏幕
  for (int i = 0; i < numEntities; i++)
  {
    renderComponents[i].render();
  }

  // 其他和时间有关的游戏循环机制……
}
```

在这里做的更好的一条提示是新代码中有更少的`->`操作符。 如果你想要提高数据局部性，找找哪些你可以摆脱的间接跳转。

我们消除了所有的指针追逐。不在内存中跳来跳去，而是直接在三个数组中做直线遍历。



这将一股字节流直接泵到了CPU饥饿的肚子里。 在我的测试中，这个改写后的更新循环是之前性能的*50*倍。

有趣的是，我们并没有在这里放弃太多的封装。 是的，游戏循环直接更新的游戏组件而不是通过游戏实体，但在此之前它已经确保了以正确的顺序运行。 即使如此，每个组件的内部还是具有很好的封装性。 它们的封装性取决于自身的数据和方法。我们只是改变了使用它们的方法。

这也不意味着我们摆脱了`GameEntity`。它拥有它组件的指针这一状态仍然得以保持。 它的组件指针现在只是指到了这个数组之中。 对游戏的其他部分，如果你还是想传递一个“游戏实体”，一切照旧。 重要的是性能攸关的游戏循环部分回避了这点，直接获取数据。

打包数据

假设我们在做粒子系统。 根据上节的建议，将所有的粒子放在巨大的连续数组中。让我们用管理类封装它。

`ParticleSystem`类是对象池的一个例子，通常为单一类型对象构建。

```
class Particle
{
public:
  void update() { /* 重力，等等…… */ }
  // 位置，速度，等等……
};

class ParticleSystem
{
public:
  ParticleSystem()
  : numParticles_(0)
  {}

  void update();
private:
  static const int MAX_PARTICLES = 100000;

  int numParticles_;
  Particle particles_[MAX_PARTICLES];
};
```

系统中的基本更新方法看起来是这样的：

```
void ParticleSystem::update()
{
  for (int i = 0; i < numParticles_; i++)
  {
    particles_[i].update();
  }
}
```

但实际上不需要同时更新*所有的*粒子。 粒子系统维护固定大小的对象池，但是粒子通常不是同时在屏幕上活跃。 最简单的解决方案是这样的：

```
for (int i = 0; i < numParticles_; i++)
{
  if (particles_[i].isActive())
  {
    particles_[i].update();
  }
}
```

我们给`Particle`一个标志位来追踪其是否在使用状态。 在更新循环时，我们检查每个粒子的这个标志位。 这会将粒子其他部分的数据也加载到缓存中。 如果粒子*没有*在使用，那么跳过它去检查下一个。 这时粒子加载到内存中的其他数据都是浪费。

活跃的粒子越少，要在内存中跳过的部分就越多。 越这样做，在两次活跃粒子有效更新之间发生的缓存不命中就越多。 如果数组很大又有*很多*不活跃的粒子，我们又在颠簸缓存了。

如果连续数组中的对象不是连续处理的，实际上这个办法也没有太多效果。 如果有太多不活跃的对象需要跳过，就又回到了问题的起点。

理解底层代码的程序员也可以看出这里的问题。 使用`if`为每个粒子检查会引起*分支预测错误*和*流水线暂停*。 在现代CPU中，一条简单的“指令”实际消耗多个时钟周期。 为了保持CPU繁忙，指令*流水线化*，在前面的指令处理完成之前就开始处理。

为了实现流水线，CPU需要猜测接下来要执行哪一条指令。 在顺序结构的代码中，这很简单，但是加入控制流，就难了。 当它为`if`执行指令，它是猜粒子是活跃的然后执行`update()`调用，还是猜它不活跃呢?

为了回答这一点，芯片做*分支预测*——它看看之前的代码选择了哪条分支然后照做。 但是当循环不断在活跃和不活跃粒子之间转换，预测就失败了。

当它失败，CPU取消它推测的代码（*流水线更新*），重头开始。 这在机器上波及广泛，这是为什么有时候你看到开发者在热点代码避免控制流。

鉴于本节的标题，你大概可以猜出答案是什么了。 我们不*监测*活跃与否的标签，我们根据标签*排序*粒子。 将所有活跃的粒子放在列表的前头。 如果知道了这些粒子都是活跃的，就不必再检查这些标识位了。

还可以很容易地追踪有多少活跃的粒子。这样，更新循环变成了这种美丽的东西:

```
for (int i = 0; i < numActive_; i++)
{
  particles[i].update();
}
```

现在没有跳过*任何*数据。 加载入缓存的每一字节都是需要处理的粒子的一部分。

当然，我可没说每帧都要对整个数组做快排。 这将抵消这里的收益。我们想要的是*保持*数组的顺序。

假设数组已经排好序了——开始时确实如此，因为所有粒子都不活跃——它变成未排序的时候即是粒子被激活或者被反激活时。 我们可以很轻易的处理这两种情况。 当一个粒子激活时，我们让它占据第一个*不*活跃粒子的位置， 将不活跃粒子移动到激活序列的尾端，完成一次交换：

```
void ParticleSystem::activateParticle(int index)
{
  // 不应该已被激活!
  assert(index >= numActive_);

  // 将它和第一个未激活的粒子交换
  Particle temp = particles_[numActive_];
  particles_[numActive_] = particles_[index];
  particles_[index] = temp;

  // 现在多了一个激活粒子
  numActive_++;
}
```

为了反激活粒子，只需做相反的事情：

```
void ParticleSystem::deactivateParticle(int index)
{
  // 不应该已被激活!
  assert(index < numActive_);

  // 现在少了一个激活粒子
  numActive_--;

  // 将它和最后一个激活粒子交换
  Particle temp = particles_[numActive_];
  particles_[numActive_] = particles_[index];
  particles_[index] = temp;
}
```

很多程序员（包括我在内）已经对于在内存中移动数据过敏了。 将一堆数据移来移去*感觉*比发送指针要消耗大得多。 但是如果你加上了*解析*指针的代价，有时候这种估算是错误的。 在有些情况下，如果能够保证缓存命中，在内存中移动数据消耗更小。

在你做这种决策前要记得*验证*这点。

将粒子根据激活状态保持*排序*——就不需要给每个粒子都添加激活标志位了。 这可以由它在数组中的位置和`numActive_`计数器推断而得。 这让粒子对象更小，意味着在cache lines中能够打包更多数据，能跑得更快。

但是并非完事如意。 你可以从API看出，我们放弃了一定的面向对象思想。 `Particle`类不再控制其激活状态了。 你不能在它上面调用`activate()`因为它不知道自己的索引。 相反，任何想要激活粒子的代码都需要接触到粒子*系统*。

在这个例子中，将`ParticleSystem`和`Particle`这样牢牢绑一起没有问题。 我将它们视为两个物理类的的组合概念。 这意味着粒子只在*特定*的粒子系统中有意义。 在这种情况下，很可能是粒子系统在复制和销毁粒子。

冷/热 分割

这里是最后一种取悦缓存的技术例子。 假设某些游戏实体有AI控件。 其中包括一些状态——现在正在播放的动画，正在前往的方向，能量等级，等等——这些东西每帧都会发生变化。 就像这样：

```
class AIComponent
{
public:
  void update() { /* ... */ }

private:
  Animation* animation_;
  double energy_;
  Vector goalPos_;
};
```

但它也有一些罕见事件的状态。 它存储了一些数据，描述它遭到猎枪痛击后会掉落什么战利品。 掉落数据在实体的整个生命周期只会使用一次，就在它结束的前一霎那：

```
class AIComponent
{
public:
  void update() { /* ... */ }

private:
  // 之前的字段……
  LootType drop_;
  int minDrops_;
  int maxDrops_;
  double chanceOfDrop_;
};
```

假设我们遵循前面的章节，那么当我们更新AI组件时，就穿过了一序列打包好的连续数组。 那个数据包含所有掉落物的信息。 这让每个组件都变得更大了，这就减少了我们能够加载到cache line中的组件个数。 每帧的每个组件都会将战利品数据加载到内存中去，即使我们根本不会去使用它。

这里的解决方案被称为“冷/热分割”。这个点子源于将数据结构划分为两个分离的部分。 第一部分保存“热”数据，那些每帧都要调用的数据。 剩下的片段被称为“冷”数据，在那里的存储使用的次数较少的数据。

这里的热部分是AI组件的*主体*。 它是使用最多的部分，所以我们不希望解析指针去找到它。 冷组件可以被归到一边去，但是我们还是需要访问它，因此我们在热组件中包含一个指向它的指针，就像这样：

```
class AIComponent
{
public:
  // 方法……
private:
  Animation* animation_;
  double energy_;
  Vector goalPos_;

  LootDrop* loot_;
};

class LootDrop
{
  friend class AIComponent;
  LootType drop_;
  int minDrops_;
  int maxDrops_;
  double chanceOfDrop_;
};
```

现在我们每帧都要遍历AI组件，加载到内存的数据只包含必需的数据（以及那个指向冷数据的指针）。

我们可以继续去除指针，为冷热数据维护平行数组。 仍能够为组件找到冷数据，因为两者在各自数组中索引值是相同的。

你可以看到事情是怎么变得模棱两可的。 在我的例子中，哪些是冷数据，哪些是热数据是很明确的，但是在真实的游戏中一般很少可以这么明显的分割。 如果你有一部分数据，实体在一种状态下会经常使用，另一种状态则不会，那该怎么办？ 如果实体只在特定关卡时使用一块特定的数据，又该怎么办？

做这种优化有时就是在走钢丝。 很容易陷入其中，消耗无尽的时间把数据挪来挪去看看性能如何。 需要通过实践来掌握在哪里付出努力。

设计决策

这章更接近于介绍一种思维定势——将数据的组织模式作为游戏性能的关键部分。 实际上具体的设计空间是开放的。 你可以让数据局部性影响整个架构，或者只在局部几个核心数据结构上使用这模式。

最需要关心的问题是在何时何地使用这个模式，但是这里还有其他几个问题需要回答。

Noel Llopis的著名文章让很多人围绕缓存设计游戏，他称之为“面向数据的设计”。

你如何处理多态?

到了现在，我们避开了子类和虚方法。 我们假设有打包好的*同类*对象。 这种情况下，我们知道它们有同样的大小。 但是多态和动态调用也是有用的工具。我们如何调和呢?

- *别这么干*

  最简单的解决方案是避免子类，至少在做内存优化的部分避免使用。 无论如何，软件工程师文化已经和大量使用继承渐行渐远了。

  一种保持多态的灵活性而不使用子类的方法是通过类型对象模式。

  - *简洁安全。* 你知道在处理什么类，所有的对象都是同样大小。
  - *更快* 动态调用意味着在跳转表中寻找方法，然后跟着指针寻找特定的代码。 这种消耗在不同硬件区别很大，但动态调用总会带来*一些*代价。

    就像往常一样，万事无绝对。 在大多数情况下，虚方法调用中C++编译器需要一次重定向。 但是在*某些*情况下，如果可以知道接受者的具体类型，编译器可以*去虚拟化*，然后静态地调用正确的方法。 去虚拟化在一些just-in-time虚拟机比如Java和JavaScript中更为常见。

  - *不灵活* 当然，使用动态调用的原因就是它给了在不同对象间展示不同的行为的强大能力。 如果游戏想要不同的实体使用独特的渲染、移动或攻击，虚方法是处理它的好方法。 把它换成包含巨大的`switch`的非虚方法会超级慢。

- *为每种类型使用分离的数组：*

  我们使用多态，这样即使不知道对象的类型，也能引入行为。 换言之，有了一包混合的东西，我们想要其中每个对象在接到通知时去做自己的事情。

  但是这提出来一个问题：为什么开始的时候要把它们混在一起呢？ 取而代之，为什么不为每种类型保持一个单独的集合呢？

  - *对象被紧密的排列着。* 每个数组只包含同类的对象，这里没有填充或者其他的古怪。
  - *静态调度。* 一旦获得了对象的类型，你不必在所有时候使用多态。你可以使用常规的非虚方法调用。
  - *得追踪每个集合。* 如果你有很多不同类型，这种管理每种类型分别的数组可是件苦差事。
  - *得明了每一种类型。* 由于你为每种类型管理分离的集合，你无法解耦*类型集合*。 多态的魔力之一在于它是*开放的*——与一个接口交互的代码可以与实现此接口的众多类型解耦。

- *使用指针的集合：*

  如果你不太担心缓存，这是自然的解法。 只要一个指针数组指向基类或者接口类型，你就获得了想要的多态，以及想多大多大的对象。

  - *灵活。*这样构建集合的代码可以与任何支持接口的类工作。完全开放。
  - *对缓存不友好。* 当然，我们在这里讨论其他方案的原因就是指针跳转导致的缓存不友好。 但是，记住，如果代码不是性能攸关的，这很有可能是行得通的。

游戏实体是如何定义的?

如果与组件模式串联使用此模式， 你会获得多个数组，包含组成游戏实体的组件。 游戏循环会在那里直接遍历它们，所以实体本身就不是那么重要了， 但是在其他你想要与“实体”交互的代码库部分，一个概念上的实体还是很有用的。

这里的问题是它该如何被表示？如何追踪这些组件？

- *如果游戏实体是拥有它组件指针的类：*

  这是第一个例子中的情况。纯OOP解决方案。 你得到了`GameEntity`类，以及指向它拥有的组件的指针。 由于它们只是指针，并不知道这些组件是如何在内存中组织的了。

  - *你可以将实体存储到连续数组中。* 既然游戏实体不在乎组件在哪里，你可以将组件好好打包，组织数组中，来优化遍历。
  - *拿到一个实体，可以轻易的获得它的组件。* 就在一次指针跳转后的位置。
  - *在内存中移动组件很难。* 当组件启用或者关闭时，你可能想要在数组中移动它们，保证启用的组件位于前列。 如果在实体中有指针指向组件时直接移动该组件，一不小心指针就会损毁。你得保证同时更新指向组件的指针。

- *如果游戏实体是拥有组件ID的类：*

  使用裸指针的挑战在于内存中移动它很难。你可以使用更加直接的方案：使用ID或者索引来*查找*组件。

  ID的实际查找过程是由你决定的，它可能很简单，只需为每个实体保存独特的ID，然后遍历数组查找， 或者更加复杂地使用哈希表，将ID映射到组件现有位置。

  - *更复杂。* ID系统不是高科技，但是还是需要比指针多做些事情。你得实现它然后排除漏洞，这里需要消耗内存。
  - *更慢。* 很难比直接使用指针更快。需要使用搜索或者哈希来帮助实体找到它的组件。
  - *你需要访问组件“管理器”。* 基本思路是用抽象的ID标识组件。你可以使用它来获得对应组件对象的引用。 但是为了做到这点，你需要让ID有办法找到对应的组件。 正是包裹着整个连续组件数组的对所要做的。

  通过裸指针，如果你有游戏实体，你可以直接找到组件，而这种方式你需要接触游戏实体和*组件注册器*。

  你也许在想，“我会把它做成单例！问题解决！”好吧，在某种程度上是这样的。 不过，你也许想要先看看这章。

- *如果游戏实体本身就是一个ID：*

  这是某些游戏引擎使用的新方式。一旦实体的行为和状态被移出放入组件，还剩什么呢？ 事实上，没什么了。实体干的唯一事情就是将组件连接在一起。 它的存在只是为了说明：*这个*AI组件和*这个*物理组件还有*这个* 渲染组件合起来， 定义了一个存在于游戏世界中的实体。

  这很重要，因为组件要相互交互。 渲染组件需要知道实体位于何处，而位置信息也许是物理组件的属性。 AI组件想要移动实体，因此它需要对物理组件施加力。每个组件都需要以某种方式获得同一实体中的其他组件。

  有些聪明人意识到你需要的唯一东西就是ID。不是实体知道组件，而是组件知道实体。每个组件都知道拥有它实体的ID。当AI组件需要它所属实体的物理组件时，它只需要找到那个拥有同样ID的物理组件。

  你的实体*类*整个消失了，取而代之的是围绕数字的华丽包装。

  - *实体很小*。当你想要传递游戏实体的引用时，只需一个简单的值。
  - *实体是空的*。当然，将所有东西移出实体的代价是，你*必须*将所有东西移出。 不能再拥有组件独有的状态和行为，这样更加依赖于组件模式。
  - *不必管理实体的生命周期。* 由于实体只是内置值类型，不需要被显式分配和释放。当它所有的组件都被释放时，对象就隐式“死亡”了。
  - *查找实体的某一组件也许会很慢。* 这和前一方案有相同的问题，但在另一个方向上。为了找某个实体的组件，你需要给ID做对象映射。这一过程消耗也许很大。

  但是，这一次*是*性能攸关的。 在更新时，组件经常与它的兄弟组件交互，因此你需要经常的查找组件。 解法是让组件在数组中的索引作为实体的“ID”。

  如果每个实体都是拥有相同组件的集合，那么组件数组就是完全同步的。 组件数组三号位的AI组件与在*物理组件*数组三号位的组件相关联。

  但是，记住，这*强迫*你保持这些数组平行。 如果你想要用不同的方式排序或者打包它们就会变得很难。 你也许需要一些没有物理组件或者没有渲染组件的实体。 而它们仍保证与其他组件同步，没有办法独自排序物理组件数组和渲染组件数组。

参见

- 这一章大部分围绕着组件模式。 这种模式的数据结构绝对是为缓存优化的最常见例子。事实上，使用组件模式让这种优化变得容易了。 由于实体是按“领域”（AI，物理，等等）更新的，将它们划出去变成组件，更容易将它们保存为对缓存友好的合适大小。

  但是这不意味你*只能*为组件使用这个模式！ 任何需要接触很多数据的关键代码，考虑数据局部性都是很重要的。

- Tony Albrecht的 《Pitfalls of Object-Oriented Programming》 也许是最广为人知的内存友好游戏设计指南。它让很多人（包括我！）明白了数据结构对性能是多么重要。

- 几乎同时，Noel Llopis关于同一话题写了一篇 非常有影响力的博客。

- 这一模式几乎完全得益于同类对象的连续存储数组。 随着时间的推移，你也许需要向那个数组增加或删除对象。 对象池模式正是关于这一点。

- 游戏引擎Artemis是首个也是最著名的为游戏实体使用简单ID的游戏框架。

脏标识模式

游戏设计模式Optimization Patterns

意图

将工作延期至需要其结果时才去执行，避免不必要的工作。

动机

很多游戏有*场景图*。 那是一个巨大的数据结构，包含了游戏世界中所有的对象。 渲染引擎使用它决定在屏幕哪里画东西。

最简单的实现中，场景图只是对象列表。 每个对象都有模型，或者其他的原始图形，以及*变换*。 变换描述了对象在世界中的位置，方向，拉伸。 为了移动或者旋转对象，只需简单地改变它的变换。

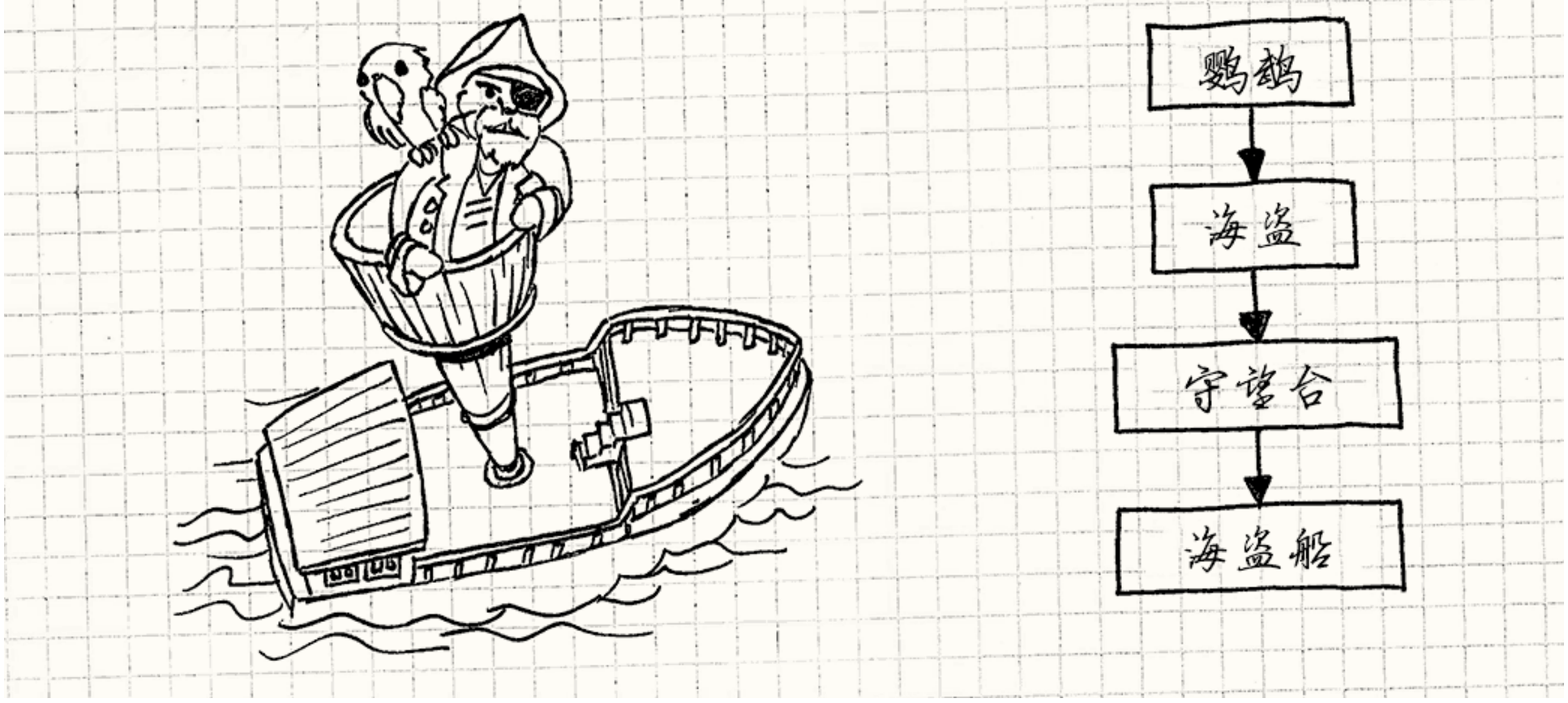
如何 存储和操作变换的内容很不幸超出了本书讨论范围。 简单的总结下，是个4x4的矩阵。 你可以通过矩阵相乘来组合两个变换，获得单一变换——举个例子，平移之后旋转对象。

它如何工作，以及为什么那样工作是留给读者的练习。

当渲染系统描绘对象，它取出对象的模型，对其应用变换，然后将渲染到游戏世界中。 如果我们有场景*包*而不是场景*图*，那就是这样了，生活很简单。

但是，大多数场景图都是*分层的*。 场景图中的对象也许拥有锚定的父对象。 这种情况下，它的变换依赖于*父对象*的位置，而不是游戏世界上的绝对位置。

举个例子，想象游戏世界中有一艘海上的海盗船。 桅杆的顶端有瞭望塔，瞭望塔中有海盗，海盗肩上有鹦鹉。 船本身的变换定位船在海上的位置。瞭望塔的变换定位它在船上的位置，诸如此类。



编程艺术！

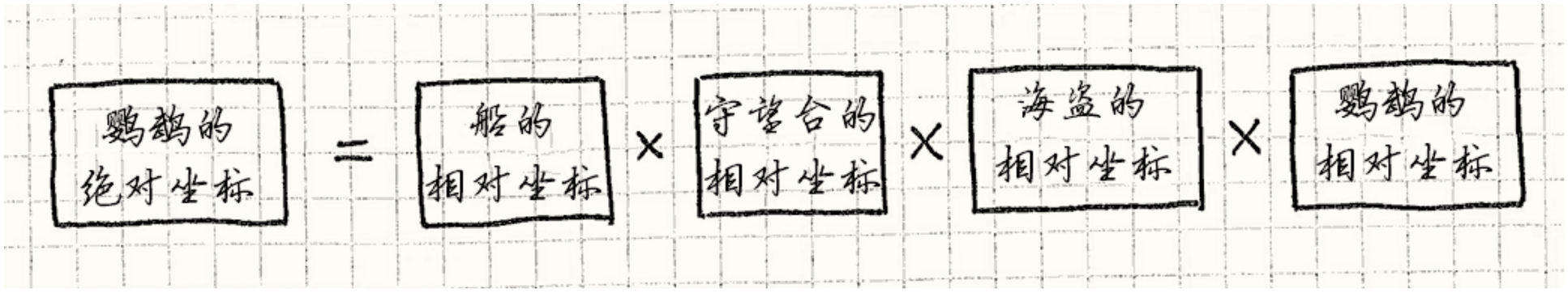
这样的话，当父对象移动时，子节点也自动的跟着移动。 如果改变了船的自身变换，瞭望塔，海盗和鹦鹉都会随之变动。 如果当船移动时，就得手动调整每个对象的变换来防止滑动，那可相当令人头疼。

老实说，当你在海上，你*确实*需要手动调整姿势来防止滑动。 也许我应该选一个不会滑动的例子。

但是为了在屏幕上真正的描绘鹦鹉，我需要知道它在世界上的绝对位置。 我会调用父节点相关的变换对对象的*自身变换*进行变换。 为了渲染对象，我需要知道对象的*世界变换*。

自身变换和世界变换

计算对象的世界变换很直接——从它的父根节点一直追踪到对象，将经过的所有变换绑在一起。 换言之，鹦鹉的世界变换如下：



如果对象没有父对象，它的自身变换和世界变换是一样的。

我们每帧需要为游戏世界的每个对象计算世界变换，因此哪怕每个模型只有一部分矩阵乘法， 它也是代码影响性能的关键所在。 保持它们及时更新是有技巧的，因为当父对象移动时，它影响自己的世界变换，并递归影响所有子节点。

最简单的方法是在渲染时计算变换。 每一帧，我们从最高层递归遍历整个场景图。 我们计算每个对象的世界变换然后立刻绘制它。

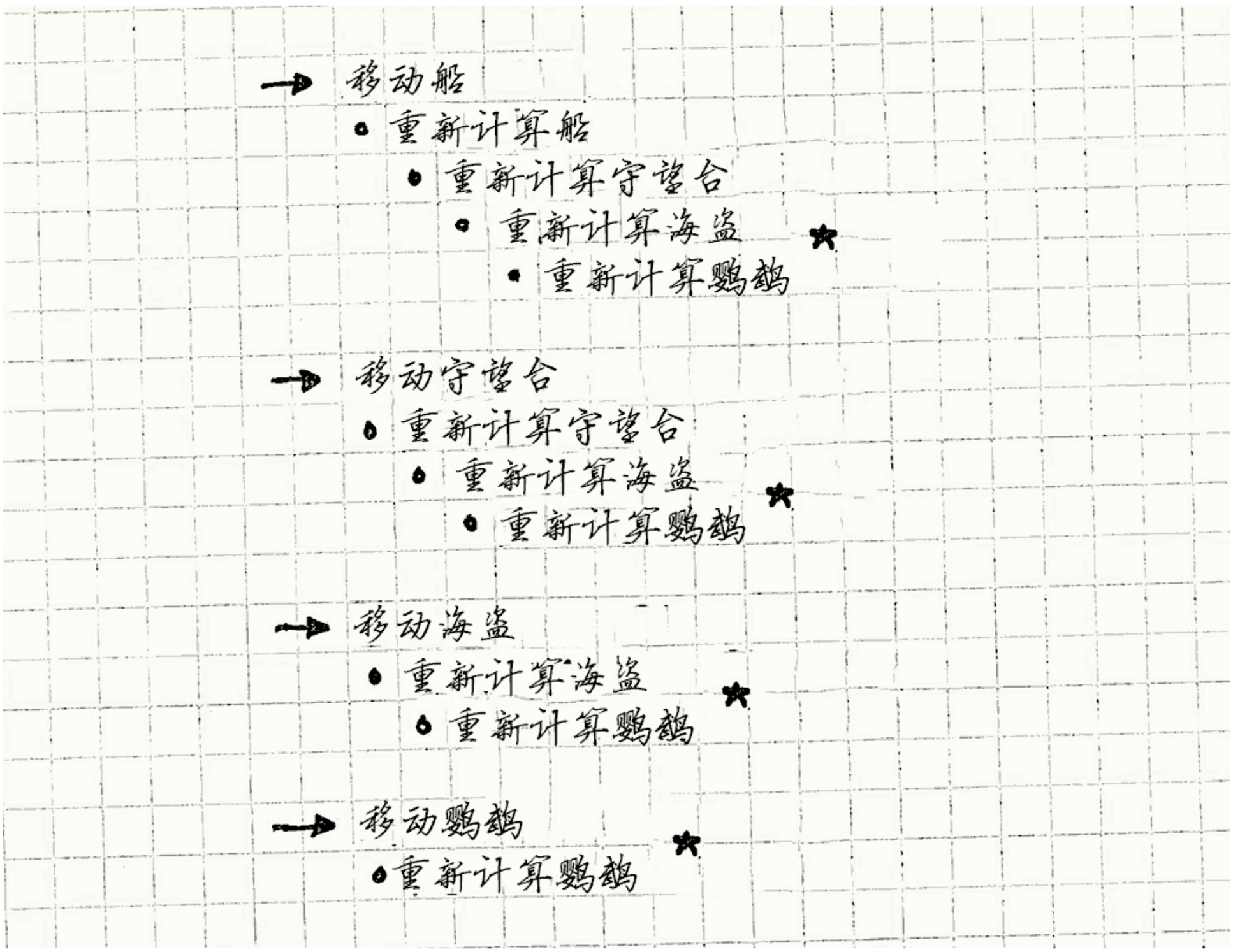
但这完全是在浪费CPU！ 很多游戏世界的对象*不是*在每帧都移动。 想想那些构成关卡的静态几何图形。 在没有改变的情况下每帧计算它们的世界变换是一种浪费。

缓存世界变换

明显的解决方案是*缓存*它。 在每个对象中，我们存储它的自身变换和世界变换。 当我们渲染时使用预计算的世界变换。 如果对象从未移动，缓存的变换永远是最新的变换，每个人都很开心。

当一个对象*确实*移动了，简单的解决方式是之后就更新世界变换。 但是不要忘记层次性！ 当父节点移动时，我们得计算它的世界变换并*递归计算它所有的子对象*。

想象游戏中忙碌的时刻。 在一帧中，船在海上颠簸，瞭望塔在风中摇晃，海盗被甩到了边缘，而鹦鹉撞上了他的脑袋。 我们改变了四个自身变换。如果每次自身变换都立即更新世界变换，会发生什么?



你可以看到在标记了★的行上，我们重复计算了四次鹦鹉的世界变换，但我们只需要最后的那次。

我只移动四个对象，但我们做了*十次*世界变换计算。 那就有六次在被渲染器使用前浪费了。 我们计算了鹦鹉的世界变换*四次*，但它只需渲染一次。

问题在于世界变换也许会依赖于多个自身变换。 由于我们*每次*变化就立即重新计算，当自身变换依赖的多个世界变换在同一帧发生变化时， 我们就对同一变换做了多次重新计算。

延期重计算

我们会通过解耦自身变换和世界变换的更新来解决这个问题。 这让我们先在一次批处理中改变自身变换，在这些改变完成*之后*，在渲染它之前，重新计算它们世界变换。

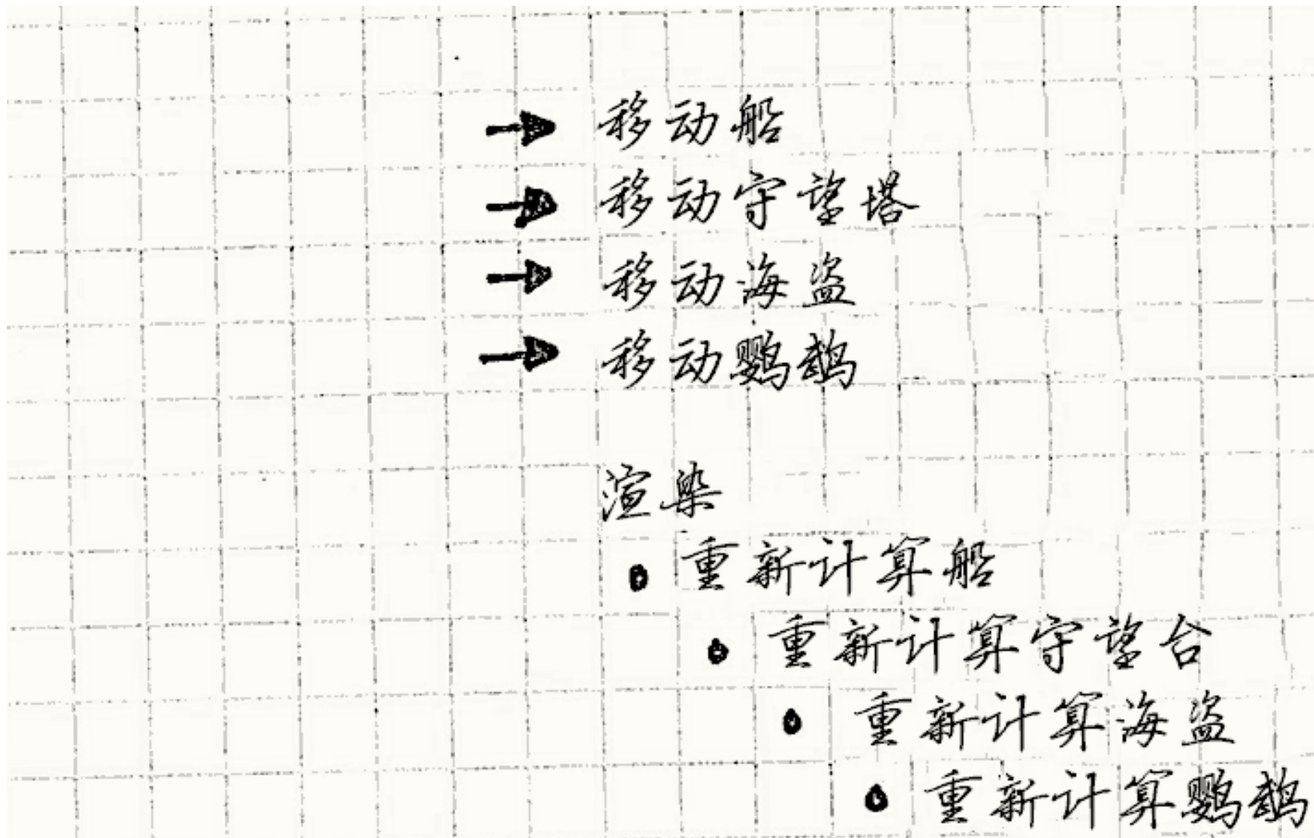
有趣的是，不少软件架构是故意稍微偏离了一点。

为了做到这点，我们为图中的每个对象添加*标识*。“标识”和“位”在编程中密切相关——都代表处在两种状态之一的一小块数据。 我们称之为“真”和“假”，或者有时称为“设置”和“清除”。 我之后会交替使用它们。

当自身变换改变了，我们设置它。 当我们需要对象的世界变换时，我们检查这位。 如果它被设置了，计算世界变换然后清除标识。 那个标识代表着，“世界变换过时了吗？”由于它们没有被清除，这种“过时的杂乱”被称为“脏”。 也就是*脏标识*。“脏位”也是这模式通常使用的名字，但是我决定使用不那么下流的称呼。

维基百科的编辑者没有我这样的自制力，使用了dirty bit.

如果我们运用这个模式，然后移动之前例子中所有对象，那么游戏最终是这样的：



这就是你能希望得到的最好结果了——每个受影响对象的世界变换只被计算一次。 使用仅仅一位数据，这个模式为我们做了以下事情：

- 它将对象的父节点链上的众多的自身变换变化归并成对象上的一次计算。
- 它避免了在没有移动的对象上重新计算。
- 还有一个小小的意外收获：如果对象在渲染前被删除了，不必再计算它的世界变换。

模式

一组**原始数据**随着时间变化而改变。 使用**昂贵的过程**推定一组**导出数据**。 一个**“脏”标识**追踪导出数据是否与原始数据保持一致。 它在**原始数据改变时被设置。** 如果导出数据被请求时，该标识被设置了，那么**重新计算并清除标识** 否则的话，使用之前**缓存的导出数据**。

何时使用

与这本书中的其他模式相比，这个模式解决了一个非常特殊的问题。 同时，就像其他优化一样，只在性能问题足够大时，再使用这一模式增加代码的复杂度。

脏标识在两种任务上应用：“计算”和“同步”。 在两种情况下，从原始数据变换到导出数据消耗很多时间，或者有很多其他方面的消耗。

在我们的场景图例子中，这个过程非常缓慢是因为需要执行很多数学运算。 在同步上使用这个模式是另一个应用场景， 导出数据在*别的地方*——在磁盘上或者在网络另一头的终端机上——从点A传输到点B消耗很大。

这里是一些其他的应用场景：

- **原始数据的变化速度远高于导出数据的使用速度。** 避免在导出数据使用前原始数据多次变化带来的不必要计算。 如果你总在原始数据变化后立即使用导出数据，这个模式无法帮忙。

- **增量更新十分困难。** 假设海盗船只能携带特定数量的战利品。我们需要获取携带事物的总重量。 我们*可以*使用这个模式，然后为总重量设脏标识。每次添加或者移除一些战利品，我们设置这个标识。 当我们需要总量时，将所有战利品重量加起来，然后清除标识。

  但是更简单的解决方法是*保存计算总量*。 当我们添加或删除事物，直接从现在的总重量添加或者删除它的重量。 如果我们可以*承担得起消耗*，保持导出数据的更新，那么更好的选择是不用这个模式， 每次需要时重新计算导出数据。

这听起来脏标识很少有能使用的时候，但你总会找到一两个部分它能帮得上忙。 直接在你的游戏代码库中搜索“dirty”，通常会发现这个模式的使用之处。

根据我的研究，也能找到很多对“dirty”黑魔法的抱怨注释。

记住

哪怕是在说服自己这个模式在这里很恰当之后，这里还有一些瑕疵可能会让你不爽。

延期太久是有代价的

这个模式将某些耗时的工作延期到真正需要结果的时候，但是当它要的时候，通常是*现在就要*。 但是我们使用这个模式的原因是计算很耗时！

在例子中，这不是问题，因为我们还是可以在一帧之内计算世界坐标，但是可以想象其他情况下，工作需要消耗可观时间。 如果玩家想要结果时才*开始*计算，这会引起不愉快的卡顿。

延期的另一个问题是，如果有东西出错了，你可能根本无法弥补。 当你使用这个模式将状态持久化时，问题更加突出。

举个例子，文本编辑器知道文档有“没保存的修改”。 在文件标题栏的小点或者星号就是可见的脏标识。 原始数据是在内存中打开的文档，推导数据是在磁盘上的文件。

很多程序直到文档关闭或者应用退出才保存到磁盘上。 在大多数情况下这很好，但是如果一不小心踢到了插线板，你的主要工作也就随风而逝了。

在后台自动保存备份的编辑器弥补了这一失误。 自动保存的频率保持在崩溃时不丢失太多数据和频繁保存文件之间。

这反映了自动内存管理系统的不同垃圾回收策略。 引用计数在不需要内存时立即释放它，但每次引用改变时都会更新引用计数，那消耗了大量CPU时间。

简单的垃圾回收器将回收内存拖延到需要内存时，但是代价是可怕的，“垃圾回收过程”会冻住整个游戏，直到回收器完成了对堆的处理。

在两者之间是更复杂的系统，像延时引用计数和增量的垃圾回收， 比纯粹的引用计数回收要消极，但比冻住游戏的回收系统更积极。

每次 状态改变你都得保证设置标识。

由于推导数据是从原始数据推导而来的，它本质上是缓存。 无论何时缓存了数据，都是需要保证*缓存一致性*——在缓存与原始数据不同步时通知之。 在这个模式上，这意味着在*任何*原始数据变化时设置脏标识。

Phil Karlton有句名言：“计算机科学中只有两件难事：缓存一致性和命名。”

一处遗漏，你的程序就使用了错误的推导数据。 这引起了玩家的困惑和非常难以追踪的漏洞。 当使用这个模式时，你也得注意，任何修改了原始数据的代码都得设置脏标识。

一种解决它的方法是将原始数据的修改隐藏在接口之后。 任何想要改变状态的代码都要通过API，你可以在API那里设置脏标识来保证不会遗漏。

得将之前的推导数据保存在内存中。

当推导数据被请求而脏标识*没有*设置，就使用之前计算出的数据。 这很明显，但这需要在内存中保存推导数据，以防之后再次使用。

如果你用这个模式将原始状态同步到其他地方，这不是问题。 那样的话，推导数据通常不在内存里。

如果你没有使用这个模式，可在需要时计算推导数据，使用完后释放。 这避免将其存储回内存的开销，而代价是每次使用都需要重新计算。

就像很多优化一样，这种模式以内存换速度。 通过在内存中保存之前计算的结果，避免了在它没有改变的情况下重新计算。 这种交易在内存便宜而计算昂贵时是划算的。 当你手头有更多空闲的时间而不是内存的时候，最好在需求时重新计算。

相反，压缩算法做了反向的交易： 它们优化*空间*，代价是解压时额外的处理时间。

示例代码

假设我们满足了超长的需求列表，看看在代码中是如何应用这个模式的。 就像我之前提到的那样，矩阵运算背后的数学知识超出了本书的范围，因此我将其封装在类中，假设在某处已经实现了：

```
class Transform
{
public:
  static Transform origin();

  Transform combine(Transform& other);
};
```

这里我们唯一需要的操作就是`combine()`，这样可以将父节点链上所有的自身变换组合起来获得对象的世界变换。同样有办法来获得原点变换——通常使用一个单位矩阵，表示没有平移，旋转，或者拉伸。

下面，我们勾勒出场景图中的对象类。这是在应用模式*之前*最低限度所需的东西：

```
class GraphNode
{
public:
  GraphNode(Mesh* mesh)
  : mesh_(mesh),
    local_(Transform::origin())
  {}

private:
  Transform local_;
  Mesh* mesh_;

  GraphNode* children_[MAX_CHILDREN];
  int numChildren_;
};
```

每个节点都有自身变换描述了它和父节点之间的关系。它有代表对象图形的真实网格。（将`mesh_`置为`NULL`来处理子节点的不可见节点。）最终，每个节点都包含一个有可能为空的子节点集合。

通过这样，“场景图”只是简单的`GraphNode`，它是所有的子节点（以及孙子节点）的根。

```
GraphNode* graph_ = new GraphNode(NULL);
// 向根图节点增加子节点……
```

为了渲染场景图，我们需要的就是从根节点开始遍历节点树，然后使用正确的世界变换为每个节点的网格调用函数：

```
void renderMesh(Mesh* mesh, Transform transform);
```

我们不会直接在这里实现，但真正的实现中也是做渲染需要的事，将网格绘制在世界上给定的位置。 如果对场景图中的每个节点都正确有效地调用，这就愉快地完成了。

尚未优化的遍历

让我们开始吧，我们做一个简单的遍历，在渲染需要时去计算所有的世界位置。 这没有优化，但它很简单。我们添加一个新方法给`GraphNode`：

```
void GraphNode::render(Transform parentWorld)
{
  Transform world = local_.combine(parentWorld);

  if (mesh_) renderMesh(mesh_, world);

  for (int i = 0; i < numChildren_; i++)
  {
    children_[i]->render(world);
  }
}
```

使用`parentWorld`将父节点的世界变换传入节点。 这样，需要获得*这个*节点的世界变换只需要将其和节点的自身变换相结合。 不需要*向上*遍历父节点去计算世界变换，因为我们可以在*向下*遍历时计算。

我们计算了节点的世界变换，将其存储到`world`，如果有网格，渲染它。 最后我们遍历进入子节点，传入*这个*节点的世界变换。 无论如何，这是一个紧密的，简单的遍历方法。

为了绘制整个场景图，我们从根节点开始整个过程。

```
graph_->render(Transform::origin());
```

让我们变脏

所以代码做了正确的事情——它在正确的地方渲染正确的网格——但是它没有高效地完成。它每帧在图中的每个节点上调用`local_.combine(parentWorld)`。 让我们看看这个模式是如何修复这一点的。首先，我们给`GraphNode`添加两个字段：

```
class GraphNode
{
public:
  GraphNode(Mesh* mesh)
  : mesh_(mesh),
    local_(Transform::origin()),
    dirty_(true)
  {}

  // 其他方法……

private:
  Transform world_;
  bool dirty_;
  // 其他字段……
};
```

`world_`字段缓存了上一次计算出来的世界变换，和`dirty_`这个脏标识字段。 注意标识初始为`true`。当我们创建新节点时，我们还没有计算它的世界变换。 初始时，它与自身变换不是同步的。

我们需要这个模式的唯一原因是对象可以*移动*，因此让我们添加对这点的支持：

```
void GraphNode::setTransform(Transform local)
{
  local_ = local;
  dirty_ = true;
}
```

这里重要的部分是同时设置脏标识。我们忘了什么吗？是的——子节点！

当父节点移动时，它所有子节点的世界坐标也改变了。 但是这里，我们不设置它们的脏标识。 我们*可以*那样做，但是那要递归，很缓慢。我们可以在渲染时做点更聪明的事。让我们看看：

```
void GraphNode::render(Transform parentWorld, bool dirty)
{
  dirty |= dirty_;
  if (dirty)
  {
    world_ = local_.combine(parentWorld);
    dirty_ = false;
  }

  if (mesh_) renderMesh(mesh_, world_);

  for (int i = 0; i < numChildren_; i++)
  {
    children_[i]->render(world_, dirty);
  }
}
```

这里有一个微妙的假设：`if`检查比矩阵乘法快。直观上，你当然会这么想，检测一位当然比一堆浮点计算要快。

但是，现代CPU超级复杂。它们严重依赖于*流水线*——入队的一系列连续指令。 像我们这里的`if`造成的分支会引发*分支预测失败*，强迫CPU消耗周期在填满流水线上。

数据局部性一章有更多现代CPU是如何试图加快运行的细节， 以及如何避免这样颠簸它们。

这与原先的原始实现很相似。 关键改变是我们在计算世界变换之前去检查节点是不是脏的，然后将结果存在字段中而不是本地变量中。 如果节点是干净的，我们完全跳过了`combine()`，使用老的但是正确的`world_`值。

这里的技巧是`dirty`参数。 如果父节点链上有任何节点是脏的，那么就是`true`。 当我们顺着层次遍历下来时，`parentWorld`用同样的方式更新它的世界变换，`dirty`追踪父节点链的是否有脏。

这让我们避免递归地调用`setTransform()`标注每个子节点的`dirty_`标识。 相反，我们在渲染时将父节点的脏标识传递给子节点，然后看看是否需要重新计算它的世界变换。

这里结果正是我们需要的： 改变节点的自身变换只是一些声明，渲染世界时只计算从上一帧以来所需的最小数量的世界变换。

注意这个技巧能有用是因为`render()`是`GraphNode`中*唯*一需要最新世界变换的。 如果其他东西也要获取，我们就得做点不同的事。

设计决策

这种模式非常具体，所以只需注意几点：

什么时候清空脏标识?

- **当结果被请求时?**
  - *如果不需要结果，可以完全避免计算。* 如果原始数据变化的速度比推导数据获取的速度快得多，这效果很明显。
  - *如果计算消耗大量时间，这会造成可察觉的卡顿。* 将工作推迟到玩家想要结果的时候会严重影响游戏体验。 这部分工作一般足够快，不会构成问题，但是如果构成问题，你就需要提前做这些工作。
- **在精心设计的检查点处：**

  有时候，某个时间点或在游戏过程中很自然的需要推迟处理。 例如，只有海盗船驶入港口才会去保存游戏。 如果同步点不是游戏的机制，我们会将这些工作隐藏在加载画面或者过场动画之后。
  - *这种工作不会影响到玩家体验。* 不像前一个选项，游戏在紧张运行时，你总能转移玩家的注意力。
  - *在工作时丧失了控制权。* 这和前一个选项相反。你在处理时能进行微观控制，确保有效优雅地处理它。

    你*不能*保证玩家真的到了检查点或者满足了定义的条件。 如果他们在游戏中迷失了，或者游戏进入了奇怪的状态，最终工作会推迟得超乎预料的晚。

- *在后台处理：*

  通常情况下，你为第一次更改时启动固定时长的计时器，然后在计时器到时间后处理之间的所有变化。

  在人机交互界，用术语*hysteresis*描述程序接受用户的输入和响应之间的故意延迟。

  - *可以控制工作进行的频率。* 通过调节计时器，可以保证它发生的像预期一样频繁（或者不频繁）。
  - *更多的冗余工作。* 如果原始状态在计时器运行之间只改变了很少的部分，最终大部分处理的都是没有改变的数据。
  - *需要支持异步工作。* 在“后台”处理数据意味着玩家可以同时继续做事。 这就意味着你将会需要线程或者其他并行支持，这样游戏在处理数据的同时仍然可以继续游玩。

    由于玩家很可能与处理中的状态交互，你也需要考虑保持并行修改的安全性。

脏追踪的粒度有多细?

假设我们的海盗游戏允许玩家建造并个性化自己的船。 船在线时会自动保存，这样玩家可以离线后恢复。 我们使用脏标识记录船的哪块甲板被修改了并需要发送到服务器。 每一块发送给服务器的数据都包括了修改的数据和一些描述改动发生在何处的元数据。

- **如果粒度更细：**

  假设你为甲板上的每个小木板都拍上一个脏标识。

  - *你只需处理真正改变的数据。* 你只将船上修改了的数据发送到服务器。

- **如果粒度更粗：**

  或者，我们可以为每层甲板关联一个脏标识。改变它上面的任何东西都会让整个甲板变脏。

  我可以说些这里不合时宜的糟糕笑话，但我克制住了。

  - *最终需要处理没有变化的数据。* 在甲板上添加一个桶，就要将整层甲板发送到服务器。
  - *用在存储脏标识上的内存更少。* 为甲板上添加十个桶只需要一位来追踪。
  - *固定开销花费的时间更少。* 当处理某些修改后的数据时，通常处理数据之前有些固定的工作要做。 在这个例子中，是确认船上改动在哪里的元数据。 处理的块越大，那么要处理的数量就越少，这就意味着有更小的开销。

参见

- 在游戏之外，这个模式在像Angular的浏览器方向框架中是很常见的。 它们使用脏标识来追踪哪个数据在浏览器中被改变了，需要将其推向服务器。
- 物理引擎追踪哪些对象在运动中哪些在休息。 由于休息的骨骼直到有力施加在上面才会移动，在被碰到时才会需要处理。“正在移动”就是一个脏标识，标注哪个对象上面有力施加并需要物理解析。

对象池模式

游戏设计模式Optimization Patterns

意图

放弃单独地分配和释放对象，从固定的池子中重用对象，以提高性能和内存使用率

动机

我们在处理游戏的视觉效果。 当英雄释放了法术，我们想要在屏幕上爆发闪光。 这需要调用*粒子系统*，产生动态的闪烁图形，显示动画直到图形消失。

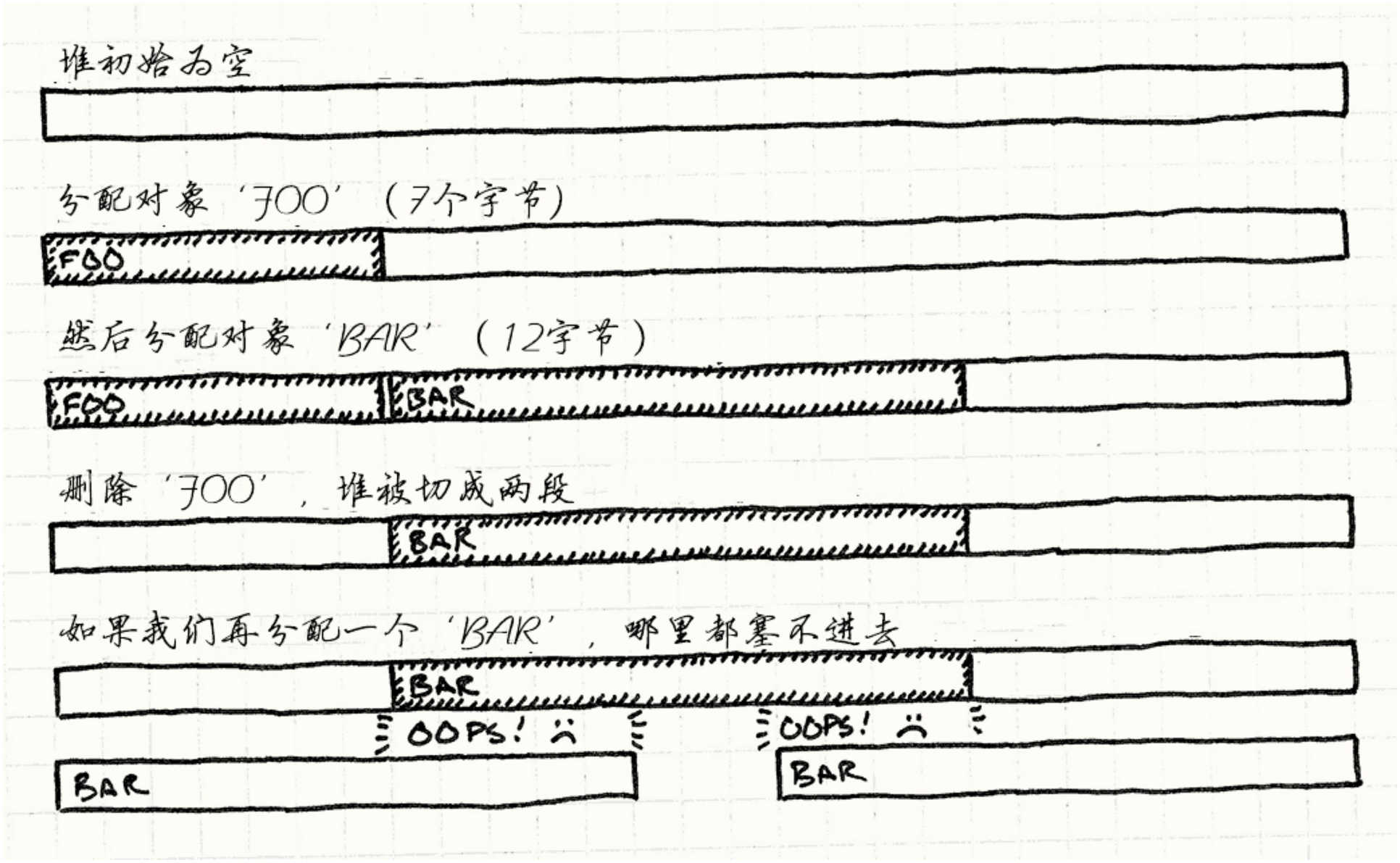
由于一次简单的魔杖挥舞就能产生成百上千的粒子，系统需要能够快速生成它们。 更重要的是，我们需要保证创建和销毁这些粒子不会造成*内存碎片*。

碎片的诅咒

为游戏主机或者移动设备编程在许多方面比为普通的计算机编程更像是嵌入式编程。 内存紧张，玩家希望游戏能如岩石般稳定运行，压缩内存的管理器很难有效。 在这种环境下，内存碎片是致命的。

碎片意味着在堆中的空余空间被打碎成了很多小的内存碎片，而不是大的连续内存块。 *总共的* 可用内存也许很大，但是最长的*连续*空间可能难以忍受的小。 假设我们有十四个空余字节，但是被一块正在使用的内存分割成了两个七字节的碎片。 而我们尝试分配十二字节的对象，那么就会失败。屏幕上不会有更多的闪烁火花了。

这有点像在已经停了很多车的繁忙街道上停车。 如果它们挤在一起，那就有地方停，但空闲地带变成了车之间的*碎片*空间。



这里展现了堆是怎么碎片化的，以及即使在理论上有足够的可用内存，内存也会分配失败。

哪怕碎片化发生得不频繁，它也仍会逐渐把堆变成了有空洞和裂隙的不可用泡沫，最终完全无法运行游戏。

大多数主机游戏制作商要求游戏通过“浸泡测试”，即让游戏在demo模式运行上几天。 如果游戏崩溃了，他们不允许游戏发售。 浸泡测试失败有时是因为发生罕见的漏洞，但碎片增长或者内存泄露是造成游戏停止的大部分原因。

兼得鱼和熊掌

由于碎片化和可能很慢的内存分配，游戏中何时何处管理内存通常需要十分小心。 一个简单又有效的办法是——游戏开始时取一大块内存，然后直到游戏结束才去释放它。 但是这对要在游戏运行时创建和销毁事物的系统是痛苦的。

使用对象池能让我们兼得鱼和熊掌。 对内存管理器，我们只需要将一大块内存分出来，保持在游戏运行时不释放它。 对于池的使用者，我们可以简单的构造析构我们想要的内容对象。

模式

定义一个**池**对象，其包含了一组**可重用对象***。 **其中每个可重用对象都支持**查询“使用中”状态**，说明它是不是“正在使用”。 池被初始化时，它就创建了整个对象集合（通常使用一次连续的分配），然后初始化所有对象到“不在使用中”状态。

当你需要新对象，向池子要一个。 它找到一个可用对象，初始化为“使用中”然后返回。 当对象不再被需要，它被设置回“不在使用中”。 通过这种方式，可以轻易的创建和销毁对象而不必分配内存或其他资源。

何时使用

这个模式广泛应用于可见的事物上，比如游戏实体和视觉效果， 但是它也可在不那么视觉化的数据结构上使用，比如正在播放的声音。 在以下情况中使用对象池：

- 需要频繁创建和销毁对象。
- 对象大小相仿。
- 在堆上进行对象内存分配十分缓慢或者会导致内存碎片。
- 每个对象都封装了像数据库或者网络连接这样很昂贵又可以重用的资源。

记住

你通常依赖垃圾回收机制或者`new`和`delete`来处理内存管理。 通过使用对象池，你是在说，“我知道如何更好地处理这些字节。”这就意味着处理内存的责任落到了你头上。

[池可能在不需要的对象上浪费内存]

对象池的大小需要根据游戏的需求设置。 当池子太小时，很明显需要调整（没有什么比崩溃更能获得你的注意力了）。 但是小心池子没有太大。更小的池子提供了空余的内存做其他有趣的事情。

同时只能激活固定数量的对象

在某种程度上这是好事。 将内存按不同的对象类型划分单独池子保证了这点。 举个例子，一连串爆炸不会让粒子系统消耗掉*所有*可用内存，然后阻碍创建新敌人这样的关键事件。

尽管如此，这也意味着试图从池子重用对象可能会失败，因为它们都在使用中。 这里有几个常见对策：

- *完全阻止这点。* 这是通常的“修复”：增加对象池的大小，这样无论用户做什么，它们都不会溢出。 对于重要对象，比如敌人或游戏道具，这通常是正确的选择。 也许没有“正确的”方法来处理玩家抵达关底时创建巨大Boss内存不足的问题，所以最聪明的办法就是保证这不发生。

  这个的副作用是强迫你为那些只在一两个罕见情况下需要的对象分配过多的内存。 因此，固定大小的对象池也许不对所有的游戏状态都适用。 举个例子，某些关卡也许需要更多的效果而其他的需要声音。 在这种情况下，考虑为每个场景调整对象池的大小。

- *就不要创建对象了。* 这听起来很糟，但是对于像粒子系统这样的情况很有道理。 如果所有的粒子都在使用，那么屏幕已经充满了闪动的图形。 用户不会注意到下个爆炸不如现在的这个一样引人注目。

- *强制干掉一个已有的对象。* 想想正在播放声音的内存池，假设需要播放新声音而对象池满了。 你*不想*简单地忽视新声音——用户会注意到魔法剑有时会发出戏剧般的声音，有时顽固的一声不吭。 更好的解决方法是找到播放中最轻的声音，然后用新声音替代之。 新声音会覆盖掉前一个声音。

  大体上，如果已有对象的*消失*要比新对象的*出现*更不引人察觉，这也许是正确的选择。

- *增加池的大小。* 如果游戏允许你使用一点内存上的灵活性，我们也许会在运行时增加池子的大小或者创建新的溢出池。 如果用这种方式获取内存，考虑下在增加的内存不再需要时，池子是否需要缩回原来的大小。

每个对象的内存大小是固定的

多数对象池将对象存储在一个数组中。 如果你所有的对象都是同样的类型，这很好。 但是，如果你想要在同一个对象池中存储不同类型的对象，或者存储子类的实例， 你需要保证池中的每个位置对*最大的*可能对象都有足够的内存。 否则，超过预期大小对象会占据下一个对象的内存空间，导致内存崩坏。

同时，如果对象大小是变化的，你是在浪费内存。 每个槽都需要能存储最大的对象。 如果对象很少那么大，每放进去一个小对象都是在浪费内存。 这很像是通过机场安检时，使用最大允许尺寸的箱子，而里面只放了钥匙和钱包。

当你发现在用这种方式浪费内存，思考将池根据对象的大小分割为分离的池子 ——大箱子给大行李，小箱子给口袋里东西。

这是一种实现有效率的内存管理的常用模式。 管理者拥有一系列池子，池子的块大小不相同。 当你申请分配一块，它会从合适块大小的池子中取出一块，然后分配给你。

重用对象不会自动清除。

很多内存管理系统拥有debug特性，会清除或释放所有内存成特定的值，比如`0xdeadbeef`。这帮助你找到使用未初始化变量或使用已被释放内存造成的痛苦漏洞。

由于对象池重用对象不再经过内存管理系统，我们失去了这层安全网。 更糟的是，为“新”对象使用的内存之前存储的是同样类型的对象。 这使你很难分辨出创建新对象时的未初始化问题： 那个存储新对象的内存已经保存了来自于上个生命周期中*几乎完全*正确的数据。

由于这点，特别注意在池里初始化对象的代码，保证它*完全*地初始化了对象。 甚至很值得加个在对象回收时清空对象槽的debug选项。

如果你将其清空为`0x1deadb0b`，我会很荣幸的。

未使用的对象会保留在内存中

对象池在支持垃圾回收的系统中很少见，因为内存管理系统通常会为你处理这些碎片。 但是对象池仍然是避免构建和析构的有用手段，特别是在有更慢CPU和更简陋垃圾回收系统的移动设备上。

如果你使用有垃圾回收的对象池系统，注意潜在的冲突。 由于池不会在对象不再使用时真正的析构它们，如果对象仍然保留任何对*其他*对象的引用，也会阻止垃圾回收器回收它。为了避免这点，当池中对象不再使用，清除它对其他对象的所有引用。

示例代码

现实世界的粒子系统通常应用重力，风，摩擦，和其他物理效果。 我们简陋的例子只在直线上特定帧移动粒子，然后销毁粒子。 这不是工业级的代码，但足够说明如何使用对象池。

我们应该从最简单的可能实现开始。首先是小小的粒子类：

```
class Particle
{
public:
  Particle()
  : framesLeft_(0)
  {}

  void init(double x, double y,
            double xVel, double yVel, int lifetime)
  {
    x_ = x; y_ = y;
    xVel_ = xVel; yVel_ = yVel;
    framesLeft_ = lifetime;
  }

  void animate()
  {
    if (!inUse()) return;

    framesLeft_--;
    x_ += xVel_;
    y_ += yVel_;
  }

  bool inUse() const { return framesLeft_ > 0; }

private:
  int framesLeft_;
  double x_, y_;
  double xVel_, yVel_;
};
```

默认的构造器将粒子初始化为“不在使用中”。之后对`init()`的调用初始化粒子到活跃状态。 粒子随着时间播放动画，一帧调用一次`animate()`函数。

对象池需要知道哪个粒子可以被重用。它通过粒子的`inUse()`函数获知这点。 这个函数利用了粒子生命时间有限这点，并使用变量`framesLeft_`来决定哪些粒子在被使用，无需存储分离的标识。

对象池类也很简单：

```
class ParticlePool
{
public:
  void create(double x, double y,
              double xVel, double yVel, int lifetime);

  void animate()
  {
    for (int i = 0; i < POOL_SIZE; i++)
    {
      particles_[i].animate();
    }
  }

private:
  static const int POOL_SIZE = 100;
  Particle particles_[POOL_SIZE];
};
```

`create()`函数允许外部代码创建新粒子。 游戏每帧调用`animate()`一次，让对象池中的粒子轮流显示动画。

`animate()`方法是更新方法模式的一个例子。

粒子本身被存储在对象池类中一个固定大小的数组里。 在这个简单的实现中，池的大小在类声明时被硬编码了，但是也可以使用动态大小的数组或使用由外部定义的模板变量。

创建新粒子很直观：

```
void ParticlePool::create(double x, double y,
                          double xVel, double yVel,
                          int lifetime)
{
  // 找到一个可用粒子
  for (int i = 0; i < POOL_SIZE; i++)
  {
    if (!particles_[i].inUse())
    {
      particles_[i].init(x, y, xVel, yVel, lifetime);
      return;
    }
  }
}
```

我们遍历对象池找到第一个可用粒子。 当我们找到后，初始化它然后就完成了。 注意在这个实现中，如果这里没有找到任何可用的粒子，就不创建新的粒子。

做一个简单粒子系统的所有东西都在这里了，当然，没有包含渲染粒子。 我们现在可以创建对象池然后使用它创建粒子。当时间到了，粒子会自动失效。

这足够承载一个游戏了，但是敏锐的读者也许会注意到创建新粒子（可能）需要遍历整个集合，直到找到一个空闲槽。 如果池子很大很满，这可能很慢。 让我们看看可以怎样改进这一点。

创建一个粒子的复杂度是$O(n)$，上过算法课的人都知道。

空闲列表

如果不想浪费时间在*查找*空闲粒子上，明显的解决方案是不要失去对它们的追踪。 我们可以存储指向每个未使用粒子的单独指针列表。 然后，当需要创建粒子时，我们从列表中移除第一个指针，然后重用它指向的粒子。

不幸的是，这回要我们管理一个和对象池同样大小的单独数组。 无论如何，在我们创建池时，*所有的*粒子都未被使用，所以列表初始会包含池中每个对象的指针。

如果*无需*牺牲任何内存就能修复性能问题那就好了。 方便的是，这里已经有可以借用的内存了——那些未使用粒子自身的内存。

当粒子未被使用时，它的大部分的状态都是无关紧要的。 它的位置和速度没有被使用。唯一需要的表示自身是否激活的状态。 在我们的例子中，那是`framesLeft_`成员。 其他的所有位都可以被重用。这里是改进后的粒子：

```
class Particle
{
public:
  // ...

  Particle* getNext() const { return state_.next; }
  void setNext(Particle* next) { state_.next = next; }

private:
  int framesLeft_;

  union
  {
    // 使用时的状态
    struct
    {
      double x, y;
      double xVel, yVel;
    } live;

    // 可重用时的状态
    Particle* next;
  } state_;
};
```

我们将除`framesLeft_`外的所有成员变量移到`live`结构中，而该结构存储在union`state_`中。 这个结构保存粒子在播放动画时的状态。 当粒子被重用时，union的其他部分，`next`成员被使用了。 它保留了一个指向这个粒子后面的可用粒子的指针。

Unions近些年不那么常见了，所以你可能不熟悉这些语法。 如果你在游戏团队中，你可能会遇见“内存大师”，当游戏遇到不可避免的内存耗尽问题时，他们就挺身而出。 问问他们关于unions的事。 他们知道所有有关union的事情，还有其他有趣的位压缩技巧。

我们可以使用这些指针构建链表，将池中每个未使用粒子都连在一起。 我们有可用粒子的列表，而且无需使用额外的内存。 我们使用了死亡粒子本身的内存来存储列表。

这种聪明的技术被称为*freelist*。 为了让其工作，我们需要保证指针正确的初始化，在粒子创建和销毁时好好被管理了。 并且，当然，我们要追踪列表的头指针：

```
class ParticlePool
{
  // ...
private:
  Particle* firstAvailable_;
};
```

当首次创建对象池时，*所有的*粒子都是可用的，所以空余列表应该贯穿整个对象池。对象池构造器设置了这些：

```
ParticlePool::ParticlePool()
{
  // 第一个可用的粒子
  firstAvailable_ = &particles_[0];

  // 每个粒子指向下一个
  for (int i = 0; i < POOL_SIZE - 1; i++)
  {
    particles_[i].setNext(&particles_[i + 1]);
  }

  // 最后一个终结的列表
  particles_[POOL_SIZE - 1].setNext(NULL);
}
```

现在为了创建新粒子，我们直接跳到首个可用的粒子：

O(1) 复杂度，孩子！这才叫编码！

```
void ParticlePool::create(double x, double y,
                          double xVel, double yVel,
                          int lifetime)
{
  // 保证池没有满
  assert(firstAvailable_ != NULL);

  // 将它从可用粒子列表中移除
  Particle* newParticle = firstAvailable_;
  firstAvailable_ = newParticle->getNext();

  newParticle->init(x, y, xVel, yVel, lifetime);
}
```

我们需要知道粒子何时死亡，这样可将其放回到空闲列表中， 所以我们将`animate()`改为在粒子不再活跃时返回`true`：

```
bool Particle::animate()
{
  if (!inUse()) return false;

  framesLeft_--;
  x_ += xVel_;
  y_ += yVel_;

  return framesLeft_ == 0;
}
```

当那发生时，简单地将其放回列表：

```
void ParticlePool::animate()
{
  for (int i = 0; i < POOL_SIZE; i++)
  {
    if (particles_[i].animate())
    {
      // 将粒子加到列表的前部
      particles_[i].setNext(firstAvailable_);
      firstAvailable_ = &particles_[i];
    }
  }
}
```

这样就成了，一个小对象池，拥有常量时间的构造和删除。

设计决策

如你所见，对象池最简单实现非常平凡：创建对象数组，在需要它们时重新初始化。 实际的代码很少会那么简单，这里还有很多方式让池更加的通用，安全，或容易管理。 在游戏中实现对象池时，你需要回答以下问题：

对象和池耦合吗?

第一个写对象池时需要思考的问题：是否对象本身需要知道它们在池子中。 大多数情况下它们需要，但是你不大可能写一个通用对象池类来保存任意对象。

- **如果对象与池耦合：**
  - *实现更简单。* 你可以在对象中简单地放个“在使用中”标识或者函数，就完成了。
  - *你可以保证对象只能被对象池创建。* 在C++中，做这事最简单的方法是让池对象是对象类的友类，将对象的构造器设为私有。

    ```
    class Particle
    {
      friend class ParticlePool;

    private:
      Particle()
      : inUse_(false)
      {}

      bool inUse_;
    };

    class ParticlePool
    {
      Particle pool_[100];
    };
    ```

    在类间保持这种关系来确保使用者无法创建对象池没有追踪的对象。
  - *你也许可以避免显式存储“使用中”的标识。* 很多对象已经保存了可以告诉外界它有没有在使用的状态。 举个例子，粒子的位置如果不在屏幕上，也许它就可以被重用。 如果对象类知道它在对象池中，那它可以提供一个`inUse()`来查询这个状态。 这省下了对象池存储“在使用中”标识的多余内存。

- **如果对象没有和对象池耦合：**
  - *可以保存多种类型的对象。* 这是最大的好处。通过解耦对象和对象池，你可以实现通用的、可重用的对象池类。
  - *必须在对象的外部追踪“使用中”状态。* 做这点最简单的方式是创建分离的位字段：

```
template <class TObject>
class GenericPool
{
private:
  static const int POOL_SIZE = 100;

  TObject pool_[POOL_SIZE];
  bool    inUse_[POOL_SIZE];
};
```

谁负责初始化重用对象?

为了重用一个已经存在的对象，它必须用新状态重新初始化。 这里的关键问题是你需要在对象池的内部还是外部重新初始化。

- **如果在对象池的内部重新初始化：**
  - *对象池可以完全封装管理对象。* 取决于对象需要的其他能力，你可以让它们完全处于池子的内部。 这保证了其外部代码不会引用到已重用的对象。
  - *对象池与对象是如何初始化的相绑定。* 池中对象也许提供了不同的初始化函数。 如果对象池控制了初始化，它的接口需要支持所有的初始化函数，然后转发给对象。

    ```
    class Particle
    {
      // 多种初始化方式……
      void init(double x, double y);
      void init(double x, double y, double angle);
      void init(double x, double y, double xVel, double yVel);
    };

    class ParticlePool
    {
    public:
      void create(double x, double y)
      {
        // 转发给粒子……
      }

      void create(double x, double y, double angle)
      {
        // 转发给粒子……
      }

      void create(double x, double y, double xVel, double yVel)
      {
        // 转发给粒子……
      }
    };
    ```

-

如果外部代码初始化对象：

- *对象池的接口更简单。* 无需提供覆盖每种对象初始化的多种函数，对象池只需要返回新对象的引用：

```
class Particle
{
public:
  // 多种初始化方法
  void init(double x, double y);
  void init(double x, double y, double angle);
  void init(double x, double y, double xVel, double yVel);
};

class ParticlePool
{
public:
  Particle* create()
  {
    // 返回可用粒子的引用……
  }
private:
  Particle pool_[100];
};
```

调用者可以使用对象暴露的任何方法进行初始化：

```
ParticlePool pool;

pool.create()->init(1, 2);
pool.create()->init(1, 2, 0.3);
pool.create()->init(1, 2, 3.3, 4.4);
```

- *外部代码需要处理无法创建新对象的失败。* 前面的例子假设`create()`总能成功地返回一个指向对象的指针。 但如果对象池已经满了，返回的会是`NULL`。安全起见，你需要在初始化之前检查这一点。

```
Particle* particle = pool.create();
if (particle != NULL) particle->init(1, 2);
```

参见

- 这看上去很像是享元模式。 两者都控制了一系列可重用的对象。不同在于“重用”的含义。 享元对象分享实例间*同时*拥有的相同部分。享元模式在不同上下文中使用相同对象避免了*重复*内存使用。

  对象池中的对象也被重用了，但是是在不同的时间点上被重用的。“重用”在对象池中意味着对象在原先的对象用完*之后*分配内存。 对象池没有期待对象会在它的生命周期中分享什么。

- 将内存中同样类型的对象进行整合，能确保在遍历对象时CPU缓存总是满的。 数据局部性模式介绍了这一点。

空间分区

游戏设计模式Optimization Patterns

意图

将对象根据它们的位置存储在数据结构中，来高效地定位对象。

动机

游戏让我们能拜访其他世界，但这些世界通常和我们的世界没有太多不同。 它们通常有和我们宇宙同样的基础物理和可理解性。 这就是我们为什么会认为这些由比特和像素构建的东西是真实的。

我们这里注意的虚拟事实是*位置*。游戏世界有*空间*感，对象都在空间的某处。 它用很多种方式证明了这点。最明显的是物理——对象移动，碰撞，交互——但是还有其他方式。 音频引擎也许会考虑声源和玩家的距离，越远的声音响声越小。 在线交流也许局限在较近的玩家之间。

这意味着游戏引擎通常需要回答这个问题，“哪些对象在这个位置周围？”如果每帧都需要回答这个问题，这就会变成性能瓶颈。

在战场上的单位

假设我们在做实时战略游戏。双方成百上千的单位在战场上撞在一起。 战士需要挥舞刀锋向最近的那个敌人砍去。 最简单的处理方法是检查每对单位，然后看看它们互相之间的距离：

```
void handleMelee(Unit* units[], int numUnits)
{
  for (int a = 0; a < numUnits - 1; a++)
  {
    for (int b = a + 1; b < numUnits; b++)
    {
      if (units[a]->position() == units[b]->position())
      {
        handleAttack(units[a], units[b]);
      }
    }
  }
}
```

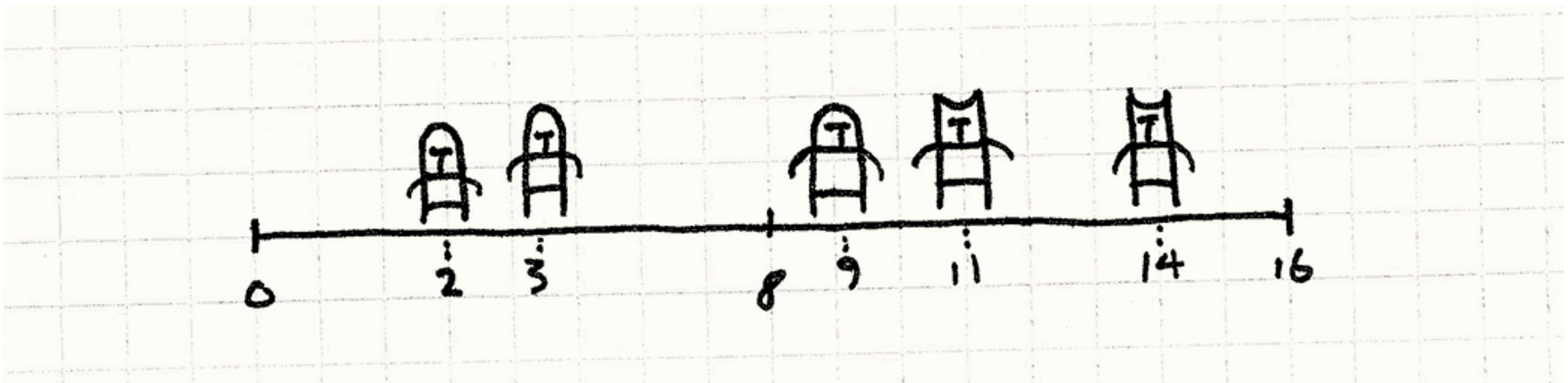
这里使用的是双重循环，每个循环都会遍历战场上的所有单位。 这就是意味着每帧进行的检测对数会随着单位数量的*平方*增长。 每个附加单位都需要和之前*所有*单位的进行检查。 如果有大量单位，这就完全失控了。

内层循环实际没有遍历所有的单位。 它只遍历那些外部循环还没有拜访的对象。 这避免了比较一对单位*两次*：A与B一次，B与A一次。 如果我们已经处理了A和B之间的碰撞，我们不必为B和A再做一次。

用大O术语，这还是$O(n^2)$的。

描绘战线

我们这里碰到的问题是没有指明数组中潜藏的对象顺序。 为了在某个位置附近找到单位，我们需要遍历整个数组。 现在，我们简化一下游戏。 不使用二维的战*场*，想象这是个一维的战*线*。



在这种情况下，我们可以通过根据单位在战线上的位置*排序*数组元素来简化问题。 一旦我们那样做，我们可以使用像二分查找之类的东西找到最近的对象而不必扫描整个数组。

二分查找有$O(\log n)$的复杂度，意味着找所有战斗单位的复杂度从$O(n^2)$降到$O(n \log n)$。 像pigeonhole sort可将其降至$O(n)$。

这里的经验很明显：如果我们根据位置存储对象在数据结构中，就可以更快的找到它们。这个模式便是将这个思路应用到多维空间上。

模式

对于一系列**对象**，每个对象都有**空间上的位置**。 将它们存储在根据位置组织对象的**空间数据结构**中，让你**有效查询在某处或者某处附近的对象**。 当对象的位置改变时，**更新空间数据结构**，这样它可以继续找到对象。

何时使用

这是存储活跃的，移动的游戏对象的常用模式，也可用于静态美术和世界地理。 复杂的游戏中，不同的内容有不同的空间分区。

这个模式的基本要求是一系列有位置的对象，而你做了太多的通过位置寻找对象的查询，导致性能下降。

记住

空间分区的存在是为了将$O(n)$或者$O(n^2)$的操作降到更加可控的数量级。 你拥有的对象*越多*，这就越重要。相反的，如果n足够小，也许不需要担心这个。

由于这个模式需要通过位置组织对象，可以*改变*位置的对象更难处理。 你需要重新组织数据结构来追踪在新位置的对象，这添加了更多的复杂性*并*消耗CPU循环。 保证这种交易是值得的。

想象一下哈希表，其中对象的键可以自动改变，那你就知道为什么这难以处理。

空间分区也会因为记录划分的数据结构而使用额外的内存。 就像很多优化一样，它用内存换速度。如果内存比时钟周期更短缺，这回是个错误的选择。

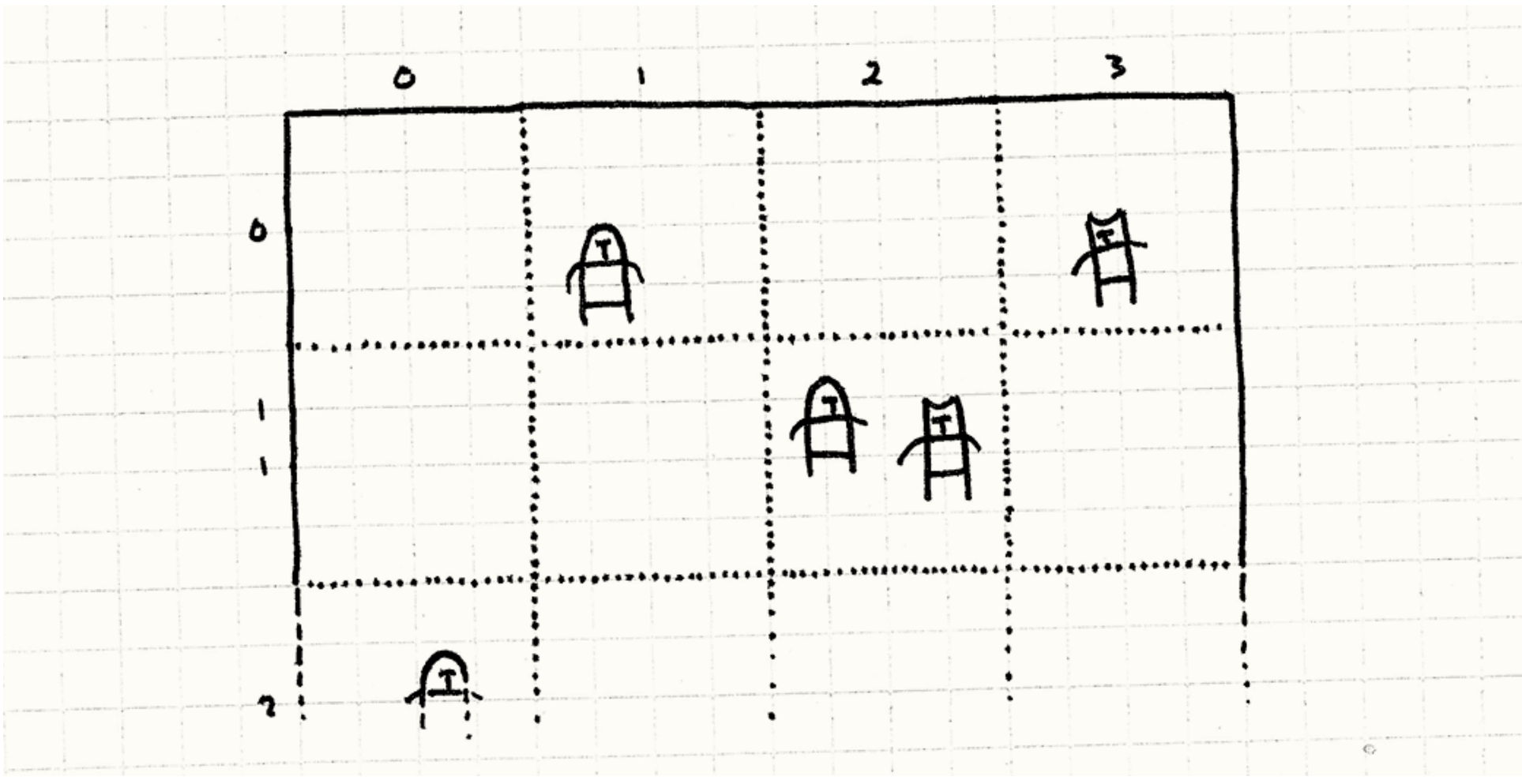
示例代码

模式总会*变化*——每种实现都略有不同，空间分区也不例外。 不像其他的模式，它的每种变化都很好地被记录下来了。 学术界发表文章证明各种变化各自的性能优势。 由于我只关注模式背后的观念，我会给你展示最简单的空间分区：*固定网格*。

看看本章的最后一节，那里有游戏中常用的空间分区方法列表。

一张网格纸

想象整个战场。现在，叠加一张方格大小固定的网格在上面，就好像一张网格纸。 不是在单独的数组中存储我们的对象，我们将它们存到网格的格子中。 每个格子存储一组单位，它们的位置在格子的边界内部。



当我们处理战斗时，我们只需考虑在同一格子中的单位。 不是将每个游戏中的单位与其他所有单位比较，我们将战场*划分*为多个小战场，每个格子中的单位都较少。

一网格相邻单位

好了，让我们编码把。首先，一些准备工作。这是我们的基础`Unit`类。

```
class Unit
{
  friend class Grid;

public:
  Unit(Grid* grid, double x, double y)
  : grid_(grid),
    x_(x),
    y_(y)
  {}

  void move(double x, double y);

private:
  double x_, y_;
  Grid* grid_;
};
```

每个单位都有位置（2D表示），以及一个指针指向它存在的`Grid`。 我们让`Grid`成为一个`friend`类， 因为，就像将要看到的，当单位的位置改变时，它需要和网格做复杂的交互，以确保所有事情都正确的更新了。

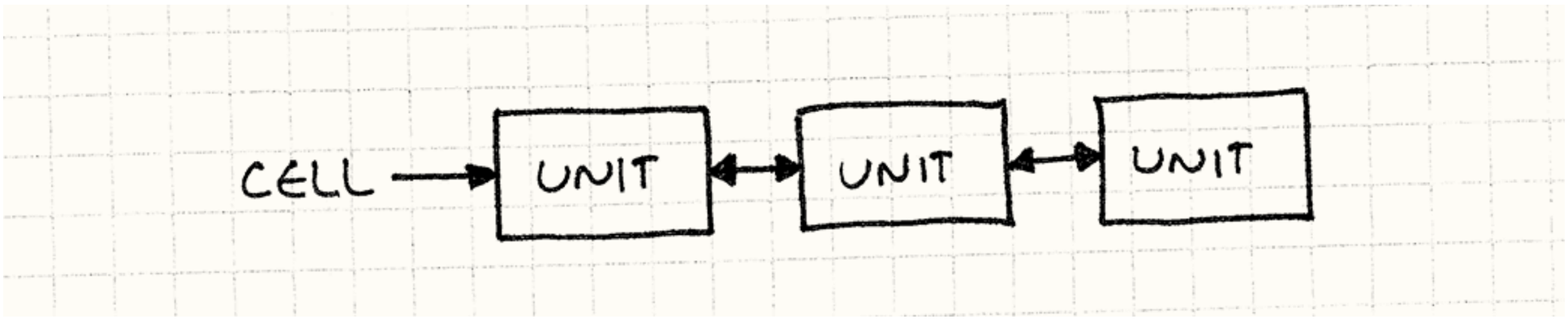
这里是网格的表示：

```
class Grid
{
public:
  Grid()
  {
    // 清空网格
    for (int x = 0; x < NUM_CELLS; x++)
    {
      for (int y = 0; y < NUM_CELLS; y++)
      {
        cells_[x][y] = NULL;
      }
    }
  }

  static const int NUM_CELLS = 10;
  static const int CELL_SIZE = 20;
private:
  Unit* cells_[NUM_CELLS][NUM_CELLS];
};
```

注意每个格子都是一个指向单位的指针。 下面我们扩展`Unit`，增加`next`和`prev`指针：

```
class Unit
{
  // 之前的代码……
private:
  Unit* prev_;
  Unit* next_;
};
```

这让我们将对象组织为双向链表，而不是数组。



每个网格中的指针都指向网格中的元素列表的第一个， 每个对象都有个指针指向它前面的对象，以及另一个指针指向它后面的对象。 我们很快会知道为什么要这么做。

在这本书中，我避免使用任何C++标准库内建的集合类型。 我想让理解例子的所需知识越小越好，然后，就像魔术师的“我的袖子里什么也没有”， 我想明晰代码中*确实*在发生什么。 细节很重要，特别是那些与性能相关的模式。

但这是我*解释*模式的方式。 如果你在真实代码中*使用*它们，使用内建在几乎每种程序语言集合避免麻烦。 人生苦短，不要浪费在编写链表上。

进入战场

我们需要做的第一件事就是保证新单位创建时被放置到了网格中。 我们让`Unit`在它的构造函数中处理这个：

```
Unit::Unit(Grid* grid, double x, double y)
: grid_(grid),
  x_(x),
  y_(y),
  prev_(NULL),
  next_(NULL)
{
  grid_->add(this);
}
```

`add()`方法像这样定义：

```
void Grid::add(Unit* unit)
{
  // 检测它在哪个网格中
  int cellX = (int)(unit->x_ / Grid::CELL_SIZE);
  int cellY = (int)(unit->y_ / Grid::CELL_SIZE);

  // 加到网格的对象列表前段
  unit->prev_ = NULL;
  unit->next_ = cells_[cellX][cellY];
  cells_[cellX][cellY] = unit;

  if (unit->next_ != NULL)
  {
    unit->next_->prev_ = unit;
  }
}
```

世界坐标除以网格大小转换到了网格空间。 然后，缩短为`int`消去了分数部分，这样可以获得网格索引。

除了链表带来的繁琐，基本思路是非常简单的。 我们找到单位所在的网格，然后将它添加到列表前部。 如果那已经存在有列表单位了，我们把新单位链接到旧单位的后面。

刀剑碰撞

一旦所有的单位都放入网格中，我们可以让它们开始互相交互。 使用这个新网格，处理战斗的主要方法看上去是这样的：

```
void Grid::handleMelee()
{
  for (int x = 0; x < NUM_CELLS; x++)
  {
    for (int y = 0; y < NUM_CELLS; y++)
    {
      handleCell(cells_[x][y]);
    }
  }
}
```

它在每个网格它上面遍历并调用`handleCell()`。 就像你看到的那样，我们真的已经将战场分割为分离的小冲突。 每个网格之后像这样处理它的战斗：

```
void Grid::handleCell(Unit* unit)
{
  while (unit != NULL)
  {
    Unit* other = unit->next_;
    while (other != NULL)
    {
      if (unit->x_ == other->x_ &&
          unit->y_ == other->y_)
      {
        handleAttack(unit, other);
      }
      other = other->next_;
    }

    unit = unit->next_;
  }
}
```

除了遍历链表的指针把戏，注意它和我们原先处理战斗的原始方法完全一样。 它对比每对单位，看看它们是否在同一位置。

不同之处是，我们不必再互相比较战场上*所有的*单位——只与那些近在一个格子中的相比较。 这就是优化的核心。

简单分析一下，似乎我们让性能*更糟*了。 我们从对单位的双重循环变成了对格子内单位的*三重*循环。 这里的技巧是内部循环现在只在很少的单位上运行，这足够抵消在格子上的外部循环的代价。

但是，这依赖于我们格子的粒度。如果它们太小，外部循环确实会造成影响。

冲锋陷阵

我们解决了性能问题，但同时创建了新问题。 单位现在陷在它的格子中。 如果将单位移出了包含它的格子，格子中的单位就再也看不到它了，但其他单位也看不到它。 我们的战场有点*过度*划分了。

为了解决这点，需要每次单位移动时都做些工作。 如果它跨越了格子的边界，我们需要将它从原来的格子中删除，添加到新的格子中。 首先，我们给`Unit`添加一个改变位置的方法：

```
void Unit::move(double x, double y)
{
  grid_->move(this, x, y);
}
```

显而易见，AI代码可以调用它来控制电脑的单位，玩家也可以输入代码调用它来控制玩家的单位。 它做的只是交换格子的控制权，之后：

```
void Grid::move(Unit* unit, double x, double y)
{
  // 看看它现在在哪个网格中
  int oldCellX = (int)(unit->x_ / Grid::CELL_SIZE);
  int oldCellY = (int)(unit->y_ / Grid::CELL_SIZE);

  // 看看它移动向哪个网格
  int cellX = (int)(x / Grid::CELL_SIZE);
  int cellY = (int)(y / Grid::CELL_SIZE);

  unit->x_ = x;
  unit->y_ = y;

  // 如果它没有改变网格，就到此为止
  if (oldCellX == cellX && oldCellY == cellY) return;

  // 将它从老网格的列表中移除
  if (unit->prev_ != NULL)
  {
    unit->prev_->next_ = unit->next_;
  }

  if (unit->next_ != NULL)
  {
    unit->next_->prev_ = unit->prev_;
  }

  // 如果它是列表的头，移除它
  if (cells_[oldCellX][oldCellY] == unit)
  {
    cells_[oldCellX][oldCellY] = unit->next_;
  }

  // 加到新网格的对象列表末尾
  add(unit);
}
```

这块代码很长但也很直观。 第一步检查我们是否穿越了格子的边界。 如果没有，需要做的事情就是更新单位的位置，搞定。

如果单位*已经*离开了现在的格子，我们从格子的链表中移除它，然后再添加到网格中。 就像添加一个新单位，它会插入新格子的链表中。

这就是为什么我们使用双向链表——我们可以通过设置一些指针飞快地添加和删除单位。 每帧都有很多单位移动时，这就很重要了。

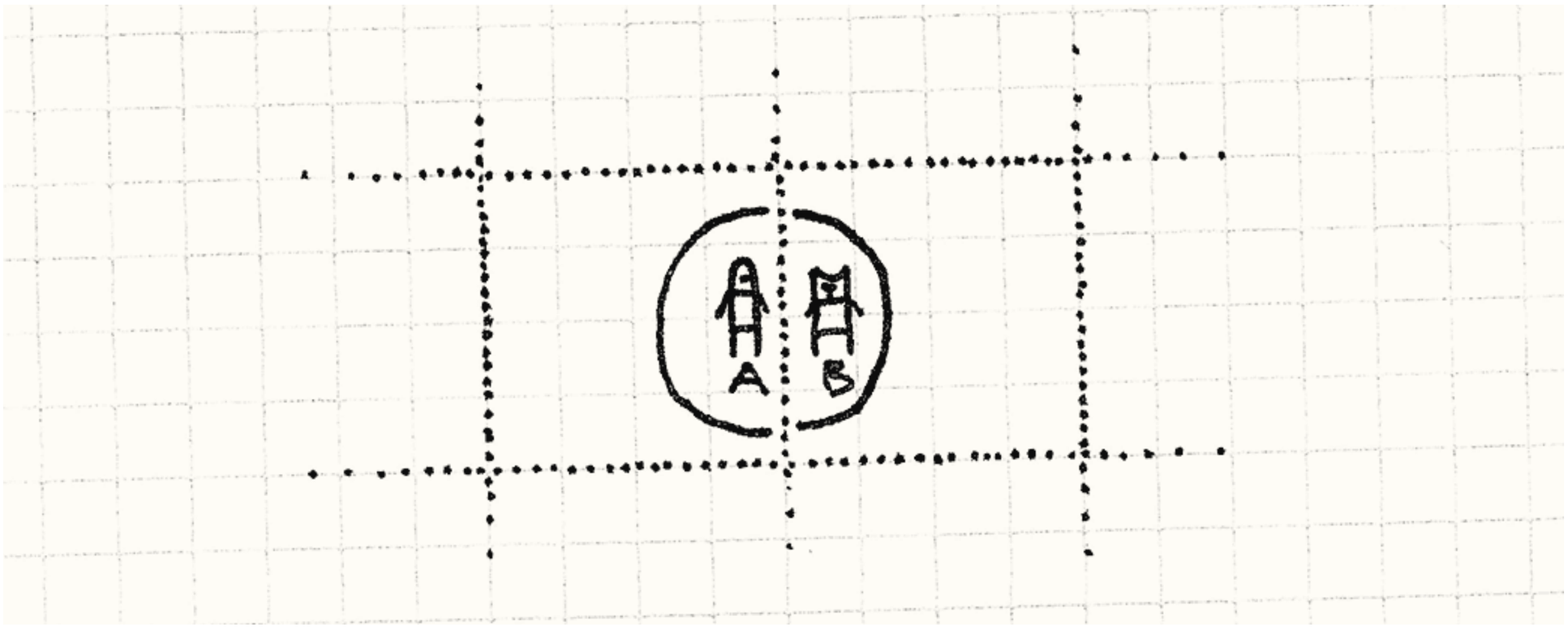
短兵相接

这看起来很简单，但我们某种程度上作弊了。 在我展示的例子中，单位在它们有*完全相同的*位置时才进行交互。 西洋棋和国际象棋中这是真的，但是对于更加实际的游戏就不那么准确了。 它们通常需要将攻击*距离*引入考虑。

这个模式仍然可以好好工作，与检查位置匹配不同，我们这样做：

```
if (distance(unit, other) < ATTACK_DISTANCE)
{
  handleAttack(unit, other);
}
```

当范围被牵扯进来，需要考虑一个边界情况： 在不同网格的单位也许仍然足够接近，可以相互交互。



这里，B在A的攻击半径内，即使中心点在不同的网格。 为了处理这种情况，我们不仅需要比较同一网格的单位，同时需要比较邻近网格的对象。 为了达到这点，首先我们让内层循环摆脱`handleCell()`：

```
void Grid::handleUnit(Unit* unit, Unit* other)
{
  while (other != NULL)
  {
    if (distance(unit, other) < ATTACK_DISTANCE)
    {
      handleAttack(unit, other);
    }

    other = other->next_;
  }
}
```

现在有函数接受一个单位和一列表的其他单位看看有没有碰撞。 让`handleCell()`使这个函数：

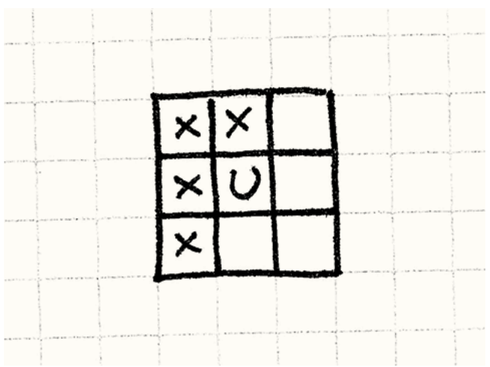
```
void Grid::handleCell(int x, int y)
{
  Unit* unit = cells_[x][y];
  while (unit != NULL)
  {
    // 处理同一网格中的其他单位
    handleUnit(unit, unit->next_);

    unit = unit->next_;
  }
}
```

注意我们同样传入了网格的坐标，而不仅仅是对象列表。 现在，这也许和前面的例子没有什么区别，但是我们会稍微扩展一下：

```
void Grid::handleCell(int x, int y)
{
  Unit* unit = cells_[x][y];
  while (unit != NULL)
  {
    // 处理同一网格中的其他单位
    handleUnit(unit, unit->next_);

    // 同样检测近邻网格
    if (x > 0 && y > 0) handleUnit(unit, cells_[x - 1][y - 1]);
    if (x > 0) handleUnit(unit, cells_[x - 1][y]);
    if (y > 0) handleUnit(unit, cells_[x][y - 1]);
    if (x > 0 && y < NUM_CELLS - 1)
    {
      handleUnit(unit, cells_[x - 1][y + 1]);
    }

    unit = unit->next_;
  }
}
```

这些新增`handleCell()`调用在八个邻近格子中的四个格子中寻找这个单位是否与它们有任何对抗。 如果任何邻近格子的单位离边缘近到单位的攻击半径内，就找到碰撞了。

有单位的格子是`U`，它查找的邻近格子是`X`。



我们只查询*一半*的近邻格子，这原因和之前是一样的：内层循环从当前单位*之后*的单位开始——避免每对单位比较两次。 考虑如果我们检查全部八个近邻格子会发生什么。

假设我们有两个在邻近格子的单位近到可以互相攻击，就像前一个例子。 这是我们检查全部8个格子会发生的事情：

1. 当找谁打了A时，我们检查它的右边找到了B。所以记录一次A和B之间的攻击。
2. 当找谁打了B时，我们检查它的*左边*找到了A。所以记录*第二次*A和B之间的攻击。

只检查一半的近邻格子修复了这点。检查*哪*一半倒无关紧要。

我们还需要考虑另外的边界情况。 这里，我们假设最大攻击距离小于一个格子。 如果我们有较小的小格子和较长的攻击距离，我们也许需要扫描几行外的近邻格子。

设计决策

空间划分的优秀数据结构相对较少，可以一一列举进行介绍。 但是，我试图根据它们的本质特性来组织。 我期望当你学习四叉树和二分空间查找（BSPs）之类的时， 可以帮助你理解它们是*如何*工作，*为什么* 工作，以帮你选择。

划分是层次的还是平面的?

我们的网格例子将空间划分成平面格子的集合。 相反，层次空间划分将空间分成几个区域。 然后，如果其中一个区域还包含多个对象，再划分它。 这个过程递归进行，直到每个区域都有少于最大数量的对象在其中。

它们通常分为2,4,8块——程序员很熟悉这些数值。

- **如果是平面划分：**
    - *更简单。* 平面数据结构更容易想到也更容易实现。

      我在每章中都提到了这个设计要点，这是有理由的。尽可能使用简单的选项。 大多数软件工程都是与复杂度做斗争。
    - *内存使用量确定。* 由于添加新对象不需要添加新划分，空间分区的内存使用量通常在之前就可以确定。
    - *在对象改变位置时更新的更快。* 当对象移动，数据结构需要更新，找到它的新位置。使用层次空间分区，可能需要在多层间调整层次结构。
- **如果是层次性的：**
    - *能更有效率的处理空的区域。* 考虑之前的例子，如果战场的一边是空的。 我们需要分配一堆空白格子，这些格子浪费内存，每帧还要遍历它们。

      由于层次空间分区不再分割空区域，大的空区域保存在单个划分上。不需要遍历很多小空间，那里只有一个大的。
    - *它处理密集空间更有效率。* 这是硬币的另一面：如果你有一堆对象堆在一起，无层次的划分很没有效率。 你最终将所有对象都划分到了一起，就跟没有划分一样。 层次空间分区会自适应地划成小块，让你同时只需考虑少数对象。

划分依赖于对象集合吗?

在示例代码中，网格空间大小事先被固定了，我们在格子里追踪单位。 另外的划分策略是自适应的——它们根据现有的对象集合在世界中的位置划分边界。

目标是*均匀地*划分，每个区域拥有相同的单位数量，以获得最好性能。 考虑网格的例子，如果所有的单位都挤在战场的一个角落里。 它们都会在同一格子中，找寻单位间攻击的代码退化为原来的$O(n^2)$问题。

- **如果划分与对象无关：**
  - *对象可以增量添加。* 添加对象意味着找到正确的划分然后放入，这点可以一次性完成，没有任何性能问题。
  - *对象移动的更快。* 通过固定的划分，移动单位意味着从格子移除然后添加到另一个。如果划分它们的边界跟着集合而改变，那么移动对象会引起边界移动，导致很多其他对象也要移到其他划分。

    这可与如红黑树或AVL树这样的二叉搜索树相类比： 当你添加事物时，你也许最终需要重排树，并重排一堆节点。
  - *划分也许不均匀。* 当然，固定的缺点就是对划分缺少控制。如果对象挤在一起，你就在空区域上浪费了内存，这会造成更糟的性能。
- **如果划分适应对象集合：**

  像BSPs和k-d树这样的空间划分切分世界，让每部分都包含接近相同数目的对象。 为了做到这点，划分边界时，你需要计算每边各有多少对象。 层次包围盒是另外一种为特定集合对象优化的空间分区。
  - *你可以保证划分是平衡的。* 这不仅提供了优良的性能表现，还提供了*稳定*的性能表现： 如果每个区域的对象数量保持一致，你可以保证游戏世界中的所有查询都会消耗同样的时间。 一旦你需要固定帧率，这种一致性也许比性能本身更重要。
  - *一次性划分一组对象更加有效率。* 当对象*集合*影响了边界的位置，最好在划分前都出现所有对象。 这就是为什么美术和地理更多的使用这种划分。
- **如果划分与对象无关，但*层次*与对象相关：**

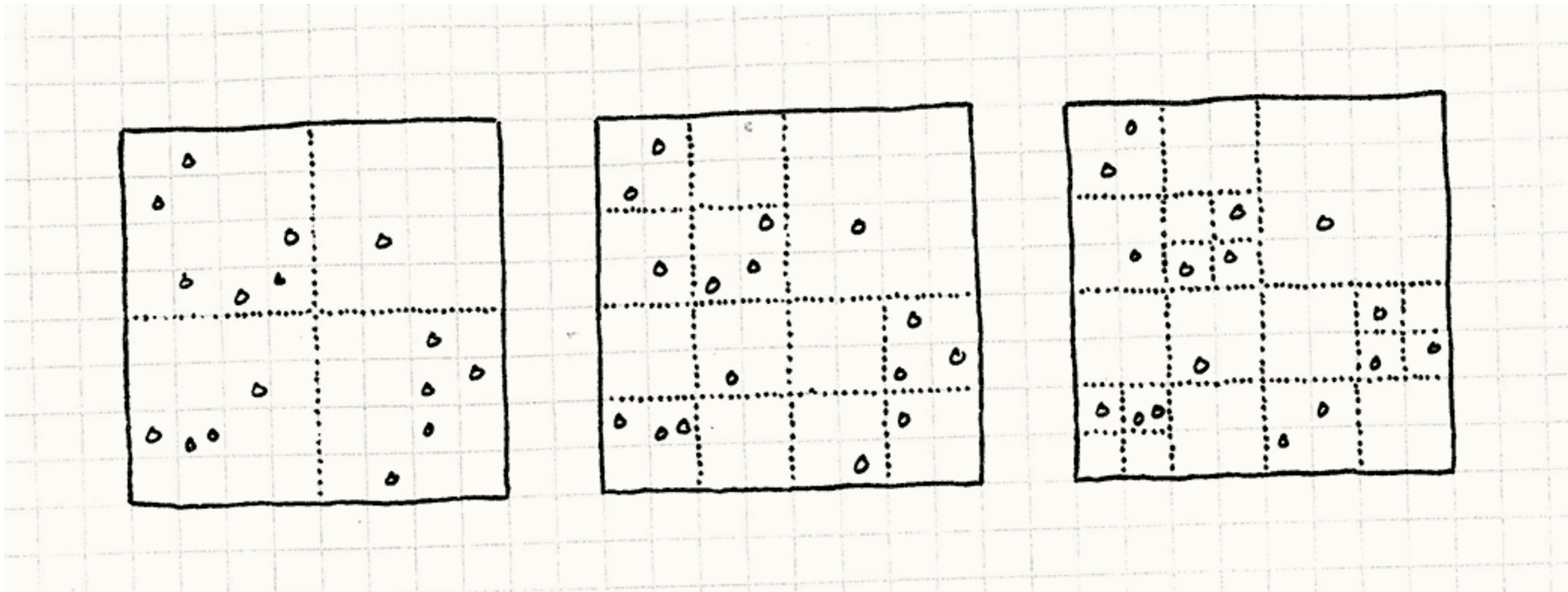
  有一种空间分区需要特殊注意，因为它拥有固定分区和适应分区两者的优点：四叉树。

  四叉树划分二维空间。它的三维实现是*八叉树*，获取“空间”，分割为8个*正方体*。 除了有额外的维度，它和平面划分一样工作。

  四叉树开始时将整个空间视为单一的划分。 如果空间中对象数目超过了临界值，它将其切为四小块。 这些块的*边界*是确定的：它们总是将空间一切为二。

然后，对于四个区域中的每一个，我们递归地做相同的事情，直到每个区域都有较少数目的对象在其中。 由于我们递归地分割有较多对象的区域，这种划分适应了对象集合，但是划分本身没有*移动*。

你可以从这里从左向右看到分区的过程：



- *对象可以增量增加。* 添加新对象意味着找到并添加到正确的区域。 如果区域中的对象数目超过了最大限度，就划分区域。 区域中的其他对象也划分到新的小区域中。这需要一些小小的工作，但是工作总量是*固定的*： 你需要移动的对象数目总是少于数目临界值。添加对象从来不会引发超过一次划分。

  删除对象也同样简单。 你从它的格子中移除对象，如果它的父格子中的计数少于临界值，你可以合并这些子分区。

- *移动对象很快。* 当然，如上所述，“移动”对象只是添加和移除，两者在四叉树中都很快。

- *分区是平衡的。* 由于任何给定的区域的对象数目都少于最大的对象数量，哪怕对象都堆在一起，你也不会有包含太多对象的分区。

对象只存储在分区中吗?

你可将空间分区作为在游戏中对象存储的*唯*一地方，或者将其作为更快查找的二级缓存，使用另一个集合包含对象。

- **如果它是对象唯一存储的地方：**
    - *这避免了内存开销和两个集合带来的复杂度。* 当然，存储对象一遍总比存两遍来的轻松。 同样，如果你有两个集合，你需要保证它们同步。 每当添加或删除对象，都得从两者中添加或删除对象。
- **如果其他集合保存对象：**
    - *遍历所有的对象更快。* 如果所有对象都是“活的”，而且它们需要做些处理，也许会发现你需要频繁拜访每个对象而并不在乎它的位置。 想想看，早先的例子中，大多数格子都是空的。访问那些空的格子是对时间的浪费。

      存储对象的第二集合给了你直接遍历对象的方法。 你有两个数据结构，每种为各种的用况优化。

参见

- 在这里，我试图不讨论特定的空间分区结构细节来保证这章的高层概况性（而且节约篇幅！），但你的下一步应该是学习一下常见的结构。尽管名字很恐怖，它们都令人惊讶的直观。常见的有：
    - Grid
    - Quadtree
    - BSP
    - k-d tree
    - Bounding volume hierarchy
- 每种空间分区数据结构基本上都是将一维数据结构扩展成更高维度的数据结构。 知道它的相互关系有助于分辨它是不是问题的好解答：
    - 网格是连续的桶排序。
    - BSPs，k-d trees和包围盒是线性搜索树。
    - 四叉树和八叉树是多叉树。

致谢

游戏设计模式

据说只有作家知道写作中会遇到什么， 但还有另外一群人知道内情——那些不幸与作家有亲密关系的人。 我的妻子Megan从岩石般致密的生活中，为我开凿出写作时间。 洗盘子，给孩子洗澡也许不是“写作”， 但没有她的这些付出，这本书永远没法写出来。

我在EA做程序员时开始写作这本书。 我认为公司不知道这回事， 我要感谢Michael Malone, Olivier Nallet, 以及Richard Wifall。 他们为书籍的前几章提供了详尽有益的建议。

写到一半时，我决定放弃传统的出版方式。 我知道，这意味着没有编辑的指导，但有成打的读者通过邮件告诉我书该怎么写； 这意味着没有校对，但有超过250个bug报告来帮我改进； 这意味着没有写作期限的鼓舞，但当我完成一章，读者会拍着我的背鼓励，我会有更强的动力。

我没有失去文字编辑。Lauren Briese在我需要的时候出现并杰出地完成了工作。

人们称之为“自出版”，但是“众出版”更加接近事实。 写作是件孤独的事，但我从没感到孤单。 哪怕是我停止写作两年后，仍有人来鼓励我。 没有那些提醒我他们期待更多章节的人，我不会重拾工作并完成此书。

特别感谢Colm Sloan，完全出于内心的善意，他认真阅读了书中每个章节*两遍*，给了我众多超赞的反馈。我欠他一份人情，也许是两份。

那些写过邮件或者发过评论的人， 那些点过赞或者收藏的人， 那些发过推特的人，那些与我交流的人， 那些向朋友宣传这本书的人，那些向我发送错误报告的人， 我要对你们说：我心中充满了对你的感激。 完成这本书是我人生中最大的目标之一，是你让我梦想成真。

谢谢！

致谢

游戏设计模式

据说只有作家知道写作中会遇到什么， 但还有另外一群人知道内情——那些不幸与作家有亲密关系的人。 我的妻子Megan从岩石般致密的生活中，为我开凿出写作时间。 洗盘子，给孩子洗澡也许不是“写作”， 但没有她的这些付出，这本书永远没法写出来。

我在EA做程序员时开始写作这本书。 我认为公司不知道这回事， 我要感谢Michael Malone, Olivier Nallet, 以及Richard Wifall。 他们为书籍的前几章提供了详尽有益的建议。

写到一半时，我决定放弃传统的出版方式。 我知道，这意味着没有编辑的指导，但有成打的读者通过邮件告诉我书该怎么写； 这意味着没有校对，但有超过250个bug报告来帮我改进； 这意味着没有写作期限的鼓舞，但当我完成一章，读者会拍着我的背鼓励，我会有更强的动力。

我没有失去文字编辑。Lauren Briese在我需要的时候出现并杰出地完成了工作。

人们称之为“自出版”，但是“众出版”更加接近事实。 写作是件孤独的事，但我从没感到孤单。 哪怕是我停止写作两年后，仍有人来鼓励我。 没有那些提醒我他们期待更多章节的人，我不会重拾工作并完成此书。

特别感谢Colm Sloan，完全出于内心的善意，他认真阅读了书中每个章节*两遍*，给了我众多超赞的反馈。我欠他一份人情，也许是两份。

那些写过邮件或者发过评论的人， 那些点过赞或者收藏的人， 那些发过推特的人，那些与我交流的人， 那些向朋友宣传这本书的人，那些向我发送错误报告的人， 我要对你们说：我心中充满了对你的感激。 完成这本书是我人生中最大的目标之一，是你让我梦想成真。

谢谢！

序

游戏设计模式

在五年级时，我和我的朋友被准许使用一间存放有几台非常破旧的TRS-80s的房间。 为了鼓舞我们，一位老师给我们找了一些简单的BASIC程序打印文档。

电脑的磁带驱动器已经坏掉了，所以每当我们想要运行代码，就得小心地从头开始输入代码。 因此，我们更喜欢那些只有几行长的程序：

```
10 PRINT "BOBBY IS RADICAL!!!"
20 GOTO 10
```

如果电脑打印的次数足够多，也许这句话就会魔法成真。

哪怕这样，过程也充满了困难。我们不知道如何编程，所以小小的语法错误对我们也是天险。 如果程序没有工作——这经常发生——我们就得从头再来一遍。

文档的最后几页是个真正的怪物：一个占据了几页篇幅的程序。 我们得花些时间才能鼓起勇气去试一试，但它实在太诱人——它的标题是“地道与巨魔”。 我们不知道它能做什么，但听起来像是个游戏，还有什么比自己编个电脑游戏更酷的吗?

我们从来没能让它运行起来，一年以后，我们离开了那间教室。 （很久以后，当我真的学会了点BASIC，我意识到那只是个桌面游戏角色生成器，而不是游戏。） 但是命运的车轮已经开始转动——自那时起，我就想要成为一名游戏程序员。

青少年时，我家有了一台能运行QuickBASIC的Macintosh，之后THINK C也能在其上运行。 几乎整个暑假我都在用它编游戏。 自学缓慢而痛苦。 我能轻松地编写并运行某些部分——地图或者小谜题——但随着程序代码量的增长，这越来越难。

暑假中的不少时间我花在路易斯安那州南部的沼泽里逮蛇和乌龟上了。 如果外面不是那么酷热，很有可能这是一本讲爬虫而不是编程的书了。

起初，挑战之处仅仅在于让程序成功运行。然后，是搞明白怎样写出内容超出我大脑容量的代码。 我不再只阅读关于“如何用C++编程”的书籍，而开始尝试找那些讲如何*组织*程序的书。

几年过后，一位朋友给我一本书：《设计模式：可复用面向对象软件的基础》。 终于！正是我从青年时期就在寻找的书。 我一口气从头读到尾。虽然我仍然与自己的程序挣扎，但看到别人也在挣扎并提出了解决方案是一种解脱。 我意识到手无寸铁的我终于有件像样的*工具*了。

那是我首次见到这位朋友，相互介绍五分钟后，我坐在他的沙发上，接下来几个小时，无视他并全神贯注地阅读。 我想自那以后我的社交技能还是有所提高的。

在2001年，我获得了梦想中的工作：EA的软件工程师。 我等不及要看看真正的游戏，还有专业人士是如何将组织一切的。 像实况足球这样的大型游戏使用了什么样的架构？不同的系统是如何交互的？一套代码库是如何在多个平台上运行的？

分析理解源代码是种震颤的体验。图形，AI，动画，视觉效果皆有杰出代码。 有专家知道如何榨干CPU的最后一个循环并好好使用。 那些我都不知道是否*可行*的事情，这些人在午饭前就能完成。

但是这些杰出代码依赖的*架构*通常是事后设计。 他们太注重*功能*而忽视了架构。耦合充斥在模块间。 新功能被塞到任何能塞进去的地方。 在梦想幻灭的我看来，这和其他程序员没什么不同， 如果他们阅读过《设计模式》，最多也就用用 单例。

当然，没那么糟。我曾幻想游戏程序员坐在白板包围的象牙塔里，为架构冷静地讨论上几周。 而实际情况，我看到的代码是努力应对紧张截止期限的人赶工完成的。 他们已经竭尽全力，而且，就像我慢慢意识到的那样，他们的全力以赴的结果通常很好。 我花在游戏代码上的时间越多，我越能发现藏在表面下的天才之处。

不幸的是，“藏”是普遍现象。 宝石埋在代码中，但人们从未意识到它们的存在。 我看到同事重复寻找解决方案，而需要的示例代码就埋在他们所用的代码库中。

这个问题正是这本书要解决的。 我挖出了游戏代码库中能找到的设计模式，打磨然后在这里展示它们，这样可以节约时间用于在发明新事物上，而非*重新*发明它们。

书店里已有的书籍

书店里已经有很多游戏编程书籍了。为什么要再写一本呢？

我看到的很多编程书籍可以归为这两类：

- **特定领域的书籍。** 这些关于细分领域的书籍带你深入理解游戏开发某一特定层面。 它们会教授你3D图形，实时渲染，物理模拟，人工智能，或者音频播放。 那些很多程序员穷其一生研究的细分领域。
- **完整引擎的书籍。** 另一个方向，还有书籍试图包含游戏引擎的各个部分。 它们倾向于构建特定种类游戏的完整引擎，通常是3D FPS游戏。

这两种书我都喜欢，但我认为它们并未覆盖全部空间。 特定领域的书籍很少告诉你这些代码如何与游戏的其他部分打交道。 你擅长物理或者渲染，但是你知道怎么将两者优雅地组合吗?

第二类书包含这些，但是发现完整引擎的书籍通常过于整体，过于专注某类游戏了。 特别是，随着手游和休闲游戏的兴起，我们正处于众多游戏类型欣欣向荣的时刻。 我们不再只是复制Quake了。如果*你的*游戏与该类游戏不同，那些介绍单一引擎的书就不那么有用了。

相反，我在这里做的更*à la carte* 。 每一章都是独立的，可应用到代码上的思路。 这样，你可以用*你*认为最好的方式组合这些思路，用到你的游戏上去。

另一个广泛使用这种*à la carte*风格的例子是*Game Programming Gems*系列。

和设计模式的关联

任何名字中有“模式”的编程书 都与Erich Gamma，Richard Helm，Ralph Johnson，和John Vlissides（通常被称为GoF）合著的经典书籍： 《设计模式：可复用面向对象软件要素》相关。

《设计模式》也受到之前的书籍的启发。 创建一种模式语言来描述问题的开放式解法， 这思路来自 *A Pattern Language*， 作者是Christopher Alexander (还有Sarah Ishikawa和Murray Silverstein).

他们的书是关于架构的（建筑和墙那样的*真正的*框架结构）， 但他们希望其他人能使用相同的方法描述其他领域的解决方案。 《设计模式》正是是GoF用这一方法在软件业做出的努力。

称这本书为“游戏编程模式”，我不是暗示GoF的模式不适用于游戏编程。 相反：本书重返设计模式一节包含了《设计模式》中的很多模式， 但强调了这些模式在游戏编程的特定使用。

同样的，我认为本书也适用于非游戏软件。 我可以依样画瓢称本书为《更多设计模式》，但是我认为举游戏编程为例子更为契合。 你真的想要另一本介绍员工记录和银行账户的书吗?

也就是说，虽然这里介绍的模式在其他软件上也很有用，但它们更合适于处理游戏中常见的工程挑战：

- 时间和顺序通常是游戏架构的核心部分。事物必须在正确的时间按正确的顺序发生。
- 高度压缩的开发周期，大量程序员需要能快速构建和迭代一系列不同的行为，同时保证不烦扰他人，也不污染代码库。
- 在定义所有的行为后，游戏开始互动。怪物攻击英雄，药物相互混合，炸弹炸飞敌人或者友军。 实现这些互动不能把代码库搞成一团乱麻。
- 最后，游戏中性能很重要。 游戏开发者处于一场榨干平台性能的竞赛中。 节约CPU循环的技巧区分了A级百万销量游戏和掉帧差评游戏。

如何阅读这本书

《游戏设计模式》分为三大块。 第一部分介绍并划分本书的框架。包含你现在阅读的这章和下一章。

第二部分，重放设计模式，复习了GoF书籍里的很多模式。 在每一章中，我给出我对这个模式的看法，以及我认为它和游戏编程有什么关系。

最后一部分是这本书最肥美的部分。 它展示了十三种我发现有用的模式。它们被分为四类： 序列模式, 行为模式, 解耦模式,和优化模式。

每种模式都使用固定的格式表述，这样你可以将这本书当成引用，快速找到你需要的：

- **意图** 部分提供这个模式想要解决什么问题的简短介绍。 将它放在首位，这样你可以快速翻阅，找到你现在需要的模式。
- **动机** 部分描述了模式处理的问题示例。 不同于具体的算法，模式通常不针对某个特定问题。 不用示例教授模式，就像不用面团教授烘烤。动机部分提供了面团，而下部分会教你烘烤。
- **模式** 部分将模式从示例中剥离出来。 如果你想要一段对模式的教科书式简短介绍，那就是这部分了。 如果你已经熟悉了这种模式，想要确保你没有拉下什么，这部分也是很好的提示。
- 到目前为止，模式只是用一两个示例解释。但是如何知道模式对*你的*问题有没有用呢？ **何时使用** 部分提供了这个模式在何时使用何时不用的指导。 **记住** 部分指出了使用模式的结果和风险。

- 如果你像我一样需要具体的例子真正来*理解*某物，那么**示例代码**部分能让你称心如意。它描述模式的一步步具体实现，来展现模式是如何工作的。
- 模式与算法不同的是它们是开放的。 每次你使用模式，可以不同的方式实现。 下一部分**设计决策**，讨论这些方式，告诉你应用模式时可供考虑的不同选项。
- 作为结尾，这里有**参见**部分展示了这一模式与其他模式的关联，以及那些使用它的真实代码。

关于示例代码

这本书的示例代码使用C++写就，但这并不意味着这些模式只在C++中有用，或C++比其他语言更适合使用这些模式。 这些模式适用于几乎每种编程语言，虽然有的模式假设编程语言有对象和类。

我选择C++有几个原因。首先，这是在游戏制作中最流行的语言，是业界的*通用语*。 通常，C++基于的C语法也是Java，C#，JavaScript和其他很多语言的基础。 哪怕你不懂C++，你也只需一点点努力就能理解这里的示例代码。

这本书的目标*不是*教会你C++。 示例代码尽可能的简单，不一定符合好的C++风格或规范。 示例代码展示的是意图，而不是代码。

特别的，代码没用“现代的”——C++11或者更新的——标准。 没有使用标准库，很少使用模板。 它们是“糟糕”C++代码，但我希望保持这样，这样那些使用C，Objective-C，Java和其他语言的人更容易理解它们。

为了避免花费时间在你已经看过或者是与模式无关的代码上，示例中省略了部分代码。 如果是那样，示例代码中的省略号表明这里隐藏了一些代码。

假设有个函数，做了些工作然后返回值。 而用它作示例的模式只关心返回的值，而不是完成了什么工作。那样的话，示例代码长的像这样：

```
bool update()
{
  // 做点工作……
  return isDone();
}
```

接下来呢

设计模式在软件开发过程中不断地改变和扩展。 这本书继续了GoF记录分享设计模式的旅程，而这旅程也不会终于本书。

你是这段旅程的关键部分。改良（或者否决）了这本书中的模式，你就是为软件开发社区做贡献。 如果你有任何建议，更正，或者任何反馈，保持联络!

架构，性能和游戏

游戏设计模式Introduction

在一头扎入一堆设计模式之前，我想先讲一些我对软件架构和其应用到游戏之中的理解，这也许能帮你更好地理解这本书的其余部分。 至少，在你被卷入一场关于设计模式和软件架构有多么糟糕（或多么优秀）的辩论时， 这可以给你一些火力支援。

注意我没有建议你在战斗中选哪一边。就像任何军火贩子一样，我愿意向作战双方出售武器。

什么是软件架构?

如果把本书从头到尾读一遍， 你不会学会3D图形背后的线性代数或者游戏物理背后的微积分。 这书不会告诉你如何用α-β修剪你的AI树，也不会告诉你如何在音频播放中模拟房间中的混响。

Wow，这段给这本书打了个糟糕的广告啊。

相反，这本书告诉你在这些*之间*的事情。 与其说这本书是关于如何写代码，不如说是关于如何*架构*代码的。 每个程序都有*一定*架构，哪怕这架构是“将所有东西都塞到`main()`中看看如何”， 所以我认为讲讲什么造成了*好*架构是很有意思的。我们如何区分好架构和坏架构呢?

我思考这个问题五年了。当然，像你一样，我有对好设计有一种直觉。 我们都被糟糕的代码折磨的不轻，你唯一能做的好事就是删掉它们，结束它们的痛苦。

承认吧，我们中大多数人都该对一些糟糕代码*负责*。

少数幸运儿有相反的经验，有机会在好好设计的代码库上工作。 那种代码库看上去是间豪华酒店，里面的门房随时准备满足你心血来潮的需求。 这两者之间的区别是什么呢?

什么是*好的*软件架构?

对我而言，好的设计意味着当我作出改动，整个程序就好像正等着这种改动。 我可以加使用几个函数调用完成任务，而代码库本身无需改动。

这听起来很棒，只是完全不可行。“把代码写到改动不会影响其平静表面。”够了。

让我们通俗些。第一个关键点是*架构是有关于改动的*。 总有人改动代码。如果没人碰代码——无论是因为代码至善至美， 还是因为代码糟糕透顶以至于没人会为了修改它而玷污自己的文本编辑器——那么它的架构设计就无关紧要。 评价架构设计的好坏就是评价它应对改动有多么轻松。 没有了改动，架构好似永远不会离开起跑线的运动员。

你如何处理改动?

在你改动代码去添加新特性，去修复漏洞，或者随便什么需要使用文本编辑器的时候， 你需要理解代码正在做什么。当然，你不需要理解整个程序， 但你需要将所有相关的东西装进你的大脑。

有点诡异，这字面上是一个OCR过程。

我们通常无视了这步，但这往往是编程中最耗时的部分。 如果你认为将数据从磁盘上分页到RAM上很慢， 那么试试通过一对神经纤维将数据分页到大脑中。

一旦把所有正确的上下文都记到了你的大脑里， 想一会，你就能找到解决方案。 可能需要反复斟酌的时刻，但通常比较简单。 一旦理解了问题和需要改动的代码，实际的编码工作有时是微不足道的。

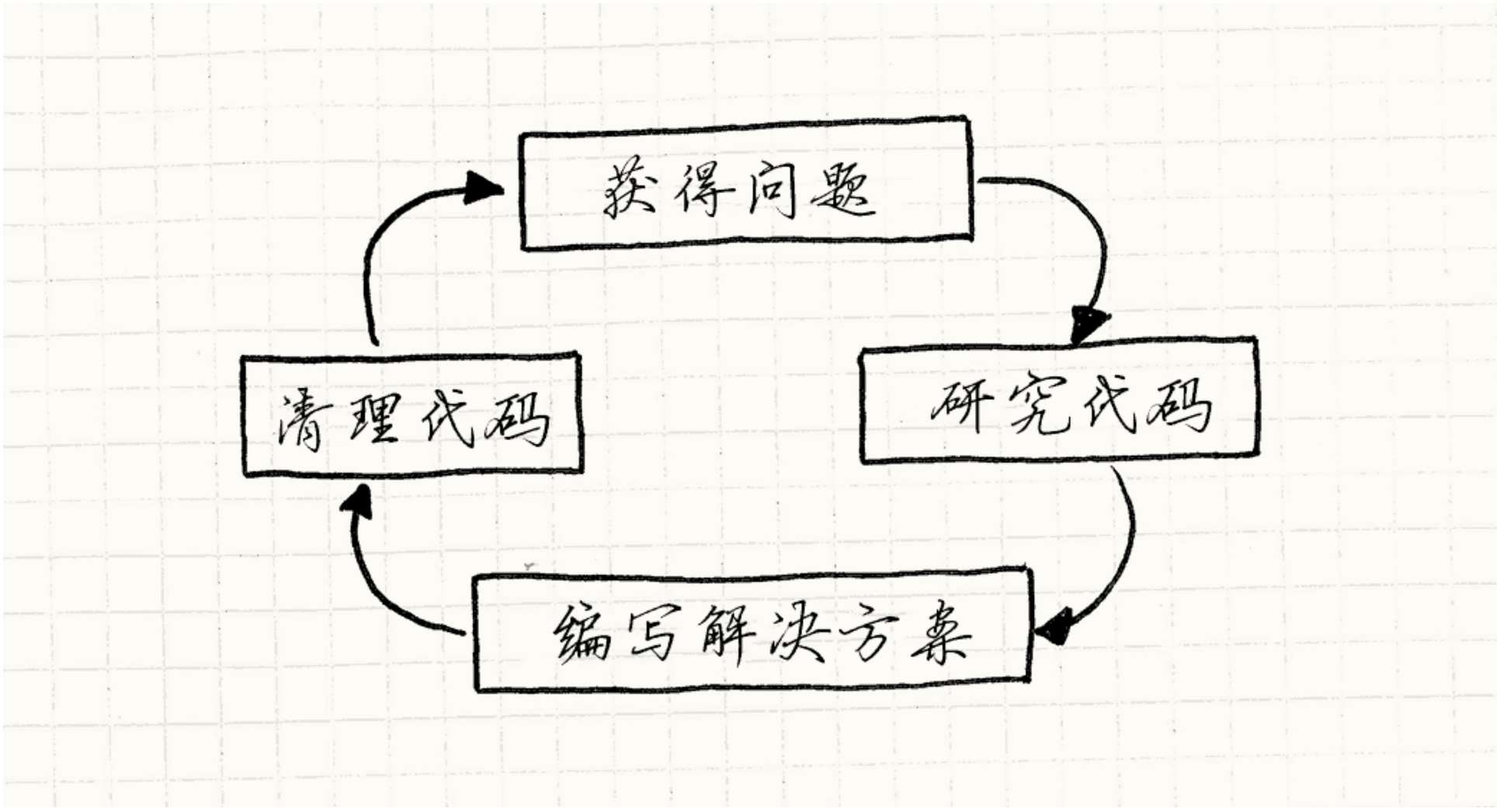
你用手指在键盘上敲打一阵，直到屏幕上闪着正确的光芒， 搞定了，对吧？还没呢！ 在你为之写测试并发送到代码评审之前，你通常有些清理工作要做。

我是不是说了“测试”？噢，是的，我说了。为有些游戏代码写单元测试很难，但代码库的大部分是完全可以测试的。

我不会在这里发表演说，但是我建议你，如果还没有做自动测试，请考虑一下。 除了手动验证以外你就没别的事要做了吗?

你将一些代码加入了游戏，但不想下一个人被留下来的小问题绊倒。 除非改动很小，否则就还需要一些工作去微调新代码，使之无缝对接到程序的其他部分。 如果你做对了，那么下个编写代码的人无法察觉到哪些代码是新加入的。

简而言之，编程的流程图看起来是这样的:



令人震惊的死循环，我看到了。

解耦帮了什么忙?

虽然并不明显，但我认为很多软件架构都是关于研究代码的阶段。 将代码载入到神经元太过缓慢，找些策略减少载入的总量是件很值得做的事。 这本书有整整一章是关于*解耦模式*， 还有很多*设计模式*是关于同样的主题。

可以用多种方式定义“解耦”，但我认为如果有两块代码是耦合的， 那就意味着无法只理解其中一个。 如果*解*耦了它俩，就可以独自地理解某一块。 这当然很好，因为只有一块与问题相关， 只需将*这一块*加载到你的大脑脑中而不需要加载另外一块。

对我来说，这是软件架构的关键目标： **最小化在编写代码前需要了解的信息**。

当然，也可以从后期阶段来看。另一种解耦的定义是：当一块代码有*改动*时，没必要修改另一块的代码。肯定需要修改*一些东西*，但耦合程度越小，改动会波及的范围就越小。

代价呢?

听起来很棒，对吧？解耦任何东西，然后像风一样编码。每个改动都只需修改一两个特定方法，在代码库上行云流水地编写代码。

这就是人们对抽象，模块化，设计模式和软件架构兴奋的原因。在架构优良的程序上工作是极佳的体验，每个人都希望能更有效率地工作。好架构能造成生产力上*巨大的*不同。它影响大得无以复加。

但是，天下没有免费的午餐。好的设计需要汗水和纪律。每次做出改动或是实现特性，你都需要将它优雅的集成到程序的其他部分。需要花费大量的努力去管理代码，在开发过程中面对数千次变化仍然*保持*它的结构。

第二部分——管理代码——需要特别关注。我看到无数程序有优雅的开始，然后死于程序员一遍又一遍添加的“微小黑魔法”。

就像园艺，仅仅种植是不够的，还需要除草和修剪。

你得考虑程序的哪部分需要解耦，然后再引入抽象。同样，你需要决定哪部分能支持扩展来应对未来的改动。

人们对这点变得狂热。他们设想，未来的开发者（或者他们自己）进入代码库，发现它极为开放，功能强大，只需扩展。他们想要有“至尊代码应众求”。（译著：这里是“至尊魔戒御众戒”的梗，很遗憾翻译不出来）

但是，事情从这里开始变得棘手。每当你添加了抽象或者扩展支持，你是*赌*以后这里需要灵活性。你向游戏中添加了代码和复杂性，这需要时间来开发，调试和维护。

如果你赌对了，后来使用了这些代码，那么功夫不负有心人。但预测未来*很难*，模块化如果最终无益，那就有害。毕竟，你得处理更多的代码。

有些人喜欢使用术语“YAGNI”——You aren't gonna need it（你不需要那个）——来对抗这种预测将来需求的强烈冲动。

当你过分关注这点时，代码库就失控了。接口和抽象无处不在。插件系统，抽象基类，虚方法，还有各种各样的扩展点，它们遍地都是。

你要消耗无尽的时间回溯所有的脚手架，去找真正做事的代码。 当需要作出改动，当然，有可能某个接口能帮上忙，但能不能找到就只能听天由命了。 理论上，解耦意味着在修改代码之前需要了解更少的代码， 但抽象层本身也会填满大脑。

像这样的代码库让人*反对*软件架构，特别是设计模式。 人们很容易沉浸在代码中，忽略目标是要发布*游戏*。 无数的开发者听着加强可扩展性的警报，花费多年时间制作“引擎”， 却没有搞清楚做引擎是*为了什么*。

性能和速度

软件架构和抽象有时因损伤性能而被批评，而游戏开发尤甚。 让代码更灵活的许多模式依靠虚拟调度、 接口、 指针、 消息和其他机制， 它们都会加大运行时开销。

一个有趣的反面例子是C++中的模板。模板编程有时可以给你抽象接口而无需运行时开销。

这是灵活性的两极。 当写代码调用类中的具体方法时，你在*写*的时候指定类——硬编码了调用的是哪个类。 通过虚方法或接口，直到*运行*时才知道调用的类。这更加灵活但增加了运行时开销。

模板编程是在两极之间。*在编译时*初始化模板，决定调用哪些类。

还有一个原因。很多软件架构的目的是使程序更加灵活，作出改动需要更少的付出，编码时对程序有更少的假设。 你可以使用接口，让代码可与*任何*实现了接口的类交互，而不仅仅是*现在*写的类。 今天，你可以使用观察者和消息让游戏的两部分交流， 以后可以很容易地扩展为三个或四个部分相互交流。

但性能与假设相关。实现优化需要基于确定的限制。 敌人永远不会超过256个？好，可以将敌人ID编码为一个字节。 只在这种类型上调用方法吗？好，可以做静态调度或内联。 所有实体都是同一类？太好了，可以使用 连续数组存储它们。

但这并不意味着灵活性不好！它可以让我们快速改进游戏， *开发* 速度是获取有趣开发经验的绝对重要因素。 没有人，哪怕是Will Wright，能在纸面上构建一个平衡的游戏。这需要迭代和实验。

越快尝试想法看看效果，就能尝试越多东西，越可能找到有价值的东西。 就算找到正确的机制，你也需要足够的时间调整。 一个微小的不平衡就有可能破坏整个游戏的乐趣。

这里没有普适的答案。 让你的程序更加灵活，在损失一点点性能的前提下更快地做出原型。 或者，优化代码，损失一些灵活性。

就我个人经验而言，让有趣的游戏变得高效比让高效的游戏变有趣简单得多。 一种折中的办法是保持代码灵活直到确定设计，再去除抽象层来提高性能。

糟糕代码的优势

下一观点：不同的代码风格各有千秋。 这本书的大部分是关于保持干净可控的代码，所以我坚持应该用*正确*方式写代码，但糟糕的代码也有一定的优势。

编写良好架构的代码需要仔细地思考，这会消耗时间。 在项目的整个周期中*保持*良好的架构需要花费大量的努力。 你需要像露营者处理营地一样小心处理代码库：总是保持其优于你刚刚接触它的时候。

当你要在项目上花费很久时间的话，这很好。 但，就像早先提到的，游戏设计需要很多实验和探索。 特别是在早期，写一些你*知道*要扔掉的代码是很普遍的事情。

如果只想试试游戏的某些点子是否可行的， 良好的架构意味着在屏幕上看到和获取反馈之前要消耗很长时间。 如果最后证明这点子不对，那么删除代码时，那些让代码更优雅的时间就付之东流了。

原型——一坨勉强拼凑在一起，只能完成某个点子的简单代码——是个完全合理的编程实践。 虽然当你写一次性代码时，*必须* 保证将来可以扔掉它。 我见过很多次糟糕的经理人在玩这种把戏：

> 老板：“嗨，我有些想试试的点子。只要原型，不需要做的很好。你能多快搞定？”
>
> 开发者：“额，如果删掉这些部分，不测试，不写文档，允许很多的漏洞，那么几天能给你临时的代码文件。”
>
> 老板：“太好了。”

几天后

> 老板：“嘿，原型很棒，你能花上几个小时清理一下然后变为成品吗？”

你得让人们清楚，可抛弃的代码即使看上去能工作，也不能被*维护*，*必须* 重写。 如果*有可能*要维护这段代码，就得防御性好好编写它。

一个小技巧能保证原型代码不会变成真正用的代码：使用和游戏实现不同的编程语言。 这样，在将其实际应用于游戏中之前必须重写。

保持平衡

有些因素在相互角力：

1. 为了在项目的整个生命周期保持其可读性，需要好架构。 2. 需要更好的运行时性能。 3. 需要让现在的特性更快的实现。

有趣的是，这些都是速度：长期开发的速度，游戏运行的速度，和短期开发的速度。

这些目标至少是部分对立的。 好架构长期来看提高了生产力， 也意味着每个改动都需要消耗更多努力保持代码整洁。

草就的代码很少是*运行时*最快的。 相反，提升性能需要很多的编程时间。 一旦完成，它就会污染代码库：高度优化的代码不灵活，很难改动。

总有今日事今日毕的压力。但是如果尽可能快地实现特性， 代码库就会充满黑魔法，漏洞和混乱，阻碍未来的产出。

没有简单的答案，只有权衡。 从我收到的邮件看，这伤了很多人的心，特别是那些只是想做个游戏的人。 这似乎是在恐吓，“没有正确的答案，只有不同的错误。”

但，对我而言，这让人兴奋！看看任何人们从事的领域， 你总能发现某些相互抵触的限制。无论如何，如果有简单的答案，每个人都会那么做。 一周就能掌握的领域是很无聊的。你从来没有听说过有人讨论挖坑。

也许你会讨论挖坑；我没有深究这个类比。 可能有挖坑热爱者，挖坑规范，以及一整套亚文化。 我算什么人，能在此大放厥词?

对我来说，这和游戏有很多相似之处。 国际象棋之类的游戏永远不能被掌握，因为每个棋子都很完美的与其他棋子相平衡。 这意味你可以花费一生探索广阔的可选策略。糟糕的游戏就像井字棋，玩上几遍就会厌倦就退出。

简单

最近，我感觉如果有什么能简化这些限制，那就是*简单*。 在我现在的代码中，我努力去写最简单，最直接的解决方案。 你读过这种代码后，完全理解了它在做什么，想不到其他完成的方法。

我的目标是正确获得数据结构和算法（大致是这样的先后），然后在从那里开始。 我发现如果能让事物变得简单，就有更少的代码， 就意味着改动时有更少的代码载入脑海。

它通常跑的很快，因为没什么开销，也没什么代码需要执行。 （虽然大部分时候事实并非如此。你可以在一小段代码里加入大量的循环和递归。）

但是，注意我并没有说简单的代码需要更少的时间*编写*。 你会这么觉得是因为最终得到了更少的代码，但是好的解决方案不是往代码中注水，而是*蒸干*代码。

Blaise Pascal有句著名的信件结尾，“我没时间写的更短。”

另一句名言来自Antoine de Saint-Exupery：“臻于完美之时，不是加无可加，而是减无可减。”

言归正传，我发现每次重写本书，它就更短。有些章节比刚完成时短了20%。

我们很少遇到优雅表达的问题，一般反而是一堆用况。 你想要X在Z情况下做Y，在A情况下做W，诸如此类。换言之，一长列不同行为。

最节约心血的方法是为每段用况编写一段代码。 看看新手程序员，他们经常这么干：为每个手头的问题编写条件逻辑。

但这一点也不优雅，那种风格的代码遇到一点点没想到的输入就会崩溃。 当我们想象优雅的代码时，想的是*通用*的那一个： 只需要很少的逻辑就可以覆盖整个用况。

找到这样的方法有点像模式识别或者解决谜题。 需要努力去识别散乱的用例下隐藏的规律。 完成时你会感觉好得不能再好。

就快完了

几乎每个人都会跳过介绍章节，所以祝贺你看到这里。 我没有太多东西回报你的耐心，但还有些建议给你，希望对你有用：

- 抽象和解耦让扩展代码更快更容易，但除非确信需要灵活性，否则不要在这上面浪费时间。
- 在整个开发周期中考虑并为性能设计，但是尽可能推迟那些底层的，基于假设的优化，那会锁死代码。

相信我，发布前两个月*不是*开始思考“游戏运行只有1FPS”问题的时候。

- 快速地探索游戏的设计空间，但不要跑的太快，在身后留下烂摊子。毕竟，你总得回来打扫。
- 如果打算抛弃这段代码，就不要尝试将其写完美。摇滚明星将旅店房间弄得一团糟，因为他们知道明天他们就走人了。

- 但最重要的是，**如果你想要做出让人享受的东西，那就享受做它的过程。**

重访设计模式

游戏设计模式

《设计模式：可复用面向对象软件的基础》出版已经二十年了。 除非你比我从业还久，否则《设计模式》已经酝酿成一坛足以饮用的老酒了。 对于像软件行业这样快速发展的行业，它已经是老古董了。 这本书的持久流行证明了设计方法比框架和方法论更经久不衰。

虽然我认为*设计模式*仍然有意义，但在过去几十年我们学到了很多。 在这一部分，我们会遇到GoF记载的一些模式。 对于每个模式，我希望能讲些有用有趣的东西。

我认为有些模式被过度使用了（单例模式）， 而另一些被冷落了（命令模式）。 有些模式在这里是因为我想探索其在游戏上的特殊应用（享元模式和观察者模式）。 最后，我认为看看有些模式在更广的编程领域是如何运用的是很有趣的（原型模式和状态模式）。

模式

- 命令模式
- 享元模式
- 观察者模式
- 原型模式
- 单例模式
- 状态模式

命令模式

游戏设计模式Design Patterns Revisited

命令模式是我最喜欢的模式之一。 大多数我写的大型程序，游戏或者别的什么，都会在某处用到它。 当在正确的地方使用时，它可以将复杂的代码清理干净。 对于这样一个了不起的模式，不出所料，GoF有个深奥的定义：

> 将一个请求封装为一个对象，从而使你可用不同的请求对客户进行参数化； 对请求排队或记录请求日志，以及支持可撤销的操作。

我想你也会觉得这个句子晦涩难懂。 第一，它的比喻难以理解。 在软件之外的狂野世界，词语可以指代任何事物，“客户”是一个人——那些和你做生意的人。 据我查证，人类不能被“参数化”。

然后，句子余下的部分介绍了可能会使用这个模式的场景。 如果你的场景不在这个列表中，那么这对你就没什么用处。 *我的*命令模式精简定义为：

命令是*具现化的方法调用*。

“Reify（具现化）”来自于拉丁语“res”，意为“thing”（事物），加上英语后缀“-fy”。 所以它意为“thingify”，没准用“thingify”更合适。

当然，“精简”往往意味着“缺少必要信息”，所以这可能没有太大的改善。 让我扩展一下。“具现化”，如果你没有听说过的话，它的意思是“实例化，对象化”。 另外一种具现化的解释方式是将某事物作为“第一公民”对待。

在某些语言中的*反射*允许你在程序运行时命令式地和类型交互。 你可以获得类的类型对象，可以与其交互看看这个类型能做什么。换言之，反射是*具现化类型的系统*。

两种术语都意味着将*概念*变成*数据*——一个对象——可以存储在变量中，传给函数。 所以称命令模式为“具现化方法调用”，意思是方法调用被存储在对象中。

这听起来有些像“回调”，“第一公民函数”，“函数指针”，“闭包”，“偏函数”， 取决于你在学哪种语言，事实上大致上是同一个东西。GoF随后说：

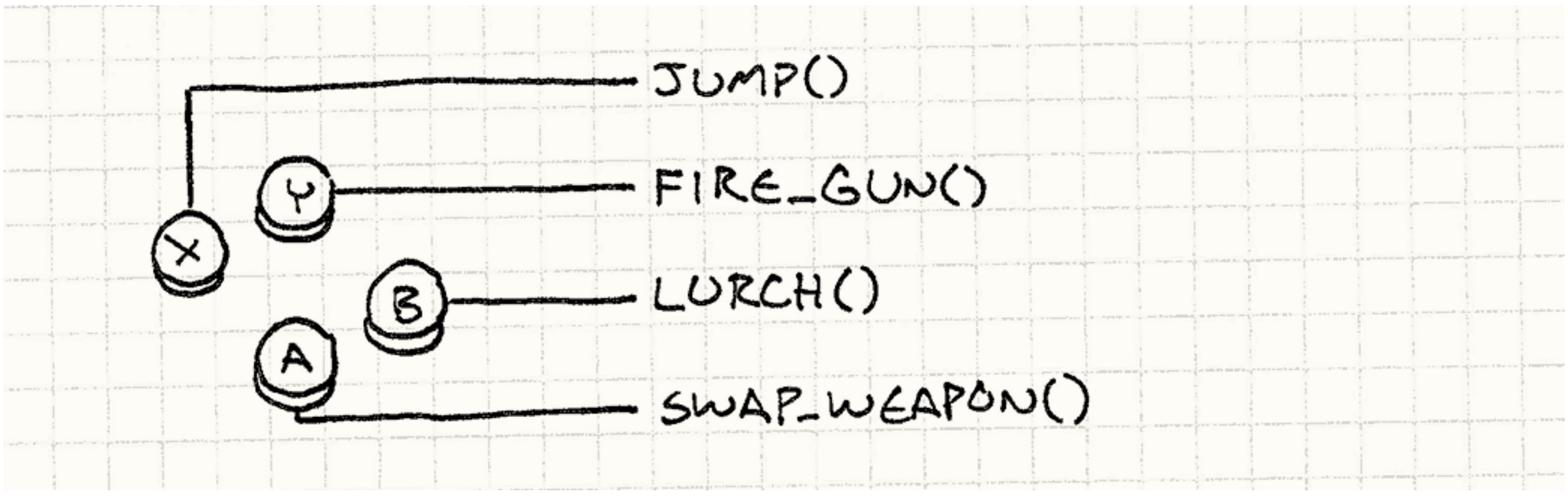
> 命令模式是一种回调的面向对象实现。

这是一种对命令模式更好的解释。

但这些都既抽象又模糊。我喜欢用实际的东西作为章节的开始，不好意思，搞砸了。 作为弥补，从这里开始都是命令模式能出色应用的例子。

配置输入

在每个游戏中都有一块代码读取用户的输入——按钮按下，键盘敲击，鼠标点击，诸如此类。 这块代码会获取用户的输入，然后将其变为游戏中有意义的行为：



下面是一种简单的实现：

```
void InputHandler::handleInput()
{
  if (isPressed(BUTTON_X)) jump();
  else if (isPressed(BUTTON_Y)) fireGun();
  else if (isPressed(BUTTON_A)) swapWeapon();
  else if (isPressed(BUTTON_B)) lurchIneffectively();
}
```

专家建议：不要太经常地按B。

这个函数通常在游戏循环中每帧调用一次，我确信你可以理解它做了什么。 在我们想将用户的输入和程序行为硬编码在一起时，这段代码可以正常工作，但是许多游戏允许玩家*配置*按键的功能。

为了支持这点，需要将这些对`jump()`和`fireGun()`的直接调用转化为可以变换的东西。“变换”听起来有点像变量干的事，因此我们需要表示游戏行为的*对象*。进入：命令模式。

我们定义了一个基类代表可触发的游戏行为：

```
class Command
{
public:
  virtual ~Command() {}
  virtual void execute() = 0;
};
```

当你有接口只包含一个没有返回值的方法时，很可能你可以使用命令模式。

然后我们为不同的游戏行为定义相应的子类：

```
class JumpCommand : public Command
{
public:
  virtual void execute() { jump(); }
};

class FireCommand : public Command
{
public:
  virtual void execute() { fireGun(); }
};

// 你知道思路了吧
```

在代码的输入处理部分，为每个按键存储一个指向命令的指针。

```
class InputHandler
{
public:
  void handleInput();

  // 绑定命令的方法……

private:
  Command* buttonX_;
  Command* buttonY_;
  Command* buttonA_;
  Command* buttonB_;
};
```

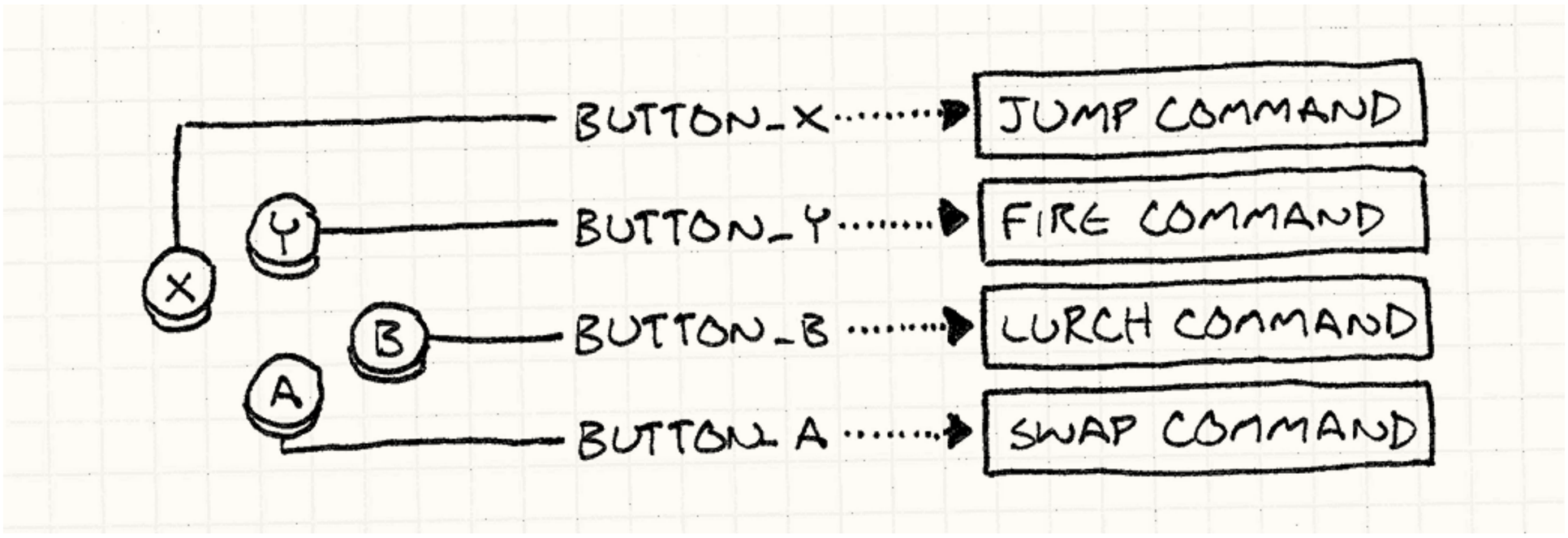
现在输入处理部分这样处理：

```
void InputHandler::handleInput()
{
  if (isPressed(BUTTON_X)) buttonX_->execute();
  else if (isPressed(BUTTON_Y)) buttonY_->execute();
  else if (isPressed(BUTTON_A)) buttonA_->execute();
  else if (isPressed(BUTTON_B)) buttonB_->execute();
}
```

注意在这里没有检测`NULL`了吗？这假设每个按键都与*某些*命令相连。

如果想支持不做任何事情的按键又不想显式检测`NULL`，我们可以定义一个命令类，它的`execute()`什么也不做。这样，某些按键处理器不必设为`NULL`，只需指向这个类。这种模式被称为空对象。

以前每个输入直接调用函数，现在会有一层间接寻址：



这是命令模式的简短介绍。如果你能够看出它的好处，就把这章剩下的部分作为奖励吧。

角色说明

我们刚才定义的类可以在之前的例子上正常工作，但有很大的局限。 问题在于假设顶层的`jump()`，`fireGun()`之类的函数可以找到玩家的角色，然后像操纵木偶一样操纵它。

这些假定的耦合限制了这些命令的用处。`JumpCommand`*只能* 让玩家的角色跳跃。让我们放松这个限制。 不让函数去找它们控制的角色，我们将函数控制的角色对象*传进去*：

```
class Command
{
public:
  virtual ~Command() {}
  virtual void execute(GameActor& actor) = 0;
};
```

这里`GameActor`是代表游戏世界中角色的“游戏对象”类。 我们将其传给`execute()`，这样可以在命令的子类中添加函数，来与我们选择的角色关联，就像这样：

```
class JumpCommand : public Command
{
public:
  virtual void execute(GameActor& actor)
  {
    actor.jump();
  }
};
```

现在，我们可以使用这个类让游戏中的任何角色跳来跳去了。 在输入控制部分和在对象上调用命令部分之间，我们还缺了一块代码。 第一，我们修改`handleInput()`，让它可以*返回*命令：

```
Command* InputHandler::handleInput()
{
  if (isPressed(BUTTON_X)) return buttonX_;
  if (isPressed(BUTTON_Y)) return buttonY_;
  if (isPressed(BUTTON_A)) return buttonA_;
  if (isPressed(BUTTON_B)) return buttonB_;

  // 没有按下任何按键，就什么也不做
  return NULL;
}
```

这里不能立即执行，因为还不知道哪个角色会传进来。 这里我们享受了命令是具体调用的好处——`延迟`到调用执行时再知道。

然后，需要一些接受命令的代码，作用在玩家角色上。像这样：

```
Command* command = inputHandler.handleInput();
if (command)
{
  command->execute(actor);
}
```

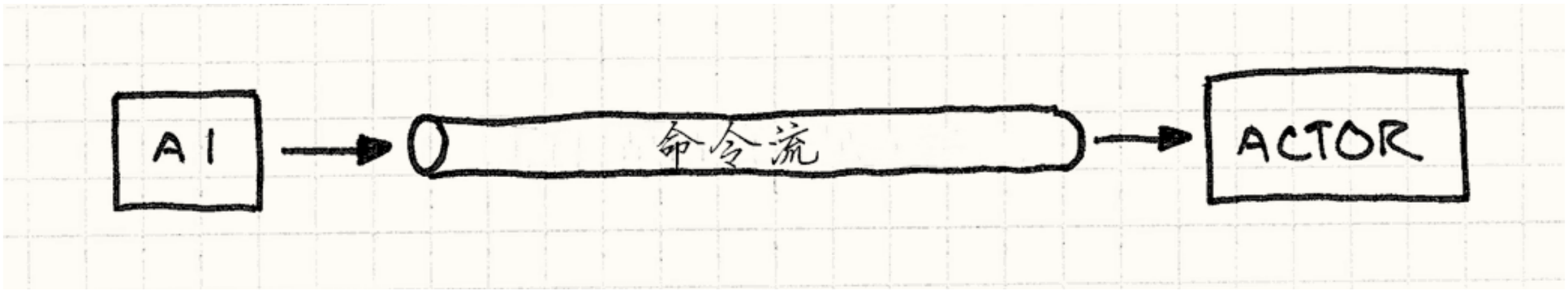
将`actor`视为玩家角色的引用，它会正确的按着玩家的输入移动， 所以我们赋予了角色和前面例子中相同的行为。 通过在命令和角色间增加了一层重定向， 我们获得了一个灵巧的功能：*我们可以让玩家控制游戏中的任何角色，只需向命令传入不同的角色。*

在实践中，这个特性并不经常使用，但是*经常*会有类似的用例跳出来。 到目前为止，我们只考虑了玩家控制的角色，但是游戏中的其他角色呢？ 它们被游戏AI控制。我们可以在AI和角色之间使用相同的命令模式；AI代码只需生成`Command`对象。

在选择命令的AI和展现命令的游戏角色间解耦给了我们很大的灵活度。 我们可以对不同的角色使用不同的AI，或者为了不同的行为而混合AI。 想要一个更加有攻击性的同伴？插入一个更加有攻击性的AI为其生成命令。 事实上，我们甚至可以为*玩家角色*加上AI， 这在原型阶段，游戏需要自动演示时是很有用的。

把控制角色的命令变为第一公民对象，去除直接方法调用中严厉的束缚。 将其视为命令队列，或者是命令流：

队列能为你做的更多事情，请看事件队列。



为什么我觉得需要为你画一幅“流”的图像？又是为什么它看上去像是管道？

一些代码（输入控制器或者AI）产生一系列命令放入流中。 另一些代码（调度器或者角色自身）调用并消耗命令。 通过在中间加入队列，我们解耦了消费者和生产者。

如果将这些指令*序列化*，我们可以通过网络流传输它们。 我们可以接受玩家的输入，将其通过网络发送到另外一台机器上，然后重现之。这是网络多人游戏的基础。

撤销和重做

最后的这个例子是这种模式最广为人知的使用情况。 如果一个命令对象可以*做*一件事，那么它亦可以*撤销*这件事。 在一些策略游戏中使用撤销，这样你就可以回滚那些你不喜欢的操作。 在人们*创造*游戏时，这是*必不可少的*工具。 一个不能撤销误操作导致的错误的编辑器，肯定会让游戏设计师恨你。

这是经验之谈。

没有了命令模式，实现撤销非常困难，有了它，就是小菜一碟。 假设我们在制作单人回合制游戏，想让玩家能撤销移动，这样他们就可以集中注意力在策略上而不是猜测上。

我们已经使用了命令来抽象输入控制，所以每个玩家的举动都已经被封装其中。 举个例子，移动一个单位的代码可能如下：

```
class MoveUnitCommand : public Command
{
public:
  MoveUnitCommand(Unit* unit, int x, int y)
  : unit_(unit),
    x_(x),
    y_(y)
  {}

  virtual void execute()
  {
    unit_->moveTo(x_, y_);
  }

private:
  Unit* unit_;
  int x_, y_;
};
```

注意这和前面的命令有些许不同。 在前面的例子中，我们需要从修改的角色那里*抽象*命令。 在这个例子中，我们将命令*绑定*到要移动的单位上。 这条命令的实例不是通用的“移动某物”命令；而是游戏回合中特殊的一次移动。

这展现了命令模式应用时的一种情形。 在某些情形中，就像之前例子，指令是可重用的对象，代表了*可执行的事件*。 我们早期的输入控制器将其实现为一个命令对象，然后在按键按下时调用其`execute()`方法。

这里的命令更加特殊。它们代表了特定时间点能做的特定事件。 这意味着输入控制代码可以在玩家下决定时*创造*一个实例。就像这样：

```
Command* handleInput()
{
  Unit* unit = getSelectedUnit();

  if (isPressed(BUTTON_UP)) {
    // 向上移动单位
    int destY = unit->y() - 1;
    return new MoveUnitCommand(unit, unit->x(), destY);
  }

  if (isPressed(BUTTON_DOWN)) {
    // 向下移动单位
    int destY = unit->y() + 1;
    return new MoveUnitCommand(unit, unit->x(), destY);
  }

  // 其他的移动……

  return NULL;
}
```

当然，在像C++这样没有垃圾回收的语言，这意味着执行命令的代码也要负责释放内存。

命令是一次性为我们很快地赢得了一个优点。 为了让指令可被取消，我们为每个类定义另一个需要实现的方法：

```
class Command
{
public:
  virtual ~Command() {}
  virtual void execute() = 0;
  virtual void undo() = 0;
};
```

`undo()`方法回滚了`execute()`方法造成的游戏状态改变。 这里是添加了撤销功能后的移动命令：

```
class MoveUnitCommand : public Command
{
public:
  MoveUnitCommand(Unit* unit, int x, int y)
  : unit_(unit),
    xBefore_(0),
    yBefore_(0),
    x_(x),
    y_(y)
  {}

virtual void execute()
{
  // 保存移动之前的位置
  // 这样之后可以复原。

  xBefore_ = unit_->x();
  yBefore_ = unit_->y();

  unit_->moveTo(x_, y_);
}

virtual void undo()
{
  unit_->moveTo(xBefore_, yBefore_);
  }

private:
  Unit* unit_;
  int xBefore_, yBefore_;
  int x_, y_;
};
```

注意我们为类添加了更多的状态。 当单位移动时，它忘记了它之前是什么样的。 如果我们想要撤销这个移动，我们需要记得单位之前的状态，也就是`xBefore_`和`yBefore_`的作用。

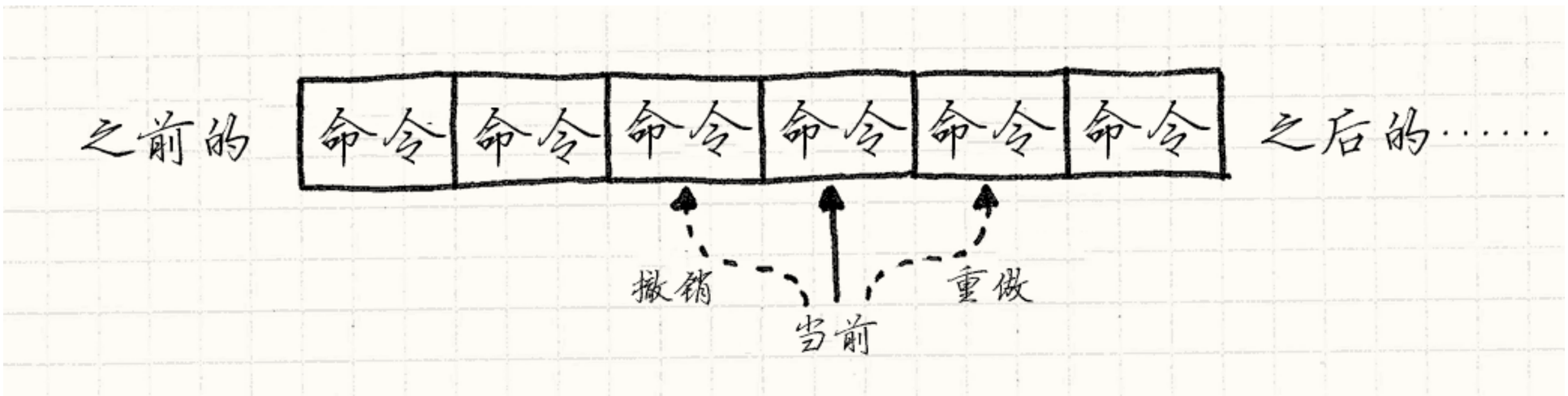
这看上去是备忘录模式使用的地方，它从来没有有效的工作过。 由于命令趋向于修改对象状态的一小部分，对数据其他部分的快照就是浪费内存。手动存储改动的部分消耗更小。

*持久化数据结构*是另一个选项。 使用它，每次修改对象都返回一个新对象，保持原来的对象不变。巧妙的实现下，这些新对象与之前的对象共享数据，所以比克隆整个对象开销更小。

使用持久化数据结构，每条命令都存储了命令执行之前对象的引用，而撤销只是切换回之前的对象。

为了让玩家撤销移动，我们记录了执行的最后命令。当他们按下`control+z`时，我们调用命令的`undo()`方法。 （如果他们已经撤销了，那么就变成了“重做”，我们会再一次执行命令。）

支持多重的撤销也不太难。 我们不单单记录最后一条指令，还要记录指令列表，然后用一个引用指向“当前”的那个。 当玩家执行一条命令，我们将其添加到列表，然后将代表“当前”的指针指向它。



当玩家选择“撤销”，我们撤销现在的命令，将代表当前的指针往后退。 当他们选择“重做”，我们将代表当前的指针往前进，执行该指令。 如果在撤销后选择了新命令，那么清除命令列表中当前的指针所指命令之后的全部命令。

第一次在关卡编辑器中实现这点时，我觉得自己简直就是个天才。 我惊讶于它如此的简明有效。 你需要约束自己，保证每个数据修改都通过命令完成，一旦你做到了，余下的都很简单。

重做在游戏中并不常见，但重*放*常见。 一种简单的重放实现是记录游戏每帧的状态，这样它可以回放，但那会消耗太多的内存。

相反，很多游戏记录每个实体每帧运行的命令。 为了重放游戏，引擎只需要正常运行游戏，执行之前存储的命令。

用类还是用函数?

早些时候，我说过命令与第一公民函数或者闭包类似， 但是在这里展现的每个例子都是通过类完成的。 如果你更熟悉函数式编程，你也许会疑惑函数都在哪里。

我用这种方式写例子是因为C++对第一公民函数支持非常有限。 函数指针没有状态，函子很奇怪而且仍然需要定义类， 在C++11中的lambda演算需要大量的人工记忆辅助才能使用。

这并*不是*说你在其他语言中不可以用函数来完成命令模式。 如果你使用的语言支持闭包，不管怎样，快去用它！ 在某种程度上，命令模式是为一些没有闭包的语言模拟闭包。

(我说*某种程度上*是因为，即使是那些支持闭包的语言， 为命令建立真正的类或者结构也是很有用的。 如果你的命令拥有多重操作（比如可撤销的命令）， 将其全部映射到同一函数中并不优雅。)

定义一个有字段的真实类能帮助读者理解命令包含了什么数据。 闭包是自动包装状态的完美解决方案，但它们过于自动化而很难看清包装的真正状态有哪些。

举个例子，如果我们使用javascript来写游戏，那么我们可以用这种方式来写让单位移动的命令:

```
function makeMoveUnitCommand(unit, x, y) {
  // 这个函数就是命令对象:
  return function() {
    unit.moveTo(x, y);
  }
}
```

我们可以通过一对闭包来为撤销提供支持:

```
function makeMoveUnitCommand(unit, x, y) {
  var xBefore, yBefore;
  return {
    execute: function() {
      xBefore = unit.x();
      yBefore = unit.y();
      unit.moveTo(x, y);
    },
    undo: function() {
      unit.moveTo(xBefore, yBefore);
    }
  };
}
```

如果你习惯了函数式编程风格，这种做事的方法是很自然的。 如果你没有，我希望这章可以帮你了解一些。 对于我而言，命令模式展现了函数式范式在很多问题上的高效性。

参见

- 你最终可能会得到很多不同的命令类。 为了更容易实现这些类，定义一个具体的基类，包含一些能定义行为的高层方法，往往会有帮助。 这将命令的主体`execute()`转到子类沙箱中。
- 在上面的例子中，我们明确地指定哪个角色会处理命令。 在某些情况下，特别是当对象模型分层时，也可以不这么简单粗暴。 对象可以响应命令，或者将命令交给它的从属对象。 如果你这样做，你就完成了一个职责链模式。

* 有些命令是无状态的纯粹行为，比如第一个例子中的`JumpCommand`。 在这种情况下，有多个实例是在浪费内存，因为所有的实例是等价的。 可以用享元模式解决。

你可以将其实现为单例，但真朋友不会让你用单例。

享元模式

游戏设计模式Design Patterns Revisited

迷雾散尽，露出了古朴庄严的森林。古老的铁杉，在头顶编成绿色穹顶。 阳光在树叶间破碎成金色顶棚。从树干间远眺，远处的森林渐渐隐去。

这是我们游戏开发者梦想的超凡场景，这样的场景通常由一个模式支撑着，它的名字低调至极：享元模式。

森林

用几句话就能描述一片巨大的森林，但是在实时游戏中做这件事就完全是另外一件事了。当屏幕上需要显示一整个森林时，图形程序员看到的是每秒需要送到GPU六十次的百万多边形。

我们讨论的是成千上万的树，每棵都由上千的多边形组成。 就算有足够的*内存*描述森林，渲染的过程中，CPU到GPU的部分也太过繁忙了。

每棵树都有一系列与之相关的位：

- 定义树干，树枝和树叶形状的多边形网格。
- 树皮和树叶的纹理。
- 在森林中树的位置和朝向。
- 大小和色彩之类的调节参数，让每棵树都看起来与众不同。

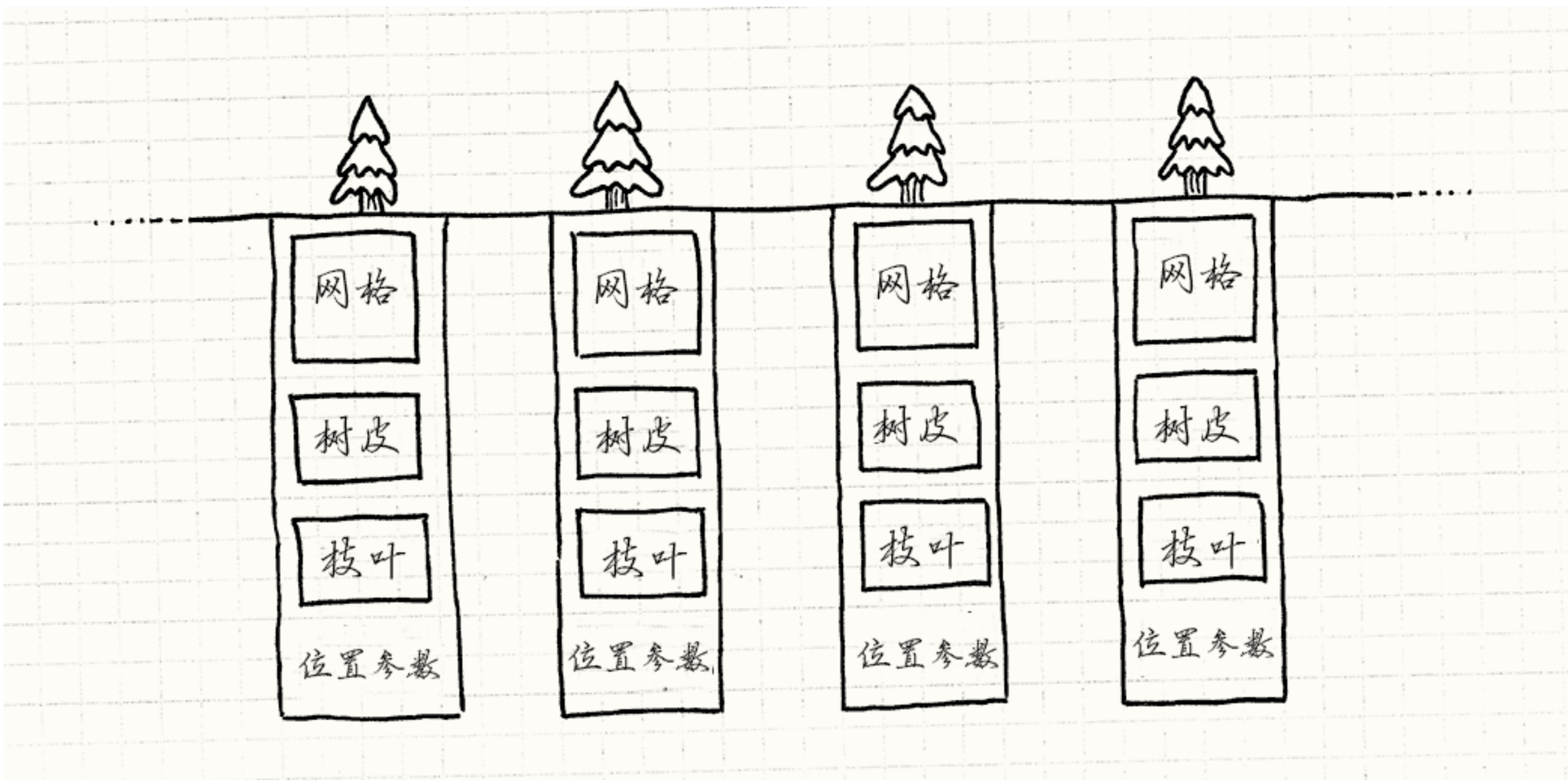
如果用代码表示，那么会得到这样的东西：

```
class Tree
{
private:
  Mesh mesh_;
  Texture bark_;
  Texture leaves_;
  Vector position_;
  double height_;
  double thickness_;
  Color barkTint_;
  Color leafTint_;
};
```

这是一大堆数据，多边形网格和纹理体积非常大。 描述整个森林的对象在一帧的时间就交给GPU是太过了。 幸运的是，有一种老办法来处理它。

关键点在于，哪怕森林里有千千万万的树，它们大多数长得一模一样。 它们使用了相同的网格和纹理。 这意味着这些树的实例的大部分字段是*一样的*。

你要么是疯了，要么是亿万富翁，才能让美术给整个森林的每棵树建一个独立模型。



注意每一棵树的小盒子中的东西都是一样的。

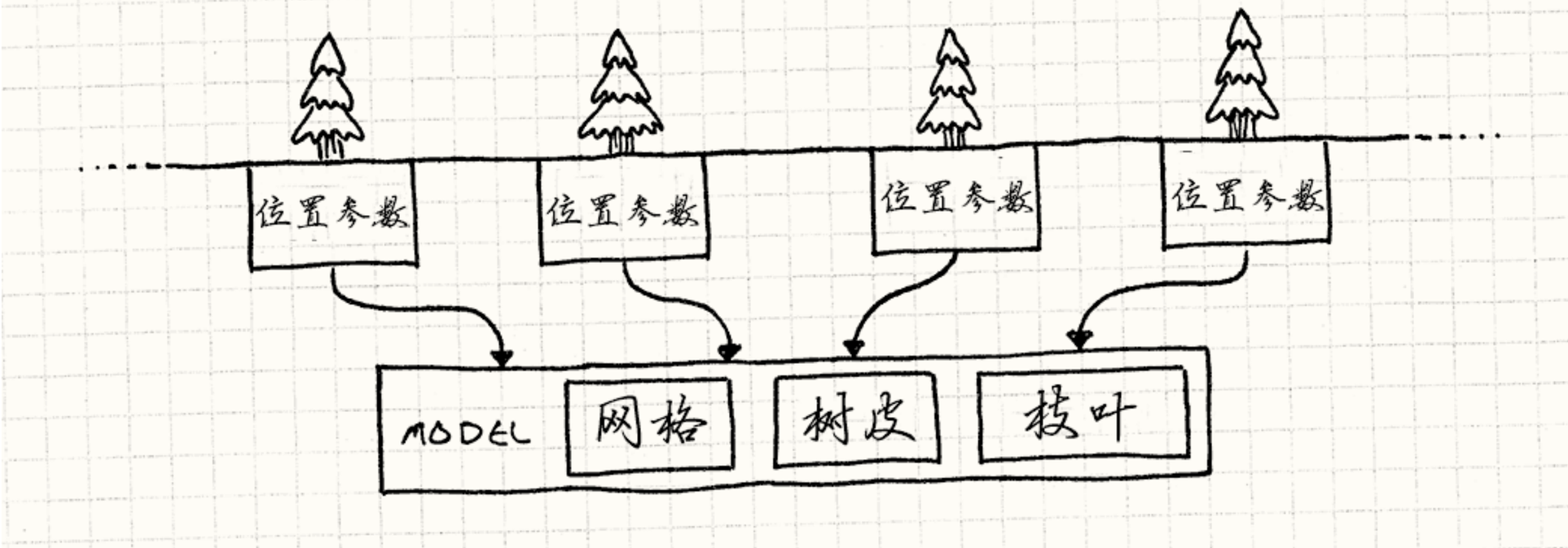
我们可以通过显式将对象切为两部分来更加明确地模拟。 第一，将树共有的数据拿出来分离到另一个类中：

```
class TreeModel
{
private:
  Mesh mesh_;
  Texture bark_;
  Texture leaves_;
};
```

游戏只需要一个这种类， 因为没有必要在内存中把相同的网格和纹理重复一千遍。 每个游戏世界中树的实例只需有一个对这个共享`TreeModel`的*引用*。 留在`Tree`中的是那些实例相关的数据：

```
class Tree
{
private:
  TreeModel* model_;

  Vector position_;
  double height_;
  double thickness_;
  Color barkTint_;
  Color leafTint_;
};
```

你可以将其想象成这样：



这有点像类型对象模式。 两者都涉及将一个类中的状态委托给另外的类，来达到在不同实例间分享状态的目的。 但是，这两种模式背后的意图不同。

使用类型对象，目标是通过将类型引入对象模型，减少需要定义的类。 伴随而来的内容分享是额外的好处。享元模式则是纯粹的为了效率。

把所有的东西都存在主存里没什么问题，但是这对渲染也毫无帮助。 在森林到屏幕上之前，它得先到GPU。我们需要用显卡可以识别的方式共享数据。

一千个实例

为了减少需要推送到GPU的数据量，我们想把共享的数据——`TreeModel`——只发送一次。然后，我们分别发送每个树独特的数据——位置，颜色，大小。 最后，我们告诉GPU，“使用同一模型渲染每个实例”。

幸运的是，今日的图形接口和显卡正好支持这一点。 这些细节繁琐且超出了这部书的范围，但是Direct3D和OpenGL都可以做*实例渲染*。

在这些API中，你需要提供两部分数据流。 第一部分是一块需要渲染多次的共同数据——在例子中是树的网格和纹理。 第二部分是实例的列表以及绘制第一部分时需要使用的参数。 然后调用一次渲染，绘制整个森林。

这个API是由显卡直接实现，意味着享元模式也许是唯一的有硬件支持的GoF设计模式。

享元模式

好了，我们已经看了一个具体的例子，下面我介绍模式的通用部分。 享元，就像它名字暗示的那样， 当你需要共享类时使用，通常是因为你有太多这种类了。

实例渲染时，每棵树通过总线送到GPU消耗的更多的是*时间*而非内存，但是基本要点是一样的。

这个模式通过将对象的数据分为两种来解决这个问题。 第一种数据没有特定指明是哪个对象的*实例*，因此可以在它们间分享。 Gof称之为*固有*状态，但是我更喜欢将其视为“上下文无关”部分。 在这里的例子中，是树的网格和纹理。

数据的剩余部分是*变化*状态，那些每个实例独一无二的东西。 在这个例子中，是每棵树的位置，拉伸和颜色。 就像这里的示例代码块一样，这种模式通过在每个对象出现时共享一份固有状态，来节约内存。

就目前而言，这看上去像是基础的资源共享，很难被称为一种模式。 部分原因是在这个例子中，我们可以为共享状态划出一个清晰的*身份*：`TreeModel`。

我发现，当共享对象没有有效定义的实体时，使用这种模式就不那么明显（使用它也就越发显得精明）。 在那些情况下，这看上去是一个对象同时被魔术般的分配到了多个地方。 让我展示给你另外一个例子。

扎根之所

这些树长出来的地方也需要在游戏中表示。 这里可能有草，泥土，丘陵，湖泊，河流，以及其它任何你可以想到的地形。 我们*基于区块*建立地表：世界的表面被划分为由微小区块组成的巨大网格。 每个区块都由一种地形覆盖。

每种地形类型都有一系列特性会影响游戏玩法：

- 决定了玩家能够多快的穿过它的移动开销。
- 表明能否用船穿过的水域标识。
- 用来渲染它的纹理。

因为我们游戏程序员偏执于效率，我们不会在每个区块中保存这些状态。 相反，一个通用的方式是为每种地形使用一个枚举。

再怎么样，我们已经从树的例子吸取教训了。

```
enum Terrain
{
  TERRAIN_GRASS,
  TERRAIN_HILL,
  TERRAIN_RIVER
  // 其他地形
};
```

然后，世界管理巨大的网格：

```
class World
{
private:
  Terrain tiles_[WIDTH][HEIGHT];
};
```

这里我使用嵌套数组存储2D网格。 在C/C++中这样很有效率的，因为它会将所有元素打包在一起。 在Java或者其他内存管理语言中，那样做会实际给你一个数组，其中每个元素都是对数组的列的*引用*，那就不像你想要的那样内存友好了。

反正，隐藏2D网格数据结构背后的实现细节，能使代码能更好的工作。 我这里这样做只是为了让其保持简单。

为了获得区块的实际有用的数据，我们做了一些这样的事情：

```
int World::getMovementCost(int x, int y)
{
  switch (tiles_[x][y])
  {
    case TERRAIN_GRASS: return 1;
    case TERRAIN_HILL:  return 3;
    case TERRAIN_RIVER: return 2;
      // 其他地形……
  }
}

bool World::isWater(int x, int y)
{
  switch (tiles_[x][y])
  {
    case TERRAIN_GRASS: return false;
    case TERRAIN_HILL:  return false;
    case TERRAIN_RIVER: return true;
      // 其他地形……
  }
}
```

你知道我的意思了。这可行，但是我觉得很丑。 移动开销和水域标识是区块的*数据*，但这里它们散布在代码中。 更糟的是，简单地形的数据被众多方法拆开了。 如果能够将这些包裹起来就好了。毕竟，那是我们设计对象的目的。

如果我们有实际的地形*类*就好了，像这样：

```
class Terrain
{
public:
  Terrain(int movementCost,
          bool isWater,
          Texture texture)
  : movementCost_(movementCost),
    isWater_(isWater),
    texture_(texture)
  {}

  int getMovementCost() const { return movementCost_; }
  bool isWater() const { return isWater_; }
  const Texture& getTexture() const { return texture_; }

private:
  int movementCost_;
  bool isWater_;
  Texture texture_;
};
```

你会注意这里所有的方法都是`const`。这不是巧合。 由于同一对象在多处引用，如果你修改了它， 改变会同时在多个地方出现。

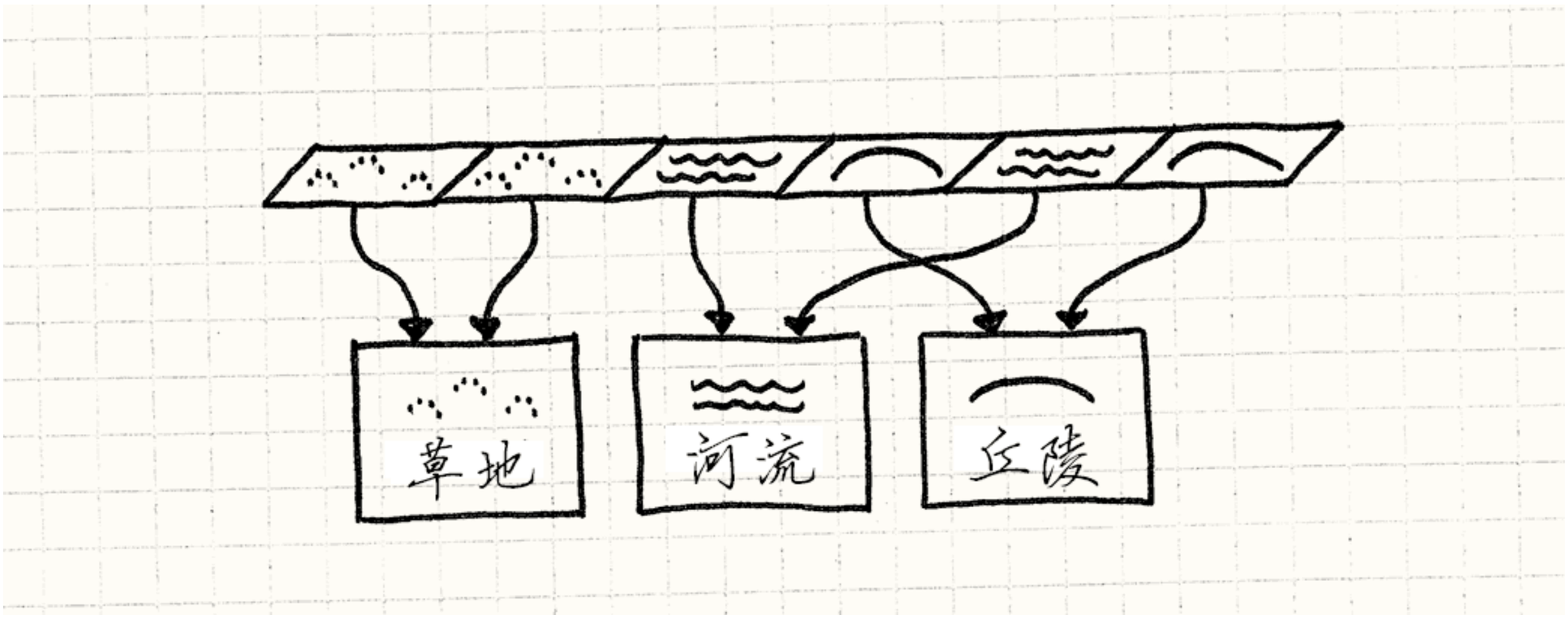
这也许不是你想要的。 通过分享对象来节约内存的这种优化，不应该影响到应用的显性行为。 因此，享元对象几乎总是不可变的。

但是我们不想为每个区块都保存一个实例。 如果你看看这个类里面，你会发现里面实际上*什么也没有*， 唯一特别的是区块在*哪里*。 用享元的术语讲，区块的*所有*状态都是“固有的”或者说“上下文无关的”。

鉴于此，我们没有必要保存多个同种地形类型。 地面上的草区块两两无异。 我们不用地形区块对象枚举构成世界网格，而是用`Terrain`对象*指针*组成网格：

```
class World
{
private:
  Terrain* tiles_[WIDTH][HEIGHT];

  // 其他代码……
};
```

每个相同地形的区块会指向相同的地形实例。



由于地形实例在很多地方使用，如果你想要动态分配，它们的生命周期会有点复杂。 因此，我们直接在游戏世界中存储它们。

```
class World
{
public:
  World()
  : grassTerrain_(1, false, GRASS_TEXTURE),
    hillTerrain_(3, false, HILL_TEXTURE),
    riverTerrain_(2, true, RIVER_TEXTURE)
  {}

private:
  Terrain grassTerrain_;
  Terrain hillTerrain_;
  Terrain riverTerrain_;

  // 其他代码……
};
```

然后我们可以像这样来描绘地面：

```
void World::generateTerrain()
{
  // 将地面填满草皮.
  for (int x = 0; x < WIDTH; x++)
  {
    for (int y = 0; y < HEIGHT; y++)
    {
      // 加入一些丘陵
      if (random(10) == 0)
      {
        tiles_[x][y] = &hillTerrain_;
      }
      else
      {
        tiles_[x][y] = &grassTerrain_;
      }
    }
  }

  // 放置河流
  int x = random(WIDTH);
  for (int y = 0; y < HEIGHT; y++) {
    tiles_[x][y] = &riverTerrain_;
  }
}
```

我承认这不是世界上最好的地形生成算法。

现在不需要`World`中的方法来接触地形属性，我们可以直接暴露出`Terrain`对象。

```
const Terrain& World::getTile(int x, int y) const
{
  return *tiles_[x][y];
}
```

用这种方式，`World`不再与各种地形的细节耦合。 如果你想要某一区块的属性，可直接从那个对象获得：

```
int cost = world.getTile(2, 3).getMovementCost();
```

我们回到了操作实体对象的API，几乎没有额外开销——指针通常不比枚举大。

性能如何?

我在这里说几乎，是因为性能偏执狂肯定会想要知道它和枚举比起来如何。 通过解引用指针获取地形需要一次间接跳转。 为了获得移动开销这样的地形数据，你首先需要跟着网格中的指针找到地形对象， 然后再找到移动开销。跟踪这样的指针会导致缓存不命中，降低运行速度。

对于更多指针追逐和缓存不命中，看看数据局部性这章。

就像往常一样，优化的金科玉律是*需求优先*。 现代计算机硬件过于复杂，性能只是游戏的一个考虑方面。 在我这章做的测试中，享元较枚举没有什么性能的优势。 享元实际上明显更快。但是这完全取决于内存中的事物是如何排列的。

我*可以*自信使用享元对象而不会搞到不可收拾。 它给了你面向对象的优势，而且没有产生一堆对象。 如果你创建了一个枚举，又在它上面做了很多分支跳转，考虑一下这个模式吧。 如果你担心性能，在把代码编程为难以维护的风格之前，至少先做些性能分析。

参见

- 在区块的例子中，我们只是为每种地形创建一个实例然后存储在`World`中。 这也许能更好找到和重用这些实例。 但是在多数情况下，你不会在一开始就创建*所有*享元。

如果你不能预料哪些是实际上需要的，最好在需要时才创建。 为了保持共享的优势，当你需要一个时，首先看看是否已经创建了一个相同的实例。 如果确实如此，那么只需返回那个实例。

这通常意味需要将构造函数封装在查询对象是否存在的接口之后。 像这样隐藏构造指令是工厂方法的一个例子。

- 为了返回一个早先创建的享元，需要追踪那些已经实例化的对象池。 正如其名，这意味着对象池是存储它们的好地方。
- 当使用状态模式时， 经常会出现一些没有任何特定字段的“状态对象”。 这个状态的标识和方法都很有用。 在这种情况下，你可以使用这个模式，然后在不同的状态机上使用相同的对象实例。

观察者模式

游戏设计模式Design Patterns Revisited

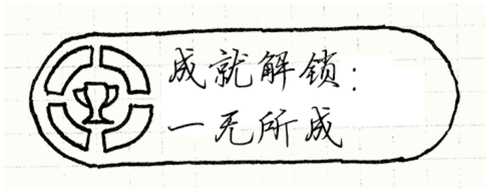
随便打开电脑中的一个应用，很有可能它就使用了MVC架构， 而究其根本，是因为观察者模式。 观察者模式应用广泛，Java甚至将其放到了核心库之中（`java.util.Observer`），而C#直接将其嵌入了*语法*（`event`关键字）。

就像软件中的很多东西，MVC是Smalltalkers在七十年代创造的。 Lisp程序员也许会说其实是他们在六十年代发明的，但是他们懒得记下来。

观察者模式是应用最广泛和最广为人知的GoF模式，但是游戏开发世界与世隔绝， 所以对你来说，它也许是全新的。 假设你与世隔绝，让我给你举个形象的例子。

成就解锁

假设我们向游戏中添加了成就系统。 它存储了玩家可以完成的各种各样的成就，比如“杀死1000只猴子恶魔”，“从桥上掉下去”，或者“一命通关”。



我发誓画的这个没有第二个意思，笑。

要实现这样一个包含各种行为来解锁成就的系统是很有技巧的。 如果我们不够小心，成就系统会缠绕在代码库的每个黑暗角落。 当然，“从桥上掉落”和物理引擎相关， 但我们并不想看到的在处理撞击代码的线性代数时， 有个对`unlockFallOffBridge()`的调用是不?

这只是随口一说。 有自尊的物理程序员绝不会允许像*游戏玩法*这样的平凡之物玷污他们优美的算式。

我们喜欢的是，照旧，让关注游戏一部分的所有代码集成到一块。 挑战在于，成就在游戏的不同层面被触发。怎么解耦成就系统和其他部分呢?

这就是观察者模式出现的原因。 这让代码宣称有趣的事情发生了，*而不必关心到底是谁接受了通知。*

举个例子，有物理代码处理重力，追踪哪些物体待在地表，哪些坠入深渊。 为了实现“桥上掉落”的徽章，我们可以直接把成就代码放在那里，但那就会一团糟。 相反，可以这样做：

```
void Physics::updateEntity(Entity& entity)
{
  bool wasOnSurface = entity.isOnSurface();
  entity.accelerate(GRAVITY);
  entity.update();
  if (wasOnSurface && !entity.isOnSurface())
  {
    notify(entity, EVENT_START_FALL);
  }
}
```

它做的就是声称，“额，我不知道有谁感兴趣，但是这个东西刚刚掉下去了。做你想做的事吧。”

物理引擎确实决定了要发送什么通知，所以这并没有完全解耦。但在架构这个领域，通常只能让系统变得*更好*，而不是*完美*。

成就系统注册它自己为观察者，这样无论何时物理代码发送通知，成就系统都能收到。 它可以检查掉落的物体是不是我们的失足英雄， 他之前有没有做过这种不愉快的与桥的经典力学遭遇。 如果满足条件，就伴着礼花和炫光解锁合适的成就，而这些都无需牵扯到物理代码。

事实上，我们可以改变成就的集合或者删除整个成就系统，而不必修改物理引擎。 它仍然会发送它的通知，哪怕实际没有东西接收。

当然，如果我们永久移除成就，没有任何东西需要物理引擎的通知， 我们也同样可以移除通知代码。但是在游戏的演进中，最好保持这里的灵活性。

它如何运作

如果你还不知道如何实现这个模式，你可能可以从之前的描述中猜到，但是为了减轻你的负担，我还是过一遍代码吧。

观察者

我们从那个需要知道别的对象做了什么事的类开始。 这些好打听的对象用如下接口定义：

```
class Observer
{
public:
  virtual ~Observer() {}
  virtual void onNotify(const Entity& entity, Event event) = 0;
};
```

`onNotify()`的参数取决于你。这就是为什么是观察者*模式*， 而不是“可以粘贴到游戏中的真实代码”。 典型的参数是发送通知的对象和一个装入其他细节的“数据”参数。

如果你用泛型或者模板编程，你可能会在这里使用它们，但是根据你的特殊用况裁剪它们也很好。 这里，我将其硬编码为接受一个游戏实体和一个描述发生了什么的枚举。

任何实现了这个的具体类就成为了观察者。 在我们的例子中，是成就系统，所以我们可以像这样实现：

```
class Achievements : public Observer
{
public:
  virtual void onNotify(const Entity& entity, Event event)
  {
    switch (event)
    {
    case EVENT_ENTITY_FELL:
      if (entity.isHero() && heroIsOnBridge_)
      {
        unlock(ACHIEVEMENT_FELL_OFF_BRIDGE);
      }
      break;

      // 处理其他事件，更新heroIsOnBridge_变量……
    }
  }

private:
  void unlock(Achievement achievement)
  {
    // 如果还没有解锁，那就解锁成就……
  }

  bool heroIsOnBridge_;
};
```

被观察者

被观察的对象拥有通知的方法函数，用GoF的说法，那些对象被称为“主题”。 它有两个任务。首先，它有一个列表，保存默默等它通知的观察者：

```
class Subject
{
private:
  Observer* observers_[MAX_OBSERVERS];
  int numObservers_;
};
```

在真实代码中，你会使用动态大小的集合而不是一个定长数组。 在这里，我使用这种最基础的形式是为了那些不了解C++标准库的人们。

重点是被观察者暴露了公*开的*API来修改这个列表：

```
class Subject
{
public:
  void addObserver(Observer* observer)
  {
    // 添加到数组中……
  }

  void removeObserver(Observer* observer)
  {
    // 从数组中移除……
  }

  // 其他代码……
};
```

这就允许了外界代码控制谁接收通知。 被观察者与观察者交流，但是不与它们*耦合*。 在我们的例子中，没有一行物理代码会提及成就。 但它仍然可以与成就系统交流。这就是这个模式的聪慧之处。

被观察者有一*列表*观察者而不是单个观察者也是很重要的。 这保证了观察者不会相互干扰。 举个例子，假设音频引擎也需要观察坠落事件来播放合适的音乐。 如果客体只支持单个观察者，当音频引擎注册时，就会*取消*成就系统的注册。

这意味着这两个系统需要相互交互——而且是用一种极其糟糕的方式， 第二个注册时会使第一个的注册失效。 支持一列表的观察者保证了每个观察者都是被独立处理的。 就它们各自的视角来看，自己是这世界上唯一看着被观察者的。

被观察者的剩余任务就是发送通知：

```
class Subject
{
protected:
  void notify(const Entity& entity, Event event)
  {
    for (int i = 0; i < numObservers_; i++)
    {
      observers_[i]->onNotify(entity, event);
    }
  }

  // 其他代码.....
};
```

注意，代码假设了观察者不会在它们的`onNotify()`方法中修改观察者列表。 更加可靠的实现方法会阻止或优雅地处理这样的并发修改。

可被观察的物理系统

现在，我们只需要给物理引擎和这些挂钩，这样它可以发送消息， 成就系统可以和引擎连线来接受消息。 我们按照传统的*设计模式*方法实现，继承`Subject`：

```
class Physics : public Subject
{
public:
  void updateEntity(Entity& entity);
};
```

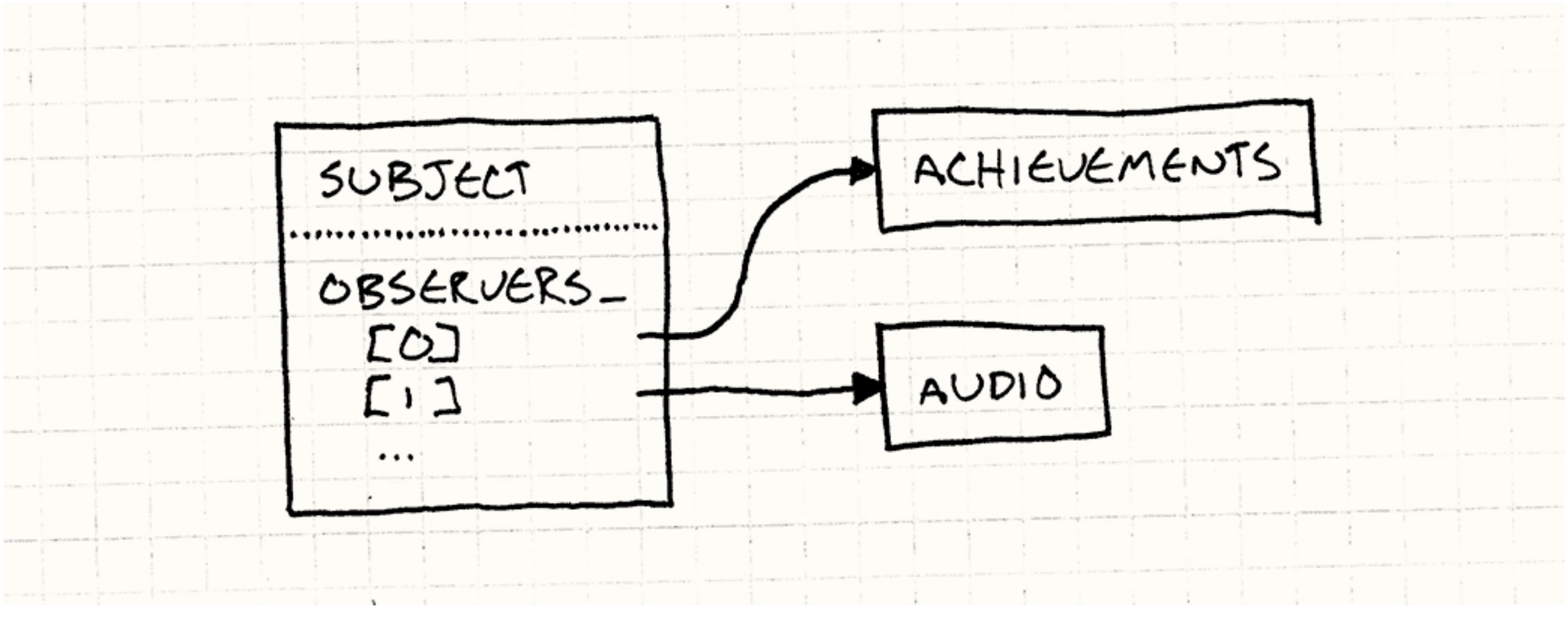
这让我们将`notify()`实现为了`Subject`内的保护方法。 这样派生的物理引擎类可以调用并发送通知，但是外部的代码不行。 同时，`addObserver()`和`removeObserver()`是公开的，所以任何可以接触物理引擎的东西都可以观察它。

在真实代码中，我会避免使用这里的继承。 相反，我会让`Physics` *有* 一个`Subject`的实例。 不再是观察物理引擎本身，被观察的会是独立的“下落事件”对象。 观察者可以用像这样注册它们自己：

```
physics.entityFell()
  .addObserver(this);
```

对我而言，这是“观察者”系统与“事件”系统的不同之处。 使用前者，你观察*做了有趣事情的事物*。 使用后者，你观察的对象代表了*发生的有趣事情*。

现在，当物理引擎做了些值得关注的东西，它调用`notify()`，就像之前的例子。 它遍历了观察者列表，通知所有观察者。



很简单，对吧？只要一个类管理一列表指向接口实例的指针。 难以置信的是，如此直观的东西是无数程序和应用框架交流的主心骨。

观察者模式不是完美无缺的。当我问其他程序员怎么看，他们提出了一些抱怨。 让我们看看可以做些什么来处理这些抱怨。

太慢了

我经常听到这点，通常是从那些不知道模式具体细节的程序员那里。 他们有一种假设，任何东西只要沾到了“设计模式”，那么一定包含了一堆类，跳转和浪费CPU循环其他行为。

观察者模式的名声特别坏，一些坏名声的事物与它如影随形， 比如“事件”，“消息”，甚至“数据绑定”。 其中的一些系统*确实会*慢。（通常是故意的，出于好的意图）。 他们使用队列，或者为每个通知动态分配内存。

这就是为什么我认为设计模式文档化很重要。 当我们没有统一的术语，我们就失去了简洁明确表达的能力。 你说“观察者”，我以为是“事件”，他以为是“消息”， 因为没人花时间记下差异，也没人阅读。

而那就是在这本书中我要做的。 本书中也有一章关于事件和消息：事件队列.

现在你看到了模式是如何真正被实现的， 你知道事实并不如他们所想的这样。 发送通知只需简单地遍历列表，调用一些虚方法。 是的，这比静态调用慢一点，除非是性能攸关的代码，否则这点消耗都是微不足道的。

我发现这个模式在代码性能瓶颈以外的地方能有很好的应用， 那些你可以承担动态分配消耗的地方。 除那以外，使用它几乎毫无限制。 我们不必为消息分配对象，也无需使用队列。这里只多了一个用在同步方法调用上的额外跳转。

太*快*?

事实上，你得小心，观察者模式*是*同步的。 被观察者直接调用了观察者，这意味着直到所有观察者的通知方法返回后， 被观察者才会继续自己的工作。观察者会阻塞被观察者的运行。

这听起来很疯狂，但在实践中，这可不是世界末日。 这只是值得注意的事情。 UI程序员——那些使用基于事件的编程的程序员已经这么干了很多年了——有句经典名言：“远离UI线程”。

如果要对事件同步响应，你需要完成响应，尽可能快的返回，这样UI就不会锁死。 当你有耗时的操作要执行时，将这些操作推到另一个线程或工作队列中去。

你需要小心地在观察者中混合线程和锁。 如果观察者试图获得被观察者拥有的锁，游戏就进入死锁了。 在多线程引擎中，你最好使用事件队列来做异步通信。

“它做了太多动态分配”

整个程序员社区——包括很多游戏开发者——转向了拥有垃圾回收机制的语言， 动态分配今昔非比。 但在像游戏这样性能攸关的软件中，哪怕是在有垃圾回收机制的语言，内存分配也依然重要。 动态分配需要时间，回收内存也需要时间，哪怕是自动运行的。

很多游戏开发者不怎么担心分配,但很担心*分页*。 当游戏需要不崩溃的连续运行多日来获得发售资格，不断增加的分页堆会影响游戏的发售。

对象池模式一章介绍了避免这点的常用技术，以及更多其他细节。

在上面的示例代码中，我使用的是定长数组，因为我想尽可能保证简单。 在真实的项目中中，观察者列表随着观察者的添加和删除而动态地增长和缩短。 这种内存的分配吓坏了一些人。

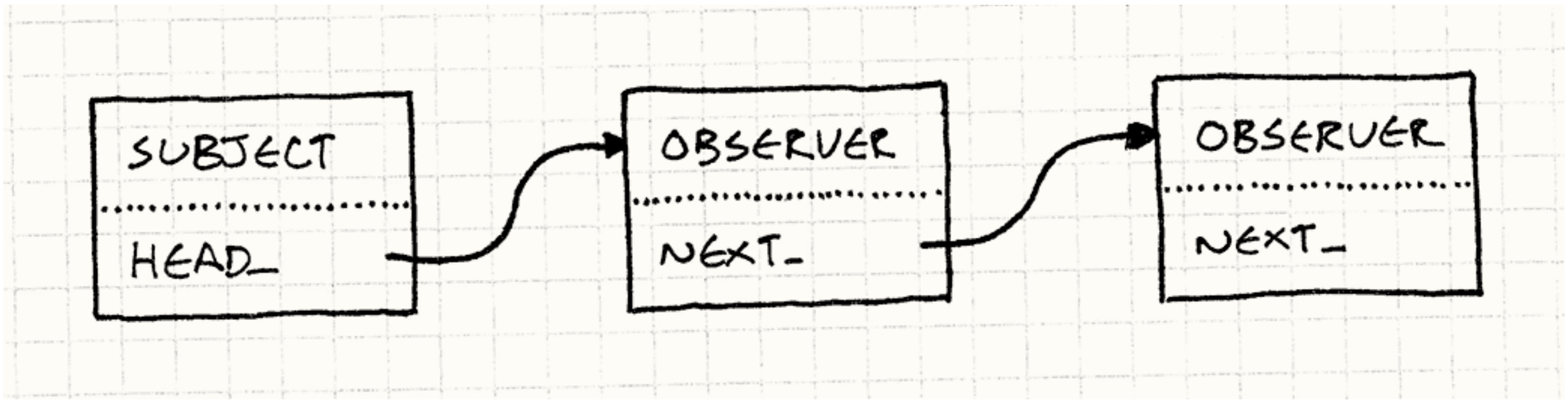
当然，第一件需要注意的事情是只在观察者加入时分配内存。 *发送* 通知无需内存分配——只需一个方法调用。 如果你在游戏一开始就加入观察者而不乱动它们，分配的总量是很小的。

如果这仍然困扰你，我会介绍一种无需任何动态分配的方式来增加和删除观察者。

链式观察者

我们现在看到的所有代码中，`Subject`拥有一列指针指向观察它的`Observer`。 `Observer`类本身没有对这个列表的引用。 它是纯粹的虚接口。优先使用接口，而不是有状态的具体类，这大体上是一件好事。

但是如果我们*确实*愿意在`Observer`中放一些状态， 我们可以将观察者的列表分布到*观察者自己*中来解决动态分配问题。 不是被观察者保留一列表分散的指针，观察者对象本身成为了链表中的一部分：



为了实现这一点，我们首先要摆脱`Subject`中的数组，然后用链表头部的指针取而代之：

```
class Subject
{
  Subject()
  : head_(NULL)
  {}

  // 方法……
private:
  Observer* head_;
};
```

然后，我们在`Observer`中添加指向链表中下一观察者的指针。

```
class Observer
{
  friend class Subject;

public:
  Observer()
  : next_(NULL)
  {}

  // 其他代码……
private:
  Observer* next_;
};
```

这里我们也让`Subject`成为了友类。 被观察者拥有增删观察者的API，但是现在链表在`Observer`内部管理。 最简单的实现办法就是让被观察者类成为友类。

注册一个新观察者就是将其连到链表中。我们用更简单的实现方法，将其插到开头：

```
void Subject::addObserver(Observer* observer)
{
  observer->next_ = head_;
  head_ = observer;
}
```

另一个选项是将其添加到链表的末尾。这么做增加了一定的复杂性。 `Subject`要么遍历整个链表来找到尾部，要么保留一个单独`tail_`指针指向最后一个节点。

加在在列表的头很简单，但也有另一副作用。 当我们遍历列表给每个观察者发送一个通知， 最*新*注册的观察者最*先*接到通知。 所以如果以A，B，C的顺序来注册观察者，它们会以C，B，A的顺序接到通知。

理论上，这种还是那种方式没什么差别。 在好的观察者设计中，观察同一被观察者的两个观察者互相之间不该有任何顺序相关。 如果顺序*确实*有影响，这意味着这两个观察者有一些微妙的耦合，最终会害了你。

让我们完成删除操作：

```
void Subject::removeObserver(Observer* observer)
{
  if (head_ == observer)
  {
    head_ = observer->next_;
    observer->next_ = NULL;
    return;
  }

  Observer* current = head_;
  while (current != NULL)
  {
    if (current->next_ == observer)
    {
      current->next_ = observer->next_;
      observer->next_ = NULL;
      return;
    }

    current = current->next_;
  }
}
```

如你所见，从链表移除一个节点通常需要处理一些丑陋的特殊情况，应对头节点。 还可以使用指针的指针，实现一个更优雅的方案。

我在这里没有那么做，是因为半数看到这个方案的人都迷糊了。 但这是一个很值得做的练习：它能帮助你深入思考指针。

因为使用的是链表，所以我们得遍历它才能找到要删除的观察者。 如果我们使用普通的数组，也得做相同的事。 如果我们使用*双向*链表，每个观察者都有指向前面和后面的指针，就可以用常量时间移除观察者。在实际项目中，我会这样做。

剩下的事情只有发送通知了，这和遍历列表同样简单；

```
void Subject::notify(const Entity& entity, Event event)
{
  Observer* observer = head_;
  while (observer != NULL)
  {
    observer->onNotify(entity, event);
    observer = observer->next_;
  }
}
```

这里，我们遍历了整个链表，通知了其中每一个观察者。 这保证了所有的观察者相互独立并有同样的优先级。

我们可以这样实现，当观察者接到通知，它返回了一个标识，表明被观察者是否应该继续遍历列表。 如果这样做，你就接近了职责链模式。

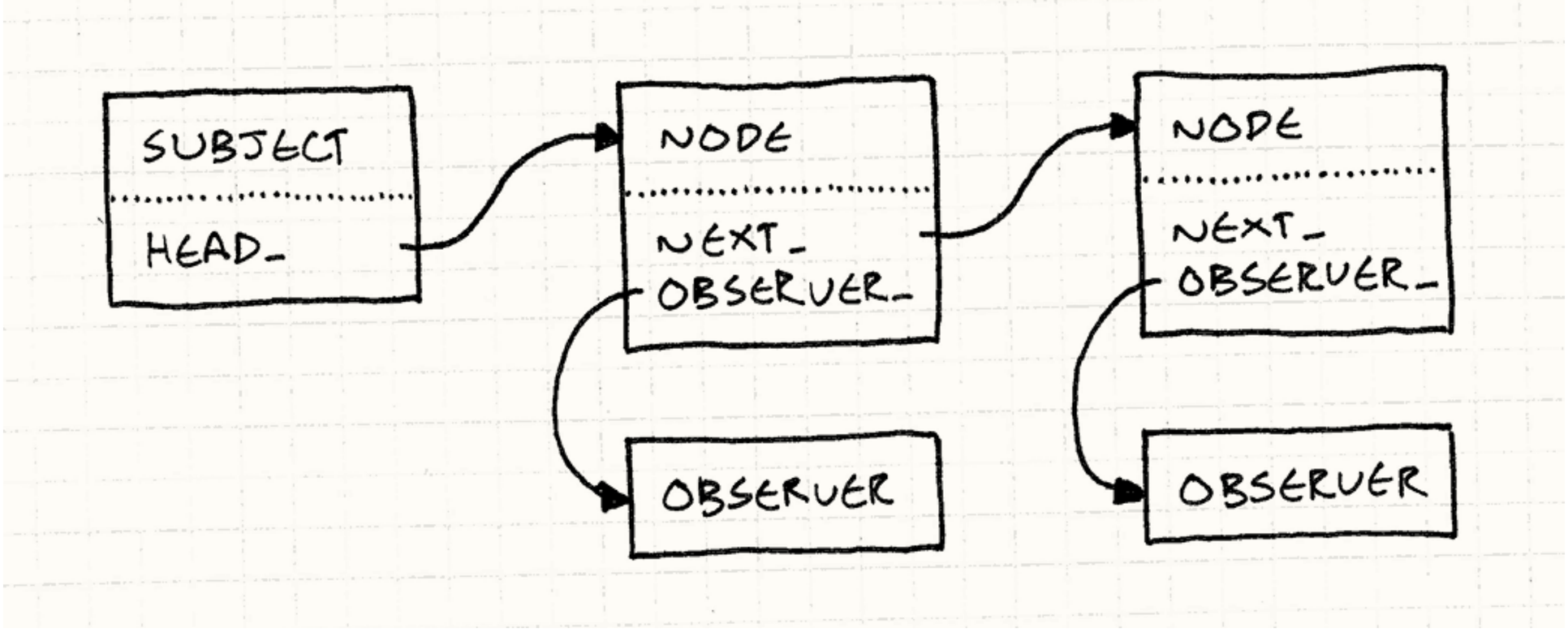
不差嘛，对吧？被观察者现在想有多少观察者就有多少观察者，无需动态内存。 注册和取消注册就像使用简单数组一样快。 但是，我们牺牲了一些小小的功能特性。

由于我们使用观察者对象作为链表节点，这暗示它只能存在于一个观察者链表中。 换言之，一个观察者一次只能观察一个被观察者。 在传统的实现中，每个被观察者有独立的列表，一个观察者同时可以存在于多个列表中。

你也许可以接受这一限制。 通常是一个*被观察者*有多个*观察者*，反过来就很少见了。 如果这*真是*一个问题，这里还有一种不必使用动态分配的解决方案。 详细介绍的话，这章就太长了，但我会大致描述一下，其余的你可以自行填补……

链表节点池

就像之前，每个被观察者有一链表的观察者。 但是，这些链表节点不是观察者本身。 相反，它们是分散的小“链表节点”对象， 包含了指向观察者的指针和指向链表下一节点的指针。



由于多个节点可以指向同一观察者，这就意味着观察者可以同时在超过多个被观察者的列表中。 我们可以同时观察多个对象了。

链表有两种风格。学校教授的那种，节点对象包含数据。 在我们之前的观察者链表的例子中，是另一种： *数据*（这个例子中是观察者）包含了*节点*（`next_`指针）。

后者的风格被称为“侵入式”链表，因为在对象内部使用链表侵入了对象本身的定义。 侵入式链表灵活性更小，但如我们所见，也更有效率。 在Linux核心这样的地方这种风格很流行。

避免动态分配的方法很简单：由于这些节点都是同样大小和类型， 可以预先在对象池中分配它们。 这样你只需处理固定大小的列表节点，可以随你所需使用和重用， 而无需牵扯到真正的内存分配器。

剩余的问题

我认为三个该模式将人们吓阻的主要问题已经被搞定了。 它简单，快速，对内存管理友好。 但是这意味着你总该使用观察者吗?

现在，这是另一个的问题。 就像所有的设计模式，观察者模式不是万能药。 哪怕可以正确高效的实现，它也不一定是好的解决方案。 设计模式有坏名声的原因之一就是人们将好模式用在错问题上，得到了糟糕的结果。

还有两个挑战，一个是关于技术，另一个更偏向是可维护性。 我们先处理关于技术的挑战，因为关于技术的问题总是更容易处理。

销毁被观察者和观察者

我们看到的样例代码健壮可用，但有一个严重的副作用： 当删除一个被观察者或观察者时会发生什么？ 如果你不小心的在某些观察者上面调用了`delete`，被观察者也许仍然持有指向它的指针。 那是一个指向一片已释放区域的悬挂指针。 当被观察者试图发送一个通知，额……就说发生的事情会出乎你的意料之外吧。

不是谴责，但我注意到*设计模式*完全没提这个问题。

删除被观察者更容易些，因为在大多数实现中，观察者没有对它的引用。 但是即使这样，将被观察者所占的字节直接回收也许会造成一些问题。 这些观察者也许仍然期待在以后收到通知，而这是不可能的了。 它们没法继续观察了，真的，它们只是认为它们可以。

你可以用好几种方式处理这点。 最简单的就是像我做的那样，以后一脚踩空。 在被删除时取消注册是观察者的职责。 多数情况下，观察者*确实*知道它在观察哪个被观察者， 所以通常需要做的只是给它的析构器添加一个`removeObserver()`。

通常在这种情况下，难点不在如何做，而在*记得*做。

如果在删除被观察者时，你不想让观察者处理问题，这也很好解决。 只需要让被观察者在它被删除前发送一个最终的“死亡通知”。 这样，任何观察者都可以接收到，然后做些合适的行为。

默哀，献花，挽歌……

人——哪怕是那些花费在大量时间在机器前，拥有让我们黯然失色才能的人——也是绝对地不可靠。 这就是为什么我们发明了电脑：它们不像我们那样经常犯错误。

更安全的方案是在每个被观察者销毁时，让观察者自动取消注册。 如果你在观察者基类中实现了这个逻辑，每个人不必记住就可以使用它。 这确实增加了一定的复杂度。 这意味着每个*观察者*都需要有它在观察的*被观察者*的列表。 最终维护一个双向指针。

别担心，我有垃圾回收器

你们那些装备有垃圾回收系统的孩子现在一定很洋洋自得。 觉得你不必担心这个，因为你从来不必显式删除任何东西？再仔细想想！

想象一下：你有UI显示玩家角色情况的状态，比如健康和道具。 当玩家在屏幕上时，你为其初始化了一个对象。 当UI退出时，你直接忘掉这个对象，交给GC清理。

每当角色脸上（或者其他什么地方）挨了一拳，就发送一个通知。 UI观察到了，然后更新健康槽。很好。 当玩家离开场景，但你没有取消观察者的注册，会发生什么？

UI界面不再可见，但也不会进入垃圾回收系统，因为角色的观察者列表还保存着对它的引用。 每一次场景加载后，我们给那个不断增长的观察者列表添加一个新实例。

玩家玩游戏时，来回跑动，打架，角色的通知发送给*所有*的界面。 它们不在屏幕上，但它们接受通知，这样就浪费CPU循环在不可见的UI元素上了。 如果它们会播放声音之类的，这样的错误就会被人察觉。

这在通知系统中非常常见，甚至专门有个名字：*失效监听者问题*。 由于被观察者保留了对观察者的引用，最终有UI界面对象僵死在内存中。 这里的教训是要及时删除观察者。

它甚至有专门的维基条目。

然后呢?

观察者的另一个深层次问题是它意图直接导致的。 我们使用它是因为它帮助我们放松了两块代码之间的耦合。 它让观察者与没有静态绑定的观察者间接交流。

当你要理解被观察者的行为时，这很有价值，任何不相关的事情都是在分散注意力。 如果你在处理物理引擎，你根本不想要编辑器——或者你的大脑——被一堆成就系统的东西而搞糊涂。

另一方面，如果你的程序没能运行，漏洞散布在多个观察者之间，理清信息流变得更加困难。 显式耦合中更易于查看哪一个方法被调用了。 这是因为耦合是静态的，IDE分析它轻而易举。

但是如果耦合发生在观察者列表中，想要知道哪个观察者被通知到了，唯一的办法是看看哪个观察者在列表中，而且*处于运行中*。 不再是理清程序的*静态*交流结构，你得理清它的*命令式，动态*行为。

如何处理这个的指导原则很简单。 如果为了理解程序的一部分，两个交流的模块*都*需要考虑， 那就不要使用观察者模式，使用其他更加显式的东西。

当你在某些大型程序上用黑魔法时，你会感觉这样处理很笨拙。 我们有很多术语用来描述，比如“关注点分离”，“一致性和内聚性”和“模块化”， 总归就是“这些东西待在一起，而不是与那些东西待在一起。”

观察者模式是一个让这些不相关的代码块互相交流，而不必打包成更大块的好方法。 这在专注于一个特性或层面的单一代码块*内*不会太有用。

这就是为什么它能很好地适应我们的例子： 成就和物理是几乎完全不相干的领域，通常被不同人实现。 我们想要它们之间的交流最小化， 这样无论在哪一个上工作都不需要另一个的太多信息。

今日观察者

*设计模式*源于1994。 那时候，面向对象语言*正是* 热门的编程范式。 每个程序员都想要“30天学会面向对象编程”， 中层管理员根据程序员创建类的数量为他们支付工资。 工程师通过继承层次的深度评价代码质量。

同一年，Ace of Base的畅销单曲发行了*三首*而不是一首，这也许能让你了解一些我们那时的品味和洞察力。

观察者模式在那个时代中很流行，所以构建它需要很多类就不奇怪了。 但是现代的主流程序员更加适应函数式语言。 实现一整套接口只是为了接受一个通知不再符合今日的美学了。

它看上去是又沉重又死板。它*确实*又沉重又死板。 举个例子，在观察者类中，你不能为不同的被观察者调用不同通知方法。

这就是为什么被观察者经常将自身传给观察者。 观察者只有单一的`onNotify()`方法， 如果它观察多个被观察者，它需要知道哪个被观察者在调用它的方法。

现代的解决办法是让“观察者”只是对方法或者函数的引用。 在函数作为第一公民的语言中，特别是那些有闭包的， 这种实现观察者的方式更为普遍。

今日，几乎*每种*语言都有闭包。C++克服了在没有垃圾回收的语言中构建闭包的挑战， 甚至是Java都在JDK8中引入了闭包。

举个例子，C#有“事件”嵌在语言中。 通过这样，观察者是一个“委托”， （“委托”是方法的引用在C#中的术语）。 在JavaScript事件系统中，观察者*可以*是支持了特定`EventListener`协议的类， 但是它们也可以是函数。 后者是人们常用的方式。

如果设计今日的观察者模式，我会让它基于函数而不是基于类。 哪怕是在C++中，我倾向于让你注册一个成员函数指针作为观察者，而不是`Observer`接口的实例。

这里的一篇有趣博文以某种方式在C++上实现了这一点。

明日观察者

事件系统和其他类似观察者的模式如今遍地都是。 它们都是成熟的方案。 但是如果你用它们写一个稍微大一些的应用，你会发现一件事情。 在观察者中很多代码最后都长得一样。 通常是这样：

1. 获知有状态改变了。
2. 下命令改变一些UI来反映新的状态。

就是这样，“哦，英雄的健康现在是7了？让我们把血条的宽度设为70像素。 过上一段时间，这会变得很沉闷。 计算机科学学术界和软件工程师已经用了*很长*时间尝试结束这种状况了。 这些方式被赋予了不同的名字：“数据流编程”，“函数反射编程”等等。

即使有所突破，一般也局限在特定的领域中，比如音频处理或芯片设计，我们还没有找到万能钥匙。 与此同时，一个更脚踏实地的方式开始获得成效。那就是现在的很多应用框架使用的“数据绑定”。

不像激进的方式，数据绑定不再指望完全终结命令式代码， 也不尝试基于巨大的声明式数据图表架构整个应用。 它做的只是自动改变UI元素或计算某些数值来反映一些值的变化。

就像其他声明式系统，数据绑定也许太慢，嵌入游戏引擎的核心也太复杂。 但是如果说它不会侵入游戏不那么性能攸关的部分，比如UI，那我会很惊讶。

与此同时，经典观察者模式仍然在那里等着我们。 是的，它不像其他的新热门技术一样在名字中填满了“函数”“反射”， 但是它超简单而且能正常工作。对我而言，这通常是解决方案最重要的条件。

原型模式

游戏设计模式Design Patterns Revisited

我第一次听到“原型”这个词是在*设计模式*中。 如今，似乎每个人都在用这个词，但他们讨论的实际不是设计模式。 我们会讨论他们所说的原型，也会讨论术语“原型”的有趣之处，和其背后的理念。 但首先，让我们重访传统的设计模式。

“传统的”一词可不是随便用的。 *设计模式*引自*1963年* Ivan Sutherland的Sketchpad传奇项目，那是这个模式首次出现。 当其他人在听迪伦和甲壳虫乐队时，Sutherland正忙于，你知道的，发明CAD，交互图形和面向对象编程的基本概念。

看看这个demo，跪服吧。

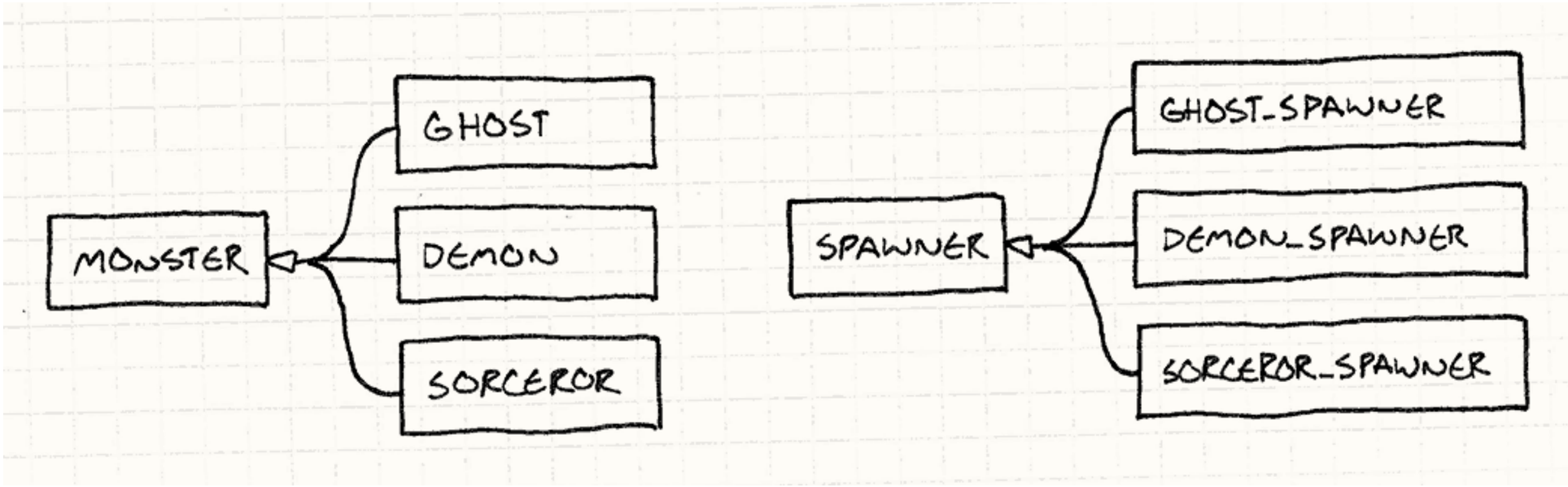
原型设计模式

假设我们要用《圣铠传说》的风格做款游戏。 野兽和恶魔围绕着英雄，争着要吃他的血肉。 这些可怖的同行者通过“生产者”进入这片区域，每种敌人有不同的生产者。

在这个例子中，假设我们游戏中每种怪物都有不同的类——`Ghost`，`Demon`，`Sorcerer`等等，像这样：

```
class Monster
{
  // 代码……
};

class Ghost : public Monster {};
class Demon : public Monster {};
class Sorcerer : public Monster {};
```

生产者构造特定种类怪物的实例。 为了在游戏中支持每种怪物，我们*可以*用一种暴力的实现方法， 让每个怪物类都有生产者类，得到平行的类结构：



我得翻出落满灰尘的UML书来画这个图表。 代表“继承”。

实现后看起来像是这样：

```
class Spawner
{
public:
  virtual ~Spawner() {}
  virtual Monster* spawnMonster() = 0;
};

class GhostSpawner : public Spawner
{
public:
  virtual Monster* spawnMonster()
  {
    return new Ghost();
  }
};

class DemonSpawner : public Spawner
{
public:
  virtual Monster* spawnMonster()
  {
    return new Demon();
  }
};

// 你知道思路了……
```

除非你会根据代码数量来获得工资， 否则将这些焊在一起很明显不是好方法。 众多类，众多引用，众多冗余，众多副本，众多重复自我……

原型模式提供了一个解决方案。 关键思路是*一个对象可以产出与它自己相近的对象*。 如果你有一个恶灵，你可以制造更多恶灵。 如果你有一个恶魔，你可以制造其他恶魔。 任何怪物都可以被视为*原型*怪物，产出其他版本的自己。

为了实现这个功能，我们给基类`Monster`一个抽象方法`clone()`：

```
class Monster
{
public:
  virtual ~Monster() {}
  virtual Monster* clone() = 0;

  // 其他代码……
};
```

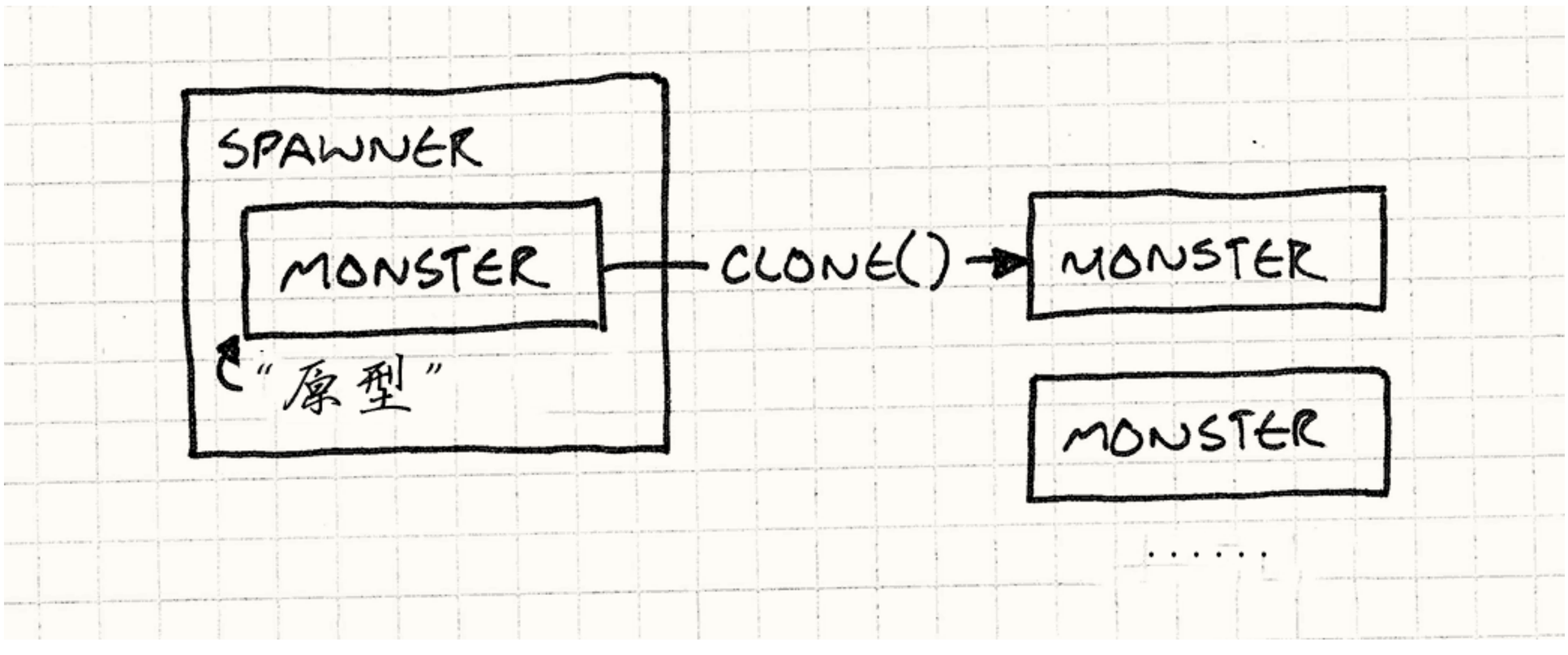
每个怪兽子类提供一个特定实现，返回与它自己的类和状态都完全一样的新对象。举个例子：

```
class Ghost : public Monster {
public:
  Ghost(int health, int speed)
  : health_(health),
    speed_(speed)
  {}

  virtual Monster* clone()
  {
    return new Ghost(health_, speed_);
  }

private:
  int health_;
  int speed_;
};
```

一旦我们所有的怪物都支持这个， 我们不再需要为每个怪物类创建生产者类。我们只需定义一个类:

```
class Spawner
{
public:
  Spawner(Monster* prototype)
  : prototype_(prototype)
  {}

  Monster* spawnMonster()
  {
    return prototype_->clone();
  }

private:
  Monster* prototype_;
};
```

它内部存有一个怪物，一个隐藏的怪物， 它唯一的任务就是被生产者当做模板，去产生更多一样的怪物， 有点像一个从来不离开巢穴的蜂后。



为了得到恶灵生产者，我们创建一个恶灵的原型实例，然后创建拥有这个实例的生产者：

```
Monster* ghostPrototype = new Ghost(15, 3);
Spawner* ghostSpawner = new Spawner(ghostPrototype);
```

这个模式的灵巧之处在于它不但拷贝原型的*类*，也拷贝它的*状态*。 这就意味着我们可以创建一个生产者，生产快速鬼魂，虚弱鬼魂，慢速鬼魂，而只需创建一个合适的原型鬼魂。

我在这个模式中找到了一些既优雅又令人惊叹的东西。 我无法想象自己是如何创造出它们的，但我更无法想象*不知道*这些东西的自己该如何是好。

效果如何?

好吧，我们不需要为每个怪物创建单独的生产者类，那很好。 但我们*确实*需要在每个怪物类中实现`clone()`。 这和使用生产者方法比起来也没节约多少代码量。

当你坐下来试着写一个正确的`clone()`，会遇见令人不快的语义漏洞。 做深层拷贝还是浅层拷贝呢？换言之，如果恶魔拿着叉子，克隆恶魔也要克隆叉子吗？

同时，这看上去没减少已存问题上的代码， 事实上还增添了些*人为的问题*。 我们需要将每个怪物有独立的类作为前提条件。 这绝对*不是*当今大多数游戏引擎运作的方法。

我们中大部分痛苦地学到，这样庞杂的类层次管理起来很痛苦， 那就是我们为什么用组件模式和类型对象为不同的实体建模，这样无需一一建构自己的类。

生产函数

哪怕我们确实需要为每个怪物构建不同的类，这里还有其他的实现方法。 不是使用为每个怪物建立分离的生产者*类*，我们可以创建生产*函数*，就像这样：

```
Monster* spawnGhost()
{
  return new Ghost();
}
```

这比构建怪兽生产者类更简洁。生产者类只需简单地存储一个函数指针：

```
typedef Monster* (*SpawnCallback)();

class Spawner
{
public:
  Spawner(SpawnCallback spawn)
  : spawn_(spawn)
  {}

  Monster* spawnMonster()
  {
    return spawn_();
  }

private:
  SpawnCallback spawn_;
};
```

为了给恶灵构建生产者，你需要做：

```
Spawner* ghostSpawner = new Spawner(spawnGhost);
```

模板

如今，大多数C++开发者已然熟悉模板了。 生产者类需要为某类怪物构建实例，但是我们不想硬编码是哪类怪物。 自然的解决方案是将它作为模板中的*类型参数*：

我不太确定程序员是学着喜欢C++模板还是完全畏惧并远离了C++。 不管怎样，今日我见到的程序员中，使用C++的也都会使用模板。

这里的`Spawner`类不必考虑将生产什么样的怪物， 它总与指向`Monster`的指针打交道。

如果我们只有`SpawnerFor<T>`类，模板类型没有办法共享父模板， 这样的话，如果一段代码需要与产生多种怪物类型的生产者打交道，就都得接受模板参数。

```
class Spawner
{
public:
  virtual ~Spawner() {}
  virtual Monster* spawnMonster() = 0;
};

template <class T>
class SpawnerFor : public Spawner
{
public:
  virtual Monster* spawnMonster() { return new T(); }
};
```

像这样使用它：

```
Spawner* ghostSpawner = new SpawnerFor<Ghost>();
```

第一公民类型

前面的两个解决方案使用类完成了需求，`Spawner`使用类型进行参数化。 在C++中，类型不是第一公民，所以需要一些改动。 如果你使用JavaScript，Python，或者Ruby这样的动态类型语言， 它们的类*是*可以传递的对象，你可以用更直接的办法解决这个问题。

某种程度上， 类型对象也是为了弥补第一公民类型的缺失。 但那个模式在拥有第一公民类型的语言中也有用，因为它让*你*决定什么是“类型”。 你也许想要与语言内建的类不同的语义。

当你完成一个生产者，直接向它传递要构建的怪物类——那个代表了怪物类的运行时对象。超容易的，对吧。

综上所述，老实说，我不能说找到了一种情景，而在这个情景下，原型*设计模式*是最好的方案。 也许你的体验有所不同，但现在把它搁到一边，我们讨论点别的：将原型作为一种*语言范式*。

原型语言范式

很多人认为“面向对象编程”和“类”是同义词。 OOP的定义却让人感觉正好相反， 毫无疑问，*OOP让你定义“对象”，将数据和代码绑定在一起。* 与C这样的结构化语言相比，与Scheme这样的函数语言相比， OOP的特性是它将状态和行为紧紧地绑在一起。

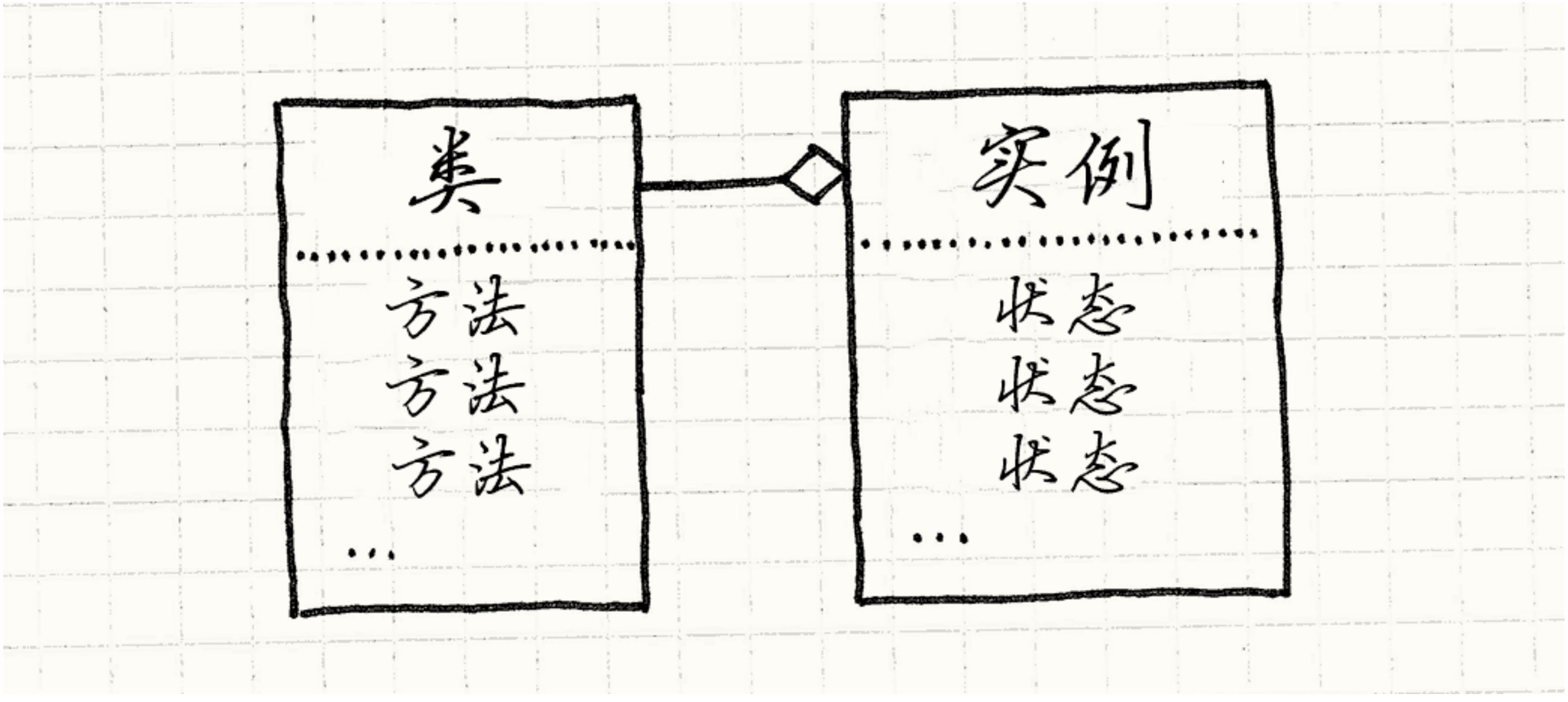
你也许认为类是完成这个的唯一方式方法， 但是包括Dave Ungar和Randall Smith的一大堆家伙一直在拼命区分OOP和类。 他们在80年代创建了一种叫做Self的语言。它不用类实现了OOP。

Self语言

就单纯意义而言，Self比基于类的语言*更加*面向对象。 我们认为OOP将状态和行为绑在一起，但是基于类的语言实际将状态和行为割裂开来。

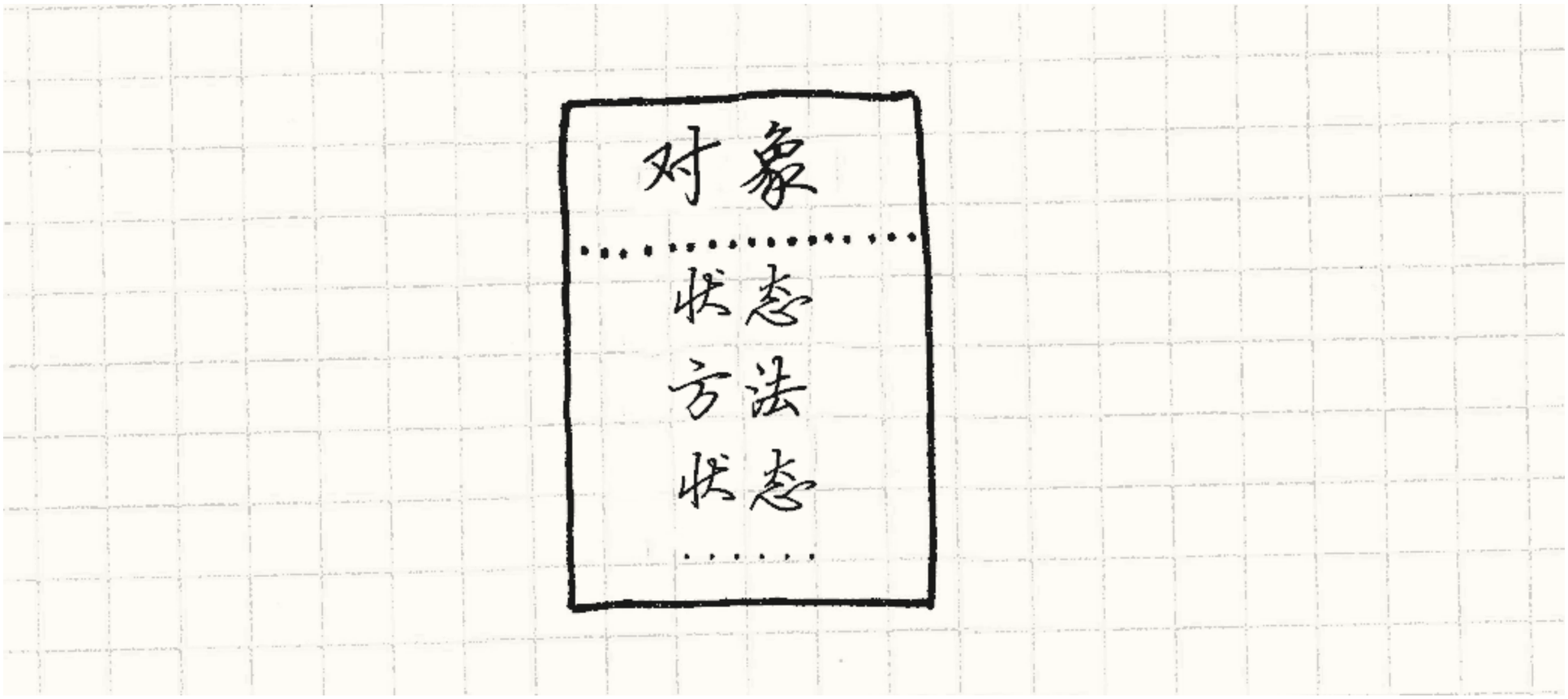
拿你最喜欢的基于类的语言的语法来说。 为了接触对象中的一些状态，你需要在实例的内存中查询。状态*包含*在实例中。

但是，为了调用方法，你需要找到实例的类， *然后在那里*调用方法。行为包含在*类*中。 获得方法总需要通过中间层，这意味着字段和方法是不同的。



举个例子，为了调用C++中的虚方法，你需要在实例中找指向虚方法表的指针，然后再在那里找方法。

Self结束了这种分歧。*无论你要找啥*，都只需在对象中找。 实例同时包含状态和行为。你可以构建拥有完全独特方法的对象。

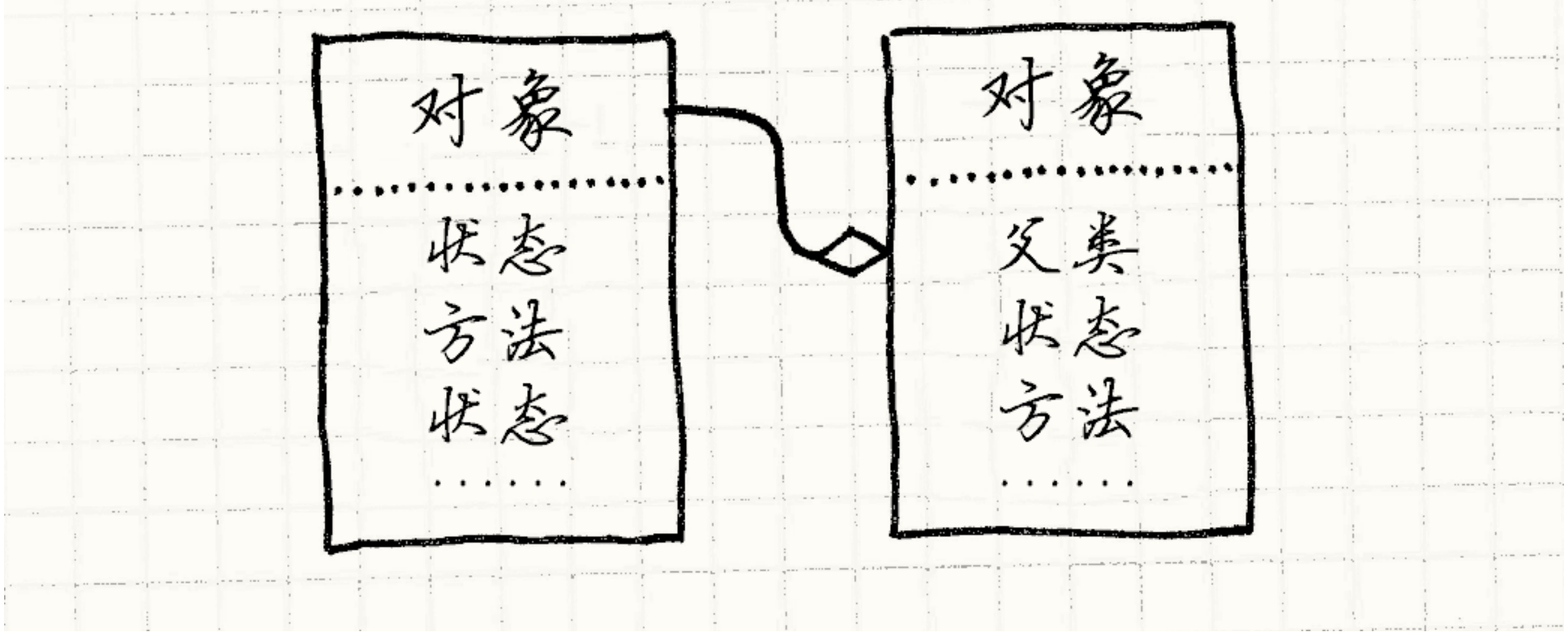


没有人能与世隔绝，但这个对象是。

如果这就是Self语言的全部，那它将很难使用。 基于类的语言中的继承，不管有多少缺陷，给了有用的机制来重用代码，避免重复。 为了不使用类而实现一些类似的功能，Self语言加入了*委托*。

如果要在对象中寻找字段或者调用方法，首先在对象内部查找。 如果能找到，那就成了。 如果找不到，在对象的*父对象*中寻找。 这里的父类仅仅是一个对其他对象的引用。 当我们没能在第一个对象中找到属性，我们尝试它的父对象，然后父类的父对象，继续下去直到找到或者没有父对象为止。 换言之，失败的查找被*委托*给对象的父对象。

我在这里简化了。Self实际上支持多个父对象。 父对象只是特别标明的字段，意味着你可以继承它们或者在运行时改变他们， 你最终得到了“动态继承”。



父对象让我们在不同对象间重用行为（还有状态！），这样就完成了类的公用功能。 类做的另一个关键事情就是给出了创建实例的方法。 当你需要新的某物，你可以直接`new Thingamabob()`，或者随便什么你喜欢的表达法。 类是实例的生产工厂。

不用类，我们怎样创建新的实例？ 特别的，我们如何创建一堆有共同点的新东西？ 就像这个设计模式，在Self中，达到这点的方式是使用*克隆*。

在Self语言中，就好像*每个*对象都自动支持原型设计模式。 任何对象都能被克隆。为了获得一堆相似的对象，你：

1. 将对象塑造成你想要的状态。你可以直接克隆系统内建的基本`Object`，然后向其中添加字段和方法。
2. 克隆它来产出……额……随你想要多少就克隆多少个对象。

无需烦扰自己实现`clone()`；我们就实现了优雅的原型模式，原型被内建在系统中。

这个系统美妙，灵巧，而且小巧， 一听说它，我就开始创建一个基于原型的语言来进一步学习。

我知道从头开始构建一种编程语言语言不是学习它最有效率的办法，但我能说什么呢？我可算是个怪人。 如果你很好奇，我构建的语言叫Finch.

它的实际效果如何?

能使用纯粹基于原型的语言让我很兴奋，但是当我真正上手时， 我发现了一个令人不快的事实：用它编程没那么有趣。

从小道消息中，我听说很多Self程序员得出了相同的结论。 但这项目并不是一无是处。 Self非常的灵活，为此创造了很多虚拟机的机制来保持高速运行。

他们发明了JIT编译，垃圾回收，以及优化方法分配——这都是由同一批人实现的—— 这些新玩意让动态类型语言能快速运行，构建了很多大受欢迎的应用。

是的，语言本身很容易实现，那是因为它把复杂度甩给了用户。 一旦开始试着使用这语言，我发现我想念基于类语言中的层次结构。 最终，在构建语言缺失的库概念时，我放弃了。

鉴于我之前的经验都来自基于类的语言，因此我的头脑可能已经固定在它的范式上了。 但是直觉上，我认为大部分人还是喜欢有清晰定义的“事物”。

除去基于类语言自身的成功以外，看看有多少游戏用类建模描述玩家角色，以及不同的敌人、物品、技能。 不是游戏中的每个怪物都与众不同，你不会看到“洞穴人和哥布林还有雪混合在一起”这样的怪物。

原型是非常酷的范式，我希望有更多人了解它， 但我很庆幸不必天天用它编程。 完全皈依原型的代码是一团浆糊，难以阅读和使用。

这同时证明，*很少*有人使用原型风格的代码。我查过了。

JavaScript又怎么样呢?

好吧，如果基于原型的语言不那么友好，怎么解释JavaScript呢？ 这是一个有原型的语言，每天被数百万人使用。运行JavaScript的机器数量超过了地球上其他所有的语言。

Brendan Eich，JavaScript的缔造者， 从Self语言中直接汲取灵感，很多JavaScript的语义都是基于原型的。 每个对象都有属性的集合，包含字段和“方法”（事实上只是存储为字段的函数）。 A对象可以拥有B对象，B对象被称为A对象的“原型”， 如果A对象的字段获取失败就会委托给B对象。

作为语言设计者，原型的诱人之处是它们比类更易于实现。 Eich充分利用了这一点，他在十天内创建了JavaScript的第一个版本。

但除那以外，我相信在实践中，JavaScript更像是基于类的而不是基于原型的语言。 一个要点是JavaScript移除了一些基

在JavaScript中没有方法来克隆一个对象。 最接近的方法是`Object.create()`，允许你创建新对象作为现有对象的委托。 这个方法在ECMAScript5中才添加，而那已是JavaScript出现后的十四年了。 相对于克隆，让我带你参观一下JavaScript中定义类和创建对象的经典方法。 我们从*构造器函数*开始：

```
function Weapon(range, damage) {
  this.range = range;
  this.damage = damage;
}
```

这创建了一个新对象，初始化了它的字段。你像这样引入它：

```
var sword = new Weapon(10, 16);
```

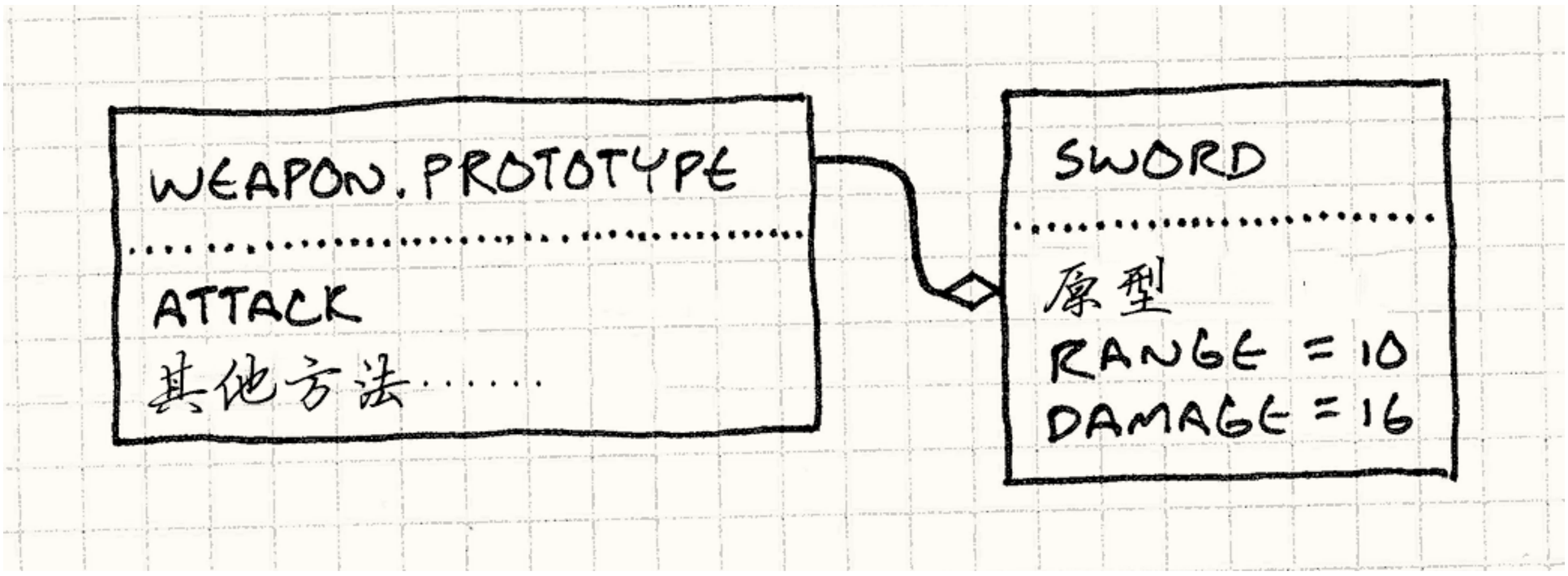
这里的`new`调用`Weapon()`函数，而`this`绑定在新的空对象上。 函数为新对象添加了一系列字段，然后返回填满的对象。

`new`也为你做了另外一件事。 当它创建那个新的空对象时，它将空对象的委托和一个原型对象连接起来。 你可以用`Weapon.prototype`来获得原型对象。

在构造器中添加属性，而通常向原型对象添加方法来定义*行为*。就像这样：

```
Weapon.prototype.attack = function(target) {
  if (distanceTo(target) > this.range) {
    console.log("Out of range!");
  } else {
    target.health -= this.damage;
  }
}
```

这给武器原型添加了`attack`属性，其值是一个函数。 由于`new Weapon()`返回的每一个对象都有给`Weapon.prototype`的委托， 你现在可以调用`sword.attack()`，这样调用那个函数。 看上去像是这样：



让我们复习一下：

- 通过“new”操作创建对象，该操作引入代表类型的对象——构造器函数。
- 状态存储在实例中。
- 行为通过间接层——原型的委托——被存储在独立的对象中，代表了一系列特定类型对象的共享方法。

说我疯了吧，但这听起来很像是我之前描述的类。 你*可以*在JavaScript中写原型风格的代码（*不用* 克隆）， 但是就语法和惯用法更推荐基于类的实现。

个人而言，我认为这是好事。 就像我说的，我发现一切都使用原型，那么很难编写代码，所以我喜欢JavaScript，它将整个核心语义包上了一层糖衣。

为数据模型构建原型

好吧，我之前不断的讨论我*不喜欢*原型的原因，这让这一章读起来令人沮丧。 我认为这本书该更欢乐些，所以在最后，让我们讨论讨论原型*确实*有用，或者更加精确，*委托*有用的地方。

随着编程的进行，如果你比较程序与数据的字节数， 那么你会发现数据的占比稳定地增长。 早期的游戏在程序中生成几乎所有东西，这样程序可以塞进磁盘和老式游戏卡带。 在今日的游戏中，代码只是驱动游戏的“引擎”，游戏是完全由数据定义的。

这很好，但是将内容推到数据文件中并不能魔术般解决组织大项目的挑战。 它只能把这挑战变得更难。 我们使用编程语言就因为它们有办法管理复杂性。

不再是将一堆代码拷来拷去，我们将其移入函数中，通过名字调用。 不再是在一堆类之间复制方法，我们将其放入单独的类中，让其他类可以继承或者组合。

当游戏数据达到一定规模时，你真的需要考虑一些相似的方案。 我不指望在这里能说清数据模式这个问题， 但我确实希望提出个思路，让你在游戏中考虑考虑：使用原型和委托来重用数据。

假设我们为早先提到的山寨版《圣铠传说》定义数据模型。 游戏设计者需要在很多文件中设定怪物和物品的属性。

这标题是我原创的，没有受到任何已存的多人地下城游戏的影响。 请不要起诉我。

一个常用的方法是使用JSON。 数据实体一般是*字典*，或者*属性集合*，或者其他什么术语，因为程序员就喜欢为旧事物发明新名字。

我们重新发明了太多次，Steve Yegge称之为“通用设计模式”.

所以游戏中的哥布林也许被定义为像这样的东西：

```
{
  "name": "goblin grunt",
  "minHealth": 20,
  "maxHealth": 30,
  "resists": ["cold", "poison"],
  "weaknesses": ["fire", "light"]
}
```

这看上去很易懂，哪怕是最讨厌文本的设计者也能使用它。 所以，你可以给哥布林大家族添加几个兄弟分支：

```
{
  "name": "goblin wizard",
  "minHealth": 20,
  "maxHealth": 30,
  "resists": ["cold", "poison"],
  "weaknesses": ["fire", "light"],
  "spells": ["fire ball", "lightning bolt"]
}

{
  "name": "goblin archer",
  "minHealth": 20,
  "maxHealth": 30,
  "resists": ["cold", "poison"],
  "weaknesses": ["fire", "light"],
  "attacks": ["short bow"]
}
```

现在，如果这是代码，我们会闻到了臭味。 在实体间有很多的重复，训练优良的程序员*讨厌*重复。 它浪费了空间，消耗了作者更多时间。 你需要仔细阅读代码才知道这些数据*是不是*相同的。 这难以维护。 如果我们决定让所有哥布林变强，需要记得将三个哥布林都更新一遍。糟糕糟糕糟糕。

如果这是代码，我们会为“哥布林”构建抽象，并在三个哥布林类型中重用。 但是无能的JSON没法这么做。所以让我们把它做得更加巧妙些。

我们可以为对象添加`"prototype"`字段，记录委托对象的名字。 如果在此对象内没找到一个字段，那去委托对象中查找。

这让`"prototype"`不再是数据，成为了*元*数据。 哥布林有绿色疣皮和黄色牙齿。 它们没有原型。 原型是*表示哥布林的数据模型*的属性，而不是哥布林本身的属性。

这样，我们可以简化我们的哥布林JSON内容：

```
{
  "name": "goblin grunt",
  "minHealth": 20,
  "maxHealth": 30,
  "resists": ["cold", "poison"],
  "weaknesses": ["fire", "light"]
}

{
  "name": "goblin wizard",
  "prototype": "goblin grunt",
  "spells": ["fire ball", "lightning bolt"]
}

{
  "name": "goblin archer",
  "prototype": "goblin grunt",
  "attacks": ["short bow"]
}
```

由于弓箭手和术士都将grunt作为原型，我们就不需要在它们中重复血量，防御和弱点。 我们为数据模型增加的逻辑超级简单——基本的单一委托——但已经成功摆脱了一堆冗余。

有趣的事情是，我们没有更进一步，把哥布林委托的*抽象*原型设置成“基本哥布林”。 相反，我们选择了最简单的哥布林，然后委托给它。

在基于原型的系统中，对象可以克隆产生新对象是很自然的， 我认为在这里也一样自然。 这特别适合记录那些只有一处不同的实体的数据。

想想Boss和其他独特的事物，它们通常是更加常见事物的重新定义， 原型委托是定义它们的好方法。 断头魔剑，就是一把拥有加成的长剑，可以像下面这样表示：

```
{
  "name": "Sword of Head-Detaching",
  "prototype": "longsword",
  "damageBonus": "20"
}
```

只需在游戏引擎上多花点时间，你就能让设计者更加方便的添加不同的武器和怪物，而这些增加的丰富赌能够取悦玩家。

单例模式

游戏设计模式Design Patterns Revisited

这个章节不同寻常。 其他章节展示如何使用某个个设计模式。 这个章节展示如何*避免*使用某个设计模式。

尽管它的意图是好的，GoF描述的单例模式通常弊大于利。 他们强调应该谨慎使用这个模式，但在游戏业界的口口相传中，这一提示经常被无视了。

就像其他模式一样，在不合适的地方使用单例模式就好像用夹板处理子弹伤口。 由于它被滥用得太严重了，这章的大部分都在讲如何*回避*单例模式， 但首先，让我们看看模式本身。

当业界从C语言迁移到面向对象的语言，他们遇到的首个问题是“如何访问实例？”他们知道有要调用的方法，但是找不到实例提供这个方法。 单例（换言之，全局化）是一条简单的解决方案。

单例模式

设计模式 像这样描述单例模式：

> 保证一个类只有一个实例，并且提供了访问该实例的全局访问点。

我们从“并且”那里将句子分为两部分，分别进行考虑。

保证一个类只有一个实例

有时候，如果类存在多个实例就不能正确的运行。 通常发生在类与保存全局状态的外部系统互动。

考虑封装文件系统的API类。 因为文件操作需要一段时间完成，所以类使用异步操作。 这就意味着可以同时运行多个操作，必须让它们相互协调。 如果一个操作创建文件，另一个操作删除同一文件，封装器类需要同时考虑，保证它们没有相互妨碍。

为了实现这点，对我们封装器类的调用必须接触之前的每个操作。 如果用户可以自由的创建类的实例，这个实例就无法知道另一实例之前的操作。 而单例模式提供的构建类的方式，在编译时保证类只有单一实例。

提供了访问该实例的全局访问点

游戏中的不同系统都会使用文件系统封装类：日志，内容加载，游戏状态保存，等等。 如果这些系统不能创建文件系统封装类的实例，它们如何访问该实例呢?

单例为这点也提供了解决方案。 除了创建单一实例以外，它也提供了一种获得它的全局方法。 使用这种范式，无论何处何人都可以访问实例。 综合起来，经典的实现方案如下：

```
class FileSystem
{
public:
  static FileSystem& instance()
  {
    // 惰性初始化
    if (instance_ == NULL) instance_ = new FileSystem();
    return *instance_;
  }

private:
  FileSystem() {}

  static FileSystem* instance_;
};
```

静态的`instance_`成员保存了一个类的实例， 私有的构造器保证了它是*唯*一的。 公开的静态方法`instance()`让任何地方的代码都能访问实例。 在首次被请求时，它同样负责惰性实例化该单例。

现代的实现方案看起来是这样的：

```
class FileSystem
{
public:
  static FileSystem& instance()
  {
    static FileSystem *instance = new FileSystem();
    return *instance;
  }

private:
  FileSystem() {}
};
```

哪怕是在多线程情况下，C++11标准也保证了本地静态变量只会初始化一次， 因此，假设你有一个现代C++编译器，这段代码是线程安全的，而前面的那个例子不是。

当然，你单例类本身的线程安全是个不同的问题！这里只保证了它的*初始化*没问题。

为什么我们使用它

看起来已有成效。 文件系统封装类在任何需要的地方都可用，而无需笨重地到处传递。 类本身巧妙地保证了我们不会实例化多个实例而搞砸。它还具有很多其他的优良性质：

- **如果没人用，就不必创建实例。** 节约内存和CPU循环总是好的。 由于单例只在第一次被请求时实例化，如果游戏永远不请求，那么它不会被实例化。

- **它在运行时实例化。** 通常的替代方案是使用含有静态成员变量的类。 我喜欢简单的解决方案，因此我尽可能使用静态类而不是单例，但是静态成员有个限制：自动初始化。 编译器在`main()`运行前初始化静态变量。 这就意味着不能使用在程序加载时才获取的信息（举个例子，从文件加载的配置）。 这也意味着它们的相互依赖是不可靠的——编译器可不保证以什么样的顺序初始化静态变量。

  惰性初始化解决了以上两个问题。 单例会尽可能晚的初始化，所以那时它需要的所有信息都应该可用了。 只要没有环状依赖，一个单例在初始化它自己的时甚至可以引用另一个单例。

-

可继承单例。 这是个很有用但通常被忽视的能力。 假设我们需要跨平台的文件系统封装类。 为了达到这一点，我们需要它变成文件系统抽象出来的接口，而子类为每个平台实现接口。 这是基类:

```
class FileSystem
{
public:
  virtual ~FileSystem() {}
  virtual char* readFile(char* path) = 0;
  virtual void  writeFile(char* path, char* contents) = 0;
};
```

然后为一堆平台定义子类:

```
class PS3FileSystem : public FileSystem
{
public:
  virtual char* readFile(char* path)
  {
    // 使用索尼的文件读写API……
  }

  virtual void writeFile(char* path, char* contents)
  {
    // 使用索尼的文件读写API……
  }
};

class WiiFileSystem : public FileSystem
{
public:
  virtual char* readFile(char* path)
  {
    // 使用任天堂的文件读写API……
  }

  virtual void writeFile(char* path, char* contents)
  {
    // 使用任天堂的文件读写API……
  }
};
```

下一步，我们把`FileSystem`变成单例：

```
class FileSystem
{
public:
  static FileSystem& instance();

  virtual ~FileSystem() {}
  virtual char* readFile(char* path) = 0;
  virtual void  writeFile(char* path, char* contents) = 0;

protected:
  FileSystem() {}
};
```

灵巧之处在于如何创建实例：

```
FileSystem& FileSystem::instance()
{
  #if PLATFORM == PLAYSTATION3
    static FileSystem *instance = new PS3FileSystem();
  #elif PLATFORM == WII
    static FileSystem *instance = new WiiFileSystem();
  #endif

  return *instance;
}
```

通过一个简单的编译器转换，我们把文件系统包装类绑定到合适的具体类型上。 整个代码库都可以使用`FileSystem::instance()`接触到文件系统，而无需和任何平台相关的代码耦合。耦合发生在为特定平台写的`FileSystem`类实现文件中。

大多数人解决问题到这个程度就已经够了。 我们得到了一个文件系统封装类。 它工作可靠，它全局有效，只要请求就能获取。 是时候提交代码，开怀畅饮了。

为什么我们后悔使用它

短期来看，单例模式是相对良性的。 就像其他设计决策一样，我们需要从长期考虑。 这里是一旦我们将一些不必要的单例写进代码，会给自己带来的麻烦：

它是一个全局变量

当游戏还是由几个家伙在车库中完成时，榨干硬件性能比象牙塔里的软件工程原则更重要。 C语言和汇编程序员前辈能毫无问题的使用全局变量和静态变量，发布好游戏。 但随着游戏变得越来越大，越来越复杂，架构和管理开始变成瓶颈， 阻碍我们发布游戏的，除了硬件限制，还有*生产力*限制。

所以我们迁移到了像C++这样的语言， 开始将一些从软件工程师前辈那里学到的智慧应用于实际。 其中一课是全局变量有害的诸多原因：

- **理解代码更加困难。** 假设我们在查找其他人所写函数中的漏洞。 如果函数没有碰到任何全局状态，脑子只需围着函数转， 只需搞懂函数和传给函数的变量。

  计算机科学家称不接触不修改全局状态的函数为“纯”函数。 纯函数易于理解，易于编译器优化， 易于完成优雅的任务，比如记住缓存的情况并继续上次调用。

  完全使用纯函数是有难度的，但其好处足以引诱科学家创造像Haskell这样*只*使用纯函数的语言。

  现在考虑函数中间是个对`SomeClass::getSomeGlobalData()`的调用。为了查明发生了什么，得追踪整个代码库来看看什么修改了全局变量。你真的不需要讨厌全局变量，直到你在凌晨三点使用`grep`搜索数百万行代码，搞清楚哪一个错误的调用将一个静态变量设为了错误的值。

- **促进了耦合的发生。** 新加入团队的程序员也许不熟悉你们完美，可维护，松散耦合的游戏架构， 但还是刚刚获得了第一个任务：在岩石撞击地面时播放声音。 你我都知道这不需要将物理和*音频*代码耦合，但是他只想着把任务完成。 不幸的是，我们的`AudioPlayer`是全局可见的。 所以之后一个小小的`#include`，新队员就打乱了整个精心设计的架构。

  如果不用全局实例实现音频播放器，那么哪怕他*确实*用`#include`包含了头文件，他还是啥也做不了。 这种阻碍给他发送了一个明确的信号，这两个模块不该接触，他需要另辟蹊径。*通过控制对实例的访问，你控制了耦合。*

- **对并行不友好。** 那些在单核CPU上运行游戏的日子已经远去。 哪怕完全不需要并行的优势，现代的代码至少应考虑在多线程环境下*工作*。 当我们将某些东西转为全局变量时，我们创建了一块每个线程都能看到并访问的内存， 却不知道其他线程是否正在使用那块内存。 这种方式带来了死锁，竞争状态，以及其他很难解决的线程同步问题。

像这样的问题足够吓阻我们声明全局变量了， 同理单例模式也是一样，但是那还没有告诉我们*应该*如何设计游戏。 怎样不使用全局变量构建游戏?

有几个对这个问题的答案（这本书的大部分都*是*由答案构成）， 但是它们并非显而易见。 与此同时，我们得发布游戏。 单例模式看起来是万能药。 它被写进了一本关于面向对象设计模式的书中，因此它*肯定*是个好的设计模式，对吧? 况且我们已经借助它做了很多年软件设计了。

不幸的是，它不是解药，它是安慰剂。 如果浏览全局变量造成的问题列表，你会注意到单例模式解决不了其中任何一个。 因为单例*确实是*全局状态——它只是被封装在一个类中。

它能在你只有一个问题的时候解决两个

在GoF对单例模式的描述中，“并且”这个词有点奇怪。 这个模式解决了一个问题还是两个问题呢? 如果我们只有其中一个问题呢? 保证实例是唯一存在的很有用的，但是谁告诉我们要让*每个人*都能接触到它? 同样，全局接触很方便，但是必须禁止存在多个实例吗?

这两问题中的后者，便利的访问，是使用单例模式几乎全部的原因。 想想日志类。大部分模块都能从记录诊断日志中获益。 但是，如果将`Log`类的实例传给每个需要这个方法的函数，那就混杂了产生的数据，模糊了代码的意图。

明显的解决方案是让`Log`类成为单例。 每个函数都能从类那里获得一个实例。 但当我们这样做时，我们无意地制造了一个奇怪的小约束。 突然之间，我们不再能创建多个日志记录者了。

起初，这不是一个问题。 我们记录单独的日志文件，所以只需要一个实例。 然后，随着开发周期的逐次循环，我们遇到了麻烦。 每个团队的成员都使用日志记录各自的诊断信息，大量的日志倾泻在文件里。 程序员需要翻过很多页代码来找到他关心的记录。

我们想将日志分散到多个文件中来解决这点。 为了达到这点，我们得为游戏不同的领域创造单独的日志记录者： 网络，UI，声音，游戏，玩法。 但是我们做不到。 `Log`类不再允许我们创建多个实例，而且调用的方式也保证了这一点：

```
Log::instance().write("Some event.");
```

为了让`Log`类支持多个实例（就像它原来的那样）， 我们需要修改类和提及它的每一行代码。 之前便利的访问就不再那么便利了。

这可能更糟。想象一下你的`Log`类是在多个*游戏*间共享的库中。 现在，为了改变设计，需要在多组人之间协调改变， 他们中的大多数既没有时间，也没有动机修复它。

惰性初始化从你那里剥夺了控制权

拥有虚拟内存和软性性能需求的PC里，惰性初始化是一个小技巧。 游戏则是另一种状况。初始化系统需要消耗时间：分配内存，加载资源，等等。 如果初始化音频系统消耗了几百个毫秒，我们需要控制它何时发生。 如果在第一次声音播放时惰性初始化它自己，这初始化有可能发生游戏的高潮，导致可见的掉帧和断续的游戏体验。

同样，游戏通常需要严格管理在堆上分配的内存来避免碎片。 如果音频系统在初始化时分配到了堆上，我们需要知道*何时*初始化发生了， 这样我们可以控制内存待在堆的*哪里*。

对象池模式一节中有内存碎片的其他细节。

因为这两个原因，我见到的大多数游戏都不使用惰性初始化。 相反，它们像这样实现单例模式：

```
class FileSystem
{
public:
  static FileSystem& instance() { return instance_; }

private:
  FileSystem() {}

  static FileSystem instance_;
};
```

这解决了惰性初始化问题，但是损失了几个单例*确实*比原生的全局变量优良的特性。 静态实例中，我们不能使用多态，在静态初始化时，类也必须是可构建的。 我们也不能在不需要这个实例的时候，释放实例所占的内存。

与创建一个单例不同，这里实际上是一个简单的静态类。 这并非坏事，但是如果你需要的是静态类，为什么不完全摆脱`instance()`方法， 直接使用静态函数呢？ 调用`Foo::bar()`比`Foo::instance().bar()`更简单， 也更明确地表明你在处理静态内存。

通常使用单例而不是静态类的理由是， 如果你后来决定将静态类改为非静态的，你需要修改每一个调用点。 理论上，用单例就不必那么做，因为你可以将实例传来传去，像普通的实例方法一样使用。

实践中，我从未见过这种情况。 每个人都在使用`Foo::instance().bar()`。 如果我们将Foo改成非单例，我们还是得修改每一个调用点。 鉴于此，我更喜欢简单的类和简单的调用语法。

那该如何是好

如果我现在达到了目标，你在下次遇到问题使用单例模式之前就会三思而后行。 但是你还是有问题需要解决。你*应该*使用什么工具呢？ 这取决于你试图做什么，我有一些你可以考虑的选项，但是首先……

看看你是不是真正地需要类

我在游戏中看到的很多单例类都是“管理器”——那些类存在的意义就是照顾其他对象。 我曾看到一些代码库中，几乎*所有*类都有管理器： 怪物，怪物管理器，粒子，粒子管理器，声音，声音管理器，管理管理器的管理器。 有时候，它们被叫做“系统”或“引擎”，但是思路还是一样的。

管理器类有时是有用的，但通常它们只是反映出作者对OOP的不熟悉。思考这两个特制的类：

```
class Bullet
{
public:
  int getX() const { return x_; }
  int getY() const { return y_; }

  void setX(int x) { x_ = x; }
  void setY(int y) { y_ = y; }

private:
  int x_, y_;
};

class BulletManager
{
public:
  Bullet* create(int x, int y)
  {
    Bullet* bullet = new Bullet();
    bullet->setX(x);
    bullet->setY(y);

    return bullet;
  }

  bool isOnScreen(Bullet& bullet)
  {
    return bullet.getX() >= 0 &&
           bullet.getX() < SCREEN_WIDTH &&
           bullet.getY() >= 0 &&
           bullet.getY() < SCREEN_HEIGHT;
  }

  void move(Bullet& bullet)
  {
    bullet.setX(bullet.getX() + 5);
  }
};
```

也许这个例子有些蠢，但是我见过很多代码，在剥离了外部的细节后是一样的设计。 如果你看看这个代码，`BulletManager`很自然应是一个单例。 无论如何，任何有`Bullet`的对象都需要管理，而你又需要多少个`BulletManager`实例呢?

事实上，这里的答案是零。 这里是我们如何为管理类解决“单例”问题：

```
class Bullet
{
public:
  Bullet(int x, int y) : x_(x), y_(y) {}

  bool isOnScreen()
  {
    return x_ >= 0 && x_ < SCREEN_WIDTH &&
           y_ >= 0 && y_ < SCREEN_HEIGHT;
  }

  void move() { x_ += 5; }

private:
  int x_, y_;
};
```

好了。没有管理器，也没有问题。 糟糕设计的单例通常会“帮助”另一个类增加代码。 如果可以，把所有的行为都移到单例帮助的类中。 毕竟，OOP就是让对象管理好自己。

但是在管理器之外，还有其他问题我们需要寻求单例模式帮助。 对于每种问题，都有一些后续方案可供参考。

将类限制为单一的实例

这是单例模式帮你解决的一个问题。 就像在文件系统的例子中那样，保证类只有一个实例是很重要的。 但是，这不意味着我们需要提供对实例的*公众全局*访问。 我们想要减少某部分代码的公众部分，甚至让它在类中是私有的。 在这些情况下，提供一个全局接触点消弱了整体架构。

举个例子，我们也许想把文件系统包在*另*一层抽象中。

我们希望有种方式能保证同事只有一个实例而*无需*提供全局接触点。 有好几种方法能做到。这是其中之一：

```
class FileSystem
{
public:
  FileSystem()
  {
    assert(!instantiated_);
    instantiated_ = true;
  }

  ~FileSystem() { instantiated_ = false; }

private:
  static bool instantiated_;
};

bool FileSystem::instantiated_ = false;
```

这个类允许任何人构建它，如果你试图构建超过一个实例，它会断言并失败。 只要正确的代码首先创建了实例，那么就保证了没有其他代码可以接触实例或者创建自己的实例。 这个类保证满足了它关注的单一实例，但是它没有指定类该如何被使用。

断言 函数是一种向你的代码中添加限制的方法。 当`assert()`被调用时，它计算传入的表达式。 如果结果为`true`，那么什么都不做，游戏继续。 如果结果为`false`，它立刻停止游戏。 在debug build时，这通常会启动调试器，或至少打印失败断言所在的文件和行号。

`assert()`表示，“我断言这个总该是真的。如果不是，那就是漏洞，我想*立刻*停止并处理它。”这样你在代码区域之间定义约束。 如果函数断言它的某个参数不能为`NULL`，那就是说，“我和调用者定下了协议：传入的参数不会`NULL`。”

断言帮助我们在游戏发生预期以外的事时立刻追踪漏洞， 而不是等到错误最终显现在用户可见的某些事物上。 它们是代码中的栅栏，围住漏洞，这样漏洞就不能从制造它的代码边逃开。

这个实现的缺点是只在*运行时*检查并阻止多重实例化。 单例模式，正相反，通过类的自然结构，在编译时就能确定实例是单一的。

为了给实例提供方便的访问方法

便利的访问是我们使用单例的一个主要原因。 这让我们在不同地方获取需要的对象更加容易。 这种便利是需要付出代价的——在我们*不想*要对象的地方，也能轻易地使用。

通用原则是在能完成工作的同时，将变量写得尽可能局部。 对象影响的范围越小，在处理它时，我们需要放在脑子里的东西就越少。 在我们拿起有*全局*范围影响的单例对象前，先考虑考虑代码中其他获取对象的方式：

- **传进来。** 最简单的解决办法，通常也是最好的，把你需要的对象简单地作为参数传给需要它的函数。 在用其他更加繁杂的方法前，考虑一下这个解决方案。

有些人使用术语“依赖注入”来指代它。不是代码*出来*调用某些全局量来确认依赖， 而是依赖通过参数被*传进*到需要它的代码中去。 其他人将“依赖注入”保留为对代码提供更复杂依赖的方法。

考虑渲染对象的函数。为了渲染，它需要接触一个代表图形设备的对象，管理渲染状态。 将其传给所有渲染函数是很自然的，通常是用一个名字像`context`之类的参数。

另一方面，有些对象不该在方法的参数列表中出现。 举个例子，处理AI的函数可能也需要写日志文件，但是日志不是它的核心关注点。 看到`Log`出现在它的参数列表中是很奇怪的事情，像这样的情况，我们需要考虑其他的选项。

像日志这样撒布在代码库各处的是“横切关注点”(cross-cutting concern)。 小心地处理横切关注点是架构中的持久挑战，特别是在静态类型语言中。

面向切面编程被设计出来应对它们。

- **从基类中获得。** 很多游戏架构有浅层但是宽泛的继承层次，通常只有一层深。 举个例子，你也许有`GameObject`基类，每个游戏中的敌人或者对象都继承它。 使用这样的架构，很大一部分游戏代码会存在这些“子”推导类中。 这就意味着这些类已经有了对同样事物的相同获取方法：它们的`GameObject`基类。 我们可以利用这点：

  ```
  class GameObject
  {
  protected:
    Log& getLog() { return log_; }

  private:
    static Log& log_;
  };

  class Enemy : public GameObject
  {
    void doSomething()
    {
      getLog().write("I can log!");
    }
  };
  ```

  这保证任何`GameObject`之外的代码都不能接触`Log`对象，但是每个派生的实体确实能使用`getLog()`。 这种使用protected函数，让派生对象使用的模式， 被涵盖在子类沙箱这章中。

  这也引出了一个新问题，“`GameObject`是怎样获得`Log`实例的？”一个简单的方案是，让基类创建并拥有静态实例。

  如果你不想要基类承担这些，你可以提供一个初始化函数传入`Log`实例， 或使用服务定位器模式找到它。

- **从已经是全局的东西中获取。** 移除*所有*全局状态的目标令人钦佩，但并不实际。 大多数代码库仍有一些全局可用对象，比如一个代表了整个游戏状态的`Game`或`World`对象。

  我们可以让现有的全局对象捎带需要的东西，来减少全局变量类的数目。 不让`Log`，`FileSystem`和`AudioPlayer`都变成单例，而是这样做：

```
class Game
{
public:
  static Game& instance() { return instance_; }

  // 设置log_, et. al. ……

  Log&          getLog()          { return *log_; }
  FileSystem&   getFileSystem()   { return *fileSystem_; }
  AudioPlayer& getAudioPlayer() { return *audioPlayer_; }

private:
  static Game instance_;

  Log          *log_;
  FileSystem   *fileSystem_;
  AudioPlayer *audioPlayer_;
};
```

这样，只有`Game`是全局可见的。 函数可以通过它访问其他系统。

```
Game::instance().getAudioPlayer().play(VERY_LOUD_BANG);
```

纯粹主义者会声称这违反了Demeter法则。我则声称这比一大坨单例要好。

如果，稍后，架构被改为支持多个`Game`实例（可能是为了流处理或者测试），`Log`，`FileSystem`，和`AudioPlayer`都不会被影响到——它们甚至不知道有什么区别。 缺陷是，当然，更多的代码耦合到了`Game`中。 如果一个类简单地需要播放声音，为了访问音频播放器，上例中仍然需要它知道游戏世界。

我们通过混合方案解决这点。 知道`Game`的代码可以直接从它那里访问`AudioPlayer`。 而不知道的代码，我们用上面描述的其他选项来提供`AudioPlayer`。

- **从服务定位器中获得。** 目前为止，我们假设全局类是具体的类，比如`Game`。 另一种选项是定义一个类，存在的唯一目标就是为对象提供全局访问。 这种常见的模式被称为服务定位器模式，有单独讲它的章节。

单例中还剩下什么

剩下的问题，何处我们*应该*使用真实的单例模式？ 说实话，我从来没有在游戏中使用全部的GoF模式。 为了保证实例是单一的，我通常简单的使用静态类。 如果这无效，我使用静态标识位，在运行时检测是不是只有一个实例被创建了。

书中还有一些其他章节也许能有所帮助。 子类沙箱模式通过分享状态， 给实例以类的访问权限而无需让其全局可用。 服务定位器模式*确实*让一个对象全局可用， 但它给了你如何设置对象的灵活性。

状态模式

游戏设计模式Design Patterns Revisited

忏悔时间：我有些越界，将太多的东西打包到了这章中。 它表面上关于状态模式， 但我无法只讨论它和游戏，而不涉及更加基础的*有限状态机*（FSMs）。 但是一旦讲了那个，我发现也想要介绍*层次状态机*和*下推自动机*。

有很多要讲，我会尽可能简短，这里的示例代码留下了一些你需要自己填补的细节。 我希望它们仍然足够清晰，能让你获取一份全景图。

如果你从来没有听说过状态机，不要难过。 虽然在AI和编译器程序很出名，但它在其他编程圈就没那么知名了。 我认为应该有更多人知道它，所以在这里我将其运用在不同的问题上。

这些状态机术语来自人工智能的早期时代。 在五十年代到六十年代，很多AI研究关注于语言处理。 很多现在用于分析程序语言的技术在当时是发明出来分析人类语言的。

感同身受

假设我们在完成一个卷轴平台游戏。 现在的工作是实现玩家在游戏世界中操作的女英雄。这就意味着她需要对玩家的输入做出响应。按B键她应该跳跃。简单实现如下：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  if (input == PRESS_B)
  {
    yVelocity_ = JUMP_VELOCITY;
    setGraphics(IMAGE_JUMP);
  }
}
```

看到漏洞了吗?

没有东西阻止“空中跳跃”——当角色在空中时狂按B，她就会浮空。 简单的修复方法是给`Heroine`增加`isJumping_`布尔字段，追踪它跳跃的状态。然后这样做：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  if (input == PRESS_B)
  {
    if (!isJumping_)
    {
      isJumping_ = true;
      // 跳跃……
    }
  }
}
```

这里也应该有在英雄接触到地面时将`isJumping_`设回`false`的代码。 我在这里为了简明没有写。

接下来，当玩家按下下方向键时，如果角色在地上，我们想要她卧倒，而松开按键时站起来：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  if (input == PRESS_B)
  {
    // 如果没在跳跃，就跳起来……
  }
  else if (input == PRESS_DOWN)
  {
    if (!isJumping_)
    {
      setGraphics(IMAGE_DUCK);
    }
  }
  else if (input == RELEASE_DOWN)
  {
    setGraphics(IMAGE_STAND);
  }
}
```

这次看到漏洞了吗?

通过这个代码，玩家可以:

1. 按下键卧倒。
2. 按B从卧倒状态跳起。
3. 在空中放开下键。

英雄跳一半贴图变成了站立时的贴图。是时候增加另一个标识了……

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  if (input == PRESS_B)
  {
    if (!isJumping_ && !isDucking_)
    {
      // 跳跃……
    }
  }
  else if (input == PRESS_DOWN)
  {
    if (!isJumping_)
    {
      isDucking_ = true;
      setGraphics(IMAGE_DUCK);
    }
  }
  else if (input == RELEASE_DOWN)
  {
    if (isDucking_)
    {
      isDucking_ = false;
      setGraphics(IMAGE_STAND);
    }
  }
}
```

下面，如果玩家在跳跃途中按下下方向键，英雄能够做跳斩攻击就太酷了：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  if (input == PRESS_B)
  {
    if (!isJumping_ && !isDucking_)
    {
      // 跳跃……
    }
  }
  else if (input == PRESS_DOWN)
  {
    if (!isJumping_)
    {
      isDucking_ = true;
      setGraphics(IMAGE_DUCK);
    }
    else
    {
      isJumping_ = false;
      setGraphics(IMAGE_DIVE);
    }
  }
  else if (input == RELEASE_DOWN)
  {
    if (isDucking_)
    {
      // 站立……
    }
  }
}
```

又是检查漏洞的时间了。找到了吗?

跳跃时我们检查了字段，防止了空气跳，但是速降时没有。又是另一个字段……

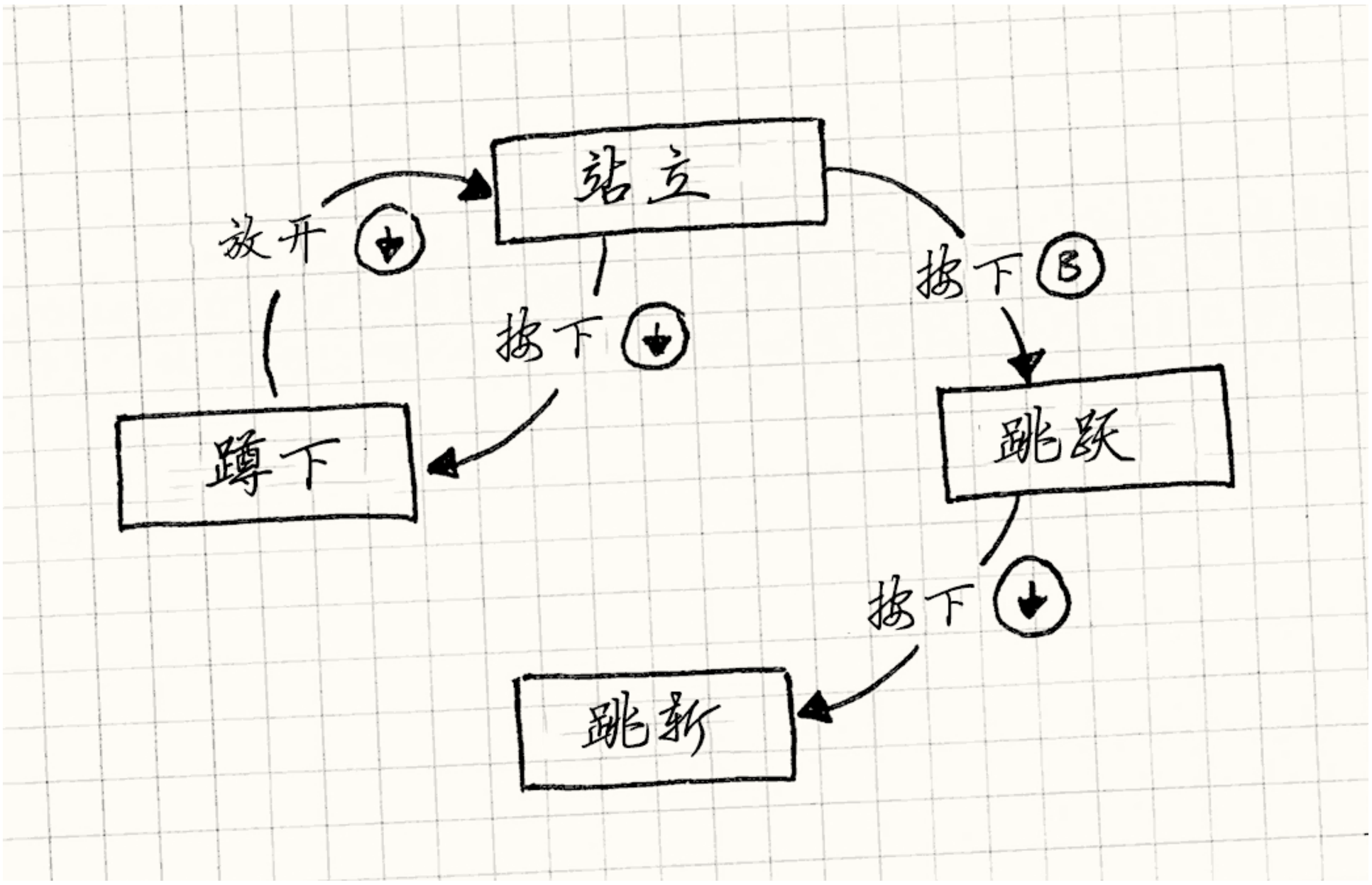
我们的实现方法很明显有错。 每次我们改动代码时，就破坏些东西。 我们需要增加更多动作——*行走* 都还没有加入呢——但以这种做法，完成之前就会造成一堆漏洞。

那些你崇拜的、看上去永远能写出完美代码的程序员并不是超人。 相反，他们有*哪种*代码易于出错的直觉，然后避开。

复杂分支和可变状态——随时间改变的字段——是两种易错代码，上面的例子覆盖了两者。

有限状态机前来救援

在经历了上面的挫败之后，把桌子扫空，只留下纸笔，我们开始画流程图。 你给英雄每件能做的事情都画了一个盒子：站立，跳跃，俯卧，跳斩。 当角色在能响应按键的状态时，你从那个盒子画出一个箭头，标记上按键，然后连接到她变到的状态。



祝贺，你刚刚建好了一个*有限状态机*。 它来自计算机科学的分支*自动理论*，那里有很多著名的数据结构，包括著名的图灵机。 FSMs是其中最简单的成员。

要点是：

- **你拥有状态机所有可能*状态*的集合。** 在我们的例子中，是站立，跳跃，俯卧和速降。
- **状态机同时只能在一个状态。** 英雄不可能同时处于跳跃和站立。事实上，防止这点是使用FSM的理由之一。
- **一连串的*输入*或*事件*被发送给状态机。** 在我们的例子中，就是按键按下和松开。
- **每个状态都有*一系列的转移*，每个转移与输入和另一状态相关。** 当输入进来，如果它与当前状态的某个转移相匹配，机器转换为所指的状态。

  举个例子，在站立状态时，按下下方向键转换为俯卧状态。 在跳跃时按下下方向键转换为速降。 如果输入在当前状态没有定义转移，输入就被忽视。

这就是核心部分的全部了：状态，输入，和转移。 你可以用一张流程图把它画出来。不幸的是，编译器不认识流程图， 所以我们如何*实现*一个？ GoF的状态模式是一个方法——我们会谈到的——但先从简单的开始。

对FSMs我最喜欢的类比是那种老式文字冒险游戏，比如Zork。 你有世界由屋子组成，屋子彼此通过出口相连。你输入像“去北方”的导航指令探索屋子。

这其实就是状态机：每个屋子都是一个状态。 你现在在的屋子是当前状态。每个屋子的出口是它的转移。 导航指令是输入。

枚举和分支

`Heroine`类的问题在于它不合法地捆绑了一堆布尔量： `isJumping_`和`isDucking_`不会同时为真。 但有些标识同时只能有一个是`true`，这提示是你真正需要的其实是`enum`（枚举）。

在这个例子中的`enum`就是FSM的状态的集合，所以让我们这样定义它：

```
enum State
{
  STATE_STANDING,
  STATE_JUMPING,
  STATE_DUCKING,
  STATE_DIVING
};
```

不需要一堆标识，`Heroine`只有一个`state_`状态。 这里我们同时改变了分支顺序。在前面的代码中，我们先在判断输入，*然后*判断状态。 这让处理某个按键的代码集中到了一处，但处理某个状态的代码分散到了各处。 我们想让处理状态的代码聚在一起，所以先对状态做分支。这样的话：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  switch (state_)
  {
    case STATE_STANDING:
      if (input == PRESS_B)
      {
        state_ = STATE_JUMPING;
        yVelocity_ = JUMP_VELOCITY;
        setGraphics(IMAGE_JUMP);
      }
      else if (input == PRESS_DOWN)
      {
        state_ = STATE_DUCKING;
        setGraphics(IMAGE_DUCK);
      }
      break;

  case STATE_JUMPING:
    if (input == PRESS_DOWN)
    {
      state_ = STATE_DIVING;
      setGraphics(IMAGE_DIVE);
    }
    break;

    case STATE_DUCKING:
      if (input == RELEASE_DOWN)
      {
        state_ = STATE_STANDING;
        setGraphics(IMAGE_STAND);
      }
      break;
  }
}
```

这看起来很普通，但是比起前面的代码是个很大的进步。 我们仍有条件分支，但简化了状态变化，将它变成了字段。 处理同一状态的所有代码都聚到了一起。 这是实现状态机最简单的方法，在某些情况下，这也不错。

重要的是，英雄不再会处于*不合法*状态。 使用布尔标识，很多可能存在的值的组合是不合法的。 通过`enum`，每个值都是合法的。

但是，你的问题也许超过了这个解法的能力范围。 假设我们想增加一个动作动作，英雄可以俯卧一段时间充能，之后释放一次特殊攻击。 当她俯卧时，我们需要追踪充能的持续时间。

我们为`Heroine`添加了`chargeTime_`字段，记录充能的时间长度。 假设我们已经有一个每帧都会调用的`update()`方法。在那里，我们添加：

```
void Heroine::update()
{
  if (state_ == STATE_DUCKING)
  {
    chargeTime_++;
    if (chargeTime_ > MAX_CHARGE)
    {
      superBomb();
    }
  }
}
```

如果你猜这就是更新方法模式，恭喜你答对了！

我们需要在她开始俯卧的时候重置计时器，所以我们修改`handleInput()`：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  switch (state_)
  {
    case STATE_STANDING:
      if (input == PRESS_DOWN)
      {
        state_ = STATE_DUCKING;
        chargeTime_ = 0;
        setGraphics(IMAGE_DUCK);
      }
      // 处理其他输入……
      break;

      // 其他状态……
  }
}
```

总而言之，为了增加这个充能攻击，我们需要修改两个方法， 添加一个`chargeTime_`字段到`Heroine`，哪怕它只在俯卧时有意义。 我们更喜欢的是让所有相关的代码和数据都待在同一个地方。GoF完成了这个。

状态模式

对于那些思维模式深深沉浸在面向对象的人，每个条件分支都是使用动态分配的机会（在C++中叫做虚方法调用）。 我觉得那就太过于复杂化了。有时候一个`if`就能满足你的需要了。

这里有个历史遗留问题。 原先的面向对象传教徒，比如写《设计模式》的GoF和写《重构》的Martin Fowler都使用Smalltalk。 那里，`ifThen:`是你只是使用条件的方法，该方法在`true`和`false`对象中以不同的方式实现。

但是在我们的例子中，面向对象确实是一个更好的方案。 这带领我们走向状态模式。在GoF中这样描述状态模式：

> 允许一个对象在其内部状态 发生变化时改变自己的行为，该对象看起来好像修改了它的类型

这可没太多帮助。我们的`switch`也完成了这一点。 它们描述的东西应用在英雄的身上实际是：

一个状态接口

首先，我们为状态定义接口。 状态相关的行为——之前用`switch`的每一处——都成为了接口中的虚方法。 在我们的例子中，那是`handleInput()`和`update()`：

```
class HeroineState
{
public:
  virtual ~HeroineState() {}
  virtual void handleInput(Heroine& heroine, Input input) {}
  virtual void update(Heroine& heroine) {}
};
```

为每个状态写个类

对于每个状态，我们定义一个类实现接口。它的方法定义了英雄在状态的行为。 换言之，从之前的`switch`中取出每个`case`，将它们移动到状态类中。举个例子：

```
class DuckingState : public HeroineState
{
public:
  DuckingState()
  : chargeTime_(0)
  {}

  virtual void handleInput(Heroine& heroine, Input input) {
    if (input == RELEASE_DOWN)
    {
      // 改回站立状态……
      heroine.setGraphics(IMAGE_STAND);
    }
  }

  virtual void update(Heroine& heroine) {
    chargeTime_++;
    if (chargeTime_ > MAX_CHARGE)
    {
      heroine.superBomb();
    }
  }

private:
  int chargeTime_;
};
```

注意我们也将`chargeTime_`移出了`Heroine`，放到了`DuckingState`类中。 这很好——那部分数据只在这个状态有用，现在我们的对象模型显式反映了这一点。

状态委托

接下来，向`Heroine`添加指向当前状态的指针，放弃庞大的`switch`，转向状态委托：

```
class Heroine
{
public:
  virtual void handleInput(Input input)
  {
    state_->handleInput(*this, input);
  }

  virtual void update()
  {
    state_->update(*this);
  }

  // 其他方法……
private:
  HeroineState* state_;
};
```

为了“改变状态”，我们只需要将`state_`声明指向不同的`HeroineState`对象。 这就是状态模式的全部了。

这看上去有些像策略模式和类型对象模式。 在三者中，你都有一个主对象委托给下属。区别在于*意图*。

- 在策略模式中，目标是解耦主类和它的部分行为。
- 在类型对象中，目标是通过*共享*一个对相同类型对象的引用，让一*系列*对象行为相近。
- 在状态模式中，目标是让主对象通过*改变*委托的对象，来*改变*它的行为。

状态对象在哪里？

我这里掩掩藏了一些细节。为了改变状态，我们需要声明`state_`指向新的状态， 但那个新状态又是从哪里来呢？ 在`enum`实现中，这都不用过脑子——`enum`实际上就像数字一样。 但是现在状态是类了，意味着我们需要指向实例。通常这有两种方案：

静态状态

如果状态对象没有其他数据字段， 那么它存储的唯一数据就是指向虚方法表的指针，用来调用它的方法。 在这种情况下，没理由产生多个实例。毕竟每个实例都完全一样。

如果你的状态没有字段，只有一个虚方法，你可以再简化这个模式。 将每个状态类替换成状态*函数*——只是一个普通的顶层函数。 然后，主类中的`state_`字段变成一个简单的函数指针。

在那种情况下，你可以用一个*静态*实例。 哪怕你有一堆FSM同时在同一状态上运行，它们也能指向同一实例，因为状态没有与状态机相关的部分。

这是享元模式。

在*哪里*放置静态实例取决于你。找一个合理的地方。 没什么特殊的理由，在这里我将它放在状态基类中。

```
class HeroineState
{
public:
  static StandingState standing;
  static DuckingState ducking;
  static JumpingState jumping;
  static DivingState diving;

  // 其他代码……
};
```

每个静态字段都是游戏状态类的一个实例。为了让英雄跳跃，站立状态会这样做：

```
if (input == PRESS_B)
{
  heroine.state_ = &HeroineState::jumping;
  heroine.setGraphics(IMAGE_JUMP);
}
```

实例化状态

有时没那么容易。静态状态对俯卧状态不起作用。 它有一个`chargeTime_`字段，与正在俯卧的英雄特定相关。 在游戏中，如果只有一个英雄，那也行，但是如果要添加双人合作，同时在屏幕上有两个英雄，就有麻烦了。

在那种情况下，转换时需要创建状态对象。 这需要每个FSM拥有自己的状态实例。如果我们分配*新*状态， 那意味着我们需要释放*当前的*状态。 在这里要小心，由于触发变化的代码是当前状态中的方法，需要删除`this`，因此需要小心从事。

相反，我们允许`HeroineState`中的`handleInput()`返回一个新状态。 如果它那么做了，`Heroine`会删除旧的，然后换成新的，就像这样：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  HeroineState* state = state_->handleInput(*this, input);
  if (state != NULL)
  {
    delete state_;
    state_ = state;
  }
}
```

这样，直到从之前的状态返回，我们才需要删除它。 现在，站立状态可以通过创建新实例转换为俯卧状态：

```
HeroineState* StandingState::handleInput(Heroine& heroine,
                                         Input input)
{
  if (input == PRESS_DOWN)
  {
    // 其他代码……
    return new DuckingState();
  }

  // 保持这个状态
  return NULL;
}
```

如果可以，我倾向于使用静态状态，因为它们不会在状态转换时消耗太多的内存和CPU。但是，对于更，额，*多状态的事物*，需要耗费一些精力来实现。

当你为状态动态分配内存时，你也许会担心碎片。 对象池模式可以帮上忙。

入口行为和出口行为

状态模式的目标是将状态的行为和数据封装到单一类中。 我们完成了一部分，但是还有一些未了之事。

当英雄改变状态时，我们也改变她的贴图。 现在，那部分代码在她转换*前*的状态中。 当她从俯卧转为站立，俯卧状态修改了她的贴图：

```
HeroineState* DuckingState::handleInput(Heroine& heroine,
                                        Input input)
{
  if (input == RELEASE_DOWN)
  {
    heroine.setGraphics(IMAGE_STAND);
    return new StandingState();
  }

  // 其他代码……
}
```

我们想做的是，每个状态控制自己的贴图。这可以通过给状态一个*入口行为*来实现：

```
class StandingState : public HeroineState
{
public:
  virtual void enter(Heroine& heroine)
  {
    heroine.setGraphics(IMAGE_STAND);
  }

  // 其他代码……
};
```

在`Heroine`中，我们将处理状态改变的代码移动到新状态上调用：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  HeroineState* state = state_->handleInput(*this, input);
  if (state != NULL)
  {
    delete state_;
    state_ = state;

    // 调用新状态的入口行为
    state_->enter(*this);
  }
}
```

这让我们将俯卧代码简化为:

```
HeroineState* DuckingState::handleInput(Heroine& heroine,
                                        Input input)
{
  if (input == RELEASE_DOWN)
  {
    return new StandingState();
  }

  // 其他代码……
}
```

它做的所有事情就是转换到站立状态，站立状态控制贴图。 现在我们的状态真正地封装了。 关于入口行为的好事就是，当你进入状态时，不必关心你是从哪个状态转换*来的*。

大多数真正的状态图都有转为同一状态的多个转移。 举个例子，英雄在跳跃或跳斩后进入站立状态。 这意味着我们在转换发生的最后重复相同的代码。 入口行为很好地解决了这一点。

我们能，当然，扩展并支持*出口行为*。 这是在我们*离开*现有状态，转换到新状态之前调用的方法。

有什么收获?

我花了这么长时间向您推销FSMs，现在我们来捋一捋。 我到现在讲的都是真的，FSM能很好解决一些问题。但它们最大的优点也是它们最大的缺点。

状态机通过使用有约束的结构来理清杂乱的代码。 你只需一个固定状态的集合，单一的当前状态，和一些硬编码的转换。

一个有限状态机甚至不是*图灵完全的*。 自动理论用一系列抽象模型描述计算，每种都比之前的复杂。 *图灵机* 是其中最具有表现力的模型之一。

“图灵完全”意味着一个系统（通常是编程语言）足以在内部实现一个图灵机， 也就意味着，在某种程度上，所有的图灵完全具有同样的表现力。 FSMs不够灵活，并不在其中。

如果你需要为更复杂的东西使用状态机，比如游戏AI，你会撞到这个模型的限制上。 感谢上天，我们的前辈找到了一些方法来闪避这些限制。我会在这一章的最后简单地浏览一下它们。

并发状态机

我们决定给英雄拿枪的能力。 当她拿着枪的时候，她还是能做她之前的任何事情：跑动，跳跃，跳斩，等等。 但是她在做这些的同时也要能开火。

如果我们执着于FSM，我们需要*翻倍*现有状态。 对于每个现有状态，我们需要另一个她持枪状态：站立，持枪站立，跳跃，持枪跳跃， 你知道我的意思了吧。

多加几种武器，状态就会指数爆炸。 不但增加了大量的状态，这也增加了大量的冗余： 持枪和不持枪的状态是完全一样的，只是多了一点负责射击的代码。

问题在于我们将两种状态绑定——她*做的*和她*携带的*——到了一个状态机上。 为了处理所有可能的组合，我们需要为每一*对*组合写一个状态。 修复方法很明显：使用两个单独的状态机。

如果她在做什么有n个状态，而她携带了什么有m个状态，要塞到一个状态机中， 我们需要$n \times m$个状态。使用两个状态机，就只有$n + m$个。

我们保留之前记录她在做什么的状态机，不用管它。 然后定义她携带了什么的单独状态机。 `Heroine`将会有*两个*“状态”引用，每个对应一个状态机，就像这样：

```
class Heroine
{
  // 其他代码……

private:
  HeroineState* state_;
  HeroineState* equipment_;
};
```

为了便于说明，她的装备也使用了状态模式。 在实践中，由于装备只有两个状态，一个布尔标识就够了。

当英雄把输入委托给了状态，两个状态都需要委托：

```
void Heroine::handleInput(Input input)
{
  state_->handleInput(*this, input);
  equipment_->handleInput(*this, input);
}
```

功能更完备的系统也许能让状态机*销毁*输入，这样其他状态机就不会收到了。 这能阻止两个状态机响应同一输入。

每个状态机之后都能响应输入，发生行为，独立于其它机器改变状态。 当两个状态集合几乎没有联系的时候，它工作得不错。

在实践中，你会发现状态有时需要交互。 举个例子，也许她在跳跃时不能开火，或者她在持枪时不能跳斩攻击。 为了完成这个，你也许会在状态的代码中做一些粗糙的`if`测试*其他*状态来协同， 这不是最优雅的解决方案，但这可以搞定工作。

分层状态机

再充实一下英雄的行为，她可能会有更多相似的状态。 举个例子，她也许有站立，行走，奔跑，和滑铲状态。在这些状态中，按B跳，按下蹲。

如果使用简单的状态机实现，我们在每个状态中的都重复了代码。 如果我们能够实现一次，在多个状态间重用就好了。

如果这是面向对象的代码而不是状态机的，在状态间分享代码的方式是通过继承。 我们可以为“在地面上”定义一个类处理跳跃和速降。 站立，行走，奔跑和滑铲都从它继承，然后增加各自的附加行为。

它的影响有好有坏。 继承是一种有力的代码重用工具，但也在两块代码间建立了非常强的耦合。 这是重锤，所以请小心使用。

你会发现，这是个被称为*分层状态机*的通用结构。 状态可以有*父状态*（这让它变为*子状态*）。 当一个事件进来，如果子状态没有处理，它就会交给链上的父状态。 换言之，它像重载的继承方法那样运作。

事实上，如果我们使用状态模式实现FSM，我们可以使用继承来实现层次。 定义一个基类作为父状态：

```
class OnGroundState : public HeroineState
{
public:
  virtual void handleInput(Heroine& heroine, Input input)
  {
    if (input == PRESS_B)
    {
      // 跳跃……
    }
    else if (input == PRESS_DOWN)
    {
      // 俯卧……
    }
  }
};
```

每个子状态继承它：

```
class DuckingState : public OnGroundState
{
public:
  virtual void handleInput(Heroine& heroine, Input input)
  {
    if (input == RELEASE_DOWN)
    {
      // 站起……
    }
    else
    {
      // 没有处理输入，返回上一层
      OnGroundState::handleInput(heroine, input);
    }
  }
};
```

这当然不是唯一实现层次的方法。 如果你没有使用GoF的状态模式，这可能不会有用。 相反，你可以显式的使用状态*栈*而不是单一状态来表示当前状态的父状态链。

栈顶的状态是当前状态，在他下面是它的直接父状态， 然后是*那个*父状态的父状态，以此类推。 当你需要状态的特定行为，你从栈的顶端开始， 然后向下寻找，直到某一个状态处理了它。（如果到底也没找到，就无视它。）

下推自动机

还有一种有限状态机的扩展也用了状态栈。 容易混淆的是，这里的栈表示的是完全不同的事物，被用作解决不同的问题。

要解决的问题是有限状态机没有任何*历史*的概念。 你记得*正在*什么状态中，但是不记得*曾在*什么状态。 没有简单的办法重回上一状态。

举个例子：早先，我们让无畏英雄武装到了牙齿。 当她开火时，我们需要新状态播放开火动画，发射子弹，产生视觉效果。 所以我们拼凑了一个`FiringState`，不管现在是什么状态，都能在按下开火按钮时跳转为这个状态。

这个行为在多个状态间重复，也许是用层次状态机重用代码的好地方。

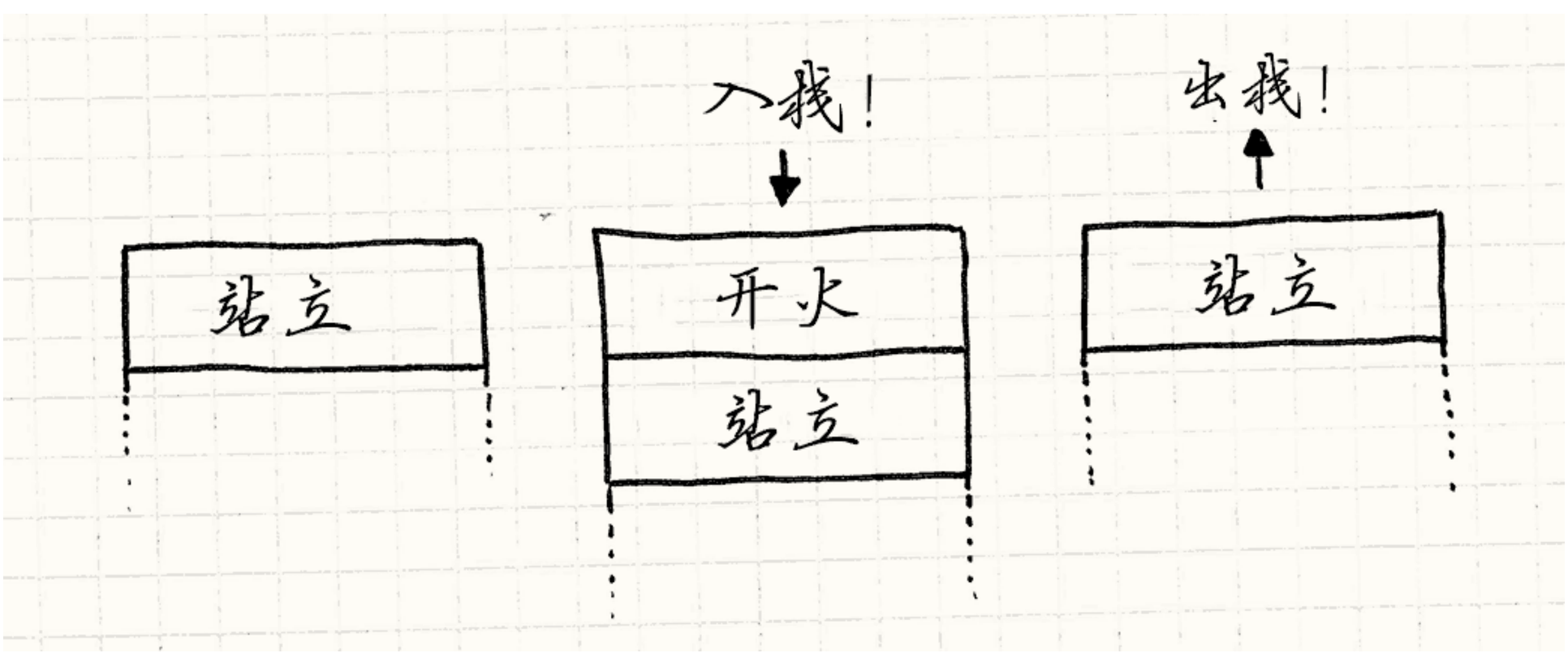
问题在于她射击*后*转换到的状态。 她可以在站立，奔跑，跳跃，跳斩时射击。 当射击结束，应该转换为她之前的状态。

如果我们固执于纯粹的FSM，我们就已经忘了她之前所处的状态。 为了追踪之前的状态，我们定义了很多几乎完全一样的类——站立开火，跑步开火，跳跃开火，诸如此类—— 每个都有硬编码的转换，用来回到之前的状态。

我们真正想要的是，它会*存储*开火前所处的状态，之后能*回想*起来。 自动理论又一次能帮上忙了，相关的数据结构被称为*下推自动机*。

有限状态机有*一个*指向状态的指针，下推自动机有*一栈*指针。 在FSM中，新状态*代替*了之前的那个状态。 下推自动机不仅能完成那个，还能给你两个额外操作：

1. 你可以将新状态*压入*栈中。“当前的”状态总是在栈顶，所以你能转到新状态。 但它让之前的状态待在栈中而不是销毁它。
2. 你可以*弹出*最上面的状态。这个状态会被销毁，它下面的状态成为新状态。



这正是我们开火时需要的。我们创建*单一的*开火状态。 当开火按钮在其他状态按下时，我们*压入*开火状态。 当开火动画结束，我们*弹出*开火状态，然后下推自动机自动转回之前的状态。

所以它们有多有用呢?

即使状态机有这些常见的扩展，它们还是很受限制。 这让今日游戏AI移向了更加激动人心的领域，比如*行为树*和*规划系统* 。 如果你关注复杂AI，这一整章只是为了勾起你的食欲。你需要阅读其他书来满足你的欲望。

这不意味着有限状态机，下推自动机，和其他简单的系统没有用。 它们是特定问题的好工具。有限状态机在以下情况有用:

- 你有个实体，它的行为基于一些内在状态。
- 状态可以被严格的分割为相对较少的不相干项目。
- 实体响应一系列输入或事件。

在游戏中，状态机因在AI中使用而闻名，但是它也常用于其他领域， 比如处理玩家输入，导航菜单界面，分析文字，网络协议以及其他异步行为。

序列模式

游戏设计模式

电子游戏之所有有趣，很大程度上归功于它们会将我们带到别的地方。 几分钟后（或者，诚实点，可能会更长），我们活在一个虚拟的世界。 创造那样的世界是游戏程序员至上的欢愉。

大多数游戏世界都有的特性是*时间*——虚构世界以其特定的节奏运行。 作为世界的架构师，我们必须发明时间，制造推动游戏时间运作的齿轮。

这本篇的模式是建构这些的工具。 游戏循环是时钟的中心轴。 对象通过更新方法来聆听时钟的滴答声。 我们可以用双缓冲模式存储快照来隐藏计算机的顺序执行，这样看起来世界可以进行同步更新。

模式

- 双缓冲模式
- 游戏循环
- 更新方法

双缓冲模式

游戏设计模式Sequencing Patterns

意图

用序列的操作模拟瞬间或者同时发生的事情。

动机

电脑具有强大的序列化处理能力。 它的力量来自于将大的任务分解为小的步骤，这样可以一步接一步的完成。 但是，通常用户需要看到事情发生在瞬间或者让多个任务同时进行。

使用线程和多核架构让这种说法不那么正确了，但哪怕使用多核，也只有一些操作可以同步运行。

一个典型的例子，也是每个游戏引擎都得掌控的问题，渲染。 当游戏渲染玩家所见的世界时，它同时需要处理一堆——远处的山，起伏的丘陵，树木，每个都在各自的循环中处理。 如果在用户*观察*时增量做这些，连续世界的幻觉就会被打破。 场景必须快速流畅地更新，显示一系列完整的帧，每帧都是立即出现的。

双缓冲解决了这个问题，但是为了理解其原理，让我们首先的复习下计算机是如何显示图形的。

计算机图形系统是如何工作的（概述）

在电脑屏幕上显示图像是一次绘制一个像素点。 它从左到右扫描每行像素点，然后移动至下一行。 当抵达了右下角，它退回左上角重新开始。 它做得飞快——每秒六十次——因此我们的眼睛无法察觉。 对我们来说，这是一整张静态的彩色像素——一张图像。

这个解释是，额，“简化过的”。 如果你是底层软件开发人员，跳过下一节吧。 你对这章的其余部分已经了解的够多了。 如果你不是，这部分的目标是给你足够的背景知识，理解等要讨论的设计模式。

你可以将整个过程想象为软管向屏幕喷洒像素。 独特的像素从软管的后面流入，然后在屏幕上喷洒，每次对一个像素涂一点颜色。 所以软管怎么知道哪种颜色要喷到哪里?

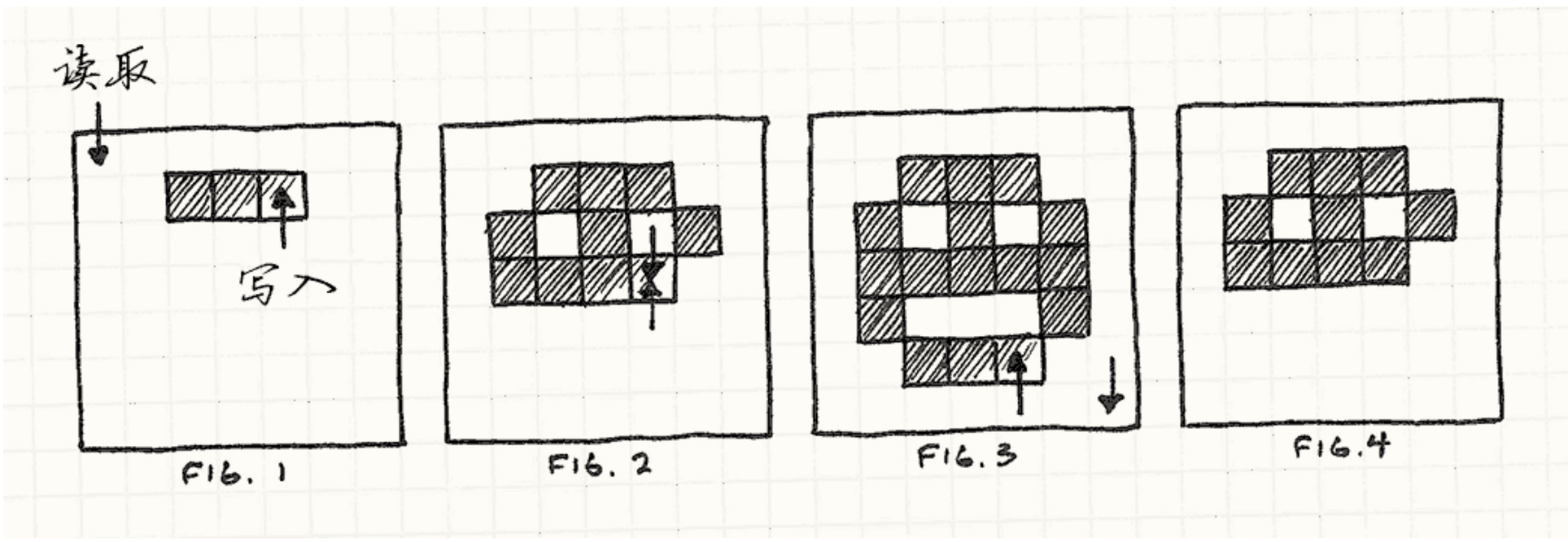
在大多数电脑上，答案是从*帧缓冲*中获知这些信息。 帧缓冲是内存中的色素数组，RAM中每两个字节代表表示一个像素点的颜色。 当软管向屏幕喷洒时，它从这个数组中读取颜色值，每次一个字节。

在字节值和颜色之间的映射通常由系统的*像素格式*和*色深*来指定。 在今日多数游戏主机上，每个像素都有32位，红绿蓝三个各占八位，剩下的八位保留作其他用途。

最终，为了让游戏显示在屏幕中，我们需要做的就是写入这个数组。 我们疯狂摆弄的图形算法最终都到了这里：设置帧缓冲中的字节值。 但这里有个小问题。

早先，我说过计算机是顺序处理的。 如果机器在运行一块渲染代码，我们不指望它同时还能做些别的什么事。 这通常是没啥问题，但是有些事*确实*在程序运行时发生。 其中一件是，当游戏运行时，视频输出正在*不断*从帧缓冲中读取数据。 这可能会为我们带来问题。

假设我们要在屏幕上显示一张笑脸。 程序在帧缓冲上开始循环，为像素点涂色。 我们没有意识到的是，在写入的同时，视频驱动正在读取它。 当它扫描过已写的像素时，笑脸开始浮现，但是之后它进入了未写的部分，就将没有写的像素绘制到了屏幕上。结果就是*撕裂*，你在屏幕上看到了绘制到一半的图像，这是可见的可怕漏洞。



显卡设备读取的缓冲帧正是我们绘制像素的那块(Fig. 1)。 显卡最终追上了渲染器，然后越过它，读取了还没有写入的像素(Fig. 2)。 我们完成了绘制，但驱动没有收到那些新像素。

结果(Fig. 4)是用户只看到了一半的绘制结果。 我称它为“哭脸”，笑脸看上去下半部是撕裂的。

这就是我们需要这个设计模式的原因。 程序一次渲染一个像素，但是显示需要一次全部看到——在这帧中啥也没有，下一帧笑脸全部出现。 双缓冲解决了这个问题。我会用类比来解释。

表演1，场景1

想象玩家正在观看我们的表演。 在场景一结束而场景二开始时，我们需要改变舞台设置。如果让场务在场景结束后进去拖动东西，在场景的连贯性就被打破了。 我们可以减弱灯光（这是剧院真正所做的），但是观众还是知道*有什么*在进行，而我们想在场景间毫无跳跃的转换。

消耗一些地皮，我们想到了一个聪明的解决方案：建*两个*舞台，观众两个都能看到。 每个有它自己的一组灯光。我们称这些舞台为舞台A和舞台B。 场景一在舞台A上。同时场务在处于黑暗之中的舞台B布置场景二。 当场景一完成后，切断场景A的灯光，将打开场景B的灯光。观众看向新舞台，场景二立即开始。

同时，场务到了黑咕隆咚的舞台*A*，收拾了场景一然后布置场景三。 一旦场景二结束，将灯光转回舞台A。 我们在整场表演中进行这样的活动，使用黑暗的舞台作为布置下一场景的工作区域。 每一次场景转换，只是在两个舞台间切换灯光。 观众获得了连续的体验，场景转换时没有感到任何中断。他们从来没有见到场务。

使用单面镜以及其他的巧妙布置，你可以真正的在同一*位置*布置两个舞台。 随着灯光切换，观众看到了不同的舞台，无需看向不同的地方。 如何这样布置舞台就留给读者做练习吧。

重新回到图形

这就是双缓冲的工作原理， 这就是你看到的几乎每个游戏背后的渲染系统。 不只用一个帧缓冲，我们用*两个*。其中一个代表现在的帧，即类比中的舞台A，也就是说是显卡读取的那一个。 GPU可以想什么时候扫就什么时候扫。

但不是*所有*的游戏主机都是这么做的。 更老的简单主机中，内存有限，需要小心的同步绘制和渲染。那很需要技巧。

同时，我们的渲染代码正在写入*另一个*帧缓冲。 即黑暗中的舞台B。当渲染代码完成了场景的绘制，它将通过*交换*缓存来切换灯光。 这告诉图形硬件开始从第二块缓存中读取而不是第一块。 只要在刷新之前交换，就不会有任何撕裂出现，整个场景都会一下子出现。

这时可以使用以前的帧缓冲了。我们可以将下一帧渲染在它上面了。超棒！

模式

定义*缓冲类*封装了**缓冲**：一段可改变的状态。 这个缓冲被增量的修改，但我们想要外部的代码将修改视为单一的原子操作。 为了实现这点，类保存了*两个*缓冲的实例：**下一缓冲**和**当前缓冲**。

当信息*从*缓冲区中读取，它总是读取*当前的*缓冲区。 当信息需要*写到*缓存，它总是在*下一*缓冲区上操作。 当改变完成后，一个**交换**操作会立刻将当前缓冲区和下一缓冲区交换， 这样新缓冲区就是公共可见的了。旧的缓冲区成为下一个重用的缓冲区。

何时使用

这是那种你需要它时自然会想起的模式。 如果你有一个系统需要双缓冲，它可能有可见的错误（撕裂之类的）或者行为不正确。 但是，“当你需要时自然会想起”没提提供太多有效信息。 更加特殊的，以下情况都满足时，使用这个模式就很恰当：

- 我们需要维护一些被增量修改的状态。
- 在修改到一半的时候，状态可能会被外部请求。
- 我们想要防止请求状态的外部代码知道内部的工作方式。
- 我们想要读取状态，而且不想等着修改完成。

记住

不像其他较大的架构模式，双缓冲模式位于底层。 正因如此，它对代码库的其他部分影响较小——大多数游戏甚至不会感到有区别。 尽管这里还是有几个警告。

交换本身需要时间

在状态被修改后，双缓冲需要一个*swap*步骤。 这个操作必须是原子的——在交换时，没有代码可以接触到*任何一个*状态。 通常，这就是修改一个指针那么快，但是如果交换消耗的时间长于修改状态的时间，那可是毫无助益。

我们得保存两个缓冲区

这个模式的另一个结果是增加了内存的使用。 正如其名，这个模式需要你在内存中一直保留*两个*状态的拷贝。 在内存受限的设备上，你可能要付出惨痛的代价。 如果你不能接受使用两份内存，你需要使用别的方法保证状态在修改时不会被请求。

示例代码

我们知道了理论，现在看看如何它在实践中如何应用。 我们编写了一个非常基础的图形系统，允许我们在缓冲帧上描绘像素。 在大多数主机和电脑上，显卡驱动提供了这种底层的图形系统， 但是在这里手动实现有助于理解发生了什么。首先是缓冲区本身：

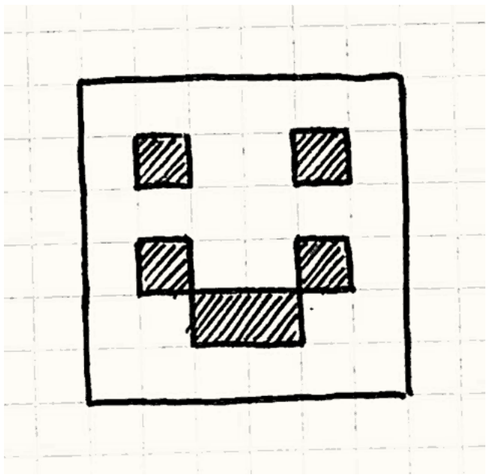
```
class Framebuffer
{
public:
  Framebuffer() { clear(); }

  void clear()
  {
    for (int i = 0; i < WIDTH * HEIGHT; i++)
    {
      pixels_[i] = WHITE;
    }
  }

  void draw(int x, int y)
  {
    pixels_[(WIDTH * y) + x] = BLACK;
  }

  const char* getPixels()
  {
    return pixels_;
  }

private:
  static const int WIDTH = 160;
  static const int HEIGHT = 120;

  char pixels_[WIDTH * HEIGHT];
};
```

它有将整个缓存设置成默认的颜色的操作，也将其一像素设置为特定颜色的操作。 它也有函数`getPixels()`，读取保存像素数据的数组。 虽然在这个例子没有出现，但在实际中，显卡驱动会频繁调用这个函数，将缓存中的数据输送到屏幕上。

我们将整个缓冲区封装在`Scene`类中。渲染某物需要做的是在这块缓冲区上调用一系列`draw()`。

```
class Scene
{
public:
  void draw()
  {
    buffer_.clear();

    buffer_.draw(1, 1);
    buffer_.draw(4, 1);
    buffer_.draw(1, 3);
    buffer_.draw(2, 4);
    buffer_.draw(3, 4);
    buffer_.draw(4, 3);
  }

  Framebuffer& getBuffer() { return buffer_; }

private:
  Framebuffer buffer_;
};
```

特别的，它画出来这幅旷世杰作：



每一帧，游戏告诉场景去绘制。场景清空缓冲区然后一个接一个绘制一大堆像素。 它也提供了`getBuffer()`获得缓冲区，这样显卡可以接触到它。

这看起来直截了当，但是如果就这样做，我们会遇到麻烦。 显卡驱动可以在*任何*时间调用`getBuffer()`，甚至在这个时候：

```
buffer_.draw(1, 1);
buffer_.draw(4, 1);
// <- 图形驱动从这里读取像素!
buffer_.draw(1, 3);
buffer_.draw(2, 4);
buffer_.draw(3, 4);
buffer_.draw(4, 3);
```

当上面的情况发生时，用户就会看到脸的眼睛，但是这一帧中嘴却消失了。 下一帧，又可能在某些别的地方发生冲突。最终结果是糟糕的闪烁图形。我们会用双缓冲修复这点：

```
class Scene
{
public:
  Scene()
  : current_(&buffers_[0]),
    next_(&buffers_[1])
  {}

  void draw()
  {
    next_->clear();

    next_->draw(1, 1);
    // ...
    next_->draw(4, 3);

    swap();
  }

  Framebuffer& getBuffer() { return *current_; }

private:
  void swap()
  {
    // 只需交换指针
    Framebuffer* temp = current_;
    current_ = next_;
    next_ = temp;
  }

  Framebuffer  buffers_[2];
  Framebuffer* current_;
  Framebuffer* next_;
};
```

现在`Scene`有存储在`buffers_`数组中的两个缓冲区，。 我们并不从数组中直接引用它们。 而是通过两个成员，`next_`和`current_`，指向这个数组。 当绘制时，我们绘制在`next_`指向的缓冲区上。 当显卡驱动需要获得像素信息时，它总是通过`current_`获取*另一个*缓冲区。

通过这种方式，显卡驱动永远看不到我们正在施工的缓冲区。 解决方案的的最后一片碎片就是在场景完成绘制一帧的时候调用`swap()`。 它通过交换`next_`和`current_`的引用完成这一点。 下一次显卡驱动调用`getBuffer()`，它会获得我们刚刚完成渲染的新缓冲区， 然后将刚刚描绘好的缓冲区放在屏幕上。没有撕裂，也没有不美观的问题。

不仅是图形

双缓冲解决的核心问题是状态有可能在被修改的同时被请求。 这通常有两种原因。图形的例子覆盖了第一种原因——另一线程的代码或者另一个中断的代码直接访问了状态。

但是，还有一个同样常见的原因：*负责修改的*代码试图访问同样正在修改状态。 这可能发生在很多地方，特别是实体的物理部分和AI部分，实体在相互交互。 双缓冲在那里也十分有用。

人工不智能

假设我们正在构建一个关于趣味喜剧的游戏的行为系统。 这个游戏包括一堆跑来跑去寻欢作乐的角色。这里是我们的基础角色：

```
class Actor
{
public:
  Actor() : slapped_(false) {}

  virtual ~Actor() {}
  virtual void update() = 0;

  void reset()      { slapped_ = false; }
  void slap()       { slapped_ = true; }
  bool wasSlapped() { return slapped_; }

private:
  bool slapped_;
};
```

每一帧，游戏要在角色身上调用`update()`，让角色做些事情。 特别的，从玩家的角度，*所有的角色都看上去应该同时更新*。

这是更新方法模式的例子。

角色也可以相互交互，这里的“交互”，我指“可以互相扇对方巴掌”。 当更新时，角色可以在另一个角色身上调用`slap()`来扇它一巴掌，然后调用`wasSlapped()`看看自己是不是被扇了。

角色需要一个可以交互的舞台，让我们来布置一下：

```
class Stage
{
public:
  void add(Actor* actor, int index)
  {
    actors_[index] = actor;
  }

  void update()
  {
    for (int i = 0; i < NUM_ACTORS; i++)
    {
      actors_[i]->update();
      actors_[i]->reset();
    }
  }

private:
  static const int NUM_ACTORS = 3;

  Actor* actors_[NUM_ACTORS];
};
```

`Stage`允许我们向其中增加角色， 然后使用简单的`update()`调用来更新每个角色。 在用户看来，角色是同时移动的，但是实际上，它们是依次更新的。

这里需要注意的另一点是，每个角色的“被扇”状态在更新后就立刻被清除。 这样才能保证一个角色对一巴掌只反应一次。

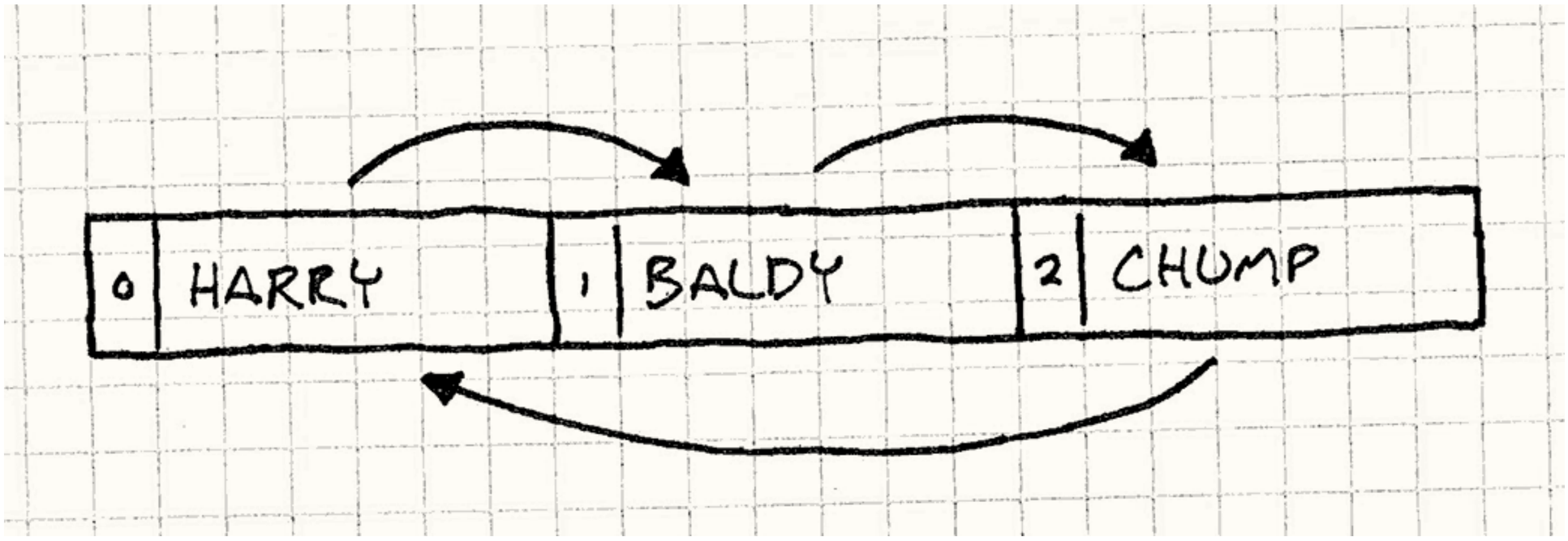
作为一切的开始，让我们定义一个具体的角色子类。 这里的喜剧演员很简单。 他只面向一个角色。当他被扇时——无论是谁扇的他——他的反应是扇他面前的人一巴掌。

```
class Comedian : public Actor
{
public:
  void face(Actor* actor) { facing_ = actor; }

  virtual void update()
  {
    if (wasSlapped()) facing_->slap();
  }

private:
  Actor* facing_;
};
```

现在我们把一些喜剧演员丢到舞台上看看发生了什么。 我们设置三个演员，第一个面朝第二个，第二个面朝第三个，第三个面对第一个，形成一个环：

```
Stage stage;

Comedian* harry = new Comedian();
Comedian* baldy = new Comedian();
Comedian* chump = new Comedian();

harry->face(baldy);
baldy->face(chump);
chump->face(harry);

stage.add(harry, 0);
stage.add(baldy, 1);
stage.add(chump, 2);
```

最终舞台布置如下图。箭头代表角色的朝向，然后数字代表角色在舞台数组中的索引。



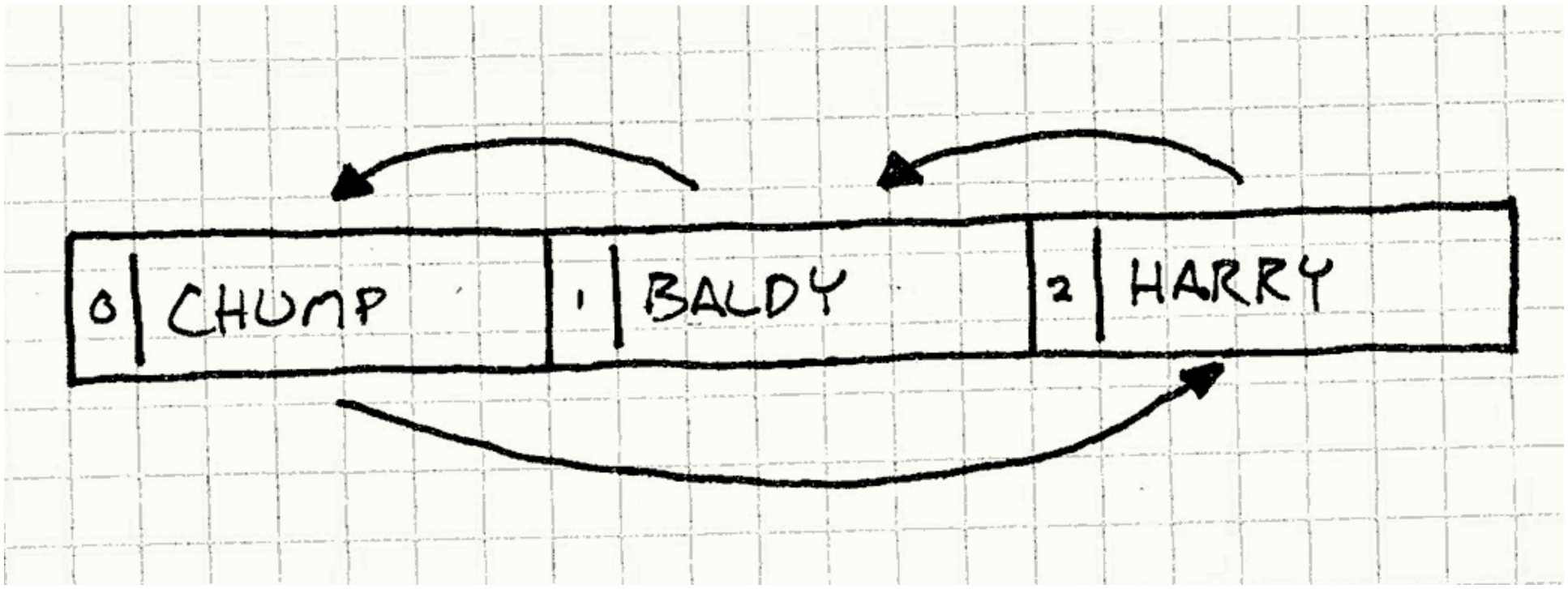
我们扇哈利一巴掌，为表演拉开序幕，看看之后会发生什么：

```
harry->slap();

stage.update();
```

记住`Stage`中的`update()`函数轮流更新每个角色， 因此如果检视整个代码，我们会发现事件这样发生：

```
Stage updates actor 0 (Harry)
  Harry was slapped, so he slaps Baldy
Stage updates actor 1 (Baldy)
  Baldy was slapped, so he slaps Chump
Stage updates actor 2 (Chump)
  Chump was slapped, so he slaps Harry
Stage update ends
```

在单独的一帧中，初始给哈利的一巴掌传给了所有的喜剧演员。 现在，让事物复杂起来，让我们重新排列舞台数组中角色的排序， 但是继续保持面向对方的方式。



我们不动舞台的其余部分，只是将添加角色到舞台的代码块改为如下：

```
stage.add(harry, 2);
stage.add(baldy, 1);
stage.add(chump, 0);
```

让我们看看再次运行时会发生什么：

```
Stage updates actor 0 (Chump)
  Chump was not slapped, so he does nothing
Stage updates actor 1 (Baldy)
  Baldy was not slapped, so he does nothing
Stage updates actor 2 (Harry)
  Harry was slapped, so he slaps Baldy
Stage update ends
```

哦不。完全不一样了。问题很明显。 更新角色时，我们修改了他们的“被扇”状态，这也是我们在更新时*读取*的状态。 因此，在更新中早先的状态修改会影响之后*同*一状态的修改的步骤。

如果你继续更新舞台，你会看到巴掌在角色间逐渐传递，每帧传递一个。 在第一帧 Harry扇了Baldy。下一帧，Baldy扇了Chump，如此类推。

而最终的结果是，一个角色对被扇作出反应可能是在被扇的*同*一帧或者*下*一帧， 这完全取决于两个角色在舞台上是如何排序的。 这没能满足我角色同时反应的需求——它们在同一帧中更新的顺序不该对结果有影响。

缓存巴掌

幸运的是，双缓冲模式可以帮忙。 这次，不是保存两大块“缓冲”，我们缓冲更小粒度的事物：每个角色的“被扇”状态。

```
class Actor
{
public:
  Actor() : currentSlapped_(false) {}

  virtual ~Actor() {}
  virtual void update() = 0;

  void swap()
  {
    // 交换缓冲区
    currentSlapped_ = nextSlapped_;

    // 清空新的“下一个”缓冲区。.
    nextSlapped_ = false;
  }

  void slap()        { nextSlapped_ = true; }
  bool wasSlapped() { return currentSlapped_; }

private:
  bool currentSlapped_;
  bool nextSlapped_;
};
```

不再使用一个`slapped_`状态，每个演员现在使用两个。 就像我们之前图形的例子一样，当前状态为读准备，下一状态为写准备。

`reset()`函数被替换为`swap()`。 现在，就在清除交换状态前，它将下一状态拷贝到当前状态上， 使其成为新的当前状态，这还需要在`Stage`中进行小小的改变：

```
void Stage::update()
{
  for (int i = 0; i < NUM_ACTORS; i++)
  {
    actors_[i]->update();
  }

  for (int i = 0; i < NUM_ACTORS; i++)
  {
    actors_[i]->swap();
  }
}
```

`update()`函数现在更新所有的角色，*然后*交换它们的状态。 最终结果是，角色在实际被扇*之后*的那帧才能看到巴掌。 这样一来，角色无论在舞台数组中如何排列，都会保持相同的行为。 无论外部的代码如何调用，所有的角色在一帧内同时更新。

设计决策

双缓冲很直观，我们上面看到的例子也覆盖了大多数你需要的场景。 使用这个模式之前，还有需要做两个主要的设计决策。

缓冲区是如何被交换的?

交换操作是整个过程的最重要的一步， 因为在其发生时，我们必须锁住两个缓冲区上的读取和修改。 为了让性能最优，我们需要它进行得越快越好。

- **交换缓冲区的指针或者引用：** 这是我们图形例子中的做法，这也是大多数双缓冲图形通用的解决方法。
  - *速度快。* 不管缓冲区有多大，交换都只需赋值一对指针。很难在速度和简易性上超越它。
  - *外部代码不能存储对缓存的永久指针。* 这是主要限制。 由于我们没有真正地移动数据，本质上做的是周期性地通知代码库的其他部分去别处去寻找缓存， 就像前面的舞台类比一样。这就意味着代码库的其他部分不能存储指向缓冲区中数据的指针—— 它一段时间后可能就指向了错误的部分。

这会严重误导那些期待缓冲帧永远在内存中的固定地址的显卡驱动。在这种情况下，我们不能这么做。

  - *缓冲区中的数据是两帧之前的数据，而不是上一帧的数据。* 接下来的那帧绘制在帧缓冲区上，而不是在它们之间拷贝数据，就像这样：

```
Frame 1 drawn on buffer A
Frame 2 drawn on buffer B
Frame 3 drawn on buffer A
...
```

    你会注意到，当我们绘制第三帧时，缓冲区上的数据是*第一帧*的，而不是第二帧的。大多数情况下，这不是什么问题——我们通常在绘制之前清空整个帧。但如果想沿用某些缓存中已有的数据，就需要考虑数据其实比期望的更旧。

    旧帧中缓存数据的经典用法是模拟动态模糊。 当前的帧混合一点之前的帧，看起来更像真实的相机捕获的图景。

- **在缓冲区之间拷贝数据：** 如果我们不能重定向到其他缓存，唯一的选项就是将下帧的数据实实在在的拷贝到现在这帧上。 这是我们的扇巴掌喜剧的工作方法。 这种情况下，使用这种方法因为拷贝状态——一个简单的布尔标识——不比修改指向缓存的指针开销大。
  - *下一帧的数据和之前的数据相差一帧。* 拷贝数据与在两块缓冲区间跳来跳去正相反。如果我们需要前一帧的数据，这样我们可以处理更新的数据。
  - *交换也许更花时间。* 这个，当然，是最大的缺点。交换操作现在意味着在内存中拷贝整个缓冲区。 如果缓冲区很大，比如一整个缓冲帧，这需要花费可观的时间。 由于交换时没有东西可以读取或者写入*任何一个*缓冲区，这是一个巨大的限制。

缓冲的粒度如何?

这里另一问题是缓冲区本身是如何组织的——是单个数据块还是散布在对象集合中? 图形例子是前一种，而角色例子是后一种。

大多数情况下，你缓存的方式自然而然会引导你找到答案，但是这里也有些灵活度。 比如，角色总能将消息存在独立的消息块中，使用索引来引用。

- **如果缓存是一整块:**
  - *交换操作更简单。* 由于只有一对缓存，一个简单的交换就完成了。 如果可以改变指针来交换，那么不必在意缓冲区大小，只需几部操作就可以交换整个缓冲区。
- **如果很多对象都持有一块数据:**
  - *交换操作更慢。* 为了交换，需要遍历整个对象集合，通知每个对象交换。

    在喜剧的例子中，这没问题，因为反正需要清除被扇状态 ——每块缓存的数据每帧都需要接触。 如果不需要接触较旧的帧，可以用一个优化在多个对象间分散状态，获得使用整块缓存一样的性能。

    思路是将“当前”和“下一”指针概念，将它们改为对象相关的*偏移量*。就像这样:

```
class Actor
{
public:
  static void init() { current_ = 0; }
  static void swap() { current_ = next(); }

  void slap()        { slapped_[next()] = true; }
  bool wasSlapped()  { return slapped_[current_]; }

private:
  static int current_;
  static int next()  { return 1 - current_; }

  bool slapped_[2];
};
```

角色使用`current_`在状态数组中查询，获得当前的被扇状态， 下一状态总是数组中的另一索引，这样可以用`next()`来计算。 交换状态只需改动`current_`索引。 聪明之处在于`swap()`现在是*静态*函数，它只需被调用一次，*每个*角色的状态都会被交换。

参见

- 你可以在几乎每个图形API中找到双缓冲模式。举个例子，OpenGL有`swapBuffers()`，Direct3D有”swap chains”, Microsoft的XNA框架有`endDraw()`方法。

游戏循环

游戏设计模式Sequencing Patterns

意图

将游戏的进行和玩家输入解耦，和处理器速度解耦。

动机

如果本书中有一个不可或缺模式，那非这个模式莫属了。 游戏循环是“游戏设计模式”的精髓。 几乎每个游戏都有，两两不同，而在非游戏的程序几乎没有使用。

为了看看它多有用，让我们快速缅怀一遍往事。 每个编写计算机程序的人都留着胡子的时代，程序像洗碗机一样工作。 你输入一堆代码，按个按钮，等待，然后获得结果，完成。 程序全都是*批处理模式*的——一旦工作完成，程序就停止了。

Ada Lovelace和Rear Admiral Grace Hopper是女程序员，并没有胡子。

你在今日仍然能看到这些程序，虽然感谢上天，我们不必在打孔纸上面编写它们了。 终端脚本，命令行程序，甚至将Markdown翻译成这本书的Python脚本都是批处理程序。

采访CPU

最终，程序员意识到将批处理代码留在计算办公室，等几个小时后拿到结果才能开始找程序漏洞的方式实在低效。 他们想要立即的反馈。*交互式* 程序诞生了。 第一批交互式程序中的就有游戏：

```
YOU ARE STANDING AT THE END OF A ROAD BEFORE A SMALL BRICK
BUILDING . AROUND YOU IS A FOREST. A SMALL
STREAM FLOWS OUT OF THE BUILDING AND DOWN A GULLY.

> GO IN
YOU ARE INSIDE A BUILDING, A WELL HOUSE FOR A LARGE SPRING.
```

这是Colossal Cave Adventure，史上首个冒险游戏。

你可以和这个程序进行实时交互。 它等待你的输入，然后进行响应。 你再输入，这样一唱一和，就像相声一样。 当轮到你时，它停在那里啥也不做。像这样：

```
while (true)
{
  char* command = readCommand();
  handleCommand(command);
}
```

这程序会永久循环，所以没法退出游戏。 真实的游戏会做些`while (!done)`进行检查，然后通过设置`done`为真来退出游戏。 我省去了那些，保持简明。

事件循环

如果你剥开现代的图形UI的外皮，会惊讶地发现它们与老旧的冒险游戏差不多。 文本处理器通常呆在那里什么也不做，直到你按了个键或者点了什么东西：

```
while (true)
{
  Event* event = waitForEvent();
  dispatchEvent(event);
}
```

这与冒险游戏主要的不同是，程序不是等待*文本指令*，而是等待*用户输入事件*——鼠标点击、按键按下之类的。 其他部分还是和以前的老式文本冒险游戏一样，程序*阻塞*等待用户的输入，这是个问题。

不像其他大多数软件，游戏即使没有玩家输入时也继续运行。 如果你站在那里看着屏幕，游戏不会冻结。动画继续动着。视觉效果继续闪烁。 如果不幸的话，怪物继续吞噬你的英雄。

件循环有“空转”事件，这样你可以无需用户输入间歇地做些事情。 对于闪烁的光标或者进度条已经足够了，但对于游戏就太原始了。

这是真实游戏循环的第一个关键部分：*它处理用户输入，但是不等待它*。循环总是继续旋转：

```
while (true)
{
  processInput();
  update();
  render();
}
```

我们之后会改善它，但是基本的部分都在这里了。 `processInput()`处理上次调用到现在的任何输入。 然后`update()`让游戏模拟一步。 运行AI和物理（通常是这种顺序）。 最终，`render()`绘制游戏，这样玩家可以看到发生了什么。

就像你可以从名字中猜到的， `update()`是使用更新方法模式的好地方。

时间之外的世界

如果这个循环没有因为输入而阻塞，这就带来了明显的问题，要运转*多快*呢？ 每次进行游戏循环都会推动一定的游戏状态的发展。 在游戏世界的居民看来，他们手上的表就会滴答一下。

运行游戏循环一次的常用术语就是“滴答”(tick)和“帧”(frame)。

同时，*玩家的*真实手表也在滴答着。 如果我们用实际时间来测算游戏循环运行的速度，就得到了游戏的“帧率”(FPS)。 如果游戏循环的更快，FPS就更高，游戏运行的更流畅更快。 如果循环得过慢，游戏看上去就像是慢动作电影。

我们现在写的这个循环是能转多快转多快，两个因素决定了帧率。 一个是*每帧要做多少工作*。复杂的物理，众多游戏对象，图形细节都让CPU和GPU繁忙，这决定了需要多久能完成一帧。

另一个是*底层平台的速度*。 更快的芯片可以在同样的时间里执行更多的代码。 多核，GPU组，独立声卡，以及系统的调度都影响了在一次滴答中能够做多少东西。

每秒的帧数

在早期的视频游戏中，第二个因素是固定的。 如果你为NES或者Apple IIe写游戏，你*明确*知道游戏运行在什么CPU上。 你可以（也必须）为它特制代码。 你只需担忧第一个因素：每次滴答要做多少工作。

早期的游戏被仔细地编码，一帧只做一定的工作，开发者可以让游戏以想要的速率运行。 但是如果你想要在快些或者慢些的机器上运行同一游戏，游戏本身就会加速或减速。

这就是为什么老式计算机通常有“turbo”按钮。 新的计算机运行得太快了，无法玩老游戏，因为游戏也会运行的过快。 *关闭* turbo按钮，会减慢计算机的运行速度，就可以运行老游戏了。

现在，很少有开发者可以奢侈地知道游戏运行的硬件条件。游戏必须自动适应多种设备。

这就是游戏循环的另一个关键任务：*不管潜在的硬件条件，以固定速度运行游戏。*

模式

一个**游戏循环**在游玩中不断运行。 每一次循环，它无阻塞地**处理玩家输入**，**更新游戏状态**，**渲染游戏**。 它追踪时间的消耗并**控制游戏的速度。**

何时使用

使用错误的模式比不使用模式更糟，所以这节通常告诫你不要过于热衷设计模式。 设计模式的目标不是往代码库里尽可能的塞东西。

但是这个模式有所不同。我可以很自信的说你会使用这个模式。 如果你使用游戏引擎，你不需要自己编写，但是它还在那里。

对于我，这是“引擎”与“库”的不同之处。 使用库时，你拥有游戏循环，调用库代码。 使用引擎时，引擎拥有游戏循环，调用*你的*代码。

你可能认为在做回合制游戏时不需要它。 但是哪怕是那里，就算*游戏状态*到玩家回合才改变，*视觉*和*听觉*状态仍会改变。 哪怕游戏在“等待”你进行你的回合，动画和音乐也会继续运行。

记住

我们这里谈到的循环是游戏代码中最重要的部分。 有人说程序会花费90%的时间在10%的代码上。 游戏循环代码肯定在这10%中。 你必须小心谨慎，时时注意效率。

“真正的”工程师，比如机械或电子工程师，不把我们当回事，大概就是因为我们像这样使用统计学是。

你也许需要与平台的事件循环相协调

如果你在操作系统的顶层或者有图形UI和内建事件循环的平台上构建游戏， 那你就有了两个应用循环在同时运作。 它们需要很好的协调。

有时候，你可以进行控制，只运行你的游戏循环。 举个例子，如果舍弃了Windows的珍贵API，`main()`可以只用游戏循环。 其中你可以调用`PeekMessage()`来处理和分发系统的事件。 不像`GetMessage()`，`PeekMessage()`不会阻塞等待用户输入， 因此你的游戏循环会保持运作。

其他的平台不会让你这么轻松地摆脱事件循环。 如果你使用网页浏览器作为平台，事件循环已被内建在浏览器的执行模型深处。 这样，你得用事件循环作为游戏循环。 你会调用`requestAnimationFrame()`之类的函数，它会回调你的代码，保持游戏继续运行。

示例代码

在如此长的介绍之后，游戏循环的代码实际上很直观。 我们会浏览一堆变种，比较它们的好处和坏处。

游戏循环驱动了AI，渲染和其他游戏系统，但这些不是模式的要点， 所以我们会调用虚构的方法。在实现了`render()`，`update()`之后， 剩下的作为给读者练习（挑战！）。

跑，能跑多快跑多快

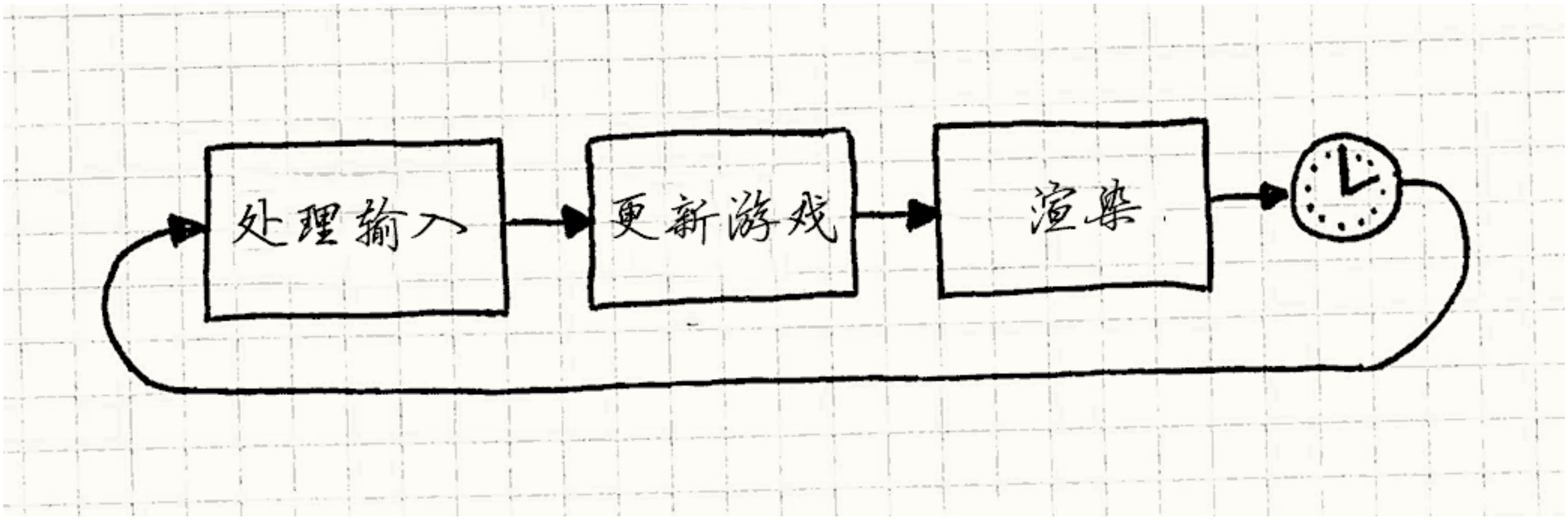
我们已经见过了可能是最简单的游戏循环：

```
while (true)
{
  processInput();
  update();
  render();
}
```

它的问题是你不能控制游戏运行的有多快。 在快速机器上，循环会运行的太快，玩家看不清发生了什么。 在慢速机器上，游戏慢的跟在爬一样。 如果游戏的一部分有大量内容或者做了很多AI或物理运算，游戏就会慢一些。

休息一下

我们看看增加一个简单的小修复如何。 假设你想要你的游戏以60FPS运行。这样每帧大约16毫秒。 只要你用少于这个时长进行游戏所有的处理和渲染，就可以以稳定的帧率运行。 你需要做的就是处理这一帧然后*等待*，直到处理下一帧的时候，就像这样：



代码看上去像这样：

1000 毫秒 / 帧率 = 毫秒每帧.

```
while (true)
{
  double start = getCurrentTime();
  processInput();
  update();
  render();

  sleep(start + MS_PER_FRAME - getCurrentTime());
}
```

如果它很快的处理完一帧，这里的`sleep()`保证了游戏不会运行太*快*。 如果你的游戏运行太*慢*，这无济于事。 如果需要超过16ms来更新并渲染一帧，休眠的时间就变成了*负的*。 如果计算机能回退时间，很多事情就很容易了，但是它不能。

相反，游戏变慢了。 可以通过每帧少做些工作来解决这个问题——减少物理效果和绚丽光影，或者把AI变笨。 但是这影响了那些有快速机器的玩家的游玩体验。

一小步，一大步

让我们尝试一些更加复杂的东西。我们拥有的问题基本上是：

1. 每次更新将游戏时间推动一个固定量。
2. 这消耗一定量的*真实*时间来处理它。

如果第二步消耗的时间超过第一步，游戏就变慢了。 如果它需要超过16ms来推动游戏时间16ms，那它永远也跟不上。 但是如果一步中推动游戏时间*超过*16ms，那我们可以减少更新频率，就可以跟得上了。

接着的思路是基于上帧到现在有多少*真实*时间流逝来选择前进的时间。 这一帧花费的时间越长，游戏的间隔越大。 它总能跟上真实时间，因为它走的步子越来越大。 有人称之为变*化的*或者*流动的*时间间隔。它看上去像是：

```
double lastTime = getCurrentTime();
while (true)
{
  double current = getCurrentTime();
  double elapsed = current - lastTime;
  processInput();
  update(elapsed);
  render();
  lastTime = current;
}
```

每一帧，我们计算上次游戏更新到现在有多少*真实*时间过去了（即变量`elapsed`）。 当我们更新游戏状态时将其传入。 然后游戏引擎让游戏世界推进一定的时间量。

假设有一颗子弹跨过屏幕。 使用固定的时间间隔，在每一帧中，你根据它的速度移动它。使用变化的时间间隔，你*根据过去的时间拉伸速度*。 随着时间间隔增加，子弹在每帧间移动的更远。 无论是二十个快的小间隔还是四个慢的大间隔，子弹在*真实*时间里移动*同样多*的距离。 这看上去成功了：

- 游戏在不同的硬件上以固定的速度运行。

- 使用高端机器的玩家获得了更流畅的游戏体验。

但是，悲剧，这里有一个严重的问题： 游戏不再是确定的了，也不再稳定。 这是我们给自己挖的一个坑：

“确定的”代表每次你运行程序，如果给了它同样的输入，就获得同样的输出。 可以想得到，在确定的程序中追踪漏洞更容易——一旦找到造成漏洞的输入，每次你都能重现之。

计算机本身是确定的；它们机械地执行程序。 在纷乱的真实世界加入时，非确定性出现了。 例如，网络，系统时钟，和线程调度都依赖于超出程序控制的外部世界。

假设我们有个双人联网游戏，Fred的游戏机是台性能猛兽，而George正在使用他祖母的老爷机。 前面提到的子弹在他们的屏幕上飞行。 在Fred的机器上，游戏跑的超级快，每个时间间隔都很小。 比如，我们塞了50帧在子弹穿过屏幕的那一秒。 可怜的George的机器只能塞进大约5帧。

这就意味着在Fred的机器上，物理引擎每秒更新50次位置，但是George的只更新5次。 大多数游戏使用浮点数，它们有*舍入误差*。 每次你将两个浮点数加在一起，获得的结果就会有点偏差。 Fred的机器做了10倍的操作，所以他的误差要比George的更大。 *同样* 的子弹最终在他们的机器上到了*不同的位置*。

这是使用变化时间可引起的问题之一，还有更多问题呢。 为了实时运行，游戏物理引擎做的是实际机制法则的近似。 为了避免飞天遁地，物理引擎添加了阻尼。 这个阻尼运算被小心地安排成以固定的时间间隔运行。 改变了它，物理就不再稳定。

“飞天遁地”在这里使用的是它的字面意思。当物理引擎卡住，对象获得了完全错误的速度，就会飞到天上或者掉入地底。

这种不稳定性太糟了，这个例子在这里的唯一原因是作为警示寓言，引领我们到更好的东西……

追逐时间

游戏中渲染通常*不会*被动态时间间隔影响到。 由于渲染引擎表现的是时间上的一瞬间，它不会计算上次到现在过了多久。 它只是将当前事物渲染在所在的地方。

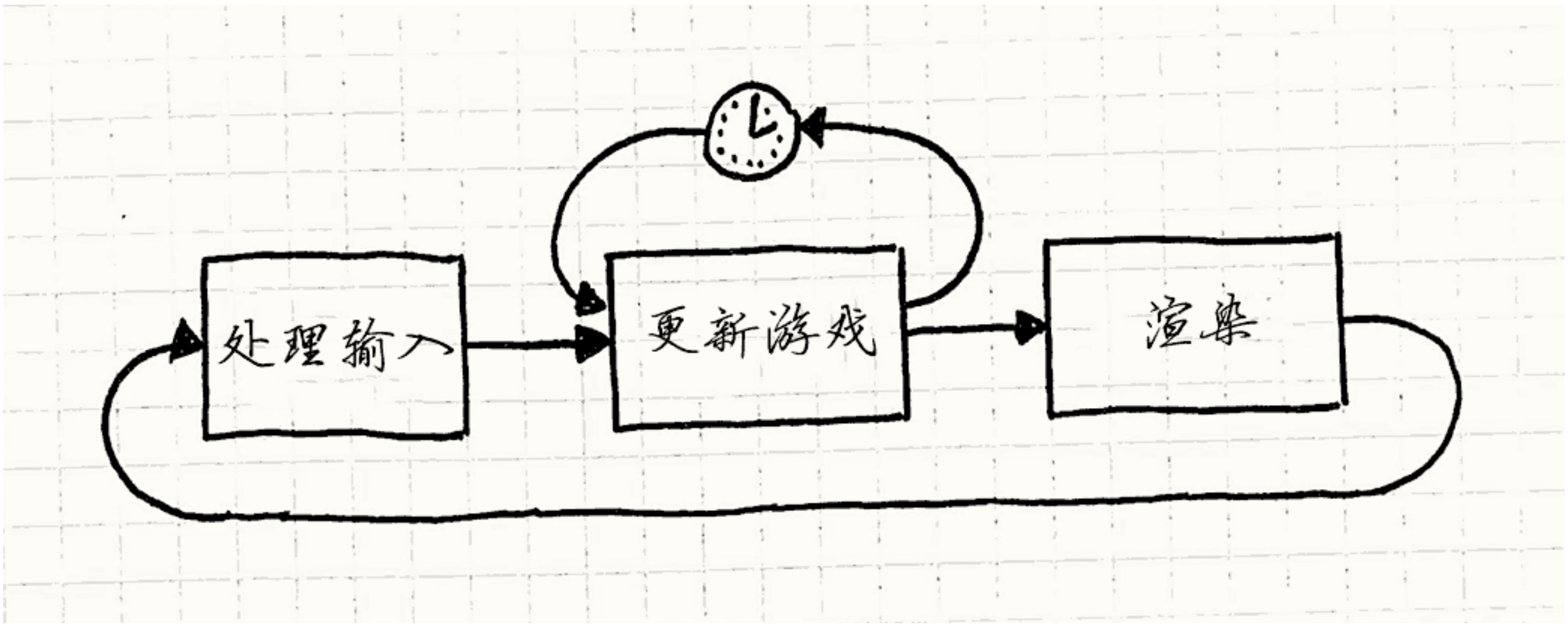
这或多或少是成立的。像动态模糊的东西会被时间间隔影响，但如果有一点延迟，玩家通常也不会注意到。

我们可以利用这点。 以固定的时间间隔*更新*游戏，因为这让所有事情变得简单，物理和AI也更加稳定。 但是我们允许灵活调整*渲染*的时刻，释放一些处理器时间。

它像这样运作：自上一次游戏循环过去了一定量的真实时间。 需要为游戏的“当前时间”模拟推进相同长度的时间，以追上玩家的时间。 我们使用一*系列*的*固定*时间步长。 代码大致如下：

```
double previous = getCurrentTime();
double lag = 0.0;
while (true)
{
  double current = getCurrentTime();
  double elapsed = current - previous;
  previous = current;
  lag += elapsed;

  processInput();

  while (lag >= MS_PER_UPDATE)
  {
    update();
    lag -= MS_PER_UPDATE;
  }

  render();
}
```

这里有几个部分。 在每帧的开始，根据过去了多少真实的时间，更新`lag`。 这变量表明了游戏世界时钟比真实世界落后了多少，然后我们使用一个固定时间步长的内部循环进行追赶。 一旦我们追上真实时间，我们就渲染然后开始新一轮循环。 你可以将其画成这样：



注意这里的时间步长不是*视觉上的*帧率了。 `MS_PER_UPDATE`只是我们更新游戏的*间隔*。 这个间隔越短，就需要越多的处理次数来追上真实时间。 它越长，游戏抖动的越厉害。 理想上，你想要它足够短，通常快过60FPS，这样游戏在高速机器上会有高效的表现。

但是小心不要把它整得*太短了*。 你需要保证即使在最慢的机器上，这个时间步长也超过处理一次`update()`的时间。 否则，你的游戏就跟不上现实时间了。

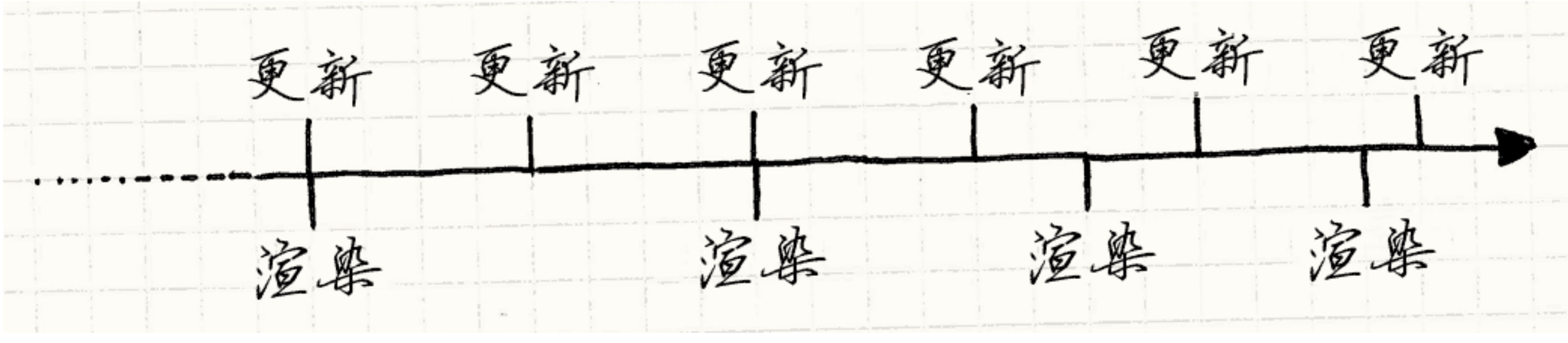
我不会详谈这个，但你可以通过限定内层循环最大次数来保证这一点。 游戏会变慢，但是比完全卡死要好。

幸运的是，我们给自己了一些喘息的空间。 技巧在于我们将*渲染拉出了更新循环*。 这释放了一大块CPU时间。 最终结果是游戏以固定时间步长*模拟*，该时间步长与硬件不相关。 只是使用低端硬件的玩家*看到的*会有抖动。

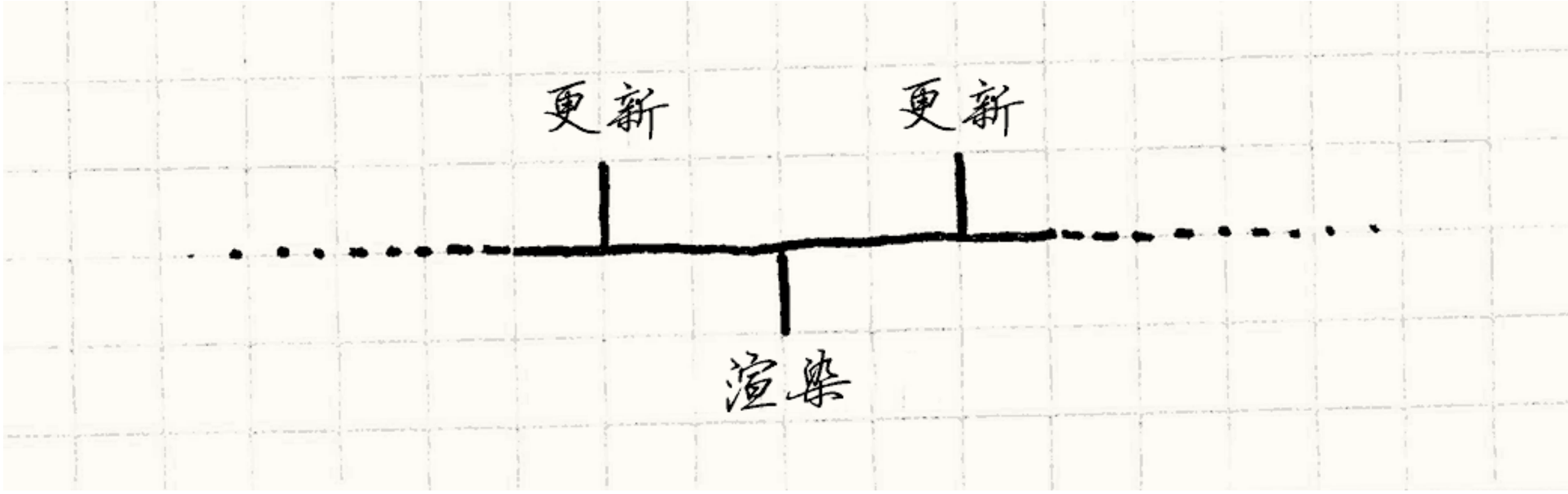
卡在中间

我们还剩一个问题，就是剩下的延迟。 以固定的时间步长更新游戏，在任意时刻渲染。 这就意味着从玩家的角度看，游戏经常在两次更新之间时显示。

这是时间线：



就像你看到的那样，我们以紧凑固定的时间步长进行更新。 同时，我们在任何可能的时候渲染。 它比更新发生的要少，而且也不稳定。 两者都没问题。糟糕的是，我们不总能在正确的时间点渲染。 看看第三次渲染时间。它发生在两次更新之间。



想象一颗子弹飞过屏幕。第一次更新时，它在左边。 第二次更新将它移到了右边。 这个游戏在两次更新之间的时间点渲染，所以玩家期望看到子弹在屏幕的中间。 而现在的实现中，它还在左边。这意味着看上去移动发生了卡顿。

方便的是，我们*实际*知道渲染时距离两次更新的时间：它被存储在`lag`中。 我们在`lag`比更新时间间隔小时，而不是`lag`是零时，跳出循环进行渲染。 `lag`的剩余量？那就是到下一帧的时间。 n we go to render, we'll pass that in:

当我们要渲染时，我们将它传入：

```
render(lag / MS_PER_UPDATE);
```

我们在这里除以`MS_PER_UPDATE`来*归一化*值。 不管更新的时间步长是多少，传给`render()`的值总在0（恰巧在前一帧）到1.0（恰巧在下一帧）之间。 这样，渲染引擎不必担心帧率。它只需处理0到1的值。

渲染器知道每个游戏对象*以及它当前的速度*。 假设子弹在屏幕左边20像素的地方，正在以400像素每帧的速度向右移动。 如果在两帧正中渲染，我们会给`render()`传0.5。 它绘制了半帧之前的图形，在220像素，啊哈，平滑的移动。

当然，也许这种推断是错误的。 在我们计算下一帧时，也许会发现子弹碰撞到另一障碍，或者减速，又或者别的什么。 我们只是在上一帧位置和我们*认为的*下一帧位置之间插值。但只有在完成物理和AI更新后，我们才能知道真正的位置。

所以推断有猜测的成分，有时候结果是错误的。 但是，幸运的，这种修正通常不可感知。最起码，比你不使用推断导致的卡顿更不明显。

设计决策

虽然这章我讲了很多，但是有更多的东西我没讲。 一旦你考虑显示刷新频率的同步，多线程，多GPU，真正的游戏循环会变得更加复杂。 即使在高层，这里还有一些问题你需要回答：

拥有游戏循环的是你，还是平台?

这个选择通常已经是平台决定的。 如果你在做浏览器中的游戏，很可能你*不能*编写自己的经典游戏循环。 浏览器本身的事件驱动机制阻碍了这一点。 类似的，如果你使用现存的游戏引擎，你很可能依赖于它的游戏循环而不是自己写一个。

- **使用平台的事件循环：**
    - *简单*。你不必担心编写和优化自己的游戏核心循环。
    - *平台友好*。 你不必明确地给平台一段时间让它处理它自己的事件，不必缓存事件，不必管理任何平台输入模型和你的不匹配之处。
    - *你失去了对时间的控制*。 平台会在它方便时调用代码。 如果这不如你想要的那样平滑或者频繁，太糟了。 更糟的是，大多数应用的事件循环并未为游戏设计，通常*是*又慢又卡顿。
- **使用游戏引擎的循环：**
    - *不必自己编写*。 编写游戏循环非常需要技巧。 由于是每帧都要执行的核心代码，小小的漏洞或者性能问题就对游戏有巨大的影响。 稳固的游戏循环是使用现有引擎的原因之一。
    - *不必自己编写*。 当然，硬币的另一面是，如果引擎无法满足你*真正的*需求，你也没法获得控制权。
- **自己写：**
    - *完全的控制*。 你可以做任何想做的事情。你可以为游戏的需求订制开发。
    - *你需要与平台交互*。 应用框架和操作系统通常需要时间片去处理自己的事件和其他工作。 如果你拥有应用的核心循环，平台就没有这些时间片了。 你得显式定期检查，保证框架没有挂起或者混乱。

如何管理能量消耗?

在五年前这还不是问题。 游戏运行在插到插座上的机器上或者专用的手持设备上。 但是随着智能手机，笔记本以及移动游戏的发展，现在需要关注这个问题了。 画面绚丽，但会耗干三十分钟前充的电，并将手机变成空间加热器的游戏，可不能让人开心。

现在，你需要考虑的不仅仅是让游戏看上去很棒，同时也要尽可能少的使用CPU。 你需要设置一个性能的*上限*：完成一帧之内所需的工作后，让CPU休眠。

- **尽可能快的运行：**

  这是PC游戏的常态（即使越来越多的人在笔记本上运行游戏）。 游戏循环永远不会显式告诉系统休眠。相反，空闲的循环被划在提升FPS或者图像显示效果上了。

  这会给你最好的游戏体验。 但是，也会尽可能多的使用电量。如果玩家在笔记本电脑上游玩，他们就得到了一个很好的加热器。

- **固定帧率**

  移动游戏更加注意游戏的体验质量，而不是最大化图像画质。 很多这种游戏都会设置最大帧率（通常是30或60FPS）。 如果游戏循环在分配的时间片消耗完之前完成，剩余的时间它会休眠。

  这给了玩家“足够好的”游戏体验，也让电池轻松了一点。

你如何控制游戏速度?

游戏循环有两个关键部分：不阻塞用户输入和自适应的帧时间步长。 输入部分很直观。关键在于你如何处理时间。 这里有数不尽的游戏可运行的平台， 每个游戏都需要在其中一些平台上运行。 如何适应平台变化就是关键。

创作游戏看来是人类的天性，因为每当我们建构可以计算的机器，首先做的就是在上面编游戏。 PDP-1是一个仅有4096字内存的2kHz机器，但是Steve Russell和他的朋友还是在上面创建了Spacewar!。

- **固定时间步长，没有同步：**

  见我们第一个样例中的代码。你只需尽可能快地运行游戏。

  - *简单*。这是主要的（好吧，唯一的）好处。
  - *游戏速度直接受到硬件和游戏复杂度影响*。 主要的缺点是，如果有所变化，会直接影响游戏速度。游戏速度与游戏循环紧密相关。

- **固定时间步长，有同步：**

  对复杂度控制的下一步是使用固定的时间间隔，但在循环的末尾增加同步点，保证游戏不会运行得过快。

  - *还是很简单。* 这比过于简单不可行的例子只多了一行代码。 在多数游戏循环中，你可能*总*需要做一些同步。 你可能需要双缓冲图形并将缓冲块与更新显示的频率同步。
  - *电量友好。* 这对移动游戏至关重要。你不想消耗不必要的电量。 通过简单的休眠几个毫秒而不是试图每帧塞入更多的处理，你节约了电量。
  - *游戏不会运行的太快。* 这解决了固定循环速度的一半问题。
  - *游戏可能运行的太慢。* 如果花了太多时间更新和渲染一帧，播放也会减缓。 因为这种方案没有分离更新和渲染，它比更高级的方案更容易遇到这点。 没法扔掉*渲染*帧来追上真实时间，游戏本身会变慢。

- **动态时间步长：**

  我把这个方案放在这里作为问题的解决办法之一，附加警告：大多数我认识的游戏开发者反对它。 不过记住*为什么*反对它是很有价值的。

  - *能适应并调整，避免运行得太快或者太慢。* 如果游戏不能追上真实时间，它用越来越长的时间步长更新，直到追上。
  - *让游戏不确定而且不稳定。* 这是真正的问题，当然。在物理和网络部分使用动态时间步长会遇见更多的困难。

- **固定更新时间步长，动态渲染：**

  在示例代码中提到的最后一个选项是最复杂的，但是也是最有适应性的。 它以固定时间步长更新，但是如果需要赶上玩家的时间，可以扔掉一些*渲染*帧。

  - *能适应并调整，避免运行得太快或者太慢。* 只要能实时*更新*，游戏状态就不会落后于真实时间。如果玩家用高端机器，它会回以更平滑的游戏体验。
  - *更复杂。* 主要负面问题是需要在实现中写更多东西。 你需要将更新的时间步长调整的尽可能小来适应高端机，同时不至于在低端机上太慢。

参见

- 关于游戏循环的经典文章是Glenn Fiedler的”Fix Your Timestep“。如果没有这篇文章，这章就不会是这个样子。
- Witters关于game loops的文章也值得阅读。
- Unity框架有一个复杂的游戏循环，细节在这里有详尽的解释。

更新方法

游戏设计模式Sequencing Patterns

意图

通过每次处理一帧的行为模拟一系列独立对象。

动机

玩家操作强大的女武神完成考验：从死亡巫王的栖骨之处偷走华丽的珠宝。 她尝试接近巫王华丽的地宫门口，然后遇到了……*啥也没遇到*。 没有诅咒雕像向她发射闪电，没有不死战士巡逻入口。 她直捣黄龙，拿走了珠宝。游戏结束。你赢了。

好吧，这可不行。

地宫需要守卫——一些英雄可以杀死的敌人。 首先，我们需要一个骷髅战士在门口前后移动巡逻。 如果无视任何关于游戏编程的知识， 让骷髅蹒跚着来回移动的最简单的代码大概是这样的：

如果巫王想表现得更加智慧，它应创造一些仍有脑子的东西。

```
while (true)
{
  // 向右巡逻
  for (double x = 0; x < 100; x++)
  {
    skeleton.setX(x);
  }

  // 向左巡逻
  for (double x = 100; x > 0; x--)
  {
    skeleton.setX(x);
  }
}
```

这里的问题，当然，是骷髅来回打转，可玩家永远看不到。 程序锁死在一个无限循环，那可不是有趣的游戏体验。 我们事实上想要的是骷髅*每帧*移动一步。

我们得移除这些循环，依赖外层游戏循环来迭代。 这保证了在卫士来回巡逻时，游戏能响应玩家的输入并进行渲染。如下：

当然，游戏循环是本书的另一个章节。

```
Entity skeleton;
bool patrollingLeft = false;
double x = 0;

// 游戏主循环
while (true)
{
  if (patrollingLeft)
  {
    x--;
    if (x == 0) patrollingLeft = false;
  }
  else
  {
    x++;
    if (x == 100) patrollingLeft = true;
  }

  skeleton.setX(x);

  // 处理用户输入并渲染游戏……
}
```

在这里前后两个版本展示了代码是如何变得复杂的。 左右巡逻需要两个简单的`for`循环。通过指定哪个循环在执行，我们追踪了骷髅在移向哪个方向。 现在我们每帧跳出到外层的游戏循环，然后在跳回继续我们之前所做的，我们使用`patrollingLeft`显式地追踪了方向。

但或多或少这能行，所以我们继续。 一堆无脑的骨头不会对你的女武神提出太多挑战， 下一个我们添加的是魔法雕像。它们一直会向她发射闪电球，这样可让她保持移动。

继续我们的“用最简单的方式编码”的风格，我们得到了：

```
// 骷髅的变量……
Entity leftStatue;
Entity rightStatue;
int leftStatueFrames = 0;
int rightStatueFrames = 0;

// 游戏主循环：
while (true)
{
  // 骷髅的代码……

  if (++leftStatueFrames == 90)
  {
    leftStatueFrames = 0;
    leftStatue.shootLightning();
  }

  if (++rightStatueFrames == 80)
  {
    rightStatueFrames = 0;
    rightStatue.shootLightning();
  }

  // 处理用户输入，渲染游戏
}
```

你会发现这代码渐渐滑向失控。 变量数目不断增长，代码都在游戏循环中，每段代码处理一个特殊的游戏实体。 为了同时访问并运行它们，我们将它们的代码混杂在了一起。

一旦能用“混杂”一词描述你的架构，你就有麻烦了。

你也许已经猜到了修复这个所用的简单模式了： *每个游戏实体应该封装它自己的行为。* 这保持了游戏循环的整洁，便于添加和移除实体。

为了做到这点需要*抽象层*，我们通过定义抽象的`update()`方法来完成。 游戏循环管理对象的集合，但是不知道对象的具体类型。 它只知道这些对象可以被更新。 这样，每个对象的行为与游戏循环分离，与其他对象分离。

每一帧，游戏循环遍历集合，在每个对象上调用`update()`。 这给了我们在每帧上更新一次行为的机会。 在所有对象上每帧调用它，对象就能同时行动。

死抠细节的人会在这点上揪着我不放，是的，它们没有*真的同步*。 当一个对象更新时，其他的都不在更新中。 我们等会再说这点。

游戏循环维护动态的对象集合，所以从关卡添加和移除对象是很容易的——只需要将它们从集合中添加和移除。 不必再用硬编码，我们甚至可以用数据文件构成这个关卡，那正是我们关卡设计者需要的。

模式

游戏世界管理**对象集合**。 每个对象实现一个**更新方法**模拟对象在**一帧**内的行为。每一帧，游戏循环更新集合中的每一个对象。

何时使用

如果游戏循环模式是切片面包， 那么更新方法模式就是它的奶油。 很多玩家交互的游戏实体都以这样或那样的方式实现了这个模式。 如果游戏有太空陆战队，火龙，火星人，鬼魂或者运动员，很有可能它使用了这个模式。

但是如果游戏更加抽象，移动部分不太像活动的角色而更加像棋盘上的棋子， 这个模式通常就不适用了。 在棋类游戏中，你不需要同时模拟所有的部分， 你可能也不需要告诉棋子每帧都更新它们自己。

你也许不需要每帧更新它们的*行为*，但即使是棋类游戏， 你可能也需要每帧更新*动画*。 这个设计模式也可以帮到你。

更新方法适应以下情况：

- 你的游戏有很多对象或系统需要同时运行。
- 每个对象的行为都与其他的大部分独立。
- 对象需要跟着时间进行模拟。

记住

这个模式很简单，所以没有太多值得发现的惊喜。当然，每行代码还是有利有弊。

将代码划分到一帧帧中会让它更复杂

当你比较前面两块代码时，第二块看上去更加复杂。 两者都只是让骷髅守卫来回移动，但与此同时，第二块代码将控制权交给了游戏循环的一帧帧中。

几乎 这个改变是游戏循环处理用户输入，渲染等几乎必须要注意的事项，所以第一个例子不大实用。 但是很有必要记住，将你的行为切片会增加很高的复杂性。

我在这里说几乎是因为有时候鱼和熊掌可以兼得。 你可以直接为对象编码而不进行返回，保持很多对象同时运行并与游戏循环保持协调。

你需要的是允许你同时拥有多个“线程”执行的系统。 如果对象的代码可以在执行中暂停和继续，而不是总得*返回*，你可以用更加命令式的方式编码。

真实的线程太过重量级而不能这么做， 但如果你的语言支持轻量协同架构比如generators，coroutines或者fibers，那你也许可以使用它们。

字节码模式是另一个在应用层创建多个线程执行的方法。

当离开每帧时，你需要存储状态，以备将来继续。

在第一个示例代码中，我们不需要用任何变量表明守卫在向左还是向右移动。 这显式的依赖于哪块代码正在运行。

当我们将其变为一次一帧的形式，我们需要创建`patrollingLeft`变量来追踪行走的方向。当从代码中返回时，就丢失了行走的方向，所以为了下帧继续，我们需要显式存储足够的信息。

状态模式通常可以在这里帮忙。 状态机在游戏中频繁出现的部分原因是（就像名字暗示的），它能在你离开时为你存储各种你需要的状态。

对象逐帧模拟，但并非真的同步

在这个模式中，游戏遍历对象集合，更新每一个对象。 在`update()`调用中，大多数对象都能够接触到游戏世界的其他部分， 包括现在正在更新的其他对象。这就意味着你更新对象的*顺序*至关重要。

如果对象更新列表中，A在B之前，当A更新时，它会看到B之前的状态。 但是当B更新时，由于A已经在这帧更新了，它会看见A的*新*状态。 哪怕按照玩家的视角，所有对象都是同时运转的，游戏的核心还是回合制的。 只是完整的“回合”只有一帧那么长。

如果，由于某些原因，你决定*不*让游戏像这样顺序更新，你需要双缓冲模式。 那么AB更新的顺序就没有关系了，因为*双方*都会看对方之前那帧的状态。

当关注游戏逻辑时，这通常是件好事。 同时更新所有对象将把你带到一些不愉快的语义角落。 想象如果国际象棋中，黑白双方同时移动会发生什么。 双方都试图同时往同一个空格子中放置棋子。这怎么解决?

序列更新解决了这点——每次更新都让游戏世界从一个合法状态增量更新到下一个，不会出现引发歧义而需要协调的部分。

这对在线游戏也有用，因为你有了可以在网上发送的行动指令序列。

在更新时修改对象列表需小心

当你使用这个模式时，很多游戏行为在更新方法中纠缠在一起。 这些行为通常包括增加和删除可更新对象。

举个例子，假设骷髅守卫被杀死时掉落物品。 使用新对象，你通常可以将其增加到列表尾部，而不引起任何问题。 你会继续遍历这张链表，最终找到新的那个，然后也更新了它。

但这确实表明新对象在它产生的那帧就有机会活动，甚至有可能在玩家看到它之前。 如果你不想发生那种情况，简单的修复方法就是在游戏循环中缓存列表对象的数目，然后只更新那么多数目的对象就停止：

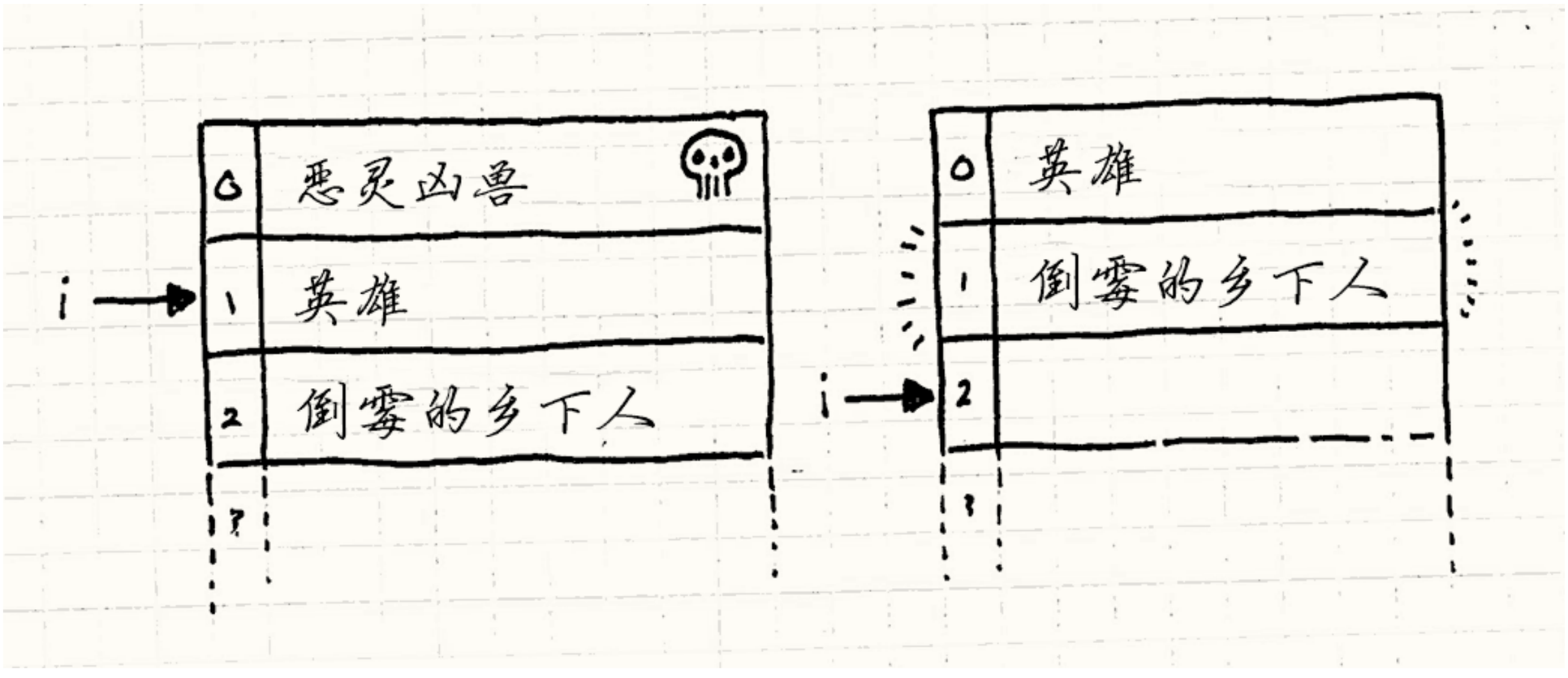
```
int numObjectsThisTurn = numObjects_;
for (int i = 0; i < numObjectsThisTurn; i++)
{
  objects_[i]->update();
}
```

这里，`objects_`是可更新游戏对象的数组，而`numObjects_`是数组的长度。 当添加新对象时，这个数组长度变量就增加。 在循环的一开始，我们在`numObjectsThisTurn`中存储数组的长度， 这样在这帧的遍历循环会停在新添加的对象之前。

一个更麻烦的问题是在遍历时*移除*对象。 你击败了邪恶的野兽，现在它需要被移出对象列表。 如果它正好位于你当前更新对象之前，你会意外地跳过一个对象：

```
for (int i = 0; i < numObjects_; i++)
{
  objects_[i]->update();
}
```

这个简单的循环通过增加索引值来遍历每个对象。 下图的左侧展示了在我们更新英雄时，数组看上去是什么样的：



我们在更新她时，索引值`i`是1。 邪恶野兽被她杀了，因此需要从数组移除。 英雄移到了位置0，倒霉的乡下人移到了位置1。 在更新英雄之后，`i`增加到了2。 就像你在右图看到的，倒霉的乡下人被跳过了，没有更新。

一种简单的解决方案是在更新时*从后往前*遍历列表。 这种方式只会移动已经被更新的对象。

一种解决方案是小心地移除对象，任何对象被移除时，更新索引。 另一种是在遍历完列表后再移除对象。 将对象标为“死亡”，但是把它放在那里。 在更新时跳过任何死亡的对象。 然后，在完成遍历后，遍历列表并删除尸体。

如果在更新循环中有多个线程处理对象， 那么你可能更喜欢推迟任何修改，避免更新时同步线程的开销。

示例代码。

这个模式太直观了，代码几乎只是在重复说明要点。 这不意味着这个模式没*有用*。它*因为*简单而有用：这是一个无需装饰的干净解决方案。

但是为了让事情更具体些，让我们看看一个基础的实现。 我们会从代表骷髅和雕像的`Entity`类开始：

```
class Entity
{
public:
  Entity()
  : x_(0), y_(0)
  {}

  virtual ~Entity() {}
  virtual void update() = 0;

  double x() const { return x_; }
  double y() const { return y_; }

  void setX(double x) { x_ = x; }
  void setY(double y) { y_ = y; }

private:
  double x_;
  double y_;
};
```

我在这里只呈现了我们后面所需东西的最小集合。 可以推断在真实代码中，会有很多图形和物理这样的其他东西。 上面这部分代码最重要的部分是它有抽象的`update()`方法。

游戏管理实体的集合。在我们的示例中，我会把它放在一个代表游戏世界的类中。

```
class World
{
public:
  World()
  : numEntities_(0)
  {}

  void gameLoop();

private:
  Entity* entities_[MAX_ENTITIES];
  int numEntities_;
};
```

在真实世界程序中，你可能真的要使用集合类，我在这里使用数组来保持简单

现在，万事俱备，游戏通过每帧更新每个实体来实现模式：

```
void World::gameLoop()
{
  while (true)
  {
    // 处理用户输入……

    // 更新每个实体
    for (int i = 0; i < numEntities_; i++)
    {
      entities_[i]->update();
    }

    // 物理和渲染……
  }
}
```

正如其名，这是游戏循环模式的一个例子。

子类化实体？！

有很多读者刚刚起了鸡皮疙瘩，因为我在`Entity`主类中使用继承来定义不同的行为。 如果你在这里还没有看出问题，我会提供一些线索。

当游戏业界从6502汇编代码和VBLANKs转向面向对象的语言时， 开发者陷入了对软件架构的狂热之中。 其中之一就是使用继承。他们建立了遮天蔽日的高耸的拜占庭式对象层次。

最终证明这是个糟点子，没人可以不拆解它们来管理庞杂的对象层次。 哪怕在1994年的GoF都知道这点，并写道：

> 多用“对象组合”，而非“类继承”。

只在你我间聊聊，我认为这已经是一朝被蛇咬十年怕井绳了。 我通常避免使用它，但教条地不用和教条地使用一样糟。 你可以适度使用，不必完全禁用。

当游戏业界都明白了这一点，解决方案是使用组件模式。 使用它，`update()`是实体的*组件*而不是在`Entity`中。 这让你避开了为了定义和重用行为而创建实体所需的复杂类继承层次。相反，你只需混合和组装组件。

如果我真正在做游戏，我也许也会那么做。 但是这章不是关于组件的， 而是关于`update()`方法，最简单，最少牵连其他部分的介绍方法， 就是把更新方法放在`Entity`中然后创建一些子类。

组件模式在这里。

定义实体

好了，回到任务中。 我们原先的动机是定义巡逻的骷髅守卫和释放闪电的魔法雕像。 让我们从我们的骷髅朋友开始吧。 为了定义它的巡逻行为，我们定义恰当地实现了`update()`的新实体：

```
class Skeleton : public Entity
{
public:
  Skeleton()
  : patrollingLeft_(false)
  {}

  virtual void update()
  {
    if (patrollingLeft_)
    {
      setX(x() - 1);
      if (x() == 0) patrollingLeft_ = false;
    }
    else
    {
      setX(x() + 1);
      if (x() == 100) patrollingLeft_ = true;
    }
  }

private:
  bool patrollingLeft_;
};
```

如你所见，几乎就是从早先的游戏循环中剪切代码，然后粘贴到`Skeleton`的`update()`方法中。 唯一的小小不同是`patrollingLeft_`被定义为字段而不是本地变量。 通过这种方式，它的值在`update()`两次调用间保持不变。

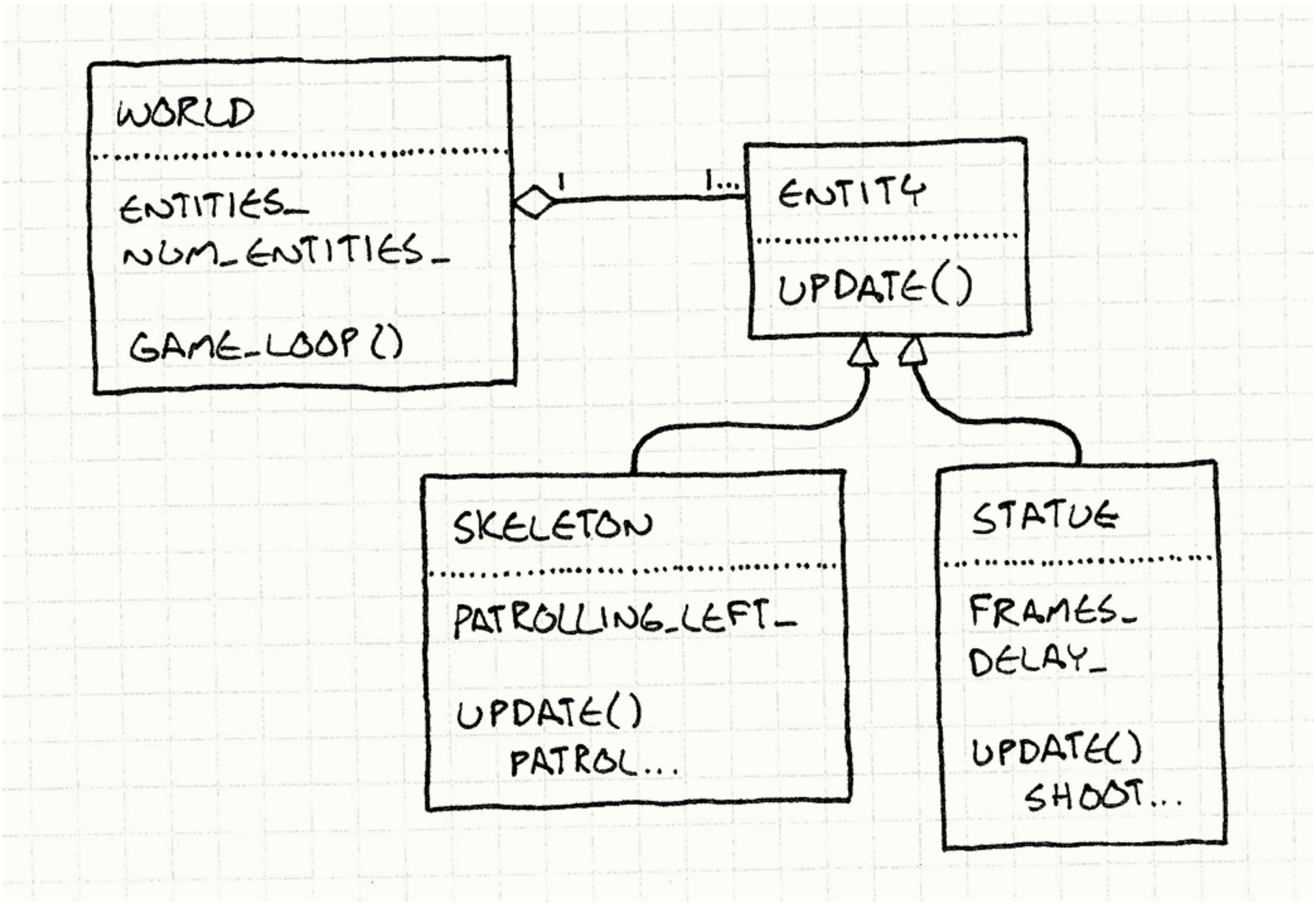
让我们对雕像如法炮制：

```
class Statue : public Entity
{
public:
  Statue(int delay)
  : frames_(0),
    delay_(delay)
  {}

  virtual void update()
  {
    if (++frames_ == delay_)
    {
      shootLightning();

      // 重置计时器
      frames_ = 0;
    }
  }

private:
  int frames_;
  int delay_;

  void shootLightning()
  {
    // 火光效果……
  }
};
```

又一次，大部分改动是将代码从游戏循环中移动到类中，然后重命名一些东西。 但是，在这个例子中，我们真的让代码库变简单了。 先前讨厌的命令式代码中，存在存储每个雕像的帧计数器和开火的速率的分散的本地变量。

现在那些都被移动到了`Statue`类中，你可以想创建多少就创建多少实例了， 每个实例都有它自己的小计时器。 这是这章背后的真实动机——现在为游戏世界增加新实体会更加简单， 因为每个实体都带来了它需要的全部东西。

这个模式让我们分离了游戏世界的*构建*和*实现*。 这同样能让我们灵活地使用分散的数据文件或关卡编辑器来构建游戏世界。



还有人关心UML吗？如果还有，那就是我们刚刚建的。

Passing time

传递时间

这是模式的关键，但是我只对常用的部分进行了细化。 到目前为止，我们假设每次对`update()`的调用都推动游戏世界前进一个固定的时间。

我更喜欢那样，但是很多游戏使用*可变时间步长*。 在那种情况下，每次游戏循环推进的时间长度或长或短， 具体取决于它需要多长时间处理和渲染前一帧。

游戏循环一章讨论了更多关于固定和可变时间步长的优劣。

这意味着每次`update()`调用都需要知道虚拟的时钟转动了多少， 所以你经常可以看到传入消逝的时间。 举个例子，我们可以让骷髅卫士像这样处理变化的时间步长：

```
void Skeleton::update(double elapsed)
{
  if (patrollingLeft_)
  {
    x -= elapsed;
    if (x <= 0)
    {
      patrollingLeft_ = false;
      x = -x;
    }
  }
  else
  {
    x += elapsed;
    if (x >= 100)
    {
      patrollingLeft_ = true;
      x = 100 - (x - 100);
    }
  }
}
```

现在，骷髅卫士移动的距离随着消逝时间的增长而增长。 也可以看出，处理变化时间步长需要的额外复杂度。 如果一次需要更新的时间步长过长，骷髅卫士也许就超过了其巡逻的范围，因此需要小心的处理。

设计决策

在这样简单的模式中，没有太多的调控之处，但是这里仍有两个你需要决策的地方：

更新方法在哪个类中?

最明显和最重要的决策就是决定将`update()`放在哪个类中。

- **实体类中：**

  如果你已经有实体类了，这是最简单的选项， 因为这不会带来额外的类。如果你需要的实体种类不多，这也许可行，但是业界已经逐渐远离这种做法了。

  当类的种类很多时，一有新行为就建`Entity`子类来实现是痛苦的。 当你最终发现你想要用单一继承的方法重用代码时，你就卡住了。

- **组件类：**

  如果你已经使用了组件模式，你知道这个该怎么做。 这让每个组件独立更新它自己。 更新方法用了同样的方法解耦游戏中的实体，组件让你进一步解耦了*单一实体中的各部分*。 渲染，物理，AI都可以自顾自了。

- **委托类：**

  还可将类的部分行为委托给其他的对象。 状态模式可以这样做，你可以通过改变它委托的对象来改变它的行为。 类型对象模式也这样做了，这样你可以在同“种”实体间分享行为。

  如果你使用了这些模式，将`update()`放在委托类中是很自然的。 在那种情况下，也许主类中仍有`update()`方法，但是它不是虚方法，可以简单的委托给委托对象。就像这样：

  ```
  void Entity::update()
  {
    // 转发给状态对象
    state_->update();
  }
  ```

  这样做让你改变委托对象来定义新行为。就像使用组件，这给了你无须定义全新的子类就能改变行为的灵活性。

如何处理隐藏对象?

游戏中的对象，不管什么原因，可能暂时无需更新。 它们可能是停用了，或者超出了屏幕，或者还没有解锁。 如果状态中的这种对象很多，每帧遍历它们却什么都不做是在浪费CPU循环。

一种方法是管理单独的“活动”对象集合，那些存储真正需要更新的对象。 当一个对象停用时，从那个集合中移除它。当它启用时，再把它添回来。 用这种方式，你只需要迭代那些真正需要更新的东西：

- 如果你使用单个包括了所有不活跃对象的集合：
  - *浪费时间*。对于不活跃对象，你要么检查一些“是否启用”的标识，要么调用一些啥都不做的方法。

  检查对象启用与否然后跳过它，不但消耗了CPU循环，还报销了你的数据缓存。 CPU通过从RAM上读取数据到缓存上来优化读取。 这样做是基于刚刚读取内存之后的内存部分很可能等会也会被读取到这个假设。

  当你跳过对象，你可能越过了缓存的尾部，强迫它从缓慢的主存中再取一块。

- 如果你使用单独的集合保存活动对象：
    - *使用了额外的内存管理第二个集合。* 当你需要所有实体时，通常又需要一个巨大的集合。在那种情况下，这集合是多余的。 在速度比内存要求更高的时候（通常如此），这取舍仍是值得的。

    另一个权衡后的选择是使用两个集合，除了活动对象集合的另一个集合只包含*不活跃*实体而不是全部实体。

    - *得保持集合同步。* 当对象创建或完全销毁时（不是暂时停用），你得修改全部对象集合和活跃对象集合。

方法选择的度量标准是不活跃对象的可能数量。 数量越多，用分离的集合，避免在核心游戏循环中用到它们就更有用。

参见

- 这个模式，以及游戏循环模式和组件模式，是构建游戏引擎核心的三位一体。
- 当你关注在每帧中更新实体或组件的缓存性能时，数据局部性模式可以让它跑到更快。
- Unity框架在多个类中使用了这个模式，包括 `MonoBehaviour`。
- 微软的XNA平台在 `Game` 和 `GameComponent` 类中使用了这个模式。
- Quintus，一个JavaScript游戏引擎在它的主`Sprite`类中使用了这个模式。

行为模式

游戏设计模式

一旦做好游戏设定，挂满了角色和道具，剩下的就是启动场景。 为了完成这点，你需要行为——告诉游戏中每个实体做什么的剧本。

当然，所有代码都是“行为”，并且所有软件都是定义行为， 但在游戏中有所不同的是，行为通常很多。 文字处理器也许有很长的特性清单， 但特性的数量与角色扮演游戏中的居民，物品和任务数量相比，那就相形见绌了。

本章的模式帮助快速定义和完善大量的行为。 类型对象定义行为的类别而无需完成真正的类。 子类沙盒定义各种行为的安全原语。 最先进的是字节码，将行为从代码中拖出，放入数据文件中。

模式

- 字节码
- 子类沙箱
- 类型对象

字节码

游戏设计模式Behavioral Patterns

意图

将行为编码为虚拟机器上的指令，赋予其数据的灵活性。

动机

制作游戏也许很有趣，但绝不容易。 现代游戏的代码库很是庞杂。 主机厂商和应用市场有严格的质量要求， 小小的崩溃漏洞就能阻止游戏发售。

我曾参与制作有六百万行C++代码的游戏。作为对比，控制火星漫游者的软件还没有其一半大小。

与此同时，我们希望榨干平台的最后一点性能。 游戏推动硬件的发展首屈一指，坚持不懈的优化只是为了跟上竞争。

为了保证稳定和性能需求，我们使用如C++这样的重量级编程语言， 它兼容多数硬件的底层结构的同时，还拥有防止漏洞的强类型系统。

我们为此感到自豪，但其亦有代价。 专业程序员需要多年的训练，之后又要对抗代码规模的增长。 构建大型游戏的时间长度在“喝杯咖啡”和 “烤咖啡豆，手磨咖啡豆，弄杯espresso，打奶泡，在拿铁咖啡里拉花。”之间。

除开这些挑战，游戏多了个苛刻的限制：“乐趣”。 玩家需要仔细权衡过的新奇体验。 那需要不断的迭代，但是如果每个调整都需要让工程师调整底层代码，然后等待漫长的编译结束，那就毁掉了创作流程。

法术战斗！

假设我们在完成一个基于法术的格斗游戏。 两个敌对的巫师互相丢法术，直到分出胜负。 我们可以将这些法术都定义在代码中，但这就意味着每当法术修改就会牵扯到工程师。 当设计者想修改几个数字感觉一下效果，就要重新编译整个工程，重启，然后进入战斗。

像现在的许多游戏一样，需要在发售之后更新游戏，修复漏洞或是添加新内容。 如果所有法术都是硬编码的，那么每次修改都意味着发行一个可以运行的游戏版本。

再扯远一点，我们还想支持*模组*。我们想让*玩家*创造自己的法术。 如果这些法术都在代码中，那么意味着每个模组制造者都得拥有编译游戏的整套工具链， 我们就得开源代码，如果他们的自创法术上有个漏洞，那么会把其他人的游戏也搞崩溃。

数据 > 代码

很明显实现引擎的编程语言不是个好选择。 我们需要将法术放在与游戏核心隔绝的沙箱中。 我们想要它们易于修改，易于加载，并与其他可执行部分相隔离。

我不知道你怎么想，但这听上去让我觉得有点像是*数据*。 如果能在分离的数据文件中定义行为，游戏引擎还能加载并“执行”它们，就可以实现所有目标。

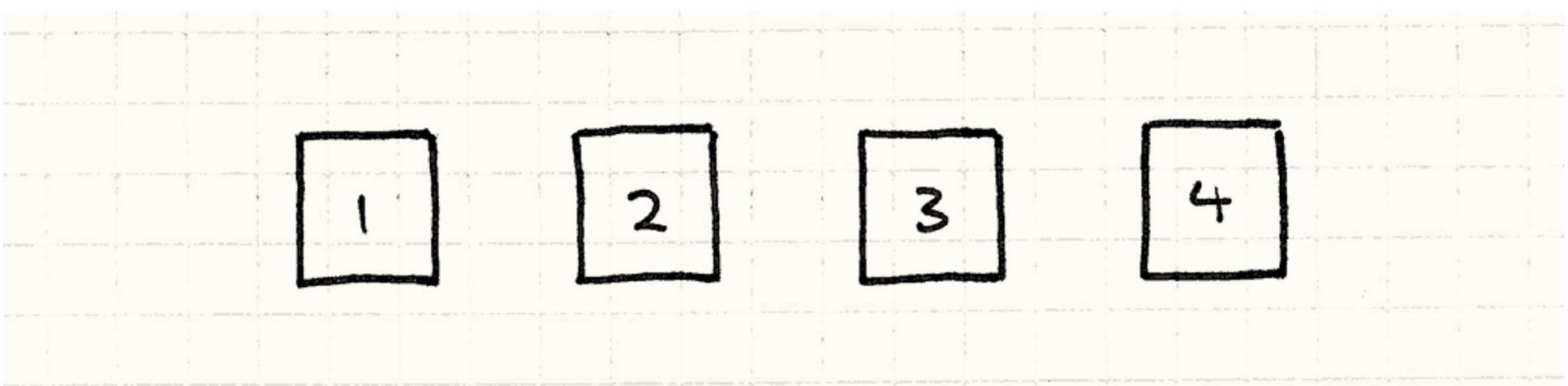
这里需要指出“执行”对于数据的意思。如何让文件中的数据表示为行为呢？这里有几种方式。 与编译模式对比着看会好理解些。

解释器模式

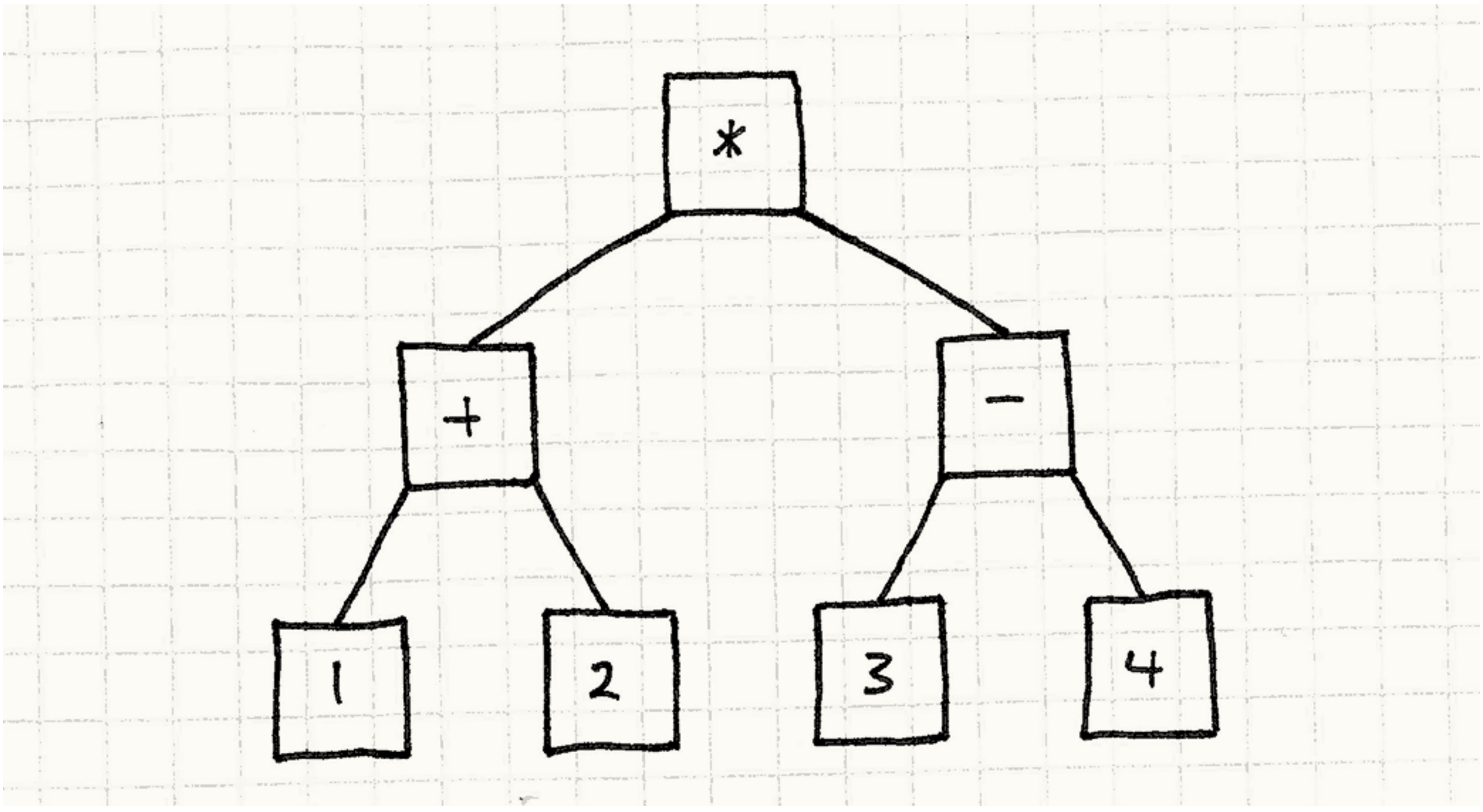
关于这个模式我就能写一章，但是有四个家伙的工作早涵盖了这一切， 所以，这里给一些简短的介绍。 从一种语言开始——想想*编程*语言——从你想要执行的语言开始。 比如，它支持这样的算术表达式

```
(1 + 2) * (3 - 4)
```

然后，把每块表达式，每条语言规则，都装到*对象*中去。数字字面量都变成对象：



基本上，它们在原始值上做了个小封装。 运算符也是对象，它们拥有操作的值的引用。 如果你考虑了括号和优先级，那么表达式就魔术般变成这样的小树：



这里的“魔术”是什么？很简单——*语法分析*。 语法分析器接受一串字符作为输入，将其转为*抽象语法树*，即一个包含了表示文本语法结构的对象集合。

完成这个你就完成了编译器的一半。

解释器模式与*创建*这棵树无关，它只关于*执行*这棵树。 它工作的方式非常巧妙。树中的每个对象都是表达式或子表达式。 用真正面向对象的方式描述，我们会让表达式自己对自己求值。

首先，我们定义所有表达式都实现的基本接口：

```
class Expression
{
public:
  virtual ~Expression() {}
  virtual double evaluate() = 0;
};
```

然后，我们定义一个类，语法中的每种表达式都实现这个接口。最简单的是数字：

```
class NumberExpression : public Expression
{
public:
  NumberExpression(double value)
  : value_(value)
  {}

  virtual double evaluate()
  {
    return value_;
  }

private:
  double value_;
};
```

一个数字表达式就等于它的值。加法和乘法有点复杂，因为它们包含子表达式。 在递归地计算其子表达式之后，才能计算自己的值。像这样：

```
class AdditionExpression : public Expression
{
public:
  AdditionExpression(Expression* left, Expression* right)
  : left_(left),
    right_(right)
  {}

  virtual double evaluate()
  {
    // 计算操作数
    double left = left_->evaluate();
    double right = right_->evaluate();

    // 把它们加起来
    return left + right;
  }

private:
  Expression* left_;
  Expression* right_;
};
```

我确信你知道乘法的实现是什么样的。

整齐漂亮吧？只需几个简单的类，现在我们可以表示和计算任意复杂的算术表达式。 只需要创建正确的对象，并正确连起来。

Ruby实现这样的东西已经十五年了。在1.9版本，他们转换到了这章描述的字节码。看看我省了你多少时间！

这是个优美简单的模式，但有自己的问题。 看看插图，看到了什么？大量的小盒子，以及它们之间大量的箭头。 代码被表示为小物体组成的巨大分形树。这会带来些令人不快的后果：

- 从磁盘上加载它需要实例化并连接大量这种小对象。

* 这些对象和之间的指针会占据大量的内存。在32位机上，那个小的算术表达式至少要占据68字节，这还没考虑内存对其呢。

```
<aside markdown="1" name="vtable">

如果你想自己算算，别忘了算上虚函数表指针。
```

```
</aside>
```

- 遍历子表达式的指针是在谋杀数据缓存。同时，虚函数调用是在屠杀指令缓存。

  查看数据局部性一章，看看什么是缓存以及它是如何影响游戏性能的。

将这些拼到一起，怎么念？M-A-N。 这就是为什么大多数广泛应用的编程语言不基于解释器模式。 太慢了，也太消耗内存了。

虚拟的机器码

想想我们的游戏。玩家电脑在运行时并不会遍历一堆C++语法结构树。 我们提前将其编译成了机器码，CPU基于机器码运行。机器码有什么好处呢？

- *密集的。* 它是一块坚实连续的二进制数据块，没有一位被浪费。
- *线性的。* 指令被打成包，一条接一条的执行。不会在内存里到处乱跳（除非你控制代码流这么干）。
- *底层的。* 每条指令都做一件小事，有趣的行为从*组合*中诞生。
- *速度快。* 在以上所有的要素作用下（当然，还要算上机器码是直接在硬件上实现的），机器码跑得跟风一样快。

这听起来很好，但我们不希望为法术提供真正的机器码。 让玩家提供游戏运行时的机器码简直是在自找麻烦。 我们需要的是机器代码性能和解释器模式的安全性之间的一种妥协方案。

如果不是加载机器码并直接执行，而是定义自己的*虚拟*机器码呢？ 然后，在游戏中写个小模拟器。 这与机器码类似——密集，线性，相对底层——但也由游戏直接掌控，所以可以放心地将其放入沙箱。

这就是为什么很多游戏主机和iOS不允许程序在运行时生成并加载机器码。 这是一种拖累，因为最快的编程语言实现就是那么做的。 它们包含了一个“即时（just-in-time）”编译器，或者*JIT*，在运行时将语言翻译成优化的机器码。

我们将小模拟器称为*虚拟机*（或简称“VM”），它运行的二进制机器码叫做*字节码*。 它有数据的灵活性和易用性，但比解释器模式有更好的性能。

在程序语言编程圈，“虚拟机”和“解释器”是同义词，我在这里交替使用。 当指代GoF的解释器模式，我会加上“模式”来表明区别。

这听起来有点吓人。 这章其余部分的目标是为了展示一下，如果把功能列表缩减下来，它实际上相当通俗易懂。 即使最终没有使用这个模式，你至少对Lua和其他许多语言有更好的了解。

模式

指令集 定义了可执行的底层操作。 一系列的指令被编码为**字节序列**。 **虚拟机** 使用 **中间值堆栈** 依次执行这些指令。 通过组合指令，可以定义复杂的高层行为。

何时使用

这是本书中最复杂的模式，无法轻易地加入游戏中。 当需要定义很多行为，而游戏实现语言因为以下原因不能很好地完成任务时使用它：

- 过于底层，繁琐易错。
- 编译时间长，迭代缓慢。
- 安全性依赖编程者。如果想保证行为不会破坏游戏，你需要将其与代码的其他部分隔开。

当然，该列表描述了一堆特性。谁不希望有更快的迭代循环和更多的安全性？ 然而，世上没有免费的午餐。字节码比本地代码慢，所以不适合引擎的性能攸关部分。

记住

创建自己的语言或者建立系统中的系统是很有趣的。 我在这里做的是小演示，但在现实项目中，这些东西会像藤蔓一样蔓延。

对我来说，游戏开发也正因此而有趣。 不管哪种情况，我都创建了虚拟空间让他人游玩。

每当我看到有人定义小语言或脚本系统，他们都说，“别担心，它很小。”于是，不可避免地，他们增加更多小功能，直到完成了一个完整的语言。 除了，和其它语言不同，它是定制的并拥有棚户区的建筑风格。

例如每一种模板语言。

当然，完成完整的语言并没有什么*错*。只是保证你是故意这么做的。 否则，小心的控制字节码可以表达的含义。在其失控前为其系上皮带。

你需要一个前端

底层的字节码指令有利于性能，但是二进制的字节码格式*不是*用户能写的。 我们将行为移出代码的一个原因是想要在*高层*表示它。 如果说写C++太过底层，那么让用户写汇编——虽然是你设计的——可不是一个改进方案！

一个反例的是游戏RoboWar。 在游戏中，*玩家* 编写类似汇编的语言控制机器人，我们这里也会讨论这种指令集。

这是我介绍类似汇编的语言的首选。

就像GoF的解释器模式，它假设有一些方法来*生成*字节码。 通常情况下，用户在更高层编写行为，再用工具将其翻译为虚拟机能理解的字节码。 这里的工具就是编译器。

我知道，这听起来很吓人。丑话说在前头， 如果没有资源制作编辑器，那么字节码不适合你。 但是，接下来你会看到，也可能没你想的那么糟。

你会想念调试器

编程很难。我们知道想要机器做什么，但并不总能正确地传达——所以我们会写出漏洞。为了查找和解决漏洞，我们已经积累了一堆工具来了解代码做错了什么，以及如何修正。我们有调试器，静态分析器，反编译工具等。 所有这些工具都是为现有的语言设计的：无论是机器码还是某些更高层次的东西。

当你定义自己的字节码虚拟机时，你离开了这些工具。 当然，可以通过调试器调试虚拟机，但它告诉你虚拟机*本身*在做什么，而不是字节码被翻译成了什么。 它不能把字节码映射回原先的高层次的形式。

如果你定义的行为很简单，可能无需太多工具帮忙调试就能勉强坚持下来。 但随着内容规模增长，花些时间完成些功能，让用户看到字节码在做什么。 这些功能也许不随游戏发布，但它们至关重要，它们能确保你确实*能*发布你的游戏。

当然，如果你想要让游戏支持mod，那你会发布这些特性，它们就更加重要了。

[示例代码]

经历了前面几个章节后，你也许会惊讶于它的实现是多么直接。 首先需要为虚拟机设定一套指令集。 在开始考虑字节码之类的东西前，先像思考API一样思考它。

法术的API

如果直接使用C++代码定义法术，代码需要调用何种API呢？ 在游戏引擎中，构成法术的基本操作是什么样的？

大多数法术最终改变一个巫师的状态，因此先从这样的代码开始。

```
void setHealth(int wizard, int amount);
void setWisdom(int wizard, int amount);
void setAgility(int wizard, int amount);
```

第一个参数指定哪个巫师被影响，`0`代表玩家而`1`代表对手。 以这种方式，治愈法术可以治疗玩家的巫师，而伤害法术伤害他的敌人。 这三个小方法覆盖了出人意料多的法术。

如果法术只是默默地调整数据，游戏逻辑就已经完成了， 但玩这样的游戏会让玩家无聊得要哭。让我们修复这点：

```
void playSound(int soundId);
void spawnParticles(int particleType);
```

这并不影响游戏玩法，但它们增强了游戏的*体验*。 我们可以增加一些镜头晃动，动画之类的，但这已经足以作为开始了。

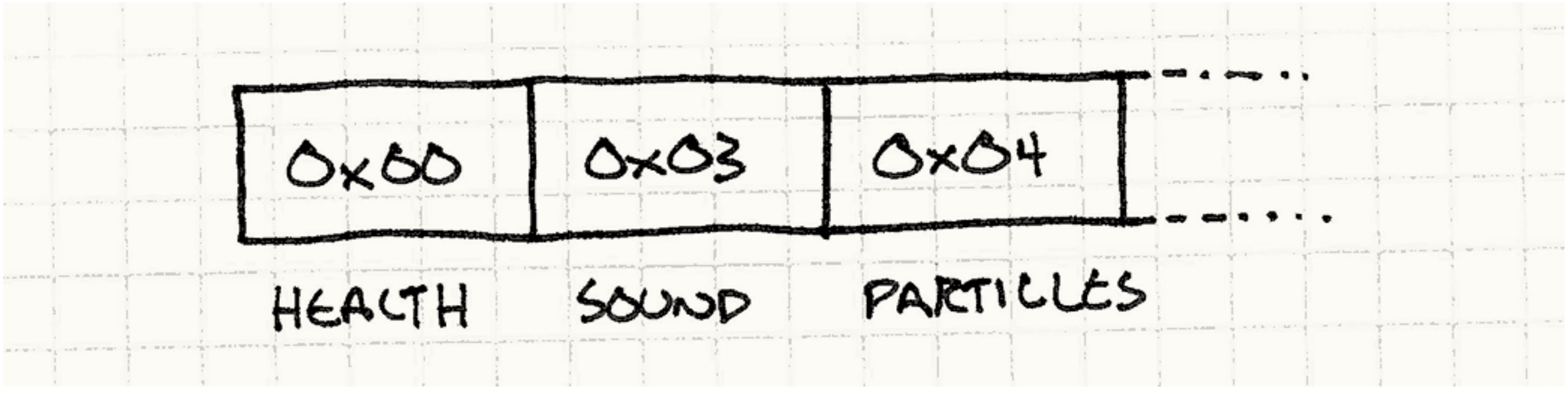
法术指令集

现在让我们把这种*程序化*的API转化为可被数据控制的东西。 从小处开始，然后慢慢拓展到整体。 现在，要去除方法的所有参数。 假设`set__()`方法总影响玩家的巫师，总直接将状态设为最大值。 同样，FX操作总是播放一个硬编码的声音和粒子效果。

这样，一个法术就只是一系列指令。 每条指令都代表了想要呈现的操作。我们可以枚举如下：

```
enum Instruction
{
  INST_SET_HEALTH       = 0x00,
  INST_SET_WISDOM       = 0x01,
  INST_SET_AGILITY      = 0x02,
  INST_PLAY_SOUND       = 0x03,
  INST_SPAWN_PARTICLES = 0x04
};
```

为了将法术编码进数据，我们存储了一数组`enum`值。 只有几个不同的基本操作原语，因此`enum`值的范围可以存储到一个字节中。 这就意味着法术的代码就是一系列字节——也就是“字节码”。



有些字节码虚拟机为每条指令使用多个字节，用更加复杂的规则译解它们。 事实上，在常见芯片上，比如x86上，的机器码更加复杂。

但单字节对于Java虚拟机和支撑了.NET平台的Common Language Runtime已经足够了，对我们也应该足够了。

为了执行一条指令，我们看看它的基本操作原语是什么，然后调用正确的API方法。

```
switch (instruction)
{
  case INST_SET_HEALTH:
    setHealth(0, 100);
    break;

  case INST_SET_WISDOM:
    setWisdom(0, 100);
    break;

  case INST_SET_AGILITY:
    setAgility(0, 100);
    break;

  case INST_PLAY_SOUND:
    playSound(SOUND_BANG);
    break;

  case INST_SPAWN_PARTICLES:
    spawnParticles(PARTICLE_FLAME);
    break;
}
```

用这种方式，解释器建立了沟通代码世界和数据世界的桥梁。我们可以将执行法术的虚拟机实现如下：

```
class VM
{
public:
  void interpret(char bytecode[], int size)
  {
    for (int i = 0; i < size; i++)
    {
      char instruction = bytecode[i];
      switch (instruction)
      {
        // 每条指令的跳转分支……
      }
    }
  }
};
```

输入它，你就完成你的首个虚拟机。 不幸的是，它并不灵活。 我们不能设定攻击对手的法术，也不能减少状态上限。我们只能播放声音！

为了真正有一点语言的感觉，我们需要在这里引入参数。

栈式机器

要执行复杂的嵌套表达式，得先从最里面的子表达式开始。 计算完里面的，结果向外作为参数流向包含它们的表达式， 直到得出最终结果，整个表达式就算完了。

解释器模式将其明确的表现为嵌套对象组成的树，但我们需要指令速度达到列表的速度。 我们仍然需要确保子表达式的结果流向正确的表达式。 但由于数据是平面的，我们使用指令的*顺序*来控制这一点。 用CPU同样的方式完成这点——用栈。

这种架构不出所料的被称为*栈式计算机*。编程语言像Forth，PostScript，和Factor 直接将这点暴露给用户。

```
class VM
{
public:
  VM()
  : stackSize_(0)
  {}

  // 其他代码……

private:
  static const int MAX_STACK = 128;
  int stackSize_;
  int stack_[MAX_STACK];
};
```

虚拟机用内部栈保存值。在例子中，指令交互的值只有一种，那就是数字， 所以可以使用简单的`int`数组。 每当数据需要从一条指令传到另一条，它得通过栈。

顾名思义，值可以压入栈或者从栈弹出，所以让我们加一对方法。

```
class VM
{
private:
  void push(int value)
  {
    // 检查栈溢出
    assert(stackSize_ < MAX_STACK);
    stack_[stackSize_++] = value;
  }

  int pop()
  {
    // 保证栈不是空的
    assert(stackSize_ > 0);
    return stack_[--stackSize_];
  }

  // 其余的代码
};
```

当一条指令需要接受参数，将参数从栈弹出，如下所示：

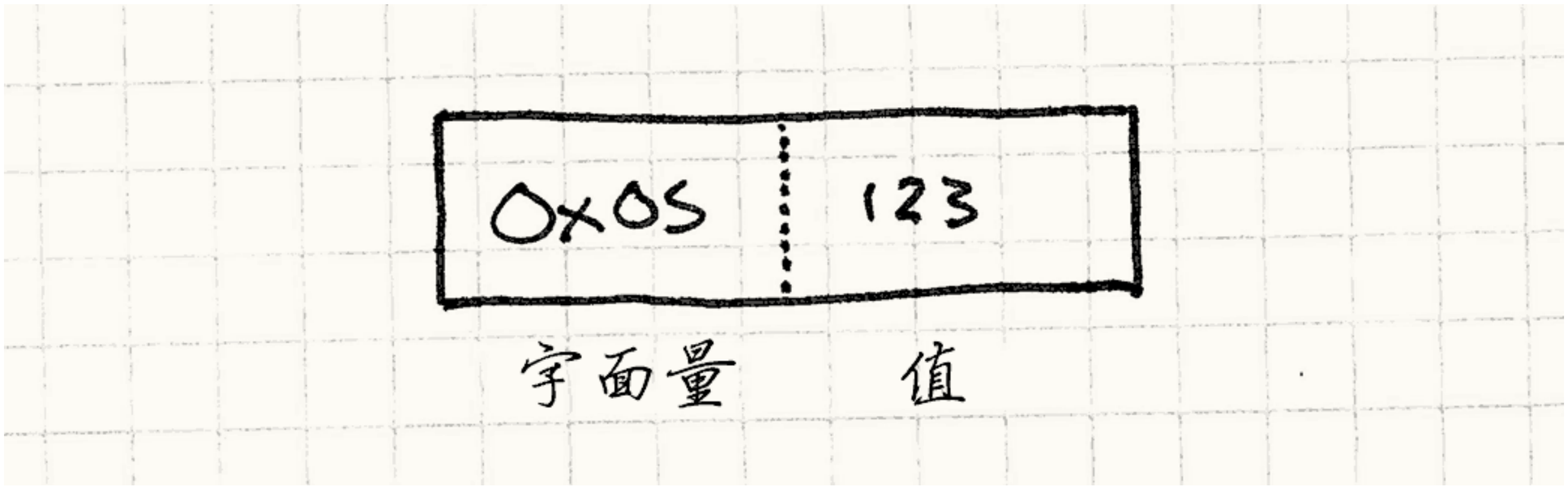
```
switch (instruction)
{
  case INST_SET_HEALTH:
  {
    int amount = pop();
    int wizard = pop();
    setHealth(wizard, amount);
    break;
  }

  case INST_SET_WISDOM:
  case INST_SET_AGILITY:
    // 像上面一样……

  case INST_PLAY_SOUND:
    playSound(pop());
    break;

  case INST_SPAWN_PARTICLES:
    spawnParticles(pop());
    break;
}
```

为了将一些值*存入*栈中，需要另一条指令：字面量。 它代表了原始的整数值。但是*它*的值又是从哪里来的呢？ 我们怎么样避免这样追根溯源到无穷无尽呢？

技巧是利用指令是字节序列这一事实——我们可以直接将数值存储在字节数组中。 如下，我们为数值字面量定义了另一条指令类型：

```
case INST_LITERAL:
{
  // 从字节码中读取下一个字节
  int value = bytecode[++i];
  push(value);
  break;
}
```

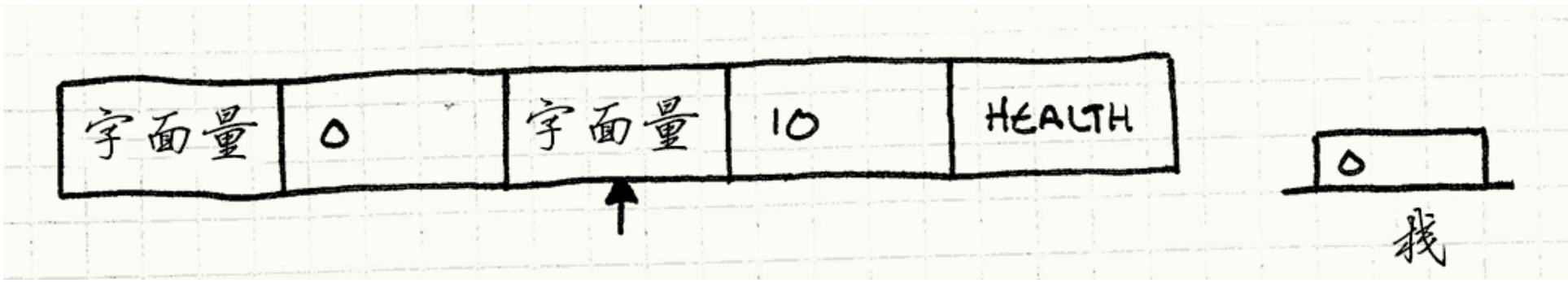
这里，从单个字节中读取值，从而避免需要解码多字节整数的精巧代码， 但在真实实现中，你会需要支持整个数域的字面量。



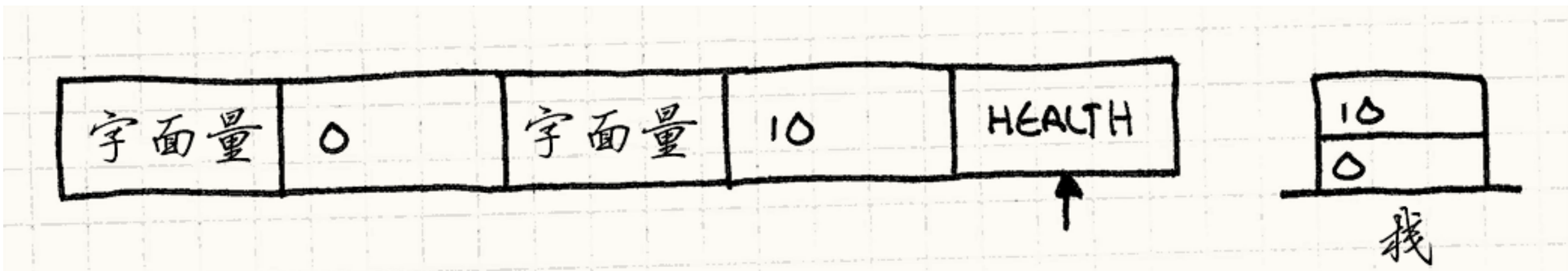
它读取字节码流中的字节*作为数值*并将其压入栈。

让我们串起来其中的几条指令，看看解释器如何执行它们，感受下栈是如何工作的。 从空栈开始，解释器指向第一个指令：

首先，它执行第一条`INST_LITERAL`，读取字节码流的下一个字节(`0`)并压入栈中。



然后，它执行第二条`INST_LITERAL`，读取`10`然后压入。



最后，执行`INST_SET_HEALTH`。这弹出`10`存进`amount`，弹出`0`存进`wizard`。然后用这两个参数调用`setHealth()`。

完成！我们获得了将玩家巫师血量设为10点的法术。 现在我们拥有了足够的灵活度，来定义修改任一巫师的状态到任意值的法术。 我们还可以放出不同的声音和粒子效果。

但是……这感觉还是像*数据*格式。比如，不能将巫师的血量提升为他智力的一半。 设计师想要有能力为法术设计*规则*，而不仅仅是*数值*。

行为 = 组合

如果我们视小虚拟机为编程语言，现在支持的只有一些内置函数，以及常量参数。 为了让字节码感觉像*行为*，我们缺少的是*组合*。

设计师需要能以有趣的方式组合不同的值，来创建表达式。 举个简单的例子，他们想让法术*变化*一个数值而不是*变到*一个数值。

这需要考虑到状态的当前值。 我们有指令来*修改*状态，现在需要添加方法*读取*状态：

```
case INST_GET_HEALTH:
{
  int wizard = pop();
  push(getHealth(wizard));
  break;
}

case INST_GET_WISDOM:
case INST_GET_AGILITY:
  // 你知道思路了吧……
```

正如你所看到的，这以两种方式与堆栈交互。 弹出一个参数来确定获取哪个巫师的状态，然后查找状态的值并压入栈中。

这允许我们写复制状态的法术。 我们可以创建一个法术，根据巫师的智慧设定敏捷度，或者让巫师的血量等于对方的血量。

有改进，但仍有限制。接下来，我们需要算术。 是时候让小虚拟机学习如何计算1 + 1了，我们将添加更多的指令。 现在，你可能已经知道如何去做，猜到了大概的模样。我只展示加法：

```
case INST_ADD:
{
  int b = pop();
  int a = pop();
  push(a + b);
  break;
}
```

像其他指令一样，它弹出数值，做点工作，然后压入结果。 直到现在，看起来每个新指令是在逐步改善，但其实我们已完成大飞跃。 这并不显而易见，但现在可以处理各种复杂的，深层嵌套的算术表达式。

来看个稍微复杂点的例子。 假设我们希望有个法术，能让巫师的血量增加敏捷和智慧的平均值。 用代码表示如下：

```
setHealth(0, getHealth(0) +
    (getAgility(0) + getWisdom(0)) / 2);
```

你可能会认为我们需要指令来处理括号造成的分组，但栈隐式支持了这一点。可以手算如下：

1. 获取巫师当前的血量并记录。
2. 获取巫师敏捷并记录。
3. 对智慧执行同样的操作。
4. 获取最后两个值，加起来并记录。
5. 除以二并记录。
6. 回想巫师的血量，将它和这结果相加并记录。
7. 取出结果，设置巫师的血量为这一结果。

你看到这些“记录”和“回想”了吗？每个“记录”对应一个压入，“回想”对应弹出。 这意味着可以很容易将其转化为字节码。例如，第一行获得巫师的当前血量：

```
LITERAL 0
GET_HEALTH
```

这些字节码将巫师的血量压入堆栈。 如果我们机械地将每行都这样转化，最终得到一大块等价于原来表达式的字节码。 为了让你感觉这些指令是如何组合的，我在下面给你做个示范。

为了展示堆栈如何随着时间推移而变化，我们举个代码执行的例子。 巫师目前有45点血量，7点敏捷，和11点智慧。 每条指令的右边是栈在执行指令之后的模样，再右边是解释指令意图的注释：

```
LITERAL 0     [0]              # 巫师索引
LITERAL 0     [0, 0]           # 巫师索引
GET_HEALTH    [0, 45]          # 获取血量()
LITERAL 0     [0, 45, 0]       # 巫师索引
GET_AGILITY   [0, 45, 7]       # 获取敏捷()
LITERAL 0     [0, 45, 7, 0]    # 巫师索引
GET_WISDOM    [0, 45, 7, 11]   # 获取智慧()
ADD           [0, 45, 18]      # 将敏捷和智慧加起来
LITERAL 2     [0, 45, 18, 2]   # 被除数: 2
DIVIDE        [0, 45, 9]       # 计算敏捷和智慧的平均值
ADD           [0, 54]          # 将平均值加到现有血量上。
SET_HEALTH    []               # 将结果设为血量
```

如果你注意每步的栈，你可以看到数据如何魔法一般流动在其中。 我们最开始压入`0`来查找巫师，然后它一直挂在栈的底部，直到最终的`SET_HEALTH`才用到它。

也许“魔法”在这里的门槛太低了。

一台虚拟机

我可以继续下去，添加越来越多的指令，但是时候适可而止了。 如上所述，我们已经有了一个可爱的小虚拟机，可以使用简单，紧凑的数据格式，定义开放的行为。 虽然“字节码”和“虚拟机”的听起来很吓人，但你可以看到它们往往简单到只需栈，循环，和switch语句。

还记得我们最初让行为呆在沙盒中的目标吗？ 现在，你已经看到虚拟机是如何实现的，很明显，那个目标已经完成。 字节码不能把恶意触角伸到游戏引擎的其他部分，因为我们只定义了几个与其他部分接触的指令。

我们通过控制栈的大小来控制内存使用量，很小心地确保它不会溢出。 我们甚至可以控制它使用多少*时间*。 在指令循环里，可以追踪已经执行了多少指令，如果遇到了问题也可以摆脱困境。

控制运行时间在例子中没有必要，因为没有任何循环的指令。 可以限制字节码的总体大小来限制运行时间。 这也意味着我们的字节码不是图灵完备的。

这里还有一个问题：创建字节码。 到目前为止，我们使用伪代码，再手工编写为字节码。除非你有*很多*的空闲时间，否则这种方式并不实用。

语法转换工具

最初的目标是创造更*高层*方式来控制行为，但是，我们却创造了比C++更*底层*的东西。 它具有我们想要的运行性能和安全性，但绝对没有对设计师友好的可用性。

为了填补这一空白，我们需要一些工具。 我们需要一个程序，让用户定义法术的高层次行为，然后生成对应的低层栈式机字节码。

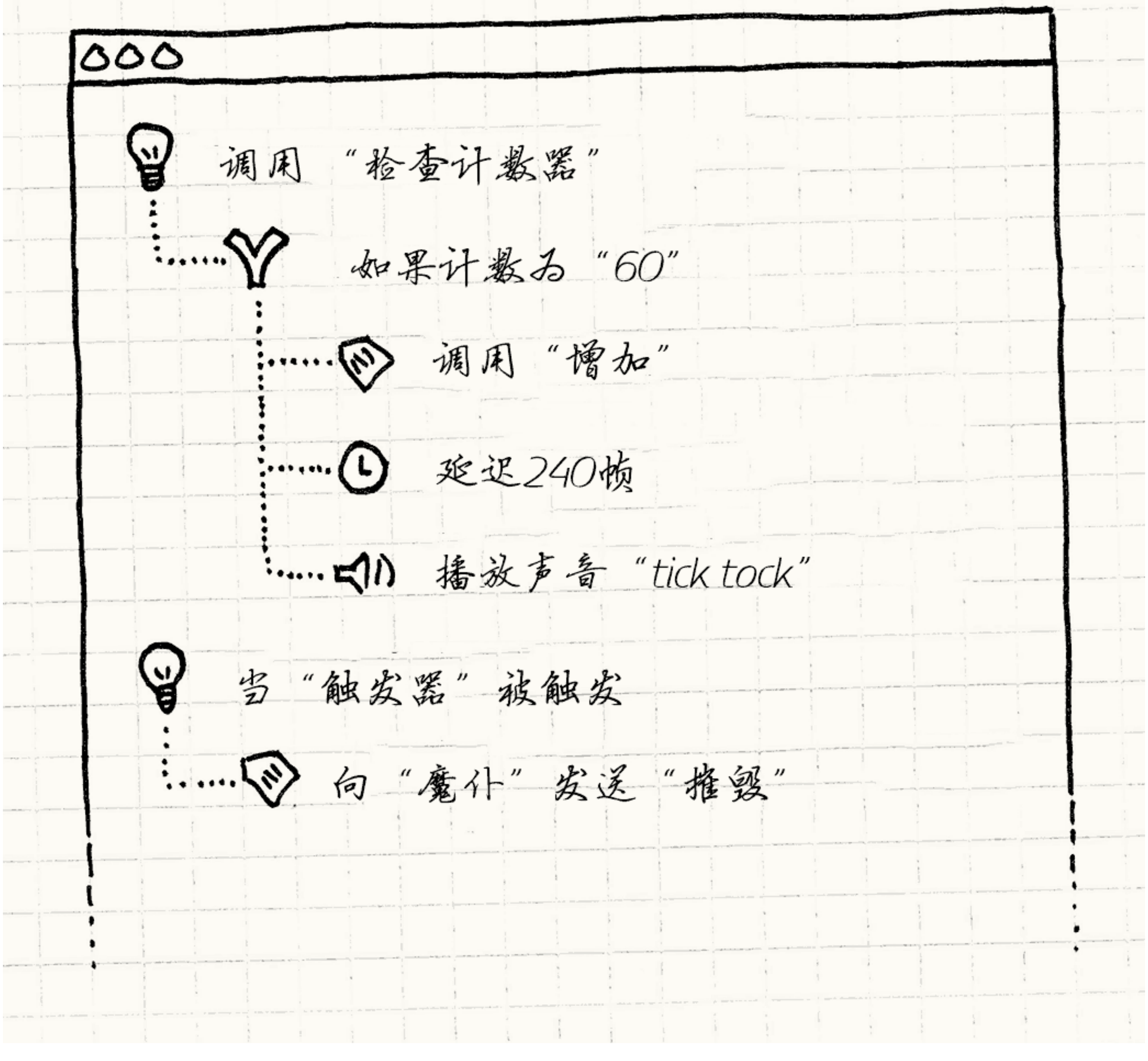
这可能听起来比虚拟机更难。 许多程序员都在大学参加编译器课程，并被龙书或者”lex“和”yacc”引发了PTSD。

我指的，当然，是经典教材*Compilers: Principles, Techniques, and Tools*。

事实上，编译一个基于文本的语言并不那么糟糕，可能有*一点*糟糕。 那需要补习研究众多话题。但是，你不需要那么做。 我说，我们需要的是*工具*——它并不一定是个输入格式是*文本文件*的*编译器*。

相反，我建议你考虑构建图形界面让用户定义自己的行为， 尤其是使用它的人没有很高的技术。 没有花几年时间习惯编译器怒吼的人很难写出没有语法错误文本。

你可以建立一个应用程序，用户通过单击拖动小盒子，下拉菜单项，或任何有意义的行为创建“脚本”，从而创建行为。


调用“检查计数器”
如果计数为“60”
调用“增加”
延迟240帧
播放声音“tick tock”
当“触发器”被触发
向“魔仆”发送“摧毁”

我为Henry Hatsworth in the Puzzling Adventure编写的脚本系统就是这么工作的。

这样做的好处是，你的UI可以保证用户无法创建“无效的”程序。 与其向他们喷射错误警告，不如主动关闭按钮或提供默认值， 以确保他们创造的东西在任何时间点上都有效。

我想要强调错误处理是多么重要。作为程序员，我们趋向于将人类错误视为想要终结的个人耻辱。

为了制作用户享受的系统，你需要拥抱人性，*包括他们的失败*。 制造错误是人们固有的，同时也是创作的固有基础。 用撤销这样的特性优雅地处理它们，这能让用户更有创意，创作出更好的成果。

这免去了设计语法和编写解析器的工作。 但是，我知道，你可能会发现UI设计同样令人不快。 好吧，如果这样，我没啥办法啦。

毕竟，这种模式是关于使用对用户友好的高层方式表达行为。 你必须精心设计用户体验。要有效地执行行为，又需要将其转换成底层形式。这是必做的，但如果你准备好迎接挑战，这终会有所回报。

设计决策

我尽可能让本章简短，但我们真正做的事情是创造语言。 那有开放的设计空间，你可以从中获得很多乐趣，所以别忘了完成你的游戏。

这是本书中最长的章节，我看来失败了。

指令如何访问堆栈?

有两种主要的字节码虚拟机：基于栈的和基于寄存器的。 栈式虚拟机中，指令总是操作栈顶，如同我们的示例代码所示。 例如，`INST_ADD`弹出两个值，将它们相加，将结果压入。

基于寄存器的虚拟机也有栈。唯一不同是指令可以从栈的深处读取值。 不像`INST_ADD`始终*弹出*其操作数， 它在字节码中存储两个索引，指示了从栈的何处读取操作数。

- **基于栈的虚拟机：**
  - *指令短小。* 由于每个指令隐式认定在栈顶寻找参数，不需要为任何数据编码。 这意味着每条指令可能会非常短，一般只需一个字节。
  - *易于生成代码。* 当你需要为生成字节码编写编译器或工具时，你会发现更容易生成基于栈的字节码。 由于每个指令隐式在栈顶工作，你只需要以正确的顺序输出指令就可以在它们之间传递参数。
  - *会生成更多的指令。* 每条指令只能看到栈顶。这意味着，产生像`a = b + c`这样的代码， 你需要单独的指令将`b`和`c`压入栈顶，执行操作，再将结果压入`a`。
- **基于寄存器的虚拟机：**
  - *指令较长。* 由于指令需要参数记录栈偏移量，单个指令需要更多的位。 例如，一个Lua指令——可能是最著名的基于寄存器的虚拟机——占用完整的32位。 它采用6位做指令类型，其余的是参数。

    Lua作者没有指定Lua的字节码格式，它每个版本都会改变。现在描述的是Lua 5.1。 要深究Lua的内部构造， 读读这个。
  - *指令较少。* 由于每个指令可以做更多的工作，你不需要那么多的指令。 有人说，性能会得以提升，因为不需要将值在栈中移来移去了。

所以，应该选一种？我的建议是坚持使用基于栈的虚拟机。 它们更容易实现，也更容易生成代码。 Lua转换为基于寄存器的虚拟机从而变得更快，这为寄存器虚拟机博得了声誉，但是这*强烈*依赖于实际的指令和虚拟机的其他大量细节。

你有什么指令?

指令集定义了在字节码中可以干什么，不能干什么，对虚拟机性能也有很大的影响。 这里有个清单，记录了不同种类的，你可能需要的指令：

- **外部基本操作原语。** 这是虚拟机与引擎其他部分交互，影响玩家所见的部分。 它们控制了字节码可以表达的真实行为。 如果没有这些，你的虚拟机除了消耗CPU循环以外一无所得。
- **内部基本操作原语** 这些语句在虚拟机内操作数值——文字，算术，比较操作，以及操纵栈的指令。

- **控制流。** 我们的例子没有包含这些，但当你需要有条件执行或循环执行，你需要控制流。 在字节码这样底层的语言，它们出奇的简单：跳转。

  在我们的指令循环中，需要索引来跟踪到了字节码的哪里。 跳转指令做的是修改这个索引并改变将要执行的。 换言之，这是`goto`。你可以基于它制定各种更高级别的控制流。

- **抽象。** 如果用户开始在数据中定义*很多*的东西，最终要重用字节码的部分位，而不是复制和粘贴。 你也许需要可调用过程这样的东西。

  最简单的形式中，过程并不比跳转复杂。 唯一不同的是，虚拟机需要管理另一个*返回*的栈。 当执行“call”指令时，将当前指令索引压入栈中，然后跳转到被调用的字节码。 当它到了“return”，虚拟机从堆栈弹出索引，然后跳回索引指示的位置。

数值是如何表示的?

我们的虚拟机示例只与一种数值打交道：整数。 回答这个问题很简单——栈只是一栈的`int`。 更加完整的虚拟机支持不同的数据类型：字符串，对象，列表等。 你必须决定在内部如何存储这些值。

- **单一数据类型：**
  - *简单易用* 你不必担心标记，转换，或类型检查。
  - *无法使用不同的数据类型。* 这是明显的缺点。将不同类型成塞进单一的表示方式——比如将数字存储为字符串——这是找打。

- **带标记的类型：**

  这是动态类型语言中常见的表示法。 所有的值有两部分。 第一部分是类型标识——一个`enum`——标识存储了数据的类型。这些位的其余部分会被解释为这种类型：

```
enum ValueType
{
  TYPE_INT,
  TYPE_DOUBLE,
  TYPE_STRING
};

struct Value
{
  ValueType type;
  union
  {
    int    intValue;
    double doubleValue;
    char*  stringValue;
  };
};
```

  - *数值知道其类型。* 这个表示法的好处是可在运行时检查值的类型。 这对动态调用很重要，可以确保没有在类型上面执行其不支持的操作。
  - *消耗更多内存。* 每个值都要带一些额外的位来标识类型。在像虚拟机这样的底层，这里几位，那里几位，总量就会快速增加。

- **无标识的union：**

  像前面一样使用union，但是*没有*类型标识。 你可以将这些位表示为不同的类型，由你确保没有搞错值的类型。

  这是静态类型语言在内存中表示事物的方式。 由于类型系统在编译时保证没弄错值的类型，不需要在运行时对其进行验证。

  这也是*无类型*语言，像汇编和Forth存储值的方式。 这些语言让*用户*保证不会写出误认值类型的代码。毫无服务态度！

  - *结构紧凑。* 找不到比只存储需要的值更加有效率的存储方式。
  - *速度快。* 没有类型标识意味着在运行时无需消耗周期检查它们的类型。这是静态类型语言往往比动态类型语言快的原因之一。
  - *不安全。* 这是真正的代价。一块错误的字节码，会让你误解一个值，把数字误解为指针，会破坏游戏安全导致崩溃。

    如果你的字节码是由静态类型语言编译而来，你也许认为它是安全的，因为编译不会生成不安全的字节码。 那也许是真的，但记住恶意用户也许会手写恶意代码而不经过你的编译器。

    这就是为什么，举个例子，Java虚拟机在加载程序时要做*字节码验证*。

- **接口：**

  多种类型值的面向对象解决方案是通过多态。接口为不同的类型测试和转换提供虚方法，如下：

```
class Value
{
public:
  virtual ~Value() {}

  virtual ValueType type() = 0;

  virtual int asInt() {
    // 只能在int上调用
    assert(false);
    return 0;
  }

  // 其他转换方法……
};
```

然后你为每个特定的数据类型设计特定的类，如：

```
class IntValue : public Value
{
public:
  IntValue(int value)
  : value_(value)
  {}

  virtual ValueType type() { return TYPE_INT; }
  virtual int asInt() { return value_; }

private:
  int value_;
};
```

- *开放*。可在虚拟机的核心之外定义新的值类型，只要它们实现了基本接口就行。

- *面向对象。* 如果你坚持OOP原则，这是做事情“正确”的方式，为特定类型使用多态分配行为，而不是在标签上做switch之类的。
- *冗长。* 必须定义单独的类，包含了每个数据类型的相关行为。 注意在前面的例子中，这样的类定义了*所有*的类型。在这里，只包含了一个！
- *低效。* 为了使用多态，必须使用指针，这意味着即使是短小的值，如布尔和数字，也得裹在堆中的对象里。 每使用一个值，你就得做一次虚方法调用。

  在虚拟机核心之类的地方，像这样的性能影响会迅速叠加。 事实上，这引起了许多我们试图在解释器模式中避免的问题。 只是现在的问题不在*代码*中，而是在*值*中。

我的建议是，如果你可以只用单一数据类型，那就这么做。 除此以外，使用带标识的union。这是世界上几乎每个语言解释器做的事情。

如何生成字节码?

我将最重要的问题留到最后。我们已经完成了*消耗*和*解释*字节码， 但需要你写*制造*字节码的工具。 典型的解决方案是写个编译器，但它不是唯一的选择。

- **如果你定义基于文本的语言：**
  - *必须定义语法。* 业余和专业的语言设计师小看这件事情的难度。让解析器快乐很简单，让*用户*快乐很*难*。

    语法设计是用户界面设计，当你将用户界面限制到字符构成的字符串，这可没把事情变简单。

  - *必须实现解析器。* 不管名声如何，这部分其实非常简单。无论使用ANTLR或Bison，还是——像我一样——手写递归下降，都可以完成。
  - *必须处理语法错误。* 这是最重要和最困难的部分。 当用户制造了语法和语义错误——他们总会这么干——引导他们返回到正确的道路是你的任务。 解析器只知道接到了意外的符号，给予有用的的反馈并不容易。
  - *可能会对非技术用户关上大门。* 我们程序员喜欢文本文件。结合强大的命令行工具，我们把它们当作计算机的乐高积木——简单，有百万种方式组合。

    大部分非程序员不这样想。 对他们来说，输入文本文件就像为愤怒机器人审核员填写税表，如果忘记了一个分号就会遭到痛斥。

- **如果你定义了一个图形化创作工具：**
  - *必须实现用户界面。* 按钮，点击，拖动，诸如此类。 有些人畏惧它，但我喜欢它。 如果沿着这条路走下去，设计用户界面和工作核心部分同等重要——而不是硬着头皮完成的乱七八糟工作。

    每点额外工作都会让工具更容易更舒适地使用，并直接导致了游戏中更好的内容。 如果你看看很多游戏制作过程的内部解密，经常会发现制作有趣的创造工具是秘诀之一。
  - *有较少的错误情况。* 由于用户通过交互式一步一步地设计行为，应用程序可以尽快引导他们走出错误。

    而使用基于文本的语言时，直到用户输完整个文件*才能*看到用户的内容，更难预防和处理错误。
  - *更难移植。* 文本编译器的好处是，文本文件是通用的。编译器简单地读入文件并写出。跨平台移植的工作实在微不足道。

    除了换行符。还有编码。

    当你构建用户界面，你必须选择要使用的架构，其中很多是基于某个操作系统。 也有跨平台的用户界面工具包，但他们往往要为对所有平台同样适用付出代价——对所有的平台上同样不适用。

参见

- 这一章节的近亲是GoF的解释器模式。两种方式都能让你用数据组合行为。

  事实上，最终你两种模式*都*会使用。你用来构造字节码的工具会有内部的对象树。这也是解释器模式所能做的。

  为了编译到字节码，你需要递归回溯整棵树，就像用解释器模式去解释它一样。 *唯一的*不同在于，不是立即执行一段行为，而是生成整个字节码再执行。
- Lua是游戏中最广泛应用的脚本语言。 它的内部被实现为一个非常紧凑的，基于寄存器的字节码虚拟机。
- Kismet是个可视化脚本编辑工具，应用于Unreal引擎的编辑器UnrealEd。
- 我的脚本语言Wren，是一个简单的，基于栈的字节码解释器。

子类沙箱

游戏设计模式Behavioral Patterns

意图

用一系列由基类提供的操作定义子类中的行为。

动机

每个孩子都梦想过变成超级英雄，但是不幸的是，高能射线在地球上很短缺。 游戏是让你扮演超级英雄最简单的方法。 因为我们的游戏设计者从来没有学会说“不”，*我们的* 超级英雄游戏中有成百上千种不同的超级能力可供选择。

我们的计划是创建一个`Superpower`基类。然后由它派生出各种超级能力的实现类。 我们在程序员队伍中分发设计文档，然后开始编程。 当我们完成时，我们就会有上百种超级能力类。

当你发现像这个例子一样有*很多*子类时，那通常意味着数据驱动的方式更好。 不再用*代码*定义不同的能力，用*数据*吧。

像类型对象，字节码，和解释器模式都能帮忙。

我们想让玩家处于拥有无限可能的世界中。无论他们在孩童时想象过什么能力，我们都要在游戏中展现。 这就意味着这些超能力子类需要做任何事情： 播放声音，产生视觉刺激，与AI交互，创建和销毁其他游戏实体，与物理打交道。没有哪处代码是它们不会接触的。

假设我们让团队信马由缰地写超能力类。会发生什么?

- *会有很多冗余代码。* 当超能力种类繁多，我们可以预期有很多重叠。 很多超能力都会用相同的方式产生视觉效果并播放声音。 当你坐下来看看，冷冻光线，热能光线，芥末酱光线都很相似。 如果人们实现这些的时候没有协同，那就会有很多冗余的代码和重复劳动。

- *游戏引擎中的每一部分都会与这些类耦合。* 没有深入了解的话，任何人都能写出直接调用子系统的代码，但子系统从来没打算直接与超能力类绑定。 就算渲染系统被好好组织成多个层次，只有一个能被外部的图形引擎使用， 我们可以打赌，最终超级能力代码会与每一个接触。

- *当外部代码需要改变时，一些随机超能力代码有很大几率会损坏。* 一旦我们有了不同的超能力类绑定到游戏引擎的多个部分，改变那些部分必然影响超能力类。 这可不合理，因为图形，音频，UI程序员很可能不想*也*成为玩法程序员。

- *很难定义所有超能力遵守的不变量。* 假设我们想保证超能力播放的所有音频都有正确的顺序和优先级。 如果我们几百个类都直接调用音频引擎，就没什么好办法来完成这点。

我们要的是给每个实现超能力的玩法程序员一系列可使用的基本单元。 你想要播放声音? 这是你的`playSound()`函数。 你想要粒子效果? 这是你的`spawnParticles()`函数。 我们保证了这些操作覆盖了你要做的事情，所以你不需要`#include`随机的头文件，干扰到代码库的其他部分。

我们实现的方法是通过定义这些操作为`Superpower`*基类*的*protected方法*。 将它们放在基类给了每个子类直接便捷的途径获取方法。 让它们为protected（很可能不是虚方法）方法暗示了它们存在就是为了被子类*调用*。

一旦有了这些东西来使用，我们需要一个地方使用他们。 为了做到那点，我们定义*沙箱方法*，这是子类必须实现的抽象的protected方法。 有了那些，要实现一种新的能力，你需要:

1. 创建从`Superpower`继承的新类。
2. 重载沙箱方法`activate()`。
3. 通过调用`Superpower`提供的protected方法实现主体。

我们现在可以使用这些高层次的操作来解决冗余代码问题了。 当我们看到代码在多个子类间重复，我们总可以将其打包到`Superpower`中，作为它们都可以使用的新操作。

我们通过将耦合约束到一个地方解决了耦合问题。 `Superpower`最终与不同的系统耦合，但是继承它的几百个类不会。 相反，它们*只*耦合基类。 当游戏系统的某部分改变时，修改`Superpower`也许是必须的，但是众多的子类不需要修改。

这个模式带来浅层但是广泛的类层次。 你的继承链不*深*，但是有*很多*类与`Superpower`挂钩。 通过使用有很多直接子类的基类，我们在代码库中创造了一个支撑点。 我们投入到`Superpower`的时间和爱可以让游戏中众多类获益。

最近，你发现很多人批评面向对象语言中的继承。 继承*是*有问题——在代码库中没有比父类子类之间的耦合更深的了——但我发现*扁平的*继承树比起*深的*继承树更好处理。

模式

基类定义抽象的**沙箱方法**和几个**提供的操作**。 将操作标为protected，表明它们只为子类所使用。 每个推导出的**沙箱子类**用提供的操作实现了沙箱函数。

何时使用

子类沙箱模式是潜伏在代码库中简单常用的模式，哪怕是在游戏之外的地方亦有应用。 如果你有一个非虚的protected方法，你可能已在用类似的东西了。 沙箱方法在以下情况适用：

- 你有一个能推导很多子类的基类。
- 基类可以提供子类需要的所有操作。
- 在子类中有行为重复，你想要更容易的在它们间分享代码。
- 你想要最小化子类和程序的其他部分的耦合。

记住

“继承”在很多编程圈子近来为人诟病，原因之一是基类趋向于增加越来越多的代码 这个模式特别容易染上这个毛病。

由于子类通过基类接触游戏的剩余部分，基类最后和子类需要的*每个*系统耦合。 当然，子类也紧密的与基类相绑定。这种蛛网耦合让你很难在不破坏什么的情况下改变基类——你得到了（脆弱的基类问题）brittle base class problem。

硬币的另一面是由于你耦合的大部分都被推到了基类，子类现在与世界的其他部分分离。理想的情况下，你大多数的行为都载子类中。这意味着你的代码库大部分是孤立的，很容易管理。

如果你发现这个模式正把你的基类变成一锅代码糊糊， 考虑将它提供的一些操作放入分离的类中， 这样基类可以分散它的责任。组件模式可以在这里帮上忙。

示例代码

因为这个模式太简单了，示例代码中没有太多东西。 这不是说它没用——这个模式关键在于“意图”，而不是它实现的复杂度。

我们从`Superpower`基类开始：

```
class Superpower
{
public:
  virtual ~Superpower() {}

protected:
  virtual void activate() = 0;

  void move(double x, double y, double z)
  {
    // 实现代码……
  }

  void playSound(SoundId sound, double volume)
  {
    // 实现代码……
  }

  void spawnParticles(ParticleType type, int count)
  {
    // 实现代码……
  }
};
```

`activate()`方法是沙箱方法。由于它是抽象虚函数，子类*必须*重载它。 这让那些需要创建子类的人知道要做哪些工作。

其他的protected函数`move()`，`playSound()`，和`spawnParticles()`都是提供的操作。 它们是子类在实现`activate()`要调用的。

在这个例子中，我们没有实现提供的操作，但真正的游戏在那里有真正的代码。 那些代码中，`Superpower`与游戏中其他部分的耦合——`move()`也许调用物理代码，`playSound()`会与音频引擎交互，等等。 由于这都在基类的*实现*中，保证了耦合封闭在`Superpower`中。

好了，拿出我们的放射蜘蛛，创建个能力。像这样：

```
class SkyLaunch : public Superpower
{
protected:
  virtual void activate()
  {
    // 空中滑行
    playSound(SOUND_SPROING, 1.0f);
    spawnParticles(PARTICLE_DUST, 10);
    move(0, 0, 20);
  }
};
```

好吧，也许*跳跃*不是*超级能力*，但我在这里讲的是基础知识。

这种能力将超级英雄射向天空，播放合适的声音，扬起尘土。 如果所有的超能力都这样简单——只是声音，粒子效果，动作的组合——那么就根本不需要这个模式了。 相反，`Superpower`有内置的`activate()`能获取声音ID，粒子类型和运动的字段。 但是这只在所有能力运行方式相同，只在数据上不同时才可行。让我们精细一些：

```
class Superpower
{
protected:
  double getHeroX()
  {
    // 实现代码……
  }

  double getHeroY()
  {
    // 实现代码……
  }

  double getHeroZ()
  {
    // 实现代码……
  }

  // 退出之类的……
};
```

这里我们增加了些方法获取英雄的位置。我们的`SkyLaunch`现在可以使用它们了：

```
class SkyLaunch : public Superpower
{
protected:
  virtual void activate()
  {
    if (getHeroZ() == 0)
    {
      // 在地面上，冲向空中
      playSound(SOUND_SPROING, 1.0f);
      spawnParticles(PARTICLE_DUST, 10);
      move(0, 0, 20);
    }
    else if (getHeroZ() < 10.0f)
    {
      // 接近地面，再跳一次
      playSound(SOUND_SWOOP, 1.0f);
      move(0, 0, getHeroZ() + 20);
    }
    else
    {
      // 正在空中，跳劈攻击
      playSound(SOUND_DIVE, 0.7f);
      spawnParticles(PARTICLE_SPARKLES, 1);
      move(0, 0, -getHeroZ());
    }
  }
};
```

由于我们现在可以访问状态，沙箱方法可以做有用有趣的控制流了。 这还需要几个简单的`if`声明， 但你可以做任何你想做东西。 使用包含任意代码的成熟沙箱方法，天高任鸟飞了。

早先，我建议以数据驱动的方式建立超能力。 这里是你可能不想那么做的原因之一。 如果你的行为复杂而使用命令式风格，它更难在数据中定义。

设计决策

如你所见，子类沙箱是一个“软”模式。它表述了一个基本思路，但是没有很多细节机制。这意味着每次使用都面临着一些有趣的选择。这里是一些需要思考的问题。

应该提供什么操作?

这是最大的问题。这深深影响了模式感觉上和实际上有多好。 在一种极端中，基类几乎不提供*任何*操作。只有一个沙箱方法。 为了实现功能，总是需要调用基类外部的系统。如果你这样做，很难说你在使用这个模式。

另一个极端，基类提供了*所有*子类也许需要的操作。 子类*只*与基类耦合，不调用任何外部系统的东西。

具体来说，这意味着每个子类的源文件只需要`#include`它的基类头文件。

在这两极端之间，操作由基类提供还是向外部直接调用有很大的操作余地。 你提供的操作越多，外部系统与子类耦合越少，但是与基类耦合*越多*。 从子类中移除了耦合是通过将耦合推给基类完成的。

如果你有一堆与外部系统耦合的子类的话，这很好。 通过将耦合移到提供的操作中，你将其移动到了一个地方：基类。但是你越这么做，基类就越大越难管理。

所以分界线在哪里？这里是一些首要原则：

- 如果提供的操作只被一个或几个子类使用，将操作加入基类获益不会太多。 你向基类添加了会影响所有事物的复杂性，但是只有少数几个类受益。

  让该操作与其他提供的操作保持一致或许有价值，但让使用操作的子类直接调用外部系统也许更简单明了。

- 当你调用游戏中其他地方的方法，如果方法没有修改状态就有更少的干扰。 它仍然制造耦合，但是这是“安全的”耦合，因为它没有破坏游戏中的任何东西。

  “安全的”在这里打了引号是因为严格来说，接触数据也能造成问题。 如果你的游戏是多线程的，读取的数据可能正在被修改。如果你不小心，就会读入错误的数据。

  另一个不愉快的情况是，如果你的游戏状态是严格确定性的（很多在线游戏为了保持玩家同步都是这样的）。 接触了游戏同步状态之外的东西会造成极糟的不确定性漏洞。

  另一方面，修改状态的调用会和代码库的其他方面紧密绑定，你需要三思。打包他们成基类提供的操作是个好的候选项。

- 如果操作只是增加了向外部系统的转发调用，那它就没增加太多价值。那种情况下，也许直接调用外部系统的方法更简单。

  但是，简单的转发也是有用的——那些方法接触了基类不想直接暴露给子类的状态。 举个例子，假设`Superpower`提供这个：

  ```
  void playSound(SoundId sound, double volume)
  {
    soundEngine_.play(sound, volume);
  }
  ```

  它只是转发调用给`Superpower`中`soundEngine_`字段。 但是，好处是将字段封装在`Superpower`中，避免子类接触。

方法应该直接提供，还是包在对象中提供?

这个模式的挑战是基类中最终加入了很多方法。 你可以将一些方法移到其他类中来缓和。基类通过返回对象提供方法。

举个例子，为了让超能力播放声音，我们可以直接将它们加到`Superpower`中：

```
class Superpower
{
protected:
  void playSound(SoundId sound, double volume)
  {
    // 实现代码……
  }

  void stopSound(SoundId sound)
  {
    // 实现代码……
  }

  void setVolume(SoundId sound)
  {
    // 实现代码……
  }

  // 沙盒方法和其他操作……
};
```

但是如果`Superpower`已经很庞杂了，我们也许想要避免这样。 取而代之的是创建`SoundPlayer`类暴露该函数：

```
class SoundPlayer
{
  void playSound(SoundId sound, double volume)
  {
    // 实现代码……
  }

  void stopSound(SoundId sound)
  {
    // 实现代码……
  }

  void setVolume(SoundId sound)
  {
    // 实现代码……
  }
};
```

`Superpower`提供了对其的接触：

```
class Superpower
{
protected:
  SoundPlayer& getSoundPlayer()
  {
    return soundPlayer_;
  }

  // 沙箱方法和其他操作……

private:
  SoundPlayer soundPlayer_;
};
```

将提供的操作分流到辅助类可以为你做一些事情：

- *减少了基类中的方法。* 在这里的例子中，将三个方法变成了一个简单的获取函数。
- *在辅助类中的代码通常更好管理。* 像`Superpower`的核心基类，不管意图如何好，它被太多的类依赖而很难改变。 通过将函数移到耦合较少的次要类，代码变得更容易被使用而不破坏任何东西。
- *减少了基类和其他系统的耦合度。* 当`playSound()`方法直接在`Superpower`时，基类与`SoundId`以及其他涉及音频代码直接绑定。 将它移动到`SoundPlayer`中，减少了`Superpower`与`SoundPlayer`类的耦合，这就封装了它其他的依赖。

基类如何获得它需要的状态?

你的基类经常需要将对子类隐藏的数据封装起来。 在第一个例子中，`Superpower`类提过了`spawnParticles()`方法。 如果方法的实现需要一些粒子系统对象，怎么获得呢?

- **将它传给基类构造器：**

  最简单的解决方案是让基类将其作为构造器变量：

```
class Superpower
{
public:
  Superpower(ParticleSystem* particles)
  : particles_(particles)
  {}

  // 沙箱方法和其他操作……

private:
  ParticleSystem* particles_;
};
```

这安全地保证了每个超能力在构造时能得到粒子系统。但让我们看看子类：

```
class SkyLaunch : public Superpower
{
public:
  SkyLaunch(ParticleSystem* particles)
  : Superpower(particles)
  {}
};
```

我们在这看到了问题。每个子类都需要构造器调用基类构造器并传递变量。这让子类接触了我们不想要它知道的状态。

这也让造成了维护的负担。如果我们后续向基类添加了状态，每个子类都需要修改并传递这个状态。

- **使用两阶初始化：**

  为了避免通过构造器传递所有东西，我们可以将初始化划分为两个部分。 构造器不接受任何参数，只是创建对象。然后，我们调用定义在基类的分离方法传入必要的数据：

```
Superpower* power = new SkyLaunch();
power->init(particles);
```

  注意我们没有为`SkyLaunch`的构造器传入任何东西，它与`Superpower`中想要保持私有的任何东西都不耦合。 这种方法的问题在于，你要保证永远记得调用`init()`，如果忘了，你会获得处于半完成的，无法运行的超能力。

  你可以将整个过程封装到一个函数中来修复这一点，就像这样：

```
Superpower* createSkyLaunch(ParticleSystem* particles)
{
  Superpower* power = new SkyLaunch();
  power->init(particles);
  return power;
}
```

  使用一点像私有构造器和友类的技巧，你可以保证`createSkylaunch()`函数是唯一能够创建能力的函数。 这样，你不会忘记任何初始化步骤。

- **让状态静态化：**

  在先前的例子中，我们用粒子系统初始化每一个`Superpower`*实例*。 在每个能力都需要自己独特的状态时这是有意义的。但是如果粒子系统是单例，那么每个能力都会分享相同的状态。

  如果是这样，我们可以让状态是基类私有而*静态*的。 游戏仍然要保证初始化状态，但是它只需要为整个游戏初始化`Superpower`*类*一遍，而不是为每个实例初始化一遍。

  记住单例仍然有很多问题。你在很多对象中分享了状态（所有的`Superpower`实例）。 粒子系统被封装了，因此它不是全局*可见的*，这很好，但它们都访问同一对象，这让分析起来更加困难了。

```
class Superpower
{
public:
  static void init(ParticleSystem* particles)
  {
    particles_ = particles;
  }

  // 沙箱方法和其他操作……

private:
  static ParticleSystem* particles_;
};
```

  注意这里的`init()`和`particles_`都是静态的。 只要游戏早先调用过一次`Superpower::init()`，每种能力都能接触粒子系统。 同时，可以调用正确的推导类构造器来自由创建`Superpower`实例。

  更棒的是，现在`particles_`是*静态*变量， 我们不需要在每个`Superpower`中存储它，这样我们的类占据的内存更少了。

- **使用服务定位器：**

  前一选项中，外部代码要在基类请求前压入基类需要的全部状态。 初始化的责任交给了周围的代码。另一选项是让基类拉取它需要的状态。 而做到这点的一种实现的方法是使用服务定位器模式：

  ```
  class Superpower
  {
  protected:
    void spawnParticles(ParticleType type, int count)
    {
      ParticleSystem& particles = Locator::getParticles();
      particles.spawn(type, count);
    }

    // 沙箱方法和其他操作……
  };
  ```

  这儿，`spawnParticles()`需要粒子系统，不是外部系统给它，而是它自己从服务定位器中拿了一个。

参见

- 当你使用更新模式时，你的更新函数通常也是沙箱方法。
- 这个模式与模板方法正相反。 两种模式中，都使用一系列受限操作实现方法。 使用子类沙箱时，方法在推导类中，受限操作在基类中。 使用模板方法时，*基类*有方法，而受限操作在*推导*类中。
- 你也可以认为这个模式是外观模式的变形。 外观模式将一系列不同系统藏在简化的API后。使用子类沙箱，基类起到了在子类前隐藏整个游戏引擎的作用。

类型对象

游戏设计模式Behavioral Patterns

意图

创造一个类A来允许灵活的创造新“类型”，类A的每个实例都代表了不同的对象类型。

动机

想象我们在制作一个奇幻RPG游戏。 我们的任务是为一群想要杀死英雄的恶毒怪物编写代码。 怪物有多个的属性：生命值，攻击力，图形效果，声音表现，等等。 但是为了说明介绍的目的我们先只考虑前面两个。

游戏中的每个怪物都有当前血值。 开始时是满的，每次怪物受伤，它就下降。 怪物也有一个攻击字符串。 当怪物攻击我们的英雄，那个文本就会以某种方式展示给用户。 （我们不在乎这里怎样实现。）

设计者告诉我们怪物有不同*品种*，像“龙”或者“巨魔”。 每个品种都描述了一*种*存在于游戏中的怪物，同时可能有多个同种怪物在地牢里游荡。

品种决定了怪物的初始健康——龙开始的血量比巨魔多，它们更难被杀死。 这也决定了攻击字符——同种的所有怪物都以相同的方式进行攻击。

传统的面向对象方案

想着这样的设计方案，我们启动了文本编辑器开始编程。 根据设计，龙是一种怪物，巨魔是另一种，其他品种的也一样。 用面向对象的方式思考，这引导我们创建`Monster`基类。

这是一种“是某物”的关系。 在传统OOP思路中，由于龙“是”怪物，我们用`Dragon`是`Monster`的子类来描述这点。 如我们将看到的，继承是一种将这种关系表示为代码的方法。

```
class Monster
{
public:
  virtual ~Monster() {}
  virtual const char* getAttack() = 0;

protected:
  Monster(int startingHealth)
  : health_(startingHealth)
  {}

private:
  int health_; // 当前血值
};
```

在怪物攻击英雄时，公开的`getAttack()`函数让战斗代码能获得需要显示的文字。 每个子类都需要重载它来提供不同的消息。

构造器是protected的，需要传入怪物的初始血量。 每个品种的子类的公共构造器调用这个构造器，传入对于该品种适合的起始血量。

现在让我们看看两个品种子类：

```
class Dragon : public Monster
{
public:
  Dragon() : Monster(230) {}

  virtual const char* getAttack()
  {
    return "The dragon breathes fire!";
  }
};

class Troll : public Monster
{
public:
  Troll() : Monster(48) {}

  virtual const char* getAttack()
  {
    return "The troll clubs you!";
  }
};
```

感叹号让所有事情都更刺激！

每个从`Monster`派生出来的类都传入起始血量，重载`getAttack()`返回那个品种的攻击字符串。 所有事情都一如所料的运行，不久以后，我们的英雄就可以跑来跑去杀死各种野兽了。 我们继续编程，在意识到之前，我们就有了酸泥怪到僵尸羊的众多怪物子类。

然后，很奇怪，事情陷入了困境。 设计者最终想要*几百个*品种，但是我们发现所有的时间都花费在写这些只有七行长的子类和重新编译上。 这会继续变糟——设计者想要协调已经编码的品种。我们之前富有产出的工作日退化成了：

1. 收到设计者将巨魔的血量从48改到52的邮件。
2. 签出并修改`Troll.h`。
3. 重新编译游戏。
4. 签入修改。

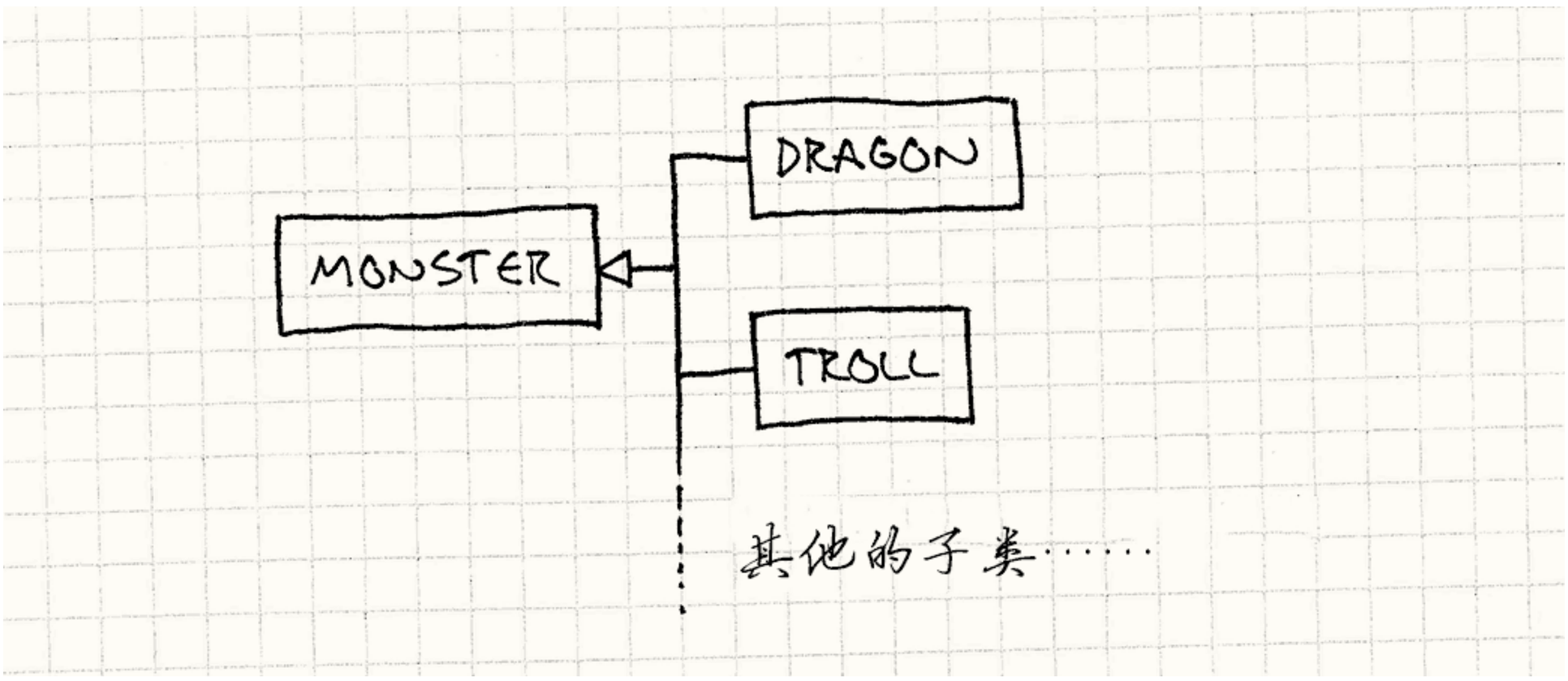
5. 回复邮件。
6. 重复。

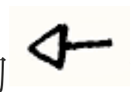
我们度过了失意的一天，因为我们变成了填数据的猴子。 设计者也感到挫败，因为修改一个数据就要老久。 我们需要的是一种无需每次重新编译游戏就能修改品种的状态。 如果设计者创建和修改品种时无需*任何*程序员的介入那就更好了。

为类型建类

从较高的层次看来，我们试图解决的问题非常简单。 游戏中有很多不同的怪物，我们想要在它们之间分享属性。 一大群怪物在攻击英雄，我们想要它们中的一些使用相同的攻击文本。 我们声明这些怪物是相同的“品种”，而品种决定了攻击字符串。

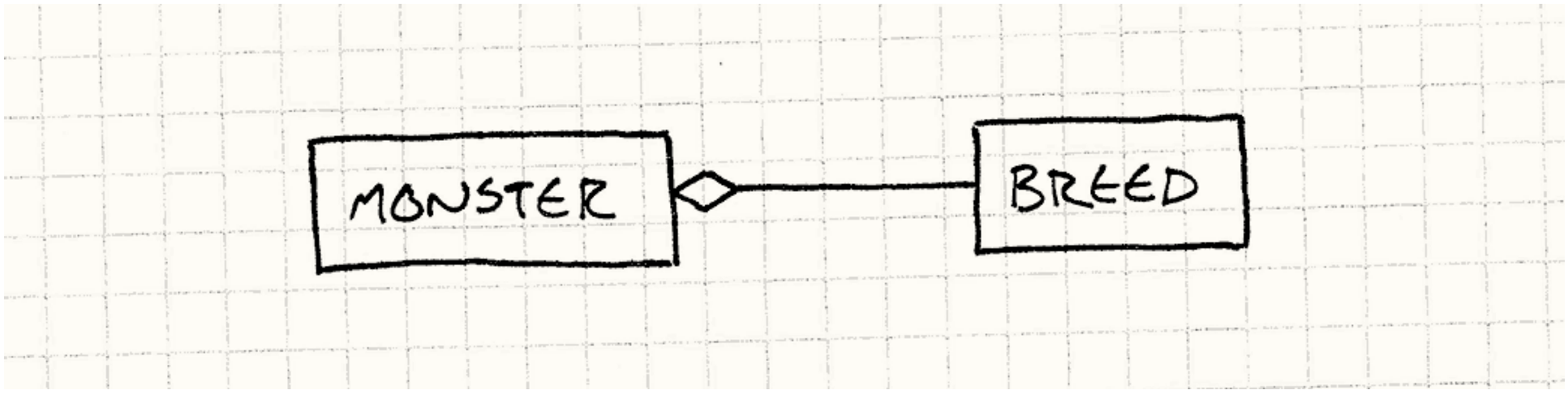
这种情况下我们很容易想到类，那就试试吧。 龙是怪物，每条龙都是龙“类”的实例。 定义每个品种为抽象基类`Monster` 的子类，让游戏中每个怪物都是子类的实例反映了那点。最终的类层次是这样的：

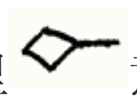


这里的  意为“从……继承”。

每个怪物的实例属于摸个继承怪物类的类型。 我们有的品种越多，类层次越高。 这当然是问题：添加新品种就需要添加新代码，而每个品种都需要被编译为它自己的类型。

这可行，但不是唯一的选项。 我们也可以重构代码让每个怪物*有*品种。 不是让每个品种继承`Monster`，我们现在有单一的`Monster`类和`Breed`类。



这里  意为“被……引用”。

这就成了，就两个类。注意这里完全没有继承。 通过这个系统，游戏中的每个怪物都是`Monster`的实例。 `Breed`类包含了在不同品种怪物间分享的信息：开始血量和攻击字符串。

为了将怪物与品种相关联，我们给了每个`Monster`实例对包含品种信息的`Breed`对象的引用。 为了获得攻击字符串，一个怪兽可以调用它品种的方法。 `Breed`类本质上定义了一个怪物的*类型*，这就是为啥这个模式叫做类型对象。

这个模式特别有用的一点是，我们现在可以定义全新的*类型*而无需搅乱代码库。 我们本质上将部分的类型系统从硬编码的继承结构中拉出，放到可以在运行时定义的数据中去。

我们可以通过用不同值实例化`Monster`来创建成百上千的新品种。 如果从配置文件读取不同的数据初始化品种，我们就有能力完全靠数据定义新怪物品种。 这么容易，设计者也可以做到！

模式

定义

类型对象类和**有类型的对象**类。每个类型对象实例代表一种不同的逻辑类型。 每种有类型的对象保存**对描述它类型的类型对象的引用**。

实例相关的数据被存储在有类型对象的实例中，被同种类分享的数据或者行为存储在类型对象中。 引用同一类型对象的对象将会像同一类型一样运作。 这让我们在一组相同的对象间分享行为和数据，就像子类让我们做的那样，但没有固定的硬编码子类集合。

何时使用

在任何你需要定义不同“种”事物，但是语言自身的类型系统过于僵硬的时候使用该模式。尤其是下面两者之一成立时：

- 你不知道你后面还需要什么类型。（举个例子，如果你的游戏需要支持资料包，而资料包有新的怪物品种呢？）
- 修改或添加新类型不想改变代码或者重新编译就能。

记住

这个模型是关于将“类型”的定义从命令式僵硬的语言世界移到灵活但是缺少行为的对象内存世界。 灵活性很好，但是将类型提到数据丧失了一些东西。

需要手动追踪类型对象

使用像C++类型系统这样的好处之一就是编译器自动记录类的注册。 定义类的数据自动编译到可执行的静态内存段然后就运作起来了。

使用类型对象模式，我们现在不但要负责管理内存中的怪物，同时要管理它们的*类型*——我们要保证，只要我的怪物需要，所有的品种对象都能实例化并保存在内存中。 无论何时创建新的怪物，由我们来保证能初始化为有含有品种的引用。

我们从编译器的限制中解放了自己，但是代价是需要重新实现一些它以前为我们做的事情。

C++内部使用了“虚函数表”（“vtable”）实现虚方法。 虚函数表是个简单的`struct`，包含了一集合函数指针，每个对应一个类中的虚方法。 在内存中每个类有一个虚函数表。每个类的实例有一个指针指向它类的虚函数表。

当你调用一个虚函数，代码首先在虚函数表中查找对象，然后调用表中函数指针指向的函数。

听起来很熟悉？虚函数表就是个品种对象，而指向虚函数表的指针是怪物保留的、指向品种的引用。 C++的类是C中的类型对象，由编译器自动处理。

更难为每种类型定义*行为*

使用子类派生，你可以重载方法，然后做你想做的事——用程序计算值，调用其他代码，等等。 天高任鸟飞。如果我们想的话，可以定义一个怪物子类，根据月亮的阶段改变它的攻击字符串。（我觉得就像狼人。）

当我们使用类型对象模式时，我们将重载的方法替换成了成员变量。 不再让怪物的子类重载方法，用不同的*代码*来*计算*攻击字符串，我们的品种对象而是在不同的*变量*中*存储*攻击字符串。

这让使用类型对象定义类型相关的*数据*变得容易，但是定义类型相关的*行为*变得困难。 如果，举个例子，不同品种的怪物需要使用不同的AI算法，使用这个模式就面临着挑战。

有很多方式可以让我们跨越这个限制。 一个简单的方式是使用预先定义的固定行为， 然后类型对象中的数据简单的*选择*它们中的一个。 举例，假设我们的怪物AI总是处于“站着不动”、“追逐英雄”或者“恐惧地呜咽颤抖”（嘿，他们不可能都是强势的龙）。 我们可以定义函数来实现每种行为。 然后，我们在方法中存储合适函数的引用，将AI算法与品种相关联。

听起来很熟悉？这是在*我们的*类型对象中实现虚函数表。

另一个更加彻底的解决方案是真正地在数据中支持定义行为。 解释器模式和字节码模式让我们定义有行为的对象。 如果我们读取数据文件并用上面两种模式之一构建数据结构，我们就将行为完全从代码中移出，放入了数据之中。

时过境迁，游戏越来越多的由数据驱动。 硬件更为强大，我们发现比起能榨干多少硬件的性能，瓶颈更多在能完成多少内容。 使用64K的软盘的时代，挑战是将游戏*塞入*其中。 而在使用双面DVD的时代，挑战是用游戏*填满*它。

脚本语言和其他高层定义游戏行为的方式能给我们提供必要的生产力，同时只消耗可预期的运行时性能。 由于硬件越来越好，而大脑并非如此，这种交换越来越有意义。

示例代码

在第一遍实现中，让我们从简单的开始，只构建动机那节提到的基础系统。 我们从`Breed`类开始：

```
class Breed
{
public:
  Breed(int health, const char* attack)
  : health_(health),
    attack_(attack)
  {}

  int getHealth() { return health_; }
  const char* getAttack() { return attack_; }

private:
  int health_; // 初始血值
  const char* attack_;
};
```

很简单。它基本上只是两个数据字段的容器：起始血量和攻击字符串。 让我们看看怪物怎么使用它：

```
class Monster
{
public:
  Monster(Breed& breed)
  : health_(breed.getHealth()),
    breed_(breed)
  {}

  const char* getAttack()
  {
    return breed_.getAttack();
  }

private:
  int    health_; // 当前血值
  Breed& breed_;
};
```

当我们建构怪物时，我们给它一个品种对象的引用。 它定义了怪物的品种，取代了之前的子类。 在构造函数中，`Monster`使用的品种决定了起始血量。 为了获得攻击字符串，怪物简单的将调用转发给它的品种。

这段非常简单的代码是这章的核心思路。剩下的任何东西都是红利。

让类型对象更像类型：构造器

现在，我们可以直接构造怪物并负责传入它的品种。 和常用的OOP语言实现的对象相比这有些退步——我们通常不会分配一块空白内存，*然后*赋予它类型。 相反，我们根据类调用构造器，它负责创建一个新实例。

我们可以在类型对象上应用同样的模式。

```
class Breed
{
public:
  Monster* newMonster() { return new Monster(*this); }

  // Previous Breed code...
};
```

“模式”一词用在这里正合适。我们讨论的是设计模式中经典的模式：工厂方法。

在一些语言中，这个模式被用来构造*所有*的对象。 在Ruby，Smalltalk，Objective-C以及其他类是对象的语言中，你通过在类对象本身上调用方法来构建实例。

以及那个使用它们的类：

```
class Monster
{
  friend class Breed;

public:
  const char* getAttack() { return breed_.getAttack(); }

private:
  Monster(Breed& breed)
  : health_(breed.getHealth()),
    breed_(breed)
  {}

  int health_; // 当前血值
  Breed& breed_;
};
```

不同的关键点在于`Breed`中的`newMonster()`。 这是我们的“构造器”工厂方法。使用我们原先的实现，就像这样创建怪物：

这里还有一个小小的不同。 因为样例代码由C++写就，我们可以使用一个小小的特性：*友类*。

我们让`Monster`的构造器成为私有，防止了任何人直接调用它。 友类放松了这个限制，`Breed`仍可接触它。 这意味着构造怪物的*唯*一方法是通过`newMonster()`。

```
Monster* monster = new Monster(someBreed);
```

在我们改动后，它看上去是这样：

```
Monster* monster = someBreed.newMonster();
```

所以，为什么这么做？创建一个对象分为两步：内存分配和初始化。 `Monster`的构造器让我们做完了所有需要的初始化。 在例子中，那只存储了类型，但是在完整的游戏中，那需要加载图形，初始化怪物AI以及做其他的设置工作。

但是，那都发生在内存分配*之后*。 在构造器调用前，我们已经找到了内存放置怪物。 在游戏中，我们通常也想控制对象创造这一环节： 我们通常使用自定义的分配器或者对象池模式来控制对象最终在内存中的位置。

在`Breed`中定义“构造器”函数给了我们地方实现这些逻辑。 不是简单的调用`new`,`newMonster()`函数可以在将控制权传递给`Monster`初始化之前，从池中或堆中获取内存。 通过在*唯*一有能力创建怪物的`Breed`函数中放置这些逻辑， 我们保证了所有怪物变量遵守了内存管理规范。

通过继承分享数据

我们现在已经实现了能完美服务的类型对象系统，但是它非常基础。 我们的游戏最终有*上百*种不同品种，每种都有成打的特性。 如果设计者想要协调30中不同的巨魔，让它们变得强壮一点，他会的处理很多数据。

能帮上忙的是在不同*品种*间分享属性的能力，一如品种在不同的*怪物*间分享属性的能力。 就像我们在之前OOP方案中做的那样，我们可以使用派生完成这点。 只是，这次，不使用语言的继承机制，我们用类型对象实现它。

简单起见，我们只支持单继承。 就像类可以有一个父类，我们允许品种有一个父品种：

```
class Breed
{
public:
  Breed(Breed* parent, int health, const char* attack)
  : parent_(parent),
    health_(health),
    attack_(attack)
  {}

  int          getHealth();
  const char* getAttack();

private:
  Breed*       parent_;
  int          health_; // 初始血值
  const char* attack_;
};
```

当我们构建一个品种，我们先传入它继承的父品种。 我们可以为基础品种传入`NULL`表明它没有祖先。

为了让这有用，子品种需要控制它从父品种继承了哪些属性，以及哪些属性需要重载并由自己指定。 在我们的示例系统中，我们可以说品种用非零值重载了怪物的健康，用非空字符串重载了攻击字符串。 否则，这些属性要从它的父品种里继承。

实现方式有两种。 一种是每次属性被请求时动态处理委托，就像这样：

```
int Breed::getHealth()
{
  // 重载
  if (health_ != 0 || parent_ == NULL) return health_;

  // 继承
  return parent_->getHealth();
}

const char* Breed::getAttack()
{
  // 重载
  if (attack_ != NULL || parent_ == NULL) return attack_;

  // 继承
  return parent_->getAttack();
}
```

如果品种在运行时修改种类，不再重载，或者不再继承某些属性时，这能保证做正确的事。另一方面，这要更多的内存（它需要保存指向它的父品种的指针）而且更慢。 每次你查找属性都需要回溯继承链。

如果我们可以保证品种的属性不变，一个更快的解决方案是在*构造时*使用继承。 这被称为“复制”委托，因为在创建对象时，我们*复制*继承的属性*到*推导的类型。它看上去是这样的：

```
Breed(Breed* parent, int health, const char* attack)
: health_(health),
  attack_(attack)
{
  // 继承没有重载的属性
  if (parent != NULL)
  {
    if (health == 0) health_ = parent->getHealth();
    if (attack == NULL) attack_ = parent->getAttack();
  }
}
```

注意现在我们不再需要给父品种的字段了。 一旦构造器完成，我们可以忘了父品种，因为我们已经拷贝了它的所有属性。 为了获得品种的属性，我们现在直接返回字段：

```
int          getHealth() { return health_; }
const char* getAttack() { return attack_; }
```

又好又快！

假设游戏引擎从品种的JSON文件加载设置然后创建类型。它看上去是这样的：

```
{
  "Troll": {
    "health": 25,
    "attack": "The troll hits you!"
  },
  "Troll Archer": {
    "parent": "Troll",
    "health": 0,
    "attack": "The troll archer fires an arrow!"
  },
  "Troll Wizard": {
    "parent": "Troll",
    "health": 0,
    "attack": "The troll wizard casts a spell on you!"
  }
}

:::json
{
  "Troll": {
    "health": 25,
    "attack": "The troll hits you!"
  },
  "Troll Archer": {
    "parent": "Troll",
    "health": 0,
    "attack": "The troll archer fires an arrow!"
  },
  "Troll Wizard": {
    "parent": "Troll",
    "health": 0,
    "attack": "The troll wizard casts a spell on you!"
  }
}
```

我们有一段代码读取每个品种，用新数据实例化品种实例。 就像你从`"parent": "Troll"`字段看到的， `Troll Archer`和`Troll Wizard`品种都由基础`Troll`品种继承而来。

由于派生类的初始血量都是0，所以该值从基础`Troll`品种继承。 这意味着无论怎么调整`Troll`的血量，三个品种的血量都会被更新。 随着品种的数量和属性的数量增加，这节约了很多时间。 现在，通过一小块代码，系统给了设计者控制权，让他们能好好利用时间。 与此同时，我们可以回去编码其他特性了。

设计决策

类型对象模式让我们建立类型系统，就好像在设计自己的编程语言。 设计空间是开放的，我们可以做很多有趣的事情。

在实践中，有些东西打破了我们的幻想。 时间和可维护性阻止我们创建特别复杂的东西。 更重要的是，无论如何设计类型系统，用户（通常不是程序员）要能轻松地理解它。 我们将其做的越简单，它就越有用。 所以我们在这里谈到的是已经反复探索的领域，开辟新路就留给学者和探索者吧。

类型对象是封装的还是暴露的?

在我们的简单实现中，`Monster`有一个对品种的引用，但是它没有显式暴露这个引用。 外部代码不能直接获取怪物的品种。 从代码库的角度看来，怪物事实上是没有类型的，事实上它们拥有品种只是个实现细节。

我们可以很容易的改变这点，让`Monster`返回它的`Breed`：

```
class Monster
{
public:
  Breed& getBreed() { return breed_; }

  // 当前的代码……
};
```

在本书的另一个例子中，我们遵守了惯例，返还对象的引用而不是对象的指针，保证了永远不会返回`NULL`。

这样做改变了`Monster`的设计。 事实是所有怪物都拥有品种是API的可见部分了，下面是这两者各自的好处：

- **如果类型对象是封装的：**
  - *类型对象模式的复杂性对代码库的其他部分是隐藏的。* 它成为了只有有类型的对象才需要考虑的实现细节。
  - *有类型的对象可以选择性地修改类型对象的重载行为。* 假设我们想要怪物在它接近死亡时改变它的攻击字符串。 由于攻击字符串总是通过`Monster`获取的，我们有一个方便的地方放置代码：

    ```
    const char* Monster::getAttack()
    {
      if (health_ < LOW_HEALTH)
      {
        return "The monster flails weakly.";
      }

      return breed_.getAttack();
    }
    ```

    如果外部代码直接调用品种的`getAttack()`，我们就没有机会能插入逻辑。
  - *我们得为每个类型对象暴露的方法写转发。* 这是这个设计的冗长之处。如果类型对象有很多方法，对象类也得为每一个方法建立属于自己的公共可见方法。
- **如果类型对象是暴露的：**
  - *外部代码可以与类型对象直接交互，无需拥有类型对象的实例。* 如果类型对象是封装的，那么没有一个拥有它的对象就没法使用它。 这阻止我们使用构造器模式这样的方法，在品种上调用方法来创建新怪物。 如果用户不能直接获得品种，他们就没办法调用它。
  - *类型对象现在是对象公共API的一部分了。* 大体上，窄接口比宽接口更容易掌控——你暴露给代码库其他部分的越少，你需要处理的复杂度和维护工作就越少。 通过暴露类型对象，我们扩宽了对象的API，包含了所有类型对象提供的东西。

有类型的对象是如何创建的?

使用这个模式，每个“对象”现在都是一对对象：主对象和它的类型对象。 所以我们怎样创建并绑定两者呢?

- 构造对象然后传入类型对象：
  - *外部代码可以控制分配。* 由于调用代码也是构建对象的代码，它可以控制其的内存位置。 如果我们想要UI在多种内存场景中使用（不同的分配器，在栈中，等等），这给了完成它的灵活性。
- 在类型对象上调用“构造器”函数：
  - *类型对象控制了内存分配。* 这是硬币的另一面。如果我们*不想*让用户选择在内存中何处创建对象， 在类型对象上调用工厂方法可以达到这一点。 如果我们想保证所有的对象都来自具体的对象池或者其他的内存分配器时也有用。

能改变类型吗?

到目前为止，我们假设一旦对象创建并绑定到类型对象上，这永远不会改变。 对象创建时的类型就是它销毁时的类型。这其实没有必要。 我们*可以*允许对象随着时间改变它的类型。

让我们回想下我们的例子。 当怪物死去时，设计者告诉我们，有时它的尸体会复活成僵尸。 我们可以通过在怪物死亡时产生僵尸类型的新怪兽，但另一个选项是拿到现有的怪物，然后将它的品种改为僵尸。

- **如果类型不改变：**
  - *编码和理解都更容易。* 在概念上，大多数人不期望“类型”会改变。这符合大多数人的理解。
  - *更容易查找漏洞。* 如果我们试图追踪怪物进入奇怪状态时的漏洞，*现在*看到的品种就是怪物始终保持的品种可以大大简化工作。
- **如果类型可以改变：**
  - *需要创建的对象更少。* 在我们的例子中，如果类型不能改变，我们需要消耗CPU循环创建新的僵尸怪物对象， 把原先对象中需要保留的属性都拷贝过来，然后删除它。 如果我们可以改变类型，所有的工作都被一个简单的声明取代。
  - *我们需要小心地做约束。* 在对象和它的类型间有强耦合是很自然的事情。 举个例子，一个品种也许假设怪物*当前的*血量永远高于品种中的初始血量。

    如果我们允许品种改变，我们需要确保已存对象满足新品种的需求。 当我们改变类型时，我们也许需要执行一些验证代码保证对象现在的状态对新类型是有意义的。

它支持何种继承?

- **没有继承:**
  - *简单。* 最简单的通常是最好的。如果你在类型对象间没有大量数据共享，为什么要为难自己呢?
  - *这会带来重复的工作。* 我从未见过看到哪个编码系统中设计者不想要继承的。 当你有十五种不同的精灵时，协调血量就要修改十五处同样的数字真是糟透了。
- **单继承:**
  - *还是相对简单。* 它易于实现，但是，更重要的是，也易于理解。如果非技术用户正在使用这个系统，要操作的部分越少越好。 这就是很多编程语言只支持单继承的原因。这看起来是能力和简洁之间的平衡点。
  - *查询属性更慢。* 为了在类型对象中获取一块数据，我们也许需要回溯继承链寻找是哪一个类型最终决定了值。 在性能攸关的代码上，我们也许不想花时间在这上面。
- **多重继承:**
  - *可以避免绝大多数代码重复。* 使用优良的多继承系统，用户可以为类型对象建立几乎没有冗余的层次。 改变数值时，我们可以避免很多复制和粘贴。
  - *复杂。* 不幸的是，它的好处更多的是理论上的而非实际上的。多重继承很难理解。

    如果僵尸龙继承僵尸和龙，哪些属性来自僵尸，哪些来自于龙? 为了使用系统，用户需要理解如何继承图的遍历，还需要有设计优秀层次的远见。

    我看到的大多数C++编码标准趋向于禁止多重继承，Java和C#完全移除了它。 这承认了一个悲伤的事实：它太难掌握了，最好根本不要用。 尽管值得考虑，但你很少想要在类型对象上实现多重继承。就像往常一样，简单的总是最好的。

参见

- 这个模式处理的高层问题是在多个对象间分享数据和行为。 另一个用另一种方式解决了相同问题的模式是原型模式。

- 类型对象是享元模式的近亲。 两者都让你在实例间分享代码。使用享元，意图是节约内存，而分享的数据也许不代表任何概念上对象的“类型”。 使用类型对象模式，焦点在组织性和灵活性。

- 这个模式和状态模式有很多相似之处。 两者都委托对象的部分定义给另外一个对象。 通过类型对象，我们通常委托*是什么*：不变的数据概括描述对象。 通过状态，我们委托*现在是什么*：暂时描述对象当前状态的数据。

  当我们讨论对象改变它的类型时，你可以将其认为类型对象起到了和状态相似的职责。

解耦模式

游戏设计模式

一旦你掌握了编程语言，编写想要写的东西就会变得相当容易。 困难的是编写适应需求*变化*的代码，在我们用文本编辑器开火之前，通常没有完美的特性表供我们使用。

能让我们更好适应变化的工具是*解耦*。 当我们说两块代码“解耦”时，是指修改一块代码一般不会需要修改另一块代码。 当我们修改游戏中的特性时，需要修改的代码越少，就越容易。

组件模式将一个实体拆成多个，解耦不同的领域。 事件序列解耦了两个互相通信的事物，稳定而且*及时*。 服务定位器让代码使用服务而无需绑定到提供服务的代码。

模式

- 组件模式
- 事件序列
- 服务定位器

组件模式

游戏设计模式Decoupling Patterns

意图

允许单一的实体跨越多个领域而不会导致这些领域彼此耦合。

动机

让我们假设我们正构建平台跳跃游戏。 意大利水管工已经有人做了，因此我们将出动丹麦面包师，Bj?rn。 照理说，会有一个类来表示友好的糕点厨师，包含他在比赛中做的一切。

像这样的游戏创意导致了我是程序员而不是设计师。

由于玩家控制他，这意味着需要读取控制器的输入然后转化为动作。 而且，当然，他需要与关卡相互作用，所以要引入物理和碰撞。 一旦这样做了，他必须在屏幕上出现，所以要引入动画和渲染。 他可能还会播放一些声音。

等一下，这在失控。软件体系结构101课程告诉我们，程序的不同领域应保持分离。 如果我们做一个文字处理器，处理打印的代码不应该受加载和保存文件的代码影响。 游戏和企业应用程序的领域不尽相同，但该规则仍然适用。

我们希望AI，物理，渲染，声音和其他领域域尽可能相互不了解， 但现在我们将所有这一切挤在一个类中。 我们已经看到了这条路通往何处：5000行的巨大代码文件，哪怕是你们团队中最勇敢的程序员也不敢打开。

这工作对能驯服他的少数人是有趣的，但对其他人是地狱。 这么大的类意味着，即使是看似微不足道的变化亦可有深远的影响。 很快，为类添加*错误*的速度明显快于添加*功能*的速度。

快刀斩乱麻

比起单纯的规模问题，更糟糕的是耦合。 在游戏中所有不同的系统被绑成了一个巨大的代码球：

```
if (collidingWithFloor() && (getRenderState() != INVISIBLE))
{
  playSound(HIT_FLOOR);
}
```

任何试图改变上面代码的程序员，都需要物理，图形和声音的相关知识，以确保没破坏什么。

这样的耦合在*任何*游戏中出现都是个问题，但是在使用并发的现代游戏中尤其糟糕。 在多核硬件上，让代码同时在多个线程上运行是至关重要的。 将游戏分割到线程的一种通用方法是通过领域划分——在一个核上运行AI代码，在另一个上播放声音，在第三个上渲染，等等。

一旦你这么做了，在领域间保持解耦就是至关重要的，这是为了避免死锁或者其他恶魔般的并发问题。 如果某个函数从一个线程上调用`UpdateSounds()`方法，从另一个线程上调用`RenderGraphics()`方法，那它是在自找麻烦。

这两个问题互相混合;这个类涉及太多的域，每个程序员都得接触它， 但它又太过巨大，这就变成了一场噩梦。 如果变得够糟糕，程序员会黑入代码库的其他部分，仅仅为了躲开这个像毛球一样的`Bjorn`类。

快刀斩乱麻

我们可以像亚历山大大帝一样解决这个问题——快刀斩乱麻。 按领域将`Bjorn`类切片成相互独立的部分。 例如，我们抽出所有处理用户输入的代码，将其移动到一个单独的`InputComponent`类。 `Bjorn`拥有这个部件的一个实例。我们将对`Bjorn`接触的每个领域重复这一过程。

当完成后，我们将`Bjorn`大多数的东西都抽走了。 剩下的是一个薄壳包着所有的组件。 通过将类划分为多个小类，我们已经解决了这个问题。但我们完成了远远不止这些。

宽松的结果

我们的组件类现在解耦了。 尽管`Bjorn`有`PhysicsComponent`和`GraphicsComponent`， 但这两部分都不知道对方的存在。 这意味着处理物理的人可以修改组件而不需要了解图形，反之亦然。

在实践中，这些部件需要在它们之间有*一些*相互作用。 例如，AI组件可能需要告诉物理组件Bj?rn试图去哪里。 然而，我们可以限制这种交互在*确实*需要交互的组件之间， 而不是把它们围在同一个围栏里。

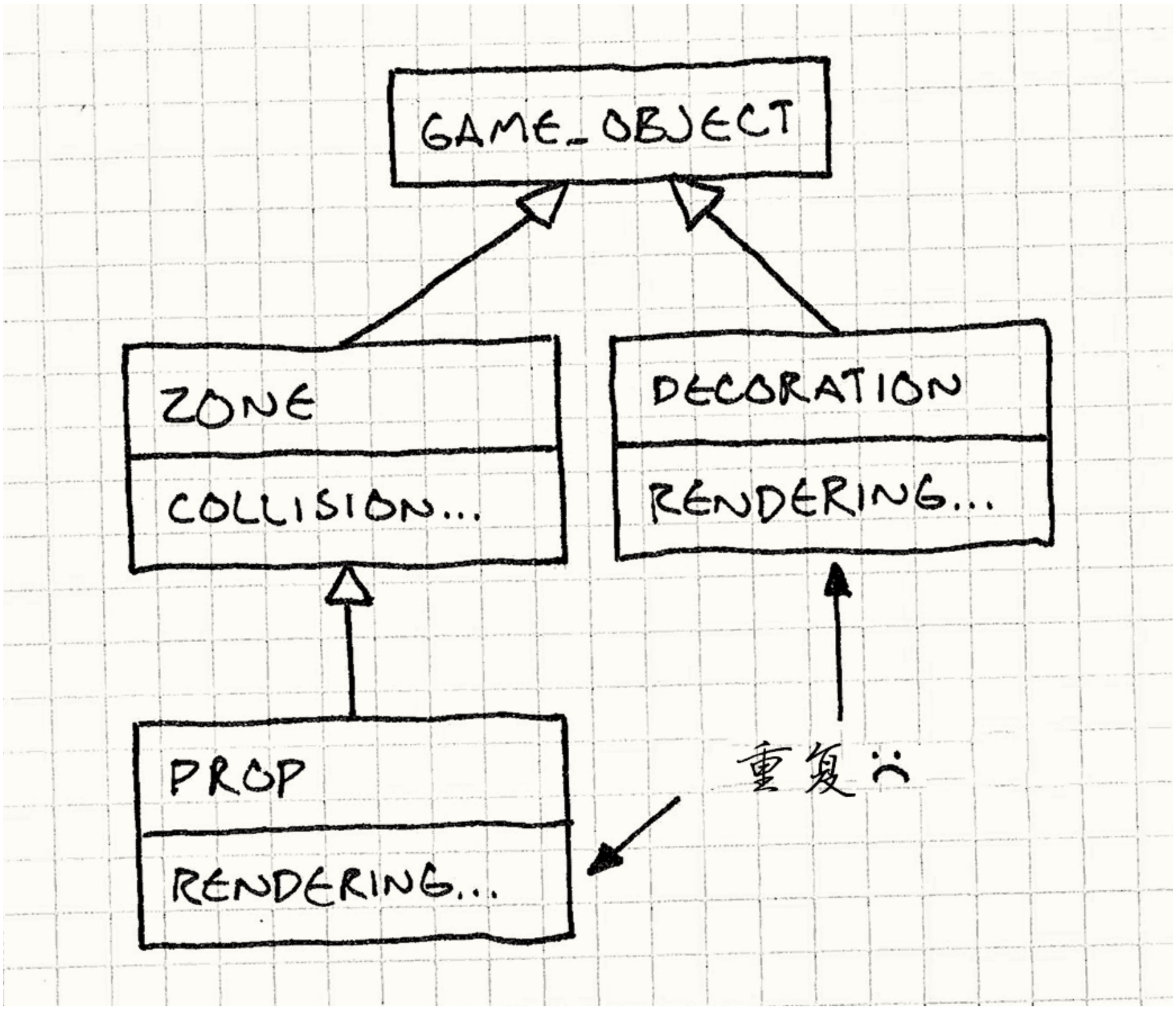
绑到一起

这种设计的另一特性是，组件现在是可复用的包。 到目前为止，我们专注于面包师，但是让我们考虑几个游戏世界中其他类型的对象。 *装饰* 是玩家看到但不能交互的事物：灌木，杂物等视觉细节。 *道具* 像*装饰*，但可以交互：箱，巨石，树木。 *区域* 与装饰相反——无形但可互动。 它们是很好的触发器，比如在Bj?rn进入区域时触发过场动画。

当面向对象语言第一次接触这个场景时，继承是它箱子里最闪耀的工具。 它被认为是代码无限重用之锤，编程者常常挥舞着它。 然而我们痛苦地学到，事实上它是一把重锤。 继承有它的用处，但对简单的代码重用太过复杂。

相反，在今日软件设计的趋势是尽可能使用组件代替继承。 不是让两个类*继承*同一类来分享代码，而是让它们*拥有同一个类的实例*。

现在，考虑如果不用组件，我们将如何建立这些类的继承层次。第一遍可能是这样的：


GAME_OBJECT
ZONE
COLLISION...
DECORATION
RENDERING...
PROP
RENDERING...
重复:(

我们有`GameObject`基类，包含位置和方向之类的通用部分。 `Zone`继承它，增加了碰撞检测。 同样，`Decoration`继承`GameObject`，并增加了渲染。 `Prop`继承`Zone`，因此它可以重用碰撞代码。 然而，`Prop`不能*同时*继承`Decoration`来重用*渲染*， 否则就会造成致命菱形结构。

“致命菱形”发生在类继承了多个类，而这多个类中有两个继承同一基类时。 介绍它造成的痛苦超过了本书的范围，但它被称为“致命”是有原因的。

我们可以反过来让`Prop`继承`Decoration`，但随后不得不重复*碰撞检测*代码。 无论哪种方式，没有干净的方式重用碰撞和渲染代码而不诉诸多重继承。 唯一的其他选择是一切都继承`GameObject`， 但随后`Zone`会浪费内存在并不需要的渲染数据上， `Decoration`在物理效果上有同样的浪费。

现在，让我们尝试用组件。子类将彻底消失。 取而代之的是一个`GameObject`类和两个组件类：`PhysicsComponent`和`GraphicsComponent`。 装饰是个简单的`GameObject`，包含`GraphicsComponent`但没有`PhysicsComponent`。 区域与其恰好相反，而道具包含两种组件。 没有代码重复，没有多重继承，只有三个类，而不是四个。

可以拿饭店菜单打比方。如果每个实体是一个类，那就只能订套餐。 我们需要为每种*可能*的组合定义各自的类。 为了满足每位用户，我们需要十几种套餐。

组件是照单点菜——每位顾客都可以选他们想要的，菜单记录可选的菜式。

对对象而言，组件是即插即用的。 将不同的可重用部件插入对象，我们就能构建复杂具有丰富的行为实体。 就像软件中的战神金刚。

模式

单一实体跨越了多个领域。为了保持领域之间相互分离，将每部分代码放入**各自的组件类**中。 *实体被简化为组件的容器*。

“组件”，就像“对象”，在编程中意味任何东西也不意味任何东西。 正因如此，它被用来描述一些概念。 在商业软件中，“组件”设计模式描述通过网络解耦的服务。

我试图从游戏中找到无关这个设计模式的另一个名字，但“组件”看来是最常用的术语。 由于设计模式是关于记录已存的实践，我没有创建新术语的余地。 所以，跟着XNA，Delta3D和其他人的脚步，我称之为“组件”。

何时使用

组件通常在定义游戏实体的核心部分中使用，但它们在其他地方也有用。 这个模式在如下情况中可以使用：

- 有一个涉及了多个领域的类，而你想保持这些领域互相隔离。
- 一个类正在变大而且越来越难以使用。
- 想要能定义一系列分享不同能力的类，但是使用继承无法让你精确选取要重用的部分。

记住

组件模式比简单地向类中添加代码增加了一点点复杂性。 每个概念上的“对象”要组成真正对象需要实例化，初始化，然后正确的连接。 不同组件间沟通会有些困难，而控制它们如何使用内存就更加复杂。

对于大型代码库，为了解耦和重用而付出这样的复杂度是值得的。 但是在使用这种模式之前，保证你没有为了不存在的问题而“过度设计”。

使用组件的另一后果是，需要多一层跳转才能做要做的事。 拿到容器对象，获得相应的组件，*然后* 你才能做想做的事情。 在性能攸关的内部循环中，这种跳转也许会导致糟糕的性能。

这是硬币的两面。组件模式通常可以*增进*性能和缓存一致性。 组件让使用数据局部性模式的CPU更容易地组织数据。

示例代码

我写这本书的最大挑战之一就是搞明白如何隔离各个模式。 许多设计模式包含了不属于这种模式的代码。 为了将提取模式的本质，我尽可能的消减代码， 但是在某种程度上，这就像没有衣服还要说明如何整理衣柜。

说明组件模式尤其困难。 如果看不到它解耦的各个领域的代码，你就不能获得正确的体会， 因此我会多写一些有关于Bj?rn的代码。 这个模式事实上只关于将组件变为类，但类中的代码可以帮助表明类是做什么用的。 它是伪代码——它调用了其他不存在的类——但这应该可以让你理解我们正在做什么。

单块类

为了清晰的看到这个模式是如何应用的， 我们先展示一个`Bjorn`类， 它包含了所有我们需要的事物，但是*没有*使用这个模式：

我应指出在代码使用角色的名字总是个坏主意。市场部有在发售之前改名字的坏习惯。“焦点测试表明，在11岁到15岁的男性不喜欢‘Bj?rn’，请改为‘Sven&rsquo”。

这就是为什么很多软件项目使用内部代码名。 而且比起告诉人们你在完成“Photoshop的下一版本”，告诉他们你在完成“大电猫”更有趣。

```
class Bjorn
{
public:
  Bjorn()
  : velocity_(0),
    x_(0), y_(0)
  {}

  void update(World& world, Graphics& graphics);

private:
  static const int WALK_ACCELERATION = 1;

  int velocity_;
  int x_, y_;

  Volume volume_;

  Sprite spriteStand_;
  Sprite spriteWalkLeft_;
  Sprite spriteWalkRight_;
};
```

`Bjorn`有个每帧调用的`update()`方法。

```
void Bjorn::update(World& world, Graphics& graphics)
{
  // 根据用户输入修改英雄的速度
  switch (Controller::getJoystickDirection())
  {
    case DIR_LEFT:
      velocity_ -= WALK_ACCELERATION;
      break;

    case DIR_RIGHT:
      velocity_ += WALK_ACCELERATION;
      break;
  }

  // 根据速度修改位置
  x_ += velocity_;
  world.resolveCollision(volume_, x_, y_, velocity_);

  // 绘制合适的图形
  Sprite* sprite = &spriteStand_;
  if (velocity_ < 0)
  {
    sprite = &spriteWalkLeft_;
  }
  else if (velocity_ > 0)
  {
    sprite = &spriteWalkRight_;
  }

  graphics.draw(*sprite, x_, y_);
}
```

它读取操纵杆以确定如何加速面包师。 然后，用物理引擎解析新位置。 最后，将Bj?rn渲染至屏幕。

这里的示例实现平凡而简单。 没有重力，动画，或任何让人物有趣的其他细节。 即便如此，我们可以看到，已经出现了同时消耗多个程序员时间的函数，而它开始变得有点混乱。想象增加到一千行，你就知道这会有多难受了。

分离领域

从一个领域开始，将`Bjorn`的代码去除一部分，归入分离的组件类。 我们从首个执行的领域开始：输入。 `Bjorn`做的头件事就是读取玩家的输入，然后基于此调整它的速度。 让我们将这部分逻辑移入一个分离的类：

```
class InputComponent
{
public:
  void update(Bjorn& bjorn)
  {
    switch (Controller::getJoystickDirection())
    {
      case DIR_LEFT:
        bjorn.velocity -= WALK_ACCELERATION;
        break;

      case DIR_RIGHT:
        bjorn.velocity += WALK_ACCELERATION;
        break;
    }
  }

private:
  static const int WALK_ACCELERATION = 1;
};
```

很简单吧。我们将`Bjorn`的`update()`的第一部分取出，放入这个类中。 对`Bjorn`的改变也很直接：

```
class Bjorn
{
public:
  int velocity;
  int x, y;

  void update(World& world, Graphics& graphics)
  {
    input_.update(*this);

    // 根据速度修改位置
    x += velocity;
    world.resolveCollision(volume_, x, y, velocity);

    // 绘制合适的图形
    Sprite* sprite = &spriteStand_;
    if (velocity < 0)
    {
      sprite = &spriteWalkLeft_;
    }
    else if (velocity > 0)
    {
      sprite = &spriteWalkRight_;
    }

    graphics.draw(*sprite, x, y);
  }

private:
  InputComponent input_;

  Volume volume_;

  Sprite spriteStand_;
  Sprite spriteWalkLeft_;
  Sprite spriteWalkRight_;
};
```

`Bjorn`现在拥有了一个`InputComponent`对象。 之前它在`update()`方法中直接处理用户输入，现在委托给组件：

```
input_.update(*this);
```

我们才刚开始，但已经摆脱了一些耦合——`Bjorn`主体现在已经与`Controller`无关了。这会派上用场的。

将剩下的分割出来

现在让我们对物理和图像代码继续这种剪切粘贴的工作。 这是我们新的`PhysicsComponent`：

```
class PhysicsComponent
{
public:
  void update(Bjorn& bjorn, World& world)
  {
    bjorn.x += bjorn.velocity;
    world.resolveCollision(volume_,
        bjorn.x, bjorn.y, bjorn.velocity);
  }

private:
  Volume volume_;
};
```

为了将物理*行为*移出`Bjorn`类，你可以看到我们也移出了*数据*：`Volume`对象已经是组件的一部分了。

最后，这是现在的渲染代码：

```
class GraphicsComponent
{
public:
  void update(Bjorn& bjorn, Graphics& graphics)
  {
    Sprite* sprite = &spriteStand_;
    if (bjorn.velocity < 0)
    {
      sprite = &spriteWalkLeft_;
    }
    else if (bjorn.velocity > 0)
    {
      sprite = &spriteWalkRight_;
    }

    graphics.draw(*sprite, bjorn.x, bjorn.y);
  }

private:
  Sprite spriteStand_;
  Sprite spriteWalkLeft_;
  Sprite spriteWalkRight_;
};
```

我们几乎将所有的东西都移出来了，所以面包师还剩下什么？没什么了：

```
class Bjorn
{
public:
  int velocity;
  int x, y;

  void update(World& world, Graphics& graphics)
  {
    input_.update(*this);
    physics_.update(*this, world);
    graphics_.update(*this, graphics);
  }

private:
  InputComponent input_;
  PhysicsComponent physics_;
  GraphicsComponent graphics_;
};
```

`Bjorn`类现在基本上就做两件事：拥有定义它的组件，以及在不同域间分享的数据。 有两个原因导致位置和速度仍然在`Bjorn`的核心类中： 首先，它们是“泛领域”状态——几乎每个组件都需要使用它们， 所以我们想要提取它出来时，哪个组件*应该*拥有它们并不明确。

第二，也是更重要的一点，它给了我们无需让组件耦合就能沟通的简易方法。 让我们看看能不能利用这一点。

机器人Bj?rn

到目前为止，我们将行为归入了不同的组件类，但还没将行为*抽象*出来。 `Bjorn`仍知道每个类的具体定义的行为。让我们改变这一点。

取出处理输入的部件，将其藏在接口之后，将`InputComponent`变为抽象基类。

```
class InputComponent
{
public:
  virtual ~InputComponent() {}
  virtual void update(Bjorn& bjorn) = 0;
};
```

然后，将现有的处理输入的代码取出，放进一个实现接口的类中。

```
class PlayerInputComponent : public InputComponent
{
public:
  virtual void update(Bjorn& bjorn)
  {
    switch (Controller::getJoystickDirection())
    {
      case DIR_LEFT:
        bjorn.velocity -= WALK_ACCELERATION;
        break;

      case DIR_RIGHT:
        bjorn.velocity += WALK_ACCELERATION;
        break;
    }
  }

private:
  static const int WALK_ACCELERATION = 1;
};
```

我们将`Bjorn`改为只拥有一个指向输入组件的指针，而不是拥有一个内联的实例。

```
class Bjorn
{
public:
  int velocity;
  int x, y;

  Bjorn(InputComponent* input)
  : input_(input)
  {}

  void update(World& world, Graphics& graphics)
  {
    input_->update(*this);
    physics_.update(*this, world);
    graphics_.update(*this, graphics);
  }

private:
  InputComponent* input_;
  PhysicsComponent physics_;
  GraphicsComponent graphics_;
};
```

现在当我们实例化`Bjorn`，我们可以传入输入组件使用，就像下面这样：

```
Bjorn* bjorn = new Bjorn(new PlayerInputComponent());
```

这个实例可以是任何实现了抽象`InputComponent`接口的类型。 我们为此付出了代价——`update()`现在是虚方法调用了，这会慢一些。这一代价的回报是什么?

大多数的主机需要游戏支持“演示模式”。 如果玩家停在主菜单没有做任何事情，游戏就会自动开始运行，直到接入一个玩家。 这让屏幕上的主菜单看上去更有生机，同时也是销售商店里很好的展示。

隐藏在输入组件后的类帮我们实现了这点， 我们已经有了具体的`PlayerInputComponent`供在玩游戏时使用。 现在让我们完成另一个：

```
class DemoInputComponent : public InputComponent
{
public:
  virtual void update(Bjorn& bjorn)
  {
    // 自动控制Bjorn的AI……
  }
};
```

当游戏进入演示模式，不像之前演示的那样构造Bj?rn， 我们将它和一个新组件连接起来：

```
Bjorn* bjorn = new Bjorn(new DemoInputComponent());
```

现在，只需要更改组件，我们就有了为演示模式而设计的电脑控制的玩家。 我们可以重用所有Bj?rn的代码——物理和图像都不知道这里有了变化。 也许我有些奇怪，但这就是每天能让我从起床的事物。

那个，还有咖啡。热气腾腾的咖啡。

删掉Bj?rn?

如果你看看现在的`Bj?rn`类，你会意识到那里完全没有“Bj?rn”——那只是个组件包。 事实上，它是个好候选人，能够作为*每个*游戏中的对象都能继承的“游戏对象”基类。 我们可以像弗兰肯斯坦一样，通过挑选拼装部件构建任何对象。

让我们将剩下的两个具体组件——物理和图像——像输入那样藏到接口之后。

```
class PhysicsComponent
{
public:
  virtual ~PhysicsComponent() {}
  virtual void update(GameObject& obj, World& world) = 0;
};

class GraphicsComponent
{
public:
  virtual ~GraphicsComponent() {}
  virtual void update(GameObject& obj, Graphics& graphics) = 0;
};
```

然后将`Bj?rn`改为使用这些接口的通用`GameObject`类。

```
class GameObject
{
public:
  int velocity;
  int x, y;

  GameObject(InputComponent* input,
             PhysicsComponent* physics,
             GraphicsComponent* graphics)
  : input_(input),
    physics_(physics),
    graphics_(graphics)
  {}

  void update(World& world, Graphics& graphics)
  {
    input_->update(*this);
    physics_->update(*this, world);
    graphics_->update(*this, graphics);
  }

private:
  InputComponent* input_;
  PhysicsComponent* physics_;
  GraphicsComponent* graphics_;
};
```

有些人走的更远。 不使用包含组件的`GameObject`，游戏实体只是一个ID，一个数字。 每个组件都知道它们连接的实体ID，然后管理分离的组件。

这些实体组件系统将组件发挥到了极致，让你向实体添加组件而无需通知实体。 数据局部性一章有更多细节。

我们现有的具体类被重命名并实现这些接口：

```
class BjornPhysicsComponent : public PhysicsComponent
{
public:
  virtual void update(GameObject& obj, World& world)
  {
    // 物理代码……
  }
};

class BjornGraphicsComponent : public GraphicsComponent
{
public:
  virtual void update(GameObject& obj, Graphics& graphics)
  {
    // 图形代码……
  }
};
```

现在我们无需为Bj?rn建立具体类，就能构建拥有所有Bj?rn行为的对象。

```
GameObject* createBjorn()
{
  return new GameObject(new PlayerInputComponent(),
                        new BjornPhysicsComponent(),
                        new BjornGraphicsComponent());
}
```

这个`createBjorn()`函数是，当然，经典GoF工厂模式的例子。

通过用不同组件实例化`GameObject`，我们可以构建游戏需要的任何对象。

设计决策

这章中你最需要回答的设计问题是“我需要什么样的组件？”回答取决于你游戏的需求和风格。 引擎越大越复杂，你就想将组件划分得更细。

除此之外，还有几个更具体的选项要回答：

对象如何获取组件?

一旦将单块对象分割为多个分离的组件，就需要决定谁将它们拼到一起。

- **如果对象创建组件：**
  - *这保证了对象总是能拿到需要的组件。* 你永远不必担心某人忘记连接正确的组件然后破坏了整个游戏。容器类自己会处理这个问题。
  - *重新设置对象比较困难。* 这个模式的强力特性之一就是只需重新组合组件就可以创建新的对象。 如果对象总是用硬编码的组件组装自己，我们就无法利用这个特性。
- **如果外部代码提供组件：**
  - *对象更加灵活。* 我们可以提供不同的组件，这样就能改变对象的行为。 通过共用组件，对象变成了组件容器，我们可以为不同目的一遍又一遍重用它。
  - *对象可以与具体的组件类型解耦。* 如果我们允许外部代码提供组件，好处是也可以传递*派生*的组件类型。 这样，对象只知道组件*接口*而不知道组件的具体类型。这是一个很好的封装结构。

组件之间如何通信?

完美解耦的组件不需要考虑这个问题，但在真正的实践中行不通。 事实上组件属于*同*一对象暗示它们属于需要相互协同的更大整体的一部分。 这就意味着通信。

所以组件如何相互通信呢？ 这里有很多选项，但不像这本书中其他的“选项”，它们相互并不冲突——你可以在一个设计中支持多种方案。

- *通过修改容器对象的状态：*

  - *这保持组件解耦。* 当我们的`InputComponent`设置了Bj?rn的速度，而后`PhysicsComponent`使用它， 这两个组件都不知道对方的存在。在它们的理解中，Bj?rn的速度是被黑魔法改变的。

  - *需要将组件分享的任何数据存储在容器类中。* 通常状态只在几个组件间共享。比如，动画组件和渲染组件需要共享图形专用的信息。 将信息存入容器类会让*所有*组件都获得这样的信息。

    更糟的是，如果我们为不同组件配置使用相同的容器类，最终会浪费内存存储不被*任何*对象组件需要的状态。 如果我们将渲染专用的数据放入容器对象中，任何隐形对象都会无益的消耗内存。

  - *这让组件的通信基于组件运行的顺序。* 在同样的代码中，原先一整块的`update()`代码小心地排列这些操作。 玩家的输入修改了速度，速度被物理代码使用并修改位置，位置被渲染代码使用将Bj?rn绘到该有的地方。 当我们将这些代码划入组件时，还是得小心翼翼的保持这种操作顺序。

    如果我们不那么做，就引入了 微妙而难以追踪的漏洞。 比如，我们*先*更新图形组件，就错误地将Bj?rn渲染在他*上一帧*而不是这一帧所处的位置上。 如果你考虑更多的组件和更多的代码，那你可以想象要避免这样的错误有多么困难了。

    大量这样共享状态的代码很难正确完成读写的相同数据。 这就是为什么学术界花时间研究完全函数式语言，比如Haskell，那里根本没有可变状态。

- *通过它们之间相互引用：*

  这里的思路是组件有要交流的组件的引用，这样它们直接交流，无需通过容器类。

  假设我们想让Bj?rn跳跃。图形代码想知道它需要用跳跃图像还是不用。 这可以通过询问物理引擎它当前是否在地上来确定。一种简单的方式是图形组件直接知道物理组件的存在：

```
class BjornGraphicsComponent
{
public:
  BjornGraphicsComponent(BjornPhysicsComponent* physics)
  : physics_(physics)
  {}

  void Update(GameObject& obj, Graphics& graphics)
  {
    Sprite* sprite;
    if (!physics_->isOnGround())
    {
      sprite = &spriteJump_;
    }
    else
    {
      // 现存的图形代码……
    }

    graphics.draw(*sprite, obj.x, obj.y);
  }

private:
  BjornPhysicsComponent* physics_;

  Sprite spriteStand_;
  Sprite spriteWalkLeft_;
  Sprite spriteWalkRight_;
  Sprite spriteJump_;
};
```

当构建Bj?rn的`GraphicsComponent`时，我们给它相应的`PhysicsComponent`引用。

- *简单快捷。* 通信是一个对象到另一个的直接方法调用。组件可以调用任一引用对象的方法。做什么都可以。

    - *两个组件紧绑在一起。* 这是什么都可以的坏处。我们向使用整块类又退回了一步。 这比只用单一类好一点，至少我们现在只是把需要通信的类绑在一起。

- *通过发送消息：*

    - 这是最复杂的选项。我们可以在容器类中建小小的消息系统，允许组件相互发送消息。

      下面是一种可能的实现。我们从每个组件都会实现的`Component`接口开始：

```
class Component
{
public:
  virtual ~Component() {}
  virtual void receive(int message) = 0;
};
```

它有一个简单的`receive()`方法，每个需要接受消息的组件类都要实现它。 这里，我们使用一个`int`来定义消息，但更完整的消息实现应该可以附加数据。

然后，向容器类添加发送消息的方法。

```
class ContainerObject
{
public:
  void send(int message)
  {
    for (int i = 0; i < MAX_COMPONENTS; i++)
    {
      if (components_[i] != NULL)
      {
        components_[i]->receive(message);
      }
    }
  }

private:
  static const int MAX_COMPONENTS = 10;
  Component* components_[MAX_COMPONENTS];
};
```

现在，如果组件能够接触容器，它就能向容器发送消息，直接向所有的组件广播。（包括了原先发送消息的组件，小心别陷入消息的无限循环中！）这会造成一些结果：

如果你真的乐意，甚至可以将消息存储在*队列*中，晚些发送。 要知道更多，看看事件队列。

- *同级组件解耦。* 通过父级容器对象，就像共享状态的方案一样，我们保证了组件之间仍然是解耦的。 使用了这套系统，组件之间唯一的耦合是它们发送的消息。

  GoF称之为中介模式——两个或更多的对象通过中介对象通信。 现在这种情况下，容器对象本身就是中介。

- *容器类很简单。* 不像使用共享状态那样，容器类无需知道组件使用了什么数据，它只是将消息发送出去。 这可以让组件发送领域特有的数据而无需打扰容器对象。

不出意料的，这里没有最好的答案。这些方法你最终可能都会使用一些。 共享状态对于每个对象都有的数据是很好用的——比如位置和大小。

有些不同领域仍然紧密相关。想想动画和渲染，输入和AI，或物理和粒子。 如果你有这样一对分离的组件，你会发现直接相互引用也许更加容易。

消息对于“不那么重要”的通信很有用。 发送后不管的特性对物理组件发现事物碰撞后发送消息，让音乐组件播放声音这种事情是很有效的。

就像以前一样，我建议你从简单的开始，然后如果需要的话，加入其他的通信路径。

See Also

参见

- Unity核心架构中`GameObject`类完全根据这样的原则设计components。
- 开源的Delta3D引擎有`GameActor`基类通过`ActorComponent`实现了这种模式。
- 微软的XNA游戏框架有一个核心的`Game`类。它拥有一系列`GameComponent`对象。我们在游戏实体层使用组件，XNA在游戏主对象上实现了这种模式，但意图是一样的。

- 这种模式与GoF的策略模式类似。 两种模式都是将对象的行为取出，划入单独的重述对象。 与对象模式不同的是，分离的策略模式通常是无状态的——它封装了算法，而没有数据。 它定义了对象*如何*行动，但没有定义对象*是*什么。

  组件更加重要。它们经常保存了对象的状态，这有助于确定其真正的身份。 但是，这条界限很模糊。有一些组件也许根本没有任何状态。 在这种情况下，你可以在不同的容器对象中使用相同的组件*实例*。这样看来，它的行为确实更像一种策略。