电子信息 · Ei精品

嘉立创
官方出品

从设计到量产
电子工程师PCB智造实战指南

◆ 晏性平　万 佳　莫志宏　何艳球　等 编著

中国工信出版集团　電子工業出版社

从设计到量产 电子工程师PCB智造实战指南
電子工業出版社

从设计到量产
电子工程师PCB
智造实战指南

晏性平　万　佳　莫志宏　何艳球　王新宇
郭永明　韩文才　黄　洁　吴洪彬　洪　婷　编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

这是一本专为硬件工程师、科研人员和创新企业量身打造的 PCB 专业实用指南。本书为工程师和企业提供了系统的 PCB 制造知识体系，有助于优化产品开发流程，提升产品可制造性，降低试错成本，加速创新产品的市场落地，实现 “设计制造零距离”。

本书内容丰富、深入浅出，从 PCB 设计软件入门开始，逐步讲解 PCB 制造的各环节，包括基材选择、钻孔工艺、线路设计、字符标识、外形层设计及特殊 PCB 类型（如柔性电路板）的工艺流程，并提供大量实际案例、图示及生产实践，配备了丰富的练习题，帮助读者有效巩固知识，将理论学习迅速转化为实操能力，全面解决设计和生产全流程中的短板问题。

本书可以用作企业内训参考用书，同时可以作为电子信息类专科、本科学生教学用书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

从设计到量产 ： 电子工程师 PCB 智造实战指南 / 晏性平等编著 . -- 北京 ： 电子工业出版社 , 2025. 4.
ISBN 978-7-121-50102-9

Ⅰ . TN410.2

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025CJ6335 号

责任编辑：曲　昕　　特约编辑：夏平飞
印　　刷：
装　　订：
出版发行：电子工业出版社
　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编　100036
开　　本：787×1092　1/16　印张：20.25　字数：486 千字
版　　次：2025 年 4 月第 1 版
印　　次：2025 年 4 月第 1 次印刷
定　　价：79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：（010）88254468，quxin@phei.com.cn。

前　言
Preface

PCB 被誉为“电子产品之母”，是硬件产品研发和生产的关键一环，从智能手机到飞机火箭，都能找到它的身影，广泛应用于消费电子、工业控制、通信医疗和航空航天等领域。随着 AI、新能源汽车、物联网、智能家居和可穿戴设备等产品需求的持续增长，PCB 行业整体发展趋势向好。据印制电路板行业权威咨询机构 Prismark 预测，到 2028 年，全球 PCB 行业产值将达到 904.13 亿美元，2023 年至 2028 年复合增长率约为 5.4%。

2006 年中国大陆的 PCB 产值超过日本，成为全球第一大 PCB 制造基地。在这一年，嘉立创公司诞生于深圳。经过近 20 年的发展，嘉立创从一家小型 PCB 企业成长为行业领先的电子及机械产业一站式基础设施服务提供商，服务全球超 180 个国家和地区的 600 多万用户。

在此过程中，嘉立创积淀了深厚的专业知识，更见证了中国科技创新的蓬勃发展。然而，在科技创新中，部分中小企业、科研机构的工程技术人员对 PCB 制造工艺缺少了解，导致设计出来的 PCB 问题频发，不仅影响产品研发进度，增加成本，一定程度上会导致创新步伐减缓，竞争力受挫。

鉴于此，嘉立创召集了公司内多位资深专家，投入大量时间和精力进行资料整理，编写了本书。希望本书的出版，可以帮助中小企业、科研机构的工程技术人员更快、更全面地了解 PCB 的制造过程和设计注意事项，实现“设计制造零距离”，从而提升硬件研发和产品生产的效率。

本书共 13 章，全面系统地介绍了 PCB 制造工艺和相关内容，从 PCB 设计软件入手，逐步深入 PCB 制造的每个关键环节，力求以翔实的数据和丰富的案例，配备图、表、视频多种资源，帮助读者更直观地了解 PCB 制造。

本书由多位嘉立创公司的资深领域专家撰写，确保了内容的准确性和实用性。其中，第 1、11 章由莫志宏编写，第 2 ～ 9 章由晏性平编写，第 10 章由何艳球编写，第 12 章由郭永明编写，第 13 章由王新宇编写，万佳、韩文才、黄洁、吴洪彬、洪婷参与全书统稿工作。

在此，谨向所有对本书编写给予大力支持和付出辛勤努力的同仁们表示深深的感谢。特别感谢贺定球、陈世周、修斌、黎钦伟、刘玉琼、姚棉生等，他们在撰写过程中提供的支持和指导，是本书顺利出版的坚实保障。

由于水平和精力有限，在本书的编写过程中难免出现疏漏和不足之处，敬请指正。

编著者

2025 年 4 月

目 录

contents

第 1 章　PCB 常用软件 …… 1

1.1　PCB 设计软件 …… 2

1.1.1　嘉立创 EDA …… 2

1.1.2　Altium Designer …… 6

1.1.3　PADS …… 10

1.2　PCB 制造软件 …… 14

1.2.1　Gerby …… 16

1.2.2　嘉立创 DFM …… 18

1.2.3　嘉立创 CAM …… 20

第 2 章　PCB 基板材料 …… 21

2.1　PCB 基材的选择与注意事项 …… 22

2.1.1　基材类别选择 …… 22

2.1.2　基材的选择 …… 22

2.2　常见 PCB 基材类型 …… 25

2.2.1　基材分类 …… 25

2.2.2　覆铜板的分类 …… 26

2.2.3　覆铜板的品种和规格 …… 28

2.3　PCB 基材的几项关键特性 …… 29

2.3.1　耐热性 …… 29

2.3.2　电气性能 …… 32

2.3.3　机械性能 …… 34

第 3 章　PCB 生产工艺流程与参数 …… 38

3.1　嘉立创 PCB 生产工艺流程 …… 38

3.1.1　单面 PCB 生产工艺流程 …… 38

3.1.2　双面 PCB 生产工艺流程 …… 39

3.1.3　4 层 PCB 生产工艺流程 …… 40

3.1.4　6 层及以上 PCB 生产工艺流程 …… 41

3.2 生产流程简介 …… 41
3.3 嘉立创 PCB 工艺参数 …… 52
第 4 章 PCB 钻孔设计与制造 …… 61
4.1 PCB 钻孔工艺概述 …… 61
4.2 钻孔分类 …… 62
4.2.1 金属化孔与非金属化孔设计与制造 …… 62
4.2.2 过孔与插件孔 …… 65
4.2.3 压接孔 …… 67
4.3 钻孔内、外径尺寸 …… 68
4.3.1 圆形钻孔设计 …… 68
4.3.2 槽形钻孔设计 …… 74
4.3.3 半孔设计要点与注意事项 …… 79
4.3.4 沉头孔、背钻和盲槽工艺 …… 82
4.3.5 孔径公差与应用 …… 84
4.4 PCB 正、负片工艺 …… 85
4.4.1 正、负片工艺加工流程 …… 86
4.4.2 正、负片工艺的品质隐患 …… 87
4.4.3 坏孔 …… 89
4.5 钻孔品质控制与检测 …… 90
4.5.1 导通性检测 …… 90
4.5.2 孔径检测 …… 91
4.5.3 钻孔内部镀层结构检测 …… 92
练习题 …… 93
参考答案 …… 97
第 5 章 PCB 线路设计与制造 …… 98
5.1 PCB 线路工艺概述 …… 98
5.2 线路设计要点及注意事项 …… 99
5.2.1 线宽、线距的设计与制造 …… 99
5.2.2 铺铜设计注意事项 …… 106
5.3 铺铜不均的品质隐患 …… 109
5.3.1 铺铜不均对线路制造的影响 …… 109
5.3.2 铺铜不均对多层板层压的影响 …… 111
5.3.3 铺铜不均对阻焊油墨的影响 …… 113

5.4 线路的品质控制与检测 …… 114
5.4.1 线路尺寸与精度的验收标准 …… 114
5.4.2 线路的检测 …… 117
练习题 …… 118
参考答案 …… 122
第 6 章 PCB 阻焊设计与制造 …… 123
6.1 PCB 阻焊工序概述 …… 123
6.1.1 阻焊的设计层次与生产工序 …… 123
6.1.2 阻焊生产的关键设备 …… 123
6.2 阻焊设计 …… 124
6.2.1 阻焊开窗与覆盖区域 …… 124
6.2.2 阻焊层与锡膏层 …… 126
6.2.3 阻焊扩展值的参数设置 …… 126
6.3 阻焊桥 …… 129
6.3.1 阻焊桥的定义与作用 …… 129
6.3.2 影响阻焊桥实现的条件 …… 129
6.4 四种阻焊覆盖方式 …… 130
6.4.1 过孔盖油 …… 130
6.4.2 过孔开窗 …… 131
6.4.3 过孔塞油 …… 132
6.4.4 过孔塞树脂 / 铜浆 + 电镀盖帽 …… 134
6.4.5 工艺选择与成本平衡 …… 136
6.5 阻焊的品质控制与检验 …… 137
6.5.1 阻焊油墨的外观检验 …… 137
6.5.2 附着力检测 …… 137
练习题 …… 137
参考答案 …… 140
第 7 章 PCB 字符标识设计与制造 …… 141
7.1 字符标识（丝印）工艺概述 …… 141
7.1.1 字符生产关键设备的时代变迁 …… 141
7.1.2 网板印刷与自动喷印的优缺点 …… 142
7.2 字符设计要点及注意事项 …… 143
7.2.1 字符标识可制造性设计 …… 143

7.2.2 字符个性化设计与选择 …… 147
7.3 字符的品质控制与检测 …… 151
7.3.1 字符清晰度和可读性检测 …… 151
7.3.2 字符附着力检测 …… 151
练习题 …… 151
参考答案 …… 153
第 8 章 PCB 外形设计与制造 …… 154
8.1 外形工艺概述 …… 154
8.2 外形设计注意事项 …… 155
8.2.1 外形层设计 …… 155
8.2.2 外形尺寸设计 …… 157
8.2.3 外形公差 …… 158
8.3 外形拼板 …… 159
8.3.1 单板出货 …… 159
8.3.2 V 割拼板出货 …… 159
8.3.3 邮票孔拼板出货 …… 162
8.3.4 拼板的其他注意事项 …… 163
8.3.5 PCB 斜边工艺 …… 165
8.4 外形的品质控制与检测 …… 166
8.5 PCB 的平整度 …… 167
8.5.1 平整度对 PCB 的影响 …… 167
8.5.2 如何预防和改善 PCB 平整度 …… 167
8.5.3 平整度的评估 …… 168
练习题 …… 170
参考答案 …… 178
第 9 章 PCB 表面处理的选择 …… 179
9.1 表面处理类型与应用 …… 179
9.1.1 喷锡工艺 …… 179
9.1.2 沉金工艺 …… 181
9.1.3 OSP …… 181
9.2 表面处理工艺选择的注意事项 …… 183
9.2.1 高密度元器件 PCB 表面处理的选择 …… 183
9.2.2 特殊类型 PCB 表面处理的选择 …… 183

9.3 表面处理的控制与检测 …… 186
9.3.1 外观检查 …… 186
9.3.2 可焊性检测 …… 187
练习题 …… 188
参考答案 …… 188
第 10 章 FPC …… 189
10.1 FPC 基础知识 …… 189
10.1.1 FPC 板分类 …… 189
10.1.2 软板材料介绍 …… 191
10.1.3 硬板材料 …… 197
10.1.4 FPC 优缺点 …… 198
10.2 FPC 生产流程 …… 198
10.2.1 单面板生产流程 …… 198
10.2.2 双面板生产流程 …… 199
10.2.3 多层板生产流程 …… 199
10.2.4 特殊多层板 …… 200
10.3 FPC 生产流程详解 …… 202
10.4 FPC 设计注意事项 …… 209
10.4.1 钻孔设计 …… 210
10.4.2 线路设计 …… 210
10.4.3 阻焊设计 …… 211
10.4.4 文字设计 …… 212
10.4.5 辅料设计 …… 212
10.4.6 外形设计 …… 214
10.4.7 拼板设计 …… 215
第 11 章 嘉立创 EDA 快速入门 …… 217
11.1 嘉立创 EDA 设计入门 …… 217
11.1.1 开发环境介绍 …… 217
11.1.2 新建元件 …… 218
11.1.3 原理图设计 …… 223
11.1.4 电路 PCB 设计 …… 227
11.2 嘉立创 EDA 特色功能 …… 232
11.2.1 FPC 软板设计 …… 232

11.2.2 彩色丝印设计 …… 235
11.2.3 3D 外壳设计 …… 238
11.2.4 面板设计 …… 242
第 12 章 嘉立创 DFM …… 245
12.1 嘉立创 DFM 软件简介 …… 245
12.2 DFM 快速入门 …… 245
12.2.1 安装客户端 …… 245
12.2.2 打开文件 …… 246
12.2.3 PCB 分析 …… 247
12.2.4 SMT 分析 …… 248
12.2.5 导出分析报告 …… 250
12.3 DFM 主要功能及操作流程 …… 252
12.3.1 DFM 检测之 PCB …… 252
12.3.2 DFM 检测之 SMT …… 255
12.3.3 DFM 分析结果查看 …… 258
12.3.4 DFM 自定义检测规则 …… 259
12.4 常见 DFM 问题识别及解决方法 …… 260
12.4.1 为什么报错“有多个 PCB 源文件或 Gerber 文件” …… 260
12.4.2 钻孔与线路层没有对齐 …… 261
12.4.3 为什么元件明明在板内却报告与板框相交 …… 262
第 13 章 嘉立创 CAM …… 264
13.1 嘉立创 CAM 软件介绍与下载安装 …… 264
13.1.1 引言 …… 264
13.1.2 软件的主要功能 …… 265
13.1.3 软件的运行环境 …… 266
13.2 初次使用流程和异常情况处理 …… 267
13.2.1 软件启动 …… 267
13.2.2 注册与登录（个人版） …… 267
13.2.3 主界面概览 …… 267
13.2.4 导入资料示例 …… 268
13.2.5 异常情况处理 …… 270
13.3 软件界面详解 …… 271
13.3.1 导入 Gerber 资料界面详解 …… 271

13.3.2 资料包的结构详解 …… 271
13.3.3 资料编辑界面详解 …… 273
13.3.4 导出资料界面详解 …… 276
13.4 主要命令详解 …… 276
13.4.1 资料整理之层命名 …… 276
13.4.2 资料整理之层属性与层类型 …… 278
13.4.3 资料整理之层极性 …… 278
13.4.4 资料整理之资料格式 …… 279
13.4.5 资料整理之层对齐 …… 280
13.4.6 资料整理之虚拟外形 …… 281
13.4.7 资料整理之 Step 归零 …… 281
13.4.8 资料整理之外形裁剪 …… 282
13.4.9 层相关命令集 …… 283
13.4.10 跨层移动 …… 283
13.4.11 跨层复制（复制层） …… 284
13.4.12 Step 相关命令集 …… 285
13.4.13 还原文件名 …… 285
13.4.14 资料编辑之选择命令 …… 286
13.4.15 资料编辑之同层移动 …… 287
13.4.16 资料编辑之同层复制 …… 289
13.4.17 资料编辑之元素添加 …… 289
13.4.18 资料编辑之元素胀缩 …… 291
13.4.19 资料编辑之元素修改 …… 292
13.4.20 资料编辑之正片去负 …… 293
13.4.21 矩阵变换 …… 293
13.4.22 提取轮廓线 …… 293
13.4.23 填充轮廓线 …… 294
13.4.24 连续线偏移 …… 295
13.4.25 连续线移动（保持角度） …… 295
13.4.26 网格填充 …… 296
13.4.27 线角转换与桥接 …… 296
13.4.28 测量工具 …… 298
13.4.29 保存 PDF 文件 …… 299

13.4.30 手动拼板 …… 299
13.4.31 拼板命令之 Repeat 选择 …… 300
13.4.32 拼板命令之 Repeat 编辑 …… 301
13.4.33 拼板命令之锚点设置 …… 302
13.4.34 半自动拼板 …… 302
13.4.35 添加工艺边 …… 302
13.4.36 拼板命令之 Repeat 对齐 …… 303
13.4.37 邮票孔添加 …… 303
13.5 使用场景和技巧 …… 305
13.5.1 修改钻孔孔径 …… 305
13.5.2 删除丝印和添加丝印 …… 305
13.5.3 旋转拼板 …… 306
附录 A 嘉立创 CAM 专业术语 …… 309
参考文献 …… 312

第 1 章 / PCB 常用软件

印制电路板（Printed Circuit Board，PCB）是电子元器件的支撑体，也是电子元器件电气连接的载体。由于采用电子印刷术制作，因此也被称为印刷电路板。PCB 样式图如图 1-1 所示。

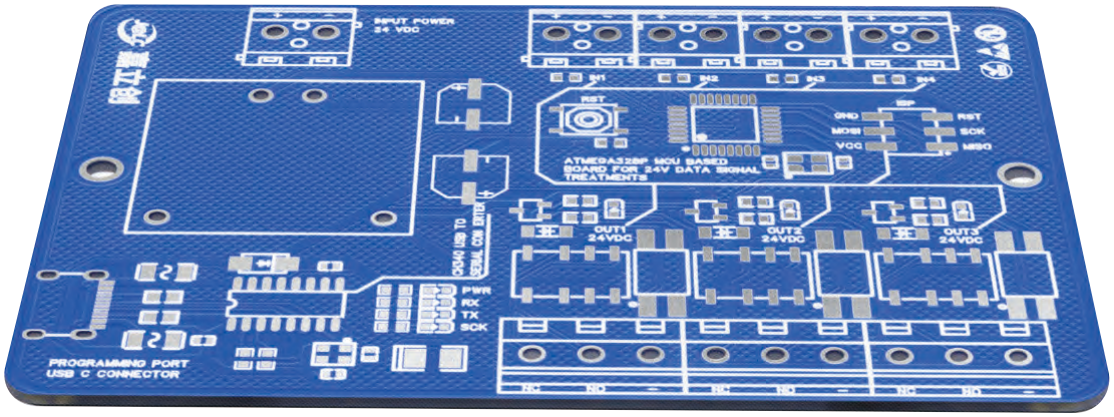


图 1-1　PCB 样式图

PCBA（Printed Circuit Board Assembly）是指依据设计方案将各类电子元器件通过插装、表面贴装、微组装等方式装焊在 PCB 上，实现装配和电气连通的制造过程。

随着信息化社会的快速发展，市场对 PCB 的需求日益增长，而 PCB 设计与生产环节的进步离不开各类软件的支持。PCB 设计与生产过程中涉及的软件主要分为以下几类。

- PCB 设计软件：用于电路原理图与 PCB 的设计，以及生产制造所需的数据文件。
- PCB 仿真软件：用于对电路性能的分析与验证，并进行信号完整性分析和阻抗计算。
- PCB 制造软件：主要用于将 PCB 设计软件提供的文件转换成生产所需的制造文件。

使用快速且高效的电路设计软件在设计生产中具有极其重要的意义。它能大大提高电路设计的效率和精度，减少人工绘图的误差和时间消耗，确保设计方案能够准确无误地转化为实际产品，保证生产的准确性和一致性，提升整体工作质量和效率。总之，电路设计软件是现代电子电路生产中不可或缺的关键工具，对推动电子行业的发展起到了至关重要的作用。

1.1 PCB 设计软件

PCB 设计软件是电子工程师用来设计印制电路板的重要工具。这类软件通常提供元件库设计、原理图设计、PCB 布局布线等常用功能。为了帮助开发者提高设计效率，PCB 设计软件一般还会包含元件库管理、2D/3D 预览及开放 API 接口，便于企业工程技术人员开发更多提升设计及生产效率的插件。

随着工业化进程的发展，行业内出现了众多优秀的 PCB 设计软件，比如国产免费的嘉立创 EDA，以及国外的 Altium Designer、PADS、Allegro 等软件。常用 PCB 设计软件如图 1-2 所示。下面介绍几款设计软件的特点以及在 PCB 生产中的注意事项。

图 1-2　常用 PCB 设计软件

1.1.1　嘉立创 EDA

嘉立创 EDA 是一款功能强大且易于使用的电子设计自动化工具，由中国人自主研发，具有完全知识产权。软件支持元件库设计与管理、原理图设计、PCB 布局布线、FPC 软板设计、面板设计、3D 外壳设计等多项功能，为用户提供了一站式的电路设计解决方案，适合电子工程师、科研人员以及电子爱好者等广泛用户群体使用。

嘉立创 EDA 软件发展历程如图 1-3 所示。嘉立创 EDA 软件自 2010 年起开始研发，在嘉立创集团的支持下得到了快速发展。2020 年推出的嘉立创 EDA 专业版，为广大电子研发型企业提供了一款免费好用的国产 PCB 设计软件，打破了 PCB 软件被国外企业垄断的局面。

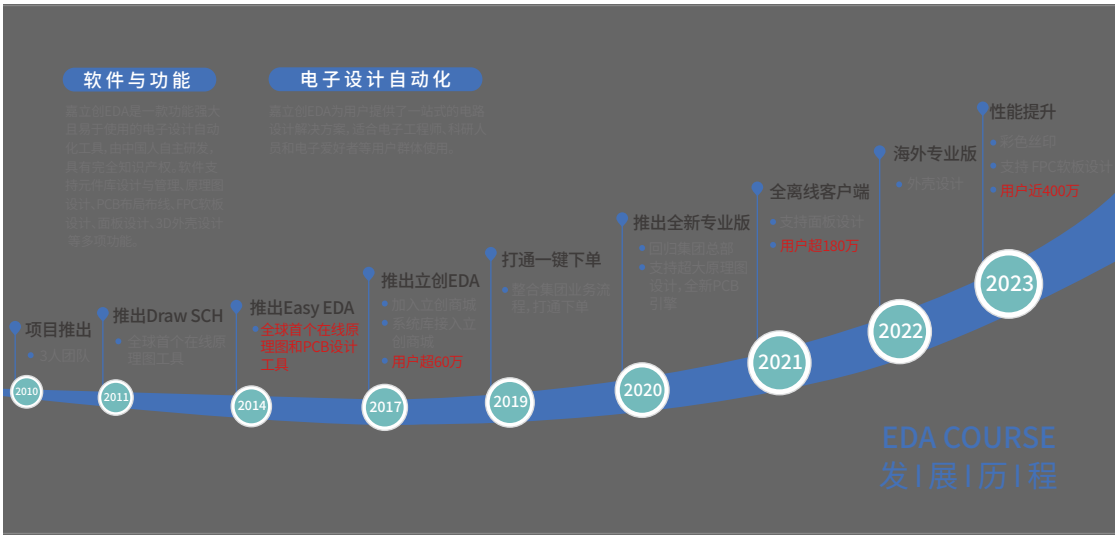


图 1-3　嘉立创 EDA 软件发展历程

1. 软件特点

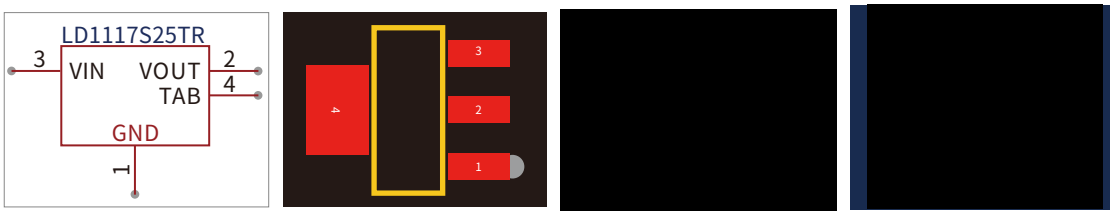
1）永久免费，拥有强大的设计功能

嘉立创 EDA 秉承着永久免费的原则，旨在让更多的电子工程师用上更好用、更合适的 EDA 设计软件。截至 2024 年 6 月末，嘉立创 EDA 集成超过百万个免费封装库，全球累计注册用户已突破 448 万人，设计硬件项目 3056 多万个，得到了广大电子工程师、高校老师以及电子爱好者的认可。

嘉立创 EDA 不仅满足电子工程师常规设计所需的符号封装库、原理图以及 PCB 三大设计功能，还支持 FPC 软板设计、面板设计以及 3D 外壳设计等特色功能。

2）免费元件库，专业技术支持团队

元件库是设计的基础，一个元器件在 PCB 设计时包含符号与封装两个要素，此外还需要实物图与 3D 模型进行 3D 预览辅助结构外壳的设计，如图 1-4 所示。嘉立创 EDA 作为一款云端设计软件，官方团队充分利用在线设计的优势，安排专人对元器件符号、封装与 3D 模型进行设计，帮助开发者实现在线元器件选型与设计功能，所见即所得，简化了元件库管理，减少了由元件库引起的设计错误。



符号　　封装　　实物图　　3D模型

图 1-4　元件库四要素

嘉立创 EDA 还提供免费元件库迁移服务，由技术支持团队协助企业进行元件库迁移，并可根据数据手册协助新建元件库符号封装，如图 1-5 所示。扫描图 1-5 中二维码可申请免费库绘制。

图 1-5　申请绘制库页面

3）私有部署版本，保障企业数据安全

嘉立创 EDA 提供线上浏览器版本、本地客户端版本以及专门为企业打造的私有部署版本。私有部署版本是为中国企业提供的高效且安全的私有化云端板级 EDA 解决方案，可将嘉立创 EDA 整个系统部署在企业自有服务器上，数据与外界互联网完全隔离，保障企业数据安全可控。私有部署优势如下。

- 版权优势：具有独立自主知识产权，避免国外厂商“卡脖子”。
- 价格优势：不到同类软件十分之一的价格，提供软件部署安装与技术支持。
- 服务优势：提供专属客户经理与服务群，快速解决本地企业用户问题。
- 定制开发：支持定制化域名与 API 改造和定制化功能开发。

2. 设计注意事项

在嘉立创电子设计生产全产业链的赋能下，嘉立创 EDA 整合了立创商城的元器件选型采购以及嘉立创的 PCB 生产与 SMT 贴片业务，可以节省大量时间，快速沟通，无缝协作，让设计与生产更高效。使用嘉立创 EDA 设计文件用于生产时需了解以下注意事项。

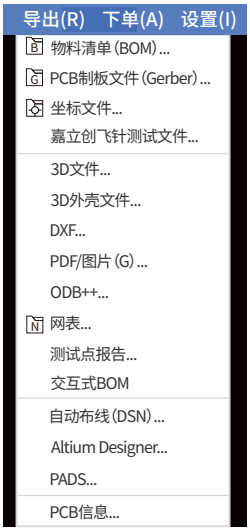


图 1-6　生产文件导出页面

1）生产文件的导出

设计好 PCB 文件后，可直接在嘉立创 EDA 软件中导出对应的生产文件，如图 1-6 所示，并可将生产文件下载在本地；也可使用一键下单功能，将生产数据上传到嘉立创平台，加快生产下单效率，如图 1-7 所示。

- PCB 生产所需文件

PCB 制板文件（Gerber）。

- SMT 贴片所需文件

PCB 制板文件（Gerber）；
物料清单（BOM）；
坐标文件（XLSX/CSV）。

- 元器件采购

物料清单（BOM）。

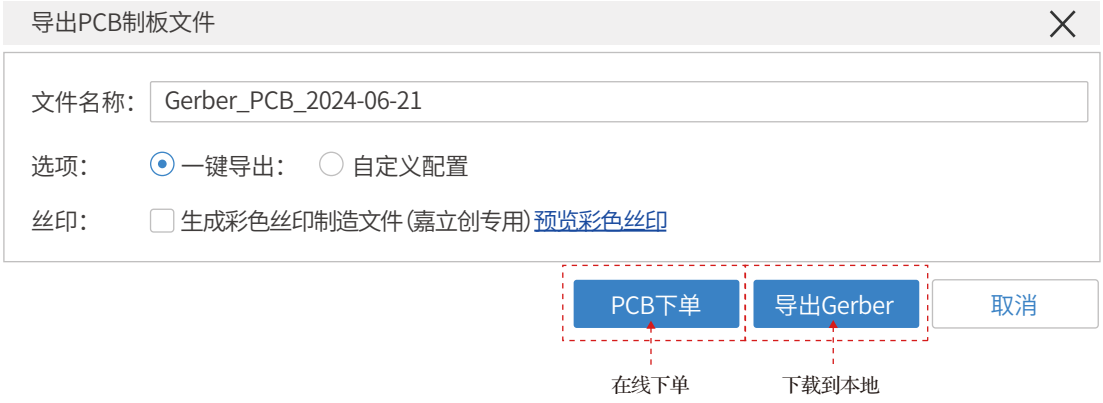


图 1-7　PCB 制板文件导出窗口

2）图片与 Logo 导入

在嘉立创 EDA 软件中导入图片或 Logo 时，需要确保图片中颜色对比清晰，最好为高清的单色位图，如图 1-8 所示。选择导入时还可以调整容差、简化、平滑与去斑等选项，对图片进行优化处理。值得注意的是，嘉立创 EDA 还支持彩色丝印设计，只需在 PCB 设置选项中勾选“使用嘉立创彩色丝印工艺”选项，在导入图片时选择全彩图片并导入至 PCB 中，即可在嘉立创平台进行彩色丝印的生产，如图 1-9 所示。

图 1-8　导入图片页面

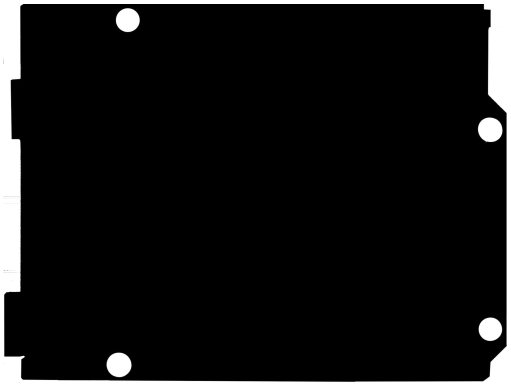


图 1-9　彩色 PCB 丝印生产样图

3）板框与槽孔

嘉立创 EDA 软件提供了板框层，在菜单栏中可以选择放置板框功能，有矩形、圆形以及多边形三种常见板框设置，能满足大部分基础板框形状的设计需求。在设计一些异形板框时，既可以使用多边形板框设计，也能选择导入外部设计好的 DXF 文件作为板框层，如图 1-10 所示。

在设计槽孔时，如果需要在 PCB 板内开槽，推荐使用放置挖槽区域功能而不是直接在板内放置一个板框作为挖槽。

图 1-10　矩形板框与异形板框图

4）导线与图片开窗

对导线进行开窗时，先按鼠标左键选择导线，然后单击鼠标右键，选择“添加”→“添加阻焊区域”即可。如果是一张顶层图片需开窗，则首先要将需开窗的图片进行框选复制，接着粘贴出一个相同的图片，然后将其中一个图片设置为顶层阻焊层，另一个为顶层，最后将不同图层的两个相同图片，使用对齐功能对齐重合，即顶层 + 顶层阻焊层，即可实现开窗效果，如图 1-11 所示。同理，可以操作文字开窗或底层开窗。

图 1-11　顶层（左）、顶层丝印层（中）、顶层 + 顶层阻焊层（右）

5）单层插件孔焊盘设置

在设计铝基板或特殊需求的场景中，需要用到插件孔时，只需保留一侧的焊盘孔，另一侧盖油时，可以在嘉立创 EDA 软件中将焊盘大小改为自定义，并将焊盘对应的阻焊大小设置为负数且绝对值大于焊盘尺寸即可，如图 1-12 中，焊盘直径为 60mil，设置顶层阻焊扩展为 2mil，底层阻焊扩展为 −1000mil，即可实现顶层有焊盘、底层没有焊盘露出且盖油的效果，如图 1-13 和图 1-14 所示。

图 1-12　焊盘属性设置

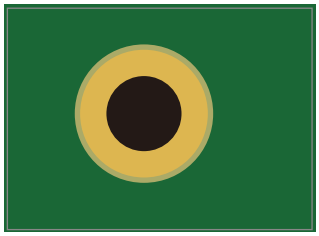


图 1-13　顶层焊盘效果

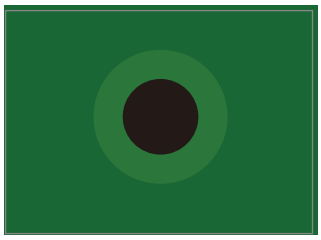


图 1-14　底层焊盘预览

更多使用技巧与注意事项可以访问嘉立创 EDA 网站联系技术支持。

1.1.2　Altium Designer

Altium Designer 是 Altium 公司推出的一体化电子产品开发系统，2024 年 2 月被日本瑞萨电子收购。该软件功能强大，应用于电子设计领域，集成了元件库管理、原理图设计、PCB 设计和仿真分析等。

1. 软件特点

Altium Designer 提供了一体化的设计环境，涵盖原理图设计、PCB 布线和仿真分析等多个环节。设计师可以在一个平台上完成整个设计流程，无须在不同软件之间切换，提高了工作效率。

在原理图设计方面，它具有丰富的元件库和便捷的绘图工具，能够快速准确地绘制出复杂的电路原理图，如图 1-15 所示。同时，它还支持层次化设计，可以将大型电路分解为多个子电路，便于管理和维护。

针对 PCB 布线，它具备智能布线引擎，能够自动优化布线路径，减少布线冲突和错误；提供了多种布线规则设置，满足不同设计要求，如线宽和间距等；支持 3D 视图，可以直观

地查看 PCB 的布局和元件安装情况。

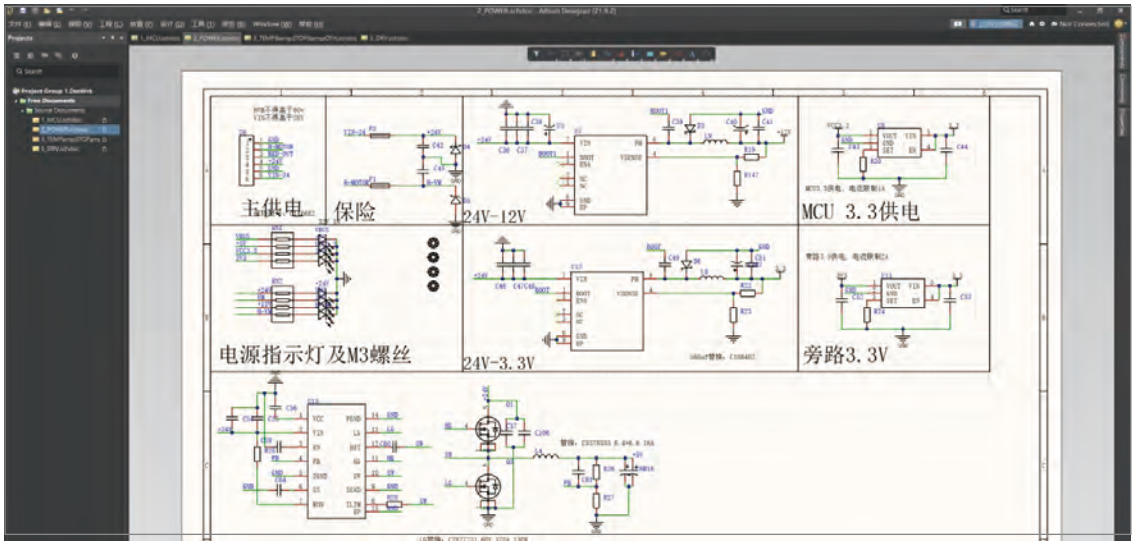


图 1-15　Altium 软件设计页面截图

2. 设计注意事项

工程设计是一项细致与严谨的工作，对于产品的需求分析、设计规范和功能验证需要多方面考虑。建议在设计前了解 PCB 制造商的制造工艺和技术要求，同时熟悉 PCB 设计软件的规则，以达到最佳设计效果。以下是使用 Altium Designer（简称 AD）进行 PCB 设计时的一些注意事项。

1）孔的设计

在使用 AD 软件放置焊盘时，如果在焊盘孔属性中没有勾选“palted”（中文版为“镀金”）（见图 1-16），会导致设计的金属化孔的孔壁无铜（见图 1-17），变成非金属化孔，造成焊盘开路问题。

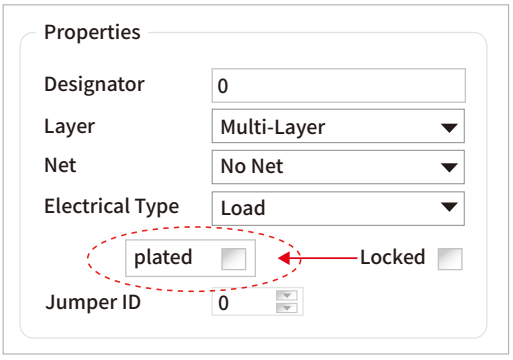


图 1-16　AD 软件孔属性设置

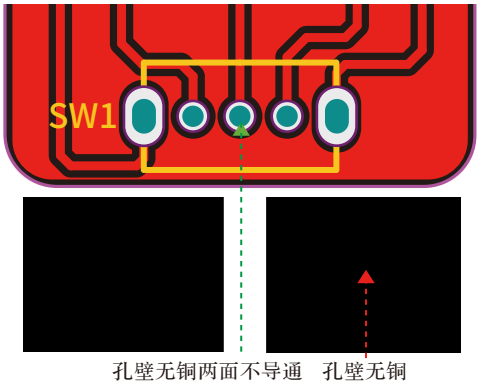


图 1-17　孔壁无铜现象示意图

如果设计文件中采用了盲埋孔设计，会导致生产时出现漏孔现象，如图 1-18 所示。

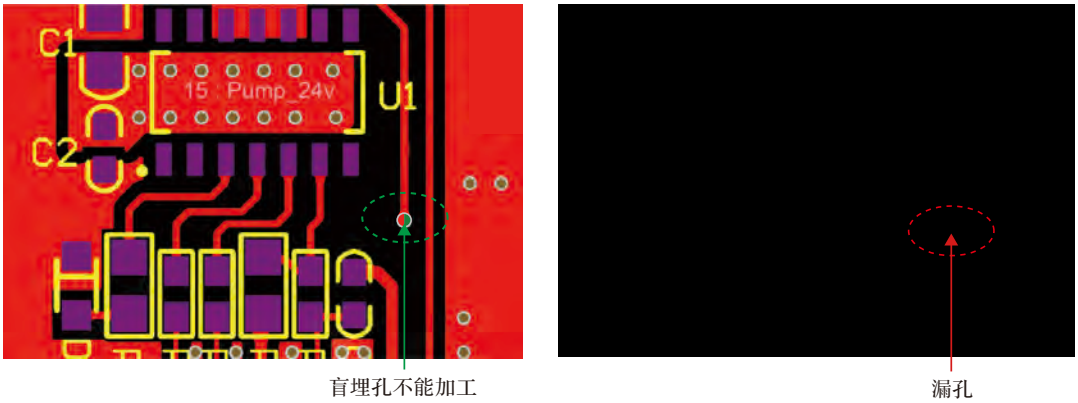


图 1-18　盲埋孔导致漏孔示意图

2）线路设计

在设计时，误把丝印层修改为线路层，会导致成品板短路，如图 1-19 所示。因此，在设计完成后务必使用软件工具进行 DRC（设计规则检查），以检查电气连接是否有短路情况。

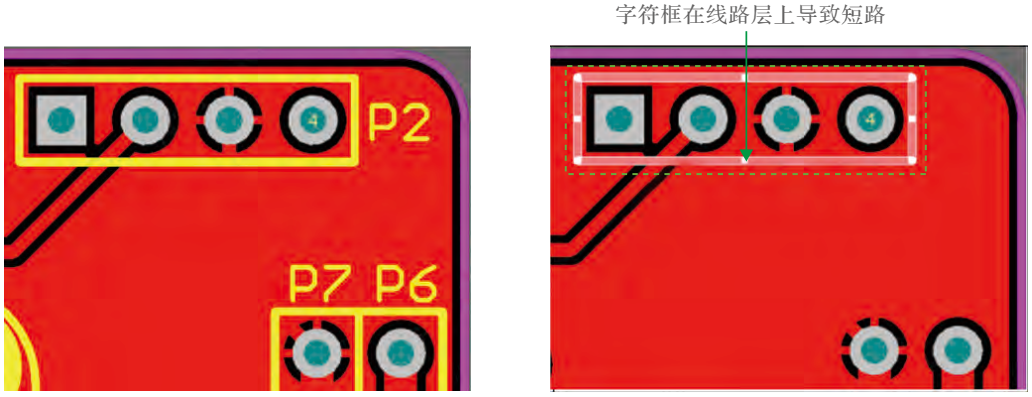


图 1-19　丝印层与线路层误用

电路中设计的细长形线头容易产生干膜丝相连短路，如图 1-20 所示。此类情况，建议删除或将其连接到另一端（确保线宽在 5mil 以上，细小缝的宽度同样在 5mil 以上）。

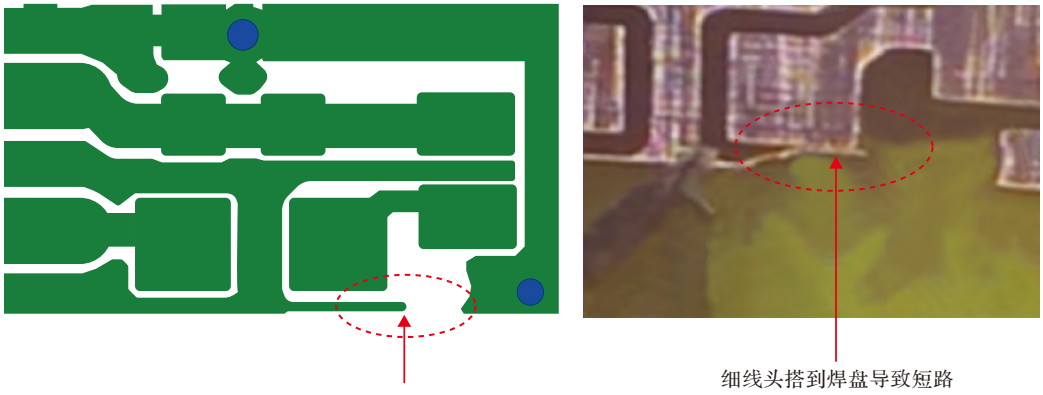


图 1-20　细长线头造成短路现象

3）阻焊设计

在焊盘属性设置时，勾选“Force...”将焊盘强制盖油，导致焊盘被阻焊油墨覆盖无法焊接，如图 1-21 所示。

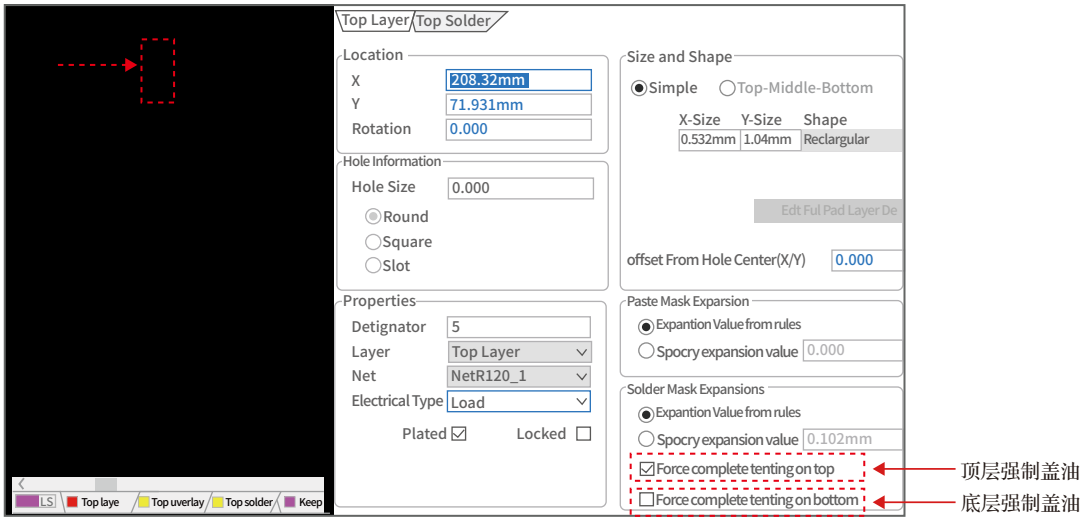


图 1-21　焊盘强制盖油设置

设计时误把元器件插件孔设计成过孔，采用 PCB 文件下单时选择“过孔盖油”，从而导致实板焊盘盖油无法焊接，如图 1-22 所示。设计电路时分清过孔与焊盘的区别，切勿混用。

图 1-22　过孔误用于焊盘图

4）字符设计

在 PCB 设计中，将字符放置在开窗的导线上。生产时，默认这些字符将被去除，如图 1-23 所示。然而，可以选择将字符放置在没有开窗的导线上。下单时，请务必仔细检查设计文件，并确认生产稿。

5）外形设计

在进行外形和槽孔设计时，必须确保外形与槽孔设计在同一层中。如果两者不在同一层，可能会导致槽孔丢失的问题，如图 1-24 所示。因此，设计时务必保持外形层的统一，确保槽孔信息不会遗漏。

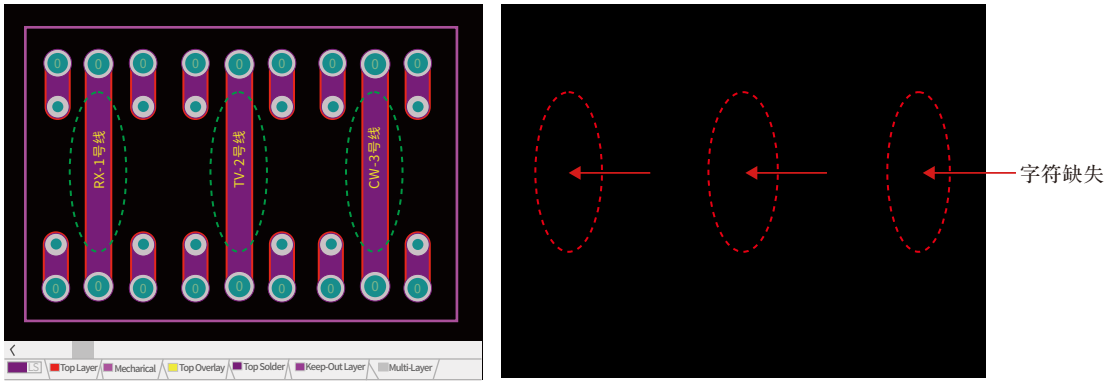


图 1-23　字符丝印放置在开窗导线上的示意图

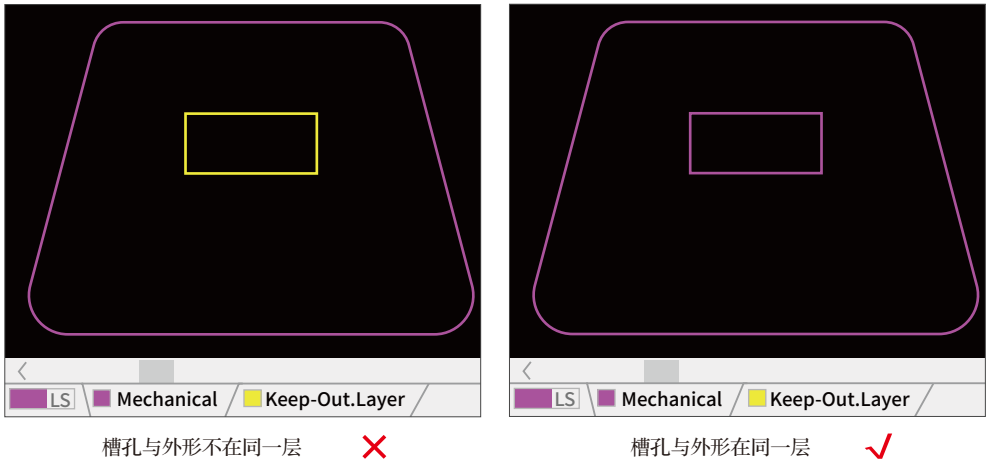


图 1-24　槽孔与外形示意图

扫描二维码可查看《小嘉扫雷：AD 设计不规范引起的常见错误点》。

1.1.3　PADS

PADS 是 MentorGraphics 旗下的一款完整的 PCB 设计平台，集成了 PCB 设计和分析技术、支持云端协作、零件研究与创建以及实时供应链洞察功能。该软件旨在为工程师提供智能的集成式协同 PCB 设计流程，满足硬件设计工程师与小型工作组的需求。

1. 软件特点

PADS 软件在原理图和 PCB 设计方面表现出色，特别是在多层 PCB（简称多层板）设计、电源、射频和信号完整性等领域具有很强的专业性。以下是 PADS 软件的一些显著特点。

- 简单易用：PADS 软件上手快，界面友好，操作便捷。
- 设计灵活：用户可以根据实际需求自由调整设计方案，满足不同的设计需求。
- 用户自由度高：工程师可以根据具体需求自由进行调整，设计自由度高。

PADS 软件在消费类电子产品设计领域占有较高的市场份额，尤其在中低端设计领域，表现出色。凭借设计灵活性和用户自由度，其在手机 PCB 设计等领域几乎占据了市场的主导地位。

在具体设计过程中，主要用到 PADS 的三个组件：PADS Logic（原理图设计软件，用于设计和编辑电路图）、PADS Layout（PCB 布局软件工具，手动操作 PCB 布局）、PADS Router（PCB 元器件布局，自动布线软件工具），如图 1-25 所示。

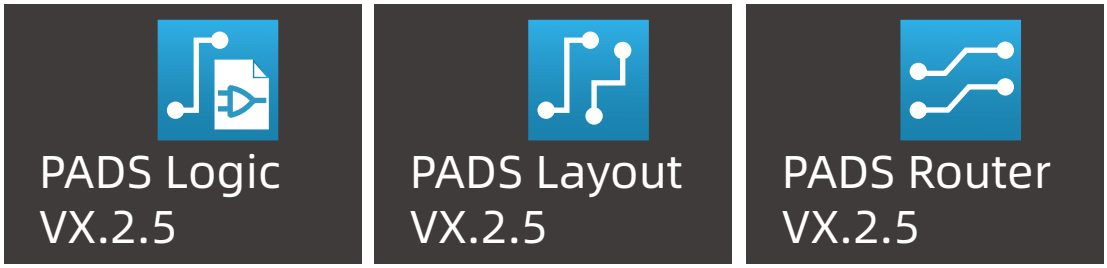


图 1-25　PADS 各组件图标

2. 设计注意事项

1）孔的设计

在 PADS 软件的设置中，如果在“层设置”的电气层勾选“支持单面板”选项，会导致设计的所有金属化孔在输出后都变成非金属化孔，从而引发铜孔开路的问题，如图 1-26 所示。

图 1-26　PADS 中层的设置窗口

在设计时，如果在“过孔”菜单中将导通过孔设计为“半导通”的盲埋孔属性，会导致这些孔无法常规输出，从而导致漏孔，进而引起开路问题，如图 1-27 所示。

2）线路设计

执行“工具”→“铺铜管理器”命令，如图 1-28 所示，PCB 制造商只会使用填充（Hatch）方式恢复铺铜，而不会使用灌注（Flood）重新铺铜。因此，在设计时需要特别留意确保不会出现短路情况。

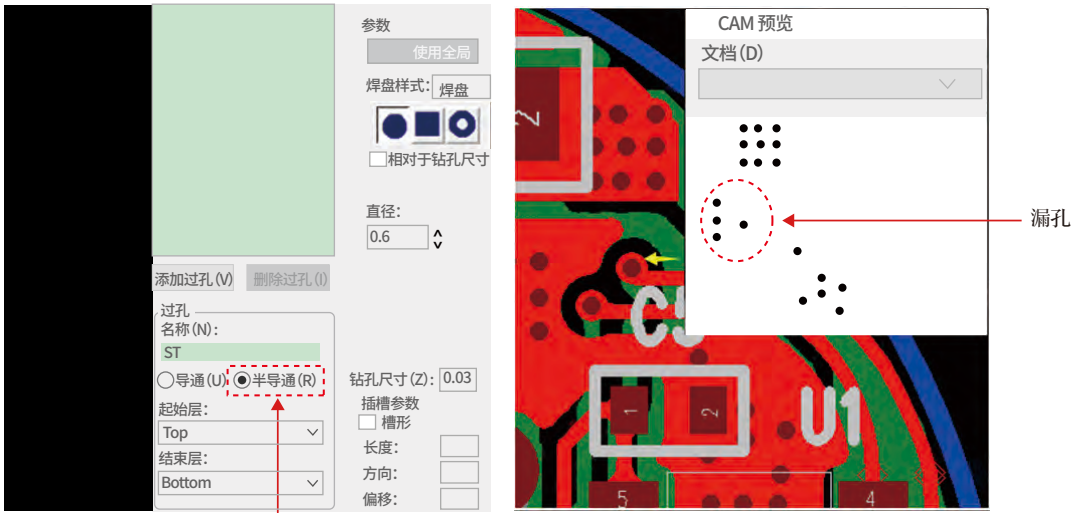


图 1-27　过孔特性设置窗口

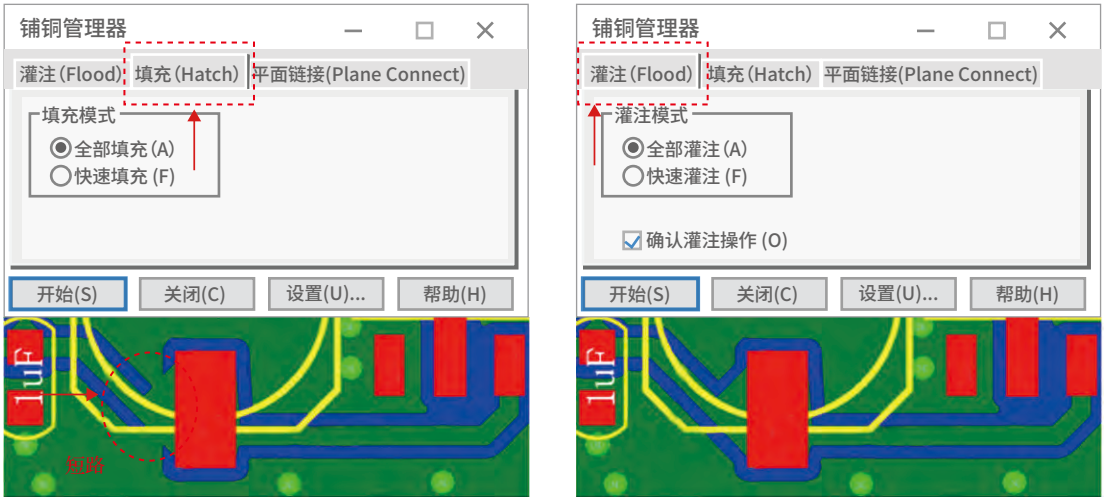


图 1-28　铺铜管理器窗口

执行“工具”→“选项”命令，如图 1-29 所示，如果选择“生成泪滴”，一定要使用填充（Hatch）方式恢复铺铜，然后打开“泪滴”进行检查，以避免出现短路情况。

3）阻焊设计

在 PADS 软件中，对于一些采用“关联”方式设计的封装（如需要让天线开窗不盖油墨），可以将其关联到一个开窗的焊盘上面，并且在封装中勾选“关联铺铜”选项（见图 1-30），输出的阻焊层才会开窗，从而让天线露铜上锡或进行沉金处理。

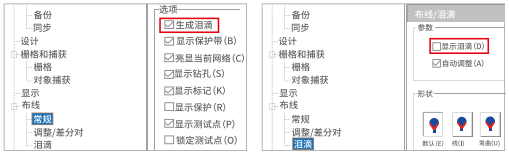
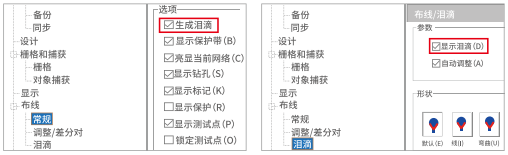
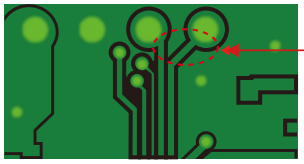
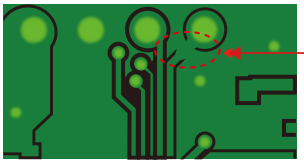
	未显示泪滴图	显示泪滴图
选项		
图示	 没有短路 图1	 实际短路 图2
描述	设计中勾选“生成泪滴”选项后，没有勾选“显示泪滴”选项，查看设计原稿，箭头指向位置没有短路现象。	设计中勾选“生成泪滴”选项后，再勾选“显示泪滴”选项，查看设计原稿，箭头指向位置泪滴与周围铜皮连接，形成短路。

图 1-29　泪滴设置

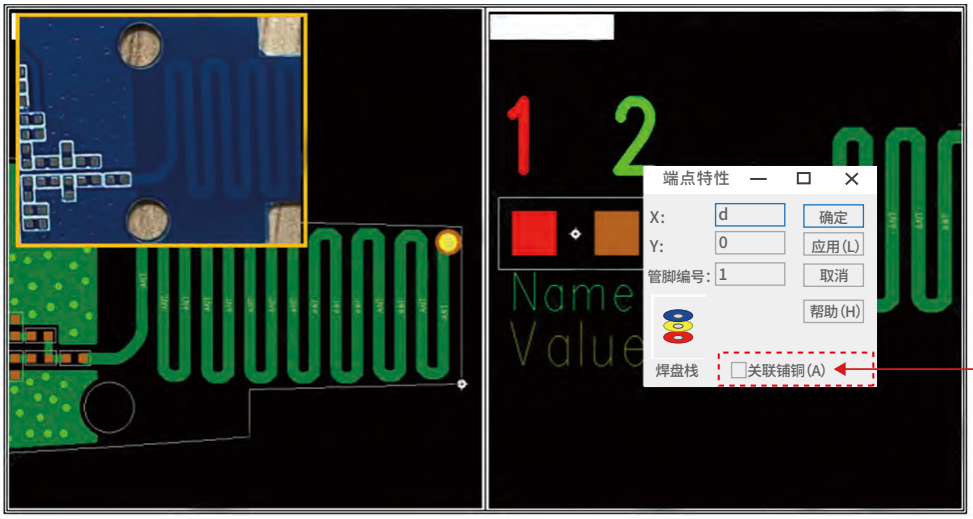


图 1-30　关联铺铜设置

4）字符设计

由于 PADS 设计的灵活性，在输出 Gerber 文件时，需要选择不同层次的元素输出。为了避免理解不同产生的分歧和错误，有以下建议，如图 1-31 所示。

- 做丝印文字：把文字设计在丝印字符层的文本栏（Silkscreen Top/Bottom）。
- 使用铜箔印刷：输出 Gerber 文件下单。

5）Gerber 导出

不管是直接使用 Gerber 文件还是 PCB 源文件提交订单，一定要在 PADS 菜单中执行“文件”→“CAM”→“添加文档”命令，重新生成正确的 D 码，然后保存提交，如图 1-32 所示。这样可以避免在输出 CAM 时预览正常但实际输出的 Gerber 文件出现乱码和异常的情况。

图 1-31　字符设计

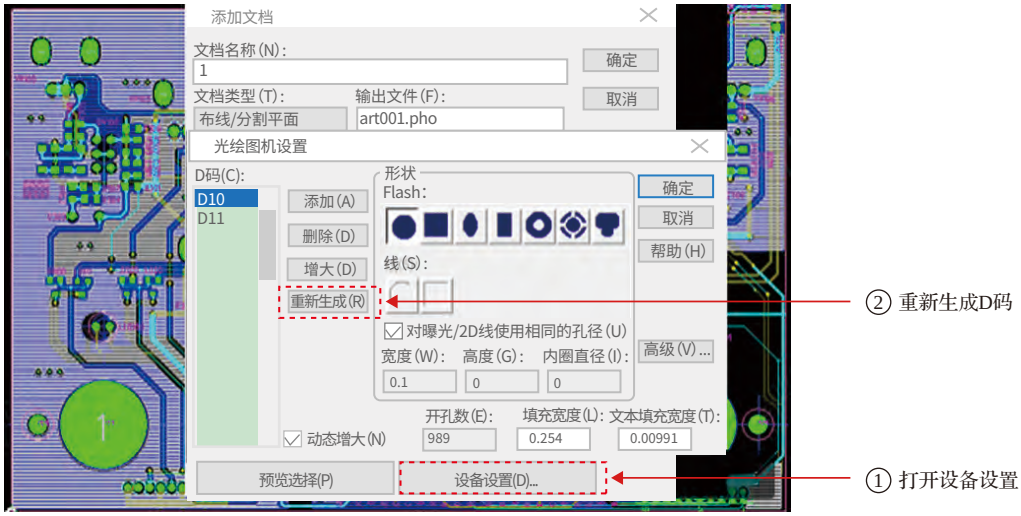


图 1-32　重新生产 D 码

扫描二维码可查看《小嘉扫雷：PADS 设计不规范引起的常见错误点》。

1.2 PCB 制造软件

在当今的电子设计领域，PCB 设计与生产制造密不可分。完成 PCB 文件设计后，需使用专门的制造软件对生产文件进行检查分析，以确保符合 PCB 制造工艺要求，从而保证 PCB 能正常生产，并避免设计错误。常用的检查分析软件有 Gerber 查看软件以及 DFM 软件。

Gerber 查看软件主要用于查看和分析 PCB 设计软件生成的 Gerber 文件，其功能包括分析 PCB 的层叠结构、放大检查 PCB 设计的细节、检查设计工艺是否符合制造要求等。

可制造性设计（Design for Manufacturability，DFM）软件功能更为丰富，不仅可以查看 Gerber 文件，还能对 PCB 设计的可制造性进行分析。DFM 软件能够帮助工程师在设计阶段发现潜在的制造问题并及时修正，减少后期返工，以及提高产品质量和可靠性。DFM 软件界面（以嘉立创 DFM 为例）如图 1-33 所示。

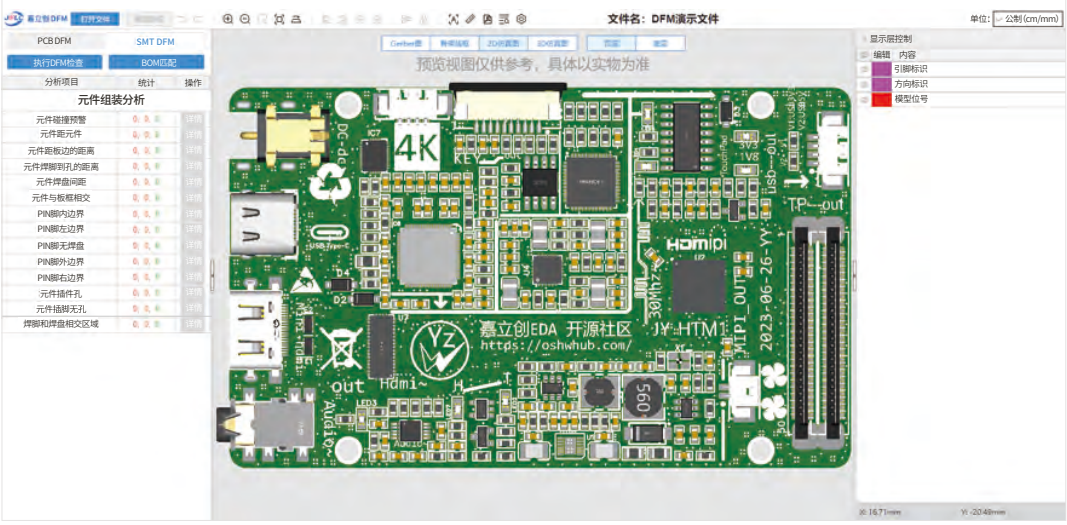


图 1-33　DFM 软件界面

在使用 Gerber 查看软件和 DFM 软件时，都需要用到 Gerber 文件。Gerber 文件是一种用于传达 PCB 制造信息的常用格式，包含 PCB 制造时所需的各种信息，涵盖 PCB 的层叠属性、走线、铺铜、丝印以及钻孔等内容，是 PCB 生产的基础文件，如图 1-34 所示。目前，通用的 Gerber 文件采用 RS-274X（扩展 Gerber 格式），是一种二维矢量图像描述格式，采用 ASCLL 编码。

Drill_PTH_Through.DRL	DRL 文件	1 KB	否
Drill_PTH_Through Via.DRL	DRL 文件	1 KB	否
FlyingProbrTesting.json	JSON 文件	2 KB	否
Gerber_BoardOutlineLayer.GKO	GKO 文件	1 KB	否
Gerber_BottomLayer.GBL	GBL 文件	2 KB	否
Gerber_BottomSilkscreenLayer....	GBO 文件	1 KB	否
Gerber_BottomSolderMaskLaye...	GBS 文件	1 KB	否
Gerber_DocumentLayer.GDL	GDL 文件	1 KB	否
Gerber_DrillDrawingLayer.GDD	GAMtasticDrillDrawingL...	2 KB	否
Gerber_TopLayer.GTL	GTL 文件	5 KB	否
Gerber_TopPasteMaskLayer.GTP	GTP 文件	2 KB	否
Gerber_TopSilkscreenLayer.GTO	GTO 文件	105 KB	否
Gerber_TopSolderM askLayer.G...	GTS 文件	1 KB	否

图 1-34　嘉立创 EDA 软件导出的 Gerber 文件

Gerber 文件通常是一个压缩包，包含 PCB 各个层与元素的相关子文件，如表 1-1 所示。

表 1–1　Gerber 文件说明

文件名	类型	说明
Gerber BoardOutline.GKO	边框文件	PCB 制造商根据该文件切割 PCB 的外形
Gerber TopLayer.GTL	PCB 顶层	顶层铜箔层
Gerber BottomLayer.GBL	PCB 底层	底层铜箔层
Gerber InnerLayerl.G1	内层铜箔层	信号层类型
Gerber InnerLayer2.G2	内层铜箔层	内电层类型的内层，输出时是正片输出，在 PCB 绘制时是负片绘制
Gerber _TopSilkLayer.GTo	顶层丝印层	
Gerber BottomSilkLayer，GBo	底层丝印层	
Gerber TopSolderMaskLayer.GTS	顶层阻焊层	也称为开窗层，在该层绘制的元素对应到顶层的区域则不盖油
Gerber BottomSoiderMaskLa-yer.GBS	底层阻焊层	也称为开窗层，在该层绘制的元素对应到底层的区域则不盖油
Drill PTH Through.DRL	金属化多层焊盘钻孔	内壁需要金属化的钻孔位置
Drill PTH_Through Via.DRL	金属化通孔类型过孔	内壁需要金属化的钻孔位置。这个文件仅嘉立创使用
Drill NPTH Through.DRL	非金属化钻孔层	内壁不需要金属化的钻孔位置，比如螺纹孔
GGerber TopPasteMaskLayer.GTP	顶层助焊层	开钢网用
Gerber BottomPasteMaskLayer.GBP	底层助焊层	开钢网用
Gerber _TopAssemblyLayer.GTA	顶层装配层	仅做读取，不影响 PCB 制造。曾用名称：ReadOnly. TopAssembly
Gerber_BottomAssemblyLayer.GBA	底层装配层	仅做读取，不影响 PCB 制造
Gerber MechanicalLayer.GME	机械层	仅做读取，默认不影响 PCB 制造。记录在 PCB 设计中机械层记录的信息，仅做信息记录用，比如工艺参数、V 割路径等
Gerber DocumentLayer.GDL	文档层	记录备注信息，不参与制造

以上文件格式命名由嘉立创 EDA 专业版提供，其他 EDA 工具导出的 Gerber 文件内容与此类似，可作参考。

Gerber 文件导出后，即可使用 Gerber 查看软件或者 DFM 软件对生产文件进行检查，确保 PCB 文件满足设计需求，不影响生产。

常见的 Gerber 查看软件有 Gerbv、FlatCAM、CAM350、ViewMate 和 GerberLogix 等。选择 Gerber 查看软件时，应考虑操作系统的兼容性与易用性是否满足 PCB 查看与制造的基本要求。

目前，DFM 软件众多，功能也非常丰富。常用的 DFM 软件有嘉立创 DFM、Autodesk EAGLE DFM、DFM Station、Ultiboard DFM 等。选择 DFM 软件时，需考虑软件的兼容性、分析能力、用户界面以及软件成本等因素是否满足特定制造需求。

下文将重点介绍 Gerbv 以及嘉立创 DFM 这两款简单易用的软件。

1.2.1　Gerbv

Gerbv 是一款免费且开源的 Gerber 查看软件，支持在 Windows、Linux 和 UNIX 平台上运行，如图 1-35 所示。该软件简单易用，下载后即可运行，无须安装。

OS	Build date	Source	Download
	2023-10-11	ccf6a3	tar.gz
	2023-10-11	ccf6a3	tar.gz
	2023-10-11	ccf6a3	.zip

图 1-35　Gerbv 软件版本

1. 软件下载

通过 Gerbv 仓库或嘉立创 EDA 下载 Gerbv，找到该下载文件后双击即可打开软件，如图 1-36 所示。

软件 git 下载地址：

通过嘉立创 EDA 下载文件名为 Gerbv_2.6.0.exe。

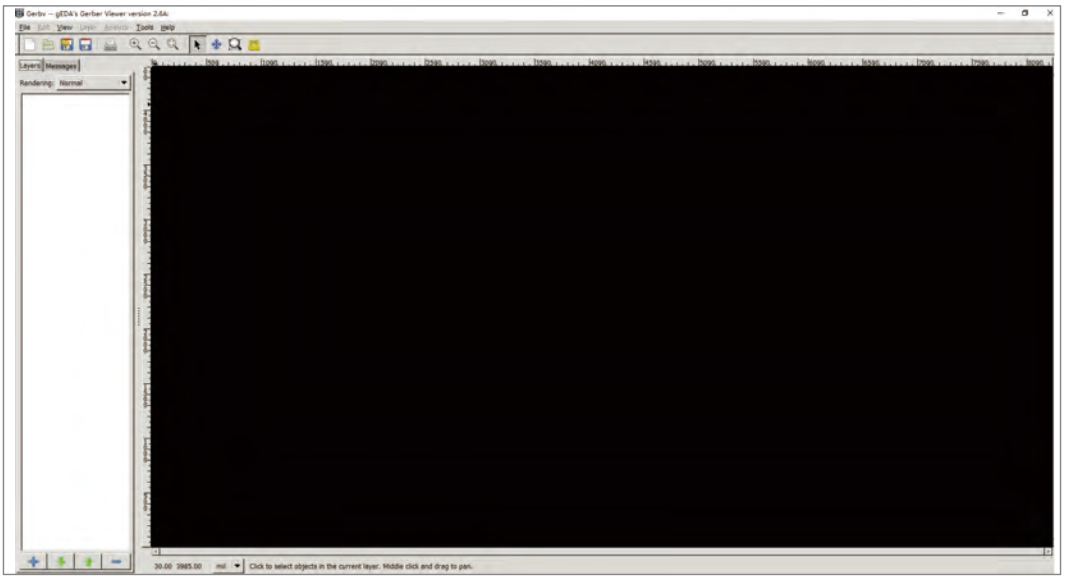


图 1-36　Gerbv 软件主页

2. 打开文件

将下载到本地的 Gerbv 文件解压缩。打开 Gerbv 软件，单击软件左下角的“+”符号，找到对应的 Gerber 文件夹，逐个选择文件或使用“CTRL+A”全选文件，导入并打开，如

图 1-37 所示。

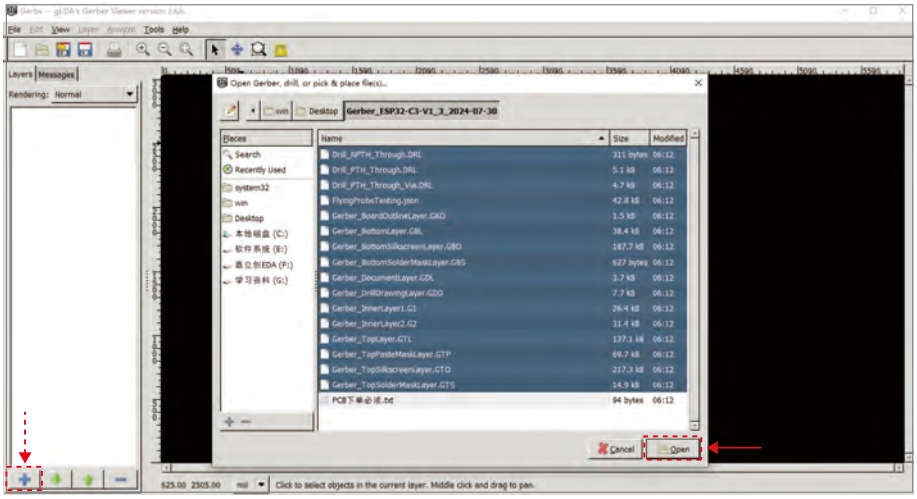


图 1-37　Gerber 文件导入

3. 检查文件

对 PCB 文件各图层进行查看，也可以通过顶部与左侧的图层工具对预览图进行缩放，检查钻孔以及铺铜等属性是否满足设计与制作要求，如图 1-38 所示。

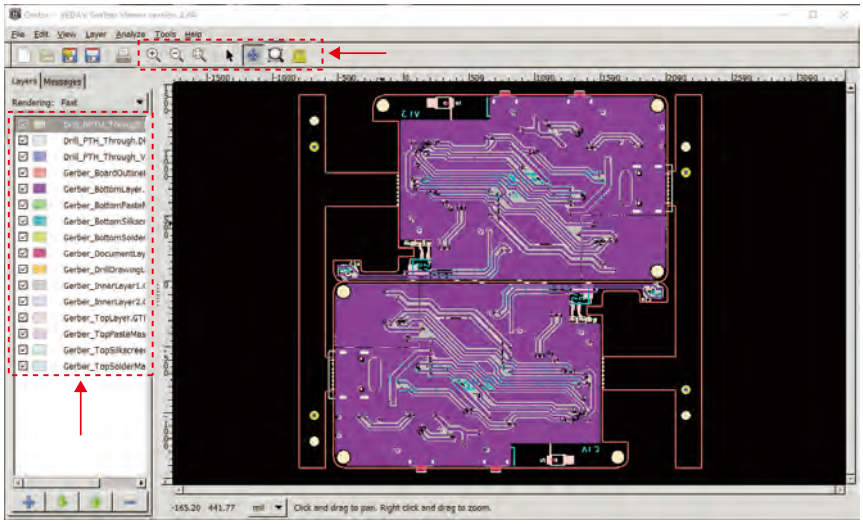


图 1-38　Gerber 文件查看界面

1.2.2　嘉立创 DFM

嘉立创 DFM 是由嘉立创集团自主研发的一款一键分析 PCB 和 PCBA 设计缺陷的软件，支持多种文件格式，并具备 3D 看图和 BOM 匹配功能。

它提供了浏览器在线使用版本和客户端版本。浏览器版本直接访问嘉立创相关网址即可；客户端版本可以在官网上下载，下载后双击安装包并按提示进行安装，安装时以最小权限安装，不会向用户主动索取管理员权限，这可以降低用户计算机的安全风险。

嘉立创 DFM 软件是一款专为电子工程师开发的可制造性检查软件，支持在线查看、一键导入分析、PCB 与 SMT 可制造性检查、错误项定位以及 3D 高清仿真预览等功能。

1. 一键上传

嘉立创 DFM 软件支持一键分析 PCB 与 PCBA 的设计缺陷，支持 Gerber 文件、PADS、Altium Designer、Protel 软件的 PCB 源文件 ZIP/rar 压缩文件导入。

2. 一键分析设计缺陷

软件包含五大分析模块，一键分析设计缺陷，预警生产障碍，避免错误流入下一道工序。分析涵盖线路、阻焊、钻孔、元件装配等可制造性问题，并提供错误项可视化定位功能，如图 1-39 所示。

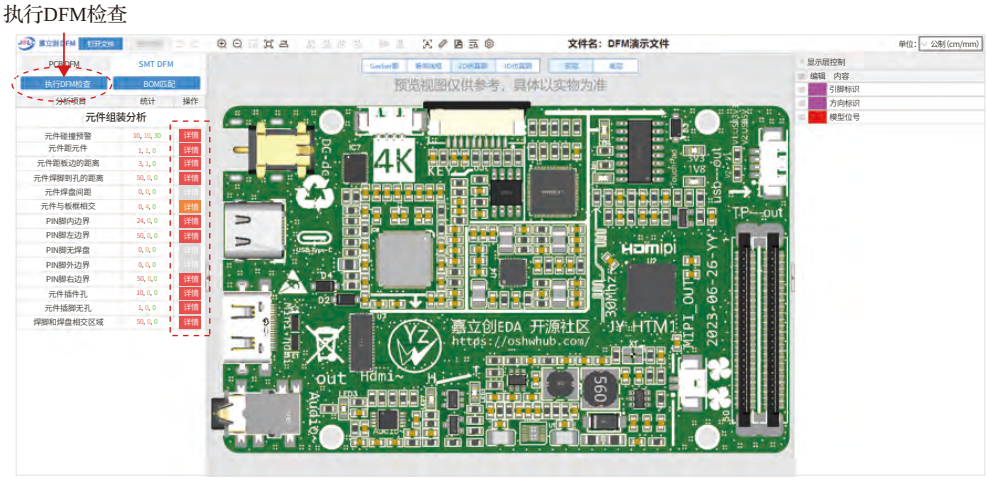


图 1-39　嘉立创 DFM 分析页面

3. 超清晰 2D/3D 仿真

嘉立创 DFM 支持高清矢量预览效果图，效果逼真，实现所见即所得的感觉，如图 1-40 所示。

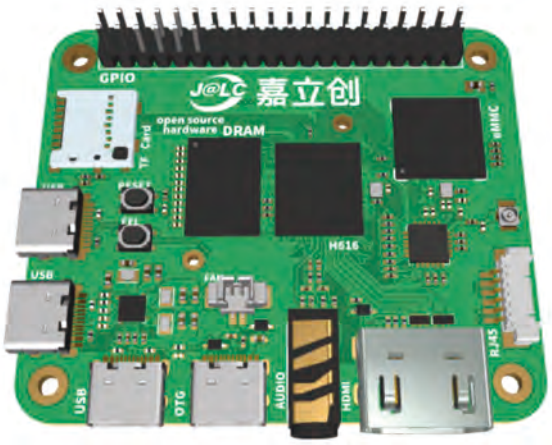


图 1-40　3D 预览效果图

说明：有关嘉立创 DFM 的更多信息请参见第 12 章内容。

1.2.3 嘉立创 CAM

1. 软件简介

嘉立创 CAM 是由嘉立创科技集团股份有限公司依据自身产业优势和生态圈培育出的一款用于 PCB 制造行业的计算机辅助制造（Computer Aided Manufacturing，CAM）软件，主要用于将 PCB 设计数据转换为可用于生产制造的实际指令，服务从设计到生产的过渡阶段。

这款软件可以协助工程师处理和优化原始设计资料，包括生成钻孔文件、菲林文件、锣带文件等；支持多种数据输入格式和输出格式，并具有强大的编辑和检验功能，确保设计符合制造标准，减少生产过程中的错误和缺陷。软件的界面采用中文展示，简单易懂，可操作性强，非常适合新用户学习，并在一定程度上保留了同类型 CAM 软件老用户的使用和操作习惯。

2. 用户群体

嘉立创 CAM 定位于高端的 PCB 生产制造市场，主要面向那些需要严格控制质量和追求高效生产流程的 PCB 制造企业和相关联的电子电路企业。通过集成智能化的编辑工具和优化算法及人工智能，为 PCB 智能制造领域探索出新的发展方向。用户群体通常包括 CAM 工程师、电子工程师、硬件工程师、预审工程师、质量工程师等电子行业相关从业人员。

软件提供了直观的操作界面和丰富的命令集，使得从设计验证、审核报价、资料优化和生产文件准备的整个流程变得高效且易于管理。无论是需要快速响应的样品制作，还是需要严格管控资料的大批量生产，嘉立创 CAM 都能提供必要的支持，尤其受到消费电子、通信设备、汽车电子等行业用户的青睐。

说明：有关嘉立创 CAM 软件的更多信息请参见第 13 章内容。

第 2 章 / PCB 基板材料

印制电路板（PCB）的基板材料，简称基材，也被行业俗称为板材，是 PCB 制造的主要基础材料，用于支撑和焊接电子元器件。基材性能直接影响 PCB 特性，因此在设计中选择合适基材至关重要。

为了满足客户对基材的不同需求，嘉立创 PCB 下单系统为各层数的 PCB 提供多种基材选择。以常用的 FR-4 基材为例，系统中针对不同层数和厚度的 PCB，提供了多种基材选项，如图 2-1 所示。

双面板：

成品板厚 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.6 2.0

板材选项

指定品牌	型号	TG值	玻璃布(张数)	阻燃性
不指定(真A级)	/	TG135	8	94V0
KB(真A级)	KB6164(有水印)	TG135	8	94V0
台湾南亚(真A级)	NP-140F(有水印)	TG140	8	94V0
生益(真A级)	S1000H(无水印)	TG155	8	94V0

6层板：

成品板厚 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.6 2.0 默认选项设置

板材选项

指定品牌	型号	TG值	阻燃性
不指定(真A级)	随机品牌	TG135	94V0
不指定(真A级)	随机品牌	TG155	94V0
台湾南亚(真A级)	NP-140F(无水印)	TG140	94V0
台湾南亚(真A级)	NP-155F(无水印)	TG155	94V0
生益(真A级)	S1000H(无水印)	TG155	94V0
生益(真A级)	S1000-2M(无水印)	TG170	94V0

4层板：

成品板厚 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.6 2.0

板材选项

指定品牌	型号	TG值	玻璃布(张数)	阻燃性
不指定(真A级)	随机品牌	TG135	8	94V0
KB(真A级)	KB6164(有水印)	TG135	8	94V0
不指定(真A级)	随机品牌	TG155	8	94V0
台湾南亚(真A级)	NP-140F(无水印)	TG140	8	94V0
KB(真A级)	KB-6165F(有水印)	TG155	8	94V0
台湾南亚(真A级)	NP-155F(无水印)	TG155	8	94V0
生益(真A级)	S1000H(无水印)	TG155	8	94V0

32层板：

成品板厚 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 1.6 2.0 2.5 3.0 3.2 3.5 4.0 4.5

板材选项

指定品牌	型号	TG值	阻燃性	加收价格
不指定(真A级)	随机品牌	TG170	94V0	不加价
生益(真A级)	S1000-2M(无水印)	TG170	94V0	起步价20+70元/m²

图 2-1　嘉立创 PCB 下单系统 FR-4 基材选项示例

在图 2-1 中，展示了不同层数的 PCB 有不同的基材选项和参数。如何选择这些选项和参数？有哪些需要注意的地方？接下来的章节将逐一探讨正确选择基材的方法，包括了解其特性以及对 PCB 性能的影响。

2.1 PCB 基材的选择与注意事项

PCB 基材是确保电路系统性能、可靠性和稳定运行的关键因素。在选择基材时，需要综合考虑电路特性、使用环境、可靠性、可制造性、成本和环境保护等因素，以实现平衡和最佳选择。以下介绍选择基材时需要注意的几个关键点。

2.1.1 基材类别选择

选择基材的关键步骤是根据需求和应用场景选择适当的基材类别。首先确定是制作刚性 PCB 还是柔性电路板（FPC）。在嘉立创电路板下单系统中，可在基本信息下的“板材类别”中进行选择。嘉立创 PCB 下单系统板材类别选项如图 2-2 所示。

图 2-2　嘉立创 PCB 下单系统板材类别选项

1. 刚性基材

如果需制作刚性 PCB，则需要根据设计与产品需求选择合适的刚性基材。常见的刚性基材类别如下。

（1）玻璃纤维布基材（FR-4）：适用于一般 PCB 设计，具有良好的机械强度和绝缘性能。

（2）高频基材：适用于高频电路，具有低介电常数和低损耗特性，如嘉立创提供的罗杰斯和聚四氟乙烯（PTFE）系列中的铁氟龙等高频基材。

（3）高温基材：适用于高温环境，具备较高耐热性能，如嘉立创提供的高 T_g 值（T_g170）FR-4 等基材。

（4）金属基材：适用于需要良好散热性能的应用，如嘉立创提供的铝基板和铜基板等基材。

2. 柔性基材

如果需制作柔性电路板，则需选 FPC（软板）基材，关于 FPC 的相关内容将在第 10 章进行讲解。

2.1.2 基材的选择

1. 满足电路特性和 PCB 使用环境的要求

选择基材时需满足电路特性及实际使用环境的要求。

高频应用：需低介电常数和低损耗的高频基材，如 PTFE 或低损耗 FR-4。

高温应用：需具备良好耐热性能的高 T_g 值基材，如高 T_g 值 FR-4 或聚酰亚胺。

大功率散热：适合大功率应用的铝基或铜基材料，以有效提高散热性能。

2. 满足产品的可靠性要求

在现代电子产品中，PCB 是关键组成部分，其可靠性直接影响整个设备的性能和寿命。因此，在 PCB 的选材过程中，应尽量考虑产品系列目录之内的基材，避免选用非标准或者产品系列目录之外的基材，确保基材的工艺可靠性和稳定性。

1）关注基材的关键特性

为确保电子产品在长期使用和各种环境条件下的稳定性，PCB 基材的选择不仅关系到电气性能，还涉及机械强度、热稳定性、化学耐受性、绝缘性能、尺寸稳定性和导热性等多个方面。高质量的基材能够提供良好的绝缘性能和热管理，确保电路在高温或高负载条件下的正常运行。

2）识别和避免使用低质量基材

市场上 PCB 基材质量参差不齐，劣质基材会直接影响电子产品的性能和可靠性。为避免潜在的电气故障并延长产品寿命，识别低质量基材至关重要。

以 FR-4 双面基材为例，FR-4 基材是由多张玻璃纤维布浸以树脂形成的预浸渍材料叠合后，表面覆盖铜箔，并通过加热和加压固化形成的复合材料。通常，正规基材厂商出品的标准 A 级厚度 1.6mm FR-4 双面板，其基材含有 8 张玻璃纤维布。如果 1.6mm 厚度的双面 FR-4 基材中的玻璃纤维布少于 8 张，则存在偷工减料的情况。嘉立创 1.6mm FR-4 双面板玻璃纤维布张数检测示例如图 2-3 所示。

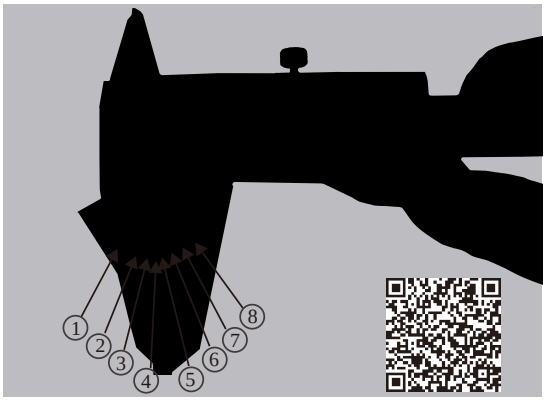


图 2-3　嘉立创 1.6mm FR-4 双面板玻璃纤维布张数检测示例

FR-4 双面板基材玻璃布张数的检测方法如下。

方法一：在安全环境下，参考嘉立创下单系统中“板材检测方法”的操作方式（扫描图 2-3 中二维码可查看板材玻璃纤维布张数检测方法），将 PCB 融化后，检测玻璃布数量是否为 8 张。

方法二：可将 PCB 样品邮寄给嘉立创，由嘉立创提供相关检测报告。具体方法：可在嘉立创电路板下单系统导航栏中找到并单击“板材检测”，在弹出窗口按“板材检测服务流程”申请。板材检测服务流程如图 2-4 所示。扫描图 2-4 中二维码可进入板材检测申请通道。

3. 考虑产品的可制造性要求

考虑产品的可制造性，选择易于加工和制造的基材。考虑基材的成型性能、加工性能和层压结构等因素，以确保生产过程的稳定性和效率。

图 2-4　板材检测服务流程

（1）性能选择：对于采用无铅工艺焊接的 PCB，应选择耐热性能较好（T_g 值较高）的基材；对于需要金属化钻孔的 PCB，应选择热膨胀系数较小的基材；对于批量较大需要采用模具冲孔的 PCB，应选择冲切性能较好 FR-1 或 FR-2 等酚醛纸基材料。

（2）结构选择：多层板应根据层间绝缘层厚度和阻抗要求，选择兼容的薄型覆铜板和半固化片结构。嘉立创提供超过 600 种层压结构供选择，如图 2-5 所示。客户可通过“阻抗计算神器”输入阻抗要求，快速获得推荐的层压结构，特别是免费结构（选择最多的结构），避免自定义计算，从而加快生产交期。

图 2-5　嘉立创层压结构

4. 考虑成本平衡

在确保满足性能和可靠性的前提下，还需考虑基材的成本效益，选择经济合理的基材，平衡成本与性能之间的关系。

例如，在嘉立创下单系统中，选择多层板的层压结构时，免费结构是最常见且最实惠的选项，若免费结构满足产品的阻抗需求，应优先选择此方案，如图 2-6 所示。

图 2-6　嘉立创多层板层压结构推荐与选择界面

5. 考虑环保性要求

在日益增强的环保意识背景下，产品设计应考虑其整个生命周期对环境的影响。因此，在选择 PCB 基材时，应优先使用环保基材，以减少有害物质排放，降低对环境的影响，同时提高产品的耐用性和可靠性。

6. 考虑供应链稳定性

选择基材时，供应商的库存和长期稳定供应能力是重要考量因素。充足的库存和稳定供应可减少生产等待时间，提高生产效率。

以上是选用 PCB 基材的一般要求。如果产品有特定的参数或性能需求，应根据实际情况采用更详细的筛选方法。这将涉及更深入的 PCB 基材知识。为帮助大家全面了解 PCB 基材，接下来的章节将简要介绍基材的构造与分类、关键特性等内容。

2.2　常见 PCB 基材类型

PCB 基材因产品性能需求和加工工艺的不同而存在多种类型和规格。随着 PCB 制造技术和市场需求的发展，基材的形式和分类也日益多样化，可根据其结构特征、主体树脂成分、特定特性以及用途等划分出不同的类型。

2.2.1　基材分类

在 PCB 制造中，基材的分类方法多种多样，最常用且应用广泛的是按基材的结构特征

进行分类，如覆铜层压板、半固化片、覆树脂铜箔和无铜箔的特殊基材等。

1. 覆铜层压板

覆铜层压板（Copper Clad Laminate，CCL）简称覆铜板，由增强材料（如玻璃纤维布等）浸以树脂，烘干后制成预浸渍材料（半固化片），再根据厚度要求将多个半固化片叠合在一起，在其最外层的一面或两面覆上铜箔，经过加热、加压固化后，形成板状复合材料。为了提高铜箔与树脂的黏合力，在铜箔的黏结面进行微蚀和氧化处理，形成微粗糙的黏合面。双面覆铜层压板结构示意图如图 2-7 所示。覆铜层压板具有优良的机械强度和导电性能，是市场应用最广泛、用量最多的类型。

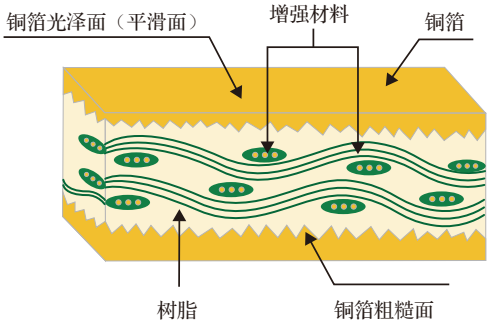


图 2-7　双面覆铜层压板结构示意图

2. 半固化片

半固化片（Prepreg，PP）也称为预浸渍材料，是 PCB 制造中的重要成分。它以薄片或薄板形式存在，树脂已经浸透到玻璃纤维布中，但尚未完全固化。制造 PCB 时，PP 被放置在铜箔层之间，经过高温高压的层压工艺，树脂完全固化，将铜箔和其他层材料牢固黏合，形成坚固的 PCB 结构。不同的预浸渍材料可提供各种绝缘性能、耐热性和化学稳定性特性，以满足不同应用需求。

3. 覆树脂铜箔

覆树脂铜箔（Resin Coated Copper，RCC）是指在铜箔表面涂覆一层树脂材料，以增强其黏附性、耐化学性和机械强度，主要用于制造高密度互联 PCB（HDI 板），特别适用于对小型化和薄型化有高要求的应用。RCC 具有优异的导电性能和耐热性能，适合需要更高电气性能的应用。

4. 无铜箔的特殊基材

这种基材不含铜箔，常见的有聚酰亚胺（PI）基材和陶瓷基材等。它们具有优异的高温稳定性和特殊的电气性能，适用于高温和特殊环境下的应用。另外，无铜箔基材也包含光敏性绝缘基板，表面没有铜箔，在制作 PCB 过程中，根据需要沉积和电镀上铜箔。该基材主要用于使用加成法制造 PCB 和 HDI 板。

2.2.2　覆铜板的分类

因产品需求不同，覆铜板有多种分类。根据基材的刚性和使用特点，可以分为刚性基材和柔性基材两大类。刚性基材因物理状态呈刚性，又称刚性板，机械强度高，不能弯曲或弯

折使用。柔性基材按物理状态又被称为柔性板或软板，可以弯曲或弯折使用。下面主要对刚性基材做简单介绍，柔性基材将在 10.1.2 节进行讲解。

刚性覆铜板（Rigid Copper Clad Laminate，RCCL）由增强材料、树脂与铜箔压制而成，是目前市场上品种和类别最多、发展最成熟的一类 PCB 基材。其分类如下。

1. 按基材中的增强材料不同分类

基材中的增强材料主要分为四类：纸基、玻璃纤维布（也称为玻纤布或玻璃布）基、复合基和特殊材料基。每一类都有多个子类，根据树脂成分的不同进行分类。PCB 基材的特性主要取决于增强材料和树脂的组合。

1）纸基板

以纤维纸为增强材料，浸以树脂（通常为酚醛树脂）与铜箔压制成的基材。纸基板通常为单面覆铜板，如 FR-1、FR-2、FR-3。它们具有较好的电气性能，成本低，但纸基吸湿性较大，通常适用于一般低值消费电子产品，不适合用于高速或高可靠性要求的 PCB。

2）玻璃纤维布基板

简称玻纤板，以玻璃纤维布浸以树脂（通常为环氧树脂或其他高性能树脂）与铜箔压制成的基材，如 FR-4、FR-5 等。它们具有良好的电气性能，较高的耐温性，适用于大多数可靠性要求较高的电子产品和高速电路产品。目前嘉立创使用最多的也是 FR-4 基材。

3）复合基板

它是一种采用两种或两种以上增强材料的基板。它在表面层和芯层中使用不同的增强材料。常见的例子是芯层采用环氧纤维纸，表层采用玻璃布与铜箔压制而成的基板，如 CEM-1 和 CEM-3。复合基板相较于纸基板具有改善的性能，而成本又较玻璃纤维布基板低，适用于民用电子和一般电子产品。

4）特殊材料基板

它包括含特殊功能的金属、陶瓷或耐热热塑型基材，通常因其高导热性被应用于电源模块、大功率器件、高密度安装的 IC 封装或汽车电子产品等 PCB 中。

（1）金属基材：由金属板层、绝缘层和铜箔三部分组成。金属层通常有铜板、铝板、钼板等，其中最常用的是铜板和铝板。它们具备机械强度高、散热性好、热膨胀相对较小等特点。

（2）陶瓷基材：由陶瓷基材、键合黏结层和导电层（铜箔）三部分组成。它们具有硬度高、脆性大、介电常数较大、导热性好、热膨胀系数相对较小等特点。

（3）高频基材：它是一种经专门优化的基材，是由专有的玻璃纤维布增强、PTFE 树脂、陶瓷粉 / 碳氢化合物复合材料等与铜箔压制而成的基材，兼具 PTFE/ 玻璃纤维布的电气性能和环氧树脂 / 玻璃纤维的工艺性。常见的高频基材包括聚四氟乙烯（PTFE）、氰酸酯覆铜板（CE）、聚苯醚（PPE）、聚酰亚胺（PI）等。这些基材具有较低的介电常数和损耗因子，以及良好的尺寸稳定性和热稳定性。它们在无线通信、雷达、微波通信和高速数字通信等高频领域中被广泛应用，以满足高频电路对于保持高频信号的稳定性、减小信号传输损耗以及降低电磁干扰的要求。

2. 按基材某一突出性能分类

覆铜板按照某一突出性能差异分类，有助于从基材名称选择某种特性突出的基材。

1）按阻燃性分类

（1）阻燃型板：防火性能好，离开明火后在一定时间内熄灭，安全性高。这类基材满

足 UL 标准（美国保险商实验室标准）中规定的垂直燃烧法实验的燃烧性 V 级要求，被称为阻燃板或 V0 板。其抗燃性等级从高到低依次为 94V-0、94V-1 和 94V-2，即 94V-0>94V-1>94V-2。

（2）非阻燃型板：防火性能差，离开明火或滴落后仍会燃烧，安全性较低，被称为 HB 级基材。

2）按介电常数分类

介电常数 ε 是一种物质在电场中的响应能力的度量，表示电磁波在基材中传播的速度。基材的介电常数对 PCB 的特性阻抗有重要影响。按照介电常数性能的高低来分类，便于高速、高频 PCB 的选材。

（1）低介电常数基材：一般介电常数在频率为 GHz 级时能稳定在 3 左右，介质损耗角正切值小于或等于 10^{-3} 的基材，主要用于高速、高频 PCB。

（2）高介电常数基材：介电常数在 10 以上甚至达到几十或者上百的基材称为高介电常数基材，主要用于埋入无源元件的多层板。在多层板的接地层和电源层如果采用该基材，可以缩短 IC 与电容的连接距离，降低电路的寄生电感，有利于高速、高频电路的去耦作用，并能降低接地层和电源层上产生的谐振噪声。

PCB 基材还可以按基材的耐热性能（T_g、T_d、T260 或 T288）、热膨胀系数（CTE）、耐漏电起痕性（CTI）、耐离子迁移性（CAF）、无卤素环保性等特性分类。

2.2.3 覆铜板的品种和规格

覆铜板是 PCB 制造中的关键材料，除上述分类外，还可以根据品种和规格进一步区分。

1. 铜箔厚度规格

覆铜板的铜箔厚度是影响电气性能的重要因素，主要规格包括 0.25oz（9μm）、0.5oz（18μm）、0.75oz（25μm）、1oz（35μm）、2oz（70μm）、3oz（105μm）等。

在 PCB 行业中，铜箔厚度通常用“盎司（oz）”作为单位。1oz 的铜箔约等于 28.35g 铜，均匀铺在 1 平方英尺的面积上，其厚度约为 35μm（1.37mil）。换算关系为：

1oz ≈ 28.35g；1mil = 0.001in = 25.4μm。

2. 基材厚度规格

标准规格：0.4mm、0.6mm、0.8mm、1.0mm、1.2mm、1.6mm、2.0mm、2.5mm、3.0mm 等。

非标准规格：0.1mm、0.2mm、0.3mm、0.5mm 等，主要用于制造多层板。

3. 铜箔面数规格

单面板：仅在单面有铜箔。

双面板：两面均有铜箔。

4. 特殊类型

用于制造积层式多层板的基材包括热固性和感光型树脂，以及覆树脂铜箔，属于以上基材的特色类型。在一般刚性 PCB 中使用得较少，主要用于高密度互联 PCB（HDI 板）。HDI 板在小型化和高速、高频电路设计中具有广泛应用。

2.3 PCB 基材的几项关键特性

基材的性能包括外观质量、耐热性、机械性能、电气性能、化学性能和环境性能等。有的特性直接影响 PCB 的基本特性，有的则直接影响 PCB 的安装和使用性能。本节将重点探讨 PCB 基材的关键特性以及对 PCB 性能的影响。通过了解 PCB 基材的特性参数，能够更好地选择适合的基材，确保 PCB 的可靠性、稳定性，从而满足不同领域和应用的要求。

2.3.1　耐热性

覆铜板基材的耐热性是指在高温环境下的稳定性和可靠性。电子设备在生产、焊接、组装和工作过程中会产生热量，而高温环境可能对覆铜板基材造成损害。因此，选择具有良好耐热性的基材非常重要。高耐热性的基材可以保持 PCB 的稳定性，避免因温度变化引起的尺寸变化或物理性能退化。

1. 玻璃化转换温度 T_g

玻璃化转换温度是指基材中聚合物从硬的和相当脆的状态（玻璃态）转变成黏稠的高弹态（橡胶态）时所处的温度。T_g 也被业内称为玻璃化温度。这一转变温度通常在较窄的温度区域内变化。

覆铜板在常温时，基材中的树脂为玻璃态（图 2-8 中 A 至 B 区），呈刚性，形变较小；在加热情况下，当温度达到 T_g 温度范围时，基材中的高分子聚合物材料开始转变成黏稠状高弹态（图 2-8 中 B 至 C 区），形变增大，表现为 PCB 上的厚度增加，热膨胀系数增大；如果温度继续升高，超过 T_g 温度范围时，基材中的高分子聚合物材料开始转变成黏流态（图 2-8 中 C 至 D 区），分子之间可以相对滑动，形变急剧增大，使 PCB 的内应力也明显增大，导致 PCB 绝缘电阻恶化、基材分层、发脆等问题。

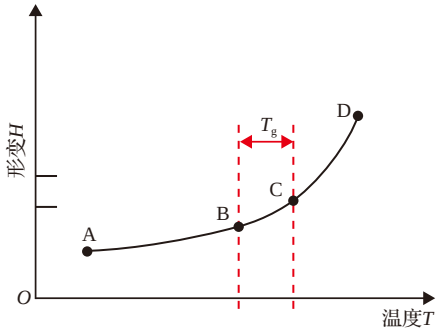


图 2-8　高分子聚合物的玻璃化转变温度与形变关系示意图

根据 T_g 的高低，可以将覆铜板分为不同的耐热档次，通常将刚性玻璃纤维布基板按照 T_g 值分为以下四个档次。

一档：T_g 为 125 ～ 130℃，一般 FR-4 板（环氧-双氰氨体系，少数为环氧-酚醛树脂体系）。

二档：T_g 为 130 ～ 150℃，对一般 FR-4 树脂体系的改性 FR-4 板。

三档：$T_g \approx 170$℃，FR-5、高耐热型树脂改性 FR-4 板、PPE 改性 BT 板、热固性 PPE 板、环氧改性 CE 板、环氧改性 PI 板等。

四档：T_g >200℃，聚酰亚胺（PI）板、BT 板、改性 BT 板、CE 板等。

按这种档次划分，包括采用不同树脂类型的覆铜板，对高耐热性覆铜板 T_g 值的要求目前业内没有特别明确的规定，一般习惯上将第三、第四档的基板称为高耐热性覆铜板。

当环境温度高于 T_g 时，覆铜板会出现绝缘电阻恶化、基材分层、脆化等问题。而高 T_g 值的覆铜板要比低 T_g 值的覆铜板具有更好的尺寸稳定性和较高的机械强度保持率。然而，T_g 值过高的基材硬度高，机械加工难度增加。因此，选择基材的 T_g 值时，应兼顾这两者的关系。

2. 热膨胀系数

热膨胀系数（Coefficient of Thermal Expansion，CTE）是评估覆铜板（CCL）耐热性能的重要指标之一。它表示基材在温度变化下每摄氏度的尺寸变化率，以百万分之几每摄氏度（ppm/℃）表示。CTE 的大小反映了增强材料、树脂和铜箔三种材料的综合表现，其中树脂对 CCL 的 CTE 影响最大。基材的 CTE 在 *X*、*Y* 和 *Z* 轴三个方向上的热膨胀系数会由于基材结构因素存在一定差异。

1）*Z* 轴方向热膨胀系数

PCB 厚度方向的热膨胀系数称为 *Z* 轴方向热膨胀系数。当温度在基材 T_g 值以下时，CCL 的 *Z* 方向的热膨胀系数为 α_1；当在 T_g 值以上时，*Z* 轴方向的热膨胀系数为 α_2。若实际生产和工作过程中，PCB 的温度处于 T_g 值以上环境中，则 α_2 会是 α_1 的 3 ～ 5 倍。*Z* 轴方向热膨胀系数急剧增大，树脂的膨胀尺寸大于孔壁铜箔膨胀尺寸，会对孔壁铜箔层产生拉应力，影响金属化孔的质量。无铅兼容性 FR-4 型覆铜板 *Z* 轴方向热膨胀系数如表 2-1 所示。

表 2–1　无铅兼容性 FR-4 型覆铜板 *Z* 轴方向热膨胀系数

CTE	一般 FR-4 型基材	低热膨胀系数基材	较好的热膨胀系数基材
α_1	≤ 60ppm/℃	≤ 50ppm/℃	30 ～ 40ppm/℃
α_2	≤ 300ppm/℃	≤ 140ppm/℃	100 ～ 200ppm/℃

2）*X*、*Y* 轴方向热膨胀系数

PCB 基材在平面（长度和宽度方向）上的膨胀特性称为 *X*、*Y* 轴方向的热膨胀系数。当温度升高到 T_g 值以上时，树脂受到增强材料玻璃纤维布的限制，导致 *X*、*Y* 轴方向上的形变较小。因此，水平方向热膨胀系数主要反映 30 ～ 130℃范围内的数值。常见基材的 *X*、*Y* 轴方向的 CET 通常为（11 ～ 16）ppm/℃。在进行基材选择时，需要使 *X*、*Y* 轴方向的热膨胀系数与所安装元器件基体的热膨胀系数相匹配。

3）低热膨胀系数高多层板的半固化片

高多层板大多采用 FR-4 型薄基材和半固化片制造，高多层板的热膨胀系数由薄型基材和半固化片的热膨胀系数决定。FR-4 型半固化片通常由 E 型玻璃纤维布与环氧树脂构成，此类半固化片中的 E 型玻璃纤维布因材质和结构的特殊性，通常情况下其 CTE 为 5ppm/℃，而环氧树脂的 CTE 为 85ppm/℃。因此，制作较低热膨胀系数高多层板时，不宜选择树脂含量过高的半固化片，以防增大高多层板的 CTE。

3. 热分解温度 T_d

热分解温度（Temperature of Thermal Decomposition）是指基材中的树脂受热分解，当材料失重 5% 时的最高温度。在此温度下，基材会产生一些不可逆的物理、化学性能降低的变化。FR-4 的热分解温度通常在 300℃ 以上。

4. 热分层时间（T260 或 T288）

热分层时间是 PCB 基材耐浸焊性能的指标，指基材在规定的焊料温度下和规定的时间内焊接，基材不出现分层、起泡等破坏现象。

T260：是指温度为 260℃时的耐焊时间，通常用于焊接温度较低的有铅焊接的基材。

T288：是指温度为 288℃时的耐焊时间，通常用于焊接温度较高的无铅焊接的基材。

热分层时间越大，表明基材在焊接温度中的可靠性越强。然而，温度越高、焊接时间越长，基材热分层的可能性越大。因此，热分层的温度和时间需要有一个限度。行业标准规定，一般型 FR-4 基材的热分层时间在 260℃时为 10s（T260=10s）。然而，这个参数无法适应无铅工艺回流焊长时间的高温环境。因此，另一评估标准规定，在 288℃下的热分层时间应不少于 5min（T288 ≥ 5min）。

5. 热应力

热应力（Thermal Stress）是指由温度变化引起的基材内部应力。当 PCB 经历快速加热或冷却时，不同材料的热膨胀系数差异会导致应力集中，这可能导致基材变形、开裂或层间剥离。

热应力测试用于评估 PCB 基材在短期高温焊锡环境中的热稳定性。测试通常在 288℃下进行，持续 10s，并通过目视检查是否出现分层或气泡等缺陷。该方法与热机械分析（TMA）测试应力下的分层时间不同，主要侧重于瞬时热影响的评估。

6. 阻燃性

阻燃性（Flammability）是指 PCB 基材在火源作用下抵抗燃烧和延缓火焰传播的能力。优良的阻燃性可以提高电子设备的安全性，减少火灾风险。美国保险商实验室（UL）将阻燃性分类为：94V-0、94V-1、94V-2，具体区别如下。

（1）94V-0：基材样品在火焰中燃烧，移除火焰后，熄灭时间不超过 10s，且在试验后不发生燃烧滴落物。适用于对阻燃性要求极高的应用。

（2）94V-1：基材样品在火焰中燃烧，移除火焰后，熄灭时间不超过 30s，且没有滴落燃烧颗粒。适用于对阻燃性有一定要求的应用。

（3）94V-2：基材样品在火焰中燃烧，移除火焰后，熄灭时间不超过 30s，且可能会滴落燃烧颗粒。适用于对阻燃性要求较低的应用。

7. 常见材料的热性能参数

基材的热性能取决于构成基材的主要材料特性。表 2-2 列出部分常见基材和材料的关键热性能参数，有助于读者全面了解基材和材料的特性，从而作出更好的选材决策。

表 2–2　常见基材和材料的关键热性能参数

基材类型	玻璃化转换温度 T_g/℃	热分解温度失重 5% T_d/℃	热分层时间		热膨胀系数（CTE）	
			T260/min	T288/min	50℃～260℃ Z 轴（%）	40℃～125℃ X/Y 轴（ppm/℃）
FR-4 环氧树脂	140	315	8 ～ 18	—	4.5	13 ～ 16
增强型 FR-4 环氧树脂	140	345	20 ～ 30	5 ～ 10	4.4	13 ～ 16
增强型含填料 FR-4	150	345	25 ～ 45	6 ～ 12	3.4	13 ～ 16
高 T_g 值 FR-4 环氧树脂	175	305	4 ～ 10	—	3.5	13 ～ 16
增强型高 T_g 值 FR-4	175	345	30	7 ～ 15	3.4	13 ～ 16
增强型含填料高 T_g 值 FR-4	175	345	30	8 ～ 16	2.8	12 ～ 15
BT/ 环氧树脂共混物	190	320	30	2 ～ 8	3.3	14 ～ 16
PPO/ 环氧树脂	175	345	30	8 ～ 20	3.8	15 ～ 16

续表

基材类型	玻璃化转换温度 T_g/℃	热分解温度失重 5% T_d/℃	热分层时间		热膨胀系数（CTE）	
			T260/min	T288/min	50℃～260℃ Z 轴（%）	40℃～125℃ X/Y 轴（ppm/℃）
低 D_k/D_f 环氧共混 A	200	350	30	6～12	2.8	11～15
低 D_k/D_f 环氧共混 B	180	380	30	10～20	3.5	13～15
改良的低 D_k/D_f 基材	215	363	30	15～35	2.8	13～14
聚酰亚胺	260	415	30	30	1.75	12～16
无卤含填料高 T_g FR-4	175	380	20～30	8～12	2.8	13～16

注：表中列举的基材树脂含量为 40%。

2.3.2 电气性能

1. 介电常数

介电常数是指基材对电场的响应能力，即在规定形状的两个电极之间填充介质而获得的电容与两电极之间为真空时的电容之比，是影响高速、高频 PCB 阻抗特性的重要参数。

介电常数影响高速信号在 PCB 上的传输速度，介电常数值越大，信号传输越慢。信号传输衰减也与介电常数有关。介电常数越小的 PCB，其介质损耗也越小，高速信号在同样长度的 PCB 导线上传输衰减就越低。因此，介电常数是高速电路设计中选用基材时需要考虑的关键特性之一。在基材技术资料中，通常用介电常数来描述基材在特定条件下的电响应特性。

2. 介质损耗角正切值

介质损耗角正切值是一个衡量基材在电磁波传输中能量损耗的指标，指覆铜板基材对信号能量的吸收和损耗的程度，是基材的介电损耗因子（D_f）与基材的介电常数（D_k）之比的正切值。

介质损耗角正切值影响高速信号的传输延迟和信号的衰减，是高性能 PCB 基材的重要电气性能之一。其值越小，表示基材在高频应用中越有效，损耗越少；其值越大，表示基材在电磁波传输过程中的能量损耗越大。因此，在高频和微波电路设计中，选择具有低介质损耗角正切值的基材可以提高电路的性能和可靠性。

3. 耐离子迁移性

耐离子迁移性（CAF）是指覆铜板基材在湿度和电场的作用下，阻止离子迁移的能力。实际上是在 PCB 通电后，相邻的金属化孔或导线之间的金属在电场作用下溶解为离子，在两个电极之间的绝缘层内或者表面析出，导致基材绝缘电阻降低。CAF 具有半导体特性，也称为导电阳极丝。CAF 有以下两种表现形式。

（1）PCB 表面离子迁移：在 PCB 表面有一定湿度和离子污染的条件下产生。

（2）导电的离子在基材内部沿玻璃纤维迁移。

常说的 CAF 通常是指后面这种情况，通常发生在电位差较大、间距较小的两相邻导线、金属化孔或相邻孔与导线之间。高温高湿环境会增加此现象发生的概率。

例如在设计布线密度高、导线间距小，尤其是有差分电路布线的高速 PCB 时，应特别关注基材的 CAF 特性，选择吸湿性小的基材有利于减少离子迁移的发生。离子迁移可能导

致 PCB 短路或性能下降。因此，选择耐离子迁移性良好的基材对 PCB 的稳定性和可靠性至关重要。

4. 耐漏电起痕性

耐漏电起痕性（CTI）是绝缘材料在特定条件下（如 0.1% 的氯化铵水溶液污染），能承受的最高电压而不产生漏电痕迹的能力，是衡量其在潮湿污染环境下抗漏电起痕的重要指标。

漏电起痕是指在绝缘基材表面，由于污染物和湿气形成的导电路径，可能导致电气故障。

PCB 在加工、组装及使用过程中，人工触摸成品 PCB 表面或 PCB 阻焊印刷前表面清洗不干净或焊接后未彻底清除助焊剂而造成 PCB 表面的氯离子污染，在湿度较大的环境下则会导致 CTI 性能下降，出现漏电起痕。漏电起痕可能导致 PCB 短路和性能下降。

5. 耐电弧性

耐电弧性（Arc Resistance）是指基材抵抗电弧放电而不发生损坏的能力，通常用以描述在特定测试条件下基材能抵挡出现漏电痕迹或形成导电通道的时间。良好的耐电弧性可以有效防止电路短路和其他电气故障，确保 PCB 在高电压和高频环境中的可靠性。

耐电弧性受多种因素影响，包括基材的介电强度、表面光洁度和厚度等。高介电强度的基材能够承受更高的电压而不发生击穿，从而提高整体电路的安全性和稳定性。

在选择 PCB 基材时，需考虑其耐电弧性能，尤其是在高压应用和恶劣工作环境中。优质的耐电弧基材不仅提高了产品的使用寿命，还降低了潜在的维修成本。

6. 表面电阻

表面电阻（Surface Resistance）是指在任意绝缘材料表面上两点之间施加的直流电压与通过这两点的总电流之比，通常以欧姆（Ω）为单位。它反映了基材表面在潮湿或污染条件下的导电能力，对 PCB 的抗干扰性能和长期稳定性至关重要。

7. 体积电阻率

体积电阻率（Volume Resistivity）是指在嵌入基材的两端电极上施加的直流电压与通过电极的电流之比，通常以欧姆米（Ω • m）或者欧姆厘米（Ω • cm）为单位。它反映了基材整体对电流流动的阻力，衡量基材的导电性，直接影响其在高电压或高温环境下的绝缘性能。

8. 介质击穿与击穿电压

介质击穿：是指在施加极高电压时，刚性绝缘基材沿平行于板面的方向发生电气击穿的现象。该过程通常用击穿电压进行量化。

介质击穿描述了绝缘材料在高电场作用下的行为，当电场强度超过材料的耐受能力时，绝缘失效会导致电流突然增加。这一现象反映了材料的耐电压能力和电气稳定性，是评估绝缘材料性能的重要指标。

击穿电压：是指在特定条件下，材料开始发生电击穿的最低电压值。超过这个电压，材料的绝缘性能失效，可能导致电流通过。击穿电压是介质击穿的量化表现，用于评估 PCB 基材在高电压环境下的安全性，通常以千伏（kV）表示。

电气强度：是指材料在电场作用下抵抗电击穿的能力，通常以千伏每毫米（kV/mm）或伏特每密耳（V/mil）表示。对于 PCB 基材而言，电气强度是关键性能指标，影响 PCB 在高电压环境中的安全性和可靠性。基材的类型、厚度、温度和湿度都会对其电气强度产生影响。

9. 常见材料电气性能参数

基材的电气性能取决于构成基材的主要材料特性。表 2-3 为常见材料的电气性能参数。

表 2–3　常见材料的电气性能参数

基材类型	介电常数		损耗因子		体积电阻率 /（Ω·m）		表面电阻 /Ω		电气强度 /（V/mil）
	1MHz	1GHz	1MHz	1GHz	96/35/90	24/125	96/35/90	24/125	
标准 FR-4 环氧树脂	4.7	4.3	0.025	0.016	—	—	—	—	—
FR-4 环氧树脂	—	—	—	—	10^8	10^7	10^7	10^7	1250
含填料 FR-4 环氧树脂	4.7	4.4	0.023	0.016	10^{11}	10^{10}	10^8	10^9	1250
高 T_g 值 FR-4 环氧树脂	4.7	4.3	0.023	0.018	10^8	10^7	10^7	10^7	1300
BT/ 环氧树脂共混物	4.1	3.8	0.013	0.010	10^7	10^7	10^6	10^7	1200
低介电常数环氧共混物	3.9	3.8	0.009	0.010	10^8	10^7	10^7	10^7	1200
氰酸酯	3.8	3.5	0.008	0.006	10^7	10^7	10^7	10^7	1650
聚酰亚胺	4.3	3.7	0.013	0.007	10^7	10^7	10^7	10^7	1350

注：① 基材的介电常数和损耗因子是在特定频率条件下测试得到的数据。因此，在 FR-4 环氧树脂之前添加“标准”二字，以明确区分该数据的来源和适用性。

② 体积电阻率和表面电阻参数，是指将样品分别置于特定湿度（90% 相对湿度、35℃环境中处理 96h）以及高温环境（125℃下处理 24h）的标准条件下所测得的参数。

2.3.3　机械性能

1. 铜箔剥离强度

铜箔剥离强度（Peel Strength）是指 PCB 基材与导电层（通常为铜箔）之间单位宽度上所能承受的剥离力。它反映了基材与导电层结合的牢固程度，直接关系到 PCB 在各种工作环境下的可靠性和稳定性。剥离强度可以在常态、热应力处理后、高温或者经化学试剂处理后等状态下测量。良好的剥离强度有助于确保 PCB 的长期可靠性和稳定性。剥离强度通常分为以下几种。

（1）热冲击后的抗剥离强度：是指将 PCB 样品置于（288±5）℃锡炉中漂锡 10s 后，测量铜箔从 PCB 基材剥离所需的最小垂直于板面的力。

（2）高温下的剥离强度：是指将 FR-4 基材样品放置在（125±2）℃的热流体或者热空气中，单位宽度铜箔从 PCB 基材上拉起所需要的最小垂直于板面的力。

（3）化学试剂处理后的剥离强度：是指将 FR-4 基材样品经过特定化学试剂处理后，单位宽度铜箔从 PCB 基材上拉起所需要的最小垂直于板面的力。

注：上述描述中，单位宽度通常为 1in（25.4mm）。基材的抗剥离强度与铜箔厚度有关。在相同条件下，铜箔越厚，抗剥离强度越大。基材技术资料中的参数通常基于 1 oz 铜箔的测量结果。

2. 抗弯强度

抗弯强度（Flexural Strength）也称弯曲强度，是指 PCB 基材在受到弯曲应力作用时抵抗破坏的能力。它衡量基材在两端支撑的条件下，中心承受载荷而不发生断裂的性能。抗弯强度通常分为横向抗弯强度和纵向抗弯强度，单位为 kgf/m^2 和 MPa。

3. 水分吸收率

水分吸收率是指 PCB 基材在特定环境条件下吸收水分的能力，通常以百分比表示。该指标反映了基材在潮湿环境中对水分的敏感性，直接影响其电气性能和机械强度。

水分吸收率对 PCB 的影响：较高的水分吸收率会显著影响 PCB 的可靠性和使用寿命。一方面，水分在加热时膨胀扩散，导致基材性能劣化，主要表现为基材分层；另一方面，在潮湿环境中对电路施加偏压时，水分可能在基材中迁移，降低基材抵抗导电阳极丝（CAF）生长的能力，从而导致绝缘性能下降。因此，选择合适的基材以控制水分吸收率至关重要。

4. 常见材料的物理性能参数

基材的物理性能参数直接影响 PCB 的机械强度和耐用性，基材的物理性能因构成材料而异。表 2-4 为常见基材标准铜箔剥离强度和耐电弧性数据。表 2-5 为常见材料抗弯强度参数。

表 2–4　常见基材标准铜箔剥离强度和耐电弧性数据

基材类型	玻璃化转换温度 T_g/℃	热冲击后的剥离强度 /（lbf/in）	高温下的剥离强度 /（lbf/in）	化学试剂处理后的剥离强度 /（lbf/in）	耐电弧性 /s
FR-4 环氧树脂	140	9.0	7.0	9.0	65 ～ 120
增强型 FR-4 环氧树脂	140	8 ～ 9	6 ～ 7	8 ～ 9	75 ～ 120
增强型含填料 FR-4 环氧树脂	150	8 ～ 9	6 ～ 7	8 ～ 9	80 ～ 120
高 T_g 值 FR-4 环氧树脂	175	8.5 ～ 9	6.5 ～ 7	8.5 ～ 9	70 ～ 120
增强型高 T_g 值 FR-4 环氧树脂	175	8 ～ 9	6 ～ 7	8 ～ 9	70 ～ 120
增强型含填料高 T_g 值 FR-4 环氧树脂	175	8 ～ 9	6 ～ 7	8 ～ 9	80 ～ 120
BT/ 环氧树脂共混物	190	8 ～ 9	7.5 ～ 8.5	8 ～ 9	100 ～ 120
PPO/ 环氧树脂	175	7 ～ 8	6 ～ 7	7 ～ 8	110 ～ 120
低 D_k/D_f 环氧共混 A	200	6 ～ 7	6 ～ 8	7 ～ 9	110 ～ 125
低 D_k/D_f 环氧共混 B	180	7 ～ 8	6 ～ 7	7 ～ 8	110 ～ 120
改良的低 D_k/D_f 基材	215	7.0	6.0	7.0	110
聚酰亚胺	260	7.0	6.0	7.0	120 ～ 130
无卤含填料高 T_g 值 FR-4 环氧树脂	175	7 ～ 9	6 ～ 8	7 ～ 9	120 ～ 130

注：1lbf ≈ 4.44822N。

表 2–5　常见材料抗弯强度参数

基材类型	最小纵向抗弯强度 /（kgf/m^2）	最小横向抗弯强度 /（kgf/m^2）
CEM-1	2.11×10^7	1.76×10^7
CEM-3	2.32×10^7	1.90×10^7
FR-1	8.44×10^6	7.04×10^6

续表

基材类型	最小纵向抗弯强度 /（kgf/m²）	最小横向抗弯强度 /（kgf/m²）
FR-2	8.44×10^6	7.39×10^6
FR-3	1.41×10^7	1.13×10^7
FR-4	4.23×10^7	3.52×10^7
FR-5	4.23×10^7	3.52×10^7
聚酰亚胺、编织 E 玻璃	4.23×10^7	3.17×10^7
氰酸酯、编织 E 玻璃	3.52×10^7	3.52×10^7

注：1kgf/m² = 9.80665Pa=0.00000980665MPa。

总结：在产品设计时，设计者可以通过覆铜板基材制造商提供的技术资料查看不同规格型号的具体参数，从而选择适合产品需求的基材。表 2-6 为嘉立创 4 种基材技术资料典型值参数。

表 2–6　嘉立创 4 种基材技术资料典型值参数

测试项目		单位	S1000–2M	KB–6164		NP–155F		NP–140F	
			典型值	规格值	典型值	规格值	典型值	规格值	典型值
耐热性	T_g	℃	180 ～ 185	⩾ 135	140	⩾ 150	155	—	135±5
	T_d	℃	355	⩾ 310	330	⩾ 325	350	—	310
	T260	min	>60	⩾ 30	>60	⩾ 30	>60	—	—
	T288	min	30	⩾ 5	>15	⩾ 5	>20	—	—
	T300	min	15	—	—	—	—	—	—
	CTE（Z 轴）/α_1	ppm/℃	41	⩽ 60	45	⩽ 60	40 ～ 60	—	50 ～ 60
	CTE（Z 轴）/α_2	ppm/℃	208	⩽ 300	240	⩽ 300	250 ～ 270	—	220 ～ 320
	CTE（Z 轴）/50 ～ 260℃	%	2.4	⩽ 4	3.5	⩽ 3.5	3.5	—	—
	热应力	s	>100	>10	⩾ 240	>10	>600	>10	>200
	阻燃性	等级	94V-0	94V-0	94V-0	94V-0	94V-0	94V-0	94V-0
电气性能	体积电阻	MΩ • cm	8.7×10^8	⩾ 10^6	3.1×10^9	⩾ 10^6	5×10^9 ～ 5×10^{10}	⩾ 10^6	5×10^8 ～ 5×10^9
	表面电阻	MΩ	2.2×10^7	⩾ 10^4	2.2×10^8	⩾ 10^4	5×10^8 ～ 5×10^9	⩾ 10^4	5×10^6 ～ 5×10^7
	击穿电压	kV	>45	⩾ 40	⩾ 45	⩾ 40	⩾ 60	⩾ 40	⩾ 60
	介电常数（1MHz）	—	—	⩽ 5.4	4.8	⩽ 5.4	4.6 ～ 4.8	⩽ 5.4	4.5 ～ 4.7
	介电常数（1GHz）	—	4.6		4.6	—	4.2 ～ 4.4	—	4.0 ～ 4.2
	介质损耗（1MHz）	—	—	⩽ 0.035	0.015	⩽ 0.035	0.016 ～ 0.020	⩽ 0.035	0.015 ～ 0.020
	介质损耗（1GHz）	—	0.018		0.016	—	0.014 ～ 0.016	—	0.012 ～ 0.014
	耐电弧性	s	133	⩾ 60	125	⩾ 60	⩾ 120	⩾ 60	⩾ 120

续表

测试项目		单位	S1000-2M	KB-6164		NP-155F		NP-140F	
			典型值	规格值	典型值	规格值	典型值	规格值	典型值
机械性能	铜箔剥离强度（1oz 125℃）	N/mm	—	≥ 0.7	1.4	—	—	—	—
	铜箔剥离强度（1oz Float 288℃ /10s）	N/mm	1.3	≥ 1.05	1.6	>6	8 ～ 10	>6	9 ～ 13
	铜箔剥离强度（1oz After Process Solution）	N/mm	—	≥ 0.8	1.2	—	—	—	—
	抗弯强度（LW）	MPa	567	≥ 415	550	≥ 415	480 ～ 550	≥ 415	480 ～ 550
	抗弯强度（CW）	MPa	442	≥ 345	496	≥ 345	415 ～ 480	≥ 345	415 ～ 480
	水分吸收率	%	0.08	≤ 0.5	0.1	≤ 0.35	0.05 ～ 0.10	≤ 0.35	0.05 ～ 0.10

注：典型值：是指在特定条件下，对大量产品进行测试后得到的具有代表性的数值；规格值：是指由制造商明确规定并承诺的、产品必须满足的性能指标范围。

第 3 章 / PCB 生产工艺流程与参数

3.1 嘉立创 PCB 生产工艺流程

印制电路板（PCB）是电子设备的核心组件，承担着支撑和连接电子元件的关键功能。其结构通常包括基材、钻孔、线路层、焊盘、阻焊层和字符层等，各部分共同作用，影响电路的性能和可靠性。PCB 的生产工艺流程是将设计图纸转化为实体成品的重要环节。

- 基材：提供电路的基础支撑，通常采用 FR-4 等绝缘材料。
- 钻孔：用于连接不同层之间的电路，或者为元件焊接和产品组装提供通孔。
- 线路层：通过蚀刻形成电路线路，负责信号传输，确保电路的电气连接。
- 焊盘：用于连接和焊接电子元件，确保电气连接的稳定性。
- 阻焊层：覆盖焊接焊盘以外的区域，防止短路和焊接缺陷，起绝缘和保护作用。
- 字符层：标示电路功能和元件信息，便于识别和维护。

随着 PCB 种类的多样化和技术的不断迭代，生产工艺也在持续进步。了解生产流程对于 PCB 设计工程师优化 Layout 设计和提高产品质量至关重要。本章将以嘉立创的现行工艺为例，重点介绍 FR-4 基材刚性 PCB 的生产流程，包括单面板、双面板和多层板。通过本章内容，电子工程师将能够快速建立 PCB 生产的整体框架，并深入理解从设计到成品的每个环节及其协同作用。

3.1.1 单面 PCB 生产工艺流程

1. 单面 PCB 结构

单面 PCB 是指含有一层导电线路的 PCB，适用于简单电路和低密度的应用。单面 PCB 结构如图 3-1 所示。

2. 单面 PCB 主要生产工艺流程

单面 PCB 除设计外，其主要生产工艺流程如图 3-2 所示。

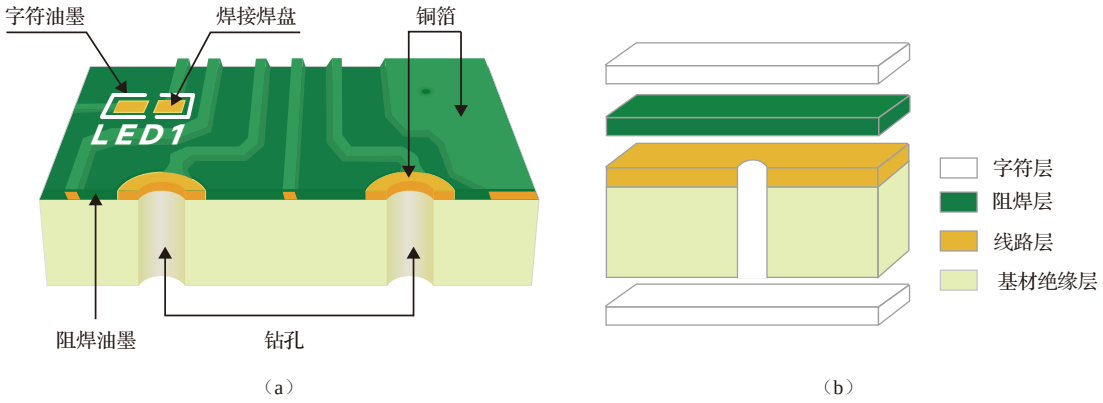


图 3-1　单面 PCB 结构

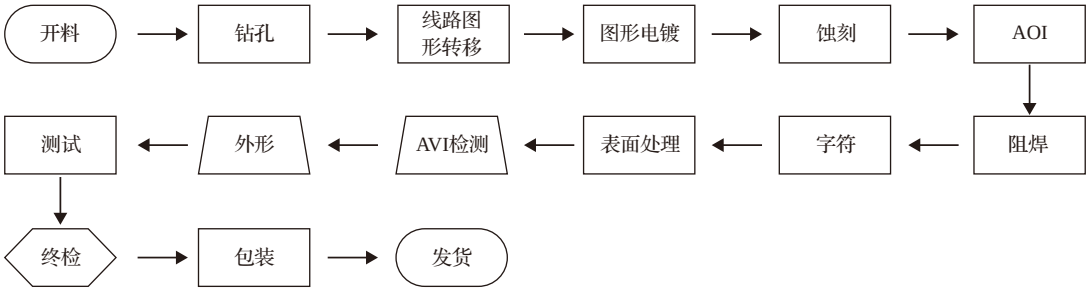


图 3-2　单面 PCB 生产工艺流程

3.1.2　双面 PCB 生产工艺流程

1. 双面 PCB 结构

双面 PCB 是指两面均有导电线路的 PCB，适合于中等复杂度的电路，能够有效利用空间。双面 PCB 结构如图 3-3 所示。

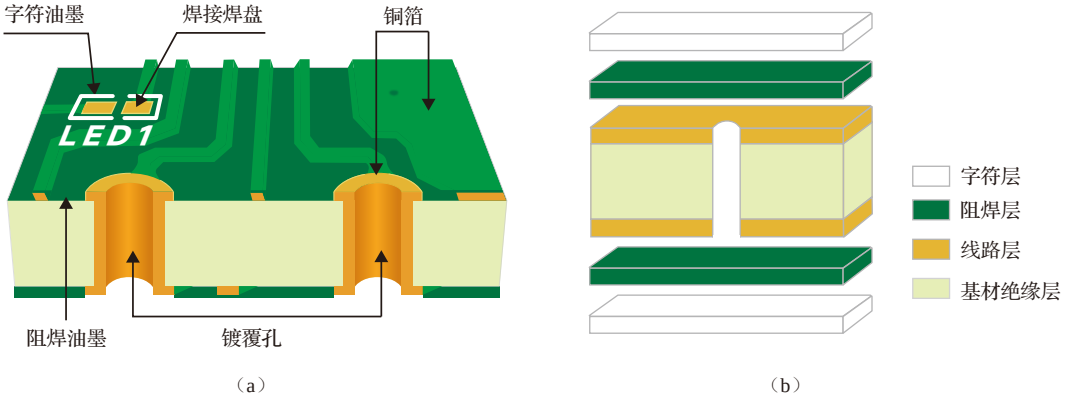


图 3-3　双面 PCB 结构

2. 双面 PCB 主要生产工艺流程

双面 PCB 除设计外，其主要生产工艺流程如图 3-4 所示。

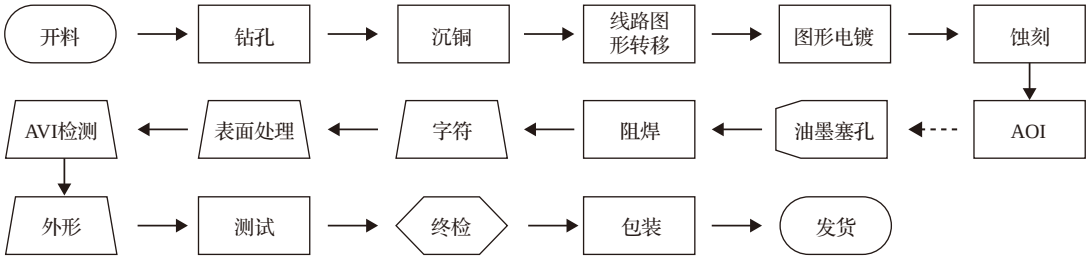


图 3-4　双面 PCB 主要生产工艺流程

注：⟶ 是指普通双面 PCB 工艺流程；- - -> 是指油墨塞孔双面 PCB 工艺流程（可选项）。

3.1.3　4 层 PCB 生产工艺流程

1. 4 层 PCB 结构

4 层 PCB 是指含有 4 层导电线路的 PCB，通常用于复杂电路设计，能够提供更好的信号完整性和更高的电路密度。4 层 PCB 结构如图 3-5 所示。

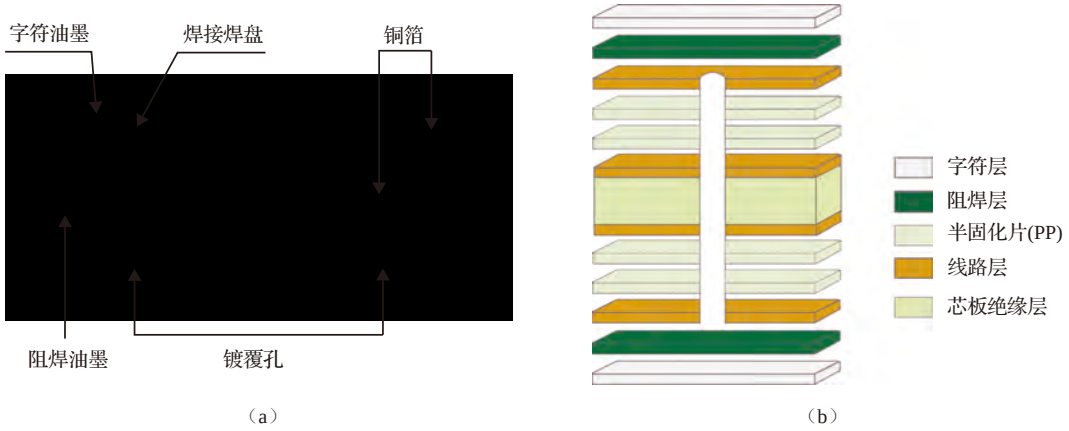


图 3-5　4 层 PCB 结构

2. 4 层 PCB 主要生产工艺流程

4 层 PCB 除设计外，其主要生产工艺流程如图 3-6 所示。

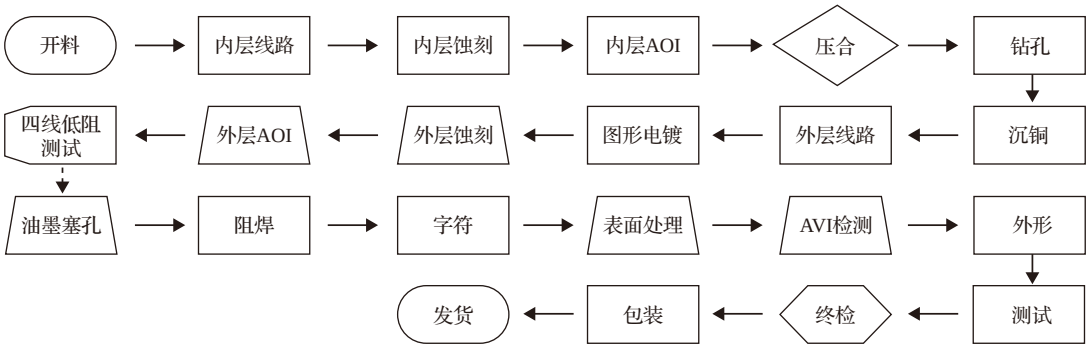


图 3-6　4 层 PCB 主要生产工艺流程

注：⟶ 是指普通 4 层 PCB 工艺流程；- - -> 是指油墨塞孔 4 层 PCB 工艺流程（嘉立创 4 层板默认按“油墨塞孔”工艺制造）。

3.1.4　6 层及以上 PCB 生产工艺流程

1. 6 层 PCB 结构

6 层 PCB 是指含有 6 层导电线路的 PCB，能够实现更高的电路密度和复杂度，适用于高性能设备。6 层 PCB 结构如图 3-7 所示。

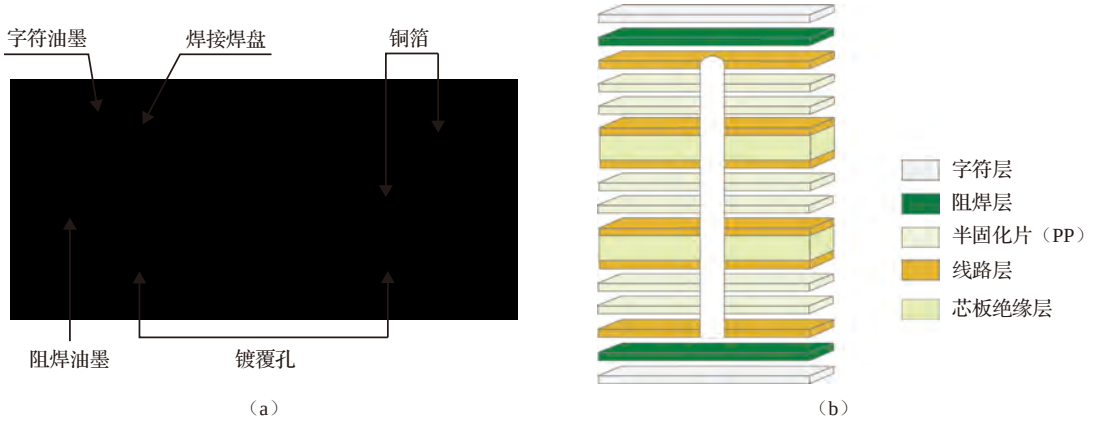


图 3-7　6 层 PCB 结构

2. 6 层及以上 PCB 主要生产工艺流程

6 层及以上 PCB 除设计外，其主要生产工艺流程如图 3-8 所示。

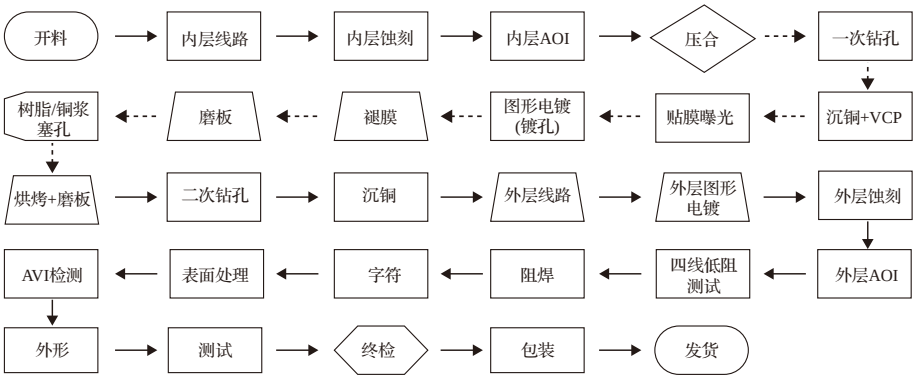


图 3-8　6 层及以上 PCB 主要生产工艺流程

注：⟶ 是指普通多层 PCB 工艺流程；- - -> 是指盘中孔多层板工艺流程（嘉立创 6 层及以上 PCB 默认按“树脂塞孔 + 电镀盖帽”工艺制造）。

在制作含埋、盲孔的高多层 PCB 时，在常规多层板流程的内层制作阶段，先采用激光或机械方法钻出埋孔并完成金属化；层压后，再在外层板钻出盲孔，并进行盲孔金属化处理，以此实现复杂层间连接。

3.2　生产流程简介

在 PCB 生产过程中，每个工序都有特定的目标和任务。本节以嘉立创生产工艺为背景

案例，对主要的生产工序做简单介绍。

1. 开料

开料工序是利用自动开料机将大尺寸的覆铜板切割成符合生产需求的特定规格基材的过程。此过程不仅包括切割，还涉及对切割后的基材进行磨边处理，以及根据生产需求进行叠板和打销钉，方便后续钻孔定位，为后续工序的顺利进行奠定基础。开料机及开料前、后覆铜板如图 3-9 所示。扫描图 3-9 中二维码可查看开料视频。

（a）开料机　（b）开料前的覆铜板　（c）开料后的覆铜板

图 3-9　开料机及开料前、后的覆铜板

2. 钻孔

钻孔工序采用数控钻孔机，根据工程钻孔资料，在覆铜板上预定的位置精确钻出孔洞。这些孔洞对于实现 PCB 各层之间的电气连接以及为电子元件提供固定位置至关重要。数控钻孔机及钻孔前、后的覆铜板如图 3-10 所示。扫描图 3-10 中二维码可查看钻孔视频。

（a）数控钻孔机　（b）钻孔前的覆铜板　（c）钻孔后的覆铜板

图 3-10　数控钻孔机及钻孔前、后的覆铜板

3. 沉铜

在钻孔完成后，PCB 将进入沉铜工序。对孔壁进行膨松、去钻污（除胶渣）、中和、整孔、微蚀、预浸、活化、还原、水洗等前处理后，通过化学反应将化铜缸中的铜离子沉积在铜面和孔壁上，形成均匀的铜层。这一步骤是实现钻孔电气导通功能的关键。沉铜生产线及钻孔沉铜前、后的覆铜板如图 3-11 所示。扫描图 3-11 中二维码可查看沉铜视频。

4. 干膜

在沉铜工艺后，PCB 经过彻底的清洗和烘干，为接下来的图形转移步骤做准备。此时，会在铜面上贴附一层干膜，它将在后续的曝光步骤中起到关键作用。

干膜是一种感光材料，能在强紫外光线照射下发生聚合反应使干膜初步固化。在曝光过程中，未被光线照射的区域将保持未固化状态，便于后续的显影步骤。贴膜机及贴干膜前、

后的覆铜板如图 3-12 所示。

（a）沉铜生产线

（b）沉铜前（孔壁无铜箔）

（c）沉铜后（孔壁有铜箔）

图 3-11　沉铜生产线及钻孔沉铜前、后的覆铜板

（a）贴膜机

（b）贴干膜前

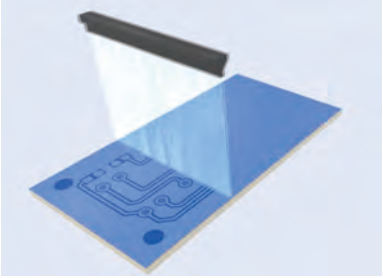
（c）贴干膜后（线路曝光前）

图 3-12　贴膜机及贴干膜前、后的覆铜板

5. 线路曝光

线路曝光是图形转移过程的重要部分。在这一步骤中，利用激光直接成像（LDI）技术将 CAM 资料投射到覆有干膜的 PCB 上。干膜在强紫外光线照射下发生聚合反应实现初步固化，为后面显影打下基础。LDI 线路曝光设备、示意图及曝光后的 PCB 如图 3-13 所示。扫描图 3-13 中二维码可查看线路曝光与显影视频。

（a）LDI 线路曝光设备



（b）LDI 线路曝光示意图

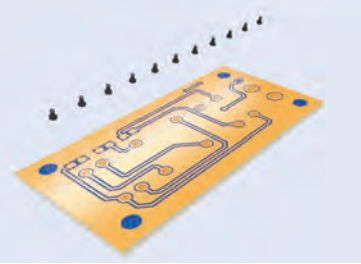
（c）线路曝光后（显影前）

图 3-13　LDI 线路曝光设备、示意图及曝光后的 PCB

6. 线路显影

线路显影是指使用显影液溶解曝光过程中未光固化的干膜，暴露出铜面，形成设计所需的电路图形。这一过程确保了电路图案精确地转移到覆铜板上。线路显影设备、示意图及显影后的 PCB 如图 3-14 所示。

（a）线路显影设备



（b）线路显影示意图

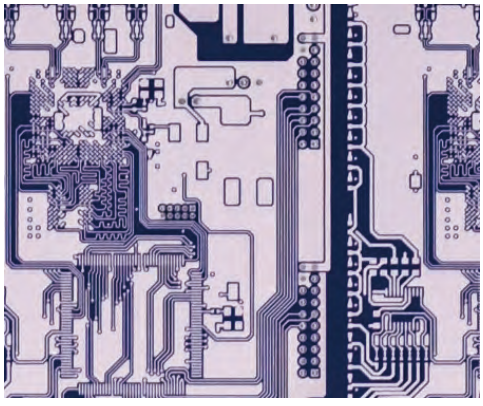
（c）线路显影后的 PCB（电镀前）

图 3-14　线路显影设备、示意图及显影后的 PCB

7. 图形电镀

图形电镀是将经线路显影后的 PCB 安装到电镀生产线上，经过除油、酸洗、微蚀和清洗等前处理后，再通过电化学反应在暴露的线路和孔壁上镀覆一层铜，随后在铜层表面镀上一层锡，以保护线路和孔壁铜箔在后面蚀刻工序中免受蚀刻液的侵蚀。图形电镀设备及电镀后的 PCB 如图 3-15 所示。扫码图 3-15 中二维码查看图形电镀视频。

（a）电镀生产线



（b）电镀后的 PCB（蚀刻前）

图 3-15　图形电镀设备及电镀后的 PCB

8. 褪膜

褪膜步骤中，将经过图形电镀的 PCB 放于褪膜设备中，褪膜剂与干膜发生化学反应，再通过清洗方式除掉剩余干膜，露出未被镀锡保护的铜箔。褪膜与蚀刻通常在同一生产线中进行。

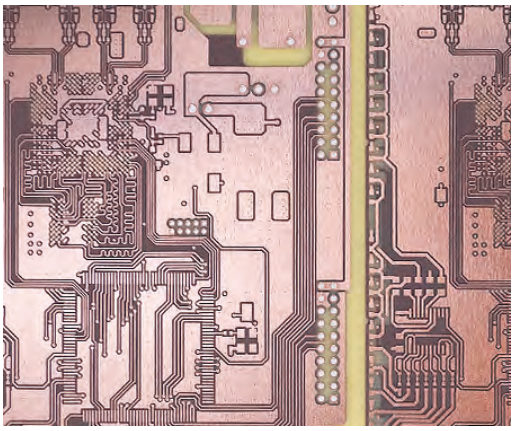
9. 蚀刻

蚀刻是指使用蚀刻药水腐蚀掉褪膜后暴露的铜箔，保留镀锡层下的铜箔，再褪去镀锡层，获得设计所需的线路图形和金属化孔。蚀刻设备及蚀刻后的 PCB 如图 3-16 所示。扫描图 3-16 中二维码可查看蚀刻与 AOI 检测视频。

10. 线路 AOI 检测

线路 AOI 检测是指使用高分辨率摄像头和图像处理算法来检查 PCB 线路的方法。它可以快速检测出线路残铜、缺口、开路或者短路等与 CAM 资料不一致的缺陷，生成检测结果，供检测人员分析和检验。AOI 检测设备及图形对比如图 3-17 所示。

（a）蚀刻生产线



（b）蚀刻后的 PCB

图 3-16　蚀刻设备及蚀刻后的 PCB

（a）AOI 自动扫描设备

（b）AOI 图形对比

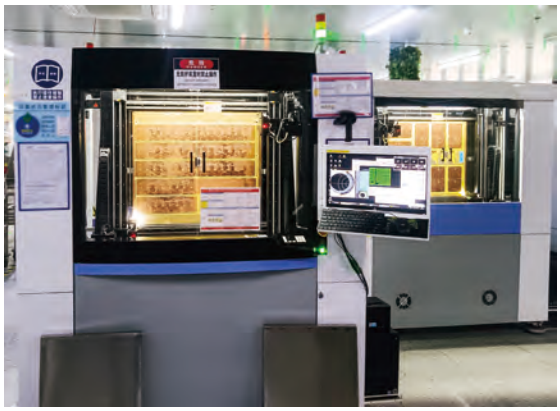
图 3-17　AOI 检测设备及图形对比

11. 四线低阻测试

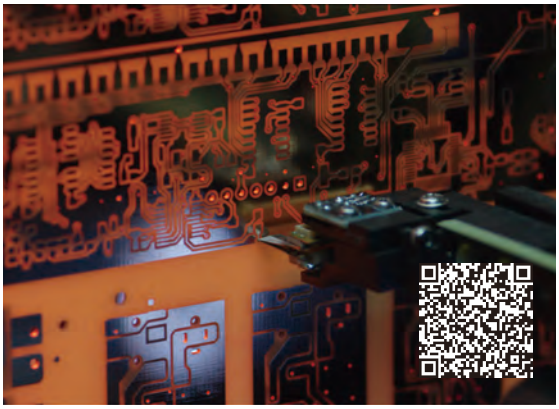
四线低阻测试也称四线开尔文测量，是一种通过恒定电流源施加恒定电流，测量电压引线之间的电压降，从而计算出电阻值的测量方法。与飞针测试机、测试架和万用表等常规测试方法的欧姆级精度相比，四线低阻测试能提供毫欧级的高精度测量，适合检测生产过程中可能出现的坏孔问题，这些问题常常无法通过飞针测试机和测试架测试发现。四线低阻测试设备及测试细节如图 3-18 所示。扫描图 3-18 中二维码可查看四线低阻测试视频。

12. 层压

层压工艺主要用于多层板生产。该工艺在完成内层线路后，先通过特殊定位方法，将 PCB 内层芯板、预浸渍材料（PP）和外层铜箔按设计顺序堆叠。随后，按照工艺规定的程序和条件进行加热层压，形成完整的多层 PCB 结构。最后，使用专业设备切除压合后的“流胶废料边”，制备待加工的多层板基材，以便进行外层线路曝光、显影和蚀刻来制造外层线路。层压设备、层压叠层示意图及压合后的基材如图 3-19 所示。扫描图 3-19 中二维码可查看层压视频。



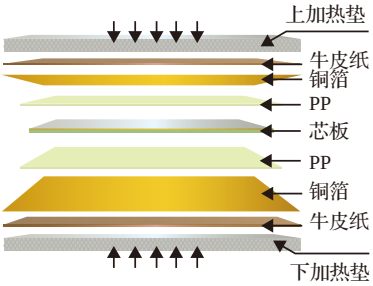
（a）四线低阻测试机



（b）四线低阻测试细节

图 3-18　四线低阻测试设备及测试细节

（a）层压设备



（b）层压叠层示意图

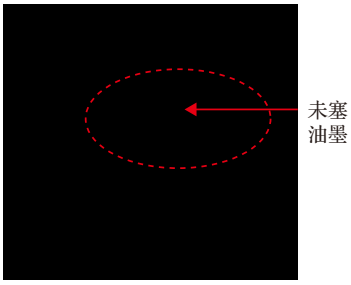
（c）压合后的基材

图 3-19　层压设备、层压叠层示意图及压合后的基材

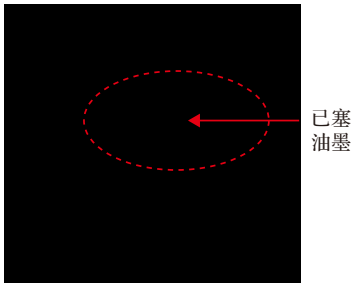
13. 油墨塞孔

油墨塞孔是指在阻焊印刷前，先通过激光在铝片上打孔，再将钻好孔的铝片制成塞孔网板，然后使用塞孔机将油墨塞入到对应的孔内。完成油墨塞孔后，再进行整板油墨印刷，并通过初步预烤固化，确保板面油墨的平整性和一致性。油墨塞孔设备及过孔塞油墨前、后的 PCB 如图 3-20 所示。扫描图 3-20 中二维码可查看油墨塞孔视频。

（a）油墨塞孔设备



（b）过孔未塞油墨



（c）过孔已塞油墨

图 3-20　油墨塞孔设备及过孔塞油墨前、后的 PCB

14. 树脂 / 铜浆塞孔

树脂 / 铜浆塞孔是指在 PCB 制造过程中，采用特殊工艺，将需塞孔的钻孔金属化后，把预先通过激光钻孔做好的铝片制作成铝片网板，安装到真空塞孔机上。然后，将树脂 / 铜浆塞入对应的孔中，经过高温固化和树脂研磨后，使孔口平整。最后，通过电镀技术形成电镀

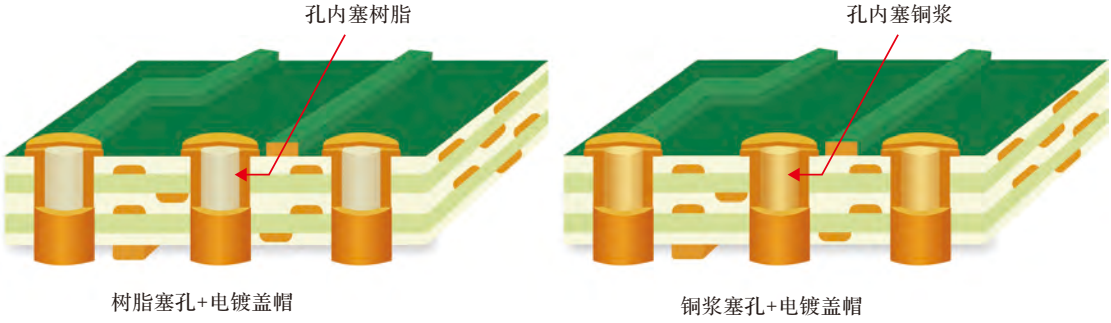
盖帽，将钻孔后的焊盘还原成一个整体，实现过孔的导电性、焊盘的平整性和完整性，这也被称为盘中孔工艺。盘中孔塞孔设备及过孔塞树脂前、后的 PCB 如图 3-21 所示。扫描图 3-21 中二维码可查看树脂塞孔视频。盘中孔工艺效果示意图如图 3-22 所示。

（a）树脂塞孔真空丝印机

（b）过孔未塞树脂

（c）过孔已塞树脂

图 3-21　盘中孔塞孔设备及过孔塞树脂前、后的 PCB



（a）　　（b）

图 3-22　盘中孔工艺效果示意图

15. 阻焊

制作好线路的 PCB 经前处理后，整板印刷阻焊油墨，再通过低温烘烤至半固化状态；然后使用 LDI/LED 曝光技术对需保留的油墨进行光学固化；最后经显影清除未固化的油墨，露出焊盘或阻焊开窗区域，明确定义出可焊区域与绝缘区域。阻焊设备及曝光显影前、后的 PCB 如图 3-23 所示。扫描图 3-23 中二维码可查看阻焊制造视频。

（a）阻焊 LDI 曝光机

（b）待阻焊曝光显影的 PCB

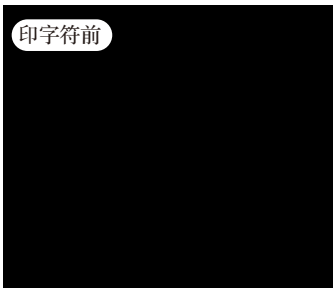
（c）阻焊曝光显影后的 PCB

图 3-23　阻焊设备及曝光显影前、后的 PCB

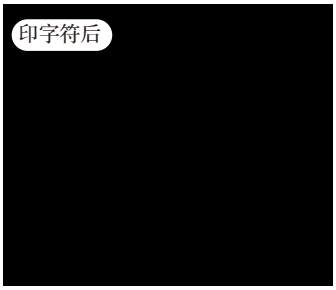
16. 字符

字符加工是在 PCB 表面涂覆阻焊油墨后，采用网板印刷或喷印等方法将文字标识（字符）添加到 PCB 表面，再进行固化处理。这些标识有助于 PCB 的追踪和识别。字符喷印设备及字符加工前、后的 PCB 如图 3-24 所示。扫描图 3-24 中二维码可查看字符喷印视频。

（a）字符喷印机



（b）字符网板丝印机



（c）印字符前、后的 PCB

图 3-24　字符喷印设备及字符加工前、后的 PCB

17. 表面处理

表面处理是通过表面化学反应或电化学反应的方式，在 PCB 裸露的铜箔表面形成一层紧密结合的（金属等）覆盖层，提高 PCB 的焊接可靠性和导电性，并为 PCB 焊盘表面提供有效保护。

嘉立创 FR-4 PCB 的表面处理主要包括喷锡工艺、沉镍金工艺、OSP 工艺等。

1）喷锡工艺

喷锡工艺又称热风整平工艺，通过将 PCB 浸入熔融焊锡中，使焊盘和金属化孔壁铜层被焊料润湿，将 PCB 从锡槽中取出时，通过热风去除多余锡料，形成相对平整、均匀和光亮的焊料涂覆层。喷锡设备及 PCB 喷锡前、后的表面焊盘如图 3-25 所示。扫描图 3-25 中二维码可查看喷锡视频。

喷锡工艺流程：前处理→助焊剂→浸锡→整平→冷却→清洗→干燥→质检。

（a）喷锡设备

（b）焊盘喷锡前

（c）焊盘喷锡后

图 3-25　喷锡（热风整平）设备及 PCB 喷锡前、后的表面焊盘

2）沉镍金工艺

沉镍金工艺简称沉金工艺，是指对经过前处理以去除表面油污和氧化物等杂质的 PCB，经过预浸与活化后再依次浸入含镍和含金的化学溶液中，通过化学还原反应，首先在焊盘和

金属化孔的铜层上沉积镍层，再沉积金层，最终形成保护焊盘和孔壁铜箔的镍金合金层。沉镍金设备及沉镍金前、后的 PCB 表面焊盘如图 3-26 所示。扫描图 3-26 中二维码可查看沉镍金视频。

沉镍金工艺流程：除油→水洗→酸洗→水洗→微蚀→水洗→预浸→活化→水洗→化学沉镍→水洗→化学沉金→水洗→干燥→质检。

（a）沉镍金生产线

（b）沉镍金前的 PCB

（c）沉镍金后的 PCB

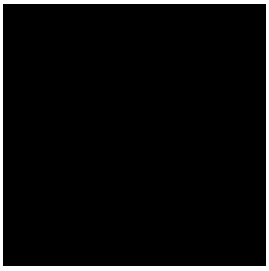
图 3-26　沉镍金设备及沉镍金前、后的 PCB 表面焊盘

3）OSP 工艺

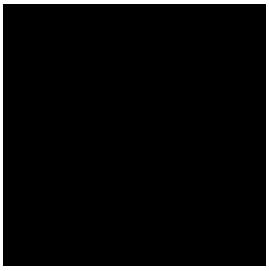
OSP 工艺又称抗氧化工艺，是一种抗氧化处理方法，通过将 PCB 浸入 OSP 药水中，药水中的有机化合物与焊盘和金属化孔的铜层表面发生化学反应，形成一层有效防止铜氧化的保护薄膜。OSP 设备及 OSP 前、后的 PCB 表面焊盘如图 3-27 所示。

OSP 工艺流程：除油→水洗→酸洗→水洗→微蚀→水洗→预浸→ OSP 处理→水洗→烘干→质检。

（a）OSP 生产线



（b）过 OSP 前



（c）过 OSP 后

图 3-27　OSP（抗氧化）设备及 OSP 前、后的 PCB 表面焊盘

18. AVI 检测

AVI 检测（自动视觉检测）：主要用于 PCB 外观检测，利用图像处理和计算机视觉技术自动扫描、收集和分析 PCB 表面图像，识别表面缺陷并反馈结果，从而确保 PCB 的质量和可靠性。嘉立创在内层蚀刻、外层蚀刻、树脂塞孔、喷锡、沉金等工序中均配备了 AVI 检测。AVI 检测设备如图 3-28 所示。扫描图 3-28 中二维码可查看 AVI 检测设备视频。

19. 测试

测试是指通过测试设备（如飞针测试、测试架等）将 PCB 与 CAM 工程资料中的线路通断进行对比，检测生产过程中是否出现线路开路或短路的不良现象，并提供有关故障的详细信息，确保产品电气性能的完整性和可靠性。飞针测试设备与测试架测试设备如图 3-29 所示。扫描图 3-29 中二维码可查看 PCB 测试视频。

（a）线路 AVI 检测

（b）喷锡外观 AVI 检测

图 3-28　AVI 检测设备

（a）飞针测试设备

（b）测试架测试设备

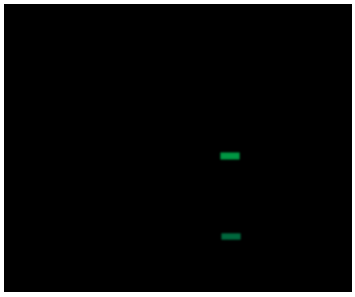
图 3-29　飞针测试设备与测试架测试设备

20. 外形加工

外形加工是指通过数控锣板机、V 割机或斜边机对 PCB 外形进行处理，包括将 PCB 从拼板切割成小板，并按要求进行 V 割或边缘处理，确保外形符合设计要求。

（1）锣板分割：通过使用锣刀切割或铣削的方法，将 PCB 从排版生产的工作板上分割成 Set 或 PCS 尺寸。锣板设备及锣板前、后的 PCB 如图 3-30 所示。扫描图 3-30 中二维码可查看 PCB 外形锣边视频。

（a）数控 CNC 铣床（锣板机）



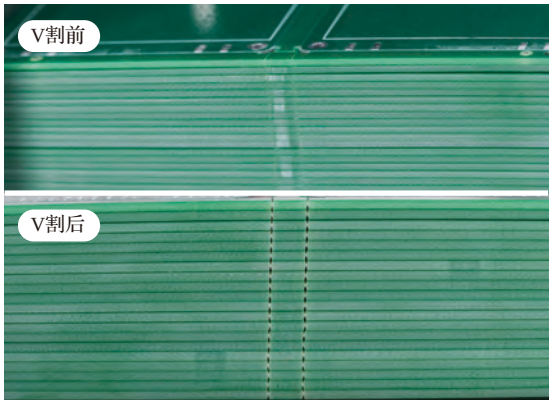
（b）锣板前的 PCB

（c）锣板后的 PCB

图 3-30　锣板设备及锣板前、后的 PCB

（2）V 割：使用 V 割工艺将需要进行 V 割的 Set 拼板，沿着单个 PCS 的外形线进行 V 槽切割，同时保留一定的厚度以确保 Set 结构保持连接形成一个整体。在元器件组装完成后，可以沿着 V 槽位置将其掰开，分割成单个 PCS 的 PCB。V 割设备及 V 割前、后的 PCB 侧面案例图如图 3-31 所示。扫描图 3-31 中二维码可查看 PCB V 割视频。

（a）V 割机

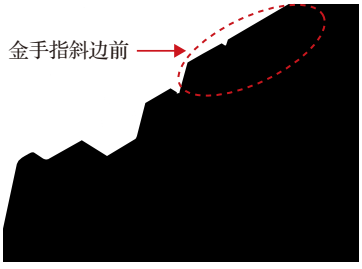


（b）V 割前、后 PCB 侧面案例图

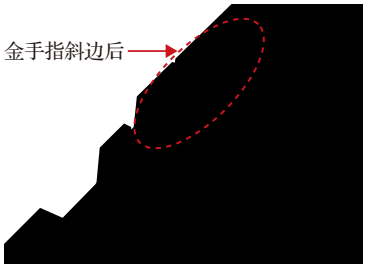
图 3-31　V 割设备及 V 割前、后的 PCB 侧面案例图

（3）斜边：板边有接触片（如金手指等）的 PCB 通过斜边设备按一定的角度切铣掉部分板边基材，让接触片板边两面达到倾斜状态。斜边设备及金手指斜边前、后形态如图 3-32 所示。扫描图 3-32 中二维码可查看 PCB 金手指斜边视频。

（a）金手指斜边机



（b）金手指斜边前形态



（c）金手指斜边后形态

图 3-32　斜边设备及金手指斜边前、后形态

21. 终检

通过 FQC 工序，对 PCB 进行全面的质量验证、功能测试、可靠性评估和缺陷筛选，确保产品的质量、性能和可靠性达到预期要求，确保 PCB 产品质量。部分终检场景如图 3-33 所示。

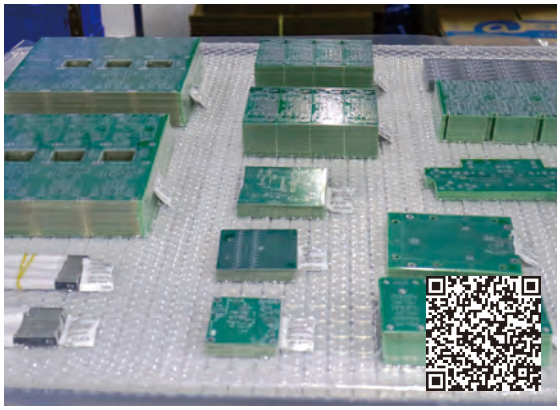
22. 包装

包装是指对符合发货条件的 PCB 产品进行包装与封装，涵盖外部包装选择、防潮防震处理、真空包装应用、标识标签设置、防尘措施及包装设计规划等。恰当的成品包装有利于存储、运输，并交付给客户。PCB 内、外包装如图 3-34 所示。扫描图 3-34 中二维码可查看 PCB 包装视频。

（a）测量 PCB 厚度

（b）检验 PCB 外观

图 3-33　部分终检（FQC）场景



（a）真空内包装

（b）外包装

图 3-34　PCB 内、外包装

23. 发货

发货是指将完成包装的 PCB 产品，通过不同的运输途径从制造商处交付给客户的过程。

总结：PCB 的制造是一个复杂而精细的过程，涉及众多专业和细致的工序。本节对主要的生产流程进行了简要介绍，目的是提供一个从设计概念到成品实现的宏观视角，并突出每个主要工序的关键作用。希望上述介绍，能让你对 PCB 的制造步骤有一个初步了解，并在设计时充分考虑生产环节的实际需求和限制。这将有助于你优化设计，提高产品的质量和可制造性，从而在激烈的市场竞争中脱颖而出。

3.3　嘉立创 PCB 工艺参数

PCB 工艺参数是指在 PCB 设计和制造过程中使用的关键参数，用于确保 PCB 的质量、可靠性和可制造性，主要包括线宽、线距、孔径、过孔间距、线与孔的间距、焊盘直径和间

距等。这些参数的选择和控制对于实现设计要求、满足电气性能、保证制造可靠性至关重要。在此，我们先了解两个概念：常规工艺参数和极限工艺参数。

（1）常规工艺参数

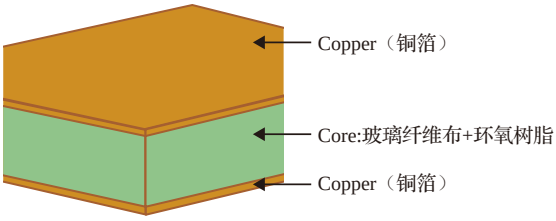
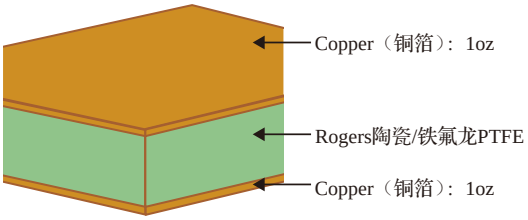
常规工艺参数是指在正常制造条件下使用的参数范围，适用于大多数标准 PCB 设计和制造。这些参数提供可靠的工艺性能，满足一般的电气和机械要求。常规工艺参数的设计不会对 PCB 制程中的生产效率、品质直通率和生产成本产生显著影响。后文简称“常规参数”。

（2）极限工艺参数

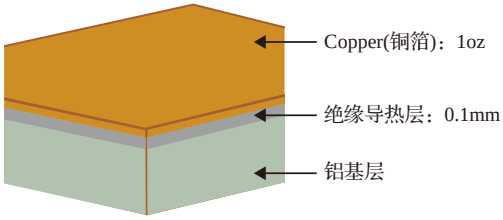
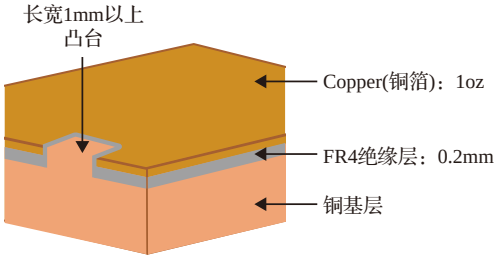
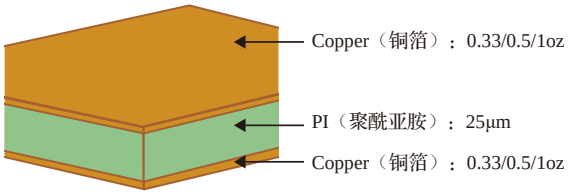
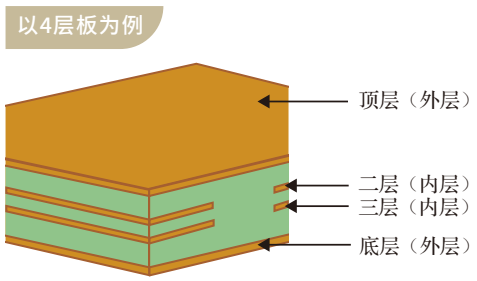
极限工艺参数是为了满足复杂 PCB 中无法回避的特殊设计和制造而设定的参数范围。它涉及更精细、更复杂的工艺步骤和更高的制造要求。不同的 PCB 制造商因设备和工艺不同，其能加工的极限工艺参数也不同。一般而言，PCB 制造商官方工艺参数中标明的最小值均为极限参数，表示有能力生产此类参数的 PCB。后文简称“极限参数”。

PCB 制造的工艺参数直接影响制造可行性和最终产品质量，与 PCB 设计密切相关。Layout 设计工程师应了解并融入这些参数，以确保准确高效的 PCB 设计，降低制造成本，提高品质直通率。不同的 PCB 制造商因自身的设备和工艺不同，会有各自的工艺参数，以表 3-1 中所示的嘉立创 PCB 工艺参数为例，我们会发现其中有一些最小参数，这些最小参数是 PCB 制造商生产可达到的极限值，从产品良率和成本角度出发，设计 PCB 时，应尽量大于最小参数。

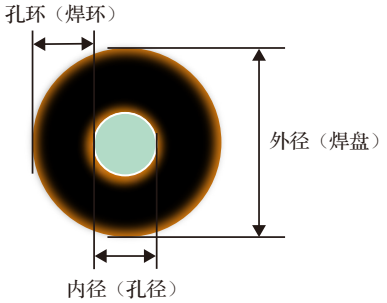
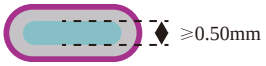
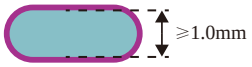
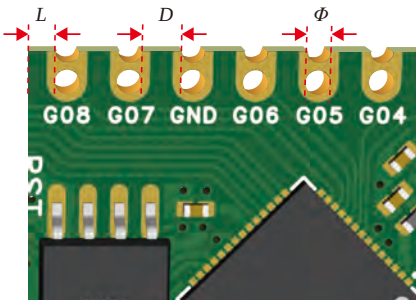
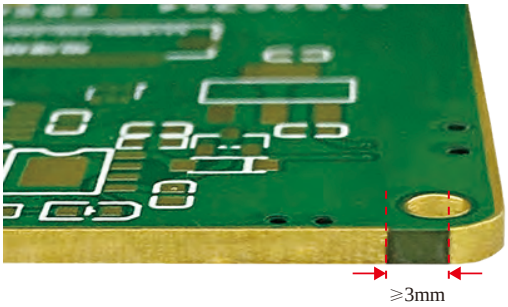
表 3–1　嘉立创 PCB 工艺参数

项目	项目能力	工艺详解	图文说明
层数	1 ～ 32 层	层数，是指 PCB 中的导电线路层数	目前只做通孔板（不做盲埋孔板）（此工艺参数列表未特别注明均是指 FR-4 板）
层压结构	4 层、6 层、8 层、10 层、12 层、14 层、16 层、18 层、20 层（最高 32 层）	多层板层压结构的选择和阻抗计算方法请查看 5.2.1 节内容；线路铺铜注意事项请查看 5.2.2 节内容	嘉立创多层板支持阻抗设计（阻抗计算神器），阻抗公差：±10%
板材类型	FR-4（A 级）	板料有“南亚”“建滔 KB”“生益”“宏瑞兴”等 A 级板料	
	高频板	目前制作“双面高频板（1oz）”：Rogers（罗杰斯），PTFE（铁氟龙）	

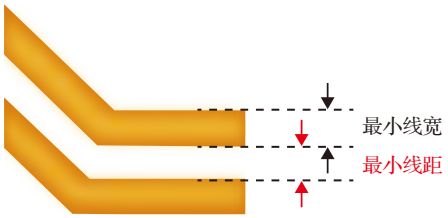
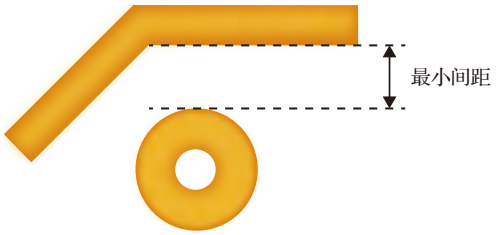
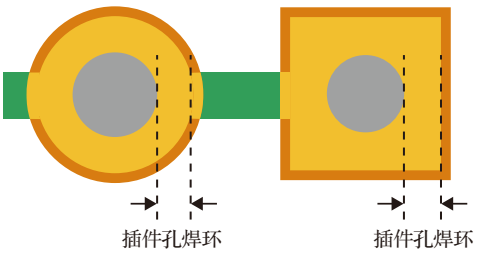
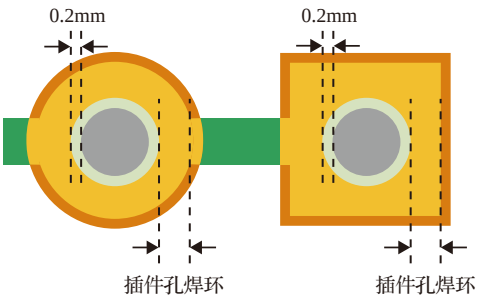
续表

项目	项目能力	工艺详解	图文说明
板材类型	铝基板	目前制作“单面铝基板”	
	铜基板	目前制作“单、双面和 4 层热电分离铜基板”（凸台长宽≥ 1mm）	
	FPC 软板	目前制作“单、双面和 4 层软板”	
整体制程	最大尺寸	FR-4：670mm×600mm 高频板：590mm× 438mm 铝基板：602mm× 506mm 铜基板：480mm× 286mm	所列数据适合≥ 0.8mm 板厚，板厚 <0.8 mm 的 FR-4 最大尺寸为 500mm×600mm； FR-4 单面板最大接单尺寸：606mm×510mm； 1oz 铜厚的 FR-4 双面板极限接单尺寸：1020mm×600mm，但需要按工艺和板厚指定到对应工厂进行生产
	最小尺寸	常规：3mm×3mm（半孔工艺 / 包边工艺长宽需要≥ 10mm）	所列数据适合≥ 0.6mm 板厚，板厚 <0.6mm 的需评估； 小尺寸板建议拼板以便加工
	板厚范围	0.4 ～ 4.5mm	FR-4 生产板厚：0.4/0.6/0.8/1.0/1.2/2.0mm（12 层以上可以做 2.5 ～ 4.5mm，以系统可选项为准）
	外层铜厚	成品铜厚：双面板（1oz、2oz、2.5oz、4.5oz）；多层板（1oz、2oz）	
	内层铜厚	成品铜厚：0.5oz，1oz，2oz	
	线路制作	图形电镀（镀锡正片工艺）	嘉立创所有订单采用正片工艺制造，负片工艺的品质隐患详见 4.4 节
	阻焊类型	感光油墨：绿色、紫色、红色、黄色、蓝色、白色、黑色	感光油墨是现在用得最多的类型，热固油一般用于低档的单面纸板

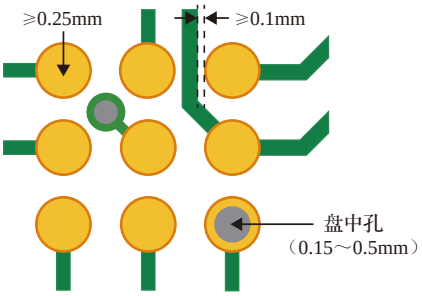
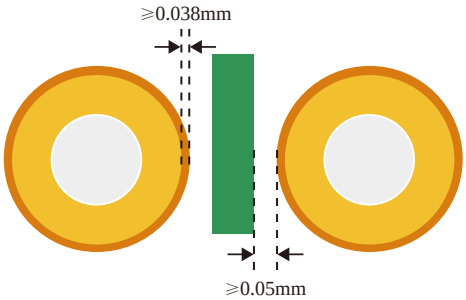
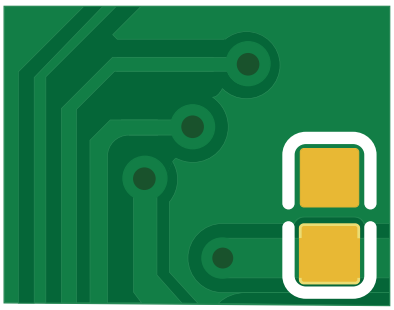
续表

项目	项目能力	工艺详解	图文说明
整体制程	表面镀层	有铅喷锡，无铅喷锡，沉金	FR-4 板料均可制作此三种工艺（6 层以上多层板及高频板为沉金）； 板厚≤ 0.4mm 不做喷锡； 铝基板仅做喷锡，铜基板仅做 OSP
钻孔	钻孔孔径	单面板：0.3 ～ 6.3mm 双面板：0.15 ～ 6.3mm 多层板：0.15 ～ 6.3mm	≥ 6.5mm 钻头的孔采用扩孔 / 锣边方式加工； 双面板、多层板最小钻孔为 0.15mm（非常规费用高，请慎用）； 铝基板最小钻孔为 0.65mm，铜基板最小钻孔为 1.0mm； 已开通沉头孔、背钻工艺
	孔径公差	插件孔直径：+0.13/−0.08mm； 压接孔直径：±0.05mm（仅限多层沉金板）	例如：设计为 0.6mm 的孔，实物板的成品孔径为 0.52 ～ 0.73mm 是合格的（为避免油墨或喷锡堵孔，插件孔直径应不小于 0.5mm）
	最小过孔 / 焊盘	单面板：0.3mm（内径）/0.5mm（外径） 双面板：0.15mm（内径）/ 0.25mm（外径） 多层板：0.15mm（内径）/ 0.25mm（外径） ① 外径必须比内径大 0.1mm，推荐 0.15mm 以上； ② 最小孔推荐 0.2mm 以上； ③ 双面板非常规孔径，过孔须塞油墨（树脂）	
	最小金属化槽孔	槽宽：0.5mm（槽长宜≥ 2 倍槽宽）	
	最小非金属化孔	槽宽：1.0mm	
	半孔工艺	半孔是指板边半个孔且孔壁有铜，多用于焊接子母板： ① 半孔孔径（*Φ*）：≥ 0.6mm； ② 半孔边到板边（*L*）：≥ 1mm； ③ 半孔边到半孔边（*D*）：≥ 0.6mm； ④ 单板最小尺寸：10mm×10mm； ⑤ 半孔工艺板厚：≥ 0.6mm	
	包边工艺	包边是指板侧面全部或部分区域包铜沉金（暂不做喷锡）： ① 包边工艺最小尺寸：10mm×10mm； ② 包边工艺板厚：≥ 0.6mm； ③ 所有板边全部包边的，需要 3mm 宽无铜连接位（至少 3 组，尺寸大的则需要 4 组及以上）	

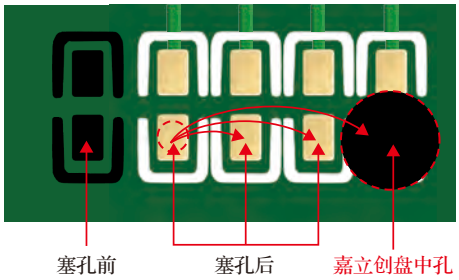
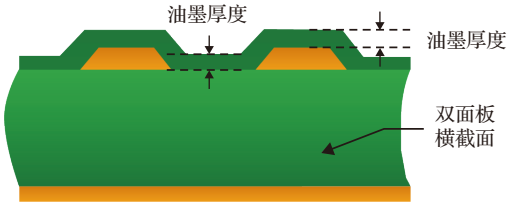
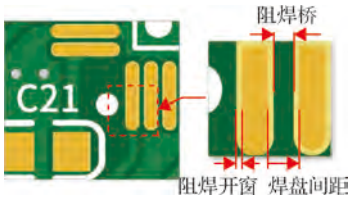
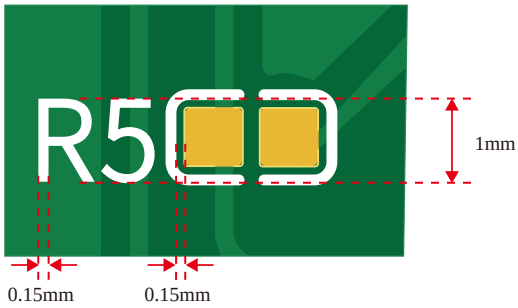
续表

项目	项目能力	工艺详解	图文说明
线路	最小线宽 / 线距（1oz）	单、双面板：0.10mm/0.10mm（4mil/ 4mil）； 多层板：0.09mm/0.09mm（3.5mil/ 3.5mil）； BGA 处局部线宽可做 3mil	
	最小线宽 / 线距（2oz）	双面板：0.16mm/0.16mm（6.5mil/ 6.5mil）； 多层板：0.16mm/0.16mm（6.5mil/ 6.5mil）	
	最小线宽 / 线距（2.5oz）	双面板：0.2mm/0.2mm（8mil/ 8mil）	
	最小线宽 / 线距（3.5oz）	双面板：0.25mm/0.25mm（10mil/ 10mil）	
	最小线宽 / 线距（4.5oz）	双面板：0.3mm/0.3mm（12mil/ 12mil）	
	线宽公差	±20%	例如：线宽 0.1mm，实板线宽为 0.08 ～ 0.12mm 是合格的
	焊盘到导线边缘间距	≥ 0.1mm（尽量大于此参数），BGA 焊盘到导线边缘最小间距为 0.09mm	
	金属化插件孔焊环（1oz）	双面板：≥ 0.25mm（建议值），极限值为 0.18mm； 多层板：0.20mm（建议值），极限值为 0.15mm	
	非金属化插件孔焊环	设计焊环≥ 0.45mm（建议值），设计焊环是指焊盘外径与钻孔之间的宽度，右图为预留 0.2mm 干膜封孔空间后保留的实际焊环示意图	

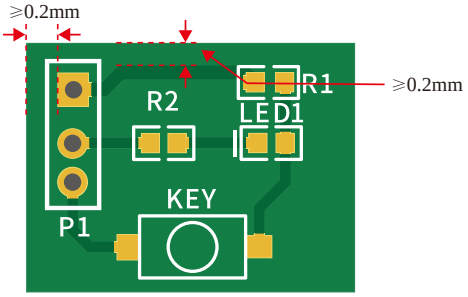
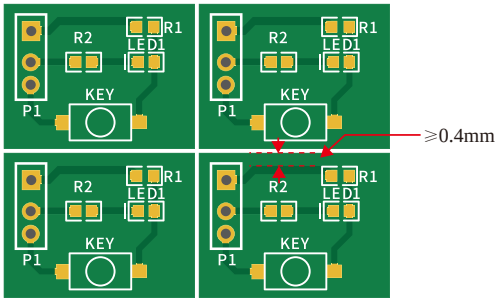
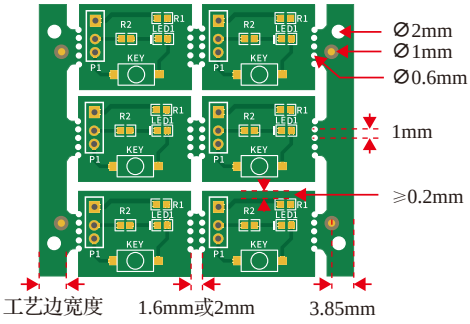
续表

项目	项目能力	工艺详解	图文说明
线路	BGA	① BGA 焊盘直径：≥ 0.25mm； ② BGA 焊盘边到线边：≥ 0.1mm（多层板最小 0.09mm）； ③ BGA 焊盘中间钻孔的盘中孔工艺可以采用树脂 / 铜浆塞孔 + 盖帽电镀	
	线圈板	① 盖油的线圈最小线宽 / 线距：0.15mm/0.15mm（1oz 完成铜厚）； ② 开窗的线圈最小线宽 / 线距：0.25mm/0.25mm（1oz 完成铜厚），仅支持沉金，喷锡易粘连	 开窗沉金 线圈盖油
阻焊	阻焊开窗	双面板：开窗比焊盘单边≥ 0.038mm，开窗距线边间距≥ 0.05mm	
		多层板：焊盘与开窗按 1 ∶ 1 设计	
	过孔塞油墨	用阻焊油墨塞进过孔达到不透光效果： ① 双面焊盘盖油的过孔才能塞油墨； ② 所有塞油墨的过孔直径为 0.15 ～ 0.5mm	

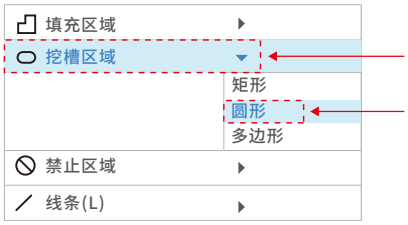
续表

项目	项目能力	工艺详解		图文说明
阻焊	过孔塞树脂 + 电镀盖帽 过孔塞铜浆 + 电镀盖帽 （嘉立创盘中孔工艺）	用树脂 / 铜浆塞进过孔且在孔表面电镀盖帽达到不透光且平整的效果： ① 树脂 / 铜浆塞孔 + 电镀盖帽处理（有高导热性需求的选铜浆塞孔）； ② 6 层及以上多层板过孔默认过孔塞树脂 + 电镀盖帽； ③ 所有塞树脂 / 铜浆的过孔直径为 0.15 ～ 0.5mm		
	阻焊厚度	≥ 10μm		
	最小阻焊桥设计数据	双面板（1oz）	焊盘间最小间距：0.20mm（适合绿、红、黄、蓝、紫色油墨）	
			焊盘间最小间距：0.23mm（适合黑、白色油墨）	
		多层板（1oz）	焊盘间最小间距：0.10mm（适合绿、红、黄、蓝、紫色油墨）	
			焊盘间最小间距：0.13mm（适合黑、白色油墨）	
字符	字符高度	≥ 1mm（特殊字体、中文、掏空字符视情况须更高）		
	字符粗细	≥ 0.15mm（低于此值可能印不出来）		
	字符到露铜焊盘间隙	≥ 0.15mm（低于此值会掏空字符，避免字符印刷在焊盘上）		

续表

项目	项目能力	工艺详解	图文说明
成品	锣边成型	① 锣边处走线和焊盘距板边距离：≥ 0.2mm； ② 走线和焊盘距锣槽距离：≥ 0.2mm； ③ 锣边外形公差：±0.2mm（普锣），±0.1mm（精锣）； ④ 精锣板单片长宽尺寸：≥ 50mm×50mm（精锣需要不同方位 3 个定位孔，直径≥ 1.5mm）； ⑤ 铝基板 / 铜基板最小锣槽宽度为 1.6mm	
	V 割拼板	① V 割处走线和焊盘距板边距离：≥ 0.4mm； ② V 割外形公差：±0.4mm（V 割板厚≥ 0.6mm）； ③ 默认采用 0 间隙拼板； ④ 最小拼板尺寸：70mm；最大拼板尺寸：475mm； ⑤ 相邻两条 V 割线间隔：3mm（极限 2mm）	
	邮票孔拼板	① 非邮票孔处走线和焊盘距板边距离：≥ 0.2mm； ② 非邮票孔处锣边公差：±0.2mm（普锣），±0.1mm（精锣）； ③ 默认采用 1.6mm 或 2mm 的拼板间隙； ④ 邮票孔处分板后呈齿轮状； ⑤ 工艺边宽度最小为 3mm（嘉立创 SMT 工艺边宽度为 5mm，光点为 1mm，定位孔为 2mm，光点中心到板边为 3.85mm）	
	板厚公差	板厚≥ 1.0mm，板厚公差为 ±10%； 板厚 <1.0mm，板厚公差为 ±0.1mm	比如板厚 T=1.6mm，实物板厚为 1.44mm（T−1.6×10%）～ 1.76mm（T + 1.6×10%）；板厚 T=0.8mm，实物板厚为 0.7mm（T−0.1）～ 0.9mm（T+0.1）
	AD 软件易错点	① 需要加工的槽孔与外形一定放在同一层，且资料中保持唯一的外形层； ② 需要加工的槽孔不能勾选“Keepout”（中文版本显示“使在外”，AD17 以上版本无此选项）	更多详情，请访问嘉立创官网查看工艺参数，或进入官网“下单前技术员必看说明”页面查看详细信息

续表

项目	项目能力	工艺详解	图文说明
设计	嘉立创 EDA	绘制槽孔尽量用挖槽区域画	
	PADS 易错点	① PCB 生产厂家通常采用还原铺铜（Hatch），PADS 软件设计的客户请务必注意； ② 如果板上的非金属化槽比较多，请用 outline 画	
	更多设计规范	请查看嘉立创 PCB 下单系统中的“下单技术员必看”	技术支持列表内的技术文档

扫描二维码可以查看嘉立创最新工艺参数。

第 4 章 / PCB 钻孔设计与制造

4.1 PCB 钻孔工艺概述

在 Layout 设计中，尽管 PCB 看似复杂，但实质上是由点、线、面组成的。我们可用“一横一竖加一点”描述。其中，“一横一竖”代表线路，“一点”代表钻孔。钻孔在 PCB 设计和制造中至关重要，是品质管控的关键，必须深入了解钻孔及相关工艺特性。

主要工序：钻孔。

钻孔是 PCB 制造的关键步骤，通过机械或激光钻孔在覆铜板上形成设计所需的孔洞，以满足电气连接和安装需求。合理的钻孔设计直接影响 PCB 的品质、成本，以及可靠性和性能。因此，Layout 设计工程师应深入了解钻孔工艺参数和特性对品质的影响，并将其整合到设计中，以确保设计方案符合制造的要求和可行性。

PCB 生产关联工序：钻孔、沉铜、电镀、蚀刻。

主要设备与工具：CNC 数控钻孔机（见图 4-1）、钻头（见图 4-2）、盖板（见图 4-3）、垫板（见图 4-3）。

扫描图 4-1 中二维码可查看 PCB 钻孔视频。

图 4-1　CNC 数控钻孔机

图 4-2　钻头

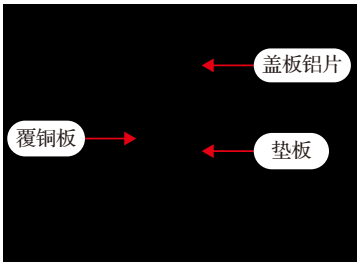


图 4-3　钻孔用盖板和垫板

钻头规格：嘉立创目前采用机械钻孔方式加工 PCB，钻头规格以公制单位表示，最小递增或递减单位为 0.05mm。例如，从 0.15mm 开始，递增规格为：0.15mm、0.20mm、0.25mm、0.30mm、0.35mm、0.40mm、0.45mm、0.50mm、0.55mm、0.60mm，依此类推。

4.2 钻孔分类

钻孔在 PCB 设计中扮演着重要角色，实现电气连接和元件安装。根据导电属性，钻孔可分为金属化孔和非金属化孔。金属化孔又可分为过孔和插件孔。插件孔根据安装方式分为普通插件孔和压接孔，根据形状分为圆孔和槽孔等。钻孔分类如图 4-4 所示。

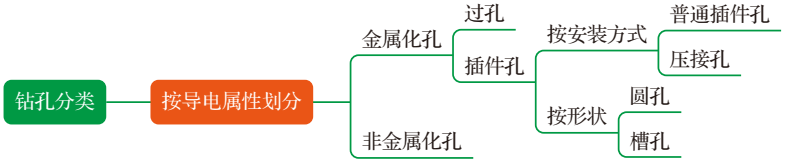


图 4-4　钻孔分类

金属化孔（Plated Hole）：是指通过化学或电镀方式在孔洞内部的孔壁镀覆一层金属（通常为铜），以实现各层导电图形之间的电气连接。经过 PCB 表面处理的金属化孔称为镀覆孔。

过孔（Via）：俗称导电孔，是用于连接不同层电路、传递电流和信号的孔，主要功能是导电，无须插件。在 PCB 制造过程中，不对过孔的孔径进行补偿。过孔类型多样，常见的有：贯穿各层实现全方位电气连接的通孔（Through-Hole Via）；始于表层、延伸至内部某一层的盲孔（Blind Via）；完全内嵌于 PCB 内部，实现两个或多个内层之间连接的埋孔（Buried Via）；孔径不大于 0.15mm，常用激光钻孔（也有其他工艺），多见于 HDI 板的微孔（Microvia）。此外，还有改善信号完整性的背钻孔、防止焊接缺陷的填充孔等。本书基于通用性，讲解过孔时默认以通孔为例。

插件孔（Pad）：也称为元件孔，是用于安装元器件的孔。PCB 制造时，为了方便插件，会对孔径进行补偿，使成品孔径控制在有效公差范围内。

压接孔（Press-Fit Hole）：是一种特殊通孔，元器件插入后可固定，与孔壁接触，实现导通，无须焊接。其精度要求高于普通插件孔。

非金属化孔（Non-Plated Hole）：是指孔壁未镀覆金属的孔，通常用于机械固定、导线穿过或电气隔离，不具备导电性。

4.2.1　金属化孔与非金属化孔设计与制造

金属化孔和非金属化孔在 PCB 设计和制造中有不同的用途和要求。设计工程师需根据电路需求选择合适的孔形，并确保在制造过程中正确处理，以满足功能、可靠性和性能要求。因此，钻孔属性设置和层次设计至关重要。

1. 钻孔属性设置

1）金属化孔

在设计软件中，选择钻孔封装属性中的“金属化（Plated）”选项，设置为“是”或“√”。嘉立创 EDA 软件中定义金属化孔属性如图 4-5 所示。

嘉立创采用正片工艺制造 PCB，该工艺先对孔洞进行沉铜，然后再进行镀铜和镀锡处理。通过镀锡层保护孔壁和所需线路，防止蚀刻过程中孔壁铜箔与蚀刻药水接触而被蚀刻掉，从而实现金属化孔的制造，如图 4-6 所示。

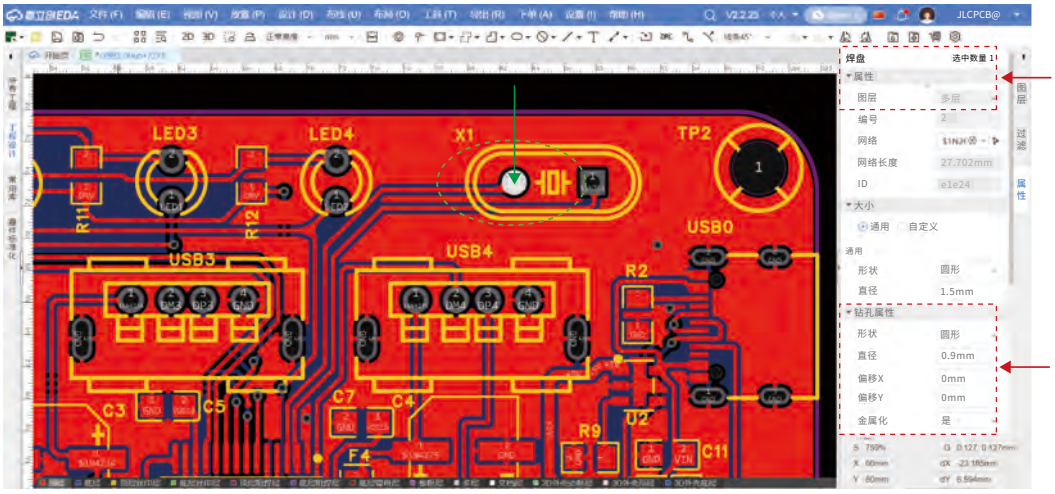


图 4-5　嘉立创 EDA 软件中定义金属化孔属性

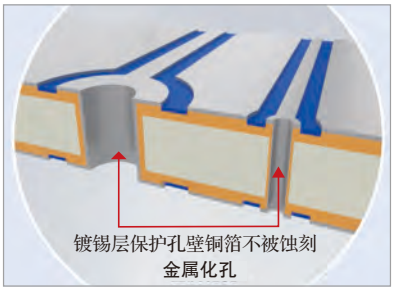


图 4-6　镀锡层保护孔壁铜箔免受蚀刻液侵蚀

2）非金属化孔

在设计软件中，选择钻孔封装属性中的“金属化（Plated）”选项，设置为“否”或“×”。嘉立创 EDA 软件中定义非金属化孔属性如图 4-7 所示。

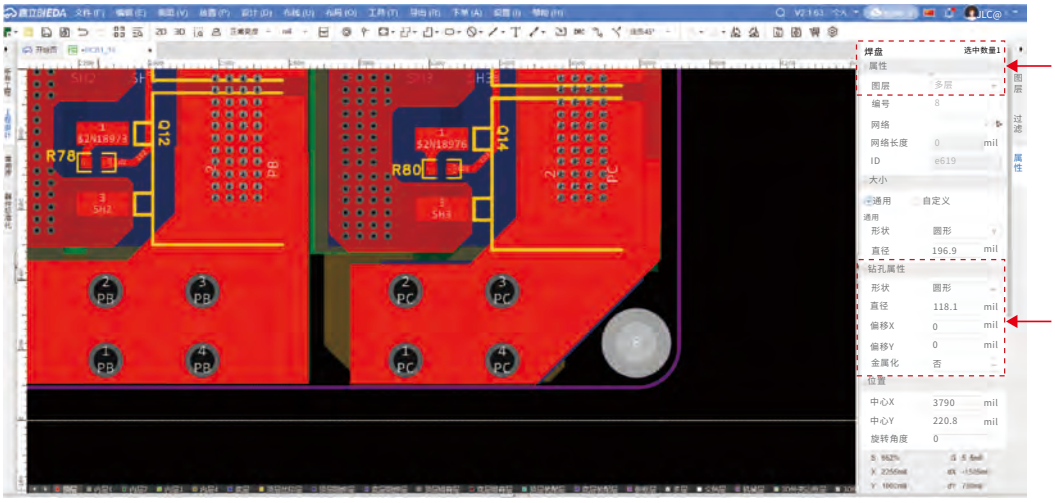


图 4-7　嘉立创 EDA 软件中定义非金属化孔属性

嘉立创采用正片干膜封孔工艺制作非金属化孔。封孔干膜覆盖区应比孔至少单边大 0.2mm，确保有效防止电镀药水入孔形成镀锡层。在蚀刻时，未受镀锡层保护的孔壁及周围 0.2mm 区域的铜箔会被蚀刻，形成非金属化孔（见图 4-8）。扫图 4-8 中二维码可查看金属化孔与非金属化孔制作视频。因此，设计非金属化孔时，焊盘外径应比金属化孔大 0.4mm。此外，该工艺的弊端是如果非金属化孔太大，干膜封孔难度会增大，建议超过 5.0mm 的钻孔采用锣孔形式设计更好。直径大于 6.5mm 的非金属化孔嘉立创采用锣孔方式加工。

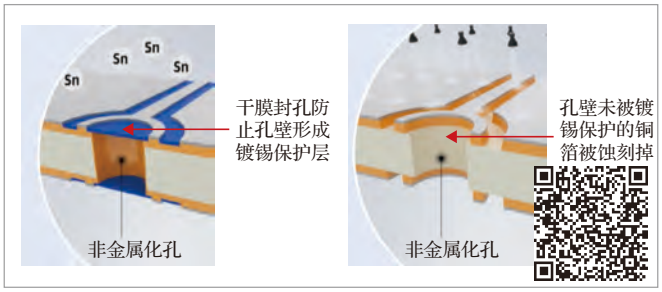


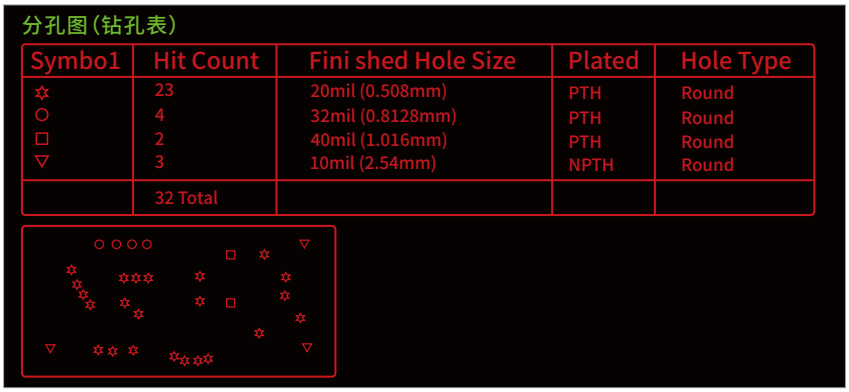
图 4-8　干膜封孔制作非金属化孔

注意：在使用 PADS 软件设计 PCB 时，除选择正确的钻孔属性外，还需特别关注“电气层”选项。如果在双面或多层板中选择了“支持单面板”，所有孔径属性将在钻孔表中显示为“NPTH”。查看该选项的步骤为：单击“Setup（设置）”→“Layer Definition（层定义）”，在弹出窗口的“Electrical layer（电气层）”列表下方即可找到“Single-side board support（支持单面板）”的选项。

2. 钻孔层次设计

在 PCB 设计中，带钻孔的焊盘必须放置在所需贯穿的多层上（如嘉立创 EDA 软件的“多层”或 AD 软件的“multi-layer”等），以实现 PCB 的贯穿功能和与不同导电层的电气连接，同时确保孔径属性在钻孔表中显示。如果误放在单一层，则在部分设计软件中，钻孔属性将不会出现在钻孔表中。

PCB 制造商根据 Layout 设计工程师提供的 PCB 或 Gerber 资料中的钻孔表（见图 4-9）识别和检查“PTH”（金属化孔）和“NPTH”（非金属化孔）属性。如果钻孔表中未显示孔径属性，将无法确保孔径的正确生产。



分孔图（钻孔表）

Symbo1	Hit Count	Fini shed Hole Size	Plated	Hole Type
☆	23	20mil (0.508mm)	PTH	Round
○	4	32mil (0.8128mm)	PTH	Round
□	2	40mil (1.016mm)	PTH	Round
▽	3	10mil (2.54mm)	NPTH	Round
	32 Total			

图 4-9　钻孔表

4.2.2　过孔与插件孔

1. 过孔与插件孔设计

设计软件中，过孔和插件孔具有不同功能。插件孔可分为金属化孔和非金属化孔，而过孔通常默认为金属化孔。在 PCB 设计时，需准确区分两者，以避免混淆。嘉立创 EDA 软件中，过孔设计如图 4-10 所示，插件孔设计如图 4-11 所示，二者存在明显区别。

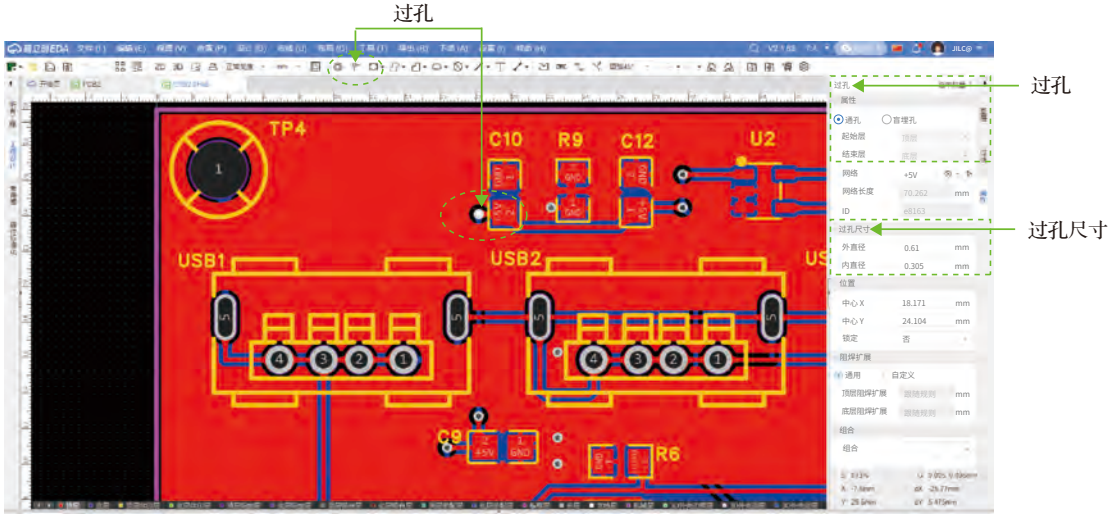


图 4-10　嘉立创 EDA 软件过孔设计

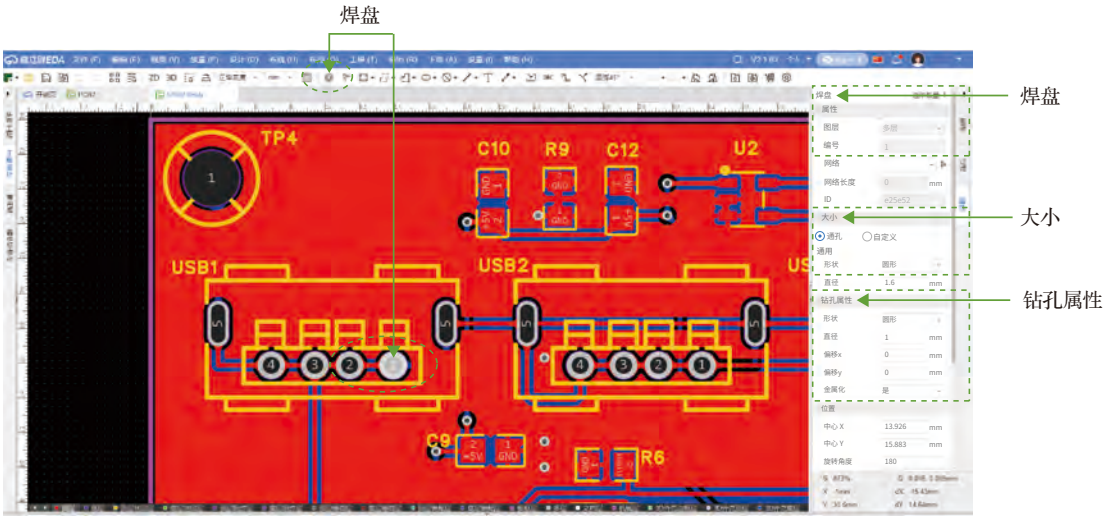


图 4-11　嘉立创 EDA 软件插件孔设计

2. 过孔与插件孔混用的潜在问题

1）过孔填塞和覆盖异常

在嘉立创 PCB 下单系统中，过孔阻焊覆盖选项（见图 4-12）提供多种处理方式。“过孔盖（塞）油或塞树脂 / 铜浆”等工艺专用于设计属性为过孔的孔径加工。

（1）误用过孔代替插件孔：会导致过孔在 PCB 制造过程中可能被盖（塞）油或者树脂 / 铜浆塞孔，无法用于插件和焊接，如图 4-13 所示。

（2）误用插件孔代替过孔：则无法实现过孔盖（塞）油或者树脂 / 铜浆塞孔，如图 4-14 所示。

图 4-12　嘉立创 PCB 下单系统过孔阻焊覆盖选项

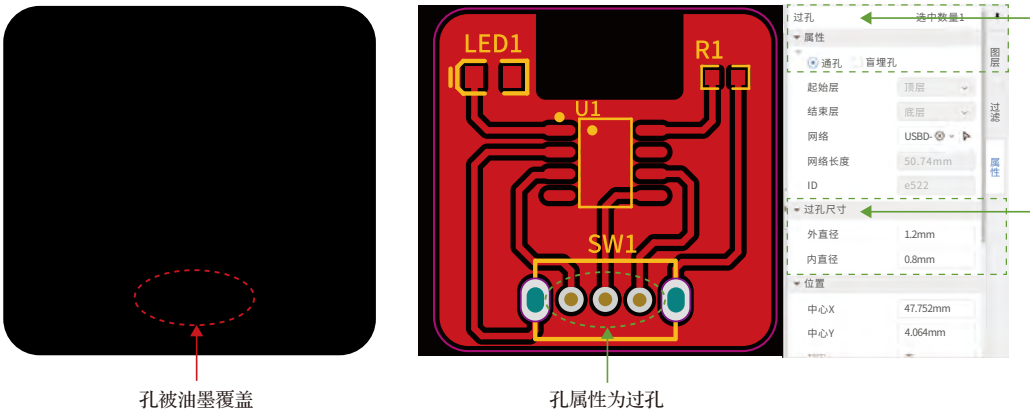


图 4-13　误用过孔设计插件孔

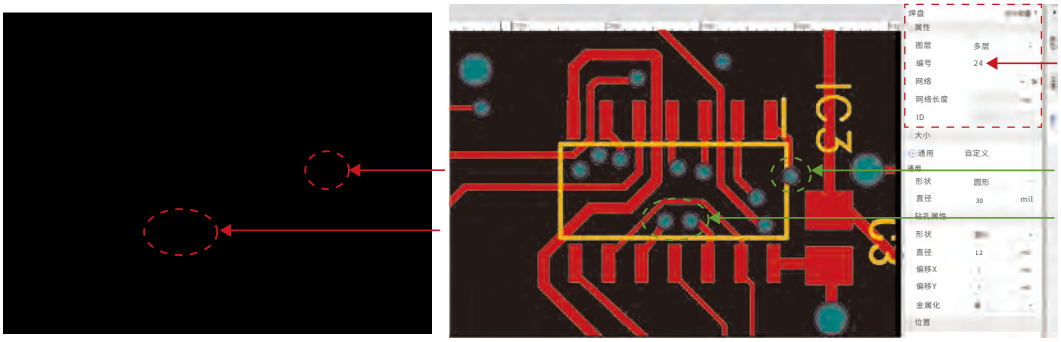


图 4-14　误用插件孔设计过孔

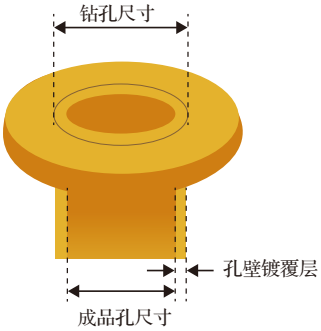


图 4-15　金属化孔示意图

2）孔径大小异常

在 PCB 加工过程中，金属化插件孔经过沉铜和喷镀处理后（见图 4-15），孔壁镀覆金属，导致孔径变小。为确保成品孔径符合设计要求，CAM 工程师会提前进行补偿调整（如双面喷锡板补偿加大 0.15mm 后再钻孔）。这样，即使在沉铜和喷镀过程中孔径有所减小，最终孔径仍接近设计值，确保孔径控制在有效公差范围内，元器件管脚能顺利安装。

误用过孔代替插件孔导致的问题：过孔不用于插件，钻孔

前不会进行孔径补偿，经过镀覆后孔径变小。即使未填塞或覆盖油墨，孔径仍可能因偏小而导致元器件管脚无法安装。

4.2.3　压接孔

1. 压接孔

压接孔（Press-Fit Hole）通过施加机械压力，利用 Press-Fit 端子的负公差特性，采用冷压接的免焊接方式将端子固定在孔内。端子管脚与孔壁接触，实现信号传输（见图 4-16）。

压接孔的优势在于其独特的冷压接方式，而可靠的压接技术需要更精密的孔径公差。为精确控制孔径公差，Layout 设计时需慎重设计压接孔大小，确保与 PCB 钻孔工具规格匹配。压接孔直径应基于器件大小，钻头最小递增单位为 0.05mm 的倍数，以减少因钻头直径不符而导致的孔径公差偏大问题。嘉立创生产的压接孔 PCB 孔径公差为 ±0.05mm。

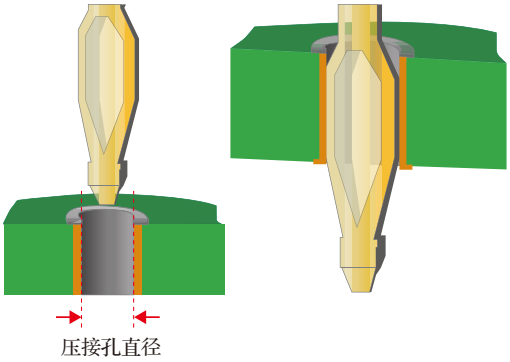


图 4-16　压接孔示意图

压接孔 PCB 表面处理工艺，必须选择沉金工艺，以避免因选择喷锡工艺时，因热风整平时喷锡涂覆层厚度不均影响压接孔直径大小。

2. 压接孔的 Press-Fit 技术与优势

Press-Fit 技术是一种可靠的连接方法，用于将电子元件与 PCB 直接连接。它通过将插针或插件部件压入预设计的孔中，实现电气和机械连接，无须焊接或其他附加方式。与传统焊接相比，压接（Press-Fit）装配技术具有以下特点和优势。

（1）免焊接：无须焊接，实现快速有效的 PCB 组装，简化了组装工序。

（2）无焊接隐患：避免了焊接过程中的常见问题，如虚焊和助焊剂残留等。

（3）组装灵活：可实现 PCB 双面组装，增加了设计的灵活性。

（4）作业简单：不需要进行额外的焊接和清洗作业，减少了生产步骤和时间。

（5）无热损：不会对 PCB 或者电子元器件产生热载荷，避免了高温对电子元器件的损害。

（6）高扩展性：Press-Fit 技术适用于多种类型的插件部件，包括插针、连接器和模块等，提供更灵活的连接解决方案。

（7）维修和更换便利：压接孔连接方式使得插件部件可以相对容易地进行拆卸和更换，对于维修、升级或更换故障元器件非常有益，减少了不必要的工作和损坏风险。

（8）可靠性：由于压接孔与插件部件之间的连接是机械性的，因此具有较高的可靠性和耐久性。压接孔能够提供稳定的电气连接，同时抵抗振动和冲击，减少因温度变化或机械应力引起的连接失效风险。

Press-Fit 技术的应用需根据设计需求和目标选用合适的插件部件及压接孔。同时，对于高密度布线和高频应用，应关注压接孔对信号完整性和电磁干扰的影响。

4.3 钻孔内、外径尺寸

在设计时，过孔和插件孔都有相应的内径和外径尺寸设置选项，具体可参见 4.2.2 节中的图 4-10 和图 4-11。这些尺寸直接影响 PCB 的电气性能、焊接、组装及制造工艺。因此，设计过程中必须综合考虑这两者的尺寸设置。

4.3.1 圆形钻孔设计

在 Layout 设计时，当遇到空间有限的封装，例如图 4-17 所示嘉立创 EDA 软件设计的 8 层 PCB 中的 BGA 封装部分，空间非常有限。Layout 工程师都知道：孔越小，占用的空间越小，设计越方便。

设计多大的孔才合理是一个关键问题。3.3 节中提到的常规参数和极限参数应如何合理运用？需要注意哪些事项？如果钻孔过小，PCB 制造商能否生产？是否会影响生产效率、直通率和产品成本等因素？

为解答这些问题，通常可参考 PCB 供应商的工艺参数。下面以嘉立创 PCB 工艺参数为例，讲解最小钻孔尺寸设计的注意事项。详细参数请扫描右侧二维码查看。

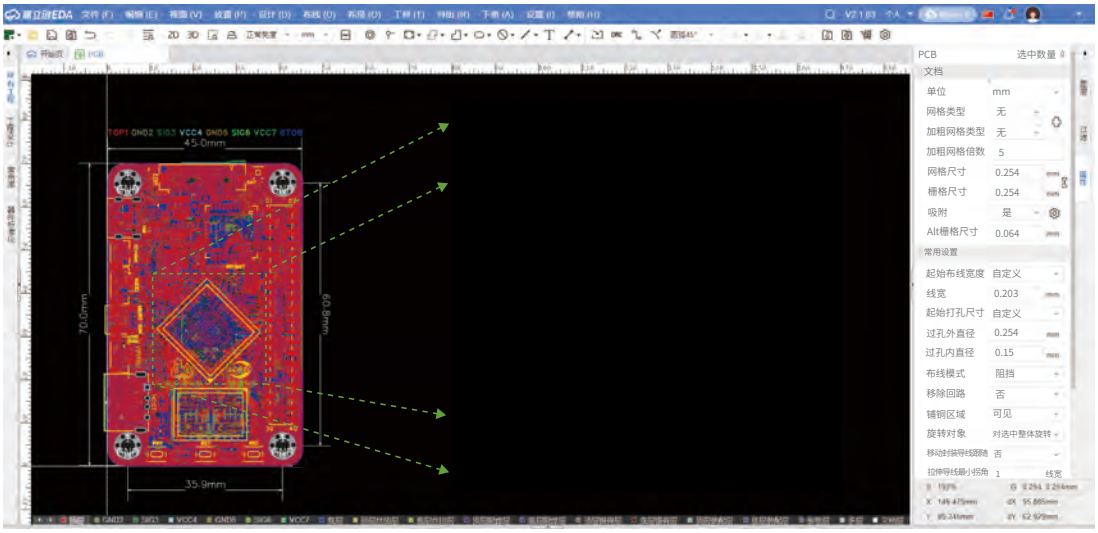


图 4-17　嘉立创 EDA 软件设计的 8 层 PCB

1. 过孔与插件孔最小内径

1）常规过孔内径

是指在 PCB 设计与制造中的常规钻孔的直径参数，通常是指直径为 0.3mm 及以上的孔径。在条件允许的情况下，Layout 设计时尽量采用常规参数。

2）极限过孔内径

嘉立创 PCB 钻孔工艺参数如表 4-1 所示，最小可加工钻孔直径为 0.15mm。这意味着在无法回避的情况下，如果设计了 0.15mm 的过孔，嘉立创也可以在保证品质的前提下进行加工。

然而，这需要投入更复杂的工艺和控制手段来确保产品良率，会降低产品生产效率并增加生产成本。

表 4–1　嘉立创 PCB 钻孔工艺参数

类　别	参　数	图　示
钻孔孔径	单面板：0.3 ～ 6.3mm	①≥ 6.5mm 钻头的孔采用扩展 / 锣边方式加工； ②双面板、多层板最小钻孔为 0.15mm； ③铝基板最小钻孔为 0.65mm； ④单面铜基板最小钻孔为 1.0mm； ⑤双面铜基板最小钻孔为 0.3mm
	双面板：0.15 ～ 6.3mm	
	多层板：0.15 ～ 6.3mm	

3）极限插件孔内径

在生产过程中，插件孔的大小由管脚结合 PCB 制造公差决定。对于部分管脚值小于 0.5mm 的元器件，嘉立创建议插件孔设计最小不低于 0.5mm。插件孔小于 0.5mm 时，油墨和锡膏容易堵塞孔径，导致油墨堵孔和喷锡堵孔的隐患。

4）金属基材最小钻孔内径

嘉立创可生产金属基材 PCB，包括单面铝基板和单、双面热电分离铜基板（见图 4-18）。金属基材硬度高，因此需要较大钻孔直径以避免断钻头，提升生产效率和品质。设计铝基板和铜基板时，最小钻孔直径须大于 FR-4 基材，且热电分离铜基板的单面和双面板对最小钻孔直径要求不同，设计时可参考嘉立创金属基材 PCB 的最小参数。

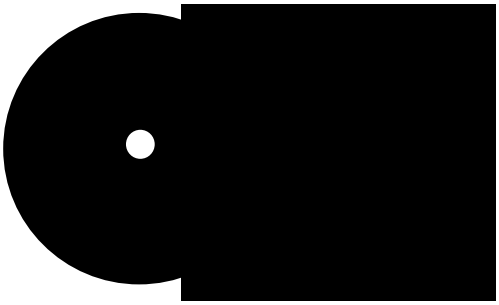
（1）铝基板

最小钻孔尺寸：0.65mm；最小锣槽宽度：1.60mm。

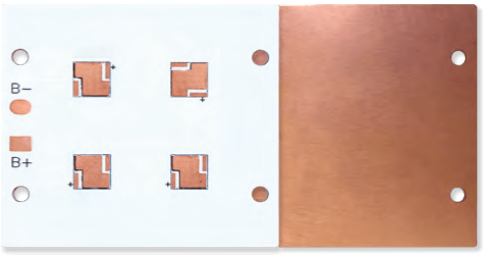
（2）热电分离铜基板

单面板最小钻孔尺寸：1.00mm；最小锣槽宽度：1.60mm。

双面板最小钻孔尺寸：0.30mm；最小锣槽宽度：1.60mm。



（a）单面铝基板



（b）单面铜基板

图 4-18　铝基板与热电分离铜基板

2. 过孔与插件孔最小外径

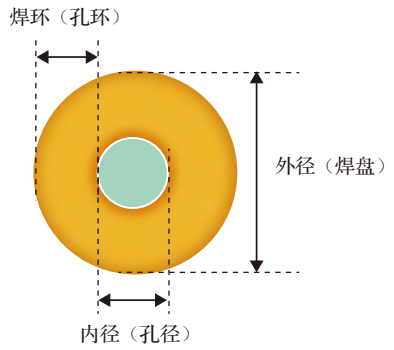
1）过孔外径

过孔外径计算公式：过孔外径 = 内径 + 焊环宽度 ×2。嘉立创 PCB 过孔内、外径工艺参数如表 4-2 所示。

常规过孔外径：推荐过孔外径比内径至少大 0.15mm。按最小常规钻孔 0.3mm 计算，常规过孔外径尺寸为 0.3mm+0.15mm=0.45mm 以上。

极限过孔外径：极限过孔外径需比内径大 0.10mm。按最小极限钻孔 0.15mm 计算，极限过孔外径尺寸为 0.15mm+0.1mm=0.25mm。

表 4–2　嘉立创 PCB 过孔内、外径工艺参数

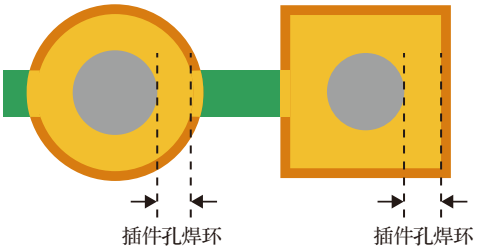
类　别	参　数	图　示
最小过孔 / 焊盘	单面板：0.3mm（内径）/0.5mm（外径）	
	双面板：0.15mm（内径）/0.25mm（外径）	
	多层板：0.15mm（内径）/0.25mm（外径）	
	①外径必须比内径大 0.1mm，推荐值＞ 0.15mm 以上； ②双面板极限过孔，需采用塞油墨或塞树脂工艺制作	

2）插件孔外径

插件孔外径计算公式：焊盘外径 = 钻孔内径 + 焊环宽度 ×2。

插件孔的焊环决定了外径的大小。嘉立创 PCB 金属化插件孔焊环参数如表 4-3 所示。插件孔焊环分为极限值和推荐值（常规值）。

表 4–3　嘉立创 PCB 金属化插件孔焊环参数

类　别	参　数	图　示
金属化插件孔焊环（1oz）	双面板：≥ 0.25mm（推荐值），极限值为 0.18mm	
	多层板：≥ 0.20mm（推荐值），极限值为 0.15mm	

（1）常规金属化插件孔外径：在设计条件允许的情况下，若钻孔尺寸按最小 1.00mm 设计时，插件孔焊盘外径的常规值计算如下。

双面板：常规插件孔外径≥ 1.00mm+2×0.25mm=1.50mm。

多层板：常规插件孔外径≥ 1.00mm+2×0.20mm=1.40mm。

（2）极限金属化插件孔外径：当设计受限，无法规避设计极限值时，若钻孔尺寸按最小 1.00mm 设计时，插件孔外径的极限值计算如下。

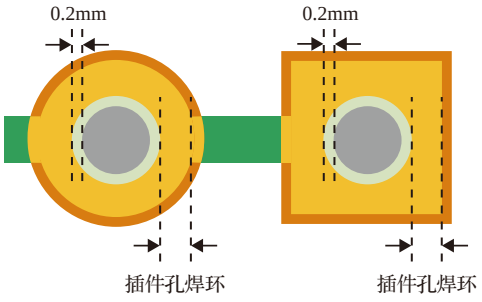
双面板：极限插件孔外径 =1.00mm+2×0.18mm=1.36mm。

多层板：极限插件孔外径 =1.00mm+2×0.15mm=1.30mm。

插件孔用于插件连接和焊接，故焊环尺寸应大于过孔的孔环尺寸，以确保连接可靠性和焊接质量。

（3）非金属化插件孔外径：非金属化插件孔外径设计，需考虑干膜封孔的空间尺寸。焊盘外径应比金属化插件孔大 0.4mm，以预留 0.2mm 的干膜封孔空间。即：非金属化孔设计焊环宽度 = 非金属孔实际焊环宽度 + 0.2mm。嘉立创 PCB 非金属化插件孔外径参数如表 4-4 所示。

表 4–4　嘉立创 PCB 非金属化插件孔外径参数

类　别	参　数	图　示
非金属化插件孔焊环	设计焊环≥ 0.45mm（推荐值），设计焊环是指焊盘外径与钻孔之间的宽度，右图为预留 0.2mm 干膜封孔空间后保留的实际焊环示意图	

3）钻孔间距设计注意事项

（1）考虑电气可靠性：在 PCB 钻孔过程中，钻头的高速旋转和下落会产生高温和挤压力，导致树脂熔化并形成胶渣。金属化孔在清除胶渣后沉铜时可能引发芯吸现象，缩短相邻过孔的有效安全间距。

为避免相邻过孔因间距过近而导致基材挤压变形或崩裂，以及防止不同网络过孔通电后产生 CAF 效应，并确保相邻焊盘的安全间距，设计相邻过孔和插件孔时（见图 4-19），其边缘间距应满足以下条件。如果不同网络的过孔间距为 0.2 ～ 0.4mm，则 PCB 厂商可在客户接受 CAF 风险的情况下进行生产。

- ①处：不同网络过孔的边缘间距≥ 0.40mm。
- ②处：相同网络过孔的边缘间距≥ 0.2mm。
- ③处：插件孔的边缘间距≥ 0.45mm。

（2）考虑结构稳定性：为了避免在 PCB 外形切割和拼板出货产品的分板过程中，受加工和分板作用力的影响出现槽孔边缘和板边圆孔崩裂现象，设计如图 4-19 中标注的相邻槽孔之间的间距时须满足以下条件，否则会出现如图 4-20 所示的槽孔和圆孔崩裂的风险。

- ④和⑤处：（非）金属化槽孔的边缘间距≥ 0.80mm。
- ⑥和⑦处：（非）金属化圆孔边缘与 V 割边间距≥ 0.60mm。
- ⑧和⑨处：（非）金属化槽孔边缘与 V 割边间距≥ 1.50mm。

4）合理布局过孔数量

在设计过程中，为了优化层间电气连接，确保信号和电源正常传输，可以适当添加过孔。这有助于大面积铺铜区散热、减少高速电路中的信号传输延迟和阻抗失配，从而提升 PCB 性能。

（1）合理布局过孔数量的好处

电气连接：确保层间的电气连接，保证信号和电源的正常传输。

热管理：有助于散热，防止大面积铺铜区域受热起泡，提高 PCB 的热管理性能。

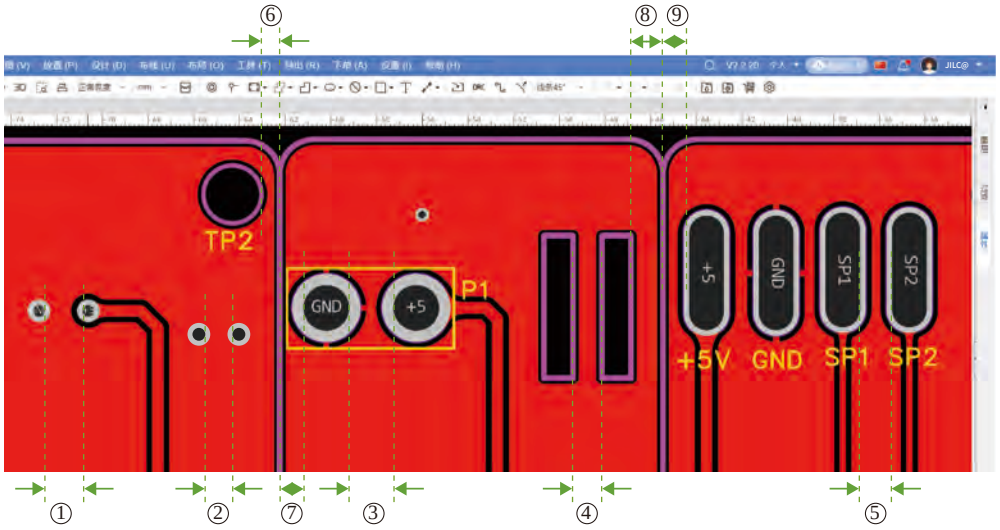


图 4-19　钻孔间距示意图

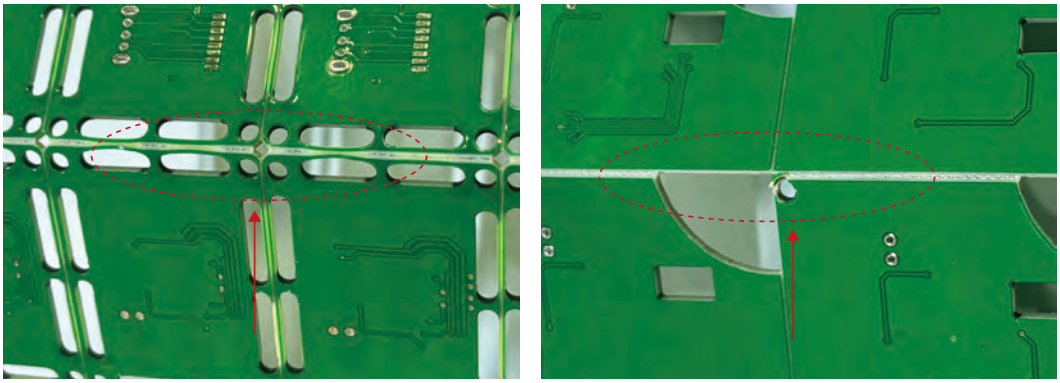


图 4-20　板边缘的槽孔太近 V 割边分板崩裂案例图

信号完整性：减小高速电路中信号线传输延迟和阻抗失配，提升信号完整性。

（2）过度密集的非功能性过孔对 PCB 的影响

若非功能所需，在 PCB 的某一区域或整板进行过密的过孔布局（见图 4-21），可能引发以下问题。

增加 PCB 制造品质隐患：过度密集的非功能性过孔布局会给 PCB 制造的填塞过孔、喷锡、烘干等工艺带来困扰和品质隐患，如过孔填塞不饱满、过孔藏锡珠、烘干难度大等。

降低 PCB 基材刚性：过多的过孔会在基材中引入诸多微小孔洞，减少基材有效面积，导致整体刚性与抗弯能力下降。

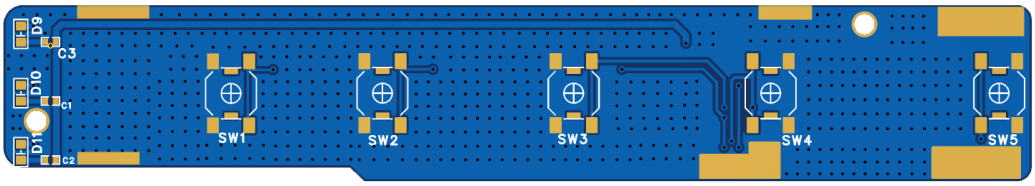


图 4-21　过孔布局过度密集案例图

3. 极限钻孔参数对生产与品质的影响

在设置钻孔大小时，参考 PCB 制造商的工艺参数至关重要。了解极限参数与常规参数的区别，可以帮助减少不必要的极限参数使用，因为钻孔的极限参数可能会带来以下影响。

1）影响生产效率

（1）钻孔速度：孔径越小，钻头直径越小，刚性降低，折断风险增加。为平衡这一风险，需提高钻头切削速度并降低进给速度。例如，0.3mm 钻头的转速为 135×10^3r/min，进给速度为 2.5m/min；而 0.15mm 钻头的转速提高到 160×10^3r/min，进给速度降低到 0.9m/min（见图 4-22）。

（2）叠板层数：不同直径的钻孔需使用相应的钻头。不同直径钻头刀刃（见图 4-23）的有效长度各异。以 1.6mm 厚的 FR-4 覆铜板为例，生产最小直径为 0.3mm 的 PCB 时，可以叠加 4 张基材进行钻孔。而对于最小直径为 0.15mm 的 PCB，由于钻头有效长度和刚性问题，无法叠板加工，只能逐张钻孔（见图 4-22，扫描图中二维码可以观看 0.15mm 钻头与 0.3mm 钻头的钻孔对比模拟视频）。

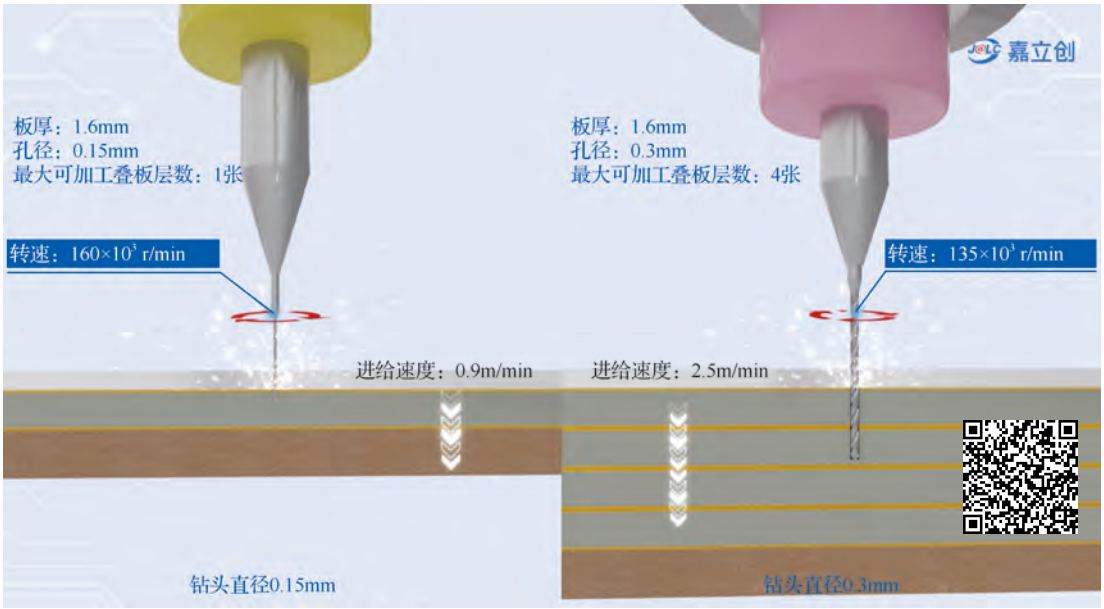


图 4-22　钻孔参数及叠板层数

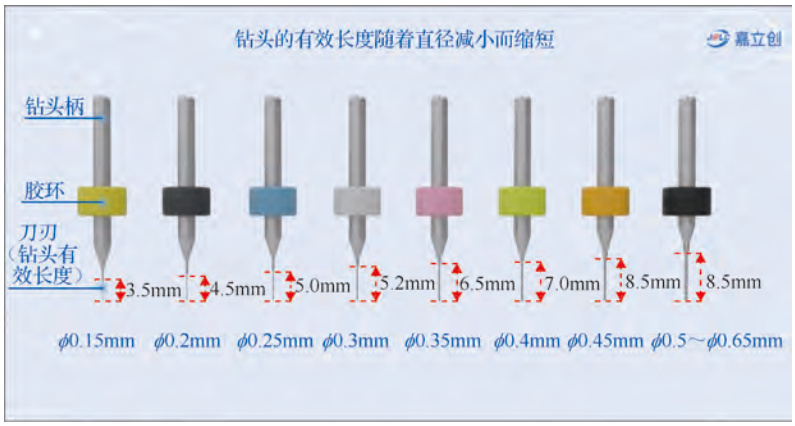


图 4-23　钻头刀刃有效长度

2）影响产品质量直通率

钻孔孔壁需要镀铜，孔径越大，钻孔中残留的粉尘越少，堵孔概率越小，钻孔的纵横比越小，电镀药水进入孔内进行镀铜越顺畅，孔壁镀铜效果和品质越好，直通率越高。反之，孔径越小，孔壁镀铜难度越大，直通率越低。例如，0.15mm 钻孔的孔壁镀铜难度远远大于 0.3mm 的钻孔。

3）影响产品成本

孔径越小，钻孔效率和沉铜直通率越低。为确保质量，嘉立创在线路 AOI 检测后增加四线低阻测试以检查孔壁镀铜质量，这会增加时间和成本。直通率和生产效率直接影响产品成本，高直通率和高效率能降低成本。因此，选择合适的工艺参数在布局设计中对提升 PCB 性价比至关重要。

4）影响可靠性

电气连接和信号传输：较大的 PCB 过孔尺寸可以提供更好的电气连接和信号传输，增加 PCB 的可靠性。

综上所述，在 PCB Layout 设计中，选择适当的工艺参数至关重要。嘉立创提供的 PCB 工艺参数包括极限参数，适用于满足复杂 PCB 设计中无法回避的特殊要求。因此，综合考虑成本和可靠性，在布线空间允许的情况下，建议尽量避免使用这些极限参数。

4.3.2 槽形钻孔设计

1. 槽形钻孔简述

槽形钻孔，简称槽孔，是指在 PCB 上开槽或凹陷的孔，通常具有特定形状和尺寸，主要用于容纳安装部件（如电子元件和机械固定）以及提供更好的导热性能。

槽孔分为金属化槽孔和非金属化槽孔两种类型。金属化槽孔通过在基材上钻孔形成，而非金属化槽孔可通过钻孔或外形切割制成。根据加工方式，槽孔可分为钻槽和锣槽。通常设计中需要特别注意的是如图 4-24 所示的这类金属化槽孔。

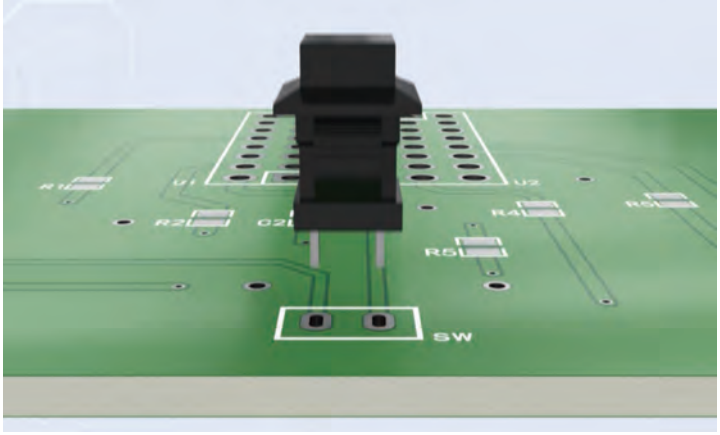


图 4-24　金属化插件槽孔示意图

2. 金属化槽孔设计

在嘉立创 EDA 软件中，可以通过图 4-25 所示方式设计金属化槽孔。

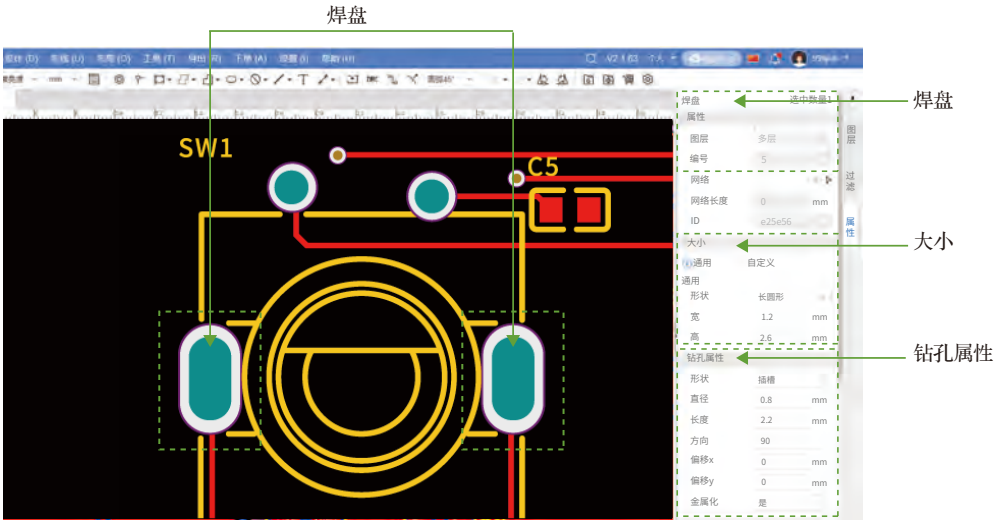


图 4-25　嘉立创 EDA 软件设计金属化槽孔

3. 槽孔生产

在 PCB 生产中，金属化槽孔的形成通常采用将多个圆形钻孔按一定顺序排列后进行钻孔，最后形成槽孔。这种方法可以提高加工精度和生产效率，同时减少对钻头的损耗。嘉立创 CAM 软件中查看处理后的槽孔资料如图 4-26 所示。

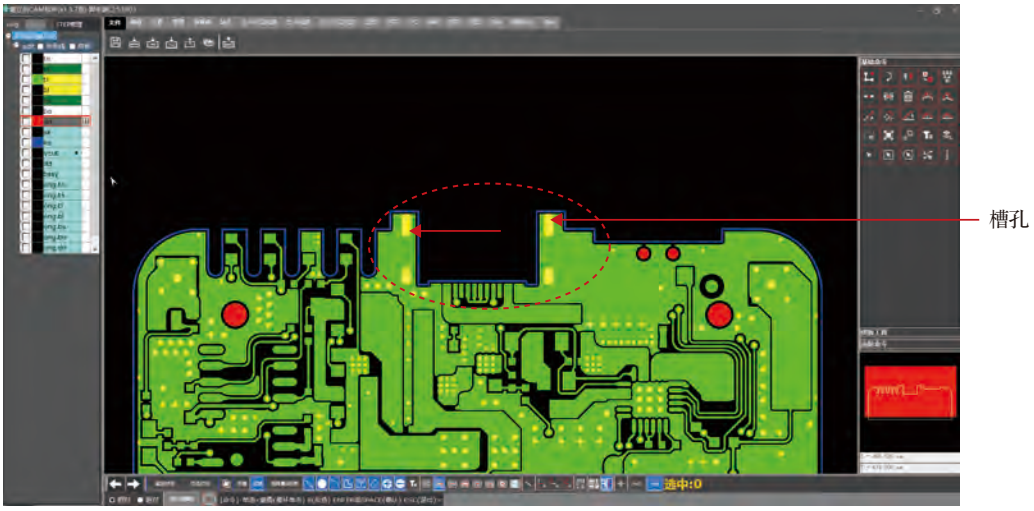


图 4-26　嘉立创 CAM 软件中查看处理后的槽孔资料

4. 槽孔设计注意事项

1）槽孔的大小与形状

在 PCB 钻孔过程中，槽孔分为钻槽和锣槽。这两种槽孔在加工时需使用专用的工具：钻槽采用槽刀进行钻孔，而锣槽使用锣刀进行切割。钻头、槽刀和锣刀如图 4-27 所示。

（a）钻头

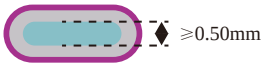
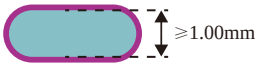
（b）槽刀

（c）锣刀

图 4-27　钻头、槽刀和锣刀

（1）槽孔的最小宽度：嘉立创最小槽刀直径为 0.65mm，最小锣刀直径为 1.00mm。可加工的最小槽宽为 0.50mm（金属化槽）和 1.00mm（非金属化槽）。在特殊情况下，钻槽可用于制造直径 0.60mm 的非金属化槽孔，但长度不超过 10.00mm 为宜。嘉立创 PCB 最小槽孔工艺参数如表 4-5 所示。

表 4–5　嘉立创 PCB 最小槽孔工艺参数

槽孔类别	可加工槽孔设计参数	图　　示
最小金属化槽孔	槽宽：0.5mm（槽长宜≥ 2 倍槽宽）	
最小非金属化槽孔	槽宽：1.00mm（极限为 0.60mm，槽长宜≥ 2 倍槽宽）	

（2）槽孔形状：在 PCB 加工中，孔是通过钻头一个一个钻出来的，单独的圆孔呈圆形，而槽孔则是通过多个圆孔按一定规律和顺序叠在一起形成的，因此钻孔加工槽孔的方式无法实现方形槽孔。金属化槽孔实物图如图 4-28 所示。

在部分 PCB 设计软件中可以设计正方形或长方形的金属化槽孔（嘉立创 EDA 软件无这种功能），这种方形槽孔在实际生产过程中采用常规钻孔方式无法得到，考虑到槽孔的可制造性，如非特殊需求，建议将其改为椭圆形钻孔进行设计。

（3）槽孔方向：在设计软件中，要将槽孔方向由水平改为垂直，应通过调整槽孔的“方向（旋转角度）”来实现，不能直接交换槽孔的“直径 ”和“长度”参数，否则会导致加工出的槽孔尺寸增大（嘉立创 EDA 软件无此隐患）。

（4）槽孔尺寸的运用：金属化槽孔的尺寸和形状应根据特定的元件或连接器要求进行设计。因此，在设计金属化槽孔时，需要考虑以下因素。

最小槽宽和公差：确保制造过程中能够实现设计要求。

有效孔径：确保槽孔足够大以容纳所需的元件，并提供适当的间隙和间距。

思考：假设元器件为 2.5mm×0.8mm 的长方形管脚，如图 4-29 所示，需要设计多大的槽孔才能装得进去？

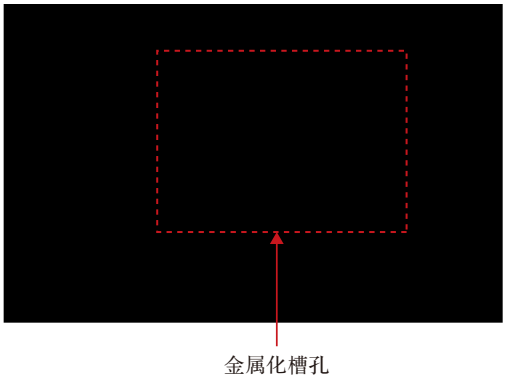


图 4-28　金属化槽孔实物图

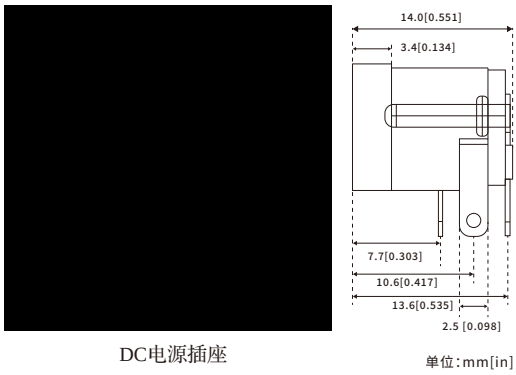


图 4-29　长方形管脚元器件

2）短槽孔的设计与优化

短槽孔是一个相对概念，通常是指在 PCB 设计中，槽孔的长度与宽度比值小于 2 的槽孔。比值大于 2 称为长槽孔，等于 2 为临界值。建议设计时尽量大于临界值。长槽孔和短槽孔设计稿如图 4-30 所示。

短槽孔在 PCB 生产过程中，由于机械加工的物理特性，加工短槽时，钻头一侧悬空，钻头容易向悬空区域和钻头受力方向的反方向滑动，导致出现短槽钻歪斜或者变短现象，如图 4-31 所示。扫描图 4-31 中二维码可查看长、短槽孔的加工视频。

为了避免出现上述问题，在设计槽孔时应注意以下几点。

（1）尽量将槽孔长度设计为槽孔宽度的两倍以上。例如，如果最小槽宽为 0.50mm，那么槽长应设计为 1.00mm 以上。

（2）若槽长为小于 2.00mm 的短槽，也可以考虑设计成合适大小的圆孔。这不仅有助于加工的稳定性，还能确保孔的尺寸和形状更为精确。

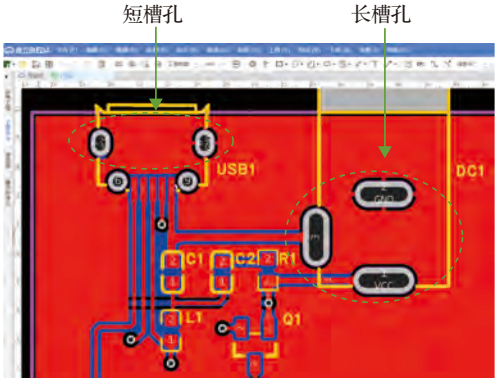


图 4-30　长槽孔和短槽孔设计稿

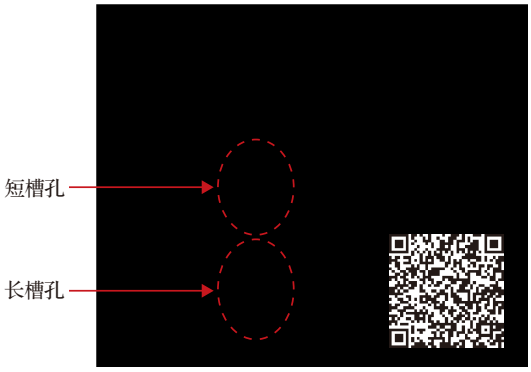


图 4-31　短槽孔歪斜案例实物图

3）槽孔的焊环设计与注意事项

金属槽孔通常用于安装和焊接元器件，必须保持金属化槽孔焊环宽度的设计与 PCB 选择的表面处理工艺相适应，以下是关于金属化槽孔焊环宽度的具体要求。

（1）沉金工艺

双面板：单边焊环宽度推荐值不低于 0.25mm，极限值为 0.18mm。

多层板：单边焊环宽度推荐值不低于 0.20mm，极限值为 0.15mm。

（2）喷锡工艺

金属化槽孔焊环宽度需大于沉金。对于双面板和多层板，顶层和底层单边焊环宽度推荐值不低于 0.30mm，极限值为 0.20mm。具体原因如下：

由于槽孔通常较大，在 PCB 喷锡过程中，整块板子被浸入高温锡槽中，使焊盘表面和金属化孔壁铜层上涂覆一层高温熔融的焊锡。然后，通过热风整平工艺，利用热风将多余的锡吹掉并使焊盘表面平整。然而，在此高温环境作用下，导致基材受热膨胀、表面焊环铜箔与基材之间的胶水软化等现象同时出现，当强热风吹过时，若风力和膨胀应力超过铜箔与基材之间的附着力，可能导致焊环“吹爆”，出现槽孔孔壁铜箔龟裂、翘铜等不良现象。矩阵排列的槽孔出现喷锡爆孔的概率更高，如图 4-32 所示。

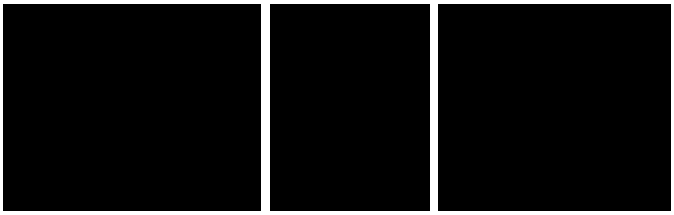


图 4-32　矩阵排列槽孔喷锡爆孔案例图

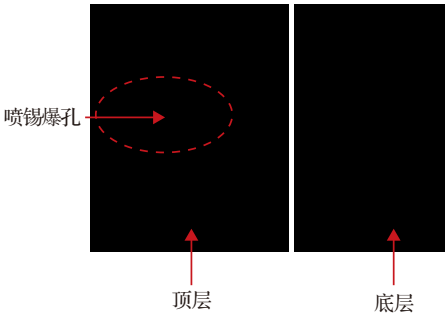


图 4-33　单面焊环喷锡爆孔案例图

部分工程师将槽孔设计成单面焊环，即一面有焊环而另一面无焊环的情况，这种设计更需要采用沉金工艺。如果选择喷锡工艺则容易出现如图 4-33 所示喷锡爆孔风险。

4）特殊方形金属槽孔

在 Layout 设计中，为满足高可靠性和耐用性的需求，或者适应大型方脚元件的安装，若需要使用较大且需要直角形态的金属化槽孔，在部分设计软件中可直接设计成如图 4-34 所示的金属化方形槽孔。若采用常规钻槽加工方式无法做出方形金属化槽孔，其成品 PCB 上槽孔呈如图 4-35 所示的椭圆形，若影响方形插件的安装，一定要制作趋近于方形的金属化槽孔，则需要采用更加复杂的包边工艺，制造成更趋近于直角的金属槽孔，如图 4-36 所示。包边工艺制作的金属化方槽也不是绝对的直角方槽，在槽孔的直角位置会残留最小半径为 0.3mm 的圆角。

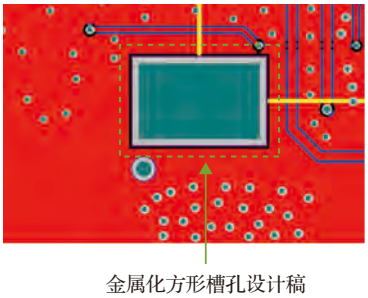


图 4-34　金属化方形槽孔设计稿

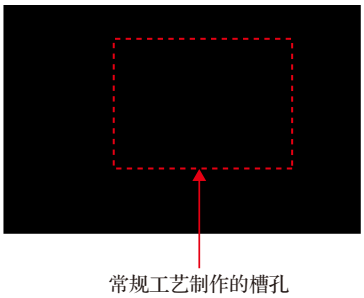


图 4-35　常规工艺制作的槽孔

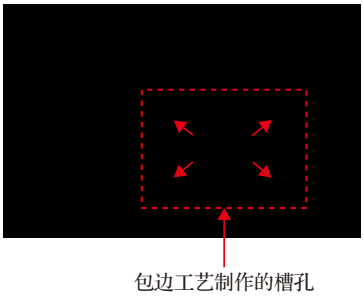


图 4-36　包边工艺制作的槽孔

因特殊形状金属槽孔的孔洞区比一般槽孔要大，若采用喷锡工艺，易出现喷锡爆孔问题。因此，PCB 下单时，应选择包边工艺，并结合使用沉金工艺，以确保特殊形状金属槽孔的制造质量和装配性能，满足产品的高可靠性要求。

若不采用包边工艺，想通过常规工艺制作趋近于方形的槽孔，可以如图 4-37 所示将槽孔设计成椭圆槽孔，并以在四个直角处添加清角孔的方式进行优化设计（方形非金属锣槽也可以参考此方法进行）。此设计优点是可以减少包边工艺的加工成本；缺点是 PCB 成品槽孔边缘会有一定的凹凸不平（见图 4-38）。

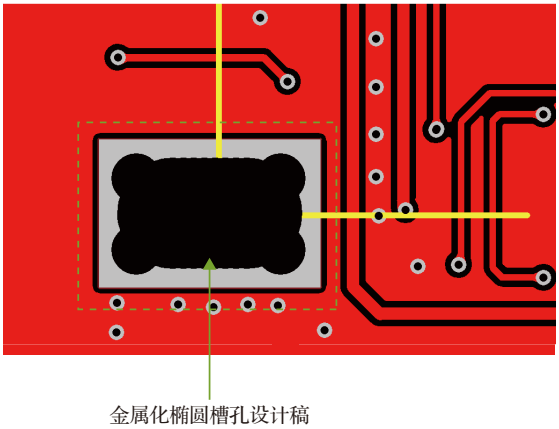


图 4-37　金属化椭圆槽孔设计稿

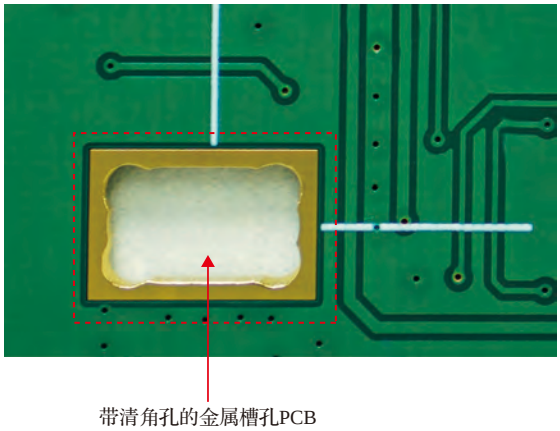


图 4-38　带清角孔的金属化槽孔 PCB

5. 包边工艺

包边工艺是一种特殊的生产工艺，需在 PCB 线路制作工序之前，采用钻孔、锣边和电镀等特殊工艺相结合的技术实现包边的加工，目的是在 PCB 边缘形成金属包边，以增强边缘的导电性能和机械强度，确保 PCB 基材在使用过程中的性能和可靠性。

制造成本：包边工艺复杂，制造成本较高。在决定使用该工艺时，需要综合考虑设计要求、预算限制和必要性。

设计复杂性：包边工艺增加了设计和制造的复杂性，需要在设计阶段充分考虑工艺要求，确保设计的可制造性。

4.3.3　半孔设计要点与注意事项

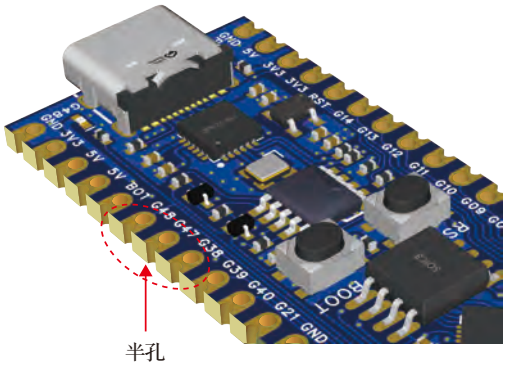
半孔是一种在 PCB 中常见的特殊孔径，仅保留钻孔的一半在板内的金属化孔，如图 4-39 所示。

1. 半孔板设计

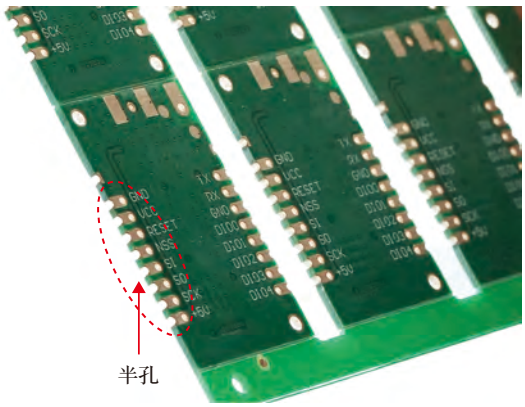
嘉立创 EDA 软件设计半孔板如图 4-40 所示。扫描图 4-40 中二维码可查看具体设计步骤。

2. 半孔板应用场景

半孔板主要应用在一些模块板或子板上，如图 4-41 所示。此类产品作为一个模块，后续通过半孔作为引脚直接焊接到 PCB 母板上。



（a）



（b）

图 4-39　半孔板图片

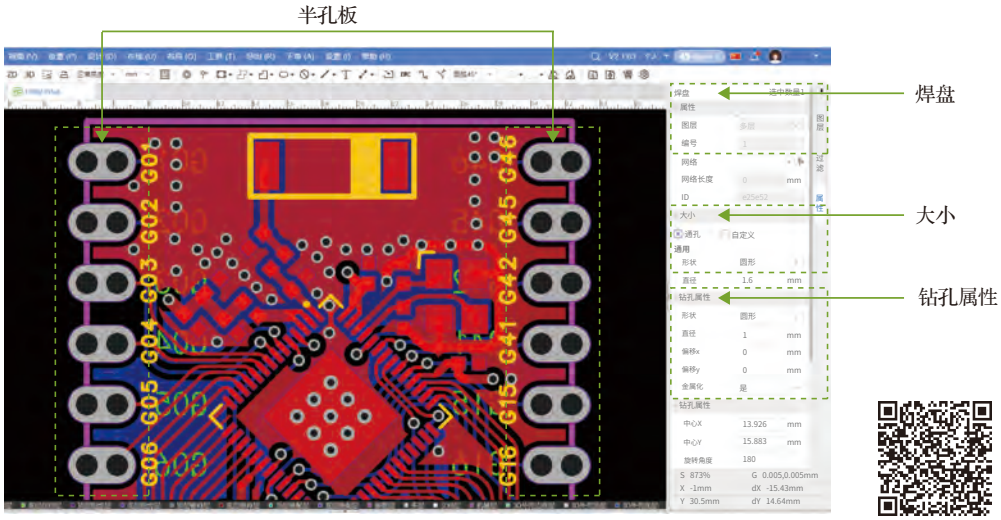
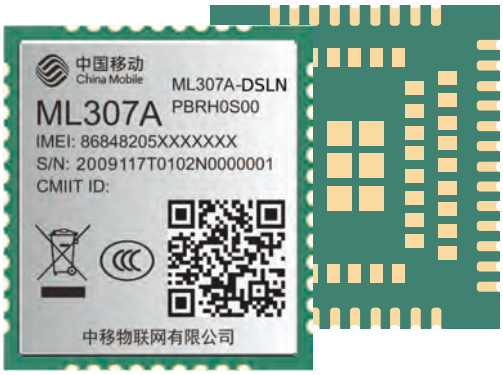
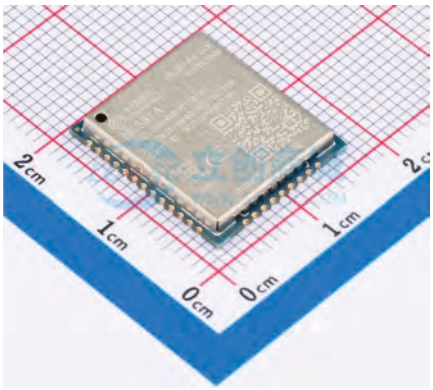


图 4-40　嘉立创 EDA 软件设计半孔板



（a）



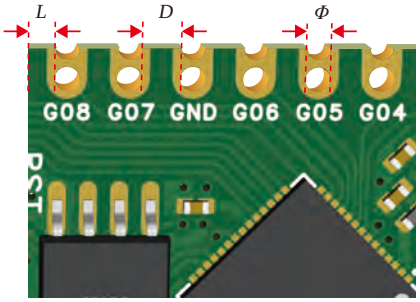
（b）

图 4-41　半孔模块板

3. 半孔设计的工艺参数

设计半孔 PCB 时，可参考表 4-6 所示的嘉立创 PCB 半孔工艺参数。

表 4–6　嘉立创 PCB 半孔工艺参数

项目名称	工艺参数详解	图　　示
半孔工艺	① 半孔孔径（Φ）：≥ 0.6mm； ② 半孔边到板边（L）：≥ 1mm； ③ 半孔边到半孔边（D）：≥ 0.6mm； ④ 单板最小尺寸：10mm×10mm； ⑤ 半孔工艺板厚：≥ 0.6mm	

4. 半孔 PCB 生产工艺

半孔工艺是一种特殊的生产工艺，需在线路制作工序之前，采用钻孔、锣板和电镀等特殊工艺相结合的技术实现半孔的加工。因此，半孔工艺比常规板多出部分特殊的加工工序，会增加制造成本和复杂性。在决定是否使用半孔工艺时，需要综合考虑设计要求、预算限制和需求的必要性，非产品需求情况下，尽量避免设计半孔。

5. 常规工艺生产半孔的隐患

如果在 Layout 时设计了半孔，但 PCB 下单时未要求按半孔工艺制作，则会按常规金属化孔进行制作。最后，外形锣边环节，沿外形线将多余的一半孔通过锣刀切除掉。生产的成品由于未采用特殊半孔工艺，常规锣削处理的 PCB 可能会存在如图 4-42 所示的隐患。

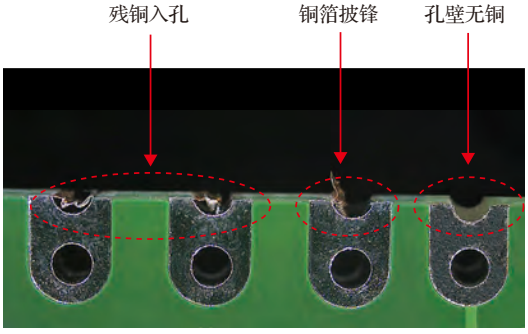


图 4-42　不按半孔工艺生产 PCB 的半孔案例图

（1）残铜入孔现象：在最后的锣边操作中，孔壁的镀铜层可能被锣刀挤入孔内，导致半孔被残铜堵塞。

（2）孔壁无铜现象：孔壁的镀铜层可能会随着锣刀的切削被带走而脱落，导致孔壁无铜。

（3）铜箔披锋现象：锣刀切削时，部分铜箔未卷入孔内或被带走，留在半孔旁边，形成铜箔披锋。

为了避免上述问题，如果需要使用半孔设计，建议下单时选择“半孔”工艺生产，以确

保半孔的可靠性。通过正确的设计和生产工艺，可以确保 PCB 产品的质量和性能，满足应用需求。

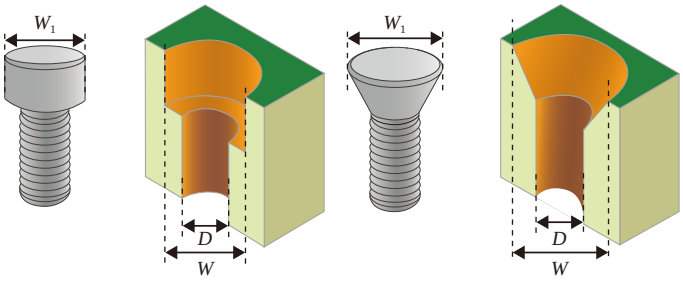
4.3.4 沉头孔、背钻和盲槽工艺

为了提升信号完整性和组装平整度，PCB 设计和加工不仅需要常规的金属化孔和非金属化孔，而且还需要特殊的钻孔工艺，如嘉立创提供的沉头孔、背钻和盲槽工艺。

1. 沉头孔工艺

1）沉头孔简介

沉头孔是一种特殊的钻孔加工形式，可以通过二次钻孔控制深度的方式形成。因加工钻头不同，可分为柱形沉头孔和锥形沉头孔，如图 4-43 中（a）所示。沉头孔的设计允许紧固件完全沉入 PCB 表面，从而提高装配的平整度和美观性。通常 PCB 中所运用的多为锥形沉头孔，孔的顶部被扩大，从开口处开始具有角度，嘉立创目前所加工的沉头孔是锥形沉头孔，如图 4-43 中（b）所示。



（a）柱形沉头孔和锥形沉头孔

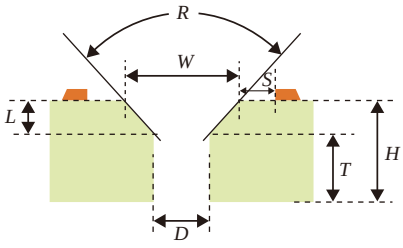
（b）锥形沉头孔

图 4-43　沉头孔

2）沉头孔设计注意事项

在进行沉头孔设计时，需综合考虑 PCB 制造商的工艺制造参数。嘉立创 PCB 沉头孔工艺参数如表 4-7 所示。

表 4–7　嘉立创 PCB 沉头孔工艺参数



沉头孔工艺说明			
代号	名称	参数	说明
H	成品板厚	≥ 0.6mm	目前支持 FR-4 的 2 ～ 32 层板
D	通孔直径	≥ 0.3mm	支持 PTH 与 NPTH 孔做沉头孔
L	沉头孔深度	自定义	公差：±0.1mm
R	沉头孔角度	90°/135°	角度公差：±10°
W	沉头孔直径	0.5 ～ 6.4mm	公差：±0.1mm（小于此公差不能制作）
T	最小余厚	≥ 0.2mm	低于此数值存在钻破余厚的情况
S	安全距离	≥ 0.2mm	沉头孔边到焊盘 / 线路 / 铜面的安全距离

（1）安全距离：沉头孔需与周边导体保持至少 0.2mm 间隙，与周边钻孔保持至少 0.3mm 间隙，以避免加工损伤。

（2）沉头孔角度：选择的螺钉形状及沉头孔角度须与 PCB 制造商提供的参数一致，以确保匹配。

（3）沉头孔深度：总板厚减去沉头孔深度后的基材余厚须大于 0.2mm，以确保沉头孔强度。

（4）沉头孔方向：明确沉头孔的起始面，避免加工错层。

（5）沉头孔属性：沉头孔属性应与通孔一致，若通孔为非金属化孔，则沉头孔也应为非金属化孔；若通孔为金属化孔，则沉头孔也应为金属化孔。

（6）沉头孔直径：锥形沉头孔直径与通孔直径、深度和角度相关，设计时需考虑 PCB 制造商的工艺能力。

（7）图纸说明：为确保沉头孔工艺的准确实施，提供的资料需清晰记录沉头孔坐标、通孔直径、数量、深度、角度及方向等重要数据。

2. 背钻工艺

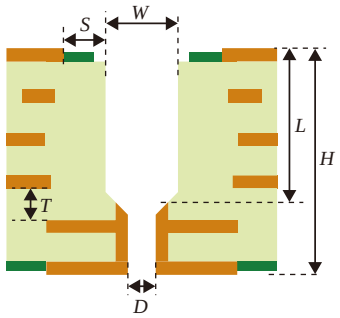
1）背钻简介

背钻是一种从任意板面钻孔至预定深度以去除部分金属化孔的方法，旨在减少孔总长度，提升信号完整性或电路绝缘性能。在多层 PCB 中，信号通过金属化孔连接不同层的电路。高频信号在通过孔时，可能会引起信号反射和损耗。背钻工艺通过在孔底部钻孔，去除多余的铜，以降低信号损耗，增强信号完整性。

2）背钻孔设计注意事项

在进行背钻孔设计时，需综合考虑 PCB 制造商的工艺制造参数。嘉立创 PCB 背钻工艺参数如表 4-8 所示。

表 4–8　嘉立创 PCB 背钻工艺参数



背钻孔工艺说明			
代号	名称	参数	说明
H	成品板厚	≥ 0.8mm	目前支持 4 ～ 32 层多层板
D	通孔直径	0.2 ～ 0.5mm	成品通孔在背钻后全部树脂塞孔
W	背钻直径	依通孔定	一般比通孔钻头尺寸大 0.2mm
L	背钻深度	贯通层次	公差：±0.05mm
T	介质厚度	≥ 0.15mm	小于此数值需要提出评审
S	安全距离	≥ 0.2mm	背钻孔边到焊盘 / 线路 / 铜面的安全距离
说明	工艺参数随设备和技术更新而变化，请关注嘉立创官网了解最新工艺参数		

（1）安全距离：背钻孔需与周边导体保持至少 0.2mm 间隙，与周边钻孔保持至少 0.3mm 间隙，以避免加工损伤。

（2）通孔直径：条件允许情况下，尽量设计在 0.3 ～ 0.5mm 之间，以降低加工成本并提高树脂塞孔质量。若设计空间受限，则最小可设计为 0.2mm。

（3）介质厚度：背钻目标层与背钻方向线路之间的介质厚度不得小于 0.15mm，小于此值需进行产前评估。

（4）背钻属性：背钻孔应为非金属化孔，采用树脂塞孔填实。

（5）图纸说明：为确保背钻工艺准确实施，资料中需清晰记录背钻孔的坐标、直径、数量、深度（目标层）及方向等重要数据。

3. 盲槽工艺

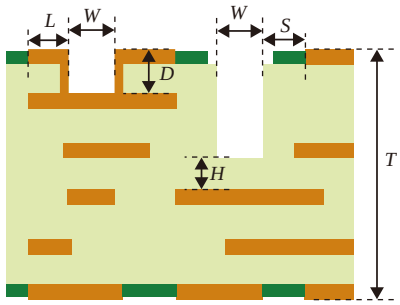
1）盲槽简介

PCB 盲槽：盲槽是指在印制电路板（PCB）中，深度不穿透整个板厚的槽孔，主要用于优化信号传输和散热管理。它能改善高频信号完整性、降低电磁干扰、增强散热性能，并有助于实现阻抗匹配及便于元器件下沉。

2）盲槽设计注意事项

设计盲槽时，需综合考虑 PCB 制造商的制程能力和安全距离。嘉立创 PCB 盲槽工艺参数如表 4-9 所示。

表 4–9　嘉立创 PCB 盲槽工艺参数



盲槽工艺说明			
代号	名称	参数	说明
T	成品板厚	≥ 0.80mm	适合 2 ～ 32 层 FR-4 板
D	盲槽深度	≥ 0.20mm	公差：±0.1mm
W	盲槽宽度	≥ 1.0mm	公差：±0.1mm，支持圆形或方形
L	盲槽环宽	≥ 0.30mm	是指 PTH 盲槽的焊环宽度
H	盲槽余厚	≥ 0.20mm	距离最近的内层或外层铜面 / 基材厚度
S	安全距离	≥ 0.20mm	盲槽边到其他焊盘 / 线路 / 铜面的距离
说明	① 需要说明哪些槽做盲槽，以及盲槽面向、深度或贯通哪几层； ② 需要指明盲槽金属化属性（在焊盘上面做盲槽，默认做 PTH）； ③ 盲槽不支持加急，需在原交期上面增加 2 ～ 3 天		

4.3.5　孔径公差与应用

钻孔直径公差是成品 PCB 钻孔尺寸与设计要求之间允许存在的偏差范围，是评估质量和责任的唯一标准。有效控制孔径公差对 PCB 的质量和可靠性至关重要。对于 PCB Layout 设计工程师，准确了解 PCB 制造商的成品孔径公差是设置元器件封装尺寸的重要前提。

1. 插件孔孔径公差

嘉立创 PCB 插件孔孔径公差：+0.13/−0.08mm。

孔径补偿：为平衡孔壁沉铜和喷镀导致的孔径缩小，嘉立创在 CAM 工程资料处理时会对插件孔进行孔径补偿。

假设双面喷锡板资料中，设计的插件孔直径为 1.0mm，CAM 工程师会将钻孔补偿加大 0.15mm，采用 1.15mm 的钻头进行钻孔。PCB 经过沉铜和喷锡后，成品孔径尺寸 = 钻孔尺寸 − 孔壁镀覆层厚度 ×2，成品孔径尺寸为 0.92 ～ 1.13mm。

例 1：圆形管脚

若一个普通的圆形管脚元器件如图 4-44 所示，管脚直径 *d* 为 0.8mm，在 Layout 设计时，如果把管脚孔也设计成 0.8mm，成品 PCB 如果走负公差 −0.08mm 时，成品孔径为 0.72mm，小于元器件管脚直径，导致器件无法插件焊接。为此，在进行 Layout 设计时，必须考虑

PCB 制造商的孔径公差范围，尤其是负公差范围。元器件管脚孔直径最小需要满足管脚大小（0.8）+ 负公差值（0.08）=0.88mm，取整数为 0.90mm 来设计较为合适。

如果设计为 0.9mm，生产出来的成品孔无法插入 0.8mm 的管脚，则成品孔径超出了正常公差范围“−0.08mm”，可以评定为 PCB 制造商的生产问题。

例 2：方形管脚

若一个方形管脚元器件如图 4-45 所示，为一个通用的排针，其管脚为正方形。如何设计这个管脚的封装呢？在设计管脚封装时，需要考虑其有效入孔宽度是管脚的对角线。因此，计算管脚直径时，需要以对角线宽度为基础，再加上负公差的值，并取整数来确定。实际中，有部分设计人员直接按管脚的长或宽为基准，加上孔径负公差参数来设计圆形的 Pad（插件孔），这可能导致 PCB 在走正公差时勉强插入，而在成品孔与设计值一致或走负公差时无法插入。

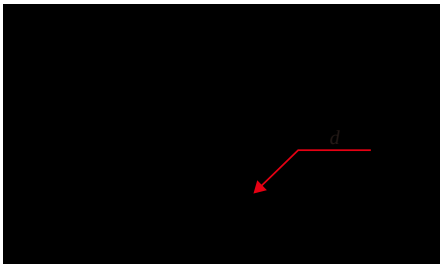


图 4-44　圆形管脚元器件

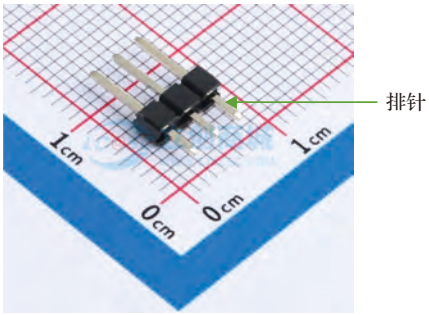


图 4-45　方形管脚元器件

2. 压接孔孔径公差

1）嘉立创 PCB 压接孔孔径公差

压接孔由于其特殊的孔径用途，孔径大小是压接技术可靠性的保障。嘉立创制造的 PCB 压接孔孔径公差范围为 ±0.05mm。

2）嘉立创确保 PCB 压接孔孔径公差无误的措施

特定的表面处理工艺：采用沉金工艺制造压接孔，排除喷锡工艺孔壁喷锡不平隐患，保持孔壁平滑。

特定的管控参数：在特定的生产环节，对工具和参数进行精确管控，例如压接孔的 CAM 补偿、钻头使用次数、沉铜厚度和沉金厚度等，确保成品孔径公差控制在 ±0.05mm 范围内。

精确的检测设备：嘉立创拥有全自动 AVI 扫描检测设备，可以准确检测孔径是否在公差范围内。

4.4　PCB 正、负片工艺

随着时代的发展和科技的进步，PCB 逐渐向高多层板发展，以满足更高密度、更小尺寸和更复杂功能的需求。在高多层板制造过程中，过孔对 PCB 的重要性不可忽视。过孔品质是至关重要的因素，过孔品质的好坏取决于选择正片还是负片工艺来制作 PCB，因为这直接

决定了 PCB 过孔是否存在潜在问题。

4.4.1 正、负片工艺加工流程

正片工艺和负片工艺是 PCB 制造中采用的两种光刻技术。它们的主要区别在于曝光和显影过程中所暴露的图形不同，以及在蚀刻过程中对金属化孔和导线铜箔的保护方式不同。

1. 正片工艺

正片工艺是一种通过曝光显影技术，褪去部分干膜，露出与设计所需保留的线路图形完全一致的铜箔，再利用电镀形成镀锡保护层，保护导线和孔壁铜箔在蚀刻过程中不受蚀刻液侵蚀的 PCB 制造工艺。

主要加工流程：

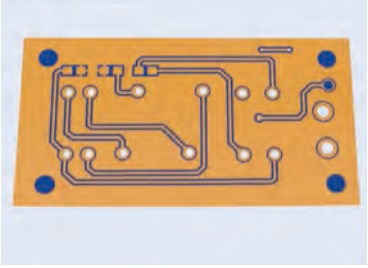


图 4-46　正片显影后平面示意图

（1）曝光：将沉铜后的覆铜板贴上干膜，利用曝光技术和光固化反应原理，通过激光扫描方式对设计所需的线路和过孔以外的干膜进行光固化。

（2）显影：通过显影技术清除未光固化的干膜，露出与设计线路完全一致的铜箔图形，实现“所见铜箔即所得”的效果，如图 4-46 所示。

（3）图形电镀：采用电镀技术，在露出的线路和孔壁的表面先镀上一层铜箔，然后在铜箔表面镀上一层锡，形成致密的镀锡保护层（见图 4-47），保护露出的导线和孔壁铜箔在蚀刻过程中免受蚀刻液侵蚀。

（4）蚀刻：褪去剩余的干膜，露出未被镀锡保护的铜箔，使用蚀刻技术对露出的铜箔进行腐蚀。镀锡层在蚀刻过程中有效地保护设计所需的线路和孔壁铜箔，防止其受到蚀刻液侵蚀，如图 4-48 所示。扫描图 4-48 中二维码可查看正、负片工艺视频。

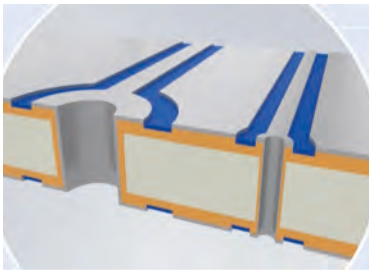


图 4-47　正片图形电镀后剖面示意图

图 4-48　正片蚀刻后剖面示意图

优点：

（1）镀锡层在蚀刻过程中对孔壁实现全方位保护，有效防止蚀刻液侵蚀孔壁铜箔。

（2）保护线路和孔壁的镀锡层硬度高，咬合度强，可更好地保证导线宽度，有利于制造更精密的导线。

缺点：

在孔壁沉铜后，需要增加镀锡和褪锡工艺，流程长，成本高。

2. 负片工艺

负片工艺是一种通过曝光显影技术，褪去部分干膜，露出与设计所需保留的线路图形完

全相反的铜箔，利用残留的干膜作为保护层，保护设计所需的导线和孔壁铜箔，使其在蚀刻过程中不受蚀刻液侵蚀的 PCB 制造工艺。

主要加工流程：

（1）曝光：将沉铜后的覆铜板贴上干膜，利用曝光技术和光固化反应原理，通过激光扫描方式对覆盖在设计所需的线路和过孔上的干膜进行光固化。

（2）显影：通过显影技术去除未光固化的干膜，露出设计所需线路和过孔以外的铜箔，呈现出与设计线路相反的铜箔图形，即“所见铜箔非所得”，如图 4-49 所示。

（3）蚀刻：使用蚀刻技术对露出的铜箔进行腐蚀。蚀刻过程中，依靠导线和孔壁上覆盖的干膜遮挡蚀刻液进入导线底部和钻孔内，防止蚀刻液对导线和孔壁铜箔进行侵蚀，如图 4-50 所示。扫描图 4-50 中二维码可查看正、负片工艺视频。

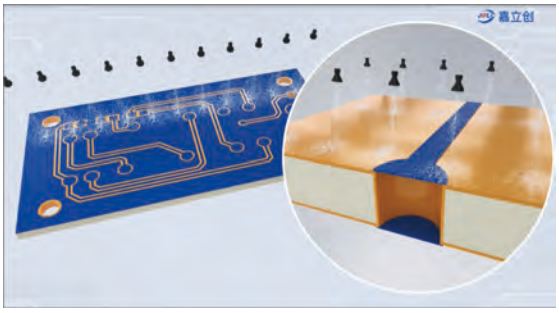


图 4-49　负片显影后（蚀刻前）示意图

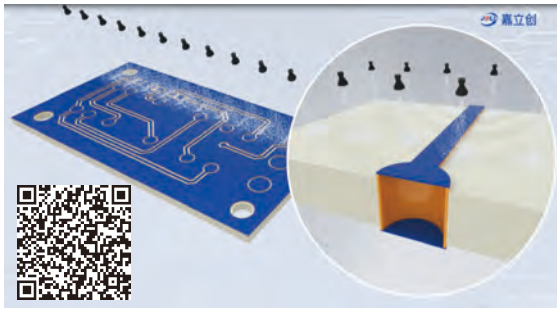


图 4-50　负片蚀刻后示意图

优点：

相对正片工艺，生产工艺少，效率高，成本低。

缺点：

干膜相对镀锡层更脆弱，若干膜出现龟裂或对位偏移，会导致蚀刻液进入孔壁，腐蚀孔壁铜箔。

4.4.2　正、负片工艺的品质隐患

负片工艺由于其加工流程相对简单且成本较低，备受部分 PCB 制造商青睐。然而，负片工艺对金属化孔在蚀刻中的保护存在一定的不可靠性，尤其是在生产高多层 PCB 时，从品质角度来看，负片工艺的隐患大于正片工艺。正片工艺虽然在制造非金属化孔方面存在一定的缺陷，但在整体品质上更为可靠。

1. 负片工艺与品质的关联

1）负片工艺的可靠性

负片工艺因其独特的工艺流程，在制造非金属化孔方面具有不可替代的优势。该工艺通过蚀刻液进入孔洞，能够彻底腐蚀孔壁的铜箔。与传统的二钻工艺相比，负片工艺效率更高，且在制造非金属化孔方面比正片工艺更为可靠。

2）负片工艺的不可靠性

负片工艺的不可靠性主要源于蚀刻过程中掩孔干膜可能无法有效覆盖孔洞，从而导致金属化孔壁的铜箔受到蚀刻液侵蚀，影响孔的质量。掩孔干膜可能无法完全覆盖孔洞的原因主要包括以下几点。

（1）掩孔干膜与覆铜板的黏合力不及正片工艺的镀锡层。掩孔干膜是通过压膜机的压力将其粘贴在覆铜板表面的，而镀锡保护层则通过电镀方式将锡离子还原为金属锡，具有更高的咬合度。因此，掩孔干膜与覆铜板的黏合力不及镀锡层。若过孔焊环较小，掩孔干膜在钻孔周围的覆铜板上覆盖面积偏小（见图 4-51），对应的黏合力相对较低。若掩孔干膜的黏合力小于显影清洗水压或蚀刻液的冲刷力度，掩孔干膜可能会松动，导致蚀刻液渗入钻孔内（见图 4-52），侵蚀孔壁铜箔，出现分散性坏孔风险（见图 4-53）。

图 4-51　掩孔干膜覆盖面积偏小示意图

图 4-52　干膜破裂导致蚀刻液渗入钻孔内部示意图

（2）掩孔干膜的强度不及正片工艺的镀锡保护层。作为光敏胶质材料，掩孔干膜在加工过程中更容易出现刮伤或破裂。此外，若钻孔直径较大，掩孔干膜中间的镂空区域可能过大，导致在显影清洗或蚀刻液冲刷过程中出现龟裂。这些情况都可能导致蚀刻液渗入钻孔内或线路底部，侵蚀孔壁铜箔和导线铜箔（见图 4-52），从而产生分散性坏孔（见图 4-53）和线路残缺的风险。

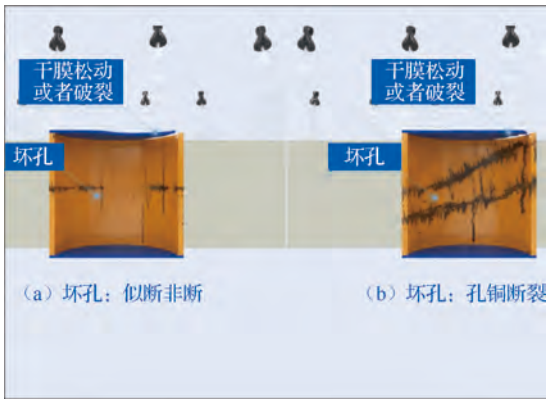


图 4-53　孔壁铜箔被蚀刻液侵蚀形成坏孔示意图

（3）可靠性易受限于外界因素。采用干膜掩孔容易受外界因素的影响，导致干膜掩孔品质不可靠，具体表现在以下几点。

① 钻孔精度的影响：无论多么精密的钻孔机，都只能将钻孔中心控制在接近资料坐标范围内，其偏摆现象总会存在。

② 基材胀缩：基材因自身结构特性，虽然在开料前会进行恒温烘烤，预防加工过程中胀

缩偏大，但仍有轻微的胀缩存在。

③ 对位精度：无论是人工对位还是自动对位设备，都存在一定的对位精度公差。由于钻孔偏摆和基材胀缩的限制，虽然可以通过提升设备精度来减小误差，但很难实现零误差。

④ 菲林精度误差和光照折射误差：若采用传统菲林曝光技术，菲林光绘过程中有一定的胀缩公差，且曝光过程中光线经过菲林厚度折射后，会产生一定的精度误差。

3）负片工艺的局限性

（1）负片工艺在使用干膜掩孔制造金属化孔时，对蚀刻液的阻挡存在一定的不可靠性。因此，在制造带有金属化通孔的高多层 PCB 时，分散性坏孔的出现概率较高，金属化孔的品质隐患也相对较大。

（2）负片工艺无法通过干膜掩孔实现钻孔内一侧金属化而另一侧不被金属化，因此不利于金属化半孔工艺的制造。

2. 正片工艺与品质的关联

1）正片工艺的可靠性

正片工艺由于采用镀锡保护层防止蚀刻液侵蚀孔壁铜箔，即使因基材胀缩、钻孔偏摆、对位精度偏差或设计焊环偏小等因素导致过孔单边焊环偏小［如 0.05 mm（2mil）］或设计孔径过大［甚至达到或超过 6mm（240mil）］，也能在孔壁和焊环表面正常镀上一层致密的镀锡层。这层镀锡层可以有效保护孔环和孔壁铜箔免受蚀刻液腐蚀，避免因蚀刻产生的分散性坏孔，可靠性更高。且正片工艺使用硬度较高的镀锡层保护导线，可以避免意外刮伤导致被误蚀刻。因此，相对于负片工艺，正片工艺更能保证导线的完整性和可靠性。

2）正片工艺的不可靠性

尽管正片工艺在加工金属化孔时具有更高的可靠性，但在制造非金属化孔时存在一定的短板。

正片工艺制造非金属化孔的原理：通过曝光和显影工艺，将设计的导线和金属化孔显露出来，而非金属化孔则保持干膜覆盖。在电镀工艺中，干膜阻止电镀药水进入孔洞形成镀锡保护层。随后，经过褪膜工艺去除非金属化孔上的干膜，再通过蚀刻腐蚀掉孔壁的沉铜部分。当非金属化孔径超过 5mm 时，在电镀过程中可能会出现掩孔干膜破裂，导致电镀药水进入孔洞并在孔壁镀上一层锡。这会阻止蚀刻药水与非金属化孔壁的铜箔接触，导致孔内的铜箔无法被彻底蚀刻掉。

3）怎么平衡正片工艺的可靠性与不可靠性

有没有一种办法，既能享受正片工艺对金属化孔和导线高可靠性的益处，又能排除其在非金属化孔加工方面的不可靠性呢？

当然有。这就需要 Layout 设计工程师的参与。在 PCB 设计阶段，当需要处理直径大于 5mm（200mil）的非金属化孔时，可以采用外形锣孔的设计方法。通过对非金属化孔进行锣边处理，可以确保孔内完全没有铜箔存在，从而同时享受正片工艺对金属化孔和导线的高可靠性优点，排除非金属化孔加工中的不可靠性问题。

4.4.3　坏孔

1. 坏孔的分类

坏孔是在制造 PCB 时出现的不合格孔洞，这里是指孔壁铜箔被蚀刻液侵蚀导致的问题，

如无法导通的金属化孔和似断非断的金属化孔。

- 不导通的坏孔：孔壁铜箔被蚀刻液腐蚀，导致开路，无法实现 PCB 上下层的电气导通，如图 4-54 所示。此类孔可以通过常规测试手段（如飞针测试或测试架测试）检测排查，避免被交付给客户，是危害最小的一种坏孔。
- 似断非断的坏孔：孔壁铜箔被蚀刻液腐蚀后，未完全断开，处于似断非断状态，仍具备一定的导电性能，如图 4-55 所示。采用常规的飞针测试或测试架测试时，因为这些检测方法的精度只能达到欧姆级，无法检测到此类坏孔内部微小的毫欧级阻值变化，其测试结果仍然会显示合格。待产品通电一段时间后，问题才会显现，具有一定的潜伏期，是坏孔中隐患和危害最大的类型。

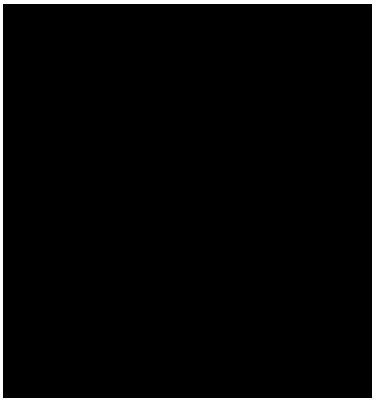


图 4-54　不导通的坏孔横切面

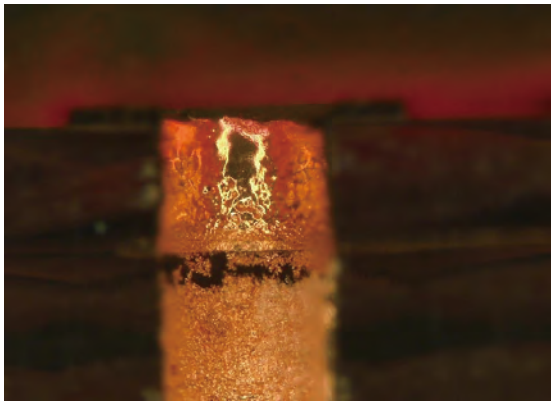


图 4-55　似断非断的坏孔横切面

2. 负片工艺中的坏孔

负片工艺中的坏孔，除沉铜工艺中因孔径过小可能出现少量坏孔外，主要由干膜掩孔工艺的不确定性导致，这类坏孔的产生受多种因素影响，缺乏规律性，表现为分散性和不可控性的坏孔。

3. 正片工艺中坏孔

在正片工艺中，除沉铜工艺中因孔径过小可能出现少量坏孔外，在某些情况下也可能会产生坏孔，主要是由于电镀工序中的电镀药水导致的“批量性坏孔”。这种类型的坏孔通常可以通过首尾检测和终检测试的方式发现，因此属于可稽查、可管控、可追溯的坏孔。相比之下，正片工艺中分散性和不可控的坏孔情况则非常罕见。

4.5 钻孔品质控制与检测

在 PCB 设计和制造中，钻孔起着至关重要的作用，主要包括电气连接、器件安装和定位等功能。因此，钻孔的品质控制与检测是确保 PCB 质量的关键步骤。

4.5.1 导通性检测

PCB 镀铜坏孔是指 PCB 制造过程中出现的镀铜不合格的孔洞，包括不导通和似断非断

两种情况，如图 4-56 所示。

1. 检测不导通的坏孔

检测工具：飞针测试机、测试架。

检测方法：在 PCB 出厂前，采用飞针测试机或测试架进行全面的开路和短路测试，若出现不导通的坏孔，会被检测为开路问题。通常情况下，存在此类问题的 PCB 不会流向终端客户。

2. 检测似断非断的坏孔

检测工具：四线低阻测试机。

检测方法：在线路蚀刻后，使用四线低阻测试机（见图 4-57）对孔径阻值进行毫欧甚至微欧级别的精确测量，以检测和排查飞针测试或者测试架测试难以识别的似断非断的坏孔问题。

四线低阻测试又称四线开尔文测量，是一种精确的电阻测量方法。

原理：通过恒定电流源施加电流，测量电压引线之间的电压降，从而计算出电阻值。

目的：用于检测 PCB 上的坏孔。如果测得的阻值超出合格范围，则表明该孔存在问题。

优势：相较于万用表、飞针测试机和测试架的测试方法，四线低阻测试能够提供毫欧甚至微欧级别的测量精度。

尽管嘉立创所有订单采用正片工艺生产，但仍对小于 0.3mm 的过孔和高多层 PCB 实施四线低阻测试，以确保产品品质。每个工厂均配备四线低阻测试机，尽管其会降低生产效率并增加制造成本，但能够有效提高检测精度，及早发现坏孔问题，确保产品的可靠性。对于普通 PCB，通常无须进行四线低阻测试，客户可根据需求选择。

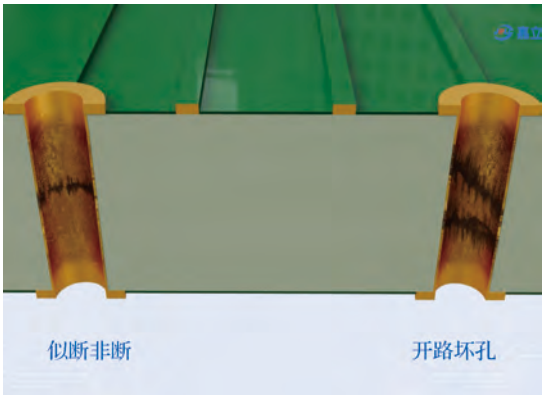


图 4-56　不导通坏孔与似断非断坏孔

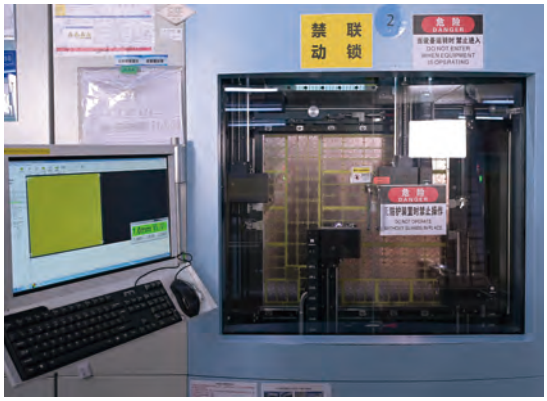


图 4-57　四线低阻测试机

4.5.2　孔径检测

在 PCB 制造中，钻孔孔径的准确性至关重要。常用的孔径检测方法有针规检测和显微镜检测。

1. 针规检测

测量工具：针规、游标卡尺或千分尺，如图 4-58 所示。

评估标准：PCB 孔径公差或订单约定公差范围。

（a）针规　　（b）游标卡尺　　（c）千分尺

图 4-58　针规、游标卡尺、千分尺

检测方法与步骤：

（1）确定测量目标：确认需要测量的孔径及其设计尺寸。

（2）选择合适针规：根据孔径设计值和公差范围，选择相应直径的针规。

（3）复核针规直径：使用千分尺或游标卡尺复核所选针规的直径，确保其准确性。

（4）孔径测量准备：将待测 PCB 固定，保持板面水平和板底悬空。

（5）孔径测量：

① 选择相应直径的针规，轻轻插入待测孔中。

② 如果针规能够自由落体穿过孔径，则选择稍大一规格的针规，重复测量。

③ 如果针规无法自由穿过孔径，则孔径的最大或最小值为无法穿过孔径的前一个规格值。

（6）结果评估：最终测量结果若在公差范围内，则成品 PCB 孔径合格；若超出公差范围，则属于制造商生产不良。

2. 显微镜检测

检测工具：带刻度的立体显微镜。

检测方法与步骤：将显微镜放大倍数设置为 20 倍，测量孔径最大处的内径。

结果评估：最终测量结果若在公差范围内，则成品 PCB 孔径合格；若超出公差范围，则属于制造商生产不良。

4.5.3　钻孔内部镀层结构检测

1. 铜镀层厚度检测

检测方法：对金属化孔进行如图 4-59 所示的横向切片后，通过在镀覆孔每侧壁上大约等距选取三个点所得的测量值来确定平均铜厚。

评估标准：按 1、2、3 级接受标准可分为以下两种接受状态。

- 1、2 级接受状态：平均铜厚≥ 20μm，最小铜厚≥ 18μm。
- 3 级接受状态：平均铜厚≥ 25μm，最小铜厚≥ 20μm。

2. 孔壁空洞检测

金属化孔在镀铜或者喷涂过程中，若出现如图 4-60 所示的铜镀层或者涂覆层空洞，则需按表 4-10 中所标注的 1、2、3 级接受标准进行验收。

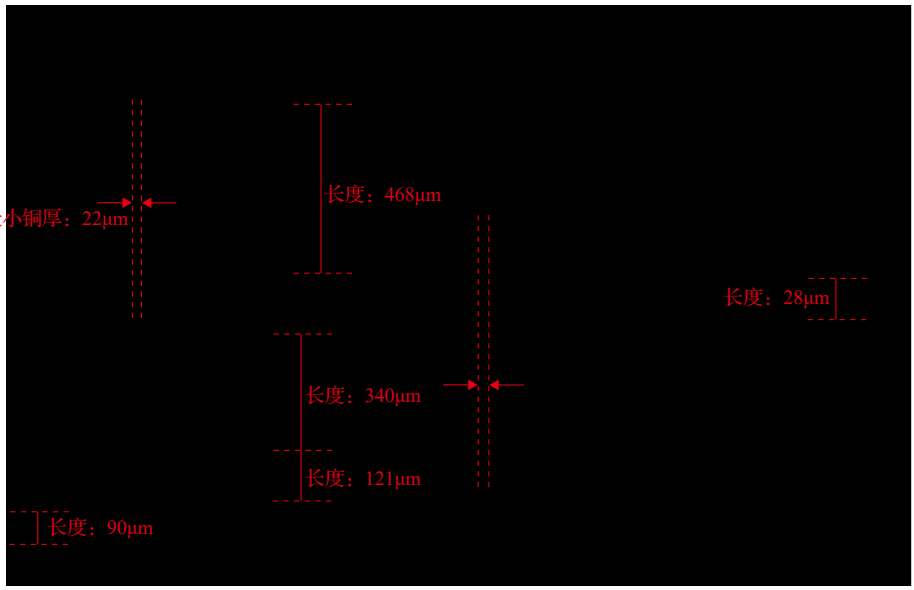
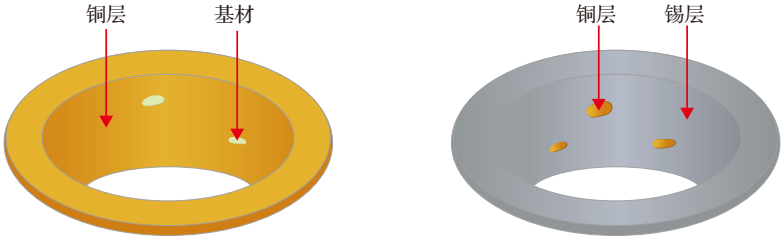


图 4-59　金属化孔横向切片剖面图



（a）铜镀层空洞示意图　　（b）涂覆层空洞示意图

图 4-60　铜镀层与涂覆层空洞示意图

表 4–10　不同产品等级的铜镀层（涂覆层）空洞要求

产品等级	要　求			
	孔内空洞数	有空洞孔的百分数	空洞的长度 / 孔长度的百分数	空洞的环形度
1 级	≤ 3（≤ 5）	≤ 10%（≤ 15%）	≤ 10%（≤ 10%）	≤ 90°
2 级	≤ 1（≤ 3）	≤ 5%（≤ 5%）	≤ 5%（≤ 5%）	≤ 90°
3 级	0（≤ 1）	0（≤ 5%）	0（≤ 5%）	0°

练习题

1. 嘉立创采用公制机械钻头加工钻孔，钻头直径按 0.05mm 单位递增或递减，以下哪些参数符合钻头直径规格？（　　）

A. 0.30mm　　B. 0.33mm　　C. 0.35mm　　D. 0.38mm

2. 嘉立创可加工的最小过孔（Via）直径是多少？（　　）

A. 0.15mm　　B. 0.30mm

3. 设计 PCB 插件孔时，如果用过孔（Via）代替元器件插件孔（Pad），选择过孔盖油工艺，按孔属性生产 PCB 会发生什么事？（　　）

A. 焊盘被油墨覆盖　　B. 孔被油墨堵住

C. 成品孔径偏小　　D. 以上都会出现

4. 如果 PCB 过孔直径小于 0.3mm，易出现似断非断的坏孔，很难通过测试架和飞针测试机检查出来。当通电使用一段时间后，产品会出现问题。嘉立创采用四线低阻测试管控品质，成本较高。从提高产品良率和控制成本的角度出发，设计 PCB 过孔直径时，在条件允许情况下，应尽量不小于以下哪个参数？（　　）

A. 0.15mm　　B. 0.30mm　　C. 0.50mm

5. 元器件管脚封装为长方形，在设计封装时需要画椭圆形的金属化孔，这类孔也被称为槽孔（见图 4-61），嘉立创可加工的金属化槽孔最小宽度是多少？（　　）

A. 0.50mm　　B. 1.00mm

6. 在 PCB 设计中，适当增大过孔（Via）之间的间距（见图 4-62）可以避免多种制造和质量问题。根据嘉立创的“下单技术员必看说明”，为了防止钻孔过程中相邻过孔间基材受损，导致开路和漏电风险，相邻过孔（Via）的最小边缘间距应不小于多少？（　　）

A. 0.10mm　　B. 0.15mm　　C. 0.20mm

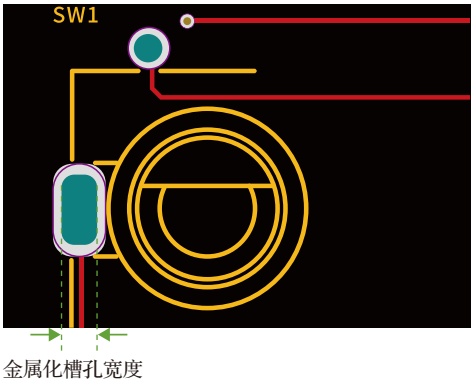


图 4-61　练习题 5 图

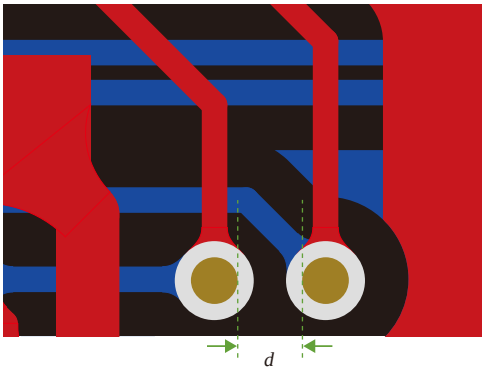


图 4-62　练习题 6 图

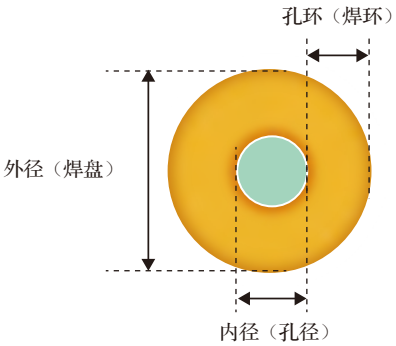


图 4-63　练习题 7 图

7. 无论是内径、外径还是孔环（见图 4-63），PCB 导电孔（Via）的参数对板子的良率和成本都有显著影响。嘉立创工艺参数表中的极限值，是工艺能力下可生产的最小值，仅供工程师参考，在 Layout 空间充足的情况下，应尽量使用大于极限值的参数。导电孔为以下哪组参数，对 PCB 的良率和成本最有利？（　　）

A. 内径 0.3mm，外径 0.45mm

B. 内径 0.15mm，外径 0.25mm

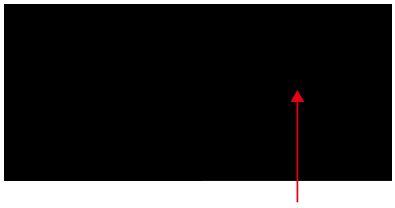
C. 内径 0.20mm，外径 0.35mm

8. 设计焊盘孔时，按图 4-64 所示的设计，如果未勾选“plated（电镀）”选项，或者“金属化”选项选“否”，生产出的 PCB 成品孔径与哪个选项的展示效果相同？（　　）

图 4-64　练习题 8 图

A.

孔壁有铜

B. 

孔壁无铜

9. 元器件引脚直径为 0.7mm，Layout 设计工程师按该尺寸将插件孔（Pad）直径设计成 0.7mm，在嘉立创制作出来的第一批 PCB，可正常插接元器件，第二批 PCB 却不能。经测量，成品孔直径在 0.650 ～ 0.675mm 之间不等，此类责任归属于哪一方？（　　）

A. 责任归属于嘉立创，第一批 PCB 能正常插接元器件，第二批无法插接，是嘉立创的生产责任

B. 责任归属于 Layout 设计工程师，因为他在设计时没有考虑插件孔孔径公差。公差属于不可控因素，嘉立创插件孔孔径公差为 +0.13/−0.08mm，0.7mm 的插件孔，成品孔径在 0.62 ～ 0.83mm 范围内，PCB 为合格。为保证成品插件孔能正常使用，工程师设计 PCB 需考虑公差，避免发生类似问题。

10. 如果将元器件封装中的金属化孔（PTH）错误地设计成非金属化孔（NPTH），实物板通电后会产生开路现象。已经设计好的 PCB 资料图，通过以下哪种方式检查孔属性更快捷？（　　）

A. 输出 Gerber 文件时，使用设计软件或嘉立创 CAM 软件检查分孔图（钻孔表）的孔属性是否正确。

B. 重新逐个检查所有封装的孔属性

C. 实物板通电后检测孔属性是否正确

11. 金属化插件孔焊环是焊接过程中必不可少的元素。在设计 PCB 时，不少工程师只关注孔径大小，却忽略了单边焊环的大小。请问，在嘉立创的工艺参数中，最小插件孔焊环的尺寸不能小于多少？（　　）

A. 插件孔（Pad）：双面板单边焊环不小于 0.18mm；多层板单边焊环不小于 0.15mm

B. 插件孔（Pad）：无论单双面板还是多层板，单边焊环不小于 0.05mm

12. 小李设计双面喷锡板，产品下载调试接口使用了一款如图 4-65 所示的排针，引脚横切面长、宽均为 0.64±0.02mm，对角线理论值为 0.905mm，在设计焊盘封装钻孔内径时，应不小于以下哪个尺寸？（　　）

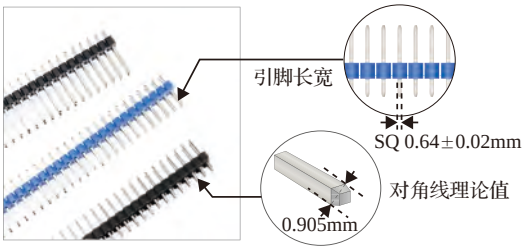


图 4-65　练习题 12 图

A. 0.64mm　　B. 0.80mm　　C. 0.905mm　　D. 1.00mm

13. 压接孔是一种特殊通孔，元器件插入孔内可固定，元器件引脚和压接孔孔壁接触，无须焊接即可实现导通功能，因此压接孔精度要求比常规钻孔更高。嘉立创压接孔公差参数为 ±0.05mm，小李设计的 6 层沉金 PCB 压接孔直径为 1mm，以下哪个选项的成品压接孔直径在公差范围内？（　　）

A. 0.94mm　　B. 0.96mm　　C. 1.06mm　　D. 1.08mm

14. 半孔板需要采用半孔工艺制作，成本比常规工艺高，如果工程师为了节约成本，要求嘉立创采用常规工艺而非半孔工艺制作 PCB，实物板半孔可能会呈现以下哪种效果？（　　）

A.

B.

15. 槽长小于两倍槽宽的槽孔称为短槽（见图 4-66）。加工短槽容易出现因槽刀受力不均，导致实物板槽孔出现有倾斜角度的偏孔，可能会影响后续元器件正常插接。为降低此类隐患出现的概率，嘉立创建议工程师在设计 PCB 时，槽孔的长、宽应尽量设计成以下哪个比例？（　　）

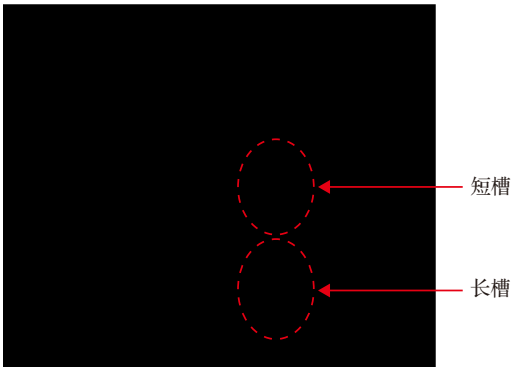


图 4-66　练习题 15 图

A. 槽孔的长宽比不小于 2　　B. 槽孔的长宽比小于 2

16. 喷锡工艺 PCB，金属化插件孔直径小于 0.5mm，容易产生喷锡堵孔隐患（见图 4-67）。为提高产品良率，在设计条件允许的情况下，插件孔直径应不小于 0.5mm。如果直径无法设计成 0.5mm 以上，则 PCB 可选择以下哪种表面处理工艺制作更合适？（　　）

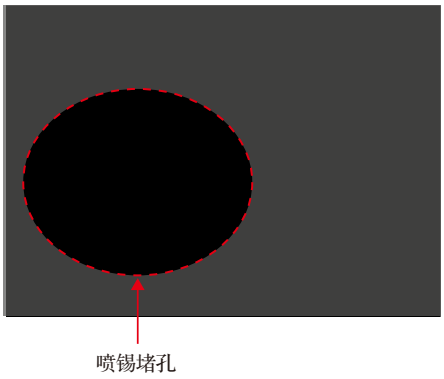


图 4-67　练习题 16 图

A. 有铅喷锡　　B. 无铅喷锡　　C. 沉金

参考答案

1．A、C；　2．A；　3．D；　4．B；　5．A；　6．C；　7．A；　8．B；
9．B；　10．A；　11．A；　12．D；　13．B；　14．A；　15．A；　16．C。

第 5 章 / PCB 线路设计与制造

5.1 PCB 线路工艺概述

线路作为 PCB 的关键组成部分，不仅是整个设计布局工程中最耗时的部分，也是最为重要的。相较于过孔，线路的生产制造工艺相对简单，但也有诸多需要注意的地方。本章将综合讨论如何优化 PCB 线路设计以实现可制造性、生产良率和成本之间的平衡关系。

主要设计环节：Layout 设计布线。

设计软件操作层次：顶层（Top Layer）、内层（Inner Layer）、底层（Bottom Layer）。

PCB 生产关联工序：线路（贴干膜、曝光、显影）、电镀、退膜、蚀刻、AOI 检测。

主要生产设备：线路 LDI 曝光机，如图 5-1 所示（扫描图中二维码可查看线路制造过程）。

图 5-1　线路 LDI 自动曝光生产线

LDI 曝光技术：LDI 曝光技术是一项直接将 CAM 资料通过激光扫描的方式转移到覆铜板上，可以避免传统曝光工艺中需要借助菲林为介质进行转移时，因菲林光绘的胀缩和菲林厚度带来的光学折射导致的偏差，让线路图形更精准地转移到覆铜板上。

5.2 线路设计要点及注意事项

5.2.1 线宽、线距的设计与制造

对于一名 Layout 工程师来说，布线前，在调整“设计规则”时，最为关键的就是导体宽度与安全间距的设置。简单地说，就是设置线宽和线距的参数（见图 5-2），在满足电气信号等需求的同时，还需要考虑 PCB 的可制造性。因此，Layout 工程师了解和选择合适的线宽、线距参数，可以提高 PCB 设计的可制造性和可靠性。

图 5-2　嘉立创 EDA 设计软件的“设计规则”界面

1. 线宽与线距的参数设置

1）线宽与线距的常规参数

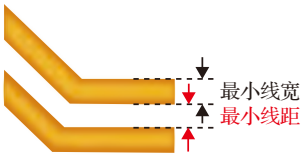
线路常规参数是指大多数 PCB 制造商在生产 1oz 铜厚的 PCB 时，能够轻松实现的设计标准。这些参数不会影响生产成本、品质或 PCB 的性能和可靠性。行业内通常规定，线路设计的常规参数为线宽和线距均大于或等于 0.15mm（6mil）。而在嘉立创，由于生产设备优良，线宽和线距的常规参数为大于或等于 0.10mm（4mil）。

2）线宽与线距的极限参数

线路的极限参数与钻孔的极限参数有所不同。钻孔直径的极限值直接影响 PCB 制造的生产效率和成本。而在线路设计中，线宽和线距的极限参数对生产效率的影响相对较小。因此，在嘉立创的工艺参数中，1oz 铜厚的双面板的最小线宽和线距均为 0.10mm（4mil），既是最小线宽、线距的参数，也是嘉立创能生产的常规参数。对于多层板，最小线宽和线距可以更小。

在嘉立创工艺参数中，列出了不同铜厚的工艺参数。嘉立创 PCB 最小线宽与线距工艺参数如表 5-1 所示。从嘉立创工艺参数中可以看到，线宽、线距的大小与 PCB 铜厚紧密相关。在设计时，需要根据产品所需基材成品铜厚来确定最小线宽、线距的参数。所选基材铜箔越厚，所需线宽、线距越大。

表 5–1　嘉立创 PCB 最小线宽与线距工艺参数（1mil ≈ 0.0254mm）

类　别	参　数	图　示
最小线宽 / 线距（1oz）	单双面板：0.10/0.10mm（4mil/4mil） 多层板：0.09/0.09mm（3.5mil/3.5mil），BGA 局部线宽可做 3mil	
最小线宽 / 线距（2oz）	双面板：0.16/0.16mm（6.5mil/6.5mil） 多层板：0.16/0.16mm（6.5mil/6.5mil）	
最小线宽 / 线距（2.5oz）	双面板：0.2/0.2mm（8mil/8mil）	
最小线宽 / 线距（3.5oz）	双面板：0.25/0.25mm（10mil/10mil）	
最小线宽 / 线距（4.5oz）	双面板：0.3/0.3mm（12mil/12mil）	
线宽公差	±20%	例如线宽为 0.1mm，实板线宽为 0.08 ～ 0.12mm 是合格的

3）侧蚀与干膜碎

为什么线宽和线距与铜厚有关，这涉及两个概念，即侧蚀与干膜碎。

（1）侧蚀：在蚀刻过程中，蚀刻液逐渐腐蚀目标区的铜箔，并随着铜箔变薄填满线隙。同时，蚀刻液与导线侧面接触，导致侧面铜箔随时间推移而出现不同程度的侵蚀，这种侵蚀导线侧面铜箔的现象，称为侧蚀，如图 5-3 所示（扫描图中二维码可查看蚀刻与线宽、线距的关系视频）。任何一条导线经过蚀刻后，都会有侧蚀现象存在，实物 PCB 线路横切面呈正梯形，如图 5-4 所示。

铜箔越厚，蚀刻所需时间越久，被镀锡保护的铜箔侧面与蚀刻液接触的时间越长，侧蚀程度越大，线路剖面呈梯形的斜边倾斜角度也越大。

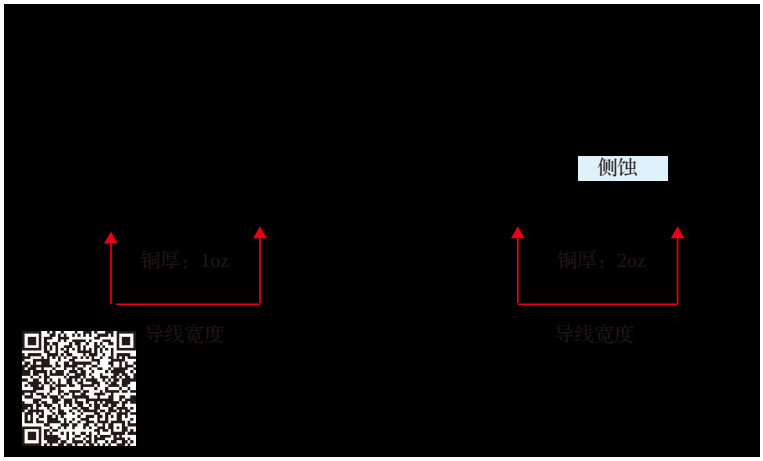


图 5-3　不同铜箔厚度导线蚀刻剖面对比图

当线路上的导体宽度过窄时，甚至低于极限参数时，导体可能会被侧蚀掉，即使未侧蚀干净，也可能在后续的清洗和研磨过程中出现脱落或变形，导致短路风险增加，尤其是铺铜残留的天线铜（断头线），如图 5-5 所示，当铜箔宽度过窄时更容易出现一端脱落，而另一端仍连接现象，增加短路风险。

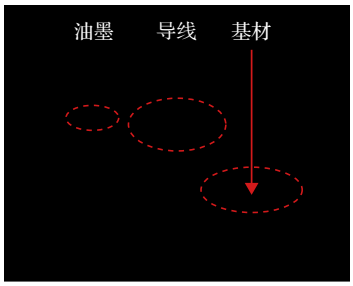


图 5-4　实物 PCB 线路横切面图

图 5-5　铜箔宽度太小诱发短路

（2）干膜碎：PCB 经过 LDI 曝光后，显影清除所需线路表层的干膜过程中，线路与线路之间的间距越小，保留下来的干膜就越窄。当低于一个极限值时，干膜与覆铜板之间的附着力小于药水冲洗作用力，干膜就会脱落，产生干膜碎。

导体之间干膜碎被清除掉：若需保留的干膜太小，形成干膜碎被清除掉，则会导致这些原本应该被干膜覆盖的线隙区域失去干膜覆盖，在镀锡过程中，形成镀锡保护膜，阻挡后期蚀刻液对线隙位置需要腐蚀的铜箔进行腐蚀，从而导致蚀刻后的线隙区域铜箔未被蚀刻掉，形成如图 5-6 所示短路或者残铜的不良现象。

干膜碎残留在导体表面：若需清除的干膜碎片未被彻底清除，可能漂浮摆动而覆盖其他导线或孔壁，导致这些区域无法在电镀过程形成镀锡保护。在退膜蚀刻过程中，未镀锡的导线或孔壁铜箔会被蚀刻掉，造成如图 5-7 所示导体残缺或开路、坏孔等品质隐患。

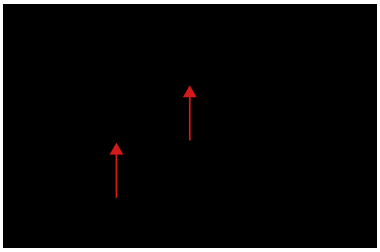


图 5-6　导线间隙残铜实物图

图 5-7　导体残缺实物图

4）导体宽度补偿

导体宽度补偿是PCB制造商的CAM工程师在处理CAM工程资料时，根据自身工艺能力，在设计线路导体宽度的基础上增加适当的参数，以平衡制造过程中的工艺偏差，特别是侧蚀对线宽的影响，从而提高线路的精度和可靠性。这是线路制造中的一个重要考虑因素。

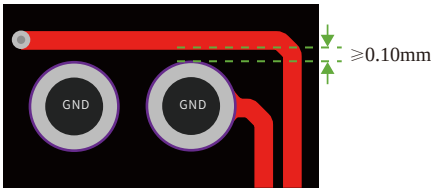
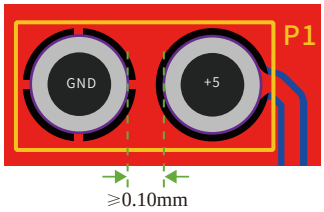
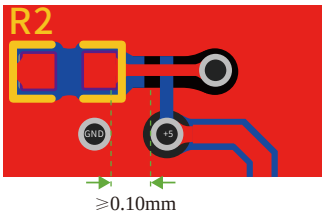
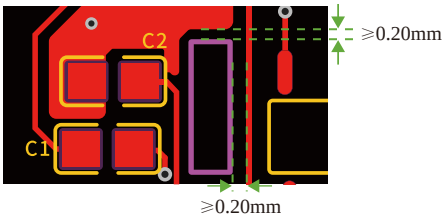
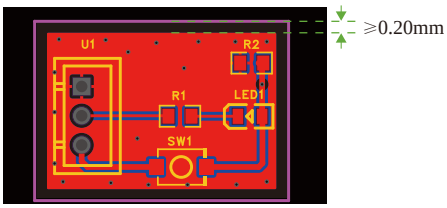
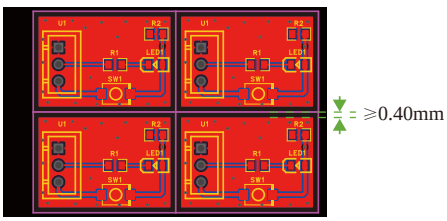
由于铜箔越厚，侧蚀量越大，为平衡侧蚀对线路的影响，线路宽度补偿的参数也越大。补偿参数加大后，会导致线距减小。为确保线距不低于最小安全值（极限线距参数），设计时在增加线宽的同时，也需要增加线距参数。

简而言之，为确保 PCB 的可制造性，铜箔越厚，所需设计的线宽和线距也应相应增加，最低不能低于 PCB 供应商提供的最小线宽、线距参数。

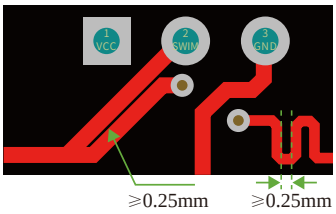
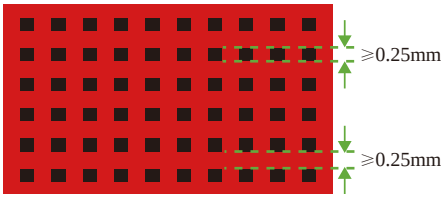
5）线路设计的其他安全间距

在 PCB 布线时，除需要注意导线的线宽、线距参数外，还需要特别注意表 5-2 中列出的各项最小安全间距参数。

表 5–2　导体与导体、外形线的最小间距参数

参数类别	最小参数	图文说明
导线与焊盘间距	≥ 0.10mm	
焊盘与焊盘间距	≥ 0.10mm	
过孔外径间距	≥ 0.10mm	
铜箔或导线与锣槽的间距	≥ 0.20mm	
铜箔或导线与外形的间距	单板锣边出货： ≥ 0.20mm	
	拼版 V 割出货： ≥ 0.40mm	

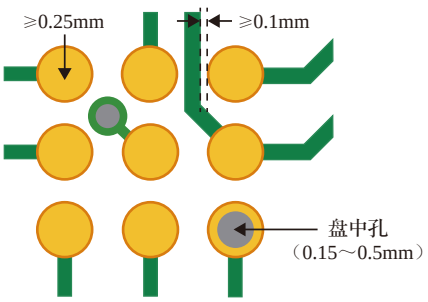
续表

参数类别	最小参数	图文说明
相同网络的导线夹角间隙	≥ 0.25mm	
网格铺铜的填充线宽度及边缘间距	≥ 0.25mm	

2. BGA 最小设计参数

BGA（Ball Grid Array）封装多用于高精密 PCB 中，其尺寸小、焊点密度高的特点限制了布线的自由度，需要更小的参数来满足布线要求。嘉立创 BGA 可加工工艺参数如表 5-3 所示。

表 5–3　嘉立创 BGA 可加工工艺参数

类　别	参　数	图　示
BGA	① BGA 焊盘直径：≥ 0.25mm； ② BGA 焊盘边与导线边缘间距：≥ 0.1mm（多层板最小 0.09mm）； ③用于 BGA 焊盘的盘中孔工艺可以采用树脂或铜浆塞孔 + 电镀盖帽	

在高多层高精密 PCB 设计中，如果布线空间受到极限参数限制，可选择盘中孔设计，即在焊盘中间打孔，将线路引出到其他有空间的层次。有人可能担心，贴片焊盘中打孔会导致 SMT 焊接时漏锡和 BGA 虚焊，这时需要了解嘉立创的盘中孔工艺。不同工艺制造的 BGA 焊盘中间带有钻孔的 PCB 如图 5-8 所示。

嘉立创盘中孔工艺：通过特殊工艺方法在孔内填充树脂或铜浆，烘干磨平后采用电镀盖帽，将钻孔填平。这样形成完整的表面焊盘，确保 SMT 焊接时无漏锡风险。对于空间小、布线难的情况，可以选择盘中孔设计。详细的盘中孔工艺将在 6.4.4 节进行介绍。

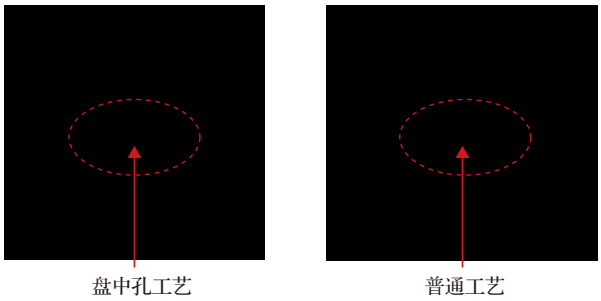


图 5-8　不同工艺制造的 BGA 焊盘中间带有钻孔的 PCB

3. 阻抗值的计算与控制

1）阻抗值的计算

在 PCB 设计中，阻抗线的设计至关重要。它类似于电路的“血管”，直接影响信号传输的质量和稳定性。合理设计阻抗线和叠层结构是实现高性能 PCB 的关键，也是耗费 Layout 设计工程师大量时间的设计步骤。

为快速解决阻抗计算，嘉立创自研的“阻抗计算神器”可根据目标阻抗值逆向计算线宽和线距，并推荐叠层结构。目前，该工具提供超过 700 种阻抗层压结构供参考。对于特殊阻抗需求，嘉立创还支持自定义服务。

使用嘉立创阻抗计算神器

操作简单：只需在下单系统中单击“阻抗计算神器”按钮（见图 5-9），在弹出的界面中填写所需的阻抗值、阻抗模式、阻抗层、参考层、板厚、铜厚和 PCB 层数等信息后，单击“计算”按钮（见图 5-10），软件将自动逆向计算出设计所需的线宽和线距，并推荐多种层压结构供参考（见图 5-11，扫描图中二维码可查看更多层压结构）。

如果已设计好的 PCB 需要计算阻抗值，可单击图 5-11 中“根据线宽反算阻值”按钮进行计算。

图 5-9　嘉立创 PCB 下单系统阻抗计算神器选择界面

图 5-10　嘉立创阻抗计算神器参数填写界面

图 5-11　嘉立创阻抗计算神器推荐层压结构界面

2）阻抗值的控制

在生产客户指定的阻抗匹配 PCB 或由嘉立创提供的阻抗自定义服务的 PCB 时，嘉立创根据客户选择的阻抗公差范围严格管控各生产环节。生产过程中，除了进行精确的线路计算、优化材料和层叠结构，还会对钻孔、电镀、蚀刻等工序进行测试与验证，以确保成品 PCB 的阻抗值符合客户所选公差要求。

目前，嘉立创有“±20%”和“±10%　”两种阻抗公差供客户选择，如图 5-12 所示。

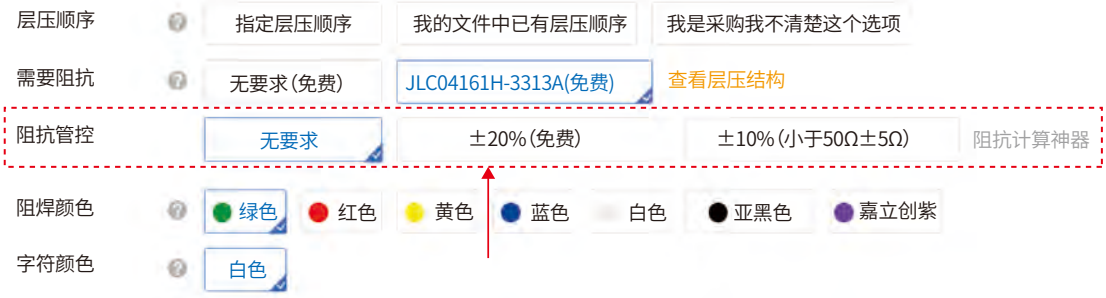


图 5-12　嘉立创 PCB 下单系统阻抗管控选项

4. 线圈板

线圈板是一种具有特定线圈结构的 PCB。在设计时，由于其结构特殊性，若线圈部分被油墨覆盖，则线宽和线距应不小于 0.15mm（6mil）；若线圈部分开窗，则线宽和线距应不小于 0.254mm（10mil），且应选择沉金工艺，避免使用喷锡工艺，以防线路在喷锡时出现连锡。

5.2.2 铺铜设计注意事项

铺铜在 PCB 设计中至关重要，它不仅提供电气连接和信号完整性，还影响散热效果、机械强度和制造品质。因此，在铺铜过程中，需综合考虑电路设计需求与 PCB 的可制造性，进行合理的铺铜设计。

1. 铺铜填充样式的选择

在 Layout 设计软件中，提供多种铺铜填充样式，如图 5-13 所示，包括全填充和网格填充两种方式，设计师可根据产品需求进行选择。使用这两种填充方式时需注意以下细节。

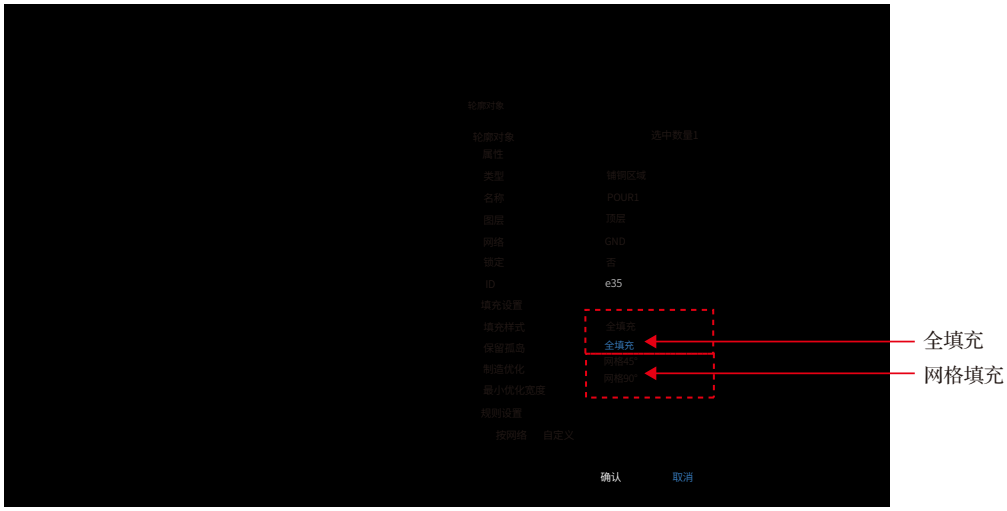


图 5-13　嘉立创 EDA 软件铺铜选择界面

1）网格铺铜

在使用网格方式铺铜时，填充线宽度、填充线边缘间距应不小于 0.254mm（10mil），否则网格太小会影响线路和阻焊油墨的精确制造。

（1）在线路工序，经过 LDI 曝光和显影后，若网格中间间距过小，干膜易脱落，导致电镀工序中这些区域被镀锡保护，铜箔无法蚀刻，最终成品如图 5-14 所示，形成全填充铜皮。这种情况在 PCB 蚀刻后通过 AOI 检测时会频繁报错，影响线路直通率。

（2）在阻焊工序，印刷阻焊油墨时，小网格中间油墨难以印下油墨，如图 5-15 所示，影响阻焊外观品质。

2）全填充铺铜

在使用全填充方式铺铜时，若存在大面积铺铜，为避免高温下基材内有机物产生挥发性气体无法顺利排出，从而导致基材起泡，需要在铺铜中间增加透气孔或开槽，以提高产品的可靠性，如图 5-16 所示。

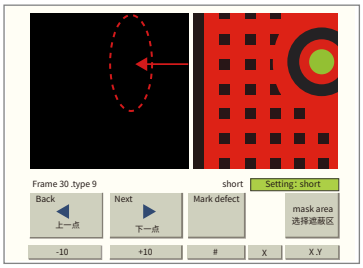


图 5-14　小网格间距蚀刻不净

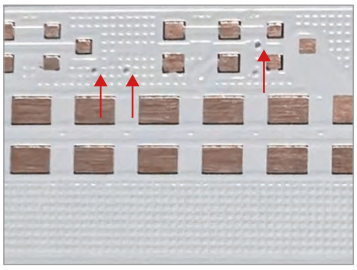


图 5-15　小网格间距印油异常

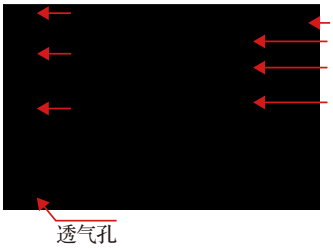


图 5-16　全填充铜箔区增加透气孔

2. 大面积铜箔区的焊盘隔热处理

热隔离环（Thermal Isolation Ring）是一种 PCB 设计结构，旨在通过焊盘与铜箔的发散连接，隔离 PCB 上的热量传输。这种设计能有效防止热量扩散，避免对其他区域的运行产生干扰。焊盘与铜箔的发散连接宽度和间距通常不低于 0.254mm（10mil）。

1）外层焊盘热隔离处理

在 PCB 设计中，外层线路的大面积铺铜区域应采用带热隔离环的发散设计焊盘（见图 5-17），以有效降低焊接过程中热量扩散速度，提高焊锡质量。若外层焊盘不采用热隔离环而直接放置在大面积铺铜上（见图 5-18），热量将迅速通过周边铜箔扩散，导致焊接温度下降，影响焊接效果。当焊锡效果不佳时，可能需要延长焊接时间或提高焊接温度，这会导致基材内热量过度积聚，造成起泡或分层。

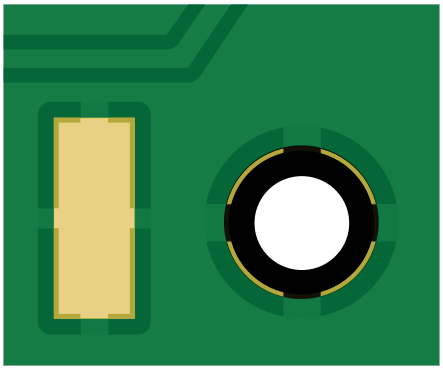


图 5-17　铺铜区焊盘采用热隔离环发散设计

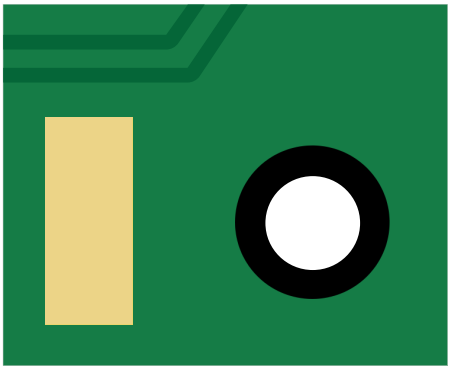


图 5-18　铺铜区焊盘未采用热隔离环发散设计

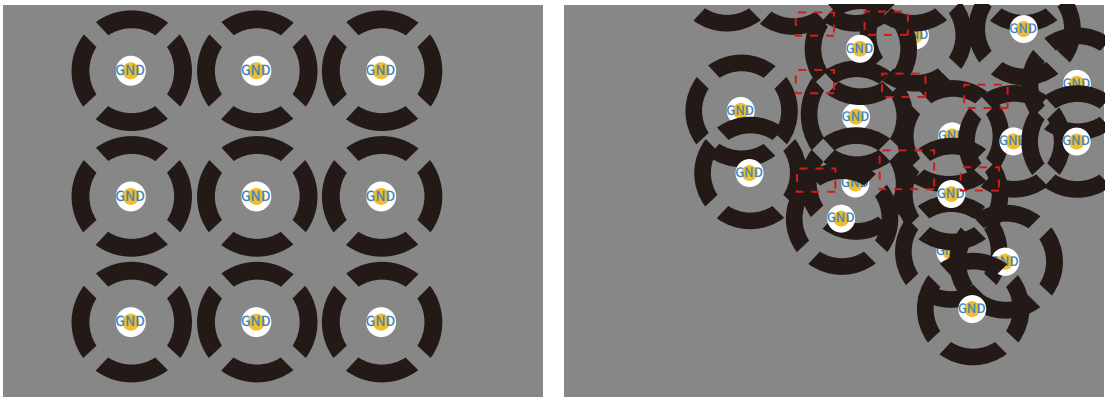
2）内层焊盘的热隔离处理

在多层板设计中，如果接地层和电源层的铜面上有连接焊盘，通常需采用热隔离环的发散设计。这种设计可确保焊盘与大铜箔保持电气连接的同时，实现有效的热隔离，防止热量对焊接质量的影响。在设计时需注意以下几点。

（1）内层线路应优先使用正片设计，避免负片设计。正片设计使电路更直观，便于识别潜在问题，并减少设计与实际制造之间的转换误差。

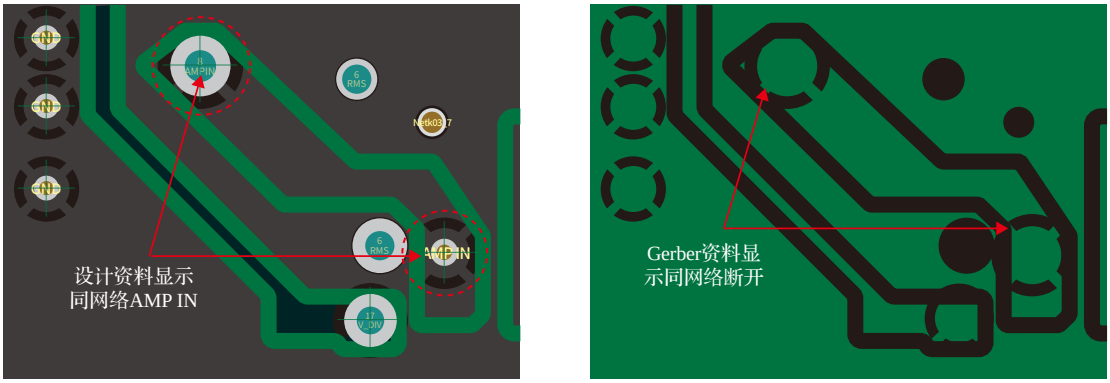
（2）避免焊盘热隔离环重叠。设计时应避免热隔离环重叠，以免导致电路开路（见图 5-19）。

（3）避免热隔离环与负片电路网络分割线重叠。在负片设计中，确保焊盘的热隔离环与负片电路网络分割线之间的安全间距不小于 PCB 制造商的最小线宽间距，以防出现如图 5-20 所示的开路现象。



（a）焊盘热隔离环正常排列　　（b）焊盘热隔离环重叠

图 5-19　正常排列与排列重叠的热隔离环焊盘



（a）焊盘热隔离环与网络分割线太接近设计稿示意图　　（b）输出 Gerber 资料后线路菲林示意图

图 5-20　焊盘热隔离环与负片电路网络分割线重叠

3. 平衡铺铜的重要性

在 PCB 设计与制造中，平衡铺铜是关键环节。它是指在 PCB 设计阶段填充闲置空间并设为地平面。铺铜提供更佳信号返回路径，增强抗干扰性，降低阻抗以提高电源效率，同时与品质控制密切相关，如图 5-21 所示。然而，若设计中存在不均匀铺铜，尤其是大量未铺铜区域内还存在少量导线，则会给 PCB 制造和品质带来困扰和风险。

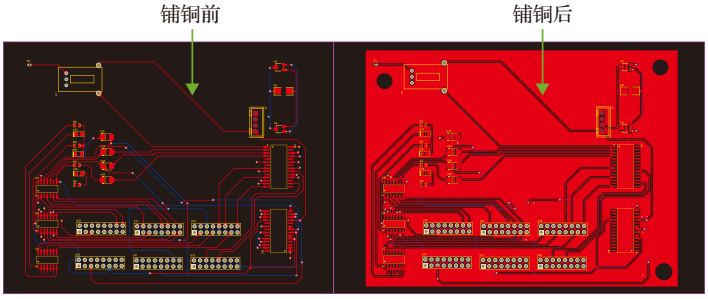


图 5-21　线路平衡铺铜前、后设计稿示意图

5.3 铺铜不均的品质隐患

虽然减少铺铜有助于降低镀铜和镀锡成本，但嘉立创一直强调产品质量在 PCB 制造中的首要地位。均匀铺铜和避免空旷区域对产品质量更有益。接下来将从几个方面探讨铺铜不均对 PCB 品质的影响。

5.3.1 铺铜不均对线路制造的影响

铺铜不均对线路制造工序的影响主要体现在图形电镀工序，影响的范围为双面和多层 PCB。

当 PCB 贴上干膜，经过曝光显影后，在覆铜板上露出设计所需的线路和孔，固定在电镀设备上（见图 5-22），放在电镀槽内，在额定电流下进行电镀。电镀槽中的铜离子在电流作用下，沉积于露在干膜外的线路铜箔上（见图 5-23）。

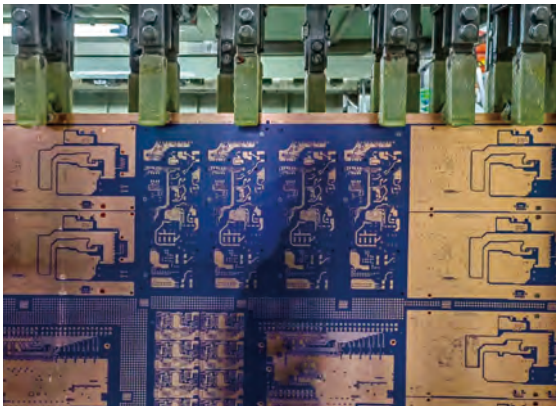


图 5-22　待进入电镀槽加厚镀铜的 PCB

图 5-23　PCB 在电镀槽中进行镀铜

此时，露在干膜外的局部线路总面积会影响电镀过程中的额定电流分配。如图 5-24 所示，面积越大且图形分布越均匀，镀区承载的电流越均匀，电镀过程中镀铜厚度也越均匀。

如果线路受镀总面积过小或图形分布不均匀（见图 5-25），则镀区承载的电流也会变得不均匀。受镀面积越小，露在干膜外的铜箔承载的电流越大，镀铜厚度也会随之增加。这可能导致原本需要 1oz 铜厚的 PCB 实际达到 1.5oz 或 2oz。一旦厚度超过一定值，即超过干膜厚度，就会出现镀层突沿现象。如图 5-26 中箭头指示区域的线隙如果仅为 3.5mil 或 4mil，甚至更小，可能导致镀铜突沿部分覆盖住导线间的部分或全部干膜。完成镀铜后，再经过镀锡工艺，会在铜箔表面形成一层镀锡保护，如图 5-27 所示，形成镀层夹膜现象。

由于镀层夹膜区域受到镀锡层保护，可能会阻碍干膜在蚀刻前的去除，导致蚀刻液无法与需要蚀刻的铜箔接触，进而引发蚀刻不干净的问题（见图 5-28）。这种情况会导致线路蚀刻后出现残铜或短路现象（如图 5-29 箭头所指，扫描图中二维码可查看铺铜不均对 PCB 品质的影响）。因此，在设计阶段，若条件允许，建议在未布线区域进行铺铜处理，以避免这些问题。空旷区域未铺铜和优化铺铜后案例图如图 5-30 所示。

图 5-24　PCB 受镀面积大

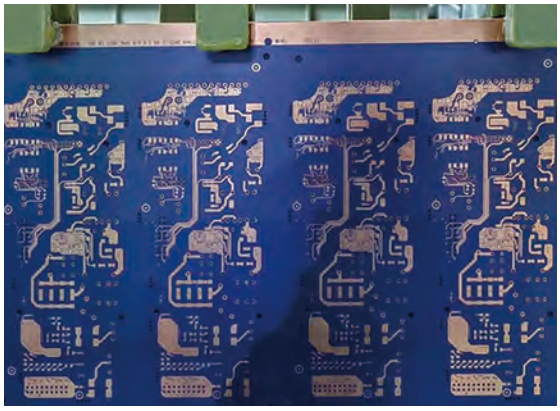


图 5-25　PCB 受镀面积小

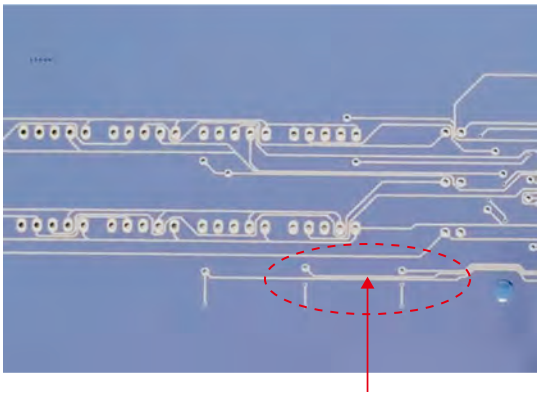


图 5-26　PCB 未铺铜区内密集导线案例图

图 5-27　镀层突沿导致夹住干膜剖面示意图

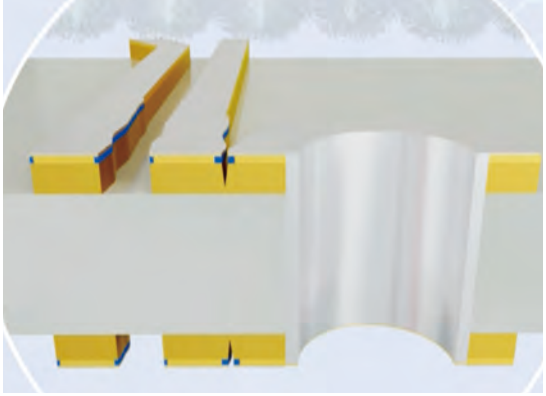


图 5-28　镀层夹膜区蚀刻不干净示意图

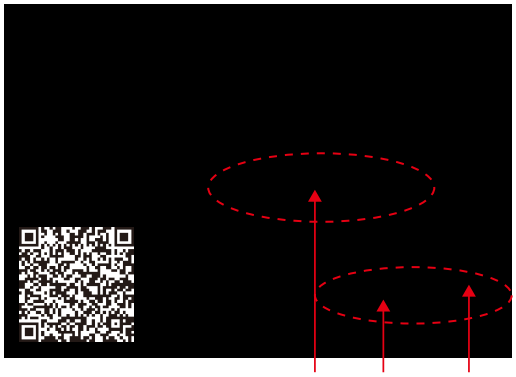
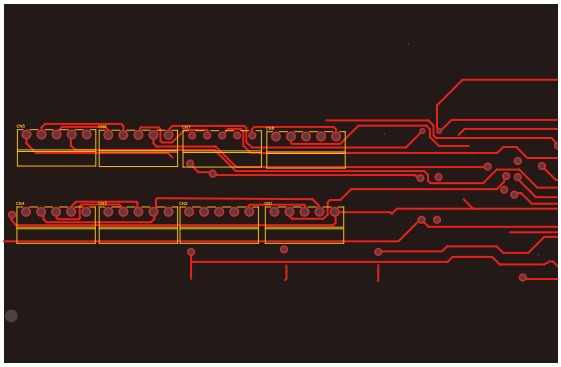
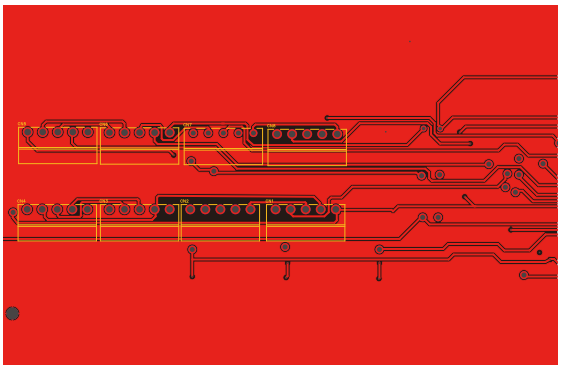


图 5-29　镀层夹膜导致蚀刻不净案例图



（a）优化前 PCB（空旷区域未铺铜）



（b）优化后 PCB（空旷区域已铺铜）

图 5-30　空旷区域未铺铜和优化铺铜后案例图

5.3.2　铺铜不均对多层板层压的影响

在 3.2 节中，我们了解到多层板的层压是形成完整多层 PCB 结构的关键步骤。为深入探讨铺铜不均对层压的影响，首先需要了解层压过程所涉及的主要材料，包括芯板和半固化片，以及这两种材料在压合过程中的作用。

1. 芯板

芯板是指多层 PCB 中位于中间位置的刚性 PCB，如图 5-31 所示。在压合过程中，通过与半固化片等其他材料层叠并经压合工艺，使各层紧密结合，共同形成具有特定层数和性能的多层 PCB。

2. 半固化片

半固化片（Prepreg，简称 PP），也称预浸渍材料，由增强纤维（如玻璃纤维等）或其他增强材料预先浸渍在基体树脂（如环氧树脂等）中形成的一种中间材料。因此，它还被称为预浸渗树脂片，如图 5-32 所示。它处于半固化状态，在受热条件下具有一定的黏性和柔韧性。在 PCB 压合等工艺中，经过加热和加压，可将树脂进一步固化。

图 5-31　内层芯板

图 5-32　半固化片

3. 多层板压合过程

多层板的压合过程需先将预浸渍材料（PP）裁切成片，放置在内层芯板与芯板、芯板与

铜箔之间（见图 5-33）。按照规范的顺序进行堆叠（见图 5-34），采用热熔和铆合方式进行精确定位，构建稳固结构。随后，通过压合设备施加高温高压，使 PP 中的树脂熔化并填充芯板的无铺铜区域（见图 5-35），在芯板与芯板、芯板与铜箔之间形成牢固黏合。最终，待树脂冷却固化，确保内层芯板与芯板、芯板与铜箔均牢固黏合，形成完整的多层板结构。

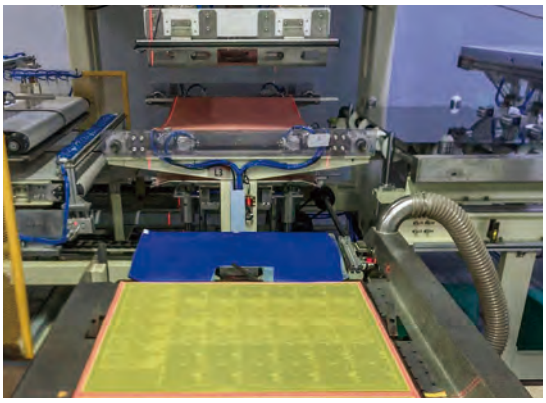


图 5-33　压合叠板

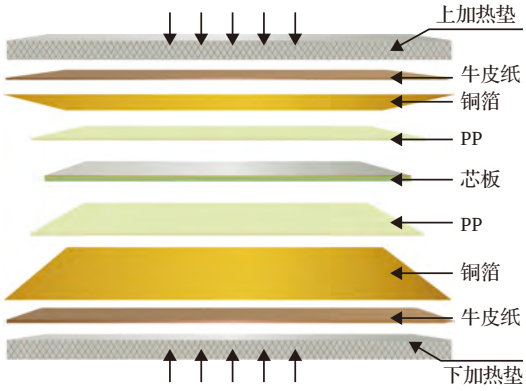


图 5-34　压合示意图

4. 铺铜不均对压合的影响

1）影响树脂填充结构均匀性

在 PCB 压合过程中，预浸渍材料（PP）中的树脂在高温高压下流动并填充各层间的间隙。若铺铜不均而留有大量的空旷区域，熔化的树脂会过度流入到未铺铜的空旷区域，导致铺铜区域的树脂变得稀薄（如图 5-36 中绿色箭头所指位置），从而使 PCB 黏合力不足，产生如图 5-37 所示的白斑及如图 5-38 所示的板材分层等问题。扫描图 5-38 中二维码可查看铺铜不均对多层板压合的影响视频。

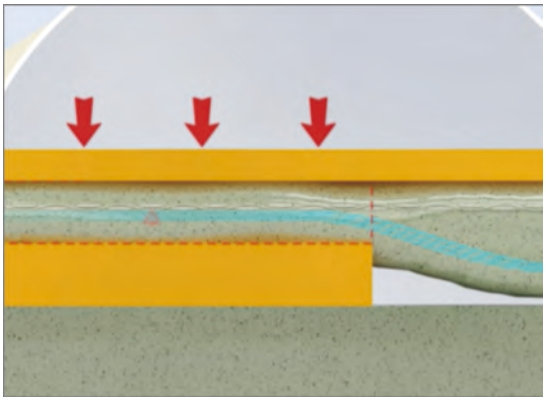


图 5-35　压合时熔化的树脂流向无铺铜区域

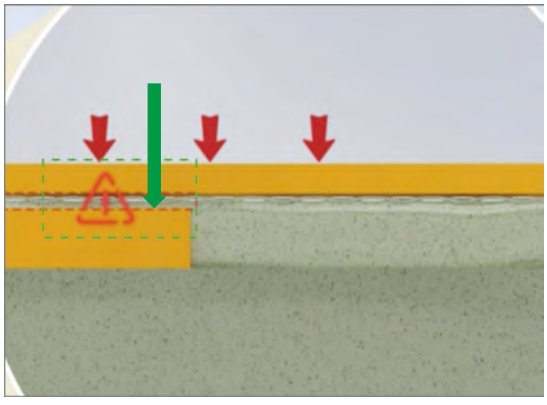


图 5-36　压合时无铺铜区域填满树脂

2）影响板材厚度

预浸渍材料（PP）中的树脂在高温高压下流动并填充各层间的间隙过多，会导致板材厚度偏薄。如遇到对板材厚度要求严格的如金手指等接触片类型的 PCB，则会造成板子偏薄，导致与连接器卡槽接触不良等问题。金手指区域内层未铺铜案例图如图 5-39 所示。

图 5-37　白斑

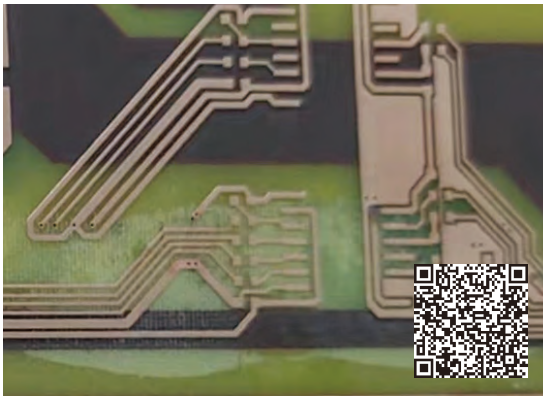


图 5-38　分层

（a）要求 1.6mm，实测 1.41mm　（b）金手指区域内层铺铜优化前　（c）金手指区域内层铺铜优化后

图 5-39　金手指区域内层未铺铜案例图

3）影响各层次之间的应力平衡

在 PCB 制造中，铜箔分布不均会导致各区域应力分布失衡：铜箔较多区域应力较大，较少区域应力较小。这种不均匀现象容易在高温加工和焊接中引发不均匀应力，导致基材翘曲。此外，不均匀铺铜破坏了力学平衡，使得铜箔区域硬度不同，易受外力影响而产生不均匀变形，积累应力导致板材翘曲，进而影响尺寸稳定性和电气性能。

5.3.3　铺铜不均对阻焊油墨的影响

在设计过程中，如果因工程需求必须保留大面积未铺铜的空旷区域，且该区域需要布线，则导线的线宽和线距应大于常规标准，以降低电镀和蚀刻的不良影响。然而，镀层增厚或突沿的情况仍可能出现。这不仅影响蚀刻精度和导线整体平整度，还会影响线路表层的油墨厚度。

在铺铜不均的空旷区域内，导线在镀铜阶段可能会遇到铜箔过厚的问题。当印刷阻焊油墨时，在恒定的丝印压力下，铜箔过厚的导线表面油墨可能会显得相对稀薄，从而容易出现类似图 5-40 所示的假性露铜情况。与图 5-41 中均匀铺铜后的导线相比，这种情况可能导致导线处的油墨呈现“发红”现象。

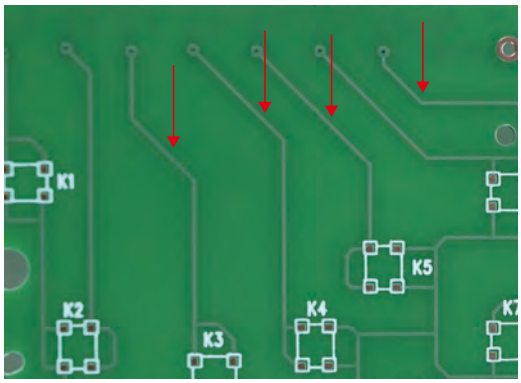


图 5-40　空旷区域导线覆盖油墨的颜色

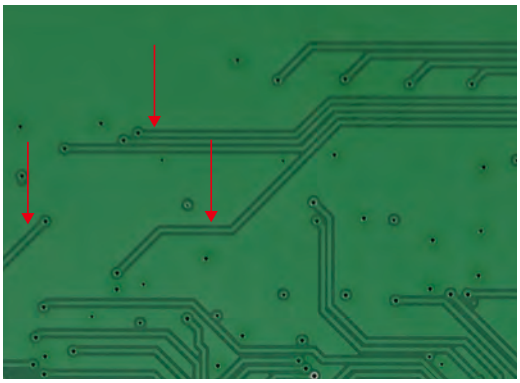


图 5-41　均匀铺铜区域导线覆盖油墨的颜色

总结：在 PCB 元器件布局和布线过程中，除遵循电气设计规则外，还需综合考虑线宽、线距及铺铜的均匀性和合理性，避免布线过于集中或未铺铜区域过于空旷，以确保可制造性、良率、电气性能、可靠性和结构稳定性，防止制造缺陷和品质问题。

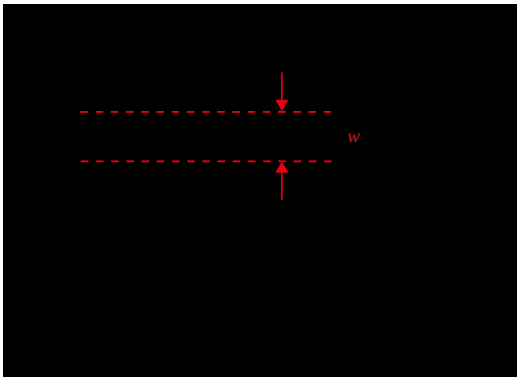
5.4　线路的品质控制与检测

5.4.1　线路尺寸与精度的验收标准

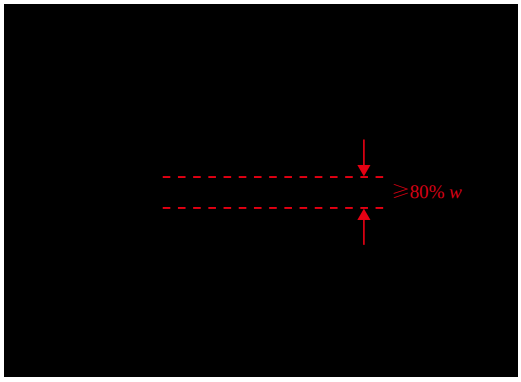
1. 导线宽度与间距

PCB 导线宽度与间距的公差是评估生产尺寸精度的重要依据。这些公差主要由线路蚀刻过程中的侧蚀现象引起，导致导线宽度和间距变化，从而影响信号阻抗特性。对于非阻抗 PCB，导线公差关注较少，因为其对性能影响较小；但对于有阻抗需求或高多层板设计，需关注 PCB 制造商的公差范围。在验收导线宽度时，通常分为三个验收等级，具体要求如下。

（1）导线宽度：导线边缘的粗糙、缺口、针孔及划伤等缺陷组合，按 2、3 级接受标准，不得导致导线宽度（w）减小超过 20%（1 级标准为 30%）。缺陷总长度不得超过导线长度的 10% 或 13.0mm（1 级标准为 25.0mm）。取两者最小值。导线宽度的理想状态和 2、3 级接受标准状态示意图如图 5-42 所示。



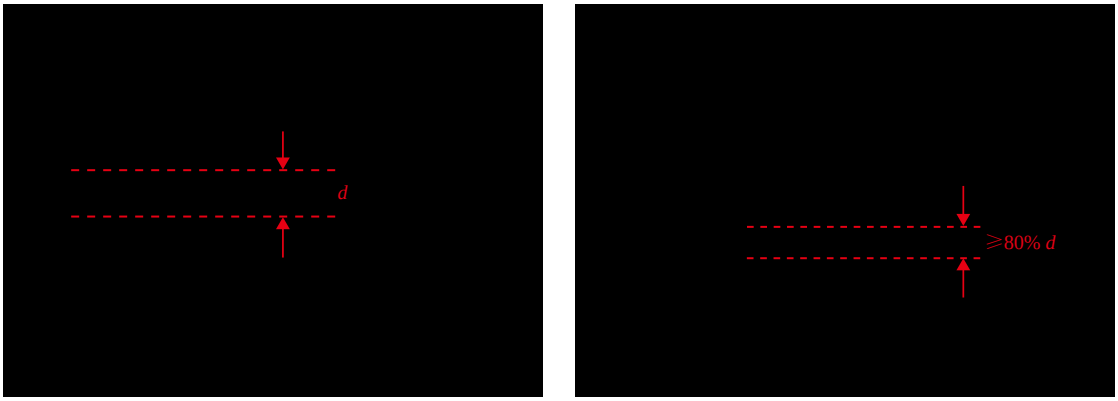
（a）理想状态



（b）接受状态

图 5-42　导线宽度的理想状态和 2、3 级接受标准状态示意图

（2）导线间距：在未规定最小间距时，对于两条相邻导线之间因导线边缘粗糙、毛刺等缺陷的任意组合而导致绝缘间距减小的情况，依据 3 级接受标准，减小量不得超过导线设计间距（*d*）的 20%；而按照 1、2 级接受标准，减小量不得超过导线设计间距（*d*）的 30%。导线间距的理想状态和 3 级接受标准状态示意图如图 5-43 所示。



（a）理想状态　　（b）接受状态

图 5-43　导线间距的理想状态和 3 级接受标准状态示意图

2. 焊环尺寸与精度

PCB 内、外层焊盘焊环宽度的尺寸与精度通常受钻孔机的偏摆精度、各层次的定位精度以及线路曝光的对位精度影响。在评估焊盘焊环宽度时，首要步骤是理解相关评估标准的确切定义。

焊盘环宽：是指 PCB 内、外层金属化孔焊环的宽度，其最小环宽定义为成品孔在电镀后，孔边缘与焊盘边缘之间最窄的铜箔宽度，如图 5-44 所示。

导体与连接盘的连接区：是指以导体与连接盘连接点为中心的 90° 区域，如图 5-45 所示。

破环：是指由钻孔偏移导致焊环破裂。在评估标准中，通过区分 90° 破环（见图 5-46）和 180° 破环（见图 5-47）来确定接受等级。

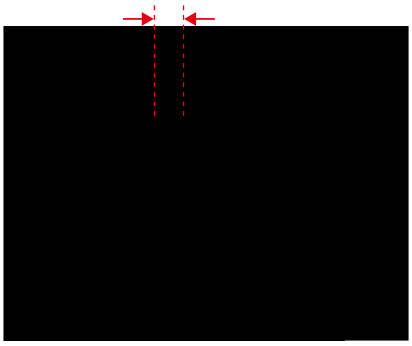


图 5-44　PCB 外层环宽

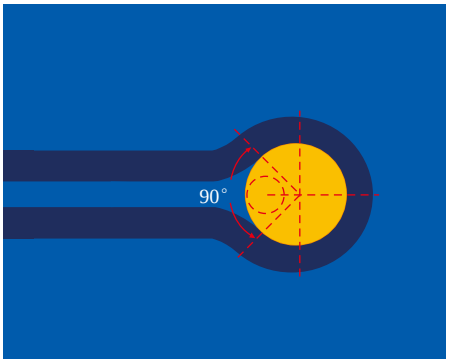
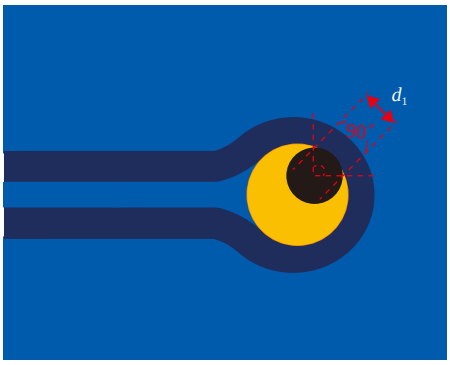
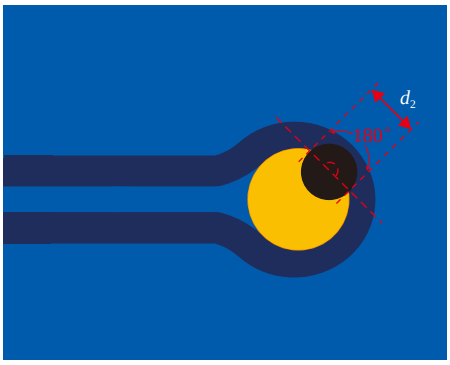


图 5-45　导体与连接盘的连接区



注：d_1=1.414× 镀覆孔的半径。

图 5-46　90° 破环

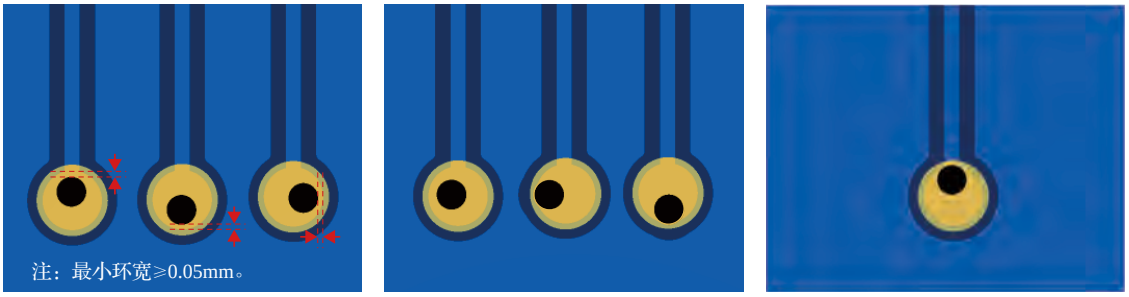


注：d_2= 镀覆孔的直径。

图 5-47　180° 破环

1）外层环宽

外层环宽的大小会影响焊接质量。理想情况下，孔应位于焊盘中心，但由于生产工序的公差，过孔与焊盘的相对偏移量各不相同。在检验过程中，根据偏移量和破环程度，分为三个接受等级，如图 5-48 所示。因此，在进行 PCB 环宽检验时，可以参考表 5-4 中支撑孔和非支撑孔的环宽接受要求，将接受标准划分为三个等级。



（a）3 级接受状况　（b）1、2 级接受状况　（c）三个等级均不接受

图 5-48　支撑孔的外层环宽

表 5–4　支撑孔和非支撑孔的环宽接受要求

产品等级	支撑孔的环宽接受要求	非支撑孔的环宽接受要求
3 级	环宽不小于 0.05mm；非连接区由于麻点、凹坑、缺口、针孔或斜孔等缺陷，允许最小环宽减小 20%	任意方向环宽不小于 0.15mm，非连接区由于麻点、凹坑、缺口、针孔或斜孔等缺陷，允许最小环宽减小 20%
2 级	破环不大于 90° 且满足最小侧向间距要求；在导体与连接盘的连接区允许破环 90°，环宽减小不大于 20%，连接处最小环宽不小于 0.05mm，或孔偏移引起的最小线宽两者中的较小值	保持孔环完整，不允许破环
1 级	破环不大于 180° 且满足最小侧向间距的要求；在导体与连接盘的连接区导线宽度减小不大于 30% 最小导线宽度的条件下允许破环 180°，并且不影响安装和功能	除导线与焊盘的连接区域外，允许破环

注：支撑孔——PCB 中孔的表面经过电镀或采用其他方法增强的孔；非支撑孔——PCB 中不包含镀层或其他类型导电增强材料的孔。

2）内层环宽

在多层板中，内层环宽不用于焊接，而是确保内层线路与金属化孔的可靠连接。这一宽度受层间的定位精度和钻孔精度影响。在最佳情况下，孔与连接焊盘应同心；对于 3 级接受标准，最小环宽不小于 0.025mm；对于 2 级接受标准，破环不大于 90°；对于 1 级接受标准，破环不大于 180°。

5.4.2　线路的检测

线路是 PCB 不可或缺的关键组成部分，其质量直接影响产品性能。因此，对线路制造环节的控制与检测至关重要。通常，我们使用 AOI 光学检测仪在印刷油墨之前进行蚀刻缺陷检测，并在发货前通过飞针测试机或测试架对 PCB 整体的电气通断功能进行检测。

1. 线路表面缺陷检测

嘉立创在线路蚀刻后进行 100% AOI 光学检测，检查蚀刻过程中出现的线路残缺、残铜、短路和破环现象。AOI 检测与复核设备如图 5-49 所示。

（a）AOI 自动扫描设备

（b）AOI 图形对比复核设备

图 5-49　AOI 检测与复核设备

2. 线路通断功能检测

产品发货前，通过飞针测试机或测试架对 PCB 整体线路的通断进行测试（见图 5-50），优点是可以百分之百检测出通断情况，确保 PCB 成品与 PCB 工程资料相比，无开、短路现象；缺点是不能检测出残缺的“坏线”。因此，嘉立创在蚀刻工序后、阻焊工序前增加了对所有订单进行 100% 扫描的 AOI 光线检测。

飞针测试机或测试架对 PCB 进行的开、短路测试，是指检测 PCB 成品与生产资料线路通断的一致性，无法检测到设计原稿中是否存在的开、短路错误。

3. 飞针测试或测试架全测的重要性

为什么经过 AOI 检测的 PCB，后续还需要经过飞针测试或者测试架全测？

（1）AOI 检测相对来说比较容易产生个别漏报。

（2）在 AOI 检测之后的其他生产工序中，也可能会导致开、短路的发生。

因此，嘉立创 PCB 下单系统的“线路测试”选项包括三种选择，如图 5-51 所示。样板订单提供免费的“飞针全测”，而批量订单则根据客户在“线路测试”中选择的测试方式进行检测。

（a）飞针测试机

（b）测试架

图 5-50　飞针测试机和测试架

图 5-51　嘉立创 PCB 下单系统“线路测试”选项

（1）选择“飞针全测”的订单，进行 100%AOI 检测，然后 100% 飞针全测。

（2）选择“飞针抽测”的订单，先进行 100%AOI 检测，然后对内部编号相同的板子进行飞针抽测。

（3）选择“工程测试架”的订单，先进行 100%AOI 检测，然后 100% 使用开设的“工程测试架”进行全测。

练习题

1. 嘉立创可生产的 PCB 导线与焊盘的最小间距（见图 5-52）为以下哪个参数？（　　）

A. 不小于 0.05mm（BGA 与导线间距最小不小于 0.038mm）

B. 不小于 0.10mm（BGA 与导线间距最小不小于 0.09mm）

C. 不小于 0.20mm（BGA 与导线间距最小不小于 0.10mm）

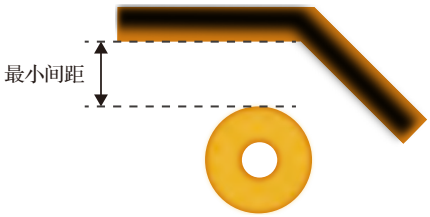


图 5-52　练习题 1 图

2. BGA 的焊盘小且密度高，对 PCB 制造提出了更高的要求，嘉立创可生产的 BGA 焊盘直径（见图 5-53）最小是多少？（　　）

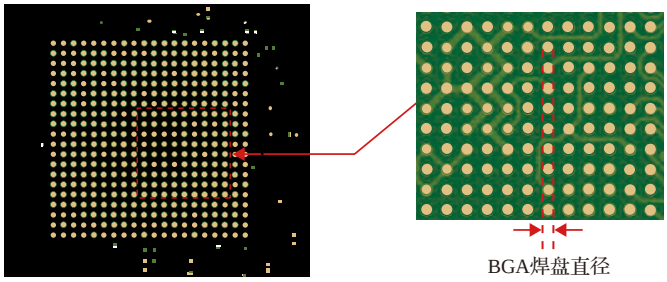


图 5-53　练习题 2 图

A. BGA 焊盘直径不小于 0.25mm　　B. BGA 焊盘直径不小于 0.15mm

3. 铜厚为 2.5oz 的双面板，嘉立创可生产的最小线宽、线距是多少？（　　）

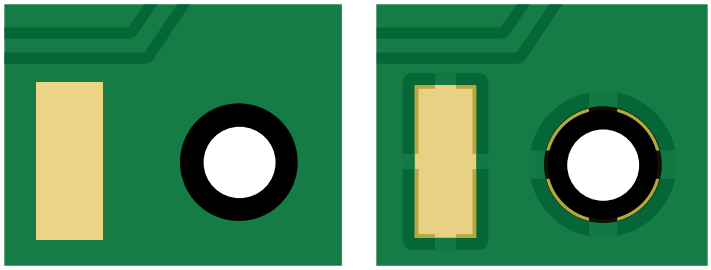
A. 线宽不小于 0.10mm，　线距不小于 0.10mm

B. 线宽不小于 0.16mm，线距不小于 0.16mm

C. 线宽不小于 0.20mm，线距不小于 0.20mm

D. 线宽不小于 0.25mm，线距不小于 0.25mm

4. 针对大铜皮上的焊盘，按图 5-54 中哪种方式设计更有利于焊接？（　　）



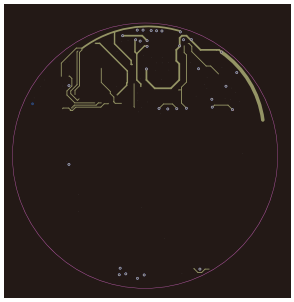
（a）　　（b）

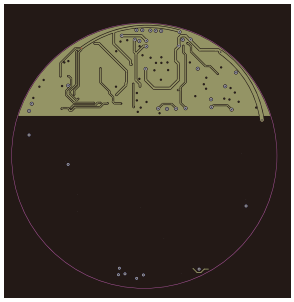
图 5-54　练习题 4 图

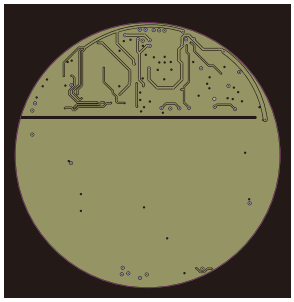
A. 焊盘直接与大面积铜箔相连［图 5-54（a）］

B. 焊盘设计为带有热隔离环的梅花形状［图 5-54（b）］

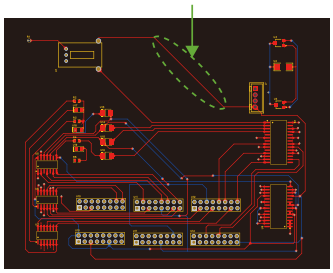
5. 在多层 PCB 布局设计过程中，为防止内层在压合时，由于内层较大空旷区域未铺铜或铺铜不足导致的预浸渍材料（PP）流向无铜区过多，进而引发基材偏薄、板弯板翘、铜皮起皱、缺胶或白斑、分层等质量问题，下列哪一图示的铺铜方式最优？（　　）

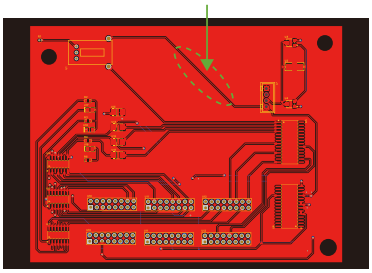
A. 

B. 

C. 

6. 铜箔的蚀刻速度与蚀刻液浓度及离子置换紧密相关。在 PCB 设计时，不均匀的铺铜或孤立线的存在会导致低残铜区域蚀刻液浓度偏高。浓度越高，离子置换速度越快，进而蚀刻速度增加。为防止线路在蚀刻过程中出现过度蚀刻，导致线路过细，应选择哪种布线方法？（　　）

A. 

B. 

7. PCB 有实心铺铜和网格铺铜两种常见铺铜方式，如果采用网格铺铜方式，网格线宽、线距参数越大越好，如果参数太小，生产环节容易出现干膜脱落现象，脱落的干膜碎片将影响产品品质。嘉立创建议工程师在设计条件允许的情况下，优先使用实心铺铜，如果采用网格铺铜方式（见图 5-55），网格线宽、线距应不小于以下哪个参数？（　　）

A. 0.1mm　　B. 0.15mm

C. 0.2mm　　D. 0.25mm

图 5-55　练习题 7 图

8. 受生产工艺影响，成品 PCB 导线宽度（线宽）（见图 5-56）可能比设计参数大，也可能偏小。在相关行业标准中，导体（导线）宽度公差为 ±20%，如果设计的 PCB 线宽为 0.2mm，则实物线宽为以下哪个参数，不符合接受标准？（　　）

A. 0.15mm　　B. 0.17mm

C. 0.19mm　　D. 0.23mm

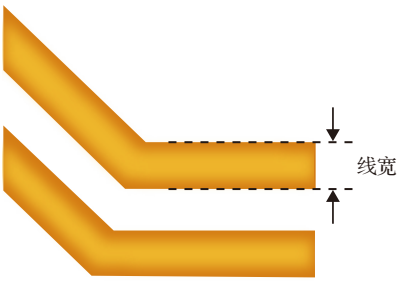


图 5-56　练习题 8 图

9. 设计 PCB 时，为避免锣刀在锣槽时损伤导线，关键一步是确保锣槽与导线之间有足够的安全间距。一般而言，安全间距越大越好，最小不能低于以下哪个参数？（　　）

A. 0.2mm　　B. 0.4mm

10. 为避免板内导体（线路、焊盘、铜皮）在 PCB 加工过程中被锣刀锣伤，电子工程师设计 PCB 时需要考虑导体与板边的间距（见图 5-57），该间距等于普通锣边和 V 割公差参数。根据嘉立创的锣边和 V 割公差，导体和板边的间距应设计成哪个参数？（　　）

A. 需要锣边的 PCB 单板，导体与板边的间距应不小于 0.2mm

B. 需要 V 割的 PCB 拼板，导体与板边的间

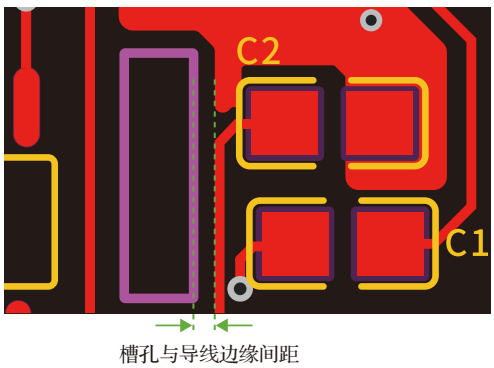


图 5-57　练习题 10 图

距应不小于 0.4mm

C. 以上两项都正确

11. 在嘉立创生产的高多层板中，当所需的阻抗值大于或等于 50Ω 时，嘉立创能提供的最小阻抗控制公差是多少？（　　）

A. ±20%　　B. ±10%

12. 焊盘与导线边缘的间距太小（见图 5-58），加工时容易出现蚀刻夹膜短路等隐患，影响产品良率。为保证间距，嘉立创 CAM 工程师可能会对焊盘进行削铜处理，导致实物板焊盘不完整。为达到提高产品良率，保证焊盘完整性，避免影响后续元器件焊接的目的，嘉立创建议电子工程师在设计铜厚为 1oz 的多层板时，BGA 焊盘与导线边缘的最小间距应不小于以下哪个参数？（　　）

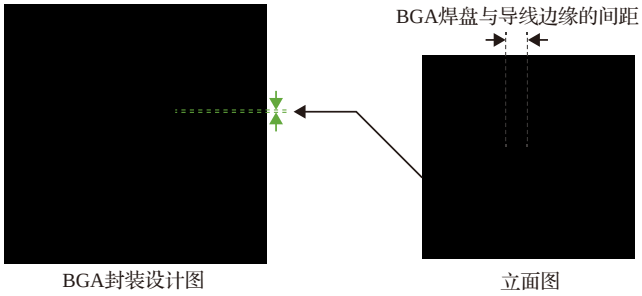


图 5-58　练习题 12 图

A. 0.09mm　　B. 0.15 mm　　C. 0.25 mm　　D. 0.30 mm

13. 嘉立创可加工的常规工艺 PCB 线宽、线距为 0.1mm（极限值为 0.09mm），线圈板需要采用特殊工艺加工，制造难度高，线宽、线距比常规参数略大。如果将 PCB 设计成整面开窗效果，线圈线宽、线距为 0.25mm，3D 预览图如图 5-59 所示，选择哪种表面处理工艺，可避免实物板出现连锡隐患？（　　）

图 5-59　练习题 13 图

A. 有铅喷锡　　B. 无铅喷锡　　C. 沉金

14. 在 PCB 行业中，如无特殊说明，PCB 厂商用来描述基本工艺参数时所说的常规铜厚（见图 5-60）是多少？（　　）

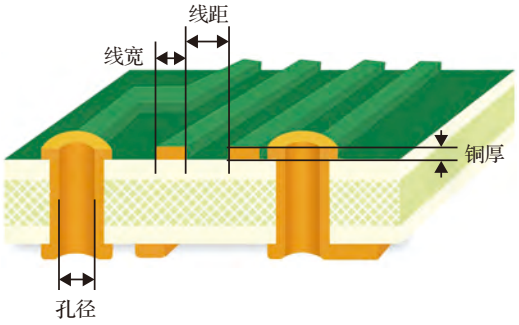
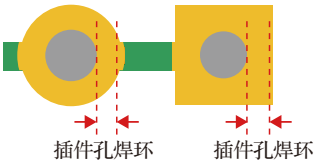
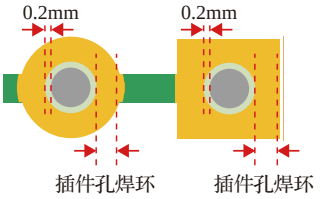


图 5-60　练习题 14 图

A. 1oz　　B. 2oz　　C. 2.5oz　　D. 3oz

15. 嘉立创部分工艺参数标有“推荐值”和“极限值”（见表 5-5），比如“金属化插件孔焊环宽度，双面板不小于 0.25mm（推荐值），极限值为 0.18mm”，以下描述正确的是哪一个？（　　）

表 5–5　嘉立创部分工艺参数

类　别	参　数	图　示
金属化插件孔焊环（1oz）	双面板：≥ 0.25mm（推荐值），极限值为 0.18mm	
	多层板：≥ 0.20mm（推荐值），极限值为 0.15mm	
非金属化插件孔焊环（1oz）	≥0.45mm（推荐值），生产时采用干膜封孔，非金属化孔周围 0.2mm 范围内的焊盘或铜皮会被掏空，为不影响焊接，焊盘宽度参数越大越好，否则可能无焊盘或者焊盘变成一个线圈	

A. 极限值是嘉立创生产可达到的最小参数，从产品良率和成本角度出发，设计 PCB 采用推荐值或大于推荐值的常规参数

B. 极限值是嘉立创生产可达到的最小参数，按极限值设计 PCB，产品良率和成本不受影响

参考答案

1. B；　2. A；　3. C；　4. B；　5. C；　6. B；　7. D；　8. A；
9. A；　10. C；　11. B；　12. A；　13. C　14. A；　15. A。

第 6 章 / PCB 阻焊设计与制造

6.1 PCB 阻焊工序概述

阻焊（Solder Mask）又称防焊，是一种涂敷在 PCB 表面、露出焊盘部位、对不需要焊接的区域进行绝缘保护的覆盖层。它在 PCB 设计与制造中扮演着关键角色。近年来，阻焊作为生产工艺中快速发展的一个环节，工艺经历了重大突破。然而，各 EDA 工具对生产工艺的理解程度不足，未能及时追赶上生产工艺的发展步伐。特别是在 PCB 的元器件库中，涉及阻焊层的信息没有与生产工艺的发展同步更新，这直接影响到 Layout 工程师的设计工作。

6.1.1 阻焊的设计层次与生产工序

设计软件操作层次：顶层阻焊层（Top Solder Layer）、底层阻焊层（Bottom Solder Layer）。

阻焊生产工序：阻焊印刷、烘烤固化、阻焊曝光、阻焊显影、检查和质量控制。

6.1.2 阻焊生产的关键设备

阻焊曝光机是阻焊生产的关键设备，其对位精度与阻焊设计优化、生产精度和品质紧密相关，对 PCB 制造的成功和设计工程师的设计布局至关重要。以下是该关键设备的发展历程。

1. 手动对位曝光机

在阻焊工艺早期，使用手动对位曝光机进行曝光。这种设备的对位精度较低，通常在 0.1mm（4mil）或更大的范围内，依赖操作员的技能和经验。受技术限制，这种设备无法满足现代 PCB 制造的高要求。

阻焊生产处于菲林成像 1.0 时代——阻焊设计单边扩展参数≥ 0.1mm（4mil）。

2. CCD/LED 自动对位曝光机

随着技术的进步，自动对位 CCD/LED 曝光机的出现使得对位精度得到提高。自动对位 CCD/LED 曝光机利用图像传感器和计算机视觉技术，能够实现更精确的对位。其对位精度可以达到 0.05mm（2mil），能更好地满足 PCB 制造的需求。

阻焊生产处于菲林成像 2.0 时代——阻焊设计单边扩展参数≥ 0.05mm（2mil）。

3. LDI 自动对位曝光机

随着技术的不断发展，LDI（激光直接成像）自动对位曝光机的出现进一步提升了对位精度。LDI 对位曝光机使用激光光束直接将 CAM 图形扫描照射到 PCB 上涂覆的阻焊层，无须使用传统的菲林。这种设备因排除了菲林对精度的影响，因此对位精度非常高，可以达到忽略偏差的程度。LDI 对位曝光机的出现极大地提高了 PCB 制造的效率和精度。

阻焊生产处于激光成像时代——在线路采用 LDI 曝光机生产的同时，阻焊设计单边扩展参数趋近“0”，即阻焊与焊盘实现 1:1 开窗。

4. 嘉立创 PCB 阻焊生产设备

嘉立创采用 LDI 自动对位曝光机（见图 6-1）生产所有高多层板和 80% 的双面板，其余 20% 的双面板采用 LED 自动对位曝光机（见图 6-2）。未来，嘉立创双面板阻焊制造也将完全转向 LDI 自动对位曝光机生产。

图 6-1　阻焊 LDI 自动对位曝光机生产线

图 6-2　阻焊 LED 自动对位曝光机生产线

6.2 阻焊设计

6.2.1 阻焊开窗与覆盖区域

PCB 的阻焊层分为阻焊开窗区域和阻焊覆盖区域两部分。在沟通时务必清晰表达意图，避免歧义，以免造成不必要的误会。

阻焊开窗区域：是指设计软件中在阻焊层上绘制的正片图形，如图 6-3 中箭头所示的部分。这些区域为不覆盖阻焊油墨的窗口，确保良好的焊接质量和电气连接。因此，设计软件中的阻焊层通常被称为 PCB 阻焊开窗层。

阻焊覆盖区域：是指在 PCB 上经过阻焊工序后，阻焊图形（开窗区域）对应的油墨被剥离，保留下来的油墨，起到绝缘保护作用，是阻焊设计图形的负片实施的结果，如图 6-4 中绿色部分所示。

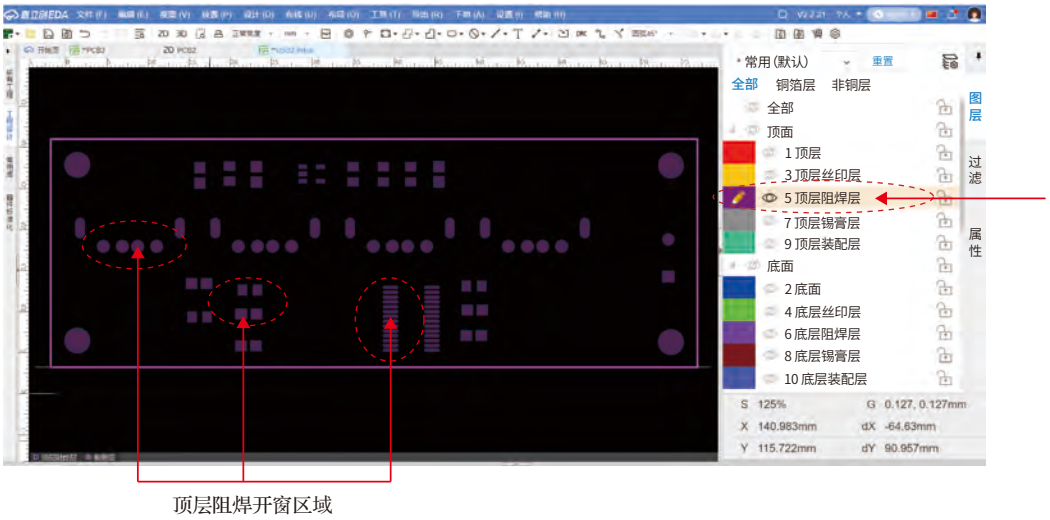


图 6-3　嘉立创 EDA 设计软件中的阻焊层（开窗区域）

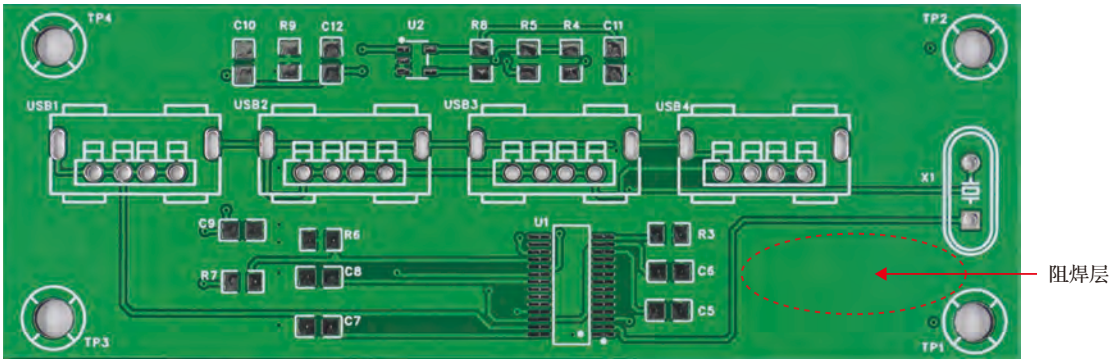


图 6-4　PCB 实物上的阻焊层（油墨覆盖区域）

注意：如果把阻焊图形放在线路铜箔上，成品 PCB 就会以开窗露铜（焊盘）的形式展现出来；如果把阻焊图形放在基材上，那么在成品 PCB 上，阻焊图形所在的区域就只有露出基材的效果，如图 6-5 所示。因此，要实现露铜的焊盘效果，除在阻焊层设计开窗图形外，还必须确保线路上有相应的铜箔。否则，PCB 成品将仅呈现露基材的外观，无法实现所期望的露铜效果。

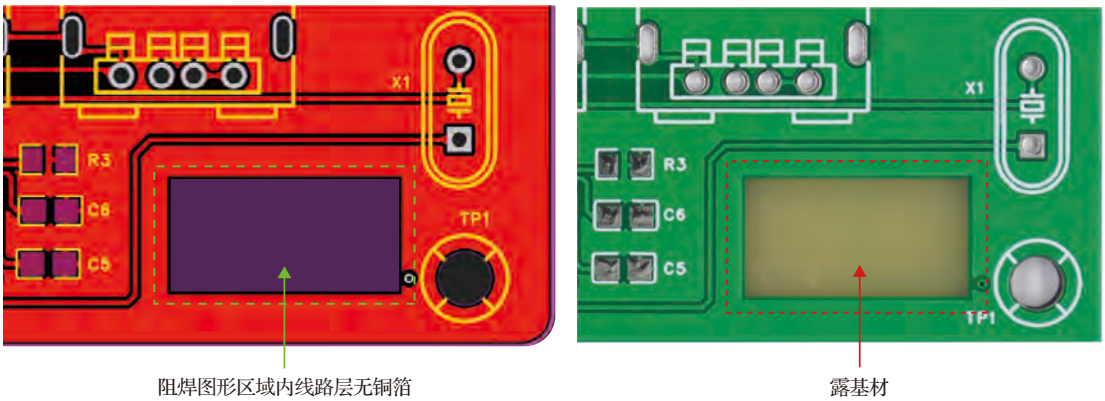


图 6-5　阻焊开窗露基材的设计稿与实物板

6.2.2 阻焊层与锡膏层

阻焊层（Solder Mask）和锡膏层（Solder Paste）在 PCB 设计和制造中具有不同的功能和应用，设计时一定要区分，不能混用。

阻焊层：是指在不需要阻焊油墨覆盖的区域设计图形，用于 PCB 生产阻焊时，去除阻焊油墨，保留焊接区域（或特定区域）以外的油墨，用于防止铜箔在不需要焊接的地方被焊接上，对 PCB 起到绝缘和保护的作用，如图 6-3 所示。

锡膏层：是指在特定的焊接点位置上设计图形，用于制造钢网开口，在焊接点上印刷锡膏以实现元件与 PCB 的焊接连接。嘉立创 EDA 设计软件中锡膏层如图 6-6 所示。

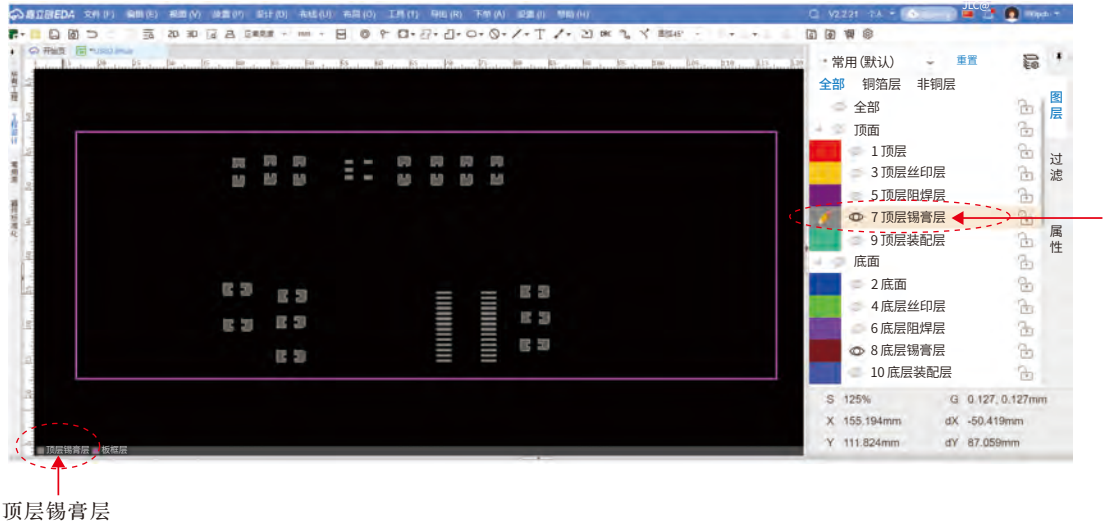


图 6-6 嘉立创 EDA 设计软件中锡膏层

注意：

（1）阻焊加工时，制造商只提取阻焊层设计的图形对 PCB 进行加工。如果将不需覆盖阻焊油墨的区域错误地设计在锡膏层上，则会导致 PCB 生产时无法读取开窗数据，导致需要开窗的区域被油墨覆盖。

（2）PCB 厂商通常会微调 CAM 资料，特别是拼板间距。在制作 PCB 钢网时，需参考 PCB 厂商调整后的 CAM 工程资料中的焊盘坐标，确保钢网开口与 PCB 焊盘准确对齐，避免偏移。

6.2.3 阻焊扩展值的参数设置

阻焊扩展值：表示阻焊油墨与焊盘之间的间隙，即阻焊开窗图形单边超出焊盘的宽度值。每个 EDA 软件元器件库中的焊盘扩展值都有默认值，但不同软件元器件封装中的默认扩展值有所不同。例如，如图 6-7 所示的贴片焊盘在嘉立创 EDA 软件中的扩展值，“跟随规则”默认为 0.05mm（2mil），而在 AD 软件中的扩展值则默认为 0.10mm（4mil）。

阻焊扩展值本身是为了解决对位精度的问题。如果生产设备精度得到提高，相应的设计也应做出调整，否则会影响 Layout 工程师的设计效率及品质。

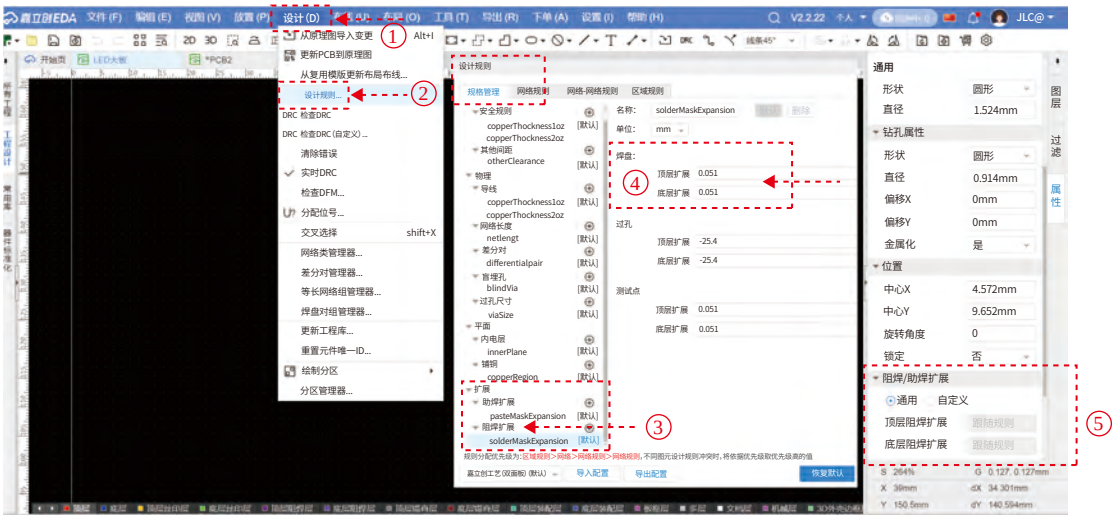


图 6-7　嘉立创 EDA 软件设计规则中阻焊扩展值设置界面

1. 阻焊扩展值大小设置

（1）当阻焊扩展值设置为正数值，表示阻焊开窗区域相对于焊盘单边向外扩大的参数。

（2）当阻焊扩展值设置为“0”值，表示阻焊开窗与焊盘等大，即 1:1 开窗。

（3）当阻焊扩展值设置为负数值，表示阻焊开窗区域相对于焊盘单边向内缩减的参数。

为了避免 PCB 生产过程中油墨覆盖住焊盘，在进行 PCB 设计时，阻焊扩展值不能小于 PCB 制造商阻焊对位的精度偏差范围。以嘉立创生产工艺为例，建议阻焊扩展值设计为以下参数。

多层板：阻焊扩展值可设计为“0”。

双面板：阻焊扩展值可设计为 0.05mm（2mil）。

嘉立创目前所有订单的线路生产采用 LDI 曝光机，同时在制造 4 层及以上高多层板时也全部采用 LDI 曝光机进行阻焊生产。因此，设计 4 层及以上高多层板时无须扩大阻焊区域，可采用与焊盘（Pad）相同大小的 1:1 比例设计阻焊开窗（阻焊扩展值为“0”），这样可以将更多的空间留给布线，大大提高了 PCB 设计的灵活性和可靠性，有利于实现更优秀的 PCB 设计。而双面板目前还有部分采用 LED 自动对位曝光机生产，因此阻焊扩展值设计为 0.05mm（2mil）即可。

2. 阻焊扩展值对品质的影响

阻焊扩展值大小对品质有着直接影响，具体表现在以下 4 个方面。

1）影响焊接效果

在 PCB 阻焊开窗设计中，如果将扩展值设为负数，阻焊油墨会扩展到线路焊盘上，减少可用焊接区域，从而降低焊接效果。当单边扩展值为负数值且大于或等于焊盘半径时，会导致整个焊盘被油墨覆盖，出现焊盘盖油现象。因此，通常不应将焊盘的阻焊开窗扩展值设置为负数。

2）影响布线和绝缘效果

当阻焊开窗扩展值过大时，布线需要特别注意避免阻焊图形覆盖到线路上。这种情况会增加在空间有限区域内布线的难度。如果阻焊图形覆盖到线路上，会导致线路露出铜箔，从

而失去绝缘保护的效果。在这种情况下，焊接过程中容易出现焊接连锡短路的风险。阻焊扩展值过大露出周围铜箔如图 6-8 所示。

图 6-8　阻焊扩展值过大露出周围铜箔

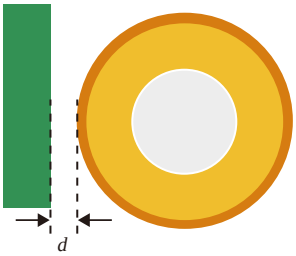


图 6-9　阻焊开窗与相邻导线间距

阻焊开窗图形与导体最小间距：为确保阻焊开窗不出现图 6-8 所示的不良现象，在设计时，除需要注意阻焊扩展值外，还需要注意如图 6-9 所示的阻焊开窗与相邻导线间距的最小值：$d \geqslant 0.05$mm（2mil），以确保导线及导线侧边被油墨完全覆盖。

3）影响阻焊桥

当相邻焊盘间距过小，特别是 IC 封装的焊盘，阻焊开窗扩展值过大会导致相邻焊盘之间的阻焊桥尺寸缩小。当阻焊桥尺寸低于一定值时，将无法有效实现阻焊桥。例如，相邻焊盘间距为 0.25mm，分别采用单边 0.05mm 和 0.10mm 开窗设计制作 PCB，做成 PCB 成品时，单边开窗 0.10mm 的没有实现阻焊桥，如图 6-10 所示。

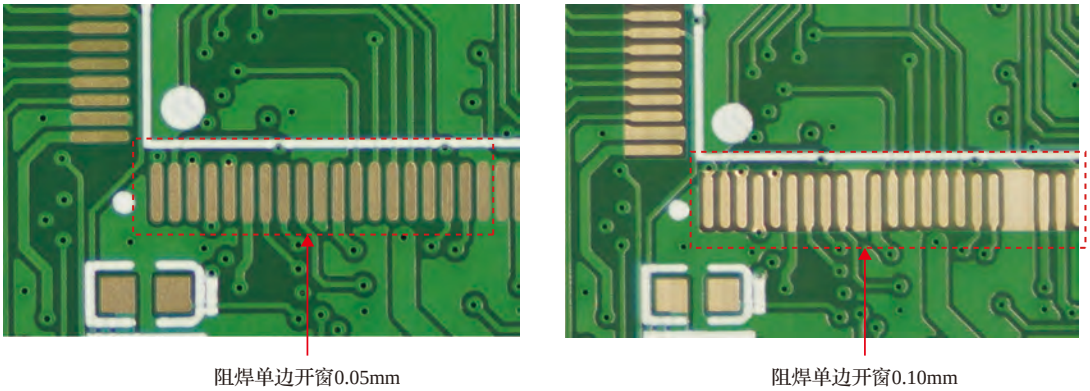


图 6-10　相同焊盘间距，采用不同大小开窗设计制作 PCB 的阻焊桥案例图

4）影响 PCB 外观

当阻焊开窗过大时，焊盘周围会有大量基材露出，影响 PCB 外观。

6.3 阻焊桥

6.3.1 阻焊桥的定义与作用

阻焊桥是 PCB 上相邻焊盘之间由阻焊油墨构成的连接部分，用于防止焊锡在焊盘间非正常流动造成短路，如图 6-11 所示。特别是在间隙较小的 IC 封装中，阻焊桥能有效阻止 SMT 过程中焊锡粘连，提高焊接直通率，对 PCB 正常功能的实现和可靠运行有着重要意义。

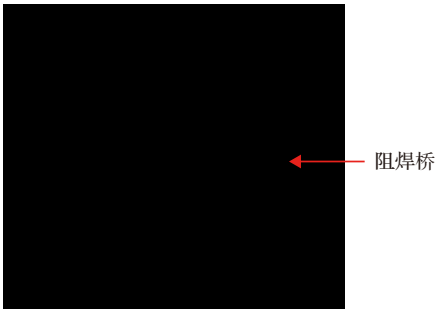


图 6-11　PCB 阻焊桥

6.3.2 影响阻焊桥实现的条件

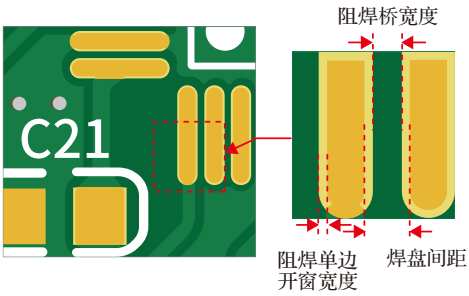
在加工 PCB 时，能否实现阻焊桥主要取决于 PCB 设计中相邻焊盘间距和阻焊开窗的设计方式，其次也受阻焊油墨的颜色影响。

1. 相邻焊盘间距

阻焊桥的宽度由封装中相邻焊盘间距决定，计算公式为：阻焊桥宽度 = 焊盘间距 – 阻焊扩展值 ×2。阻焊扩展值受限于阻焊工艺能力，处于一定范围内，可视为固定量。因此，在 PCB 制造过程中，习惯以相邻焊盘间距来衡量阻焊桥宽度，并将其作为阻焊桥能否有效保留的参数标准。

为了确保不同颜色的阻焊油墨均能有效地实现阻焊桥，在设计时，需要了解 PCB 制造商可加工阻焊桥的工艺参数。嘉立创实现 PCB 阻焊桥最小工艺参数如表 6-1 所示。

表 6–1　嘉立创实现 PCB 阻焊桥最小工艺参数

类　别	参　数	图　示
双面板（1oz）	焊盘间最小间距：0.20mm（适合绿、红、黄、蓝、紫色油墨）	
	焊盘间最小间距：0.23mm（适合黑、白色油墨）	
多层板（1oz）	焊盘间最小间距：0.10mm（适合绿、红、黄、蓝、紫色油墨）	
	焊盘间最小间距：0.13mm（适合黑、白色油墨）	

2. 阻焊桥设计注意事项

在 IC 封装设计中，阻焊开窗若采用开通窗设计，则无法实现阻焊桥；若未采用开通窗设计，嘉立创 CAM 工程师将根据工艺能力优化阻焊开窗大小。因此，嘉立创实现 PCB 阻焊桥最小工艺参数排除了阻焊扩展值的影响，依据相邻焊盘间距进行衡量。

注意：设计时应避免阻焊桥设计于接触按键类封装或带插拔金手指的 PCB 阻焊开窗。此类 PCB 采用阻焊开通窗设计可有效预防阻焊油墨厚度对接触效果的影响。

3. 阻焊油墨颜色的选择

通常情况下，阻焊油墨的颜色决定了 PCB 的整体外观。嘉立创 PCB 下单系统提供七种阻焊颜色供客户选择，如图 6-12 所示。在阻焊曝光工序中，不同颜色的油墨对光谱的吸收和反射程度不同，导致相同宽度的阻焊桥在同等曝光能量下，其固化保留程度有所差异。因此，阻焊桥的有效保留不仅与焊盘间距有关，还与油墨颜色密切相关。

图 6-12　嘉立创 PCB 下单系统阻焊颜色选项

6.4　四种阻焊覆盖方式

随着 PCB 层数的增加，过孔的密集度也会相应增加，因此对过孔覆盖的需求也不同。例如，双面板通常采用过孔盖油，4 层板更适合采用过孔塞油以获得更好的效果，而 6 层及以上高多层板则采用盘中孔工艺更可靠。

为了选择合适的阻焊覆盖方式，首先需了解各覆盖方式的效果。以下以嘉立创下单系统中的四种阻焊覆盖方式为例进行讲解。

6.4.1　过孔盖油

过孔盖油：PCB 行业通常将其称为连塞带印工艺。在印制阻焊油墨时，油墨直接覆盖过孔，通过曝光工艺的光学固化，使过孔表面形成一层阻焊油墨覆盖，从而阻止过孔被喷锡或沉金。这是大多数 PCB 采用的工艺之一，生产流程如下。

（1）将 PCB 进行除氧化等前处理成如图 6-13 所示的待印阻焊油墨 PCB。

（2）将待印阻焊油墨的 PCB 放入阻焊丝印机，通过刮刀压力，将阻焊油墨透过通用网板的网纱印到 PCB 上（见图 6-14）。

（3）将整板的两面通过丝印覆盖上阻焊油墨后，固定在框架中，再通过低温烘烤至半固化状态（见图 6-15）。

（4）通过曝光显影工艺保留过孔孔环及孔洞区域覆盖的油墨，如图 6-16 所示。

图 6-13　待印阻焊油墨 PCB

图 6-14　阻焊丝印设备

图 6-15　两面印刷阻焊油墨的 PCB

图 6-16　过孔盖油

应用范围：通常应用在对过孔填塞需求不高的双面板上，在喷锡或波峰焊过程中，过孔孔环表面有一层阻焊油墨，可以阻挡过孔孔环沾锡。

优点：生产方便，经济实惠。

缺点：部分过孔可能盖油不饱满，导致孔口发黄，且喷锡工艺下容易出现孔内藏锡珠现象。

6.4.2　过孔开窗

过孔开窗：是指在阻焊生产工艺中，通过曝光显影工序清除过孔位置的阻焊油墨，形成一个窗口，使过孔的铜环和孔壁暴露在外，避免被阻焊油墨覆盖。这些过孔在表面处理过程中可进行喷涂处理，如图 6-17 所示。具体生产流程类似于过孔盖油，区别在于过孔开窗时，所用的阻焊曝光资料中过孔区域的阻焊是开窗的，而过孔盖油工艺则不对过孔区域进行开窗处理。

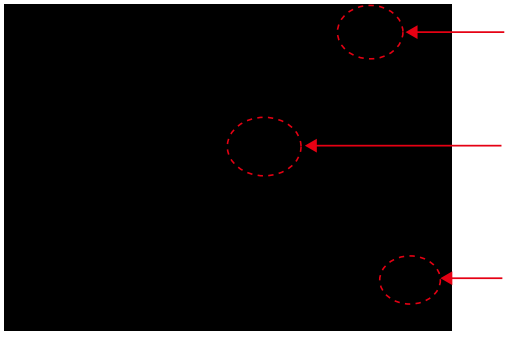


图 6-17　过孔开窗

应用范围：通常应用在功能比较简单、使用插接元器件的 PCB、需要通大电流的 PCB 或需要通过过孔散热的 PCB 上。因为过孔与焊盘的间距较大，SMT 环节不易短路；在波峰焊环

节，孔内全部浸满锡，有利于增强导电性，且焊盘未被油墨覆盖，散热效果更好。

优点：生产方便，波峰焊时孔内浸锡提供更大导电截面积，能容纳更大电流，有利于大电流传输和散热。

缺点：PCB 可靠性降低，可能存在漏锡、连锡短路等隐患。

6.4.3 过孔塞油

图 6-18 过孔塞油

过孔塞油：首先在铝片上激光钻孔，并将铝片制作成铝片网板安装到塞油丝印机上，通过印刷将油墨塞入 PCB 过孔中，然后进行整板阻焊油墨印刷，以确保过孔覆盖的一致性，如图 6-18 所示。

PCB 过孔塞油工艺是一种相对于传统过孔盖油工艺更为复杂的技术，该工艺显著降低了过孔发黄的风险，提供更好的过孔覆盖效果，但制造成本也相应增加。因此，在全面应用过孔塞油工艺时，PCB 行业面临着成本挑战。

嘉立创秉承为客户提供优质产品与服务的理念，将所有 4 层板从传统的过孔盖油工艺全面升级到过孔塞油工艺，4 层板不再提供过孔盖油工艺选项，如图 6-19 所示，并且完全取消了过孔塞油的额外费用。这一变革使客户免费享用更高品质的过孔塞油工艺，带来了真正的革新。接下来，将详细解析这项工艺。

图 6-19 嘉立创 PCB 下单系统 4 层板阻焊覆盖选项

1. 过孔塞油工艺流程

为何说 PCB 制造商将所有的板全面实现过孔塞油非常难？因为在生产过程中，过孔塞油要比过孔盖油多出铝片钻孔和塞孔等工序，具体生产流程如下。

（1）把要塞的孔提前在铝片上钻好，如图 6-20 所示。

（2）将预先通过激光钻孔做好的铝片制作成铝片网板，安装到塞孔丝印机上，如图 6-21 所示。

（3）将经过前处理，待印刷阻焊塞油的 PCB 放入塞孔丝印机内，采用丝印技术将油墨塞入对应过孔内（见图 6-22）。

（4）塞油完成后，再重复“过孔盖油”流程。

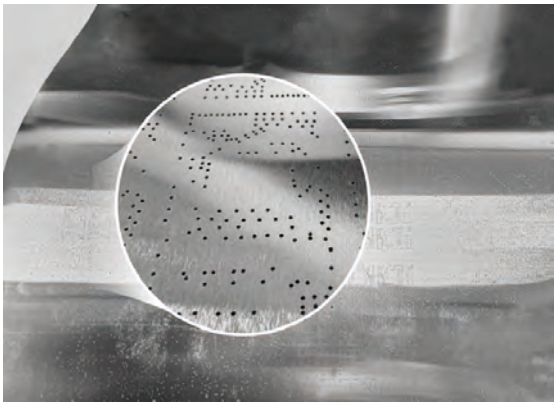


图 6-20　钻好孔的铝片

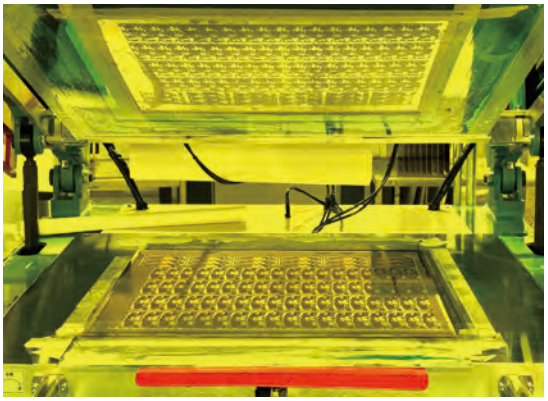


图 6-21　油墨塞孔丝印机

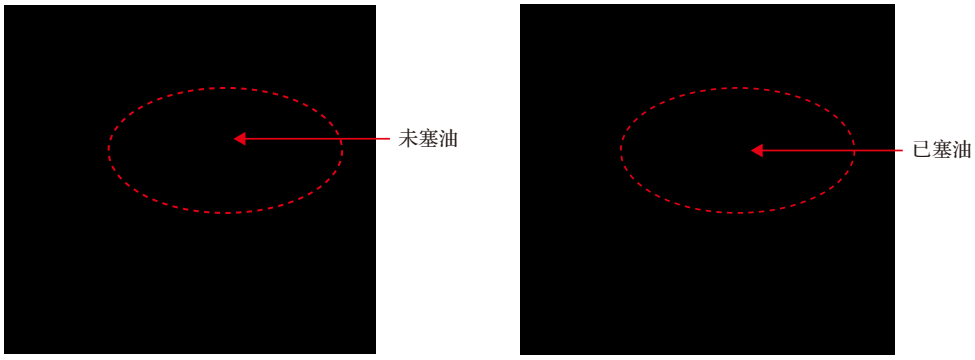


图 6-22　塞油前、后的 PCB

通过上述流程对比，可以发现过孔塞油工艺与过孔盖油工艺在工具和工序方面存在明显差异。

工具：过孔塞油需要使用激光钻铝片制作定制网板和通用网纱网板，而过孔盖油则只需使用通用网纱网板。

工序：过孔塞油多出了铝片钻孔和塞油工序。

这两个方面大大提高了过孔塞油相对于过孔盖油的成本。

2. 过孔塞油的优势

过孔塞油工艺通过增加定制网板和塞油工序，先用铝片将阻焊油墨塞进过孔里，再整板印刷阻焊油墨的制作流程，其塞孔率可达到 95% 以上（不含盘中孔），有效改善了过孔盖油中存在的过孔发黄现象。选择过孔塞油的优势具体如下。

（1）更好的过孔覆盖效果：过孔塞油工艺的最大优势是对过孔有更好的覆盖效果，减少过孔的露铜率（即所谓的“假性露铜”）。尤其对于 BGA 板而言，该工艺能够有效防止过孔内的油墨覆盖不充分而出现过孔内藏有锡珠。在焊接过程中，锡珠可能会在高温下熔解并流到焊盘上，导致短路等焊接问题的发生。

（2）增强电气连接可靠性：通过在孔内塞油墨填充过孔，可以防止氧化、腐蚀和外界杂

质的侵入，从而减少接触电阻，提高信号传输的稳定性和可靠性。

（3）提高产品质量和外观：先塞油，再整板印油的流程，使得 PCB 整体外观更具一致性，不仅改善了 PCB 的外观和整体质量，还增加了 PCB 的结构强度，降低了振动和应力对电路的影响，从而提高产品的可靠性和稳定性。

3. 过孔塞油设计注意事项

由于过孔塞油是采用丝印技术将油墨塞入孔内的，从品质角度出发，过孔塞油在设计时应注意以下几点。

（1）塞油过孔直径不大于 0.5mm：通常 0.3mm 是最佳塞油孔径，若塞孔直径大于 0.5mm，会导致塞孔工艺中，油墨塞孔不饱满，仍然会有过孔孔口发黄出现的风险。

（2）塞油过孔距离焊接焊盘不能太近：按目前嘉立创生产工艺，双面板中需要塞油的过孔距离焊接焊盘的边缘间距通常不小于 0.35mm，否则可能会有油墨上焊盘的风险（此间距随工艺进步会不断减小）。

（3）塞油过孔需两面盖油：按目前嘉立创生产工艺，进行过孔塞油工艺的 PCB，需要过孔两面盖油才可制造，否则会有油墨扩散到过孔所在的开窗焊盘上，影响焊盘喷镀和焊接效果。

6.4.4 过孔塞树脂 / 铜浆 + 电镀盖帽

过孔塞树脂 / 铜浆 + 电镀盖帽（又称盘中孔工艺）：首先在铝片上激光钻孔，并将钻好孔的铝片制作成铝片网板。结合真空丝印机，将树脂或铜浆塞入对应的覆铜板孔中，经过烘干打磨后进行电镀盖帽，最终恢复焊盘的完整性，实现过孔的导电性和平整性，如图 6-23 所示。

盘中孔工艺在 PCB 行业具有崇高地位。然而，许多 Layout 设计工程师可能不了解它，这是因为 PCB 制造商对该工艺收费极高，使其成为一个昂贵的选项。

然而，嘉立创在 6 层及以上的高多层板中免费为客户提供盘中孔工艺服务，实现了盘中孔工艺的普及，使“高贵工艺”走向大众化，以充分发挥其巨大价值。

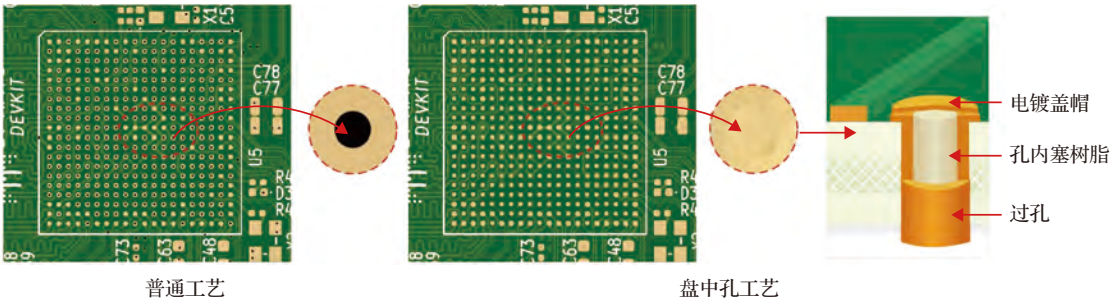


图 6-23　普通工艺与盘中孔工艺生产的 BGA 焊盘

应用范围：适用于空间小、布线难的高精密 PCB，特别是需要高可靠性、高性能的高多层 PCB。

1. 盘中孔的生产流程

（1）钻孔：在覆铜板上对需要树脂塞孔的坐标位置进行预钻孔，并使用激光钻孔方式按照塞孔坐标在铝片上进行钻孔。

（2）沉铜 +VCP：通过化学沉铜技术与 VCP 垂直连续电镀技术，对需要塞孔的金属化过孔进行孔壁沉铜。

（3）贴膜曝光：贴干膜并按对应的镀孔资料进行曝光。

（4）图形电镀：采用电镀技术加厚孔铜。

（5）褪膜：褪去覆铜板表面的干膜。

（6）磨板：对褪膜后的覆铜板进行打磨处理。

（7）树脂塞孔：先将预先通过激光钻孔做好的铝片制作成铝片网板，安装到真空塞孔机上；然后将树脂 / 铜浆塞入对应的孔中。

（8）烘烤：将塞满树脂的孔放入恒温烤炉中进行高温烘烤固化。

（9）研磨：将突出孔洞的树脂进行研磨，使填充的树脂与铜箔表面达到相同的平整程度。

（10）电镀盖帽：利用电镀技术，在研磨平整的塞孔树脂表面镀覆一层铜箔，实现盖帽效果，将中心钻过孔的焊环恢复成一个完整的实心焊盘。

塞孔设备及塞孔后 PCB 如图 6-24 所示（扫描图中二维码可查看 PCB 盘中孔制作视频）。

（a）钻好孔的铝片　（b）塞孔真空丝印机　（c）树脂塞孔后 / 打磨前 PCB

图 6-24　塞孔设备及塞孔后 PCB

2. 盘中孔工艺的优势

使用盘中孔工艺的理由很简单：它能提升高密度布线 PCB 设计的工作效率，增强产品可靠性，并减轻 Layout 设计工程师的工作负担。更重要的是，嘉立创如今在 6 层及以上的多层板上免费提供这一实用工艺。

（1）提高工作效率：Layout 设计工程师在进行高密度布线时，遇到空间有限、导线扇出困难时，可以直接在焊盘中间打孔，连接到其他层上进行扇出，从而达到事半功倍的效果。

（2）提示产品良率：在空间有限的布线环境中，使用盘中孔设计可以将过孔直接放在焊盘中间，将过孔所占的空间释放出来用于布线，减少或规避极限参数的使用，提升产品的可制造性和良率。

（3）消除焊接隐患：Layout 设计工程师在空间受限的条件下布线，如果不用盘中孔，过孔可能需要紧挨焊接焊盘放置，这会增加在 PCB 加工过程中过孔填塞的难度。若使用油墨塞孔，容易出现油墨上焊盘影响焊接效果的风险，若过孔填塞不饱满，在 SMT 焊接过程中容易出现漏锡等问题。使用盘中孔可以避免这些焊接隐患，提高 PCB 的可制造性和焊接品质。

（4）优化高速 PCB 布线：在高密度高速 PCB 布线，尤其是 BGA 布线时，Layout 设计工

程师可应用盘中孔技术，通过直线扇出，减少导线的弯曲次数，有助于优化布线，提高 PCB 性能和可靠性。

（5）提高 PCB 稳定性和耐久性：经过树脂塞孔工艺，可以增强过孔的抗振动和抗潮湿性能，还能增强 PCB 的抗环境腐蚀能力，从而提高 PCB 的稳定性和耐久性。

（6）增加产品散热性能：针对需要散热的产品，可直接在焊盘钻孔，利用盘中孔工艺实现散热，既能达到散热效果，又不影响焊接。

（7）增加板材机械性能：在钻孔的孔洞中填塞树脂或铜浆，能够增加 PCB 板材的机械性能，使产品机械性能更强。

特别注意：在生产过程中，过孔盖油、过孔塞油和过孔塞树脂或铜浆的覆盖方式适用于最小可加工孔径为0.15mm。覆盖效果和生产难度与孔径大小密切相关。当孔径低于0.3mm时，覆盖和填塞难度增加；孔径越小，难度越大。孔径超过 0.5mm 时，可能导致覆盖不饱满，出现孔口发黄，且效果随孔径增大而下降。为获得最佳效果，建议将覆盖或填塞的过孔孔径设定在 0.3 ～ 0.5mm，以 0.3mm 为最佳选择。

6.4.5　工艺选择与成本平衡

在选择过孔覆盖工艺时，需要平衡产品品质与成本之间的关系。良好的工艺通常伴随着复杂的生产流程，这会导致制造成本的增加。

嘉立创在 PCB 下单界面（见图 6-25）为不同层数的订单提供多种阻焊覆盖选项，方便客户根据产品需求选择合适的工艺。

为确保产品品质并消除价格忧虑，嘉立创将所有 4 层板的过孔工艺免费升级为“过孔塞油”，同时将 6 层及以上高多层板的过孔工艺免费升级为“过孔塞树脂 + 过孔电镀盖帽”。这不仅解决了客户在选择阻焊覆盖时的价格困扰，还提高了产品可靠性，增强了设计灵活性和效率，消除了 Layout 设计成本的顾虑，实现了品质与成本的有效平衡。

图 6-25　嘉立创下单系统不同层数的阻焊覆盖选项

6.5 阻焊的品质控制与检验

阻焊层的作用是对 PCB 起到绝缘保护，并在焊接时，为焊点提供明确的位置，避免相邻导体之间意外导通，有效防止电路短路。

6.5.1 阻焊油墨的外观检验

1. 检验项目

（1）阻焊油墨漏印：PCB 导体之间，除设计需求不覆盖阻焊油墨外，没有因缺少阻焊油墨而使相邻导体暴露。如果有用于修补的油墨，应与最初阻焊油墨具有相同的性能。

（2）阻焊油墨起泡：PCB 每一面出现瑕疵不允许超过两处，每个瑕疵的最大尺寸不超过 0.25mm；因起泡导致的电气间距的减少量不得超过间距的 25%。

（3）阻焊图形重合度：PCB 阻焊油墨在焊盘上的错位不可使相邻焊盘或导线暴露，印制接触片和测试点不应有阻焊油墨。节距≥ 1.25mm 时，表面安装焊盘仅可单侧受侵占且不超 0.05mm；0.65mm ≤节距＜ 1.25mm 时，表面安装焊盘仅可单侧受侵占且不超 0.025mm。

2. 验收标准

理想状态：

PCB 表面覆盖的阻焊油墨无漏印、空洞、起泡、错位、露导线，且牢固地附着在 PCB 上。

接受状态：

（1）在油墨覆盖区域内无金属导体裸露。

（2）没有因油墨起泡造成导体桥接。

（3）修补的油墨应与最初阻焊油墨有相同的性能。

（4）阻焊图形与焊盘错位，不得使焊盘的环宽减小到规定的最小环宽以下。

（5）阻焊油墨不能进入需焊接的金属化孔内，且牢固地附着在 PCB 上。

拒绝接受状态：超出上述接受状态。

6.5.2 附着力检测

阻焊油墨附着力的检测通常采用胶带检测法，具体操作和标准如下。

测试准备：准备一卷 1/2 英寸宽的 3M 牌 600 号压敏胶带和需要检测的 PCB 样板。

测试方法：在 PCB 阻焊油墨表面上贴最少 50mm 长的压敏胶带，挤走空气泡。在一分钟内，用手将胶带接近垂直板面反向扯起，胶带只用一次。

评估标准：目检胶带和样板测试区，确认阻焊油墨是否从 PCB 样板上剥离。无油墨剥离为合格，反之为不合格。

练习题

1. 阻焊开窗通常需要比焊盘单边大 0.05mm（见图 6-26），以减少阻焊对位公差对产品良率造成影响。嘉立创使用 LDI 曝光机生产精密高多层 PCB，可实现阻焊开窗面积与焊盘

面积的比为 1:1，即阻焊开窗单边缩小到以下哪个极限参数，PCB 也能正常生产？（　　）

A. 0.038mm　　B. 0.025mm　　C. 0.005mm　　D. 0mm

2. 阻焊开窗边缘与导线的距离太近容易导致线路露铜，给产品带来隐患。为提高产品品质，嘉立创建议工程师在设计 PCB 时，阻焊开窗边缘与导线的间距越大越好，最小间距 *d*（见图 6-27）应尽量不小于以下哪个参数？（　　）

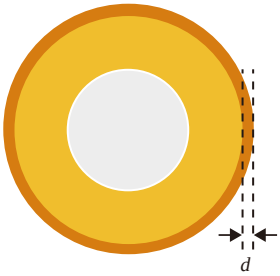


图 6-26　练习题 1 图

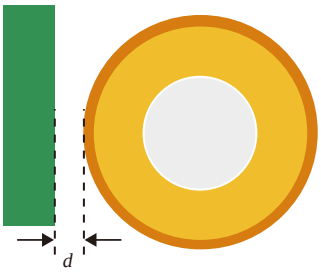


图 6-27　练习题 2 图

A. 0.038mm　　B. 0.05mm　　C. 0.075mm　　D. 0.10mm

3. 如图 6-28 所示，为了实现银白色区域内导线的露铜喷锡效果，李工在顶层线路层完成导线设计后，还需要在哪个层设计阻焊开窗？（　　）

A. 顶层阻焊层

B. 顶层锡膏层

C. 底层阻焊层

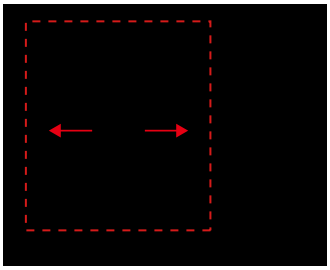


图 6-28　练习题 3 图

4. 如图 6-29 所示，在 PCB 设计软件中的顶层阻焊层，有两处开窗区域，分别标记为①和②。关于箭头所指的区域在成品 PCB 中的呈现效果，以下描述中错误的是哪一个？（　　）

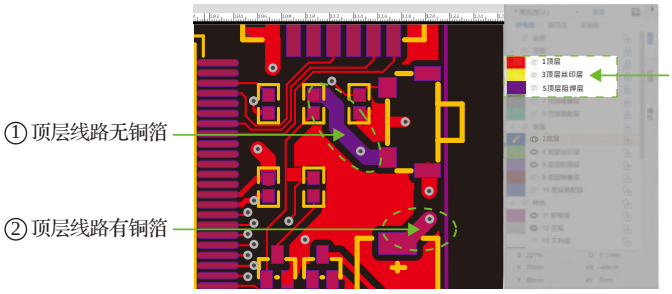


图 6-29　练习题 4 图

A. 箭头①所指阻焊开窗区域内，对应线路层没有设计铜箔，因此成品 PCB 呈现露基材效果。

B. 箭头②所指阻焊开窗区域内，对应线路层设计了铜箔，因此成品 PCB 呈现露铜且被喷镀的效果。

C. 箭头所指的①、② 两处的阻焊层设计了阻焊开窗区域，无论线路是否设计铜箔，都可以做出露铜且被喷镀的效果。

5. 如图 6-30 所示，过孔盖油工艺，俗称连塞带印，采用一次性印刷油墨覆盖过孔的工艺，优点是生产方便快捷且经济实惠，缺点是过孔覆盖效果没有过孔塞油好。以下关于过孔盖油可能出现的隐患描述正确的是哪一个？（　　）

过孔塞油　　过孔盖油

图 6-30　练习题 5 图

A. 过孔的孔口可能出现发黄现象

B. 过孔内可能无法实现油墨堵孔效果

C. 喷锡工艺中过孔可能出现藏锡珠现象

D. 以上三项描述均属于过孔盖油工艺的相对缺陷

6. 嘉立创 4 层板已免费升级至过孔塞油工艺，该工艺需要开铝片后塞油，再印阻焊油墨，烘烤固化。过孔直径太小，增加塞油难度，而过孔直径太大，实物板容易出现塞孔不饱满、过孔冒油等不良现象，如图 6-31 所示。为提高产品品质，嘉立创建议工程师在设计 PCB 时，如果需要采用过孔塞油工艺，过孔直径应尽量设计在哪个范围？（　　）

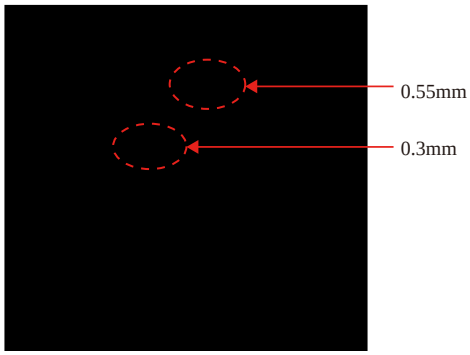


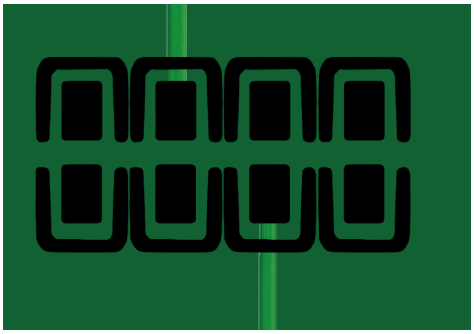
图 6-31　练习题 6 图

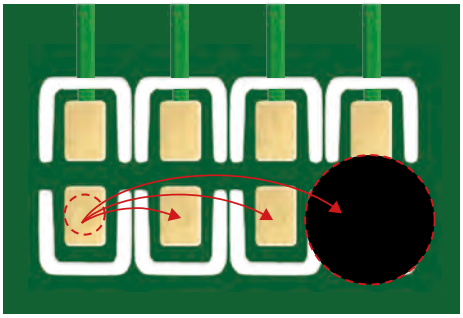
A. 理想的塞油过孔直径为 0.3 ～ 0.5mm，最佳参数为 0.3mm

B. 理想的塞油过孔直径应在 0.5mm 以上，最佳参数为 0.5mm

C. 理想的塞油过孔直径为 0.15 ～ 0.3mm，最佳参数为 0.15mm

7. 设计了盘中孔，但未选择盘中孔工艺（过孔塞树脂 / 铜浆 + 过孔电镀盖帽），实物板将呈现以下哪种效果？（　）

A. 

B. 

8. IC 阻焊桥是指两个 IC 焊盘之间的阻焊油墨，阻止焊料流动。不同的 PCB 制造商对可实现阻焊桥生产的焊盘间距（见图 6-32）要求各不相同。在嘉立创制造 1oz 铜厚的 PCB 时，以下选项中哪些相邻 IC 焊盘间距参数能够保留阻焊桥？（　　）（多选题）

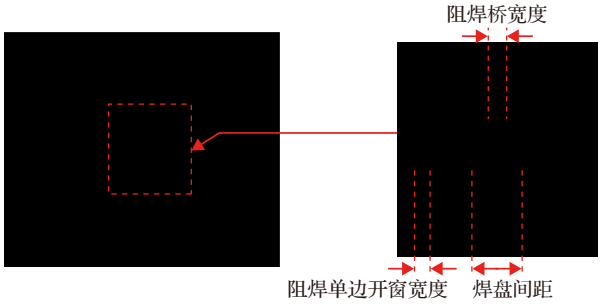


图 6-32　练习题 8 图

A. 双面板焊盘间最小间距：0.20mm（适合绿、红、黄、蓝、紫色油墨）

B. 双面板焊盘间最小间距：0.23mm（适合黑、白色油墨）

C. 多层板焊盘间最小间距：0.13mm（适合黑、白色油墨）

D. 多层板焊盘间最小间距：0.10mm（适合绿、红、黄、蓝、紫色油墨）

9. 嘉立创生产的高多层板采用绿色阻焊油墨，相邻 IC 引脚焊盘间距为 0.1mm 的情况下，PCB 能够实现阻焊桥的制作，如图 6-33 所示。这一成果主要归功于以下哪个原因？（　　）

图 6-33　练习题 9 图

A. 嘉立创拥有精良的生产设备（LDI 曝光机），可做到阻焊单边开窗宽度为 0mm，将更多的空间留给了阻焊桥

B. 嘉立创拥有卓越的显影技术

10. PCB 行业使用最广泛的阻焊油墨颜色为绿色，主要原因是什么？（　　）

A. 大家喜欢绿色

B. 阻焊油墨的固化效果受到光谱特性的显著影响。具体而言，白色油墨具有较强的光反射能力，导致大量光线反射而不是被吸收，这会降低油墨的固化效率。相反，黑色油墨的吸光性极强，这使得光难以穿透油墨的底层，结果是油墨表层可能已固化而底层仍未完全固化，从而增加了油墨脱落的风险。相比之下，绿色油墨在固化时间短、性能稳定等方面表现优异，很少出现如阻焊桥脱落等问题。因此，在没有特殊要求的情况下，PCB 制作通常偏好使用绿色油墨

参考答案

1. D；　2. B；　3. A；　4. C；　5. D；　6. A；　7. A；
8. A、B、C、D；　9. A；　10. B。

第 7 章 / PCB 字符标识设计与制造

7.1 字符标识（丝印）工艺概述

PCB 字符标识，简称字符（Silkscreen），是指印刷在 PCB 表面的文本和标记，因传统工艺采用丝网印刷制作，因此也俗称丝印。“清晰可辨识”是检验字符的重要准则。针对无外壳的 PCB 产品，用户对字符美观度的要求越来越严苛。为了实现更清晰美观的字符，合理的字符设计以及对生产工艺的提升与控制同样不可或缺。

设计软件操作层次：顶层丝印层（Top Silkscreen Layer）、底层丝印层（Bottom Silkscreen Layer）。

字符生产工艺：将制作好阻焊油墨的 PCB 经前处理后，通过丝网或喷印等设备在表面加工字符标识，并进行固化。

7.1.1 字符生产关键设备的时代变迁

随着技术的发展和市场需求的变化，字符生产工艺不断升级，从传统的网板印刷转向字符喷印，并从单色字符发展到彩色丝印，关键设备也随之不断演变。

1. 网板印刷时代

网板印刷：也称为丝网印刷技术，是通过刮胶压力将油墨通过丝印网板转移到 PCB 表面的工艺。

丝印网板：也称为网印模板，是通过封网胶将网纱固定在网框上。在丝网表面涂覆感光材料并固化后，结合光绘菲林，通过曝光、显影和冲洗等步骤，冲洗掉与菲林图形对应位置的感光材料，形成特定图案。在丝印过程中，油墨在刮胶压力作用下通过该图案区域转印到 PCB 上，形成图案或文字。

（1）人工作业时代

主要设备：丝印机、网板。人工定位字符丝印机如图 7-1 所示。

工艺流程：采用人工定位，人工印刷或机器印刷，将 PCB 字符通过网板印刷方式转移到 PCB 表面，利用高温烘烤或 UV 光能照射的办法进行油墨固化后，再重复上述过程进行第二

面字符印刷。

（2）全自动机械化时代

主要设备：自动对位丝印机、网板。全自动字符丝印设备如图 7-2 所示。

工艺流程：采用光学对位方式进行定位，机器自动丝印方式，将 PCB 字符通过网板印刷在 PCB 表面后，再利用联动的烘烤设备进行油墨固化后，再重复上述过程进行第二面字符印刷。

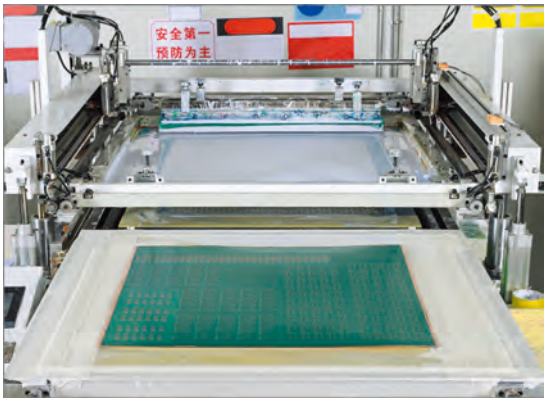


图 7-1　人工定位字符丝印机

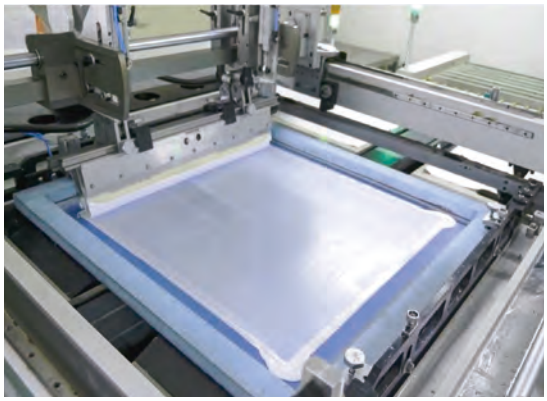


图 7-2　全自动字符丝印设备

2. 全自动喷印时代

主要设备：字符喷印全自动生产线（见图 7-3）。

工艺流程：采用光学对位方式进行定位和机器自动喷印方式，将 PCB 字符直接喷印在 PCB 表面，同时使用紫外线对油墨进行初步固化。完成后，自动翻面进行第二面的字符喷印。字符喷印机在实际生产中通常称为字符打印机，而字符喷印也常被称为字符打印。

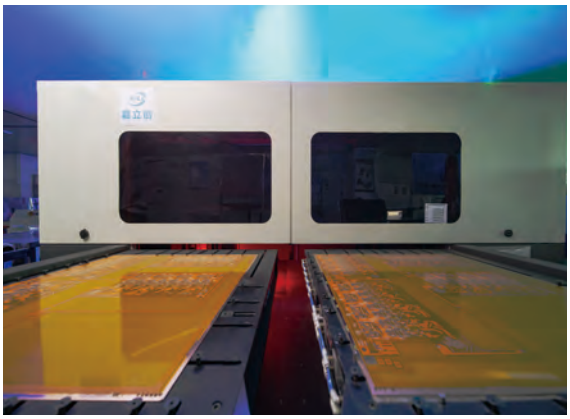


图 7-3　字符喷印全自动生产线

7.1.2　网板印刷与自动喷印的优缺点

综合考虑生产效率和整体品质，喷印方式已取代网板方式，成为字符制造的主流工艺。然而，喷印技术并非完胜网板技术，因为两者各有优缺点。

（1）网板印刷

优点：成本相对较低，操作简单，大面积字符丝印表面平滑美观。

缺点：丝印精度低，对位偏差大，效率低。

（2）自动喷印

优点：丝印精度高，对位精准，效率高。

缺点：设备成本高，喷印喷头使用时间稍长会影响大面积字符块的品质。

7.2　字符设计要点及注意事项

7.2.1　字符标识可制造性设计

字符在 PCB 设计和制造中的重要性不可忽视，其评估标准是可辨认和美观。为了达到这两点，需依据软件规则及 PCB 制造商的工艺参数进行合理设计。

1. 软件规则

顶层丝印层：放置该层上的字符应为正向字体，如图 7-4 中箭头“A”所示。生产出的 PCB 字符分布与设计稿一致。

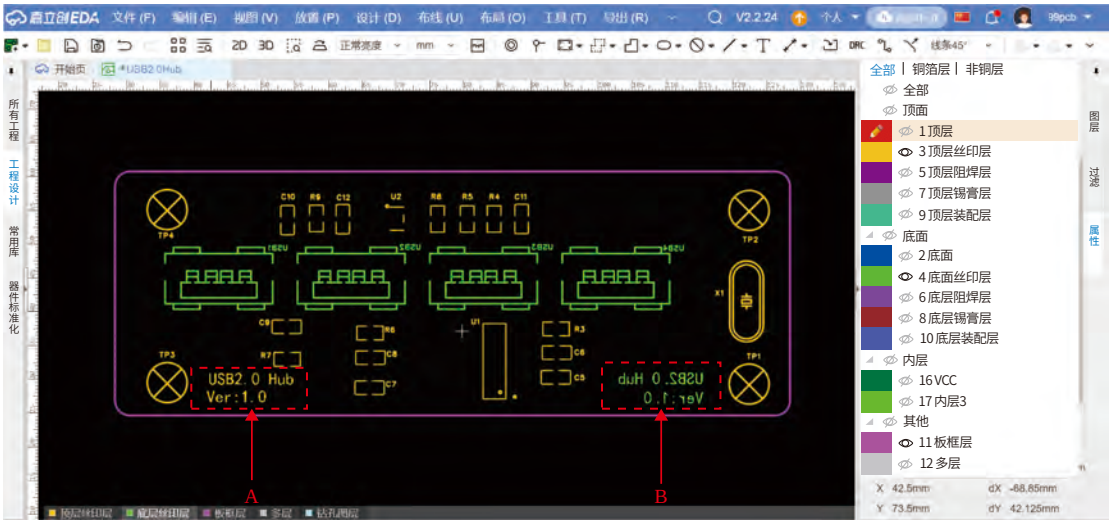


图 7-4　嘉立创 EDA 软件正、反向字符丝印

底层丝印层：放置该层上的字符应采用反向字体（镜像字体），如图 7-4 中箭头“B”所示。生产出的 PCB 在底层朝上观察时，字符呈正向显示，但其分布与软件中设计的分布呈镜像关系。

注意：若在底层丝印层设计正向字体，会导致生产出来的 PCB 上的字符为反向字体（镜像字体），嘉立创 EDA 软件设计时无此问题。

2. 字符标识的参数

在设计过程中，字符的大小、位置布局及字体的选择是能否做出清晰且美观字体的前提。

嘉立创 PCB 正相字符工艺参数如表 7-1 所示。

表 7–1　嘉立创 PCB 正相字符工艺参数

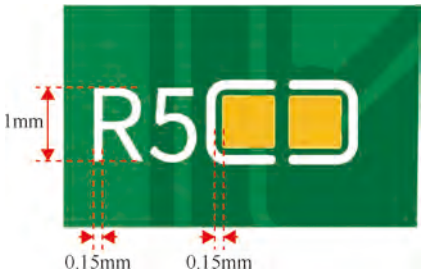
类　别	参　数	图　示
字符高度	≥ 1mm（特殊字体、中文、掏空字符视情况需更高）	
字符宽度	≥ 0.15mm（低于此值可能印不出来）	
字符到露铜焊盘间隙	≥ 0.15mm（低于此值会掏空字符，避免字符印刷在焊盘上）	

表 7-1 中列出了各项参数，但设计时需特别注意多个细节，以避免因细节理解或设置误差导致设计的字符实际加工出来清晰度不足。

（1）字符宽度：指标识中字符的一横一竖的笔画宽度，如图 7-5 中的 W 所示。在正向字体中，由于字体不同，设计时 W 可能由一条线或多条填充线组成（如白色高亮的 W_1 所示）。

工艺参数中，丝印宽度通常指字符丝印线条的 D 码大小（即字符丝印线条在设计编码中对应的规格大小）：

常规字符：$W \approx W_1 \geqslant 0.15\text{mm}$；高精字符：$W \approx W_1 \geqslant 0.10\text{mm}$。

（2）字符高度：在优化字符高度设计时，需注意设计软件中的字体有两个高度参数。

① 字体虚拟高度：（如图 7-5 中 H_1 所示），设计软件中填写的参数，不是字符实体的高度。设计时需考虑字体的虚拟高度应大于实体高度：$H_1 > H$。

② 字符实体高度：工艺参数中所指的字符高度，如图 7-5 中的 H 所示。当 H_1 不变时，H 的值会因字体的不同而变化。因此，在设计时应关注字符实体高度 H 的具体值。

常规字符：$H \geqslant 1.00\text{mm}$；高精字符：$H \geqslant 0.80\text{mm}$。

（3）字符间隙：如图 7-5 中的 S 所示，指两个字符之间的间距。为了避免字符粘连而降低辨识度，应使字符间隙 $S \geqslant 0.15\text{mm}$。

（4）字符旋转角度：指字符偏移水平线的角度，如图 7-5 中 R 所示。

（5）镂空字符：也称为反相字符，如图 7-6 所示，由字体和被挖空的填充区域两部分组成。由于字符呈镂空形态，须避免黏稠的油墨在固化前向外扩散，从而使镂空区域字符标识主体变小，导致字符不清晰。因此，镂空字体的大小通常需大于正相字体。按嘉立创生产工艺能力，如图 7-6 中各项参数需满足以下条件：

字体宽度 $W \geqslant 0.20\text{mm}$；填充线宽度 $W_2 \geqslant 0.15\text{mm}$；

字体高度 $H \geqslant 1.50\text{mm}$；反相扩展值 $D \geqslant 0.20\text{mm}$。

注意：设计中，通常有采用填充方式设计的如图 7-7 所示的 LOGO 类字符，无论是正相还是反相字符，其填充线宽度 W 均须大于 0.15mm，否则在设计软件中，字符表面看上去是完整的 LOGO，实际加工时，因填充线太小，可能导致丝印不清晰或中间出现条纹（见图 7-8）。

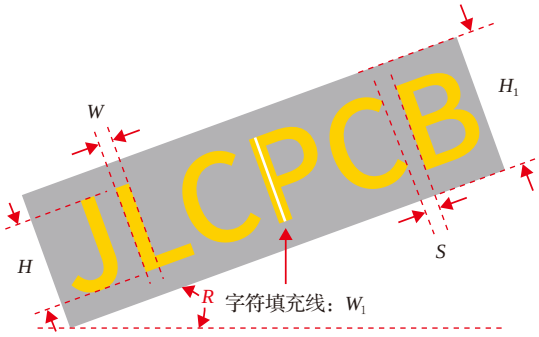


图 7-5　正相字符参数示意图

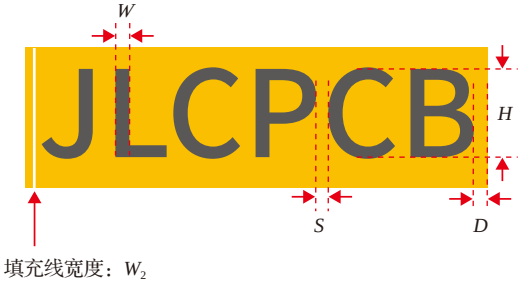


图 7-6　反相字符参数示意图

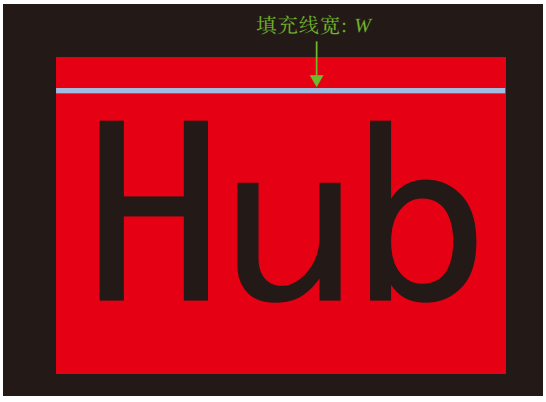


图 7-7　字符块示意图

图 7-8　有条纹的字符块案例图

3. 字体的选择

在设计字符标识过程中，如果使用相同的参数但采用不同的字体，字符标识的大小也会有所差异。因此，在进行字符标识设计时，除关注字符参数对字体清晰度的影响外，还需要从以下三个方面着手来选择合适的字体。

（1）字体组成结构

建议优先选用单一线条的字体，避免选择由多条细线填充而成的字体。否则，若填充细线的 D 码过小，可能会小于光绘设备的最小分辨率，导致无法准确光绘出来。此外，在喷印过程中，由于线条过细，可能会出现喷印时的条纹间隙，从而影响字符的美观度（参见图 7-8）。而填充线太粗又会导致字体肥大，影响美观。

（2）字体的兼容性

建议在没有特殊需求时使用软件自带的字体，以提高兼容性。如果需要设计特殊字体，应输出为 Gerber 格式后提供给 PCB 制造商，以避免因制造商打开资料时无匹配字体导致字符变形或丢失的风险。

（3）字体的统一性

同一组参数的字符，采用不同字体设计时，字符大小会有所不同。因此，尽量避免频繁更换字体，确保字体的统一性和字符大小的一致性。

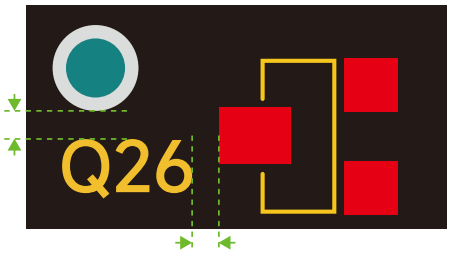
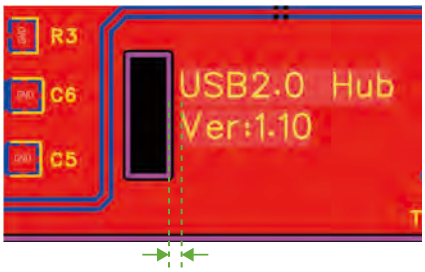
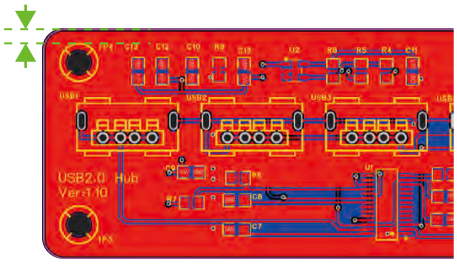
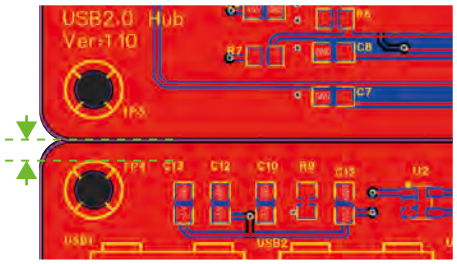
4. 字符位置布局

设计时，为确保焊盘能够完整印刷，除考虑字符的大小和字体外，还应关注字符的放置位置。

1）字符与焊盘、外形线间距参数

建议避免字符与焊盘、外形线过近，以防在 CAM 过程中发生字符被掏空或切削，导致字符不完整。字符与焊盘、外形线间距最小工艺参数如表 7-2 所示。

表 7–2　字符与焊盘、外形线间距最小工艺参数

参数类别	最小参数	图文说明
字符与焊盘（开窗露铜区域）之间的间距	≥ 0.15mm	
字符与锣槽之间的间距	≥ 0.20mm	
字符与锣板成型的外形线间距	≥ 0.20mm	
字符与 V 割成型拼板的外形间距	≥ 0.40mm	

2）字符放置在开窗区域

（1）字符放置在阻焊开窗露铜区域：PCB 制造商按照“露铜（露焊盘）优先”原则处理，可能掏空阻焊开窗露铜区域内的字符，导致字符残缺或丢失，如图 7-9 所示。

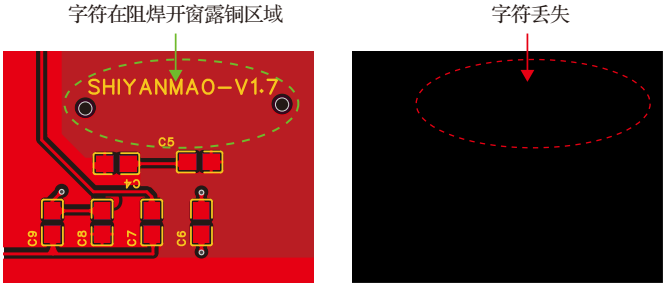


图 7-9　字符设计在阻焊开窗露铜区域设计稿与实物板图片

（2）字符放置在阻焊开窗露基材区域：不影响字符加工，可以完整呈现所有字符，如图 7-10 所示。

图 7-10　字符设计在阻焊开窗露基材区域设计稿与实物板图片

7.2.2　字符个性化设计与选择

嘉立创提供多种字符加工服务，包括不同清晰度和多种颜色的丝印。此外，还可根据客户要求提供个性化服务，如定制二维码、序列号，以及选择性添加客户编号和生产日期，以满足客户的需求。

1. 颜色与清晰度个性化定制

1）彩色丝印设计与制造

嘉立创提供彩色丝印服务，满足客户对个性化彩色外观的需求。设计时，需使用嘉立创 EDA 软件进行设计，如图 7-11 所示（彩色丝印设计相关内容请参考 11.2.2 节）。设计完成的彩色 PCB，在嘉立创 PCB 下单系统中，如图 7-12 所示的字符工艺选项中选择“嘉立创 EDA 彩色丝印”下单，即可得到如图 7-13 所示的彩色丝印 PCB。

2）单色字符个性化选项

在嘉立创 PCB 下单系统中，除彩色丝印外，还提供三种单色字符工艺选项（见图 7-12）。其中，采用批量模式打印或网版印刷方式加工的字符为默认的免费选项，而采用高精打印模式加工的高精字符与采用曝光方式加工的高清字符则是可选收费选项，用以满足对字符清晰度和精度要求更高的需求。嘉立创 PCB 的四种字符模式如表 7-3 所示。

图 7-11　嘉立创 EDA 软件设计彩色丝印

图 7-12　嘉立创 PCB 下单系统字符工艺选项

图 7-13　彩色丝印 PCB 案例

表 7–3　嘉立创 PCB 的四种字符模式

工　艺	优缺点	成　本	设计参数	实拍效果图
曝光高清字符	平整度极好、观感度极好、对位精度高、结合力一般、工艺复杂	成本极高，收费高	字符宽度：6mil 字符间距：6mil	
高精模式打印字符	平整度一般、观感度好、对位精度高、结合力好、工艺简单	成本高，效率低	字符宽度：6mil 字符间距：6mil	

续表

工　艺	优缺点	成　本	设计参数	实拍效果图
批量模式打印字符	平整度一般、观感度一般、对位精度高、结合力好、工艺简单	成本较低，免费	字符宽度：6mil 字符间距：6mil	[redacted]
网版印刷字符	平整度好、观感度一般、对位精度较低、结合力好、工艺复杂度一般	成本低，免费	字符宽度：6mil 字符间距：6mil	[redacted]

2. 个性化字符标志添加

为满足客户个性化需求，嘉立创推出了“板上加标志”的个性化字符服务，涵盖二维码、序列号、客户编号和生产日期等字符标识。嘉立创 PCB 下单系统板上加标志选项如图 7-14 所示。

图 7-14　嘉立创 PCB 下单系统板上加标志选项

1）说明书图文二维码添加

选择“加说明书图文二维码”选项后，会弹出如图 7-15 所示选项窗口，按需求选择和设置。客户可编辑二维码内容，如企业介绍、产品说明书等。扫描图 7-15 中二维码可查看二维码管理教程。

图 7-15　嘉立创 PCB 下单系“加图文二维码”个性化选项

2）溯源序列号和时间周期添加

选择“加溯源序列号”或“加时间周期 + 序列号”后，在弹出如图 7-16 所示的窗口中按需求选择和设置。序列号通过扫描识别，内容包含特定产品防重码序列号和时间周期 + 序列号信息，方便产品识别和管理。

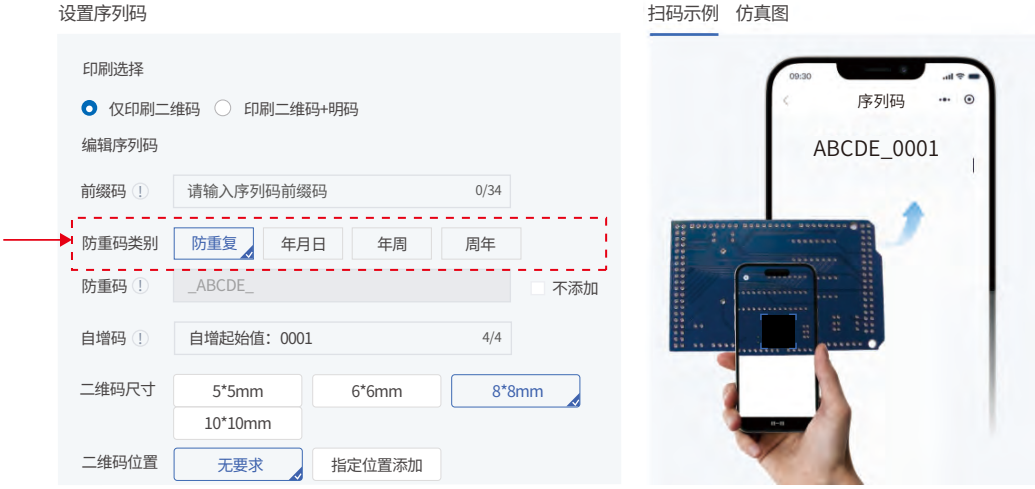


图 7-16　嘉立创 PCB 下单系“设置序列码”个性化选项

3）客户编号和生产日期添加

（1）添加客户编号：客户可在嘉立创下单系统中选择“指定位置添加”或“随机添加”。若选择“指定位置添加”，则需勾选该选项，并在设计稿的字符层中指定位置添加“JLCJLCJLCJLC”字样的字符标识，以便嘉立创工程师准确定位。嘉立创 PCB 下单系统“指定位置添加”客户编号注意事项如图 7-17 所示。

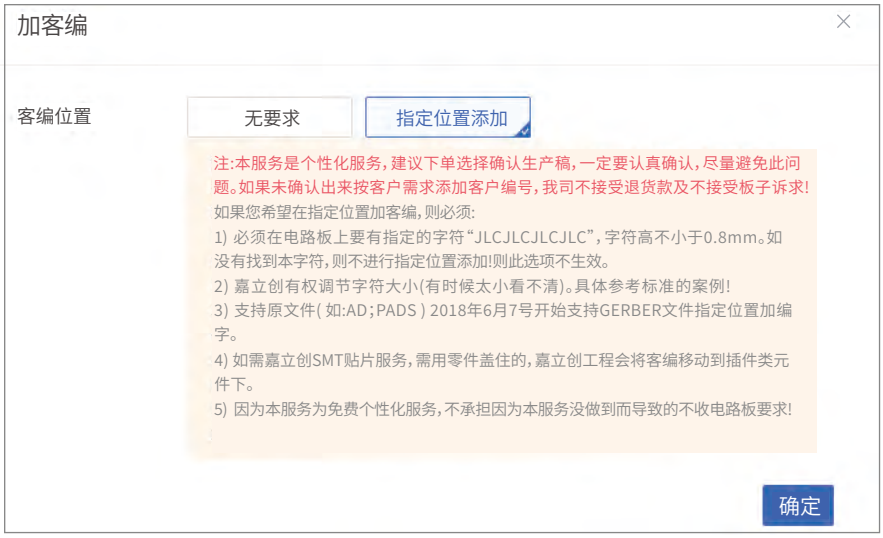


图 7-17　嘉立创 PCB 下单系统“指定位置添加”客户编号注意事项

（2）添加生产日期：在嘉立创下单系统中，客户可选择是否在每个单片内增加生产日期。对于拼板的 PCB，客户通常会选择每个 PCB 都添加生产日期，便于产品追溯和管理。

（3）不增加任何标志：客户不希望在 PCB 上增加任何标志，可以选择“不增加”选项。若板上没有添加任何标志，则会增加嘉立创在识别 PCB 归属时的难度。

7.3 字符的品质控制与检测

7.3.1 字符清晰度和可读性检测

字符是 PCB 上的重要标识，其清晰度和可读性至关重要。通常通过目视检测检查文字的完整性和可读性，并可使用放大镜等工具提高检测准确性。

根据字符的清晰度和可读性，可分为以下三个评估等级。

3 级标准：字符在清晰可辨认情况下，允许字符油墨在线条外侧增宽（堆积），如图 7-18 所示。

2 级标准：在 3 级标准基础上，允许元器件方位符号在方位清楚的情况下，其字符的轮廓有局部脱落，油墨允许印到焊盘上，但不能渗入孔中或使焊盘的环宽减小到最小环宽以下，如图 7-19 所示。

1 级标准：在 2 级标准基础上，允许字符标识模糊或出现重影，但仍可辨认，如图 7-20 所示。

图 7-18　3 级接受标准

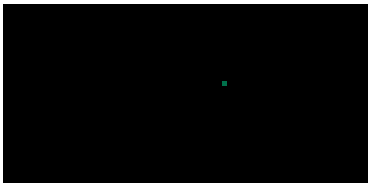


图 7-19　2 级接受标准

图 7-20　1 级接受标准

7.3.2 字符附着力检测

字符附着力检测通常采用胶带检测法来实施，具体测试方法和评估标准如下。

测试准备：准备一卷 13mm 宽的“3M”牌的 600 号压敏胶带和需要检测的 PCB 样板。

测试方法：在 PCB 字符图形表面上，贴至少 50mm 长、13mm 宽的压敏胶带，挤走空气泡。在一分钟内，用手将胶带接近垂直板面反向扯起。胶带只使用一次。

评估标准：目检胶带和样板测试区，来确定字符油墨是否从 PCB 样板上剥离。无油墨剥离为合格，反之为不合格。

练习题

1. 在 PCB Layout 设计中，选定合适的字体大小至关重要，因为它直接影响加工后字体的清晰度。由于不同的 PCB 制造商拥有不同的工艺水平，因此能实现的最小字体尺寸也会

有所不同（见图 7-21）。针对正相字体，嘉立创常规工艺能够实现清晰字符的最小参数是多少？（　　）

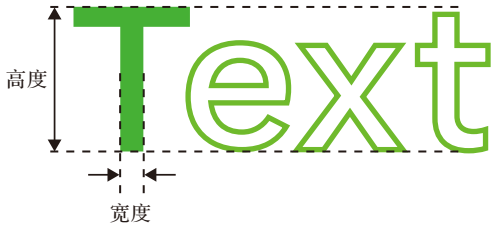


图 7-21　练习题 1 图

A. 字体宽度：≥ 0.15mm；字体高度：≥ 0.6mm

B. 字体宽度：≥ 0.15mm；字体高度：≥ 1.0mm

C. 字体宽度：≥ 0.2mm；字体高度：≥ 0.80mm

D. 字体宽度：≥ 0.2mm；字体高度：≥ 1.50mm

2. PCB 字符可设计成正相字体和反相镂空字体（见图 7-22），为了使实物板上的字符更清晰，设计时需要注意字体相关参数不宜太小，以下哪个选项为嘉立创可加工的最小镂空字参数？（　　）

图 7-22　练习题 2 图

A. 字宽不小于 0.15mm，字高不小于 1.0mm，填充线宽不小于 0.15mm

B. 字宽不小于 0.20mm，字高不小于 1.5mm，填充线宽不小于 0.15mm

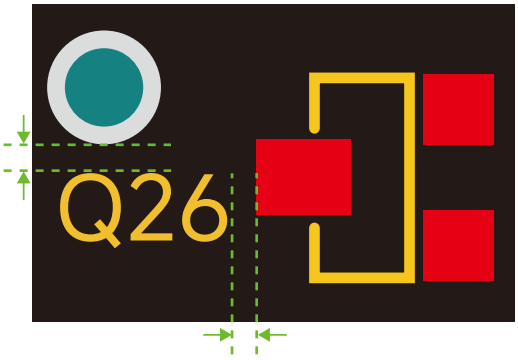


图 7-23　练习题 3 图

3. PCB 字符有网板印刷、字符打印和曝光制作三种常见的制作工艺，不论使用哪一种制作工艺，设计时都应考虑字符的高度、线宽，以及字符到焊盘的距离。为避免实物板字符印在焊盘上，对元器件焊接造成影响，嘉立创建议字符与焊盘的间距（见图 7-23）越大越好，最小间距应尽量不小于以下哪个参数？（　　）

A. 0.05mm　　B. 0.10mm

C. 0.15mm　　D. 0.20mm

4. 如图 7-24 所示，在 PCB 设计的 Layout

阶段，为了确保焊盘和露铜区域能够正常上锡，并防止在喷锡过程中丝印文字的掉落或残缺，设计工程师应当避免将丝印文字放置在哪些区域？（　　）

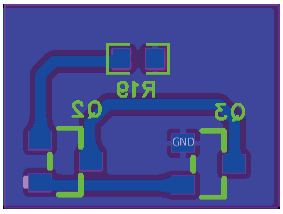
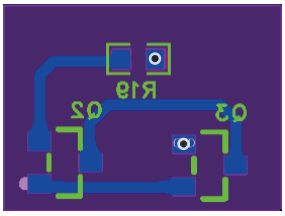
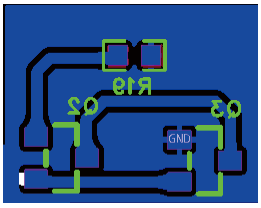
设计稿 （底层字符）			
实物图			
	字符设计在露铜区域	字符设计在基材区域	字符设计在阻焊油墨区域

图 7-24　练习题 4 图

A. 阻焊油墨覆盖区域
B. 露出基材的阻焊开窗区域
C. 露出焊盘或大面积铜箔的阻焊开窗区域

参考答案

1．B；　2．B；　3．C；　4．C。

第 8 章 / PCB 外形设计与制造

8.1 外形工艺概述

在 PCB 设计过程中，外形设计和拼板布局是至关重要的环节。下面将从 PCB 制造的视角出发，介绍 PCB 在设计过程中的注意事项。

设计软件操作层次：板框层、机械层。

外形生产工序：外形锣板、外形 V 割、外形斜边。

外形生产工艺：外形生产工艺是指在 PCB 制造过程中，采用锣边、V 割和斜边等方式来实现 PCB 外形轮廓及相关结构的操作流程（在 PCB 行业中也称为成型工艺）。

外形生产主要设备：PCB 数控锣边机、PCB 数控 V 割机、PCB 数控斜边机。外形加工设备如图 8-1 所示。

外形生产主要工具：锣刀、V 割刀、斜边铣刀。

（a）数控铣床（锣边机）

（b）V 型槽数控割槽机（V 割机）

（c）数控斜边机

图 8-1　外形加工设备

8.2 外形设计注意事项

8.2.1 外形层设计

外形层：是用于设计 PCB 外形切割元素的层次。在不同的设计软件中，外形层有不同的名称，如板框层（Board Outline Layer）、机械层（Mechanical Layer）、外形轮廓层（Outline Layer）等。

工程师在进行 Layout 设计时，需要将采用外形加工的开孔、开槽、V 割等外形切割元素与板框线统一且正确地放置在同一外形层上，以确保提供给 PCB 制造商的外形层数据唯一且准确，避免外形漏做或做错。嘉立创 EDA 软件设计的板框层（外形层）如图 8-2 所示。

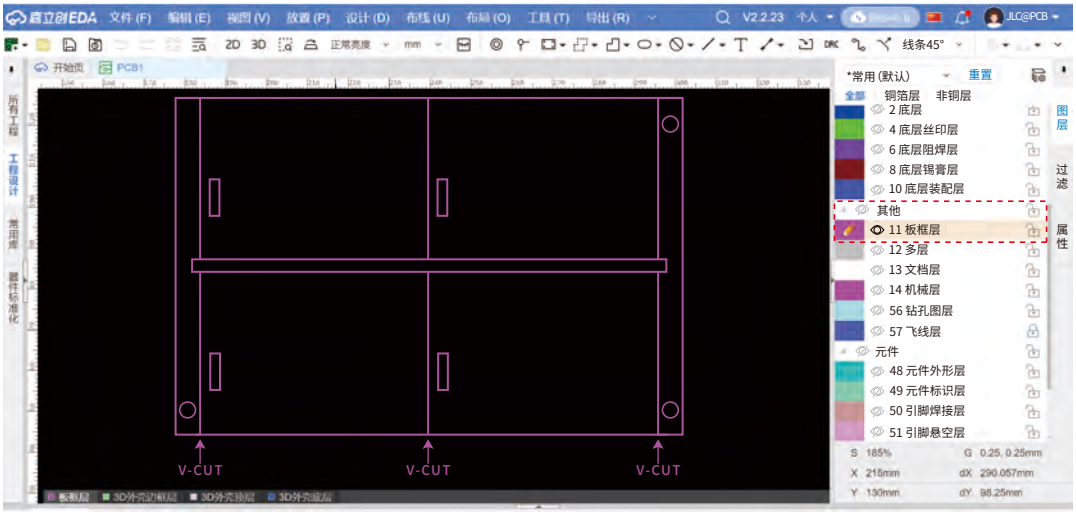


图 8-2　嘉立创 EDA 软件设计的板框层（外形层）

若因层次、属性不正确或大小示意不明确，导致设计的外形元素无法正常输出 Gerber 加工数据至外形层，并被加工设备有效识别和切割，将可能造成漏加工或错误加工。因此，设计时需特别注意以下问题。

1. 外形层设计不规范问题

在使用 AD 软件进行设计时，必须注意 Keep-Out layer（禁止布线层）与 Mechanical layer（机械层）的区别，两者不能混用。首先，应了解这两个层次的用途及适用的设计内容。

Keep-Out layer（禁止布线层）：用于定义不允许放置布线和组件的区域。通常用于避免与其他元件或信号干扰，确保特定区域保持干净。

Mechanical layer（机械层）：用于设计与 PCB 机械加工相关的内容，包括外形轮廓、孔位、V 割线、尺寸标注及其他与机械结构相关的信息，供制造和装配使用。

（1）PCB 制造商通常首选机械层作为外形层进行切割。设计时，应在机械层上绘制外形线。若如图 8-3 所示，Keep-Out layer 和 Mechanical layer 中同时定义不同的外形，则在优先使用机械层加工时可能会引发错误。

（2）PCB 制造商通常仅以外形层为准进行切割。为确保开槽、开孔和 V 割的正确性，

这些元素应当统一设计在同一外形层上。若如图 8-4 所示，外形元素分层设计，则使用外形层（外形所在的 Mechnical1 layer 层）切割时会漏掉外形层以外的其他图层元素，造成漏切割。

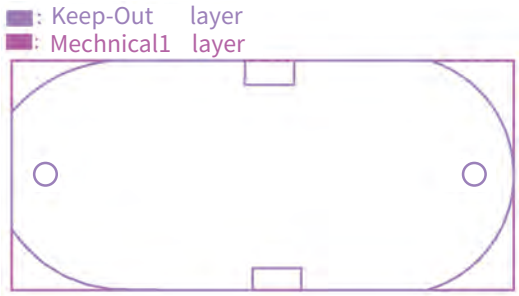


图 8-3　不同层定义不同外形

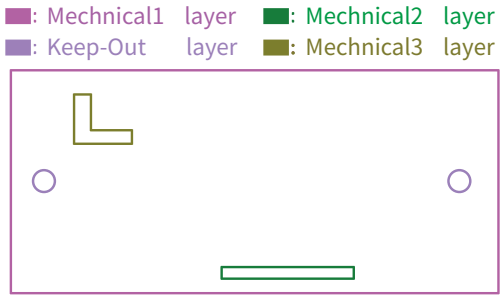


图 8-4　外形元素分层设计

2. 外形元素勾选“Keep-out”选项问题

在 AD 软件设计中，外形层的外形线属性不能选择“Keep-Out”（使在外）选项。若如图 8-5 所示某外形线勾选“Keep-Out”选项，该元素将被软件禁止输出 Gerber 数据，导致 PCB 加工时无法读取该外形数据，出现外形元素漏加工。

3. 漏画外形层问题

在 AD 软件中，“Board Cutout”区域仅用于 3D 视图，不会输出 Gerber 数据进行切割加工。为确保准确性，设计时应在“Board Cutout”区域边缘用外形线勾勒槽或孔的轮廓。若如图 8-6 所示，仅依赖“Board Cutout”设计外形孔，而不使用外形线，则将导致切割时缺乏可读数据，出现漏切槽或孔的情况。

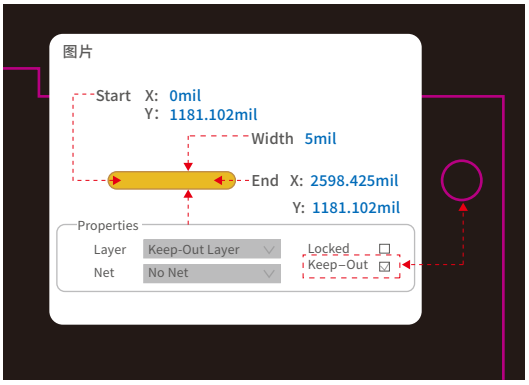


图 8-5　外形线勾选“Keep-Out”选项

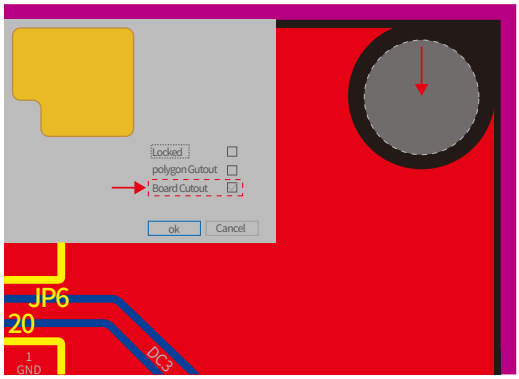


图 8-6　仅依赖“Board Cutout”设计外形孔

4. 孔径大小不明确问题

在外形层的开孔位置放置两个大小不同的同心圆（见图 8-7），会导致 PCB 制造商无法准确快速识别所需的开孔大小。

5. 外形线被钻孔符号遮挡问题

在 PADS 设计软件中，外形线与钻孔符号一同输出到“钻孔图”。如果外形线设计的槽或孔的 D 码大小与板框线不同且与周围钻孔间距过近，则可能导致外形槽或孔与钻孔符号重叠，从而被遮挡。如图 8-8 所示，外形槽与钻孔符号重叠，白色高亮部分的方槽被遮挡，难

以识别，这将导致 PCB 制造厂的 CAM 工程师无法识别、查看和提取加工数据，从而造成漏开槽或孔。

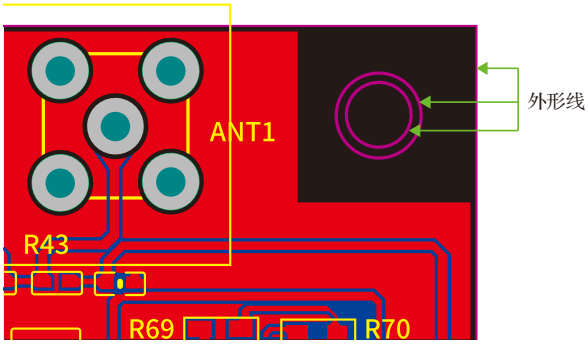


图 8-7　外形层设计大小不同的同心圆

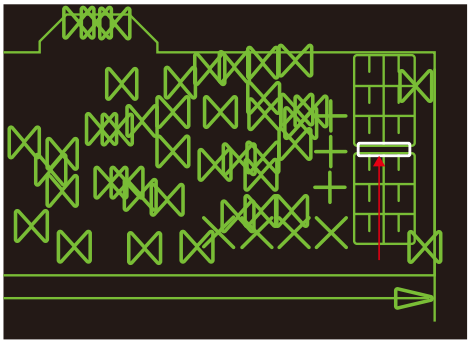


图 8-8　外形槽与钻孔符号重叠

6. 外形锣槽无法实现绝对直角问题

在 PCB 设计和制造中，需注意一个普遍问题：外形锣槽无法实现绝对直角。这是因为在切割时，锣刀沿着外形线的中心位置切割，而锣刀本身具有一定直径。当锣刀经过槽内的直角位置时，刀边无法到达直角，导致外形锣槽的边缘通常会留下与锣刀直径相当的圆角。如果产品需要，可以在设计中参考 4.3.2 节关于在直角处添加清角孔的金属化方槽优化方法。

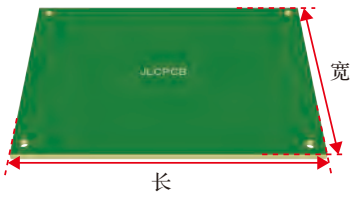
8.2.2　外形尺寸设计

1. 最大或最小外形尺寸

PCB 外形尺寸：是指根据电路需求和装配要求设计的 PCB 整体外形尺寸，包括单片或拼板出货时的外形长、宽参数。

在设计中，PCB 的最大或最小尺寸需考虑 PCB 的可制造性，即 PCB 制造商的工艺能力。嘉立创可加工 PCB 尺寸工艺参数如表 8-1 所示。

表 8–1　嘉立创可加工 PCB 尺寸工艺参数

类　别	参　数	特别说明	图　示
最大尺寸	① FR-4：670mm×600mm	①所列数据适合≥ 0.8mm 板厚，板厚 <0.8 mm 的 FR-4 最大尺寸为 500mm×600mm； ② FR-4 单面板最大接单尺寸为 606mm×510mm； ③ 1oz 铜厚的 FR-4 双面板极限接单尺寸为 1020mm×600mm，但需按工艺和板厚指定到对应工厂进行生产	
	②高频板：590mm×438mm		
	③铝基板：602mm×506mm		
	④铜基板：480mm×286mm		
最小尺寸	常规：3mm×3mm（半孔工艺 / 包边工艺长、宽≥ 10mm	所列数据适合≥ 0.6mm 板厚，板厚 < 0.6mm 的需评估，小尺寸的板建议拼板，以便加工	

2. 最小板边悬空外形尺寸

PCB 板边悬空外形：是指设计中，PCB 边缘的外形仅有一个较小连接位的悬空区域，缺乏支撑。为确保 PCB 制造和使用的稳定可靠，悬空外形的尺寸不宜过小。通常，如图 8-9 所

示的悬空外形的长、宽尺寸应满足：宽度（W）≥ 2.0mm，长度（L）≤ 10.0mm，以避免在加工和使用过程中可能出现的基材崩裂风险。

3. 出货尺寸偏小的影响

当 PCB 出货外形尺寸的长、宽不大于 30mm 时，PCB 生产过程中会影响锣板和表面处理工序的品质和效率。

（1）影响锣板成型的品质：在使用常规外定位锣板时，由于板子面积过小，锣刀接近终点时可能导致板子摆动，从而折断尾部基材，留下未被平滑切除的三角形突出物，形成 PCB 外形毛刺（见图 8-10）。如对外形尺寸有严格要求，需在嘉立创下单系统中选择“需要磨边”，通过人工打磨清除毛刺，避免影响产品装配。如果尺寸过小，PCB 本体可能会随边角废料被锣板吸尘设备吸走。

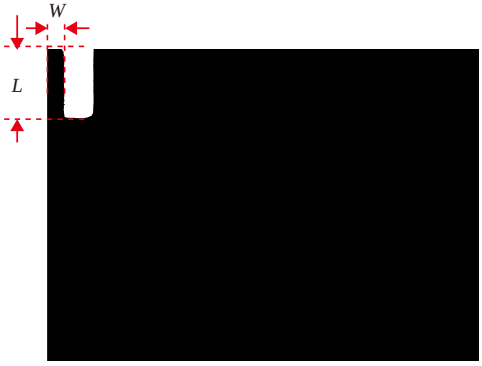


图 8-9　PCB 板边悬空外形案例

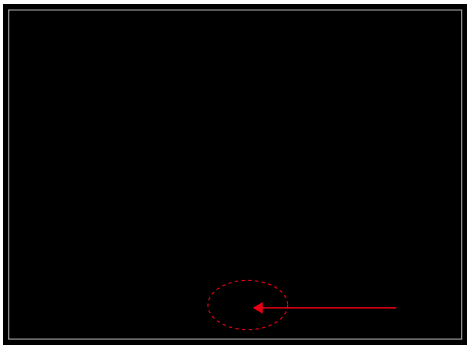


图 8-10　PCB 外形毛刺案例

（2）影响 PCB 表面清洗的品质：在完成锣板后，需要对 PCB 进行表面清洗。若板子尺寸过小，容易从清洗设备的传送带缝隙中掉落，导致无法正常清洗 PCB 表面，进而需要采用人工手动清洗，这会增加表面清洗的操作难度和品质不确定性。

因此，针对小尺寸 PCB，建议采用拼板出货。在嘉立创 PCB 下单系统中，客户可以选择自己设计拼板后下单，或针对简单且规则的外形由嘉立创提供拼板服务，同时对于特殊外形和需求，也可寻求第三方协助拼板。

8.2.3　外形公差

外形公差是指制造过程中 PCB 实际尺寸与设计要求之间允许的偏差范围。它规定了 PCB 尺寸的最大偏差值。

通常，PCB 会根据使用需求选择不同的成型方式。由于加工方式的不同，锣边和 V 割的外形公差也会有所差异。嘉立创的外形公差如下：

- 常规锣边（普锣）外形公差：±0.2mm。
- 精密锣边（精锣）外形公差：±0.1mm。
- V 割拼板 PCB 分板后外形公差：±0.4mm。

8.3 外形拼板

不同类型的 PCB 在交付给客户时有不同的方式。常见的交付方式包括单板出货和拼板出货。拼板出货的 PCB 又分为 V 割拼板出货、邮票孔拼板出货和混合拼板出货。每种出货方式都涉及相应的制造工艺和设计注意事项。

在讨论出货方式时，需要了解两种 PCB 的计数单位：PCS 和 Set。

- PCS（pieces）：通常用于单片 PCB 的描述，可理解为“件”或“片”。例如，1 PCS PCB 表示 1 件或 1 片 PCB。
- Set（sheet）：通常用于 PCB 拼板和组合的描述。工程师将多个小尺寸的 PCB 拼板连接在一起，形成一个整体，或在单片 PCB 上添加工艺边后形成一个整体，称为“1 Set”。

8.3.1 单板出货

单板出货也称单 PCS 出货，是指将 PCB 以单块电路板的形式（不添加工艺边），通过锣边工艺对其外形进行加工处理后进行交付的出货方式。

嘉立创为了满足客户对外形更高的精度要求，锣板成型的工艺中，在普锣的基础上，特别推出精锣工艺，供客户在下单时按需选择（见图 8-11）。

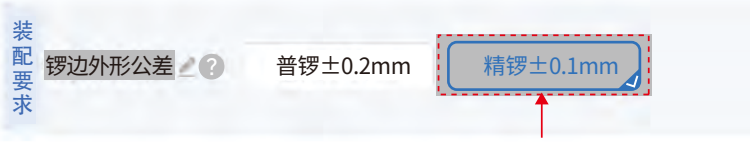


图 8-11　嘉立创 PCB 下单系统锣边外形公差选项

普锣：即常规锣板工艺，适用于大多数常规尺寸、形状和要求相对简单的 PCB。在设计时，需要考虑板边或板内的导体与外形线的安全间距不能低于锣板公差 ±0.2mm。

精锣：即精密锣板工艺，适用于对外形尺寸要求高的 PCB。在设计时，需要注意以下几点。

（1）精锣单板出货的 PCB 的长、宽尺寸需要大于或等于 50mm。

（2）精锣 PCB 上需要有三个呈“L”形态分布在 PCB 不同方位的板内定位孔，且定位孔直径不能小于 1.5mm。

（3）板边或板内导体仍需与外形线保持 0.2mm 以上的安全间距。

8.3.2 V 割拼板出货

V 割拼板是指通过将多个小尺寸 PCB 拼接或者单个 PCB 与工艺边拼接，形成一个 Set 大小和规格的拼板。在 PCB 加工过程中，首先使用锣板技术将 PCB 切割成 Set 大小，然后在外形线位置的上方和下方进行 V 形切割，同时保留中心一定厚度的基材以维持小板的连接状态（见图 8-12）。完成元器件组装后，可以沿着 V 槽掰开。此方法常用于规则外形的 PCB 拼板，可提高 PCB 生产和元器件装配效率。

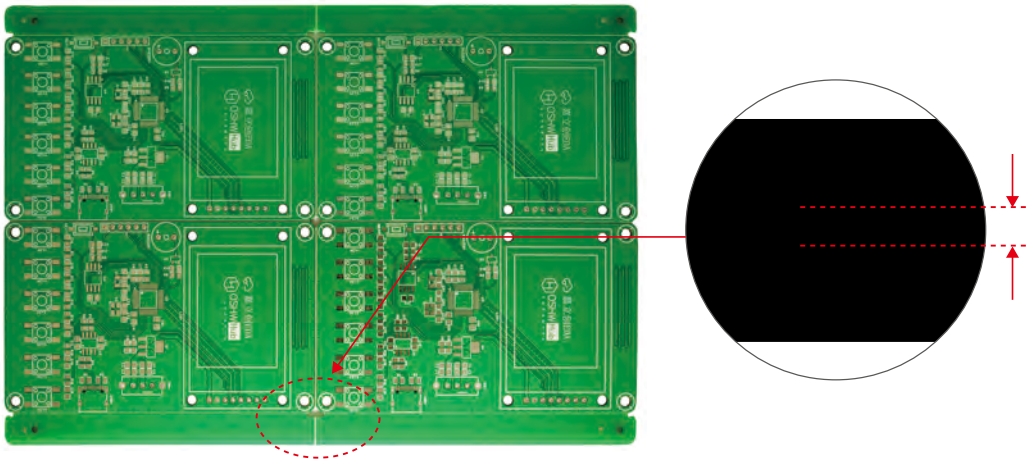


图 8-12　V 割拼板 PCB 及 V 割细节

在 PCB 设计或 CAM 软件中进行 V 割拼板时，需关注以下注意事项。

1. 尺寸与间距规范

（1）拼板长、宽尺寸需考虑加工的最大和最小尺寸限制，以避免因尺寸过小而在 V 割设备传输轨道中掉落或因尺寸过大而无法放入 V 割轨道。根据嘉立创的工艺参数，如图 8-13 中①处所示，与 V 割线垂直的板边长度最小不小于 70mm，最大不超过 475mm。

（2）相邻 PCB 或 PCB 与工艺边 V 割拼板时，应将如图 8-13 中②处所示的相邻外形线中心间距设为“零”，以减少 V 割分板后的外形尺寸公差。

（3）若无器件干涉，如图 8-13 中③处所示，相邻拼板 PCB 之间的工艺边应大于或等于 3mm，否则会降低生产效率和产品质量。

（4）外侧工艺边宽度建议 5mm，最小不能低于 3mm。若如图 8-13 中④处所示工艺边太窄且低于 V 割刀刃与 V 割设备传输轨道边缘间距时，则无法在正确位置进行切割。

（5）相邻 PCB 间隔拼板的最小间隙需大于或等于 1.6mm。若如图 8-13 中⑤处所示小于此参数，需采用更小规格的锣刀进行锣槽，而锣刀直径的缩减不仅会导致进刀速度有所下降，还会增加锣刀断裂的风险。

（6）槽孔距离 V 割线的安全间距与槽长有关，V 割边上的槽孔长度小于 10mm，距离 V 割线的最小安全间距不小于 1.6mm；槽长大于 10mm，最小安全间距不小于 3mm。若如图 8-13 中⑥处ⓐ所示间距低于以上参数，建议间隔拼板或者如图 8-13 中⑥处ⓑ所示，在紧贴着槽孔边缘的工艺边上加开卸力槽。否则，V 割分板时会有槽孔边缘基材崩裂的风险。

（7）板边安装孔与 V 割线的最小安全间距应大于或等于 1.0mm。若如图 8-13 中⑦处所示间距小于 1.0mm，V 割后分板时容易出现孔边基材崩裂风险。

2. 结构与强度考虑

（1）悬空工艺边长度大于 30mm 时，需使用邮票孔和辅助边连接固化，如图 8-14 中⑬处所示，以避免 V 割过程中悬空工艺边受到切割应力和机械挤压，导致工艺边断裂。

（2）对于不规则外形的 PCB，建议通过增设邮票孔和辅助边来实现连接固化，如图 8-14 中⑱处所示，或重新设计拼板方式，以防止因板边不平导致支撑不稳，进而避免 V 割过程中发生偏位，确保切割精度和 PCB 的整体质量。

（3）PCB 板间承重连接位应大于或等于 5mm，极限不能小于 3mm。若如图 8-14 中⑯处所示的连接位过小且悬空区域过大，则可能导致拼板结构不牢固，从而在 V 割、运输或元器件组装过程中发生断裂。

（4）V 割拼板的 PCB 厚度需不小于 0.6mm，板厚过薄会导致 V 割时基材变形，影响 V 割精度并损坏 PCB。

3. 加工过程要求

（1）多款板合并时，V 割线必须保持在一条直线上（见图 8-14 中的⑮处）。这是因为 V 割加工是通过传输带将 PCB 传送至旋转的 V 割刀，从一端切割到另一端，无法实现跳跃、曲线或折线切割。

（2）当 PCB 上的元器件部分悬突在板框线以外并下沉与工艺边重叠时，应在工艺边相应位置开设下沉槽孔（见图 8-14 中⑳处），以避免阻碍元器件的安装。

（3）V 割拼板中添加的定位孔和 Mark 点，除了应避免添加在 V 割线切割轨迹上，还需要与外形相交点保持 2mm 以上的间距（见图 8-14 中⑪处，d_1、$d_2 \geqslant 2.0$mm），并放置在靠近板内区，避免对称。

（4）在 V 割拼板时，无论是在 PCB 内还是在工艺边上的 Mark 点，需与 V 割轨迹保持至少 0.4mm 的安全间距（见图 8-14 中⑲处，W_1、$W_2 \geqslant 0.4$mm），以避免在 V 割公差范围内被切割，影响 SMT 加工过程中识别 Mark 点。

（5）对于外形或板边设计有突出超过 10mm 的长槽（凹槽）（见图 8-14 中⑭与⑰处），导致板边基材小于 3mm，建议避免采用 V 割成型。这可以防止在 V 割过程中出现板子弹跳、卡刀，以及导致 V 割不良或分板时基材崩裂等问题。

（6）如图 8-13 中的⑧所示，若有突出圆弧或凹槽，建议避免使用 V 割成型，改为间隔拼板。

4. 标识与辅助设计

（1）为明确标识锣槽，设计相邻拼板间隙的锣槽时，应如图 8-13 中⑨处所示，将锣槽设计为一个整体，并延伸 1mm 至工艺边内或者在槽孔中央的外形层上添加“CNC”字样。

（2）为方便 PCB 制造商快速准确地识别设计意图，在需 V 割位置标上如图 8-13 中 ⑩处所示箭头和“V-CUT”字样，且标识文字应与外形线放在同一外形层上。

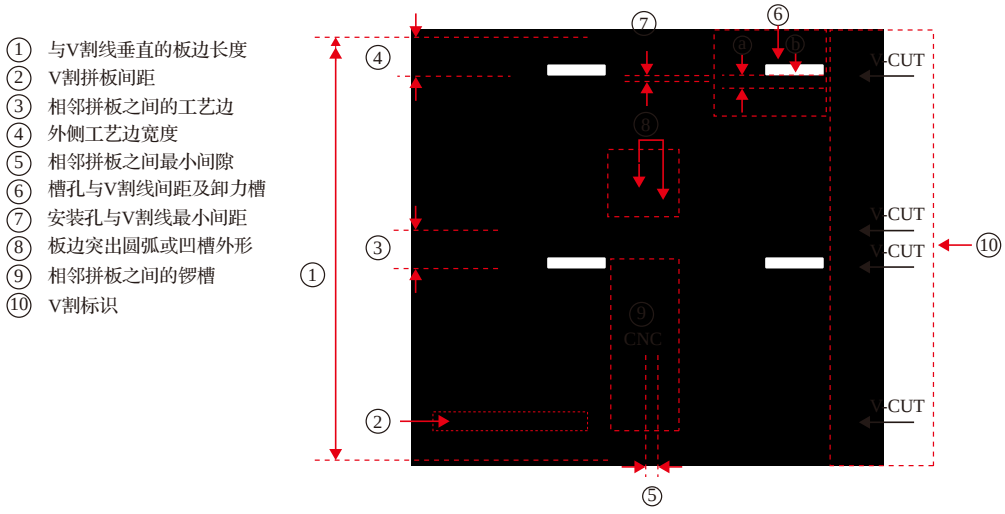


图 8-13　V 割拼板注意事项示例图 1

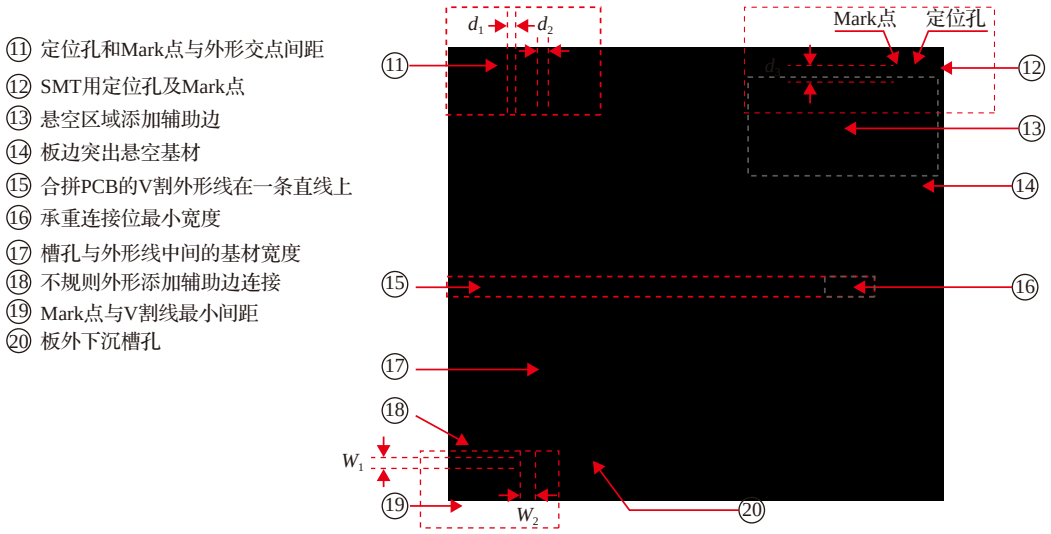


图 8-14　V 割拼板注意事项示例图 2

（3）为顺利使用嘉立创 SMT 服务，在嘉立创进行标准型 SMT 加工的 PCB 时，需要添加两条 5mm 的工艺边。工艺边四角应至少设置 3 个位置不对称，直径为 2.0mm 的定位孔和直径为 1.0mm 的 Mark 点。此外，Mark 点边缘与工艺边外沿的间距需大于 SMT 轨道宽度 3.35mm，如图 8-14 中⑫处所示，直径 1.0mm 的 Mark 点中心与工艺边外沿的最小间距 d_3 不得小于 3.85mm。

8.3.3　邮票孔拼板出货

邮票孔拼板：通过在 PCB 边缘设计布置一定数量的邮票孔状非金属化小孔，来连接相邻的 PCB 或借助辅助边进行拼接。拼接完成后，通过锣边加工，将其加工成拼板 Set 尺寸进行出货，以提高 PCB 生产和元器件装配效率。这种方式多用于不规则外形的 PCB 拼板结构。邮票孔连接位分板后，会在边缘形成类似邮票边缘的齿状毛刺。邮票孔拼板 PCB 及邮票孔细节如图 8-15 所示。

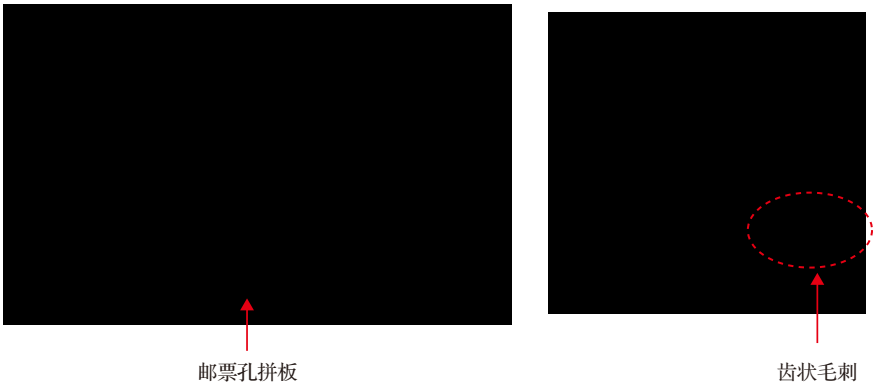


图 8-15　邮票孔拼板 PCB 及邮票孔细节

虽然 PCB 任意位置都可以添加邮票孔，但是在设计时，也需要考虑邮票孔添加后整体结构的稳定性、后续分板的便利性、分板后的毛刺大小等因素来进行合理布局。需要注意以

下细节。

1. 邮票孔属性

邮票孔必须是非金属化钻孔。如果设计成金属化孔，容易在生产时造成连接短路，或者分板时，邮票孔内的铜屑掉落到 PCBA 上诱发短路的隐患。

2. 邮票孔大小

通常使用直径为 0.4 ～ 0.65（mm）的小孔作为邮票孔。孔径越大，分板后齿状毛刺也就越大。特殊情况下邮票孔最小可做到 0.3mm，低于 0.3mm 的孔会增加制造成本。

3. 邮票孔个数与间隔

（1）每组邮票孔连接位通常包含 6 ～ 8 个孔，最少不少于 6 个。最小连接宽度约为 4mm。孔数少于 6 个会导致连接宽度减小，降低结构稳固性，可能在加工和运输过程中出现断裂风险。

（2）邮票孔间距对结构稳固性至关重要，过小的间距会降低连接力，增加拼板断裂风险。相邻邮票孔边缘间距为 0.35 ～ 0.4mm，最小不得小于 0.3mm。随着基材变薄，需增加邮票孔数量和相邻邮票孔的间距以维持连接强度。

4. 邮票孔组数

邮票孔添加的组数与板子大小有关，是确保拼板结构稳定的基础。当板子长、宽小于 30mm 时，最少需要 3 组连接位来确保连接支持的稳定性，且连接位的相互间距均匀分配。连接位随着板子尺寸变大而增加，建议镂空的板边长度每增加 50 ～ 60mm，需增加一组邮票孔。

5. 邮票孔位置

（1）邮票孔应加在板框线的中心线或伸到板内 1/3 处（若空间允许，伸到板内 1/2 处更好）。如果板边有过孔、线路、安装孔及向外延伸的元器件或者 PCB 实体结构存在较为脆弱的区域，应尽量避开，并且邮票孔应与板内导体保持 0.3mm 的安全间距，以避免分板时，掰板的作用力损坏 PCB 板边，导致板边崩裂。

（2）邮票孔需与 PCB 板内导体保持最少 0.3mm 的安全间距，以免因间距太近导致电镀夹膜出现邮票孔被金属化而诱发短路现象或者分板后有铜屑掉落现象。

（3）避免将邮票孔设计在与板边间距小于 2mm 的定位孔附近。

6. 拼板间距

相邻 PCB 拼板间距：常规间隙为 1.6mm 或 2mm，最小间隙为 1.2mm。

8.3.4　拼板的其他注意事项

由于 PCB 的外形结构和客户需求多样，单一的 V 割拼板和邮票孔连接拼板有时无法完全满足产品要求。在这种情况下，需要综合运用邮票孔和 V 割混合拼板的方式，以便更好地满足需求。在混合拼板过程中，为确保拼板不会对 PCB 产品质量造成任何隐患，除关注 V 割拼板和邮票孔拼板各自的细节外，还需特别注意以下几点。

1. 拼板样式

能采用 V 割拼板的尽量采用 V 割拼板，这样可以减少邮票孔分板带来的板边毛刺对装

配的影响。

2. 拼板大小

无论哪一种拼板出货方式，在设计拼板尺寸时，都需要综合考虑板厚与板面承载的元器件重量。建议拼板后的长、宽尺寸尽量控制在 150mm×200mm 范围内，以避免尺寸过大导致焊接加工或运输过程中板子变形、出现板翘现象。若板子很薄或承载器件较重，则拼板时尺寸不宜过大。

3. 拼板间距

拼板时，如果相邻两个 PCB 外形中间需要锣槽，则相邻 PCB 外形间距的常规间距为 2.0mm 或 1.6mm。

4. 拼板方向

拼板时，PCB 方向应尽量保持一致，非特殊需求（如金手指板需要倒扣方便斜边），应避免倒扣拼板。无论哪种拼板方式，都建议在板边工艺边上的四个角位分别添加 3 ～ 4 个位置不对称的定位孔作为方向孔，直径通常为 2.0mm，特殊需求除外，避免后续焊接组装时因方向难辨带来加工隐患。

5. 拼板边缘的平衡性

无论哪一种出货方式，为了方便后续自动化的元器件组装，对于外形不规则的 PCB，需要通过添加工艺边或辅助边 + 邮票孔等连接方式补齐板边悬空区域，确保 PCB 进入 V 割、SMT 或者波峰焊传输轨道时板边平整，能够在传输和加工中保持平衡和稳定。

6. 拼板结构的稳固性

拼板时，应避免在拼板中出现 PCB 只有一边连接支撑而另外三边均悬空的现象，必要时可以使用辅助边 + 邮票孔方式进行连接，以达到稳固结构的效果，否则锣板或者 V 割过程中，容易发生偏摆，导致割坏 PCB 或加工过程中出现断裂现象。

7. 元件组装便利性

若单板出货的产品，板内贴片元件离板边间距小于 3mm 或需要波峰焊接的元件离板边间距小于 5mm，建议添加工艺边，以方便后续自动化贴片或波峰焊。

8. 光学定位准确性

无论单板出货、拼板出货有工艺边或者无工艺边的 PCB，都需在 PCB 板内或工艺边上的四个角位分别添加 3 ～ 4 个位置不对称的光学定位点（即 Mark Point），方便在 SMT 加工过程中能够被贴片机器的光学定位系统快速和准确地识别并定位。

9. 防止器件相互干涉

拼板过程中，如果 PCB 有伸出板外的元器件，则需要考虑相邻 PCB 上元器件相互干涉的问题。建议拼板时预留一定的间距，为了确保拼板结构稳固，建议相邻板之间间距处用工艺边连接。如若有外扩下沉的元件，则需要在工艺边上对应区域开槽孔，方便器件下沉。

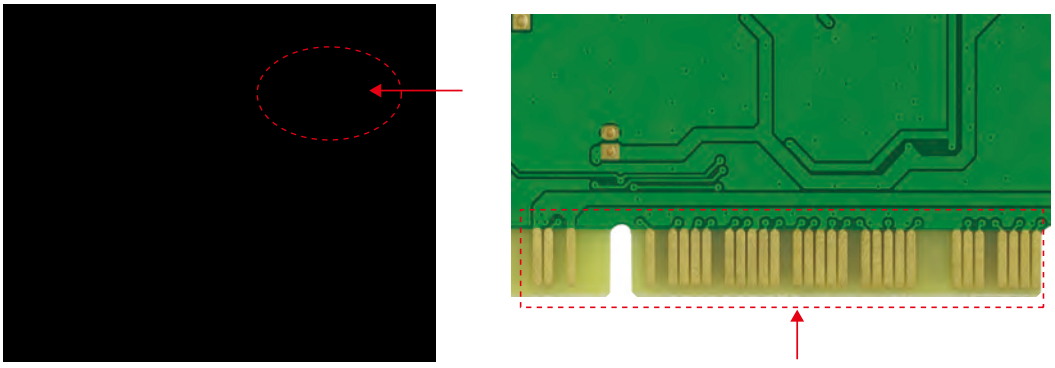
10. 特殊基材拼板注意事项

金属基材：嘉立创生产的铝基板和热电分离铜基板为金属基材，材质坚硬，若采用邮票孔拼板，分板后毛刺较大且坚硬，因此非必要情况下不建议使用邮票孔拼板。

8.3.5　PCB 斜边工艺

PCB 斜边工艺是通过斜边机对 PCB 板边进行倾斜加工，赋予边缘特殊形状，常用于设计金手指接触片的 PCB，使其更适用于插拔场景，如图 8-16 中（a）所示。

金手指（Gold Finger）：是 PCB 边缘用于连接的一段镀有金属合金的导电触片。其具有良好的导电性、耐磨性和耐腐蚀性，常用于插入插槽，实现 PCB 与其他电子设备之间的可靠连接，如电子信号和电源的传输。金手指 PCB 如图 8-16（b）所示。



（a）　　（b）

图 8-16　板边金手指斜边案例图

1. 金手指斜边工艺参数

在设计需要金手指斜边的 PCB 时，需要综合考虑 PCB 加工的工艺参数。嘉立创加工金手指斜边工艺参数如表 8-2 所示。

表 8–2　嘉立创加工金手指斜边工艺参数

	D：基材叠层厚度	
	T：外层铜箔厚度	
	α：角度	30°　±5°
	L：铜皮与板边的间距	1.15mm（板厚≤ 1.6mm）
		1.35mm（板厚＞ 1.6mm）

2. 斜边金手指板设计注意事项

（1）安全间距

设计时，金手指与板边的间距应该结合产品所选基材厚度，设计成不能低于表 8-2 中的 *L* 值。如果设计时 *L* 值偏小，PCB 制造商在处理 CAM 工程资料时，会对金手指进行切削操作以确保安全间距，避免金手指进行斜边加工时铣刀触碰到金手指，导致金手指被割伤，影响使用和外观品质。当金手指被切削后，金手指长度会缩短，存在影响使用的隐患。因此，在设计时应特别注意这个安全间距。

（2）线路铺铜

如果 PCB 是多层板，金手指区域内层上的铜箔也需要与板边保持一定的安全间距，且

内层需要均匀铺铜，避免出现大面积空旷区域，导致在多层板压合过程中出现基材偏薄，影响接触效果。

（3）阻焊设计

金手指区域与板边区域建议均采用阻焊开通窗设计，避免在相邻手指接触片中间或手指至板边的间距范围内存在阻焊油墨。斜边无法全部将阻焊油墨切除掉，导致后续组装时因残留阻焊影响金手指与接触片的稳定性。

（4）拼板设计

若 PCB 设计有金手指，在进行拼板设计时需确保金手指位于板边外侧，以便在外形加工时直接锣出，确保外形公差精度，并方便金手指的斜边加工。

8.4 外形的品质控制与检测

PCB 作为电子设备的核心组件之一，其外形品质的控制与检测至关重要。通过有效的检测工具和方法，可以及时发现并纠正外形缺陷，确保 PCB 的尺寸、形状和外形特征符合设计要求，提高产品的质量和可靠性。

1. 检测工具及其应用

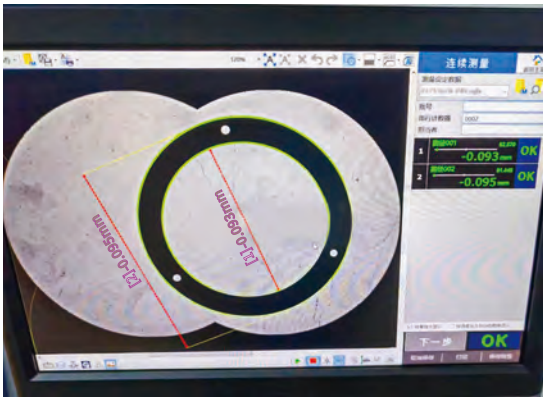
（1）游标卡尺

游标卡尺是一种常见的尺寸测量工具，可以快速测量 PCB 上的长度、宽度、高度、孔径等尺寸参数。游标卡尺具有简单易用、成本低廉和测量精度较高的优点，适用于快速检测 PCB 的尺寸。

（2）光学扫描闪测仪

光学扫描闪测仪是一种高速、非接触式的外观检测工具。它利用光学传感器对 PCB 进行扫描，快速检测外形尺寸、槽或孔的形状及其直径和弧度等参数，并提供详细的检测报告，如图 8-17 所示。

（a）光学扫描闪测仪



（b）检测细节

图 8-17　嘉立创 PCB 外形光学扫描闪测仪

2. 评估标准

根据供需双方协商规范或 PCB 供应商提供的公差范围进行评估。如果尺寸变动在公差范围内，则评定为合格；如果超出公差范围，则评定为不合格。

8.5 PCB 的平整度

在 PCB 成型或者焊接后的检测过程中，可能会发现部分 PCB 存在翘曲现象。这种翘曲是由何种原因引起的？如何进行评估？又该如何预防和改善？为了解决这些问题，本节将探讨 PCB 平整度的概念和影响，以及如何在设计、制造、存储和使用过程中确保其达到最佳水平，以帮助读者更好地理解和应用这一关键概念。

PCB 平整度（又称翘曲度）：是指 PCB 相对于理想平面的表面平整程度，在制造和使用过程中的体现。它不仅关乎产品外观质量，而且直接影响电子元件的安装和产品组装效果，在严重情况下，甚至会影响 PCB 的电气性能。

8.5.1 平整度对 PCB 的影响

1. 影响元器件组装

（1）PCB 的平整度直接关系到电子元件的焊接质量。如果 PCB 翘曲度过大，在使用表面贴装技术（SMT）进行焊接时，元件与 PCB 之间的接触可能不均匀，导致焊接不良，如虚焊、假焊等问题。

（2）在现代电子制造中，自动化装配生产线广泛应用。高度平整的 PCB 能够确保元件在自动贴片机上准确地拾取和放置，提高生产效率和精度。如果 PCB 翘曲度过大，则可能会导致元件无法正确定位，影响自动化装配的顺利进行。

2. 影响产品安装与固定

（1）对于有边缘连接器（如金手指）的 PCB，如果 PCB 不平整，则会影响边缘连接器安装和接触的可靠性。

（2）平整的 PCB 更容易安装在电子产品的机箱或外壳中，并且能够与其他部件良好地配合。这有助于提高电子产品的整体结构稳定性，减少因 PCB 安装不当而引起的故障。同时，平整的 PCB 也便于使用螺钉、卡扣等固定件进行固定，确保在使用过程中不会松动或移位。

3. 影响电气性能

PCB 的平整度超标还可能影响 PCB 信号传输的稳定性。例如，在高频应用中，表面不平可能导致串扰和反射损失。

8.5.2 如何预防和改善 PCB 平整度

PCB 的平整度受多种条件的影响，预防和改善 PCB 平整度需要从以下几方面着手。

1. PCB 基材选择

（1）根据使用环境，选择具有较小热膨胀系数和较高弯曲强度的基材，可以减少热应力引起的翘曲。

（2）根据 PCB 装载的元器件重量，考虑板子承重能力来选择合适的基材厚度，避免基材载重失衡出现翘曲。

2. PCB 设计

（1）PCB 需要采用均匀布线和铺铜的设计布局，来减少 PCB 受热过程中因热应力分布不均匀而引起的基材翘曲。

（2）过孔的设计和分布也会影响平整度，过多或不合理分布的过孔可能会削弱 PCB 的结构强度，使 PCB 在受到应力时更容易变形出现翘曲。

（3）多层 PCB 的层间结合力和厚度均匀性对平整度有重要影响。如果层间结合不良，在受到外力或热应力时容易分层，导致 PCB 变形。同时，各层的厚度不均匀也会使 PCB 在加工和使用过程中产生翘曲。

（4）设计 PCB 拼板时，需注意拼板结构和拼板整体尺寸，避免装载元器件后，过高温锡炉过程中因拼板结构薄弱（连接位小，镂空区域大）或拼板尺寸过大导致基材在高温状态下变形出现翘曲。

（5）当单片 PCB 尺寸太小时，拼板个数需要控制在合理范围内，避免拼板个数太多，经 V 割后（V 割处只保留基材约 0.4±0.1mm 厚度），V 割连接处基材强度变弱导致基材在高温条件下变形。

3. PCB 制作过程控制

（1）在 PCB 制造过程中，每个烘烤过程需要确保 PCB 处于平衡状态下均衡受热，避免在高温烘烤环境中，基材因摆放不平衡而导致变形。

（2）PCB 包装时，需要确保 PCB 平整放置于包装箱内，避免因摆放不平衡挤压或者重力作用导致 PCB 变形。

4. 焊接工艺

（1）焊接过程中，应尽量控制合适的焊接温度和工艺参数，以减少翘曲风险。

（2）高温焊接出来的产品，应平整放置，避免不规则堆砌放置导致 PCB 基材仍处于高温状态下在元器件压力作用下变形。

5. 运输与存储环境

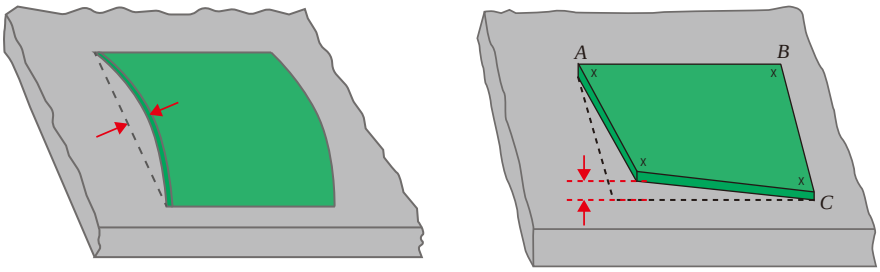
（1）PCB 在加工完成后需要采用与空气隔离包装，最好采用真空包装，避免 PCB 长时间与空气直接接触而使 PCB 受潮，导致基材膨胀。

（2）在 PCB 存储过程中需要对环境适当控制，避免因温度过高或湿度过大引起基材膨胀和翘曲。

（3）在运输和存储过程中，应保持 PCB 平整放置，避免因倾斜放置时间过长，PCB 在重力作用下出现弯曲变形。

8.5.3 平整度的评估

PCB 平整度受设计时布线的均匀程度、加工过程中应力消除条件和 PCB 的厚度及基材的特性以及运输与存储条件等多方面影响，应当以交付的形式对成品印制板进行平整度评估。PCB 翘曲通常表现为弓曲和扭曲两种情况，如图 8-18 所示。



（a）PCB 弓曲　　（b）PCB 扭曲

图 8-18　PCB 弓曲和扭曲示意图

1. PCB 平整度的检测

1）视觉检查

在适当光照下检查 PCB 表面，注意观察是否存在不规则的表面形状，可以识别出明显的翘曲、凹陷等平整度缺陷。

2）工具检测

使用专业的测量工具进行定量检测，能够更准确地评估 PCB 的平整度。

检测工具：精密的平台、标准测量仪（千分尺或游标卡尺）或塞尺（测隙规）等。

检测方法：

（1）弓曲：将被测样品放置在基准平面上，凸面朝上；对每条边施加足够的压力，确保两个角与基准面接触；使用标准测量仪测量并计算出样品垂直方向的最大值。

（2）扭曲：将被测样品放置在基准平面上，使三个任意角与平面接触；施加足够的压力，确保这三个角稳固接触基准面；测量翘起角到基准面的距离，找出偏差最大的角。保持其他三个角与平面接触，让偏差最大的角上翘，在其下插入适当的塞尺，直到刚好支起该角。使用标准测量仪（如千分尺）测量并计算出样品垂直方向的最大值。

2. PCB 平整度的评估

PCB 的扭曲和弓曲率统称为 PCB 翘曲度，是衡量平整度的量化标准。该标准与 PCB 的尺寸相关，通过特定计算准确衡量板体偏离理想平面的程度，提供直观有效的评估依据。

1）PCB 翘曲度的计算方法

PCB 翘曲度是用被测样板与平台之间的最大垂直距离值除以有效尺寸来计算弓曲和扭曲百分比。

（1）弓曲：用弓曲最大垂直距离值除以其所在边的长度。

（2）扭曲：用翘曲最大垂直距离值除以其所在对角线长度。

2）扭曲和弓曲的“相对百分比”的评估标准

（1）采用表面贴装元器件设计的 PCB，弓曲和扭曲最大范围应当不大于 0.75%。

（2）未采用表面贴装元器件设计的 PCB，弓曲和扭曲最大范围应当不大于 1.50%。

总结：PCB 平整度是一个综合性问题，需要在各个环节进行控制。通过优化设计、选择合适的基材、控制制造与焊接工艺，并管理环境温、湿度和存储方式，可以最大限度减少 PCB 的翘曲现象，确保平整度，提升元器件贴装和产品组装的质量与可靠性。

在控制平整度方面，PCB 设计起着关键作用。当发现 PCB 翘曲时，应首先审查和评估设计，

确认是否存在潜在问题。随后，再排查基材、制造工艺以及运输和存储的方式与条件。因此，PCB 设计人员了解并应用这些控制方法至关重要。

练习题

1. 林工使用的 PCB 设计软件有禁止布线层（Keep-Out）和机械一层（Mechanical 1），根据软件规则，在哪一层设计 PCB 外形和外形槽更规范？（　　）

A. 禁止布线层（Keep-Out）　　B. 机械一层（Mechanical 1）

2. 嘉立创加工 PCB 外形的规则为：不在外形层上的元素不做外形加工。如图 8-19 所示，林工在软件的机械一层（Mechanical 1）设计了 PCB 外形，在禁止布线层（Keep-Out）设计了两个圆圈作为定位孔，这两个定位孔是否会被加工成外形孔？（　　）

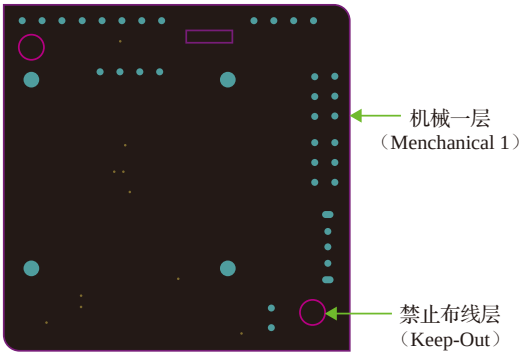


图 8-19　练习题 2 图

A. 会　　B. 不会

3. 张工使用的 PCB 设计软件界面如图 8-20 所示，在设计 PCB 时，他将一条外形线属性设置成“Keep-Out”，以下哪个描述是正确的？（　　）

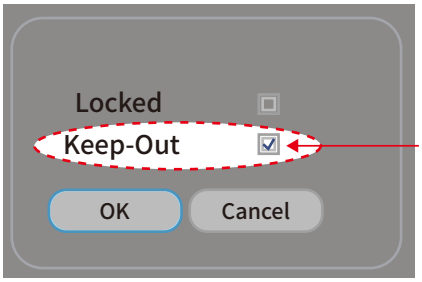


图 8-20　练习题 3 图

A. 该外形线在软件中的位置将被锁定，无法移动

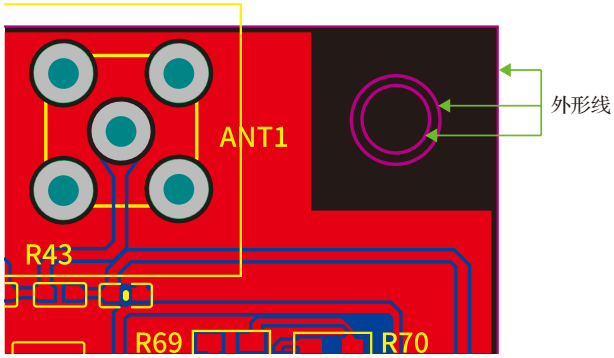
B. 该外形线被定义为禁止布线属性，但输出 Gerber 数据无影响

C. 软件将禁止该外形线输出为 Gerber 数据，导致生产商无法读取该外形线数据，无法加工该外形线

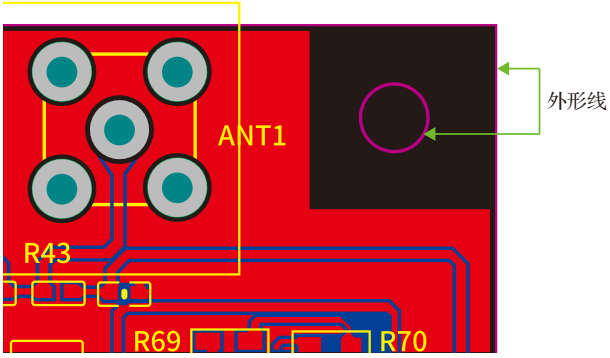
D. 该外形线不会产生任何变化

4. 工程师将 PCB 定位孔设计成以下哪个选项，能确保嘉立创快速准确识别定位孔直径参数？（　　）

A.



B.



5. 嘉立创常规锣板公差为 ±0.2 mm，张工用宽度为 0.4mm 的外形线，设计了一个如图 8-21 所示的非金属化槽，常规锣板生产的成品板槽孔宽度为以下哪个参数？（　　）

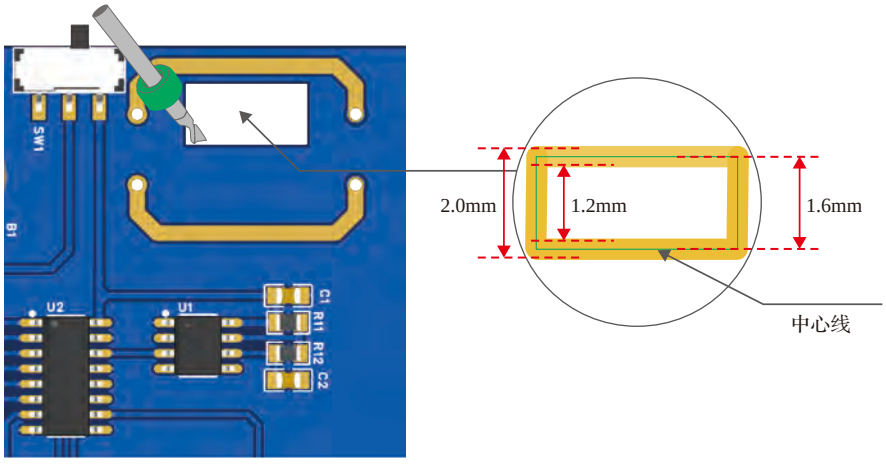


图 8-21　练习题 5 图

A. 1.2±0.2mm　　B. 1.6±0.2mm　　C. 2.0±0.2mm

6. 如图 8-22 所示，在 PCB 制造过程中，使用 V 割分板很高效，但分板后常会在边缘留下由基材形成的毛刺，影响产品的外形尺寸精度。根据嘉立创的工艺参数，生产采用 V 割拼板的 PCB，V 割外形分板后的尺寸公差范围是多少？（　　）

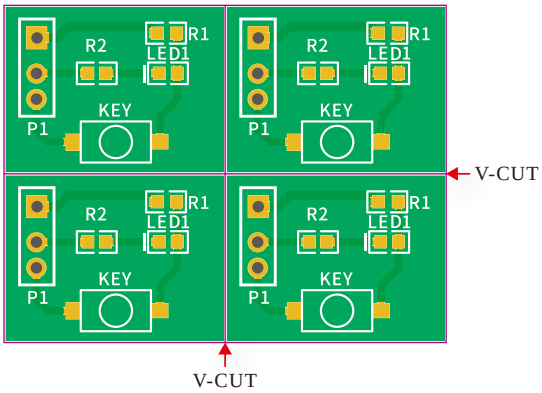


图 8-22　练习题 6 图

A. ±0.2 mm　　B. ±0.4 mm

7. 为满足用户对 PCB 外形精度更高的要求，嘉立创推出了 PCB 精锣个性化服务，生产设备通过板内定位孔定位，实现更高精度的锣板加工，但对 PCB 定位孔的位置有一定的要求，且定位孔最小直径应不小于 1.5mm。下面几款 PCB 定位孔位置和个数不同，哪款定位效果最好？（　　）

A. 　B. 　C.

8. 嘉立创使用设备加工 V 割拼板 PCB，设备刀刃与轨道边的最小间距为 3mm。李工在 PCB 拼板两侧设计了需要 V 割的工艺边，为保证产品可被正常加工，工艺边宽度（见图 8-23）设计成以下哪个参数更合适？（　　）

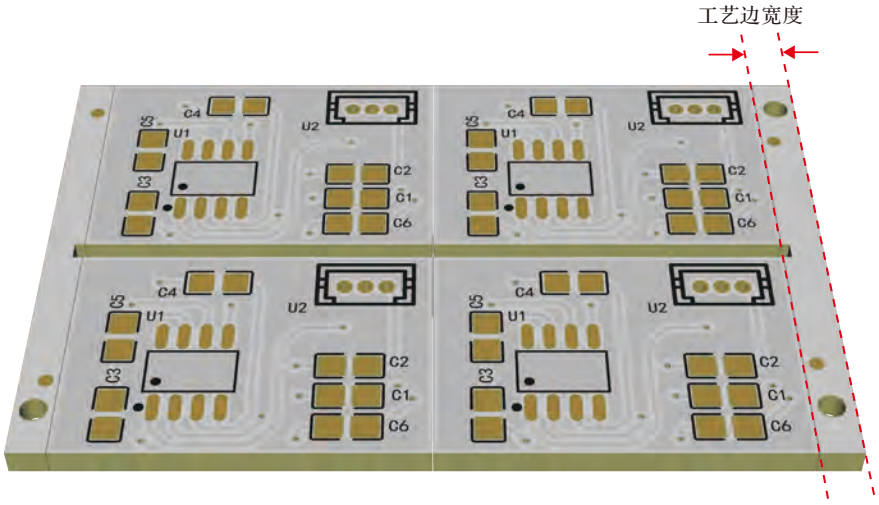


图 8-23　练习题 8 图

A. 常规宽度为 5mm，最小宽度不小于 2mm

B. 常规宽度为 5mm，最小宽度不小于 3mm

C. 常规宽度为 10mm，最小宽度不小于 5mm

9. 根据产品需求，部分 PCB 需设计成窄长且突出的特殊形状。为避免在锣板过程中出现断裂风险，设计如图 8-24 所示的外形时，嘉立创建议锣板出货的 PCB，突出外形的长度（*L*）和宽度（*W*）需要满足以下哪组参数？（　　）

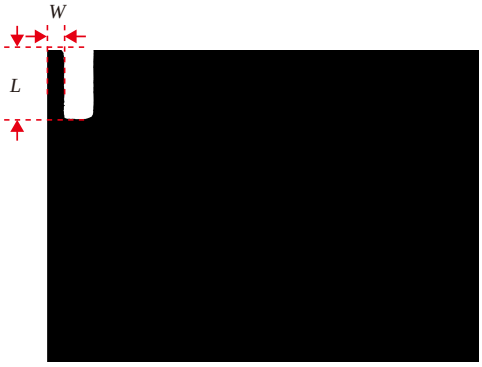


图 8-24　练习题 9 图

A. $W \geqslant 2$mm；$L \leqslant 10$mm　　B. $W \geqslant 0.5$mm；$L \geqslant 10$mm

10. PCB 拼板悬空工艺边容易因磕碰发生断裂，图 8-25 中哪个位置的 Mark 点和定位孔，容易因工艺边断裂而丢失？（　　）

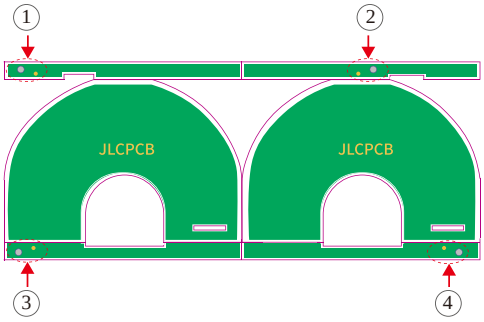


图 8-25　练习题 10 图

A. 位置①　　B. 位置②　　C. 位置③　　D. 位置④

11. PCB 为圆形或不规则外形（见图 8-26），拼板后悬空的工艺边容易因磕碰发生断裂，为减少出现此类隐患，PCB 拼板可采用以下哪些方式优化设计？（　　）（多选题）

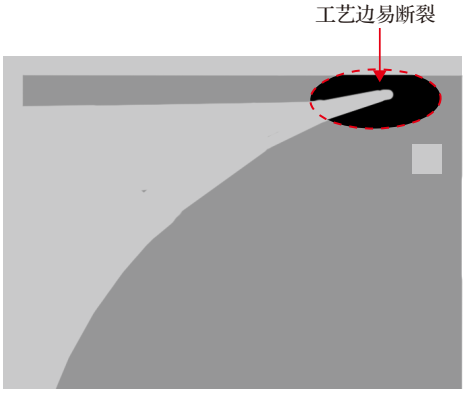
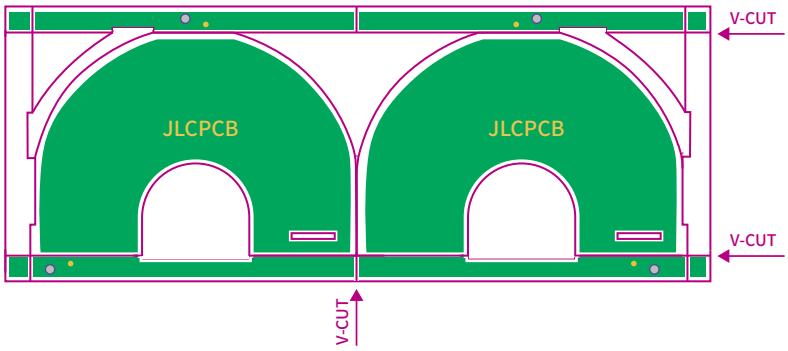
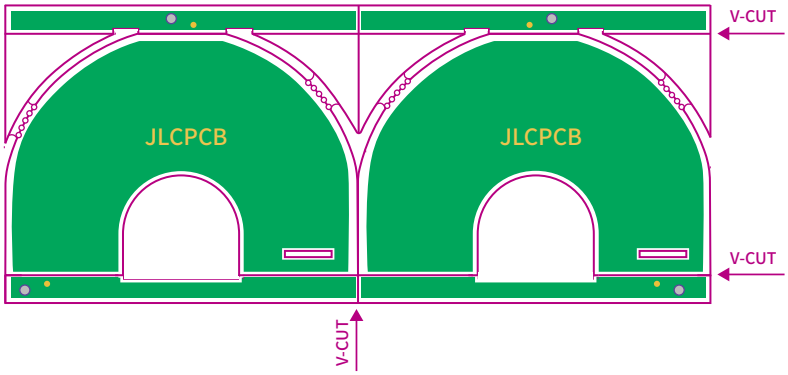


图 8-26　练习题 11 图

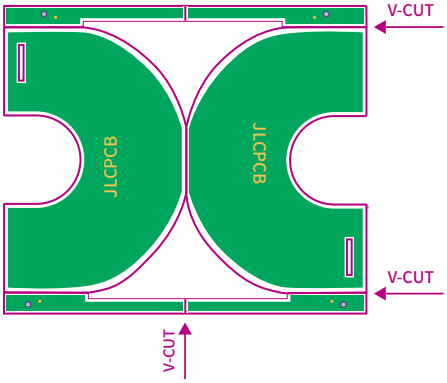
A.



B.



C.



12. 为避免在实物板分板环节，板内铜线、铜皮和焊盘等导体受损，对于采用邮票孔方式拼板的 PCB，嘉立创建议工程师在设计 PCB 时，非金属化邮票孔与板内导体的距离（见图 8-27）越大越好，最小不得小于以下哪个参数？（　　）

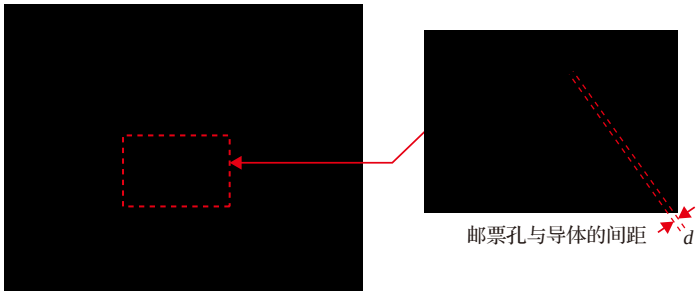


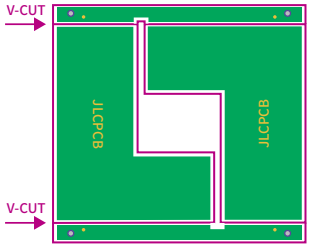
图 8-27　练习题 12 图

A. 0.3mm　　B. 0.2mm　　C. 0.1mm

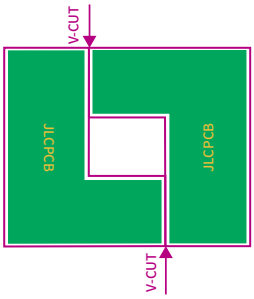
13. PCB 外形如图 8-28 所示，以下哪个选项中的拼板设计，既能省板材，又能避免 PCB 在加工时存在报废隐患？（　　）

图 8-28　练习题 13 图

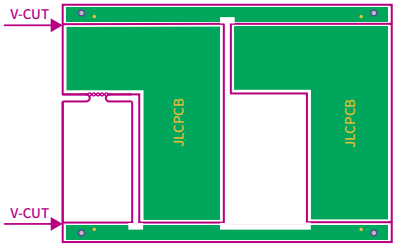
A.



B.



C.



14. 嘉立创用锣刀锣槽，锣刀直径小于 1.6mm 时容易断，需要频繁换刀，加工效率慢，成本高，产品品质受影响。为提高 PCB 品质和生产效率，嘉立创建议工程师设计 PCB 拼板时，上下两排 PCB 的间距 *d*（见图 8-29）应尽量不小于以下哪个参数？（　　）

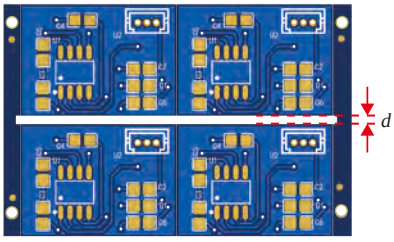
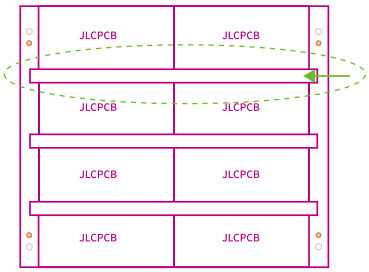


图 8-29　练习题 14 图

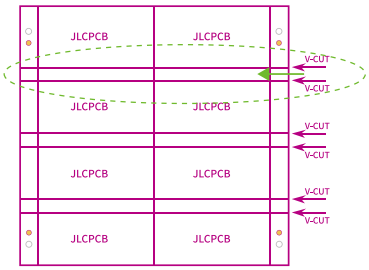
A. 0.8 mm　　B. 1.0 mm　　C. 1.2 mm　　D. 1.6 mm

15. 李工设计了 3 种 PCB 拼板外形，绿色箭头所指位置需要锣槽，哪种设计方式最不容易产生歧义？（　　）

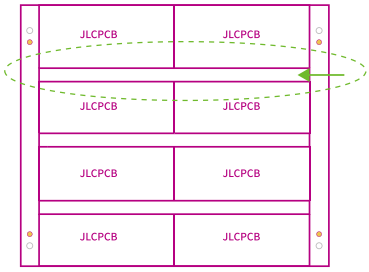
A.



B.

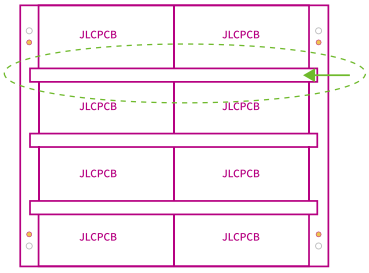


C.

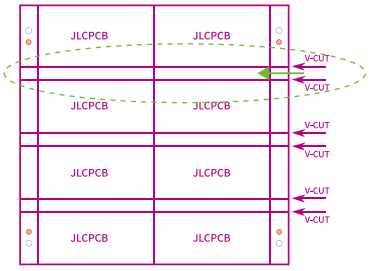


16. 李工设计了 2 种 PCB 拼板外形，绿色箭头所指位置需要 V 割（V-CUT），哪种设计方式最不容易产生歧义？（　　）

A.

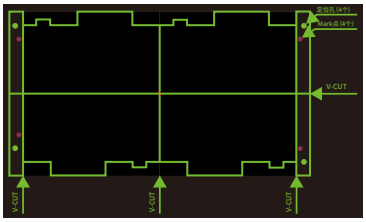


B.

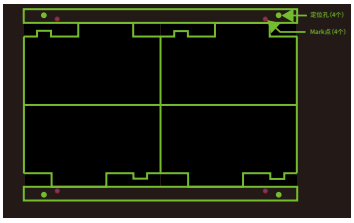


17. 以下哪种拼板方式，能确保斜边金手指方向朝外，嘉立创可实现手指斜边正常加工？（　　）

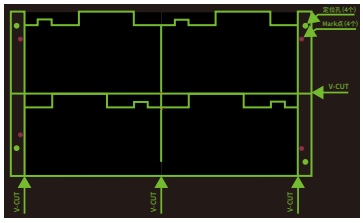
A.



B.



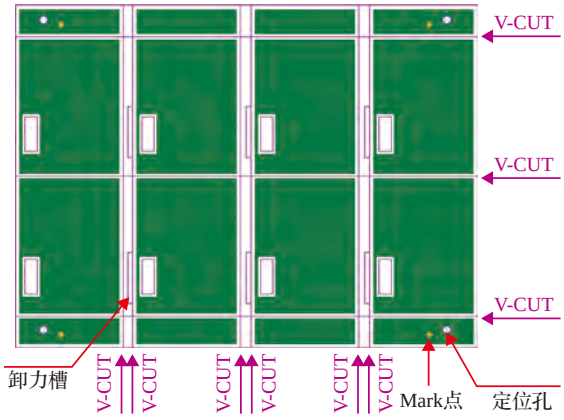
C.



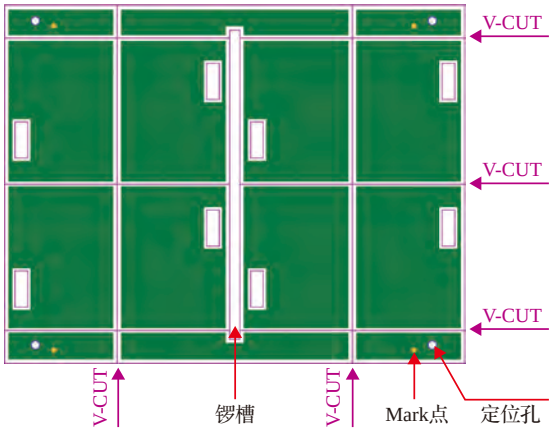
18. PCB 采用 V 割（V-CUT）方式拼板，槽孔与板边的间距小于 1.5mm，分板时槽孔容

易出现崩裂隐患。张工设计的 PCB 槽孔与板边的间距小于 1.5mm，以下哪种拼板方式，容易导致实物板分板出现崩裂隐患？（　　）

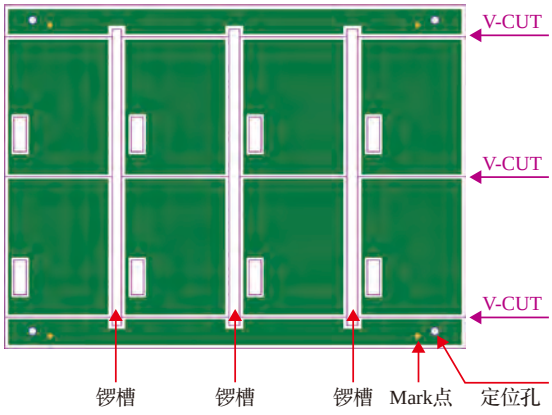
A.



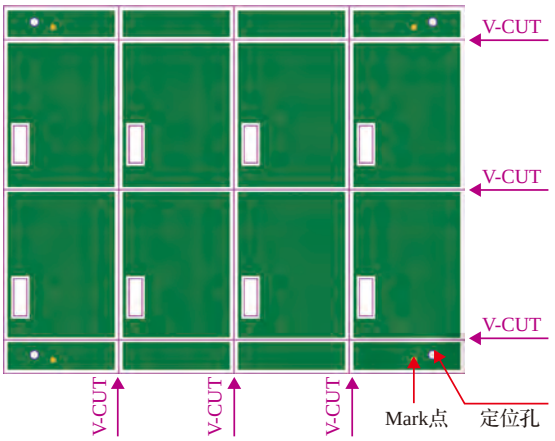
B.



C.



D.



参考答案

1．B；　2．B；　3．C；　4．B.　5．B；　6．B；　7．A；　8．B；
9．A；　10．A；　11．A、B、C；　12．A；　13．A；　14．D；　15．A；
16．B；　17．A；　18．D。

第 9 章 / PCB 表面处理的选择

不同的表面处理工艺具有各自的特点和适用场景，因此在 PCB 制造过程中，选择合适的表面处理工艺对于保证 PCB 的可靠性和性能至关重要。

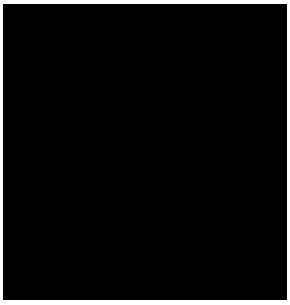
PCB 表面处理工艺也称表面涂覆工艺，是指根据产品需求，通过表面化学反应或电化学反应的方式，在 PCB 裸露的铜箔表面形成一层紧密结合的镀覆层。此镀覆层不仅可以提高焊接可靠性、增强导电性，还为 PCB 焊盘表面提供了有效的保护。

9.1 表面处理类型与应用

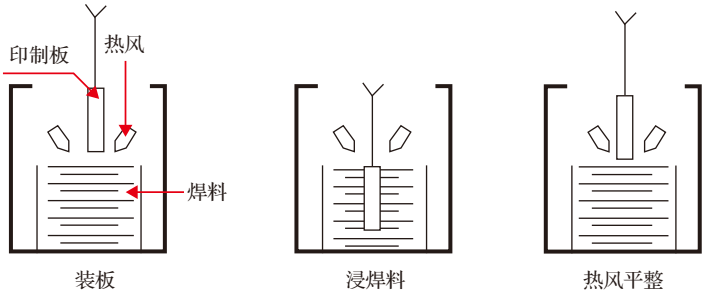
在 PCB 行业中，常见的表面处理工艺有喷锡（有铅喷锡、无铅喷锡）、沉金、电镀金、沉银、沉锡及 OSP 等。嘉立创在 FR-4 基材和铝基板上主要采用三种表面处理工艺：有铅喷锡、无铅喷锡和沉金，而热电分离铜基板采用的表面处理工艺为 OSP。

9.1.1 喷锡工艺

喷锡工艺，也称热风整平工艺，是先将 PCB 浸入高温锡槽中，使裸露在阻焊油墨外的焊盘和金属化孔壁铜层被锡缸中熔融的液态锡润湿，然后在取出 PCB 时，通过热风将焊盘表面及金属化孔内多余的锡吹掉，得到一个相对平整、均匀且光亮的喷锡涂覆层。喷锡设备及喷锡示意图如图 9-1 所示。



（a）垂直式热风整平机



（b）垂直式热风整平机工作示意图

图 9-1　喷锡设备及喷锡示意图

由于液态锡的润湿作用和加工过程中的重力影响，表面涂覆的锡层会出现中间凸起的“龟背”现象，影响焊盘平整度，因此该工艺不适合表面贴装元器件较多且较小、对焊盘平整度要求高的高密度、高可靠性 PCB 的组装。喷锡工艺焊盘如图 9-2 所示。

图 9-2　喷锡工艺焊盘

为满足不同客户对焊盘表面涂覆层含锡成分的要求，喷锡工艺根据涂覆材料的不同分为有铅喷锡和无铅喷锡。

1. 有铅喷锡

有铅喷锡（HASL）是将 PCB 浸入锡铅合金溶液中，通过热风整平的方式在 PCB 表面形成一层锡铅合金涂覆层的工艺。

优点：

- 焊接性能：有铅喷锡 PCB 焊点温度较低，容易焊接，具有良好的可焊性。
- 成本效应：成本较低，是一种经济实惠的表面处理方法。
- 导电性：能够提供较好的电气性能。

缺点：

- 平整度：表面平整度较低，可能会影响高密度组装的可靠性。用于 BGA（球栅阵列）和其他高密度组装要求时有一定风险。
- 环境影响：含有铅元素，不适用于环保要求中不含铅元素的产品。
- 稳定性：防氧化和耐腐蚀性相对沉金较差。

适用范围：

- 适用于一般性应用，特别是对成本敏感的 PCB。
- 不适用于高密度、高可靠性和特殊要求的 PCB。

2. 无铅喷锡

无铅喷锡（Lead-Free HASL）是将 PCB 浸入不含铅的锡合金溶液中，通过热风整平的方式在 PCB 表面形成一层无铅的锡合金涂覆层的工艺。

优点：

- 环境友好：不含铅元素，适用于符合环保要求不含铅元素的产品。
- 成本效应：相对于沉金工艺，成本较低；
- 导电性能：能够提供较好的电气性能。

缺点：

- 平整度：表面平整度较低，可能会影响高密度组装的可靠性。
- 焊接性能：相对有铅喷锡，焊接温度较高，需要控制焊接温度，较易出现拒焊风险。
- 稳定性：防氧化和耐腐蚀性相对沉金较差。
- 成本效应：成本相对有铅喷锡偏高。

适用范围：

- 适用于一般性应用，尤其是满足环保要求的不含铅元素的 PCB。
- 不适用于高密度、高可靠性和特殊要求的 PCB。

9.1.2　沉金工艺

随着电子产品朝着小型化、高密度及高可靠性不断发展，对 PCB 表面处理在平整度、无铅环保、抗氧化、耐腐蚀和可焊性等方面的要求愈发严苛。为满足此类需求，沉金工艺应运而生。

沉金（ENIG），也称化学沉镍金，是一种在 PCB 表面进行金属化处理的工艺。其过程为先通过化学反应在 PCB 表面沉积一层镍，形成镍层基底，然后在此基础上再沉积一层金。该工艺能提供平整度较高的焊盘表面，有利于电子元器件的安装和焊接。沉金工艺焊盘如图 9-3 所示。

图 9-3　沉金工艺焊盘

优点：

- 平整度：提供平整、光滑的焊盘表面，便于高密度电子元器件的安装和焊接。
- 焊接性能：具有强大的焊接兼容性，适用于多种组装工艺，包括表面贴装技术（SMT）、插件焊接和其他常见的组装方法。
- 稳定性：金层晶体结构致密，具有防氧化性、耐磨性和耐腐蚀性，增强了 PCB 的耐久性和稳定性。
- 美观度：沉金焊盘表面色泽美观，提升产品外观。
- 环境友好：不含环保要求中限制的铅元素。

缺点：

- 成本效应：成本较高，相对于其他表面处理工艺而言较昂贵。
- 工艺难度：工艺复杂，需要较为复杂的步骤和较长的时间来完成沉金处理。

使用范围：

- 适用于高密度、高可靠性和特殊要求的 PCB（如高频、高速信号传输的 PCB）。
- 适用于耐磨需求和抗腐蚀要求高的 PCB。
- 特别适用于内含 BGA 和其他需要平整表面和可靠连接组件的 PCB。

9.1.3　OSP

OSP（Organic Solderability Preservatives），也称有机助焊保护膜或有机表面防氧化保护剂，是一种通过化学反应在 PCB 的铜表面形成一层有机保护膜的工艺，用于防止氧化并增强组

装过程中的焊接性能。OSP 工艺焊盘如图 9-4 所示。

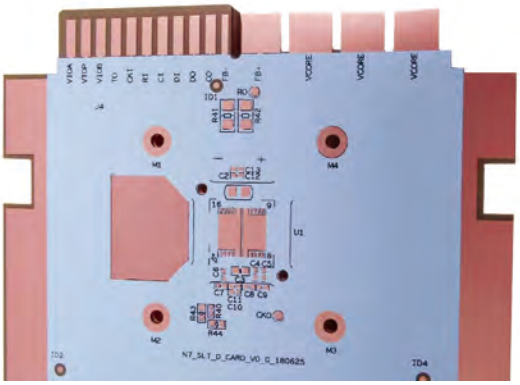


图 9-4　OSP 工艺焊盘

早期的有机助焊保护膜是松香，但由于松香涂层容易吸潮变黏，防护效果下降，存放时间稍长容易氧化干涸在 PCB 表面且难以清洗，因此逐渐被 OSP 所取代。

优点：

- 平整度：提供平整、光滑的焊盘表面，有利于高密度电子元器件的安装和焊接。
- 环保性：不含环保要求中限制的铅元素。
- 可焊性：可焊性好，能与多种组装工艺兼容，适用于表面贴装技术（SMT）、插件焊接和其他常见的组装方法。
- 成本效应：制造成本低，经济实惠。

缺点：

- 不耐高温：OSP 在多次高温焊接后可能分解或受损。
- 存储时间短：OSP 的保存期限相对较短，随着时间推移，OSP 的性能可能会下降，容易导致 PCB 存储过程中出现氧化等问题。

使用范围：

- OSP 适用于基础 PCB、低成本应用和简单焊接要求的 PCB。

嘉立创目前只在相对简单的特色基材结构的单、双面热电分离铜基板上使用 OSP 工艺。热电分离铜基板（单面）结构图如图 9-5 所示。

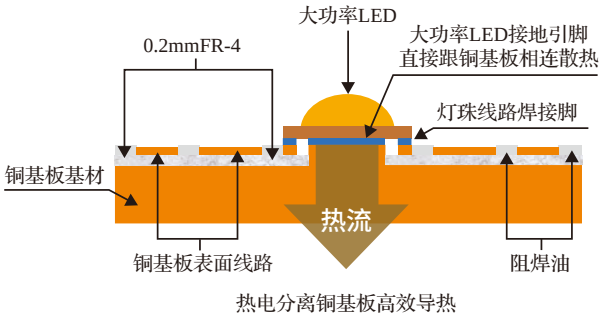


图 9-5　热电分离铜基板（单面）结构图

9.2 表面处理工艺选择的注意事项

9.2.1 高密度元器件 PCB 表面处理的选择

在当今的电子制造领域，表面贴装技术（SMT）已成为主流，高密度元器件的广泛应用对 PCB 的表面处理工艺提出了严苛的要求。在常见的 PCB 表面处理工艺中，喷锡工艺和沉金工艺均有采用，但在高密度元器件的 SMT 焊接过程中，沉金工艺展现出了显著优势。

高密度元器件具有引脚间距小、集成度高等特点。这要求 PCB 焊盘表面具备极高的平整度、共面性以及良好的可焊性，以确保每个引脚都能与焊盘实现精准且可靠的连接。高密度元器件如图 9-6 所示。

（a）QFN　　（b）CSP　　（c）BGA

图 9-6　高密度元器件

以 BGA（球栅阵列）为例，BGA 封装由排列在封装底部的锡球阵列组成，这些锡球间距小、密度高，对 PCB 焊盘的平整度和共面性要求极为严格。

若 PCB 采用喷锡工艺

PCB 焊盘表面的喷锡层容易出现中间鼓起的“龟背”现象，导致焊盘平整度受损。这种不平整的表面在 BGA 焊接时，会影响锡球与焊盘的良好接触，增加焊接缺陷的风险，如虚焊、连锡短路等问题。

喷锡工艺中的锡合金在长期使用和热循环过程中，可能产生锡须生长，从而在小间距焊点之间引发短路等故障。

若 PCB 采用沉金工艺

PCB 焊盘表面的镍金层具有优良的平整度和共面性，为 BGA 焊盘提供均匀、平整的焊接界面，确保每个锡球在回流焊接过程中能良好润湿和结合，形成可靠的焊接接头，减少虚焊风险，从而显著降低焊接缺陷发生率。

因此，从品质角度出发，对高密度元器件 PCB，选择沉金工艺能确保良好的焊接质量，相比喷锡工艺，可显著降低缺陷发生率。

9.2.2 特殊类型 PCB 表面处理的选择

1. 印制接触片 PCB

印制接触片通常是指 PCB 上专门设计用于实现电气连接、导通电流或传输信号的印制

导电区域或部件。这些接触片通常具有特定的形状、尺寸和镀层，以确保与其他电子元件或连接器进行可靠的接触和交互。印制接触片（金手指）PCB 如图 9-7 所示。当 PCB 包含印刷接触片时，下单时应综合考虑需求与表面处理工艺的局限性和优势。

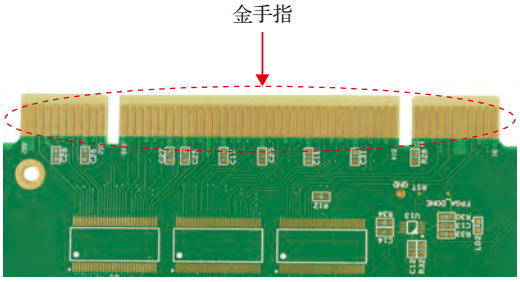


图 9-7　印制接触片（金手指）PCB

喷锡工艺的局限性

- 表面平整度差：热风整平易使接触片区域高低不平，出现“龟背”现象，影响平滑接触，降低可靠性。
- 耐磨性差：锡层较软，频繁插拔易磨损，影响性能和寿命。

沉金工艺的优势

- 表面平滑度高：能形成均匀光滑金层，确保接触片与插槽或连接器平滑接触，提供可靠电气连接，减少信号干扰或中断。
- 耐腐蚀性强：金层能有效防止氧化和腐蚀，确保接触片稳定可靠。

因此，从品质角度出发，选择内含印制接触片的 PCB 表面处理时，沉金工艺可提高表面平滑度、耐腐蚀性和长期稳定性，确保可靠的电气连接。

2. 裸露导体相对密集的 PCB

此类 PCB 由于功能需求，需要将大面积导线部分裸露在阻焊油墨以外进行表面喷镀，如线圈类 PCB、接触性按键 PCB 和有特别需要裸露导线的 PCB。在进行 PCB 下单时，建议选择沉金工艺，以避免喷锡连锡的风险，同时确保焊盘平整度。

1）线圈类 PCB

线圈类 PCB 具有线路密集和较大面积露铜的特点。若选择喷锡工艺，会有喷锡连锡和表面不平等隐患。喷锡工艺与沉金工艺线圈板如图 9-8。

（a）喷锡工艺（易连锡）　　（b）沉金工艺

图 9-8　喷锡工艺与沉金工艺线圈板

● 连锡现象：喷锡工艺易出现连锡现象，由于线圈可能属于同一网络，在 PCB 终检飞针测试或测试架测试过程中，无法通过检测网络开、短路的方法检测中间连锡短路的问题。

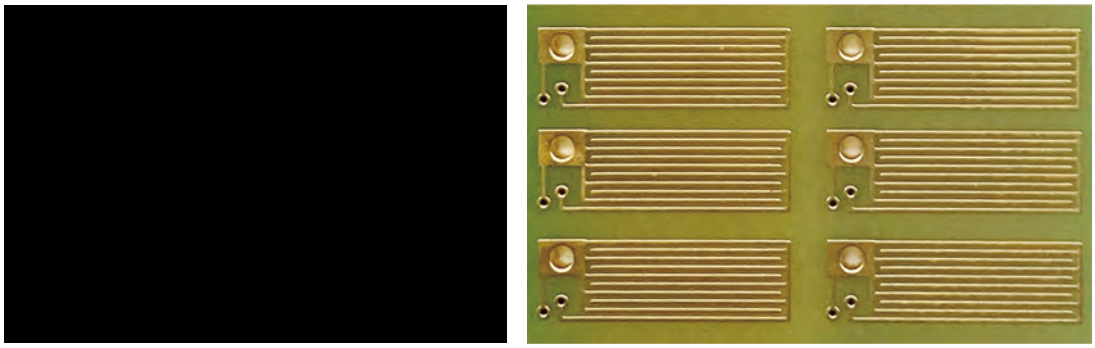
● 表面不平整：喷锡工艺在热风整平过程中，可能会导致线圈导线上的锡厚薄不一，影响线圈的电感特性和电磁性能，使得线圈的响应和性能不稳定。

● 电气特性变化：喷锡工艺在热风整平过程中，可能有锡膏受热风影响，导致线圈导线之间的间隙变小，进而影响线圈的阻抗和频率响应等电气特性。

因此，建议线圈类 PCB 尽量避免选用喷锡工艺下单，而应选择沉金工艺，以确保产品的可靠性。

2）特殊封装类型的 PCB

采用喷锡工艺制造特殊用途封装（如天线、接触按键等）的 PCB，由于喷锡涂覆层的不均匀性和封装的紧凑型特性，可能影响此类 PCB 中天线的工作频率、辐射特性、阻抗匹配，以及接触按键的灵敏度等特性，如图 9-9 所示。为确保此类 PCB 的可靠性，建议选择沉金工艺。



（a）喷锡工艺　　（b）沉金工艺

图 9-9　喷锡工艺与沉金工艺的按键 PCB 案例图

3）其他密集导体外露的 PCB

除特殊类型与封装外，在部分因设计需求导致特定区域过密导线或焊盘裸露的情况下，应尽量选用沉金工艺而非喷锡工艺，防止喷锡时出现如图 9-10 所示的连锡短路现象。

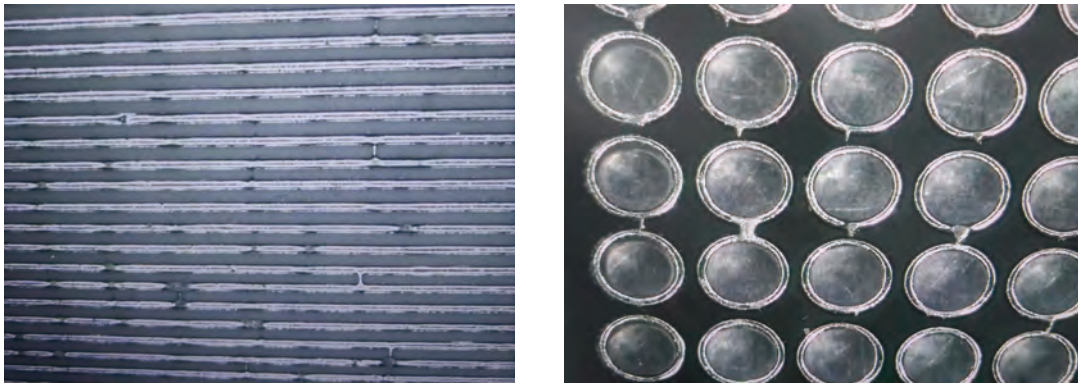


图 9-10　密集导线、焊盘外露出现喷锡连锡案例图

9.3 表面处理的控制与检测

在 PCB 制造过程中，表面处理是关键步骤之一。为确保其质量和有效性，检测至关重要。通常使用光谱仪、锡炉等设备来评估表面处理的外观和可焊性。

9.3.1 外观检查

1. 焊盘表面喷锡焊料涂覆层检测

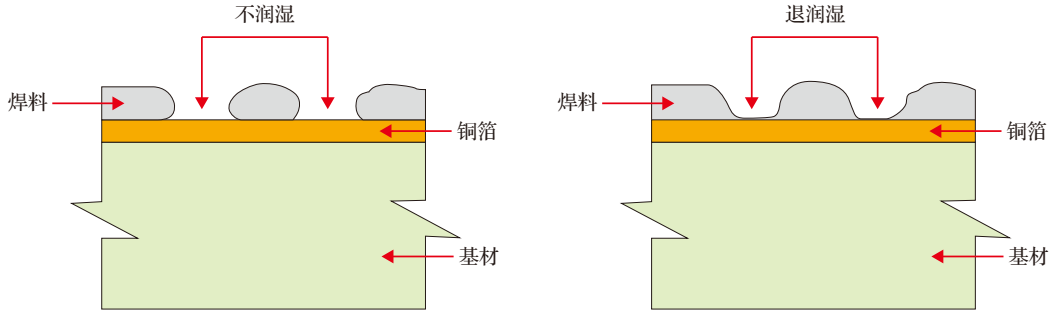
理想状态：无不润湿和退润湿现象。

接受状态：喷锡后的焊盘表面可焊性良好，无不润湿现象。在导体和接地层或电源层上，允许有局部退润湿。在焊盘上，对于 2、3 级板，只允许有不大于焊盘面积 5% 的退润湿；对于 1 级板，则允许有不大于焊盘面积 15% 的退润湿。

拒绝接受状态：如果超过以上标准，则不接受。

不润湿：熔融的喷锡焊料不能与基材的铜箔形成金属键合，如图 9-11（a）所示。

退润湿：熔融的喷锡焊料涂覆在金属表面后焊料回缩，导致形成由焊料薄膜覆盖且未暴露金属基材的区域分割开的不规则焊料堆的一种状况，如图 9-11（b）所示。



（a）不润湿示意图　　（b）退润湿示意图

图 9-11　PCB 焊盘表面喷锡焊料涂覆层不润湿与退润湿示意图

2. 沉金表面镀层检测

PCB 采用沉金工艺制造的焊盘表面镀层检测：从外观上看，理想状态为焊盘完整，表面镀层均匀光亮，无镀层脱落或缺失、露铜、氧化、划痕等缺陷。

下面重点介绍圆形表面贴装连接盘（BGA）和印制接触片（金手指）的表面镀层外观验收标准。

1）圆形表面贴装连接盘（BGA）

理想状态：连接焊盘的外部边缘无缺口、压痕、结瘤或针孔等不良现象。

接受状态：如图 9-12 所示，连接盘直径中心 80% 区域内无表面缺陷；连接焊盘外部边缘的表面缺陷向连接焊盘中心延伸不超过连接盘直径的 10%，且 2、3 级板缺陷不能延伸超过连接盘圆周的 20%（1 级板为 30%）；电气测试探针压痕满足最终涂覆要求。

拒绝接受状态：超过以上标准。

2）印制接触片（金手指）

理想状态：印制接触片表面应光滑，无针孔、麻点、划痕和电镀结瘤，焊料层或阻焊层

与接触片之间没有露铜和重叠的区域。

接受状态：如图 9-13 所示，在印制接触片完好区域内，表面缺陷不应暴露底层金属（镍或铜），且无金属凸点、结瘤和溅落的焊料；在完好区域外的麻点、压痕或凹陷处的最长值需小于或等于 0.15mm，每个接触片上的缺陷不超过 3 处，且这些缺陷的接触片不超过接触片总数的 30%。电气测试探针压痕满足最终涂覆要求。

拒绝接受状态：超过以上标准。

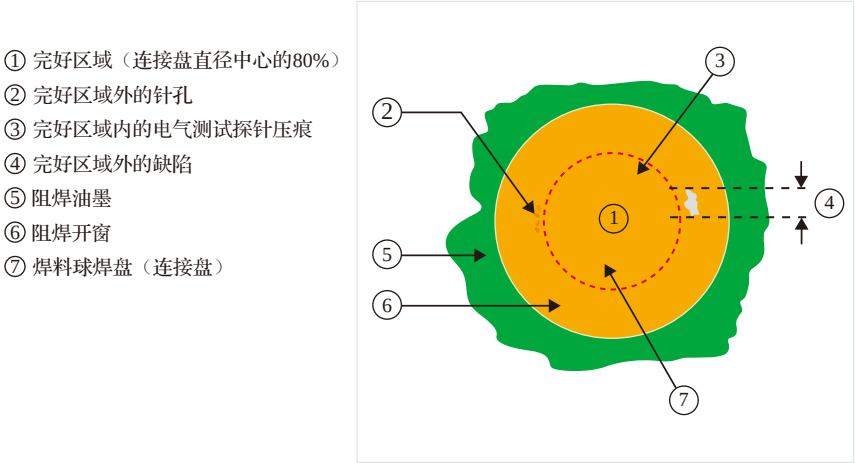


图 9-12　圆形表面贴装连接盘示意图

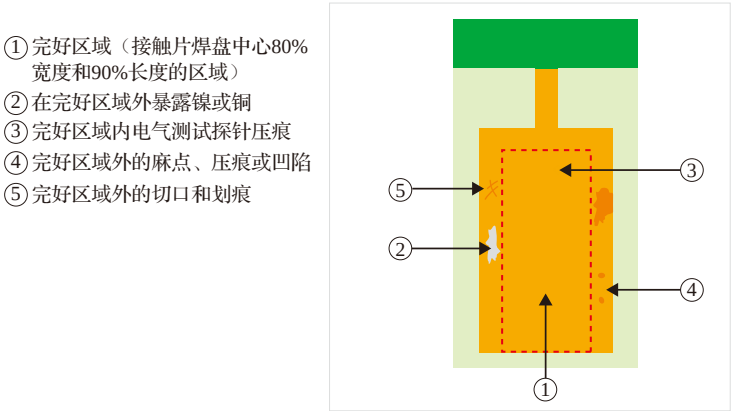


图 9-13　印制接触片（金手指）示意图

9.3.2　可焊性检测

工具：焊料槽（锡槽）或锡炉。

PCB 的可焊性主要是指表面焊盘的可焊性和孔内镀层的可焊性。一般通过使用规定的焊料、助焊剂，在规定的焊接温度和焊接时间内，对焊盘表面和孔内金属表面的润湿状态来评估。

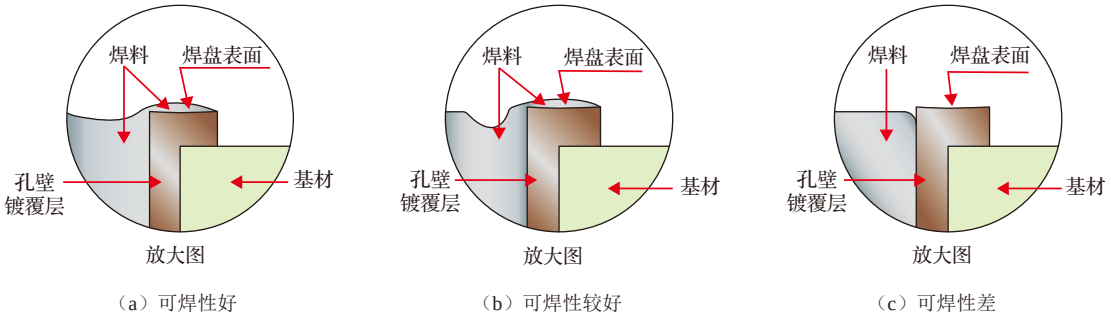
理想状态：所有金属化孔壁完全被焊料润湿，焊料润湿到孔的顶部焊盘上，且焊盘表面全部润湿，焊盘表面和孔壁没有暴露金属基材现象，如图 9-14（a）所示。

接受状态：

（1）焊盘表面可焊性评估：焊盘表面全部润湿。

（2）金属化孔可焊性评估：焊料完全润湿了焊盘表面，虽然焊料没有完全填满金属化孔，但焊料充满孔的 2/3 以上（若板厚大于或等于 3mm，焊料充满孔的 3/4 以上），并且焊料与孔壁的接触角小于 90°，呈润湿状态；对于 1、2 级板，镀覆孔焊料应当堵塞孔径于小 1.5mm 的孔，但没必要完全填满，如图 9-14（b）所示。

拒绝接受状态：不满足以上条件，如图 9-14（c）所示。



（a）可焊性好　　（b）可焊性较好　　（c）可焊性差

图 9-14　金属化孔焊盘表面与孔壁润湿及填充示意图

练习题

1. 关于沉金、有铅喷锡和无铅喷锡三种表面处理方式，以下哪些描述是正确的？（　　）（多选题）

A. 沉金工艺和无铅喷锡工艺可用于制作环保要求不含铅元素的 PCB

B. 沉金工艺 PCB 表面平整度好，成本相对较高

C. 喷锡工艺 PCB 表面平整度不如沉金工艺

D. 喷锡工艺和沉金工艺焊盘平整度一致，都可用于制作环保要求无铅的 PCB

2. 含 BGA 的 PCB，嘉立创为什么强烈建议工程师选择沉金工艺？（　　）（多选题）

A. BGA 的管脚在 IC 封装的底下这一特性，决定了一旦 PCB 焊接出现品质问题，维修难度特别高，采用沉金工艺焊接品质更好，返修概率低

B. BGA 焊盘位于封装底部，焊接后难以用目测系放大镜检测焊接质量，因此需要采用更好的沉金工艺来保证品质的可靠性

C. BGA 焊盘多且密，对 PCB 表面平整度要求高，喷锡工艺 PCB 在 SMT 过程中极容易出现虚焊，沉金工艺 PCB 表面平整度非常高，适合焊接 BGA

D. 含 BGA 元器件的 PCBA 通常价值较高，品质是第一位的，与板子价值相比，沉金工艺成本并不是最重要的，因此嘉立创强烈建议工程师选择品质更好的沉金工艺

参考答案

1. A、B、C；　　2. A、B、C、D。

第 10 章 / FPC

10.1 FPC 基础知识

柔性电路板（Flexible Print Circuit，FPC）简称软板，也称软式印刷电路板或软性电路板等，是一种可以弯曲的电路板。

软硬结合板（Rigid-Flex Printed Circuit Board，R-FPCB），也称软硬复合板或刚挠印制板。它将 PCB 硬板和 FPC 软板层压在一起，形成部分区域是硬板、部分区域是柔软可弯折的电路板。

柔性电路板及软硬结合板属于 PCB 的一个细分领域，主要用以搭载电子元器件，如 IC 芯片、电阻、电容、连接器等，使电子产品能发挥既定的功能。由于 FPC 具有可弯折性及可 3D 空间配线等特性，因此广泛应用于轻薄短小或需要弯曲折叠的电子产品或设备中。

10.1.1 FPC 板分类

1. 单面 FPC（Single-sided FPC）

单面 FPC 结构图如 10-1 所示，单面 FPC 实物图如图 10-2 所示。

单面FPC (板厚0.07mm)	
字符层 (Silkscreen)	—
聚酰亚胺 (Polyimide,DK:2.9)	12.5μm
胶 (Adhesive)	15μm
铜箔 (Copper)	18μm
聚酰亚胺 (Polyimide,DK:3.3)	25μm
补强板 (Stiffener)	—
总厚度 (Total thickness)	70.5μm

图 10-1　单面 FPC 结构图

图 10-2　单面 FPC 实物图

2. 双面 FPC（Double-sided FPC）

双面 FPC 结构图如图 10-3 所示，双面 FPC 实物图如图 10-4 所示。

双面FPC (板厚0.11mm)	
字符层（Silkscreen）	—
聚酰亚胺（Polyimide,DK:2.9）	12.5μm
胶（Adhesive）	15μm
铜箔（Copper）	12μm
聚酰亚胺（Polyimide,DK:3.3）	25μm
铜箔（Copper）	12μm
胶（Adhesive）	15μm
聚酰亚胺（Polyimide,DK:2.9）	12.5μm
字符层（Silkscreen）	—
补强板（Stiffener）	—
总厚度（Total thickness）	104μm

图 10-3　双面 FPC 结构图

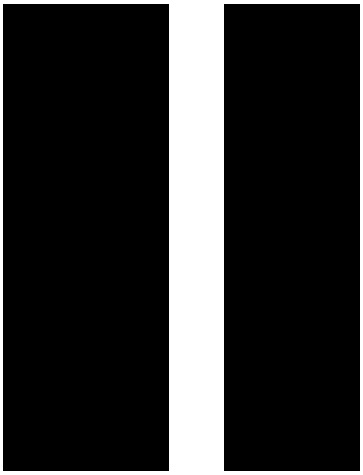


图 10-4　双面 FPC 实物图

3. 多层 FPC（Multi-sided FPC）

多层 FPC 结构图如图 10-5 所示，多层 FPC 实物图如图 10-6 和图 10-7 所示。

4层FPC (板厚0.21mm)	
字符层（Silkscreen）	—
聚酰亚胺（Polyimide,DK:2.9）	12.5μm
胶（Adhesive）	15μm
L1 铜箔（Copper）	12μm
聚酰亚胺（Polyimide,DK:3.3）	12.5μm
胶（Adhesive）	25μm
L2 铜箔（Copper）	12μm
聚酰亚胺（Polyimide,DK:3.3）	25μm
L3 铜箔（Copper）	12μm
胶（Adhesive）	25μm
聚酰亚胺（Polyimide,DK:3.3）	12.5μm
L4 铜箔（Copper）	12μm
胶（Adhesive）	15μm
聚酰亚胺（Polyimide,DK:2.9）	12.5μm
字符层（Silkscreen）	—
补强板（Stiffener）	—
总厚度（Total thickness）	203μm

图 10-5　多层 FPC 结构图

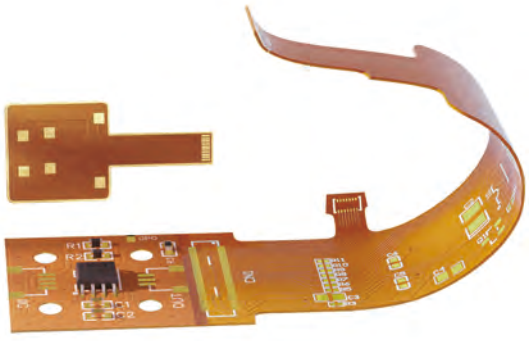


图 10-6　多层 FPC 实物图（1）

4. 软硬结合板

软硬结合板实物图如图 10-8 所示。

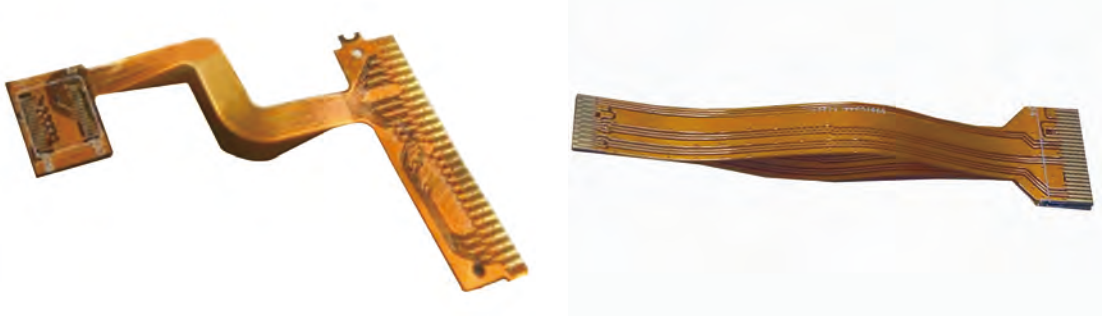


图 10-7　多层 FPC 实物图（2）

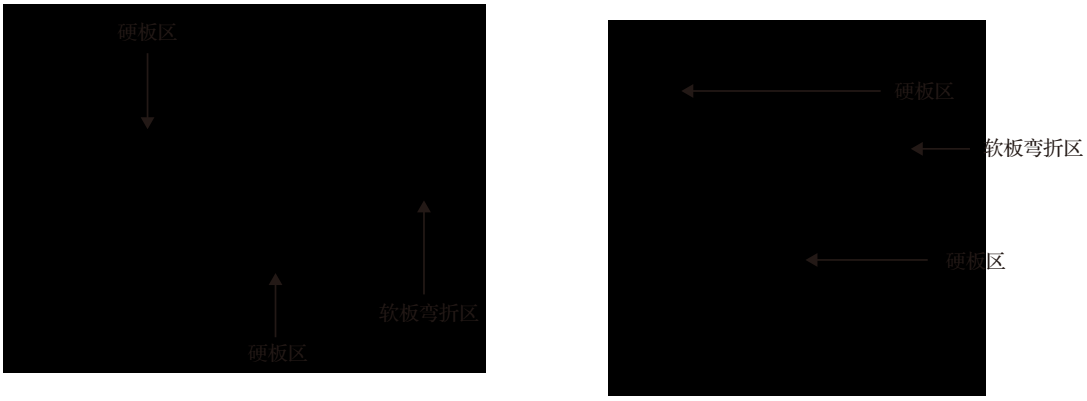


图 10-8　软硬结合板实物图

10.1.2　软板材料介绍

软板材料由柔性板材、覆盖膜、铜箔、补强板、补强胶、电磁屏蔽膜、背胶、防焊油墨等组成。

1. 柔性板材

柔性板材主要由绝缘材料、胶和铜箔结合而成，一般分有胶基材和无胶基材两种，每种基材又分为单面铜箔基材和双面铜箔基材。有胶基材是指用胶将铜箔与绝缘材料层压而成的材料；无胶基材则通过特殊方法将铜与绝缘材料直接结合，结合方法通常有电镀法、涂布法、压合法等。单面有胶铜箔基材如图 10-9 所示，单面无胶铜箔基材如图 10-10 所示，双面有胶铜箔基材如图 10-11 所示，双面无胶铜箔基材如图 10-12 所示。

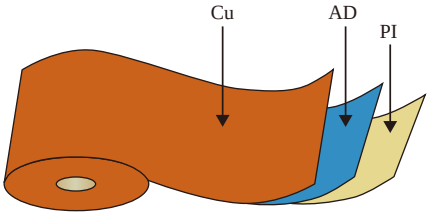


图 10-9　单面有胶铜箔基材

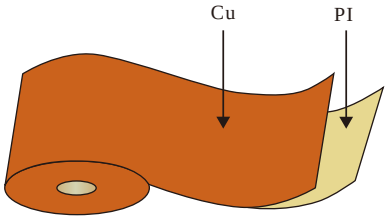


图 10-10　单面无胶铜箔基材

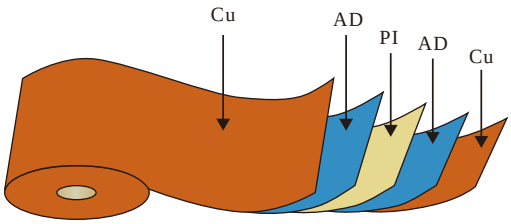


图 10-11　双面有胶铜箔基材

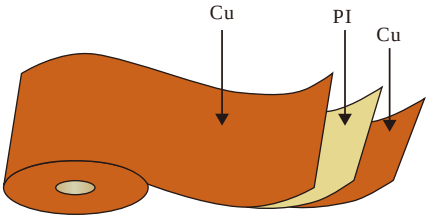


图 10-12　双面无胶铜箔基材

1）绝缘材料

FPC 最显著的特点是有绝缘膜，它使用薄而柔软的绝缘膜实现绝缘和机械强度。

绝缘材料种类繁多，最常见的有两种：PI 膜和 PET 膜，其中 PI 膜占 90% 以上的市场份额。PI 膜如图 10-13 所示，PET 膜如图 10-14 所示。

图 10-13　PI 膜（耐高温）

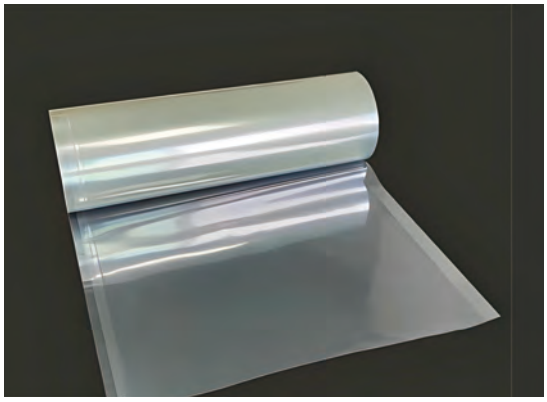


图 10-14　PET 膜（不耐高温）

（1）PI（Polyimide）膜：PI 又称为聚酰亚胺绝缘树脂材料，特点为耐高低温（长期使用温度为 -40 ～ 260℃），电气性能和机械性能具佳，所生产的产品可靠性好，为 FPC 主要材料，但价格为 PET 的两倍以上。

一般 PI 做基材绝缘层，常规厚度有 0.5mil、1mil、2mil、3mil、5mil，其价格随厚度减薄或增加而不同，其中以厚度为 25μm（1mil）的最便宜。PI 越硬则尺寸越稳定，但在覆盖膜中 PI 越硬，柔性越差。

（2）PET（Polyester）膜：PET 是一种聚酯绝缘树脂材料，耐热性较差。当温度为 60 ～ 80℃时，PET 的机械特性就会降低，PET 产品主要应用于室温条件下，不适用于细小间距高密度线路，且很难达到 UL 的阻燃等级，市场上大部分产品不适合 SMT。当产品不需要耐高温时，PET 也是一种优异的薄膜材料。PET 的吸湿和尺寸稳定性比 PI 膜好，且无色透明，是 PI 所不具有的。

PI 与 PET 材料性能对照表如表 10-1 所示。

表 10–1　PI 与 PET 材料性能对照表

特性	弯折性	尺寸稳定性	抗拉强度	可焊性	耐燃性	耐化学品性	绝缘性
PI	优	良	优	优	优	中	良
PET	优	优	良	差	差	良	优

2）胶（Adhesvie，AD）

胶也称为黏接剂或纯胶，其作用是将铜箔与 PI 或 PET 等黏合在一起。它是挠性覆铜板制造过程中最重要的组成部分。挠性覆铜板中很多重要的性能指标都是由胶的性能所决定的，如绝缘材料与铜箔之间的剥离强度、抗挠曲性能、化学性能、耐湿性能、胶层流动性能等，因此，电子工程师一般优选无胶基材，有胶基材已逐步被淘汰。

常用的胶有丙烯酸 / 亚克力胶和环氧树脂胶两种，厚度有 0.5mil、1mil、2mil 等。丙烯酸胶如图 10-15 所示，环氧树脂胶如图 10-16 所示。

图 10-15　丙烯酸胶

图 10-16　环氧树脂胶

丙烯酸 / 亚克力胶：具有优异的耐热性和较高的黏接强度，但是其电气性能不理想，在高温的环境下还会引起铜的迁移。一般只在一定条件下才会反应，因此其储存时间相对较长。

环氧树脂胶：耐热性能低于丙烯酸胶，但整体性能较为均衡。环氧树脂胶对储存环境要求较为严格，需低温，保质期一般只有 3 个月；对压合条件要求较为严格，不同的压合条件会导致压出的板子差异较大，但总体来说，其电气性能较好，可用于多层板压合。

丙烯酸胶和环氧树脂胶性能对照表如表 10-2 所示。

表 10–2　丙烯酸胶和环氧树脂胶性能对照表

特性	耐热性	耐化学性	介电性	黏接力	弯曲性	吸湿性
丙烯酸胶	优	中	中	优	良	中
环氧树脂胶	良	良	良	中	中	良

3）铜箔（Copper）

铜是导电体，铜箔分压延铜箔（RA）和电解铜箔（ED）。FPC 铜箔标准厚度：1/3oz（12μm，也用 Toz 表示）；0.5oz（18μm，也用 Hoz 表示）；1oz（35μm）；2oz（70μm）。

（1）压延铜箔：是将铜板经过多次重复辊轧而成，它的组织属片状组织，如图 10-17 和图 10-18 所示。

（2）电解铜箔：是通过电镀沉积制成的铜箔，它的组织属柱状组织，如图 10-19 和图 10-20 所示。

图 10-17　压延铜箔

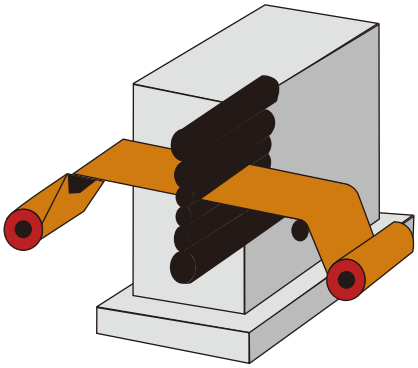


图 10-18　压延铜箔生产示意图

图 10-19　电解铜箔

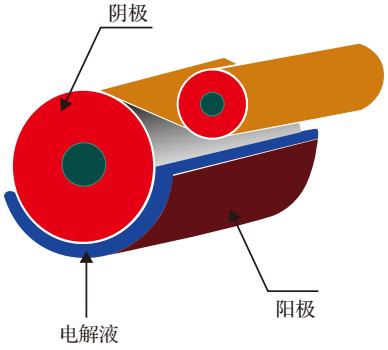


图 10-20　电解铜箔生产示意图

铜箔选用注意事项：

- 电解铜箔技术比较成熟，成本低，市占率达 95% 以上，压延铜箔耐弯折性能比电解铜箔稍好，价格比较高，适合航空航天等特殊应用场景。
- 铜厚越厚，弯折性能越差，为保证耐弯折性能，铜厚一般不建议超过 2oz。
- 压延铜箔蚀刻较困难，不利于制作细电路板。

2. 覆盖膜

覆盖膜又称 PI 保护膜（Coverlay，CVL），指 FPC 表面的绝缘层，在基材上做完线路后为防止线路氧化和短路而贴附的一层类似于 PCB 绿色油墨功能的绝缘层，由胶和 PI 膜构成，如图 10-21 所示。为起到保护胶的作用，一般会在胶上覆盖一层薄膜（Mylar）。覆盖膜实物图如图 10-22 所示。一般覆盖膜胶厚度为：0.5mil、1.0mil、1.5mil、2.0mil；PI 膜厚度为：0.5mil、1.0mil、2.0mil、3.0mil、5.0mil。

3. 补强板

补强板（Stiffener，STF）是软板局部区域为了承载元件和便于安装而另外加上的硬质材料，主要有 PI 补强板、FR-4 补强板、钢片补强板等。

1）PI 补强板

常见的厚度为 0.1mm、0.15mm、0.2mm、0.225mm、0.25mm，一般用在插拔金手指背面，如图 10-23 所示。

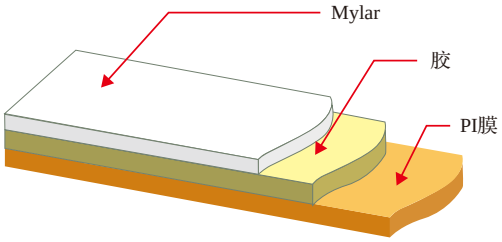


图 10-21　覆盖膜结构图

图 10-22　覆盖膜实物图

2）FR-4 补强板

FR-4 补强板又称环氧补强板，常用厚度为 0.1mm、0.2mm、0.4mm、0.5mm、0.6mm、0.7mm、1.6mm，颜色一般为黄色，常用于有插件孔的元器件处补强或要求不高的芯片背面，如图 10-24 所示。

3）钢片补强板

钢片一般为 SUS304 不锈钢，厚度为 0.1mm、0.2mm、0.3mm。钢片有强磁、弱磁之分，因此带有霍尔元件的产品慎用。钢片比 FR-4 平整，一般用于芯片或 FPC 座子背面。另外，钢片还可起到散热的作用。钢片补强板如图 10-25 所示。

图 10-23　PI 补强板

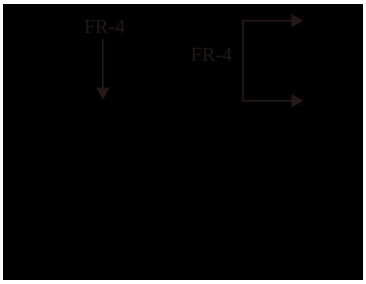


图 10-24　FR-4 补强板

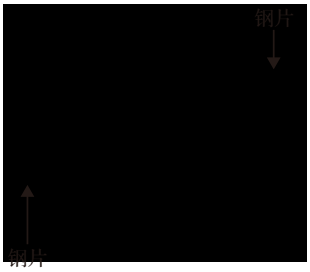


图 10-25　钢片补强板

4. 补强胶

补强胶用于黏接补强板与板子，常用的补强胶有热固胶和压敏胶。

1）热固胶

热固胶也叫热硬化胶，有环氧树脂胶和亚克力胶等类型，即前面所讲的 AD 纯胶。

2）压敏胶

压敏胶（Pressure Sensitive Adhesive，PSA）也叫不干胶，是一种无须热压的、可直接粘贴于绝缘材料上的胶，类似于日常用的双面胶，并且可重复粘贴多次，如图 10-26 所示。常用的型号有以下两种。

- 3M9077：可耐 260℃高温，可正常过 SMT，厚度为 50μm，黏性比 3M468 稍差一些。
- 3M468：最高只能耐 150℃高温，厚度为 125μm，黏性比较好，但不能过 SMT。

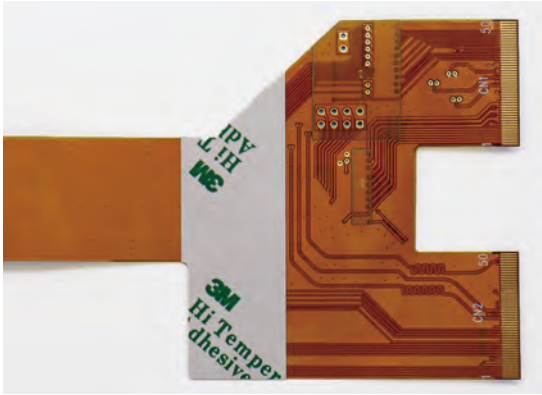


图 10-26　3M 胶实物图

热固胶和压敏胶性能对比表如表 10-3 所示。

表 10–3　热固胶和压敏胶性能对比表

类型	厚度	黏结强度	蠕变特性	耐化学性	耐浮焊性	生产效率	材料费	加工费
压敏胶	50 ～ 125μm	中	低	低	良好	高	低	低
热固胶	25 ～ 125μm	高	良好	高	良好	低	低	高

注：一般补强胶默认用热固胶，结合力好，不容易脱落；压敏胶一般用于组装时固定 FPC 的位置，如灯条板背胶。

5. 电磁屏蔽膜

电磁屏蔽是电磁兼容工程中广泛采用的抑制电磁干扰的有效方法之一。所谓屏蔽，就是用导电导磁材料制成的屏蔽体将电磁波限定在一定的范围内，使电磁波从屏蔽体的一面耦合或辐射到另一面时受到抑制或衰减。笔记本电脑、GPS、显示屏和手机等产品都会因高频电磁波干扰产生杂波，影响通信品质。电磁屏蔽膜耐弯折、导电性能好。电磁屏蔽膜实物图如图 10-27 所示，其结构图如 10-28 所示。

图 10-27　电磁屏蔽膜实物图

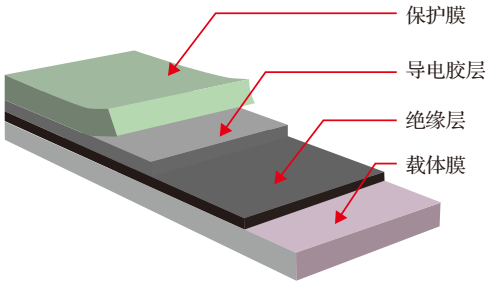


图 10-28　电磁屏蔽膜结构图

注：电磁屏蔽膜一般建议要做接地设计，不接地有可能会影响信号，增加电磁屏蔽膜后，阻抗会减小 15 ～ 20Ω。

6. 防焊油墨

防焊油墨种类有感光型（LPI）、UV 固化型、热固化型等。软板采用油墨时需使用软板

专用油墨。

液态感光型：即 LPI，采用丝印或喷涂方法把液态感光油墨涂布在蚀刻过的 PCB 上，经过烘干、曝光、显影等成像的方法，形成的显露连接焊盘和保护油墨，通常用于硬板、软硬结合板以及软板密集元件区。

涂料保护型：即 UV 固化型和热固化型，由丝网印刷到 PCB 上，并通过紫外线或红外加热来固化形成一层永久不变的、薄的和不易磨损的保护涂层。

覆盖膜与防焊油墨的比较如表 10-4 所示。

表 10–4　覆盖膜与防焊油墨的比较

保护层材料	优　　点	缺　　点
覆盖膜	耐弯折	相对成本高
	没有针孔	需要预切割和预钻孔操作
	无渗油	容易褶皱
	具有较高的介电强度	容易偏位
	不易刮花	线路之间填充可能会出现空洞
		无法修补
防焊油墨	线路之间填充较好	容易掉油
	成本较低	介电强度稍弱
	工艺成熟	容易渗油或油墨堵孔
	修补方便	容易刮花
	对位精度较高	不能弯折
	能制作细小阻焊桥	

软件结合板覆盖膜与油墨实物图如图 10-29 所示。

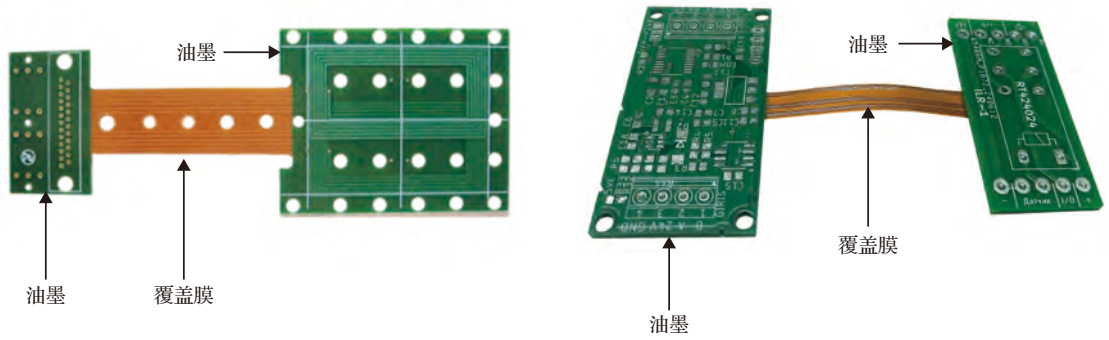


图 10-29　软件结合板覆盖膜与油墨实物图

10.1.3　硬板材料

硬板材料主要为覆铜板和半固化片，详见 PCB 基础知识。覆铜板实物图如图 10-30 所示，

半固化片实物图如图 10-31 所示。

图 10-30　覆铜板实物图

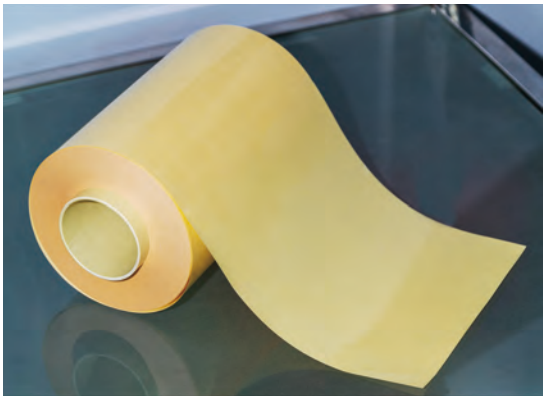


图 10-31　半固化片实物图

10.1.4　FPC 优缺点

1. 优点

（1）重量轻、体积小、厚度薄。

（2）可弯曲、能扭转。

（3）介电常数低、耐热性好。

（4）三维互连安装、可连续性生产加工。

2. 缺点

（1）工程师需要有丰富的设计经验。

（2）客户产品结构变化多样，要求各不相同，生产难度较大。

（3）返工的可能性低，特别在压合、蚀刻及电镀等工序。

（4）检查困难，线细、孔铜等给检测带来不便，工程设计困难，比较容易出错。

10.2　FPC 生产流程

10.2.1　单面板生产流程

单面板只有一面铜箔，所有孔都是非金属化孔，即孔内无须镀铜。

单面板主要由单面软板基材、覆盖膜等组成，是最简单的一种 FPC。

1）单面板结构

单面板结构图如图 10-32 所示。

2）单面板生产流程

开料→钻孔→干膜→曝光→显影→蚀刻→去膜→ AOI/ 目检→预叠（上覆盖膜需先开料 / 激光）→压合→沉金→文字→电测→装配→压合→烘烤→成型→ FQC →包装→出货。

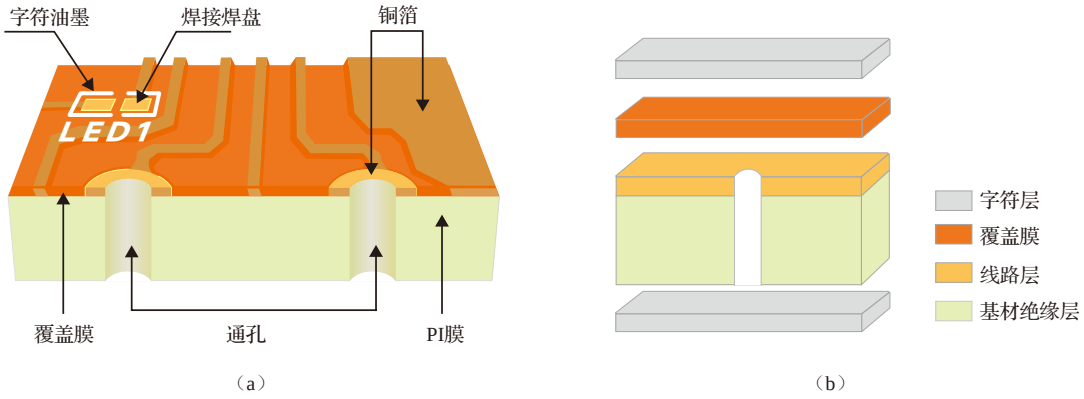


图 10-32　单面板结构图

10.2.2　双面板生产流程

1. 双面板结构

双面板基材两面都有铜箔，且有电镀导通孔连接两面的线路铜 Pad，主要由双面软板基材、覆盖膜等组成，如图 10-33 所示。

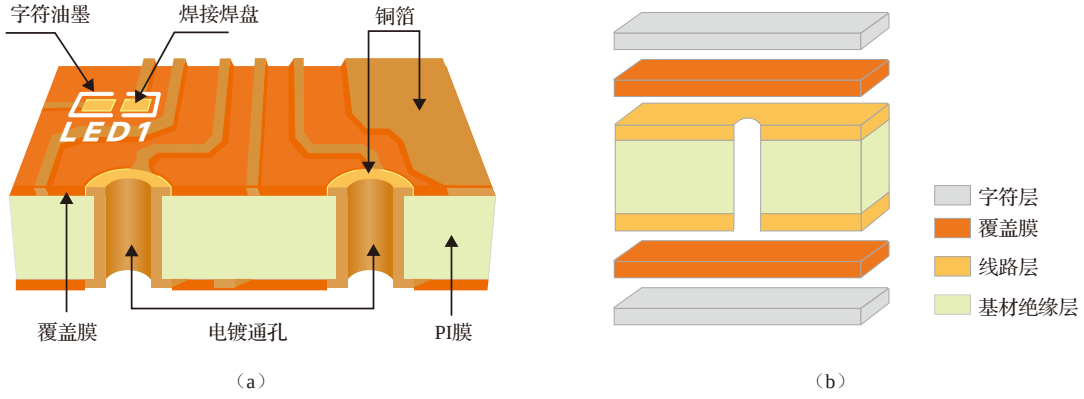


图 10-33　双面板结构图

2. 双面板生产流程

开料→钻孔→黑孔→板电→干膜→曝光→显影→蚀刻→去膜→ AOI →预叠（上下覆盖膜需先开料 / 激光）→压合→沉金→文字→测试→装配→压合→烘烤→成型→ FQC →包装→出货。

10.2.3　多层板生产流程

1. 多层板结构

分别将多张单面或双面基板做好内层线路，再按顺序压合，且有电镀导通孔连接内外层的线路铜 Pad，主要由多个双面软板基材、黏接片、覆盖膜等组成，如图 10-34 所示。

2. 多层板生产流程

开料→内层线路→压合→钻孔→沉铜→板电→干膜→曝光→显影→蚀刻→去膜→ AOI →预叠（上下覆盖膜需先开料 / 激光）→压合→沉金→文字→测试→装配→压合→烘烤→成型→ FQC →包装→出货。

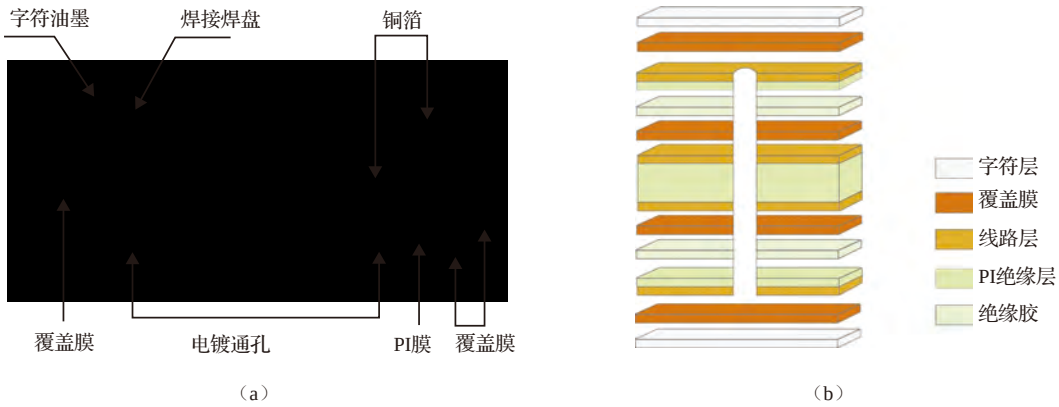


图 10-34　多层板结构图

10.2.4　特殊多层板

1. 分层板结构

分层板由多张单面板或单面板 + 双面板压合而成，弯折区域层与层之间是分开的，以增加板子弯折区域的柔性，如图 10-35 所示。

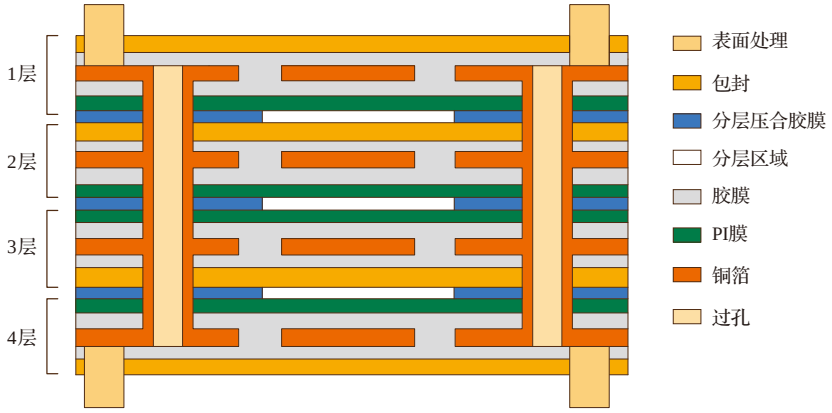


图 10-35　单 + 单 + 单 + 单四层板结构图

2. 软硬结合板结构

柔性电路板与刚性电路板经过压合等工序，按相关工艺要求组合在一起，形成同时具有 FPC 特性与 PCB 特性的电路板，主要由一个或多个双面软板基材、覆盖膜、硬板基材、硬板 PP 组成，如图 10-36 所示。

软硬结合板优点与缺点如下。

优点：软硬结合板同时具备 FPC 与 PCB 的特性，因此可以用于一些有特殊要求的产品之中，既有一定的挠性区域，也有一定的刚性区域，对节省产品内部空间、减少成品体积、提高产品性能有很大帮助。

缺点：软硬结合板生产工序繁多，生产难度大，良品率较低，所投物料、人力较多，因此价格比较贵，生产周期比较长。

3. HDI 软硬结合板

HDI 软硬结合板是在软硬结合板基础上增加了埋盲孔功能，此类板线路更精密，生产更复

杂，成本特别高。HDI 软硬结合板结构图如图 10-37 所示，HDI 软硬结合板实物图如图 10-38 所示。

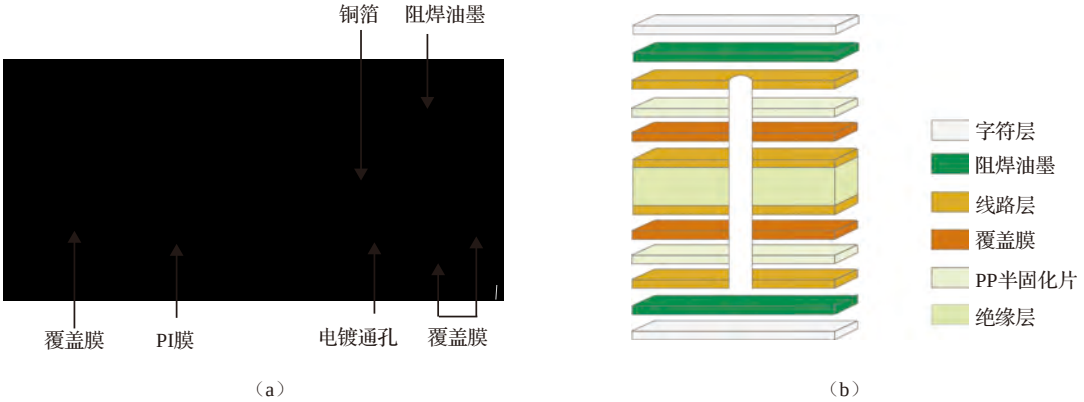


图 10-36　软硬结合板结构图

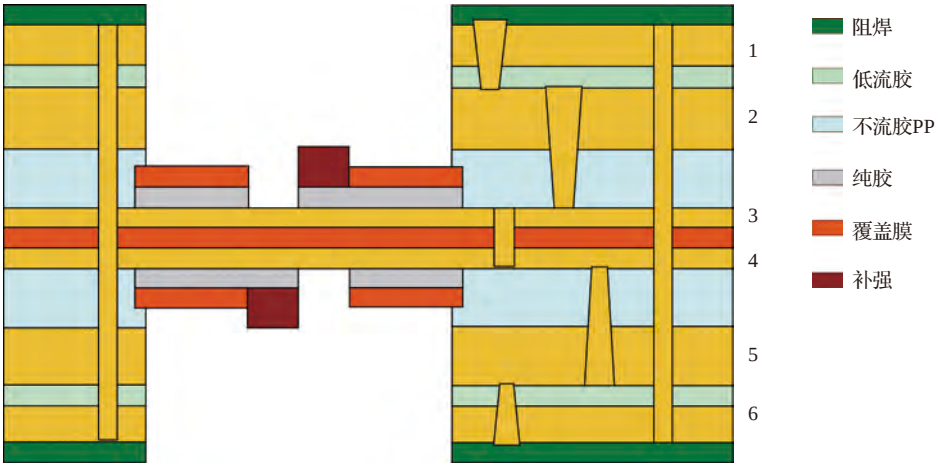


图 10-37　HDI 软硬结合板结构图

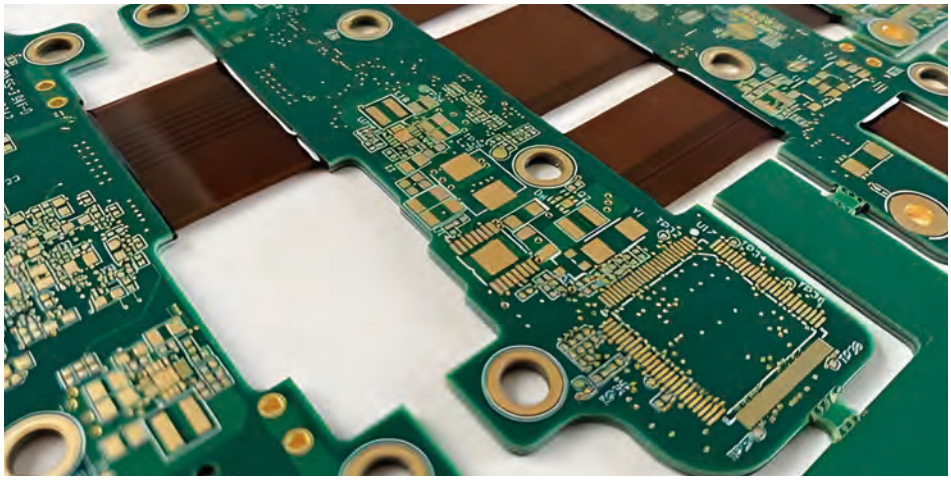


图 10-38　HDI 软硬结合板实物图

注：分层板、软硬结合板、HDI 软硬结合板需根据客户每个板子的工艺要求来设计不同的生产流程。

10.3 FPC 生产流程详解

1. 开料

由于 FPC 基材、覆盖膜、PI 补强板、3M 胶等一般都是卷状的，宽度为 250mm，长度为 100m，而生产线上的生产板尺寸一般不超过 400mm，所以要将卷料按照 MI（流程单）上的尺寸要求裁成片状。开料机如图 10-39 所示，开料前如图 10-40 所示，开料后如图 10-41 所示。

图 10-39　开料机

图 10-40　开料前

图 10-41　开料后

2. 钻孔

在裁切好的板料上钻出客户要求的孔位，以实现层与层之间的线路导通、元件插焊、安装固定等。孔的位置及大小均需满足客户要求。FPC 制造商在生产板板边也需要增加一些工具孔，如定位孔、对位孔、切片孔、料号孔、钻孔尾孔等，以方便产线制作及品质检测。钻孔机如图 10-42 所示，钻孔后的板如图 10-43 所示。

图 10-42　钻孔机

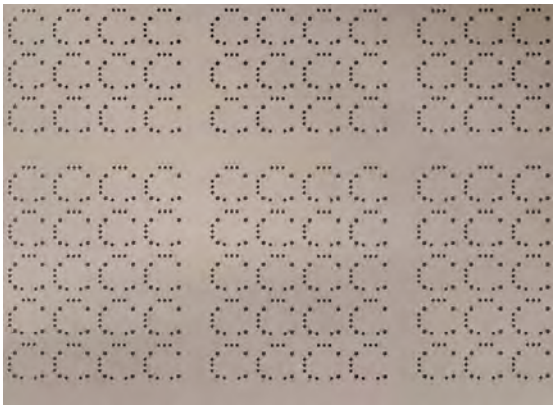


图 10-43　钻孔后的板

3. 黑孔

由于刚钻好的孔壁基材是绝缘的，无法直接进行电镀，必须先通过化学沉积的方式在孔壁上沉积一层很薄的导电碳膜，以提供导电性。黑孔设备如图 10-44 所示，黑孔后的板如图 10-45 所示。

图 10-44　黑孔设备

图 10-45　黑孔后的板

4. 板电

在黑孔层基础上，通过电化学方式电镀出孔壁铜及加厚线路铜，使上下层导通。待电镀的板如图 10-46 所示，电镀中的板如图 10-47 所示。

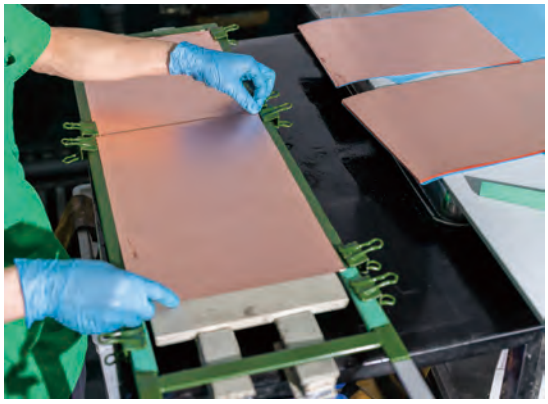


图 10-46　待电镀的板

图 10-47　电镀中的板

5. 干膜

电镀后的板经过前处理线清洗干净并烘干后，在铜面上压一层感光膜（干膜）。压膜机如图 10-48 所示，压膜后的板如图 10-49 所示。

干膜是一种高分子化合物，通过紫外线照射后能够产生聚合反应，并形成一种稳定的物质附着于板面，从而达到阻挡电镀和蚀刻的功能。

6. 曝光

线路曝光也叫图形转移，是将工程部处理好的客户线路图形转移到覆铜板干膜上。其原理是采用 LDI 激光光刻的或菲林底片 +LED 灯曝光的方式将线路图形呈现在干膜上。LDI 曝光机的精度比 LED 曝光机要高很多，如图 10-50 所示。曝光后的板如 10-51 所示。

7. 显影

采用碳酸钠或碳酸钾等弱碱溶液溶解并清洗掉曝光时未感光部分的干膜，露出铜面，而感光部分的干膜已经固化，不会被清洗掉，留在板面上保护线路图形。DES 线显影段如图 10-52 所示，显影后的板如图 10-53 所示。

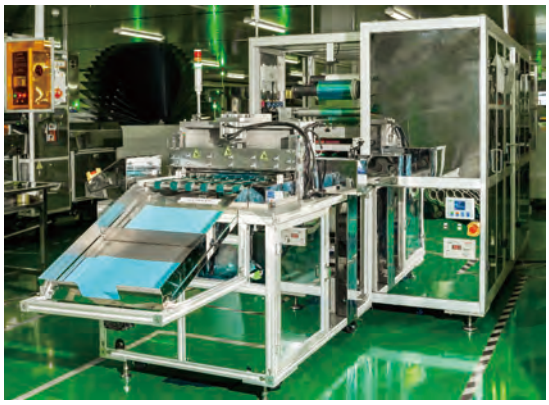


图 10-48　压膜机

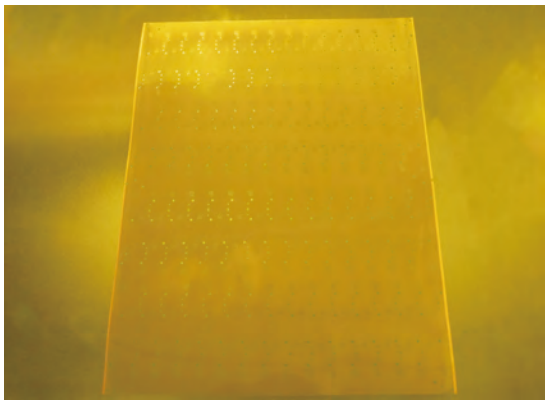


图 10-49　压膜后的板

图 10-50　LDI 曝光机

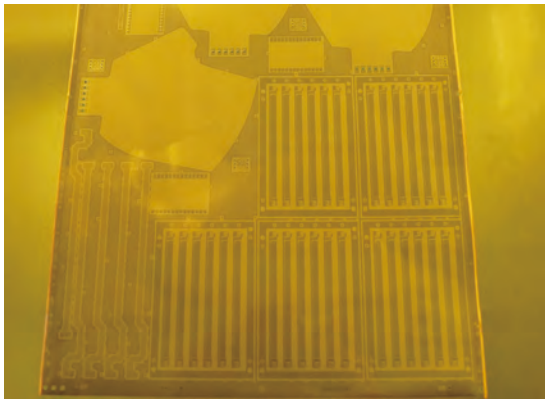


图 10-51　曝光后的板

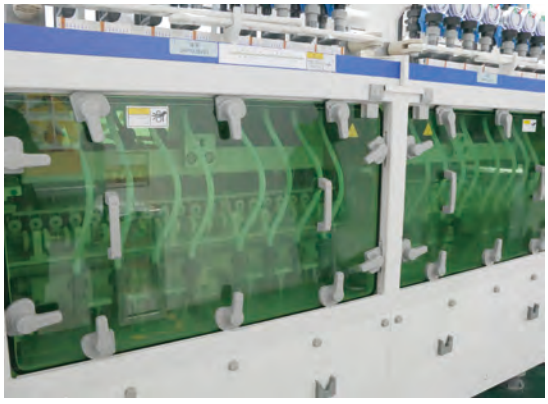


图 10-52　DES 线显影段

图 10-53　显影后的板

8. 蚀刻

采用蚀刻液将显影后露出来的铜面蚀刻掉，留下被干膜保护的铜面，形成线路图形。DES 线蚀刻段如图 10-54 所示，蚀刻后的板如图 10-55 所示。

图 10-54　DES 线蚀刻段

图 10-55　蚀刻后的板

9. 去膜

采用带有一定温度的 NaOH（氢氧化钠）溶液把保护铜面的干膜去除掉，露出线路图形。DES 线去膜段如图 10-56 所示，去膜后的板如图 10-57 所示。

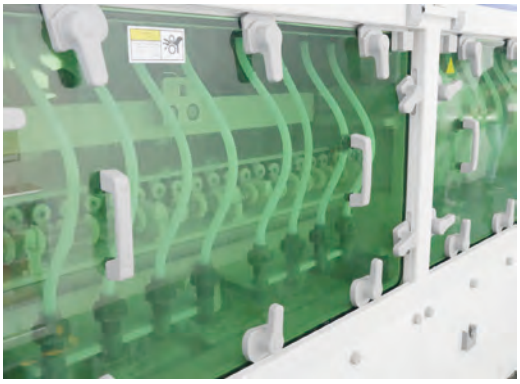


图 10-56　DES 线去膜段

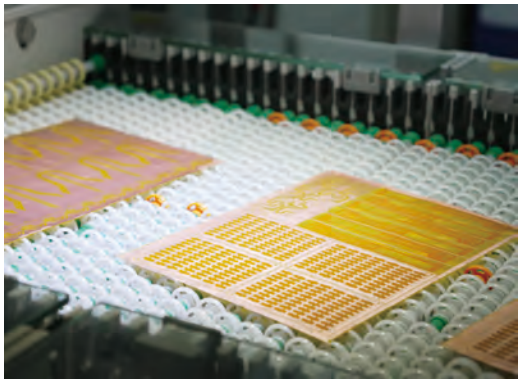


图 10-57　去膜后的板

10. AOI

AOI 通过相机捕捉蚀刻后的 FPC 板图像，再将图像与电脑中 Gerber 文件进行对比，报告出不同之处，以检查线路是否有开路、短路、残铜及缺口等隐患。AOI 设备如图 10-58 所示，AOI 检测结果如图 10-59 所示。

图 10-58　AOI 设备

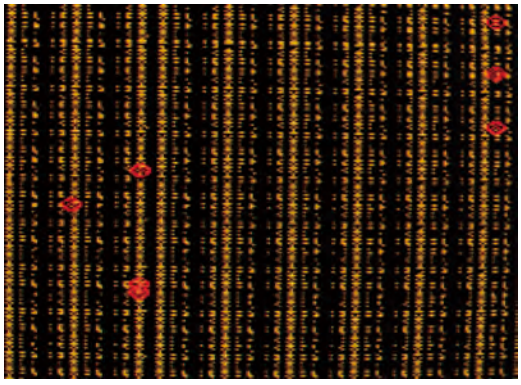


图 10-59　AOI 检测结果

11. 预叠

预叠是指将事先切割好阻焊窗的覆盖膜贴合在 FPC 板子上，并固定好。切割好的覆盖膜如图 10-60 所示，覆盖膜预叠如图 10-61 所示。

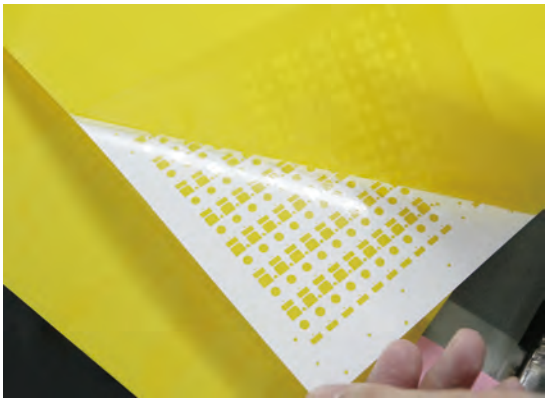


图 10-60　切割好的覆盖膜

图 10-61　覆盖膜预叠

12. 压合

将预叠好的板放在压机内，通过高温高压使覆盖膜与线路层紧密结合。压合机如图 10-62 所示，压合后的板子如图 10-63 所示。

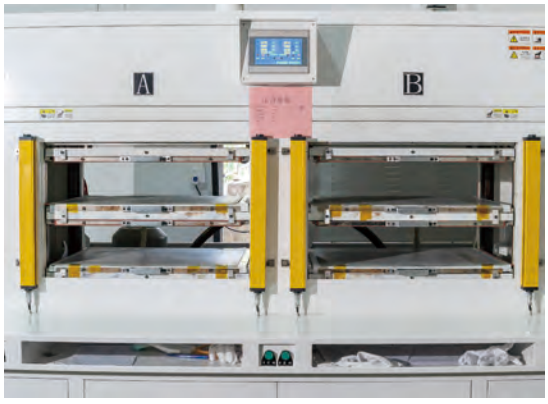


图 10-62　压合机

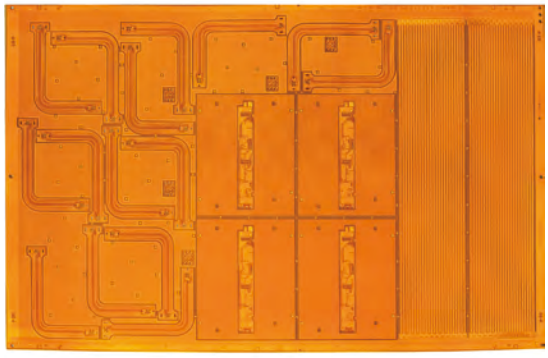


图 10-63　压合后的板子

13. 沉金

沉金是指在 PCB 表面露铜位置通过化学方式沉积一层薄的镍金层，主要起防氧化和提高可焊性的作用。沉金前处理线如图 10-64 所示，沉金线如图 10-65 所示。

14. 文字

文字也叫字符或白字，是按客户要求印刷指定的零件符号，给元件安装和维修印制板提供信息；另外，FPC 厂家也会在 FPC 上增加客编及生产日期等标识，这些标识主要通过字符喷印机打印在板面上，常规为白色或黑色。字符喷印机如图 10-66 所示，字符喷印实物图如 10-67 所示。

图 10-64　沉金前处理线

图 10-65　沉金线

图 10-66　字符喷印机

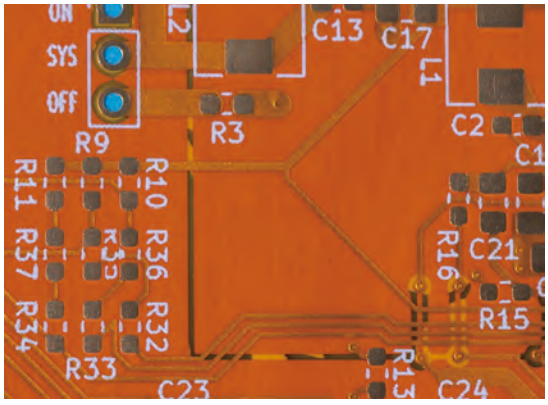


图 10-67　字符喷印实物图

15. 测试

飞针测试是一种用于测试 FPC 电气性能的方法，通过使用多个可移动的电气探针来接触 FPC 上的引脚、焊盘或过孔，从而测量电阻、电容、电压、电流等电气参数，以检测线路是否有短路、开路。飞针测试机如图 10-68 所示，飞针测试如图 10-69 所示。

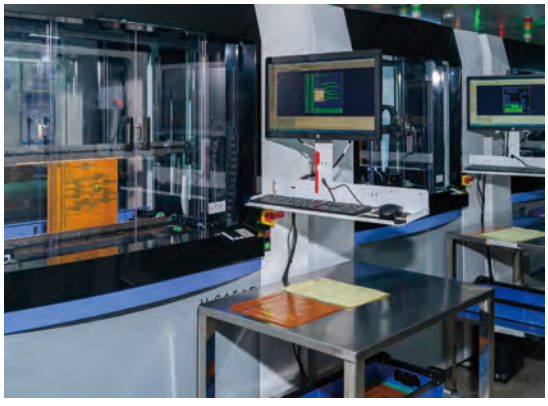


图 10-68　飞针测试机

图 10-69　飞针测试

16. 装配与压合

装配是指根据客户要求在板子指定位置贴上 FR-4 补强板、PI 补强板、钢片补强板、3M 胶、电磁膜等辅料，并再次通过压机压实。贴背胶如图 10-70 所示，贴钢片补强板如图 10-71 所示。

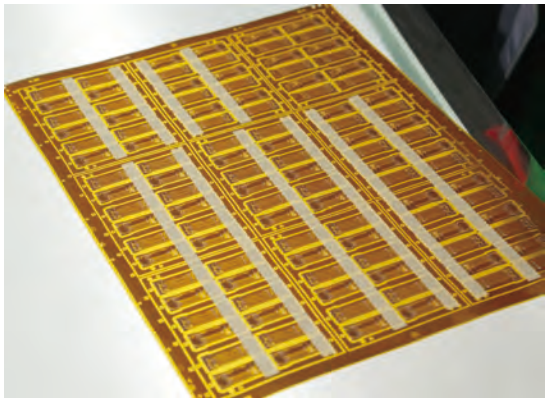


图 10-70　贴背胶

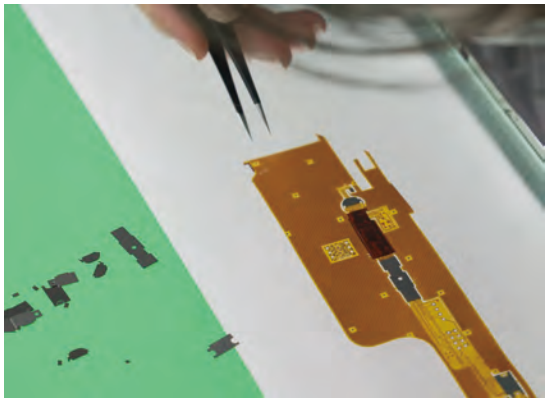


图 10-71　贴钢片补强板

17. 烘烤

烘烤是通过烤箱将板子上的文字油墨及装配贴合的补强再次固化，防止脱落。

18. 成型

成型是指通过激光或模冲的方式，把生产板冲切成客户需要的外形及尺寸。激光机如图 10-72 所示，成型后的板子如图 10-73 所示。

图 10-72　激光机

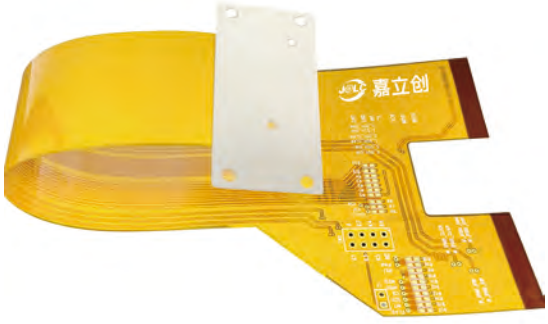


图 10-73　成型后的板子

19. FQC（最终质量控制）

产品切割成单片后，对产品的外观进行清洁及 100% 的检查，具体方法需根据产品的线路粗细来决定采用显微镜、放大镜、AVI 机还是目视来检查。清洁板面如图 10-74 所示，检查外观如图 10-75 所示。

20. 包装

将 FQC 检查好的板子进行点数并装入防静电袋中，如果是大尺寸的板子，需要上下增加硬纸板固定，然后打包发货。内包装如图 10-76 所示，打包盒如图 10-77 所示。

图 10-74　清洁板面

图 10-75　检查外观

图 10-76　内包装

图 10-77　打包盒

注：

- 多层板内层线路与上面介绍的干膜、曝光、显影、蚀刻、去膜流程及设备都是一样的。
- 分层板及软硬结合板因无固定流程，暂时不做介绍，也可咨询嘉立创 FPC 工程师。

10.4　FPC 设计注意事项

FPC 设计与 PCB 相同，区别在于 FPC 比较柔软，不方便组装及焊接，需要在局部增加一些刚性的补强。但各大 EDA 软件都没有专用的补强层，导致设计出来的资料五花八门，有的用 CAD 来设计补强，有的用图片标注，有的在 Gereber 中标注，PCB 制造商工程师很容易遗漏或搞错面向，导致板子不能用。

为了解决这个行业痛点，嘉立创 EDA 专业版 2.0 版本支持 FPC 板补强区域设计功能。可以直接将补强区域放置到需要进行补强的位置，无须另外制作 CAD 或在 Gerber 等图纸中标注，快速提升了设计效率。

10.4.1 钻孔设计

1. 漏孔检查要求

（1）金属化孔需设计在 drl 钻孔层。

（2）非金属化孔需设计在板框层，且保证板框层不能有其他杂乱的元素。

2. 过孔设计不合理检查

（1）过孔不能设计成一排，需上下或左右错开。

（2）过孔不能一半开窗，一半盖油。

（3）钻孔离板边需要有 0.5mm 以上的距离。

3. 板边半孔设计要求

半孔通常设计在板边需要焊接的焊盘上，方便焊接时过锡。

（1）过孔直径建议不小于 0.3mm。

（2）半孔孔中心需设计在板框线正中心。

（3）焊接金手指建议每个焊盘上打 2 个过孔，且板内过孔要错开，不能制作成一排。半孔焊接金手指如图 10-78 所示。

（4）独立半孔建议设计椭圆形焊盘，并保证板内焊盘剩余宽度在 0.3mm 以上。

扫描右侧二维码可查看 FPC 焊接金手指设计教程。

图 10-78　半孔焊接金手指

10.4.2 线路设计

1. 避免焊盘脱落设计要求

（1）独立焊盘建议做阻焊膜压 PAD 设计（设计成 SMD 焊盘，即焊盘比开窗要大）。

（2）正反两面焊盘不能重叠，尺寸需错开。

（3）BGA 焊盘直径不小于 0.25mm。

（4）插件孔区域需做补强，一般采用 FR-4 补强。

2. 线路铜到板框的距离

（1）为避免成型伤铜，走线或铺铜到板边正常距离要 0.2mm 以上，有高压的板需要 0.5mm 以上。

（2）板边焊盘宽度需要 0.5mm 以上，且下单备注：焊盘不能削，否则嘉立创会默认削焊盘离板边 0.2mm。

（3）板边焊盘不允许削时，需接受有轻微碳粉问题或改为模冲。

3. 线路大地铜设计

（1）尽量避免大面积铺铜，否则会导致压合气泡、水纹印等问题，如无法避免可以在大地铜上增加一些透气的阻焊窗。

（2）大地铜建议设计成线宽 0.2mm、间距 0.2mm 的网格状。

4. 焊盘到线设计

（1）焊盘间距小于 0.5mm 时，尽量不要在焊盘之间走线。

（2）焊盘到线需要有 0.2mm 的间距。

5. 线宽 / 线距设计要求

（1）铜厚 12μm（0.33oz）：3/3mil（极限 2/2mil）。

（2）铜厚 18μm（0.5oz）：3.5/3.5mil（极限 3/3mil）。

（3）铜厚 35μm（1oz）：4/4mil（极限 3.5/3.5mil）。

特殊情况：

（1）空旷区线宽需在以上基础上增加 1 ～ 2mil。

（2）线圈板线宽 / 线距尽量设计为 5/5mil 以上。

6. 通孔焊盘设计要求

（1）过孔外径必须比内径大 0.2mm 以上。

（2）插件孔外径需比内径大 0.4mm 以上。

特殊情况：

（1）空旷区外径需在以上基础上增加 0.05 ～ 0.1mm。

（2）孔内径大于或等于 2.0mm 时，外径需比内径大 0.6mm 以上。

7. FPC 反向金手指设计要求

反向金手指是指一端金手指在正面，另一端金手指在反面，具体可以查看嘉立创 FPC 官网插拔金手指设计教程。

（1）需要设计成双面线路，正反面线路通过添加过孔实现导通换层。

（2）下单需要选择双层板，如果是插拔金手指需要设计 PI 补强。

扫描右侧二维码可查看 FPC 插拔金手指设计教程。

10.4.3　阻焊设计

1. 阻焊桥设计要求

阻焊桥是指两个焊盘之间的阻焊膜，FPC 因阻焊采用的是覆盖膜，两个焊盘之间的距离需要在 0.5mm 以上才能保留阻焊桥。

2. 阻焊开窗到铜距离要求

（1）阻焊开窗到铜距离需在 0.15mm 以上（即焊盘到铺铜有 0.2mm 以上的距离）。

（2）电容、电阻、LED 灯等小元器件两焊盘间距小于 0.5mm 时，中间不能有铺铜。

3. 阻焊压 PAD 设计

FPC 阻焊设计不合理，会导致焊盘与走线处容易断裂。阻焊压 PAD 是指设计时线路焊盘要做大一些，使阻焊开窗能够压住一点焊盘，以防止焊盘脱落或焊盘与线路交接处断裂。

（1）焊接金手指正反面覆盖膜开窗需错开 0.3 ～ 0.5mm，不能正反两面开窗尺寸相同。

（2）开窗边缘尽量不要加在线路与焊盘交接处，需做成压 PAD 的设计。

（3）如无法做压 PAD 时，建议用 50μm PI 的基材。

4. 阻焊开窗设计要求

（1）按键位阻焊开窗需要开通窗。

（2）阻焊开窗长度一般不能超过 20mm，尽量避免大面积开窗。

（3）阻焊窗一定要设计在阻焊层，不能只设计在钢网层。

（4）工艺边废料或大地铜上尽量多增加一些透气开窗。

（5）金手指、元器件焊盘一定要有阻焊窗，大面积开窗会有褶皱问题。

5. 过孔阻焊开窗设计

（1）常规过孔在 EDA 软件里不能设计成插件孔属性，应设计为 Via 属性。

（2）FPC 过孔，嘉立创默认按阻焊盖油制作，如果要开窗，需要特别备注。

（3）如果过孔要开窗，不能设计成 Via 属性且需要在下单时特别说明。

（4）过孔形测试点需要设计 Testpoint 属性，并截图说明要开窗。

（5）过孔不能一半开窗，一半盖膜，需要保留 0.5mm 以上的安全间距。

10.4.4 文字设计

（1）标示性字符需设计在板外。

（2）底层字符需镜像。

（3）文字不能设计在焊盘上。

（4）文字高度为 1.0mm，字符线宽为 0.15mm。

（5）补强上有丝印要求时，下单时“补强是否有丝印”这个选项要选“有丝印”。

10.4.5 辅料设计

1. 补强材质选择

（1）PI 补强板适用于插拔类金手指区域补强。

（2）FR-4 补强板适用插件孔区域补强或低端的 IC 芯片背面补强。

（3）钢片补强板适用于 IC 芯片、BGA 等器件背面补强，平整度较好，但霍尔元件及插件孔不能使用。

2. 补强标示

在设计补强时，需要把补强材质、厚度、层别、区域等明确标示出来，并在下单时提供相关信息。

建议使用嘉立创 EDA 来设计 FPC，有专门设计 FPC 补强板的功能。

扫描右侧二维码可查看嘉立创 EDA 设计 FPC 教程。

其他 EDA 软件可通过在空白的丝印层，或图片中标示补强信息，并在下单时说明补强信息标示在什么位置。补强图三要素：材质、厚度、区域，如图 10-79 所示。

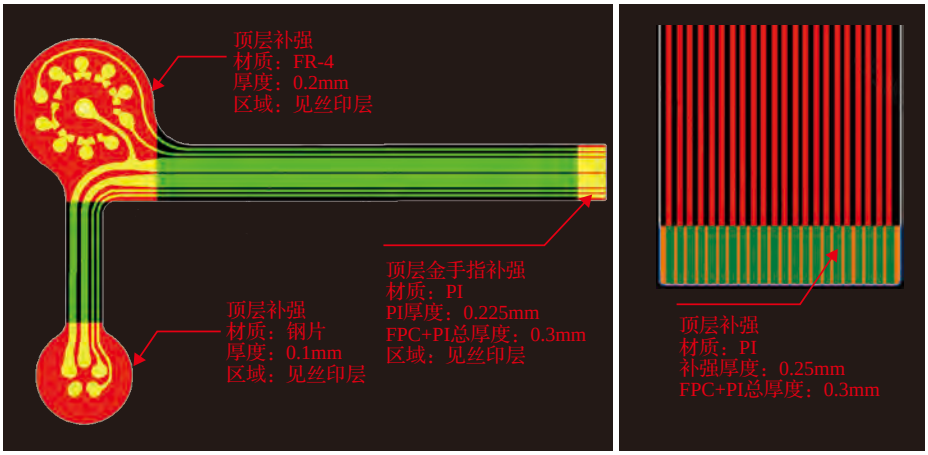


图 10-79　FPC 补强标示示意图

3. 补强尺寸设计

（1）补强区域需比焊盘大 1.0mm 以上，才能有效保护焊盘与线路交接处不断裂。

（2）FR-4 补强板、3M 胶最小宽度为 3mm。

（3）PI 补强板最小宽度为 2mm。

（4）钢片补强板最小宽度为 1mm。

4. 插拔金手指 PI 补强厚度计算

插拔金手指板一般在金手指背面需要做 PI 补强，补强 +FPC 的总厚度需要与连接器规格书上要求的厚度相符。

（1）金手指处板厚公差为 ±0.03mm。

（2）计算 PI 补强厚度时，FPC 厚度需要减去一层覆盖膜的厚度及考虑金手指背面的线路层是否有铺铜。

（3）金手指板下单时，一定要填写 FPC+PI 补强总厚度要求。

关注嘉立创 FPC，在右下角 FPC 设计中有金手指 PI 补强厚度计算器，只需输入总厚度及板厚，就会自动计算 PI 补强厚度，如图 10-80 所示。

图 10-80　金手指补强厚度计算器

5. 补强避让要求

补强避让是指补强覆盖到焊盘或孔时，如果想露出焊盘，称为避焊盘；如果只想露孔而不露焊盘，称为避孔。

（1）补强避焊盘：补强开口比焊盘单边大 0.3mm，可能会导致焊盘与焊盘之间或焊盘到板边之间没有补强。

（2）补强避孔：补强开口只比孔单边大 0.1mm，需要确认焊盘被补强盖住是否影响焊接。

（3）嘉立创默认用焊盘来避让，可能会导致焊盘与焊盘之间或焊盘到板边之间没有补强，如有特殊要求，需要特别备注。

（4）表面贴装的焊盘背面贴补强不能掏孔，否则会导致焊盘内凹。

6. SMT 补强设计要求

FPC 也可以像 PCB 一样做 SMT，但设计时尽量不要在有贴片元器件这面设计补强，因为补强有一定的厚度，会导致印锡膏时落锡不均匀，无法贴件，且不方便维修。

（1）FR-4、钢片、PI 等补强及 3M 胶尽量不要贴在有元器件这面。

（2）SMT 前贴胶纸需选用 3M 9077，过 SMT 后胶纸起泡、收缩或离型纸发黄属正常现象，不影响品质。

（3）芯片两组引脚之间不能设计补强。

（4）如元器件这面一定要做补强，建议补强要避开元器件外壳，并下单备注：SMT 后再贴补强，且接受补强使用 3M 胶来贴。

7. 特殊补强要求

FPC 辅料有很多特殊要求，需要标示清楚，且下单需要备注，具体如下。

（1）3M 胶有撕手位要求。

（2）补强有一半需要除胶（补强带手提位）。

（3）补强上需要背胶。

（4）同一位置双面都需要贴补强。

（5）两种补强是叠加的。

以上特殊要求在生产中都比较麻烦，尽量不要设计，否则会增加成本。

8. 电磁膜设计要求

电磁膜是用来屏蔽电磁干扰的，厚度为 18μm，颜色为黑色。增加电磁膜，阻抗会降低 20Ω 左右。如果干扰不是特别大，建议谨慎使用，如果阻抗管控不好，反而会影响信号。

（1）电磁膜一般要求接地，不接地会吸收大量电磁波，导致信号传输异常。

（2）电磁膜接地是指在地铜对应的阻焊窗上增加直径 1.0mm 以上的阻焊窗，最少 2 个。

（3）电磁膜是导体，离焊盘需要有 0.5mm 以上的距离。

（4）如果是局部贴电磁膜，需要标示好贴合的区域。

10.4.6 外形设计

外形是指板子最终需要切割的形状，含板外框及板内槽孔。FPC 样品及小批量采用激光切割，理论上外形设计不受限制，但要注意以下几点。

（1）外形层必须唯一，一般用 GM1 或 GKO 表示，两者只能保留一个。

（2）板内非金属化孔圆环或槽的框线也需要放在外形层。

（3）外形层不能放任何杂线。

（4）FPC 外形不能有内直角或尖角，且必须闭合，不能断开。

（5）板子宽度小于 2mm 的，切割后会卷起来，需要使用微黏膜固定出货，并且会有碳粉残留现象。

（6）焊盘与外形线距离不小于 0.2mm，否则需要接受激光碳粉问题或改为模冲。

10.4.7　拼板设计

1. FPC 拼板设计要求

（1）宽度尽量设计为 120mm 或 250mm，尽量拼双数，方便开模。

（2）拼板间距：板与板间距一般为 2mm，有钢片补强的间距建议为 3mm，板与板间距要一致。

（3）FPC 不支持邮票孔和 V 割工艺。FPC 拼板是用 0.8mm 左右宽度的连接点来连接的，除连接点外，其他外形全部采用切线的方式割开。客户在使用时可以采用刀片分割连接点或手撕的方式分板。如果采用手撕方式分板，建议增加防撕裂线。

（4）工艺边宽度为 5mm，正常四边都要加，如不加工艺边，下单时要备注。

（5）拼板最大尺寸为 250mm×600mm，最小尺寸为 70mm×70mm。

（6）工艺边需要有定位孔和 Mark 点。

（7）尽量不要把两个不同的板拼在一起，否则会影响贴片效率。

2. 防撕裂线设计

防撕裂线是指在连接点处对应的线路层增加一个小铜线，预防分板时撕坏板。因为防撕裂线是增加在线路层的，所以需要评估对原有线路是否有影响。如果需要嘉立创帮助增加防撕裂线，下单时需要备注，并确认生产稿中所加的位置是否可以，如图 10-81 所示。

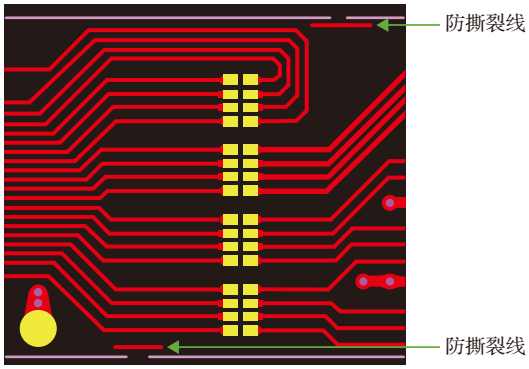


图 10-81　防撕裂线

3. 连接点设计

FPC 连接点宽度要根据板尺寸、是否做 SMT、是否有钢片或厚 FR-4 来决定。

（1）SMT 的板连接点宽度一般设计为 0.8mm，连接点不能加在半孔或金手指焊盘位置。

（2）非 SMT 的板连接点宽度一般设计为 0.25 ～ 0.3mm，每 PCS 增加 2 ～ 3 个连接点（下单时最好备注一下）。

（3）连接点没有特别要求时可让嘉立创来添加。

4. 小尺寸板设计要求

单板尺寸较小时，产线生产会比较麻烦，建议拼板制作。

（1）FPC+SMT 的板最小尺寸要求为 70mm×70 mm，小于此值，需要拼板或补工艺边达到这个尺寸。

（2）单板尺寸小于 50mm×50mm 的，建议拼板生产，异形板可以在下单时选择嘉立创帮拼。

（3）尺寸小于 10mm×10mm 的，必须拼板，或选择微黏膜出货。

第 11 章 / 嘉立创 EDA 快速入门

11.1 嘉立创 EDA 设计入门

嘉立创 EDA 软件为纯中文界面，页面简洁，宣传口号为“两小时入门，两天精通”，操作简单易上手。下面将围绕开发环境介绍、新建元件、原理图设计及电路 PCB 设计四个方面，详细介绍嘉立创 EDA 软件的使用方法。

11.1.1 开发环境介绍

嘉立创 EDA 软件可以直接通过浏览器访问使用，也可以下载客户端版本，支持 Windows、Linux 和 Mac 多个版本的客户端（见图 11-1），安装包小于 200MB，下载安装方便快捷。

浏览器在线使用地址：https：//pro.lceda.cn/editor。

客户端下载地址：https：//lceda.cn/page/download。

图 11-1　嘉立创 EDA 软件下载页面

嘉立创 EDA 软件提供了多个版本，包括浏览器在线版本、客户端版本以及私有部署版本，如图 11-2 所示。浏览器在线版本需要连接网络使用，而客户端版本支持全在线模式、半离线模式及全离线模式，私有部署版本则是为企业量身定制的，可满足客户不同应用场景的需求。

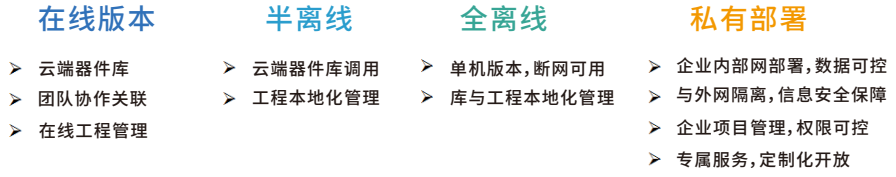


图 11-2　嘉立创 EDA 软件版本介绍

打开嘉立创 EDA 专业版编辑器页面，可以在右上角登录嘉立创账号（嘉立创集团内账号通用）。通过顶部菜单栏可以选择文件的打开与导入导出、系统设置、快捷键设置以及原理图、PCB 设置等功能。左侧工程列表展示个人以及团队工程项目，通过快捷入口可以对软件功能进行快速操作。同时，主页还支持自定义快捷方式，输入快捷方式的地址与图标即可自由定义。嘉立创 EDA 专业版编辑器主页如图 11-3 所示。

图 11-3　嘉立创 EDA 专业版编辑器主页

在对系统进行设置时，可以按照个人操作系统修改系统配色属性、图纸、快捷键与工具栏等内容，如图 11-4 所示。选择设置的对象后，单击底部的“应用”按钮即可保存当前设置，单击“确认”按钮即可保存所有设置并关闭当前设置窗口。软件支持将个人的配置文件导出，其他设备选择导入配置，方便对设置参数的迁移。

11.1.2　新建元件

学习 PCB 设计首先需要了解元件库的组成结构。在设计 PCB 时，必不可少的两个要素是元器件的符号与封装，此外还可以为封装匹配 3D 模型，便于整体 PCB 的效果预览。

图 11-4　嘉立创 EDA 专业版配置页面

1. 新建元件

选择快速开始区域中的“新建元件”图标（见图 11-5），器件类型选择“元件”（见图 11-6），输入元件名称，根据元件种类选择分类，然后单击“保存”按钮进入元件编辑页面。

图 11-5　“新建元件”图标

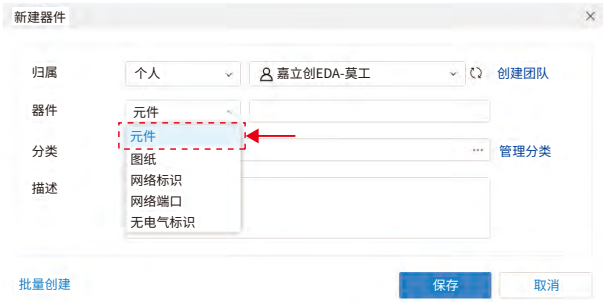


图 11-6　新建器件窗口

使用绘图工具绘制元器件符号样式，放置元器件引脚。可在符号左侧查看元件属性，修改器件位号等信息。引脚长度可随意修改，为保持元件库的规范性，网格大小建议保持为

0.05inch（英寸），使引脚端点在网格格点上，引脚固定后可修改网格大小，微调其他元素位置和大小，如图 11-7 所示。

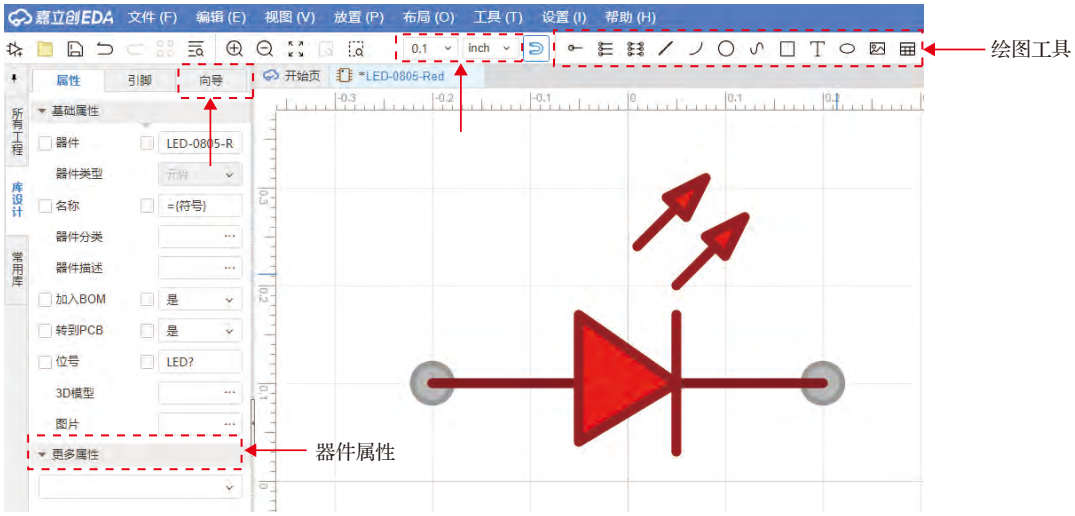


图 11-7　新建器件窗口页面

单击引脚，可以在右侧属性栏中修改引脚的名称、编号、类型、形状、长度和颜色等信息，如图 11-8 所示。如果是闭合图形，还可以选择内部填充颜色，如内部填充为红色的 LED 灯符号。

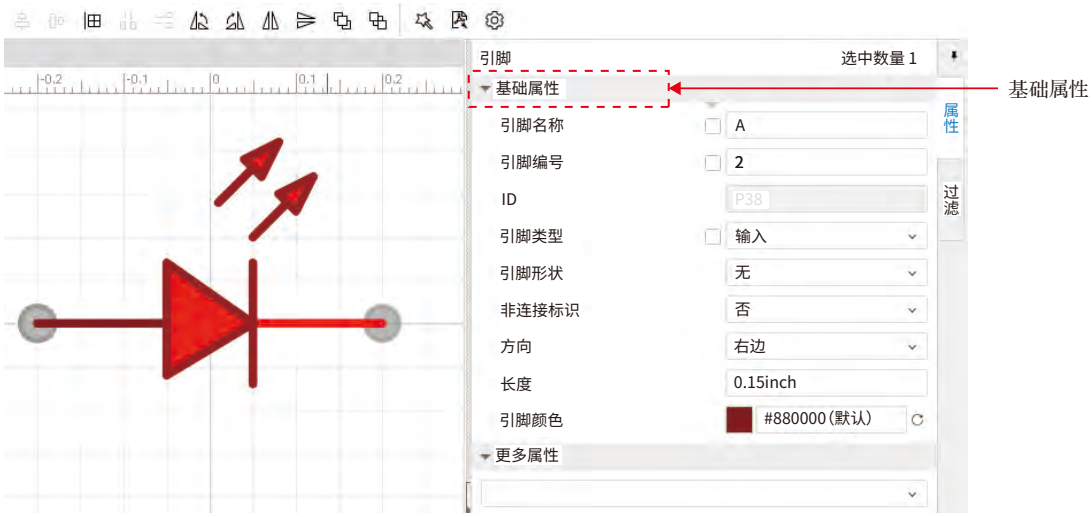


图 11-8　引脚属性修改

在绘制一些复杂元器件的符号时，嘉立创 EDA 还支持规格书提取功能，只需框选规格书或图片中的符号图片，即可识别器件符号，实现快速画库的功能，如图 11-9 所示。

2. 新建封装

元器件符号创建后，可以单击左侧封装栏位置进入“封装管理器”页面，搜索嘉立创 EDA 百万元件库中满足该器件的封装，可以直接搜索绑定，如图 11-10 所示。

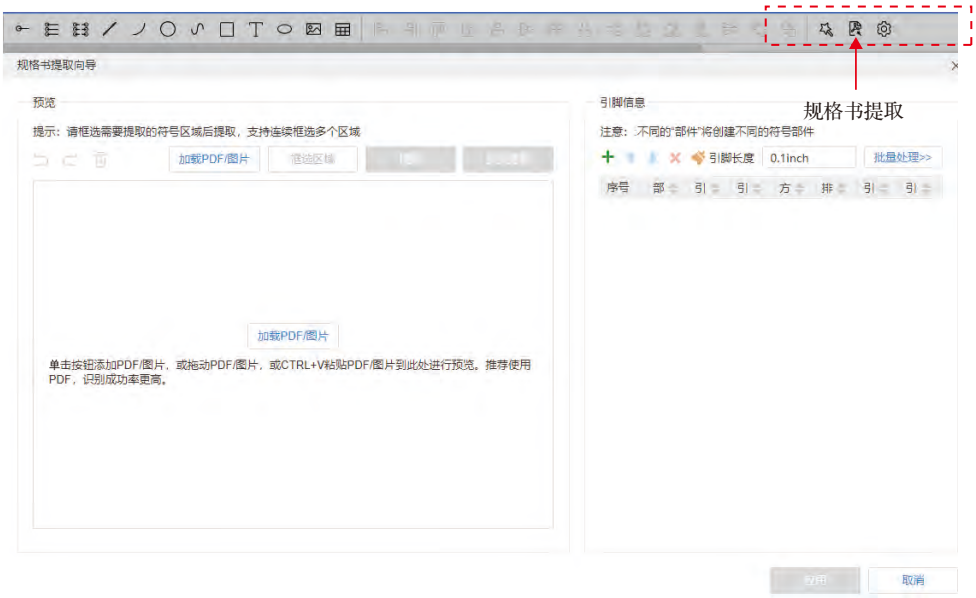


图 11-9　规格书提取窗口

图 11-10　封装管理器绑定页面

如果官方库中没有满足的封装，可以结合数据手册新建一个器件封装。单击页签行中的“开始页”选项，选择快速开始的“新建封装”图标，进入新建封装页面，如图 11-11 所示。

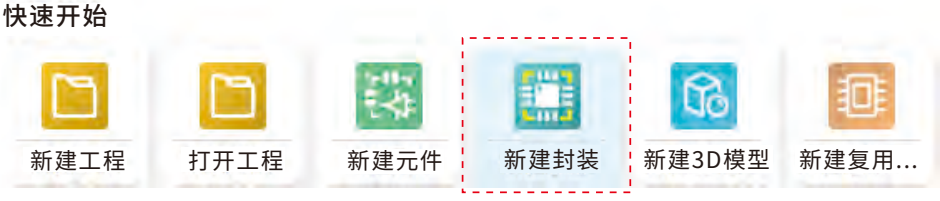


图 11-11　“新建封装”图标

输入封装名称，进入封装编辑窗口，从顶部菜单栏中选择“放置”选项，选择“焊盘”，默认为单层焊盘，如图 11-12 所示。如需改为多层焊盘，只需单击焊盘，在右侧焊盘属性中修改图层与大小等参数信息，如图 11-13 所示。

图 11-12　放置焊盘

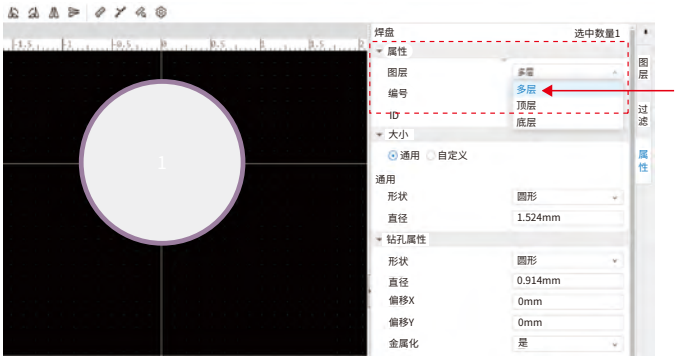


图 11-13　焊盘属性修改

例如，要绘制一个 0805 尺寸的 LED 贴片封装，只需将多层焊盘改为单层，形状改为矩形，宽高尺寸修改为 1mm×1.25mm，放置两个一样的焊盘。注意焊盘的位号与元件符号保持一致，使用顶层丝印层绘制 LED 丝印信息，两个焊盘的间距可以使用智能尺寸工具调整为 2.200mm。智能尺寸工具如图 11-14 所示。设计完成后，还可以使用尺寸检查工具对所设计的封装尺寸进行规格检查，如图 11-15 所示。

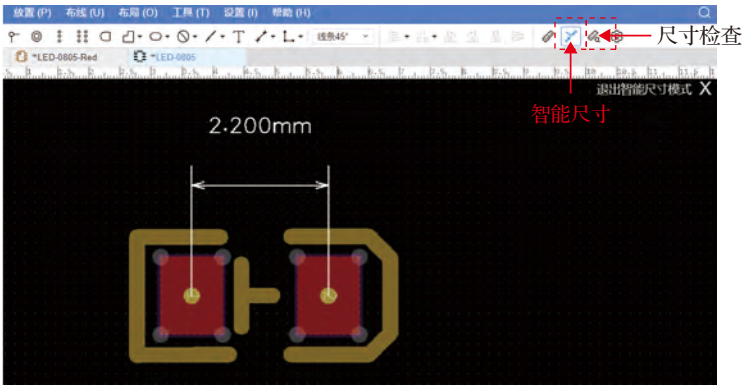


图 11-14　智能尺寸工具

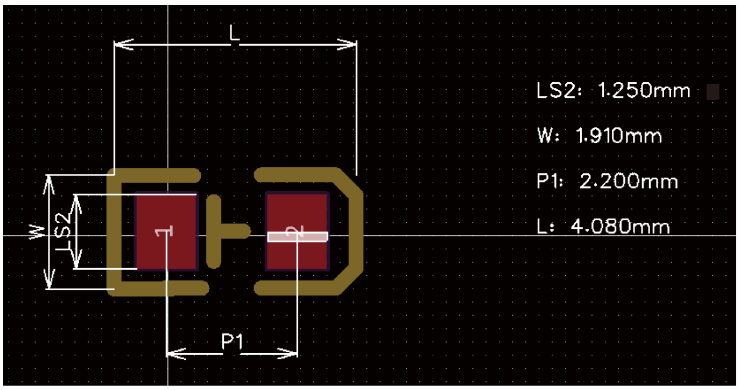


图 11-15　尺寸检查工具

除常规设计方法外，嘉立创 EDA 还支持向导设计功能。在左侧列表中单击“向导”，选择常见封装规格模板，根据不同的模板结合给出的图示对封装焊接尺寸大小与间距进行设置，如图 11-16 和图 11-17 所示。

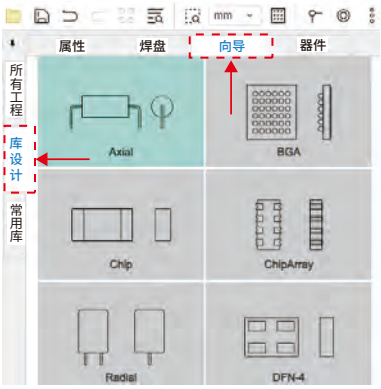


图 11-16　封装向导功能

图 11-17　向导参数选择与设置

3. 3D 模型绑定

3D 模型可以使 PCB 设计更为具象化。嘉立创 EDA 软件内置了海量的 3D 模型库，用户可以直接在封装设计窗口进入 3D 模型管理器搜索满足需求的 3D 模型进行绑定，也可以自行导入设计好的模型文件保存到个人库后进行绑定，如图 11-18 所示。

单击“3D 模型”后面的空白文本框，进入“3D 模型管理器”窗口，输入 3D 模型名称，在官方库或系统库中找到满足该器件的 3D 模型，可直接进行绑定；在右侧校准属性中调整尺寸大小信息，使模型合理地放置在 PCB 器件焊盘位置，如图 11-19 所示。

11.1.3　原理图设计

电路原理图设计的基本流程：新建工程→元器件搜索→电路连接→规则检查。

1. 新建工程

打开嘉立创 EDA 专业版软件编辑器，选择快速开始板块的“新建工程”图标，选择工程归属，输入工程名称，完成工程文件的创建，如图 11-20 所示。

图 11-18 “新建 / 修改器件”对话框

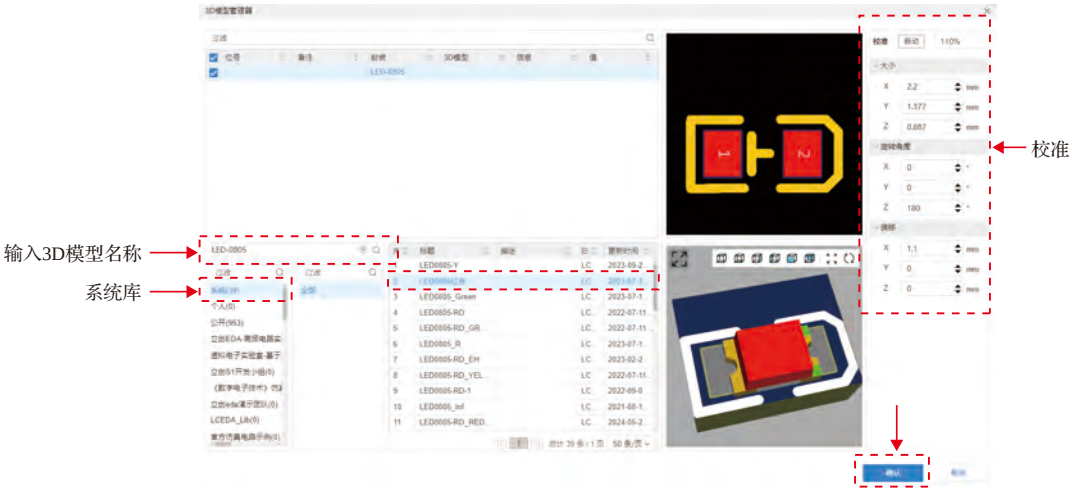


图 11-19 “3D 模型管理器”对话框

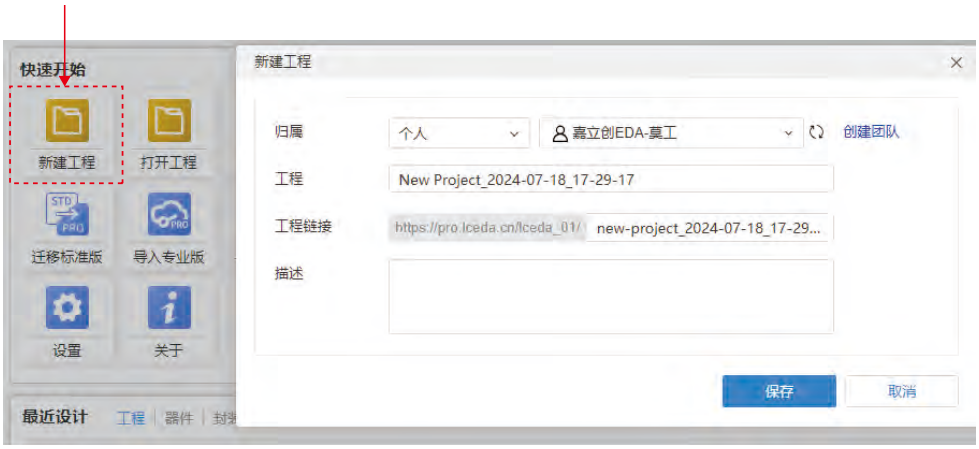


图 11-20 “新建工程”对话框

工程新建完成后会自动创建工程列表，默认创建了一个 PCB 文件 Board1。可根据需要新增 PCB 文件，每个 PCB 文件分别包含一个 Schematic1 和一个 PCB1 文件，如图 11-21 所示。

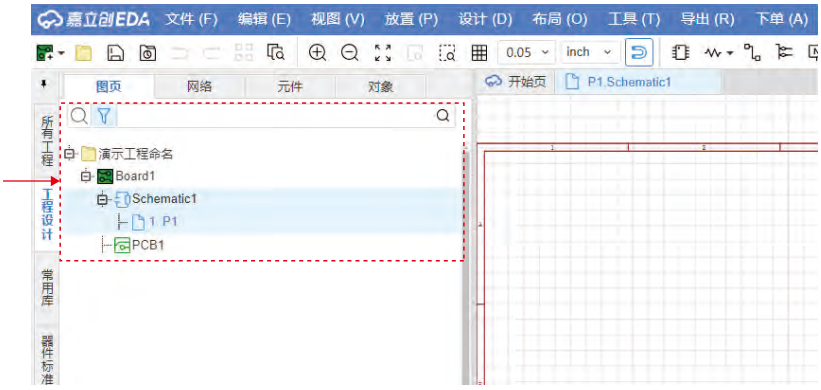


图 11-21　工程设计图页面

2. 元器件搜索

嘉立创 EDA 拥有超过 400 万个不断新增的元件库，可以让工程师专注于设计本身，而不再将时间花费在烦琐重复的画库工作中。嘉立创 EDA 拥有专门的画库团队，为立创商城所有元器件物料提供专业的符号、封装以及 3D 模型库，同时免费为用户提供画库服务。只需要提供器件规格书，工程师就可以安排绘制库文件。

嘉立创 EDA 提供了三种放置元件库的方式：左侧常用库、底部面板以及顶部放置器件。

1）左侧常用库

左侧常用库分为个人常用库和系统默认库。系统默认库为软件自带，可通过下拉选取不同封装的元件。用户可根据个人设计喜好添加个人常用库，在设置菜单栏中选择“常用库”选项，创建常用库分类，输入器件分类。在对应列表里添加器件名称，可以在组合栏输入相同名称即可将多个器件合并并通过下拉列表选择，单击“应用”按钮即可在左侧常用库中查看，如图 11-22 所示。

图 11-22　常用库设置

2）底部面板

通过展开底部面板，可以对元器件进行搜索。在搜索栏输入器件名称，即可准确搜索到符合条件的器件。选中器件后，右侧预览窗口还会显示该器件的符号、封装、实物图以及 3D 模型图，便于开发者进行元器件选型和设计，如图 11-23 所示。

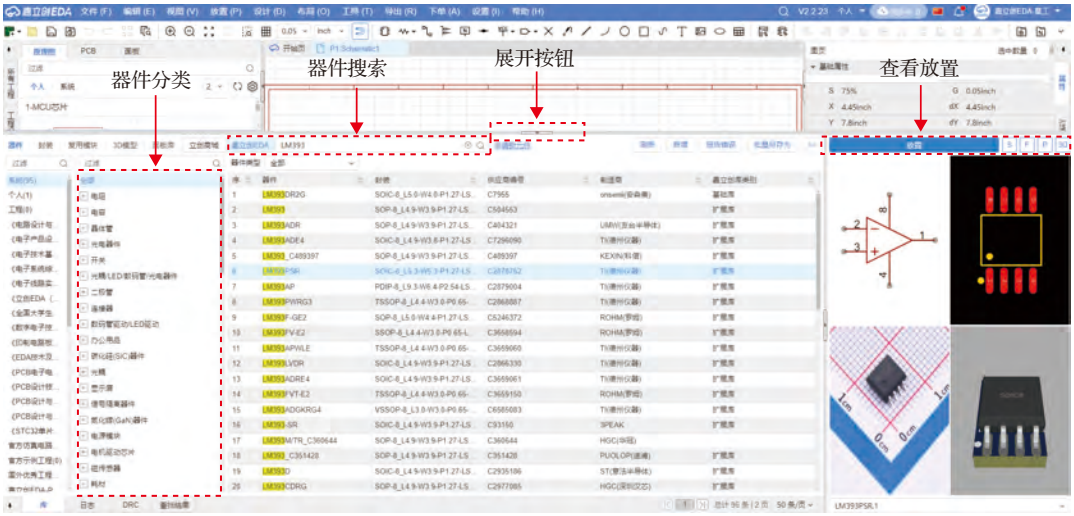


图 11-23　底部面板窗口

3）顶部放置器件

如果在设计选项时需要查看元器件的数据手册与价格信息，可以在顶部菜单栏列表执行“放置”→“器件”命令，也可以选择顶部工具栏中的器件图标进入器件放置窗口，输入搜索芯片名称，即可调取立创商城上的器件详情进行选型，如图 11-24 所示。

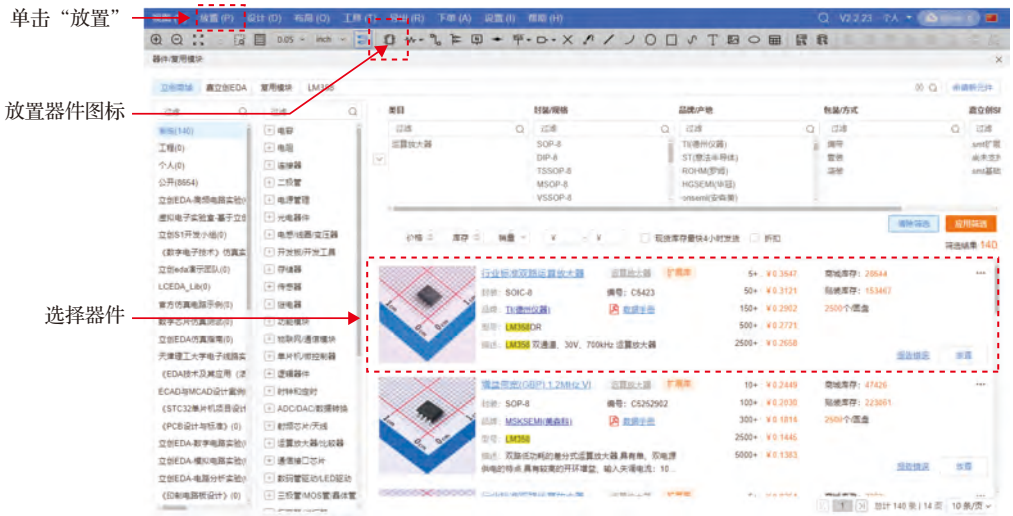


图 11-24　顶部放置器件窗口

3. 电路连接

元器件放置完成后，按照正确的电路使用顶部工具栏中的导线、总线、网络标签等工具

对元器件进行连接，完成电路原理图的连接设计，如图 11-25 所示。

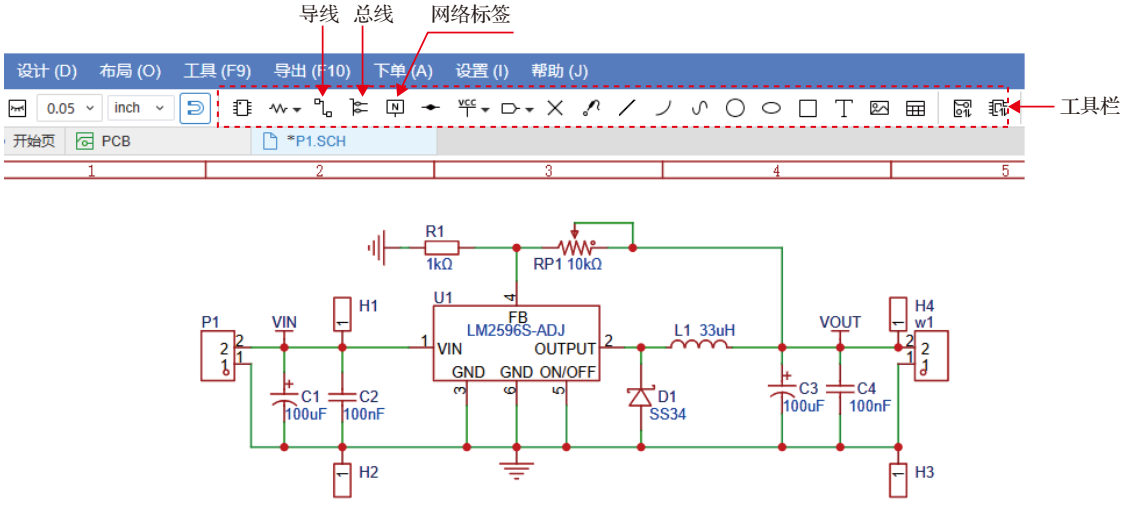


图 11-25　原理图连接

4. 规则检查

在顶部菜单栏中执行“设计”→“设计规则”命令，可以通过对原理图设计规则进行设置，检查原理图中是否有引脚悬空、不同网络连接到一起短路以及多部件器件的检查等相关问题，保障原理图设计的准确性，如图 11-26 所示。设计规则中的消息等级可以结合实际设计需求进行选择。致命错误和错误一般会严重影响电路功能，而警告则需检查电路是否有误，视情况可忽略警告。

设计规则

序号	检查项	设计规则	消息等级
1	网络	总线名需要符合规则：大写英文字母，数字与可见的ASCII字符+[后缀起始值结束值]，如BUS[0:5]	致命错误
2		网络名需要符合规则：大写英文字母，数字与可见的ASCII字符	致命错误
3		网络名不能超过255个字符	错误
4		通过总线分支跟总线相连的导线，必须有名称且符合所连总线的命名规则	致命错误
5		元件相同引脚编号的引脚需要链接到同一个网络	致命错误
6		网络标识，网络端口需要有名称	错误
7		网络标识，网络端口含有“全局网络名”属性时，所连导线的名称需要与“全局网络名”的值一致	错误
8		引脚的连接端点不能重叠且未连接	致命错误
9		导线不能是游离导线（未连接任何元件引脚）	警告
10		导线不能是独立网络的导线（仅链接了一个元件引脚）	致命错误
11		网络端口名称需要与所连接导线的名称一致	提醒
12		全局网络名不应该短接	警告
13		网络端口名称需要与所连接总线的名称一致	提醒
14		网络标签、网络标识、网络端口、短接符需要连接导线或总线	提醒
15		导线和总线未连接网络标识或网络端口时，名称需要显示在画布	提醒
16		元件需要有“器件”“封装”属性，不能为空	致命错误
17		元件如果有“值”属性，不能为空	提醒

导入配置　导出配置　恢复默认　立即校验　确认　取消

图 11-26　设计规则设置

11.1.4　电路 PCB 设计

原理图设计无误后，在顶部菜单栏中执行“设计”→“从原理图导入变更”命令，将元器件封装更新至 PCB 设计页面进行布局走线。

1. 边框设计

为方便 PCB 制造商识别 PCB 外形，嘉立创 EDA 专门提供了板框层图层。在顶部菜单栏中执行“放置”→“板框”命令。板框默认形状有矩形、圆形以及多边形，软件也支持导入其他软件设计的 DXF 文件作为板框。板框的大小可根据实际元器件布局随意修改。板框放置如图 11-27 所示。

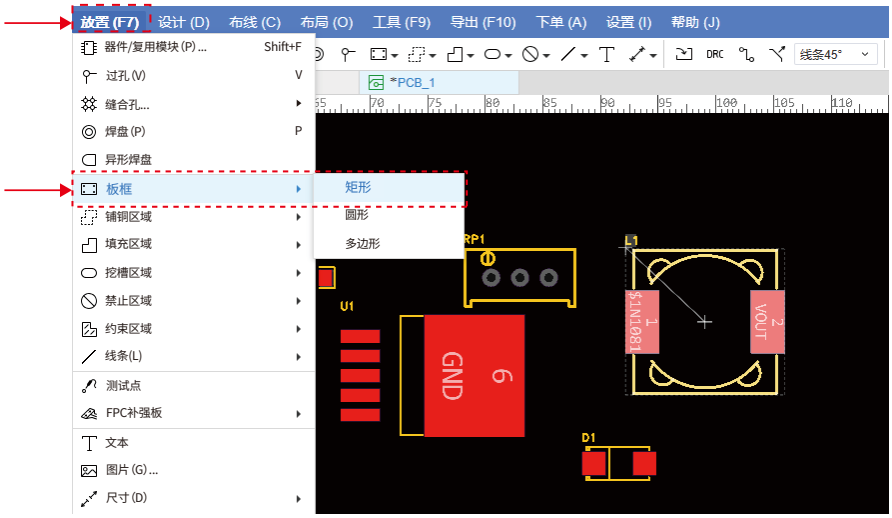


图 11-27　板框放置

2. PCB 布局

原理图生成 PCB 后，各个元器件的摆放随意。可结合实际的电气连接情况，对器件封装进行合理布局摆放。PCB 布局前如图 11-28 所示，PCB 布局后如图 11-29 所示。

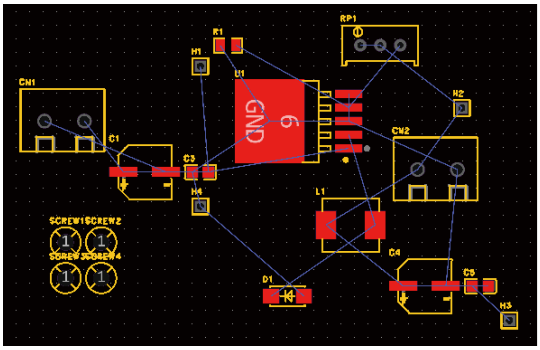


图 11-28　PCB 布局前

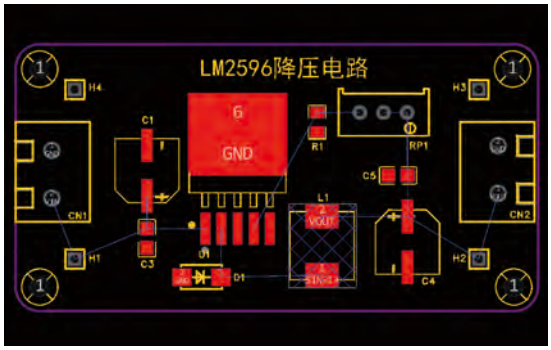


图 11-29　PCB 布局后

以下是一些布局小技巧。

- 根据电源走向及主控与外围器件引脚连接进行布局摆放。
- 按模块划分，遵循“先大后小，先难后易”的原则。重要电路先放置，最后放置其他电路。
- 特殊器件需单独处理，如高频器件、发热器件等。
- 做好电气隔离，常见的有高低压隔离、模拟数字隔离、高低频隔离等。
- PCB 布局应保证走线尽可能短、直，电源滤波电容紧靠芯片摆放。

- 连接器接口需靠边放置，保证实际使用时的可操作性，便于安装调试。

3. PCB 布线

布局完成后，在顶部菜单栏执行“布线”→“单路布线”命令，将相同网络的焊盘连接起来。走线时可按键盘上的“Tab”键修改导线大小。在顶部菜单栏执行“设计”→“设计规则”命令，可以对 PCB 安全间距、走线规则、铺铜规则等进行设置，如图 11-30 所示。

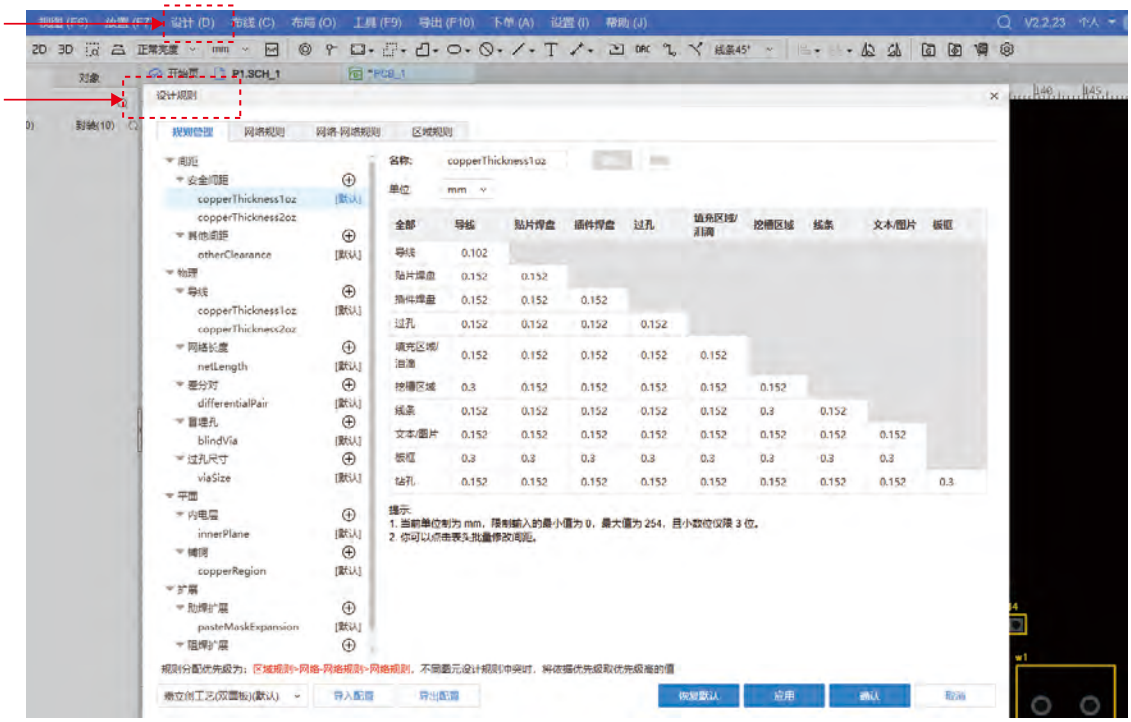


图 11-30　PCB 规则设置

使用大面积走线时，可以使用放置铺铜功能，也可以使用实心填充替换导线对相同网络进行连接。使用铺铜工具时，软件会自动识别边框，只需将普通框包围 PCB 即可实现板内铺铜功能。多边形填充示意图如图 11-31 所示，铺铜示意图如图 11-32 所示。

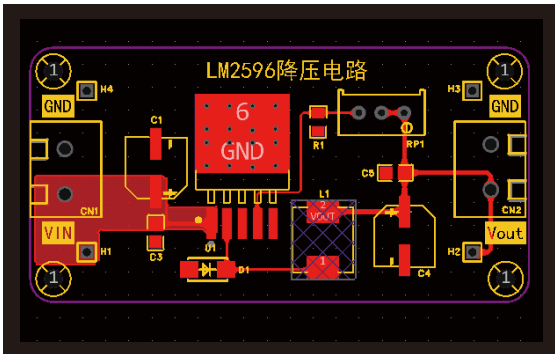


图 11-31　多边形填充示意图

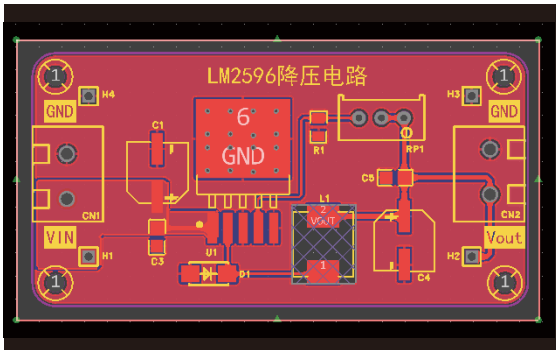


图 11-32　铺铜示意图

完成 PCB 设计后，可使用软件提供的 2D 预览及 3D 预览功能进一步查看板子布局走线

的合理性。2D 预览效果图如图 11-33 所示，3D 预览效果如图 11-34 所示。

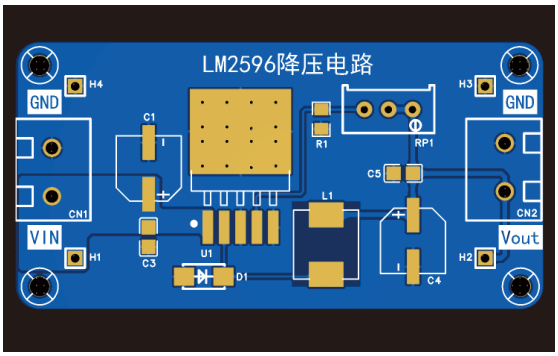


图 11-33　2D 预览效果图

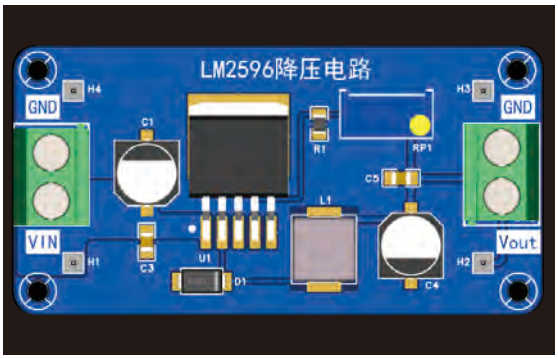


图 11-34　3D 预览效果图

走线小技巧：

- 走线长度尽量短，走线沿焊盘方向引出。
- 走线过程中避免出现一端浮空走线，以防止天线效应。
- 电源滤波去耦电容的走线应确保电流先流进电容滤波，然后再向器件供电。
- 在 PCB 走线时，电源线和地线的宽度应尽量加宽。通常，地线 > 电源线 > 信号线。
- PCB 设计中应尽量避免锐角和直角，以减少不必要的辐射干扰。
- 在设计走线时，应确保信号线与其回路面积尽可能小，遵循最小回路原则。

设计完成后，还需对 PCB 进行如下检查和优化。

- 元器件编号和名称：确保元器件的编号和名称标记准确，避免焊接错误。
- 丝印检查：检查丝印是否清晰，摆放是否统一，接口引脚是否用丝印标记清楚。
- 关键电路布局：对关键电路和信号进行最佳布局和走线，如走线最短、电气隔离等。
- 走线优化：对不理想的走线进行调整，检查电源线电流流向是否合理。
- 线宽间距检查：检查线宽和间距是否符合设计要求，确保焊盘与走线、焊盘与焊盘之间无干扰。
- DRC 检查：在导出 Gerber 文件前，对整体进行设计规则检查（DRC）及预览，添加项目名称、logo 和版本等信息。

4. 特色功能

嘉立创 EDA 专业版提供了大量高阶功能，除基础的单路布线外，软件还支持差分对布线、等长调节、多路布线以及扇出布线等功能，如图 11-35 所示。

在嘉立创 EDA2.2 版本后，软件提供了页面分区功能。通过视图菜单中的“窗口排列”选项，可将当前页面分为水平平铺或垂直平铺，实现原理图和 PCB 同屏查看，如图 11-36 所示。

为了帮助开发者进行元器件焊接，可在顶部工具栏中选择焊接辅助工具，打开焊接工具助手，如图 11-37 所示。该助手可帮助查看元器件位置，并可将页面导出为离线 html 格式文件，方便在智能手机与平板电脑上查看。

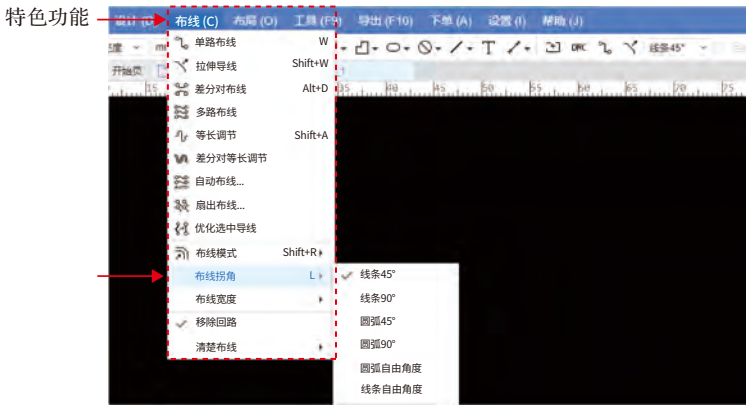


图 11-35　布线功能列表

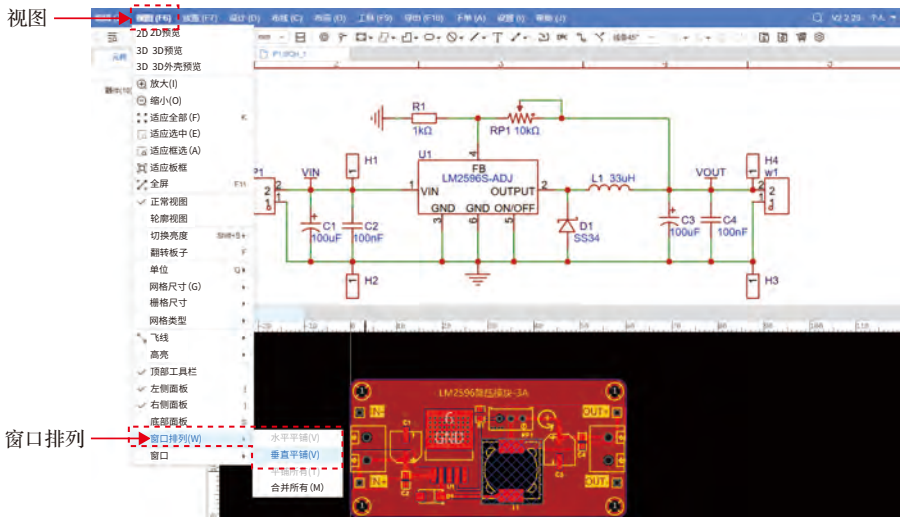


图 11-36　窗口排列示意图

图 11-37　焊接辅助工具

11.2 嘉立创 EDA 特色功能

11.2.1 FPC 软板设计

嘉立创 EDA 专业版支持 FPC 补强板的绘制，结合嘉立创 PCB 下单系统，可以方便接入 FPC 设计文件，减少人工确认过程，降低出错率和时间成本。以下是 FPC 补强板绘制步骤。

1. PCB 设计

按常规 PCB 进行绘制，设计好原理图、PCB 和安装设计要求，完成 PCB 设计，如图 11-38 所示。FPC 软板本质上是一种特殊的 PCB，主要区别在于材料，因此设计过程类似。

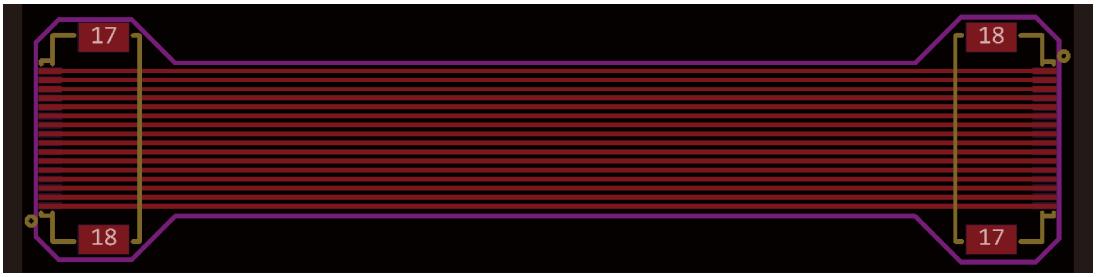


图 11-38　PCB 设计

2. 放置补强

FPC 设计的关键在于补强的放置。在顶部菜单栏中执行“放置”→“FPC 补强板”命令，或导入 DXF 图转换为补强区域，如图 11-39 所示。

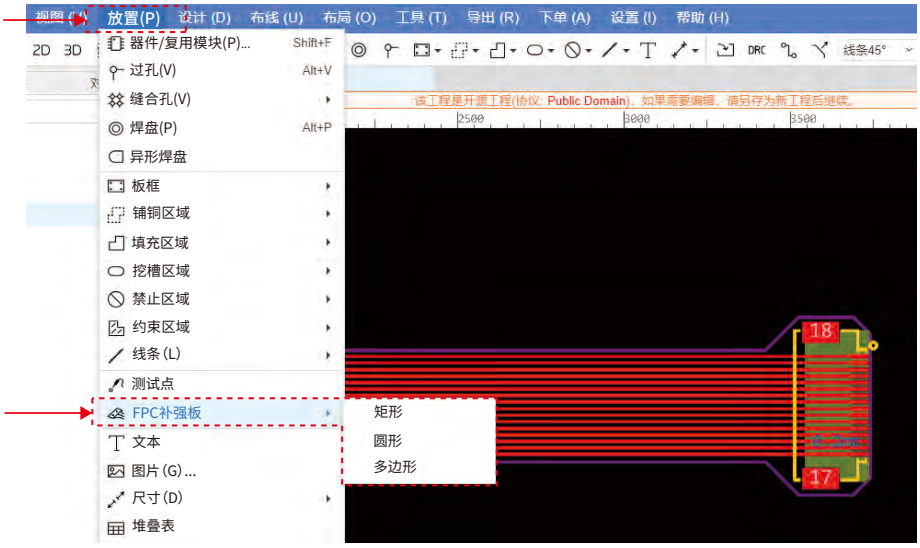


图 11-39　放置 FPC 补强板

设计特殊补强形状时，可使用软件提供的布尔运算功能。当对两个包含关系的补强矩形进行布尔运算时，选中两个补强结构后，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择“布尔运算”

中的“减去顶层区域”选项，即可对小矩形内部进行挖空，如图 11-40 所示。

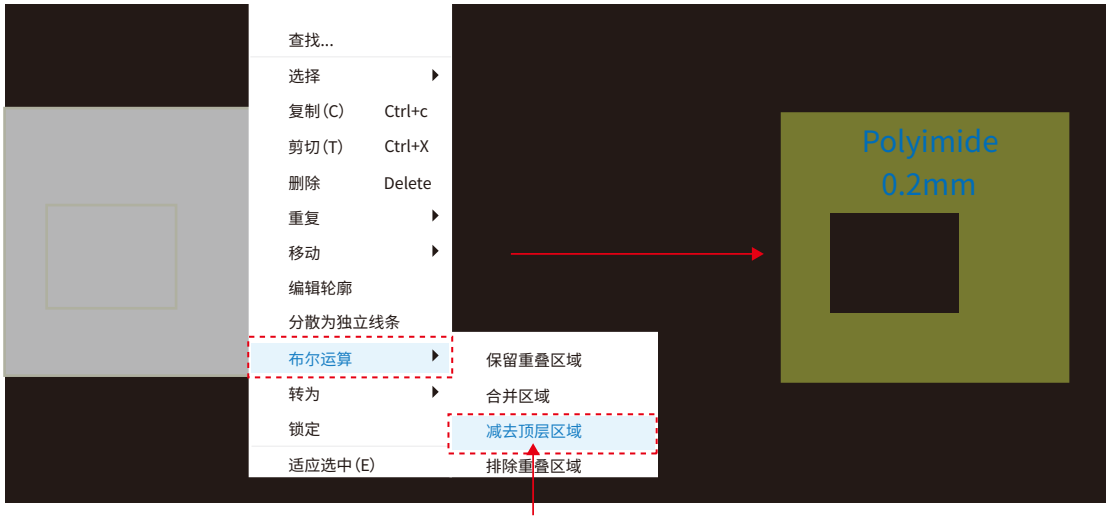


图 11-40　使用布尔运算功能挖空补强区域

3. 设置补强属性

放置补强后，选中补强图层，在右侧属性面板设置材质（如 PI、钢片、3M 双面胶、电磁屏蔽膜等）及厚度 / 型号，如图 11-41 所示。

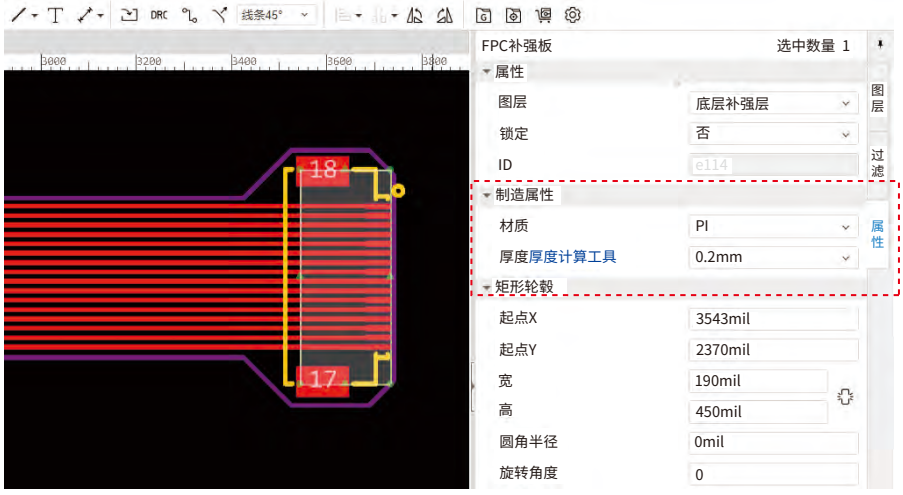


图 11-41　FPC 补强板属性面板

4. 2D/3D 预览

完成 FPC 设计后，可直接查看 2D 预览或 3D 预览，以检查设计情况，如图 11-42 所示。

5. FPC 下单

设计核对完毕后，导出 Gerber 文件，或者直接选择顶部菜单栏的“PCB 下单”选项，一键转到嘉立创平台进行下单。FPC 下单时，板材选择“FPC 软板”，如图 11-43 所示。

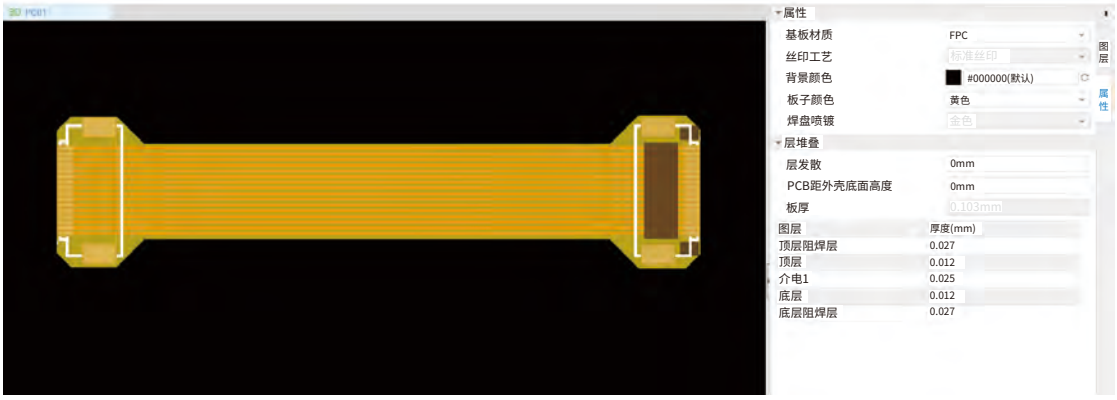


图 11-42　FPC 3D 预览窗口

图 11-43　FPC 下单板材选择

使用嘉立创 EDA 设计的 FPC 板无须备注补强方式，直接按照嘉立创 EDA 中的设计文件生产。但如果是其他 EDA 软件设计的文件，由于软件不支持设计补强板，下单时需要以图片或在 Gerber 文件中说明补强材质、厚度及区域，如图 11-44 所示。

补强图三要素：材质、厚度、区域

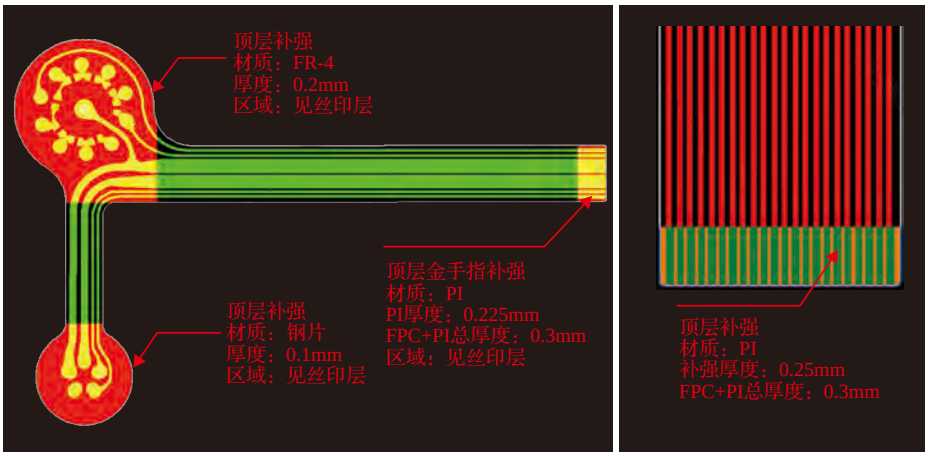


图 11-44　非 EDA 软件补强标识方法

补充说明：

- 同一块板上支持相同补强材质的不同厚度及不同种类的补强。补强价格与补强面积

和数量有关，超出部分会增加相应费用。

- 补强厚度指补强材料的厚度，补强区总板厚为 FPC 厚度加上补强材料厚度。
- PI、FR-4、钢片、3M 胶如果原稿没有避开开窗焊盘，嘉立创默认用焊盘掏开单边 0.3mm 处理，掏开后补强宽度不够 2mm 的会开通窗处理，有特殊要求下单时请备注。

11.2.2　彩色丝印设计

常规 PCB 只有一种丝印颜色，嘉立创为迎合时代发展推出了彩色丝印生产工艺，实现多彩 PCB 效果。使用嘉立创 EDA 软件可以在 PCB 上放置彩色图片和设置彩色丝印文字。值得一提的是，嘉立创彩色丝印虽然收取彩色工艺费，但是免费提供沉金工艺。以下是彩色丝印设计方法。

1. 打开设置

在设计彩色丝印 PCB 时，首先在顶部菜单栏中执行“设置”→“PCB/ 封装”→“通用”命令，勾选“使用嘉立创彩色丝印工艺”，单击“应用”按钮，如图 11-45 所示。

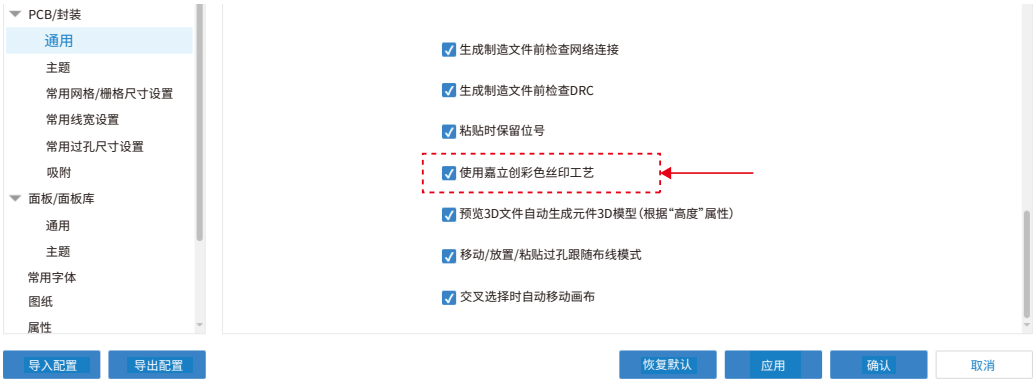


图 11-45　设置使用嘉立创彩色丝印工艺

2. 放置图片

开启彩色丝印功能后，在顶部菜单栏中执行“放置”→“图片”命令，选择一张 PNG 或 JPG 格式的彩色图片，勾选“放置原图”，即可导入彩色图片，如图 11-46 所示。

图 11-46　导入彩色图片

3. 丝印设置

软件除支持导入彩色图片外，还支持自定义修改丝印颜色。选中丝印后，可在右侧属性面板中修改丝印颜色，自由配置丝印内容，如图 11-47 所示。

图 11-47　彩色丝印设置

4. 彩色丝印预览

在设计过程中，可以在顶部菜单栏中选择视图工具中的“2D 预览”或“3D 预览”功能，对彩色丝印设计效果进行预览。预览时默认显示为标准丝印工艺，需要在右侧属性面板中将丝印工艺修改成彩色丝印，即可看到彩色丝印效果，如图 11-48 所示。

图 11-48　彩色丝印 3D 预览效果图

5. 彩色丝印下单

完成彩色丝印 PCB 设计后，导出 PCB 制板文件时，需勾选“生成彩色丝印制造文件（嘉立创专用）预览彩色丝印”，否则打板文件将不会有彩色丝印。可直接选择“PCB 下单”一键下单，或“导出 Gerber”，在嘉立创 PCB 下单网站或嘉立创下单小助手提交 Gerber 文件打板，如图 11-49 所示。

图 11-49　彩色丝印 Gerber 文件

在嘉立创下单彩色丝印文件时，阻焊颜色选择“白色”，焊盘喷镀选择“沉金”，沉金厚度为 1μm，字符工艺选择“嘉立创 EDA 彩色丝印”，如图 11-50 和图 11-51 所示。

图 11-50　彩色丝印工艺参数选择

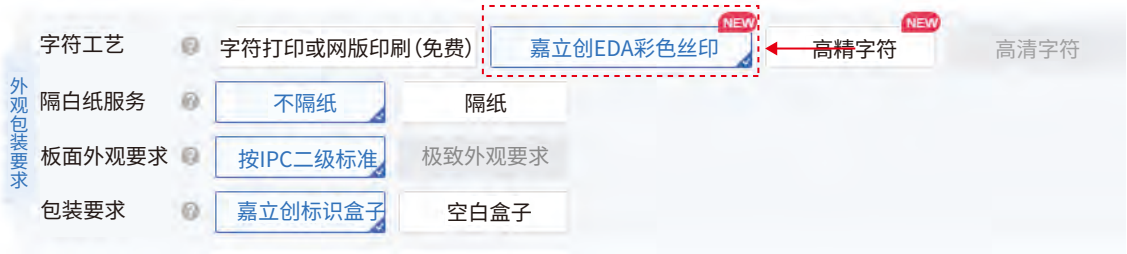


图 11-51　彩色丝印字符工艺选择

补充说明：

如果您的彩色丝印板需要嘉立创 SMT 服务，请确保在“拼板”功能中设置工艺边（类型：V 割，创建工艺边：是。拼板后长、宽均大于 7mm）或手动添加工艺边，如图 11-52 所示，否则选择 SMT 服务后，彩色丝印将不会打印。

图 11-52　彩色丝印工艺边设置

11.2.3　3D 外壳设计

嘉立创 EDA 专业版提供 3D 外壳设计功能，适合新手入门学习，不需要任何 3D 设计基础，即可轻松设计出简单精致的 3D 外壳。3D 外壳设计流程如下。

1. 生成 3D 边框

在设计 3D 外壳前，可在右侧过滤属性中将元件、文本等信息过滤，保留边框与 3D 外壳分类下的属性，方便 3D 外壳设计时原电路设计不被选中移动，如图 11-53 所示。

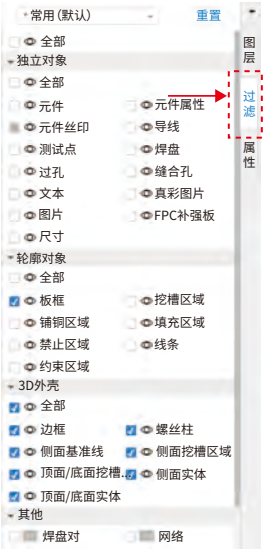


图 11-53　过滤属性选择

3D 外壳的边框可以基于原有 PCB 的板框快速生成，单击选择板框，右键选择“生成 3D 外壳 - 边框”选项，如图 11-54 所示。外扩间距为板子到 3D 边框的距离，可根据实际情况选择，一般为 1 ～ 3mm。除此之外，也可以选择菜单栏的“放置”→“3D 外壳”→“边框”功能，手动绘制任意形状的 3D 外壳。

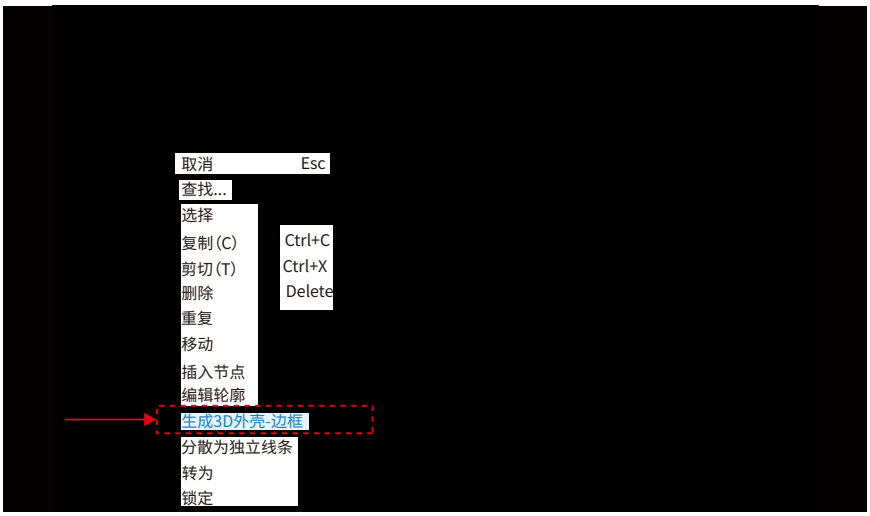


图 11-54　“生成 3D 外壳 - 边框”选项

在菜单栏的“视图”中选择“3D 外壳预览”选项，可以查看带外壳的预览效果图，结合预览图调整 3D 建模参数，如图 11-55 所示。

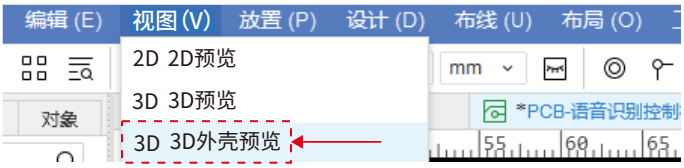


图 11-55　“3D 外壳预览”选项

鼠标选中生成的边框线，在右侧“3D 外壳 - 边框”的“属性”栏中可以修改外壳类型为推拉结构或上下壳结构，以及外壳整体高度、PCB 距外壳面高度、下壳高度等信息，设计出满足需求的外壳结构，如图 11-56 所示。

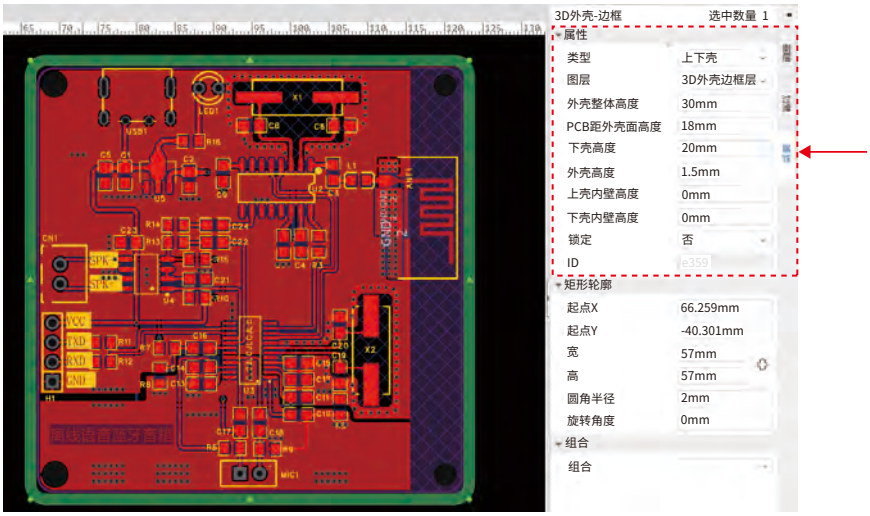


图 11-56　3D 外壳边框属性

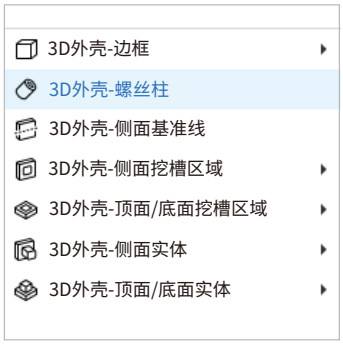


图 11-57　螺丝柱放置

2. 放置螺丝柱

为方便外壳结构与 PCB 的固定连接，软件支持螺丝柱的放置。在顶部菜单栏选择放置工具下的“3D 外壳 - 螺丝柱”功能，在属性栏中设置螺丝柱的规格、图层、高度、通孔直径、壁厚等信息，如图 11-57 和图 11-58 所示。建议螺丝柱加上加强筋，以增加 3D 建模的稳定性，沉头孔设置后将在螺丝背面开孔，用于螺丝的安装。

3. 放置挖槽区域

3D 外壳挖槽分为顶面 / 底面挖槽和侧面挖槽两个选项。对外壳侧面挖槽时，先在挖槽的一侧放置一条基准线，放置时按住键盘上的“Shift”键，使放置的基准线水平笔直；接着选择放置侧面挖槽区域，先选中挖槽面的基准线，然后绘制挖槽形状。而顶面 / 底面挖槽区域则直接放置挖槽区域，在属性栏中改为顶层或底层即可。挖槽区域放置如图 11-59 所示。

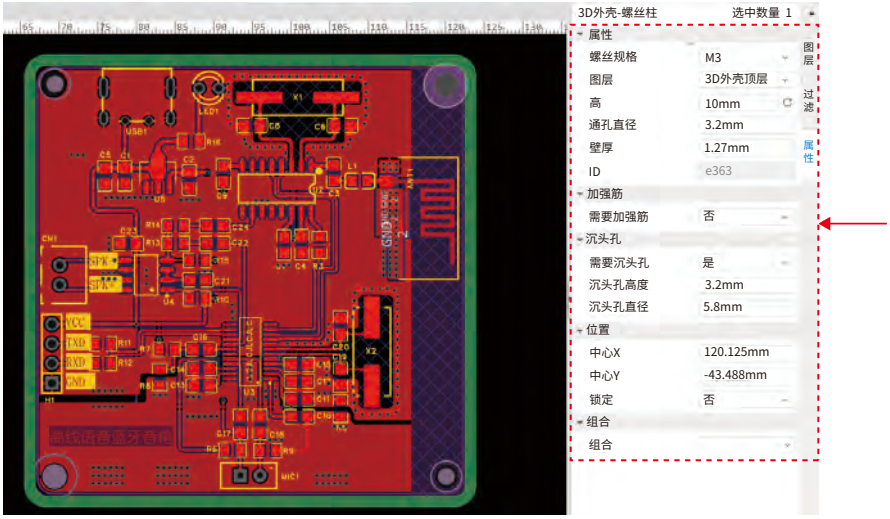


图 11-58　螺丝柱属性

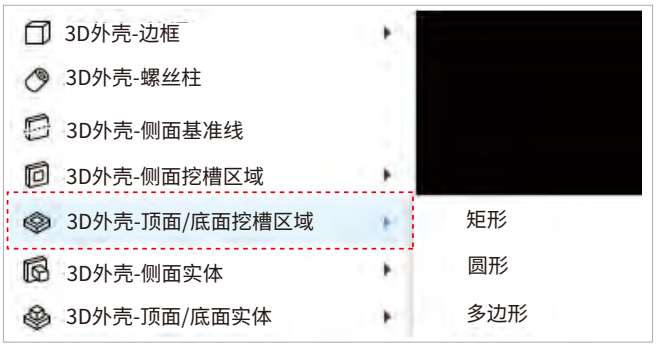


图 11-59　挖槽区域放置

4. 放置实体

实体放置与挖槽功能类似，侧面实体仍需先选中所加实体面的基准线，顶面 / 底面实体可直接添加。

5. 3D 文件导出与下单

设计好 3D 外壳后，可选择导出 3D 外壳文件，格式可选 STL、STEP 和 OBJ，如图 11-60 所示；也可以选择 3D 外壳下单，直接跳转到嘉立创三维猴 3D 下单平台（www.sanweihou.com/）快速下单，如图 11-61 所示。

图 11-60　3D 外壳文件导出

图 11-61　三维猴 3D 下单流程

上传 3D 文件到三维猴 3D 下单系统后，可选择所需的打印参数进行生产打印。当遇到多个文件时，还可进行批量编辑操作，节约下单时间，如图 11-62 所示。

图 11-62　三维候 3D 打印下单参数选择页面

参数选择后预估报价会出现，单击“立即下单”按钮后，工作人员会对生产文件进行审核，审核通过后即可付款进入生产环节。

11.2.4 面板设计

嘉立创 EDA 专业版支持面板设计，不需要使用专业复杂的图形设计软件，即可设计出美观实用的面板。操作简单，所见即所得，旨在让客户设计好图后即可直接在立创商城进行面板生产。

面板不能单独新建，需要新建工程后才能新建面板设计图。在顶部菜单栏中执行“文件”→“新建”→“面板”命令，进行面板设计，面板建好后会自动进入面板设计编辑界面，在此界面绘制面板图形即可，如图 11-63 所示。

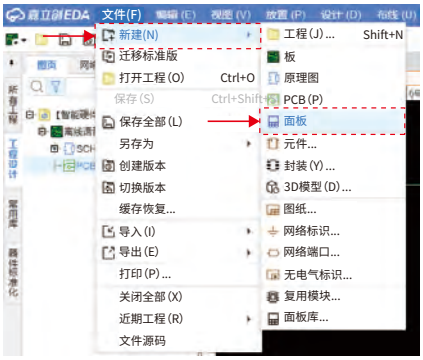


图 11-63　新建面板

面板设计图上的红色边框四个角都有一个矩形框，为板材定位点，用于生产时定位，默认不能修改。设计图中红色的矩形框是立创商城面板打印材料的大小，新建图纸的默认大小是 200mm×300mm，如图 11-64 所示。

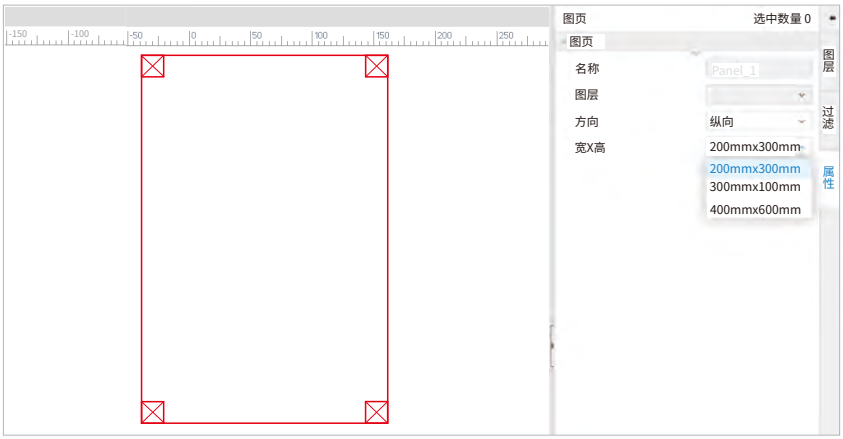


图 11-64　面板边框属性

下面介绍面板图层，如图 11-65 所示。

- 辅助绘制层：包括智能尺寸、辅助线、辅助点等位于辅助绘制层的辅助图元，该层图元在实际生产时不生效。

- 挖孔层：用于面板中的挖孔，如螺丝孔、开槽等。
- 板框层：用于绘制需要切割的外形图，可以切割异形或波浪形，路径需闭合。位于板框层图元以外的内容不能导出。
- 鼓包层：用于制作需要面板带按键图层，仅限于薄膜面板工艺。
- 透明控制层：用于控制绘制的图形、文字、图片的打印透明度。
- 打印层：用于打印油墨的图层，无绘制默认不打印，只显示原材料本色。打印层绘制的图形默认带有白底遮盖，常规遮光，如需调透明度可通过透明控制层实现。
- 背胶挖空层：对有背胶的面板挖空，不需背胶的区域挖空，未挖的区域保留背胶。
- 灯光仿真层：用于面板对灯光透明度的仿真，模拟真实灯光效果，仅在 3D 预览下生效。
- 材料边界层：表示画布内的最大设计面积，超出该区域绘制的内容无法打印切割。

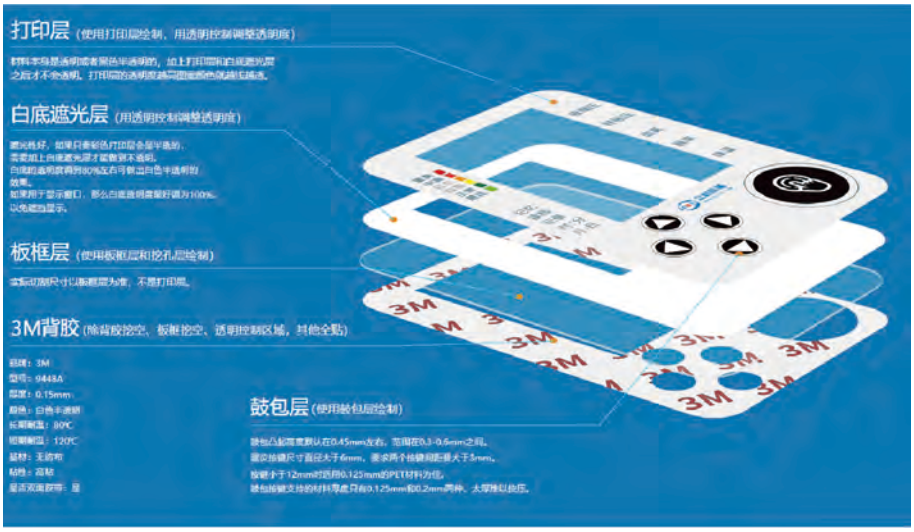


图 11-65　面板图层说明

面板设计相对简单，只需按照产品外形设计，在面板上添加图标与文字，设置面板透明度即可。EDA 软件底部面板中提供常用面板库可供选择，如图 11-66 所示。

图 11-66　官方面板常用库

设计好面板文件后，可支持一键下单和导出面板文件下单两种方式。如果使用一键下单流程，则无须再次导出上传文件到立创商城，如图 11-67 所示。

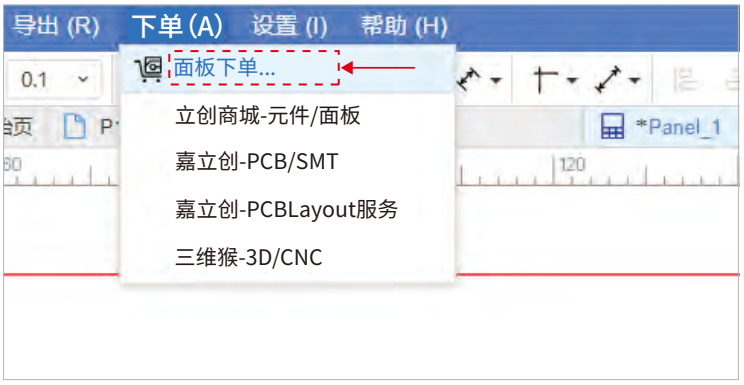


图 11-67　面板下单

在顶部菜单栏中执行“导出”→“面板制造文件”命令，如图 11-68 所示，导出的面板制造文件格式为 .epanm，属于嘉立创 EDA 专业版的专用格式，只能用于立创商城面板下单使用，不能用于其他网站。导出的下单文件 .epanm 需要手动上传至立创商城下单，文件大小建议在 8MB 以下。面板设计产品图如 11-69 所示。

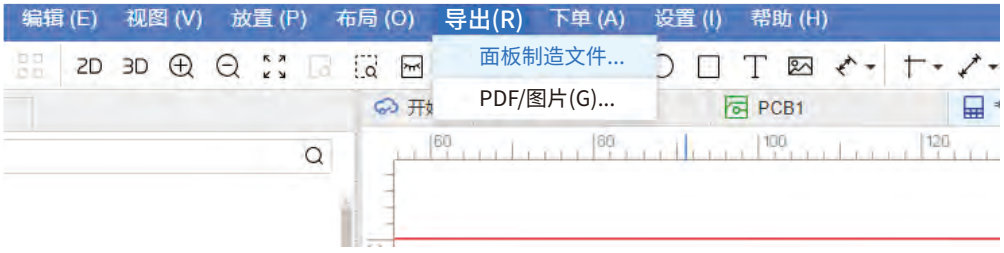


图 11-68　导出面板制造文件

图 11-69　面板设计产品图

第 12 章 / 嘉立创 DFM

12.1 嘉立创 DFM 软件简介

嘉立创 DFM 软件是一款专为印制电路板（PCB）行业和印制电路板装配（Printed Circuit Board Assembly，PCBA）行业打造的可制造性设计（Design for Manufacture，DFM）分析工具。该软件通过智能化算法和丰富的行业经验，帮助设计师在设计阶段发现并解决潜在的可制造性问题。

设计与制造是产品生命周期中两个最重要的环节。开始设计产品时，就需要考虑产品的可制造性。针对产品研发、工艺可加工性、试制周期长、成本高、量产等多个环节的问题，借助 DFM 软件规范产品设计，可以提升产品的设计效率、降低制造成本，并加速产品上市时间。

目前，嘉立创 DFM 软件支持个人计算机端（PC 端）及浏览器在线查看，无须安装，随时随地多终端查看文件。嘉立创 DFM 软件支持全球主流电子设计自动化（Electronic Design Automation，EDA）软件，如 Altium Designer、Power PCB（PADS）、Cadence Allegro 以及嘉立创 EDA 等软件设计的 PCB 文件及通用 Gerber 文件，支持一键上传、一键分析、一键导出分析报告，支持 2D/3D 高清仿真图模式和高清矢量图，带来所见即所得的视觉体验。从自动导入到智能分析，嘉立创 DFM 还支持电子物料清单（Bill of Material，BOM）匹配，操作简单、便捷、精准，解决设计烦恼，让您更懂生产，为您的设计保驾护航。

12.2 DFM 快速入门

12.2.1 安装客户端

打开嘉立创 DFM 网站首页（www.jlc-dfm.com），下载客户端安装包，如图 12-1 所示。下载到本地后，双击打开并按照提示进行安装。本安装包的特点是最小权限安装，不会向用

户主动索取管理员权限，从而降低用户电脑的安全风险。

图 12-1　下载客户端

如图 12-2 所示，打开客户端后，默认展示一个演示案例（可以通过设置关闭加载演示案例）。

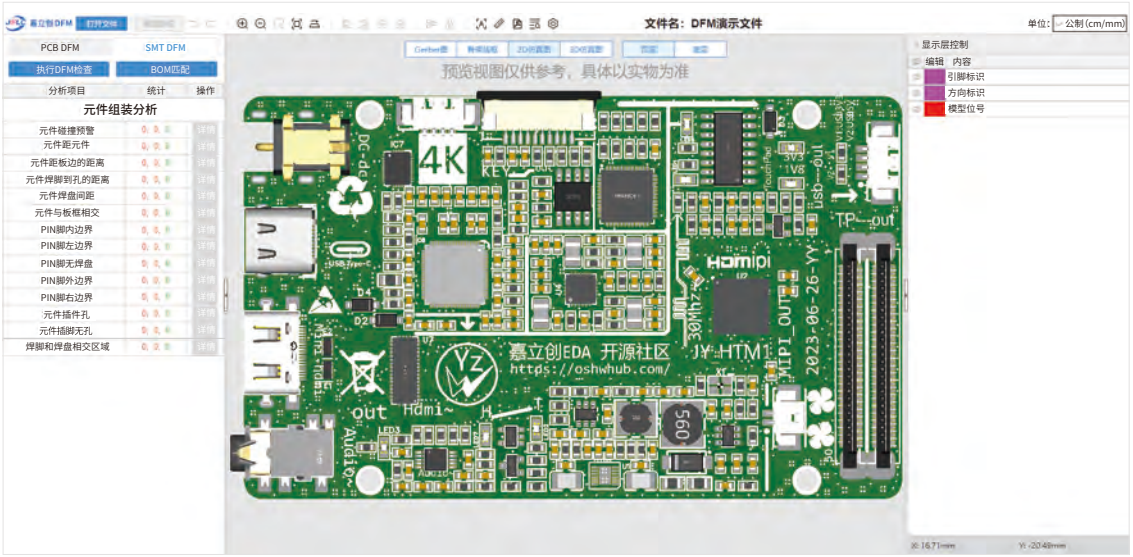


图 12-2　演示案例效果

12.2.2　打开文件

（1）打开文件的方式

方式 1：单击界面上的“打开文件”按钮，选择要打开的文件，即可导入资料，如图 12-3 所示。

方式 2：直接拖拽文件到界面任务位置，程序会自动加载文件。

图 12-3　打开文件

（2）支持的文件格式

- Gerber 文件：可以选择打开一个 Gerber 文件目录，也可以直接打开一个 Gerber 文件压缩包。备注：无须用户登录。
- PCB 源文件：支持 Altium Designer、Power PCB（PADS）、Cadence Allegro 以及嘉立创 EDA 等软件设计的 PCB 文件。备注：须用户登录。

12.2.3　PCB 分析

打开一个文件后，默认进入 PCB 的 DFM 界面，并展示 PCB 图，直接单击“执行 DFM 检查”按钮，如图 12-4 所示。

图 12-4　执行 DFM 检查

在分析完成后，用户会得到分析结果，展示各种分析项，并按红、橙、绿三种颜色区分安全等级。单击这些按钮可以查看对应分析项目的具体报告位置，详细内容可查看 12.3.3 节，如图 12-5 所示。

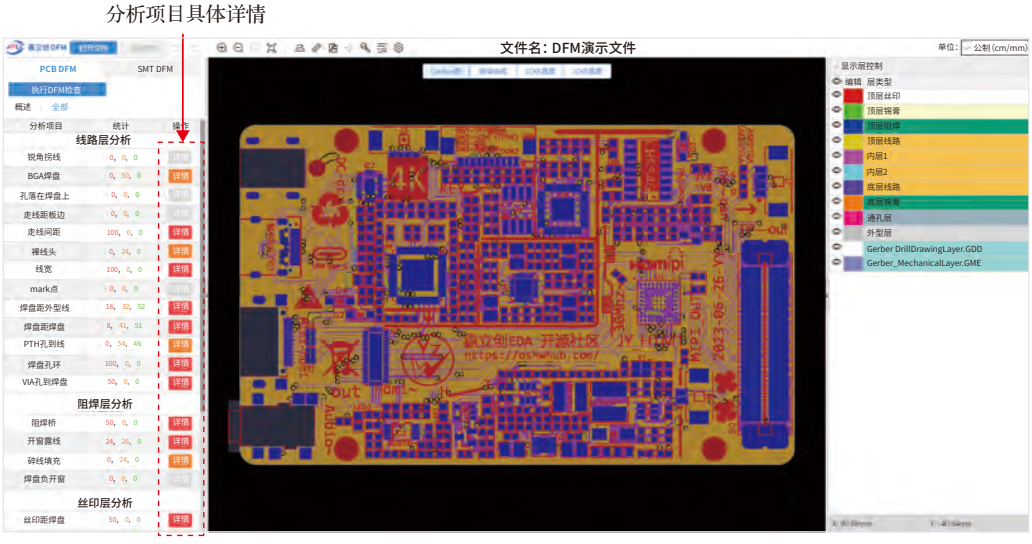


图 12-5　DFM 结果详情查看

备注：灰色按钮表示该分析无相关结果，即没有该方面的问题。

单击“概述”按钮，可以切换到汇总，如图 12-6 所示。在此页面中，展示了与 PCB 生产报价有关的参数信息（更详细的分析请单击“全部”按钮）。此外，还包含了一些非 DFM 相关的数据，如锣程统计等。

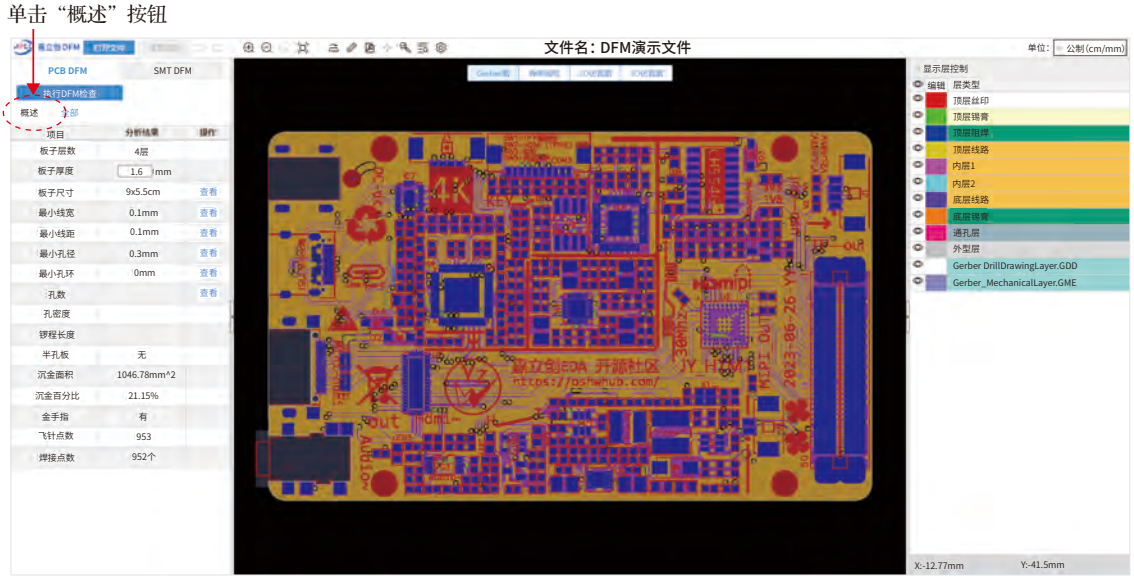


图 12-6　“概述”查看入口

12.2.4　SMT 分析

单击选项卡切换到 SMT 分析模块。此分析重点是分析元件装配相关的信息，因此 PCB 默认以 2D 仿真图效果展示，如图 12-7 所示。

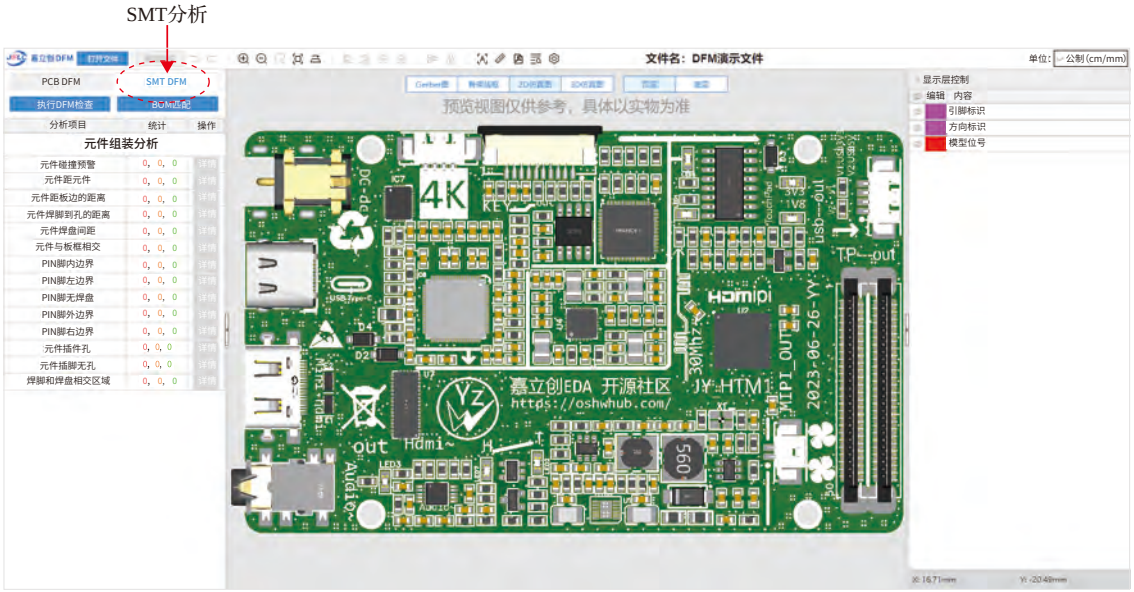


图 12-7　切换到 SMT 分析模块

如果在 PCB 环境中打开的是 Gerber 文件，则要先执行“BOM 匹配”操作，把元件加载进来，如图 12-8 所示。

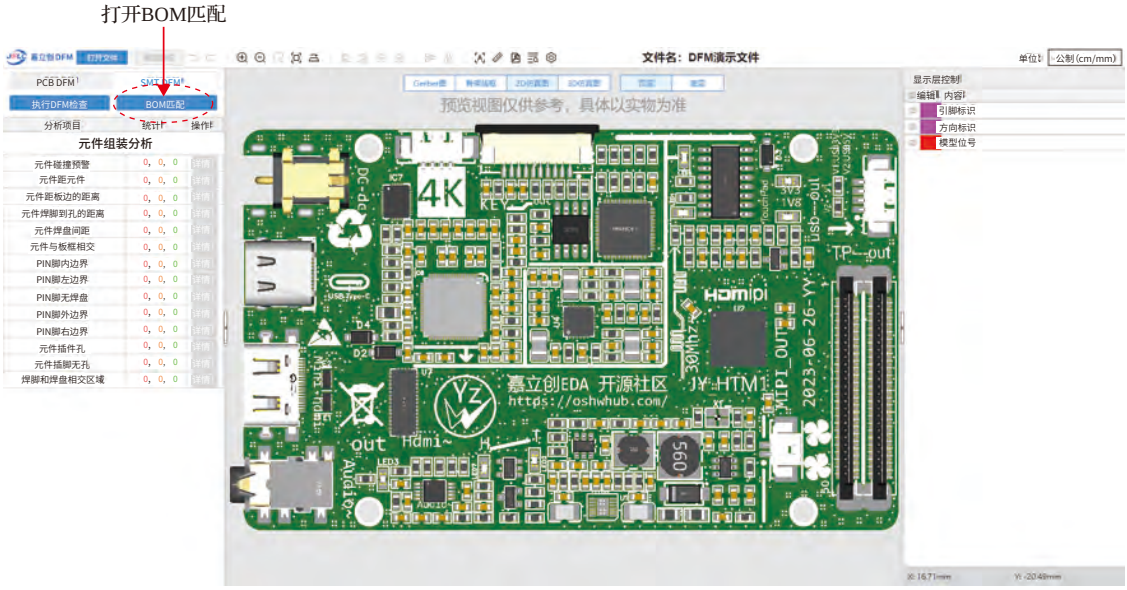


图 12-8　BOM 匹配操作入口

按照提示上传 BOM 文件和坐标文件，如图 12-9 所示。

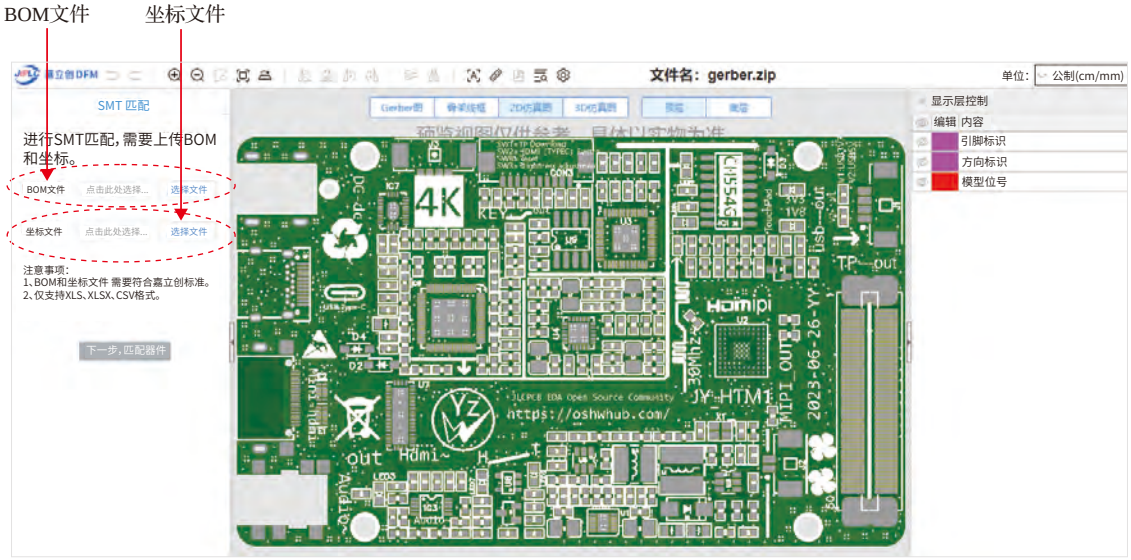


图 12-9　BOM 匹配操作界面

系统后端会先执行一次 BOM 匹配，尽可能匹配到所有元件，部分没有自动匹配成功的元件需要人工手动匹配，如图 12-10 所示。

备注：BOM 匹配过程与嘉立创 SMT 下单过程中的 BOM 匹配完全一致。BOM 匹配完成后，单击“保存并关闭”按钮。

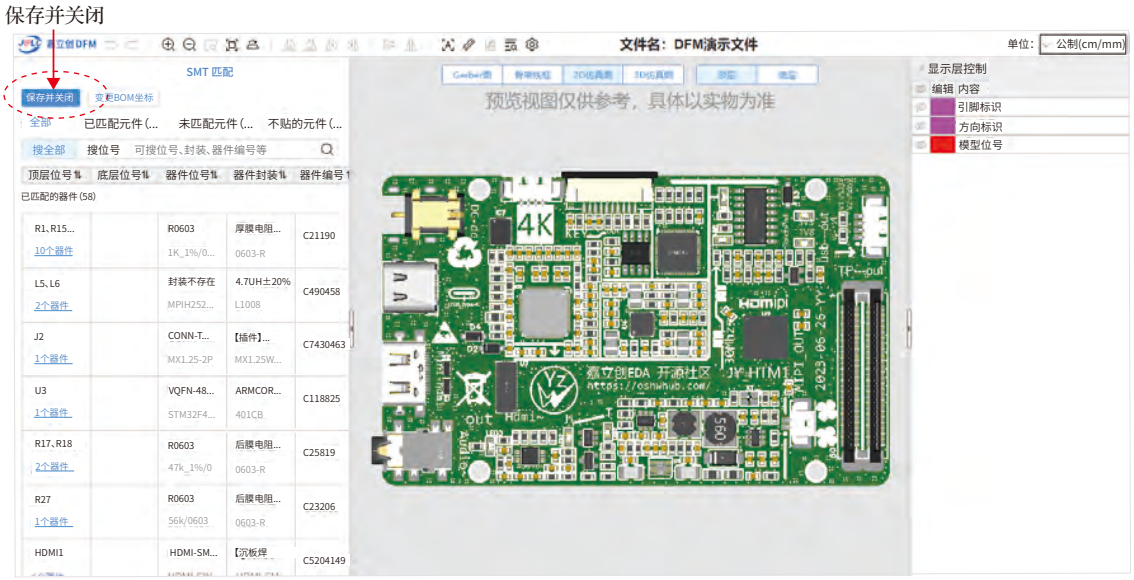


图 12-10　保存 BOM 匹配结果

完成操作后，匹配好的元件会自动同步到主界面，如图 12-11 所示。

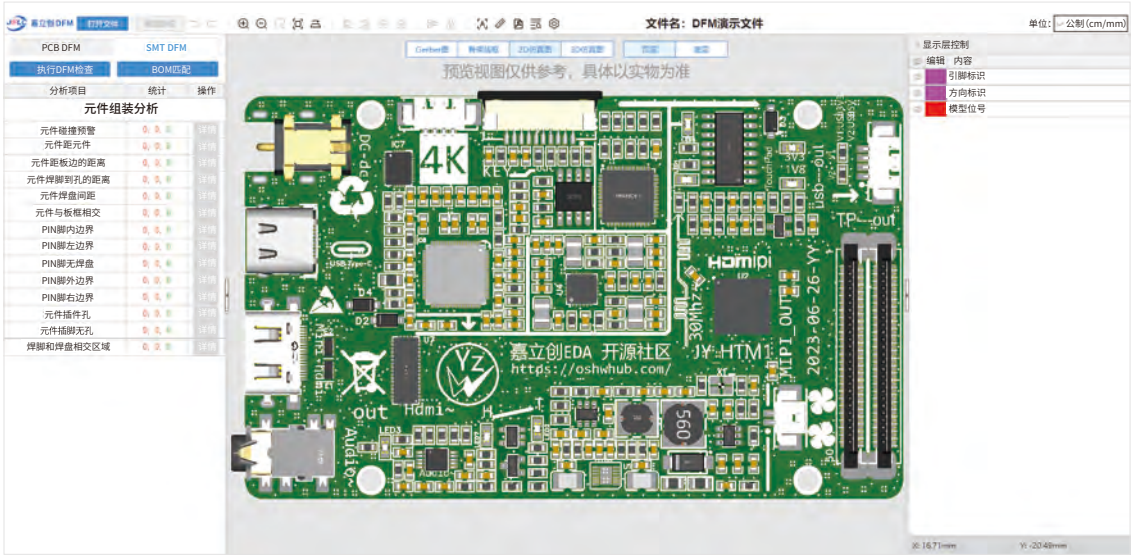


图 12-11　回到主界面的 SMT 展示界面

单击“执行 DFM 检查”按钮，将得到 SMT 分析的相关结果，如图 12-12 所示。

12.2.5　导出分析报告

执行完以上所有的分析检查后，可以一键导出 DFM 分析报告，如图 12-13 所示。

执行DFM检查

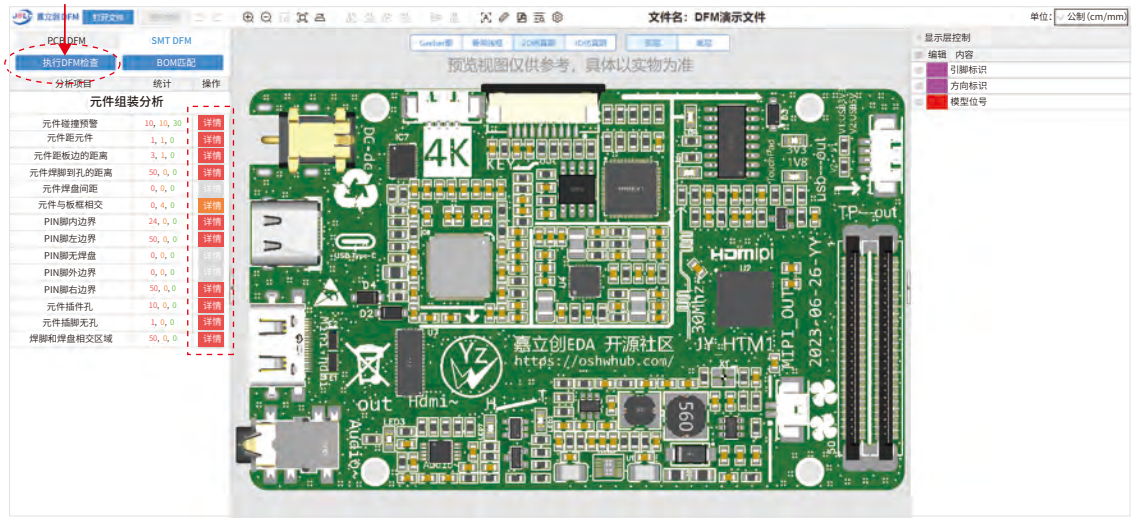


图 12-12　SMT 执行 DFM 检查

图 12-13　导出分析报告

导出报告为 PDF 文档，如图 12-14 和图 12-15 所示。

嘉立创DFM分析检查报告

文件名：　EDA-DFM测试003.zip

报告时间：　2024-06-0515:40:44

板子层数：　2层

板子尺寸：　4.9cmx3.29cm

分析项目：　SMT DFM

图 12-14　分析报告截图（1）

PCB DFM>线路层分析

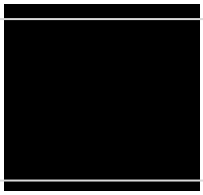
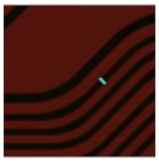
分析项目	分析结果	PCB截图	图层分布	数据统计
锐角拐线 （检测相连接的两条走线夹角是否为锐角）	无	无	无	危险: 0 警告: 0 良好: 0
BGA焊盘 （检测板子上的BGA焊盘）	null 警告		Gerber_Toplayer.GTL	危险: 0 警告: 50 良好: 0
孔落在焊盘上 （检测焊盘上是否有非常的孔）	无	无	无	危险: 0 警告: 0 良好: 0
走线距板边 （检测距板边太近的走线）	无	无	无	危险: 0 警告: 0 良好: 0
走线间距 （测量相邻两条平行走线间的间距）	0.1mm 危险		Gerber_BottomLayer.GBL Gerber_TopLayer.GTL	危险: 0 警告: 100 良好: 0
裸线头 （没有焊盘连接的独立走线头）	null 警告		Gerber_Toplayer.GTL	危险: 0 警告: 24 良好: 0

图 12-15　分析报告截图（2）

12.3 DFM 主要功能及操作流程

12.3.1　DFM 检测之 PCB

按照主界面布局区域划分，可以分为 7 个区域，如图 12-16 所示。

（1）A 区：主图形渲染区域。

- 滚动鼠标滚轮，可以控制图形缩放。
- 按住鼠标右键，在屏幕上拖拽，可以按鼠标移动方向拖动图形。
- 在 3D 视图模式下，用鼠标左键拖曳，可以自由翻动板子。
- 共有 4 种视图模式：Gerber 图、骨架线框、2D 仿真图、3D 仿真图，如图 12-17 和图 12-18 所示；在仿真图模式下，层显示控制开关面板会自动隐藏，改用“顶层”“底层”开关快速切换，如图 12-19 和图 12-20 所示。

（2）B 区：工具栏。工具栏包含一些快捷操作按钮，当鼠标悬停在图标上时会显示相应的功能介绍。在某些场景下不支持的功能会置灰禁用，比如撤销、重做等。在 PCB 模式下，不支持编辑元件功能；但是在 SMT 模式下，支持编辑元件功能，是开放的。

（3）C 区：标题显示用户上传的原始文件名。
（4）D 区：公 / 英制单位切换。
（5）E 区：PCB DFM 分析控制区。
（6）F 区：层显示控制开关。
（7）G 区：鼠标坐标，鼠标在 A 区移动时，这里会同步更新。

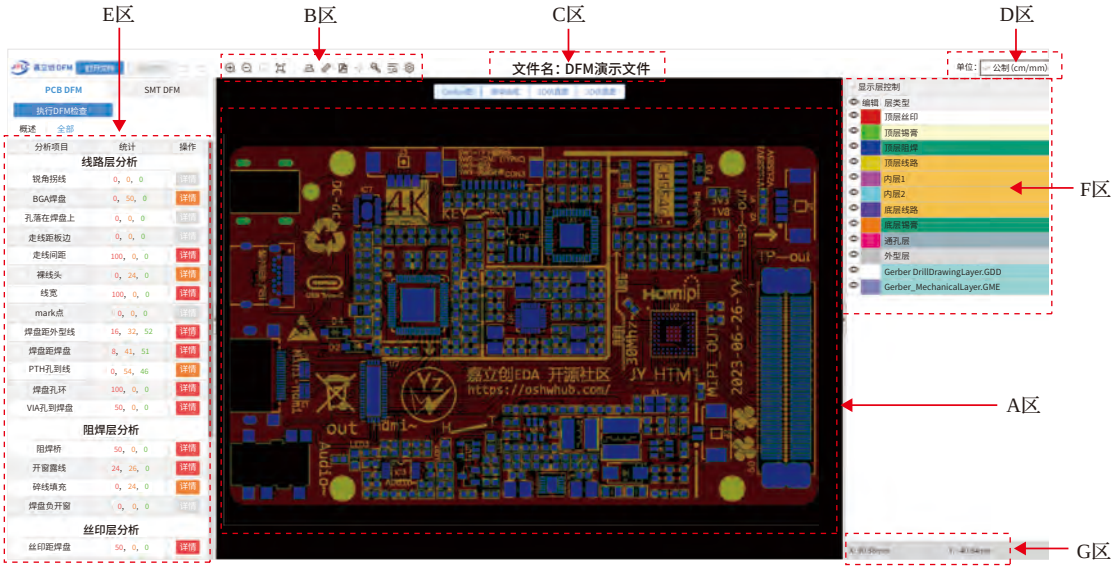


图 12-16　PCB 界面结构布局

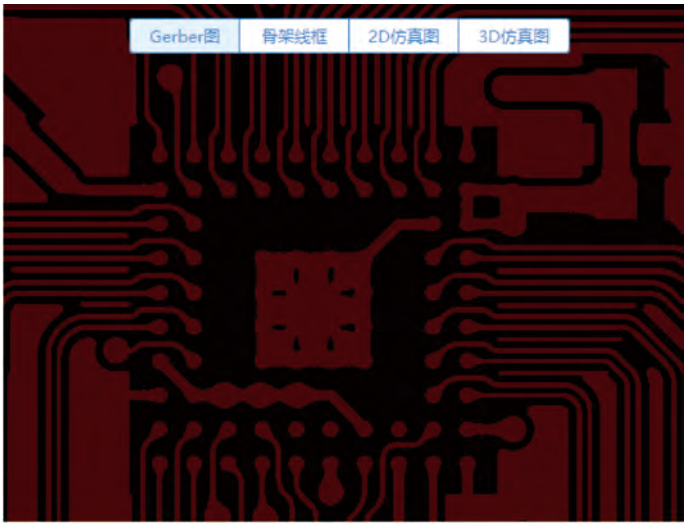


图 12-17　Gerber 图

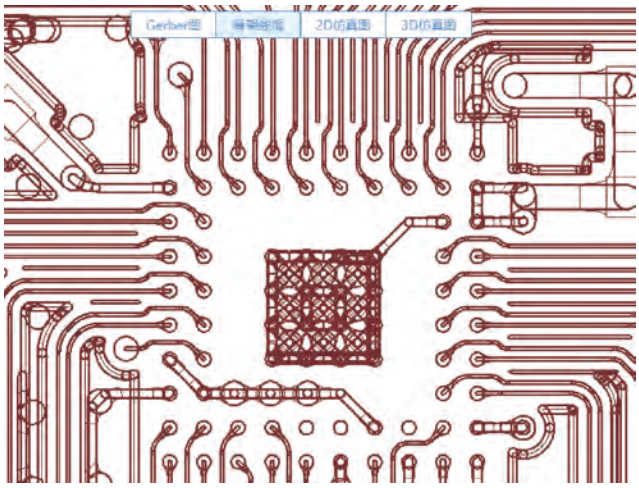


图 12-18　骨架线框

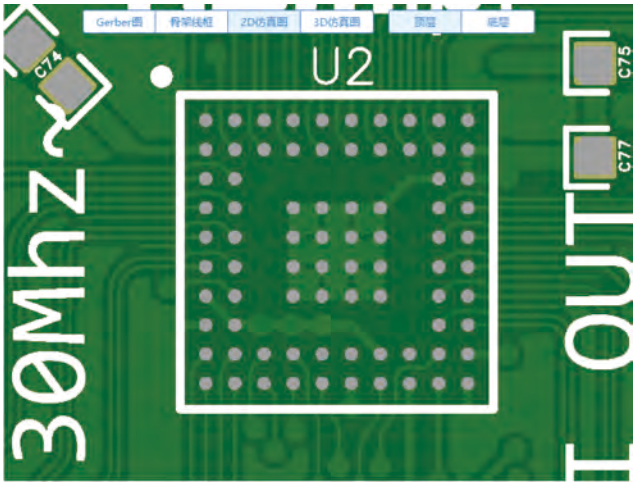


图 12-19　2D 仿真图

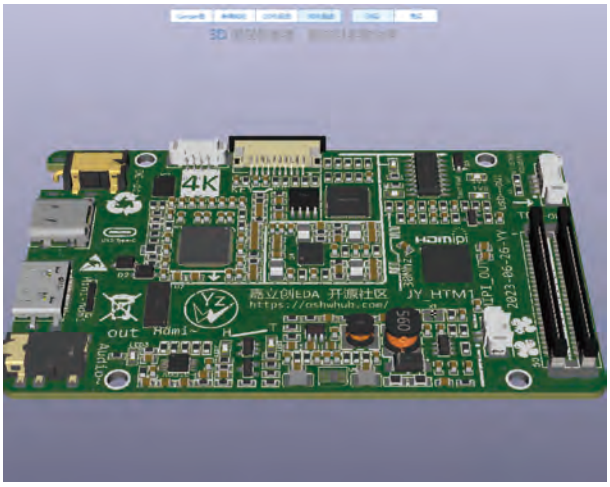


图 12-20　3D 仿真图

（8）PCB DFM 分析控制区。

- 执行 DFM 检查：可以一键分析，重点分析内容会在“全部”栏展示，如图 12-21 所示。
- 全部：展示“执行 DFM 检查”的分析结果，如图 12-21 所示。“统计”列展示了各分析项的数量，并按报警等级分成红、橙、绿三种颜色。“操作”列提供查看按钮，如果该分析没有报告，按钮会被禁用。按钮颜色表明了报警等级，优先使用危险等级最高的颜色。例如，绿色按钮表明该分析项没有危险 / 警告报告，单击按钮可以查看 DFM 分析项结果。
- 概述：统计 PCB 的一些基础信息，主要方便评估 PCB 打样成本，如图 12-22 所示。
- 如图 12-23 所示，A 区用于控制层显示开关，单击第一个“小眼睛”可以进行“全关 / 全开”切换。鼠标单击 B 区也能切换对应层的显示开关状态。

图 12-21　执行 DFM 检查

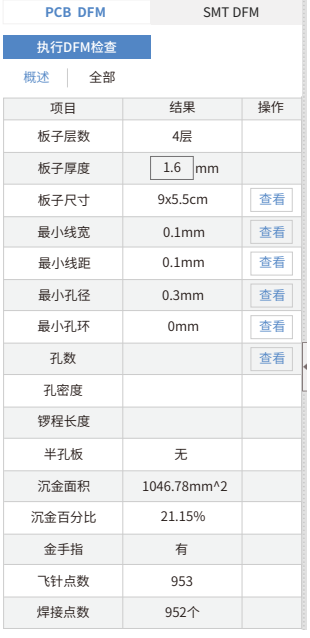


图 12-22　概述层显示控制开关

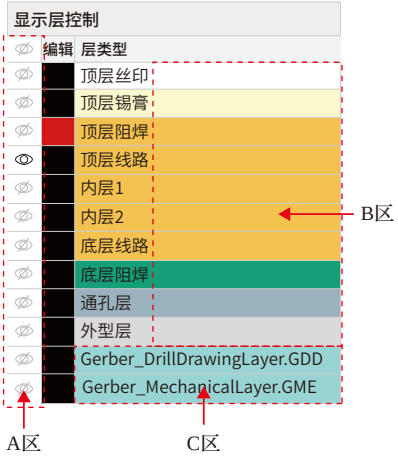


图 12-23　显示层控制

- 编辑：预留，暂无实际功能，但该区域的颜色是该层在主渲染区中的颜色。
- 层类型：鼠标悬停时会显示原始的 Gerber 文件名。
- 未识别的层会放置在杂层 C 区。

12.3.2　DFM 检测之 SMT

在 SMT DFM 界面单击“BOM 匹配”按钮，会弹出如图 12-24 所示的界面。

（1）A 区：如果原稿是 PCB 源文件，系统会自动提取 BOM 与坐标信息，不会提示您选上传 BOM 和坐标文件，该 BOM 匹配操作与嘉立创 SMT 下单（www.jlcsmt.com）中的 BOM 匹配操作完全一致。

（2）B 区：控制元件辅助标志的显示开关。有些元件有方向要求，打开方向标识非常有用。

（3）SMT 仿真图渲染：增加了元件摆放，详见“主图形渲染区域”介绍。

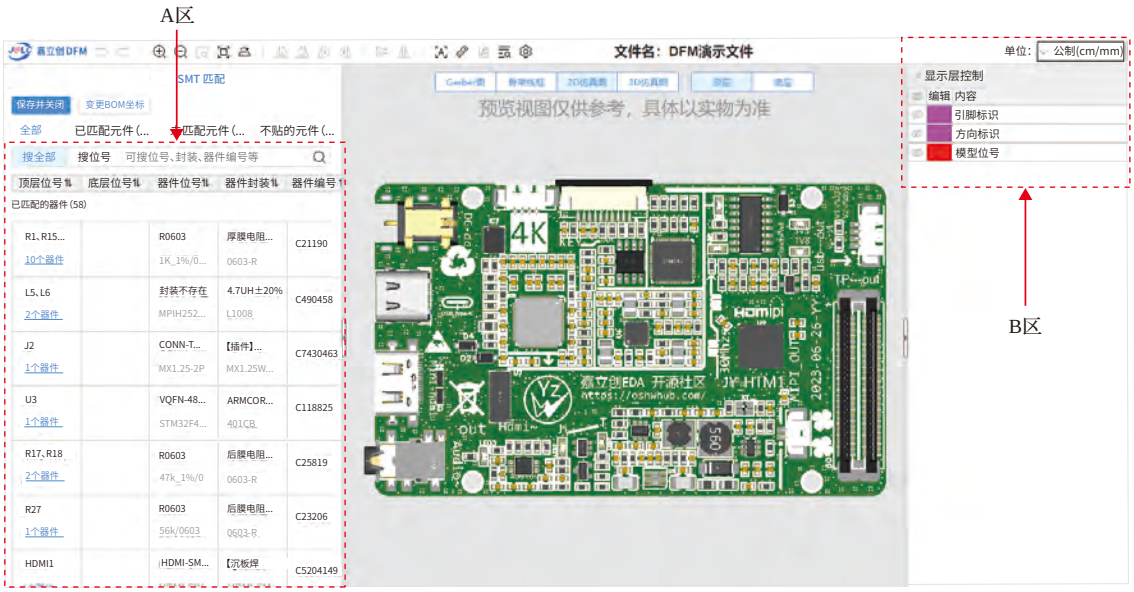


图 12-24　BOM 和坐标匹配后的效果

如果上传的原稿不是 PCB 源文件，系统是没有 BOM 和坐标数据的。单击“BOM 匹配”按钮，会弹出如图 12-25 所示 BOM 匹配界面，提示用户上传 BOM 和坐标文件。该文件要求同嘉立创 SMT 下单要求完全一致。

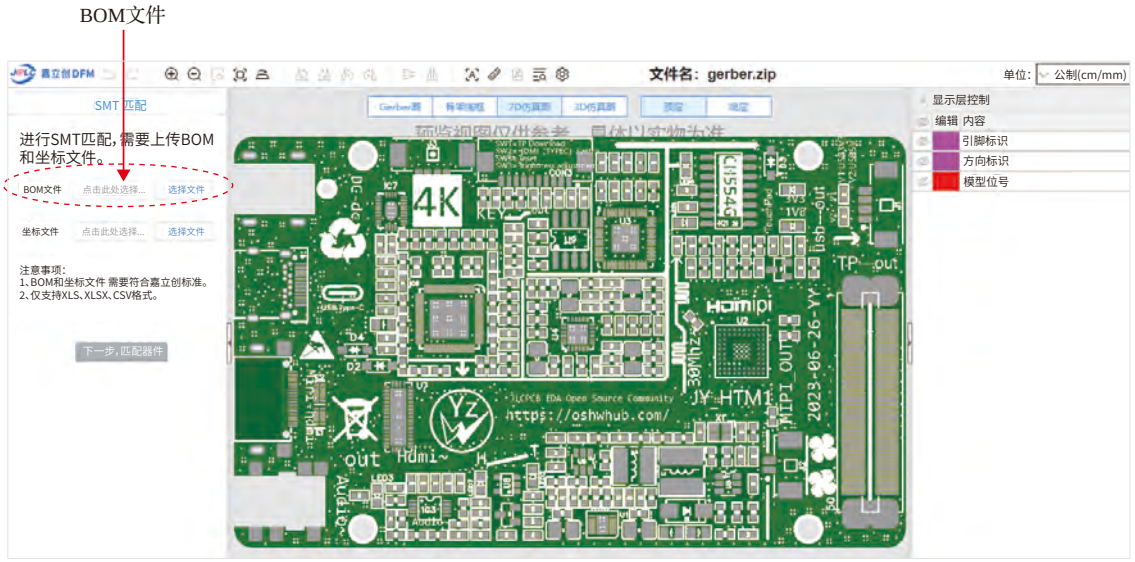


图 12-25　BOM 和坐标文件上传

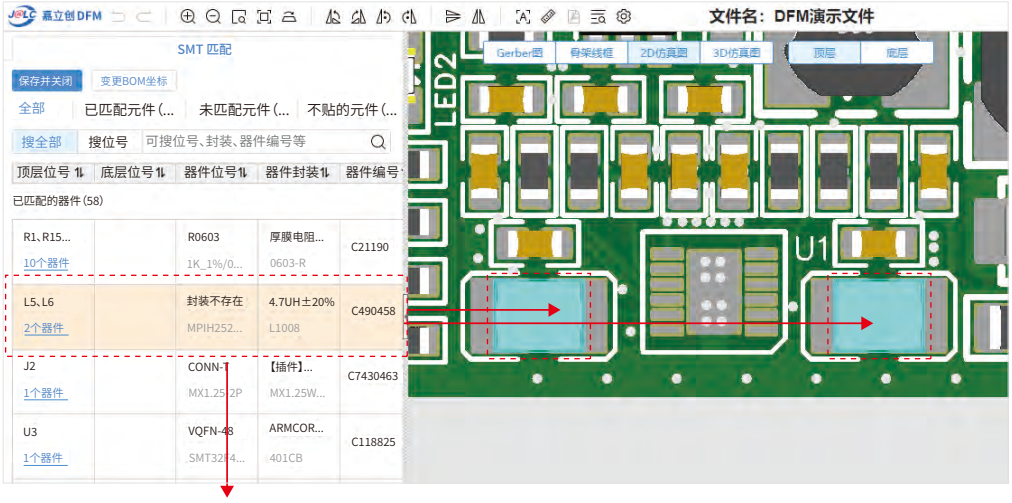
SMT 的图形渲染同时支持多种视图模式，提供元件的可视化编辑功能，默认视图模式为 2D 仿真。详细编辑功能如下。

- 单击 BOM 匹配栏的位号，会在图形区域自动定位到对应的元件，并一次选择所有该类型的元件，如图 12-26 所示。
- 鼠标左键单击可选中元件，每次单击只能选中当前元件，前面选择的元件将自动取

消选中状态。按住“Ctrl”键可以连续选择。单击空白处可以取消所有选中的元件。

● 旋转功能分为整体旋转和独立旋转。如果一次选择多个元件，整体旋转是以所有选中元件的中心点旋转（在倒扣拼板中，整层旋转非常有用）；独立旋转是每个选中的元件各自以自身的中心点原地旋转（这在批量校正元件角度中非常有用）。

● 镜像功能可以基于 *X* 轴或 *Y* 轴镜像，只是对元件的摆放坐标值镜像，元件本身的形状不会因为镜像而翻转（如元件摆放方向正极性向左，镜像后还是向左）。

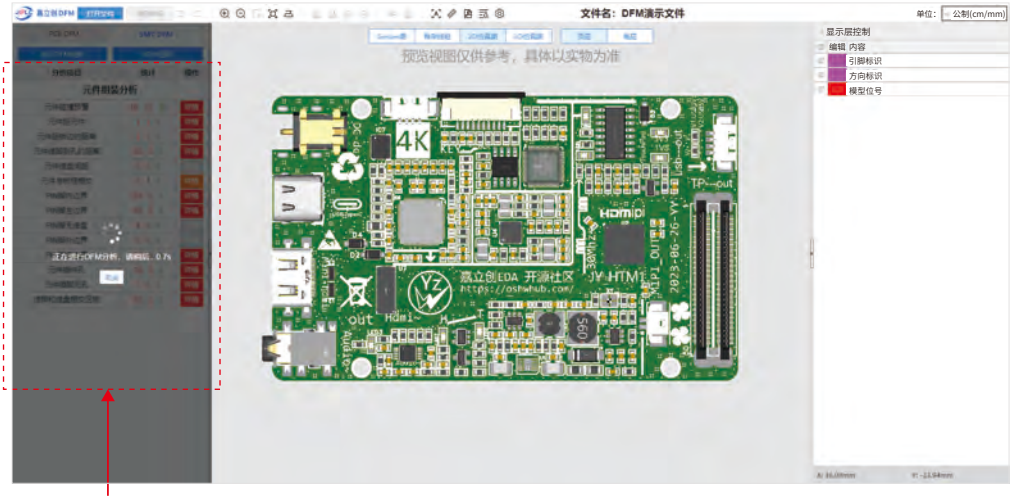


单击对应的位号，自动定位到对应元件

图 12-26　定位 BOM 清单中的元件

在 SMT 主界面中单击“执行 DFM 检查”按钮，会进行 SMT 的 DFM 分析，分析所有与元件组装相关的合规性。

分析结果的大模块是元件组装分析，如图 12-27 所示，操作方式与 12.3.1 节相同。



元件组装分析

图 12-27　SMT 的 DFM 分析

12.3.3 DFM 分析结果查看

分析检测的详细结果可以通过如图 12-28 所示的界面查看。

（1）A 区：标题栏，内容格式为“分析模块名称 > 分析项名称”，本图例中分析模块名是“线路层分析”，分析项名称是“走线间距”。

（2）B 区：该分析项的功能简述。

（3）C 区：图层选择。某些分析项是按层归类汇总的，每个层名后面标注了该分析项的报告数量，如图 12-28 中的“顶层线路（0，0，50）”，这三个数字分别用红、橙、绿展示，依次表示（危险：0 个，警告：0 个，良好：50 个）。关于这个分级详见 H 区。

（4）D 区：分析项的各个记录，这是一个列表控件。

（5）E 区：主图形区域的显示控制，若选中“智能显示图层”，则定位每个测量结果时无关的层会自动关闭；若选中“自动适应视图”，则定位每个测量结果时会自动以一个合适的缩放比例显示在屏幕上。

（6）F 区：该分析项的功能详细描述，相对于 B 区，侧重于讲解该分析项违规之后对生产造成的隐患。

（7）G 区：该分析项的作用示意图。

（8）H 区：报警等级指导规则，D 区中的值属于哪个等级是通过这里的规则定义的。

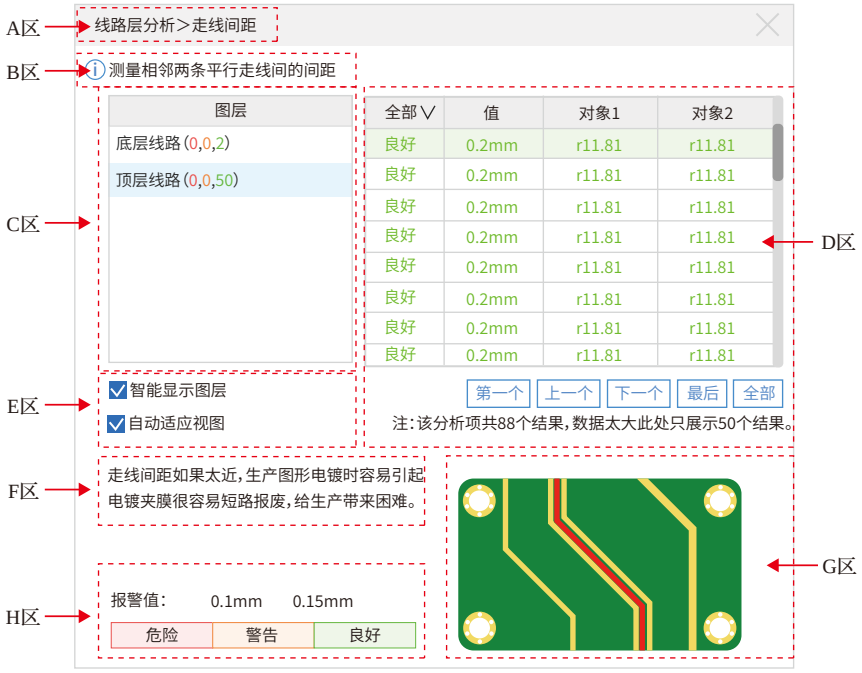


图 12-28　分析项结果查看详情

（9）D 区详解。

- 全部：字样那列为报警等级，可变选择，用于过滤显示。
- 值：大多数分析项结果基于两点的测量，属于长度值；有少部分是没有单位的裸数值，比如用于计算百分比的浮点值；还有一部分分析项是无值表示的，比如裸线头这类（这类要么属于警告，要么属于危险）。

● 对象 1 和对象 2：表示分析项结果所测量的两个对象。比如走线间距，每个测量结果的两个对象是两条平行走线。对象名称大多数是 DFM 引擎内置的几何图元名称，比如 r11.81 表示直径 11.81mil 的圆形（如果对象是走线，表明该走线转迹使用的光圈是 r11.81，意思就是走线宽为 11.81mil），rect20×30 表示一个矩形，oval20×50 表示一个椭圆形等。但也有一些复杂的自定义图元，在这里可能只会展示一个难以理解的字符串。如果是元件检测，这里会显示位号名称，比如 R10、R11、R12 等。有的分析只有一个测量对象，另外一个会显示 null。

表格下面的几个按钮用于操作选中查看每个测量结果。注意事项：有些情况下，分析项的结果非常多，最终结果数据量可能比 Gerber 文件还大。每个分析项都是有共性的，一旦超过一定数量，审核疲劳会导致人工逐个查看失去意义，因此我们最终会选择保留最低等级的 50 个结果值。

12.3.4　DFM 自定义检测规则

1. 新建自定义规则

不同的制造商有不同的工艺控制水平，这也意味着 DFM 的规则需要根据实际制造工艺进行调整。例如，4mil 的走线宽度在 A 工厂可以生产，但是在 B 工厂就不行。因此，我们需要能自定义 DFM 的分析规则。

切换到“PCB DFM”选项，单击设置图标，如图 12-29 所示。第一次使用，刚打开时，只有一个系统内置的默认规则，这个规则是不允许编辑修改的。可以新建规则，比如“1111”，如图 12-30 所示。

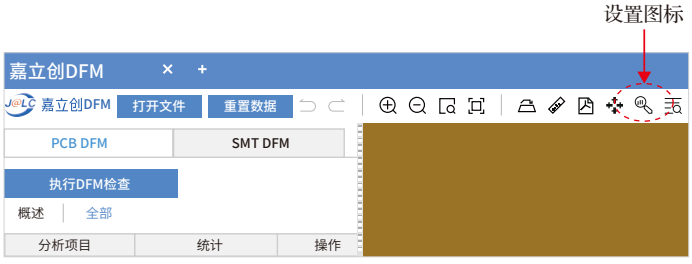


图 12-29　打开自定规则配置入口

2. 规则分析解释

新建规则后，可以根据实际的生产能力调整各分析项的报告值等级设置。

● 按值报：以“线宽”为例说明，默认的“红、橙、绿”三个等级的值分别是“4、5、8”。如果是 2oz 的铜厚，可能需要调大，比如改成“8、10、12”。意思是走线宽度小于 8mil，表示危险；8 ～ 10mil 表示勉强能做，属于设计触及生产极限；大于 10mil 表示安全，可以放心设计。其他分析项可以依此类推。

● 非按值报：还有一些分析项没有测量值的等级设置，只提供“仅报黄”（表示警告提醒）或“仅报红”（表示危险）这样的等级选项。这类分析项没有长度测量概念，只是描述一个现象。比如，“裸线头”的存在不符合常规设计，很可能是误操作把线段截断，那么这个分析按“仅报红”当成危险来提醒是有必要的。当然，如果你是故意这样设计，而且是常规操作，可以设置为“仅报黄”（黄对应橙色，橙色字醒目一些），例如有的天线天生就是一个裸线头。

图 12-30　新建自定义规则

12.4 常见 DFM 问题识别及解决方法

12.4.1　为什么报错“有多个 PCB 源文件或 Gerber 文件”

用户会经常遇到如图 12-31 所示的错误提示。

图 12-31　错误提示

原因分析：

原始压缩包里既包含 PCB 源文件，也包含 PCB 转换的 Gerber 文件，程序在对原始压缩包解析识别时，会认为这是两款 PCB 资料。而 DFM 分析目前只接受一个压缩包中只有一款 PCB 资料，如果超过一款就会出现上面的错误提示。

错误的源文件如图 12-32 所示。

解决办法：

把压缩包中不需要的那一款删除，保证压缩包中只有一款 PCB 资料。如果有两款或多款资料都要分析，应分成不同的压缩包，各自单独上传分析。

此电脑 > 本地磁盘 (D:) > 测试资料 > Gerber文件 > 独立站demo文件 > gerber

名称	修改日期	类型	大小
Drill_PTH_Through.DRL	2024/5/28 11:49	DRL 文件	32 KB
Gerber.PCBDOC	2024/5/28 11:49	PCBDOC 文件	1 KB
Gerber_BoardOutlineLayer.GKO	2024/5/28 11:49	GKO 文件	5 KB
Gerber_BottomLayer.GBL	2024/5/28 11:49	GBL 文件	452 KB
Gerber_BottomLSilkscreenLayer.GBO	2024/5/28 11:49	GBO 文件	1 KB
Gerber_BottomLSolderMaskLayer.GBS	2024/5/28 11:49	GBS 文件	2 KB
Gerber_DrillDrawingLayer.GDD	2024/5/28 11:49	GDD 文件	1338 KB
Gerber_InnerLayer1.G1	2024/5/28 11:49	G1 文件	170 KB
Gerber_InnerLayer2.G2	2024/5/28 11:49	G2 文件	458 KB
Gerber_MechanicalLayer.GME	2024/5/28 11:49	GME 文件	7KB
Gerber_TopLayer.GTL	2024/5/28 11:49	GTL 文件	1353 KB
Gerber_TopPasteMaskLayer.GTP	2024/5/28 11:49	GTP 文件	82 KB
Gerber_TopSilkScreenLayer.GTO	2024/5/28 11:49	GTO 文件	2307 KB
Gerber_TopSolderMaskLayer.GBTS	2024/5/28 11:49	GTS 文件	31 KB

PCB源文件

图 12-32　错误的源文件

12.4.2　钻孔与线路层没有对齐

如图 12-33 所示，钻孔层会缩在一个角落，或者钻孔分布范围很大，这种现象说明钻孔格式解析错误。

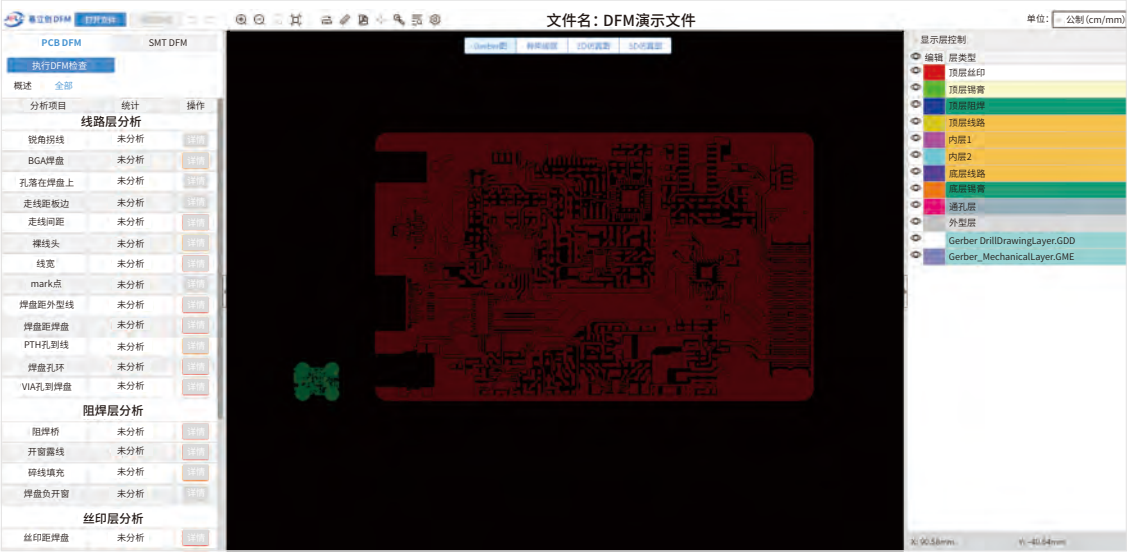


图 12-33　识别错误的钻孔格式

原因分析：

大多数的原稿钻孔格式信息不完整。在嘉立创的 DFM 系统（包含下单）中，必须进行钻孔格式分析。只有钻孔与线路层的 PAD（一般指焊盘，也包含过孔对应的 PAD）对齐，才能表示钻孔格式正确。但是在极端情况下，可能无法完成对齐。影响因素包括板子太简单、板内只有 NPTH 孔、线路层没有对应的 PAD 或者线路层有 PAD 但不是独立图元，而是由一

些细碎的小线段填充形成，这种情况下，抓取中心点很难，如图 12-34 所示。

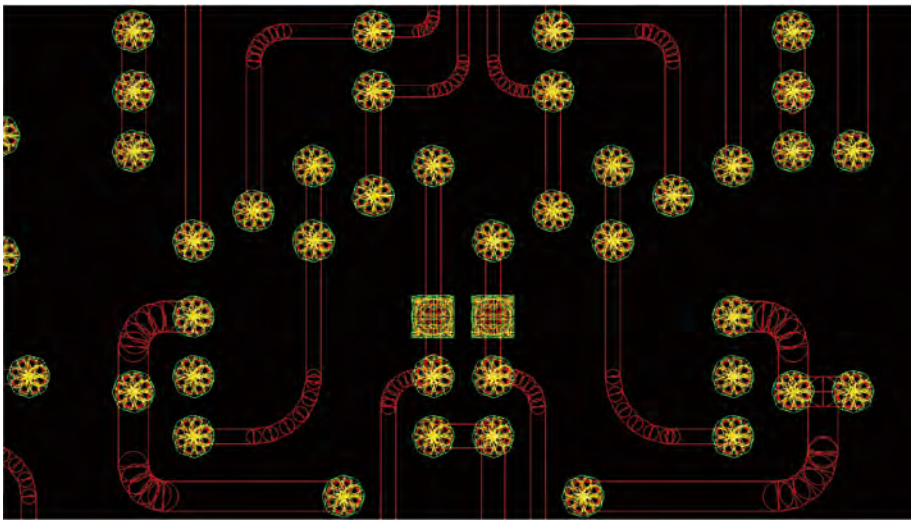


图 12-34　碎线段填充形成的焊盘（差）

解决方法：

针对图 12-34 所示的案例，我们的建议是，将原稿的 PAD 尽量设计成每个 PAD 都是独立图元，大多数为圆形或矩形。虽然不要求所有 PAD 都这样，但大多数 PAD 能这样设计即可。例如，过孔的 PAD 设计成圆形没有问题，如图 12-35 所示。常规设计中，大多数 EDA 软件输出的 Gerber 文件都不会出现如图 12-34 所示的问题。

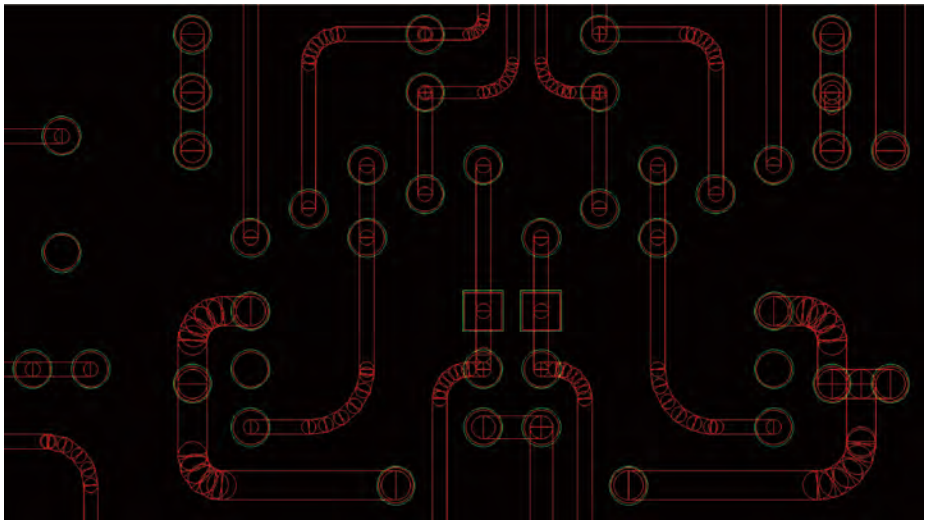


图 12-35　独立的圆形或矩形图元焊盘（良好）

12.4.3　为什么元件明明在板内却报告与板框相交

如图 12-36 所示，元件明明在板内却报告元件与板框相交，看起来不合理。

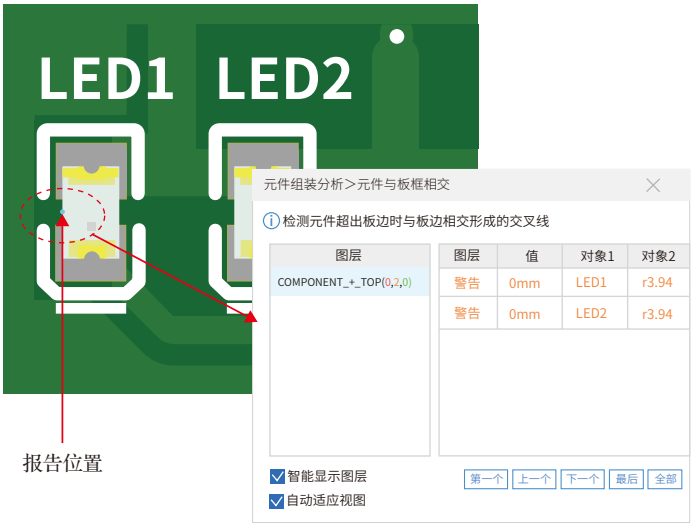


图 12-36　看似错误的报告

原因分析：

切换到 Gerber 视图位置，发现外形层取的是 GM13 层，板子实际正确的外形层在 GKO 层，而这个位置刚好画有线条，被当成了线框，如果与元件接触就会误报，如图 12-37 所示。

解决方法：

规范的设计是保证 DFM 正确分析的唯一途径。本案例的真实外形层在 GKO 层，应该放在机械层中去，并且不要放置与外形边框 / 内槽无关的杂数据，以避免误报。

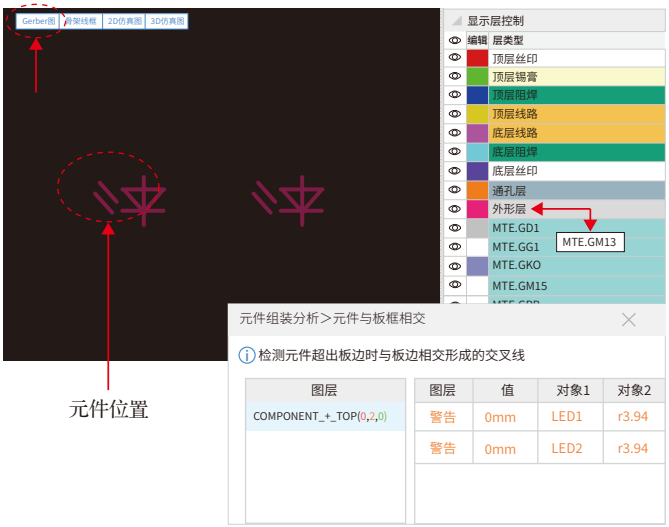


图 12-37　外形层有干扰分析的杂数据

第 13 章 / 嘉立创 CAM

13.1 嘉立创 CAM 软件介绍与下载安装

13.1.1 引言

在 1.2.3 节的介绍中，我们已经初步了解了嘉立创 CAM 在 PCB 行业中具有重要的市场价值和广泛的用户基础。凭借其先进的技术特点、较低的学习成本以及显著的制造效率提升，嘉立创 CAM 赢得了众多用户的青睐。

本章节将深入剖析其内在功能、操作细节以及在不同应用场景下的优异表现，以引导大家更好地掌握和利用这一 PCB 智造领域的利器。嘉立创 CAM 官网界面如图 13-1 所示。

图 13-1　嘉立创 CAM 官网界面

13.1.2　软件的主要功能

1. 数据导入与转换

嘉立创 CAM 支持多种 PCB 设计数据格式，包括但不限于 Gerber、GerberX2、DDW、DXF、ODB++ 等。这确保了不同来源的设计数据可以顺利导入，并在制造过程中得到统一理解和应用，实现数据从设计到制造的无缝对接。嘉立创 CAM 官网软件介绍与下载界面如图 13-2 所示。

图 13-2　嘉立创 CAM 官网软件介绍与下载界面

2. 设计验证与修正

嘉立创 CAM 可以对 PCB 生产资料进行详细检查，包括设计规则检查（Design Rule Check）、电气测试点（Testpoint）验证和网络检查等，及时发现并修正潜在的设计异常，减少生产中的缺陷，提高生产良率。

3. 优化与编辑

嘉立创 CAM 内置强大的编辑工具，允许用户在软件内部使用工具命令手动修改资料和优化设计。例如，调整孔径、移动走线、添加或删除元素、规划钻孔和刀具路径等，有助于提高生产效率，降低成本，确保产品质量。

4. 生产文件输出

嘉立创 CAM 能够生成并输出各个制造环节所需的生产文件，包括钻孔文件、菲林文件、刀具路径文件、标注图纸等，确保生产过程中的每个步骤都有准确的数据支持。

5. 二次开发与脚本支持

嘉立创 CAM 支持二次开发，可以通过脚本自动化执行常规任务，提升生产效率，减少人工干预，同时也提高了生产资料的准确性，这对于大规模生产和快速响应市场变化至关重要。

6. 成本控制与管理

嘉立创 CAM 内置异形开料算法和多款排版算法，通过精确计算材料的使用和优化排版布局，有助于减少原材料浪费，帮助制造商更好地控制生产成本。

7. 兼容性和灵活性

嘉立创 CAM 能够适应不同的制造设备和工艺要求，给予制造商高度的灵活性。无论是在选择生产设备还是应对不同软件设计的 PCB 资料时，都能保持高效准确地运作。

8. 数据管理和追溯性

嘉立创 CAM 包含品质数据管理功能，能够存储、追踪和回溯用户的操作记录与文件的加工数据。这样能够协助生产和品质部门对产品进行质量控制、问题排查和持续改进生产流程。

13.1.3 软件的运行环境

1. 硬件环境

- 处理器：嘉立创 CAM 需要性能强劲的处理器来支持复杂的图形处理和计算任务。推荐使用 Intel 或 AMD 的中高端处理器，如 Intel Core i7 或 AMD Ryzen 7 及以上型号。
- 内存空间：嘉立创 CAM 要处理大量的图形数据，建议内存至少为 8GB RAM，16GB 或以上更佳，以保证软件的流畅运行，支持大规模设计文件的快速处理。
- 硬盘空间：至少需要 256GB 可用硬盘空间，使用固态硬盘（SSD）会显著提升文件加载与处理速度。
- 显卡：支持 OpenGL 3.3 或更高版本的独立显卡，有助于提高图形渲染效率。
- 输入输出设备：鼠标、键盘、显示器。
- 推荐分辨率：1920×1080。

2. 软件环境

操作系统：嘉立创 CAM 软件当前专为 Windows 64 位操作系统量身定制，其中，优先建议使用 Windows 10（64 位）版本以确保最佳体验，这一推荐基于 Windows 10 出色的操作稳定性、成熟的安全防护机制以及广泛的软硬件兼容性。

3. 网络环境

嘉立创 CAM 后续会支持多人在线编辑和共享处理成果，因此需要一个稳定、高速的网络环境。对于需要连接外部设备或云服务的场景，也要确保网络连接稳定，带宽足够应对数据传输需求，尤其是进行远程监控和数据同步时，建议使用千兆以太网或更高速的网络连接方式。

4. 安全环境

为了确保数据安全，需要采取一系列安全措施，如安装杀毒软件、设置防火墙、定期备份数据等。此外，还需要对用户权限进行严格的管理，避免数据泄露或误操作导致数据损失。

5. 安装与配置步骤

- 下载软件：访问官方网站 https：//www.jlccam.com/ 或授权渠道下载最新版本的嘉立

创 CAM 安装包。

- 检查系统环境：参照上述硬件与软件要求，确认系统满足最低配置。
- 关闭防病毒软件：在安装过程中暂时关闭防病毒软件，以防误报影响安装。
- 执行安装：按照安装向导的指示完成软件安装。
- 系统设置调整（如有需要）：根据软件使用需求手动调整特定的系统环境变量或配置，并且可以将嘉立创 CAM 软件添加到安全软件的白名单中。

13.2 初次使用流程和异常情况处理

13.2.1 软件启动

嘉立创 CAM 软件提供了多种便捷的启动方式，以满足用户的不同需求。以下是三种主要的启动方式。

（1）桌面快捷方式：在安装嘉立创 CAM 软件后，通常会在桌面上自动生成一个快捷方式图标，只需双击该图标，即可快速启动软件。

（2）开始菜单：在 Windows 操作系统的开始菜单中，找到嘉立创 CAM 软件的启动项，单击“开始”按钮，在弹出的菜单中找到嘉立创 CAM 软件并单击，即可启动软件。

（3）任务栏图标：如果嘉立创 CAM 软件已经运行并且被固定在任务栏上，则可以直接单击任务栏上的图标来启动或切换到软件界面。

13.2.2 注册与登录（个人版）

在启动嘉立创 CAM 软件后，新用户需要进行注册并登录才能使用软件的全部功能。以下是注册与登录的简单流程。

在软件启动后的登录界面上，有一个蓝色的“免费注册”按钮。单击该按钮后，会自动打开浏览器，跳转到嘉立创统一注册中心界面。

在注册中心的引导下，注册成功后，使用正确的用户名和密码进行登录，即可进入嘉立创 CAM 软件的主界面并开始使用各项功能。后续也可以使用微信扫码和手机验证码的方式快捷登录。

13.2.3 主界面概览

嘉立创 CAM 软件主界面如图 13-3 所示。

1. 标题栏

标题栏位于嘉立创 CAM 软件顶部位置，左上角显示软件的版本号、端口号和公司网址。

2. 菜单栏

菜单栏位于主界面左侧，提供了一系列功能选项，例如资料包索引框、导入 gerber、导入 tgz、导入 dxf、嘉立创脚本、打开本地文档等，用户可以通过单击这些按钮访问和使用相应的功能。

3. 操作区

操作区位于标题栏下方的大片空白区域，这是嘉立创 CAM 的主界面操作区。此区域用于显示当前工作文件夹里的所有资料包。通过鼠标左键单击和右键菜单的功能，用户可以对资料包进行改名、复制料号、新建料号、输出 tgz、删除等基础操作。

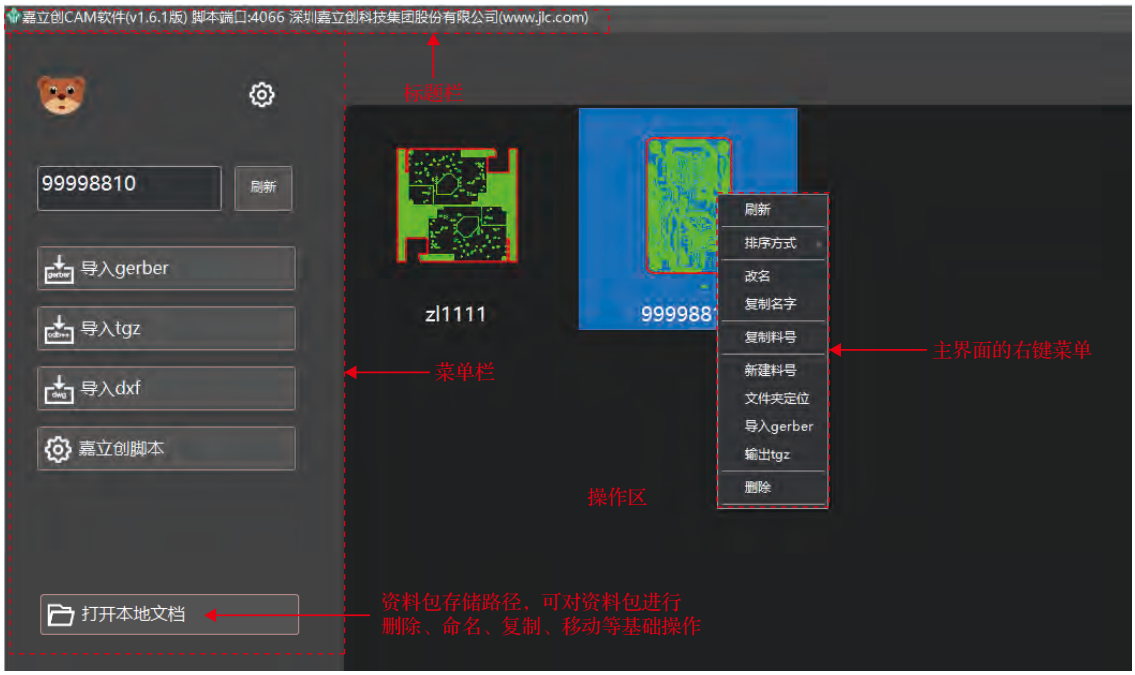


图 13-3　嘉立创 CAM 软件主界面

13.2.4　导入资料示例

1. 导入 Gerber

单击软件主界面菜单栏中的“导入 gerber”按钮，即可打开“资料导入”界面。单击该界面左上角的“选择文件夹”按钮，在弹出的 Windows 资源管理器中选择需要导入的 Gerber 文件图层或文件夹，软件会根据默认设置的规则，对资料进行简单的识别。嘉立创 CAM 导入 Gerber 简介如图 13-4 所示。

确认识别结果无误后，在左上角“料号名称”后面的方框中输入一个简短的料号名。注意不要和其他资料包的命名重复，避免使用含有非法字符、生僻字、特殊符号等软件不支持的名字。推荐使用字母加数字的组合，便于记忆和后续查找。

单击界面右下角的“导入”按钮，嘉立创 CAM 即可快速导入资料并自动打开资料包。嘉立创 CAM 导入 Gerber 文件示例如图 13-5 所示。

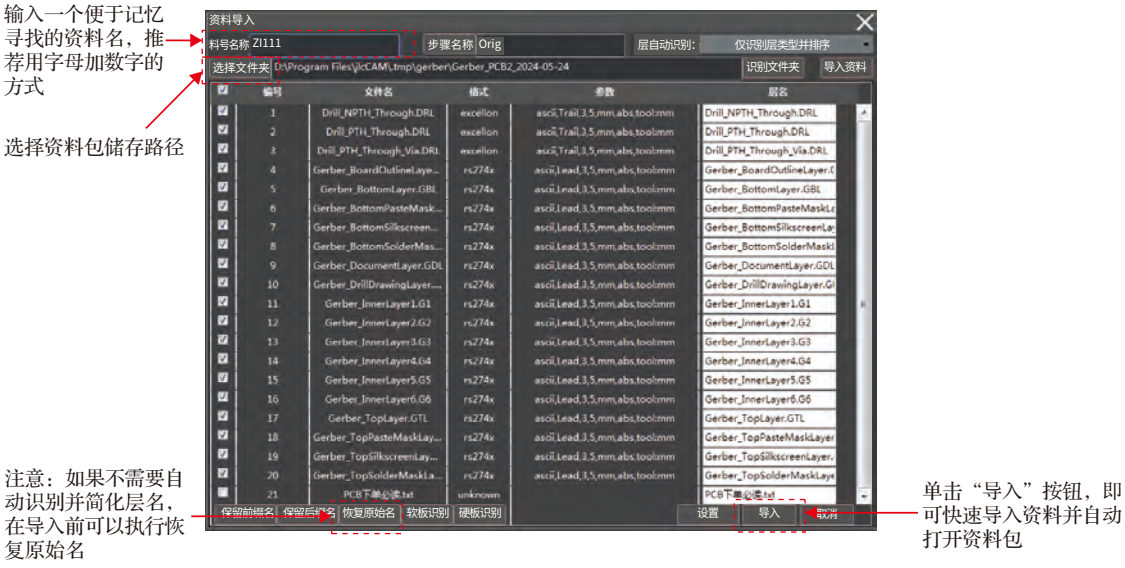


图 13-4　嘉立创 CAM 导入 Gerber 简介

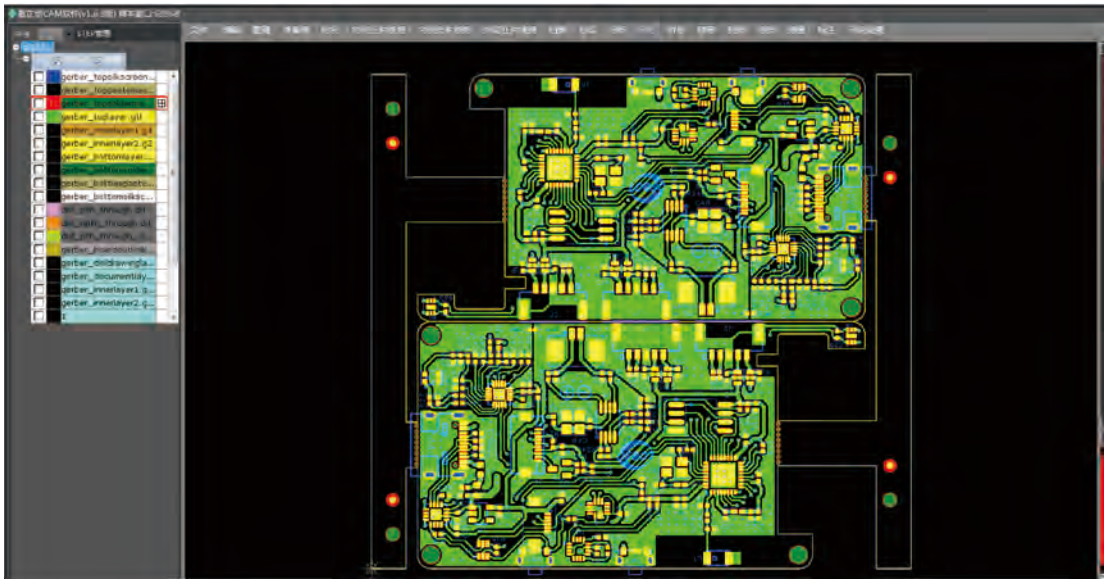


图 13-5　嘉立创 CAM 导入 Gerber 示例

2. 导入 DXF

单击软件主界面菜单栏中的“导入 dxf”按钮，打开“导入 dxf”界面，在“dxf 文件”后面的方框中输入需要导入的 DXF 文件。嘉立创 CAM 导入 DXF 资料简介如图 13-6 所示。

选择好导入文件后，在“料号”后面的方框中输入一个简短的料号名。接着，单击界面下方的“导入”按钮，嘉立创 CAM 会自动生成一个以料号名命名的资料包，并将选择的 DXF 文件按默认设置导入软件，然后展示在用户面前。嘉立创 CAM 导入 DXF 资料效果如图 13-7 所示。

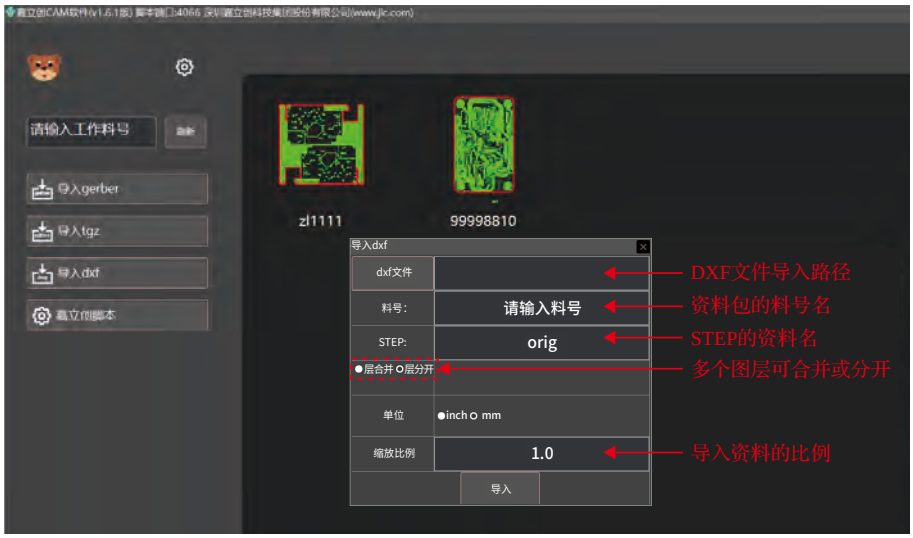


图 13-6　嘉立创 CAM 导入 DXF 资料简介

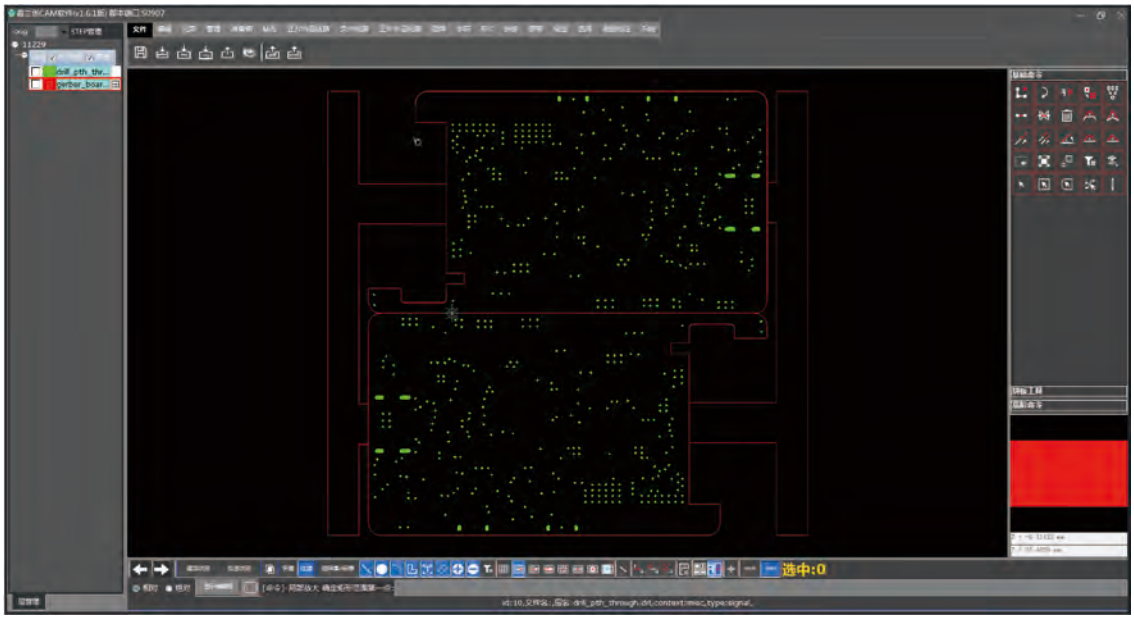


图 13-7　嘉立创 CAM 导入 DXF 资料效果

13.2.5　异常情况处理

1. 软件无法启动

可能是软件版本过于老旧，无法自动升级。请登录嘉立创 CAM 官网 https：//www.jlccam.com/，手动下载最新的软件包，重新安装嘉立创 CAM 软件。

2. 自动升级失败

请根据软件弹窗提示，手动下载最新的安装包进行手动升级。注意不要将软件安装到系统 C 盘的 Programs 目录下，避免影响后续的自动升级。

3. 启动后无法登录

请检查设备网络环境。嘉立创 CAM（个人版）不支持局域网用户登录，且暂未支持代理服务器，因此外部服务可能被限制访问。

4. 软件界面出现乱码

这可能是由于字符编码问题导致的。请打开控制面板，找到“时钟和区域”，选择“区域”，打开“管理”选项卡，选择“非 Unicode 程序的语言”，更改系统区域设置为“中国”(需要管理员权限)，然后重新启动设备即可。

5. 正常资料无法识别

可能是由于资料包没有解压缩导致的。请将资料包解压后，再重新导入识别。

6. 解压资料无法识别

可能是由于文件名或层名存在特殊符号、生僻字等软件不支持的字符编码，导致识别异常。请将文件名或层名修改为简单的字母加数字组合，再重新导入识别。

7. 所有资料层无法识别

请检查资料包的路径是否为本地路径。暂时不支持直接从服务器路径导入资料。

8. 资料无法识别导入为空

请检查设备上是否安装有加密软件。如果资料被加密，请联系对应的工作人员，将资料取消加密，然后重新导入识别。

13.3 软件界面详解

13.3.1 导入 Gerber 资料界面详解

除了前面提到过的通过选择文件夹的方式导入资料，嘉立创 CAM 还支持手动交互的方式导入资料。例如，可以通过按住鼠标左键，将聊天界面中、电脑桌面上、邮件附件等场景下的资料文件夹拖拽到嘉立创 CAM 软件的主界面。嘉立创 CAM 会自动解析资料并打开导入界面，同时还支持 RAR 和 ZIP 等格式的压缩文件包自动解压缩。

解析导入完成后，如果导入界面的层背景颜色显示为绿色，则代表该层资料解析正常；显示为黄色则代表该层资料存在一些问题，但是嘉立创 CAM 可以兼容；显示为红色，则代表该层资料本身存在异常，无法正常读入。可以通过开启相关导入设置，将异常资料强行读入，但可能会出现错误、变形、偏位等问题，因此不建议直接用于生产，仅用于迫切需要查看和浏览资料的特殊场景。嘉立创 CAM 导入 Gerber 资料详解如图 13-8 所示。

13.3.2 资料包的结构详解

在嘉立创 CAM 中，项目资料管理和生产资料处理是通过一系列有序的组织结构来实现的。这些结构包括项目资料包（以下简称 Job）、步骤（以下简称 Step）和图层（以下简称 Layers），分别代表了不同的项目层次和设计内容。通过理解和使用这些结构，用户可以有效地管理和执行 PCB 设计或制造项目。这种结构化的管理方式不仅提高了项目的组织性和可

维护性，还增强了团队协作的效率。嘉立创 CAM 项目资料包结构详解如图 13-9 所示。

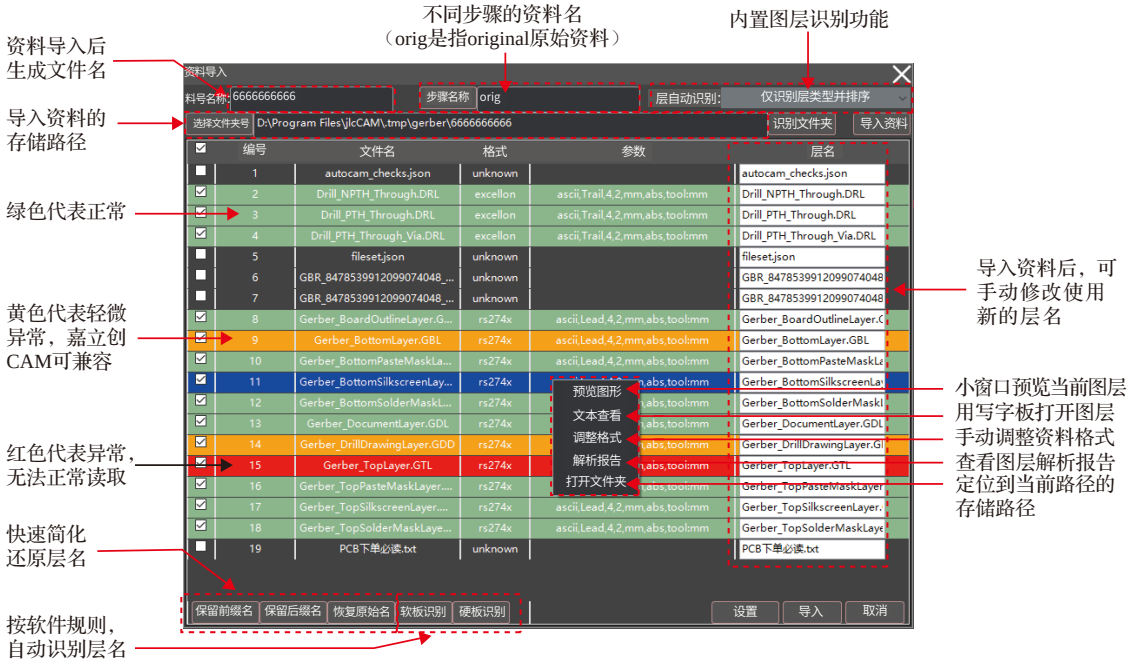


图 13-8　嘉立创 CAM 导入 Gerber 资料详解

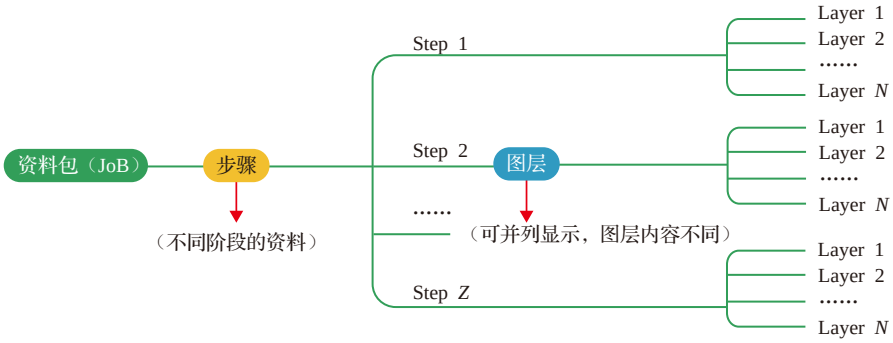


图 13-9　嘉立创 CAM 项目资料包结构详解

Job 是嘉立创 CAM 主界面展示出来的一个个文件。通常一个资料包代表一个完整的 PCB 设计或制造项目，并包含该项目所需要的所有数据和相关设置。默认以 DDW 压缩文件格式存在，且每个资料包都有一个唯一的料号名作为标识。

Step 是 Job 中的子单元，代表 PCB 设计或制造过程中的一个特定资料步骤或阶段。每个 Step 都包含了与该步骤相关的数据和指令。

以嘉立创 CAM 默认的 Step 名称“orig”为例，它是英文单词“original”的缩写，指该资料是未经修改编辑过的原始设计阶段的资料。

一个 Job 里可以包含多个 Step，允许其内容独立且并列存在。用户可以在 Job 中创建、编辑、复制和删除 Step，以适应项目需求的变化。

Layers 就是项目资料包里面的各个图层。以 Altium Designer 和嘉立创 EDA 为例，常见的输出 Gerber 文件图层有丝印层、阻焊层、线路层、钻孔层、机械加工层等。

在不同的 Step 中，Layers 的数量是一样的，但里面的内容可以不一样，甚至为空。如果把 Job 比作笔记本，那么 Step 就是页，Layers 就是页面上的行。用户可以在不同页面的同一行位置，书写上不同的内容。

13.3.3　资料编辑界面详解

嘉立创 CAM 的资料编辑界面是 PCB 设计、制造领域工程师日常工作的核心区域，该界面以其直观、高效和强大的功能特性，深受专业人士的喜爱。编辑界面主要由菜单栏、右侧工具栏、左侧层列表面板、下方工具栏、图形显示与编辑区以及其他辅助窗口组成。嘉立创 CAM 资料编辑界面如图 13-10 所示。

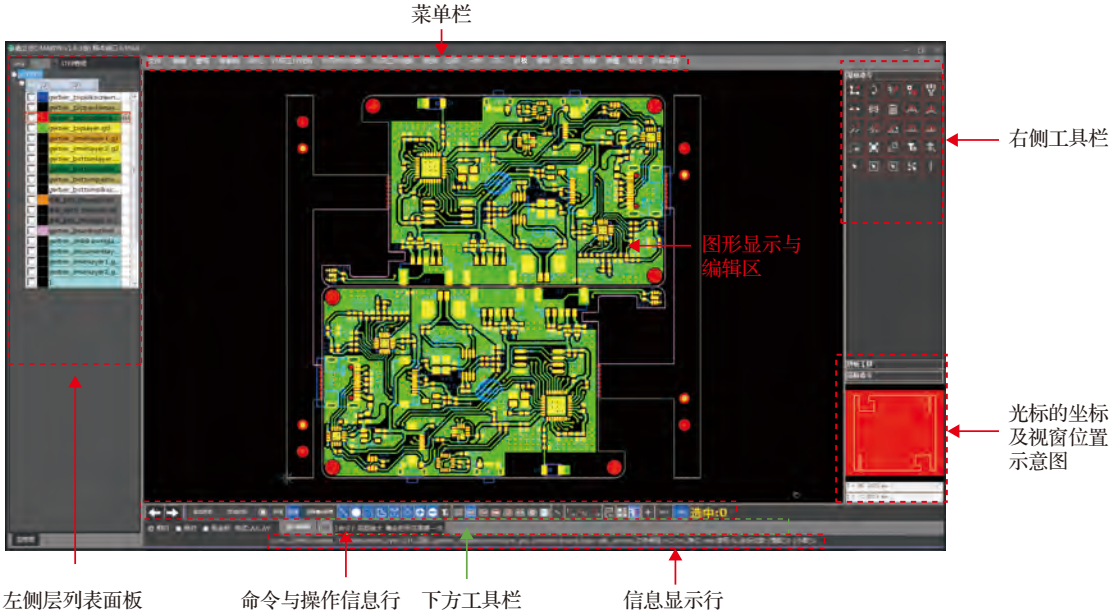


图 13-10　嘉立创 CAM 资料编辑界面

菜单栏位于界面的最上方，提供了丰富的操作命令，默认以菜单模式展示。这些命令涵盖了文件操作（如保存、导入、导出等），编辑操作（如复制、粘贴、移动、旋转、镜像等），图形操作（如胀缩、修改、替换、对齐、去重等），以及高级功能（如自动移线、网络分析、钻孔管理、快速拼板等）。通过菜单栏，用户可以快速访问所需的功能，大幅提高工作效率。嘉立创 CAM 菜单栏如图 13-11 所示。

左侧层列表面板位于界面的左边，是嘉立创 CAM 中非常重要的一个部分，用于管理资料中的各个 Step 和图层，并以树状图的形式展现当前项目资料包的结构与状态。

用户可以通过此面板，对 Step 和图层进行增加、删除、复制、排序、重命名等操作，以及定义图层的属性和类型（如阻焊类型、线路类型、字符类型等），从而协助软件分析判断各个图层的实际用途。

此外，还支持对 Step 和图层的状态进行编辑，如 Step 和图层的显示状态、图层显示颜色的切换、工作 Step 与工作图层的切换、勾选多个图层进行批量编辑、切换命令捕捉层等。这些交互感强的基础命令，使用户能够更加方便地处理复杂的 PCB 资料。嘉立创 CAM 左侧层列表面板如图 13-12 所示。

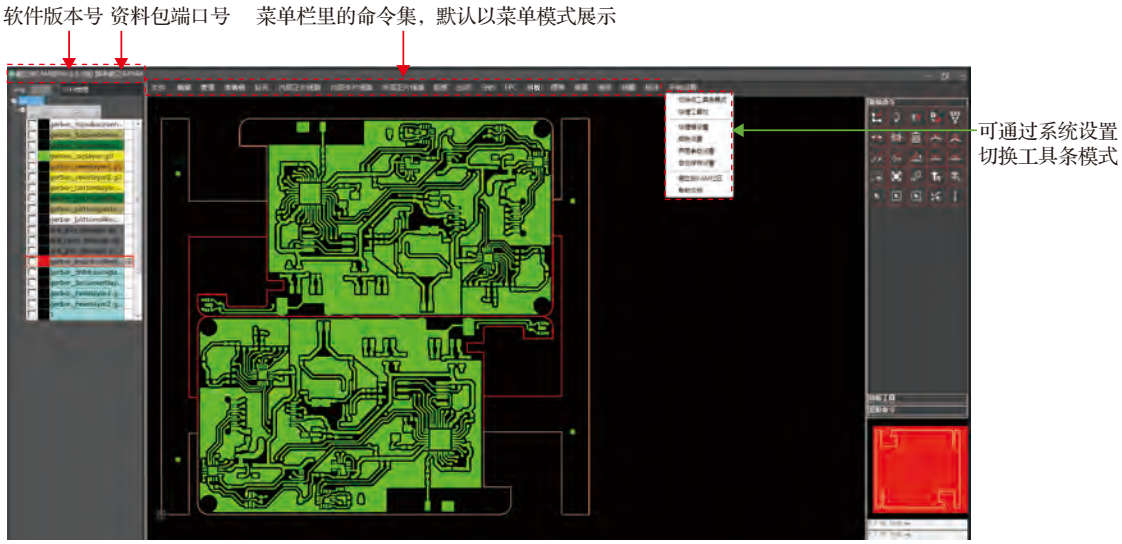


图 13-11　嘉立创 CAM 菜单栏

右侧工具栏位于界面的右侧，按使用频率和不同功能，又细分为基础命令、拼板工具和高阶命令三个界面，里面包含了许多编辑资料的常用工具，如元素添加工具、移线工具、元素替换工具、删除线条工具、选择工具等。嘉立创 CAM 右侧工具栏如图 13-13 所示。

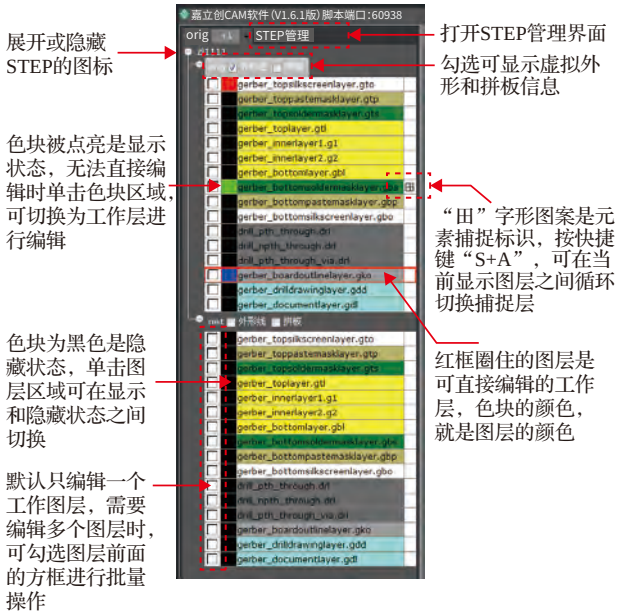


图 13-12　嘉立创 CAM 左侧层列表面板

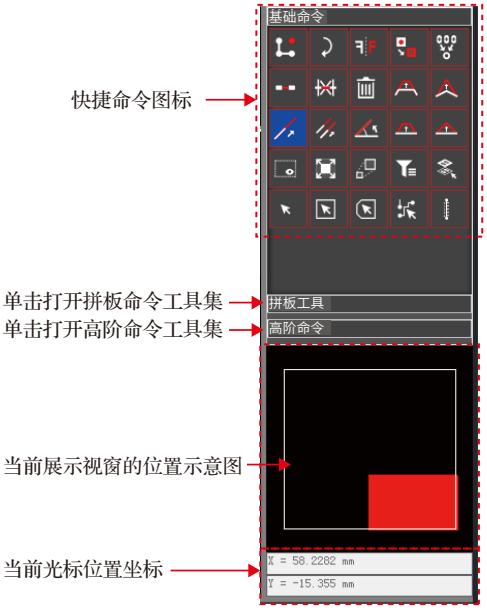


图 13-13　嘉立创 CAM 右侧工具栏

这些工具均以图标形式展示，用户可以根据实际需要，用光标选择对应的工具，再对工作图层的图形元素进行编辑处理。右侧工具栏的设计充分考虑了用户的使用习惯和使用频率，使得日常操作更加便捷。

下方工具栏位于界面的底部，呈现为一条水平的区域，根据软件版本和配置的不同，它包含多个命令图标和操作提示区，如选择状态图标、过滤选择图标、元素捕捉图标、拼板显

示状态、单位切换图标、命令与操作信息行、信息显示行等。

命令与操作信息行用于显示软件的命令执行状态和操作指引，当用户执行命令时，信息行会给出相应的步骤引导，以帮助用户顺利完成操作。

信息显示行显示的是当前选中元素的类型、编号、坐标、极性、角度、是否镜像、尺寸大小等基本信息，有助于用户快速识别和操作当前选中的元素。用户还可以通过工具栏中的命令修改这些信息，以实现更复杂的图形编辑和设计需求。嘉立创 CAM 下方工具栏如图 13-14 所示。

图 13-14　嘉立创 CAM 下方工具栏

图形显示与编辑区位于界面中间，默认是黑色背景，是用户与 PCB 设计互动的主要场所。这个区域又被称为图形编辑器或设计编辑器，它允许用户可视化和操作图层上的各个元素。

根据用户在左侧层列表面板上的选择和设置，该区域实时显示出对应图层中的内容，如钻孔、外形轮廓线、线路焊盘、线条、丝印等元素。

用户可以使用鼠标滚轮前后滚动和按住滚轮拖动，来放大、缩小、平移当前视窗，也可以使用菜单栏视图命令集中的相关命令进行当前视窗调整，以便更细致地查看 PCB 设计细节和整体布局。嘉立创 CAM 图形显示与编辑区如图 13-15 所示。

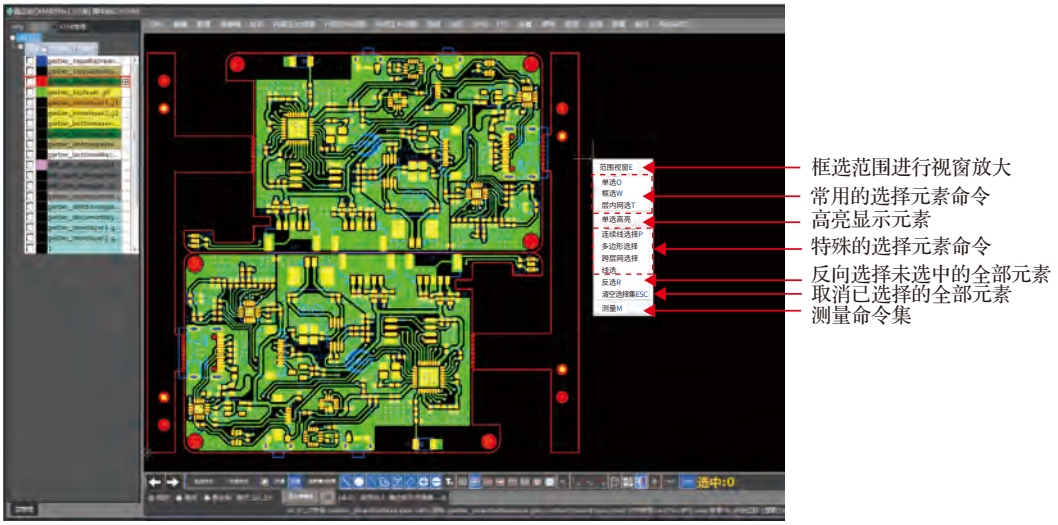


图 13-15　嘉立创 CAM 图形显示与编辑区

13.3.4 导出资料界面详解

选择菜单栏的“文件”命令集，再单击“导出资料”按钮，即可打开导出资料界面。这个界面提供了多种导出选项，以满足用户不同的导出需求，如选择导出的 Step 和相应的图层，设置输出路径、资料格式、资料类型、资料比例等。

在资料的导出过程中，软件会显示导出进度和状态信息。这些信息有助于用户了解导出过程的实时情况，并在出现错误时采取相应措施。嘉立创 CAM 导出资料界面详解如图 13-16 所示。

图 13-16　嘉立创 CAM 导出资料界面详解

13.4 主要命令详解

13.4.1 资料整理之层命名

在集成电路设计领域，一系列先进的电子设计自动化（Electronic Design Automation，EDA）软件，如 Altium Designer、Power PCB（PADS）、Cadence Allegro 以及嘉立创 EDA 等，已成为工程师不可或缺的工具。这些软件都以其独有的技术路线支持集成电路设计，但同时也带来了各自的数据格式和命名习惯。

下游环节，尤其是那些用于可制造性分析的 DFM 软件和计算机辅助制造的 CAM 软件，依赖一致且明确的层名来准确识别和处理每一层的信息。若没有标准化的层名，软件可能无法正确解析原始资料，导致错误理解设计意图，从而造成品质缺陷。

嘉立创 CAM 作为行业内领先的计算机辅助制造软件，深刻理解到这一需求，并因此

内置了一套全面且精细的标准模板层名与层类型。嘉立创 CAM 内置模板层名如表 13-1 所示。

表 13–1　嘉立创 CAM 内置模板层名

通用层名	常见别称	输出文件名（Altium Designer）	输出文件名（嘉立创 EDA）	嘉立创 CAM 内置模板层名	层属性和层类型
丝印层	字符层、文字层	Top Overlay、Bottom Overlay	Gerber_TopSilkLayer.GTO、Gerber_BottomSilkLayer.GBO	TO（顶层丝印）、BO（底层丝印）	板－丝印
阻焊层	防焊层、绿油层、绝缘层、开窗层	Top Solder、Bottom Solder	Gerber_TopSolderMaskLayer.GTS、Gerber_BottomSolderMaskLayer.GBS	TS（顶层阻焊）、BS（底层阻焊）	板－阻焊
外层线路	顶层线路、底层线路	Top Layer、Bottom Layer	Gerber_TopLayer.GTL、Gerber_BottomLayer.GBL	TL（顶层线路）、BL（底层线路）	板－线路
内层线路	电源层、接地层、信号层等	Middle Layer1、Middle Layer 2	Gerber_InnerLayer1.G1、Gerber_InnerLayer2.GP2	L2、L3、…、L31、L32（按叠层结构类推）	板－线路
钻孔层	钻带、DRL 层等	NC DRILL	Drill_PTH_Through.DRL、Drill_PTH_Through_Via.DRL、Drill_PTH_Inner1_to_Inner2.DRL	DRL（通孔钻带）	板－钻孔
外形层	禁止布线层、机械层、板框层、锣带等	Mechanical1、Keep-Out Layer	Gerber_BoardOutline.GKO、Gerber_MechanicalLayer.GME	KO（包含内槽的唯一外形）	板－锣带
贴片层	钢网层、锡膏层、SMT 层	Top Paste、Bottom Paste	Gerber_TopPasteMaskLayer.GTP、Gerber_BottomPasteMaskLayer.GBP	TP（顶层贴片）、BP（底层贴片）	板－贴片
装配层、主要焊盘层、孔符图层等其他辅助层		Top Pad Master、Bottom Pad Master、Drill Drawing 等	Gerber_DrillDrawingLayer.GDD	以层的后缀名命名，重名可以加前缀	统一用杂项－线路

为进一步增强兼容性和易用性，嘉立创 CAM 还开发了智能识别层名的功能。当导入设计文件时，软件会基于部分 EDA 软件的特定命名规则，自动识别一部分资料并按模板层名重新命名。这一过程极大地简化了信息传递的复杂度，减少了人工干预，提高了整体的生产效率。

如果人工检查后，发现自动识别的层名不够准确，就需要在导入界面的层名输入框里手动校正。如果是已经导入成功的资料，就需要在资料编辑界面，使用嘉立创 CAM 中的层命名功能进行修改。

将光标移至资料编辑界面的左侧层列表面板上，单击鼠标右键，在弹出的菜单中选择“层命名”功能，或者使用快捷键“ CTRL+R”，即可快速打开层命名界面。

在“层名”输入框中键入新的层名后，单击右侧的“改名”按钮即可，或直接按下回车键。这不仅能确认当前层名修改，还会自动切换到下一层的层名输入框，便于连续修改多个层名。嘉立创 CAM 层命名功能如图 13-17 所示。

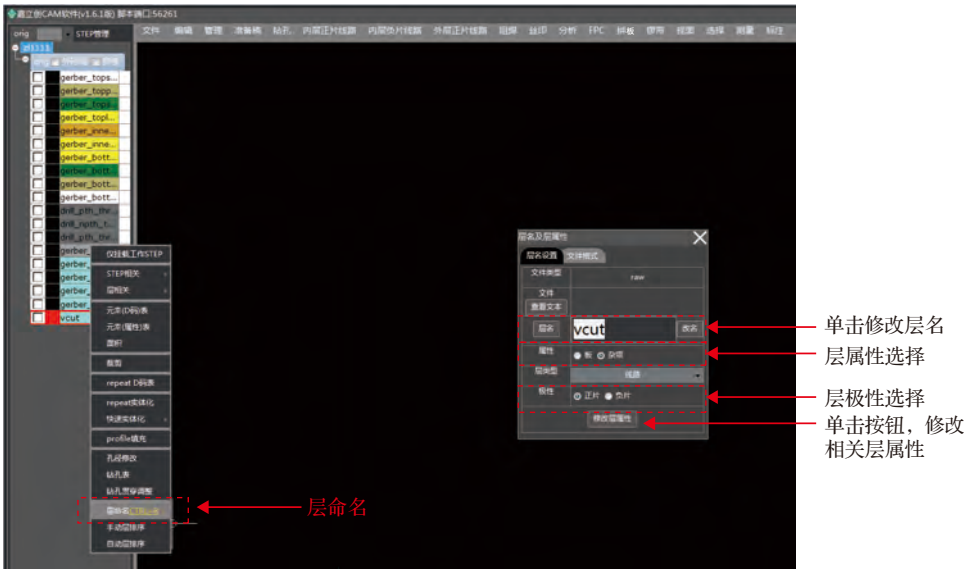


图 13-17　嘉立创 CAM 层命名功能

13.4.2　资料整理之层属性与层类型

嘉立创 CAM 除通过标准化层名来判断分析资料外，还会基于层属性和层类型来进一步区分 PCB 的不同内容，从而实现差异化与精细化处理，提升项目的清晰度和可维护性。

“板”属性用于标识属于实物板的一部分层，这些层通常包含实物 PCB 的外形、钻孔、线路、焊盘、文字等元素，是 PCB 的重要组成部分，会直接影响生产制造的结果。

“杂项”属性用于标识不属于实物板的一部分层，这些层通常包含对理解设计和生产制造有用的信息，如孔符图层、文档信息层、装配层、拼板示意层等，起到辅助和指导生产的作用，会间接影响生产制造的结果。

层类型设置的主要作用是为软件提供关于每一层资料的用途和特性的明确指示，这有助于软件在进行钻孔处理、线路优化、阻焊优化等操作时，能够准确识别和处理每一层的数据。

嘉立创 CAM 支持多种层类型，包括丝印、线路、阻焊、钻孔、锣带等，每种层类型都有其特定的用途和表现方式。例如，设置线路层类型，会告诉程序这些层是可导电的电路图形，以确保电路连通并实现相应的功能；设置阻焊层类型，则告诉程序这些层是涂覆防焊材料的，以保护电路免受环境因素的影响；设置丝印层类型，则告诉程序这些层在 PCB 上标注了元件信息、制造要求等文字信息，以便于生产和维护。

嘉立创 CAM 自带智能识别层属性和层类型的功能。如果人工检查后，发现自动识别的层属性和层类型不准确，则可以在层命名界面进行修改。

根据实际资料的内容，再结合表 13-1，选择好对应的层属性和层类型后，单击“修改层属性”按钮即可，参见图 13-17。

13.4.3　资料整理之层极性

行业内绝大部分的 EDA 设计软件都支持正负片设计，如 Altium Designer 的正片层（Signal）与负片层（Plane）、Cadence Allegro 的正片层（Conductor）与负片层

（Plane）等。

这个信息很重要，但在各类设计软件输出的 Gerber 274X 格式的资料中，并不含有该层资料是正片设计还是负片设计的信息与指令。

这需要具备专业知识和丰富经验的工程师，基于实际资料和设计逻辑，人为判断资料是正片设计还是负片设计，再通过嘉立创 CAM 的层命名功能，进行修改。

“正片”对应的是正片设计，“负片”对应的是负片设计。

选择正确的设计方式后，单击“修改层属性”按钮即可。

13.4.4　资料整理之资料格式

由于设计软件和用户设置的不同，项目输出的 Gerber 资料和 Excellon 钻孔资料格式也各异，因此嘉立创 CAM 软件在读入这些资料时必须遵循当时输出的格式。

以 Altium Designer 为例，输出 Gerber 资料的默认格式是 274X，采用英制单位，数字规则为 2:5；输出 NC DRILL 钻孔资料的默认格式是 Excellon 2，同样采用英制单位，数字规则也为 2:5。

虽然嘉立创 CAM 自带智能识别 Gerber 资料格式和 Excellon 钻孔资料格式的功能，能够匹配并兼容市面上主流的几款设计软件输出的文件，但是如果导入资料后，发现钻孔文件比例异常、偏位变形，就需要使用嘉立创 CAM 的格式调整功能手动修正。

首先在左侧层列表面板上，选中钻孔类型的层；然后打开层名及层属性界面，切换到“文件格式”标签页，单击左下角的“猜格式”按钮，即可启用更复杂的钻孔格式识别算法，进一步解析钻孔格式。

如果解析仍然不正确，则可根据输出资料时的信息，人为选择单位格式、坐标方式、省零规则、数字规则以及刀具单位信息，重复单击下方的“重新解析”按钮，多次尝试解析钻孔文件。嘉立创 CAM 资料格式调整功能如图 13-18 所示。

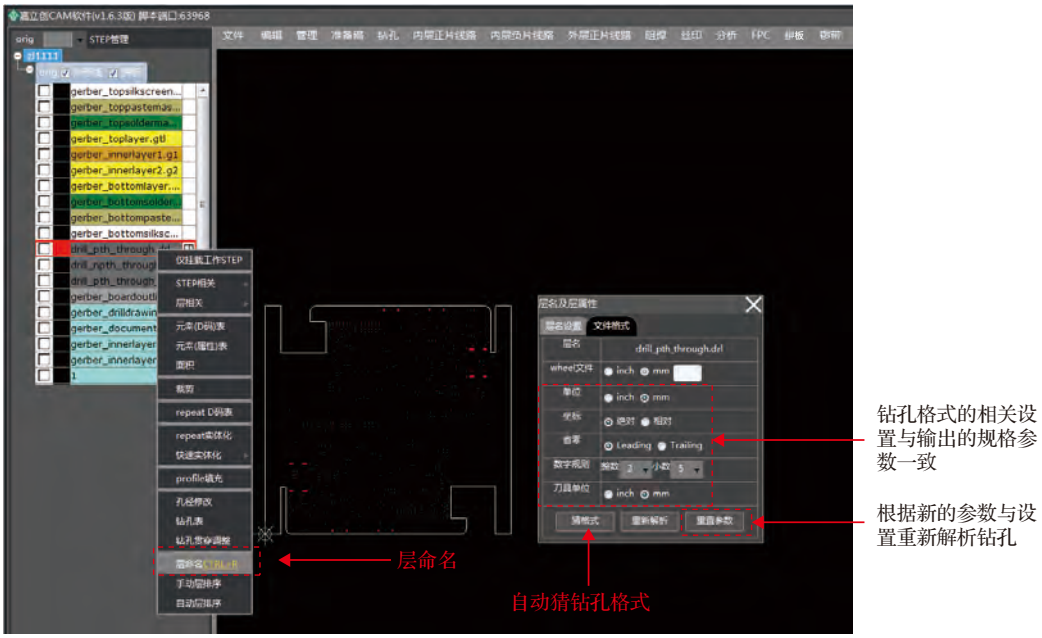


图 13-18　嘉立创 CAM 资料格式调整功能

13.4.5 资料整理之层对齐

因文件转换和导入设置等原因，资料导入到嘉立创 CAM 后，各层资料有时候是偏位的，这会影响浏览和编辑。这时就需要使用层对齐的命令，结合实际资料去对齐图层。

将光标移至资料编辑界面的左侧层列表面板上，单击鼠标右键，在弹出的菜单中选择“层相关”，再在下级菜单中选择“层手动对齐”，即可快速打开层对齐界面。嘉立创 CAM 层对齐功能如图 13-19 所示。

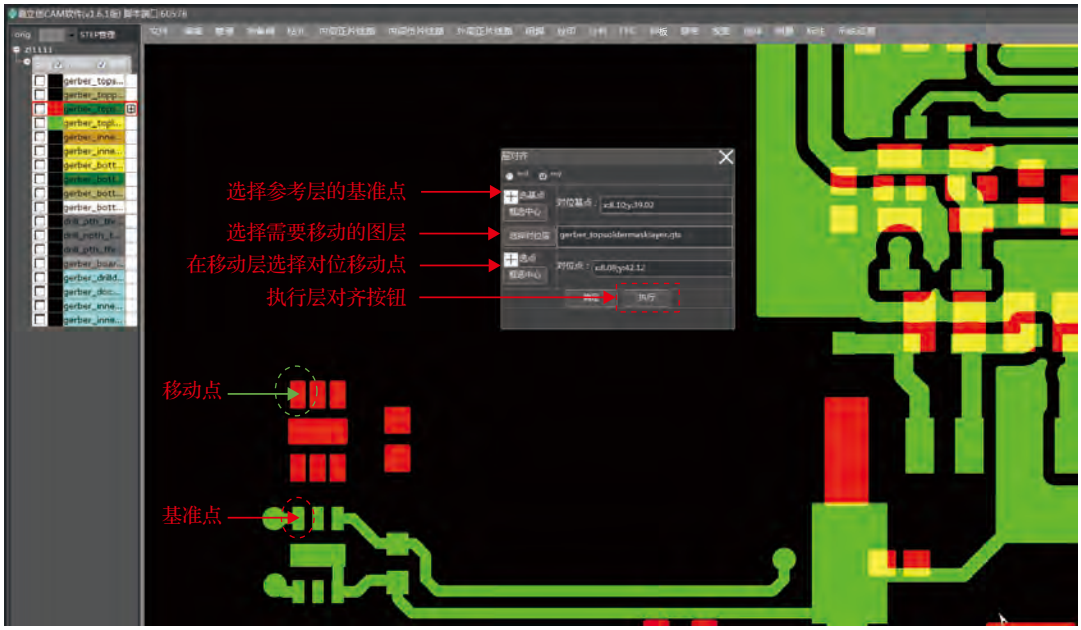


图 13-19　嘉立创 CAM 层对齐功能

首先将参考层和需要移动的层在层列表面板上同时显示，并将需要移动的层设定为工作层（层列表面板上被红框圈住的层）。

接着单击层对齐界面上“选基点”附近的“+”号按钮进入选择基准点状态，再按快捷键“S+C”，开启捕捉元素中心的功能，然后按快捷键“ S+A”，将元素捕捉功能应用到参考层（元素捕捉层可循环切换，只要看到层列表面板上参考层的尾端显示田字格捕捉符号即可）。

随后在参考层找到合适的元素中心，并用光标捕捉到后，单击鼠标左键，即可完成基准点的选择。选点要从设计角度出发，尽量选择容易对齐的元素中心，比如钻孔中心对线路焊盘中心、线路焊盘中心对阻焊开窗中心等。

接下来，在“选择对位层”的输入框中，选择或键入需要移动的层名，再单击“选点”附近的“+”号按钮进入选择移动点状态，然后按快捷键“ S+A”，将元素捕捉功能应用到移动层。

在移动层找到对应的元素中心，并用光标捕捉到后，单击鼠标左键，即可完成移动点的选择。

最后单击界面下方的“执行”按钮，程序就会自动将所有移动层的元素，以移动点为新基准点，朝着参考层的基准点移动，从而实现层与层之间的对齐。

13.4.6　资料整理之虚拟外形

因为部分工程师在设计过程中可能混淆机械加工层与禁止布线层的使用，且程序难以通过多边形轮廓精准识别 PCB 的物理边界，所以需要用户基于实际资料，创建一个虚拟的 Profile 外形。这样，在编辑资料的过程中，软件就能实现对特定区域的检查优化和屏蔽处理。

首先，在左侧层列表面板上，单击显示正确的外形层。然后，在上方菜单栏单击“编辑”按钮，再在编辑菜单中选择“外形”选项。在展开的次级菜单下选择“创建 PROFILE 外形”选项，即可创建一个能让程序识别物理边界的虚拟外形。嘉立创 CAM 创建 Profile 虚拟外形如图 13-20 所示。

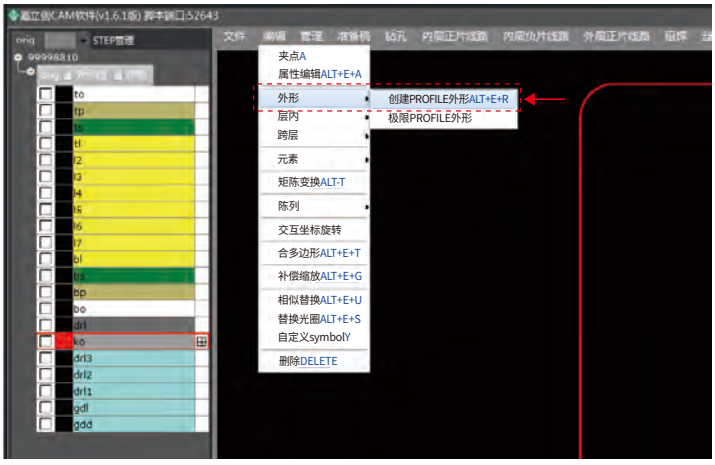


图 13-20　嘉立创 CAM 创建 Profile 虚拟外形

13.4.7　资料整理之 Step 归零

此命令的作用是将锚点（Datum Point）和原点（Origin）设置到 Profile 虚拟外形的左下角。

首先，在左侧层列表面板上选择想要执行该命令的 Step 里的任意一个图层作为工作层；接着，在上方菜单栏单击“准备稿”按钮，再选择“Step 整体归零”选项，即可成功将锚点和原点默认设置到 Profile 虚拟外形的左下角。嘉立创 CAM Step 整体归零如图 13-21 所示。

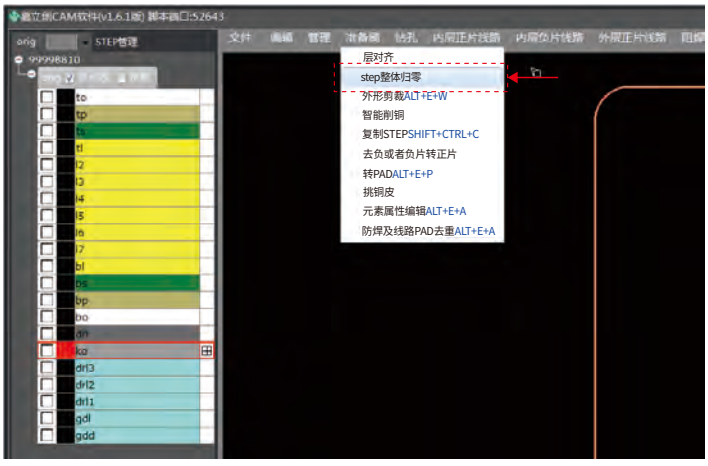


图 13-21　嘉立创 CAM Step 整体归零

这两个点对于持续编辑资料和后续指导生产非常重要，需要深入了解一下。

（1）锚点：它是一个特定的坐标点，不是 PCB 的几何中心或任何物理结构，而是一个可以人为定义的虚拟点位。在嘉立创 CAM 中，锚点通常用于排版布局，在排版过程中，锚点定义了单元板的起始位置，在进行单元板旋转、镜像、移动等操作时，能确保每个单元在排版中的精确位置关系，保证整体设计的有序与协调。

（2）原点：它是资料平面坐标系的中心点或起点，坐标通常是（0，0）。在嘉立创 CAM 中，原点有以下重要作用。

- 绝对定位：无论是焊盘、走线还是过孔的位置，每一个点位的坐标都是相对于原点的距离，是所有设计元素定位的基准。
- 制造和装配：制造商在生产 PCB 时，会依据生产文件中的原点信息，调整其制造设备，如钻孔机、贴片机和曝光机等，以确保在正确的坐标位置上进行加工。
- 数据交换：当生产资料在不同的生产工具或制造商之间传递时，原点提供了统一的数据参照框架，保证了资料的完整性，避免了因坐标偏移导致的错误。

13.4.8 资料整理之外形裁剪

此命令的作用是将 PCB Profile 虚拟外形线以外的所有图形元素移除，如线路、丝印、焊盘等，避免在制造过程中出现不必要的元素残留而影响到其他 PCB，确保制造数据只包含当前 PCB 内部的有效内容，防止外部图形造成拼板异常或浪费材料。

首先在左侧层列表面板上，以勾选影响层的方式批量选择需要裁剪的层，通常包括板内属性层。然后单击鼠标右键，在弹出的菜单中选择“裁剪”功能，即可快速打开外形裁剪功能界面。嘉立创 CAM 外形裁剪功能如图 13-22 所示。

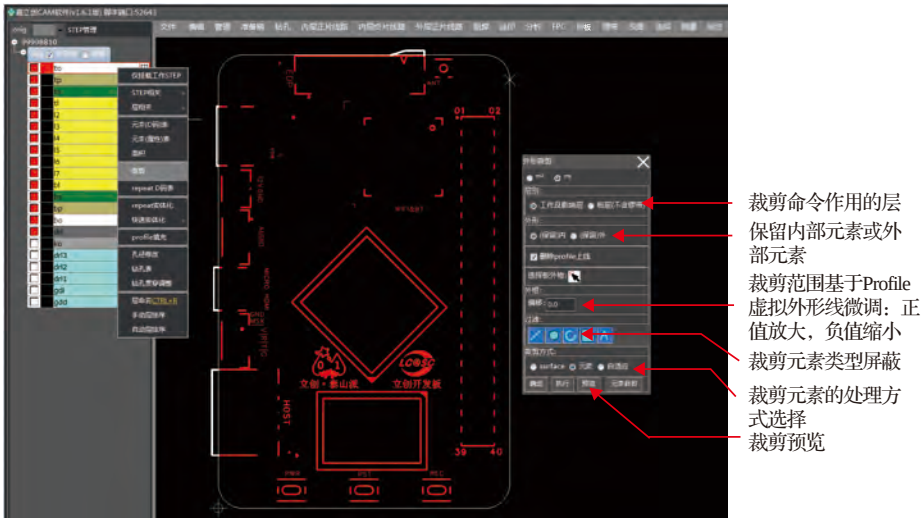


图 13-22　嘉立创 CAM 外形裁剪功能

仅移除板外元素，可按外形裁剪功能里的默认参数去执行命令，先单击“预览”按钮，查看哪些板外元素会被裁剪移除，确认无误后，再单击“执行”按钮，嘉立创 CAM 会立即根据用户设定参数移除选定层所有的板外元素。

13.4.9　层相关命令集

此命令集里包含了针对图层的一些基础命令。要访问这些命令，请将光标移至上方菜单栏，单击“管理”按钮，然后在管理菜单中选择“层”选项，即可展开与图层相关的命令集。嘉立创 CAM 层相关命令集如图 13-23 所示。

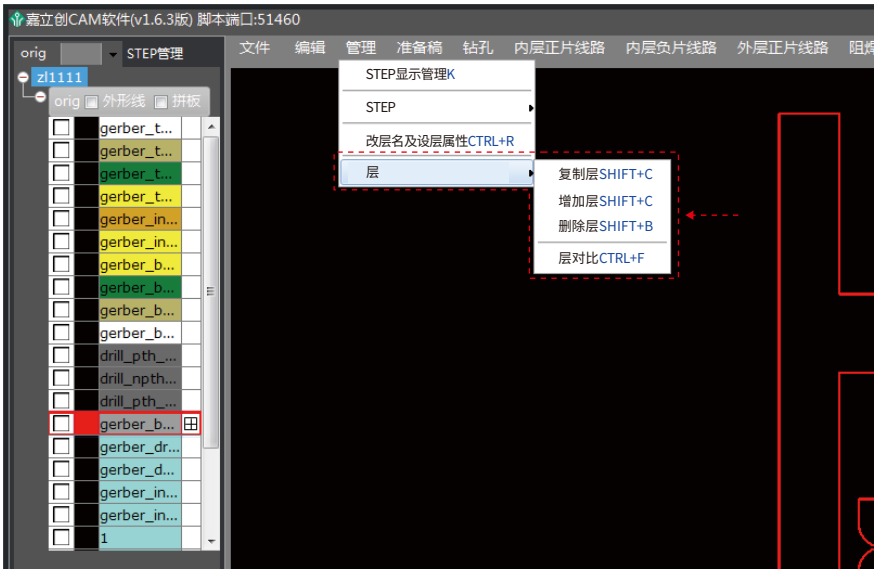


图 13-23　嘉立创 CAM 层相关命令集

（1）增加层：新建一个在所有 Step 中都没有内容的空层，便于用户进行一些辅助性的编辑和操作。

（2）删除层：在每个 Step 中，将选定图层删除。

（3）复制层：将来源 Step 中某些图层的所有内容原封不动地复制到新的图层里，支持在同一 Step 内复制和跨 Step 复制，便于用户进行一些辅助性的编辑和操作。

（4）层对比：将选择的图层进行两两对比，并生成对比报告和辅助显示层，支持在同一 Step 内和跨 Step 一次性对比多个图层。

13.4.10　跨层移动

此命令的作用是将当前工作图层已选择的元素或所有元素，移动到其他图层但不改变它们所在的位置。在移动过程中，还可以通过界面选项和参数对移动后的元素进行极性和大小的修改。

首先在工作图层选择需要移动的元素，接着将光标移至上方菜单栏单击“编辑”按钮，再在编辑菜单中选择“跨层”选项，然后在展开的次级菜单下选择“跨层移动”选项或直接按快捷键“Alt+X”，即可打开跨层移动命令界面。

输入目标层名，单击界面下方的“移动”按钮，即可完成跨层移动。嘉立创 CAM 跨层移动如图 13-24 所示。

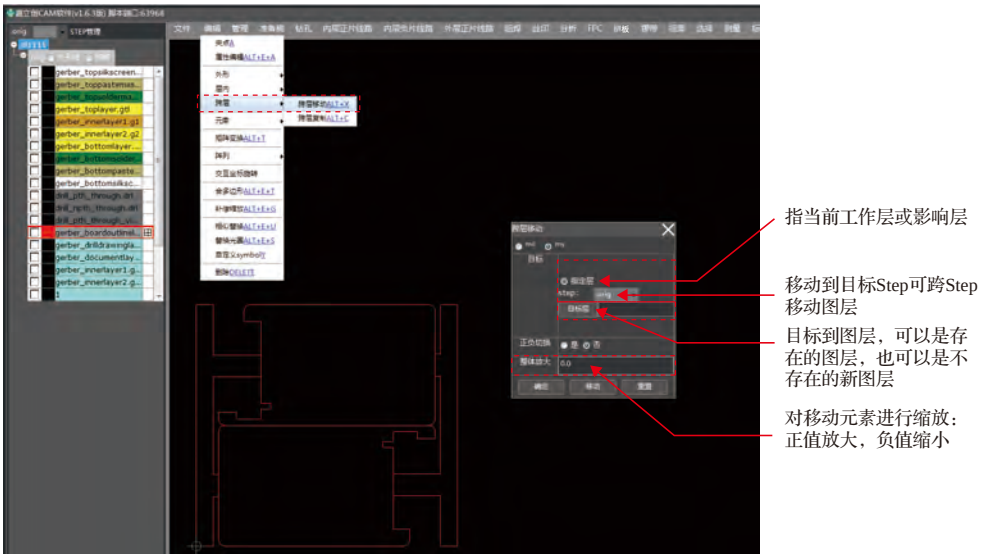


图 13-24　嘉立创 CAM 跨层移动

13.4.11　跨层复制（复制层）

此命令的作用是将当前工作图层已选择的元素或所有元素，复制到其他图层但不改变它们所在的位置。在复制过程中，还可以通过界面选项和参数对复制出来的元素进行极性转换（具体定义请参见附录 A）和大小的修改。

首先在工作图层选择需要复制的元素，接着将光标移至上方菜单栏单击“编辑”按钮，再在编辑菜单中选择“跨层”选项，然后在展开的次级菜单下选择“跨层复制”选项或直接按快捷键“ALT+C”，即可打开跨层复制命令界面。

输入目标层名，单击界面下方的“复制”按钮，即可完成跨层复制。嘉立创 CAM 跨层复制如图 13-25 所示。

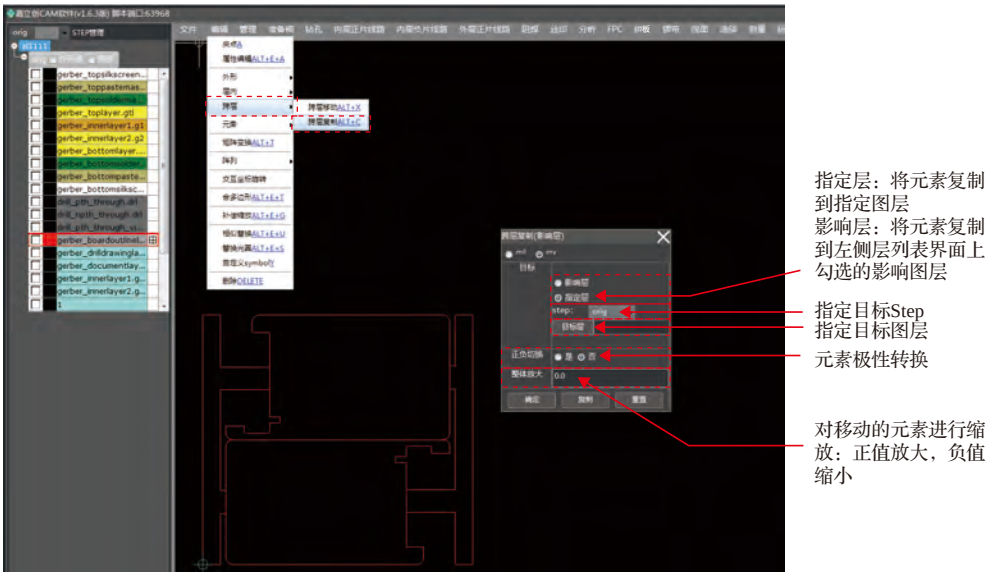


图 13-25　嘉立创 CAM 跨层复制

13.4.12　Step 相关命令集

此命令集是针对图层的一些基础命令。将光标移动到上方菜单栏单击“管理”按钮，再在管理菜单中选择“STEP”选项，即可展开 Step 相关的命令集。嘉立创 CAM Step 相关命令集如图 13-26 所示。

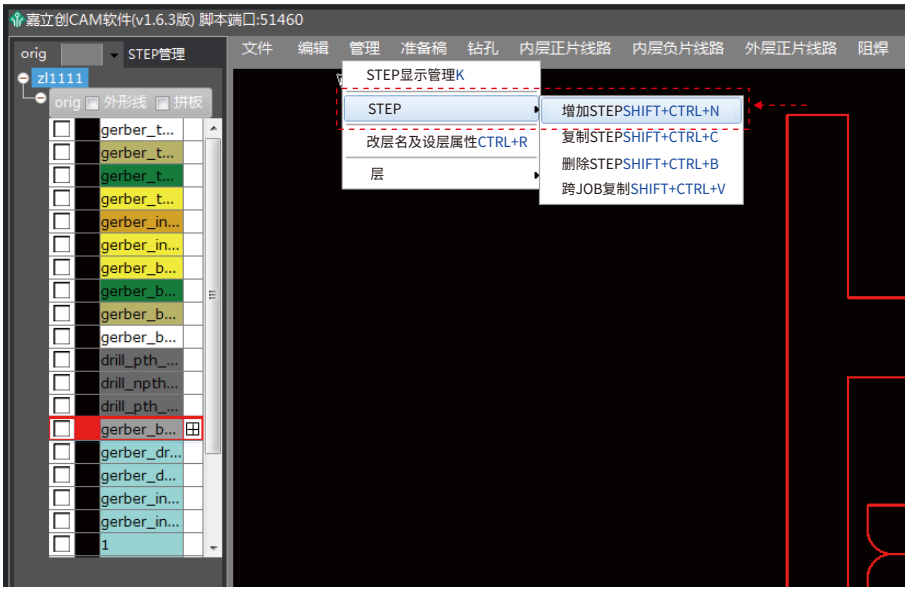


图 13-26　嘉立创 CAM Step 相关命令集

（1）增加 STEP：新建一个内部所有图层都为空的 Step，便于用户进行一些辅助性的编辑和操作，如手动拼板。

（2）复制 STEP：将某个 Step 的所有内容原封不动地复制到一个新的 Step 中，便于用户进行一些辅助性的编辑和操作。

（3）删除 STEP：将当前工作的 Step 完全删除，包括所有图层在这个 Step 中的内容。

（4）跨 JOB 复制：从其他项目资料包中复制 Step 和图层到当前的项目资料包中。

13.4.13　还原文件名

此命令的作用是将通过嘉立创 CAM 导入的图层层名全部还原成原始文件名。通常是在用户完成编辑后，输出资料前使用，因为有些用户习惯使用原始资料名，便于留底和与旧资料包进行校对。

首先在左侧层列表面板上，以勾选影响层的方式批量选择需要还原文件名的图层；接着单击鼠标右键，在右键菜单里选择“层相关”选项，然后选择“还原文件名”选项或直接按快捷键“Alt+N”，即可快速将当前选择的图层层名全部还原成原始文件名。嘉立创 CAM 还原文件名如图 13-27 所示。

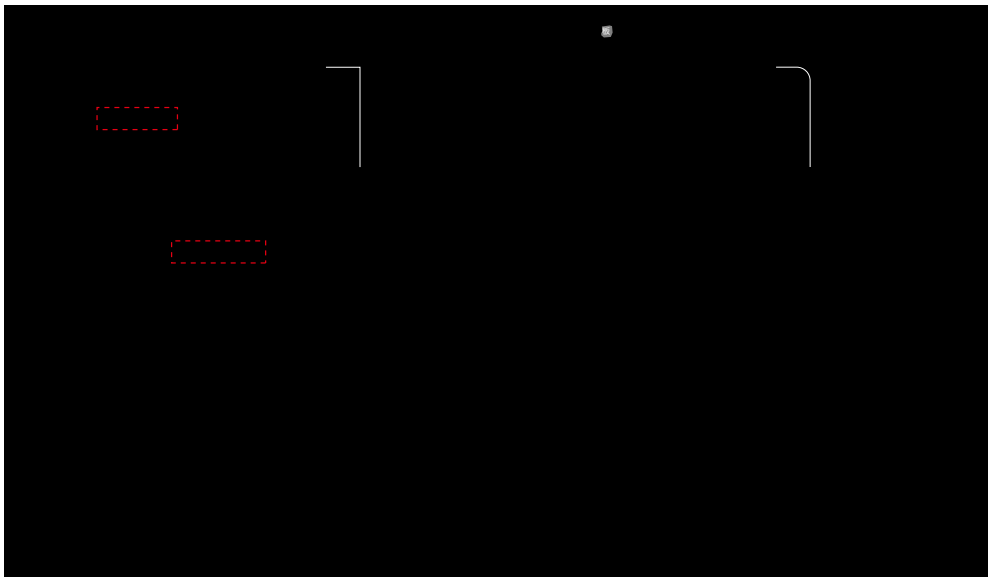


图 13-27　嘉立创 CAM 还原文件名

13.4.14　资料编辑之选择命令

嘉立创 CAM 中的绝大部分命令，其执行对象都是整个图层。如果想对图层里的单个元素或一组元素进行编辑或处理，就必须用到选择命令，比如修改某个钻孔的成品孔径、修改丝印符号、移动走线等，因此掌握选择命令集中的功能就尤为重要。

将光标移至上方菜单栏单击“选择”按钮，或者在工作图层的图形显示与操作区域单击右键，软件展开的功能菜单里就是不同模式的选择命令，适用于不同的场景和需求。嘉立创 CAM 选择命令集如图 13-28 所示。

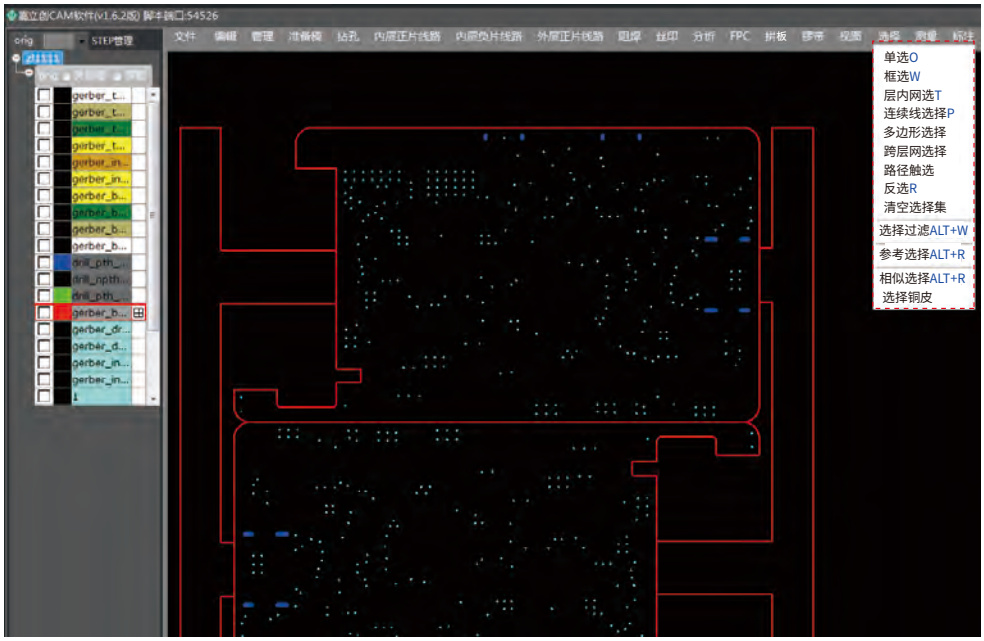


图 13-28　嘉立创 CAM 选择命令集

（1）单选：通过鼠标左键单击来选择单个元素。在工作图层的图形显示与编辑区，执行单选并进入命令状态后，使用鼠标左键单击想要选择的元素，即可完成选择，快速双击还可以将当前工作层内与初选元素相似的元素同时选中。

（2）框选：通过拖拽鼠标来定义一个矩形区域，所有位于该区域内的元素都会被选中。在工作图层的图形显示与编辑区，执行框选并进入命令状态后，请按下鼠标左键并进行拖动，释放鼠标左键时，所有被矩形框覆盖的元素都会被选中。

（3）多边形选择：通过鼠标点选来定义一个多边形区域，所有位于该区域内的元素都会被选中。在工作图层的图形显示与编辑区，执行多边形选择并进入命令状态后，使用鼠标左键选择多个点位围成多边形，再双击鼠标左键结束，所有被多边形区域覆盖的元素都会被选中。

（4）层内网选：通过鼠标左键单击来选择单个元素，当前工作层内与该单个元素是同一网络的元素都会被选中。在工作图层的图形显示与编辑区，执行层内网选并进入命令状态后，使用鼠标左键单击想要选择的元素，即可完成选择。

（5）跨层网选择：通过鼠标左键单击来选择元素，当前资料包内与该元素是同一网络的元素都会被选中（跨层网选择会考虑所有的线路层、钻孔层和外形层，基于完整资料来判断网络）。在工作图层的图形显示与编辑区，执行跨层网选择并进入命令状态后，使用鼠标左键单击想要选择的元素，即可完成选择。

（6）连续线选择：通过鼠标左键单击来选择单个线性元素，当前工作层内与该线性元素相关联的多段线元素也会被选中，主要用于选择有规律的多段轮廓线。在工作图层的图形显示与编辑区，执行连续线选择并进入命令状态后，使用鼠标左键单击想要选择的元素，即可完成选择。

（7）路径触选：通过鼠标点选来定义一段虚拟路径，所有被虚拟路径接触到的元素都会被选中。在工作图层的图形显示与编辑区，执行路径触选并进入命令状态后，使用鼠标左键选择两个点位形成一条路径，即可完成选择。

（8）反选：选择除当前已选择元素外的所有元素，同时取消当前已选择元素，转为未选中状态，如果执行时没有选择元素，实际效果为全部选择。在工作图层的图形显示与编辑区，单击右键，在弹出的菜单中选择“反选”选项或按快捷键“R”，即可完成反向选择。

注意，这些常规选择命令，在重复使用时会自动取消上一步选择的元素，如果有连续选择的需要，可以启用下方工具栏里的“追加状态”功能，这样每次执行选择操作时，新选择的元素将被累加到当前已选元素列表中，不会替换原有选择。

（9）清空选择集：一次清除当前已选择元素列表中所有的元素。在工作图层的图形显示与编辑区，单击鼠标右键，在弹出的菜单中选择“清空选择集”选项或按快捷键“ESC”，即可完成清空选择操作。

如果有局部取消选择的需要，可以启用下方工具栏里的“反选状态”功能，这样所有常规的选择命令（单选、框选、层内网选、多边形选择等）都会转变为取消选择，使用相同的选择工具，其效果是取消对元素的选择，而非新增选择。

13.4.15　资料编辑之同层移动

此命令的作用是将当前工作图层已选择的元素或所有元素进行位置调整，但不改变它们所在的图层。

首先在工作图层选择需要移动的元素，接着将光标移至上方菜单栏单击“编辑”按钮，再在编辑菜单中选择“层内”选项，然后在展开的次级菜单下选择“层内移动”选项或直接按快捷键“Ctrl+X”，即可进入层内移动状态。嘉立创 CAM 同层移动命令如图 13-29 所示。

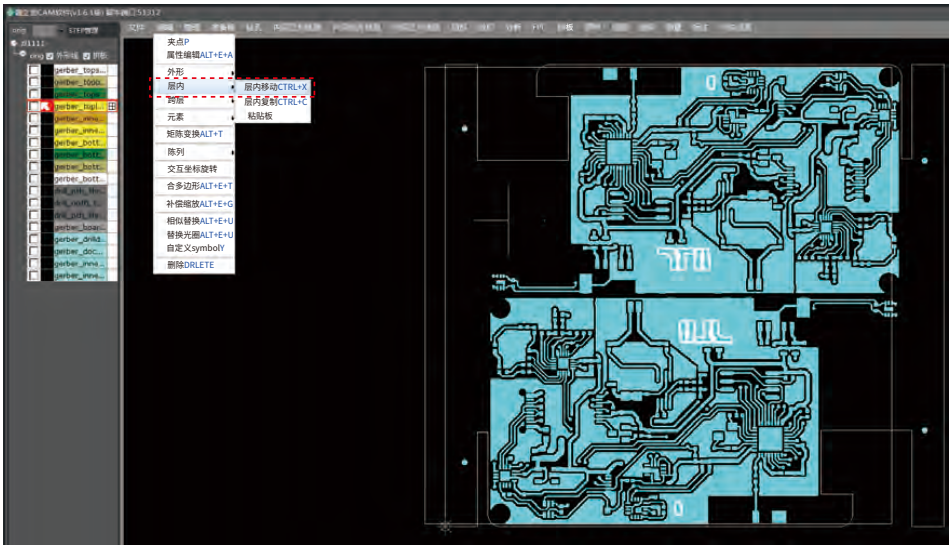


图 13-29　嘉立创 CAM 同层移动命令

在移动状态下，先用鼠标左键点选一个基准点，接着拖动光标就会进入移动预览状态。将元素移动到合适位置后，再用鼠标左键单击（而非“点选一个参考点”，因为此步骤通常不需要选择特定的参考点来使预览生效，而是直接通过单击确认位置）以确认移动，即可完成层内移动。

如果有按具体坐标移动元素的需要，可以启用下方工具栏里的“编辑框”功能。在移动预览状态下，按平面直角坐标系在框内输入 X 和 Y 方向的坐标，中间用英文输入法状态下的逗号“，”隔开，按“回车键”或“空格键”，即可实现从基准点按具体坐标来移动元素。嘉立创 CAM 同层移动示例如图 13-30 所示。

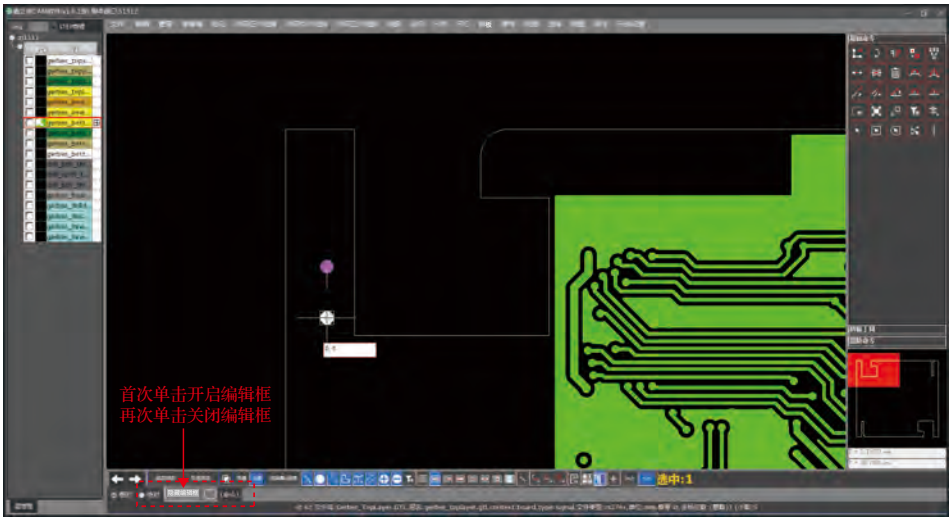


图 13-30　嘉立创 CAM 同层移动示例

13.4.16　资料编辑之同层复制

此命令的作用是将当前工作图层中已选择的元素或所有元素复制一份，并进行位置调整，但不改变它们所在的图层。

首先在工作图层选择需要复制的元素，接着将光标移至上方菜单栏单击“编辑”按钮，再在编辑菜单中选择“层内”选项，然后在展开的次级菜单下选择“层内复制”选项或直接按快捷键“Ctrl+C”，即可进入层内复制状态。嘉立创 CAM 同层复制如图 13-31 所示。

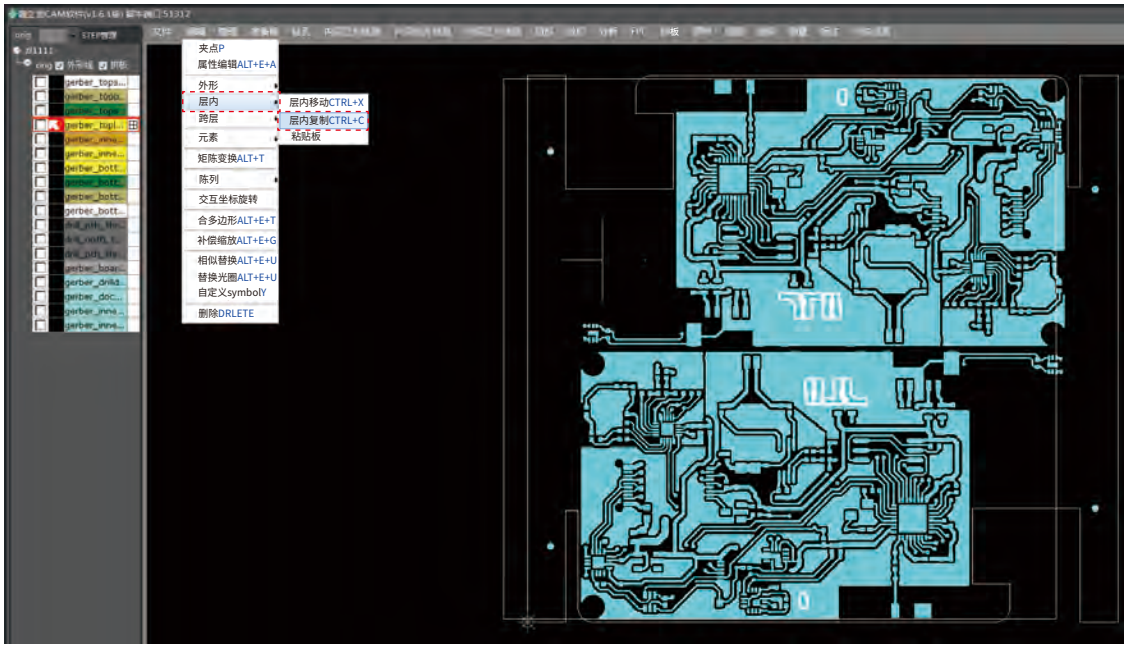


图 13-31　嘉立创 CAM 同层复制

复制状态下，先用鼠标左键点选一个基准点，接着拖动光标就会进入复制预览状态，将元素复制到合适位置后，再用鼠标左键点选一个参考点使预览生效，即可完成层内复制。如果有按具体坐标复制元素的需要，同样可以启用下方工具栏里的“编辑框”功能，使用方法和前面的层内移动功能相同。

13.4.17　资料编辑之元素添加

此命令的作用是弹出一个元素添加窗口，方便用户将不同类型和尺寸的特征元素添加到当前工作层中。这些特征元素包括线条、焊盘、圆弧、多边形、文本。

将光标移动到右侧工具栏，单击第一行的第一个命令图标或者按快捷键“C”，即可打开元素添加命令界面，如图 13-32 所示。

（1）添加线条：先设置好线条宽度，再单击线条图标进入绘制状态，然后移动光标到工作图层的图形显示与编辑区，通过选取起止点的方式一边预览一边绘制线条，最后按回车键或空格键执行，如图 13-33 所示。

（2）添加焊盘：先设置好焊盘类型与尺寸，再单击焊盘图标进入添加状态，然后移动光标到工作图层的图形显示与编辑区，通过选取基准点的方式一边预览一边添加焊盘，最后按回车键或空格键执行，如图 13-34 所示。

图 13-32　元素添加介绍

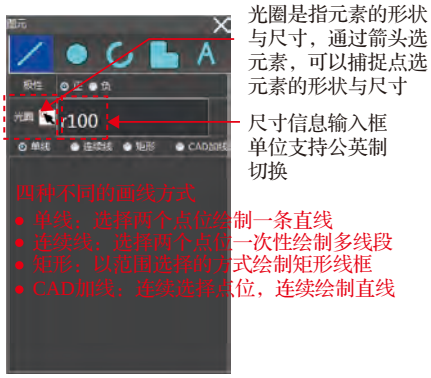


图 13-33　添加线条

（3）添加圆弧：先设置好圆弧的宽度，再单击圆弧图标进入绘制状态，然后移动光标到工作图层的图形显示与编辑区，通过选取起止点（或圆心、起止角度等，具体取决于所选模式）的方式一边预览一边绘制圆弧，最后按回车键或空格键执行，如图 13-35 所示。

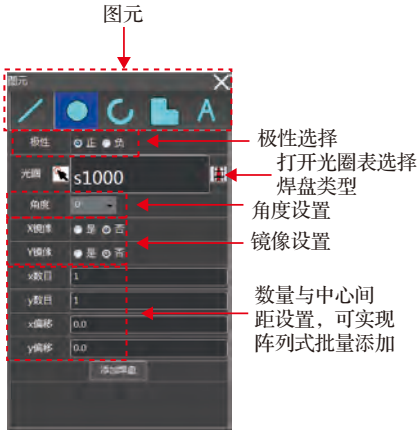


图 13-34　添加焊盘

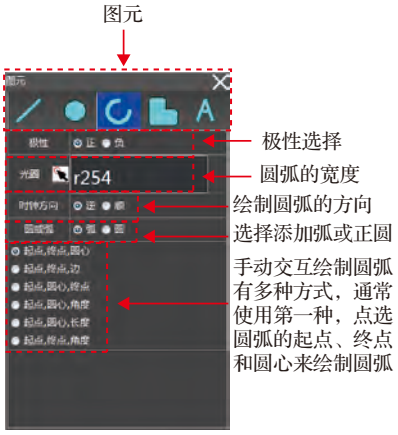


图 13-35　添加圆弧

（4）添加多边形：先选好绘制方式，再单击多边形图标进入绘制状态，然后移动光标到工作图层的图形显示与编辑区，通过选取范围或选取节点的方式一边预览一边绘制多边形，最后按回车键或空格键执行，如图 13-36 所示。

（5）添加文本：先输入字体、高度和文本内容等参数，再单击文本图标进入添加状态，然后移动光标到工作图层的图形显示与编辑区，用点选放置的方式一边预览一边添加文本，最后按回车键或空格键执行，如图 13-37 所示。

以上添加元素的命令，在预览状态下，也可以使用下方工具栏的“输入框”功能。首先输入正确的 X 和 Y 坐标，再按回车键或空格键执行，即可实现按选定的基准点精准添加元素。

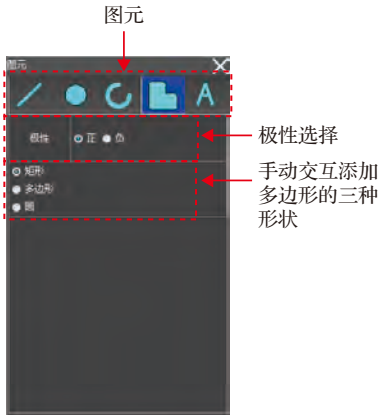


图 13-36　添加多边形

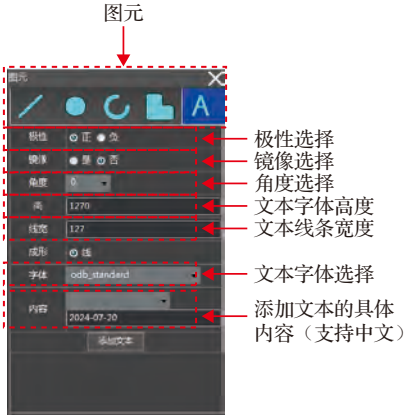


图 13-37　添加文本

13.4.18　资料编辑之元素胀缩

此命令的作用是对所选元素进行放大或缩小处理，以方便用户直接调整资料中的元素尺寸。

首先在工作图层选择需要调整尺寸的元素，接着将光标移至上方菜单栏，单击“外层正片线路”按钮，在弹出的菜单中选择“补偿”选项，然后在展开的次级菜单中选择“手动补偿”选项，或直接按快捷键“Alt+E+G”，即可打开元素胀缩界面，如图 13-38 所示。

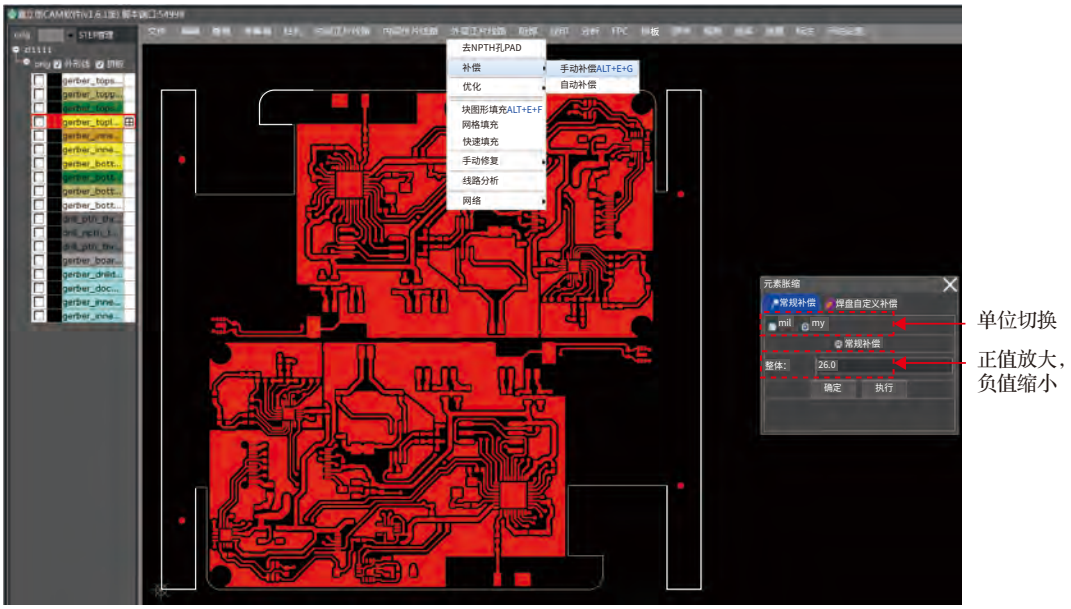


图 13-38　嘉立创 CAM 元素胀缩界面

在补偿值的输入框中输入正值是整体放大，输入负值则是整体缩小，单击“执行”按钮即可生效。

除整体胀缩外，还可以对一些圆形、矩形的常规焊盘按上下左右的方向进行自定义胀缩，或者用鼠标拖动焊盘边界的节点，进行手动交互调整焊盘大小。嘉立创 CAM 焊盘自定义补偿如图 13-39 所示。

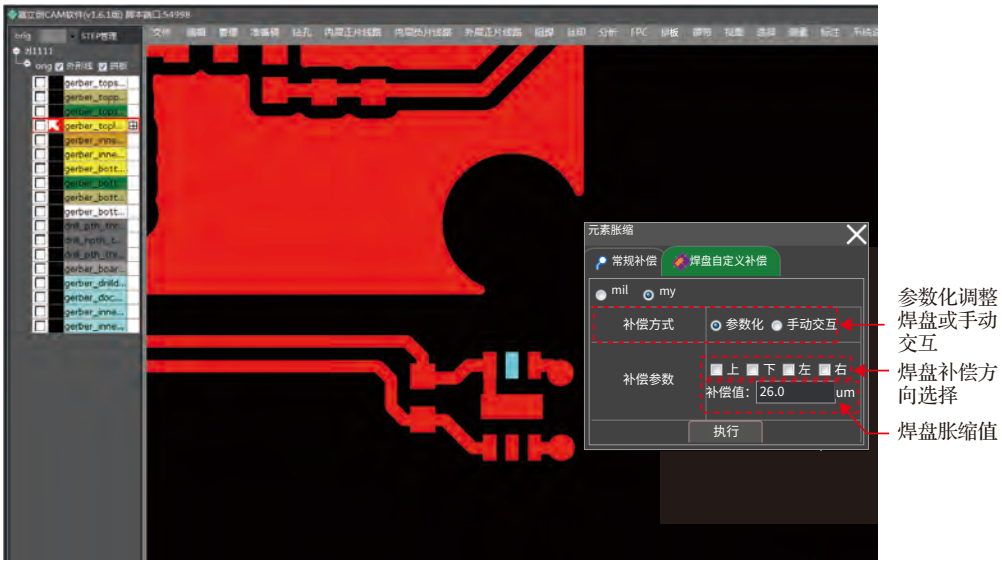


图 13-39　嘉立创 CAM 焊盘自定义补偿

13.4.19　资料编辑之元素修改

此命令的作用是对所选元素进行参数和类型的修改，以方便用户精准调整元素类型和尺寸。

首先在工作图层选择需要修改的元素，接着将光标移至上方菜单栏，单击“编辑”按钮，在弹出的菜单中选择“替换光圈”选项，或者直接按快捷键“Alt+E+S”，即可打开元素修改命令界面。

首先单击输入框前面的小箭头（此步骤是进入某种特定模式或选择状态的必要操作），进入参数捕捉状态；然后单击想要修改的元素，该元素的参数会自动被提取到输入框内；最后根据实际需求手动修改输入框中的元素类型编码和尺寸参数，单击“执行”按钮即可完成对所选元素的修改。嘉立创 CAM 元素修改如图 13-40 所示。

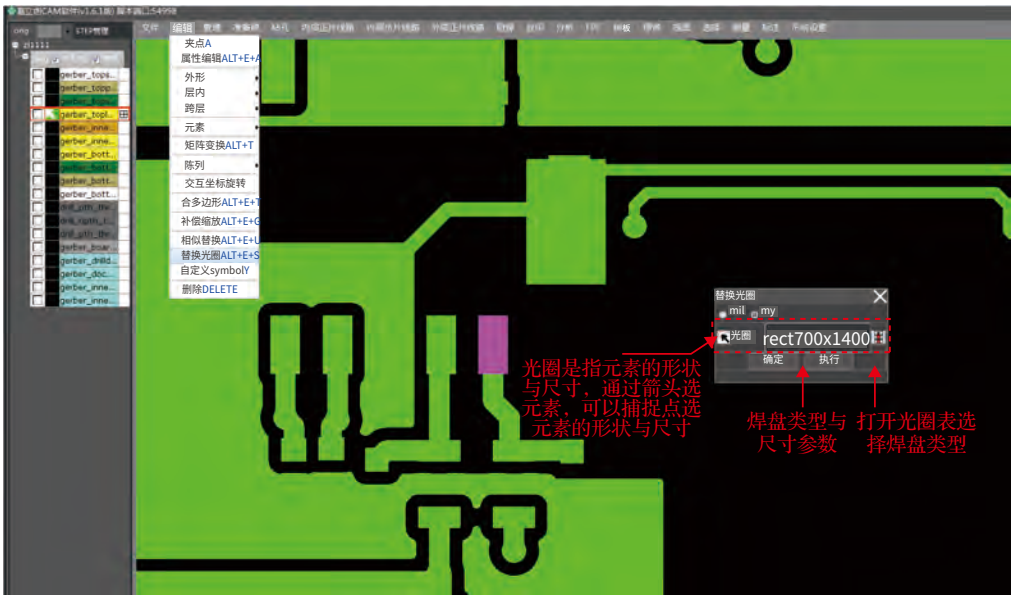


图 13-40　嘉立创 CAM 元素修改

13.4.20　资料编辑之正片去负

此命令的作用是合并资料中所有的负性元素（请参见附录 A），以达到所见即所得的效果，便于用户进一步编辑资料，避免在操作和命令执行过程中无意中处理到负性元素，导致资料发生异常改变。

首先按快捷键“Ctrl+N”，打开负性显示，查看当前工作图层是否存在负性元素，如果有就将光标移至上方菜单栏，单击“准备稿”按钮，在弹出的菜单中选择“去负或负片转正片”选项，接着在弹出窗口上单击“正片去负”按钮，即可自动合并处理掉资料中所有的负性元素。嘉立创 CAM 正片去负如图 13-41 所示。

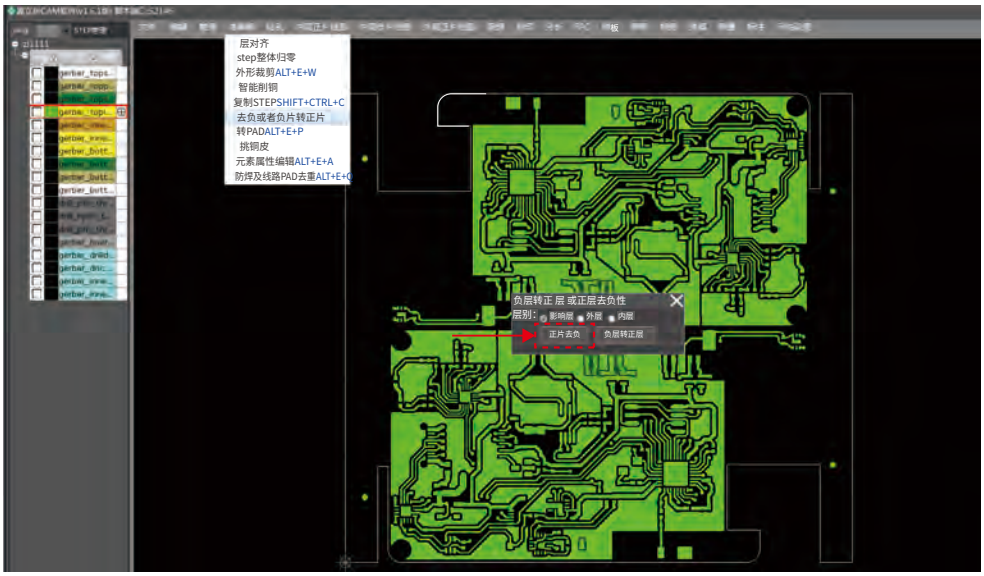


图 13-41　嘉立创 CAM 正片去负

13.4.21　矩阵变换

此命令的作用是对已选择的元素进行变换操作，如偏移、旋转、镜像以及缩放，这对于调整 PCB 布局、优化资料非常有用。

首先在工作图层选择需要变换的元素，接着将光标移至上方菜单栏，单击“编辑”按钮，在弹出的菜单中选择“矩阵变换”选项，即可快速打开矩阵变换命令界面。

在该命令界面中，先勾选需要的变换方式，在下方输入框中输入对应的参数；然后设置一个执行中心点；最后单击“执行”按钮，即可完成对选择元素的矩阵变换。嘉立创 CAM 矩阵变换如图 13-42 所示。

13.4.22　提取轮廓线

此命令的作用是将表面图形以边缘为中心转换成轮廓线，便于进行一些辅助操作或制作生产资料。

首先在工作图层选择需要转换为轮廓线的元素，接着将光标移至上方菜单栏，单击“编辑”按钮，在弹出的菜单中选择“元素”选项，然后在展开的次级菜单中选择“元素提取轮廓线”选项或按快捷键“Alt+E+X”，即可快速打开提取轮廓线命令界面。

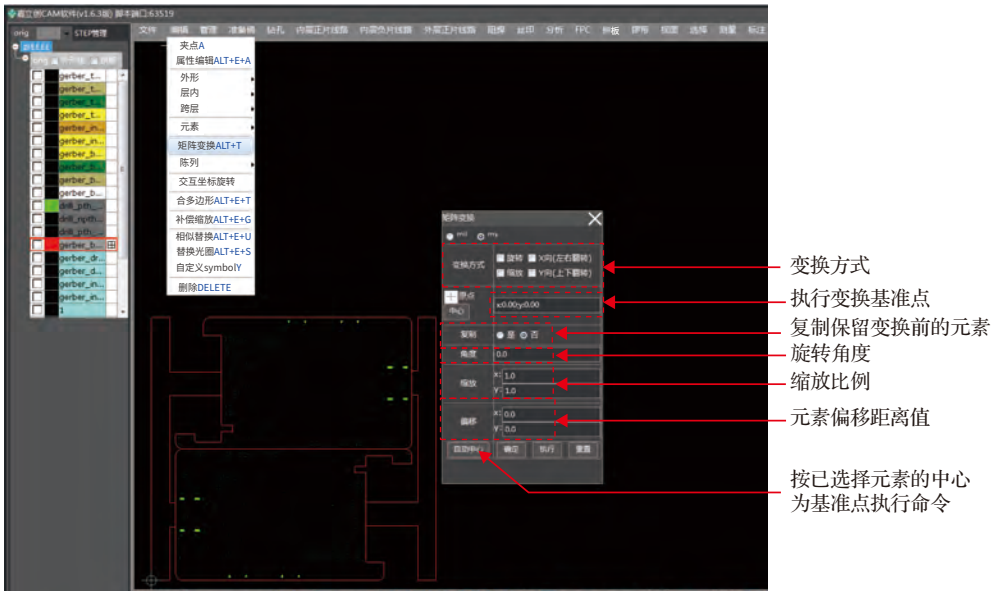


图 13-42　嘉立创 CAM 矩阵变换

在该命令界面线宽输入框中输入轮廓线的线条宽度后，单击“执行”按钮，即可将当前所选元素转换成设置宽度的闭合轮廓线。嘉立创 CAM 提取轮廓线如图 13-43 所示。

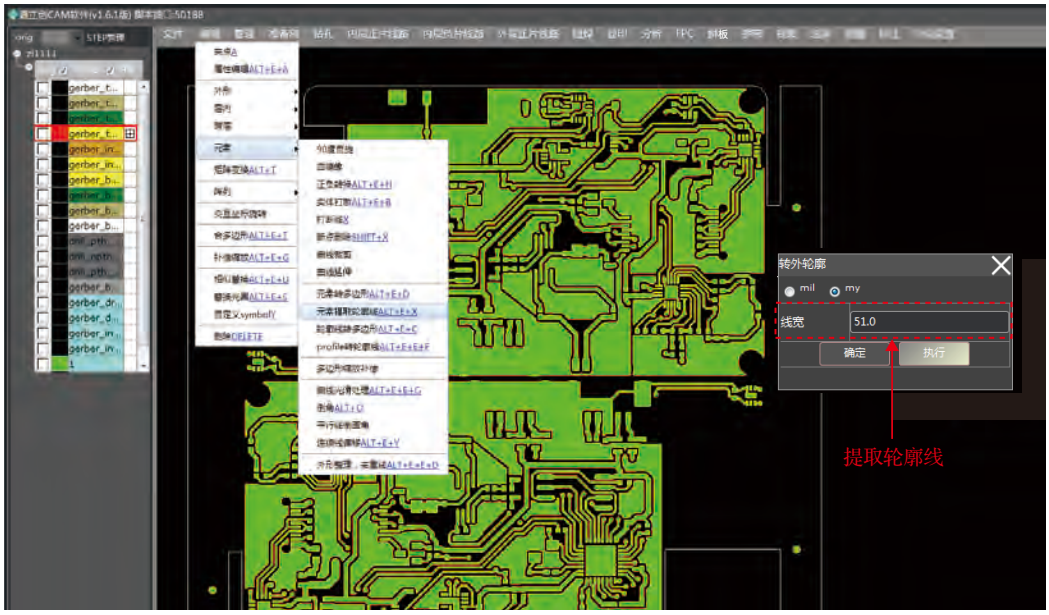


图 13-43　嘉立创 CAM 提取轮廓线

13.4.23　填充轮廓线

此命令的作用是将一组具有宽度的闭合轮廓线填充成多边形元素，填充完成后，多边形的边缘将与原始轮廓线的中心位置对齐。

首先在工作图层的图形显示与编辑区选择需要填充的闭合轮廓线，接着将光标移到上方

菜单栏单击“编辑”按钮，在弹出的菜单中选择“元素”选项，然后在展开的次级菜单中选择“轮廓线转多边形”选项或按快捷键“Alt+E+C”，即可快速执行填充轮廓线的功能。

13.4.24　连续线偏移

此命令的作用是将一组或多组连续线按指定参数进行整体放大或整体缩小的偏移操作，并支持生成新的连续线。

首先在工作图层选择需要偏移的连续线，接着将光标移至上方菜单栏，单击“编辑”按钮，在弹出的菜单中选择“元素”选项，然后在展开的次级菜单中选择“连续线偏移”选项或按快捷键“Alt+E+Y”，即可快速打开连续线偏移命令界面。

在距离值的输入框中输入正值是放大偏移，输入负值则是缩小偏移。单击“执行”按钮即可进行偏移操作。另外，手动交互模式允许用户通过拖动光标来控制连续线偏移的方向和距离。嘉立创 CAM 连续线偏移如图 13-44 所示。

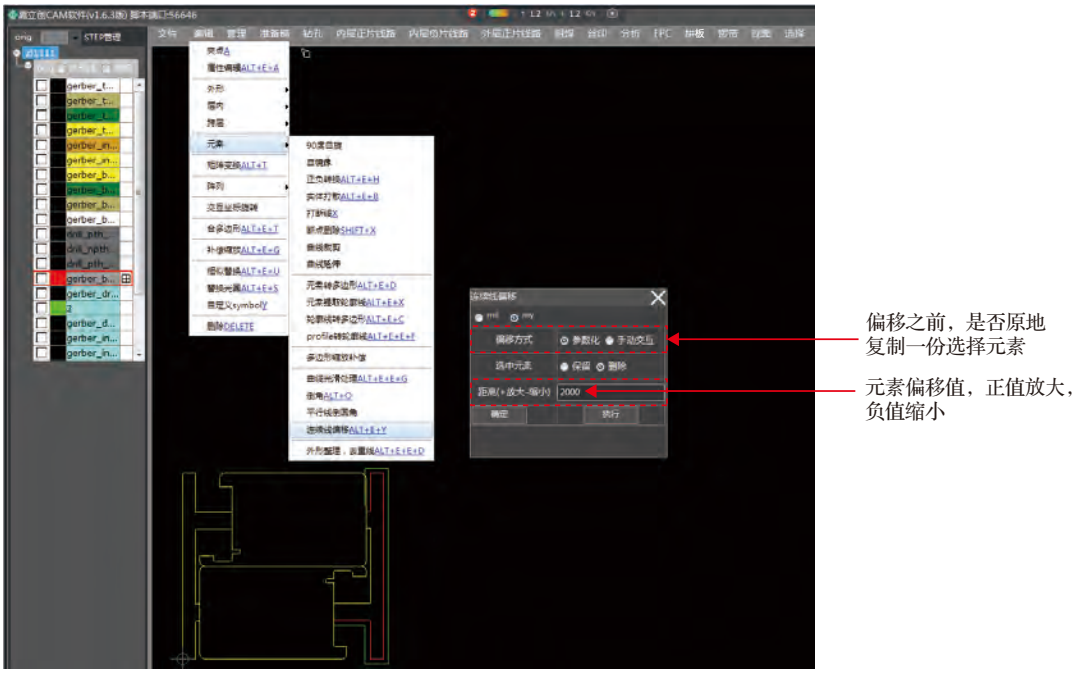


图 13-44　嘉立创 CAM 连续线偏移

13.4.25　连续线移动（保持角度）

该命令用于将一组连续线中的某一特定线条按照光标拖动的方向和距离整体平移，同时保持原有角度不变。

首先将光标移动到右侧工具栏，并按照图示单击“连续线移动”命令图标，即可进入移线状态。“连续线移动”命令图标如图 13-45 所示。然后将光标移回工作图层的图形显示与编辑区，单击需要移动的线条元素，即可进入移线预览状态。最后拖动线条至合适位置，单击鼠标左键或按下空格键或回车键即可完成移线操作。连续线移动示例如图 13-46 所示。

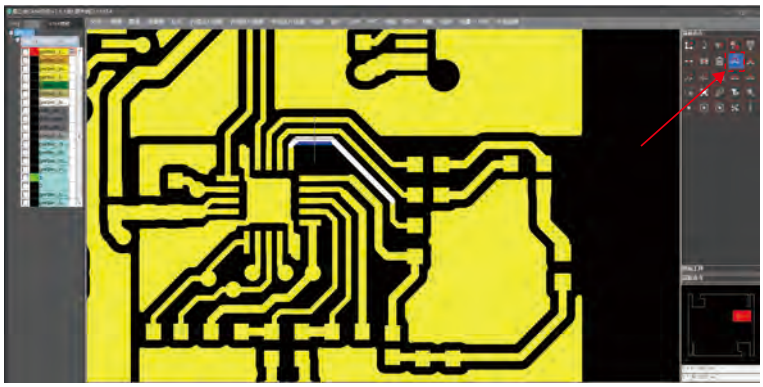


图 13-45　“连续线移动”命令图标

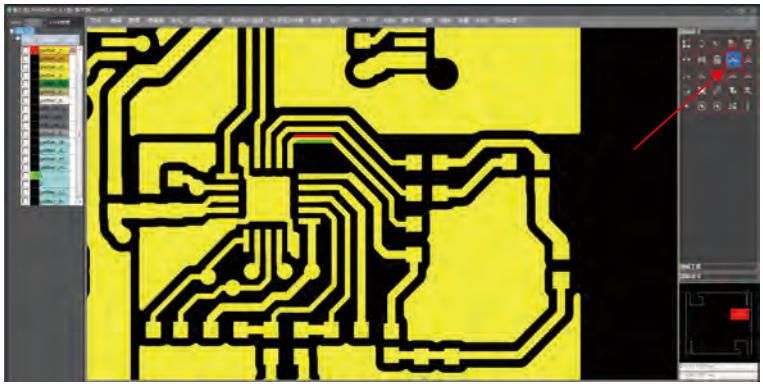


图 13-46　连续线移动示例

13.4.26　网格填充

此命令的作用是将选择的多边形元素转换成网格填充，以满足设计和生产在特定场景下对非标准铜面的需求。

首先在工作图层选择需要填充的多边形元素，接着将光标移至上方菜单栏，单击“外层正片线路”按钮，在弹出的菜单中选择“网格填充”选项，即可快速打开网格填充命令界面。

在该命令界面，按照实际需求输入相应的数值后，单击“执行”按钮即可将选中的多边形元素转换成网格填充。嘉立创 CAM 网格填充如图 13-47 所示。

13.4.27　线角转换与桥接

此命令的作用是将线角的连接方式更改为圆角、斜角或直连，并支持将断开的两根非平行线按选定的连接方式桥接起来。

首先将光标移至上方菜单栏，单击“锣带”按钮，在弹出的菜单中选择“倒圆角”选项或按快捷键“Alt+O”，即可快速打开线角转换与桥接命令界面。线角转换与桥接命令如图 13-48 所示。

在该命令界面中，首先选择所需的连接模式（直连、圆角、斜角），然后单击下方的“执行”按钮，进入选线状态。

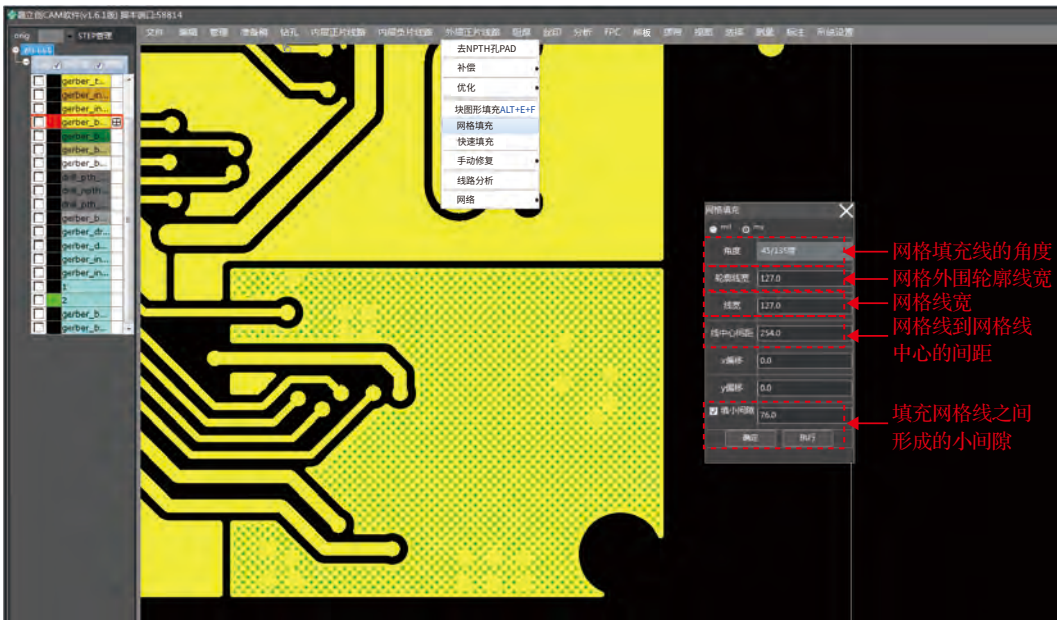


图 13-47　嘉立创 CAM 网格填充

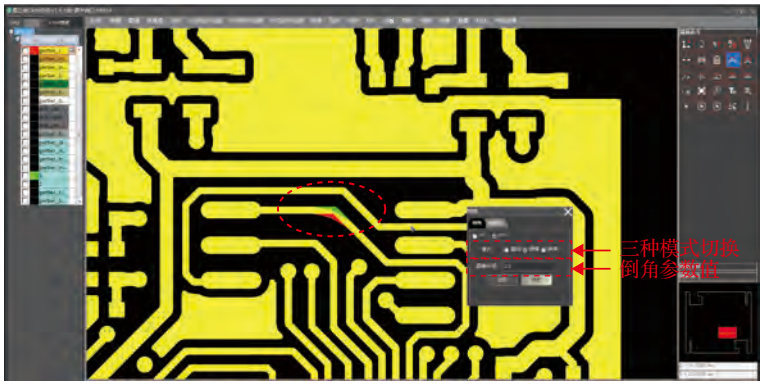


图 13-48　线角转换与桥接命令

随后，将光标移回工作图层的图形显示与编辑区，按先后顺序选择需要改变线角的两根线条，或者指定需要桥接的断开线条。选择完成后，系统将自动完成线角转换或断线桥接操作。线角转换与桥接示例如图 13-49 所示。

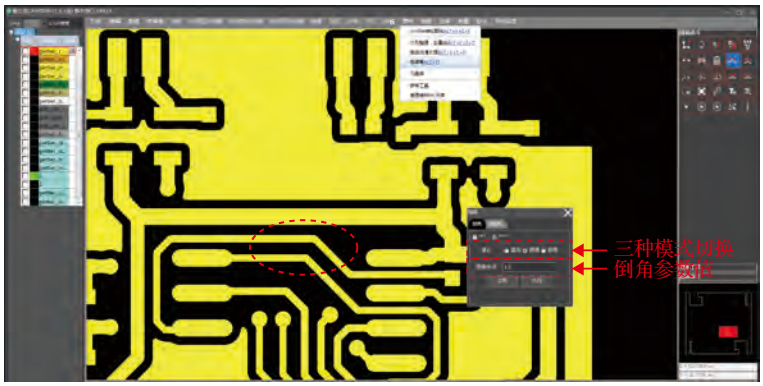


图 13-49　线角转换与桥接示例

13.4.28 测量工具

此功能是一种用于测量 PCB 上各个元素之间距离和元素尺寸的工具。这个功能对于验证资料设计的准确性至关重要。

要使用此功能，请将光标移动到右侧工具栏，根据图示单击“测量”命令图标或直接按快捷键“M”，即可打开测量工具界面。嘉立创 CAM 测量功能如图 13-50 所示。

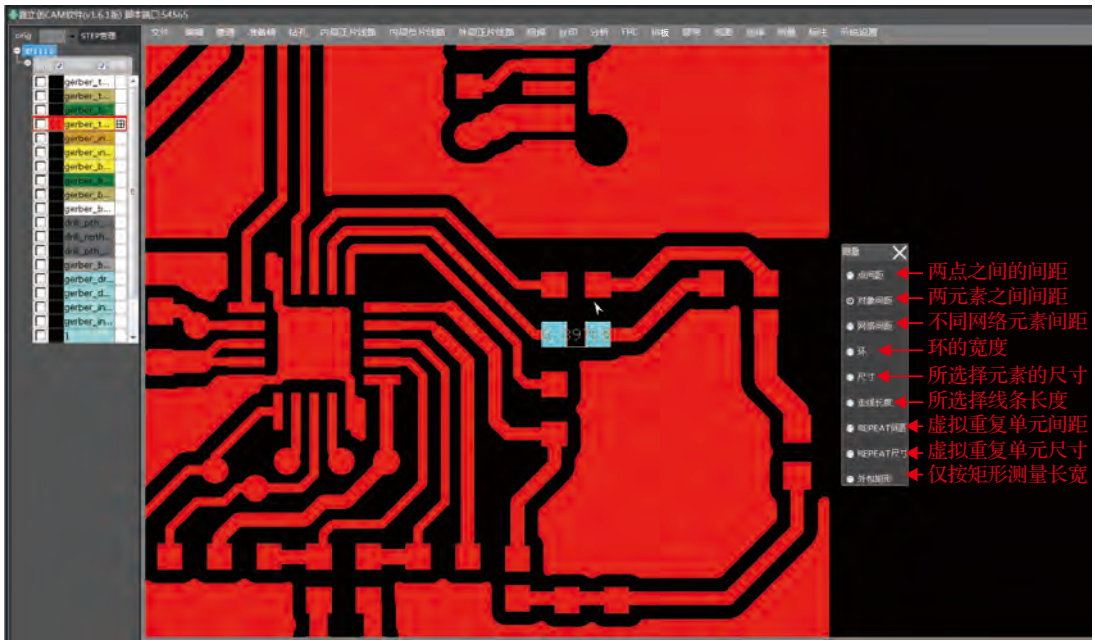


图 13-50　嘉立创 CAM 测量功能

图 13-51 ～图 13-59 是测量工具的使用演示，该功能测量的结果会显示在下方的信息显示行与编辑框内，方便用户查看和复制测量信息。

图 13-51　点到点间距测量

图 13-52　边缘到边缘间距测量

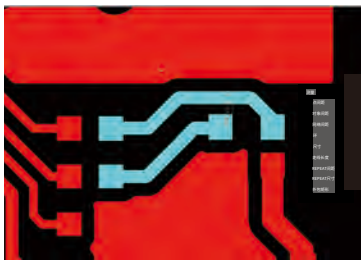


图 13-53　网络到网络间距测量

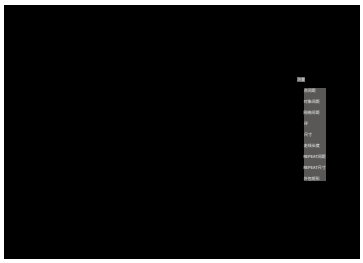


图 13-54　环的宽度测量

图 13-55　元素尺寸测量

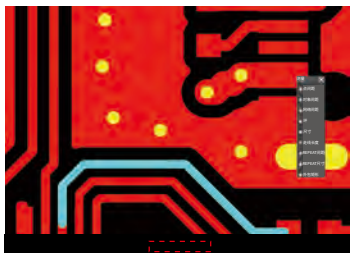


图 13-56　线条长度测量

图 13-57　Repeat 间距测量

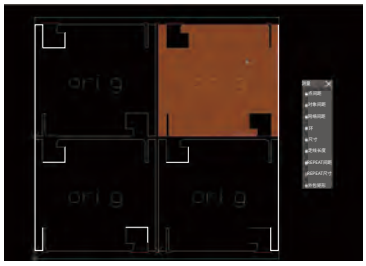


图 13-58　Repeat 尺寸测量

图 13-59　仅按矩形测量长宽

13.4.29　保存 PDF 文件

此命令的作用是将当前 PCB 资料图层上可视化的界面内容转换为 PDF 格式输出，便于后续的设计审查、客户沟通、存档记录，以及与其他不使用 CAM 软件或不具备专业技能的团队共享信息。

要使用此功能，请将光标移至上方菜单栏，单击“文件”按钮，在弹出的菜单中选择“保存 PDF”选项，即可快速打开保存 PDF 文件命令界面。

在该命令界面中，根据实际需求设置好选项与参数后，单击“选择范围导出”按钮进入框选状态。

随后，按住鼠标左键在图形显示与编辑区框选出一个输出范围。接着，在弹出的文件保存对话框中输入文件名，点击“保存”按钮，即可完成 PDF 文件的输出。嘉立创 CAM 保存 PDF 文件如图 13-60 所示。

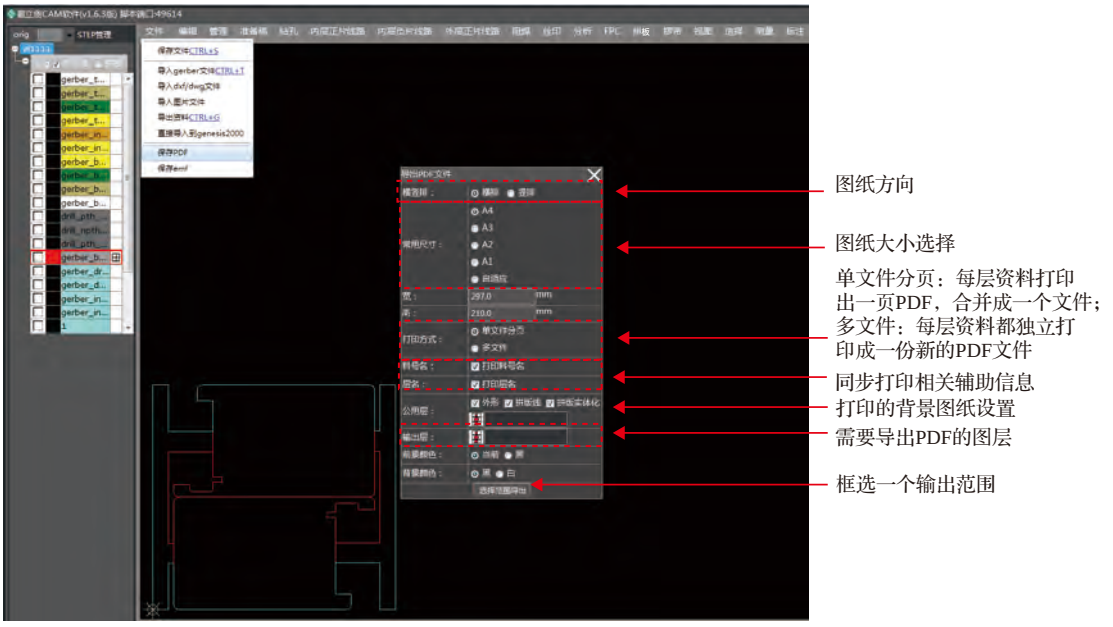


图 13-60　嘉立创 CAM 保存 PDF 文件

13.4.30　手动拼板

此功能的作用是在当前工作 Step 中，按照界面设置的参数与选项，手动放置一些重复

的虚拟单元（以下简称 Repeat，请参见附录 A），便于进行后续的拼板处理。

要使用此功能，请将光标移动到上方菜单栏，单击“拼板”按钮，在弹出的菜单中选择“手动拼板”选项，即可快速打开手动拼板界面。嘉立创 CAM 手动拼板界面如图 13-61 所示。

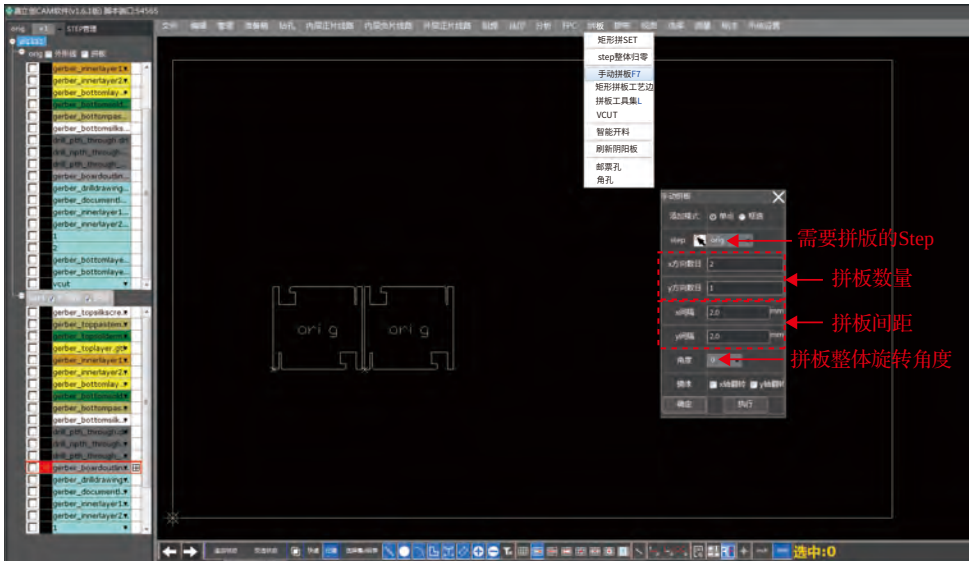


图 13-61　嘉立创 CAM 手动拼板界面

13.4.31　拼板命令之 Repeat 选择

此命令用于选择 Repeat，方便用户后续对 Repeat 进行复制、移动、旋转、删除等基础操作。它提供单选和框选两种方式，可以搭配追加状态和反选状态使用。

将光标移动到上方菜单栏，单击“拼板”按钮，在弹出的菜单中选择“拼板工具集”选项，即可打开“拼板操作集”界面，单击单选 Repeat 或框选 Repeat 命令图标，即可进入选择 Repeat 的状态，如图 13-62 所示。

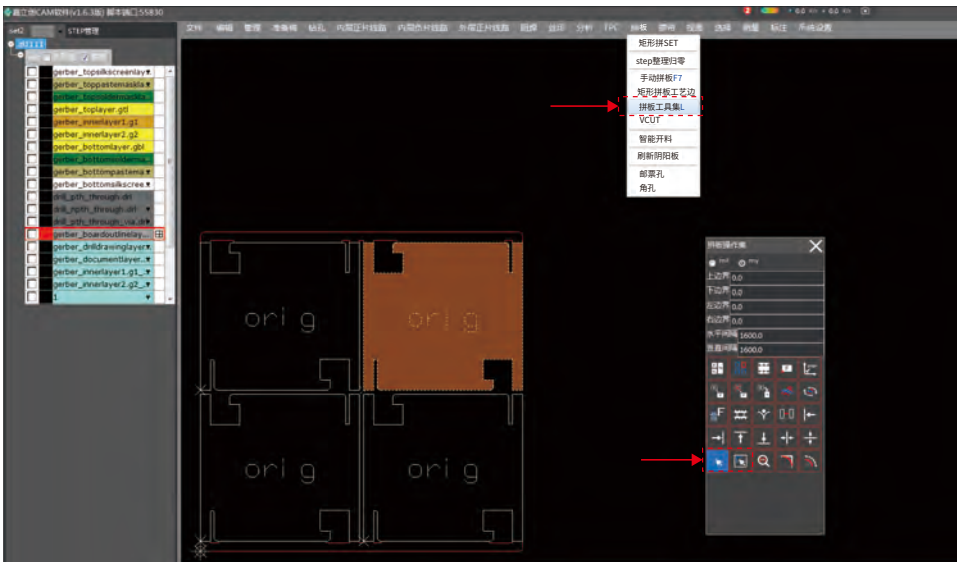


图 13-62　嘉立创 CAM Repeat 选择

注意：Repeat 选择命令无法直接选择资料图层里的实体元素，反之，元素选择命令也无法直接选择 Repeat。

13.4.32　拼板命令之 Repeat 编辑

此命令的作用是在含有 Repeat 的 Step 中，对已选择的 Repeat 执行复制、移动、旋转、删除等操作。

将光标移至上方菜单栏，单击“拼板”按钮，在弹出的菜单中选择“拼板工具集”选项或按快捷键“L”，即可打开“拼板工具集”界面。嘉立创 CAM Repeat 编辑如图 13-63 所示。

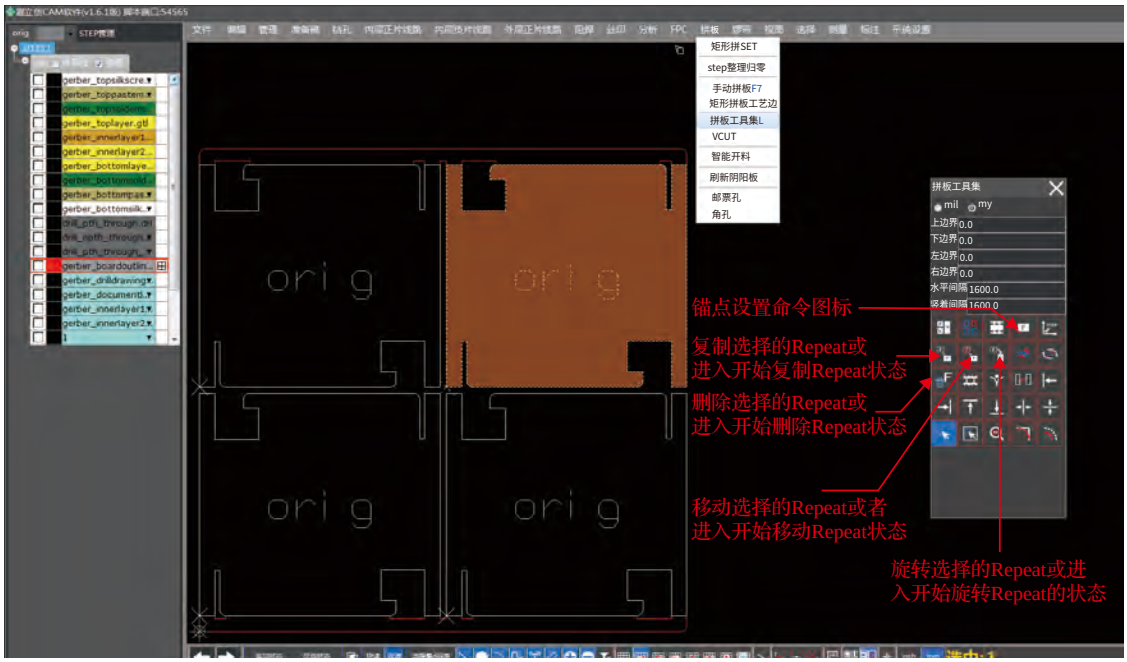


图 13-63　嘉立创 CAM Repeat 编辑

（1）复制 Repeat：将当前选中的 Repeat 复制一份，允许用户通过移动光标来调整位置。首先选择当前工作 Step 中的 Repeat，然后单击工具栏中的复制 Repeat 命令图标进行复制；或者，先单击命令图标进入复制状态，再返回选择 Repeat 进行复制。

（2）移动 Repeat：将当前选中的 Repeat 置于移动状态，允许用户通过移动光标来调整位置。首先选择当前工作 Step 中的 Repeat，然后单击工具栏中的移动 Repeat 命令图标进行移动；或者先单击命令图标进入移动状态，再返回选择 Repeat 进行移动。

（3）旋转 Repeat：将当前选中的 Repeat 按照用户输入的角度参数进行顺时针旋转。首先选择当前工作 Step 中的 Repeat，然后单击工具栏中的旋转 Repeat 命令图标，打开旋转 Repeat 命令界面进行设置；或者先单击命令图标进入旋转状态，再返回选择 Repeat 进行旋转。

（4）删除 Repeat：将当前选中的 Repeat 删除。首先选择当前工作 Step 中的 Repeat，然后单击工具栏中的删除 Repeat 命令图标进行删除；或者，先单击命令图标进入删除状态，再返回选择 Repeat 进行删除。

13.4.33 拼板命令之锚点设置

此命令的作用是修改当前 Step 资料的锚点，以便于在特定场景下进行手动拼板和套用拼板。锚点在执行“Step 整体归零”命令后，默认位于 Profile 的左下角。

首先在需要切换锚点的 Step 中打开一个工作图层（通常是外形层）；接着将光标移至上方菜单栏，单击“拼板”按钮，在弹出的菜单中选择“拼板工具集”选项，打开“拼板工具集”界面，单击锚点设置命令图标，即可进入锚点选择状态；最后在工作图层的图形显示与编辑区内选择一个合适的位置，单击鼠标左键即可完成锚点的切换。

13.4.34 半自动拼板

此功能旨在根据用户输入的参数，快速实现同一方向的拼板，并支持添加工艺边、定位孔、光学点以及工艺边铺铜等个性化设置。

将光标移至上方菜单栏，单击“拼板”按钮，在弹出的菜单中选择“矩形拼 SET”选项，即可打开半自动拼板功能的命令界面。

按照实际需求设置好所有选项和参数后，单击界面下方的“确定”按钮，软件就会快速生成包含多个 Repeat 的拼板 Step。嘉立创 CAM 半自动拼板如图 13-64 所示。

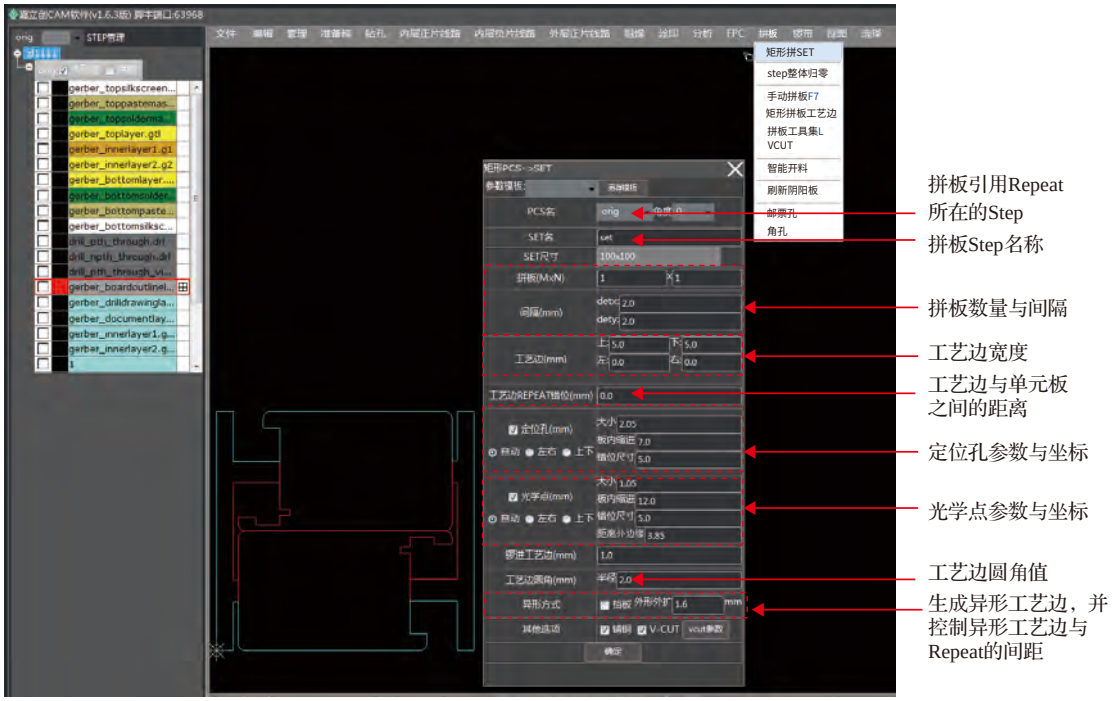


图 13-64 嘉立创 CAM 半自动拼板

13.4.35 添加工艺边

此功能用于根据工作 Step 中 Repeat 的布局和用户输入的参数，快速添加工艺边，并支持添加定位孔、光学点以及工艺边铺铜等个性化设置。

将光标移至上方菜单栏，单击“拼板”按钮，在弹出的菜单中选择“矩形拼板工艺边”选项，即可打开添加工艺边功能的命令界面。

在设置好所需的选项和参数后，单击界面下方的“确定”按钮，系统将在不改变 Repeat 位置和内容的情况下，快速生成所需的拼板工艺边。嘉立创 CAM 添加工艺边如图 13-65 所示。

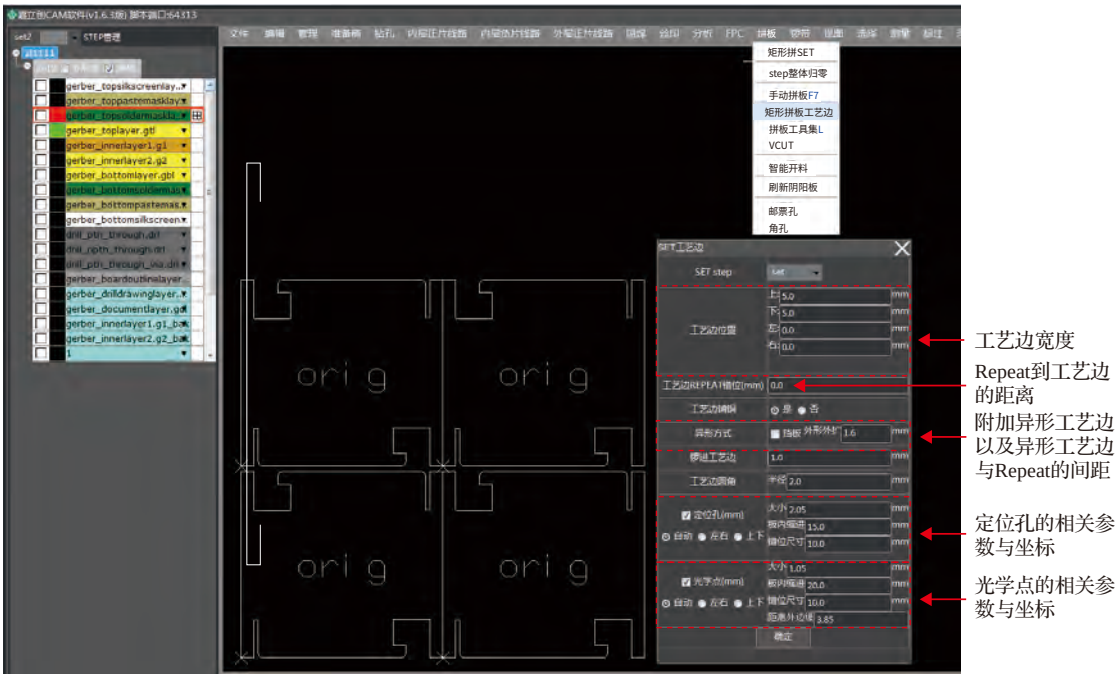


图 13-65　嘉立创 CAM 添加工艺边

13.4.36　拼板命令之 Repeat 对齐

此功能的作用是将工作 Step 中的 Repeat 按照设定好的参数，在 Profile 范围内进行上下左右以及水平居中对齐，以满足用户个性化的需求。

将光标移至上方菜单栏，单击“拼板”按钮，在弹出的菜单中选择“拼板工具集”选项或直接按快捷键“L”，即可打开“拼板工具集”界面。

首先，在工作 Step 中选择需要进行对齐的 Repeat；其次，根据需求输入间距参数；最后，单击对应的命令图标即可实现自动对齐。如果未选择任何 Repeat，则实际效果是将 Step 中所有的 Repeat 进行对齐。嘉立创 CAM Repeat 对齐如图 13-66 所示。

13.4.37　邮票孔添加

此功能用于在两组未相交的连续曲线之间，手动添加桥连位和邮票孔，并支持半自动邮票孔削铜和添加邮票孔阻焊开窗的功能，便于用户制作桥连邮票孔拼板。

将光标移至上方菜单栏，单击“拼板”按钮，在弹出的菜单中选择“邮票孔”选项，即可打开“邮票孔”界面。按实际需求设置相应参数和选项后，单击“添加”按钮即可进入添加邮票孔状态。当绿色搜索光圈内显示两组连续曲线时，单击鼠标左键，即可成功添加邮票孔。嘉立创 CAM 邮票孔添加如图 13-67 和图 13-68 所示。

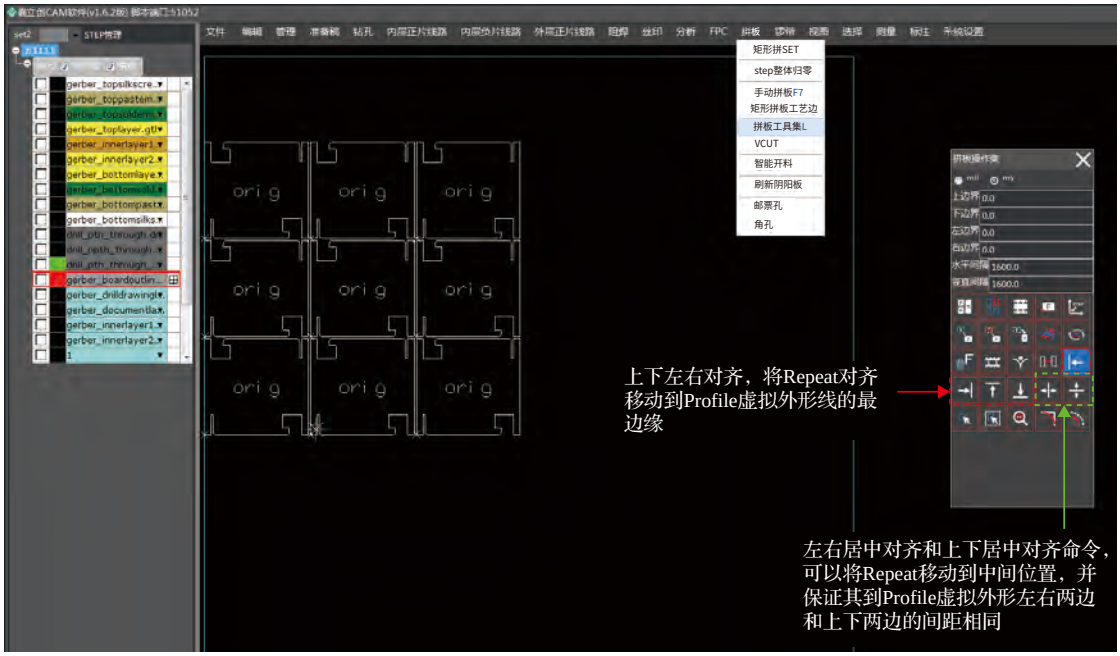


图 13-66　嘉立创 CAM Repeat 对齐

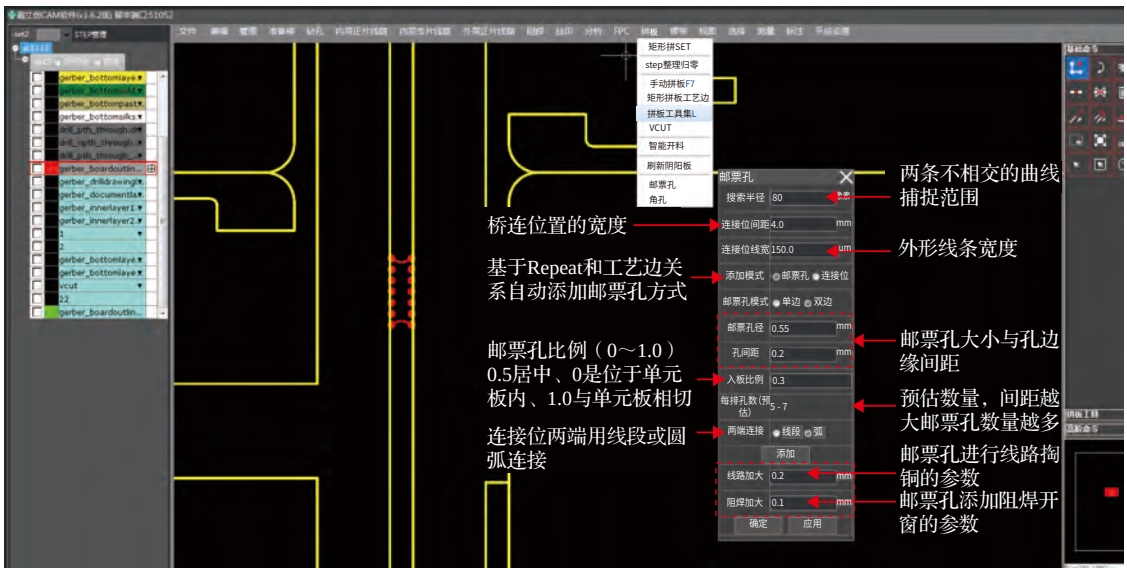


图 13-67　嘉立创 CAM 邮票孔添加介绍

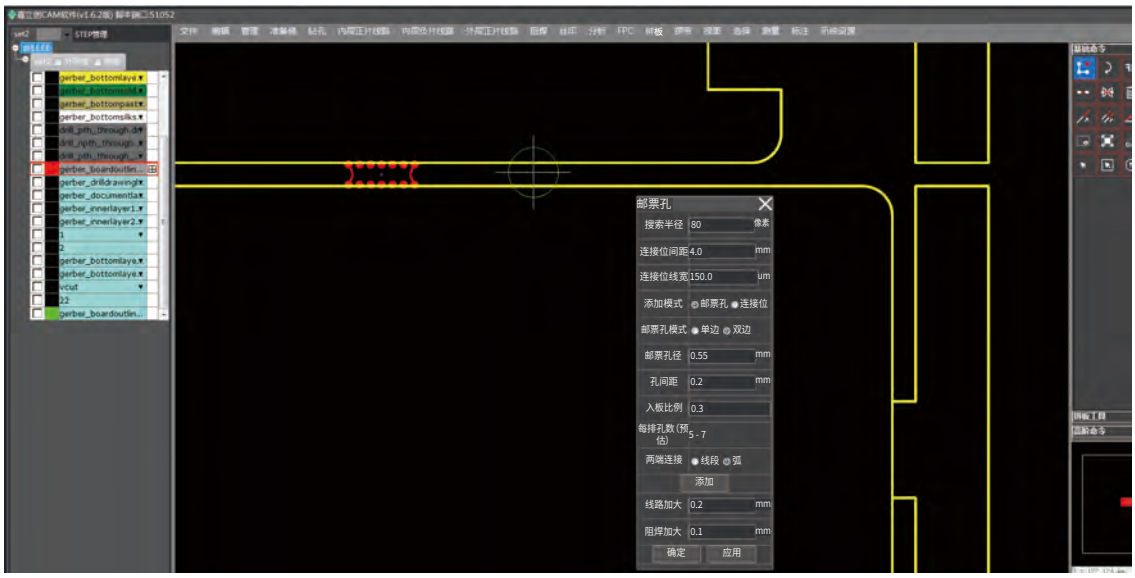


图 13-68　嘉立创 CAM 邮票孔添加示例

13.5　使用场景和技巧

13.5.1　修改钻孔孔径

首先按照前面的教程导入原始资料，然后找到钻孔资料层并打开。如果不好定位，可以同时显示丝印层以便参考。根据丝印层的符号找到钻孔资料层对应的钻孔元素，通过选择命令将需要修改的钻孔元素选中，按快捷键“Alt+E+S”，打开元素修改命令。

接着，在输入框中输入所需的钻孔孔径参数，单击“确定”或“执行”按钮，即可完成原始孔径的修改。目测检查无误后，再还原钻孔资料层的文件名，并使用 13.3.4 节介绍的相关命令输出资料。

同理，通过元素修改命令，还可以修改原始资料的线路层元素、阻焊层元素、外形层元素等。嘉立创 CAM 修改铅孔孔径如图 13-69 所示。

13.5.2　删除丝印和添加丝印

首先，按照前面的教程导入原始资料；其次，在左侧层列表面板中找到丝印层并打开；再次，使用选择命令将需要修改的那部分丝印全部选中；最后，按快捷键“Ctrl+B”执行元素删除，即可删除这部分丝印。

要添加丝印，首先按快捷键“C”打开元素添加命令并切换到添加文本页面，然后设置合适的字体和文本高度，输入需要的文本内容。

单击文本图标即可进入添加状态，随后移动光标到工作图层的需求位置，双击鼠标左键或按回车键、空格键中的任意一个键，都可以执行文本添加。嘉立创 CAM 修改丝印如图 13-70 所示。

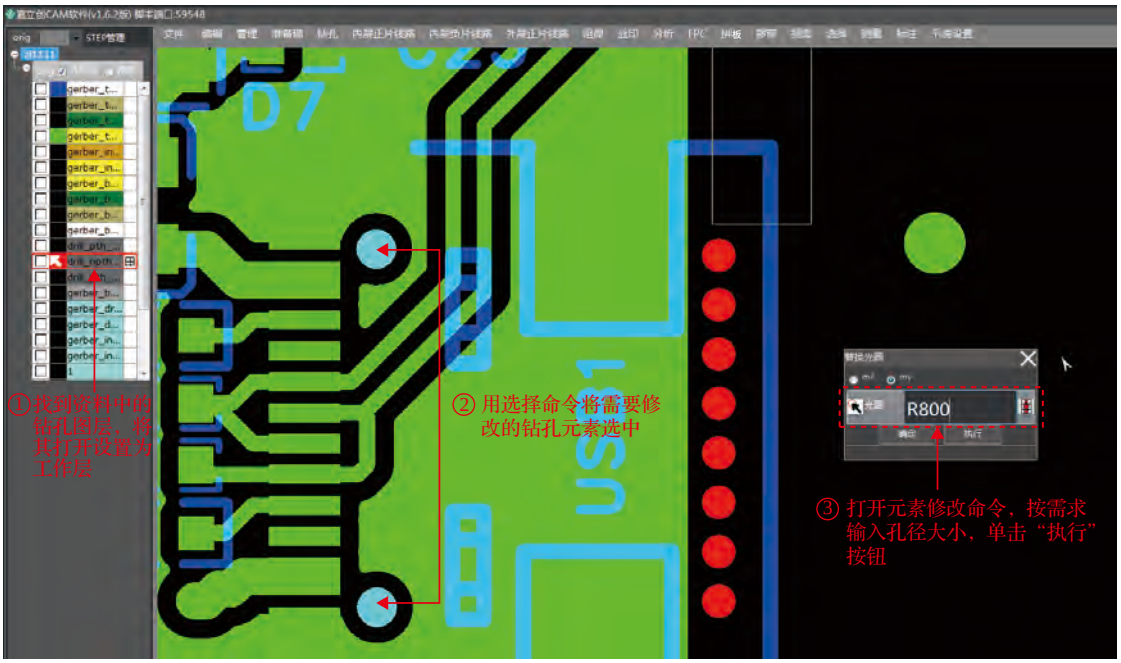


图 13-69　嘉立创 CAM 修改钻孔孔径

图 13-70　嘉立创 CAM 修改丝印

13.5.3　旋转拼板

首先，按照前面的教程导入原始资料，并完成资料层命名、层对齐、层属性设置、删除板外物等前处理操作，确保这份资料可以用于拼板。

其次，创建一个名为“ Set”的空 Step。在这个空的 Step 中，使用手动拼板功能，按照

数量和间距要求放置一些 Repeat。嘉立创 CAM 放置 Repeat 如图 13-71 所示。

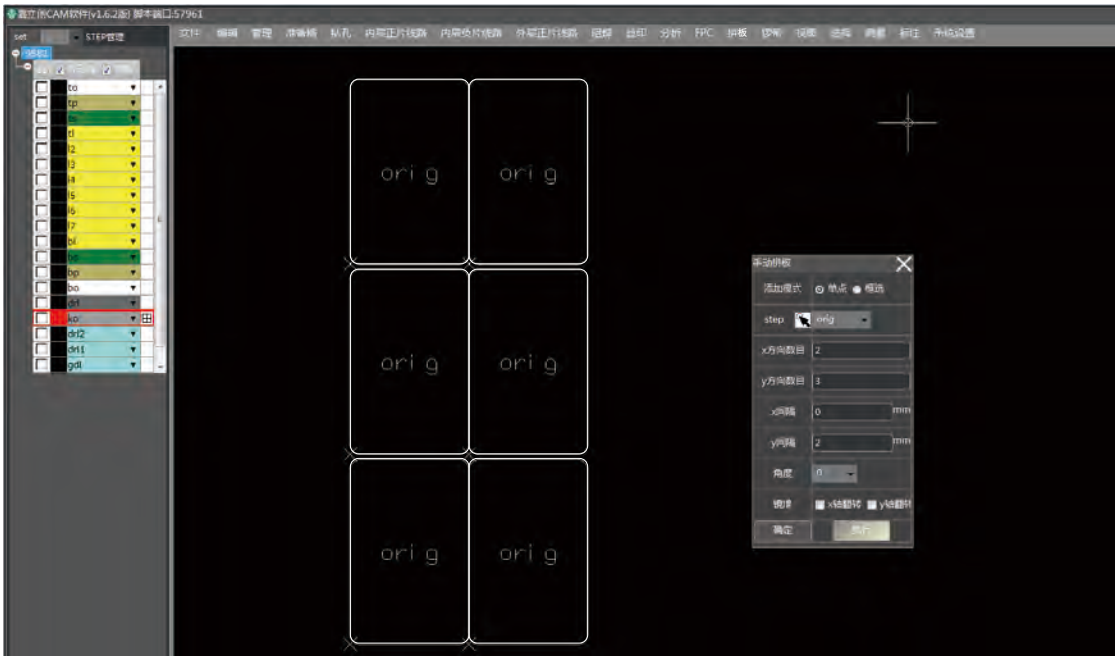


图 13-71　嘉立创 CAM 放置 Repeat

再次，选中需要旋转的 Repeat，使用旋转命令将其旋转 180° 或其他指定的角度，如图 13-72 所示。

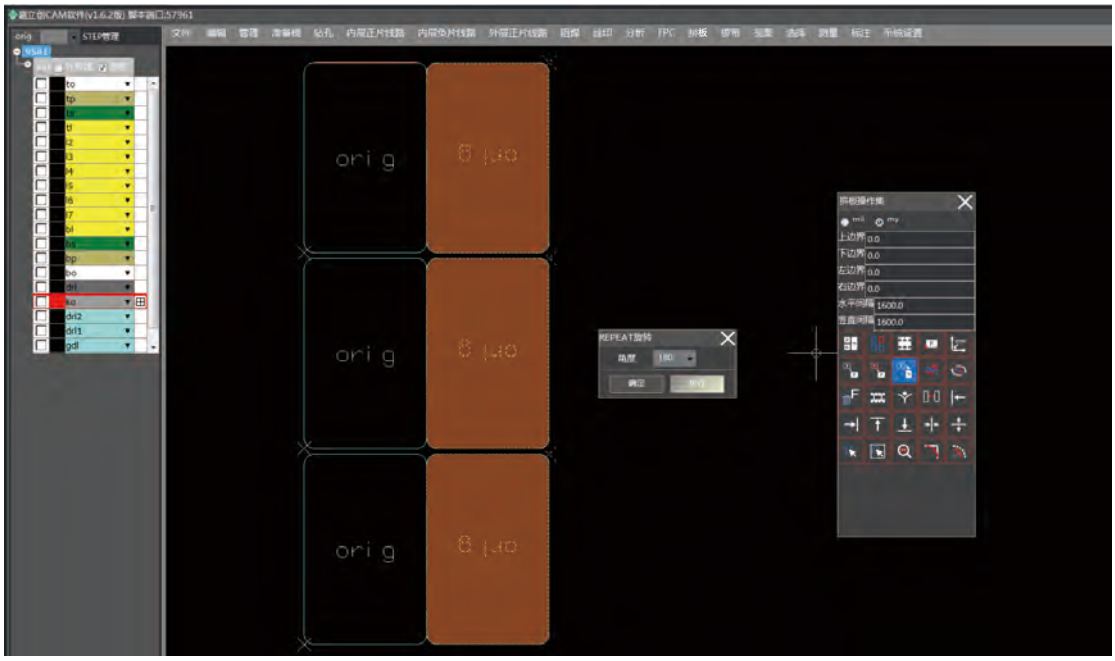


图 13-72　嘉立创 CAM Repeat 旋转 180°

最后，打开添加工艺边的功能，为 Repeat 增加工艺边、光学点、定位孔、铺铜等内容，

即可完成一个常规的 V 割旋转拼板操作。嘉立创 CAM Repeat 添加工艺边如图 13-73 所示。

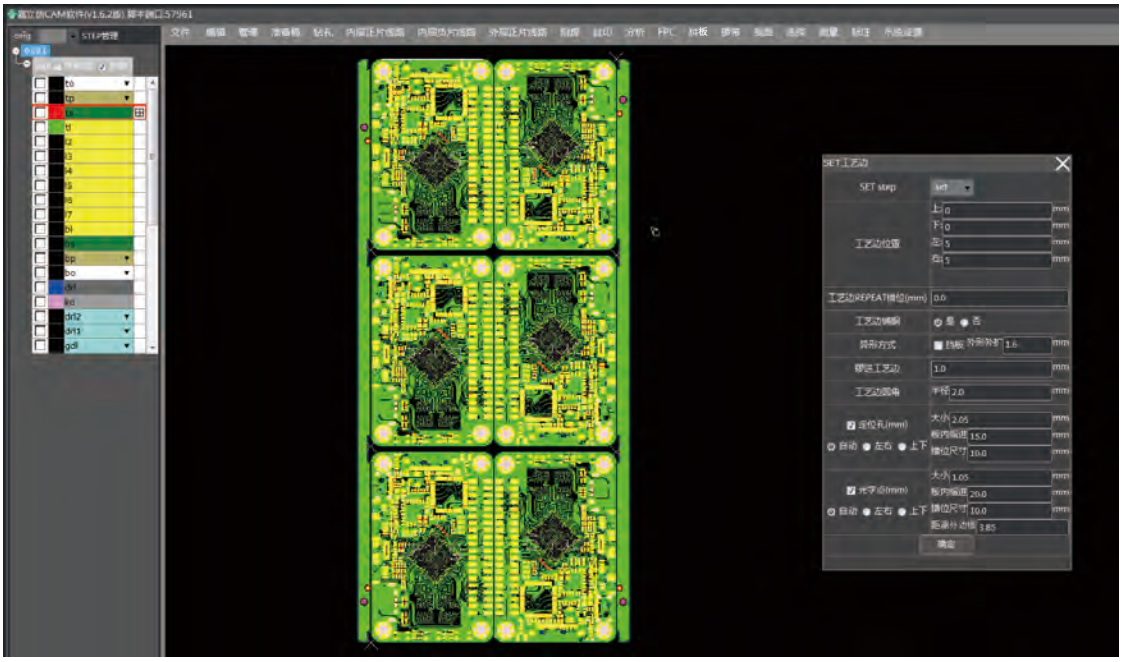


图 13-73　嘉立创 CAM Repeat 添加工艺边

附录 A / 嘉立创 CAM 专业术语

负性元素：由于 EDA 设计软件的铺铜原理不同，且 Gerber 文件格式本身存在一定的局限性，主要基于矢量图形，并不直接支持复杂的几何形状，如带孔或多边形内部有挖空部分的结构，因此当 EDA 软件输出 Gerber 文件需要描述一个带有内部挖空的铺铜区域时，它会采用正性和负性元素结合的方式来实现这一目标。类似于涂改液一样，把不需要的部分遮盖起来，多层叠加，达到想要的复杂效果。负性元素如图 A-1 所示。

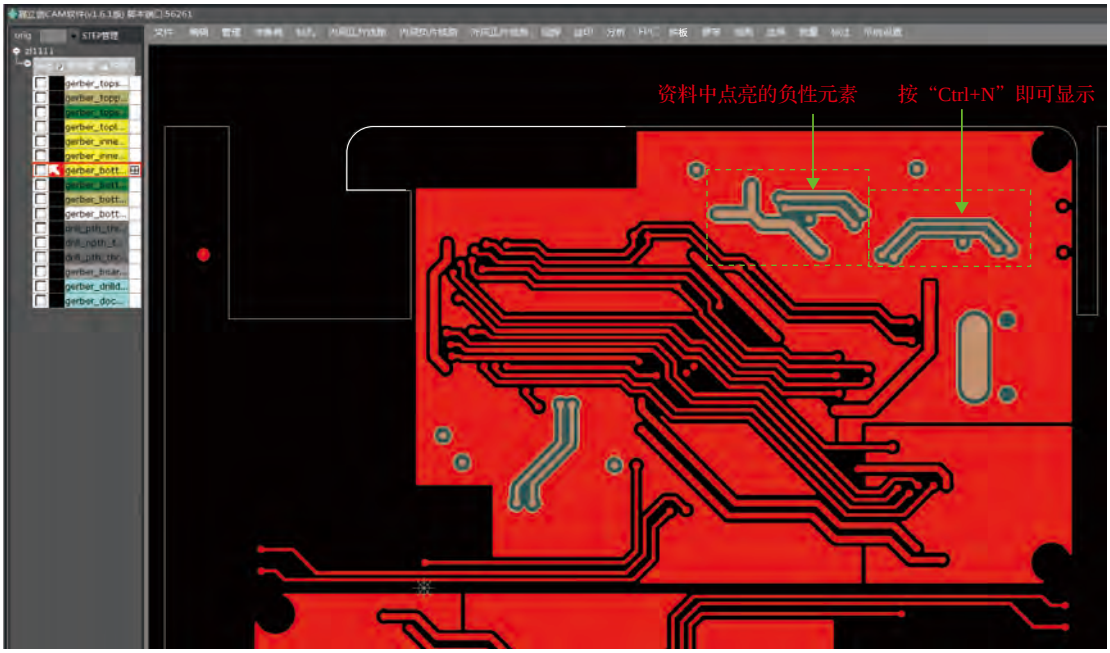


图 A-1　负性元素

极性转换：将正性元素转为负性元素，或将负性元素转为正性元素，通过负性元素的遮盖特性，用户可以使用极性转换来实现线路掏铜、削焊盘等复杂操作。极性转换如图 A-2 所示。

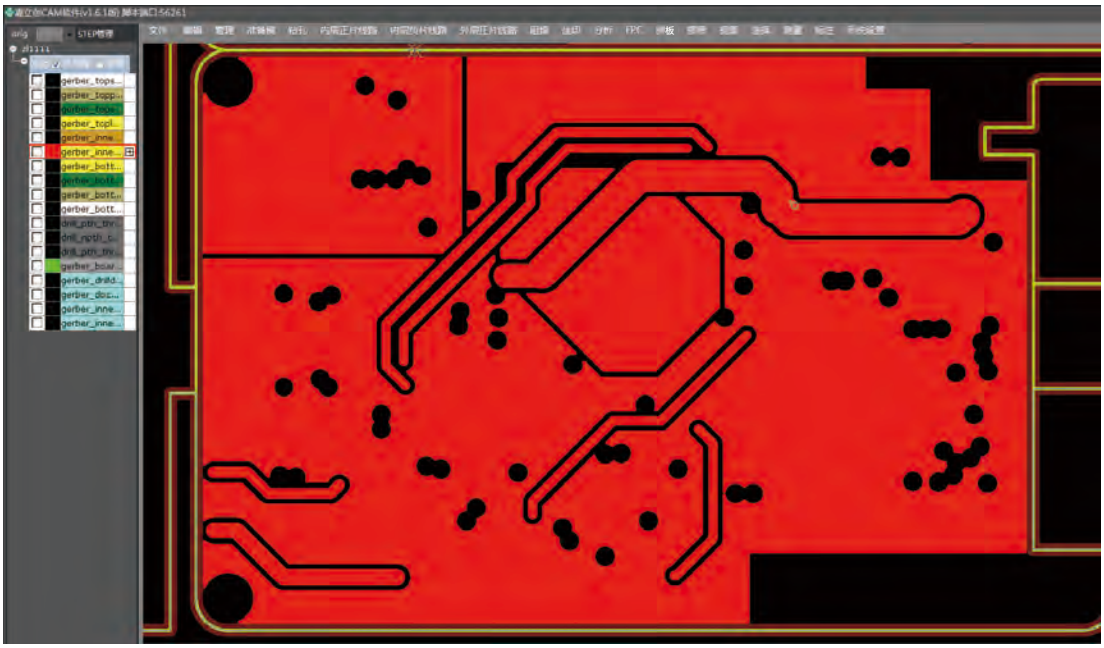


图 A-2　极性转换

正片设计：正片设计（Positive Film Design）的逻辑是“绘制即保留”，即所有绘制线条和铺铜的区域在制造过程中会被保留为铜箔，而未绘制区域则会被蚀刻去除。正片设计如图 A-3 所示。

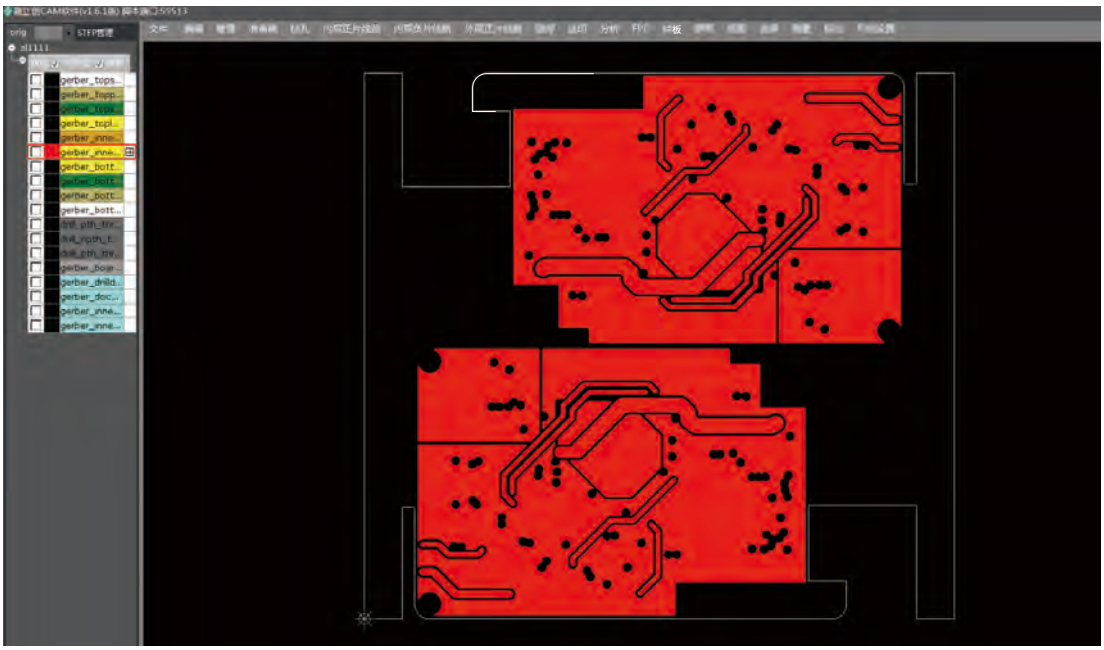


图 A-3　正片设计

负片设计：负片设计（Negative Film Design）的逻辑则是“绘制即去除”，即所有绘制线条和铺铜的区域在制造过程中会被蚀刻去除，而未绘制区域则保留铜箔。负片设计如图 A-4 所示。

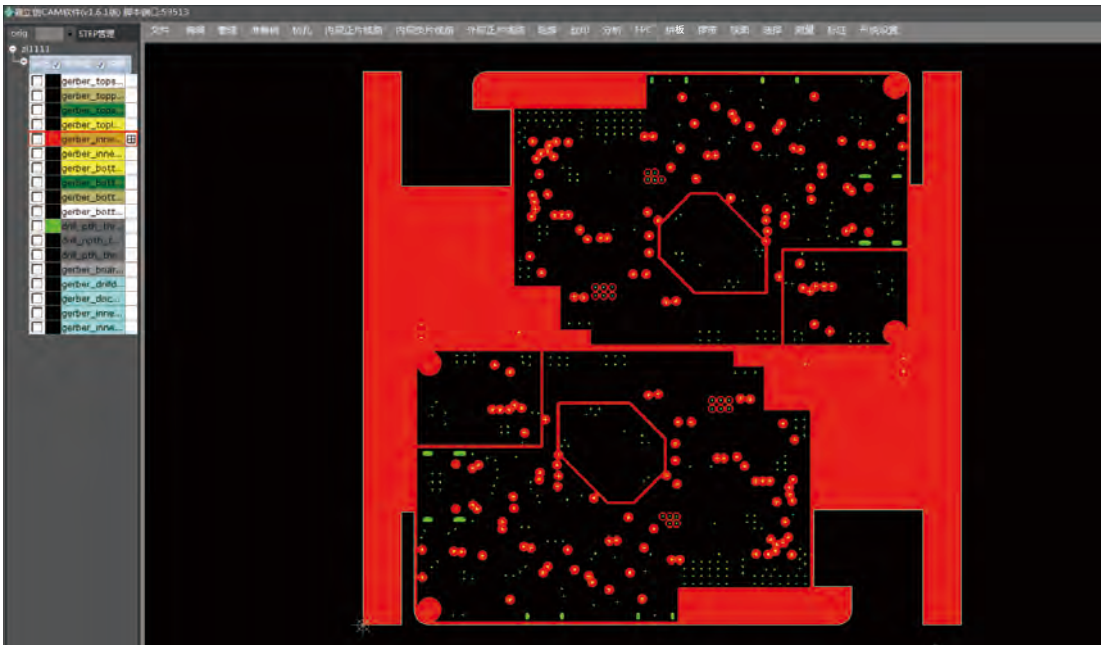


图 A-4　负片设计

重复虚拟单元（Repeat）：可以理解为拼板单元资料的投影副本。当拼板需要多个相同的图形时，可以使用 Repeat 功能快速复制并排列这些图形，避免手动复制粘贴的烦琐。其优点是排列快速且简单，且无法直接编辑里面的内容，这样就不容易出错，并且还会与单元实体资料保持实时刷新，确保每个拼板单元都一致。重复虚拟单元如图 A-5 所示。

图 A-5　重复虚拟单元

参考文献

[1] 姜培安 . 印制电路板的设计与制造 [M]. 2 版 . 北京：电子工业出版社，2021.

[2] Clyde F. Coombs.Jr. 印制电路手册 [M]. 6 版 . 乔书晓，王雪涛，陈黎阳，译 . 北京：科学出版社，2018.

[3] IPC.Specification for Base Materials for Rigid and Multilayer Printed Boards：IPC-4101B[S]，2006.

[4] IPC.Acceptability of Printed Boards：IPC-A-600J CN[S]，2016.

[5] IPC.Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards：IPC-6012E CN[S]，2020.

[6] IPC.Test Methods Manual：IPC-TM-650[S]，2005.