



"十二五"国家重点图书出版规划项目
新能源汽车研究与开发丛书

电动车辆能量 转换与回收技术

Electric Vehicle Energy Conversion
and Recover Technologies

李永(Li Yong) 宋健(Song Jian) 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



“十二五”国家重点图书出版规划项目
新能源汽车研究与开发丛书

电动车辆能量转换与回收技术

Electric Vehicle Energy Conversion and Recover Technologies

李 永 宋 健
(Li Yong Song Jian) 著



机械工业出版社

本书论述了电动车辆能量传输与回收技术,是电动车辆领域的一部学术专著。全书共8章。前4章介绍了电动车辆能量传输理论、纳米能源传输技术和电动车辆能量传输测试系统等,重点介绍的能量传输技术包括电磁传输技术、纳米能源技术与微系统技术等。后4章介绍了电动车辆能量回收技术,包括制动能量回收技术与压电能量回收技术等。本书以电动车辆能量技术为核心,重点围绕电动车辆的能源传输与回收技术问题,阐述了电动车辆的关键能源技术。本书具有完整的理论体系和脉络,为电动车辆的发展提供了技术支撑。

本书可以作为高等学校车辆、机械、机电、力学及宇航等专业的本科生和研究生的教材或教学参考书,也可作为相关工程技术与研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电动车辆能量转换与回收技术/李永,宋健著. —北京:机械工业出版社,2015.12

(新能源汽车研究与开发丛书)

ISBN 978-7-111-51956-0

I. ①电… II. ①李… ②宋… III. ①电动汽车—能量转换—研究②电动汽车—回收技术—研究 IV. ①U469.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第256693号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:何士娟 责任编辑:何士娟 孙 鹏

版式设计:霍永明 责任校对:肖 琳

封面设计:马精明 责任印制:乔 宇

北京富生印刷厂印刷

2016年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm · 12.25印张 · 238千字

0 001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-51956-0

定价:59.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前 言

能源和环境问题是当今世界汽车行业面临的巨大挑战，巨大的市场需求与严峻的能源环境约束之间的矛盾尖锐，研究替代传统能源的电动车辆，发展电动车辆关键技术就显得很迫切。高功率密度、高能量密度能量系统是电动车辆是否可以真正替代传统能源体系的重要标志。能量传输与回收技术是电动车辆的核心技术，该技术减少了电动车辆对环境的污染和对能源的消耗。高效、安全的能量传输与回收技术成为电动车辆发展的助推器。

本书是作者对近年来有关电动车辆能量传输与回收技术系统的研究，加以提炼和总结撰写而成的。书中既有电动车辆上较为成熟的技术，还充分融入了国内外该领域研究的最新成果。主要包括：电动车辆能量传输微系统机理、磁电能量传输技术、纳米能量传输技术、电动车辆制动能量回收系统、实验与策略和压电能量回收技术等。

本书在简略介绍有关电动车辆能量理论的基础上，详尽地介绍了电动车辆能量传输与回收技术的实验装置、测试方法、控制策略与分析方法。在内容选材上突出了工程背景、实用性和新颖性，力求对读者有所启迪。

本书由北京理工大学李永、清华大学宋健著。

本书的全部工作得到汽车安全与节能国家重点实验室开放基金的滚动资助，有关电动车辆能量传输技术的工作得到国家自然科学基金（10972037）资助，在此衷心感谢。

本书中引用的文献、报告与资料尽量在参考文献中做了说明，并表示感谢。由于工作量较大及作者不详，对没有说明的文献作者表示歉意和感谢。

电动车辆能量传输与回收技术正在蓬勃发展，本书中一些关键技术还处于研究中，希望读者能提出和发展新技术。

由于作者水平有限，难免有不当和疏漏之处，欢迎读者不吝指正。

作者

2015 年 11 月于美国

休斯顿大学

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 快速充电模型与技术	4
1.2 无线充电关键技术	5
1.3 传输效率关键技术	10
1.4 电池能量管理系统	12
1.5 制动能量回收技术	14
1.6 压电能量回收技术	15
参考文献	18

IV

第2章 电动车辆能量传输微系统与微结构机理	20
2.1 电动车辆能源传输微系统机理	20
2.2 应力/快速温升下电池电极位错/应力电极/空洞耦合能量传输技术 ...	24
2.3 非平衡状态下位错/应力迁移/裂纹耦合能量传输定量微尺度表征	26
2.4 位错/应变/空洞耦合能量传输失效表征与加载技术	30
2.5 前景与展望	32
参考文献	32

第3章 电动车辆磁电效应能量传输模型与能量系统设计	36
3.1 磁电能量传输模型	36
3.2 磁电能量传输系统锂电池传输能量系统磁电效应模型	39
3.3 磁电能量传输系统耦合设计	42
3.4 磁电能量传输系统锂电池实验表征	44
3.5 结论与展望	49
参考文献	49

第4章 电动车辆能量传输纳米能源系统与模型	51
4.1 纳米能源系统传输基本模型	51



4.2	纳米结构耦合缺陷与纳米能源传输系统·····	54
4.3	Si 电极的缺陷与失效机制·····	59
4.4	碳电极系统耦合模型与纳米尺度传输机制表征·····	64
4.5	前景与展望·····	66
	参考文献·····	67
第 5 章 电动车辆制动系统电磁能量回收技术 ·····		72
5.1	电磁系统结构设计·····	73
5.2	电磁制动能量回收系统的电磁机理·····	75
5.3	阀腔流场分析·····	78
5.4	电磁阀的动态响应特性实验测试·····	83
5.5	电磁阀动态力学模型·····	88
	参考文献·····	94
第 6 章 电动车辆制动能量回收系统实验技术 ·····		96
6.1	制动能量回收实验系统与实验方法·····	96
6.2	BERS 的动态特性分析·····	99
6.3	BERS 的能量传递特性实验·····	103
6.4	制动能量回收的动态传输实验·····	108
	参考文献·····	113
第 7 章 电动车辆 BERS 的控制策略 ·····		116
7.1	制动能量回收系统的结构分析·····	116
7.2	制动能量回收系统的基本理论·····	118
7.3	制动能量回收系统的力学模型·····	120
7.4	制动能量回收系统的主动控制策略·····	123
7.5	制动能量回收系统的综合控制策略·····	135
7.6	基于制动能量回收的热力学理论·····	142
	参考文献·····	145
第 8 章 电动车辆压电能量回收技术 ·····		147
8.1	电动车辆固态压电能量系统回收模型与技术·····	150
8.2	高比能量压电能量回收电池系统的无序结构模型·····	152
8.3	压电能量系统回收的智能平台·····	154
	参考文献·····	163



附录	165
附录 A 电动车辆能量传输与回收技术实验设备简介	165
附录 B 电动车辆整体宏观运行状况	174
附录 C 电动车辆能量传输结构	180
附录 D 电动车辆能量传输与回收硬件设计	185

第 1 章 绪 论

随着汽车保有量的不断增长，汽车工业在世界经济发展中的地位越来越突出，已成为现代经济支柱产业之一，并对世界经济的发展和社会的进步产生巨大的作用和深远的影响。随着石油资源逐渐短缺，扭转目前以石油为主的能源利用格局，实现能源多样化成为未来汽车工业发展的趋势。混合动力系统已从原来发动机与电机离散结构向发动机电机和变速器一体化结构发展，即集成化混合动力总成系统。混合动力汽车是传统内燃机汽车与电动车辆相结合的产物，它继承了电动车辆低排放的优点，又发挥了石油燃料高的比能量和比功率的优点，显著改善了传统内燃机汽车的排放和燃油经济性，增加了电动车辆的续驶里程，在由内燃机汽车向电动车辆的转变过程中扮演着重要的角色，如图 1-1 所示。电池是混合动力和纯电动车辆的关键部件之一。锂电池目前尚处于研究改进和迅速发展阶段，其主要优势在于具有较高的比能量，可以使电池更小、更轻；具有较好的充放电效率和低的自放电率，可以提高电池的能量效率，具有较大的潜在降价空间。从技术上来看，电动车辆中许多类型已经成熟，完全可以进行大规模生产。但电动车辆产业化的最大难题通常是成本，由于传统汽车经过长期发展，具有显著的规模经济和相关产业链支持，而电动车辆在其发展初期面临着规模较小、上下游产业链不完整等因素，导致电动车辆的成本通常较高。特别是电池技术滞后于电动车辆总体技术的发展，电池的能量密度、功率密度、循环性能、安全性能与倍率性能都急需迅速提高。

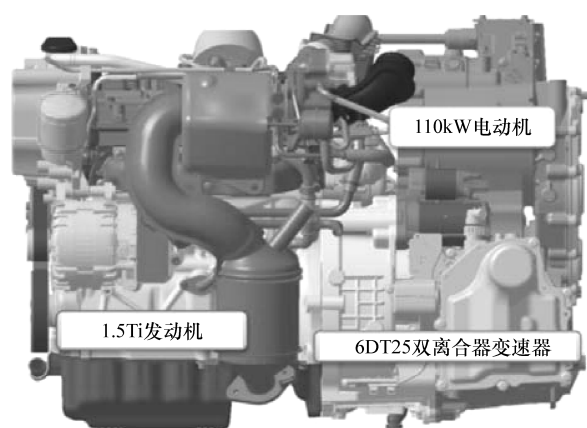
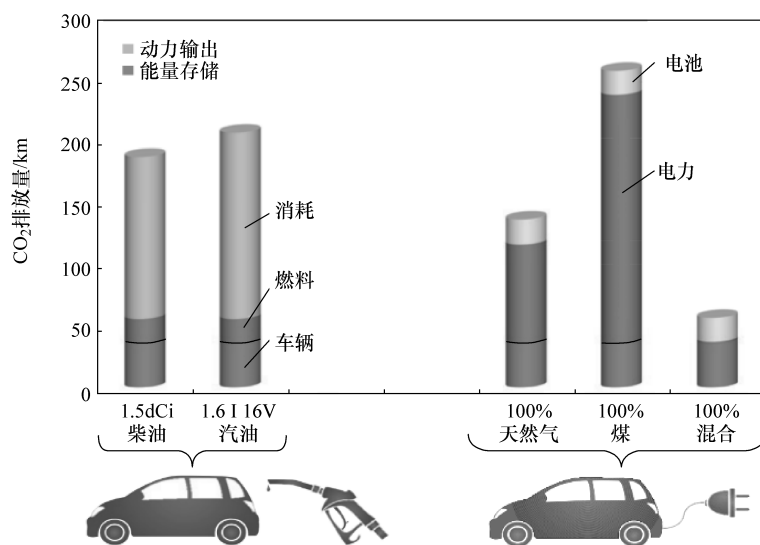


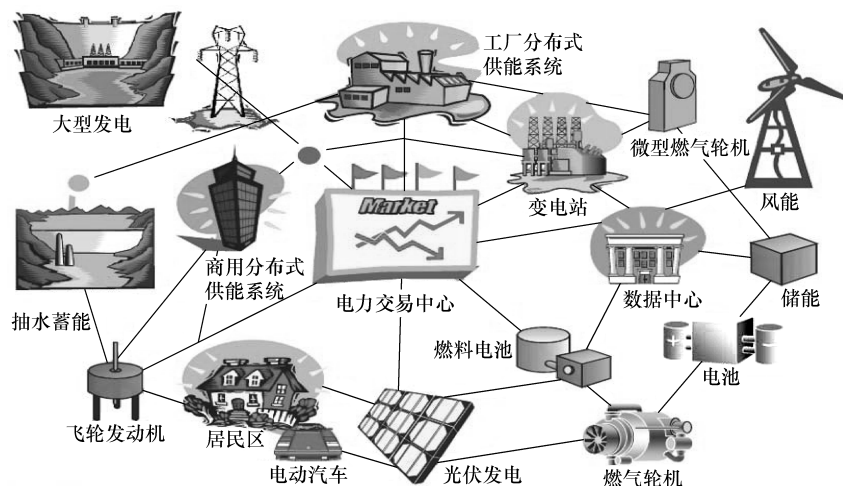
图 1-1 混合动力车辆发动机结构示意图，包括内燃机与电动机及匹配系统



在人类社会可持续发展的进程中，我们的日常生活一直都在排放二氧化碳(CO_2)。随着人类社会的发展，人口的增加与经济的增长等必将使 CO_2 排放增加。工业与交通领域能源燃料燃烧也是产生 CO_2 排放的重要原因之一，特别值得关注的就是车辆领域，传统内燃机车辆与电动车辆的 CO_2 排放对比示意图如图 1-2a 所示。科学家们认为 CO_2 过度排放已经并将继续为地球和人类带来灾难，因



a)



b)

图 1-2 电动车辆系统宏观能量排放与传输示意图

a) 内燃机与电动车辆 CO_2 排放对比图 b) 电动车辆能量传输构架的设计模型



此,控制和减少 CO_2 排放量是全球可持续发展共同面临的严峻挑战。随着电动车辆技术的发展,如何通过新技术来节能减排,成为目前全球瞩目的可持续发展能源技术新亮点。现代工业和电动车辆等对可持续能源的应用需求激增,目前电动车辆发展的重点是内燃机与电池共同作为动力源的混合动力汽车、纯电动车辆和燃料电池汽车。技术研发将围绕混合动力汽车、纯电动车辆和燃料电池汽车展开。从发电结构来看,纯电动汽车所需要的电能短期内仍然主要由煤炭、水电转化而来,二者之和所占的比重超过 90%,煤炭、水电相比其他发电方式仍具有明显的成本优势,因此短期内纯电动车辆所需要的能源主要仍由煤电和水电来提供。现代工业、电力与电动车辆系统等能量传输构架的设计模型示意图如图 1-2b 所示。可以看出,人们在拓宽可持续能源应用领域的进程中,越来越重视新技术对可持续能源系统的节能减排与多样化设计。如何研发替代传统能源的可持续发展新能源,对电动车辆等现代工业显得尤为迫切,势在必行。

2015 年,世界电动车辆产量增长约 3%,其中 80% 增量来自中国。中国电动车辆的快速发展引起了全球电动车辆产业的关注。根据中国电动车辆技术和市场的现状、面临的困难和发展的趋势,得出电动车辆锰酸锂与磷酸铁锂电池的综合性能与效益,如图 1-3a 所示,有助于电动车辆的工程师、销售经理以及供应商抓住目前中国电动车辆发展的机遇,推动电动车辆的迅速发展。2014 年我国汽车销量为 7.46 万辆,同比上升 424%。其中纯电动车销量为 4.5 万辆,同比上升 321%,如图 1-3b 所示。随着越来越多消费者对电动车辆的认可及充电设备的普及,车辆充电不再是一个难题,未来中国的电动车辆销量将进一步攀升。

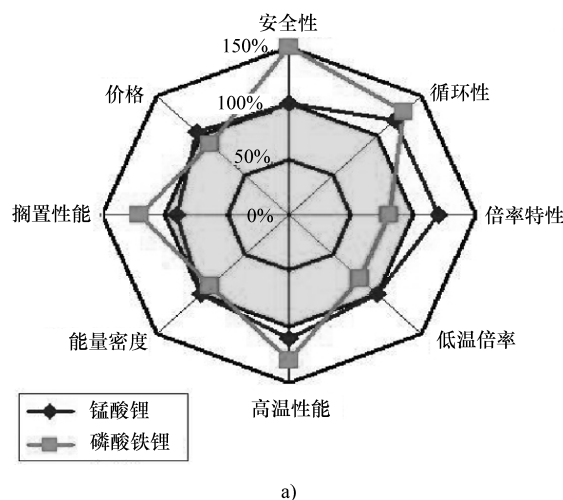


图 1-3 电池综合效益与电动车辆销量示意图
a) 锰酸锂与磷酸铁锂电池的综合性能与效益示意图



b)

图 1-3 电池综合效益与电动车辆销量示意图 (续)

b) 目前电动车辆的销量

从新能源电池材料的发展来看,电动车辆拉动作用巨大。从电池正极材料来看,几乎所有的正极材料产能都是比较充裕的,中国正极材料出货量占了全球的50%,但是产品层次相对不高。以电动车辆为代表的电动交通工具市场对锂离子电池的需求增长最快,占比从2013年的22%增长到2015年的35%。2014年该市场锂离子电池需求量590.77万kW·h,其中电动车辆325.20万kW·h,占比55.05%。2015年该市场锂离子电池需求量1144.34万kW·h,其中电动车辆642.16万kW·h,占比56.12%。2015年各种材料成本占比:正极材料58.80%,负极材料10.16%,电解液7.49%,隔膜14.98%,其他材料8.58%。

1.1 快速充电模型与技术

快速充电也是现在电池技术的难题。电池损耗的重要原因是在充放电过程中,正负电极在吸收和释放电解质里离子时自身的膨胀和收缩。在充放电过程中,电极纳米粒子会相对统一地吸收和释放离子。但是如果只有少部分粒子吸收了所有离子,电极就会加速损坏,减少电池寿命。学者们利用不同的电流对电池组进行不同时间的充电,然后迅速将它们分离并阻止充电/放电过程,还将电极切成薄片,并利用同步加速X射线检测。科学家对锂电池电极里微小粒子行为的研究显示,对电池快速充电,然后用于高功率快速耗电的工作,对电池的损伤没有人们预想的差,而缓慢充电和耗电所带来的益处可能也被过度夸大,快速充电电池电极里微小粒子模型如图1-4所示。这项结果挑战了有关快速充电比缓慢充电对电极要求更高的观点。科学家可能改变电池电极或改变充电方式,以提升统一的充电和放电过程,从而延长电池寿命。在充放电过程中电极变化细节只是



确定电池寿命的众多因素之一，但这一因素在这项研究之前尚未被完全理解。他们发现了电池老化的新证据，可优化商业锂电池氧化物和石墨电极。他们研究了上千个电极纳米粒子，在不同条件下对充放电过程进行详细分析，获得充放电过程中动态表征，如图 1-4 所示。在保证较长电池寿命的前提下，这表明优化电极可实现更快的充放电速率。通过上千次循环运行电极，能够拍摄电池在充放电过程中的实际情况，这个过程在同步加速器同 X 辐射源里进行。他们正与工业界密切合作，探寻如何在电动车辆领域应用快速充电。

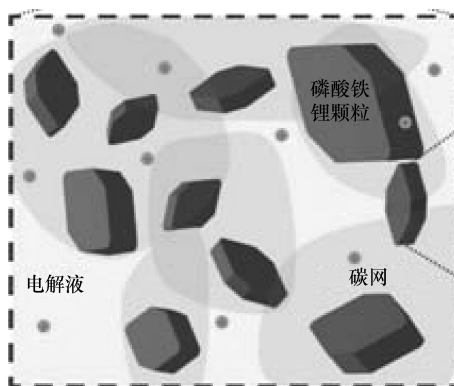


图 1-4 快速充电过程电池动态模型

科学家研制了纳米多孔电池，只需 12min 可完全充满，较目前长达数小时的充电周期大幅缩短。这种电池内部纵向排列了数以百万计的纳米孔，每一纳米孔均内含固态电解质，两端作为阴阳极，也就是说，每一个纳米孔都是一个微型电池，它们组成纳米阵列进行充放电。研究人员将能量存储材料覆盖在纳米孔的两端，然后加入电解质，使每个独立纳米孔都成为一个电池。其最大优势在于能够快速充电，并且储存能量将提升 10 倍，在快充状态下能循环 7000 次，该电池相比传统电池，不仅容量大，而且充电速度大幅加快，循环寿命长。这将给电动车辆带来重大创新。

1.2 无线充电关键技术

近年来，全世界对电动车辆的设计和制造等都提出了更高的要求，对加强电动车辆技术的要求日渐增长，但是，在电子电磁器件增加的同时，电器配线和各种信号配线也越来越多，许多电动车辆的线束重量和线束直径已分别达到甚至超过了 50kg 和 16cm，车内电线总长度可能超过 10km。由于导线太多，严重地干扰了电动车辆零部件的设计、布局和制造，另外，给电动车辆的维修也带来许多不便，还制约了电子电磁技术在电动车辆上的广泛应用。在这种情况下，研究人员一直知道如何在不使用电线的情况下输电。他们利用了“共振”原理，当送电方的电源接通后，两个线圈都以 10MHz 的频率振动，从而产生强大的电磁场，送电方发出的电磁振动即可传到受电方。两个线圈虽未相连，仍可完成隔空供电，使灯泡发光。即使在电源与灯泡中间摆上木头、金属或其他电器，灯泡仍会



发亮。“无线输电”技术的突破之处在于，找到了“抓住”电磁波的方法，即利用物理学的“共振”原理——两个振动频率相同的物体能高效传输能量。因此，研究人员先将能量囤积在发送端，而共振频率相同的接收端靠近时，这些能量就会通过共振效应将电流传送到接收端，最终实现电力的无线传播。

无线充电，就是通过电磁的转换，将之前通过电缆进行传输的电能不能取消物与物的连接，没有电缆之间的连接，就给了电动车更多的自由度，这是电动车最需要的。目前，为了解决这个困境，采用二次能量存储和携带来供应电动车的运行动力，现在炙手可热的特斯拉汽车，也无法避免自己底盘周围庞大数量的电池布置。所以，我们看到大家对于电池发展的期待是非常高的，把“远程无线充电”列成一项值得期待的未來汽车变革技术，当然这项技术和目前的无线充电技术有没有关系、有着什么样的关系，还很难界定，或许我们目前能够看到的电磁世界对于支撑远程无线供电还不具备可能性，但是物理界以及相关的设备制备方面，这方面的能力仍然不可小视，这种可能性随时可能发生。如果远程供电不具备，则在一段路上铺设无线充电设备，电动汽车在这条路上行驶的过程中，就可以充电——这个技术难度有限，可能成本也比较高，但这种办法可以越过汽车电池的束缚。电动车如果少了电池有线充电这个包袱，一方面整体的成本可以降低，同时重量也可大幅度下降，更为重要的是，消费者担心的着火等事情跟电动车辆基本上脱离了关系，这些车辆比现有车辆更为安全，这才是人们真正期待的电动车辆，也是无线能量传输技术的特色。

无线充电技术，源于无线电力输送技术。无线充电，又称为感应充电、非接触式感应充电，是利用近场感应，也就是电感耦合，由供电设备（充电器）将能量传送至用电的装置，该装置使用接收到的能量对电池充电，并同时供其本身运作之用。因为充电器与用电装置之间以电感耦合传送能量，两者之间不用电线连接，所以充电器及用电装置都可以做到无导电接点外露。无线充电技术的商用为现有插电和换电模式之外新增了一种电动车辆充电模式，其工作原理主要是电磁感应，主要由地面能量发送模块和车载能量接收模块等组成，充电功率可以达到3~300kW，从插座到电池的端到端充电效率可达90%以上，如图1-5所示。来自电网公司的交流电在地面能量发送模块里被转换成为几十千赫的电磁能，穿过地面与车底盘之间的空气间隙被装载于车底部的能量接收模块感应接收，之后再转变成成为车载电池充电所需的电能。地面能量发送模块可以地埋，不影响路面的通过性，支持在都市核心区域利用现有路面和停车场进行改装建设大功率无线充电设施，可以有效提升新能源公交线路的系统投资效率和社会效益。该技术能够对加速电动车辆充电基础设施建设产生革命性推动作用，成倍提升投资效率，解决在都市核心地带大量建设充电设施的老大难问题。并且，公交车在改造过的停车位停靠后就可以进行充电，无须人工插拔充电枪，完全不受泥沙和水浸的影



响。大功率无线充电解决方案优点总结为：站不征地、车不增负、充不动手、路
不白跑、电不过放。

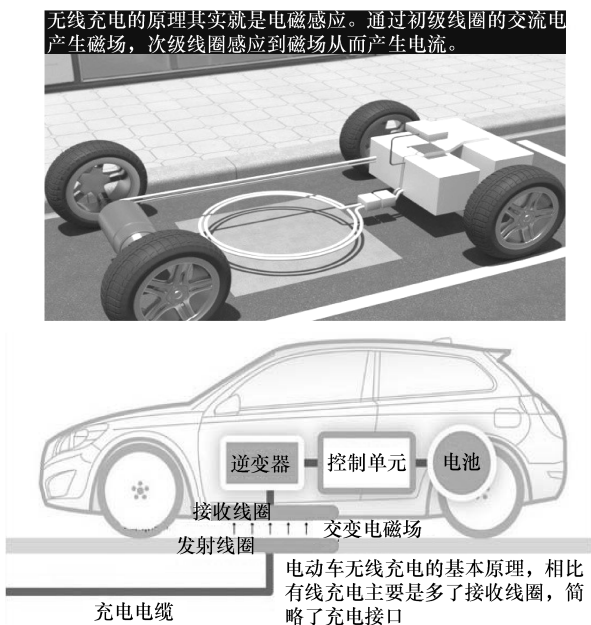


图 1-5 电动车无线充电技术原理

无线充电主要分为以下三种。

电磁感应式充电：初级线圈中一定频率的交流电，通过电磁感应在次级线圈中产生一定的电流，从而将能量从传输端转移到接收端，如图 1-6 所示。目前最为常见的充电垫方案就采用了电磁感应，事实上，电磁感应解决方案已在电动车辆技术上实现，如图 1-7 所示。

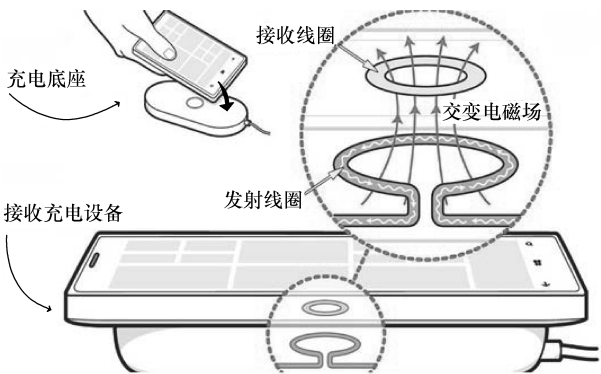
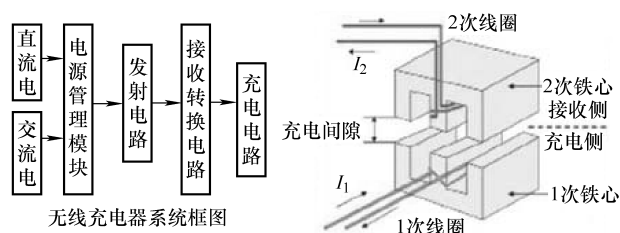


图 1-6 电磁感应系统



磁场共振充电：由能量发送装置和能量接收装置组成。当两个装置调整到相同频率或者说在一个特定的频率上共振时，它们就可以交换彼此的能量，是目前正在研究的一种技术，如图 1-8 所示。如果线圈尺寸缩小，则接收功率也会下降。

*电磁感应式充电系统框图及应用



无线充电器系统框图

*电磁感应式充电

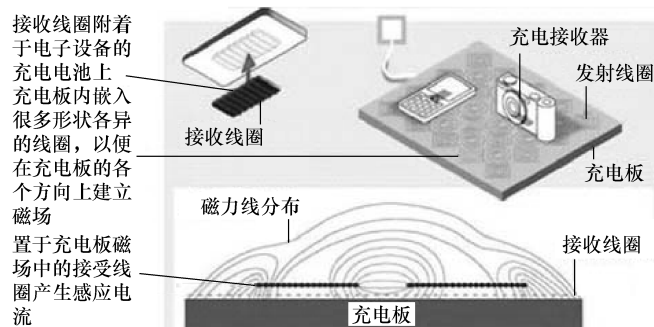


图 1-7 电磁感应逻辑结构

◆ 磁场共振

注：共振频率接收器



图 1-8 磁场共振模式



无线电波式充电：这是发展较为成熟的技术，类似于早期使用的矿石收音机，主要由微波发射装置和微波接收装置组成，可以捕捉到从墙壁弹回的无线电波能量，在随负载做出调整的同时保持稳定的直流电压。此种方式只需一个安装在墙身插头的发送器，以及可以安装在任何低电压产品的“蚊形”接收器。如图 1-9 所示。



图 1-9 电波充电原理

1—供电组件 2—充电板 3—电磁波 4—车载接收版 5—车载控制器 6—电池组

因为磁共振过程中能量的损失要低于电流在传统线缆中的损耗，所以无线充电的效率非常高，可以达到 90% 以上，超过了线缆充电。未来无线充电将用于更加广泛的环境中，以实现车辆的半动态及动态充电。要想实现这个目标，需要在城市道路中埋设大量的充电板，当车辆在充电板上方驶过时，便可以进行连续的充电，最理想的状态是，驾驶人可以在行驶中将电池组充满。当然，想要实现这个目标，人们还需要在技术、安全、标准、成本和政策等方面进行更加深入的努力，但这样的未来确实值得人们期待。无线充电和当年的无绳电话一样，短距离的无线充电意义不大，但由短距离开始，从开始的无绳电话到最后的手机，以及当下的移动互联网，这个改变需要时间的积累。但是，很多人可能已经考虑到一个难题，电动车辆的充电站如何建设，如果电动车辆想要普及的话，城市居民



居住的小区如何去建设充电站，首先车位不足，然后是有车位的如何进行充电桩的改建，建设一个充电桩以及改动相关线束确实存在困难，无线充电技术还没有能力去实现远程充电，但中距离的充电已具备。我们提出了快速无线充电技术系统的解决方案，如图 1-10 所示。系统由外层的整车稳定性控制器和内层的 4 个控制器组成。

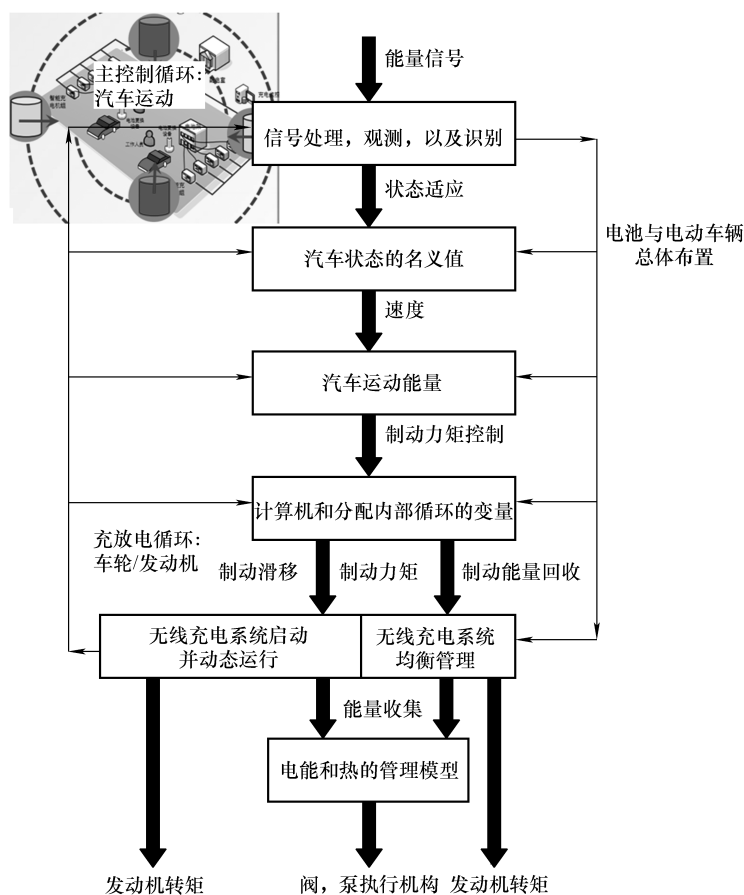


图 1-10 快速无线充电技术总体解决方案

1.3 传输效率关键技术

传输效率是所有无线充电都面临的问题，对于电动车辆这样充电功率更大的能源系统来说更是如此——电能首先转换为无线电波，再由无线电波转换成电能，这两次转换都会损失不少的能量——这与本身就是绿色、环保的电动车来



说，似乎显得有些格格不入。无线充电技术物理原理如图 1-11 所示。电磁兼容也是无线充电需要解决的技术瓶颈之一，众所周知，电磁波很容易产生泄漏，当大功率的车用无线充电设备运行时，也会对周围的生物和电子设备产生影响，甚至会危害人体健康，在大家谈辐射色变的今天是很敏感的话题，所以这方面如何处理也是电动车无线充电实现工程化需要解决的问题。此外无线充电还是会面临电气标准等方面的问题，也是需要工程师和汽车厂商需要去解决的，不过相信关键技术问题解决之后，这些问题在大趋势下也会迎刃而解。

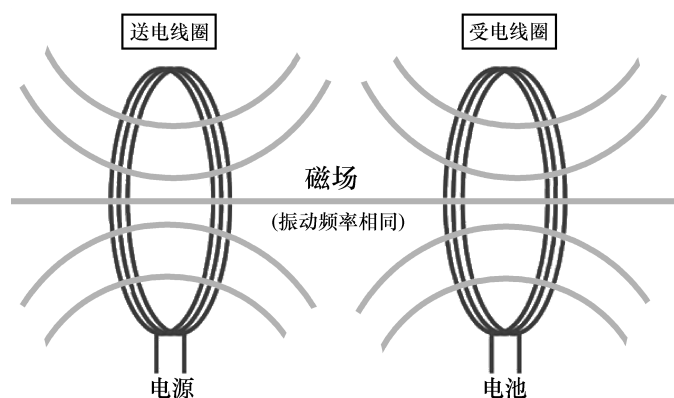


图 1-11 无线充电技术物理原理

电动车辆充电要依靠充电站或充电桩。充电站面积大、投资高，难以在城市中心区推广，利用率也不高，充电桩建设也存在许多困难，充电桩施工造价高，难以大面积推广。充电桩方式如同有线路由器，一根线只能保证一台电脑上网，而无线充电如同无线网络（WiFi），多台电脑和手机可以同时上网。采用无线充电方式，在一个停车场的一个充电基站，就可以在一定范围内为多辆电动车充电。目前的无线充电技术传输功率还比较小，而且距离也比较短，还不能满足汽车充电的需要，但是在研究方面已经取得可喜的进展，目前全球的电动车辆行业还未对无线充电设备的设计标准做出规范，包括韩国、日本以及美国的部分科技企业和大学都在研发类似的新一代电动车充电技术。因此不同厂商之间的兼容性成为阻碍这种技术在短时间内普及使用的一大障碍。另外，还有人在开发移动无线供电技术，电动车辆可以边充电边行驶，据说这个方案技术难度倒是不大，但是成本比较高，而且要改造现有公路，投资规模肯定不小，在公路的柏油层并盖，按一定的距离布置初级线圈，当电动车辆从上面经过时，就能进行充电。试想一下，当你开着一台电动车辆行驶在可以充电公路上，看着电池电量在缓慢增长，驶达目的地的时候，可能会比出发时的电量还要多，如图 1-12 所示。如果考虑到汽车可以带很少的电池去较远的地方，这个方案还是可以考虑的。无线充



电是一个刚刚起步的领域，如果发展好，则可以在很大程度上解决电动车辆发展的充电瓶颈，但由于其研发投资巨大，需要国家进行鼓励和扶持，以加快其研发进程，尽早得以推广应用。无线充电技术是解决电动车辆的途径，但绝不是唯一的。它同样面临许多的问题，比如能量传输中的损耗，以及改造现有设施的高昂成本。不过，通过技术的改进，无线充电将会有长足的进步，并且像无线网络一样，充分地渗透到日常生活中。

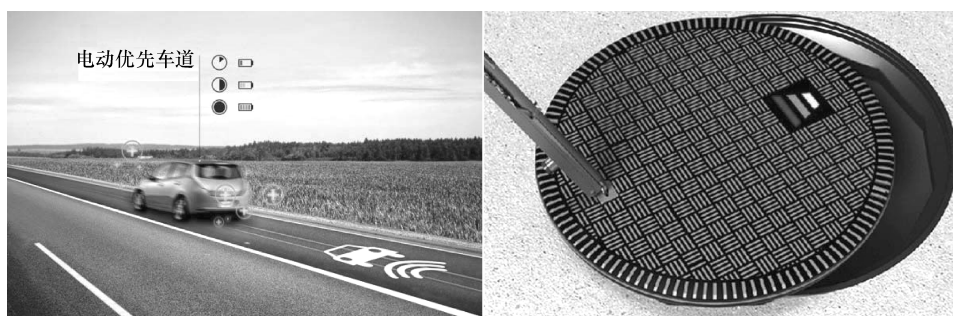


图 1-12 智能充电原理示意图

1.4 电池能量管理系统

随着电气化动力系统变得日益复杂，电池能量管理系统（Battery Management System，简称 BMS）需要执行的功能增多，承受的负担之重前所未有。无论是简单的充电控制器还是复杂的控制单元，对于电池管理系统（BMS）的需求都在迅速增长，尤其是电动车辆领域。除了传统的充电状态监控外，BMS 还必须遵守日益严格的安全法规，注重控制和待机功能、热管理和用于保护车厂电池的加密算法。未来，甚至车辆控制单元的部件和功能也会与 BMS 相关联。BMS 在电动车辆领域发挥重要作用。然而 BMS 的各个子功能往往由车厂定制，会因系统配置不同而存在很大差异。因此，不可能制定出适用于每一个电动车辆制造商的完整的 BMS 要求列表。然而，电池管理系统处理的任务范围不断扩大，这一事实毋庸置疑。BMS 最常见的要求包括安全要求、控制和监控功能、待机功能、热管理、加密算法和预留可扩展接口增加新功能。电池系统中最危险的故障来源有：因电缆磨损或事故而导致车辆底盘出现高电压漏电而未被发现；各种引起高电压电池起火或爆炸的原因，例如对电池过度充电（如在公用电网上或因停电恢复引起）、电池过早老化（如爆炸性气体泄漏）、液体进入和短路（如因雨水引起）、滥用（例如维修不当）和热管理错误（如冷却失效）等。在安全方面，主开关（主继电器）在避免与高电压相关的事故中起到了重要的作用，



它可确保 BMS 电子系统能够做出充分的故障反应。发生故障时，BMS 模块会在适当的故障反应时间内断开开关（例如 10ms 以内）。非关键故障安全条件的特征通常是：如果 BMS 微控制器（MCU）失效，甚至在控制器逻辑完全失效的情况下，独立的外部安全元件（如窗口看门狗）仍可确保主开关继电器可靠地打开逆变器（正/负）的两个高电压触点。BMS 中还集成了其他安全功能，包括漏电流监控和主开关继电器监控。BMS 功能包括对电动车辆中昂贵的高电压电池的监控、保养和维护，如图 1-13 所示。BMS 控制和监控功能来源于安装于电池包中的电子平衡单元。管理各个电池组内（Battery Slave Pack）的平衡，同时精确地感测各个单电池的电压。平衡芯片通常可管理多达 12 个单电池组成的群组。相关数量的电池群组串联后可产生高达数百伏的高中间电路电压以供逆变器控制之用，这是电动车辆的逆变器电驱动所必需的。位于主开关对所有高电压电池的总电流的测量，以及从芯片对各个单电池电压的单电池精确同步监控，BMS 可使用特定算法（如基于电池化学 Matlab Simulink 模型）评估充电状态及健康状态等电池参数。BMS 通常不会安装在非常靠近高电压电池的位置，但是通常会通过冗余的流电去耦总线系统（如 CAN 或其他适合的差分总线）与电子平衡从动元件相连接。它由汽车电压（12V 电池）供电，因此可通过现有的网络架构与现有的控制单元群组结合使用，无须进一步的流电去耦措施。最后，它还改善了安全性，因为它让 BMS 能够在高电压电池发生机构或化学缺陷时确保功能正常并且安全地断开主开关。根据制造商选择的电动车辆特定电子拓扑结构，目前已有高阶驱动策略的逆变器控制单元和独立的整车控制单元。同时还有整个转矩控制系统，这些系统还具有其他高级功能，如智能电源管理等。电源处理器（通过集成的导航单元）将驾车路线规划涵盖在内，可根据具体路线优化整个电源系统，因此有助于增加电池的行驶距离范围。

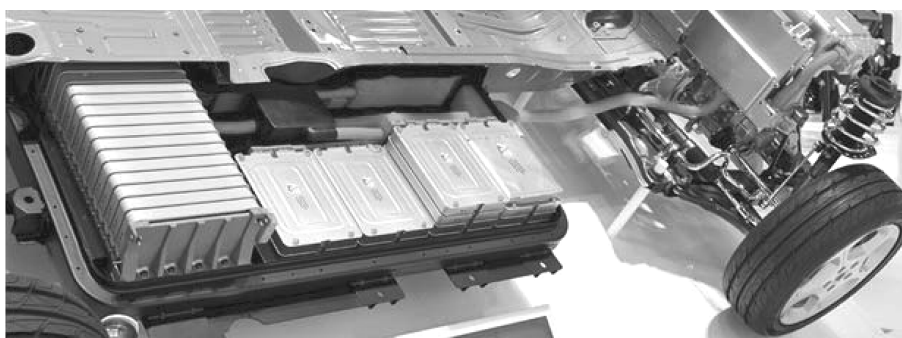


图 1-13 电池管理系统模型解剖图



1.5 制动能量回收技术

通过在发动机与电机之间设置离合器，在车辆减速时，使发动机停止输出功率而得以解决。但制动能量回收还涉及混合动力车的液压制动与制动能量回收的复杂平衡或条件优化的协调控制。通过驱动电机回收车辆运动能量的机理是电机工作的逆过程，就是发电机工作状态。一般电学基础理论早已阐明，表示电机驱动的工作原理是左手定则，而表示发电原理的则是右手定则。由于电机运转，线圈在阻碍磁通变化的方向上产生电动势。该方向与使电机旋转而流动的电流方向相反。于是人们称为逆电动势。逆电动势随着转速的增加而上升。由于转速增加，原来使电机旋转而流动的电流，其流动阻力加大，最后达到某一转速，就不能再向上超出。所以，制动时通过电机的电流被切断，代之而发生逆电动势。这就是使电机起到发电机作用的制动能量回收的原理。这种电机称为电动机-发电机。然而，当制动能量回收实施时，如何处理制动踏板？制动时，制动踏板行程（或强度）如何与制动能量回收系统保持协调关系？起到制动能量回收作用的制动部分，会减少制动力。因为对于制动来说，从制动能量回收中所起作用考虑，必须在减少制动力方面做出相应措施。在制动力减少的同时，制动踏板的踏板力要求与踏板行程相对应。当驾驶人踩制动踏板时，则按照制动踏板力大小，通过行程模拟器（Stroke Simulator）等部分，液压制动器（液压伺服制动系统）实时进入相应工作，紧接着制动能量回收系统也将进入工作状态。即如果动力电池的电控单元判断动力蓄电池有相应的荷电量回收能力，则制动能量回收制动力占整个制动力的相应部分。制动能量回收制动与液压制动之和达到与制动踏板行程量相对应的制动力值，从而改善驾驶人制动操作时路感。如图 1-14 所示，电机在制动、缓慢减速时，通过混合动力整车电控单元发出相应指令使电机转为发电机再生发电工况，通过制动能量回收控制系统以电能形式向动力电池充电。其基本工作过程是：当制动时，制动踏板传感器使电控单元激活制动主缸伺服装置，通过动力电池电控单元、能量回收电控单元、电机电控单元等电控单元发出相



在急加速、高速路或者需要加大转矩的上坡等情况下发动机会及时起动，与电动机同时工作，并且为电池充电

图 1-14 制动能量回收装置示意图



应指令，使液压机械制动和电机能量回收之间制动力协调均衡，以实现最优能量回收。

1.6 压电能量回收技术

能量无处不在。我们每天跑步、跳跃、行走、活动，不断产生机械振动能。压电发电技术瞄准的正是这些不起眼的能量，将其收集起来有效利用。说到压电技术，要追溯到 1880 年。当年居里在石英晶体中发现：晶体受到机械应力的作用时，其表面会产生电荷；反之，当外加电场于晶体时，晶体会产生形变。前者被命名为正压电效应，后者则被称为逆压电效应。100 多年过去，压电学和压电材料经过了石英晶体、钛酸钡陶瓷、锆钛酸铅陶瓷、弛豫铁电单晶等几个里程碑的发展，各种压电传感器、换能器和驱动器在工业技术领域成为不可替代的重要器件。这些年来，工业化社会对能源需求猛增与化石能源供给有限的矛盾日益突出，各国大力发展各种可再生能源，能量回收技术成为研发热点。压电正是这样一种技术——利用压电材料的正压电效应将机械振动能转变为电能，从而将如人体走路的踩踏、机械振动，甚至噪声等形式的振动能量收集起来，经过能量转换—整流—存储—传输—供电等诸多环节，应用于生活。这种能量收集系统帮助我们利用曾被白白浪费的能源。不久的将来，车站、公路、轨道等，都可能成为发电装置，作为众多其他能源的补充。

压电发电具有结构简单、不发热、无电磁干扰、无污染和易于实现小型化和集成化等优点，并因能满足产品的电能需求而成为目前研究的热点之一。2010 年上海世博会上的压电地板，参观者轻轻几步就可将电灯点亮，这让人惊喜不已。美国研究机构在公路下埋有压电能量回收装置，使其驱动电动车辆，在实验室研发阶段基本达到可自供电的实用水平。同样，以色列技术研究院也在普通路面的沥青中植入大量的压电晶体，通过汽车驶过时的压电转换来发电。据测算，1km 的路面能产生约 100 ~ 400kW 的电力，如图 1-15 所示。理论上，这些植入沥青的压电材料能使用至少 30 年，可用于任何大流量的道路，包括铁路和公路。目前以色列对这种技术仅进行了小规模的试验，今后将进行大范围的试验。此外，为了提高能量获得效率，研发人员一般在设计时将压电、热电、光伏等多种能量同时收集利用。我国有关的研究机构也在积极开展能量回收的研究工作。上述不同的研发工作，其基本原理没有本质差别，主要的不同在于压电材料的工作模式不同，系统和应用场合的结构不同。目前压电换能器大多采用 PZT 压电陶瓷，结构形状有陶瓷片、陶瓷悬臂梁、压电鼓、压电铰铍以及多层陶瓷结构等。为了增大发电功率，必须采用多个元件并联方式，以提高装置的输出电流。

近年来，压电材料也在向更微观的尺度发展。纳米压电电子学将半导体和压

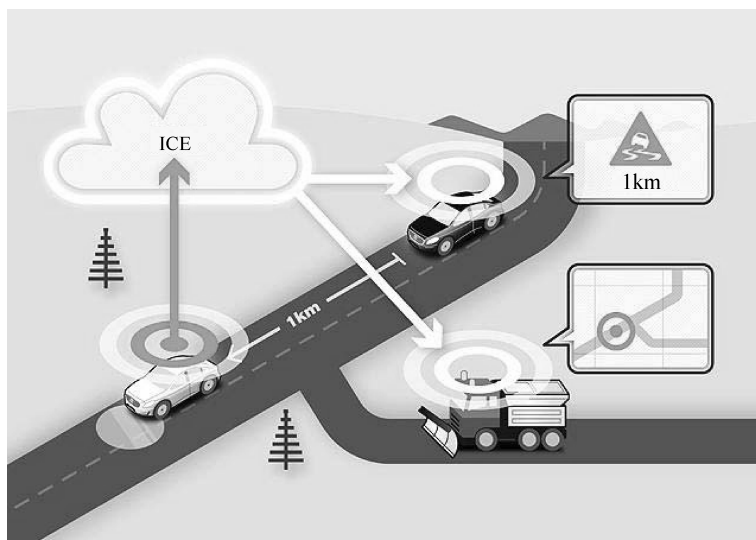


图 1-15 压电能量回收技术的结构框架示意图

电学结合起来，从而有望开发出新型的压电场效应晶体管、自供电纳米发电机。美国和我国的科学家合作研究并报道了一种压电纳米发电机，以氧化锌纳米线为基础，实现了在纳米尺度上把机械能转化为电能。纳米线的直径一般小于100nm，但其长度可以达到数微米，如此大的长径比使得很小的力便可将纳米线弯曲而产生电势差。纳米压电发电机的理论发电效率可达17%~30%，模型如图1-16所示，具有较高的能量密度和转换效率，开辟了新的技术路线。不过，虽然目前人们已经能够大量合成出纯度、尺寸、形貌以及晶体结构可控的氧化锌纳米棒阵列，但如何将运动、振动、流体等自然存在的机械能转化为电能，从而实现无需外接电源的纳米器件，仍然存在许多挑战。解决成本和效益问题是关键。目前，外部的振动机械能通过能量收集装置产生的电流为交流电，其缺点是不连续、不规则。在工程应用中，必须设计相应的匹配电路，采用桥式整流电路，将交流电转换为直流电，将产生的电能储存起来，经一定时间的充电，达到足够的量时方可供应外部负载使用。

能量回收系统的关键技术，主要包括选择压电材料、设计和外部振动频率接近的压电振子及支撑方式、设计高效的电能收集和储存电路系统等。目前的验证性演示主要是驱动车辆照明或显示设备，如图1-17和图1-18所示。要有大的发电量，在技术上没有太大的障碍，主要还是成本和效益问题。如何进一步提高发电效率，大幅度降低成本，提高系统的可靠性和耐用性，这些都是重要的挑战。如果科研单位和企业协同努力，压电能量回收技术有望在20年内逐步得到推广

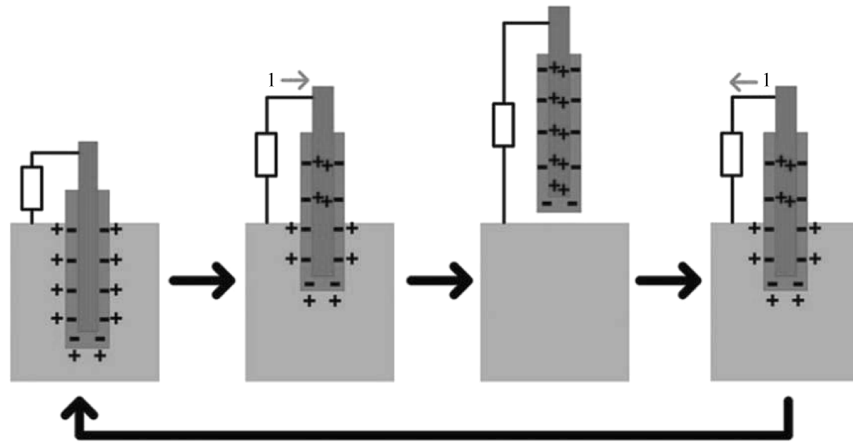


图 1-16 纳米压电发电机模型

和应用。

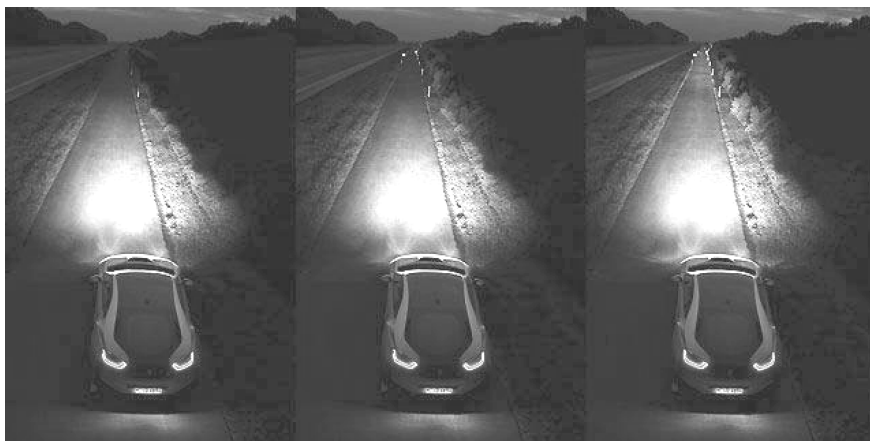


图 1-17 压电能量回收技术驱动照明设备示意图（从左至右，压电能量回收系统分别驱动氙气前照灯、LED 前照灯和激光前照灯的照射距离和效果比较）

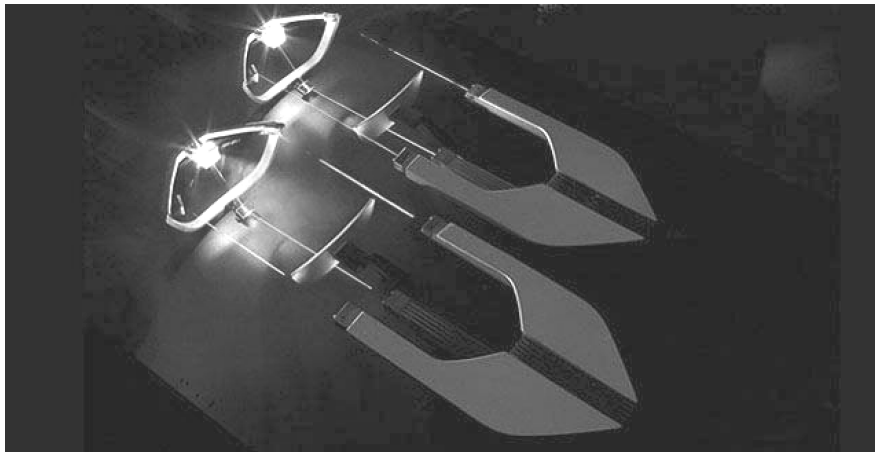


图 1-18 压电能量回收系统驱动激光灯结构示意图

参 考 文 献

- [1] Wang C, Wu H, Chen Z, et al. Self-healing chemistry enables the stable operation of silicon microparticle anodes for high-energy lithium-ion batteries [J]. Nat Chem 2013 - 17 - 1802 - 9.
- [2] Favors Z J, Wang W, Bay H H, et al. Stable cycling of SiO₂ nanotubes as high-performance anodes for lithium-ion batteries [J]. Sci Rep 2014 - 4 - 5121 - 7.
- [3] Li Y, Song J, Yang J. Progress in research on the performance and service life of batteries membrane of new energy automotive [J]. Chin Sci Bull 2012 - 57 - 4153 - 9.
- [4] Li Y, Song J, Yang J. Graphene models and nano-scale characterization technologies for fuel cell vehicle electrodes [J]. Renew Sustain Energy Rev, 2014, 10: 1016.
- [5] Suo L M, Hu Y S, Li H et al. A new class of solvent-in-salt electrolyte for high-energy rechargeable metallic lithium batteries [J]. Nat Commun 2013 - 4 - 148 - 53.
- [6] Shin B R, Nam Y J, Kim J W, et al. Interfacial architecture for extra Li⁺ storage in all-solid-state lithium batteries [J]. Sci Rep 2014 - 4 - 5572 - 81.
- [7] Ebner M, Geldmacher F, Marone F, et al. X-Ray tomography of porous, transition metal oxide based lithium ion battery electrodes [J]. Adv Energy Mater 2013 - 10 - 1012 - 9.
- [8] Jung D S, Hwang T H, Park S B, et al. Spray drying method for large-scale and high-performance silicon negative electrodes in Li-ion batteries [J]. Nano Lett, 2013 - 13 - 2092 - 7.
- [9] Liu G, Zheng H, Song X, et al. Particles and polymer binder interaction: a controlling factor in lithium-ion electrode performance [J]. Electrochem Soc, 2012 - 159 - A214 - 21.
- [10] De Volder M F L, Tawck S H, Baughman R H, et al. Carbon nanotubes: present and future commercial applications [J]. Science, 2013 - 339 - 535 - 9.
- [11] Wang X J, Hou Y Y, Zhu Y S, et al. An aqueous rechargeable lithium battery using coated Li metal as anode [J]. Sci Rep, 2013 - 3 - 1401 - 7.



- [12] Wang J J, Sun X L. Understanding and recent development of carboncoating on LiFePO₄ cathode materials for lithium – ion batteries [J] . Energy Environ Sci, 2012 – 5 – 5163 – 85.
- [13] Liu N, Lu Z D, Zhao J, et al. A pomegranate – inspired nanoscale design for large – volume – change lithium battery anodes [J] . Nat Nanotechnol, 2014 – 9 – 187 – 92.
- [14] Yi R, Dai F, Gordin M L, et al. Micro – sized Si – C compositewith interconnected nanoscale building blocks as high – performance anodesfor practical application in lithium – ion batteries [J] . Adv Energy Mater 2013 (3) : 295 – 300.
- [15] Song B H, Lai M O, Liu Z W, et al. Graphene – based surfacemodification on layered Li – rich cathode for high – performance Li – ion batteries [J] . Mater Chem, 2013 – A1 – 9954 – 65.
- [16] Catalan G, Seidel J, Ramesh R, et al. Domain wall nanoelectronics [J] . Rev Mod Phys, 2012 – 84 – 119 – 56.
- [17] Wang C, Wu H, Chen Z, et al. Self – healing chemistry enables the stable operation of silicon microparticle anodes for high – energy lithium – ion batteries [J] . Nat Chem, 2013 – 17 – 1802 – 9.
- [18] Favors Z J, Wang W, Bay H H, et al. Stable cycling of SiO₂ nanotubes as high – performance anodes for lithium – ion batteries [J] . Sci Rep, 2014 – 4 – 5121 – 7.
- [19] Tee B C, Wang C, Allen R, et al. An electrically and mechanically self – healing composite with pressure – and flexion – sensitive properties for electronicskin applications [J] . Nat Nanotechnol, 2012 – 7 – 825 – 32.
- [20] Sathiya M, Rousse G, Ramesha K, et al. Reversible anionic redox chemistry in high – capacity layered – oxide electrodes [J] . Nat Mater, 2013 – 12 – 827 – 35.
- [21] Bouchet R, Maria S, Meziane R, et al. , Single – ion BAB triblock copolymers as highly efficient electrolytes for lithium – metal batteries [J] . Nat Mater, 2013 – 12 – 452 – 7.
- [22] Szczech J R, Jin S. Nanostructured silicon for high capacity lithium batteryanodes [J] . Energy Environ Sci, 2011 (4) : 56 – 72 .
- [23] Zhao Y L, Feng J G, Liu X, et al. Self – adaptive strain – relaxation optimization for high – energy lithium storage material through crumpling of graphene [J] . Nat Commun, 2014 – 5 – 4565 – 73.
- [24] Guo B, Ruan H, Zhen C, et al. Hierarchical LiFePO₄ with a controllable growth of the (010) facet for lithium – ion batteries [J] . Sci Rep, 2013 – 3 – 278 – 88.

第2章 电动车辆能量 传输微系统与微结构机理

本章阐述电动车辆电池电极材料应力、快速温升耦合条件下的位错/应力/空洞耦合模型，研究复杂工况下非平衡状态位错/应力电极/应力迁移耦合能量传输的表征方法，评述位错/裂纹耦合能量传输耦合演化机理。重点介绍 X 射线照相技术，分析电池应力电极与位错耦合的内在关联机制，发展中心暗场透射电镜技术研究裂纹扩展路径与位错演化进程之间的关系。探索电动车辆能量非平衡状态应力电极、温升与裂纹贯通的机制，揭示电池位错/裂纹在非平衡状态应力/快速温升下的电池损伤与性能能量传输的耦合机理，探索可用于电动车辆实时加载的位错/裂纹微尺度表征的新能源技术，将非平衡状态位错/应变的表征尺度提升到更大视场、更高分辨率等。评述与探索位错/应变分布耦合微尺度表征方法，为电池电极材料能量传输分析与微结构损伤表征提供科学依据和技术支撑。

20

2.1 电动车辆能源传输微系统机理

能源是电动车辆发展的基石，电池材料是电动车辆重要的能源材料，通过电池材料的电化学/化学耦合作用把化学能转化为动能，实现动力电池功能。现在的商用动力电池充电时间过长，续航里程过短，不能完全满足电动车辆的需求。为适应电动车辆长续航里程与快速充电的发展趋势，对电池材料提出了更加苛刻的要求。长距离续航、快速充电等复杂工况会使造成大电流瞬间放电及快速温升频繁发生，将导致电池耐久性与使用性能变差。电池材料处于加速能量传输/快速温升的非平衡动态工况。在长距离续航及快速充放电等过程中，电池材料损伤极为严重，加速能量传输/快速温升耦合频繁发生，使电池很难达到预期设计的耐久性能和安全使用寿命。在技术层面，安全是电池技术首要前提，安全事故是对电池技术的严峻挑战。在科学层面，电池技术的底层创新依赖于材料微结构体系与微尺度效应，只有新材料结构体系带来的新尺度效应，才能引领未来更加安全的适应耐久性的电池技术发展，例如，功能电极材料结构体系（图 2-1a）、核壳复合材料结构体系等，因此，随着电池技术的发展需求，新材料研究经久不衰。由于电极材料提高了应力/温升耦合性能和使用寿命，并保证了热稳定性和耐久性等，其诱人的应用前景被研究者日益重视。但是目前电池电极材料性能能



量传输的微尺度表征工作，多为定性表征或半定量分析，定量及可视化表征工作稀少，还未能揭示电池性能能量传输失效机理及预测耦合演化进程。Sayle 等分析了锂嵌入电极材料结构的模型，自表及里晶粒由纳米增大至微米尺度。实验表明，电极材料优异变形能力源于微结构独特的变形机制，在演化过程中其变形机制为晶界迁移、空洞、位错等，并伴随空洞长大，如图 2-1b 所示。

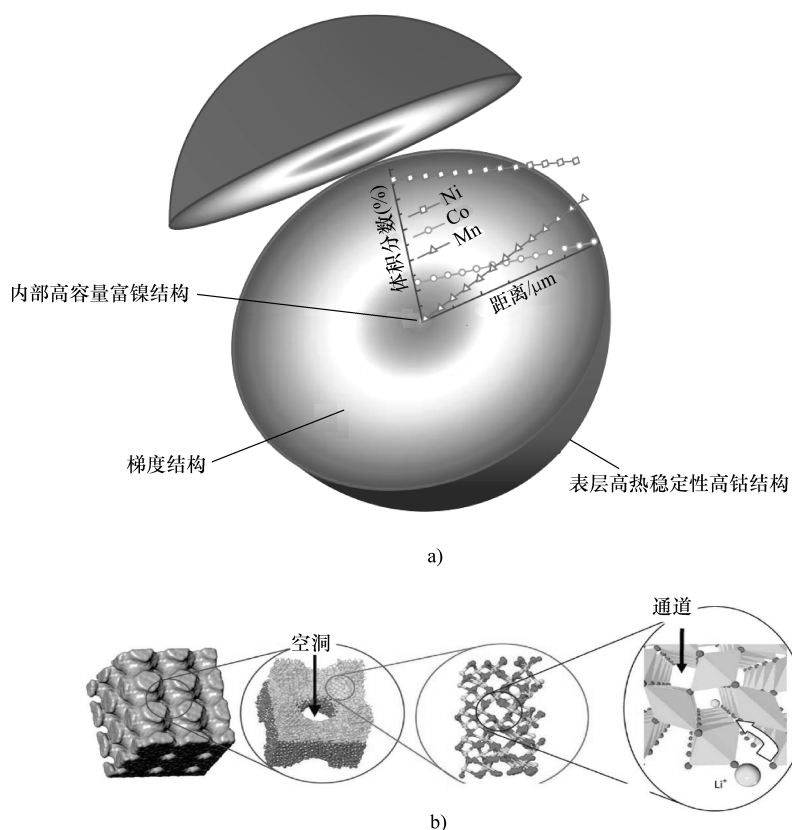


图 2-1 电池电极材料模型

a) 电池电极材料微结构模型 b) 锂嵌入电极材料微结构跨尺度模型

对近年来重载、高速、耐久电动车辆电池动态过程中的事故进行研究表明，大多故障源自电池材料动态能量传输与损伤耦合。在电化学与热力学层面，应力/快速温升导致材料微结构发生微尺度缺陷，比如位错/空洞/微裂纹等缺陷，这些缺陷演化发展后使得电池性能能量传输与材料失效耦合，从而发生事故。Huang 等研究了在应力与快速温升的耦合作用下，电池电极材料动态损伤和断裂过程，认为能量传输源于材料内部微结构的动态演化，位错生长与贯通，演化成位错云，出现位错、位错云等缺陷的交互与关联。位错云使得微区应力迁移、应



力电极变化等，如图 2-2 所示。

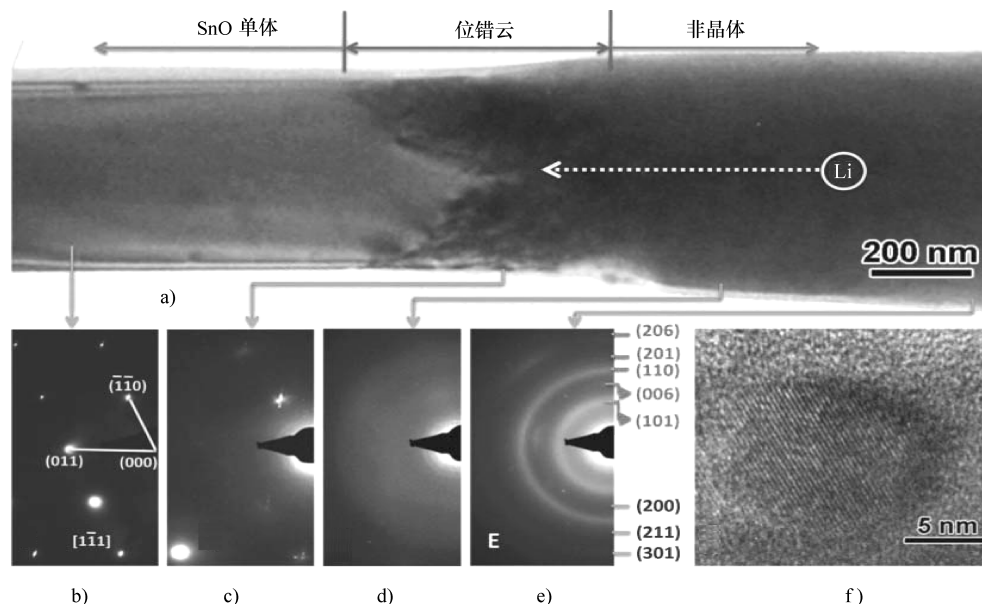


图 2-2 电极位错演化进程表征

a) 锂化位错云 b) 缺陷团 c) 初始位错 d) 位错滑移 e) 位错云扩展 f) 位错云成核

Wood 等采用同步辐射 X 射线断层扫描显微镜（Synchrotron Radiation X-ray Tomographic Microscopy，简称 SRXTM）结合第一原理能量计算，测出了非平衡状态微尺度析出相的晶体结构与能量传输演化，分析了裂纹萌生与扩展演化过程中性能能量传输的微尺度机制，如图 2-3 所示。微结构的电池性能能量传输清晰地反映在微尺度电极结构的可视化表征图像中，揭示了充放电过程中微结构还原与氧化反应的基本结构形态。目前，对电池材料微结构位错/应力电极/空洞耦合尚缺乏表征技术，定量表征尤其困难，空洞成核与演化过程难以观测，应力迁移物理机制还未阐明，位错萌生过程也不清楚。电池技术理论框架虽很漂亮，但实验表征多为定性实验，定量表征稀少，结果不够准确。目前实验虽考虑宏观应力与高温影响，但未体现应力与非平衡状态快速温升导致的微结构及微尺度缺陷演化以及应力电极变化而受到争议。若能定量表征非平衡状态应力/快速温升下位错、应力诱发空洞及空洞贯通等耦合机理，那无疑将是一个有价值且有意义的工作。因此，急需发展高速/重载/耐久电池电极材料应力/温升耦合导致应力迁移、微区应力电极及位错、空洞耦合机理的实验表征技术，揭示电池电极材料微结构运动与微尺度缺陷演化耦合作用的耦合机理，为电池技术发展提供科学依据和技术支撑。

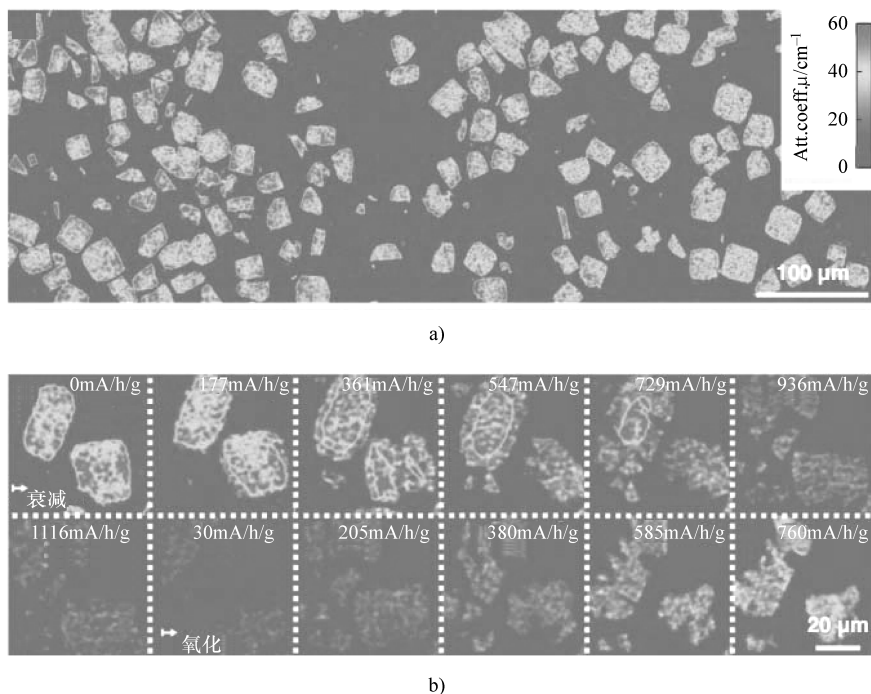


图 2-3 电极微结构能量传输微尺度表征示意图

a) 未经加工的横截面 X 照相术显示单个 SnO_2 颗粒在电极具有高分辨率和良好对比度，表征了衰减的电极微结构

b) 通过两个微结构的截面相，表征电极微结构体积膨胀、裂纹萌生和氧化能量传输进程

随着实验技术迅速发展，对位错/应变/空洞耦合行为定量表征和分析成为可能，Nam 等用暗场（darkfield DF）技术结合透射电镜（Transmission Electron Microscope, TEM）技术的暗场透镜（DFTEM）技术表征微尺度缺陷与位错，如图 2-4 所示。DFTEM 是近年出现的技术，是微尺度定量表征位错/应力电极是很有潜力的手段，它将莫尔技术与离轴全息结合，具有分辨率高、视场大、灵敏度高、结果直观等优点。但该领域实验较少，许多技术细节都很不完善，例如实时加载、样品制备、观测分析手段等都不完备，制约与掣肘了该技术的发展。目前需求迫切的新技术为：

① 应力/快速温升下电池电极材料位错/应力电极/空洞耦合能量传输建模方法。

② 非平衡状态下位错/应力迁移微尺度耦合能量传输的定量表征技术。

③ 位错/应变/空洞耦合能量传输失效表征与加载技术。

下面分析这三方面研究现状及动态进展。

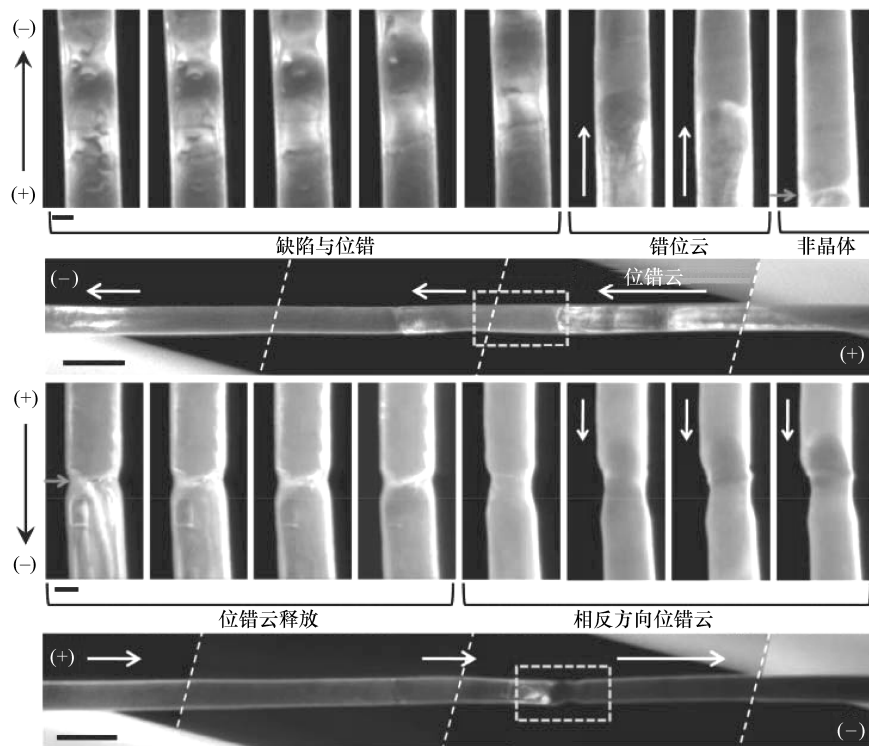


图 2-4 暗场透镜微尺度表征

2.2 应力/快速温升下电池电极位错/应力电极/空洞耦合能量传输技术

电池材料的本质是能量转换，Liu 等分析应力/温升与微结构有关，由于微尺度应力迁移，且应力分布不均匀，裂纹与应力电极、应力迁移有关，如图 2-5 所示。微裂纹在应力循环过程中随微区应力迁移和位错攀移运动而改变，其变化特点和尺度取决于微结构应力电极与应力迁移的耦合作用。在微尺度层面，微区温度电极和应力电极是耦合的，例如：温升引起电极材料微结构体积膨胀又产生应力电极，从而导致变形，并引起应力迁移与界面偏聚。无论是远距离续航所需的高能量，还是重载所需的高功率，均会导致非平衡状态瞬间大电流/快速温升，大电流/快速温升是电池性能监测时重点考虑的因素，快速温升产生微区温度电极与应力电极，大电流推动微尺度位错攀移运动，使得位错云体积增大，并与应力电极耦合诱发空洞成核。这些缺陷演化扩展后将加速电池性能能量传输，导致



电池材料失效耦合。电池电极材料问题的复杂性给建立微尺度实验模型带来新的挑战和发展机遇。

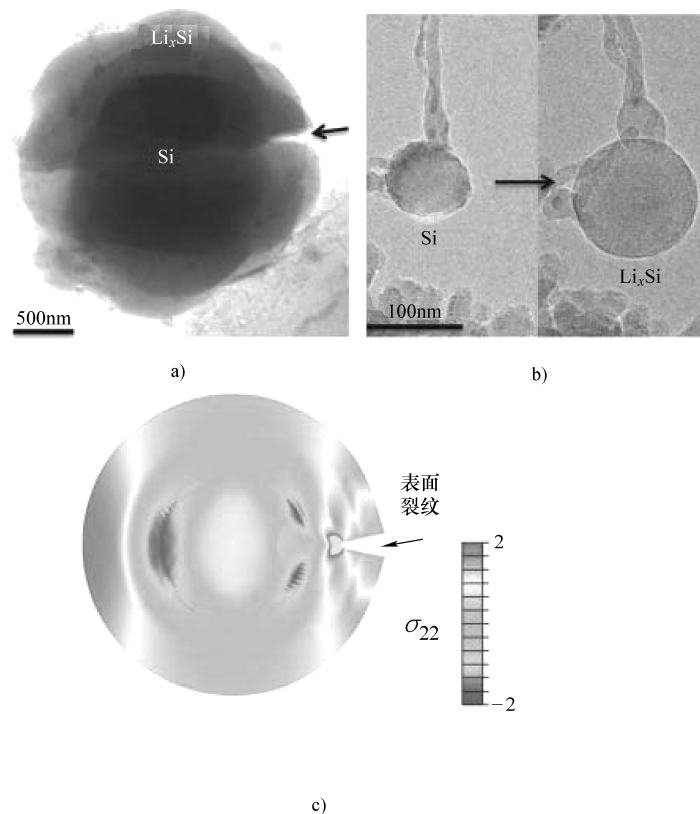


图 2-5 动力电池电极能量传输锂化进程中裂纹演化与断裂表征
a) TEM 表征的 Li_xSi 电极材料表层裂纹 b) Li_xSi 电极材料裂纹萌发表征
c) 电极材料表层裂纹发生是由于应力电极引起的锂化电极材料体积膨胀模拟

Li 等在电极材料模型中应用工程热力学第二定律，考虑了位错运动的影响，确定了温度电极，为分析平衡状态下微尺度耦合行为提供了帮助。该工作模拟了位错聚集形成空洞演化过程，伴随位错的滑移和攀移，空洞形状不断改变，如图 2-6 所示。动态空洞在材料薄弱点成核，空洞形成局部释放了材料内部弹性应变能，周围材料进行变形适应空洞不断长大，邻近纳米尺度空洞相互作用贯通形成更大尺度微米尺度空洞。微尺度空洞会导致应力电极、应力集中，伴随损伤局部化与簇集，然后微裂纹生长与扩展。当位错密度和尺度达到一定临界值时，材料内部形成断裂。

位错/应力/空洞耦合效应，导致应力面应力迁移、应力诱生空洞等复杂演

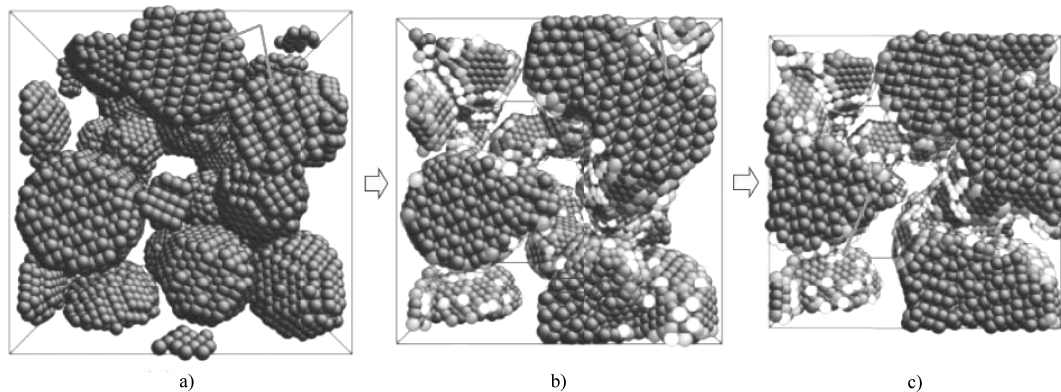


图 2-6 电池能量传输工程中位错聚集形成空洞演化过程

a) 双空洞通过发射位错长大 b) 空洞在位错交汇处成核 c) 空洞与邻近空洞贯通

化，包括位错攀移、应力界面位错结构及非平衡状态快速温升下微区应力集中等复杂过程。在建立位错/应力电极/应力迁移模型时，未考虑定量表征非平衡状态应力/快速温升对电极材料微结构及位错攀移运动的影响，降低了能量传输机制中微尺度表征的准确性与可靠性。我们建立了应力/快速温升条件下电池电极材料位错/应力/空洞耦合模型，并开发了位错/应力/空洞耦合行为的分析技术，用于指导电极材料微结构设计及制备，提高电动车辆复杂工况下的安全性与耐久性。

2.3 非平衡状态下位错/应力迁移/裂纹耦合能量传输定量微尺度表征

Huang 等采用了高分辨透射电镜（High - Resolution Transmission Electronmicroscope, HRTEM）及高角环形暗场显微术（High Angle Annular Dark Field Microscopy, HAADF）等，如图 2-7 所示，表征出不同工作状态状态下电极结构缺陷纳观尺度形貌，揭示了锂化过程中位错缺陷成核及位错云发展的演化过程，预测了电池电极材料的纳米尺度能量传输进程，验证了材料表面位错演化。Huang 等发现在应力循环下，应力电极和塑性应变产生的位错云会逐渐增大，直至位错云扩展膨胀至材料能量传输失效。Kushima 等观察到锂化过程中应力造成应力电极诱发裂纹在界面上扩展，提出了表征材料界面偏聚传播模型。该界面容易形成裂纹源，伴随不同类型裂纹的生长，受锂化过程中裂纹扩展运动的影响，裂纹滑移与攀移，裂纹体积逐渐增大并贯通，如图 2-8 所示。这两项工作很有意义，但类似的工作还很稀少，虽解释了部分演化过程，但还远不足以支撑对微尺度能量传输机理的揭示。以往多数学者研究了平衡状态下位错与微结构的耦合作



用能与位错力，为深入研究电极材料位错提供了有益的帮助。但模型多为平衡状态，没有涉及非平衡状态（如电池频繁快速充电工况导致的加速能量传输/快速温升状态），也未考虑瞬时工作状态循环（包括电压、电流、温度等）应力迁移产生的界面位错攀移与界面偏聚等，更加缺乏的是微尺度实验定量表征方法，因此，不能很好地表征微尺度电极微结构能量传输机理与耦合演化进程。

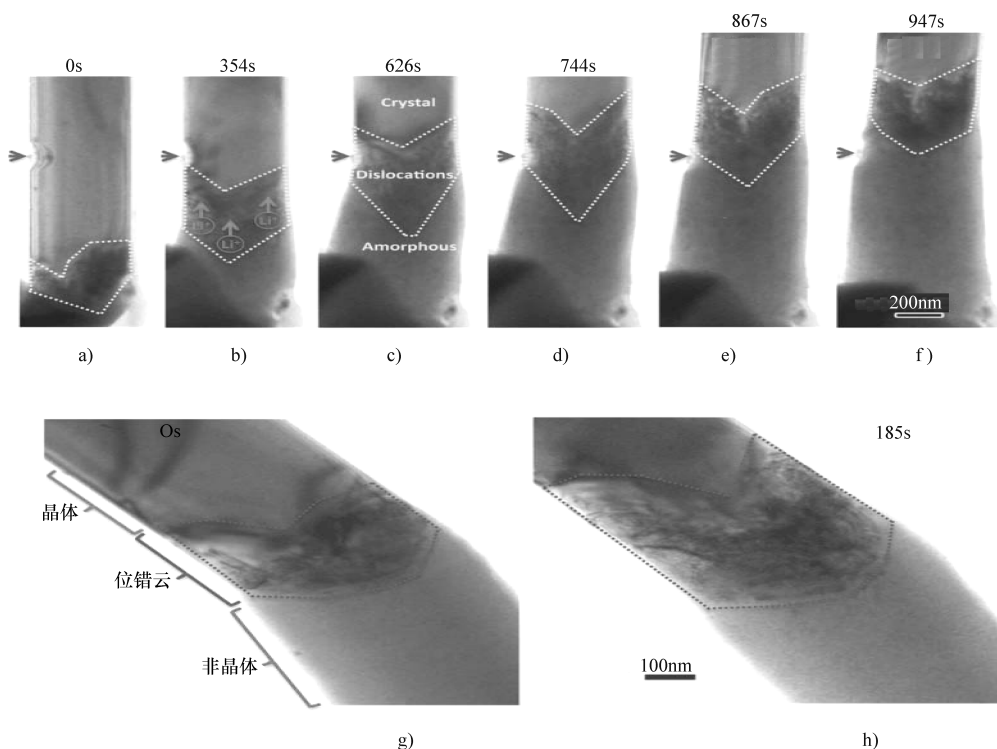


图 2-7 不同时间过程与工作状态的电池能量动态传输纳米尺度缺陷微尺度表征

a) ~f) 相同微区不同时间进程 HRTEM 平衡态纳米电极结构位错演化进程

g)、h) 相同微区不同时间进程高温平衡态纳米电极结构与位错云的 HRTEM 像、HADDFM 像

由于尺度效应，位错与微结构耦合机理已发生根本改变，材料本构理论没有表征纳米尺度空洞附近位错的应变电极效应。在应力界面方面，以往集中在电极材料静态界面研究，尚未引入表征动态应力界面效应的界面模型与位错特征。在环境状态方面，未考虑非平衡状态特别是快速温升下位错与空洞的耦合作用问题，未考虑材料动态应力中常处于非平衡状态，会产生推动位错攀移运动的化学力。在耦合方面，尚未涉及应力迁移、应力诱生空洞，更未涉及位错在应力界面处，非平衡温升及位错攀移引发的界面偏聚与微结构耦合演化的内在能量传输机制。

Wood 等用同步辐射 X 射线层析显微术（Synchrotron Radiation X-ray Tomo-

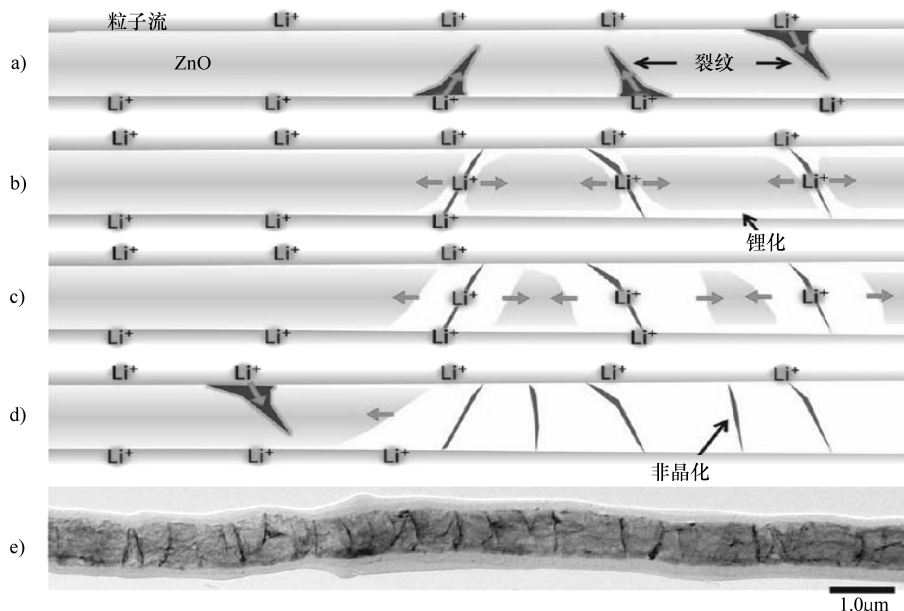


图 2-8 能量传输锂化过程电池电极材料裂纹演化扩展机理

a) ~ e) 所示为电池电极材料裂纹嵌锂演化过程解释，电池微结构体积膨胀，应力诱导裂纹从表面区向核心区发展；然后，锂离子迅速沿裂纹渗透至表面并扩散，垂直于裂纹表面的微区材料非晶化进程加速，在锂化过程中，其微区域两个非晶畴生长并形成非晶界面；最后，电极材料被分成多个纳米非晶化微区域。

graphic microscopy, SRXTM) 表征了电池材料电极变化层的化学性能能量传输。该技术分辨率高、光谱范围大、频移不受频率限制，取得了很好的表征效果，实验平台如图 2-9 所示。纳米微结构的应力电极用扫描/透射电子、原子力显微术等检测，但都存在制样分散的问题，样品分散的好坏与检测结果有密切的关系。而 SRXTM 技术测定平均晶粒尺寸与透射电子显微术 TEM 看到的粒子尺寸相仿，且不存在制样分散的问题。它与 CMOS Camera 结合，使 SRXTM 更稳定、分辨率更高。SRXTM 分析可得出材料中物相结构及应力/应变分布，电极材料快速温升发生微结构改变演化，SRXTM 技术通过温升解释并预测这些演化，SRXTM 分析特色是，同时可视化量化的表征，用层析照片模拟电池的三维结构能量传输特征，电池性能照相强度随该相含量的增加而增加（即物相的相对含量越高，则 X 照相的相对强度也越高）。由于物相对 X 射线吸收系数不同，照相强度不严格正比于其含量，需加以修正。SRXTM 分析灵敏度较高，对样品和表征技术修正与完善，可给出微晶清晰照相图以分辨晶体结构及缺陷，如图 2-10 所示。

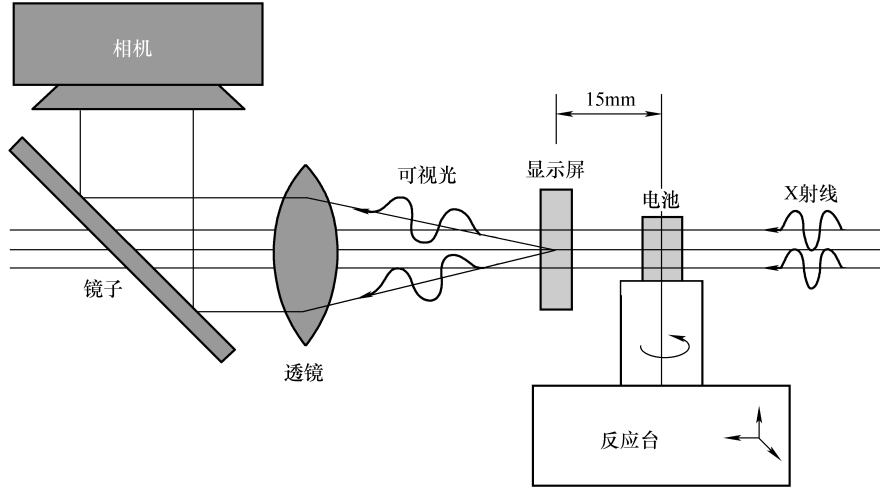


图 2-9 电池材料能量传输性能微尺度表征 SRXTM 实验平台

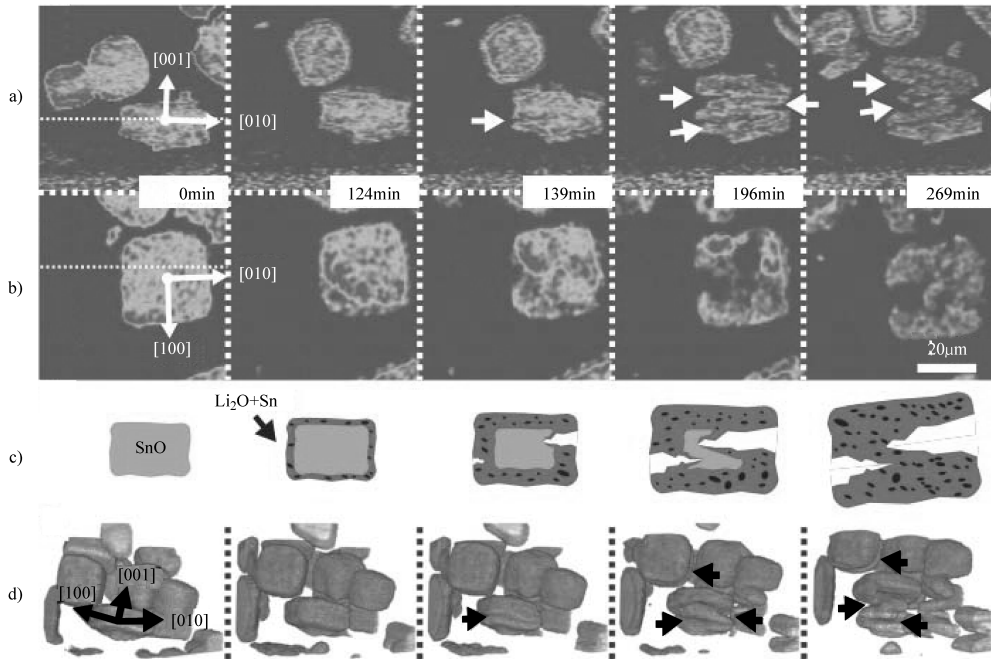


图 2-10 电池材料能量传输失效的微尺度裂纹萌生直至断裂的演化进程

a) 白色箭头表征裂纹萌生 b) 微结构化学能量传输

c) 颗粒相的演化和裂纹增长导致锯齿形态裂纹 d) 黑色箭头表征断裂发生



2.4 位错/应变/空洞耦合能量传输失效表征与加载技术

X 射线衍射技术 XRD 可获得高灵敏度的应变测量效果，却不能获得纳米尺度空间高分辨率的应变场，原子力电镜 AFM 与扫描隧道电镜 STM 显微术可获得纳米尺度高分辨率应变场，但视场限于纳米量级，无法观测更大视场微米尺度应变。通过调整衍射、干涉束，选择明、暗场模式等技术细节，可实现不同微尺度成像模式下的透射电镜成像。但目前的微尺度表征技术，在高应变灵敏度、高分辨率及大视场技术方面需要突破。基于几何位相分析方法，Hytch 等提出了中心暗场透射电镜技术（Central Dark Field Transmission Electron Microscope, CDFTEM）新技术，如图 2-11 所示，在中心暗场条件下，采用无应变完整晶体区的衍射束参考束，与应变区的衍射束干涉，获得被莫尔条纹调制的暗场全息图，再利用几何位相分析法计算出应变区的应变场，得到尺度为 200nm 的区域大视场应变分布，并具有令人满意的高空间分辨率和应变灵敏度。利用 CDFTEM 技术观察位错/空洞具有独特优点，反映位错起源、孔洞扩展及相互作用，直接观察位错、空洞贯通与晶格条纹，收集分析从样品局部微区发射的各种信息，如透射束与参考束干涉的全息条纹，不仅可获位错运动、空洞排列信息，还可通过衍射环直径和晶格条纹间距等来获得位错结构与空洞、微晶形状，因而，该技术在位错/应变/空洞微尺度耦合表征中前景广阔。

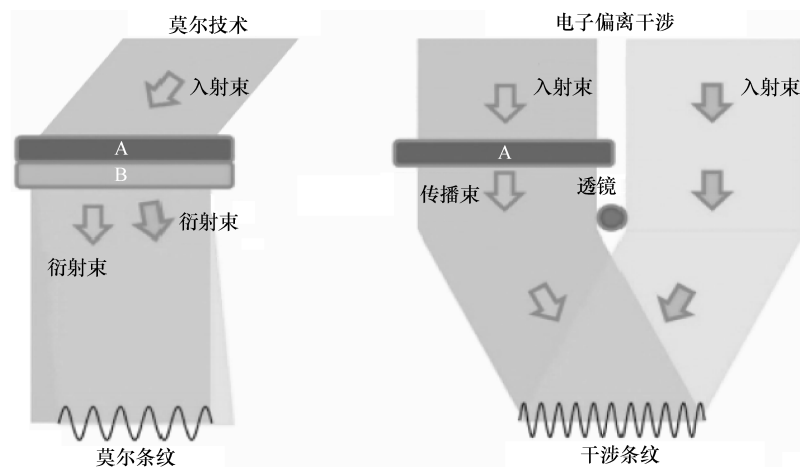


图 2-11 CDFTEM 原理示意图

我们对电池电极材料微结构进行了系统有序的实验研究，发现 CDFTEM 技



术并不完善，尚有诸多缺陷，仍待发展、修正与完善，才能成为微尺度表征的有力手段。例如，用 CDFTEM 获得应变场在暗场模式下拍摄的应变区的中心暗场像强度不够，如何在双束条件下保证拍摄时应变区的中心暗场像强度是需要解决的问题。样品厚度会带来重叠效应，干扰界面附近的应变测量效果，样品晶格或格栅栅距与参考栅无变形晶格的有对应关系，界面附近应变区将很难解释。CDFTEM 记录时间很长，虽然图像信噪比好，但样品漂移和倾动影响图像质量。CDFTEM 受加载空间所限，对样品加载就会对参考栅加载，因而 CDFTEM 很难用于实时加载测量中（实时加载是保证实验质量和可靠性的重要条件），实时加载变形测量如何解决？技术困难很大。晶面的衍射方向差别很大，要将不同的某一个晶面衍射改变方向很难实施，微区应变场单向测量的强度和可靠性不稳定。这些问题都急待解决，我们建立了发展、修正与完善 CDFTEM 微尺度表征技术的加载实验平台，如图 2-12 所示，该平台为 CDFTEM 新技术能定量表征微尺度位错/应变/空洞能量传输演化过程，提供了实时加载的技术支撑。

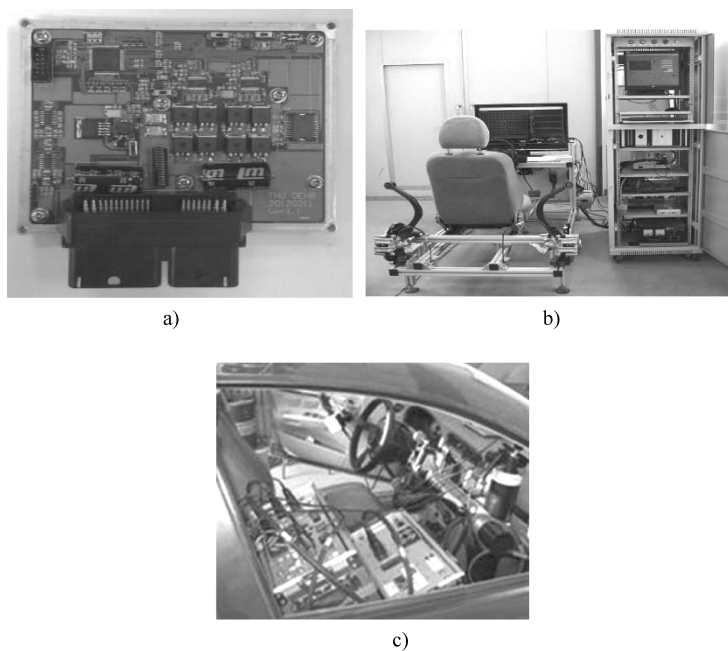


图 2-12 实时加载的电池能量传输加载实验平台

a) 电池能量传输数据采集系统 b) 电池台架加载仿真平台 c) 非平衡状态温升加载系统



2.5 前景与展望

发展电动车辆是实现汽车工业弯道超车的重要手段,如果电动车辆发展顺利,将成为支撑经济平稳发展的新增长点,同时将带动相关产业的发展及技术进步。但是,就目前电动车辆发展水平看,作为电动车辆心脏的电池存在严重安全隐患。电池电极材料表征具有诱人前景,该领域源于对化学问题和热问题的研究,至今许多想法(如位错动力学等)和实验手段(如 TEM 等)仍在研究中发挥重要作用。但大电流/快速温升非平衡状态与微尺度耦合能量传输等,无论在实验理论、模型,还是在表征手段上至今都存在许多尚未解决并急需探索的问题。对非平衡状态微结构能量传输损伤的微尺度定量表征实验稀少,远未解决问题,这是电池实验表征的新挑战,同时也是电动车辆技术新的发展机遇。我们发展了 CDFTEM 技术表征非平衡状态下微尺度性能,提出实时加载、样品制备与分析的具体手段,部分解释了位错/应变/空洞的演化破化机制。我们将以电池电极材料为研究对象,采用实验理论与表征结合,研究非平衡状态下位错/应力电极/空洞等与应力/快速温升等耦合条件的内在关联,探索位错在应力界面的稳定性与位错攀移导致界面偏聚问题,获得合理位错/应力电极/应力迁移微尺度定量表征方法。综合考察目前本领域的研究工作,急需开展电池电极材料实验研究,提供既定量表征电池能量传输规律,又令人信服的科学依据,这符合电池实验表征的发展和电动车辆实际需求的牵引。及早开展研究对表征电池性能能量传输、揭示电池微结构缺陷和推动电动车辆发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Bruce P G, Freunberger S A, Hardwick L J, et al. LiO_2 and LiS batteries with high energy storage [J]. *Nature Mater*, 2012 (11): 19–29.
- [2] Qin Y P, Zhuang Q C, Shi Y L, et al. Methods on investigating properties of electrode/electrolyte interfaces in lithium-ion batteries [J]. *Prog Chem*, 2011 (23): 390–400.
- [3] Wu X L, Liu Q, Guo Y G, et al. Superior storage performance of carbon nanosprings as anode materials for lithium-ion batteries [J]. *Electrochem commun*, 2009 (11): 1468–1471.
- [4] Bruce P G, Scrosati B, Tarascon J M. Nanomaterials for rechargeable lithium batteries [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2008 (47): 2930–2946.
- [5] Armand M, Tarascon J M. Building better batteries [J]. *Nature*, 2008 (451): 652–657.
- [6] Nam S, Chung H, Lo Y. Electrical wind force-driven and dislocation-templated amorphization in phase-change nano wires [J]. *Science*, 2012 (336): 1561–1566.
- [7] Li H, Shi L, Wang Q, et al. Nano-alloy anode for lithium ion batteries [J]. *Solid State Ionics*, 2002 (148): 247–258.



- [8] Valentine S V. Emerging symbiosis: renewable energy and energy security [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2011 – 15 – 4572 – 8.
- [9] Johansson B. A broadened typology on energy and security [J]. *Energy*, 2013 (53): 199 – 205.
- [10] Sun Y, Chen Z, Noh H, et al. Nanostructured high – energy cathode materials for advanced lithium batteries [J]. *Nature Mater*, 2012 (11): 942 – 947.
- [11] Zhu H, Qin X, Sun X, et al. Rocking – chair configuration in ultrathin lithium vanadate – graphene hybrid nanosheets for electrical modulation [J]. *Sci. Rep*, 2013 (3): 1246 – 1253.
- [12] Cao F, Guo Y, Wan L. Better lithium – ion batteries with nanocable – like electrode materials [J]. *Energy Environ Sci*, 2011 (4): 1634 – 1642.
- [13] Park O, Cho Y, Lee S, et al. Who will drive electric vehicles, olivine or spinel [J]. *Energy Environ Sci*, 2011 (4): 1621 – 1633.
- [14] Chung S, Choi S, Lee S, et al. Distinct configurations of antisite defects in ordered metal phosphates: comparison between LiMnPO_4 and LiFePO_4 [J]. *Phys Rev Lett*, 2012 (108): 195501 – 195506.
- [15] Huang Y, Zhong L, Wang C, et al. In situ observation of the electrochemical lithiation of a single SnO_2 nanowire electrode [J]. *Science*, 2012 (330): 1515 – 1520.
- [16] Ebner M, Marone F, Stampanoni M, Wood V. Visualization and quantification of electrochemical and mechanical degradation in Li ion batteries [J]. *Science*, 2013 (342): 716 – 719.
- [17] Ge M, Rong J, Fang X, et al. Porous doped silicon nanowires for lithium ion battery anode with long cycle life [J]. *Nano Lett*, 2012 (12): 2318 – 2323.
- [18] Väyrynen A, Salminen J. Lithium ion battery production [J]. *Thermodynamics*, 2012 (46): 80 – 85.
- [19] Krivanek O L, Chisholm M F, Nicolosi V, et al. Atom – by – atom structural and chemical analysis by annular dark – field electron microscopy [J]. *Nature*, 2010 – 464 – 571 – 4.
- [20] Aert S V, K Batenburg J, Rossell M D, et al. Three – dimensional atomic imaging of crystalline nanoparticles [J]. *Nature*, 2011 – 470 – 374 – 7.
- [21] Ibrahim H, Ilinca A, Perron J. Energy storage systems—characteristics and comparisons [J]. *Renew and Sustain Energy Rev*, 2007 – 12 – 1221 – 50.
- [22] Li H, Wang Z X, Chen L Q, et al. Research on advanced materials for Li – ion batteries [J]. *Adv Mater*, 2009 (21): 4593 – 4607.
- [23] Jung H G, Hassoun J, Park J B, et al. An improved high – performance lithium—Air battery [J]. *Nat Chem*, 2012 (4): 579 – 585.
- [24] Akiyama Y, Sodaye H, Shibahara Y J, et al. Study on degradation process of polymer electrolyte by solution analysis [J]. *J Power Sources*, 2010 (195): 5915 – 5921.
- [25] Suenaga K, Koshino M. Atom – by – atom spectroscopy at graphene edge [J]. *Nature*, 2010 (468): 1088 – 1090.
- [26] Ji X, Lee K, Nazar L. A highly ordered nanostructured carbon – sulphur cathode for lithium – sulphur batteries [J]. *Nat Mater*, 2009 (8): 500 – 506.



- [27] Wu G, More K, Johnston C, et al. High performance electrocatalysts for oxygen reduction derived from polyaniline, iron, and cobalt [J]. Science, 2011 (332): 443 – 447.
- [28] Sasaki T, Ukyo Y, Novák P. Memory effect in a lithium – ion battery [J]. Nat Mater, 2013 (16): 3623 – 3630.
- [29] Zhang H, Yu X, Braun P. Three – dimensional bicontinuous ultrafast – charge and – discharge bulk battery electrodes [J]. Nat Nanotechnol, 2011 (6): 1 – 5.
- [30] Yang R S, Qin Y, Dai L M, et al. Flexible charge – pump for power generation using laterally packaged piezoelectric – wires [J]. Nat Nanotechnol, 2009 (4): 34 – 39.
- [31] Park M H, Kim M G, Kim K J, et al. Silicon nanotube battery anodes [J]. Nano Lett, 2009 (9): 3844 – 3847.
- [32] Taberna L, Mitra S, Poizot P, et al. High rate capabilities Fe_3O_4 – based Cu nano – architecture – electrodes for lithium – ion battery applications [J]. Nature Mater. 2006 (5): 567 – 573.
- [33] Kang B, Ceder G. Battery materials for ultrafast charging and discharging [J]. Nature, 2009 (458): 190 – 193.
- [34] Chung S, Bloking J, Chiang Y. Electronically conductive phospho – olivines as lithium storage electrodes [J]. Nature Mater, 2002 (1): 123 – 128.
- [35] Kushima A, Liu X, Zhu G, et al. Leapfrog cracking and nanoamorphization of ZnO nanowires during in Situ electrochemical lithiation [J]. Nano Lett, 2011 (11): 4535 – 4541.
- [36] Kang K, Meng Y, Breger J, et al. Electrodes with high power and high capacity for rechargeable lithium batteries [J]. Science, 2006 (311): 977 – 980.
- [37] Arico A, Bruce P, Scrosati B, et al. Nanostructured materials for advanced energy conversion and storage devices [J]. Nature Mater, 2005 (4): 366 – 377.
- [38] Cui L, Yang Y, Hsu C, et al. Carbon – silicon core – shell nanowires as high capacity electrode for lithium ion batteries [J]. Nano Lett, 2009 (9): 3370 – 3374.
- [39] Kim J, Myung S, Sun Y. Molten salt synthesis of $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ spinel for 5V class cathode material of Li – ion secondary battery [J]. Electrochim Acta, 2004 (49): 219 – 227.
- [40] Guo J, Wang C. A polymer scaffold binder structure for high capacity silicon anode of lithium – ion battery [J]. Chem Commun, 2010 (46): 1428 – 1430.
- [41] Reddy A, Shaijumon M, Gowda S, et al. Coaxial MnO_2 /carbon nanotube array electrodes for high – performance lithium batteries [J]. Nano Lett, 2009 (9): 1002 – 1006.
- [42] Fischer A, Pettigrew K, Rolison D, et al. Incorporation of homogeneous, nanoscale MnO_2 within ultraporous carbon structures via self – limiting electroless deposition; implications for electrochemical capacitors [J]. Nano Lett, 2007 (7): 281 – 286.
- [43] Wang Z, Fierke M, Stein A. Porous carbon/tin (IV) oxide monoliths as anodes for lithium – ion batteries [J]. J Electrochem Soc, 2008 (155): A658 – A663.
- [44] Ergang N, Lytle J, Yan H, et al. Effect of a macropore structure on cycling rates of LiCoO_2 [J]. Electrochem Soc, 2005 (152): A1989 – A1995.
- [45] Sakamoto J, Dunn B. Hierarchical battery electrodes based on inverted opal structures [J]. J



Mater. Chem, 2002 (12): 2859 – 2861.

- [46] Stephenson D, Hartman E, HarbJ, et al. R Modeling of particle – particle interactions in porous cathodes for lithium – ion batteries [J] . J Electrochem Soc. 2007 (154): A1146 – A1155.
- [47] M J Hytch, F Houdellier, F Htue, et al. Nanoscale holographic interferometry for strain measurements in electronic devices [J] . Nature, 2008 (453): 1086 – 1089.
- [48] M J Hytch F Houdellier, F Hue, et al, Dark – field electron holography for the measurement of geometric phase [J] . Ultramicroscopy , 2011 (111): 1328 – 1337.

第3章 电动车辆磁电效应 能量传输模型与能量系统设计

利用电动车辆磁电能量传输结构锂电池储能产生特殊宏观等效性能，本章在能源电池理论和实验领域上给出了表征其宏观等效性质的方法，解决了能源系统的非均质性和电池微结构储能引起的磁电效应，系统分析了电池磁电效应模型与能源系统设计理论，介绍了电动能源车辆锂电池系统-结构-材料电池能量系统耦合设计，为优化设计电动车辆能源系统提供了实验基础，揭示了电动车辆锂电池磁电效应的机理。同时，在磁电效应模型与能源系统微结构设计方面，重点介绍了磁电能量传输系统锂电池在磁电耦合场下的非均质效应及磁电耦合机理，评述了在磁电与温度多场耦合下的能源系统设计方法和实验表征技术。在多场耦合加载实验技术与测试表征方面，考虑了磁电耦合场加载与测量技术，着重评价了电动能源车辆锂电池结构在磁电耦合场作用下的实验模型，提升与优化了电动能源车辆锂电池系统的规范表征方法、测试和评价技术。通过综合评价电动能源车辆系统结构与电池器件设计理论，提高了磁电锂电池能源系统的设计水平，为电动能源车辆磁电锂电池的实际工程应用提供了理论和实验支撑。

3.1 磁电能量传输模型

磁电能量传输系统锂电池（压电/压磁结构、电致伸缩结构、磁致伸缩结构以及铁电/铁磁复合结构等）同时具有智能充电和电能优化传输等优越性能，在车辆、宇航及能量传输等领域中都起到了重要作用。例如，在电动可持续能量车辆领域，已出现整体锂电池结构车辆。锂电池技术发展迅猛，得到了全世界的广泛关注，各种锂电池研究现状与发展动态如图3-1所示。最初由于结构能降低能源系统内部应力集中并提高电池材料热稳定性等特点，将结构设计思想引入到电动能源车辆锂电池系统中，后续研究逐步发现其具有磁、电、温度等多场耦合特性和可设计的磁电性质，形成了高能量传输磁电效应结构锂电池，并因其具有磁电与温度耦合效应，能延长电池使用寿命、稳定充放电等优点，成为非常诱人的研究热点之一。磁电能量传输系统锂电池，在高密度能量传输电池、超级电容器、均衡电池组及无线能量传输等领域具有广泛的应用前景和重要价值，引起了人们强烈的研究兴趣。

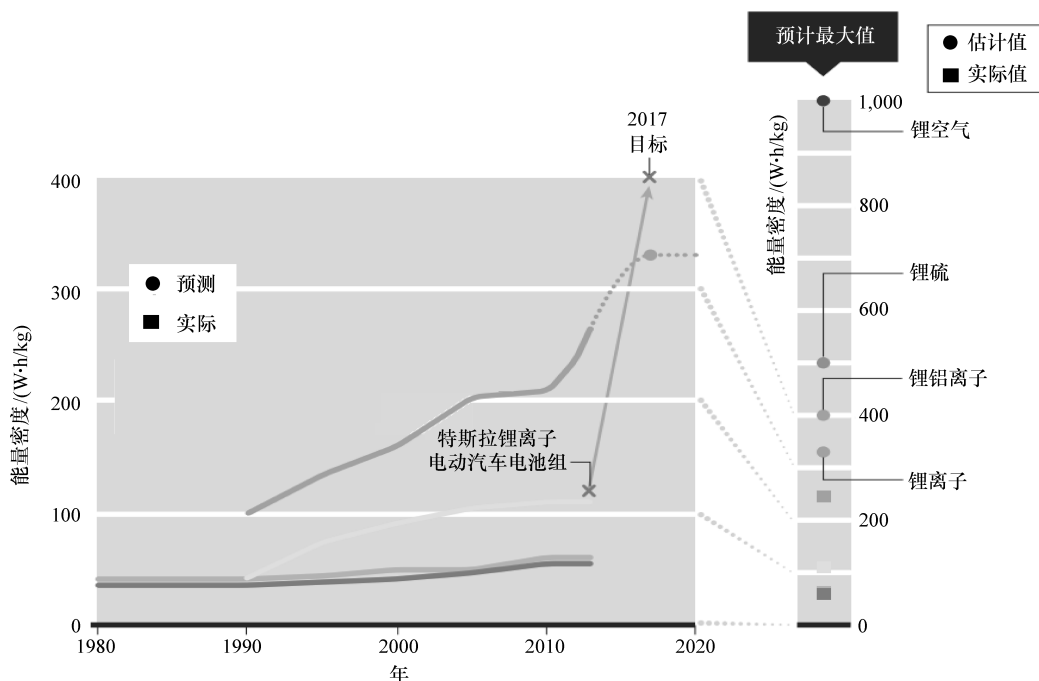


图 3-1 各种锂电池研究现状与发展动态

磁电效应是指锂电池结构在外加磁场中发生电极化响应的现象,或电池在外加电场中发生磁化改变的现象。例如,磁电电池能够储能到的最小极限磁场是 10^{-12} T,可与造价昂贵的超导量子储能电池性能相媲美,相对于霍尔磁场储能电池而言,成本更低,寿命更长,可实现的最低磁场频率为 10^{-2} Hz,可应对磁场的异常变化。磁电能量传输系统电池作为电动能量车辆电池,在低频下可以保持稳定的输出能量,是一般电池所不能达到的,其基本器件模型如图 3-2 所示。利用该磁电复合电池可设计出快速电极化诱导、快速磁畴翻转的磁电锂电池代替现有的慢速充电锂电池,提升锂电池的充电效率与使用寿命;同时,还可利用其高介电常数和磁导率制成锂电池均衡电池组,解决电感和电容器件相互干扰问题,并减少高能量密度储能装置上的器件数量。

随着实验技术的发展,电动能量车辆锂电池磁电能量传输系统的研究也在不断发展。例如,在研究中增加偏置磁、电和温度场三个自由度,存在偏置磁场会影响非线性磁致伸缩效应,因此可以测量得到磁电电压系数随着偏置磁场的增加而出现的非线性甚至滞后的变化规律。当存在偏置电场时,将会引起锂电池结构的非线性电致伸缩,因此其压电系数已经不能够表征其变形与电位移之间的关系。当外加电场增加到矫顽场附近时,有可能很大程度上改善锂电池结构的磁电

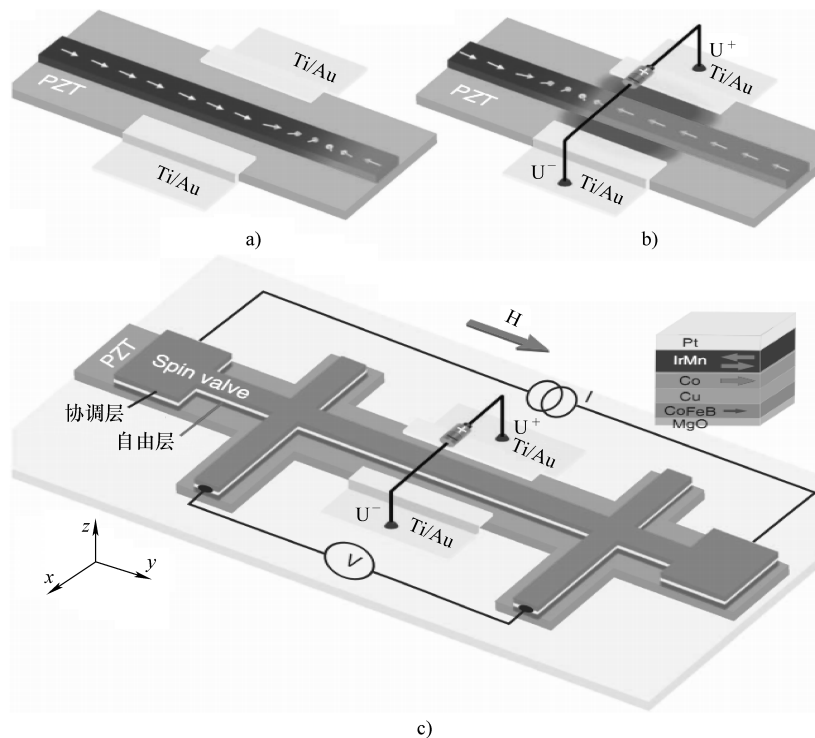


图 3-2 磁电能量传输系统基本器件磁电耦合模型

a) 压电层的磁畴传播 b) 施加局部应力控制磁畴传播 c) 磁电磁畴与电极结构

性质。当存在偏置磁电场时，可导致铁弹性行为，温度场将诱发材料的“跳变”，从而提高锂电池结构的磁电性质。这些现象均是由于相似的物理机制引起的，即外场引起了畴变发生。同时，如果锂电池结构的热稳定性较差，则会导致磁电性质的变弱甚至消失，限制结构的磁电应用。因此，这方面的研究对于形成磁电介质的完整本构理论体系、设计与优化磁电能量传输系统锂电池的综合性能具有重要的意义。

当温度场稳定时，即使锂电池结构拥有较高的磁电电压系数，也可以诱发较高的电极化强度，有利于实际工程应用；另一方面，若检测磁电电压系数与电流幅值之间存在一定的关系，则可探索新型磁电储能电池以平衡电流磁场的温度强度。人们研究了各种因素对材料性能的影响，包括界面化学行为、非线性效应、压电压磁结构匹配组合、极化方向等因素。在实验基础上设计与表征磁电能量传输系统锂电池，非线性磁电和温度耦合效应是难点之一，也是研究发展方向之一。综上所述，我们采用理论、数值和实验相结合的方法，重点介绍磁电能量传



输系统锂电池的磁电效应模型、磁电能量传输系统电池能量系统耦合设计与磁电能量传输系统锂电池实验表征。

3.2 磁电能量传输系统锂电池传输能量系统磁电效应模型

随着异向介质、复相陶瓷及单相固熔体等材料的研究取得重大突破,磁电能量传输系统锂电池的应用前景已十分明朗,也吸引了众多学者的研究兴趣。铁电—铁磁结构的磁电性质是通过铁电相/铁磁相的乘积效应实现的,即:磁电 = 磁/力 $\times$ 力/电,可以产生远高于单相材料的磁电性质,且复合的方法可实现材料组分及复合结构的设计,以满足工程应用的要求。从乘积效应的机理可以看出,其中的机械变形机制起到了关键作用。目前,采用超磁致伸缩结构体系的磁电性能最高,磁电电压系数达到了 $6.3\text{V}/\text{cmOe}$,当采用具有很高压电系数的 $[001]$ 取向的结构层时,磁电电压系数达到了 $12.1\text{V}/\text{cmOe}$ 。各组元材料性能参数、温度特性、颗粒形状、取向、界面化学行为、偏置磁场幅值、施加方向及电流磁场频率等对于磁电性质均有影响。

目前的理论方法大致包括:等效电路方法、磁电物理方法及有效介质理论等,能够预测颗粒形状、取向、材料组分及温度等参数对磁电性质的影响及储能效应。例如,利用等效电路方法分析了锂电池结构的储能行为,通过界面耦合系数,利用等效电路方法计算得到磁电性质和储能特性。Sun 等从纳米尺度效应出发,计算了磁电性质与磁场频率的关系。利用磁电物理方法,考虑了微结构取向、分布和形状,计算了锂电池结构在线性压电、压磁、弹性变形及温度场下的磁电性质,并基于非均质结构理论提出了有效介质理论,在充放电过程中引入了非线性物理本构关系与磁致伸缩应变,在磁电性能方面做出预测设计模型并优化,如图 3-3 所示。该模型考虑了充放电过程、锂化进程与钠化进程等诸多因素,完善了锂电池物理模型及有效数值计算策略,描述磁电性质的变化规律,并对磁电锂电池结构进行材料组分和复合结构的优化设计,从而得到了优异的磁电性质。

目前为止,对磁电能量传输系统锂电池尚未形成完备的多场耦合磁电效应模型,在本构理论中虽引入了非线性磁致伸缩的影响,但仍忽略了材料组元的铁弹性,所采用的本构方程不能描述电池温度场对磁畴及电畴分布的影响、磁致伸缩的“跳变”效应、温度场对磁电性质的影响、电致伸缩效应等。并且,介电常数、磁导率、磁致伸缩、电致伸缩、温度参数均为外偏置耦合场的函数,在预测多场耦合下的温度效应、磁电性质和储能上存在较大偏差。另外,仅考虑线性压电压磁效应,也很难预测滞后效应。磁电耦合复杂性、畴变机制、衰退过程和非线性效应成为物理本构理论难点,也是非线性问题表征的发展方向。Sung 等建立

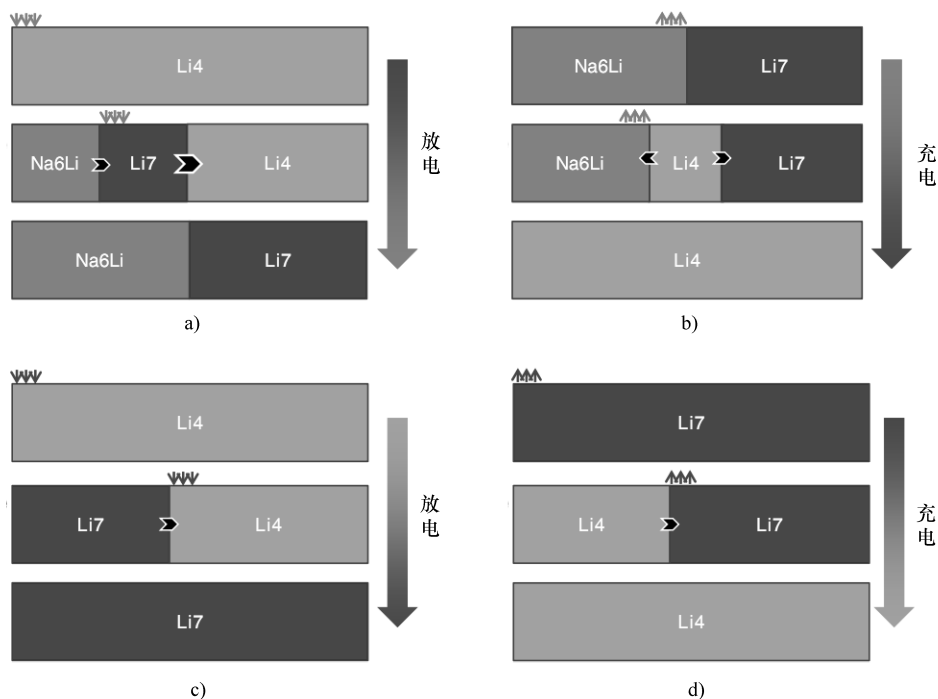


图 3-3 充放电过程微结构变化过程预测模型

a) 钠化放电进程 b) 钠化充电进程 c) 锂化放电进程 d) 锂化充电进程

了结构锂电池传输能量系统衰退规程的非线性磁电场与温度场耦合的磁电效应模型，如图 3-4 所示，发展一套完备的多场耦合本构关系，对结构多场磁电能量耦合行为进行描述和预测。

Liu 等预测外加耦合场、界面化学行为等对磁电性质、温度储能频率及频宽的影响；开发了结构优化设计程序，优化设计材料组分及结构参数等，优化后的结构锂电池传输能量系统磁电效应模型如图 3-5 所示，该石榴模型可使结构的磁电效应机制，在电动能源车辆锂电池上得到充分发挥，该模型基于畴变的非线性本构关系的物理机制来研究结构的磁电变形机制，定量描述了电池结构的磁电性质和温度效应。在压电方程、压磁方程中引入磁致伸缩/电致伸缩效应，描述介电常数、磁导率、压电系数、压磁系数及弹性系数随着磁电-温度耦合耦合场的变化规律，该模型在非线性结构本构理论基础上，结合非均质理论，得到了微结构在磁电能量传输系统锂电池储能中的影响规律，发展与优化了非线性磁电性质及温度效应的模型与设计方法，很好解释了温度与磁电锂电池的储能耦合性质。

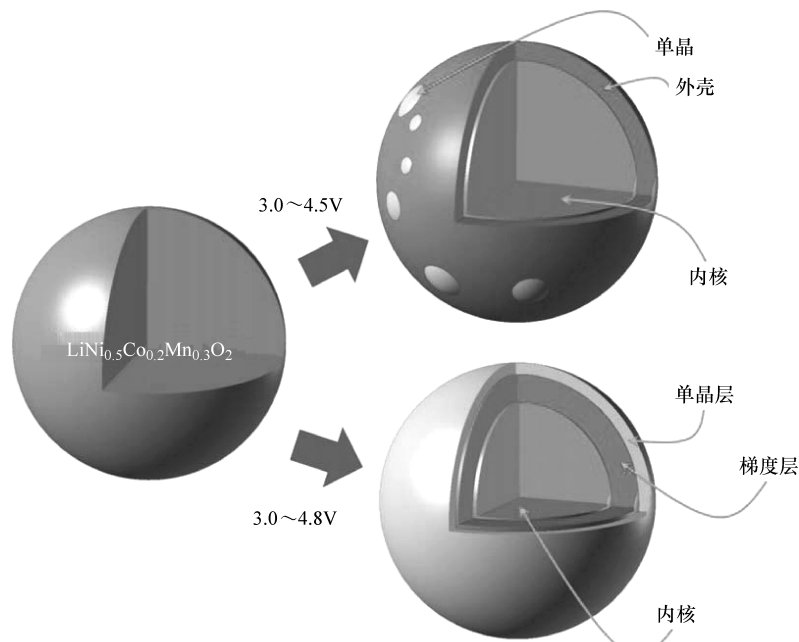


图 3-4 衰退过程的锂电池传输能量系统磁电效应模型

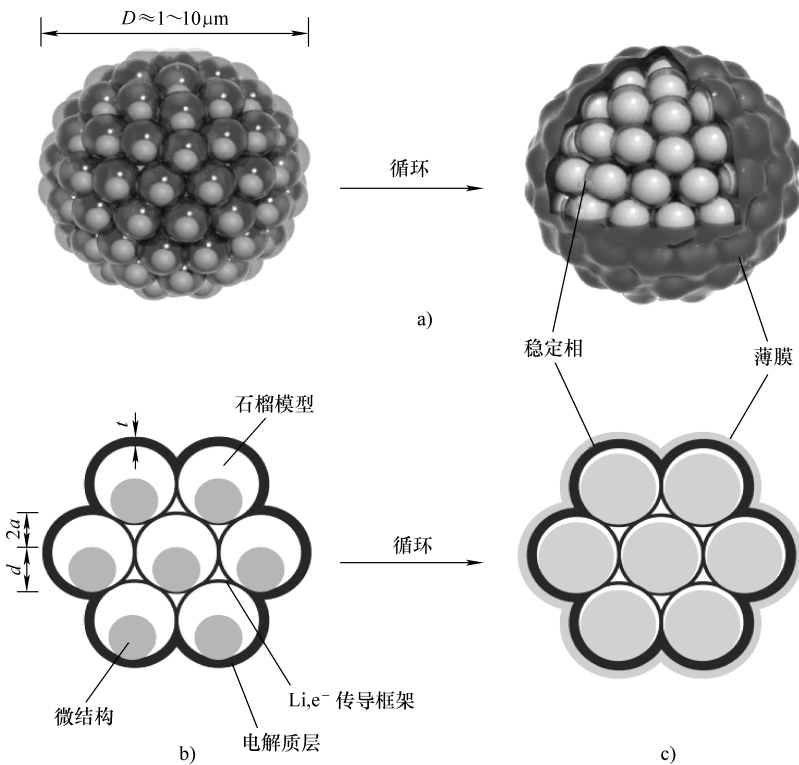


图 3-5 结构锂电池传输能量系统磁电效应优化石榴模型

a) 三维微结构石榴模型 b)、c) 二维微结构石榴模型



3.3 磁电能量传输系统耦合设计

为了满足实际电动能源车辆应用，须提出锂电池结构能量系统磁电性质的耦合设计方案。如果铁磁相材料采用具有更高磁致应变的材料，将会极大地提高磁电电压系数，但目前这方面研究内容鲜有报道。预制失配应变在磁电能量传输系统锂电池中，界面之间会存在各种缺陷，例如，失配应变影响磁电性质和温度效应。虽然人们通过工艺来改善界面耦合效果，但失配应变对于结构性能的影响，仍然缺乏系统的实验和理论工作。由于磁电能量传输系统锂电池的磁电性质是通过机械、物理与化学变形来传递和转换能量信号，界面间的失配应变将会很大程度上决定锂电池结构的磁电性质，对磁电电池性能的提高有重要意义。如何预制失配应变及其对磁电性质的影响，是一个难点，也是一个创新点。Xue 等设计了一种内外镶嵌结构，通过界面之间径向变形匹配来实现磁电性质，使磁电介质的径向收缩及纵向伸长均与压电结构产生耦合作用，从而提高磁电能量传输系统锂电池磁电转换效率，如图 3-6 所示。该能量系统以新型磁电储能器件为设计对象，提升了磁场/电场调控的能量系统耦合磁电强度，由于不同偏置磁场/电场将改变材料的介电常数、弹性系数、磁导率等材料参数，从而可以调控储能机械与

42

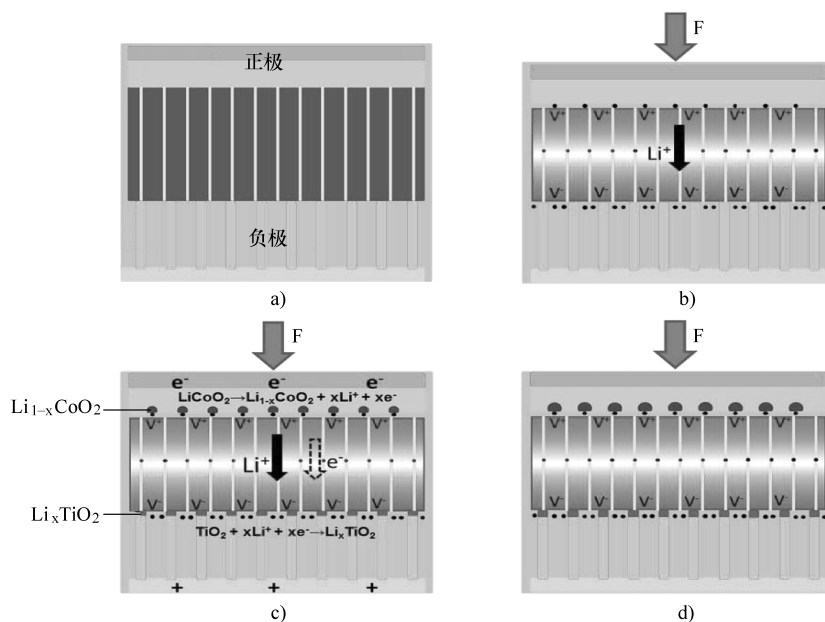


图 3-6 内外镶嵌结构设计磁电锂电池

a) 电极压电微系统设计 b) 耦合能量系统 c) 能量系统优化 d) 能量系统磁电多场耦合



热稳定性，并通过设计结构的微结构方式及界面耦合等来提升储能效率，从而满足实际应用的需求。

由于压电/压磁结构的电致伸缩、磁致伸缩均是基于畴变的物理机制，因此这两种锂电池结构的非线性滞后效应具有相似的物理机理。Pikul 等考虑了畴壁移动和畴变过程，从而形成完整的基于畴变的非线性本构关系，描述与预测了压磁及压电性等非线性效应对磁电性质的影响，表征锂电池结构的非线性磁电性质。针对压磁相材料将考虑磁畴的弹性能、应力能、各向异性能、静磁能及力磁耦合能等，压电锂电池结构还须考虑静电能、力电耦合能等；磁畴/电畴将按照能量与结构匹配的模式分布，如图 3-7 所示。该系统考虑失配应变的内外镶嵌结构设计，由于磁电能量传输系统锂电池的磁电性质是通过机械变形来传递和转换信号的，界面间的失配应变，相当于在某一方向上存在偏置的应力，将会很大程度上影响锂电池结构的磁电性质。磁电能量传输系统锂电池结构，是通过界面之间径向的变形匹配来实现磁电性质的。然而，超磁致伸缩锂电池结构在纵向的伸长效应并没有传递给压电材料，降低了磁电转换的效率。因此，该能源系统适合内外镶嵌结构，使结构的径向收缩以及纵向的伸长均与压电结构产生耦合作用。

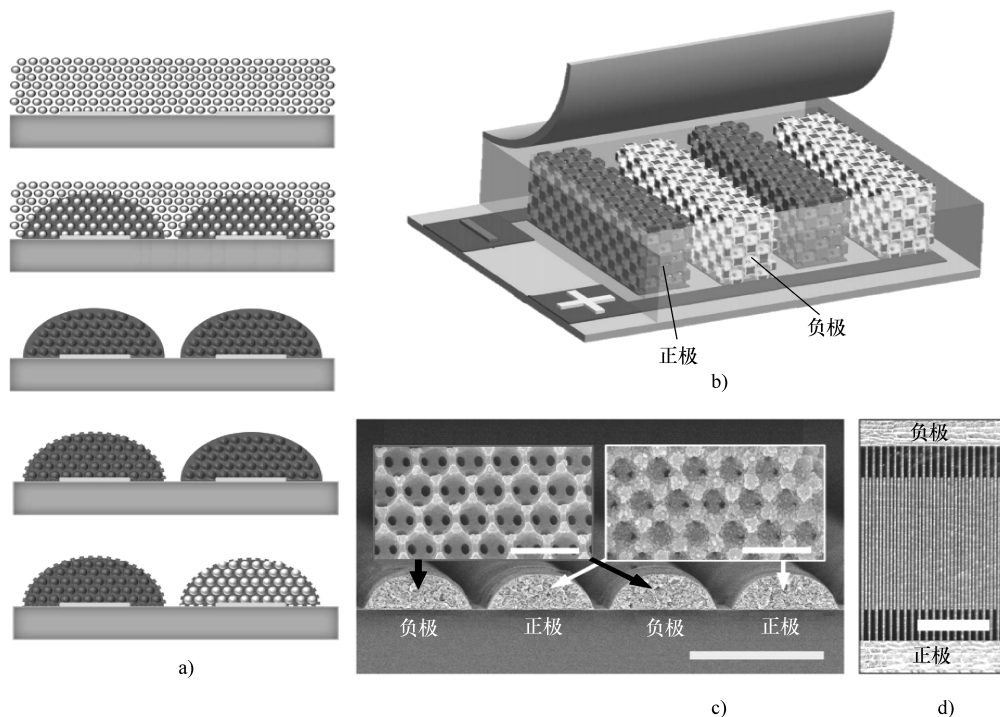


图 3-7 磁畴/电畴能量系统总体设计

a) 电极系统设计 b) 电池能量系统总体设计 c) 扫描电镜电极形貌表征 d) 正负极磁畴扫描电镜形貌表征



用,从而提高了磁电能量传输系统锂电池的磁电储能转换效率。

以压磁相结构为例,各向异性能为:

$$E_k = K_1 (\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2) + K_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 \quad (3-1)$$

式中, K_1 、 K_2 代表磁晶各向异性常数; α_i ($i = 1, 2, 3$) 表示磁化强度矢量与晶轴 $[100]$, $[010]$, $[001]$ 的方向余弦。

$$\text{静磁能为: } E_H = -\mu_0 H M_s (\alpha_1 \beta_1 + \alpha_2 \beta_2 + \alpha_3 \beta_3) \quad (3-2)$$

$$\begin{aligned} \text{应力能为: } E_\sigma = & -\frac{3}{2} \lambda_{100} (\alpha_1^2 \sigma_{11} + \alpha_2^2 \sigma_{22} + \alpha_3^2 \sigma_{33}) \\ & -3 \lambda_{111} (\alpha_1 \alpha_2 \sigma_{12} + \alpha_2 \alpha_3 \sigma_{23} + \alpha_1 \alpha_3 \sigma_{13}) \end{aligned} \quad (3-3)$$

在某一温度 T 时, 能量系统占据某一方向的能态的概率符合 Maxwell - Boltzmann 统计:

$$P_M = C \exp [- (E_k + E_H + E_\sigma) / k_B T] \quad (3-4)$$

这里得到磁电锂电池压磁相结构磁畴分布和演化关系, 从而计算非线性的磁致伸缩效应。同样, 对于压电相结构也采取相同研究手段和统计分布规律, 将两种结构的本构关系结合起来, 形成完整的磁电能量传输系统的非线性本构关系。现有商业软件仅能描述线性压电效应, 无法模拟计算磁致伸缩、电致伸缩等物理机制, 须在上述理论基础上, 开发优化计算程序, 以优异磁电性质为目标对材料和结构进行优化设计。利用磁电锂电池储能理论, 研究磁电性质的储能特性, 由于考虑非线性效应, 这将极具挑战性。另外, 还可通过设计磁电能量传输系统的空间变化来优化储能频率和频宽, 从而满足实际应用的需求。例如, 通过设计结构颗粒体积含量、分布和大小与储能效率关系 (正比或反比), 优化界面, 获得高频率和带宽。磁电电压系数与电流磁场的幅值成单调增长的关系, 当偏置场幅值、方向、电流场的频率和方向, 以及测量的方向等因素固定时, 即可通过磁电电压系数得到电流磁场幅值的信号, 这有望替代现在利用锂电池组均衡系统。

3.4 磁电能量传输系统锂电池实验表征

Wang 等研究磁电耦合场及电流场的加载与检测技术, 提出合理的多场耦合的加载与测量方案, 发展新的实验方法, 解决了实验技术难题, 得到磁电能量传输系统锂电池 X 射线同步辐射技术微尺度表征, 如图 3-8 所示。解决了高压电场击穿、绝缘问题, 高磁场电磁铁极头间距与高载荷装置的空间矛盾问题; 电信号, 磁信号等在温度影响下引起温漂问题。在强磁场以及高频扰动磁场下, 许多储能器已经失效, 需要进行磁屏蔽与噪声屏蔽, 并避免加载装置以及储能器对磁场均匀度的影响等。该结构在磁电多场耦合下的磁电性质表征, 包括了观测结构



的温度稳定性、电致伸缩及磁致伸缩对磁电性质的影响、非线性磁电性质、界面行为与温度效应对储能的影响、外加磁电耦合场对磁电性质及储能频率调控规律等。

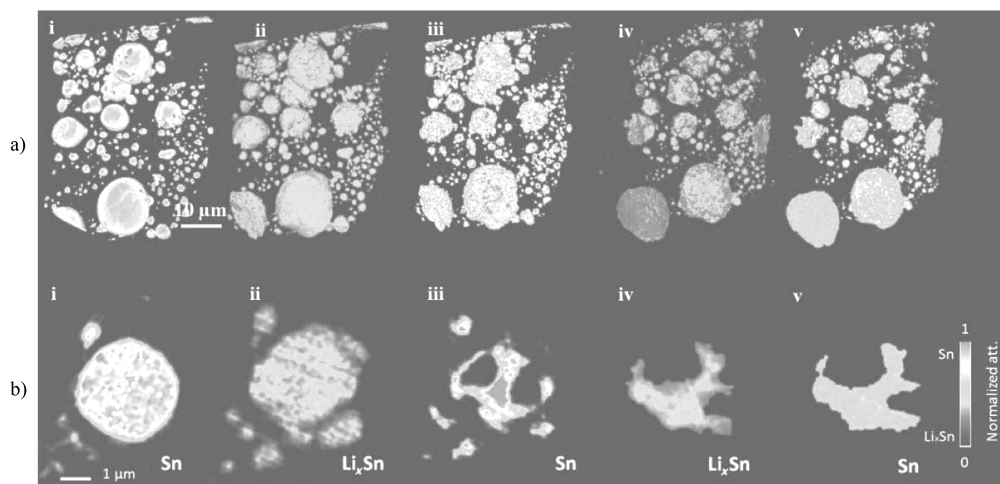


图 3-8 磁电能量传输系统锂电池 X 射线同步辐射技术微尺度表征

a) 结构形态演化过程 b) 单个微结构形态演化过程

Lei 等考虑失配应变的结构设计，由于结构制备中存在失配应变，相当于在某一方向上存在偏置的应力，因此会提高材料性能，当在偏置磁场下对压电相和压磁相结构进行复合的时候，压磁相复合结构将产生伸长或者收缩变形，当结构复合完毕后去掉偏置场，将会产生失配应变。如果检测这种结构的磁电性质时，沿着另外一个方向施加磁场，可能会提高结构的磁电电压系数。预制失配应变的方案如图 3-9 所示，通过界面之间径向的变形匹配来实现磁电性质，超磁致伸缩结构在纵向的伸长效应传递给压电材料，该内外镶嵌结构使磁电材料的径向收缩及纵向的伸长均与压电材料产生耦合作用，从而提高了结构的磁电转换效率。

磁电性质产生的极化电荷容易通过外电路瞬间泄漏掉而很难检测，测量的电压值不稳定，Takahashi 等用动态法测量了结构磁电性质，如图 3-10 所示。该测试表征系统的偏置直流磁场由功率直流电源驱动电磁铁产生，场强由高斯计检测。电流磁场由信号发生器驱动线圈产生，诱发电流磁场信号经电荷放大仪在示波器上显示，可直接测量得到磁电电压系数， $\alpha_E = dE/dH \approx \Delta E/\Delta H$ ，而且交变信号稳定。

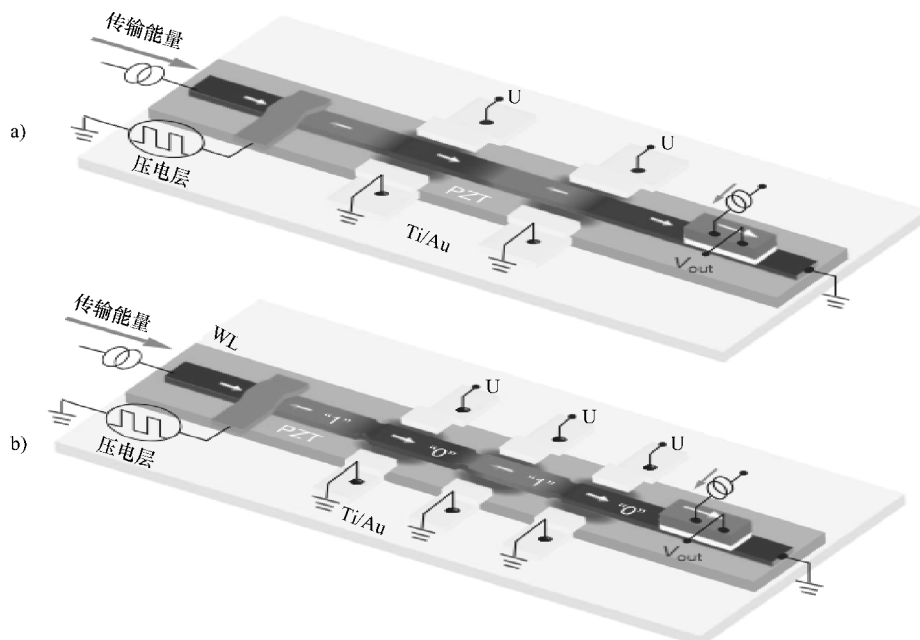


图 3-9 基于预制失配应变设计的内外镶嵌结构与磁畴分布示意图

a) 磁畴壁结构与磁畴传播形态 b) 加载磁畴壁结构与磁畴调控

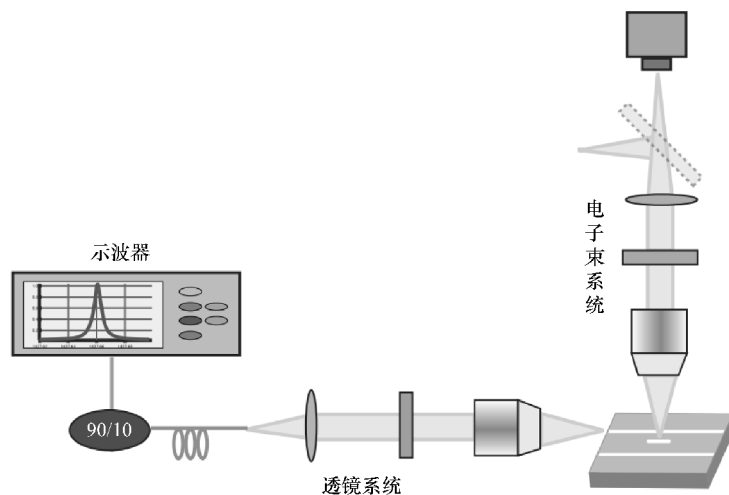


图 3-10 偏置场动态磁电性质测试表征系统图

目前缺少有效的磁电多场耦合环境下的实验方法与测试技术。现有实验观测了单纯磁场诱发的电极化或者电场诱发的磁化现象，对结构在磁场—电场—温度场耦合场下的变形行为和性能研究鲜有报道，即同时存在偏置磁场、偏置电场和温度场时，实验工作较少，这主要是在一个实验平台上实现多场耦合的加载技术



及相应的测量较困难,也成为实验滞后理论的一个原因。例如,高压电场击穿、绝缘问题,高磁场的产生要求很小的电磁铁极头间距,这与高载荷产生装置的空间需求产生矛盾,电信号、磁信号等在温度场影响下引起漂移等难题。利用结构实现物体储能的实验获得成功,标志着人们对磁电储能的操控达到了新水平。但由于受到工艺限制,系统结构最好具有简单的构型。结构由于微结构本身的特点,其宏观性质从形式上与传统的夹杂/基体型复合结构有较大的差别。高介电颗粒在磁电作用下可以产生电和磁储能,利用这种储能性质作者课题组初步实现了颗粒夹杂/基体结构,该磁电能量传输系统的核心是通过磁电效应机理形成微结构的磁电储能,利用该结构对磁电储能进行操控是对结构、系统和材料的一体化设计问题,这涉及两个层次,一个是结构层次,即按照预先的功能设计出结构中材料的分布形式;另外一个材料层次,即按照所需要的材料分布形式设计相应的结构,这一点与核壳锂电池材料完全类似,不仅在空间中每点的性质不同,而且要求材料是各向异性的。这也给传统的实验表征带来了新挑战,因此迫切需要开发针对材料与结构、能量模型的精确表征。

Dan 等研究结构在磁电耦合场下的实验加载、测量技术与表征,以磁场/电场调控的储能器件为例,由于不同偏置磁场/电场将改变结构的介电常数、弹性系数、磁导率等材料参数,从而可以调控储能频率的大小和频宽等特性,可以通过偏置场控制储能频率。由于偏置场为非接触场,无须引线,避免了引线位置影响储能等问题。该实验方案解决了屏蔽和电磁兼容问题,搭建了实验平台与研发测控软件,多场耦合加载与测量实验平台原理示意图如图 3-11 所示,实现加载和测量控制,以及数据采集和处理,包括温度量、磁学量及电学量等物理量检测和实验曲线绘制,电流场加载采用信号发生器经过放大器驱动亥姆霍兹线圈产生电流磁场,分别采用检测线圈和电荷仪连接相机测量电流磁场和电场信号。

Liu 等设计了夹杂/基体型磁电能量传输系统锂电池,通过实验研究颗粒体积含量、分布以及大小对宏观电磁性能的影响,研究高介电粉末填充复合结构实现磁电能量传输系统锂电池的可能性。根据使磁电绕射、储能等功能要求,通过调节储能单元在空间的分布、尺寸及含量的变化,使其满足所要求的有效性质的空间变化和各向异性。利用数值方法进行验证和优化,并进行相应的实验和功能测试。利用高介电常数纳米结构(如高介电锂电池纳米结构)的储能性质,将其作为金属(或散射体)的包裹层,设计并测试对磁电储能的影响。采用磁电能量传输系统锂电池实验单元的储能性质,透射电镜实验研究纳米尺度储能特性,建立该系统纳米尺度锂化进程速度与纳米结构的关系,并进行演化进程的实验表征验证,如图 3-12 所示。该磁电耦合场下的结构电池实验包括:观测结构温度稳定性,电致伸缩及磁致伸缩对磁电性质的影响,非线性磁电性质,空间变化,界面对储能频率以及频宽的影响规律,磁电电压系数在固定电流频率下随偏

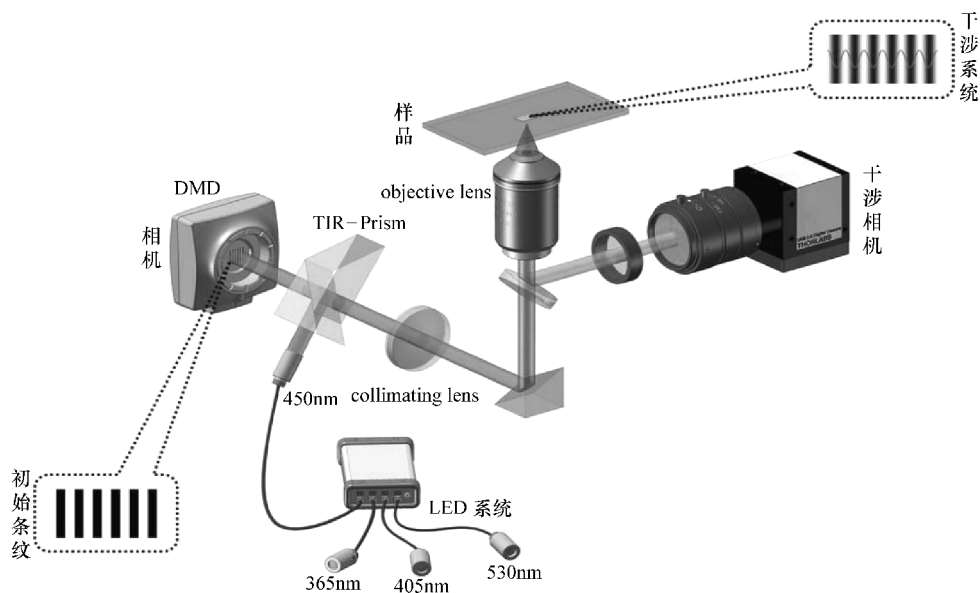


图 3-11 基于偏置磁场调制频率的多场耦合加载与测量平台示意图

置耦合场的变化规律，磁电电压系数在固定偏置耦合场作用下随着电流频率的变化规律，不同结构参数下的磁电电压系数变化规律。测量实验参数包括：矫顽场、电位移、磁化强度、电/磁致伸缩、磁电电压系数、失配变形、温度储能频率和频宽等。采用磁电电压系数 $\alpha_E = \Delta E / \Delta H$ 或者 $\alpha = \Delta P / \Delta H$ 磁电系数来表征线性磁电性质，采用 $\alpha'_E = E / H$ 来表征非线性磁电性质。

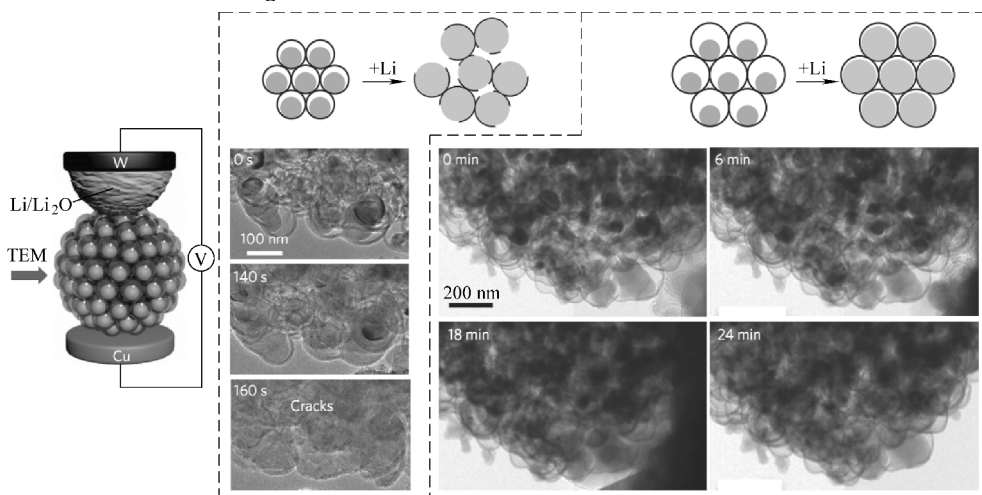


图 3-12 磁电能量传输系统锂电池纳米结构的储能性质演化进程透射电镜纳米尺度表征



作者课题组对磁电能量传输系统锂电池模型、电池能量系统耦合设计与磁场与温度场耦合效应的实验表征等问题开展了系统而有序的研究,在锂电池结构多场耦合效应及电池能量系统设计方面有所突破。磁电能量传输系统锂电池在电动能量车辆锂电池与大型均衡电池组储能等领域都具有诱人的潜在应用前景,同时在科学层面上又提出了许多急需解决的能源问题。正如前面分析,磁电能量传输系统锂电池最早源于对能源电池热应力问题的研究,至今许多研究思想和方法如均质化和多功能一体化设计(结构磁电性质和温度效应的研究成果可以相互借鉴)仍然在磁电能量传输系统锂电池微结构表征和能量系统设计方法中发挥着重要作用。

3.5 结论与展望

电动能源车辆磁电能量传输系统锂电池储能领域是目前诱人的前沿研究热点之一,研究磁电性质与温度效应的耦合机理,能源系统设计方法、物理本构理论、有效计算策略及实验表征技术问题,目前研究集中在三个领域:磁电能量传输系统锂电池磁电效应模型,磁电能量传输系统电池能量系统能量系统耦合设计,磁电能量传输系统锂电池实验表征。针对磁电能量传输系统锂电池,人们给出表征其宏观性质的动态均质化方法,并建立基于畴变理论的磁电能量传输系统锂电池的非线性本构关系。考虑磁致伸缩、电致伸缩等以畴变为物理机制的非线性效应,表征了部分非线性磁电性质。另外,人们不断通过预制失配应变提高结构磁电性质,以及通过内外镶嵌结构来改善磁电锂电池电压转换效率,同时,设计电场调控的新型磁电储能器并用微尺度表征磁场幅值等,对拓展磁电能量传输系统锂电池在电动能源车辆上的应用有重要价值。目前,国际上采用磁场诱发电极化或者电场诱发磁化效应,利用多场耦合加载技术以及高幅值的磁电场加载技术搭建实验平台。未来,人们将建立基于磁电和温度耦合效应与调控磁场/电场的新型磁电电池储能器件模型,如超级电容器、大型锂电池组等能源系统模型,也将基于磁电能量传输系统锂电池模型设计新型动力能源锂电池,还将搭建电动车辆能量系统实验平台,精确表征磁电能量传输系统锂电池微尺度结构演化进程对宏观非局部磁电效应的影响,为电动能量车辆提供理论依据与实验技术支撑。

参考文献

- [1] Dunn B, Kamath H, Tarascon J M. Electrical energy storage for the grid: abattery of choices [J]. Science, 2011 (334): 928-935.
- [2] Noorden R V. A better battery [J]. Nature, 2014 (507): 26-28.
- [3] Valentine S V. Emerging symbiosis: renewable energy and energy security [J]. Renewable



and sustainable energy reviews, 2011 – 15 – 4572 – 8.

- [4] Lei N, Devolder T, Agnus G, et al., Strain – controlled magnetic domain wall propagation in hybrid piezoelectric/ferromagnetic structures [J]. Nature communications, 2013(1378)1 – 7.
- [5] Wu G, More K L, Johnston C M, et al. High performance electrocatalysts for oxygen reduction derived from polyaniline, iron, and cobalt [J]. Science, 2011 (332): 443 – 447.
- [6] Li Y, Song J, Yang J. Progress in research on the performance and service life of batteries membrane of new energy automotive [J]. Chin Sci Bull, 2012, 57 (32): 4153 – 4159.
- [7] Li Y, Song J, Yang Jie. A review on structure model and energy system design of lithium – ion battery in renewable energy vehicle [J]. Renew sustain Energy Rev, 2014 (37): 627 – 633.
- [8] Sun Y, Zhao L, Pan H, et al. Direct atomic – scale conformation of three – phase storage mechanism in $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ Anodes for room – temperature sodium – ion batteries [J]. Nature Commun, 2013 (4): 1870 – 1880.
- [9] Sung K, Gwon H, Hong J, et al., Understanding the Degradation Mechanisms of $\text{LiNi}_0.5\text{Co}_0.2\text{Mn}_0.3\text{O}_2$ Cathode Material in Lithium [J]. Adv Energy Mater, 2014 (4): 1301 – 1307.
- [10] Liu N, Lu ZD, Zhao J, et al. A pomegranate – inspired nanoscale design for large – volume – change lithium battery anodes [J]. Nature Nanotech, 2014 (9): 187 – 92.
- [11] Xue X, Wang S, Guo W, et al. Hybridizing energy conversion and storage in a mechanical – to – electrochemical process for self – charging power cell [J], Nano Lett, 2012 (12): 5048 – 5054.
- [12] Pikul J H, Zhang H G, Cho J, . High – power lithium ion microbatteries from interdigitated three – dimensional bicontinuous nanoporous electrodes [J]. Nature Commun, 2013 (4): 1732 – 1737.
- [13] Wang J, Karen Y, Wang J. In situ three – dimensional synchrotron X – Ray nanotomography of the lithiation processes in tin anodes [J]. Angew Chem Int Ed, 2014 (53): 171 – 176.
- [14] Takahashi Y, Inui Y, Chihara M et al. A micrometre – scale Raman silicon laser with a micro-watt threshold [J]. Nature, 2013 (498): 470 – 4.
- [15] Dan D, Lei M, Yao B L, et al. DMD – based LED – illumination super – resolution and optical sectioning microscopy [J]. Sci Rep, 2013 (3): 1116 – 1123.

第4章 电动车辆能量传输纳米能源系统与模型

电动车辆锂离子电池电极由于具有较好的储能特性，使之成为可再生新能源汽车极具前景的纳米能源储能系统。然而，电极系统在充放电过程中，会发生变形与衰退等，引起电池及活性材料的失效，严重影响锂离子电池循环性能和使用寿命，这是锂离子电池在电动车辆领域更广泛应用所面临的严峻挑战。本文介绍了不同电极结构的纳米能源系统模型及其在充放电过程中的失效表征机制，并评述充放电过程中的纳米能源电极系统循环性能演化与实验理论等新进展，分析Si/C电极失效研究成果的新亮点。针对锂离子电池电极利用率低、循环性能差和能量容量低等问题，探讨锂电池能源系统失效与优化设计技术的研究亮点、难题和未来方向，为进一步推动锂电池技术研发与储能产业发展提供技术支持。根据锂电池充放电过程中纳米能源电极结构的失效表征，深刻揭示其在充放电循环过程中的能源系统模型、纳米尺度缺陷演化规律与电池循环性能衰退等方面的机制。针对锂离子电池电极的应用现状与新技术的发展，重点评价硅/碳/锂耦合纳米能源电极系统与结构等在锂离子电池动力系统运行中的运行机制、失效过程与工程应用，并展望硅/碳/锂纳米能源电极系统与结构在锂离子电池电动能源车辆中的应用前景和发展方向。

51

4.1 纳米能源系统传输基本模型

能源是世界经济发展的支柱，也是人类生存与进步的动力基础。目前，在传统能源日渐枯竭与环境保护日益强化的双重压力下，能源储存和使用的方式正发生巨大变革，发展可再生能源电动车辆替代传统能源汽车迫在眉睫，电动车辆对高性能储能系统也提出了技术要求。金属锂非常活泼，能与许多物质发生反应，但锂金属电池在充电过程中易形成枝晶，并刺破隔膜，导致电池内部短路造成事故。为了克服锂金属电池因活泼性而引起的安全性和循环性差的缺点，人们用嵌锂化合物代替金属锂作为电极，相对于金属锂，锂离子电池避免了枝晶的生长，提高了安全性。同时，锂离子电池具有工作电压高、应用温度范围宽、自放电率低、环境污染轻等优异的性能，并兼具长寿命、高能量密度与高功率密度的优点，因此，锂离子电池在电动车辆储能领域取得了迅猛的发展，并具有广阔应用前景。从比容量、嵌锂电位、循环性能及成本等方面综合考虑，锂离子电池被确



定为目前电动车辆的主要动力能源。但发展可再生能源汽车要特别考虑续航问题，续航里程一直是电动车辆面临的挑战。电动车辆在全世界迅猛发展，迫切需求更大能量/功率密度、更长寿命、更高安全性和更低价格的动力能源电池。如何进一步提升锂离子电池能量密度、循环寿命与安全性能等，是全球能源学术界与工业界面临的巨大挑战。锂离子电池能量密度存在很大的提升空间。例如，将传统磷酸铁锂电池改性和包覆，设计新能源结构体系，并加入新掺杂元素，如图4-1所示，就可形成较高能量密度的锂离子电池，将原来磷酸铁锂电池能量密度提升超过60%，这意味着改性后的锂离子电池将提升电动车辆的续航里程，在新能源车市场极具竞争力。

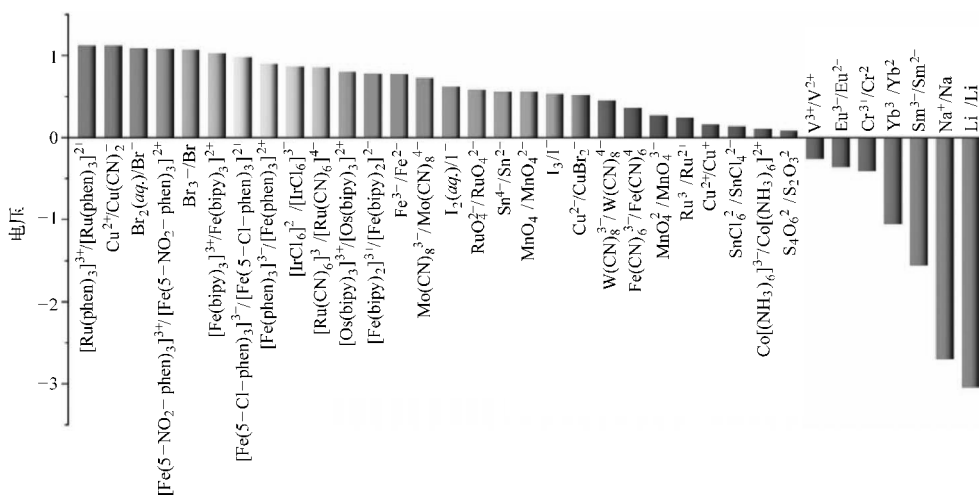


图4-1 各种动力电池的电压与电位示意图

如何在拥有高能量密度的同时，兼备高功率密度与高循环稳定性是锂离子电池发展的关键技术。电极是锂离子电池的能量储存的核心系统，锂离子电池早期用金属锂作为负极，但金属锂负极在长期循环过程中，电极表面会形成锂枝晶而造成安全事故。摇椅式锂离子电池用低嵌锂电位的层间化合物代替金属锂负极，配之以高插锂电位的化合物作为正极，避免金属锂枝晶沉积，提高了安全性。但由于这种电池存在电压低、锂离子在负极中扩散很慢等问题，研发一度陷入瓶颈。这时，碳与硅等材料作为电极基体开始研发，新型纳米硅、碳纳米管与石墨烯等，由于具有一维和二维等特殊纳米储能结构，具备优异的导电性和导热性，在电动车辆锂离子电池应用中显示了巨大潜能。动力能源系统锂离子电池理想电



极如图 4-2 所示, 该电极能源系统特性为: 锂离子在电极中插入氧化还原电位尽可能低, 接近金属锂的电位, 使得电池输出电压高; 在电极基体中高容量密度锂离子插入和脱插过程应可逆, 电极结构如果基本没有变形或变形小, 就可确保良好的循环性能和平稳的充放电电压。电极较好的电导率和导热率, 可减少极化效应, 并能进行大电流充放电。电极表面结构与电解质形成良好的膜, 在工作电压范围内具有良好的稳定性, 在形成膜后不与电解质发生反应, 便于快速冲放电过程。

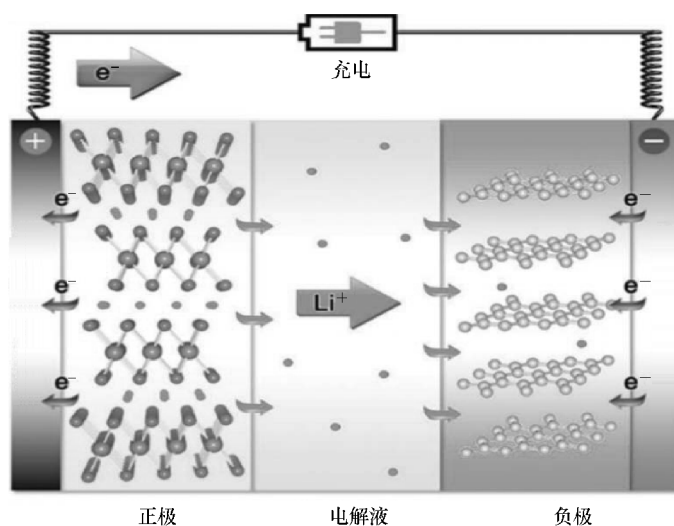


图 4-2 充放电过程理想锂离子电池电极能源系统设计

在科学层面, 锂离子电池物理化学结构上是锂离子动态浓度梯度结构, 是具有锂离子浓度差的电池, 正负电极由两种不同的锂离子嵌入化合物组成。充电时, 锂离子从正极脱嵌, 经过电解质嵌入负极, 负极处于富锂态, 正极处于贫锂态, 同时, 电子的补偿电荷从外电路供给到负极, 保证负极的电荷平衡, 放电时则相反, 锂离子从负极脱嵌, 经过电解质嵌入正极, 正极处于富锂态。在正常充放电情况下, 锂离子在球状梯度结构碳/硅材料和纳米能源系统的层间嵌入和脱出, 理想状态是, 这种动态过程只引起球面间距变化, 不破坏电极晶体结构, 如图 4-3 所示。在充放电过程中, 电极的结构基本不变。这样, 锂离子电池的电极反应才是一种较好的能源动力电池的理想可逆反应。

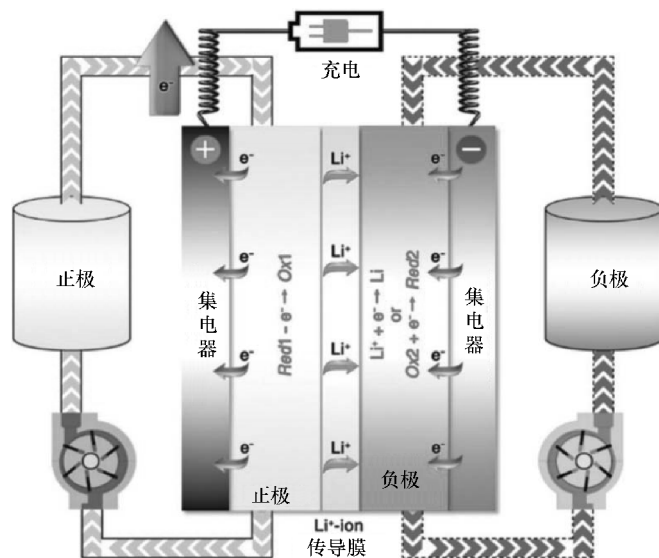


图 4-3 充放电过程锂离子理想动态运行轨迹与过程

4.2 纳米结构耦合缺陷与纳米能源传输系统

电动车辆续航里程短，虽可通过提升电池能量密度予以解决，但充电慢又成为电动车辆实际应用的更大制约。正常电动车辆锂电池完全充满需 4~8h，若快充，可在 1~2h 内充满，但很大地影响电池的循环性能及使用寿命等。实验证明，若频繁快充，电池寿命会骤减至原来的 1/3，且电池循环性能下滑显著，安全事故发生概率却大大增加。例如， LiCoO_2 晶体结构具有层状结构放电平稳、循环性能好的特点，是目前应用广泛的锂离子电池。锂离子从 LiCoO_2 中可逆脱嵌量最多为 0.5 单元，当大于 0.5 单元时， $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$ 就不稳定，如图 4-4a 所示，容量发生衰减，并伴随着钴的损失，该损失是由于钴离子和电子的迁移所致，导致电极结构很不稳定，并使部分钴离子迁移到电解质中，因此， LiCoO_2 的实际循环比容量还不到理论比容量的 50%。

在纳米能源层面，充电速率越快，纳米能源电极变形速度就越快，变形与应力迁移的能量得不到及时释放，就会造成很大的非局部塑性变形与应力梯度，材料易发生位错缺陷，如图 4-4b 所示，电极临界破坏值就变小，很容易出现损伤失效。反之，充电速率小，破坏临界值相对较大，电极就比较稳定。例如，在 2014 年，某型电动车使用钴酸锂电池作为动力能源电池，该电动车将 6000 多块钴酸锂电池划分成块、层、堆三个层级进行管理，数十个电池并联成一块，十几个电池块串联成一个层，而十几层再串联成整个电池堆。若想要更大动力能源输



出,可用上万个电池单元来满足电动车钴酸锂电池动力能量需求。但是,这种情况下,电池安全性能差和循环寿命短的缺点就被迅速放大,若出现大功率放电、高温或撞击等紧急工况,电池系统很不稳定,容易导致安全事故。该纯电动车问世时,性能更加稳定的磷酸铁锂电池技术还未成熟,选择空间并不多,即便所有电池单元都有保险装置,检测到电池温度过高或电流过大时,会立即断开输出。但是,事实证明,该电池能源系统并不可靠,从多起自燃事故召回就可见一斑,事故中电池组经常遭内部系统衰退与刺穿效应作用,而导致整体电池失效,根本达不到设计的循环性能,大大低于设计的使用寿命。因此,迫切需要能源学者深入研究分析,探寻问题的本质。

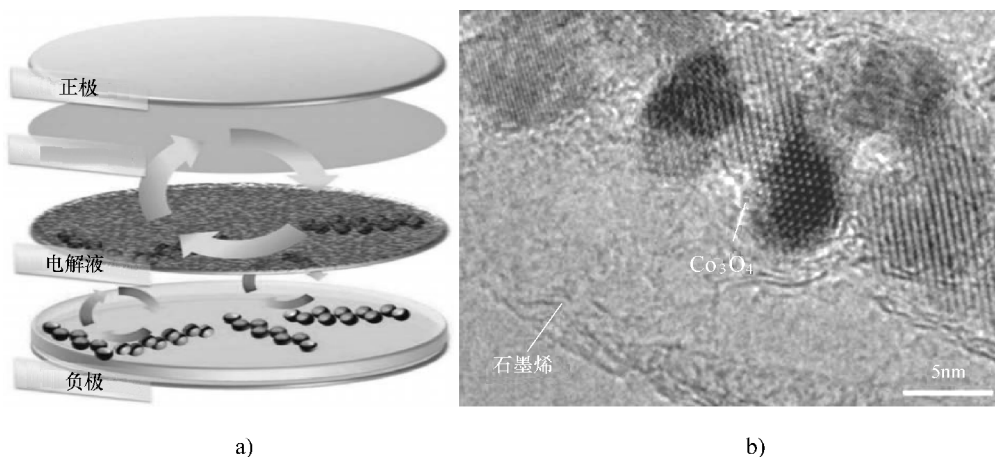


图4-4 钴酸锂电池的原理与固有缺陷

a) 钴酸锂电池工作原理 b) 钴酸锂电池纳米能源电极系统位错缺陷模型

相对于钴酸锂的缺点,锰酸锂是理想的电极材料,但其能量储存性能较差、容量衰减较快。原因为:电极使用过程锰易溶解,会导致尖晶石中晶格产生缺陷,使得晶体结构无序化,阻塞了锂离子的嵌入/脱嵌通道,影响到锂离子在其中的扩散,造成了 LiMn_2O_4 在循环过程中容量下降。引起锰溶解的原因为: LiMn_2O_4 中含有的锰发生歧化反应,游离的 Mn^{2+} 会迅速转化为黑色锰沉淀,并沉积于电极上,阻碍 Li^+ 的扩散,使电极无法正常工作,导致锰酸锂电极过度嵌锂。此时,在尖晶石表面形成锰酸锂相,造成锰酸锂的晶胞膨胀,产生异晶扭曲与结构畸变的 Jahn - Teller 效应,该效应会导致电极结构不稳定。电极表面由于极化和 Jahn - Teller 效应影响,会出现过度放电现象。体相掺杂是从纳米能源晶格内部改善锰酸锂电极性能的有效方法。通过掺杂,引入镍、锂等低价金属元素部分替代锰,可减少结构的 John - Teller 效应,如图 4-5 所示,提高电极结构稳定性,减少充放电过程中的电极结构变化。因此,对 LiMn_2O_4 电极改性是抑制电池循环性能衰减的有效办法。

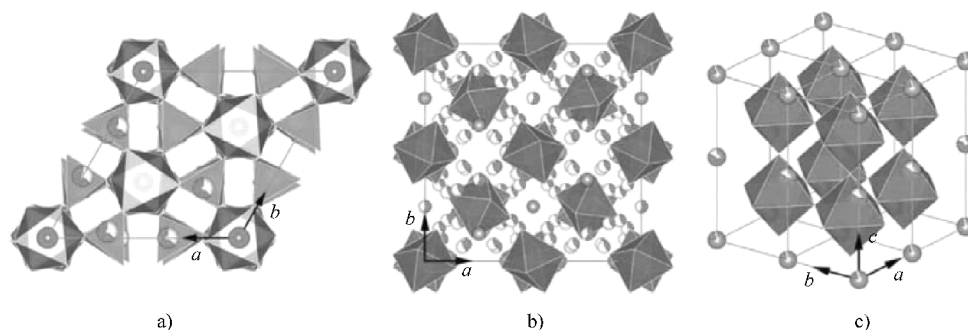


图 4-5 LiMn_2O_4 电极改性纳米能源晶格系统

a) 扭曲异晶 b) 畸变结构 c) 改性结构

锰酸锂电池低温性能较好，低温电量损失不大，价格便宜，有好的高倍率放电性能和高容量，但安全性不高，结构也不稳定。由于目前已有的单一电极都有各种各样的缺陷，那么综合设计多元材料电极，通过协同作用弥补不足之处，可优化单一电极的综合性能。多元材料是近几年快速发展的新型电极，具有容量高、成本低、安全性好等特性。例如， LiCoO_2 易合成，具有高电压且电化学性能稳定，但价格昂贵，且实际容量不到理论容量的 50%。而 LiNiO_2 和 LiMnO_2 却具有高容量，但结构不稳定，循环性能不好。因此，综合 LiCoO_2 、 LiNiO_2 、 LiMnO_2 三类材料的优点，通过掺杂改善 LiCoO_2 和 LiMnO_2 的循环性能，组合成含有镍、钴、锰三元素协同的新型过渡金属嵌锂复合结构，形成 $\text{LiCoO}_2/\text{LiNiO}_2/\text{LiMnO}_2$ 的纳米能源复合结构体系，如图 4-6 所示，其综合性能优于单组合化合物，存在明显的三元协同效应。在纳米尺度， LiCoO_2 、 LiNiO_2 和 LiMnO_2 均为层状结构嵌锂化合物，且锰、钴、镍是属于同一周期相邻的几个元素，具有相似的原子核外电子排布，原子半径接近，通过锰、钴、镍互相掺杂，结构互补得到储能性能更优的嵌锂电极。

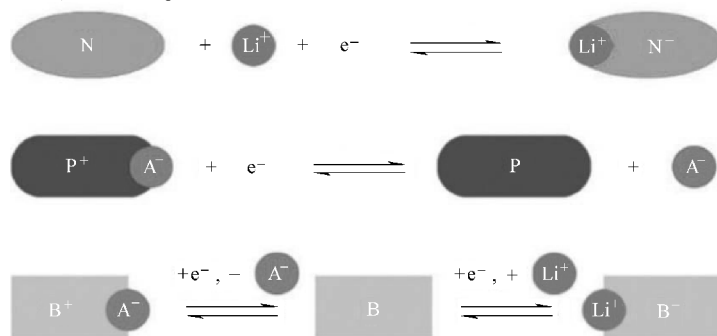


图 4-6 三元电极纳米能源系统机制



动力锂离子电池要求能够高倍率充放电，即大电流、短时间放出足够电能。磷酸铁锂电极的优势是放电倍率和功率密度大，安全性与加速性能好，循环寿命长，成本较低。动力锂电池另一个要求是低温性能，但 LiFePO_4 电池缺点是能量密度相对较低，续航里程相对较短，低温性能较差，低温电量会损失很大。 LiFePO_4 电池在低温下电子电导率很低，其低温性能是其应用于动力电池的巨大障碍。 LiFePO_4 电池很难兼顾低温性能和续航要求，其能量密度和电子电导率较低，导致 LiFePO_4 电池缺点明显。因此，必须进行改性，才能够提高 LiFePO_4 电池电导率和能量密度，但这样又可能会导致电池体积过大。纳米能源电极系统可以兼顾这些特点进行优化设计，纳米高容量复合电极按照复合结构形式划分，分为纳米颗粒与活性材料机械混合、原位外包覆结构与原位内填充三种结构等。Wang 等用表面包覆与改性法对 LiFePO_4 表面包覆与阻隔，如图 4-7 所示。根据表征结果，表面包覆就是在纳米颗粒表面包覆匹配物质，掺杂元素浓度呈径向梯度分布，可达到高浓度体相掺杂的效果。原因在于材料经过预加的表面包覆之后，形成的孪晶密度梯度，使得材料由里至外，强度增加，这种表面强、内部弱的复合结构，其变形由各处的体积平均决定。孪晶密度梯度也使得材料在塑性过程中维持较高的硬化，即随着材料塑性变形而需要增加载荷以实现进一步变形的现象，这一硬化特点能有效防止变形局部集中导致的材料破坏。更为重要的是，由于表面包覆处理中孪晶密度梯度的存在，后续的体积变形使得材料内部形成梯度多层次孪晶结构。因此，通过微粒表面包覆技术，合理调控电极与电解液接触面积，就可以减少极化作用、应力集中和电解液分解，改善循环性能，在纳米尺度，大大提升能源系统的容量。因此，设计新型高性能结构电极储能系统一直是电动车辆锂电池研究亮点与焦点。

基于磷酸铁锂电池高容量复合电极的碳材料前驱体，包括天然石墨、人造石墨、硬炭等，由于碳纳米颗粒具有良好分散特性，与活性材料直接混合，可显著提高电极的循环特性。高容量碳纳米能源复合电极，如硅/石墨烯/单壁碳纳米管、一氧化硅/碳纳米管/石墨等。纳米能源复合电极可采用水热反应、沉淀、电沉积与气相沉积等原位复合等技术制备。虽然这些技术在一定程度上能够改善纳米能源电极循环性能，但碳纳米管与活性材料间缺乏直接键合，结合力较弱，在循环过程中，结构不可避免地遭到破坏，性能提高的幅度有限。为了解决混合过程中碳纳米难以分散、分布不均匀以及与活性材料结合力较弱等问题，Wang 等设计了硫/磷酸铁锂的纳米复合材料电极，如图 4-8 所示，将硫颗粒镶嵌在磷酸铁锂基体中，硫纳米颗粒前驱体被弥散分布，碳纳米颗粒良好的弹性和导电性能使电极在循环过程中保持完整的导电网络，显著地改善了复合电极的循环性能。随着循环过程的进行，在不同的材料流动和变形阶段，晶体内在的不同孪晶与位错系统被激活，使得变形在微观层次趋于均匀分布，同时维持电极结构的应变硬

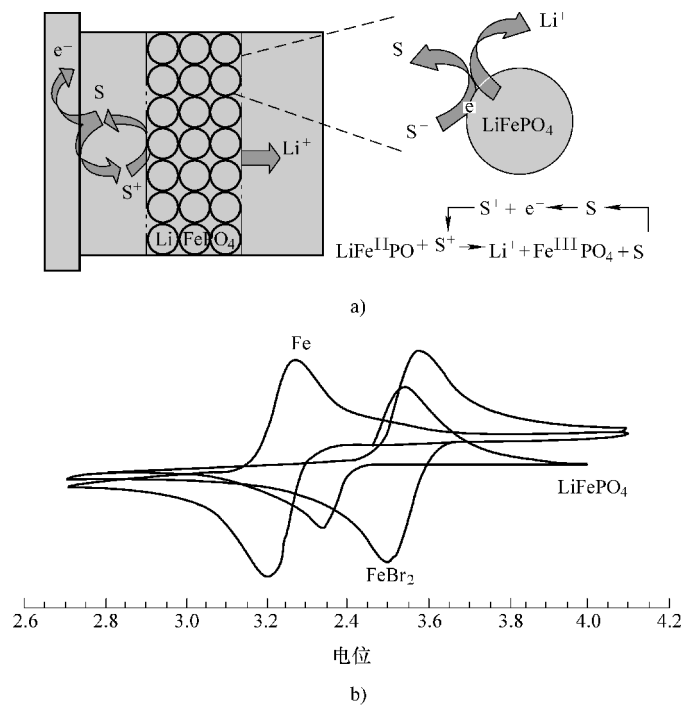


图 4-7 磷酸铁锂电极纳米能源系统使用原理
a) 纳米模型 b) 系统电位

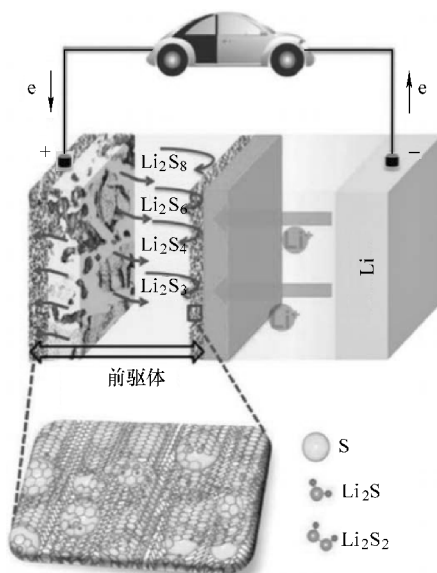


图 4-8 磷酸铁锂电极纳米能源系统设计与运行机制



化,阻止电极纳米能源系统的塑性变形局域化,保持纳米能源电极的高稳定性。因此,硫和石墨烯等新型电极结构,将为锂电池发展带来新机遇,锂/硫/石墨烯材料相关研究对于锂电池性能提高具有重要意义。

4.3 Si 电极的缺陷与失效机制

目前大多数锂离子电池都采用石墨作为正极,但石墨资源有限,随着科技的进步,学者们开始寻找更好的替代材料,硅地球储量丰富,占地球表层的25.8%,用其替代石墨,作为锂电池电极非常有潜力。根据热力学理论,在已知锂电池电极中,硅的理论比容量比石墨的理论比容量大10倍。Wu等设计硅作为锂电池电极的基体,并将其设计成三维纳米多孔镶嵌复合结构,如图4-9所示,这种纳米能源系统电极利用多孔与镶嵌技术,大大改善了锂电池的循环性能、电容量和导电率。但是,硅电极在使用中,由于锂离子的嵌入和脱出,会产生电极纳米结构非常大的体积变形,将导致锂电池性能剧烈衰退,严重制约了高容量硅电极在动力电池可再生能源车辆中的潜在应用,高性能锂电池面临的挑战不仅是电化学问题,更是热力学、纳米能源与储能系统等综合问题。纳米尺度的硅能解决体积变形问题,但随后发现,传统方法制造出的纳米硅极易降解,且难以规模生产,无法满足电池商业化生产的需要。Favors等用石英和二氧化硅构成的沙子来解决这两个难题,他们将沙子研磨成纳米尺度颗粒,随后又进行了一系列纯化步骤,这些沙子逐渐从棕色变为了明亮的白色,就像绵白糖一样,他们又将盐和镁以同样的方法进行研磨,再将这三种物质混合起来进行加热。在加热的过程中盐和镁能够帮助石英去除氧,得到纯纳米硅,与传统工艺纯硅不同,这种纯纳米硅具有海绵一样的三维多孔结构,且极为稳定,如图4-9所示,这种多孔纳米硅结构有可能是提高锂电池电极续航性能的关键技术。他们的实验结果显示,新型锂电池循环性能和使用寿命比普通锂电池高出3倍以上。用这种纳米硅电极制成的新型锂电池,可将目前电动车辆的预期寿命提高至少3倍以上。他们试图改进设计方法得到更多的纳米硅,并计划为电动车辆制造出体积更小与容量更大的锂电池。

硅基材料具有高比容量,使其成为锂电池的理想电极,但其容量衰退仍是难题。硅电极在脱嵌锂过程中存在体积膨胀和收缩是固有属性,无法抑制其体积变化,只能通过硅基材料的纳米化、薄膜化与硅SEI复合化等来改善硅电极的微裂纹萌生。然而,硅基锂电池循环过程中容易出现电极粉化失效,导致容量损失也是面临的难题,严重制约容量大、功率高的硅基锂电池动力电池市场化应用。锂离子电池在连续充放电过程中,易发生容量损失与性能衰退的原因,从纳米能源系统角度可做出合理解释,是因为电极表面出现了纳米尺度的不同程度粉化,硅

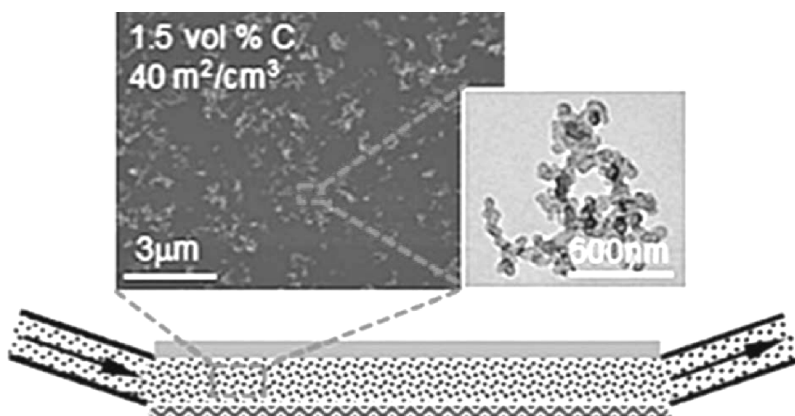


图 4-9 纳米硅电极的能量系统模型

电极在循环充放电后会出现粉化失效，随着充放电过程的继续进行，材料表面出现更加严重的裂纹，甚至剥落，这大大影响了电极与活性材料的工作效率，导致了循环性能退化，由于该锂化过程会发生塑性变形，因此，考虑塑性变形的热力学耦合模型急需建立。电极嵌脱锂过程中的变形分为两个部分，即弹性应变和塑性应变，弹性变形没有破坏材料原子间的化合键，而塑性变形包含材料流动发生的塑性应变和反应中材料嵌入锂离子的体积应变。根据热力学定律，基于变形塑性的热力学耦合理论模型，科学家提出了电极的锂离子运输及纳米能量储存的动态失效机制，如图 4-10 所示，亥姆霍兹自由能在反应过程中不会增加，反应前后的化学势主导化学反应进行。当电极与电解液之间达到平衡状态，反应停止。电极塑性变形与应力梯度和应变扩散有关，临界破坏点与应力梯度与离子浓度梯度相关。电极反应的驱动力主要来自应力梯度、化学势和离子浓度梯度。电极塑性变形呈现很强的时空不连续性，在时间上，塑性应变发生突跳，以间歇的方式进行；在空间上，电极发生局部化塑性变形，晶体表面形成滑移线与滑移带；由于空间限制，位错存储及增殖机制发生变化，出现新的临界应力-应变关系。该临界应变率的大小由初始位错密度、位错平均自由程及位错运动障碍的强度决定。随着应变率的增加，位错微结构图案从均匀形态变成单一形态，位错滑移都集中到某一个特定滑移系内，并随之在晶体内部出现变形带。变形带的宽度随着应变率的增加而增加，其中的剪应力明显高于相邻区域，这些区域往往是电极中进一步发生失效的位置。这些新的特性给纳米能源系统电极塑性的研究带来很多挑战。

为了深入理解硅电极在充放电过程的失效破坏形式，需对其嵌锂和脱锂过程中的纳米尺度结构变化进行表征分析。为了保证锂离子在硅电极中均匀扩散，对硅的循环性能进行研究，控制充放电电压可分别得到硅充放电过程中，电极能量

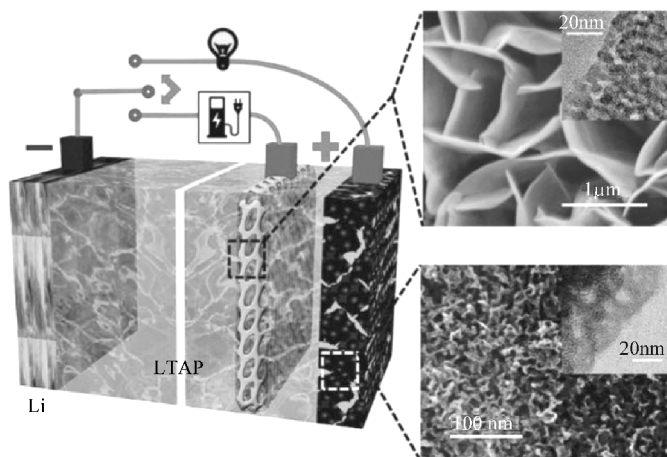


图 4-10 基于变形弹塑性理论的热力学耦合模型的纳米能源机制

传输效率与倍率随电压与温度的动态规律，随着充电过程进行，电极由于体积不断变形，发生塑性流动。当电池放电时，硅电极开始脱锂过程，初始阶段发生弹性变形，其应力状态从应力梯度转变为应力扩散，当应力扩散后，电极发生非局部塑性变形。基于球形浓度梯度结构，科学家建立了硅纳米颗粒的自组织结构与 $\text{Si}@\text{SiO}_2$ 包覆结构模型，探讨了离子浓度梯度和空洞在充放电过程中的演化机制，并观察了碳/硅纳米能源复合电极在充放电过程中的失效行为。复合电极嵌锂后，会出现无组织状态的空洞，如图 4-11 所示，纳米球表面区域不是应力梯度导致空洞，而是非局部位错密度导致空洞出现，这更符合电极失效的实际应力分布。球中心区域受到非局部位错密度影响，在锂化的界面层附近则表现为应力扩散，然后空洞在表面附近微区演化，多次充放电循环过程后，纳米能源系统体积增大，塑性变形加剧，一旦位错网中的位错连接被破坏，或者从该有限空间中逃逸，位错增殖将停止，正常塑性应变硬化也将结束。随着位错逃逸的进行，控制硅电极塑性变形的过程，从位错扩展及相互作用转变为位错形核，随之出现纳米能量电极容量衰退。

应变梯度位错能量理论忽略了位错近程相互作用，而其在纳米尺度对电极内应力有重要影响，非局部塑性理论弥补了这个不足。考虑微尺度塑性变形中存储缺陷能量的物理机制，非局部塑性缺陷能量理论认为，缺陷能是相邻滑移面上的非协调位错，在弹性相互作用中存储的势能、缺陷能与位错密度和位错滑移面间距的尺度参数有关。位错滑移面间距的尺度参数反映了位错近程相互作用距离。基于缺陷能量的非局部塑性理论，Wang 等设计了不同晶粒尺寸的纳米颗粒在锂化过程中的粉化失效模型，如图 4-12a 所示。最初硅颗粒完好，当充电电极结构锂化后，外层 solid electrolyte interphase (简称 SEI) 膜，已开始破坏，但内层的

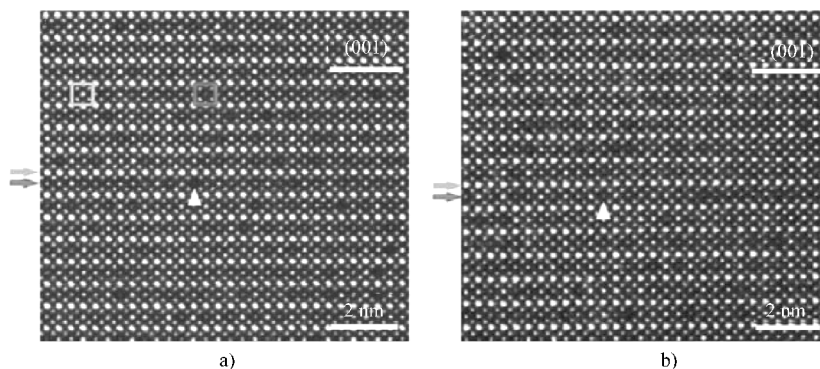


图 4-11 纳米结构非局部位错密度空洞机制示意图

a) 空洞形成 b) 非局部位错空洞

活性材料依然完好；当充电继续时，材料已经出现裂纹；当充电到临界点时，材料出现粉化。多次实验后发现，当颗粒体积不断变大，充电后就会发生粉化，为了得到硅纳米线的临界尺寸，他们原位观察了不同直径的硅纳米线材料锂化前后的尺寸变化，对于直径为纳米尺度的硅纳米线，锂化后完全消失了，说明锂化后材料粉化了。在纳米尺度范围，他们选取了不同长度的材料进行锂化后的测试，如图 4-12b 所示，锂化后体积增加了，在硅脱嵌锂离子的过程中，涉及热力学耦合作用。因此，无论是理论建模还是实验观测，精确揭示电极失效机制都困难，造成了不同实验方法得出的失效临界值相差较大，原因为：充电过程中，电极表面会形成 SEI 膜，对于不同尺寸电极，SEI 膜厚度不同，这造成电极载荷不同，其临界点也存在差异，同时，充电速率也是影响临界值的因素，如图 4-12c 所示，电极缺陷空洞、位错、微裂纹等缺陷程度、密度也不一样，这样也会造成失效临界值的差异。

硅电极虽然拥有很高的理论容量，但是却在商业化应用上存在致命缺陷，即充放电过程中会发生破坏，导致非局部位错密度与扩散应力。Zhao 等基于核壳结构，建立锂电池电极模型，考虑了表面应力、界面应力及外壳本身对锂离子扩散应力的影响，外壳缓解了活性材料的应力，扩散应力与碳外壳厚度和杨氏模量相关。根据热力学理论可知，核壳结构能承受更大变形，缓解应力增加，显示高倍率性能。但电极核壳结构在锂化和脱锂过程中，壳的非局部塑性变形如图 4-13 所示，会诱导应变梯度效应，导致应变扩散小于充放电循环时间，应变能量不能及时释放，严重影响了锂离子电池安全和循环性能。可观察到循环演化后，外壳变薄了。核壳结构在充放电失效机制中的应变扩散过程，是典型的非均匀局部扩散，是由非局部位错密度不均匀驱动的。

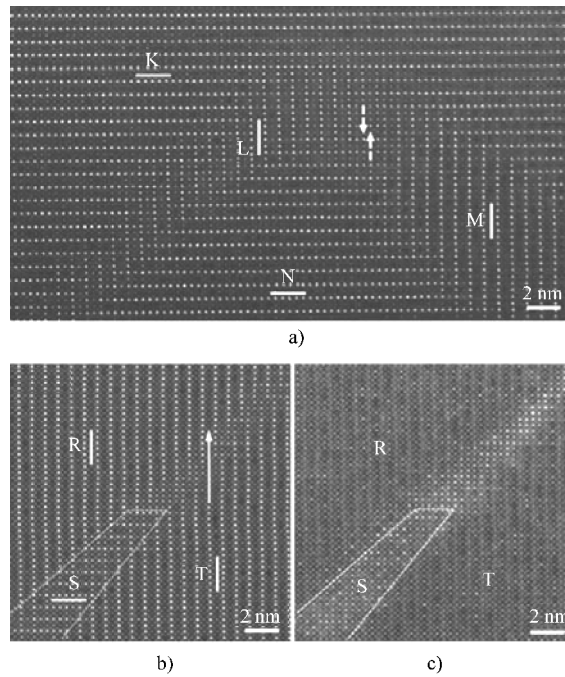


图 4-12 硅电极缺陷演化模型与表征
a) 缺陷模型 b) 演化模型 c) 失效表征

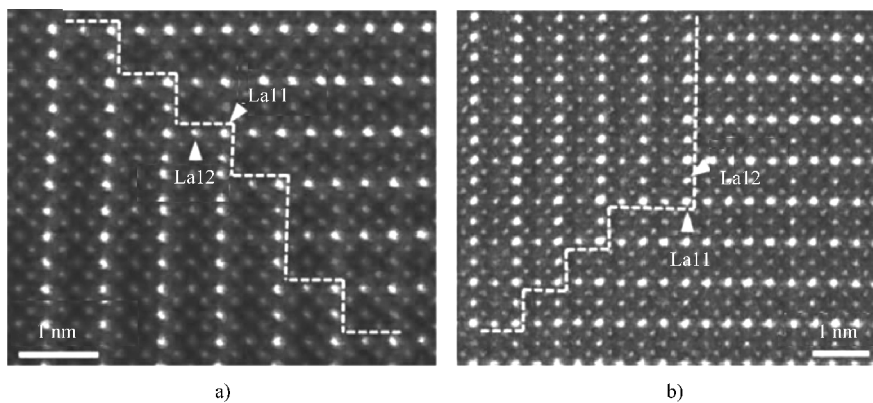


图 4-13 核壳结构纳米壳的演化表征
a) 核壳结构演化前壳纳米尺度边界 b) 核壳结构演化前壳纳米尺度边界

在电极嵌入与脱嵌锂离子的过程中，电极结构变形分为弹性变形和塑性变形。当施加于电极载荷移除后，弹性变形可恢复，这时，只有塑性变形存在。充放电循环后，浓度梯度结构电极不能恢复到初始状态，材料中具有很大的应变梯度。随着离子扩散，电解质和电极的化学势平衡，应变梯度促进离子扩散。塑性



应变表征了电极纳米能量持续释放的结果，离子浓度梯度代表反应趋势，在离子的嵌入和脱出过程中，化学势逐渐平衡，但应变梯度阻碍了充放电循环反应进行。纳米能源电极体积变形，主要由塑性应变承受，这个不可逆变形过程会引发非局部位错密度效应，即存在非均匀塑性变形和非局部位错聚集的纳米尺度物理特性。在电极纳米结构变形的情况下，活性材料的整体流动应力下降，电极非均匀塑性变形引起的几何必需位错密度演化，会导致纳米能源结构的位错、空洞与裂纹等缺陷萌生及演化，直至电极系统失效，具有明确的纳米尺度的化学物理基础。

4.4 碳电极系统耦合模型与纳米尺度传输机制表征

在反复循环过程中，材料体积变化大，电极易粉化而失效。活性物质与电解液直接接触进行脱嵌锂时，会形成不稳定的固体电解质界面（Solid Electrolyte Interface, SEI）膜，严重影响电极的反应性能。另外，电极外表面碳球在充放电时易发生脱落，导致电极循环稳定性降低。基于高功率碳纳米管或石墨烯的复合电极，利用碳纳米管或石墨烯具有较高电子电导率的特性，提高电极倍率特性、循环寿命和导电性。碳作为柔性基体，可吸收体积膨胀时的应力，有助于增强电极安全性，此外，纳米碳材料可有效防止活性材料的团聚与极化，从而提高电极循环稳定性。Zheng 等设计出具有海胆结构的碳球/天然石墨复合储锂电极，如图 4-14a 所示，活性材料分散于这种有活性物质包覆与内填充结构的碳球原位复合结构表面，可以有效避免电极在充放电过程中的团聚、粉化，提高电极循环稳定性。在石墨负极表面原位生长碳球，如图 4-14b 所示，原位生长方法较机械混合得到的电极具有更高的容量和循环性能。碳球具有独特的结构，将活性物质限制在碳球内，不仅可以增强接触面积，改善电极电导性，缓解体积膨胀，而且能有效防止活性物质的粉化、脱落，并抑制其表面不稳定 SEI 膜的形成。同时，碳球具有的纳米限域效应，能增强电极的储锂性能，将活性材料填充到碳纳米管内部空腔，能有效改善电极的性能。在实验方面，他们根据模型，相应地设计了 Cu - C 纳米结构电极，将纳米粒子分别内填充和包覆于碳球中，在脱嵌锂时，碳球对铜的限域作用，可防止 Cu - C 键破坏与铜离子的团聚，确保结构稳定，如图 4-14c 所示，由于碳球内的限域效应，铜在碳球内通过电荷转移和电子交互作用，处于更加还原的状态，并与碳球通过 Cu - C 键牢固结合，从而能保证电极结构具备高的可逆比容量和容量保持率。这个基于位错纳米能源理论的非局部晶体塑性模型包含两个耦合过程：晶体滑移与位错运动耦合，位错密度与位错增殖耦合。在纳米尺度位错和界面的相互作用，对电极性能有重要影响，该纳米能源模型优点为：将位错流类比成热扩散中的热流，来处理其在晶体界面处的堆积、



扩散、反射等行为。因此该模型弥补了现有电极塑性模型的不足，拓宽了电极塑性理论的应用范围。

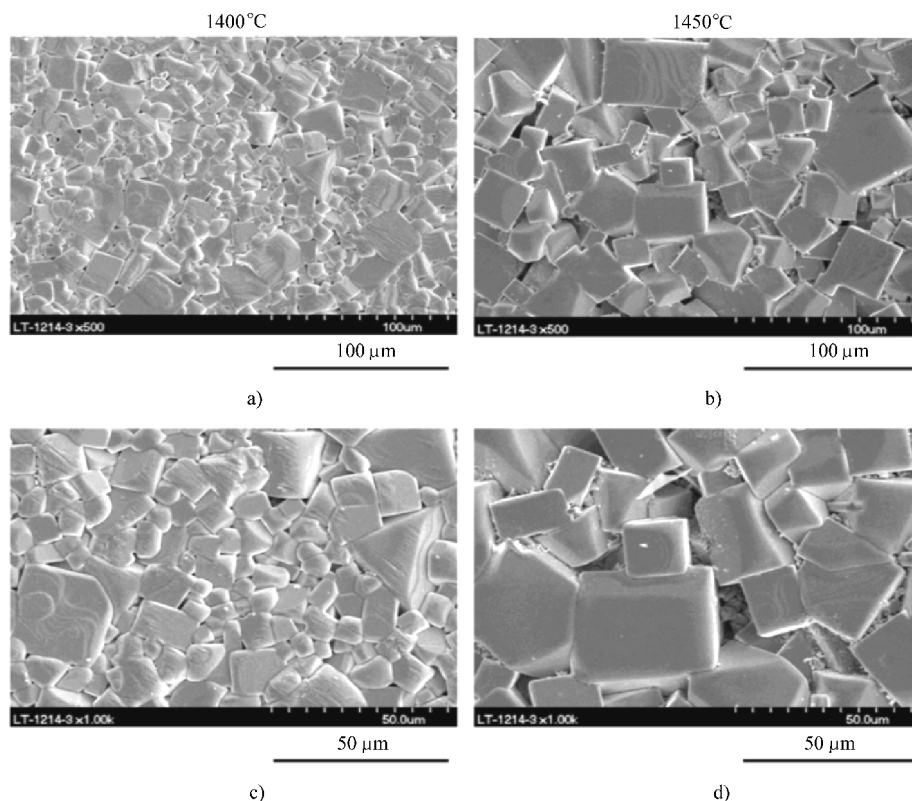


图 4-14 碳球电极微结构表征

a) SEI 薄膜层表征 b) 碳球涂层表征 c) 碳球纳米尺度演化表征 d) 碳球涂层微尺度横截面表征

目前，主要采用两种方法合成石墨复合高容量负极，即原位合成石墨/过渡金属氧化物负极与石墨/活性材料自组装合成石墨烯/硅等负极。锂电池复合石墨电极，在电动车辆储能器件领域取得了成功，但受制于其嵌入锂与脱嵌锂机理和体积变形，其能量密度很难满足未来电动车辆的发展需求。而基于转化反应的电极却可以满足这样的要求。然而，基于转化反应机理的电极在充放电过程中，往往会经受巨大的体积变化和应力梯度，使其循环性能很难达到实际需求。因此，开发一种能随电极材料体积自适应变化的弹性保护外壳显得尤为迫切。针对上述问题，Zhao 等使用两步水浴/水热法，设计出三维褶皱石墨烯自适应包覆硫化镍电极，如图 4-15a 所示。对该电极装配的锂电池进行恒流限容充放电测试发现，在充分电循环 1000 次后，容量基本不衰减。此外，低电流密度下电池可达到 2165mAh/g 的高容量。高分辨透射电镜图片表明，石墨烯保护外壳存在弯曲的



晶格，X 射线光电子能谱分析存在储锂能量强峰，这些都证明了褶皱石墨烯的存在。为了探索电极高性能与电极结构的关系，他们随后对电极与活性物质进行了原位透射电镜和非原位透射电镜、扫描电镜的分析，并通过分子动力学模拟验证。结果显示，褶皱石墨烯包覆的硫化镍材料在锂化过程中的确发生了巨大的体积变化，更重要的是，褶皱石墨烯能伴随着活性物质的体积膨胀而展开，体积收缩而折叠，显示出良好的自适应特性，如图 4-15b 所示。这种基于褶皱石墨烯自适应特性的设计给未来高续航电动车辆高能储锂电极提供了新思路，极具参考价值 and 实际应用潜力，有可能成为未来电动车辆能量储存的助推器。

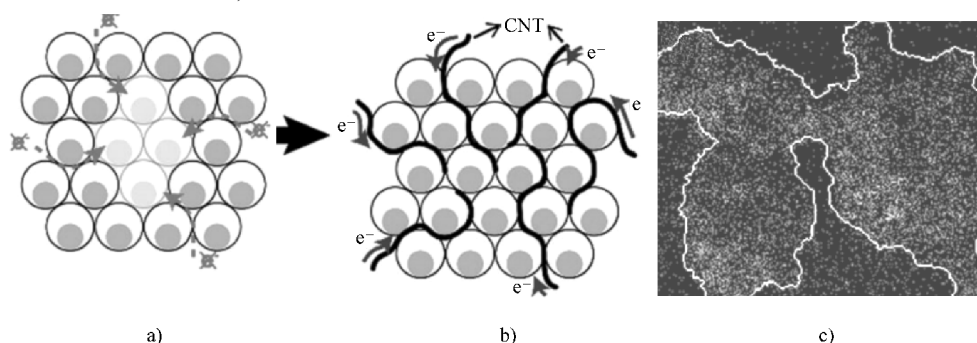


图 4-15 三维褶皱石墨烯自适应包覆硫化镍电极工作原理

a) 电极赤裸颗粒脱/嵌锂过程粉化模型 b) 核壳结构保护层脱/嵌锂过程中，随核与壳体膨胀与收缩的不同，外壳萌生裂纹，核壳之间产生缝隙 c) 可展开/折叠自适应结构，当颗粒脱/嵌锂过程体积连续膨胀，电极有动态缓冲区和三维封装框架，不但提高锂离子和电子的运输效率，而且使电极具备高循环稳定性

4.5 前景与展望

在物理化学与热力学层面，充放电中，锂离子电池电极反复循环嵌锂与脱嵌的运行机制，导致电池储能结构在充放电过程中体积变化大，纳米硅容量与安全性均高于石墨，且来源丰富，价格便宜，存在问题就是体积变化和应力梯度效应，导致常规电解液与硅不相容性，难形成稳定 SEI 膜，充放电效率低，容量衰减加剧。因此，优化设计锂电池能源电极体系很重要，例如，组成电极纳米储能系统的颗粒单向尺寸缩小一半，单个颗粒体积将缩小 8 倍，那么它们在锂化过程中，绝对体积的变化就很小，纳米化有望缓解体积变化机制，减小粒子尺寸到纳米尺度能显著改善电极循环性能。纳米化集中在不同形态结构与性能的研究，包括纳米管、多孔球、石墨烯等，因此，锂电池电极性能归根到底与电池纳米能源系统的选择与设计有关。



随着锂电池价格的进一步下降和容量的进一步提升,电动车辆会越来越便宜,性能越来越好。随着锂电池电动车辆迅猛发展,电极理论会受到科学界越来越多的关注,已经引起了学术界的极大兴趣。在充放电过程中,电极发生的体积变形及纳米尺度非均匀局部位错密度效应,易造成电极失效,进而引起电池综合性能退化。虽然通过纳米化、薄膜化、包覆化等技术,一定程度改善了锂电池的性能,但是必须看到,距离电动车辆苛刻动力能源容量、安全、续航等要求尚有很大距离,研究才刚刚起步。电动车取代燃油车的进程也才刚刚开始。要解决这些问题,迫切需要能源学术界同行共同努力,不但加大研究力度与深度,更要从纳米能源角度入手,探索纳米能量模型、纳米尺度变形机理和结构设计等,利用暗场透射电镜、同步辐射 X 射线技术等技术,表征电极充放电过程中的纳米能源变化,特别要注意,用物理化学与热力学理论具体解释各种电极的具体面临的各种不同失效机理。同时,基于热力学理论,建立电极充放电过程中的热力学耦合模型,找到电极在充放电循环中的失效判据,合理设计电极核壳结构、浓度梯度结构等纳米能源系统。对电极充放电过程中的失效行为进行预测,优化设计电极,结合实验技术,提高电极综合性能,确定锂电池的应用方案,减少电动车电池事故,为可再生和可持续能源在电动车辆上的实际应用提供科学与技术支撑。

参 考 文 献

67

- [1] Robert C, Wang L, Alam M. The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: A review and outlook [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2011 - 15 - 544 - 53.
- [2] Martín - González M, Caballero - Calero O, Díaz - Chao P. Nanoengineering thermoelectrics for 21st century: energy harvesting and other trends in the field [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2013; (24): 288 - 305.
- [3] Reddy M V, Subba R G, Chowdari B V. Metal oxides and oxysalts as anode materials for Li ion batteries [J]. *Chem Rev*, 2013 - 113 - 5364 - 457.
- [4] Goodenough J B, Park K S. The Li-ion rechargeable battery: a perspective [J]. *Chem Soc*, 2013 - 135 - 1167 - 76
- [5] Park K S, Benayad D I, Dylla A, et al. LiFeO₂ - incorporated Li₂MoO₃ as a cathode additive for lithium-ion battery safety [J]. *Chem Mater*, 2012 - 24 - 2673 - 83 .
- [6] Noorden R V. A better battery [J]. *Nature*, 2014 - 507 - 26 - 8.
- [7] Dunn B, Kamath H, Tarascon J M. Electrical energy storage for the grid: a battery of choices [J]. *Science*, 2011 - 334 - 928 - 35.
- [8] Thomas H, Frank A. Design, demonstrations and sustainability impact assessments for plug-in hybrid electric vehicles [J]. *Renew Sustainable Energy Rev*, 2010 - 13 - 115 - 28.
- [9] M Yang, X Zhao, Y Bian, et al. Cation disordered rock salt phase Li₂CoTiO₄ as a potential cathode material for Li-ion batteries [J]. *Mater Chem*, 2012 - 22 - 6200 - 5 .
- [10] Valentine S V. Emerging symbiosis: renewable energy and energy security [J]. *Renew Sustain*



Energy Rev, 2011 – 15 – 4572 – 8 .

- [11] Sun Y, Chen Z, Noh H, et al . Nanostructured high – energy cathode materials for advanced lithium batteries [J]. Nat Mater, 2012 – 11 – 942 – 47.
- [12] Alam H, Ramakrishna S. A review on the enhancement of figure of merit from bulk to nano – thermoelectric materials [J]. Nano Energy, 2013 (2) : 190 – 212.
- [13] Zhao Y, Wang L, Byon H R. High – performance rechargeable lithium – iodine batteries using triiodide/iodide redox couples in an aqueous cathode [J]. Nat Commun, 2013 – 4 – 2907 – 14.
- [14] Biswas K, He J, Blum I D, et al. High – performance bulk thermoelectrics with all – scale hierarchical architectures [J]. Nature, 2012 – 489 – 414 – 8.
- [15] Li J F, Liu WS, Zhao LD, Zhou M. High – performance nanostructured thermoelectric materials. NPG Asia Mater, 2010 – 2 – 152 – 8.
- [16] Li D, Zhou H S. Two – phase transition of li – intercalation compounds in li – ion batteries [J]. Mater today, 2014 – 32 – 181 – 7
- [17] Yu L, Wu H B, Lou X W. Mesoporous $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ hollow spheres with enhanced lithium storage capability [J]. Adv Mater, 2013 – 25 – 2296 – 300.
- [18] Bruce P G, Freunberger S A, Hardwick L J, et al. Li – O_2 and Li – S batteries with high energy storage [J]. Nat Mater, 2012 (11) : 19 – 29.
- [19] Pistoia G. Lithium – ion batteries advances and applications [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2014.
- [20] Ebner M, Marone F, Stampanoni M, et al, Visualization and quantification of electrochemical and mechanical degradation in li ion batteries [J]. Science, 2013 – 342 – 716 – 9.
- [21] Ge M, Rong J, Fang X, et al. Porous doped silicon nanowires for lithium ion battery anode with long cycle life [J]. Nano Lett, 2012 – 12 – 2318 – 23.
- [22] Lei N, Devolder T, Agnus G. Strain – controlled magnetic domain wall propagation in hybrid piezoelectric/ferromagnetic structures [J]. Nat commun, 2013 – 1378 – 1 – 7.
- [23] Magasinski A, Dixon P, Hertzberg B, et al. High – performance lithium – ion anodes using a hierarchical bottom – up approach [J]. Nat Mater, 2010 – 9 – 353 – 8 .
- [24] Nam S, Chung H, Lo Y, et al. , Electrical wind force – driven and dislocation – templated amorphization in phase – change nanowires [J]. Science, 2012 (336) : 1561 – 1566.
- [25] Krivanek O, Chisholm M, Nicolosi V, et al. Atom – by – atom structural and chemical analysis by annular dark – field electron microscopy [J]. Nature, 2010 – 464 – 571 – 4
- [26] Aert S, Batenburg K, Rossell M, et al. Three – dimensional atomic imaging of crystalline nanoparticles [J]. Nature, 2011 – 470 – 374 – 7
- [27] Wang B, Li X, Zhang X, et al. Contact – engineered and void – involved silicon/carbon nano-hybrids as lithium – ion – battery anodes [J]. Adv Mater, 2013 – 25 – 3560 – 5 .
- [28] Jung D. Spray drying method for large – scale and high – performance silicon negative electrodes in Li – ion batteries [J]. Nano Lett, 2013 – 13 – 2092 – 7.



- [29] Chan K Y, Li C Y. Electrochemically enabled sustainability [M]. Boca Raton: The Chemical Rubber Company Press, 2014.
- [30] Hitzeroth M, Megerle A. Renewable energy projects: acceptance risks and their management [J]. Renew Sustain Energy Rev, 2013 - 27 - 576 - 84.
- [31] Song B H, Liu H W, Liu Z W, et al. High rate capability caused by surface cubic spinels in Li - rich layer - structured cathodes for Li - ion batteries [J]. Sci Rep, 2013 - 3 - 3094 - 106.
- [32] Hirmer S, Cruickshank H. The user - value of rural electrification: an analysis and adoption of existing models and theories [J]. Renew Sustain Energy Rev, 2014 - 34 - 145 - 54.
- [33] Suenaga K, Koshino M. Atom - by - atom spectroscopy at graphene edge [J]. Nature, 2010 - 468 - 1088 - 90.
- [34] Magasinski A, Dixon P, Hertzberg B, et al. High - performance lithium - ion anodes using a hierarchical bottom - up approach [J]. Nat Mater, 2010 - 9 - 353 - 8.
- [35] Wang J J, Chen - Wiegart Y K, Wang J. In operando tracking phase transformation evolution of lithium iron phosphate with hard X - ray microscopy [J]. Nat commun, 2014 - 5 - 4570 - 80.
- [36] Zhang H, Yu X, Braun P. Three - dimensional bicontinuous ultrafast - charge and - discharge bulk battery electrodes [J]. Nat Nanotechnol, 2011 - 6 - 271 - 5.
- [37] Malik R, Zhou F, Ceder G. Kinetics of non - equilibrium lithium incorporation in LiFePO_4 [J]. Nat Mater, 2011 - 10 - 587 - 90.
- [38] Volder D, Tawfick S, Baughman R, et al. Carbon nanotubes: present and future commercial applications [J]. Science, 2013 - 339 - 535 - 9.
- [39] Malik R, Abdellahi A, Ceder G. A critical review of the Li insertion mechanisms in electrodes [J]. Electrochem Soc, 2013 - 160 - A3179 - 97.
- [40] Pikul J H. High - power lithium ion microbatteries from interdigitated three - dimensional bi - continuous nanoporous electrodes [J]. Nat Commun, 2013 - 4 - 1732 - 47.
- [41] Wang J J, Yang J L, Tang Y J, et al. Size - dependent surface phase change of lithium iron phosphate during carbon coating [J]. Nat commun, 2014 - 5 - 3415 - 22.
- [42] Aravindan V, Shubha N, Ling W, et al. Constructing high energy density non - aqueous Li - ion capacitors using monoclinic TiO_2 - B nanorods as insertion host [J]. Mater Chem, 2013 - A1 - 6145 - 51.
- [43] Wu H, Yu G H, Pan L J, et al. Stable Li - ion battery anodes by in - situ polymerization of conducting hydrogel to conformally coat silicon nanoparticles [J]. Nat commun, 2013 - 4 - 1943 - 9.
- [44] Wei L, Yushin G. Nanostructured activated carbons from natural precursors for electrical double layer capacitors [J]. Nano Energy, 2012 - 1 - 552 - 5.
- [45] Favors Z, Wang W, Bay H H, et al. Scalable synthesis of nano - silicon from beach sand for long cycle life li - ion batteries [J]. Sci Rep, 2014 - 4 - 5623 - 30.
- [46] Wu H, Cui Y. Designing nanostructured Si anodes for high energy lithium ion batteries [J].



Nano Today , 2012 - 7 - 414 - 29 .

- [47] Yi R, Dai F, Gordin M L, et al. Micro - sized Si - C composite with interconnected nanoscale building blocks as high - performance anodes for practical application in lithium - ion batteries [J]. Adv energy mater, 2013 (3) : 295 - 300.
- [48] Thangadurai V, Narayanan S, Pinzaru D. Garnet - type solid - state fast Li ion conductors for Li batteries: critical review [J]. Chem Soc Rev, 2014 - 43 - 4714 - 27.
- [49] Wu H, Chan G, Choi J W, et al. Stable cycling of double - walled silicon nanotube battery anodes through solid - electrolyte interphase control. Nat nanotechnol, 2012 - 10 - 1038 - 44.
- [50] Suo L M, Hu Y S, Li H, et al. A new class of solvent - in - salt electrolyte for high - energy rechargeable metallic lithium batteries [J]. Nat Commun, 2013 - 4 - 148 - 53.
- [51] Shin B R, Nam Y J, Kim J W, et al. Interfacial architecture for extra Li^+ storage in all - solid - state lithium batteries [J]. Sci Rep, 2014 - 4 - 5572 - 81.
- [52] Jung D S, Hwang T H, Park S B, et al. Spray drying method for large - scale and high - performance silicon negative electrodes in Li - ion batteries [J]. Nano Lett, 2013 - 13 - 2092 - 7.
- [53] De Volder M F L, Tawfik S H, Baughman R H, et al. Carbon nanotubes: present and future commercial applications [J]. Science, 2013 - 339 - 535 - 9.
- [54] Liu N, Lu Z D, Zhao J, et al. A pomegranate - inspired nanoscale design for large - volume - change lithium battery anodes [J]. Nat nanotechnol, 2014 - 9 - 187 - 92.
- [55] Yi R, Dai F, Gordin M L, et al. Micro - sized Si - C composite with interconnected nanoscale building blocks as high - performance anodes for practical application in lithium - ion batteries [J]. Adv energy mater, 2013 (3) : 295 - 300.
- [56] Catalan G, Seidel J, Ramesh R, et al. Domain wall nanoelectronics. Rev Mod Phys, 2012 - 84 - 119 - 56.
- [57] Wang C, Wu H, Chen Z, et al. Self - healing chemistry enables the stable operation of silicon microparticle anodes for high - energy lithium - ion batteries [J]. Nat Chem, 2013 - 17 - 1802 - 9.
- [58] Tee B C, Wang C, Allen R, et al. An electrically and mechanically self - healing composite with pressure - and flexion - sensitive properties for electronics skin applications [J]. Nat Nanotechnol, 2012 - 7 - 825 - 32.
- [59] Sathya M, Rousse G, Ramesha K, et al. Reversible anionic redox chemistry in high - capacity layered - oxide electrodes [J]. Nat Mater, 2013 - 12 - 827 - 35 .
- [60] Bouchet R, Maria S, Meziane R, et al. , Single - ion BAB triblock copolymers as highly efficient electrolytes for lithium - metal batteries [J]. Nat Mater, 2013 - 12 - 452 - 7
- [61] Szczech J R, Jin S. Nanostructured silicon for high capacity lithium battery anodes. Energy Environ Sci, 2011 (4) : 56 - 72 .
- [62] Zhao Y L, Feng J G, Liu X, et al. Self - adaptive strain - relaxation optimization for high - energy lithium storage material through crumpling of graphene [J]. Nat commun, 2014 - 5 - 4565 - 73.



- [63] Chen Y, Kushner A M, Williams G A, et al. Multiphase design ofautonomic self – healing thermoplastic elastomers [J]. Nat Chem, 2012 –4 –467 –72.
- [64] Li Y, Chen S, WuM, Sun J. Polyelectrolyte multilayers impart healability tohighly electrically conductive films [J]. Adv Mater, 2012 –24 –4578 –82.
- [65] Palleau E, Reece S, Desai S C, et al. Self – healingstretchable wires for reconfigurable circuit wiring and 3D microfluidics [J]. Adv Mater, 2013 –25 –1589 –92 .
- [66] Pasta M, Wessells C D, Huggins R A, et al. A high – rate and long cyclelife aqueous electro- lyte battery for grid – scale energy storage [J]. Nat Commun, 2012 –3 –1149 –56.
- [67] Hassan F M, Chabot V, Elsayed A, et al. Engineered sielectrode nanoarchitecture; a scalable treatment for the production of next – generation Li – ion batteries [J]. Nano Lett, 2014 –14 –277 –83.
- [68] Zheng G Y, Lee S W, Liang Z, et al. Interconnected hollow carbon nanospheres for stable lithi- um metal anodes [J]. Nat nanotechnol, 2014 –10 –1038 –44.
- [69] Zhao Y, DingY, Li Y, et al. A chemistry and material perspective on lithium redox flow bat- teries towards high – density electrical energy storage [J]. Chem Soc Rev, 2015 (626): 139 –168.
- [70] Jiang C, Zhang J. Nanoengineeringtitania for high rate lithium storage: areview [J]. Mater Sci Technol, 2013 (29) : 97 –122.
- [71] Xiao J, Zheng J, Li X, et al. Hierarchically structuredmaterials for lithium batteries [J]. Nanotechnology, 2013 –24 –424 –34.

第 5 章 电动车辆制动系统电磁 能量回收技术

石油资源不可再生，全球气候变暖给人类敲响了保护环境的警钟，政府决策部门和汽车制造厂商必须考虑汽车工业可持续发展。此外，汽车制造厂商也顺势而动，以“环保”为卖点，吸引消费者，开拓未来市场空间。因此，环保节能型汽车面临发展的良好机遇。专家表示，这类节能型汽车虽有一定发展，但在国际市场上所占份额很少，这种现状与发展环保节能型汽车面临的困难有关：电动车因充电的限制无法远行的问题难以解决；天然气与石油一样是不可再生的资源，而且需要遍及各地的充气站网络保障；混合动力车一车两台发动机，自身重量增加，消耗大，价格较贵，短期难被普通消费者接受；生物燃料虽是从植物中提炼，但生产成本较高。由于价格偏高、加油充气不便等原因，目前广大消费者还难以承受购买、使用这类汽车的负担。而业内专家普遍看好的氢能技术开发至少还要等 15 年。生物燃料可以大范围替代汽油和柴油的产品，但欧盟专家认为，生物燃料仍处于萌芽状态。欧盟只有法国、瑞典、德国使用生物燃料最多，但也仅占燃料消费比例的 1%，市场极其狭窄。这些都是环保节能型汽车当前面临的困难。由于环保节能型汽车发展面临一定困难，短期内难形成规模，目前要减少汽车废气排放，主要还是靠汽车制造厂商不断提高汽车技术含量，降低油耗，控制并减少废气排放对大气的污染。ABS 制动系统大大增加了行驶过程中的安全系数。对于制动能进行合理的回收，等于是二次节能。车辆在城市循环工况中，大约有一半的能量以制动热量的形式消耗掉，如果能回收被消耗的这部分能量，车辆行驶所需要的燃料将大大减少，这对提高车辆的燃油经济性和排放性能有重要意义。

传统的汽车很难具有这一功能，而混合动力车辆具有较大功率的发电机和大容量动力电池，能将多余的能量转换为电池化学能储存起来，在必要时为车辆提供能量。使汽车正常制动的同时对汽车在制动时损失的动能进行有效的回收。其原理就是应用电磁感应原理，制动线圈在制动盘（电磁铁，其中通的是直流电）中转动产生电流，制动盘中的磁场对通有电流的制动线圈就会产生电磁力，通过变速系统降低转速，增大制动力矩，从而产生对汽车的可靠的制动力，对行驶的汽车进行制动。为达到使制动力平稳的效果，制动线圈所在的回路在汽车制动时必须能提供稳定的强电流，以使得制动线圈在电磁鼓的磁场中能受到理想的制动力，进而能使制动的过程变得更加平稳。参照 ABS 制动原理，通过 ECU 来控制



电磁盘中电磁铁上的电流的大小、导通和截至，从而提高制动的稳定性能和安全性能。为了电磁制动能顺利地完成制动过程，必须保证制动线圈和制动盘所在的电路能保持正常的通路，在每次汽车起动前添加的检测电路会自动检测制动线圈和制动盘所在的电路是否正常，如果不正常就不能正常起动，并且发出警告，让驾驶人知道是制动电路出问题了，并及时维修，要是在途中制动能量回收系统电路出现故障，也会采取相应的措施，以保障行车的安全。由于制动电路简单，所以故障率也很低，且维修起来也很方便，电磁制动能量回收系统在制动的同时会有电流的产生，可设计相关的电路对制动时产生的这部分电流进行回收，达到能源二次利用的目的，从而节约能源。车辆制动能量的回收方式为蓄电池储能，较容易实现且成本低。能实现安全快速制动，有足够的制动力矩，保留了 ABS 防抱死制动功能，在制动同时能对制动能的回收再利用，利用电磁制动原理，结构简单方便。

5.1 电磁系统结构设计

电磁制动能量回收系统工作时，线圈上通以由 ECU 控制的直流电源提供的电流，产生电磁场，当转子（与车轮固定）转动时，转子线圈上便产生了电动势，由于转子处在闭合回路中，便在闭合回路中产生了电流，电磁场对通有电流的转子便产生了电磁力，从而产生了阻尼。为了能回收在汽车制动时产生的这部分电能，使制动能量回收系统能产生平稳的制动力，必须保证制动线圈所在的电路在制动时能保持提供给制动线圈稳定的强电流，要使电磁制动时能正常地回收电能，还得保持电压的相对稳定。在正常制动时，车轮转速降低，ECU 不会给 HCU 发出信号，电磁阀动作时制动主缸的液压传到制动能量回收系统，ABS 不起作用，但是即使在这种情况下，ABS 也一直监测着车轮的减速度，当轮速传感器信号表明车轮正在趋于抱死时，ECU 给液压控制单元发出控制电流，激活电磁阀，电磁阀的动作将制动回路和主缸断开，停止制动压力继续增长，保持不变；如果轮速传感器的信号表示车轮还是减速快，ECU 就给液压控制单元发出较大的电流，电磁阀的阀杆移动的更远，打开制动回路的旁通通道，制动能量回收系统的压力减小，使车轮的制动减弱；当轮速传感器的信号表明由于制动液压力减小车轮重新加速时，ECU 停止向液压制动单元发出电流，关闭电磁阀，制动液的压力又增大，又使车轮始减速，每秒钟这一循环重复 4~6 次，ABS 控制过程中液压控制单元改变制动液的压力，使制动踏板发生微小振动，这是很正常的。制动过程中，对安全的要求是第一位的。需要找到电制动和机械制动的最佳覆盖区间，在确保安全的前提下，尽可能多地回收能量。具有能量回收系统的制动能量回收系统的制动过程应尽可能地与传统的制动过程近似，这将保证在实际



应用中，更具吸引力，可以为大众所接受。电动汽车中常用的电池为锂电池。充电时，避免因充电电流过大或充电时间过长而损害电池。

根据电池放电深度的不同，电池可接受的最大充电电流、电池可接受的最大充电时间、能量回收停止时电机的转速及与此相对应的充电电流值均不同。电磁阀的动态响应特性除了与电磁阀的结构参数（如回位弹簧刚度、摩擦力水平）和材料特性有关外，主要取决于电磁阀电磁场的动态响应特性。指出电磁阀电磁场的动态响应特性取决于电磁阀的主工作气隙、磁路截面积和线圈匝数等参数。求解电磁阀电磁场动态特性问题可归结为电磁场微分方程的边值问题与初值问题，本章探讨高效、精确地建立电磁阀电磁场有限元模型并求解电磁阀电磁场响应特性的方法。建立电磁阀的电磁场模型，模型中，将线圈以及阀体、电磁阀附近的空气、本体等文献忽略部分的磁场作为整个电磁场有限元模型的一部分，并考虑了材料非线性迟滞特性的影响。研究了不同的线圈电流和阀芯开度状态下电磁阀磁场的磁矢势、磁通密度和磁场强度，以及阀芯所受的电磁力和线圈电感的动态响应特性。借鉴国内外的结构，根据控制要求和生产条件，实车图如图 5-1 所示，总体布置如图 5-2 所示。

74

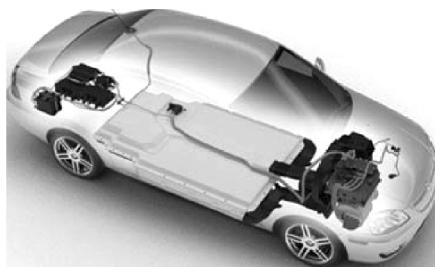


图 5-1 实车图

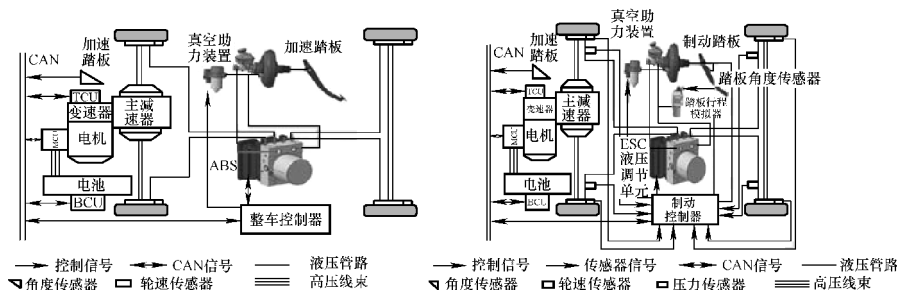


图 5-2 总体布置

电磁系统必须具有良好的电磁、流场和机械响应特性。同时，电磁阀要有可靠的控制性能，保证对机电液耦合系统的准确控制。某电磁阀的整体结构如图 5-3 所示，电磁阀电子控制单元如图 5-4 所示。电子控制单元是控制核心部件，它准确控制往复式柱塞泵，在电动机偏心轴的驱动下，将制动液从低压储能器泵



入缓冲器，返回制动系统。

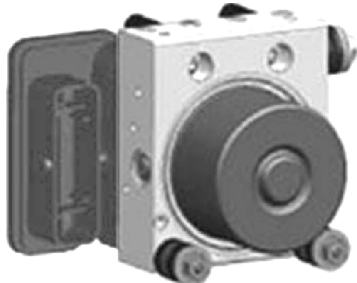


图 5-3 电磁阀的整体结构

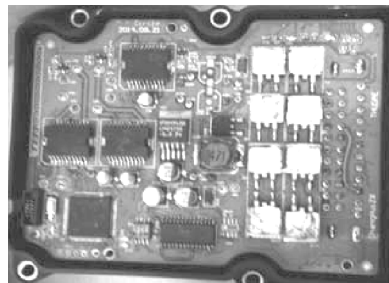


图 5-4 电磁阀电子控制单元

5.2 电磁制动能量回收系统的电磁机理

电磁阀是一种常闭阀，通过电磁力和回位弹簧的复位力驱动动铁并带动推杆移动以达到阀的开和关。在给线圈加电压之前，动铁和推杆在回位弹簧的作用下，推杆下端的球阀与阀座紧密结合，阀处于关闭状态；给线圈加上工作电压，线圈电流逐渐增大，动铁和推杆在逐渐增大的电磁力的作用下，克服弹簧作用力和摩擦力向上运动，阀进入打开状态^[10-15]。电磁阀的动铁和定铁是用软磁材料制成的，在它们相对的极端面上装有非磁性垫片，材料使用铝青铜，称为隔磁片。它的作用是使动铁在吸合后仍与定铁留有一定的小气隙，这样当线圈断电时有剩磁 B_r ，由于气隙的存在使磁路工作在退磁曲线上，由于软磁材料的矫顽磁力 H_c 很小，所以只要有极小的气隙，工作点就沿迅速下降的退磁曲线而大大下降，使磁感应强度大大减小，缩短释放时间，避免动铁粘住不释放的情况。电磁阀电磁场的动态特性包括线圈电流 i ，电磁力 F_m ，线圈电感 L ，阀芯位移 x ，磁链 ψ 等参数相互之间的关系。其电磁场动态过程可以用电磁线圈非线性电磁微分方程式表示：

$$\begin{cases} U = Ri + \frac{d\psi}{dt} \\ L = \frac{\psi}{i} \end{cases} \quad (5-1)$$

式中， U 表示电磁线圈驱动电压； R 表示线圈回路的电阻； i 表示线圈电流； ψ 表示磁链； L 表示线圈电感。

对于软磁材料，电感 L 不仅与动铁位置有关，在考虑了磁感应强度与磁场强度 ($B-H$) 非线性特性后，还与电流有关，即 $L = L(x, i)$ 。则有

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{d(Li)}{dt} = \frac{dL(x, i)}{dt}i + L \frac{di}{dt} = \frac{\partial L}{\partial x} \frac{dx}{dt}i + \left(\frac{\partial L}{\partial i}i + L \right) \frac{di}{dt} \quad (5-2)$$



由式 (5-1) 和式 (5-2) 可得

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L + i \frac{\partial L}{\partial i}} \left(U - Ri - \frac{\partial L}{\partial x} i v \right) \quad (5-3)$$

同时由阀芯的动力学方程可得

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} [F_m(x, i) - K(x + G_0) - F_p - bv - F_f] \\ \frac{dx}{dt} = v \end{cases} \quad (5-4)$$

式中, v 表示阀芯组件 (动铁和推杆) 的移动速度; m 表示阀芯组件质量; F_m 表示电磁力 (它是阀芯位移 x 和线圈电流 i 的函数); K 表示回位弹簧刚度; F_p 表示阀芯组件所受液压反力; b 表示阻力速度相关系数; x 表示阀芯位移; G_0 表示弹簧预紧量; F_f 表示摩擦力。

根据电磁阀的几何结构模型, 建立了电磁场模型。电磁场模型在结构上相对于电磁阀的几何结构作了如下修改: ①由于动铁和推杆使用的材料相同, 结构上通过压制装配结合在一起, 因此这两个部件视为一体; ②隔磁管是某种合金, 属于非铁磁性材料, 其相对磁导率 $\mu_r \approx 1$, 在电磁场分析时将其磁特性视作与空气一致; ③回位弹簧对电磁力和电感的计算没有影响, 不将其考虑进电磁场模型里。此外, 未对电磁阀的几何结构作简化。由于电磁阀之外也存在磁场, 为了获得更准确的结果, 在电磁阀模型基础上, 对其周围的空气和其他非磁性材料 (包括本体等) 也进行了建模, 将漏磁和电磁阀间的互感因素考虑在内, 考虑上述影响因素后, 所建模型如图 5-5 所示。对图 5-5 所示模型进行网格划分生成节点和单元, 对动铁和阀体的接触处、主工作气隙等关键区域进行了局部网格细化, 网格划分如图 5-6 所示。

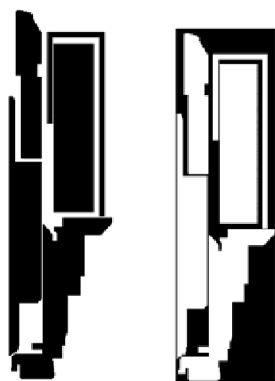


图 5-5 电磁阀几何模型

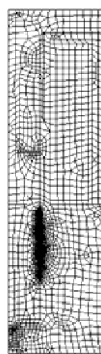


图 5-6 电磁阀有限元模型



电磁线圈周围存在磁场，分布在线圈周围空间。在工程上，为了加强磁场并且使其绝大部分磁通在预定的路径中通过，就沿着这个路径放置一定形状的铁磁物质（即线圈扼铁），使这个路径成为磁通的主要路径。另外，不可避免的还有很少的一部分磁通不在预定的路径中通过，这是磁通的次要路径。这两种路径统称为磁路。通过主要路径的磁通称为主磁通，通过次要路径的磁通称为漏磁通。在电磁阀设计中，要求磁通主要通过主工作气隙（可变）对阀芯产生吸力。

图 5-7 是线圈加上工作电压后，线圈电流达到最大值时的磁力线图。可见，磁力线基本集中分布于线圈扼铁、定铁、动铁和阀体上，只有很小一部分磁场分布于隔磁管和线圈扼铁之外，因此不会因为互感而影响其他电磁阀的工作；由图 5-8 所示的阀芯所受电磁力也可以看出 X 方向的分力相对于 Y 方向的分力很小，线圈电流产生的电磁力能被充分利用于驱动阀芯开启。因此，该电磁阀的几何结构设计是合理的。图 5-9 所示为电磁阀工作范围内不同线圈电流和不同阀芯开度状态下，阀芯所受的电磁力。可以看出，电磁力随着阀芯开度的增大（动铁和定铁间距的减小）和电流的增大而增大，并且随着阀芯开度的增大，电磁力相对电流的增长越来越快。



图 5-7 磁力线

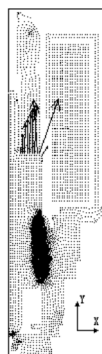


图 5-8 动铁所受电磁力

图 5-10 所示为电磁阀工作范围内不同线圈电流和不同阀芯开度状态下的线圈电感。在计算过程中给线圈加上阶跃电压，计算结果显示，在每个阀芯开度下，线圈电流由零开始增大，电感则迅速增大，到达某个电流值（约 15% 最大电流值）时，电感达到最大值，之后随着电流的再增大，电感逐渐减小。

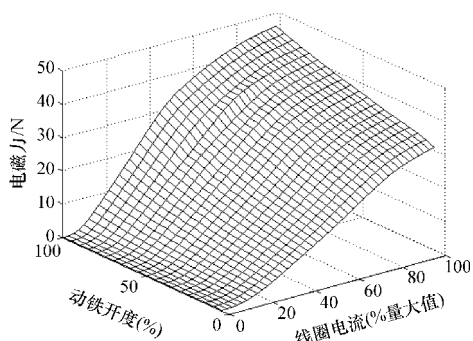


图 5-9 电磁力 - 线圈电流 - 阀芯开度图

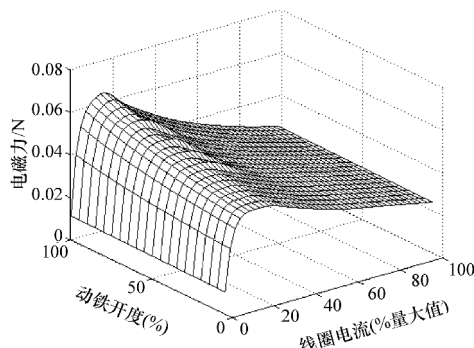


图 5-10 电感 - 线圈电流 - 阀芯开度图

5.3 阀腔流场分析

制动液流经电磁阀阀腔时因动量发生变化会引起液动力。电磁阀阀腔流场动态响应分析中，利用流体动量原理，将制动液视为不可压缩牛顿流体，用断面平均流速和阀腔进出口压差计算单位时间内经过流断面的制动液动量。选择阀腔进出口过流断面及阀腔内壁面为控制面的控制体。制动液在单位时间内流经控制体进、出口过流断面时，由于流速方向及大小发生变化会引起稳态液动力。在阀芯开启及关闭过程中，或电磁阀进出口制动液压差出现变化时，控制体内制动液速度将随时间变化而产生瞬态液动力。本章以减压阀为分析对象，建立减压阀内制动液的湍流模型，建立阀芯所受液动力与阀芯位置和流速、进出口压差的关系。稳态液动力可用式 (5-5) 表示：

$$F_{\text{稳}} = 2\beta C_d C_v b x \Delta p \cos\theta \quad (5-5)$$

式中， β 表示动量修正系数； C_d 表示流量系数； C_v 表示速度系数； b 表示阀口通流截面周长； x 表示阀芯的开启量； Δp 表示阀芯前后压力差； θ 表示制动液流经阀口时流动方向与阀芯轴线之间的角度。

由式 (5-5) 可知，当 β 、 C_d 、 C_v 、 b 和 θ 为定值时， $F_{\text{稳}}$ 与阀芯开启量 x 和阀口前后压力差 Δp 有关。只要阀芯有一开启量 x ，经过阀口的液流就会在阀芯上作用一个稳态液动力，而且不管制动液流经阀口是流入还是流出，阀芯上所受的稳态轴向液动力都是与阀芯开启量 x 成正比，并使阀的开口趋于减小。

因此，稳态液动力对于阀芯的作用相当于阀芯一端的回位弹簧效应。但是这种回位弹簧效应中的弹性刚度不是常量，而是随 Δp 变化的一个随变参量。如果在分析中 Δp 的变化较小，其影响可以忽略不计，则可将 Δp 看成是常量，这样稳态液动力就是常量，可以合并到原有回位弹簧的作用中去。对于液压电磁制动



系统减压阀的回位弹簧力就是使阀芯关小的，稳态液动力相当于使原有回位弹簧的刚度 k 值增大。瞬态液动力可用式 (5-6) 表示：

$$F_{\text{瞬}} = \rho l \frac{dQ}{dt} \quad (5-6)$$

式中， l 表示控制体积中的有效液流长度； ρ 表示制动液密度； Q 表示通过阀口的流量；其表达式为：

$$Q = C_d b x \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (5-7)$$

式中， C_d 表示流量系数； b 表示阀口通流截面周长。

从以上二式可以看出，当 ρ 、 l 、 C_d 、 b 为定值时，瞬态液动力是 $x \sqrt{\Delta p}$ 的导数的函数，与 $\frac{dx}{dt}$ 成正比，即与阀芯运动速度 v 成正比。如果阀口前后的压力差 Δp 变化不大，其影响可以忽略时，可将 Δp 看成常量，则 $F_{\text{瞬}}$ 亦为常量。在建立电磁阀阀腔制动液流体数学模型时，将瞬态液动力看作阻尼项。当制动液从阀口流出时，阀芯上所受的瞬态液动力与阀芯的移动速度方向相反，起阻止阀芯移动的作用，相当于正阻尼。当制动液经阀口流入时，阀芯上所受的瞬态液动力与阀芯的移动速度方向相同，起促进阀芯移动的作用，相当于负阻尼。对于减压阀来说，制动液只能在减压阀阀腔里作单向流动，即只能经阀口流出，阀芯上所受的瞬态液动力在减压阀开启过程起阻止阀芯移动的作用，在减压阀关闭过程则起促进阀芯移动的作用。选择模型控制体的时候，应将问题的边界设在条件已知的地方，如果并不知道精确的边界条件而必须做出假定时，就不要将分析的边界设在靠近感兴趣的区域，也不要将边界设在求解变量变化梯度大的地方。分析开始时还不能肯定电磁阀阀口中哪个地方梯度变化比较大，这就要先作一个试探性分析，然后根据结果来修改分析区域。阀芯附近所在的阀腔是本章要着重分析的区域，也是制动液速度、压力梯度变化较大的区域，因此模型控制体应包含这个区域。试分析后选择如图 5-11 所示的控制体。

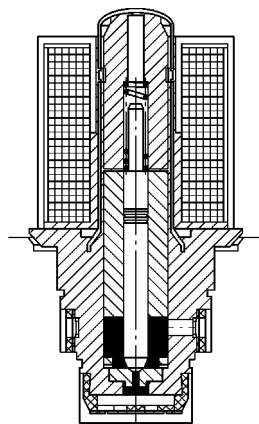


图 5-11 电磁阀阀腔控制体

如果流体的密度在流动过程中保持不变或者当流体压缩时只消耗很少的能量，该流体就可以认为是不可压缩的，不可压缩流的温度方程忽略了流体动能的变化和黏性耗散。在本分析当中，制动液压力的变化所引起的流体密度变化很小，把它看作是不可压缩流。流动可以分为内流和外流，对于内流，除了进口和



出口边界外，流动被壁面对称面约束，减压阀阀腔内的制动液就是典型的内流，除了进口和出口边界，制动液处于阀体、动铁和推杆的壁面以及轴对称面的约束之中。在分析计算中，进口处速度和出口处的压力都规定为均一值，这与实际流场有差别。为减少这些假设对流场分布的影响，人为加大了出口的长度（虚拟长度），以使得真正出口处的速度具有较一致的分布。此外，对于湍流分析，回流区可能已经延伸到出口边界之后，为了使流场在出口之前可以得到充分发展，也应该加长出口后端，如图 5-12 和图 5-13 所示。

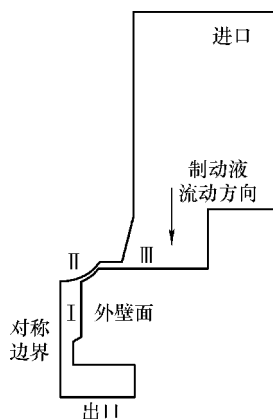


图 5-12 阀腔分析区域及边界

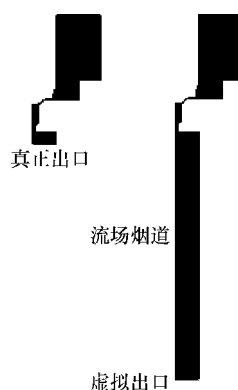


图 5-13 出口虚拟长度

流场中区域 I、II、III 处（图 5-12）的流体梯度变化大，在这些地方网格作了相应的调整：在压力、速度变化梯度大的边界以及狭窄处加大单元密度，而在远离节流孔的出口处，采用大网格单元。由于使用了湍流模型，靠近壁面的区域的网格密度就比采用层流模型密得多，否则如果壁面区域的网格太粗，该网格就不能在求解中准确反映出由于变化很大的梯度对流动造成的显著影响，而在那些长边和低梯度方向一致的单元（如进口和虚拟出口区域）可以有很大的长宽比。合理调节各线的分段数、比率，保证合适的单元长宽比（在梯度变化大的区域要小，在梯度变化不大甚至没有变化的区域则可以较大），并使得单元内角在合适的范围内（ $25^\circ < \text{角度} < 155^\circ$ ），同时使网格密度大的区域逐步向网格密度低的区域过渡，以避免相邻单元尺寸变化过大，提高数值的稳定性。使用映射网格划分，它可以在边界上更好地保持恒定的网格特性，从而得到更精确的结果。阀芯位置改变后，必须重新划分网格。网格划分如图 5-14 所示，图 5-14a 是包括虚拟出口的整个流场有限元网格，图 5-14b 是不包括虚拟出口的流场有限元网格放大图，图 5-14c 是节流孔处流场有限元网格的局部放大图。

流场控制方程的自由度包括流速、压力等场量。通过 ANSYS 后处理程序，在节点自由度计算结果的基础上，以向量图和路径图等可视化形式将节点的速度

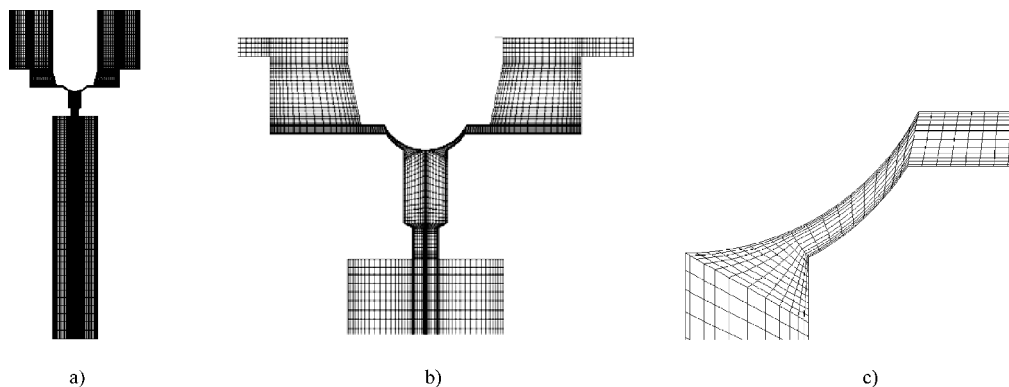
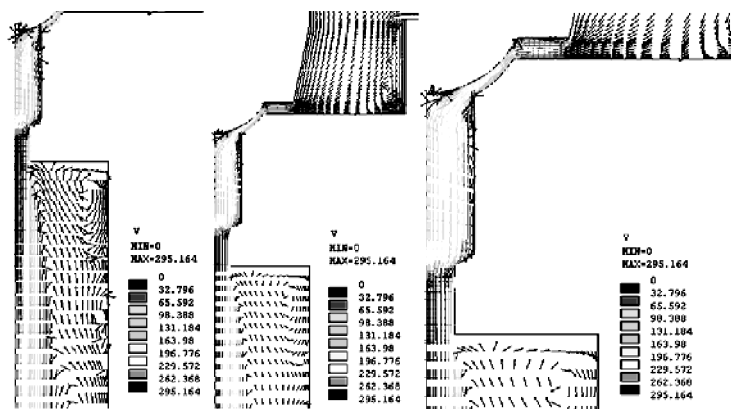


图 5-14 分析区域单元划分和局部放大图

度、压力等表示出来，计算阀芯所受液动力与阀芯开度、进口流速、压力等的关系。下面以阀芯开度 50% 时候为例分析求解结果。图 5-15 所示为阀口附近的有限元节点流速矢量图。在制动液流过阀口后，速度急剧上升，并且制动液的流动在阀口后端湍流发展得更明显。在阀芯开度为 50% 时，沿流动方向流速分量 V_y 等势图如图 5-16 所示（由左至右依次放大），图中速度 V_y 向上为正方向。流动通过真正的出口边界仍继续发展。在阀芯开度大于 18% 时，制动液沿流动方向流速分量 V_y 和流速 V 在节流孔区域 II 迅速增加，在经过区域 I 之后的倒角再一次节流之后，速度上升到最大值，由图 5-17 沿流动方向流速分量 V_y 等势图也可以看到 V_y 在区域 I 处和出口处的壁面出现了回流。

81

图 5-15 流速 V 矢量图（由左至右依次放大）

阀腔压力等势图如图 5-18 所示（由左至右依次放大），在 50% 开度的时候，阀口附近区域的压力梯度已经不明显。计算结果显示，在阀芯开度大于 18% 时，阀芯开度变化对阀口附近区域的压力梯度已经不构成明显影响。图中的压力负值



表明该处压力低于虚拟出口处的参考压力零。

图 5-19 由左至右分别为 50% 阀芯开度下的垂直于流动方向的速度分量 V_x 、沿着流动方向的速度分量 V_y 和合速度 V 流线分布图。在阀口后和出口处已经捕捉到了回流区，尤其在出口处的回流区已经发展得很明显。

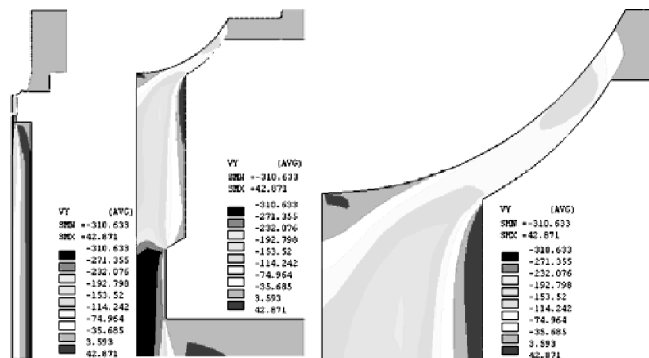


图 5-16 沿流动方向流速分量 V_y 等势图（由左至右依次放大）

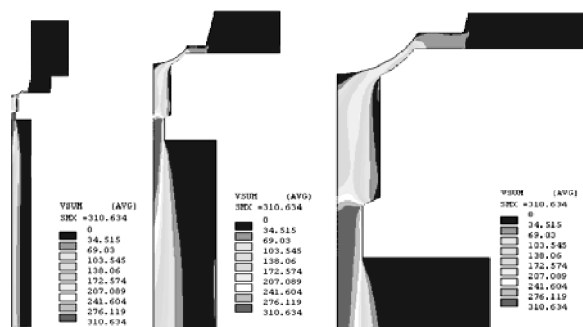


图 5-17 流速 V 等势图（由左至右依次放大）

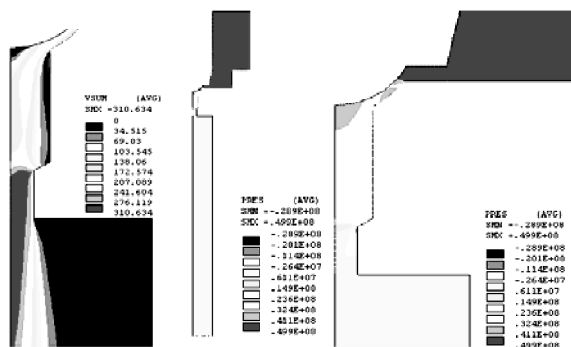
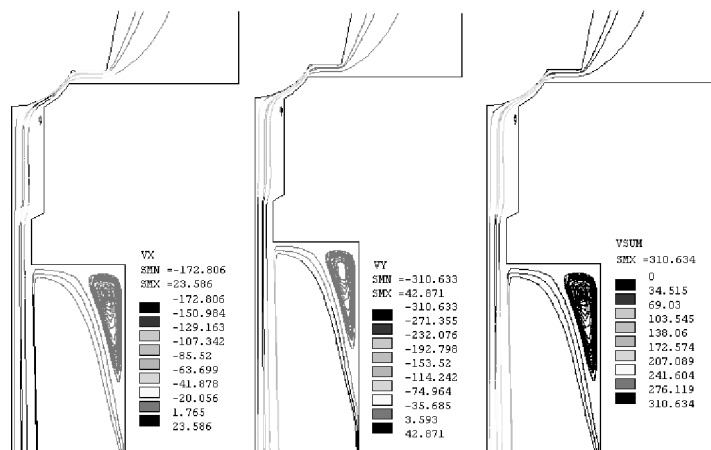


图 5-18 阀腔压力等势图（由左至右依次放大）

图 5-19 速度流线分布图 (由左至右为 V_x 、 V_y 、 V)

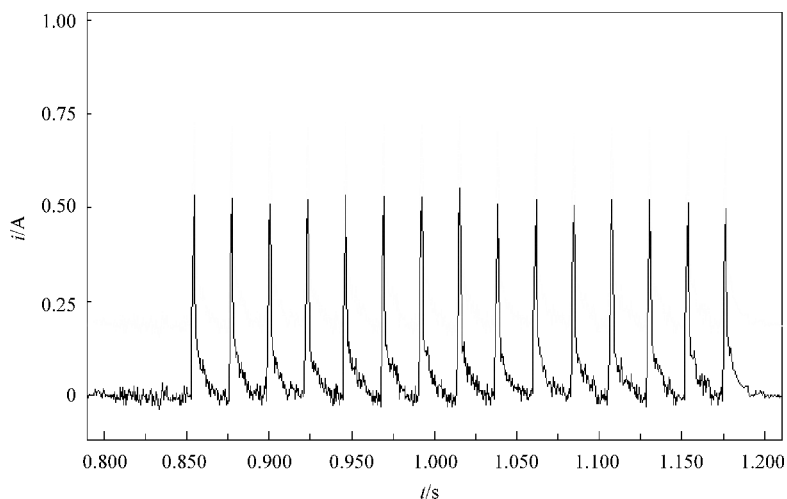
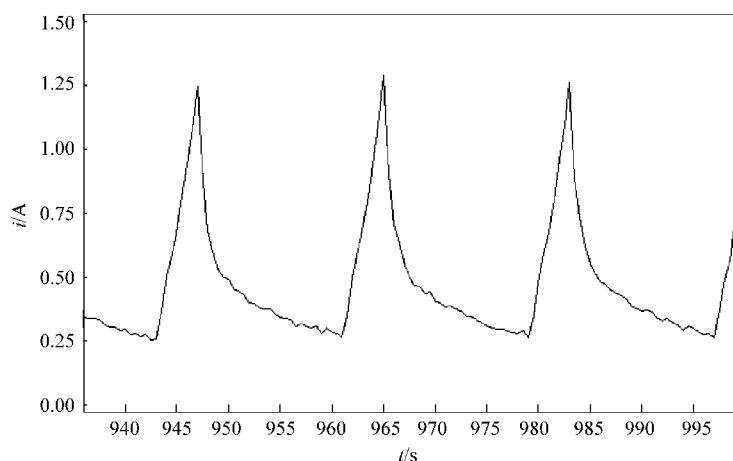
5.4 电磁阀的动态响应特性实验测试

标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型是 ANSYS 分析中的默认模型，也是最简单的湍流模型，通常能提供流动的真实情况，尤其适于计算管道和通道中的湍流流动，但有时会过高地估计湍流流量，也就过高地估计所得到的动能。由于在阀芯与阀座间流体控制面形状变化剧烈，经过分析比较后选用 RNG 湍流模型 (Re - Normalized Group)，它是标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型的扩展，它对于几何形状曲度变化剧烈的情况有很好的计算效果，在大应变区域能产生更为真实的和可靠的结果，这特别适合于分析由强烈加、减速度（如节流口处制动液的状态）和回流的流动。为此，进一步细化有限元网格，降低邻近出口区域的流场梯度。湍流模型在控制方程中使用有效黏性来考虑速度脉动对平均流动的影响，有效黏性等于层流黏性（它取决于流体的物理特性）和湍流黏性之和。在正确的物理特性初始化之后，先不激活湍流模型，并采用较高的黏性。在周期 T ($T > t_{on} + t_{off}$) 固定后，测试减压阀电磁线圈电流响应波形随着脉冲宽度 T_p 的变化规律。线圈电流很小，没上升到触发电流 i_A ，便迅速下降，如图 5-20 所示。

线圈电流如图 5-21 所示，通电时间大于吸合触动时间，但电流不能维持到阀芯完全开启便下降，并且在每个周期能下降至零值。

线圈电流如图 5-22 所示，可以上升至稳定值，也可以下降至零值，为完全响应。

如图 5-23 所示，这时线圈电流可以上升至稳定值，但不可以下降至零值。

图 5-20 $T_p \leq t_1$ 时减压阀开启—关闭过程电流响应曲线图 5-21 $t_1 < T_p < (t_1 + t_2)$ 时减压阀开启—关闭过程电流响应曲线

f_m 表示由吸合时间所确定的频率, $f_m = 1/t_{on}$, 在这个频段范围内, 占空比 D (脉宽 T_p) 较小时, 线圈电流如图 5-24 所示, 电流不能上升到稳定值即开始下降, 但可以回到零值, 如果 $T_p > t_{on}$ 阀芯能到达最大位移处, 否则未达最大位移就开始回位; 占空比 D (脉宽 T_p) 变大时线圈电流如图 5-25 所示, 电流能够上升到稳定值, 但不能回到零值, 阀芯能到达最大位移处, 但不能完全回位。由于 $f_m = 1/t_{on}$, 故当 $f > f_m$ 以后, 电磁阀将不可能得到完全开启状态, 当 $f > 1/t_1$ 时, 阀芯将不对脉冲做出任何反应, 此时 ($f = 260\text{Hz}$) 线圈电流如图 5-26 所示。

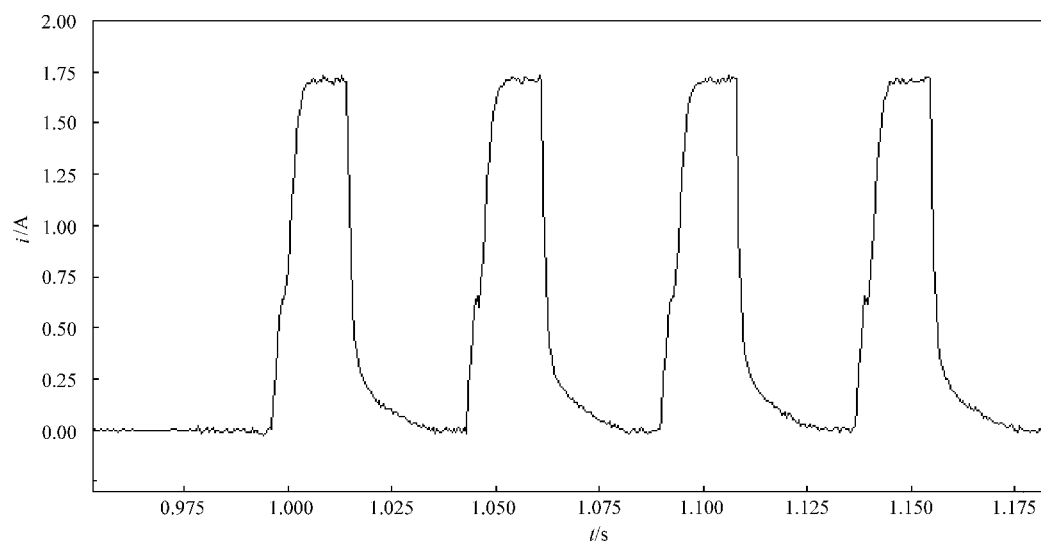


图 5-22 $t_{on} \leq T_p \leq T - t_{off}$ 时减压阀开启—关闭过程电流响应曲线

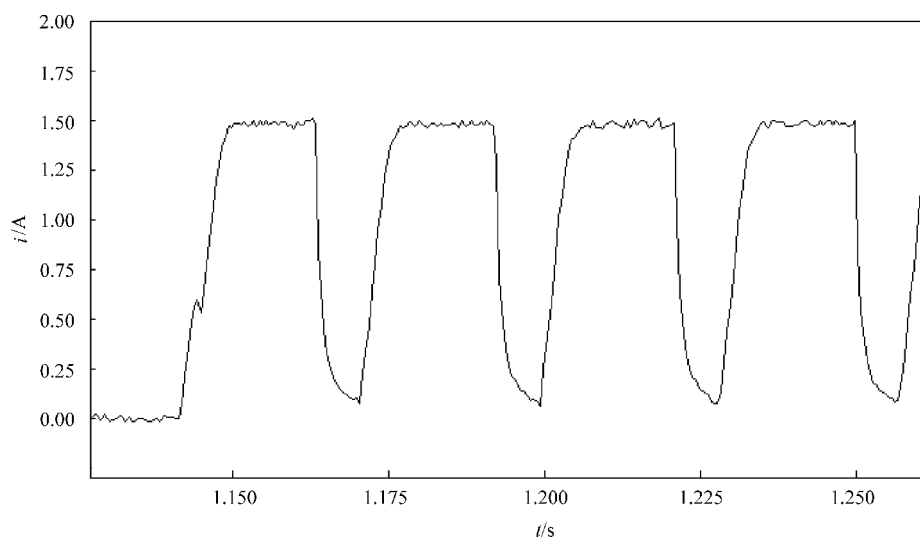


图 5-23 $T - t_{off} < T_p \leq T$ 时减压阀开启—关闭过程电流响应曲线

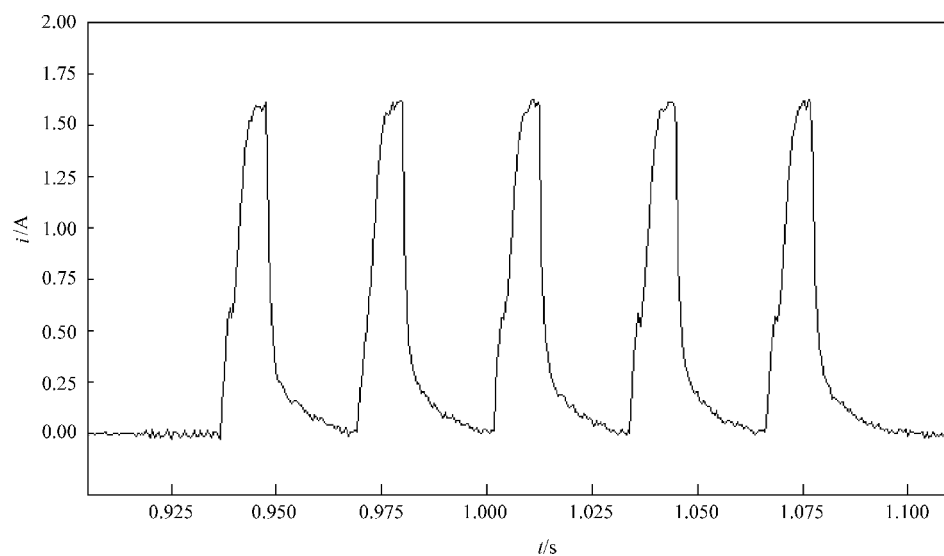


图 5-24 $f_c < f < f_m$ 时减压阀开启—关闭过程电流响应曲线 ($D = 30\%$)

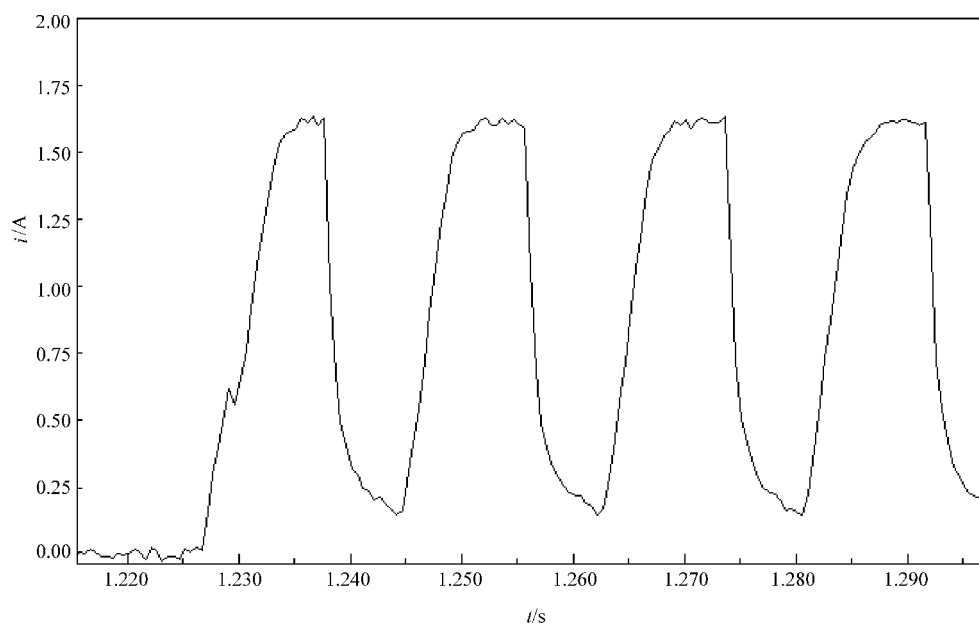
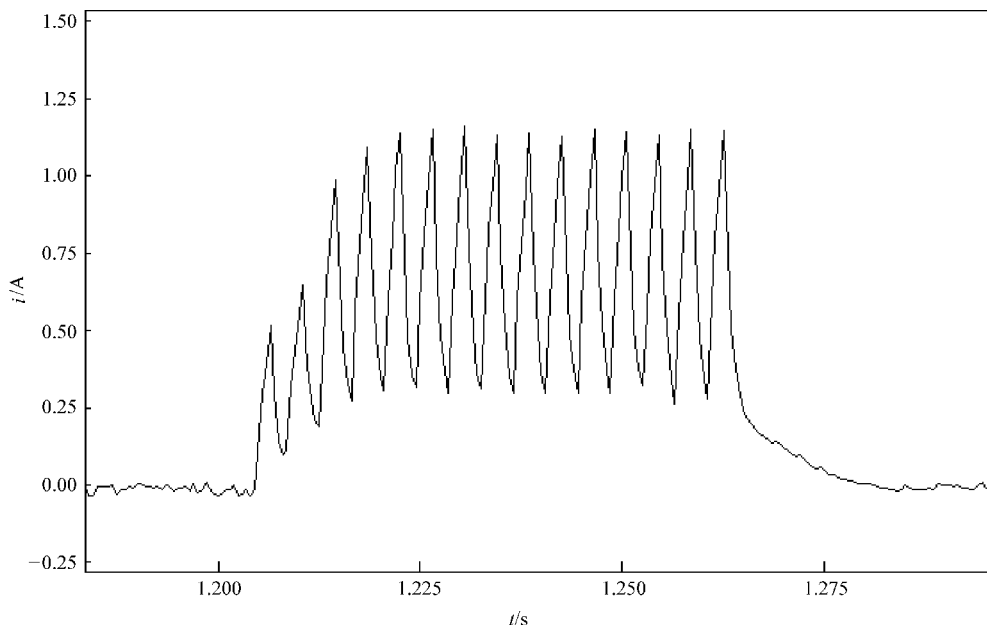


图 5-25 $f_c < f < f_m$ 时减压阀开启—关闭过程电流响应曲线 ($D = 60\%$)

图 5-26 $f > f_m$ 时减压阀开启—关闭过程电流响应曲线

电磁制动系统控制系统在工作时，其中的电路、磁路和制动液流动都处于非稳态，且具有一定电磁惯性和机械惯性，因此需要根据电磁学、机械动力学及流体动力学的基本原理，对电磁阀的工作过程进行理论分析和模拟计算，从而对高速电磁阀的动态响应特性得出定量的认识。当在电磁阀电磁线圈加上（撤去）电压后，阀芯（包括动铁和推杆）不可能立即闭合（释放），而是需要一定的过渡过程。电磁阀的动态响应特性是描述这一过程的动态参数，它主要是指阀芯（包括动铁和推杆）的位移 x 、运动速度 v 、加速度 a 以及电磁吸力 F_m 、电磁线圈电流 i 、线圈磁链 ψ 等参数随时间变化的函数关系，反映了电磁阀的实际工作状态，对其进行深入的研究有助于全面地了解电磁阀的工作特性。对电磁阀动态特性的研究，基于某型号电磁制动系统的两位两通电磁开关阀结构原理图，利用电学原理、力学原理建立其动态数学模型，研究各参量随时间变化过程以及各个参量之间相互关系的规律，分析电磁阀的动态指标，探讨动态过程的进行规律。电磁阀动态特性的计算实质就是电磁阀的仿真。将电磁阀接通电源时，要经历一个渐变吸合过程，动铁和定铁才完全闭合，期间的电磁过程、发热过程、机械过程等都不能瞬时完成，而是有一个过渡过程。同样，在突然撤去电磁线圈电源时也经历一个渐变释放过程。这些都是动态过程。



5.5 电磁阀动态力学模型

电磁阀的动态过程，在电路上遵循电压平衡方程，在运动上遵循牛顿运动方程，在磁场上遵循麦克斯韦方程，在热路上则遵循热平衡方程，这些方程间存在相互的联系，构成了描述动态过程的微分方程组，即

$$\begin{cases} U = i(t) \cdot R(\theta) + \frac{d\psi}{dt} \\ \psi = \psi(x, i) = L(x, i) \cdot i(t) \\ m \frac{d^2x}{dt^2} = F_m(x, i) - K(x + G_0) - b\left(\frac{dx}{dt}\right) - F_p(x) - F_f \\ F_m = F_m(x, i) \\ \frac{d\theta}{dt} = \theta(P, t, \theta_0) \\ x(0) = x_0, i(0) = i_0 \end{cases} \quad (5-8)$$

式中， t 表示时间； U 表示电磁线圈励磁电压； i 表示电磁线圈电流； R 表示电磁线圈电阻，是 θ 的函数； Ψ 表示电磁系统磁链； L 表示电磁线圈电感； m 表示阀芯运动组件（动铁和推杆）的质量； x 表示阀芯运动组件的位移； F_m 表示阀芯所受电磁力； K 表示回位弹簧刚度； G_0 表示回位弹簧预紧量； b 表示阻力速度相关系数； F_p 表示阀芯所受液动力； F_f 表示摩擦力； θ 、 θ_0 表示相应为电磁线圈工作温度和周围环境温度； x_0 表示阀芯组件初始位移； i_0 表示电磁线圈初始电流。电磁阀动态响应的 Simulink 模型如图 5-27 所示。在阶跃信号控制下电磁阀的阀芯位移 x 、速度 v 以及阀芯组件受到的电磁力 F_m 、线圈电流 i 的响应分别如图 5-28 ~

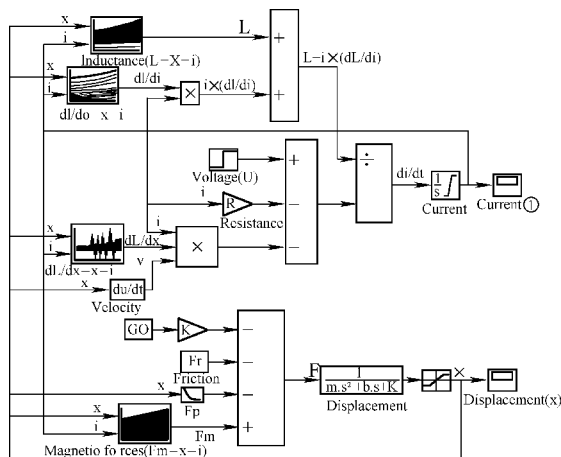


图 5-27 电磁阀动态响应的 Simulink 模型



图 5-32 所示。通电后电磁力增大，经过触动延时，阀芯运动速度迅速上升至峰值再下降，阀芯在触动后约 1ms 后到达最大位移处。撤去电压后，电磁力迅速下降为零，阀芯回位，但是阀芯回位速度峰值比吸合时的速度要小，运动时间也比吸合时间稍长。

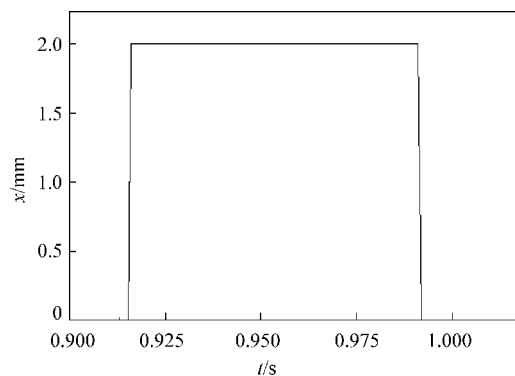


图 5-28 阀芯位移曲线

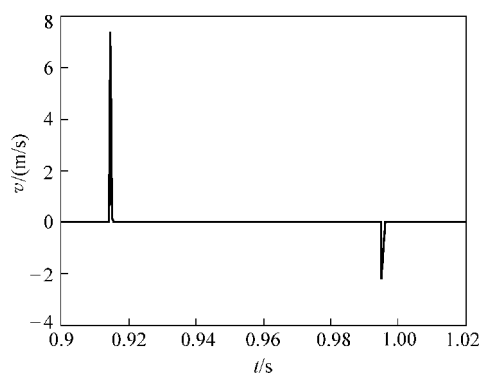


图 5-29 阀芯速度曲线

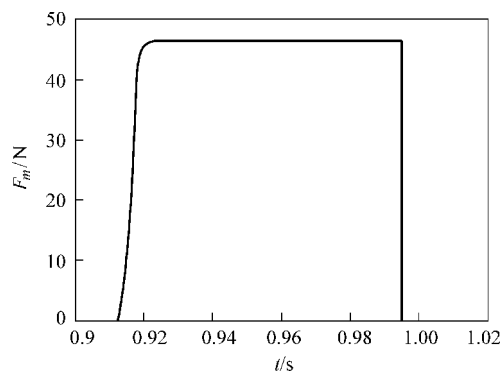


图 5-30 阀芯所受电磁力曲线

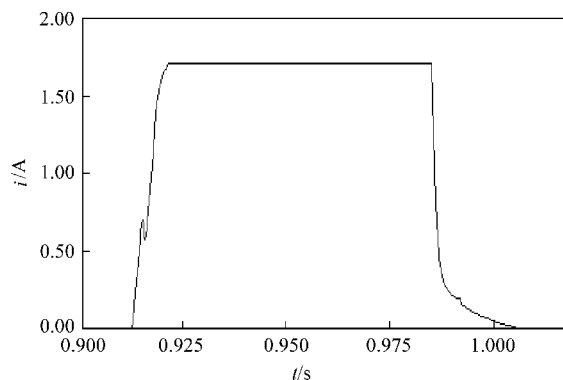
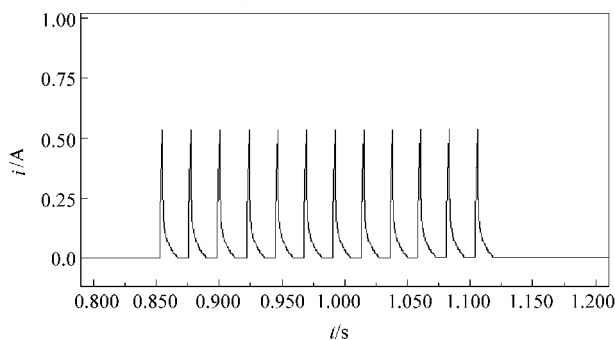
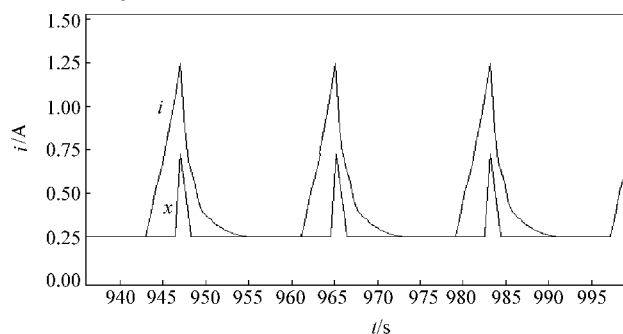


图 5-31 电磁线圈电流曲线

电磁阀的完全响应是指 100% 的开启和 100% 的关闭。要得到完全的开启响应，脉宽 T_p 至少要持续时间 t_{on} ，要得到完全的关闭响应，负脉冲宽度至少要持续 t_{off} 时间。下面以减压阀为例，讨论在调制周期 T 较大 ($T > t_{on} + t_{off}$) 并固定时，电磁线圈电流响应与脉冲宽度 T_p (占空比 D) 之间的关系。减压阀开启—关闭过程响应仿真曲线如图 5-32 所示，线圈电流可以达到触动电流使阀芯触动，但不能维持到阀芯完全开启便下降，这时阀芯的位移响应近似为三角形。

图 5-32 $T_p \leq t_1$ 时减压阀开启—关闭过程电流响应仿真曲线图 5-33 $t_1 < T_p < (t_1 + t_2)$ 时减压阀开启—关闭过程响应仿真曲线



减压阀开启—关闭过程响应仿真曲线如图 5-34 所示, 这时阀芯的运动响应为完全响应, 位移近似梯形。

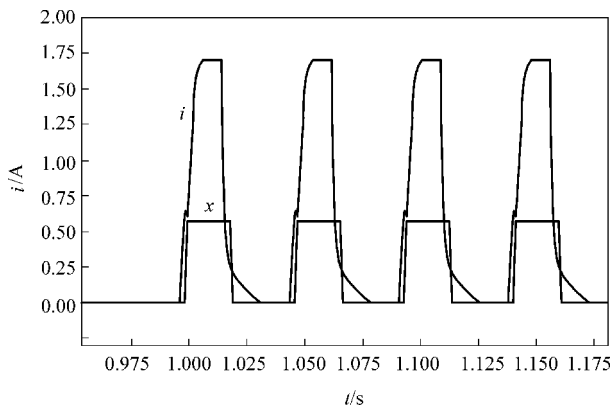


图 5-34 $t_{on} \leq T_p \leq T - t_{off}$ 时减压阀开启—关闭过程响应仿真曲线

这时阀芯的稳态响应波形如图 5-35 中第二个周期所示, 可见线圈电流不能降至 0, 阀芯则不能回到全关闭的位置。 $T - t_{off} < T_p \leq T$ 时减压阀开启—关闭过程响应仿真曲线为梯形。随着调制频率 f 的提高, 不仅会使阀芯位移响应线性范围减小, 直到完全消失, 而且会进入一个完全不同的控制模式。这时得到的响应波形是不完全响应的波形。在每一脉冲信号输入后尚未完成全部过渡过程时, 后面一个脉冲信号又开始, 仿真计算结果表明阀芯的运动将跟随脉宽信号的平均值, 并叠加上调制频率的三角形脉动波。在电磁阀实际工作过程中, 还由于电磁阀的力—位移特性的非线性特征, 使得上述调制过程变得更加复杂。要得到完全的开启响应, 脉冲宽 T_p 至少要持续时间 t_{on} , 要得到完全的关闭响应, 负脉冲宽度至少要持续 t_{off} 时间。因此要得到完全的启闭响应, 控制信号脉冲周期最小应为 $T_c = t_{on} + t_{off}$ 。当周期 T 小于 T_c , 即当调制频率 $f > \frac{1}{T_c}$ 时, 则不论脉宽 T_p (占

空比 D) 为多少, 电磁阀都不能作出完全响应。把 $f_c = \frac{1}{T_c} = \frac{1}{t_{on} + t_{off}}$ 称为临界频率, 它是表征电磁阀动态特性的参数。 f_c 是能够得到完全响应的最高频率, f_c 高表明可以使用较高的调制频率, 响应线性区的范围较大, 响应较快。

f_m 表示由开启时间所确定的频率, 即 $f_m = 1/t_{on}$ 。在这个频段范围内, 占空比 D (脉宽 T_p) 较小时, 线圈电流如图 5-36 所示, 占空比 D (脉宽 T_p) 变大时线圈电流如图 5-37 所示。由于 $f_m = 1/t_{on}$, 故当 $f > f_m$ 以后, 电磁阀不可能得到完全开启状态, 因此使阀的有效控制范围变小, 频率越大控制范围越小。当 $f > 1/t_1$ 时, 阀芯将不对脉冲做出任何反应, 因此可以把 f_m 称为截止频率。

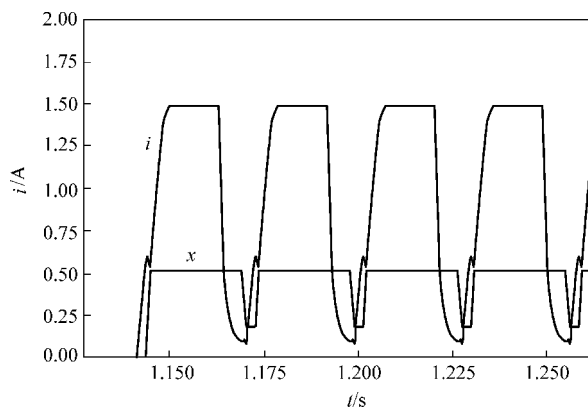


图 5-35 $T - t_{off} < T_p \leq T$ 时减压阀开启—关闭过程响应仿真曲线

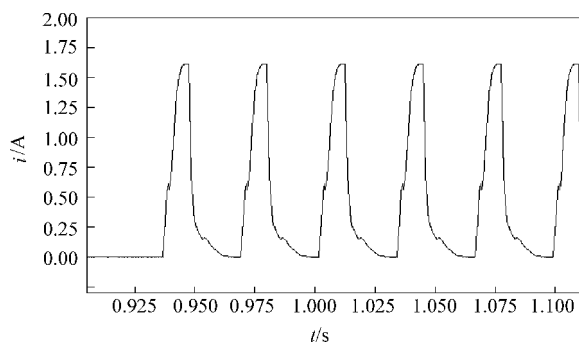


图 5-36 $f_c < f < f_m$ 时减压阀开启—关闭过程电流响应仿真曲线 ($D = 30\%$)

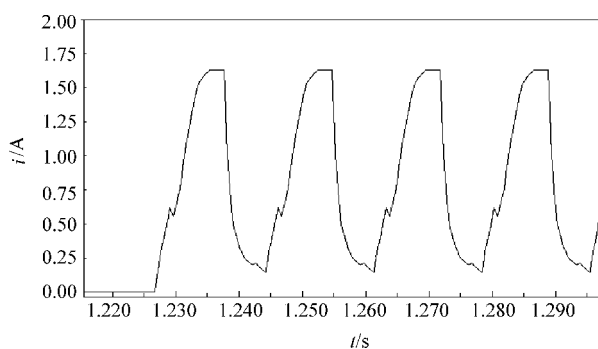


图 5-37 $f_c < f < f_m$ 时减压阀开启—关闭过程电流响应仿真曲线 ($D = 60\%$)

从速度和压力的等势图可以得出结论：增压阀打开时，影响阀口特性的主要是节流孔本身；增压阀动作过程中，影响过渡过程的主要是钢珠与阀座的相对位置等因素。增压阀是常开阀，只考虑节流孔本身对流量—压力特性的影响。相



反, 研究制动液对阀芯的作用力时, 必须考虑阀芯的位置, 以确定液力对电磁阀的动态过程的影响。由于规定出口压力等于 0, 且“虚拟长度”与阀芯的设计长度相当, 阀芯边界的压力积分即近似于阀芯所受到的液压反作用力 F_p 。图 5-38 是不同流量 Q 下 F_p 与阀开度的关系。当阀口开度大于 20% 后, 液压差没有对阀芯造成显著的反力。当然, 增压阀闭合/开启的动态过程中, 流量 Q 是不恒定的。当阀口开度很小 (如小于 5%)。

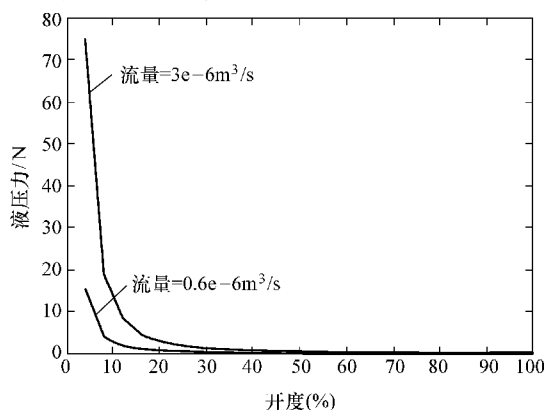


图 5-38 阀芯液压作用力 - 阀开度

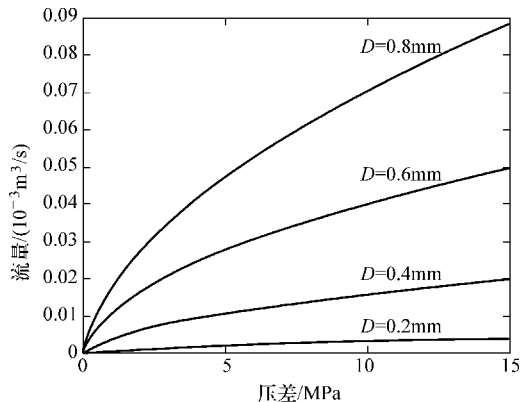


图 5-39 流量 - 压力特性

电磁阀的流量 - 压力特性 ($Q - \Delta p$ 特性) 在液压系统设计中必须得到重视。图 5-39 是不同节流孔直径下增压阀打开时的 $Q - \Delta p$ 特性曲线。实车验证及结果分析: 实车试验验证上述控制流程, 路面为压实雪面, 路面附着约为 0.3。图 5-40、图 5-41 分别为原地起步加速过程中的轮速及滑转率数据。

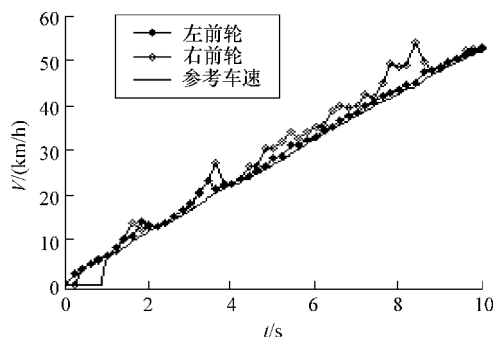


图 5-40 两前轮轮速及参考车速

图 5-41 中驱动轮的滑转率则在 1.7s 以及 3.3s 处开始回到稳定区间。在此过程中, 车辆耗时 10s 从静止加速到 14.44m/s 的速度, 平均加速度为 1.44m/s, 已知路面附着利用率达到了 90%。如果考虑此过程中换挡过程造成的加速能力的损失, 则实际的附着利用率超过了 90%。雪面上峰值附着系数对应的滑转率区间为 0.12~0.15, 在此过程中, 驱动轮的滑转率始终保持在峰值附着系数对应的滑转率区间附近。试验结果说明控制方法能够有效识别路面附着、计算最优驱动力矩。

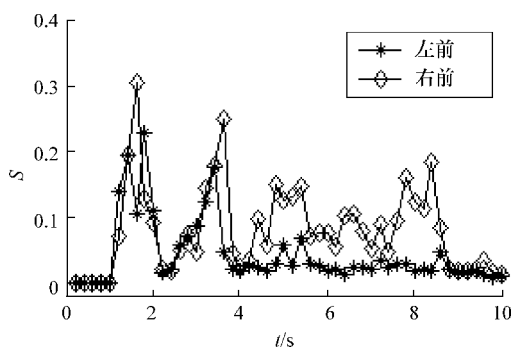


图 5-41 驱动轮滑转率

参考文献

- [1] Jack Erjavec, Robert Scharff. 汽车构造与检修 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] 司利增. 汽车计算机控制 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [3] 余志生. 汽车理论 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [4] 陈家瑞. 汽车构造 [M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [5] 陈在峰, 宋健. 汽车防抱死制动系统轮速传感器信号处理 [J]. 汽车工程, 2002, 22, (4): 282~285.
- [6] M. A. Salman. A robust servo - electronic controller for brake force distribution [J].



- Transaction of the AMSE, 1990 (112): 442 – 447.
- [7] Mark Akey. Development of Fuzzy Logic ABS Control for Commercial Trucks [J]. SAE paper, No. 952673.
- [8] Jeffery R. Layne. Fuzzy Logic Continuous and Quantizing Control of an ABS Braking System [J]. SAE paper, No. 940830.
- [9] Edge C Yeh, et al. A parametric study of anti – skid brake system Using Poincare concept. Int. J [J]. Vehicle design, 1992 (13): 210 – 232.
- [10] (日) 田部力, 等. 汽车制动防抱死系统的控制 [J]. 国外汽车. 1987 (2): 28 – 33.
- [11] 宋健, 陈在峰. 制动器耗散功率最大为目标的 ABS 控制方法 [J]. 清华大学学报, 1997, 37 (12): 95 – 99.
- [12] 陈在峰. 汽车防抱死制动系统控制方法的研究 [D]. 北京: 清华大学, 1997.
- [13] 叶庆凯. 优化与最优控制中的计算方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [14] 陈在峰, 宋健. 利用遗传基因算法求解防抱死制动系统的控制律 [J]. 汽车技术, 1998 (4): 6 – 9.

第 6 章 电动车辆制动能量回收系统实验技术

6.1 制动能量回收实验系统与实验方法

制动系统在汽车的安全方面扮演着至关重要的角色。20 世纪 80 年代后期，随着电子技术的发展，世界汽车技术领域最显著的成就就是防抱制动系统（Anti-lock Braking System，简称 ABS）的实用与推广。ABS 集微电子技术、精密加工技术、液压控制技术为一体，是机电一体化的高技术产品。它的安装大大提高了汽车的主动安全性和操纵性。随着人们对制动性能要求的不断提高，防抱死制动系统（ABS）、牵引力控制系统、电子稳定性控制程序、主动碰撞技术等功能逐渐融入制动系统中，越来越多的附加机构安装于制动线路上，使制动系统的结构更加复杂，也增加了液压管路泄漏的隐患以及装配、维修的难度。因此结构更简捷、功能更可靠的制动系统呼之欲出。随着电子，特别是大规模、超大规模集成电路的发展，制动系统的形式也将发生变化。制动能量回收系统（Brake Energy Recovery System，BERS）是未来制动控制系统的发展方向。BERS 制动力矩为：

$$M = rF = rmgs\sin\alpha \quad (6-1)$$

式中， M 为力矩设计值； r 为有效车轮半径； F 为实际受力； m 为车轮所承受的质量； g 为重力加速度； α 为路面倾斜角。

输入计算参数：

$$M = J/r_w^2 \quad (6-2)$$

式中， J 为试件所承受的转动惯量； r_w 为有效车轮半径。当输入倾斜角设计值后，系统会按下式计算：

$$M = gJ\sin\alpha/r_w \quad (6-3)$$

式中， $\sin\alpha = \sqrt{G/G^2 + 1} (J/r_w)$ ，其中 G 为斜率。

采用惯性式 BERS 实验台对 BERS 进行测试。其主要部件有实验工作站、飞轮装置和直流电机驱动单元。通过水平装配的压力传感器测出试件和实验台所产生的力矩。飞轮装置是用来模拟车辆转动惯量，从而模拟车辆的道路驾驶情况，它的传动轴上连有一个用来装夹制动盘或制动鼓的法兰，还有飞轮片的离合装置。飞轮装置在加速或减速的过程中，会产生加速度或制动力矩，设置飞轮模拟质量要依据该类型车辆的有关参数计算出被试 BERS 所承受的惯量来确定。



BERS 实验总体设计如图 6-1 ~ 图 6-3 所示，主要组成有实验 BERS、试验车和试验台架等。BERS 系统转动惯量由下式校准：

$$J = L_V m r^2 \quad (6-4)$$

式中， J 为转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)； L_V 为相关试样所分配到的比例负载； m 为车辆质量 (kg)； r 为动态车轮半径。

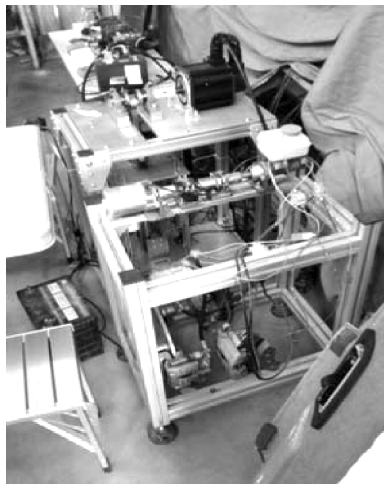


图 6-1 制动能量回收机电耦合系统



图 6-2 BERS 实验车

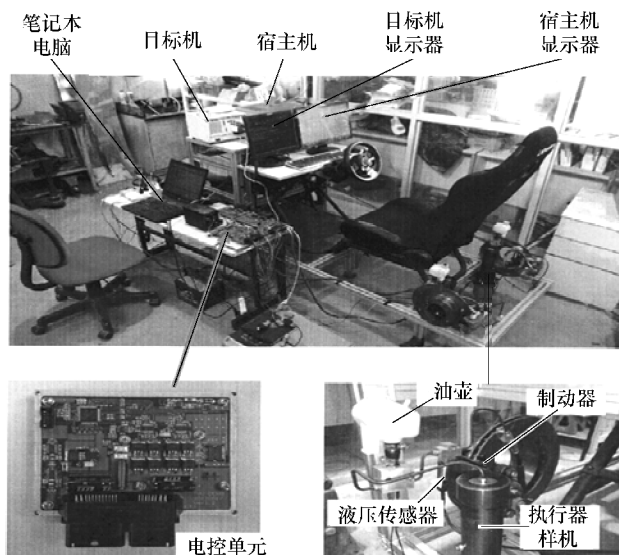


图 6-3 BERS 控制策略仿真实验台架

力矩为

$$M_s = M_a - M_b - M_r \quad (6-5)$$



式中, M_s 为转动轴上的计算总力矩 (Nm); M_a 为直流电机转矩; M_b 为 BERS 的制动力矩; M_r 为实验台摩擦力矩。

对角速度进行积分求出转速:

$$M_a - M_b - M_r - J_i dw/dt = 0 \quad (6-6)$$

$$dw = [(M_a - M_b - M_r)/J_i] dt \quad (6-7)$$

$$\omega = \int [(M_a - M_b - M_r)/J_i] dt \quad (6-8)$$

$$n = [60/2] \pi \int [(M_a - M_b - M_r)/J_i] dt \quad (6-9)$$

$$n = [60/2] \pi \omega \quad (6-10)$$

式中, J_i 为转动惯量 (kgm^2); ω 为角速度 (rad/s); n 为每分钟转数 (r/min); t 为时间 (s)。

由 BERS 台架仿真、BERS 软件环境仿真装置和 SCHENCK (PWD - C/V - 75 - 200) 惯性测功机, 构成动态 BERS 特性分析, 如图 6-4 所示。该实验系统适



图 6-4 BERS 特性分析实验台

a) BERS 台架仿真装置 b) BERS 软件环境仿真装置 c) SCHENCK (PWD - C/V - 75 - 200) 惯性测功机



用于电动车辆 BERS 总成的动态功能测试, 根据 BERS 性能要求, 进行实车动态仿真, 对 BERS 的总成进行全方位的功能测试。

6.2 BERS 的动态特性分析

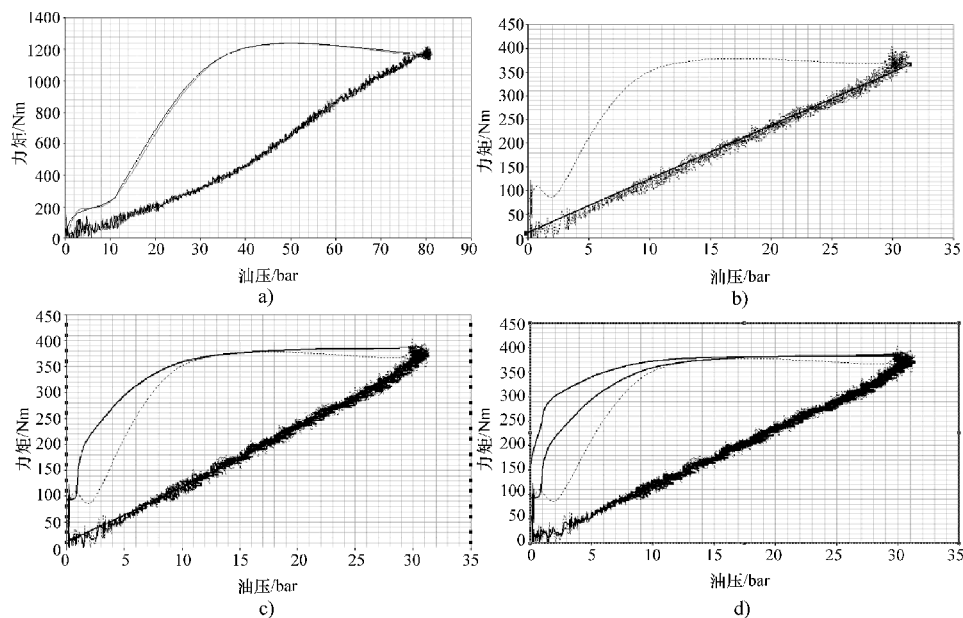
车辆防抱死制动系统 (ABS) 由轮速传感器、电子控制器及压力调节器三部分组成。从控制的角度出发, ABS 的反馈回路中还应包括 BERS、轮胎和制动传动系统。在防抱死制动时, 由于零部件间的间隙、制动元件的弹性以及摩擦等许多不确定性因素的影响, 制动压力 - 力矩响应表现出死区、饱和、滞环等非线性动态特性, 这为 ABS 控制规律的设计增加了难度。为了开发高性能 ABS, 提高 BERS 的制动效能, 必须研究 BERS 的 $T_Q - P$ 动态特性, 建立能反映 $T_Q - P$ 动态响应特性的力学模型。迄今为止, 对 BERS 动态特性的研究还比较少。一些研究中, 考虑了 BERS 的动态特性, 建立了反映制动压力 - 力矩响应动态特性的经验模型。对于车辆 BERS, 还没有提出系统的数学模型。本实验以 BERS 为研究对象, 参考已有的研究方法, 建立了一种 $T_Q - P$ 动态响应特性。首先检查压缩空气供给是否正常, 确保压力不少于 6bar 之后, 合上系统电柜的总闸开关, 此时 VME 过程控制计算机和 PLC 安全监控系统已进入工作状态, 再把 +H2 风机电源开关打到 ON 状态。然后启动 X - Brake 操作。应用 X - One program manager 可调出如下三个工作:

(1) 实验准备: 选择实验程序表, 进行必要的参数修改; 输入试样有关参数; 定义测量、记录通道; 定义实验极限数据范围, 用于安全保护; 通过测量柜上的 DRB166 控制器, 选择液压系统控制参数组。

(2) 实验执行: 首先把 +F1 上的工作模式选择“开关”, 然后进行试样装载。此时可打开实验仓门, 完成 BERS 的安装、测量和放气等准备工作, 并用手动控制盒进行低速运转, 检查装夹情况。关好实验仓门, 把工作模式选择开, 进行自动程序或手动程序装载 (即把实验程序和有关参数等数据库传到 VME 过程控制计算机), 启动直流电机; 按下绿色“启动”按钮, 开始实验, 实验过程中可进行在线监控和随机显示; 程序运行结束, 保存数据, 关掉电机。

(3) 实验评估: 从数据库中选择实验原始记录; 进行数据格式转变, 然后进入处理系统, 进行数据处理; 出具实验结果曲线, 如图 6-5 所示。

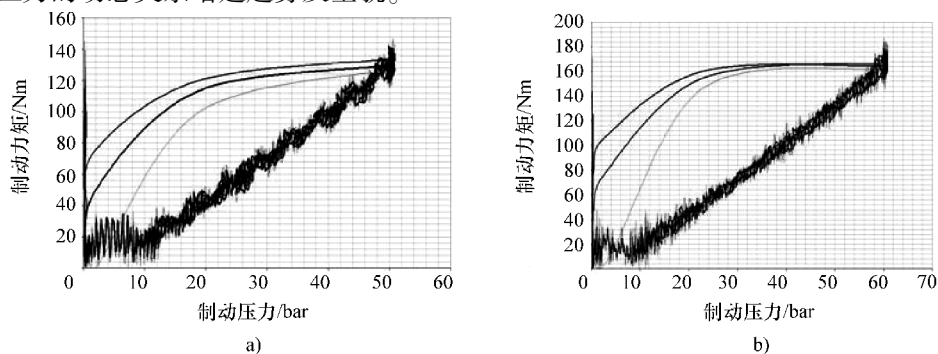
$T_Q - P$ 动态关系曲线反映了制动力矩与制动力动态响应的全貌, 这对控制理论方法的建立是至关重要的。系统的迟滞对 ABS 控制的影响是很大的, 系统迟滞的存在使控制逻辑变得复杂。对迟滞特性的处理是 ABS 控制软件匹配的一个关键环节。ABS 的迟滞指的是 ABS 从采集轮速信号到实现制动力矩的调整之间的时间差, 主要包括以下一些具体的环节: 轮速、轮加减速度计算的滞后; 电磁

图 6-5 $T_Q - P$ 动态关系曲线

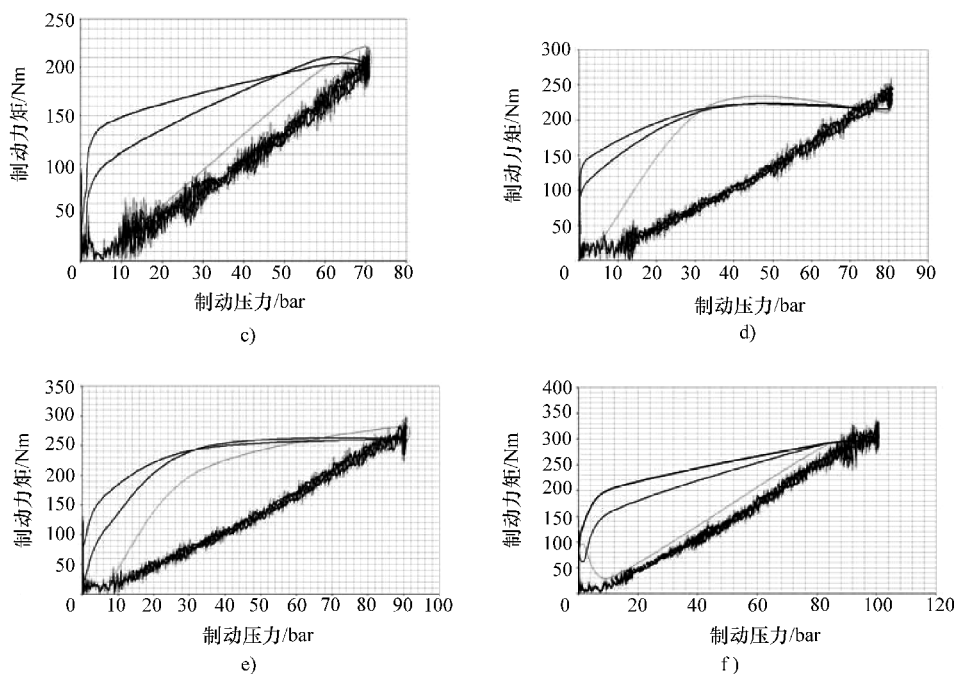
100

a) 实测盘式 BERS $T_Q - P$ 动态关系 b) 盘式 BERS 实验机一阶模拟模型 $T_Q - P$ 动态关系
c) 盘式 BERS $T_Q - P$ 实验机二阶模拟模型动态关系 d) 盘式 BERS $T_Q - P$ 实验机三阶模拟模型动态关系

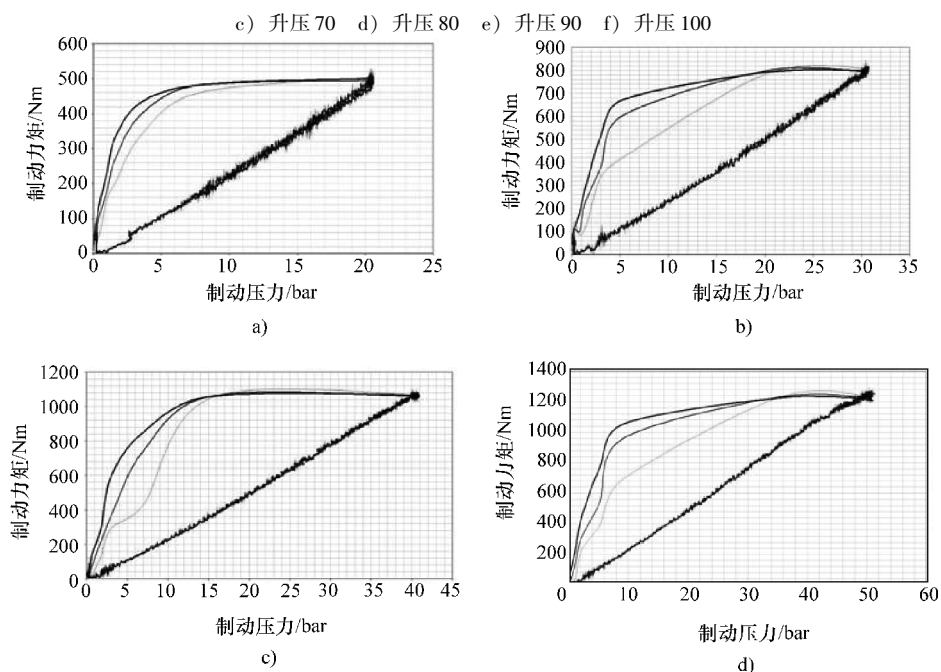
阀动作的滞后；制动液体压力传递的滞后。实验的制动压力循环通过软件调节频率较高，达到 7.8Hz 左右，盘式 BERS $T_Q - P$ 响应呈现出严重的非线性与滞环。在 ABS 控制理论计方法中，将 BERS 的耗散功率作为车轮制动过程的特征值，作为 ABS 执行机构的本质控制参数。图 6-6 给出了几种典型的车辆 BERS 的 $T_Q - P$ 实验机三阶模拟模型动态关系特性曲线，可以直观地得出制动力矩和制动压力的动态关系增建趋势及全貌。

图 6-6 某型车辆后鼓平衡式 BERS $T_Q - P$ 实验机三阶模拟模型动态关系

a) 升压 50 b) 升压 60

图 6-6 某型车辆后鼓平衡式 BERS $T_Q - P$ 实验机三阶模拟模型动态关系 (续)

101

图 6-7 某型车辆前盘式 BERS $T_Q - P$ 实验机三阶模拟模型动态关系

a) 升压 20 b) 升压 30 c) 升压 40 d) 升压 50

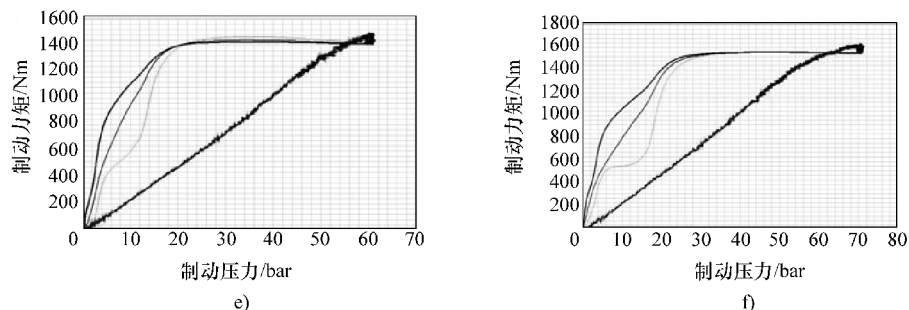


图 6-7 某型车辆前盘式 BERS $T_Q - P$ 实验机三阶模拟模型动态关系 (续)

e) 升压 60 f) 升压 70

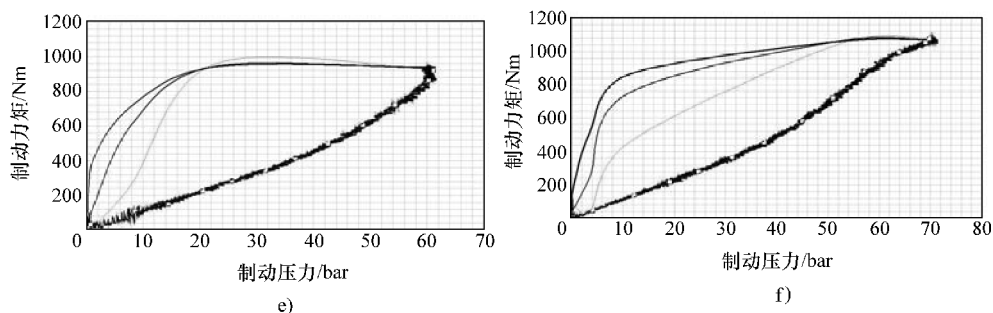
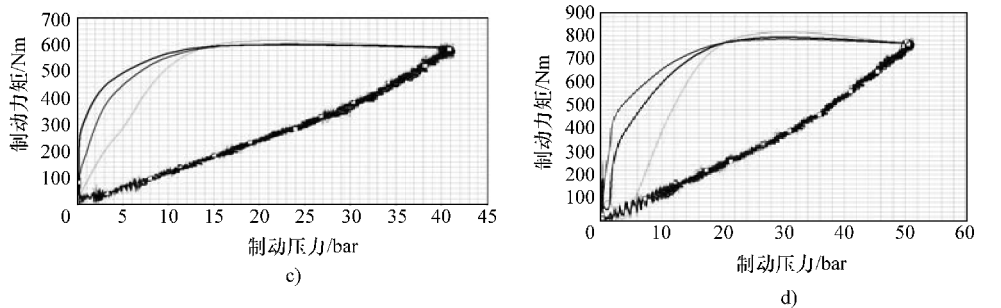
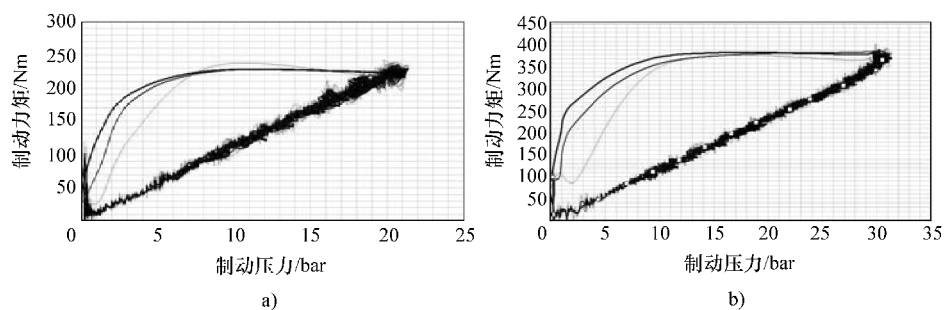
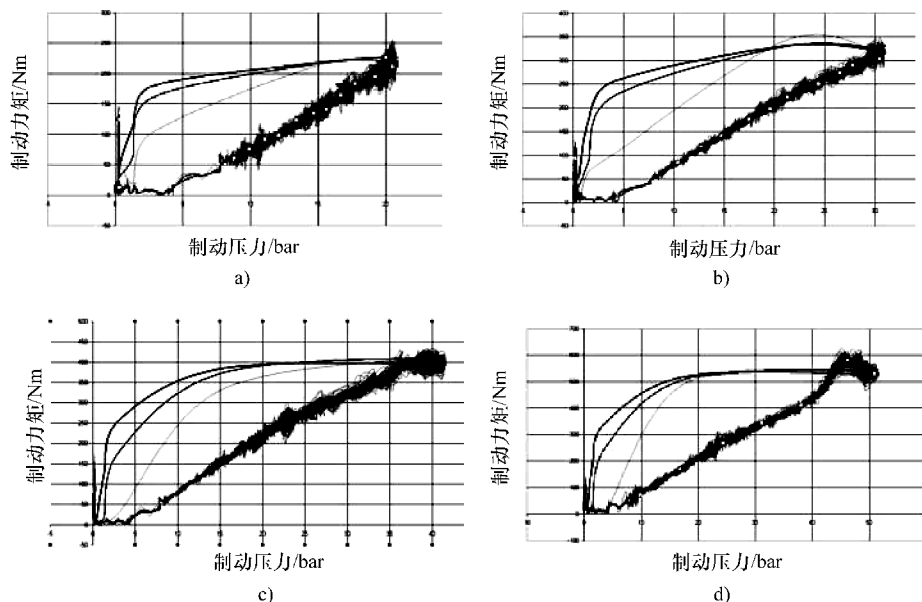


图 6-8 某型车辆前盘式 BERS $T_Q - P$ 实验机三阶模拟模型动态关系

a) 升压 20 b) 升压 30 c) 升压 40 d) 升压 50 e) 升压 60 f) 升压 70

图 6-9 某型车辆前鼓双增式 BERS $T_Q - P$ 实验机三阶模拟模型动态关系

a) 升压 20 b) 升压 30 c) 升压 40 d) 升压 50

6.3 BERS 的能量传递特性实验

在典型的液压制动系统中，主要的动态构件是 BERS 和制动管路。BERS 的原理：通过与 BERS 前腔相连的发动机的进气管，使 BERS 的前腔与后腔产生一定的真空度。在制动过程中，真空阀关闭，大气阀打开，空气由大气阀进入后腔，使前腔与后腔的真空度不同，从而产生压力。在研究中发现，产生在主泵出口的制动管路压力，对迅速施加的踏板力的响应表现出明显的滞后，即此部分对于制动系统的响应滞后有较大影响。制动管路的响应迟滞与液流横截面积、制动管路的长度、管路的布置形状、制动液的可压缩性等因素有关。其基本公式为：

$$\frac{dp_L}{dt} = \frac{k_L}{V_L}(Q - Q') \quad (6-11)$$

式中， k_L 为弹性模量； V_L 为管路中液体体积； Q 为制动主缸制动液流量； Q' 为制动轮缸制动液流量。

BERS 制动器件布置如图 6-10a 所示，逻辑结构如图 6-10b 所示。为了体现系统的动态特性，踏板力输入为气缸阶跃输入，模拟紧急制动工况。轿车正常工作时 BERS 真空度为 0.8bar，同时为了考察 BERS 部分失效及完全失效时液压系统的动态响应，把真空度分别确定为 0.8bar、0.6bar、0bar 三种。磁带机记录 10



个压力传感器的信号和一个踏板力传感器信号。

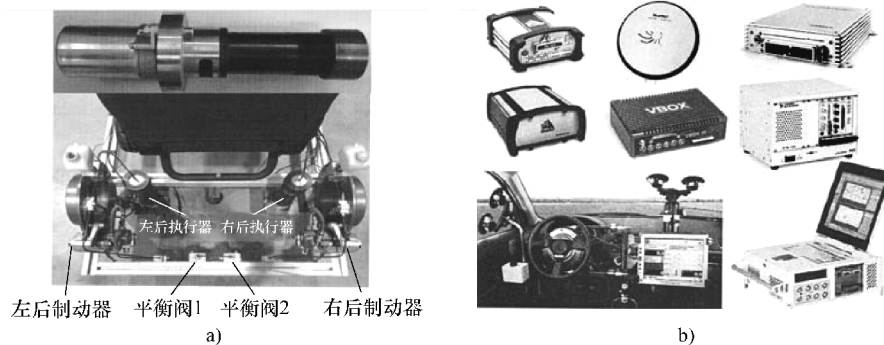


图 6-10 实验总体布局

a) 布置 b) 逻辑结构

BERS 结构紧凑，质量小，制动平稳，涉水性能及散热性能优良。在制动过程中，当进入压力稳定阶段后，可认为制动压力与力矩呈线性关系：

$$T_b(t) = \begin{cases} aP_b(t) - b, & b/a < P_b(t) < 1 \\ 0, & 0 \leq P_b(t) < b/a \end{cases} \quad (6-12)$$

为评价 BERS 动态经验模型的精确性，需要把模型的输出力矩与实验测量的实际制动力矩进行比较，二者的平均误差 T_{error} 可用下式定义：

$$T_{\text{error}} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |T_{\text{act}} - T_{\text{mod}}| dt \quad (6-13)$$

式中， T_{mod} 为模型输出力矩； T_{act} 为实际测得的力矩； t_1 与 t_2 分别为测量的起始时刻与终止时刻。使用数值积分法计算力矩平均误差 T_{error} 。 T_{error} 的数值反映了计算模型与实际情况的符合程度， T_{error} 的数值越小，模型越精确。假定制动力矩的迟滞现象仅在升压过程中存在，并可用指数时间函数来近似，那么滞后系数可表示为：

$$X(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{c_t}\right) \quad (6-14)$$

式中， t_0 为制动压力上升的起始时刻； c_t 为迟滞因子的时间系数。

升压过程的制动力矩存在饱和特性。根据有关标准，制动压力最高可达 16MPa。由此计算，盘式 BERS 的许用最大制动力矩为

$$T_{\text{bmax}} = KT_b^+ = 2.91 \text{ kNm} \quad (6-15)$$

当制动压力下降时，记录并存储制动力矩所能达到的最小值 T_{min} ，作为下一次升压过程中制动力矩的暂存下限，则升压过程的制动力矩表示为



$$T_b^r(t) = \begin{cases} 0 & [0 < P_b(t) \leq b/a] \\ T_{\min} & [b/a < P_b(t) \leq (T_{\min} + b)/a] \\ T_{\min} + [aP_b(t) - b - T_{\min}]X(t) & [(T_{\min} + b)/a < P_b(t) < 16] \\ T_{b\max} & [P_b(t) \geq 16] \end{cases} \quad (6-16)$$

式中, a 为回滞因子; b 为滞环因子, $T_{\min}$ 是升压前降压达到的力矩最小值, 即升压开始时刻的制动力矩数值; $X(t)$ 是由式 (6-14) 确定的滞后系数。为了按式 (6-16) 计算升压制动力矩, 需首先确定式 (6-14) 中迟滞因子 c_t 的数值。 c_t 的大小决定了滞后程度, 对模型的精确性有重要影响。滞后系数 $X(t)$ 的数学意义为时间参数 t 和迟滞因子 c_t 的二元函数, 用雅可比近似法寻找 c_t 的最优值, 使优化的目标为误差最小, 目标函数是式 (6-13) 的变形, 可表示为

$$T_{\text{error}}(c_t) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |T_b^+(t) - T_{\text{act}}(t)| dt \quad (6-17)$$

$$T_{\text{error}}(c_{ti})|_{c_t=c_{ti}} = \min(T_{\text{error}}) \quad (6-18)$$

对于一次已知的升压过程, 式 (6-17) 是以 c_t 为自变量的一元函数, T_b^+ 由式 (6-15) 计算, 其他参数的定义同式 (6-13)。选取一次典型的防抱死制动过程来优化计算 c_t 的值。根据线性拟合, 可得 c_t 与初始制动力矩 $T_{\min}$ 之间的关系的经验公式:

$$c_t = -0.1048T_{\min} + 0.0378 \quad (6-19)$$

当 $T_{\min} > 0.0378/0.1048$ 时, 时间常数为零, 此时制动力矩的迟滞现象基本消失, 迟滞系数 $X(t) = 1$ 。由于受制动元件的弹性及其他多种因素的影响, 降压过程中的压力-力矩关系不同于式 (6-16) 的线性函数。可将降压过程中的压力-力矩响应描述为可变线性模型:

$$T_b^-(t) = \begin{cases} 0 & [0 \leq P_b(t) < b/Y] \\ YP_b - b & [b/Y < P_b(t) \leq (T_{bhi} + b)/Y] \\ T_{bhi} & [P_b(t) > (T_{bhi} + b)/Y] \end{cases} \quad (6-20)$$

式中, T_{bhi} 为制动压力上升时刻, 制动力矩多能达到的最大值, 即降压初始时刻的制动力矩数值, 是一次降压过程中制动力矩的上限; Y 为斜率, 是可变的, 其数值同样可以根据误差最小原则确定。目标函数可表示为:

$$T_{\text{error}}(Y) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} |T_b^-(t) - T_{\text{act}}(t)| dt \quad (6-21)$$

$$T_{\text{error}}(Y_i)|_{Y=Y_i} = \min(T_{\text{error}})$$

对于一次已知的降压过程, 式 (6-21) 是以 Y 为自变量的一元函数, T_b^- 由式 (6-20) 计算, 其他参数的定义同上。在 $Y > 0$ 的约束下, 求 $T_{\text{error}}(Y)$ 极小值



对应的自变量 Y_i 即为所求的斜率。为了减小升压过程中的迟滞效应对降压过程的影响，实验中降低了压力循环频率。制动压力循环 6 次，对于 2~6 次循环，记录升压过程制动力矩最大值。前三次实验的制动压力循环频率很高，约达到 10Hz，压力-力矩响应呈现出严重的非线性与滞环。从实验结果可以得出：主缸前腔压力与后腔压力的建立相对于踏板力存在着滞后。这是由于 BERS 的滞后特性造成的。轮缸压力的建立相对于管路压力的建立存在着滞后，是由于管路特性造成的。在紧急制动情况下，踏板力到右后轮分泵压力延迟大约 30ms，踏板力到左前轮分泵压力延迟大约 12ms，踏板力到左后轮分泵压力延迟大约 32ms，踏板力到右前轮分泵压力延迟大约 10ms。时间延迟长短主要与管路长短有关。将 ABS 液压系统实验辨识出的液压系统参数代入到上述方程，仿真中用到的系统模型为

$$\frac{dp_w}{dt} = \begin{cases} 35.7418 (p_m - p_w)^{0.58} & (\text{增压时}) \\ 0 & (\text{保压时}) \\ -36.3714 (p_w - p_r)^{0.92} & (\text{减压时}) \end{cases} \quad (6-22)$$

式中， p_w 为轮缸内液体压力； p_r 为低压蓄能器内压力； p_m 为制动主缸压力或高压蓄能器压力，为 12MPa。

106

在研究中发现，产生在主泵出口的制动管路压力，对迅速施加的踏板力的响应表现出明显的滞后，即此部分对于制动系统的响应滞后产生较大影响，如图 6-11 所示。制动管路的响应迟滞与液流横截面积、制动管路的长度、管路的布置形状、制动液的可压缩性等因素有关。在不同真空度下，用磁带机同时记录制动系统的输入、主缸压力、管路压力及轮缸压力的时间建立过程，即可得到液压部分的压力传递动态特性。

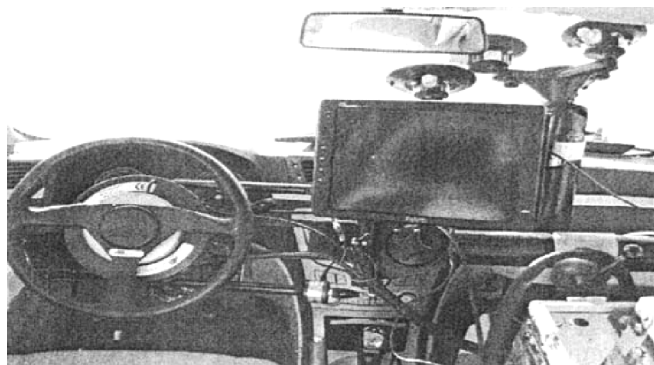


图 6-11 BERS 迟滞模型测量装置

把真空度分别确定为 0.8bar、0.6bar、0bar 三种。踏板力输入模拟紧急制



动、缓慢制动和点制动三种情况。磁带机记录 10 个压力传感器的信号和一个踏板力传感器信号。不同输入、不同真空度下轿车制动系统液压管路压力、轮缸压力、主缸压力随时间建立的过程曲线如下：

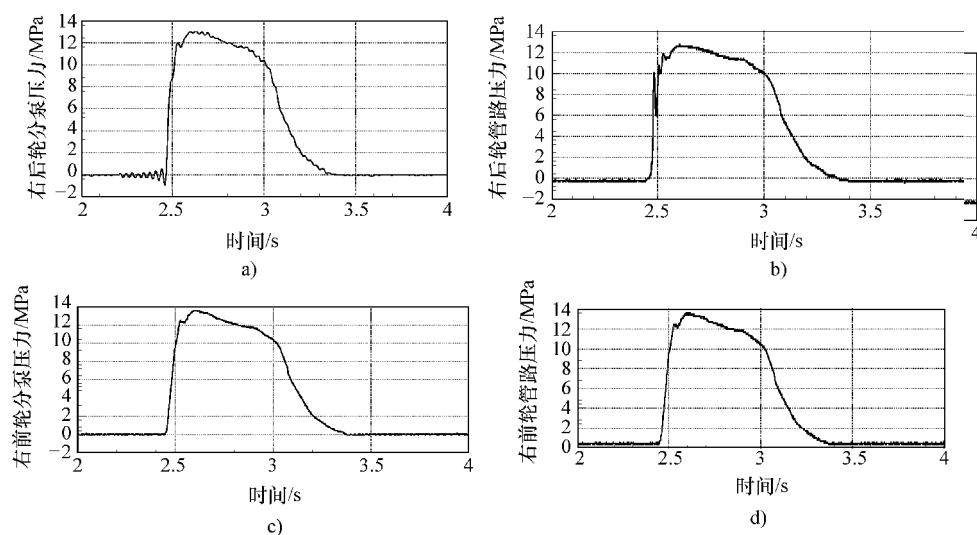


图 6-12 人力输入：真空度 0bar，紧急制动

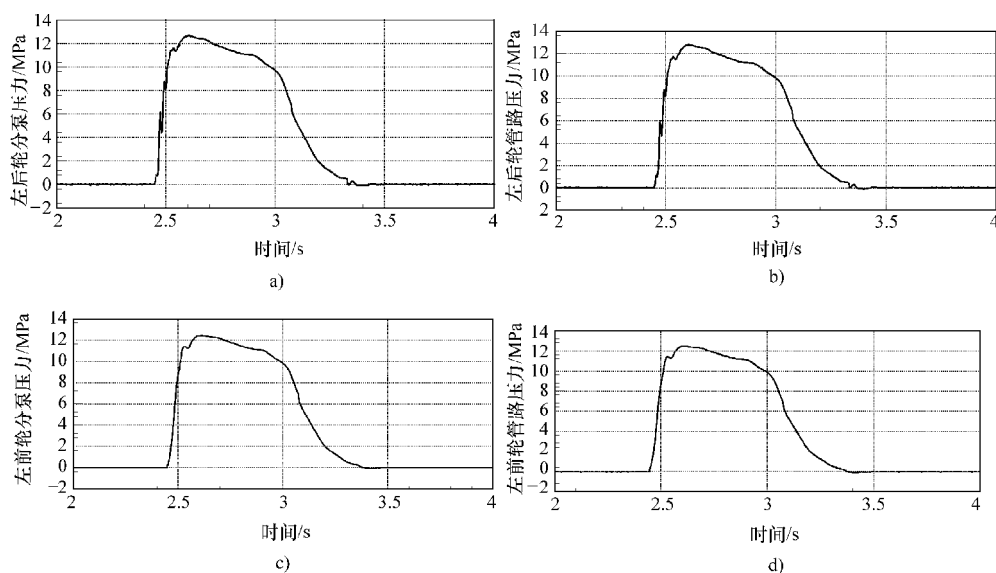


图 6-13 人力输入：真空度 0.6bar，紧急制动

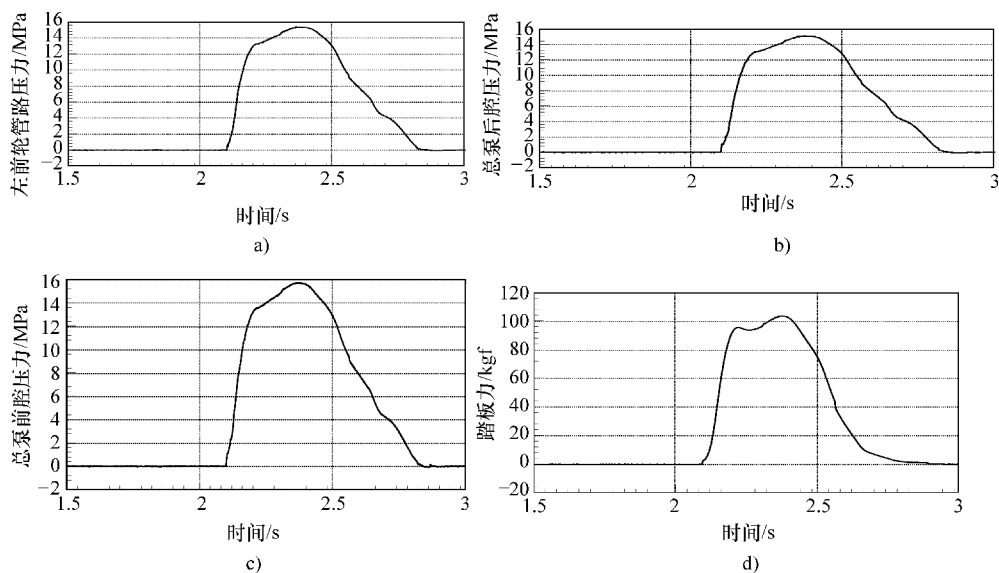


图 6-14 人力输入：真空度 0.8bar，紧急制动

6.4 制动能量回收的动态传输实验

根据制动系统动力学特性的实验测定要求，对 BERS 力矩相对于轮缸压力的动态特性进行测定，从而得出其动态特性关系，并为制动系统模型提供实验验证。为了实现上述目的，需要对动态制动力矩进行测量。SCHENCK 制动惯量实验台具有测量动态制动力矩的能力。但由于设备制造厂在软件中将实验台设定为只能进行常规 BERS 实验，因而无法利用制动实验台自带的数据采集处理系统。同时，实验台自身的压力传感器固定位置距轮缸距离很长，远远超过了实车的布置，而压力的时间建立过程与管路的长度有很大关系，所以实验台的压力传感器测量结果必然与真实情况有所出入。因此我们在靠近轮缸入口处布置了一个传感器，同时通过实验台数采系统的力矩输出通道测量动态制动力矩，并在磁带机上记录，这样就可以得到 BERS 力矩相对于轮缸压力的动态特性。理论



图 6-15 安装原理



上,测量轮缸压力时,应在轮缸上打孔,传感器直接测量轮缸内部的压力。但是由于工艺上的不可操作性,压力传感器只能布置在轮缸外部。为了保证实验结果的准确,压力传感器应尽可能靠近轮缸入口。

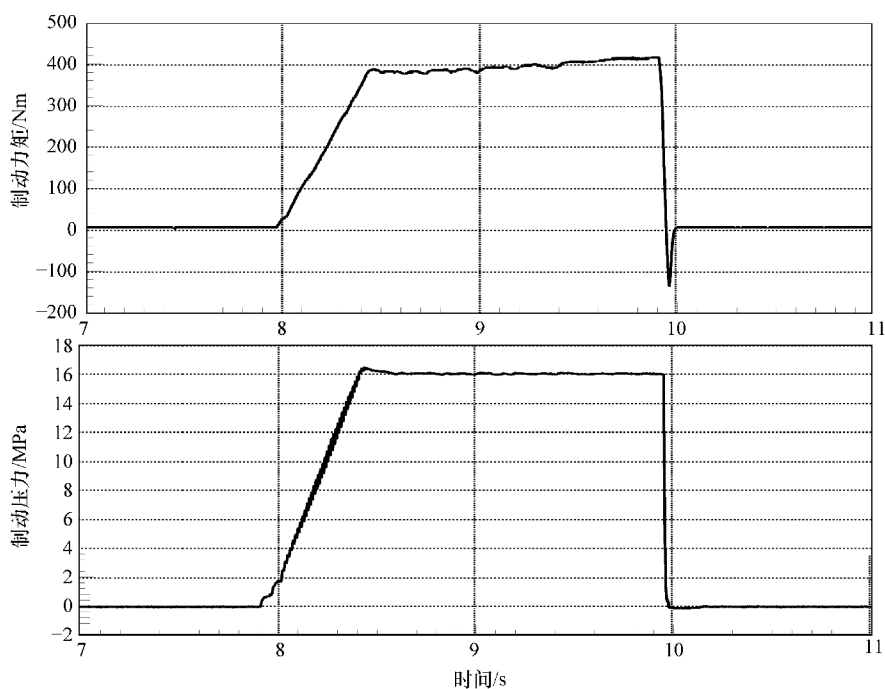


图 6-16 BERS 初速 20km/h, 压力上升时间 0.2s

实验步骤如下:

- (1) BERS 实验台以压力控制方式工作。
- (2) 压力增长 $0 \rightarrow 160\text{bar}$, 增长时间 0.2s。
 - ① 制动起始速度 40km/h, 重复两次。
 - ② 制动起始速度 80km/h, 重复两次。
 - ③ 制动起始速度 120km/h, 重复两次。
- (3) 压力增长 $0 \rightarrow 160\text{bar}$, 增长时间 0.4s。
 - ① 制动起始速度 40km/h, 重复两次。
 - ② 制动起始速度 80km/h, 重复两次。
 - ③ 制动起始速度 120km/h, 重复两次。

BERS 制动力矩与轮缸压力的动态特性关系结果如图 6-17 ~ 图 6-23 所示, 采样频率为 1000Hz。

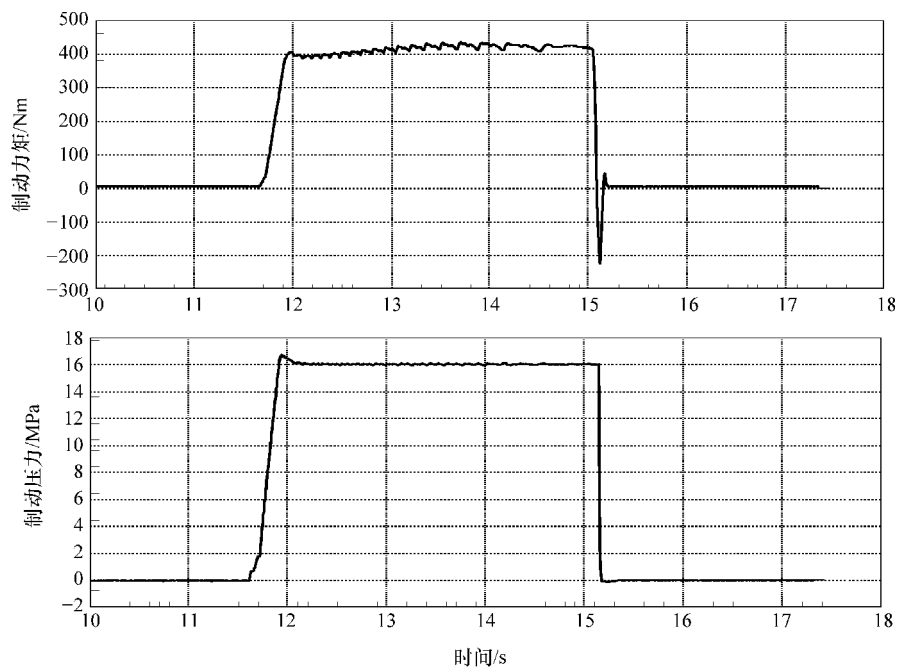


图 6-17 BERS 初速 40km/h, 压力上升时间 0.4s

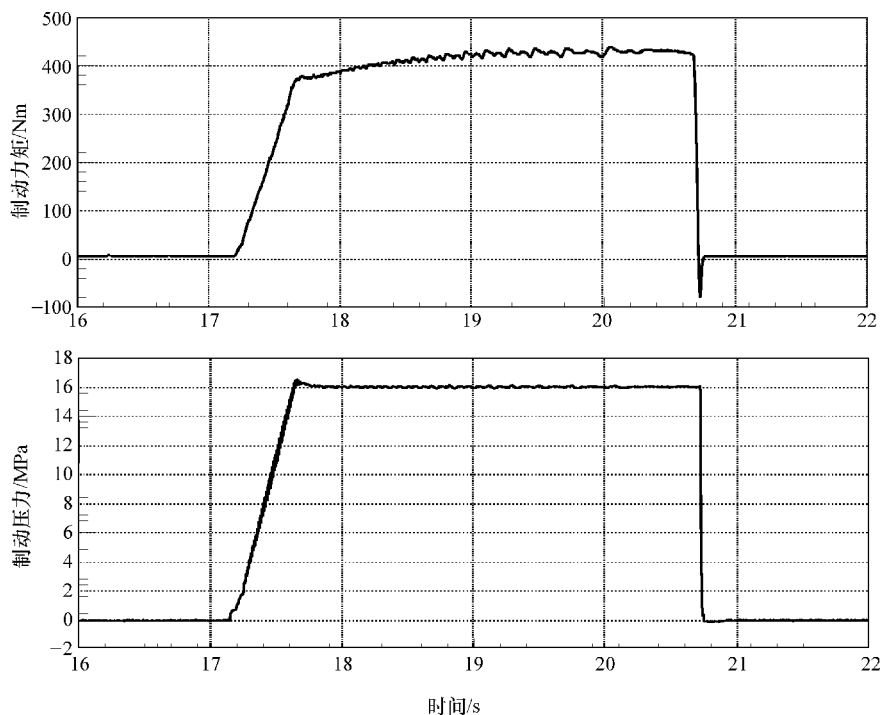


图 6-18 BERS 初速 80km/h, 压力上升时间 0.4s

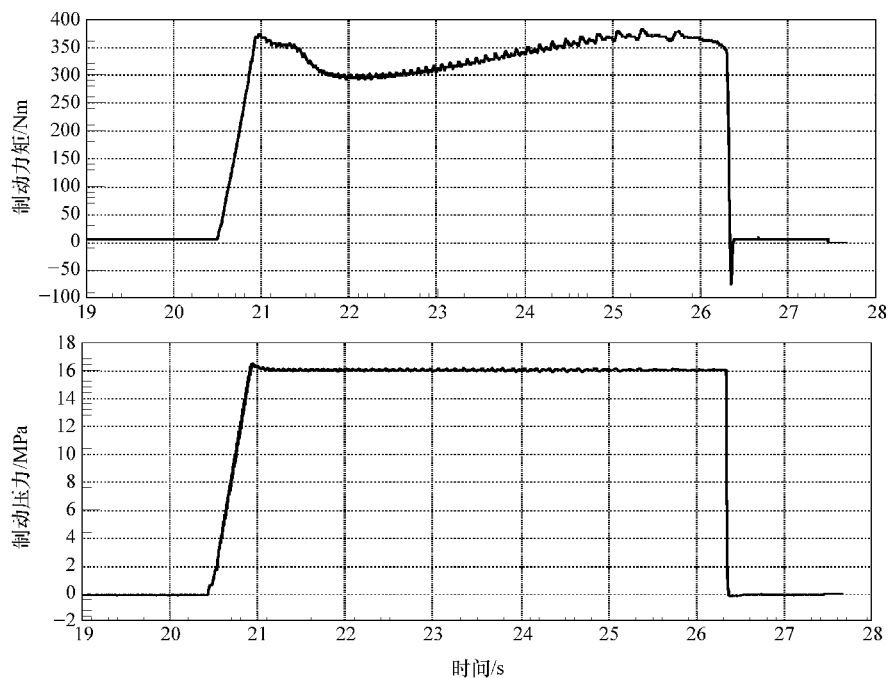


图 6-19 BERS 初速 120km/h, 压力上升时间 0.4s

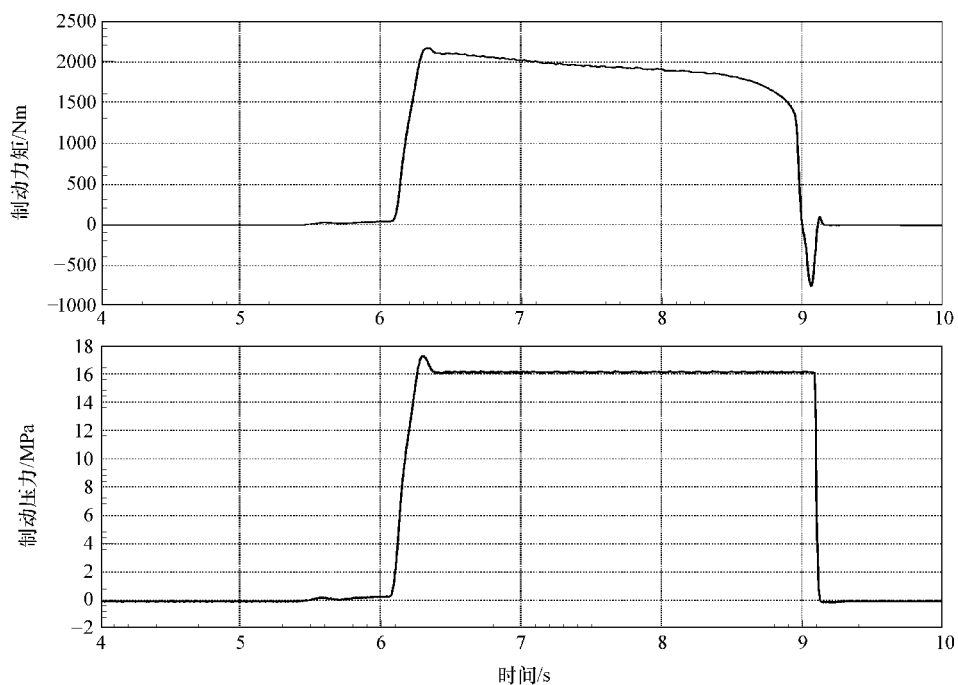


图 6-20 BERS 初速 20km/h, 压力上升时间 0.2s

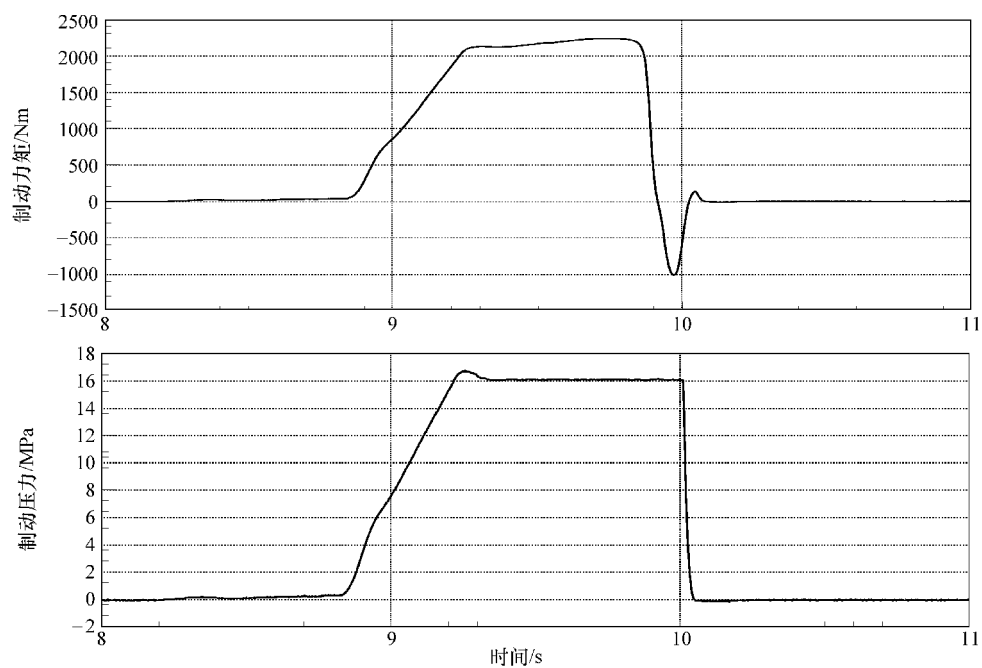


图 6-21 BERS 初速 40km/h, 压力上升时间 0.4s

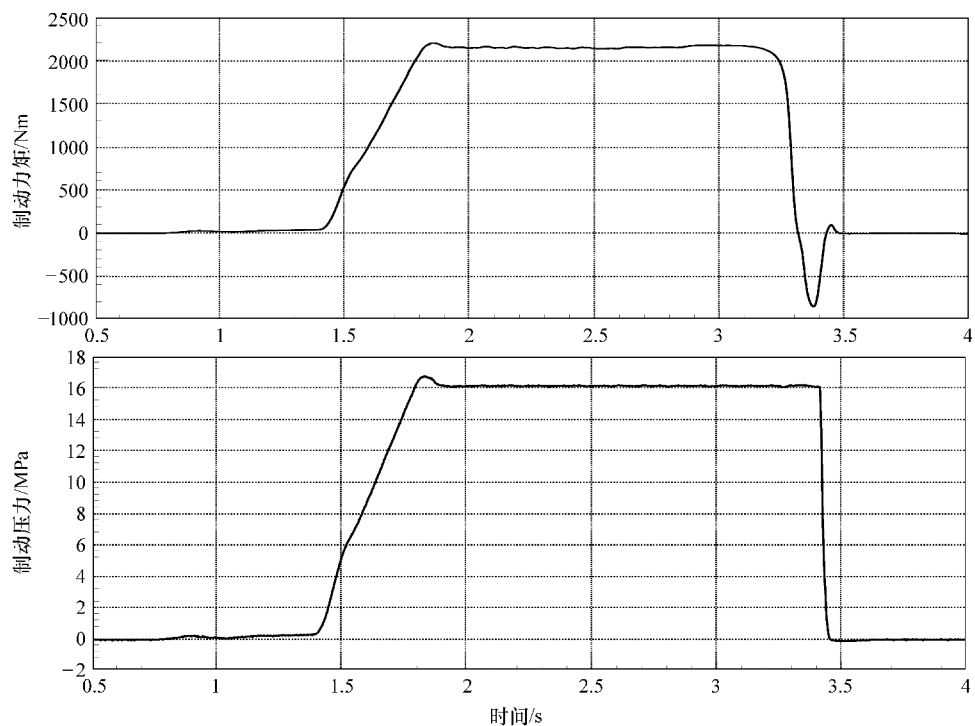


图 6-22 BERS 初速 80km/h, 压力上升时间 0.4s

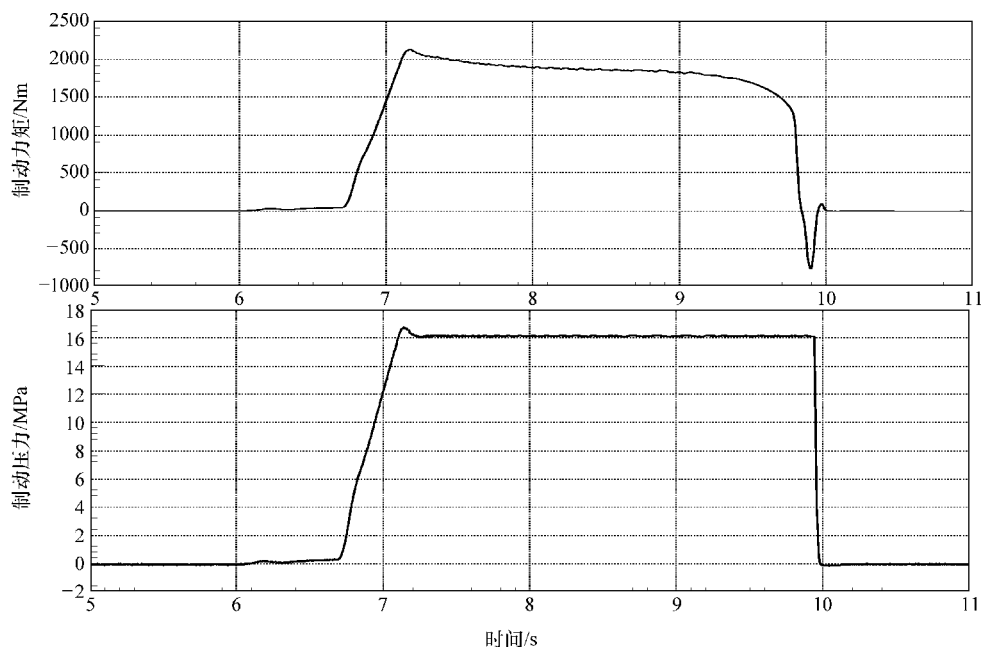


图 6-23 BERS 初速 120km/h, 压力上升时间 0.4s

参考文献

- [1] Raimondo Sferco, Yves Page, Jean-Yves Le Coz, et al. Potential effectiveness of electronic stability programs (ESP) —What EUROPEAN field studies tell us [C]. SAE 2001-06-0192.
- [2] Hongtei Eric Tseng, Behrouz Ashrafi, Dinu Madau. The development of vehicle stability control at Ford [J]. IEEE/ASME transactions on mechatronics 1999, 9 (4).
- [3] Anton T, Van Zanten. Evolution of electronic control systems for improving the vehicle dynamic behavior [C]. AVEC'02, 20024481.
- [4] 宋健, 陈在峰. 制动器耗散功率最大为目标的 ABS 控制方法. 清华大学学报 (自然科学版), 1997 (12): 95-98.
- [5] 瞿翔洲. 牵引力控制系统 (TCS) 的硬件在环仿真分析 [D]. 北京: 清华大学, 2002.
- [6] V Alberti, E Babbel. Improved driving stability by active braking of the individual wheels [C]. AVEC'96: 717-732.
- [7] 贾豫东, 宋健, 孙群. 用于电子稳定程序的汽车模型和控制策略 [J]. 公路交通科技, 2004, (5) 132-136.
- [8] Davide Danesin, Philippe Krief, Aldo Sornioti, et al. Active roll control to increase handling and comfort [C]. SAE 2003-01-0962.
- [9] Michael Robert Uchanski. Road friction estimation for automobiles using digital signal processing methods [D]. Berkeley: University of California, 2001.



- [10] H E Tseng. Dynamic estimation of road bank angle [J]. Vehicle system dynamics, 2001 (36): 307 – 328.
- [11] Joost Zuurbier, Paul Bremmer. State estimation for integrated vehicle dynamics control [C]. AVEC'02 20024537.
- [12] E Esmailzadeh, A Goodarzi, G R vossoughi. Optimal yaw moment control law for improved vehicle handling [J]. Mechatronics, 2003 (13): 659 – 675.
- [13] Donald Margolis, Taehyun Shim. A band graph model incorporating sensors, actuators, and vehicle dynamics for developing controllers for vehicle safety [J]. Journal of the Franklin institute; 2001 (338): 21 – 34.
- [14] Shoji Inagaki, Ikuo Kshiro, Masaki Yamamoto. Analysis on vehicle stability in critical cornering using phase – plane method [C]. AVEC'94, 9438411.
- [15] Yoshikazu Hattori, Hen Koibuchi, Tatsuaki Yokayama. Force and moment control with non-linear optimum distribution for vehicle Dynamics [C]. AVEC'02 20024577.
- [16] Ludger dragon. FYDYS handling simulations used in a real – time hardware – in – the – loop application with the ESP – controller [C]. AVEC'96.
- [17] Takaji Umeno, Eiichi Ono, Katsuhiko Asano. Estimation of tire – road friction using wheel speed vibration [C]. AVEC'02 20024630.
- [18] Ijin Yang, Woogab Lee, Inyong Hwang. A model – based design analysis of hydraulic braking system [C]. SAE2003 – 01 – 0253.
- [19] Katsufumi Ichikawa, Munenori Matsuura, Katsumi Tomioka. Development of preview – controlled VDC [C]. AVEC'02 20024490.
- [20] Taeyoung Chung, Kyongsu Yi, Jeongtae Kim, et al. Closed – loop evaluation of vehicle stability control (VSC) systems using a combined vehicle and human driving model [C]. SAE2004 – 01 – 0763.
- [21] Anton T, Van Zanten, Rainer Ertardt, et al. Control aspects of the Bosch – VDC [C]. AVEC'96: 573 – 608.
- [22] Keiyu Kin, Hironobu Kiryu, Tohru Ikeda, et al. Enhanced vehicle stability and steerability with VSA [C]. AVEC'02 20024491.
- [23] Ken'ichi Kitahama. Analysis of vehicles' handling behavior using a phase plane [C]. AVEC'02 20024581.
- [24] Masato Abe, Yoshio Kano, Kazuasa Suzuki, et al. Side – slip control to stabilize vehicle lateral motion by direct yaw moment [J]. JSAE Review2001 (22): 413 – 419.
- [25] Seongho Choi, Dong – Woo Cho. Control of wheel slip ratio using sliding mode controller with pulse width modulation [J]. Vehicle System Dynamics, 1999 (32): 267 – 284.
- [26] Seongho Choi, Dong – Woo Cho. Design of nonlinear sliding mode controller with pulse width modulation for vehicular slip ratio control [J]. Vehicle system dynamics, 2001.36 (1): 57 – 72.
- [27] Koji Uematsu, J Christian Gerdes. A comparison of several sliding surface for stability con-



- trol [C]. AVEC'02 20024578.
- [28] Yusuf Kaelani, In yoman Sutantra, Ian Hardianto. Integrated traction control with implement of fuzzy logic controller [C]. AVEC'02 20024600.
- [29] Kaoru Sawase, Yoshiaki Sano. Application of active yaw control to vehicle dynamics by utilizing driving/braking force [J]. JSAE Review 1999 (20): 289 – 295.
- [30] Toshimichi Takahashi. Modeling, analysis and control methods for improving vehicle dynamic behavior (Overview), special issue modeling, analysis and control methods for improving vehicle dynamic behavior [J]. R&D Review of Toyota CRDL, Vol. 38 No. 4.
- [31] Luigi Petrucci, Mauro Velardocchia, Aldo Sorniotti. Electro – hydraulic braking system modelling and simulation [C]. SAE 2003 – 01 – 3336.
- [32] Mauro Velardocchia, Aldo Sorniotti. A failsafe strategy for a vehicle dynamics control (VDC) system [C]. SAE 2004 – 01 – 0190.
- [33] Andrea Diermeier, Wilhard von Wendorff. Semiconductor solutions for braking systems: new partitioning and new safety concepts increase safety and reduce system cost [C]. SAE 2004 – 01 – 0251.
- [34] Alexander Eichberger. Generating multibody real – time models for hardware – in – the – loop applications [C]. AVEC'02 20024546.
- [35] H Fennel, E L Ding, A model – based failsafe system for the continental TEVES electronic – stability – program (ESP) [C]. SAE 2000 – 01 – 1635.
- [36] R Willig, M Mörbe. New generation of inertial sensor cluster for ESP – And future vehicle stabilizing systems in automotive applications [C]. SAE 2003 – 01 – 0199.

第 7 章 电动车辆 BERS 的控制策略

制动能量回收系统 (Brake Energy Recovery System, BERS), 给电动车辆制动系统带来变革, 为将来的电动车辆智能控制提供条件。BERS 的控制单元 (ECU) 接收制动系统踏板发出的信号, 控制制动系统制动; 接收驻车制动信号, 控制驻车制动; 接收车轮传感器信号, 识别车轮是否抱死、打滑等, 控制车轮制动力, 实现防抱死和驱动防滑。因为各种控制系统如卫星定位、导航系统、自动变速系统、无级转向系统、悬架系统等与制动控制系统高度集成, 所以 ECU 还得兼顾这些系统的控制。从结构上可以看出这种 BERS 具有传动制动控制系统无法比拟的优点: 整个电动车辆制动系统结构简单, 省去了传统车辆制动系统中的制动油箱、制动主缸, 助力装置、液压阀、复杂的管路系统等部件, 使整车质量减轻; 制动响应时间短, 提高了制动性能; 维护简单; 系统总成制造、装配、测试简单快捷, 制动总成成为模块化结构; 采用电线连接, 系统耐久性能好; 易于改进, 稍加改进就可以增加各种电控制功能。国外对 BERS 有一定的经验可循, 而国内也有部分学者致力于这方面的研究, 因此本章将在此研究基础上, 吸收其优点, 改善其性能, 尝试将盘式 BERS 应用于电动车辆上。这样可以节省不必要的时间和精力的浪费, 缩短开发周期, 且开发成功的可能性较大。BERS 与传统的制动系统相比, 更需要准确研究电磁铁部分和与其相对应的控制器。本章分析 BERS 的结构与工作原理, 建立 BERS 的力学模型并加以分析, 提炼基于 BERS 的 ABS 控制策略和适用于 BERS 的 ABS 控制算法。

116

7.1 制动能量回收系统的结构分析

某种 BERS 利用电磁阻力的原理将电动车辆的动能转化为热能耗散在空气中, 使电动车辆获得减速度。其制动效能和工作可靠性、持久性都高于其他传统车辆制动系统, 是国际制动系统的发展方向。该 BERS 根据电磁原理, 将电能转化为机械能, 并使制动盘侧的制动块夹紧制动盘, 从而使车轮制动。本章研究电动车辆 BERS 模型, 图 7-1 为电动车辆 BERS 示意图。

该 BERS 的制动盘以螺栓固定在轮毂上, 带有摩擦衬块的制动块和通电线圈装在桥壳上的制动钳体内, 制动块和通电线圈只可以沿轴向滑动, 但不能转动。



制动时，给线圈供电，使其通以一定量的电流，这样，电磁铁产生足够的电磁吸力，使制动块向下运动，与制动盘摩擦，产生所需的制动效果。电动车辆再次启动时，给回复电磁铁通电，电磁吸力使制动块向上运动，从而与制动盘脱离，制动消除，此时的回复电磁铁也已回到气隙最小的位置处。回复电磁铁的运动部分与摩擦块刚性连接。采用两个电磁铁后，该部分的动作实现了完全电控，避免了采用机械弹簧支撑时的适配问题。另外，此 BERS 很适用于电动车辆制动系统。BERS 的等效磁路如图 7-2 所示。

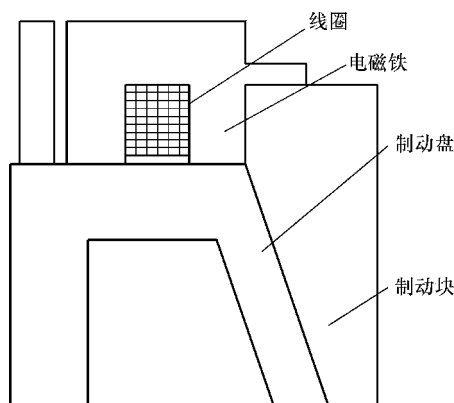


图 7-1 BERS 电磁结构示意图

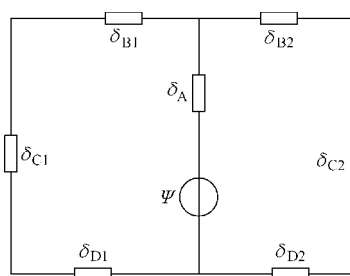


图 7-2 BERS 的等效原理图

δ_A 、 δ_{B1} 、 δ_{B2} —电磁铁磁导

δ_{C1} 、 δ_{C2} —制动盘磁导 δ_{D1} 、 δ_{D2} —气隙磁导

ψ —电动车辆制动系统磁势， $\psi = Ni$

(N 为线圈所通匝数， i 为线圈内电流)

根据麦克斯韦理论，可得电磁吸力 F 为

$$F = \frac{(Ni)^2 S_0 \mu_0}{8l^2} \quad (7-1)$$

式中， N 为单个磁铁的线圈匝数； i 为线圈中的电流； S_0 为气隙面积； μ_0 为磁路中材料的磁导率； l 为空气隙厚度。BERS 开始作动时，气隙长度也会变化，则变化的电磁吸力 $F(x)$ 为

$$F(x) = \frac{N^2 S_0 \mu_0}{8x^2} \quad (7-2)$$

BERS 作动时，气隙会发生变化，同时也会因受到各种扰动及制动盘与制动块之间的摩擦导致的摩擦表面变形，影响气隙的变化，而电磁力也会随之改变。图 7-3 所示为电磁吸力与气隙的关系。

BERS 采用车载蓄电池供电，随着蓄电池工作时间的增加，电流会有所下降；同时由于摩擦热的生成会使电磁体的温度升高，都将使电流发生变化。图



7-4 所示为电磁吸力 (N) 在不同电流 (A) 激励下的变化情况。

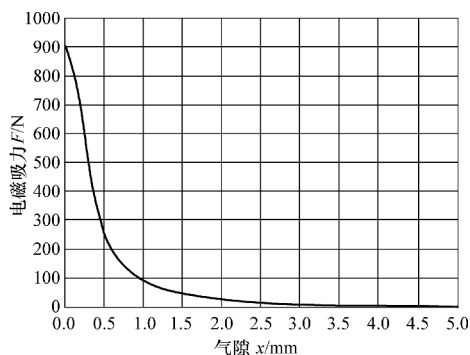


图 7-3 电磁吸力与气隙的关系

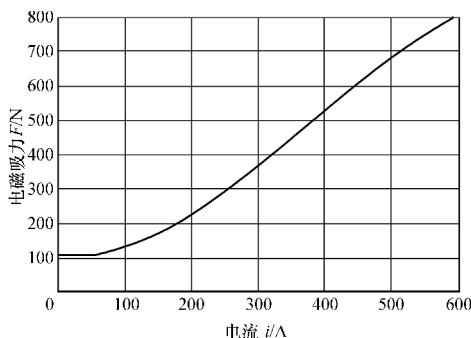


图 7-4 电磁吸力在不同电流激励下的变化情况

7.2 制动能量回收系统的基本理论

118

BERS 的制动力是电磁铁的线圈通电后产生的, 因为不再靠液压油产生制动力, 所以不再使用液压油, 也节省了液压制动管路, 取而代之的是线束, 也正是由于这一变革使得 BERS 更易于与 ABS 等电动车辆上的电子装置集成, 且相对于制动主缸、液压阀及制动管路, 线束的维修与更换都要简单得多。另外, 由于使用线束代替机械液压制动装置及制动管路, 也减少了制动时的非线性和制动力矩相对于制动力的迟滞效应。根据 BERS 的工作原理, 考虑 BERS 制动时的力学模型, 建立制动系统制动力矩与电磁吸力间的关系如下:

$$T_b = \mu_f K_t F \quad (7-3)$$

式中, T_b 为制动时产生的制动力矩; F 为电磁体产生的吸力; μ_f 为电磁铁与摩擦块之间的平均摩擦系数; K_t 为制动效能因数, 由制动系统结构参数及使用工况决定, 不是一个常数, 而是一个关于温度的函数。而对温度影响最大的就是电动车辆速度, 可用一个速度的二次多项式来表达:

$$K_t = K_1 v^2 + K_2 v + K_3 \quad (7-4)$$

式中, K_1 、 K_2 、 K_3 为多项式拟合系数, 可通过 MATLAB 拟合实验数据得出。

BERS 制动时, 电磁铁与制动块吸合以后, 由于电磁力很大, 工作气隙的变化相对较小, 对于具有一定安匝数线圈的电磁体, 线圈中的通电电流成为影响电磁体吸力的主要因素。BERS 工作时, 磁感应强度处于材料的膝拐点附近, 这说明 BERS 处于非饱和状态, 而在这种状态下, 改变激励可很好地控制电磁力。理



论分析及实验证明：电磁体的吸力在 200 安匝以上基本上与安匝数呈线性关系。电磁吸力与电流的关系，经大量实验数据拟合后可得：

$$F = a + bNi + c(Ni)^2 + d(Ni)^3 \quad (7-5)$$

式中， N 为电磁体线圈的匝数； i 为通电电流； a 、 b 、 c 、 d 为多项式拟合系数。

当线圈匝数一定时，改变线圈中的通电电流，电磁吸力随之改变。因此在制动控制过程中选择频率恒定、占空比可调的 PWM 信号控制电磁体通断电，可达到改变制动力大小的目的。BERS 靠车载直流电源供电，通过电路把直流电转换成脉冲电流，通过调节脉冲宽度可改变脉冲的占空比。考虑到电磁材料的磁滞，PWM 信号的频率不能取得太大，一般为 200 ~ 500。由以上的公式可得制动力矩的表达式为

$$T_b = a + bNi + c(Ni_0\delta)^2 + d(Ni_0\delta)^3 \quad (7-6)$$

式中， δ 为 PWM 的占空比； i_0 为当 $\delta = 100\%$ 时电磁体的通电电流，此时电磁体输入最大通电电流，BERS 输出最大制动力矩。传感器将轮速等信号传给电控单元，然后由电控单元输出 PWM 控制信号，调节制动力矩。可以认为电磁作动系统为一阶非线性系统：

$$\dot{T}_b = (K_f \delta P_{\max} - T) / \tau \quad (7-7)$$

式中， $P_{\max}$ 为电磁作动系统产生的最大作用压力， $P_{\max} = \mu_f F_{\max}$ ； τ 为时间迟滞常数，一般取 150 ~ 200ms，主要是线圈响应滞后以及垫圈缓冲等。根据电磁效应，可得气隙磁导 δ 的计算公式为

$$\delta = \frac{\mu_0 S_0}{l} \quad (7-8)$$

当 BERS 作动时，气隙发生变化，则变化的气隙磁导 $\delta(x)$ 为

$$\delta(x) = \frac{\mu_0 S_0}{x} \quad (7-9)$$

产生的电感为

$$L(x) = N^2 \delta(x) = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{x} \quad (7-10)$$

线圈中的磁链 $\Psi = Li$ ，因此磁链的变化率为

$$\frac{d\Psi}{dt} = L(x) \frac{di}{dt} + \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt} i = \frac{N^2 \mu_0 S_0}{x} \frac{di}{dt} - \frac{N^2 \mu_0 S_0 i}{x^2} \frac{dx}{dt} \quad (7-11)$$

式 (7-11) 的第一项为自感电动势，第二部分为反电势。假设加在线圈两端的电压为 u ，则有

$$u = Ri + \frac{d\Psi}{dt} \quad (7-12)$$



式中, R 为线圈电阻。由式 (7-12) 可推导出电流为

$$i = \left(u - \frac{d\Psi}{dt} \right) / R \quad (7-13)$$

为便于仿真, 可将其写成指数形式:

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) = i_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (7-14)$$

式中, U 为初始电压; i_0 为初始电流。根据上面的公式, 可得 BERS 制动过程中反电势、电流和摩擦盘速度变化曲线如图 7-5 所示。

BERS 的制动过程通常分为两个阶段: 第一阶段是从线圈接通电流, 到其达到稳态电流为止, 此阶段 BERS 并未动作; 第二阶段是制动块开始运动, 气隙开始减小, 直到动铁心完全闭合, 气隙为零。第二阶段制动开始后, 制动块开始运动, 电流继续增加, 而此阶段反电势的增加使得自感电势下降。由于此时运动速度很小, 运动反电动势也很小, 电流的增长速度开始减小。

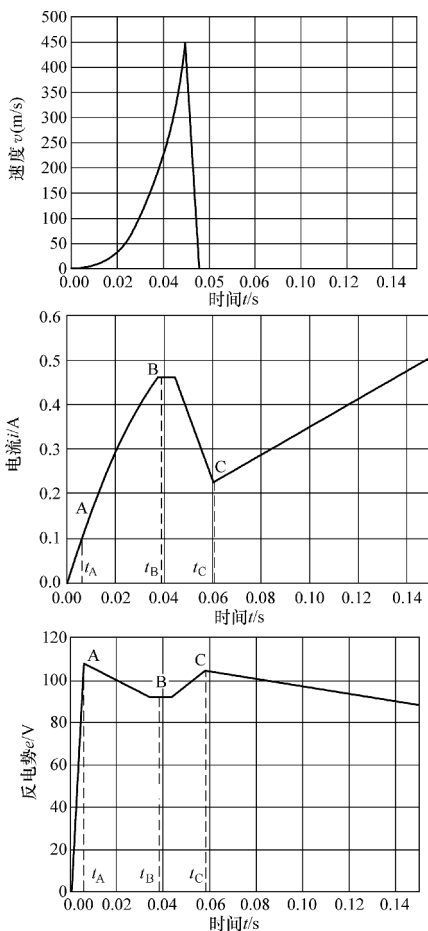


图 7-5 BERS 制动过程中反电势、电流和摩擦盘速度变化曲线

7.3 制动能量回收系统的力学模型

系统模型是对实际系统的一种抽象, 是对系统本质 (或是系统的某种特性) 的一种描述。模型应具有与系统相似的特性。好的模型能够反映实际系统的主要特征和运动规律 (系统的某种特性)。系统模型可以分为实体模型和力学模型。力学模型包括原始系统模型和仿真系统模型。原始系统模型是对系统的原始描述。仿真系统模型是一种适合于在计算机上演算的模型, 主要是指根据计算机的运算特点、仿真方式、计算方法、精度要求将原始系统模型转换为计算机程序。



本章研究的电动车辆 BERS 结构模型，如图 7-6 所示。

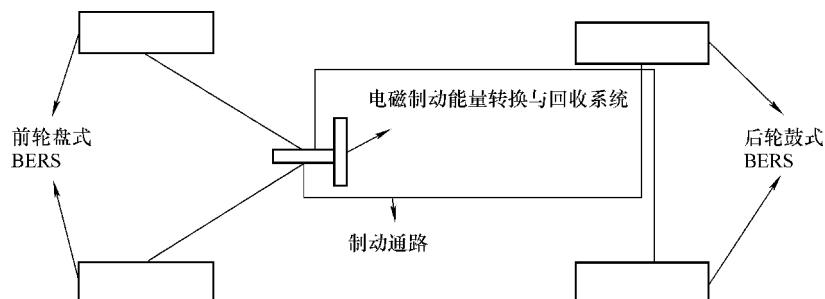


图 7-6 电动车辆 BERS 结构简图

该电动车辆制动系统由电磁制动能量转换与回收系统，前轮盘式 BERS 和后轮鼓式 BERS 组成。其制动过程如图 7-7 所示。

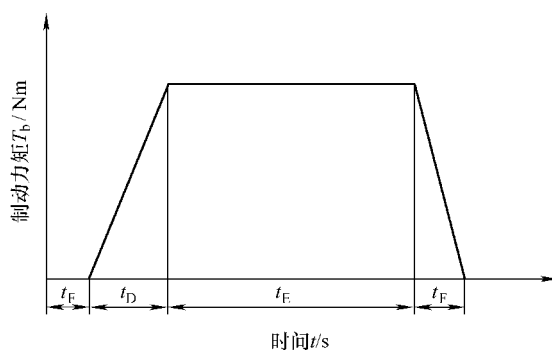


图 7-7 电动车辆制动能量回收过程中制动力矩的变化

图中 t_A 为电动车辆制动系统反应时间，是指制动踏板踩下后，克服自由行程、机械阻力及电磁铁间间隙的时间。一般液压制动系统的反应时间为 $0.015 \sim 0.03\text{s}$ ，气压制动系统的反应时间为 $0.05 \sim 0.06\text{s}$ ，而 BERS 的反应时间为 $0.006 \sim 0.01\text{s}$ 。 t_D 为制动起作用时间，这期间作用在车轮上的制动力矩不断增大，一般液压电动车辆制动系统起作用的时间为 $0.15 \sim 0.3\text{s}$ ，气压电动车辆制动系统起作用的时间为 $0.3 \sim 0.8\text{s}$ ，而 BERS 起作用的时间为 $0.01 \sim 0.05\text{s}$ ； t_E 为持续稳定制动时间，此阶段占整个制动过程的 80% 的时间以上且制动过程相对稳定； t_F 为放松制动时间，此阶段驾驶人松开制动踏板，至此制动过程结束。

本章主要研究电动车辆的 BERS 的制动性能，采用单轮电动车辆模型，以使模型简化，使制动性能的研究更容易且不受其他条件干扰。对被控对象做如下假设：电动车辆的质量均匀地分布在每个车轮上；电动车辆在平坦的路面上行驶，忽略空气阻力和车轮的滚动阻力；忽略侧向力；不考虑制动过程的振动和由此引



起的法向载荷的变化；不考虑电动车辆由于绕直线旋转或者是其他车轮上不均匀制动而造成的运动动力学。

整车及轮胎受力分析如图 7-8 所示，根据达朗伯原理，对模型中车体在行驶方向和车轮绕主轴方向两个自由度建立动力学方程，可得简化电动车辆动力学方程为

电动车辆运动方程：

$$M\dot{v} = -F \quad (7-15) \quad \text{图 7-8 单轮电动车辆模型}$$

车轮运动方程：

$$I\dot{\omega} = FR - T_b \quad (7-16)$$

车轮纵向摩擦力：

$$F = N\mu \quad (7-17)$$

制动力矩：

$$T_b = Kt \quad (7-18)$$

式中， M 为车轮的承载质量，即 1/4 车体质量； v 为电动车辆车身行驶速度； F 为车轮摩擦力； I 为车轮转动惯量； R 为车轮滚动半径； ω 为车轮角速度； T_b 为制动力矩即制动系统摩擦力矩； N 为车轮对地面的法向反力； μ 为车轮与地面间的附着系数； K 为制动系统制动因数； t 为时间。考虑轮胎模型魔术公式的表达式为

$$Y = D \sin[\text{Carctan}(B\phi)] + \Delta S_v \quad (7-19)$$

$$\phi = (1 - E)(X + \Delta S_h) + (E/B) \arctan[B(X + \Delta S_h)] \quad (7-20)$$

式中， D 为峰值因子，表示曲线的最大值； B 为刚度因子； E 为曲线曲率因子，表示曲线最大值附近的形状； C 为曲线形状因子，即曲线是像横向力、纵向力还是回正力矩； S_h 为曲线的水平方向漂移； S_v 为曲线垂直方向漂移。魔术公式模型用来模拟制动时车轮纵向附着系数和车轮滑移率之间的关系为：

$$\mu(S) = f + D \sin[\text{Carctan}[BS - E(BS - \arctan(BS))]] \quad (7-21)$$

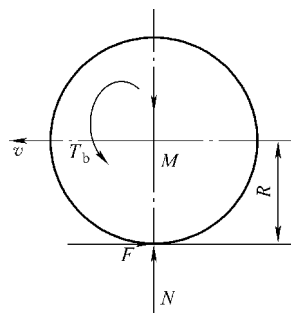
式中， f 为轮胎的静摩擦系数； S 为滑移率； μ 为纵向附着系数。

若将纵向附着系数 μ 表示成滑移率 S 的函数，其表达式为

$$\mu(S) = B(1 - e^{-CS}) - DS \quad (7-22)$$

式中， B 、 C 、 D 与魔术公式一样，都是与路面有关的参数。路面摩擦系数与车轮滑移率的关系如图 7-9 所示。

由图 7-9 可推导出两个直线方程来表达轮胎模型，即





$$\begin{cases} \mu = \frac{\mu_h}{S_C} S & (S \leq S_C) \\ \mu = \frac{\mu_h - \mu_g S_C}{1 - S_C} - \frac{\mu_h - \mu_g}{1 - S_C} S & (S > S_C) \end{cases} \quad (7-23)$$

式中, μ 为附着系数; μ_h 为峰值附着系数; S_C 为最佳滑移率; S 为车轮滑移率; μ_g 为滑移率 100% 时的附着系数。该公式体现轮胎力特性, 提炼双线性轮胎模型表达式为

$$\mu = \frac{2\mu_h S_C S}{S_C^2 + S^2} \quad (7-24)$$

定义滑移率为

$$S = 1 - \omega R / v \quad (7-25)$$

式中, ω 为车轮角速度。此模型体现轮胎力特性趋势, 而且更为简洁, 适用于电动车辆 BERS 动力学控制领域的分析和预测。

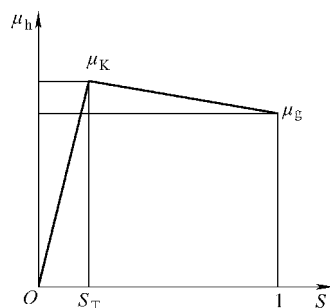


图 7-9 路面摩擦系数与车轮滑移率的关系

7.4 制动能量回收系统的主动控制策略

123

电动车辆紧急制动时, 后轮易抱死拖滑, 此时轮胎与路面的侧向附着系数极小, 电动车辆失去横向抗干扰能力, 这时只要一个很小的横向力就可使电动车辆发生侧滑, 易发生事故。而装配 ABS 的电动车辆可很好地避免这类事故的发生。制动时, ABS 可使车轮始终处于 15% ~ 25% 的边滚边滑的运动状态。处于这个状态的电动车辆, 横向附着系数比较大, 有足够的抵抗横向干扰的能力, 从而保证了电动车辆制动时有较高的横向运动稳定性, 很好地避免了紧急制动时可能出现的侧滑、甩尾等危险情况。装有 ABS 的电动车辆可以保证紧急制动时前轮抱死而无法及时躲开前方障碍物的情况。在保证以上两条安全要求的前提下, 尽量提高路面附着系数的利用率, 缩短制动距离。装有 ABS 的电动车辆的制动距离小于同车型不装 ABS 的电动车辆。减轻驾驶人的疲劳强度, 不需要驾驶人的“点制动”。因为避免了车轮的抱死拖滑等现象, 减

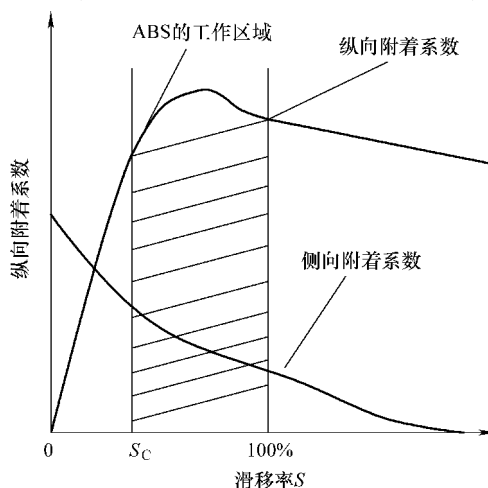


图 7-10 附着系数与滑移率曲线



少了轮胎的局部严重磨损，延长了轮胎的使用寿命。BERS 制动时的制动力是线圈中的电流通电后，由于电磁感应产生电磁吸力而使制动盘与制动块接触摩擦，从而使电动车辆制动的。电流是通过车载电池供电的，电池与电磁线圈之间通过线束连接，这更有利于 BERS 与 ABS 的集成，可更有效地提高电动车辆制动的效能和制动安全性。因此，研究基于 BERS 的 ABS 控制将成为必要工作。车轮滑移率与路面纵向附着系数和侧向附着系数有关系，附着系数为切向力或侧向力与轮胎所受垂直载荷之间的比例系数。

基于 BERS 的电动车辆的 ABS 制动系统由车轮速度传感器（WSS）、电子控制单元（ECU）、制动力调节装置和原电动车辆制动系统组成，其逻辑结构如图 7-11 所示。

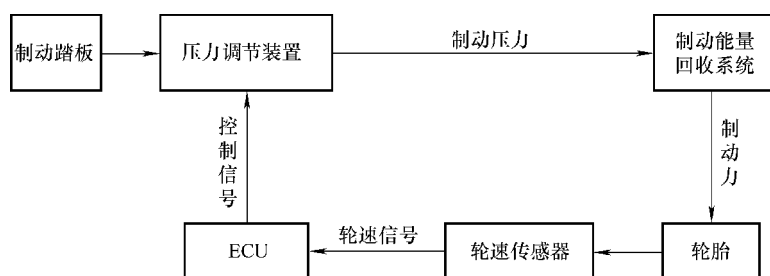


图 7-11 ABS 的组成和工作原理示意图

工作过程：车轮速度传感器不断地读入车轮的角速度信号，经处理后送至电子控制器，计算车轮的角加速度、角减速度和参考滑移率，然后与设定的门限值进行比较，根据比较得出的差值调节制动压力，保证车轮的滑移率在最佳滑移率 S_c 附近，从而获得最大的纵向附着系数和较大的侧向附着系数，使车轮始终处于较好的制动状态。基于 BERS 的 ABS 控制系统的核心技术就是控制算法，由于 ABS 具有非线性，因此有效、准确、实用的 ABS 算法成为 ABS 发展的关键。控制算法有：逻辑门限控制、PID 控制、基于路面附着系数的控制、基于耗散功率最大为目标的控制等。逻辑门限值控制算法已是一种成熟的控制算法。逻辑门限值控制算法是根据最大加、减速度，以及最佳滑移率来选取门限值，根据控制逻辑进行制动压力控制。计算出理论的最大加、减速度后，再通过试验选择合适的门限值进行逻辑控制。一般有 5 个门限值，分别为车轮角减速度门限值、车轮角加速度第一门限值、车轮角加速度第二门限值、滑移率第一门限值和滑移率第二门限值。控制压力状态一般有三种：保压、减压、升压。最终目标就是使滑移率保持在最佳滑移率附近。PID 控制算法即比例积分微分控制法，是连续系统中技术成熟、应用最为广泛的一种控制方式。它最大的优点是不需要了解被控对象的数学模型，只需要根据经验进行调节参数，即可获得满意的结果，并且实施容



易。它的不足之处是对被控对象参数变化较敏感，对纯滞后被控对象的控制效果较差。

被控对象的控制量 u 和偏差 e 的传递函数关系式为

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s) \quad (7-26)$$

式中， $U(s)$ 、 $E(s)$ 为系统控制量 u 和偏差 e 的拉氏变换； K_p 为比例系数； K_i 为积分系数， K_d 为微分系数。PID 算法既可以采用经典的控制理论在频率域中对被控对象的传递函数进行校正设计，也可以在 Z 域中对离散系统的模型进行设计，连续控制律为

$$u = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) + u_0 \quad (7-27)$$

式中， u 为控制量； u_0 为控制量初值； K_p 为比例系数； T_i 为积分时间常数； T_d 为微分时间常数； e 为控制误差。离散时间控制律为

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) - e(k-1) \right\} + u_0 \quad (7-28)$$

式中， T 为采样周期。

ABS 根据滑移率与路面附着系数的关系，可推出在实际路面下在最佳滑移率附近的控制方法，其控制律为

$$\begin{cases} \frac{d\mu}{dS} > 0 \text{ 时, } S < S_c, \text{ 需增加压力} \\ \frac{d\mu}{dS} = 0 \text{ 时, } S = S_c, \text{ 需保持压力} \\ \frac{d\mu}{dS} < 0 \text{ 时, } S > S_c, \text{ 需减小压力} \end{cases} \quad (7-29)$$

式 (7-29) 即为路面附着系数控制策略，但是由于实际中 $d\mu/dS$ 并不可测，故需要对该式进行变形，以通过可测量的参数，判断 $d\mu/dS$ 的状态，控制滑移率。由单轮模型动力学方程，得

$$\mu = \frac{T_b + I\dot{\omega}}{RN} \quad (7-30)$$

式中， R 和 I 为电动车辆结构参数，地面对车轮的反向力 N 可看作不变，则求 μ 关于时间 t 的导数，得

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{\dot{T}_b + I\dot{\omega}}{RN} \quad (7-31)$$

根据滑移率的定义式，可求滑移率对时间 t 的导数，得



$$\frac{dS}{dt} = \frac{\omega R \dot{v} - \dot{\omega} R v}{v^2} \quad (7-32)$$

由于车辆车身减速度要远远小于角减速度，则式 (7-32) 简化为

$$\frac{dS}{dt} \approx -\frac{\dot{\omega} R}{v^2} \quad (7-33)$$

联立式 (7-31) 和 (7-33)，可得

$$\frac{d\mu}{dS} = \frac{d\mu/dt}{dS/dt} = -\frac{\dot{T}_b + I\dot{\omega}}{RN} \times \frac{v^2}{\dot{\omega} R} \quad (7-34)$$

式中， R 、 N 为电动车辆的结构特性参数； v 在车辆行驶中为正，所以 $d\mu/dS$ 的符号可由 $-\frac{\dot{T}_b + I\dot{\omega}}{\dot{\omega}}$ 来确定。

利用制动系统耗散功率最大为控制目标，ABS 控制方法是基于车辆制动过程的物理实质和特性提出，根据车辆制动过程的功能转换推导出来的。车辆制动过程，实质上是车辆平动动能转化为其他形式能量的过程。在制动时，安装摩擦式制动系统的车辆，其平动动能将通过两处摩擦力做功的方式转化为热能耗散掉：一是通过路面与轮胎之间摩擦力做功的方式；二是通过制动系统摩擦力做功的方式。轮胎的纵向滑移率越大，车辆的横向力就越大，车辆的制动操纵稳定性就越差，所以为提高车辆的制动稳定性，需尽量减小车辆的纵向滑移率，即控制路面与轮胎之间的摩擦力做功功率在适当的围内；为提高车辆的制动效能，则应设法使上述二者的摩擦功率之和为最大。为了兼顾制动稳定性和制动效能，陈在峰等提出了以制动系统耗散功率最大为 ABS 控制目标的控制理论。根据能量守恒有

$$P_w = T_b \omega \quad (7-35)$$

式中， P_w 为耗散功率； T_b 为制动力矩； ω 为车轮角速度。

对式 (7-35) 求导，可得

$$\dot{P}_w = \dot{\omega} T_b + \dot{T}_b \omega \quad (7-36)$$

基于耗散功率最大为目标的控制就是通过判断 $\dot{P}_w$ 的符号来控制的， $\dot{P}_w > 0$ ，增压； $\dot{P}_w = 0$ ，保压； $\dot{P}_w < 0$ ，减压。控制方法简单。图 7-12 所示为经过大量试验数据及数据处理后得到的不同路面上轮胎纵向附着系数与滑移率的关系及制动耗散功率与滑移率的关系。比较图 7-12a 与图 7-12b 中这几种特殊路面上滑移率与纵向附着系数和制动系统耗散功率的关系可看出，除疏松积雪路面外，相应路面上与耗散功率最大值对应的滑移率 S_w 均比最大纵向附着系数 μ_c 对应的滑移率 S_c 略小，相差不大，这说明对应制动系统耗散功率极大值点的制动力矩是合适



的，也就是说，以制动系统耗散功率最大为目标的 ABS 控制与经典的使滑移率在 S_C 附近的控制等效。在疏松积雪路面上，有 S_W ($S_C \approx 1$) 但却很接近 S_m (S_m 为纵向附着系数 - 滑移率任一曲线斜率由正变为一个极小的正数的那一点所对应的滑移率的值)。在这种路面上，车轮滑移率较大，甚至接近 1 时，虽然此时纵向附着系数较大，但横向附着系数急剧下降（一般横向附着系数是滑移率的减函数），电动汽车极易丧失转向能力或后轮抱死拖滑、甩尾，发生交通事故。所以，在疏松积雪路面上，以制动系统耗散功率最大为目标的控制要明显优于经典的使滑移率保持在最佳滑移率 S_C 附近的控制。除了松软积雪路面 ($S_C = 1$) 以外， S_W 与 S_C 相近，即 S_W 自适应地与 S_C 趋同。因此采用制动系统耗散功率作为 ABS 的控制信号，可以自动地根据路况进行自适应的调节。制动系统耗散功率在滑移率 $S > S_W$ 时随滑移率的变化比纵向附着系数在 $S > S_C$ 时随滑移率的变化更显著，因此估算 S_W 会比估算 S_C 和 S_m 容易许多。基于对应最大制动系统耗散功率 S_W 具有特征显著的优点，因为特征显著就容易被识别。

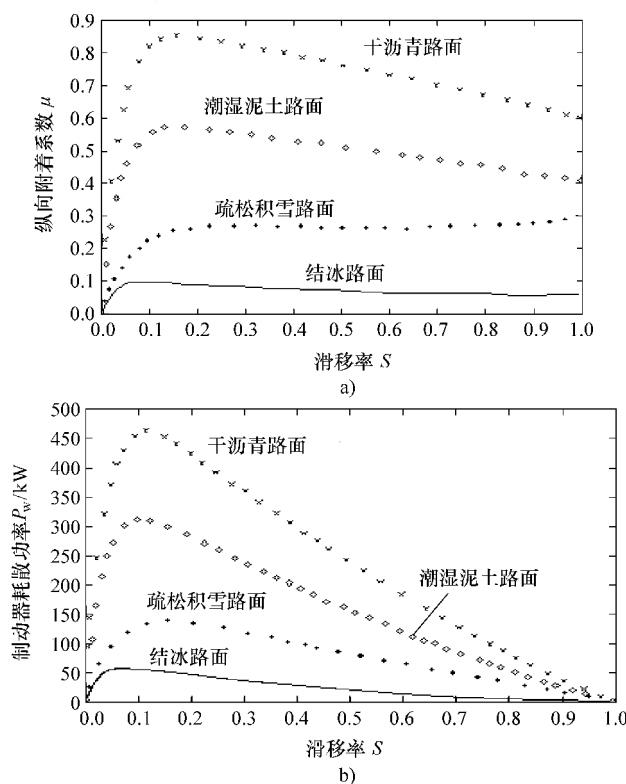


图 7-12 不同路面上轮胎纵向附着系数与滑移率的关系及制动耗散功率与滑移率的关系

a) 不同路面上纵向附着系数与滑移率的关系 b) 不同路面上制动系统耗散功率与滑移率的关系

本章采用混合建模方法：这种方法建模与人工建模相同，计算采用专用软件



包，如 ACSL 模拟语言、MATLAB 及 MATRIX 仿真语言。MATLAB 语言是由美国 Mathwork 公司于 1967 年推出的“Matrix Laboratory”（缩写为 MATLAB）软件包，并不断更新和扩充，发展到今天的 7.0 版本已经是一种功能强大、效率高、便于进行科学和工程计算的交互式软件包。MATLAB 目前已有几十个专业工具箱，其中对动力学模拟最适用的工具箱就是 SIMULINK，它是专用于系统动力学模拟的工具箱。它是集数值计算与图形功能为一体的软件包，采用图形建模的方法将各种标准的物理环节做成模块，再根据动力学方程将这些模块连接起来构成动力学系统，然后再解微分方程。应用 SIMULINK 进行电动汽车动力学控制系统的建模及仿真的优点在于，控制系统与电动车辆动力学系统有机地融为一体，同时用图形易于表达控制系统的信号流向和逻辑开关控制。利用 MATLAB，SIMULINK 进行建模仿真。SIMULINK 模型如图 7-13 所示。

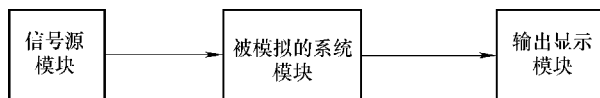


图 7-13 SIMULINK 模型

运用 SIMULINK 对电动汽车 BERS 的各个子系统进行图形建模仿真，包括单轮电动车辆模型、轮胎模型、BERS 模型等。BERS 的 ABS 各个子系统之间的关系如图 7-14 所示（以基于滑移率控制为例）。

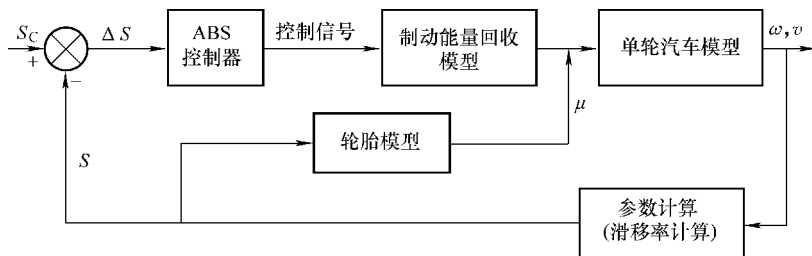


图 7-14 BERS 的 ABS 各子系统间的关系

单轮电动汽车子系统模型以制动系统制动力矩 T_b 和纵向附着系数 μ 为输入，以车身速度 v 和车轮角速度 w 为输出，并将车身速度 v 和车轮线速度 $\omega \times R$ 送入滑移率计算模块中。单轮电动车辆的 SIMULINK 仿真模块如图 7-15 所示。

根据滑移率计算公式，建立图 7-16 所示的滑移率计算仿真模块，它以车身速度 v 和轮胎线速度 $\omega \times R$ 作为输入，以滑移率 S 为输出，并将其作为轮胎子系统的输入。

本章仿真路面为干沥青路面，轮胎模型中的参数分别为： $S_C = 0.2$ ， $\mu_h = 0.9$ ， $\mu_g = 0.75$ 。轮胎的 SIMULINK 仿真以滑移率 S 为输入，经过轮胎模型块后，输出纵向附着系数 μ ，并在电动汽车制动系统中作为单轮电动车辆模型的输入，如图 7-17 所示。

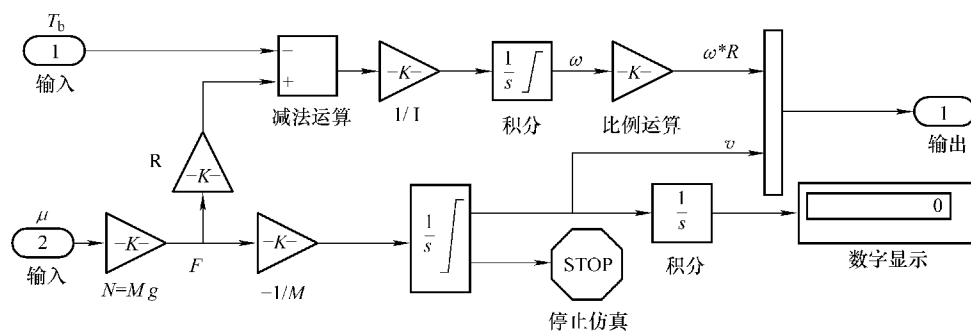


图 7-15 单轮电动汽车子系统仿真模块

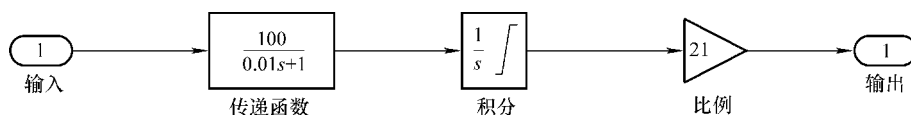


图 7-16 滑移率计算制动仿真模块

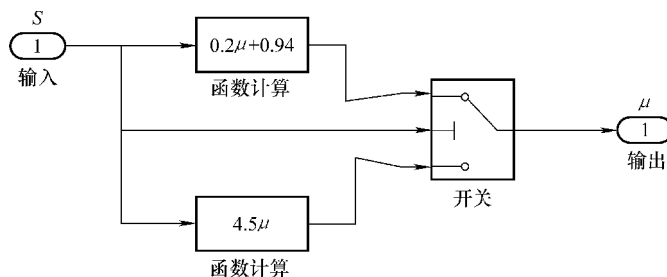


图 7-17 轮胎子系统仿真模块

电磁制动 SIMULINK 仿真子系统是以车身速度 v 和 PWM 的占空比 δ 为输入，以制动力矩 T_b 为输出，并将这一输出作为单轮电动车辆子系统的输入，如图 7-18 所示。

利用 SIMULINK 对不带 ABS 控制器的电动汽车制动系统进行了在干混凝土上的路面上的仿真，仿真图形如图 7-19 所示。

仿真结果如图 7-20a、b 所示。

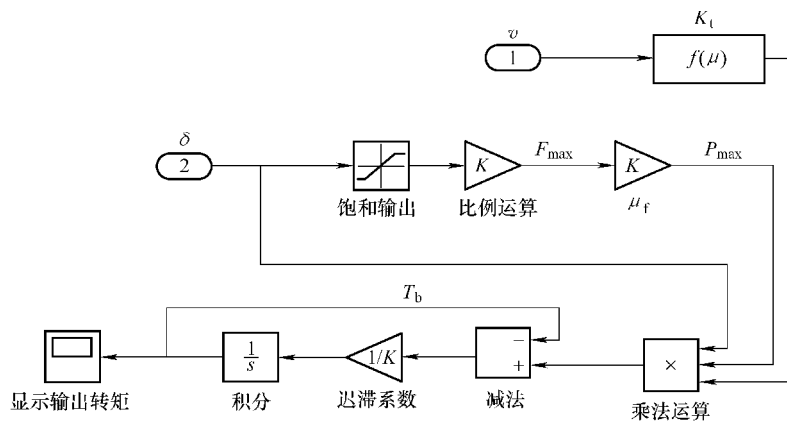


图 7-18 BERS 子系统仿真模块

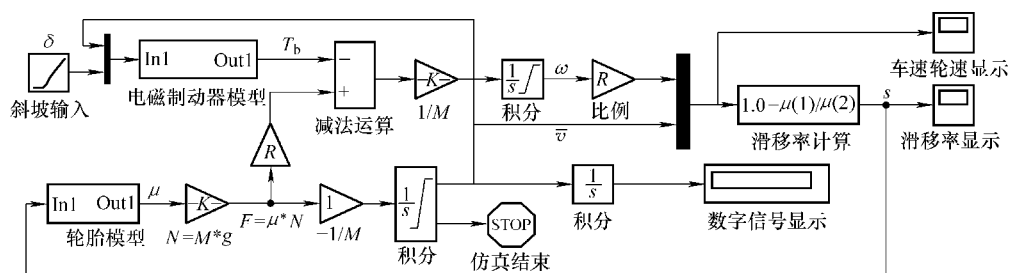


图 7-19 不带 ABS 的 BERS 的仿真模型

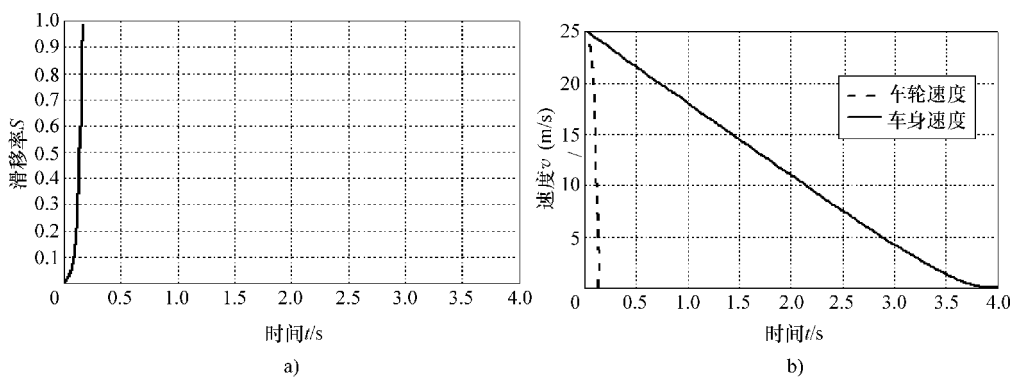


图 7-20 仿真结果

a) BERS 滑移率仿真 b) BERS 车轮速度与车身速度的对比仿真

分析图 7-20 可知：电动汽车在路面上制动时，在开始制动的 1.48s 左右车轮出现抱死，而此时的车身速度在 24.1m/s 左右，电动汽车极易发生侧滑甩尾



或失去转向能力，导致事故的发生。在建立 BERS 模型的基础上，加上 ABS 控制器就可以构成 BERS 的 ABS 仿真模型。根据逻辑门限值控制逻辑，编制了图 7-21 和图 7-22 所示的 SIMULINK 下的逻辑门限控制器及电动汽车 BERS 的逻辑门限控制仿真模型，仿真初速度为 25m/s，仿真时间为 10s，仿真步长为 0.001s，仿真结果如图 7-23 所示。

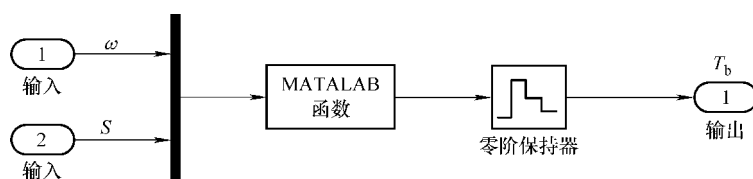


图 7-21 BERS 的逻辑门限控制器模型

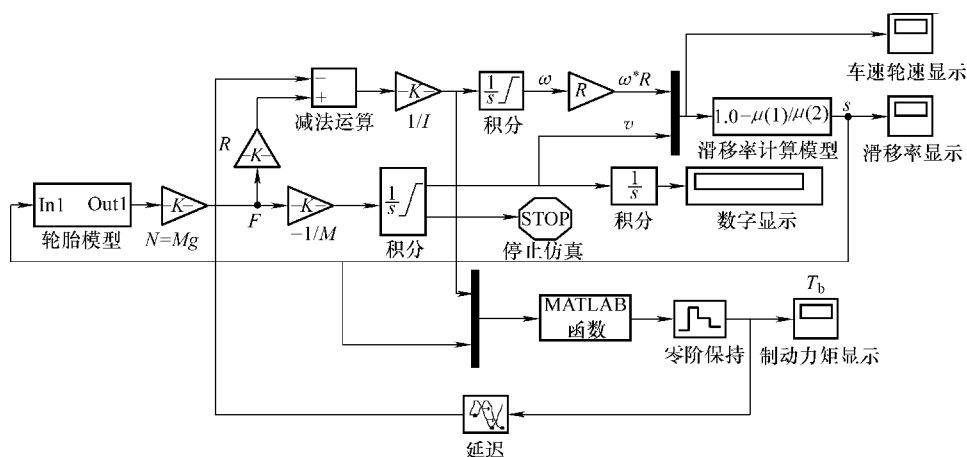


图 7-22 BERS 的逻辑门限值控制模型

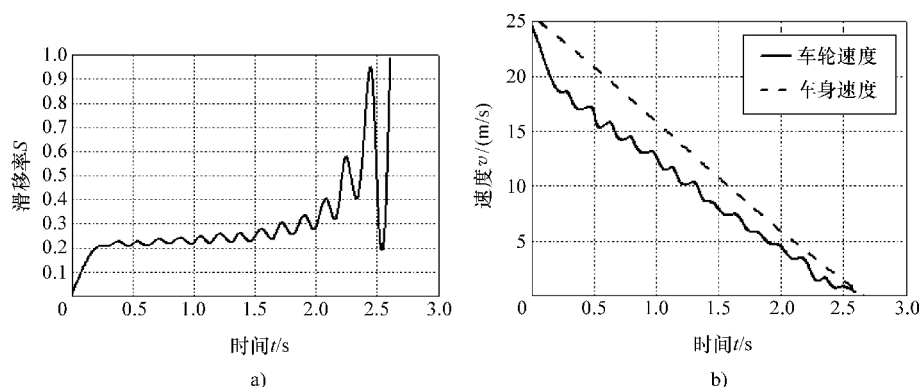


图 7-23 仿真结果

a) 滑移率变化 b) 车身与车轮速度对比

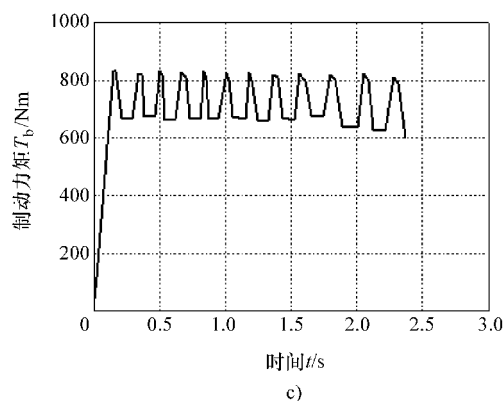


图 7-23 仿真结果 (续)
c) 制动力矩变化

分析图 7-23，逻辑门限值控制相对于不带 ABS 的电动汽车制动系统在很大程度上防止了车轮提前抱死，避免了事故的发生。根据 PID 的控制逻辑设计了 PID 控制器，如图 7-24 所示。

132

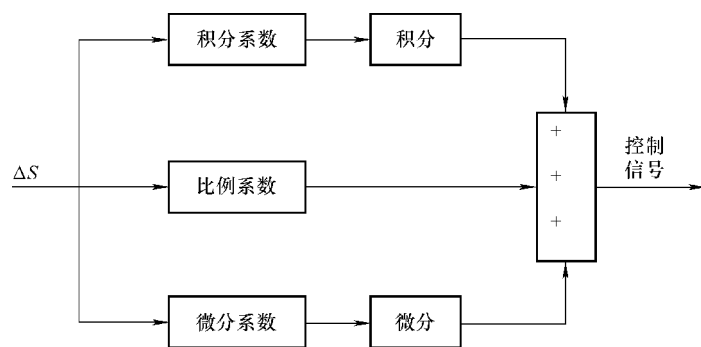


图 7-24 PID 控制器示意图

BERS 的 PID 控制模型如图 7-25 所示，其仿真结果如图 7-26 所示：

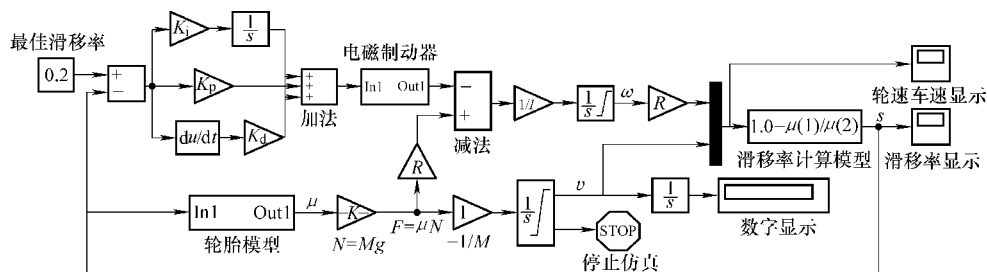


图 7-25 BERS 的 PID 控制模型

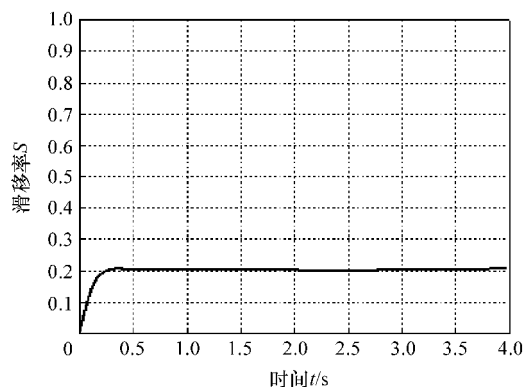


图 7-26 PID 控制的滑移率变化

分析图 7-27，车辆行驶在最佳滑移率为 0.2，PID 控制基本上可使滑移率保持在 0.2 附近。车辆速度为 0 时，车轮的速度也变为 0，也就是说车轮抱死时，车辆已经停下来。根据电磁吸力与线圈安匝数及电流的关系，建立 BERS 的力学模型，并得到了计算机仿真的验证，同时该模型可作为 BERS 理论研究的基础；建立电动车辆的 1/4 模型及轮胎模型，并研究基于 BERS 的 ABS 控制算法，为 BERS 与 ABS 的集成应用做好准备。由控制逻辑在 SIMULINK 中编写算法，得到图 7-28 所示的基于路面附着系数的控制器仿真模块。

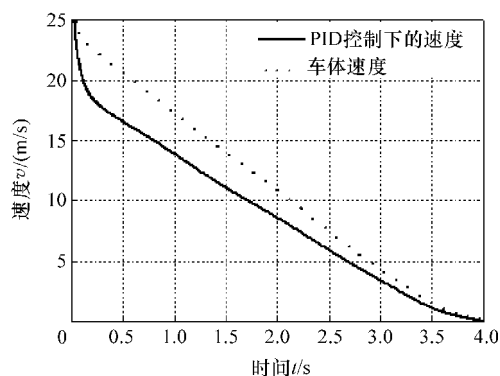


图 7-27 PID 控制的车轮速度与车身速度对比

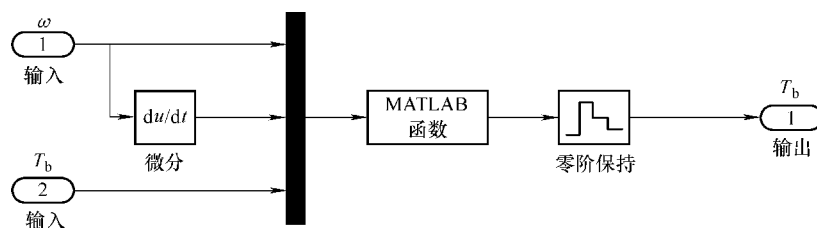
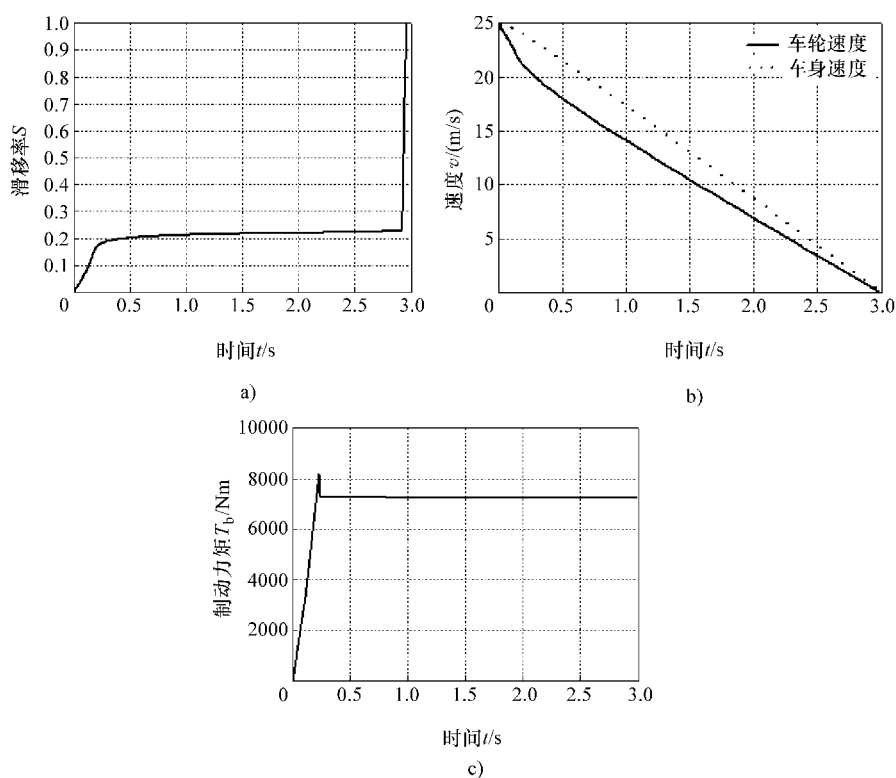
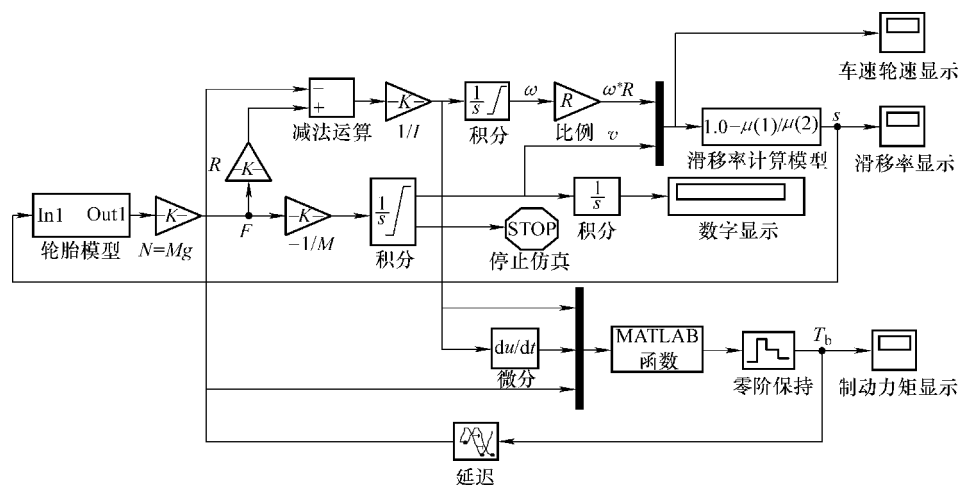


图 7-28 基于路面附着系数的控制器模块

将上面的仿真模块加入到 BERS，在 SIMULINK 中进行仿真，得到 7-29 所示的仿真模型。

仿真时长为 10s，采样时间为 0.001s，得到仿真结果如图 7-30 所示。



a) 基于路面控制的滑移率变化 b) 基于路面附着系数的车轮速度与车身速度的对比
c) 基于路面附着系数的制动力矩的变化



分析图 7-30 可知, 基于路面附着系数控制的 BERS 在干沥青路面上的制动情况: 初速度为 25m/s, 车轮抱死时速度为 0, 车轮和车身几乎同时在 2.99s 时同时抱死。

7.5 制动能量回收系统的综合控制策略

复杂路面条件下 BERS 对驱动轮滑转率的控制需要基于驾驶人加速驾驶意图判断结果合理协调发动机转矩干预和主动制动来实现。根据轮胎的附着特性曲线 (图 7-31), 当车轮的滑转率在 10% ~ 35% 的范围内, 轮胎纵向和侧向力均在较高水平。BERS 系统通过发动机输出转矩控制和主动制动控制调节驱动轮滑转率在这一范围内, 在实现驱动稳定性的前提下提高电动车辆的加速性能。

考虑到制动能量控制的优点是无须了解被控对象的力学模型, 只需根据经验调节控制参数即可获得满意效果。由实际路况、驱动轮工况变化, 设计了可变参数的自适应制动能量控制器, 来克服传统制动能量控制的不足。在分析时, 考虑到电动汽车前后载荷的转移, 忽略行驶过程中的滚动阻力和空气阻力及坡道阻力的影响, 建立包括 4 轮转动、车身俯仰运动和纵向运动的 4 轮 6 自由度整车模型。微分方程如下:

$$\text{整车纵向: } m \dot{u} + m_s D_0 \ddot{\theta} = F_{x11} + F_{x12} + F_{x21} + F_{x22} \quad (7-37)$$

$$\text{整车俯仰: } J_y \ddot{\theta} + m_s D_0 \dot{u} = 0 \quad (7-38)$$

$$\text{四轮转动: } J_1 \dot{\omega}_{11} = -F_{x11} R_1 - P_{11} + T_{11} \quad (7-39)$$

$$J_1 \dot{\omega}_{12} = -F_{x12} R_1 - P_{12} + T_{12} \quad (7-40)$$

$$J_2 \dot{\omega}_{21} = -F_{x21} R_2 - P_{21} \quad (7-41)$$

$$J_2 \dot{\omega}_{22} = -F_{x22} R_2 - P_{22} \quad (7-42)$$

式中参数意义见表 7-1。

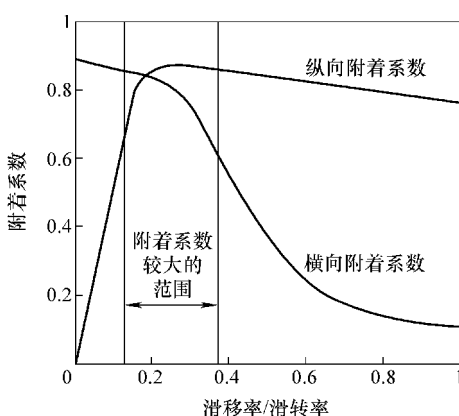


图 7-31 纵向和侧向附着系数与滑转率的关系



表 7-1 车辆动力学模型参数

符号	意义及说明
m, m_s	分别为整车质量 (kg) 和悬上质量 (kg)
D_0	整车质心至俯仰轴线的距离 (m)
u	电动汽车的纵向前进速度 (m/s)
θ	悬置以上结构俯仰运动自由度
J_y	车身绕俯仰轴线的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
J_1, J_2	前、后车轮的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
$\omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{21}, \omega_{22}$	左前轮, 右前轮, 左后轮、右后轮的转速 (rad/s)
R_1, R_2	前、后车轮的半径 (m)
$P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$	四轮的制动力矩 (Nm)
T_{11}, T_{12}	左、右前轮受到的驱动力矩 (Nm)

考虑纵向受力情况, 轮胎模型采用魔术公式, 纵向力表述为

$$F_x = D \sin \{ C \arctan [B \lambda (1 - E) + E \arctan B \lambda] \} \quad (7-43)$$

式中, D 为峰值因子; C 为形状因子; B 为刚度因子; E 为曲率因子; λ 为车轮滑转率。在 BERS 中, 驱动轮滑转率定义为

$$\lambda = 1 - v_{\text{ref}} / \omega R_1 \quad (7-44)$$

式中, v_{ref} 为参考车速; ω 为车轮的角速度。

魔术公式中各因子的表达为

$$\left. \begin{aligned} C &= b_0 \\ D &= b_1 F_z^2 + b_2 F_z \\ E &= b_6 F_z^2 + b_7 F_z + b_8 \\ B &= \frac{b_3 F_z^2 + b_4 F_z}{C D e^{b_5 F_z}} \end{aligned} \right\} \quad (7-45)$$

式中, F_z 为垂直载荷; $b_0 \sim b_8$ 为轮胎模型特性系数, 采用利用附着系数变化率估算路面附着系数, 如图 7-32 所示。

最优目标滑转率估算是滑移率控制的基础, 最优滑转率与路面附着相关, 体现了最终的路面附着能力的利用率。根据附着系数-滑移率特性曲线 (图 7-33), 路面峰值附着系数和最优滑转率 λ_s 之间可近似为线性关系:

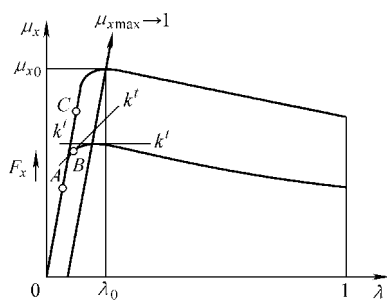


图 7-32 路面附着识别示意图



$$\lambda_s = A_1 \mu_{\max} + A_0 \quad (7-46)$$

式中, A_0 、 A_1 为系数, 可以通过轮胎试验标定。此处 $A_0 = 0.05$, $A_1 = 0.3$ 。

系统控制逻辑结构如图 7-35 所示, 驾驶人输入节气门开度和档位控制, 发动机模型采用 MAP 图实现, 根据节气门开度和转速信号可得驾驶人期望的转矩; 当期望的转矩远大于路面最大驱动力矩时, 车轮出现滑转, 控制器根据轮速传感器信息实时计算路面附着系数和最优目标滑转率。

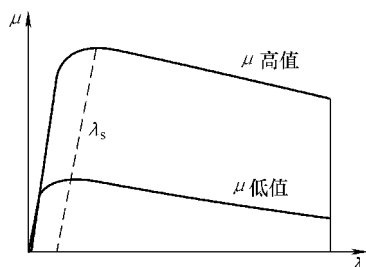


图 7-33 最优滑转率和路面附着关系

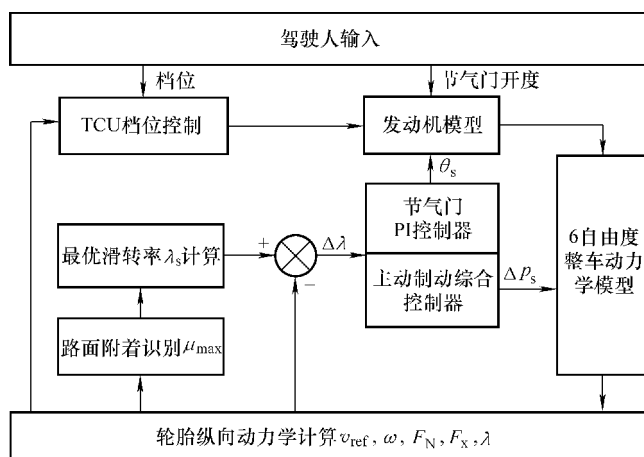


图 7-34 BERS 的控制逻辑

采用节气门的 PI 控制方式, 被控变量选用既反映滑转率又便于观测的轮速, 设最优目标滑转率为 λ_s , 参考车速为 v_{ref} , 则目标轮速的计算公式为

$$v_{\text{rt}} = v_{\text{ref}} / (1 - \lambda_s) \quad (7-47)$$

令两驱动轮轮速平均值为 $v_r = (v_{11} + v_{12}) / 2$, 则偏差 $e(k) = v_{\text{rt}}(k) - v_r(k)$ 。目标节气门开度 $\theta_s(k)$ 是实现目标滑转率的节气门开度, 采用 PI 控制器实现:

$$\theta_s(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) \quad (7-48)$$

式中, 比例系数 K_p 较大时, 系统的响应速度快, 调节精度高, 但是过大的比例系数会导致系统不稳定。积分系数 K_i 较大时, 系统的静态误差消除较快, 但取值过大会在响应过程的初期产生积分饱和现象, 从而引起系统的较大超调。

目标干涉压力 p_s 为实现最优目标滑转率的干涉压力值, 增量式制动能量控制器计算出目标干涉压力的变化速率 $\Delta p_s(k)$ 为

$$\Delta p_s(k) = K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (7-49)$$



式中, K_p 、 K_i 、 K_d 分别是比例系数、积分系数和微分系数。

采用动力性自动换档策略且换档过程中无动力中断, 车辆初始速度均为 1m/s 。路面为低附到高附变换的对接路面, 路面附着系数前 2s 为 0.2 , 后 2s 为 1.0 , 起步加速。仿真结果如图 7-35 和 7-36 所示, 图中线段 1 代表车速, 线段 2、3 分别代表左前、右前驱动轮轮速, 线段 4、5 分别代表左前、右前轮缸内的主动干涉压力, 6 为加速踏板开度, 7 为电子节气门开度。

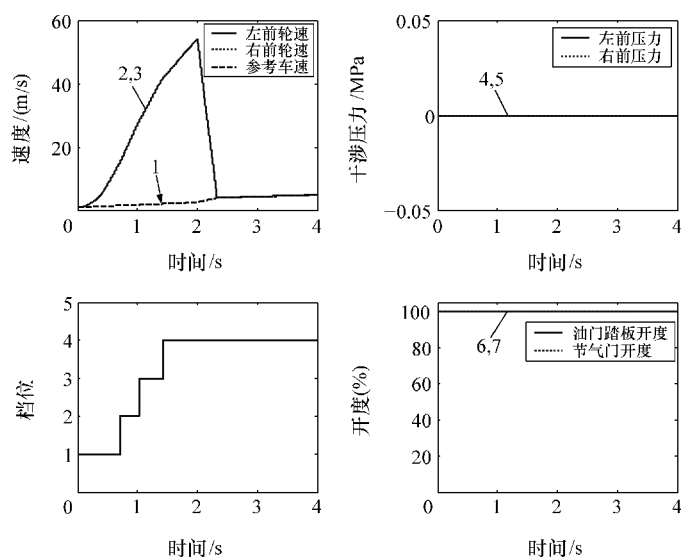


图 7-35 附着系数低→高对接水平路面起步加速 (无 BERS 控制)

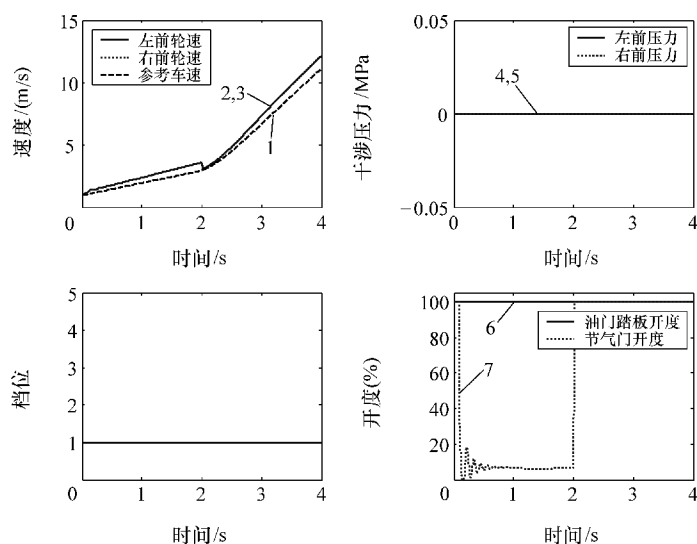


图 7-36 附着系数低→高对接水平路面起步加速 (有 BERS 控制)



由图 7-35 可知, 无 BERS 控制时, 车辆在 2s 内处于低附着路面上, 驱动轮滑转严重, 自动变速器档位由 1 档升高到 4 档, 后续加速能力受到限制, 仿真结束时末速度为 4.93m/s, 行驶距离为 12.10m。由图 7-36 可知, 有 BERS 控制时, 驱动轮滑转率受到控制, 档位保持在 1 档, 仿真结束时末速度为 11.12m/s, 行驶距离为 17.40m, 分别提高 125.56% 和 43.80%。水平对开路面起步加速仿真中附着系数设为左侧路面 0.2, 右侧路面 1.0, 结果如图 7-37 和图 7-38 所示。在

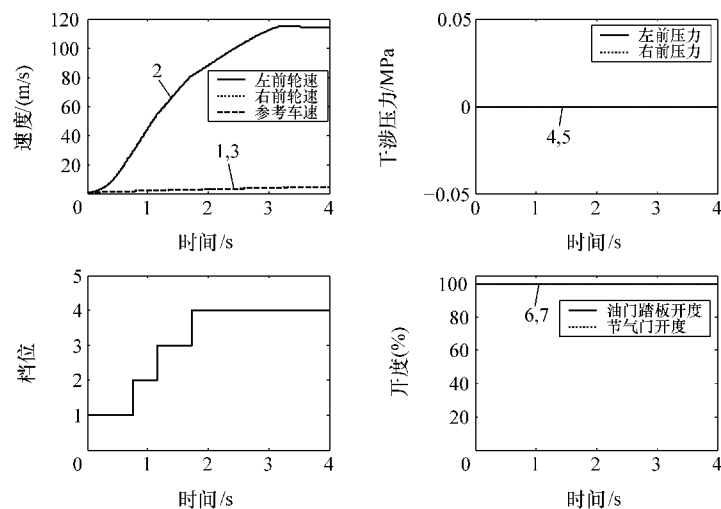


图 7-37 水平对开路面起步加速 (无 BERS 控制)

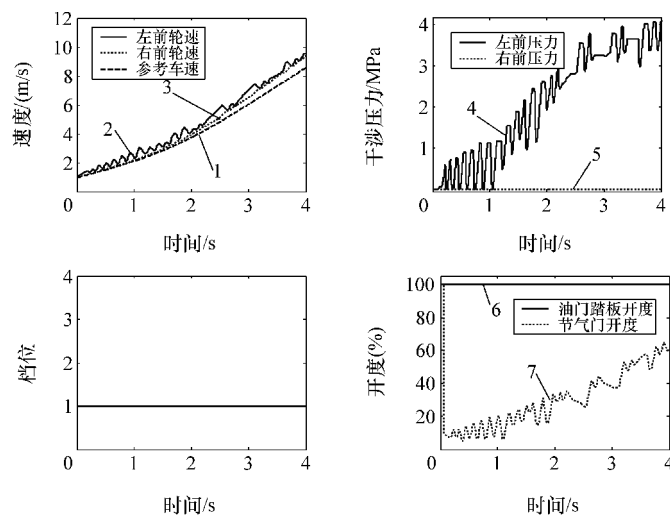


图 7-38 水平对开路面起步加速 (有 BERS 控制)



图 7-37 中, 无 BERS 控制时, 低附侧驱动轮获得的驱动力远大于路面附着力, 驱动轮发生严重滑转, 车辆从 1 档逐步升高到 4 档, 仿真结束时末速度为 4.78m/s , 行驶距离为 12.0m 。图 7-38 所示有 BERS 控制时, 在低附侧施加主动压力干涉后, 低附侧所能利用的驱动力矩增大, 高附侧驱动轮可以施加更大的驱动力矩, 以充分利用该侧的路面附着能力, 试验中驱动轮无过度滑转, 仿真末速度为 8.55m/s , 行驶距离为 16.5m , 分别提高 78.87% 和 37.5% 。

采用发动机节气门干涉和主动压力干涉, 既提高车辆行驶的动力性能又保证车辆行驶的侧向稳定性。实车试验路面附着系数在 0.25 左右; 对开路面高附侧为水泥路面, 由于路面比较潮湿, 高附侧路面附着系数约 0.6 。图 7-39 所示为试验车辆。

图 7-40 是无 BERS 控制时的试验结果。试验过程中变速器档位保持在 1 档,



图 7-39 试验车辆

加速踏板开度较大, 节气门几乎全开, 两驱动轮滑转严重, 在车速低于 3.2m/s 时驱动轮轮速已经达到了 15.4m/s 以上。图 7-41 是有 BERS 控制时的试验结果。试验过程中变速器档位保持在 1 档, 加速踏板开度较大, 开始时节气门开度随着加速踏板开度增大而增大, 当驱动轮出现轻微滑转时, 节气门开度不再跟随加速踏板开度增大而增大, 而进入变化较为平稳的控制阶段, 为了迅速控制驱动轮的滑转, 进行一定

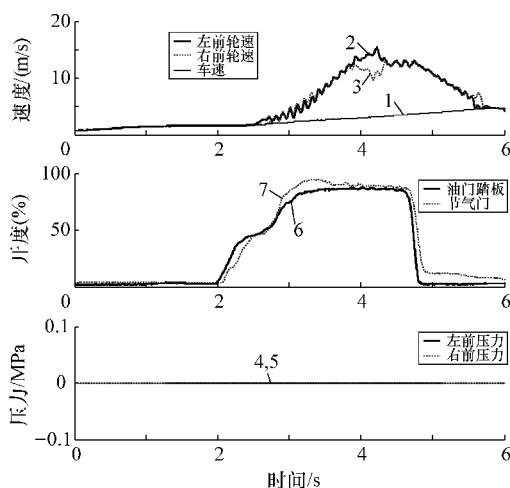


图 7-40 低附路面实车试验 (无 BERS 控制)

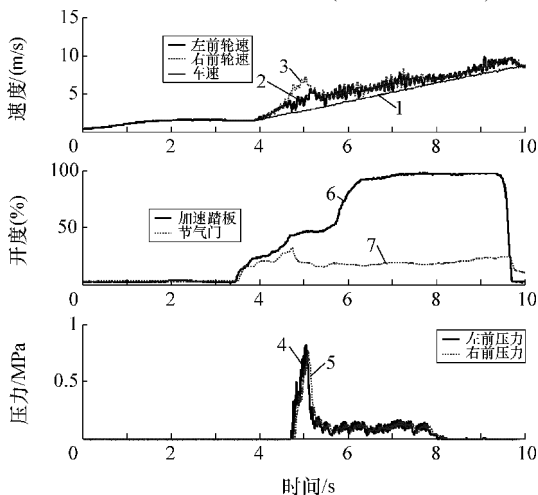


图 7-41 低附路面实车试验 (有 BERS 控制)



程度的主动压力干涉。图 7-42 是对开路面上无 BERS 控制时的试验结果。车辆左侧车轮在高附着路面上，右侧车轮在低附着路面上。试验过程中加速踏板开度较大，接近 95% 开度，节气门开度几乎达到 100%。由于右侧车轮在低附着路面上，因而右侧车轮出现了滑转，在车速不到 6m/s 时右侧驱动轮轮速已经超过 23m/s。在此过程中驾驶人可以听见驱动轮滑转发出的尖锐声音，驾驶舒适性较差。图 7-43 是对开路面上有 BERS 控制时的试验结果。当驱动轮出现滑

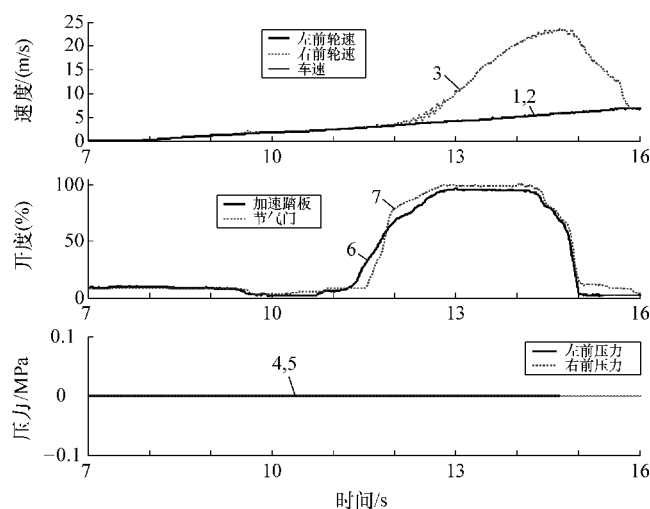


图 7-42 对开路面实车试验（无 BERS 控制）

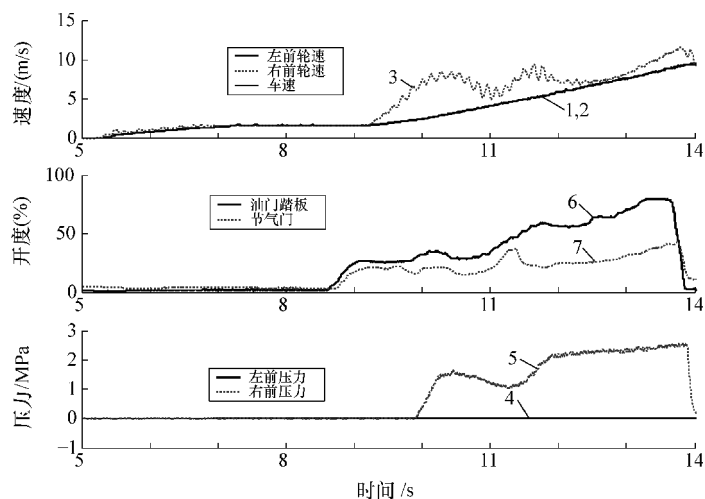


图 7-43 对开路面实车试验（有 BERS 控制）



转趋势时，节气门开度不再随着加速踏板开度增大而增大，而是进入变化较为平稳的控制阶段。在对开路面上只有低附侧驱动轮会出现滑转，通过对低附侧驱动轮进行主动压力干涉来提高车辆的加速能力，在此过程中低附侧驱动轮受到的主动干涉压力较大，最大干涉压力值达到 2.5MPa。

复杂路面条件下的 BERS 有可变参数制动能量控制器控制策略。该策略能够对 BERS 工作中路面附着条件的变化进行自适应的调整控制参数，从而获取良好的整车驱动性能和行驶稳定性，具有实际应用价值。

7.6 基于制动能量回收的热力学理论

由于制动盘（鼓）边界上热载荷的交变特性，进行温度场全三维仿真实际是一个复杂的“四维”问题。因此全三维瞬态热力学仿真计算较之常规的热力学分析工作量成几何数量级的增长，给制动系统虚拟设计的高效求解带来了困难。因此需要对力学模型进行简化，开发快速仿真模型。在制动盘（鼓）上到中心距离相等的同心环上任意两点 A、B 的载荷如图 7-44 所示。制动盘（鼓）结构上存在循环对称轴和周期角，并且绕此轴旋转任意一个周期角时，旋转前后的结构重合，物理参数和边界条件也完全重合。

循环制动过程中，制动系统的温度达到了 400℃ 甚至更高，此时必须考虑辐射边界条件。具有循环对称特征的构件的温度场的求解可以化为对称边界下的一般结构的泛函变分极值问题，从而可以方便地利用热力学法求解。对完全循环对称式的制动鼓，可以直接采用二维热力学模型，如图 7-45 所示。对于完全循环对称式的实心式制动盘，可以直接采用二维热力学模型，如图 7-46 所示。对于空心盘式制动系统，考虑散热筋板结构，建立自通风式三维循环对称热力学模型，如图 7-47 所示。在制动过程中，电动汽车的动能通过轮胎与地面之间的滑动摩擦力和制动系统摩擦副之间的摩擦生热耗散。对于安装有 ABS 的电动汽车，

142

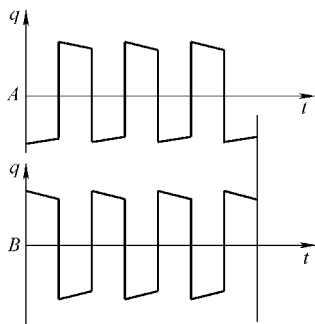


图 7-44 A、B 点热流函数曲线对比图

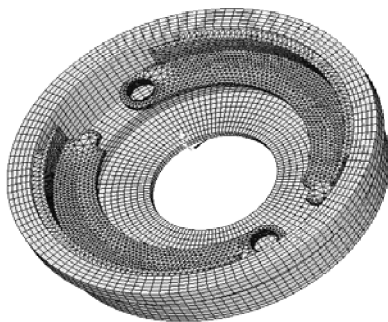


图 7-45 制动鼓的整体热力学模型



希望通过制动系统摩擦副耗散的制动能量最大, 这样就能将滑移率控制在最佳的滑移率上, 保证电动汽车的制动稳定性。基于这一实际工况, 一般将滑移率 s 通过 ABS 控制在 10% 左右, 即认为在制动过程中 90% 的热量通过制动系统摩擦生热耗散。根据制动过程中的能量转换, 得到任意时刻电动汽车上前、后制动系统上因为制动摩擦生热产生的热流密度为

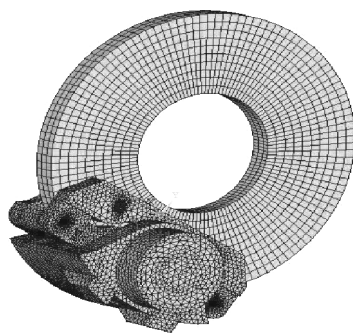


图 7-46 实心盘式制动系统整体热力学模型

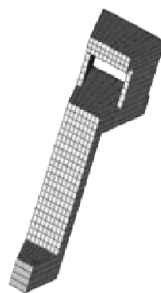


图 7-47 空心盘式热力学模型

前制动系统

$$q_f = mu_l \beta z g (1 - s) / (7.2 A_f) \quad (7-50)$$

后制动系统

$$q_r = mu_l (1 - \beta) z g (1 - s) / (7.2 A_r) \quad (7-51)$$

式中, u_l 为循环制动过程中电动车辆的瞬时速度。根据制动系统台架试验方法 (国标 QC/T 564) 得

$$u_l = u_0 - at \quad (7-52)$$

式中, m 为车质量; β 为制动力分配系数; z 为制动强度; s 为滑移率; A_f 为前制动盘总工作面积; A_r 为后制动盘总工作面积。

在制动过程中, 制动产生的热量将在制动系统接触副之间进行分配。基于前面的循环对成理论, 总的热量在制动衬块和制动盘 (鼓) 之间分配系数为

$$\xi = \frac{q_r}{q_k} = \left(\frac{\rho_r C_r K_r}{\rho_k C_k K_k} \right)^{0.5} \quad (7-53)$$

式中, q_r 、 ρ_r 、 C_r 、 K_r 分别为制动盘 (鼓) 的热流密度函数、密度、比热、导热系数; q_k 、 ρ_k 、 C_k 、 K_k 分别为制动系统摩擦块的热流密度函数、密度、比热、导热系数。因为密度、比热、导热系数是温度的函数, 所以热载荷的分配系数 ξ 为温度的函数。实心制动盘与外界对流换热系数为

$$a_1 = \begin{cases} 0.04 (\lambda_a / d_a) Re^{0.8} & (\text{当 } Re > 2.4 \times 10^5) \\ 0.7 (\lambda_a / d_a) Re^{0.55} & (\text{当 } Re \leq 2.4 \times 10^5) \end{cases} \quad (7-54)$$



式中, $Re = u_a \rho_a d_a / (3.6 \mu_a)$ 为雷诺数; ρ_a 为空气的密度; μ_a 为空气的黏度; λ_a 为空气导热系数; d_a 为制动盘的外径。空心盘式制动系统的对流换热系数包括制动盘的对流换热系数 α_1 和自然通风孔的对流换热系数 α_2 之和。通风孔的对流换热系数为

$$\alpha_2 = \begin{cases} 0.046 \left[1 + \left(\frac{d_h}{l} \right)^{0.67} \right] Re^{0.8} P_r^{0.33} \left(\frac{\lambda_a}{d_h} \right) & (\text{当 } Re > 10^4) \\ 3.72 \left(\frac{Re}{P_r} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{d_h}{l} \right)^{0.83} \frac{\lambda_a}{d_h} & (\text{当 } Re \leq 10^4) \end{cases} \quad (7-55)$$

式中, l 为制动盘的长度, $l = (d_a - d_i)/2$; d_h 为流体力学直径, $d_h = \frac{2Bd_i(\theta d_a/360 - A_c)}{d_a(B + \theta d_a/360 - A_c)}$; v_q 为风孔中气流的平均速度, $v_q = 0.026w \sqrt{d_a^2 - d_i^2} (1 + d_a/d_i)$; Re 为雷诺数, $Re = v_q \rho_a d_h / \mu_a$; d_a 、 d_i 为空心制动盘的外径、内径, B 为通风槽的宽度, h 为制动盘的厚度, A_c 为摩擦片的衬片面积, θ 为摩擦片包角; w 为制动系统的转速。因此, 空心盘总的对流换热系数为 $a = a_1 + a_2$ 。鼓式制动系统制动鼓的旋转圆周表面部分和外界的换热系数与实心盘换热条件相似, 所以 $a = a_1$, 而以 Z 轴为旋转轴的直径为 D 的制动接触表面的换热系数 ($Re \geq 1000$) 为

$$a_3 = 0.1 \left(\frac{\lambda_a}{D} \right) Re^{\frac{2}{3}} \quad (7-56)$$

辐射的热流密度为

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma [(t_w + 273)^4 - (t_f + 273)^4] \quad (7-57)$$

式中, q_{rad} 为辐射热流密度; t_w 为制动盘 (鼓) 温度; t_f 为环境温度; ε 为摩擦辐射系数, 对于制动盘 (鼓) 取 0.55; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ 。在进行热力学仿真计算过程中, 由于辐射换热是一个高度非线性问题, 求解过程难以收敛。为此, 将辐射换热等效为对流换热, 式 (7-57) 等效为

$$q_{\text{rad}} = a_{\text{eqr}} (t_w - t_f) \quad (7-58)$$

式中, $a_{\text{eqr}} = \varepsilon \sigma [(t_w + 273)^2 + (t_f + 273)^2] (t_w + t_f + 546)$

以后制动系统为例, 当制动盘 (鼓) 接触面处于制动接触时段时, 输入的热流密度为

$$q_{\text{in}} = \frac{\xi}{1 + \xi} q_r - (a + a_{\text{eqr}}) (t_w - t_f) \quad (7-59)$$

制动盘 (鼓) 接触面处于非制动接触时段, 以及制动盘 (鼓) 非接触面输出热流密度为

$$q_{\text{out}} = (a + a_{\text{eqr}}) (t_w - t_f) \quad (7-60)$$



式中, a 为对流换热系数, 根据不同制动系统结构的不同部位, 分别对应参数 a_1 、 $a_1 + a_2$ 、 a_3 。

15 次制动循环的温度循环曲线如图 7-48 所示。图中曲线表示的是制动系统制动副接触面上不同位置上两点的温度曲线。经历了 15 次循环制动后, 制动鼓上瞬变的温度场达到动态平衡。

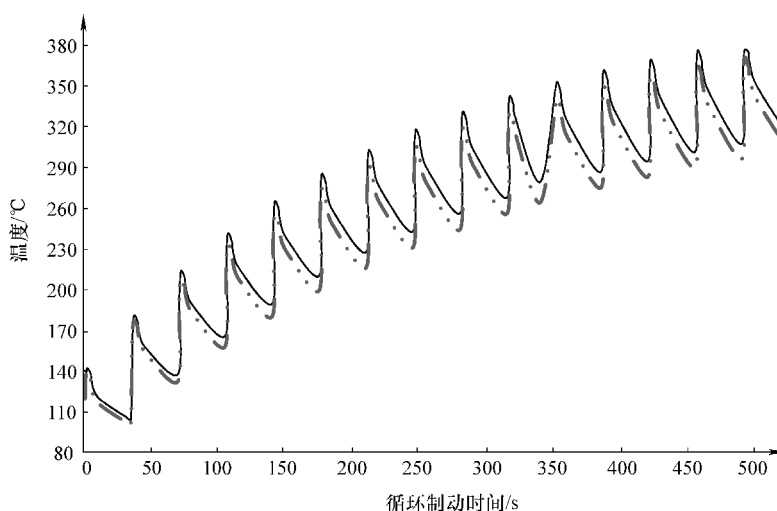


图 7-48 15 次循环制动制动接触面温度曲线

为了验证力学模型的正确性, 在相同的工况下, 在具有国际先进水平的 SCHENCK (PWDOCPV0750200) 惯性式制动系统测功机上进行了 15 次循环制动试验测试, 将仿真结果和测试结果进行了对比分析, 仿真结果和测试结果均为循环过程中摩擦副的最高温度。结果表明: 热力学仿真模型具有较高的精确度, 循环温度的试验结果和分析结果变化规律一致, 二者的偏差在 5% 以内, 因而采用热力学方法分析制动能量回收循环中的问题是有效的和可行的。

参 考 文 献

- [1] 厉天威, 阮江军, 等. 大规模电磁场数值计算中并行迭代方法的比较 [J]. 电工技术学报, 2007, 08 (012): 88-90.
- [2] 邹继斌, 王骞, 等. 横向磁场永磁直线电动机电磁力的分析与计算 [J]. 电工技术学报, 2007, 08 (009): 13-17.
- [3] 白志红, 周玉虎. 电磁铁的动态特性的仿真你与分析 [J]. 电力学报, 2004, 03 (007): 90-94.
- [4] 孙骏, 朱忠奎, 等. 汽车制动防抱系统的混合建模与仿真研究 [J]. 系统仿真学报. 2004, 09 (027): 88-90.



- [5] Georg F Mauer. A fuzzy logic controller for an ABS braking system [J]. Fuzzy systems technology, 2009, 34 (11): 381 - 388.
- [6] Jeremy Broughton, Chris Baughan. The effectiveness of antilock braking systems in reducing accidents in Great Britain [J]. accident analysis and prevention, 2009, 34 (009): 347 - 355.
- [7] 陈在峰. 以制动器耗散功率最大为目标的 ABS 控制方法研究与系统实现 [D]. 北京: 清华大学, 2000.
- [8] 阎清东, 李宏才, 唐衍. 热力学法在湿式多片制动器温度场研究中的应用 [J]. 电动车辆科技, 2001 (2): 13 - 17.
- [9] 周凡华, 吴光强, 沈浩, 等. 盘式制动器 15 次循环制动温度计算 [J]. 电动车辆工程, 2001 (6): 411 - 418.
- [10] 王文静, 谢基龙, 刘志明, 等. 基于循环对称结构制动盘的三维瞬态温度场仿真 [J]. 机械工程学报, 2002, 38 (12): 131 - 34.
- [11] 庄光山, 王成国, 王海庆, 等. 盘式制动器摩擦片的温度场研究 [J]. 机械工程学报, 2003, 39 (2): 150 - 154.
- [12] 俞昌铭. 热传导及其数值分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1982: 321 - 366.
- [13] Zhang Jia cai, Li Kai, Li Jing, et al. Control methods for automobile traction control system [J]. Journal of Jilin University, 2006, 4: 514 - 517.
- [14] Pieter M de Koker; Gouws J; Pretorius L. Fuzzy control algorithm for automotive traction control systems [J]. Electrotechnical conference, 1996, 1: 226 - 229.
- [15] Sangmin Kang, Maru Yoon, Myoungcho Sunwoo. Traction control using a throttle valve based on sliding mode control and load torque estimation [J]. Journal of Automobile Engineering, 2004, 219: 645 - 653.
- [16] 李亮, 宋健, 于良耀, 等. 低附路面电动车辆动力学稳定性控制系统控制策略 [J]. 机械工程学报. 2008, 1.
- [17] 杨财. 电动车辆驱动防滑控制方法及动力学稳定性综合控制策略研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [18] Pacejka H B, Bakker E. The magic formula tyre model. Vehicle system dynamics, 1992, 21: 1 - 18.
- [19] 杨财, 李亮, 宋健, 等. 基于轮胎力观测器的路面附着系数识别算法 [J]. 中国机械工程, 2009, 20 (7): 873 - 876.
- [20] L Li, J Song, H z Li, et al. Comprehensive prediction method of road friction for vehicle dynamics control [J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers part D - Journal of Automobile Engineering, 2009, 223 (8): 987 - 1002.

第 8 章 电动车辆压电能量回收技术

实现电动汽车等新兴工业应用，需要设计和开发能量可调的大型能源系统。反过来，电动车辆中的激励、压力与振动信号，又为能源系统提供了丰富的压电能量来源，如图 8-1 所示。科学家认为直接用传统器件去采集这些能量非常困难，并且实施这些能量传输与转换也十分烦琐，如图 8-2 所示。为了解决这些难题，科学家认为压电效应与压电能量效应就尤为重要。压电效应是压电器件在应力作用下产生形变时出现内部电势现象，广泛应用于电池和能源领域，如图 8-3 所示。当压电器件受到外加应力时，由于离子极化产生极化电荷，有效改变了电极界面势垒和电子输运性质。压电能量效应是利用应变作用引起的电极界面极化电荷，调制电极界面处能量结构，进而有效地调节和控制电池能量转换，优化电子输运，如图 8-4 所示。非对称性单原子层二维材料 MoS_2 具有显著理论压电能量效应，然而，该压电能量效应从未在实验中被观测验证过。

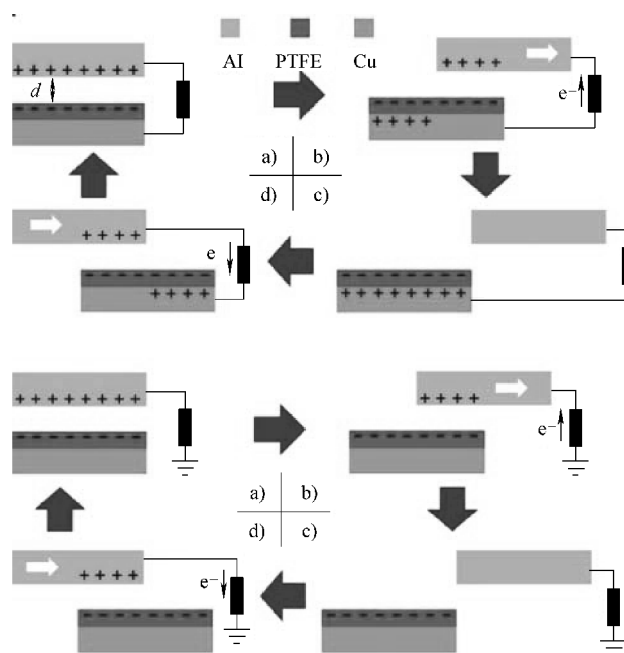


图 8-1 压电能源回收示意图

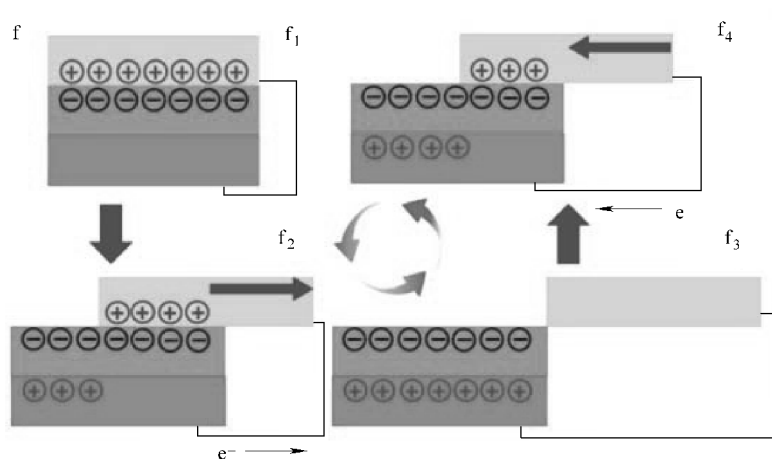


图 8-2 压电能源采集装置

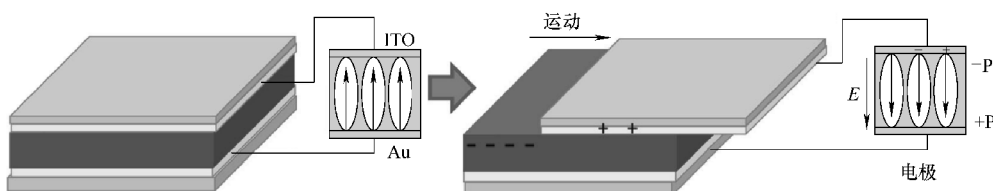


图 8-3 压电电池能源系统

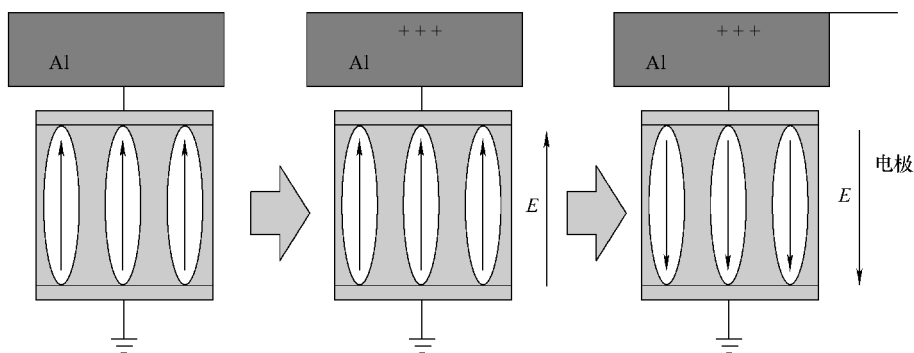


图 8-4 电极界面极化电荷压电能量回收系统

Wang 等在二维单原子层 MoS_2 中，通过实验观测到压电效应 (piezoelectric effect) 和压电能量效应 (piezotronic energy effect)，并利用单原子层 MoS_2 受应力/应变作用产生压电极化电荷，对电子输运进行调控，实现了原子尺度机械能到电能的转化。他们在 MoS_2 中观测到显著压电能量效应，并实现了原子尺度的压电机机械能量采集，如图 8-5a 所示。他们用谐波技术确定 MoS_2 电极位置和施加应变方向，在 MoS_2 两端电极受应变产生的极化电荷，驱动电子在外电路中的流

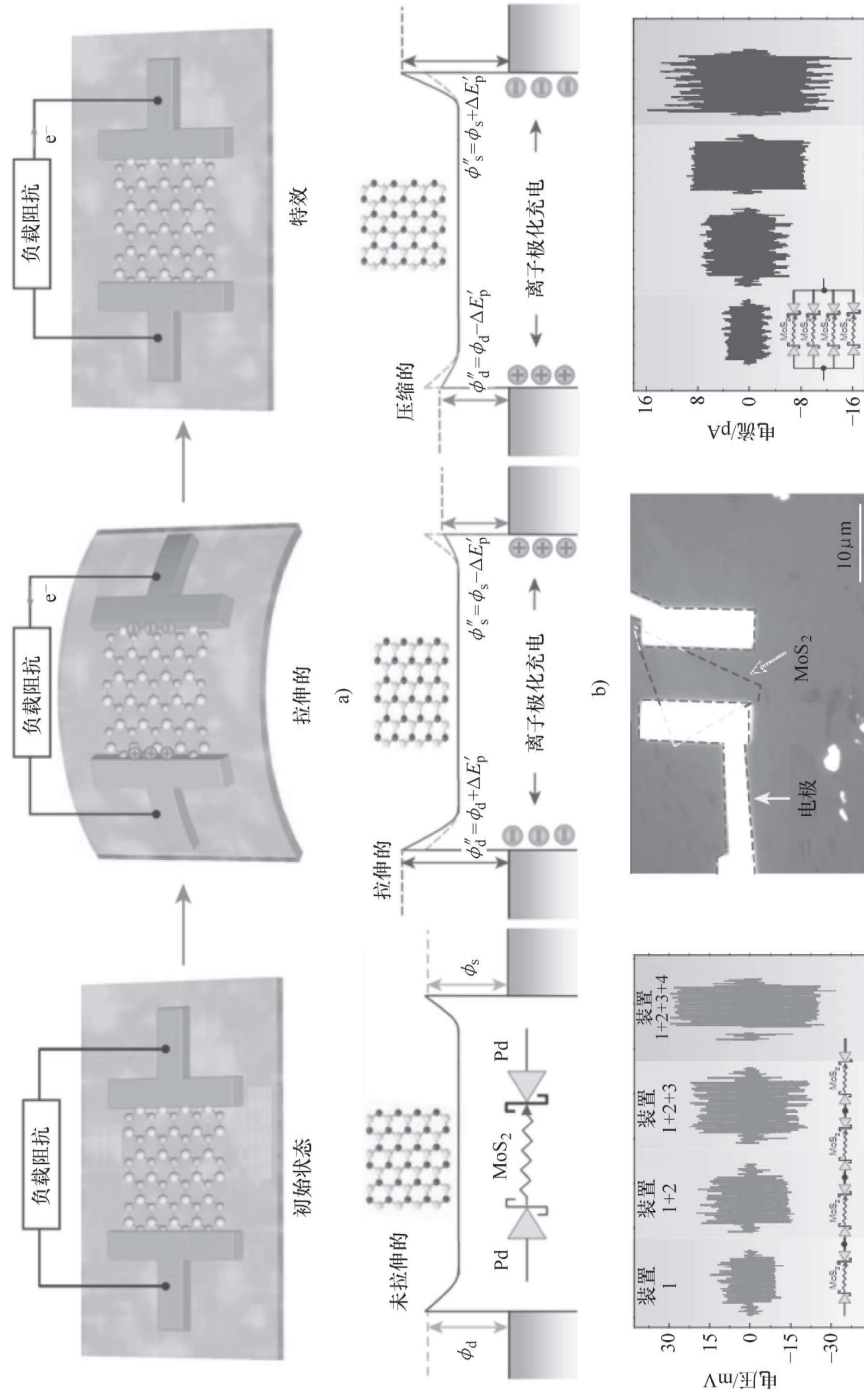


图 8-5 MoS₂ 固态电池压电能量回收机理

a) MoS₂ 中压电机械能量采集模型 b) 单原子层 MoS₂ 压电能量反向输出效应 c) 串并联 MoS₂ 器件相应增加的压电输出电压、电极模型和电流



动,实现从机械能到电能的转化。 MoS_2 中离子极化产生的极化电荷,可有效改变电极界面势垒,实现对能量输运的有效调控。该工作的技术突破为,在单原子层 MoS_2 中观测到压电能量效应,极化电荷随应变方向改变 90° ,单原子层 MoS_2 压电能量反向输出,如图 8-5b 所示。他们利用阵列集成气相法获得单层 MoS_2 ,实现了压电能量输出和转化,通过电气串联或并联单个 MoS_2 器件,使该能量系统的压电输出电压和电流都得到相应增加,如图 8-5c 所示。这为大规模集成 MoS_2 电池并将其应用于电动车辆纳米能源电池组提供了可能性。 MoS_2 压电能量性质随层数改变而变化,由于原子层数的改变导致相应的材料晶体对称性发生变化,具有明显的尺寸效应,当 MoS_2 层数为奇数时,其压电能量效应随着奇数层数的增加而减弱。通过压电能量效应,机械应变可调控 MoS_2 电池中的能量输运,利用压电极化电荷,可调控电极势垒,实现不改变电极结构或界面性质,就可调控电池能量储存的效果,这是传统技术不能实现的。

8.1 电动车辆固态压电能量系统回收模型与技术

快速充电也是现在电池技术的难题。压电能量回收系统损耗的重要原因是在充放电过程中,正负电极在吸收和释放电解质里离子时自身的膨胀和收缩。在充放电过程中,电极纳米粒子会相对统一地吸收和释放离子。但是如果只有少部分粒子吸收了所有离子,那么电极会加速损坏,减少压电能量回收系统寿命。学者们利用不同的电流对压电能量回收系统进行不同时间的充电,然后迅速将它们分离并阻止充电/放电过程,还将电极切成薄片,并利用同步加速 X 射线检测。Chueh 等对压电能量回收系统里微小粒子行为的研究显示,对压电能量回收系统快速充电,然后用于高功率快速耗电的工作,对压电能量回收系统的损伤没有人们预想的差,而缓慢充电和耗电所带来的益处可能也被过度夸大。这项结果挑战了有关快速充电比缓慢充电对电极要求更高的观点。他们改变压电能量回收系统或改变充电方式,以提升统一的充电和放电过程,从而延长压电能量回收系统寿命。在充放电过程中电极变化细节只是确定压电能量回收系统寿命的众多因素之一,但这一因素在这项研究之前尚未被完全理解。他们发现了压电能量回收系统老化的新证据,研究上千个电极纳米粒子,在不同条件下对充放电过程进行了详细分析,获得了充放电过程中的动态表征。他们发现在充电过程中只有少部分纳米粒子吸收和释放离子,即使这个过程非常迅速。但当压电能量回收系统放电时,有趣的事发生了,随着放电速率增加超过一定极限,越来越多粒子开始同步吸收离子,转变成一个更加统一、损害较少的模式。这表明在保证较长压电能量回收系统寿命的前提下,优化电极可实现更快的充放电速率。通过上千次循环运行电极,能够拍摄压电能量回收系统在充放电过程中的实际情况,这个过程在同



步加速器同 X 辐射源里进行。他们正与工业界密切合作，探寻如何应用快速充电在电动车辆领域。

Li 等用非局部位错塑性模型对纳米电极塑性流动问题进行深入研究。该模型解决了电极能量理论中难以描述塑性变形的问题，并能用于大规模压电能量回收系统，对电动车辆压电能量回收系统研究具有重要应用价值。纳米塑性是当前纳米压电能量回收系统研究的热点，其塑性变形导致软化行为与块体电池截然相反。基于缺陷能量的非局部塑性理论，他们提出了纳米尺度塑性变形中存储缺陷能量机制，反映了位错近程相互作用距离，非局部晶体塑性模型在纳米压电位错和界面的相互作用，如图 8-6a 所示，对锂电池性能有重要影响，而传统高阶模型仅能处理锂离子穿过或堆积在晶界上。本模型优点为，它可以把“离子流”类比成能源传输中的“电流”，来处理其在晶界的堆积、扩散等行为。因此该模型弥补了现有模型不足，拓宽了压电能量回收系统变形理论的应用。随着应变率的增加，位错微结构图案从均匀形态变成单一形态，如图 8-6b 所示。位错滑移都

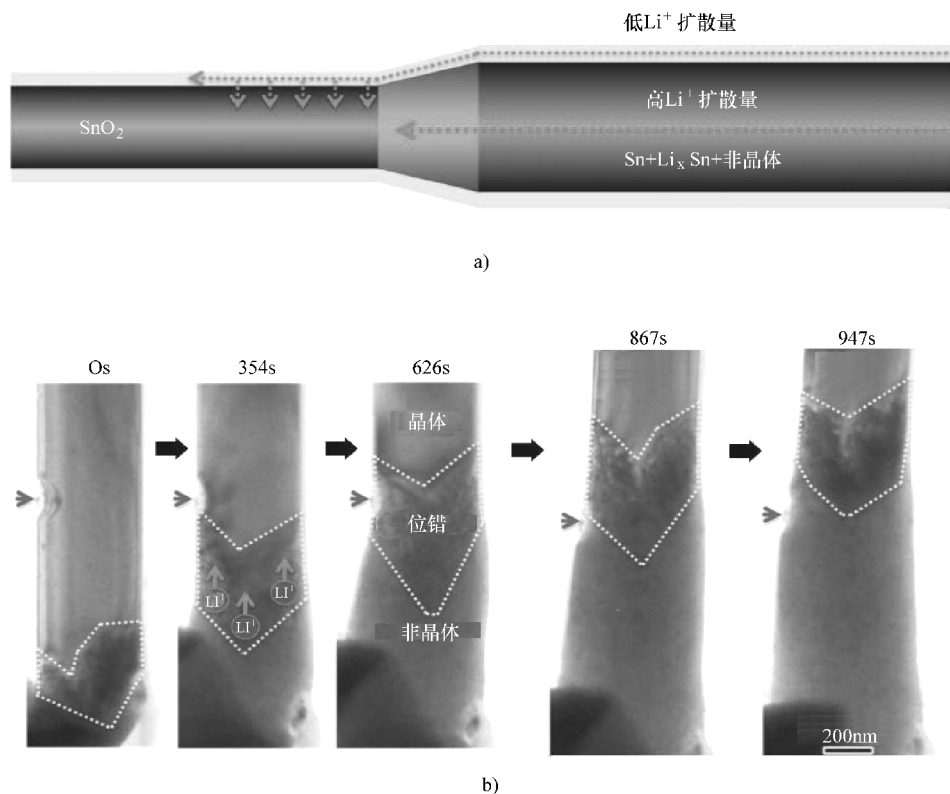


图 8-6 纳米压电能量回收系统的纳米压电模型与非局部塑性位错表征

a) 纳米尺度模型 b) 纳米尺度位错动态演化表征



集中到某一个特定滑移系内，并随之在晶体内部出现变形带。变形带的宽度随着应变率的增加而增加，其中的剪应力明显高于相邻区域，这些区域是电极中发生失效的位置，该研究为高应变率下纳米压电能量回收系统的变形及失效模式预测提供依据。

8.2 高比能量压电能量回收电池系统的无序结构模型

压电材料正极在锂电池中至关重要，它直接影响着电池性能、成本、重量和体积。目前，广泛应用的锂电池正极往往是有序紧密堆积排列的氧化物，如典型岩盐结构和尖晶石结构锂过渡金属氧化物，而对压电材料无序结构关注甚少。正极有序结构被认为是获得高容量和高循环性能的重要条件。然而，近日 Ceder 等发现，将阳离子无序氧化物 $\text{Li}_{1.211}\text{Mo}_{0.467}\text{Cr}_{0.3}\text{O}_2$ (LMCO) 作为锂电池正极，具有比层状氧化物正极更高的容量与稳定性。该研究中 LMCO 采用固相法制备，呈现层状岩盐结构，但在几次充放电循环后转化为无序岩盐结构，混排有大量的过渡金属阳离子。虽然阳离子的混排一度被认为是致使循环性能大幅下降的元凶，但该无序结构的 LMCO 具有非常好的循环性能。特别是经过碳包覆的 LMCO，在高充放电倍率下循环 1000 次后，比容量仍可达 $266\text{mA} \cdot \text{h/g}$ ，这在层状锂过渡金属氧化物中罕见。

在无序岩盐结构中，锂和过渡金属阳离子各自占据着八面体中的立方晶格，锂的扩散通过八面体位之间的跃迁完成，中间需通过一个四面体位。锂在四面体位呈现激活状态，该激活态锂与 4 个八面体位共面，分别是锂自身起初占据的隙位及其将要占据的隙位，还有两个可被锂与过渡金属阳离子占据的隙位，如图 8-7a 所示。该激活态能量决定了锂的迁移阻力，主要由激活态锂和共面阳离子之间的静电排斥力来决定，取决于两个因素：共面阳离子的化合价，激活态锂与共面阳离子之间的可弛豫空间。该空间可通过层状结构中的锂插层间距来衡量，也可通过弛豫发生的空间——四面体高度来衡量。存在两个共面阳离子时，将对激活态锂产生较强的静电排斥，如图 8-7b 所示。因此，锂主要通过双空位机制进行扩散。在无序岩盐结构中，这一机制可通过无共面过渡金属阳离子扩散通道 (0-TM 通道) 和单共面过渡金属阳离子通道 (1-TM 通道) 实现。为了研究在无序的 LMCO 中，哪种通道可以实现合理的锂跃迁速率，Ceder 等通过密度泛函理论 (DFT) 对两种通道中的锂迁移阻力进行了计算。结果表明，0-TM 通道中的锂迁移阻力远远低于 1-TM 通道中的锂迁移阻力，室温下锂在 0-TM 通道中的跃迁速率约为 1-TM 通道中的 4400 倍。这是由于 1-TM 通道的四面体高度较小，导致其在无序化材料中几乎关闭。而 0-TM 通道虽然使用频率较低，但在无序化岩盐状材料中保持畅通。0-TM 通道即可使锂扩散更加容易，而 0-TM



通道要想主导锂的扩散，其必须在整个材料内部保持连续，形成不被 1-TM 通道和 2-TM 通道干扰的逾渗网络。0-TM 通道只有在 $\text{Li}_x\text{TM}_{2-x}\text{O}_2$ 中的锂含量 x 约超过 1.09 时才能开启逾渗网络；而在达到此逾渗阈值后，随着锂含量 x 的继续增加，将产生更多的 0-TM 通道，从而形成连续性更强的逾渗网络，如图 8-7b 所示。

若 LMC0 的锂含量 $x > 1.09$ ，其 0-TM 通道可开启渗滤网络，保证无序结构下的锂扩散，从而解释了以往无序结构不受欢迎的原因，大部分锂过渡金属氧化物正极 LiTMO_2 锂含量远远低于 0-TM 通道渗滤阈值，因此在无序结构下 0-TM 通道与 1-TM 通道均无法有效发挥作用，从而导致了电池容量的大幅下降。他们提出的 0-TM 通道渗滤网络原理，也可应用在其他无序锂氧化物中，该工作将阳离子无序氧化物推上了高容量、高能量密度锂电池正极的舞台，为高性能锂电池的研究开辟了新方向。

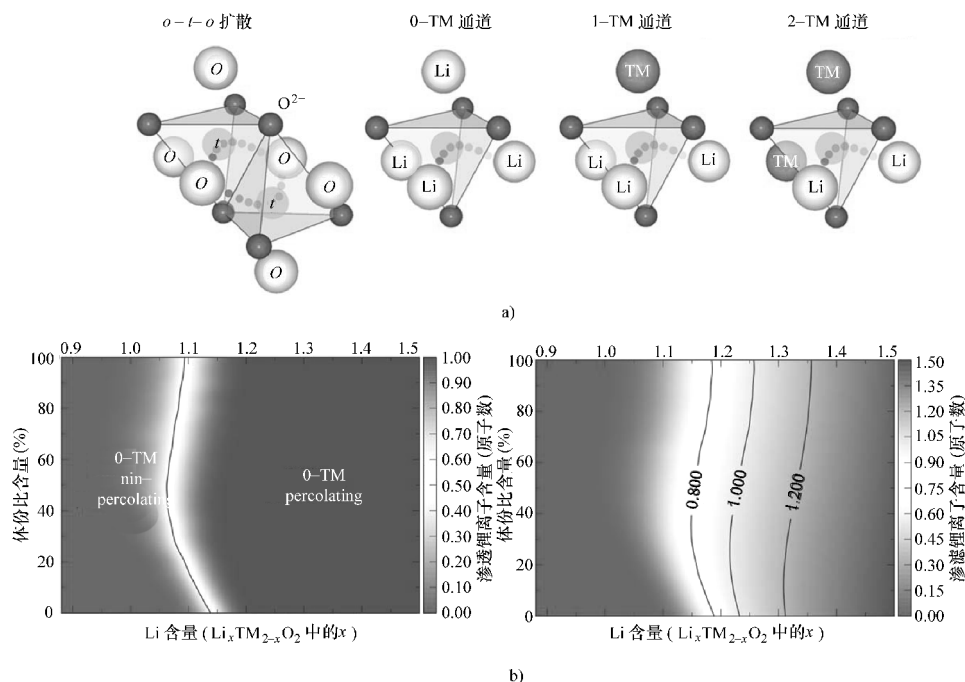


图 8-7 锂电池正极阳离子无序氧化物的模型与压电能量回收通道渗滤网络机理

a) 无序结构三维模型 b) 能量通道渗滤网络模拟

对于以电动车辆应用为目标的高比能量固态纳米电池，其实用化的关键指标包括能量转换效率、功率密度、成本与寿命等，这给固态纳米电池实用化提出了严峻挑战。电极和电解质是发展高性能电源之本，集成电极与电解质的膜电极则是提高固态纳米电池性能的核心。只有从纳米电催化材料、高性能电解质膜及两者集成的纳米结构膜电极入手，才能协同解决制约固态纳米电池实用化问题。固



态纳米电池电极、纳米结构与界面特性、电极性能的关联机制研究将成为热点。科学家将发展压电能量回收系统与电极界面、结构与功能的调控方法，分析制约纳米固态电解质与电极集成的应用和成本的技术瓶颈，定量化表征纳米尺度活性界面、离子电导率与纳米电极性能的关系。

固态压电能量回收系统的设计与表征实现了在纳米尺度从机械能到电能的转化，是纳米科技发展中的新亮点，开启了压电能量回收系统发展的新领域。固态压电能量回收系统的应用范围覆盖可再生与可持续能源等广泛领域，在电动车辆、电力自驱动储能系统、自适应能量传输系统和无线充电系统等现代工业领域具有极其诱人的应用前景。随着纳米固态电池的实验室研究推进，新电池商业技术也随之不断面世，由于固态单体电池不需要液体电解质，固体电解质与更广泛电池兼容，可提供更高的功率和能量密度，在可持续能源车辆动力电池等方面均有显著优势。随着电动车辆大型电池组需求量的增加，固态电池成为电动车辆可持续能源重要发展方向，相比于传统液态电池更符合多元化、个性化的发展要求。大型固态电池组可采取层叠与串并联的技术思路，能源可采用印刷、涂布与3D打印等新技术进行多功能化设计与制备，在能源转化和传输效率方面可望显著提高。未来的固态纳米电池，由于具有比传统电池更高的安全性、能量密度和更广的应用领域，必将对人们的生活和经济的发展做出更大的贡献。

8.3 压电能量系统回收的智能平台

本章提出了知识管理技术在电动车辆压电能量回收系统开发中应用的解决方案，将JSP与ActiveX控件技术相结合，采用基于Web的产品数据管理模式和专家系统技术，构建电动车辆制动系统创新设计的平台。该平台融合了传统PDM协调管理功能和专家系统智能化的功能，使企业能够在Web方式下进行协同创新设计。这一平台是对传统的PDM功能的拓展，提供了制造业企业核心竞争力的系统解决方案，具有良好的推广前景。制造业企业已经广泛采用CAX（CAD/CAE/CAPP/CAM）技术进行产品创新设计。但是目前CAX技术的应用，主要是由各个阶段分别由各类专业人员分别进行，前阶段的专业人员常常不能及早考虑后阶段可能产生的问题，造成设计与制造脱节，又因后期工装制造产生的问题，而不得不反过来修改产品设计，使整个生产装备过程重复循环，造成设计改动量大、产品开发周期长、成本高，制约了CAX技术作用的发挥。因此产品数据管理（PDM）提出了基于工作流程的管理模式，以产品数据管理为核心，构建项目的协同设计的平台。CAX软件分散独立的模式，造成了企业的软件投资过大，尤其是三维CAD软件、CAE软件的投入，对于希望提高企业核心竞争能力的企业而言无疑是巨大的投资，这种投资同时也意味着一种风险。为此，可以利用



ActiveX 控件, 将这些软件生成的各种类型的文档在 Web 方式下可视化。这样就大大降低了软件投入, 更为重要的是实现了统一平台下的知识互融。此外, 为了实现设计面向制造的设计理念, 必须将存在于企业中的显性知识: 产品数据、试验数据、设计的案例、设计规范等进行系统的整合; 同时为了充分发掘在企业工程师个体中的隐性知识, 就必须采用智能的知识管理方式, 将这些知识进行外在化, 从而能够可视化, 供所有的设计人员使用。面向设计的专家系统恰好是这一问题的解决方案, 它在关键技术提出了合理的解决方案, 从而实现了这一构想, 建立了基于知识管理的产品创新设计平台, 并在电动车辆制动系统生产企业实施。

基于以上的规划设计思想, 提出基于知识管理的产品创新设计平台整体框架: 采用基于 Web 的产品数据管理理念, 将 JSP 与 ActiveX 控件技术相结合, 在软件的用户界面 UI 层上, 采用基于 Web 三层式的管理结构 (B/S) 结构, 构建一种实现知识管理的平台, 使之兼容传统的 PDM 的功能, 集成企业的 CAX 软件, 并在此基础上实现了企业创新设计的专家系统, 具有重要的意义。基于项目的设计目标, 提出了以下的业务模型, 如图 8-8 所示。为充分保证系统在安全性、跨平台性、易扩展性、易维护性等方面的要求, 建议将采用先进的基于 JAVA 平台的三层 (Browser/Application Server/Database Server) 应用体系结构, 系统通过架构于 B/S 三层应用体系结构之上, 并采用 JSP、Servlet、EJB、XML 等编程技术和面向对象程序设计技术, 将复杂的业务处理逻辑、流程控制逻辑和数据存取逻辑通过 Enterprise Java Beans 组件来实现, 并运行在应用服务器之上, 实现业务逻辑的快速部署和灵活调整, 并通过部署在应用服务器层的专用组件实现对数据库的存取访问, 以充分保证数据库系统的安全可靠访问。

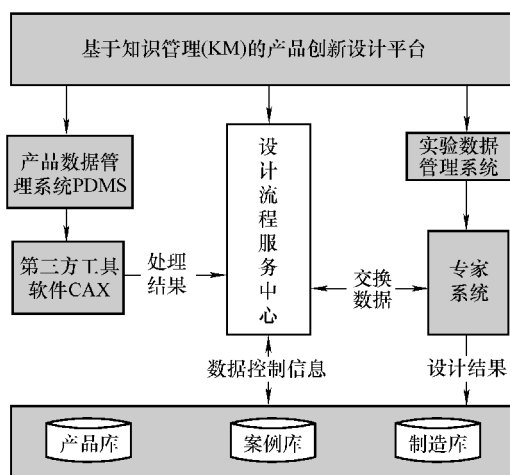


图 8-8 系统业务模型图



我们采用多层架构的 B/S 结构。这是因为 PDM 的实施费用分为软件费用和硬件费用。软件模块的可配置性,不仅能够保证企业在最小的花费下解决最头疼的问题,而且可以根据企业的需求迅速地组织一个分布式结构的 PDM 系统,在软件升级时也会相对较为简单,这样可以有效地降低成本和保证软件的有效性。采用 JAVA 语言技术,基于 J2EE 技术的分布式计算技术进行系统架构设计和系统开发;采用 Web Service 技术;应用服务器采用 JRUN 或 TOMCAT,使得系统能够具有良好的跨平台性能。同时,随着 Web 的概念的深入,这种技术也是国际上大型 PDM 软件的发展方向——采用 Oracle 数据库。考虑到企业的产品数据量大,事务处理复杂,需要大对象存储和全局检索,从性能和效率考虑,采用 Oracle 数据库;利用 XML 作为系统接口的数据交换标准,进行信息资源整合,采用组件技术提供系统的快速开发和更新。框架的基础服务构件化,支持业务层的基本服务。采用 MVC 模式,业务逻辑封装在业务层,客户请求都通过控制层的分发处理器来调用不同的服务来响应,安全检验或是其他过滤的功能可以动态调整,增强了系统的可扩展性和可维护性。

设计部门的知识资源主要是两类:一种是显性知识,主要是以一种外在的形式存在,主要有产品设计的数模、图形文件、设计说明、试验分析报告等;一种是隐性知识,主要存在于设计人员的大脑之中,体现为一种业务素质、设计时的直觉、设计经验等。这两种知识,前者需要进行系统的管理,才能有效地实现协同功效;后者需要深度发掘,才能成为企业能够共享的可视化的显性知识。从对创新设计的影响来看,知识可以分为两类:一类是支持核心业务的专业业务知识;另一类是支持创新设计的业务组织管理的知识。前者是企业进行创新设计的主体——工程技术人员进行创新设计的基础,因而希望能够实现有计划的,基于业务权限的共享。后者是企业进行创新设计的管理者——主任工程师或者项目主管迫切需要的支撑。因此,本文中提出的基于知识管理(KM)的产品创新设计平台的业务功能包括两部分:一是对企业知识资源的管理,包括显性知识的系统管理,隐性知识通过专家系统的知识库和案例库进行深度发掘;二是对企业的设计部门进行管理流程再造,使得项目的管理过程扁平化、可视化、协同化。因此平台具有的主要的业务功能有:

建立统一的电子资料库,实现企业级的产品数据共享,能够通过设置适当的权限,通过图文档管理和产品结构树管理,按产品设计的阶段划分文件夹,实现图档的分类管理和检索功能;能够方便快捷地利用图档属性、产品或零部件节点属性查询各类产品数据;同时能够进行动态的增删改查功能,方便企业进行产品数据的扩充和维护。因而这一管理系统能够大大降低企业设计过程中进行纸质文档的查询中耗费的时间,同时减少分散在各个技术人员个人电脑中的文档,提高检索、借用的效率,降低产品数据流失的风险。这是传统的 product data management



PDM 软件系统的核心业务功能。图文档管理的核心是产品数据的管理，为了直观、方便地查看产品的构架及零件在总成中的分布及位置，通常用数据树的方式来表示这种层次关系。产品结构树是工厂组织生产、生产准备的最基础数据。以前左制动器总成为例（图 8-9），构建产品数据管理的数据结构。

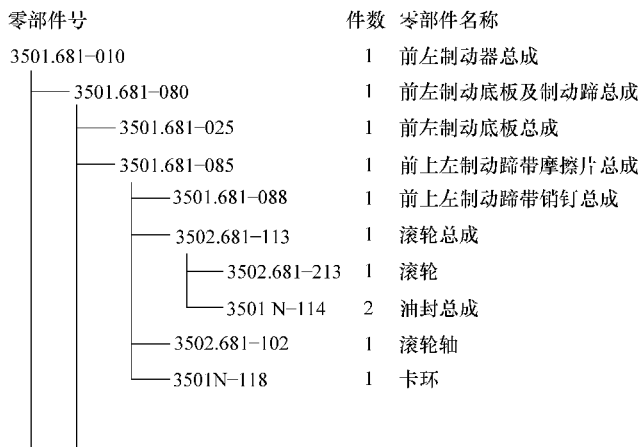


图 8-9 组成电动车辆压电能量回收系统的部分智能制动器件与数据参数树

为了使设计的产品得到用户的认可或者是法规的认可，设计部门设计的产品必须进行大量的试验。在电动车辆行业，尤其是涉及安全方面的产品，像制动系统的设计过程中，试验耗费了大量的资源。因此，设计过程中，应该能够尽可能地参照前期产品的试验结果，指导设计。同时，随着虚拟设计制造的模式在制造业企业的推广应用，采用试验分析的结果校核 CAD。CAE 的模型和结论是一个重要的验证过程。因此企业迫切希望能够采用统一的试验数据接口管理模式，将企业各个实验室的数据直接提供给设计人员。采用标准的试验数据接口，管理不同的试验数据，动态地生成试验报告，并自动提交到流程控制中，使得试验报告进入协同设计流程中。

以技术中心为企业设计资源管理的源头，按照项目方式对新产品设计进行组织管理。总师在平台上进行立项，并将该项目开发任务下达到主任师；主任师在接到总师的开发任务后将该“项目”细化分解，同时将每一子任务下发给工程师；每一工程师通过实时通信工具，在自己的本地机上登录系统，即可获得“任务列表”，能方便地看到自动显示出来的主任师分派给自己的项目任务。本系统中根据制动系统的创新设计的技术路线，分别分析了机械式制动器的设计、分析，以及 ABS 的开发设计的项目管理流程再造。图 8-10 所示即为企业进行创新设计和性能分析的业务流程。

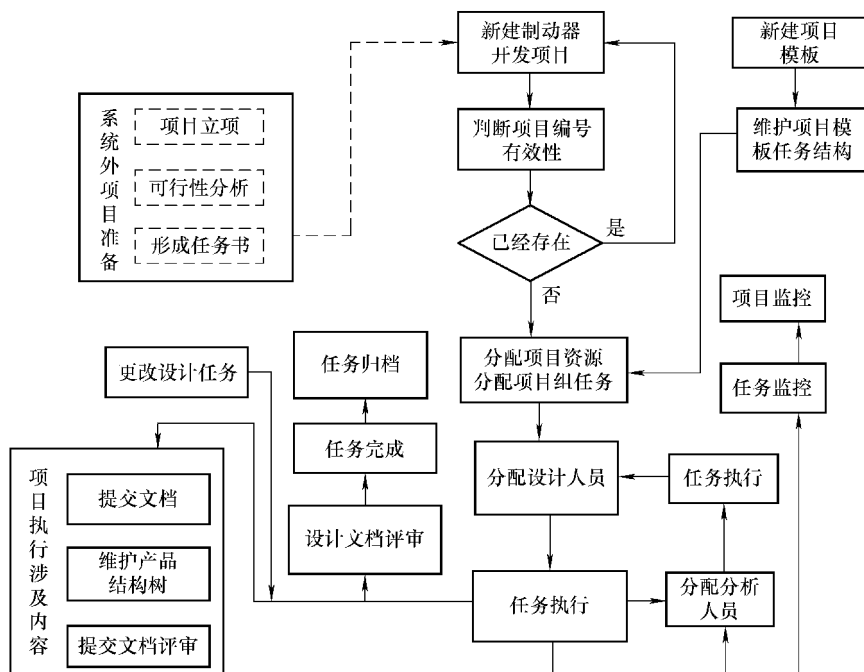


图 8-10 电动车辆压电能量回收系统项目管理的数据流图

通过工作流引擎，实现业务流程的可视化监控，它可以创建、执行、监督和控制工作流程，使得总师、主任师和工程师并行地协调工作。在设计的过程中，能实时查看协同工作人员的设计成果（结构部分能看到相关部分的设计成果信息），并方便地继承和利用系统中已管理的数据资源，实现真正意义上的“资源共享”和“协同工作”。总师和主任师可以在平台中实时监控项目进度，及时对相应部门做出工作调整。能提供和管理不同的用户及权限，即对不同访问对象做不同操作权限的限制，达到数据访问安全管理的目的。在本平台上主要提供三类不同的用户权限：总师、主任师、工程师。其中，工程师的权限最低，他直接进行产品的设计与分析；主任师除具有工程师的所有权限外，还负责每个工程师的任务分配与协调工作；总师的权限最高，除具有主任师和工程师的所有权限外，还要负责制定产品开发计划、召开技术会议、批准新品试制和实验任务等。平台提供了操作接口，可完全按照企业的真实组织结构建立相应的人员组织。系统管理员可以方便地增加、删除、更改用户权限及项目组人员。平台把产品作为系统中的管理对象，每个对象中都存放了产品整个生命周期中所有的相关数据（如设计任务书、方案可行性论证报告、说明书、设计模型、工艺文件、临时文件、



更改单、产品图形信息、各类实验数据及实验报告等), 所有这些数据在服务器上统一管理、存储、备份, 确保产品数据的安全。同时, 能够对图档的版本和版本更改信息进行管理 with 记录。实现产品图档更改电子流程管理, 详细记录每种型号零部件和总装的变化历史, 图档或产品节点发生更改后系统自动提示影响范围, 以提醒技术人员被借用到其他产品上的该零件如何处理 (是同步改动还是保留原样)。因此, 对制造业企业来讲, 上述功能的实现, 实现了知识的整合, 体现了协同设计的思想, 设计面向制造的要求, 这一平台充分地管理了公司的显性知识和进行创新设计的流程管理的知识。但是对于隐性知识的发掘和利用则需要借助于专家系统来实现。针对企业的需求, 定制了能够进行 CAD、UG、Pretel 软件生成的文件在 Web 方式下的浏览的控件, 实现了这三类软件生成的图形文件在 Web 方式下的浏览、缩放、旋转、移动、打印等功能。这些功能的实现不需要对文件类型进行转化, 因而操作的效率高, 用户友好程度高。系统运行的模式如图 8-11 和图 8-12 所示。

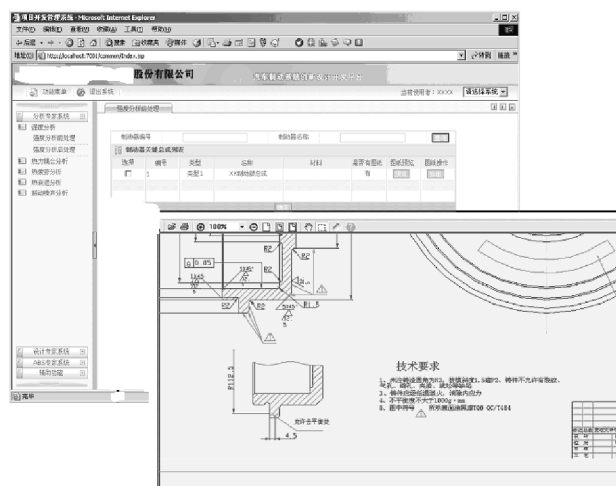


图 8-11 二维图形文件集成功能示意图

如果能充分的发掘企业的隐性知识, 同时能够借助于专家的知识作为创新设计的支撑, 那么将大大地提高设计的能力。在创新设计过程中, 专家的知识在专家系统中是原发性知识, 而设计人员既是知识的获取者和使用者, 同时也是知识拥有者和创造者。为此, 我们必须研究专家系统对知识的发掘过程, 同时又要实现设计过程中知识的扩展和系统的自学习。对于一个以知识为管理为平台的创新设计系统而言, 必须考虑到知识的转化, 将隐性知识转化为显性知识, 供设计人员应用; 在这一设计实践过程中, 又将获得新的隐性知识, 此时系统必须尽可能地自动发掘这些隐性知识, 将其进一步外化, 这样的螺旋循环过程, 将逐渐

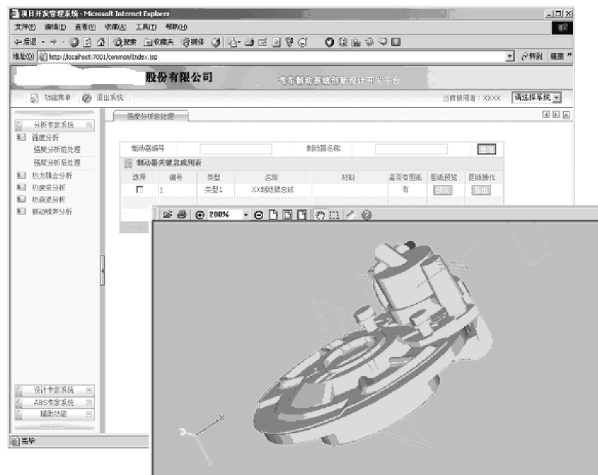


图 8-12 三维图形文件集成功能示意图

提升企业的设计水平。知识的发掘和应用，通过知识库的构建和案例库的构建来实现。工程技术人员借助于知识库和案例库进行创新设计，获得成功的设计结果可以直接动态的生成案例，自动扩充专家系统的案例库。从而将蕴藏其中的隐性知识通过产生的产品数据文件和设计流程外在化。通过构建的底层知识管理的平台，我们能够实现企业现有的显性知识资源的管理，同时可以直接通过平台提供的查询、检索、浏览等实现知识的共享。借助知识库，案例库系统的整合专家知识；同时借助案例库自动获取设计工程人员的隐性知识。知识的发掘和应用的流程如图 8-13 所示。

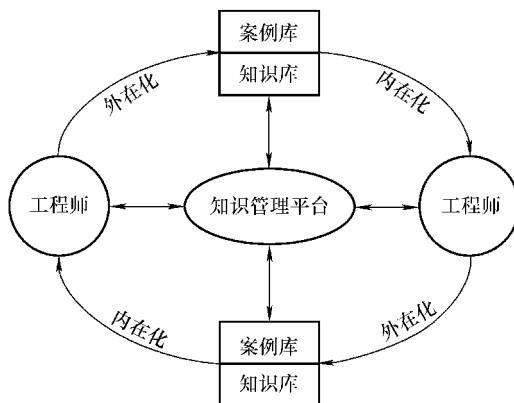


图 8-13 知识的深度发掘和循环使用流程图



采用面向对象的方式构建知识库。知识库系统是由知识库、知识库管理机构、知识获取系统、人机交互接口等基本部分组成。知识表示、知识利用和知识获取是知识库系统实现的三大关键技术问题。知识库系统的逻辑框图如图 8-14 所示，可以看出，知识库系统的主要功能模块包括知识库的建立、知识的获取与更新，知识库的检索、查询与维护，以及知识的一致性、完整性检查等。

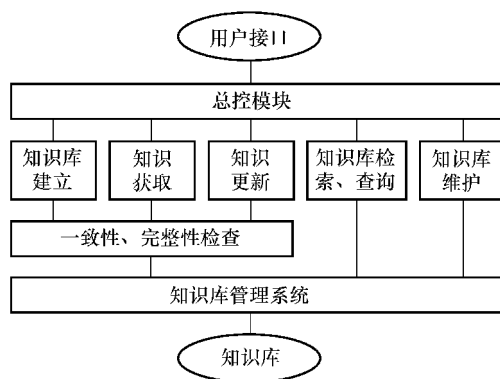


图 8-14 知识库的逻辑结构图

通过专家系统的支撑，工程师可以完成某一项目的产品创新设计。在这一设计通过了试制、试验的验证并正式投产之后，案例库管理系统能够根据项目的编号，将所有与这一项目相关的设计图纸、文档等直接传送到案例库中，供以后的设计参照，从而实现知识的积累。案例库系统通过参数匹配的方式，在线再现设计分析过程，从而使得设计过程中的设计方式、设计过程等隐性知识外在化，给设计人员提供直接参照。图 8-15 所示是利用创新设计平台进行电动车辆压电制动器的开发示例。系统通过调用设计专家系统，得到制动器的总体设计形式与关键结构参数，通过调用 UG 完成初始设计。平台工作流程引擎将设计文档发送到性能分析专家系统。分析专家系统通过平台调用分析的命令流文件，经过参数匹配之后，生成需要分析的制动器的 ANSYS 命令流文件。然后，通过平台集成软件接口提交到 ANSYS 分析软件进行分析，得到制动器支架的应力和位移分析结果。专家系统调用 ANSYS 分析结果文件，将分析结果输入专家系统，调用校核规则校核，经过自推理得到分析的结论，并生成分析报表。

通过数据管理平台和专家系统，实现了设计面向制造的设计理念，将存在于企业中的显性知识、隐性知识，分别采用 PDM 和专家系统，进行了智能化的管理，充分实现知识的外在化、可视化，供所有的设计人员使用。这大大降低了软件投入，更为重要的是实现了统一平台下的知识互融。通过这些关键技术的研究和解决方案的实施，为企业基于 Web 的协同设计提出了系统的解决方案，并实

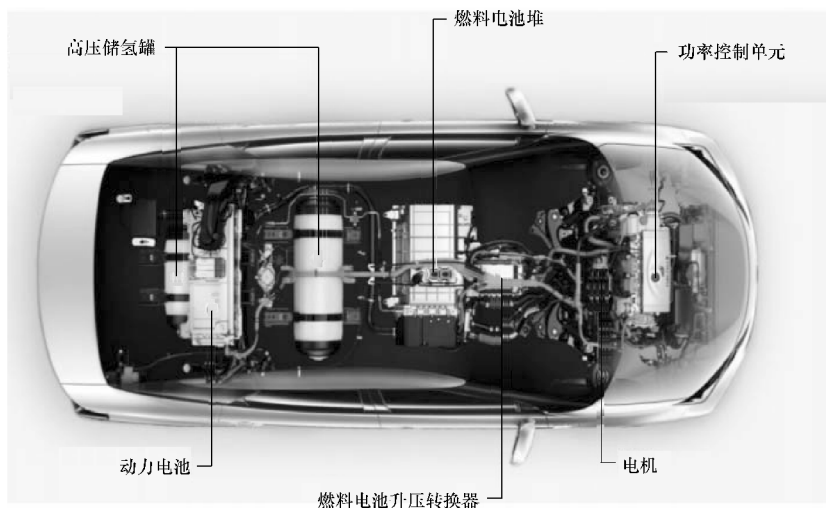


现了这一构想，建立了基于知识管理的产品创新设计平台。目前开发的系统正在电动车辆制动系统生产企业实施。系统具有模块化的结构，因此能够方便地向其他电动车辆零部件制造业企业推广，具有良好的应用前景。



162

a)



b)

图 8-15 电动车辆专家系统分析功能示例图

a) 基于压电能量知识库的制动器 ANSYS 模型 b) 电动车辆专家系统综合分析模块



参 考 文 献

- [1] Favors Z, Wang W, Bay HH, Mutlu Z, et al. Scalable synthesis of nano – silicon from beach sand for long cycle life li – ion batteries [J]. Sci Rep 2014 – 4 – 5623 – 30.
- [2] Wu H, Cui Y. Designing nanostructured Si anodes for high energy lithium ion batteries [J]. Nano today 2012 – 7 – 414 – 29.
- [3] Lee S W, Mc Dowell M T, Berla L A, et al. Fracture of crystalline silicon nanopillars during electrochemical lithium insertion [C] . Proc Natl Acad Sci USA 2012 – 109 – 4080 – 5.
- [4] Yi R, Dai F, Gordin ML, et al. Micro – sized Si – C composite with interconnected nanoscale building blocks as high – performance anodes for practical application in lithium – ion batteries [J] . Adv Energy Mater, 2013 (3) : 295 – 300 .
- [5] Wu W Z, Wang L, Li Y, et al. Piezoelectricity of single – atomic – layer MoS_2 for energy conversion and piezotronics [J]. Nature, 2014 (514) : 470 – 4 – 74.
- [6] Thangadurai V, Narayanan S, Pinzaru D. Garnet – type solid – state fast Li ion conductors for Li batteries; critical review [J]. Chem Soc Rev, 2014 (43) : 4714 – 4727.
- [7] Wu H, Chan G, Choi J W, et al. Stable cycling of double – walled silicon nanotube battery anodes through solid – electrolyte interphase control [J] . Nat Nanotechnol, 2012 (10) : 1038 – 1044.
- [8] Maier J. Thermodynamics of electrochemical lithium storage [J] . Angew chem int Ed, 2013 (52) : 4998 – 5026.
- [9] Suo L M, Hu Y S, Li H, et al. A new class of solvent – in – salt electrolyte for high – energy rechargeable metallic lithium batteries [J] . Nat Commun, 2013 – 148 – 53.
- [10] Shin B R, Nam Y J, Kim J W, et al. Interfacial architecture for extra Li^+ storage in all – solid – state lithium batteries [J] . Sci Rep, 2014 – 4 – 5572 – 81.
- [11] Ebner M, Geldmacher F, Marone F, et al. X – Ray tomography of porous, transition metal oxide based lithium ion battery electrodes [J] . Adv Energy Mater, 2013 – 10 – 1012 – 9.
- [12] Li Y Y, Gabaly F E, Ferguson T R, et al. Current – induced transition from particle – by – particle to concurrent intercalation in phase – separating battery electrodes [J] . Nat Mater, 2014 – 14 – 128 – 36.
- [13] Jung D S, Hwang T H, Park S B, et al. Spray drying method for large – scale and high – performance silicon negative electrodes in Li – ion batteries [J]. Nano Lett, 2013 – 13 – 2092 – 7.
- [14] Simon P, Gogotsi Y, Dunn B. Where do batteries end and supercapacitors begin [J]. Science, 2014 (343) : 1210 – 1211.
- [15] De Volder M F L, Tawfick S H, Baughman R H, et al. Carbon nanotubes: present and future commercial applications [J] . Science, 2013 – 339 – 535 – 9.
- [16] Huang Y, Zhong L, Wang C et al. In situ observation of the electrochemical lithiation of a single SnO_2 nanowire electrode [J]. Science, 2012 (330) : 1515 – 1520.



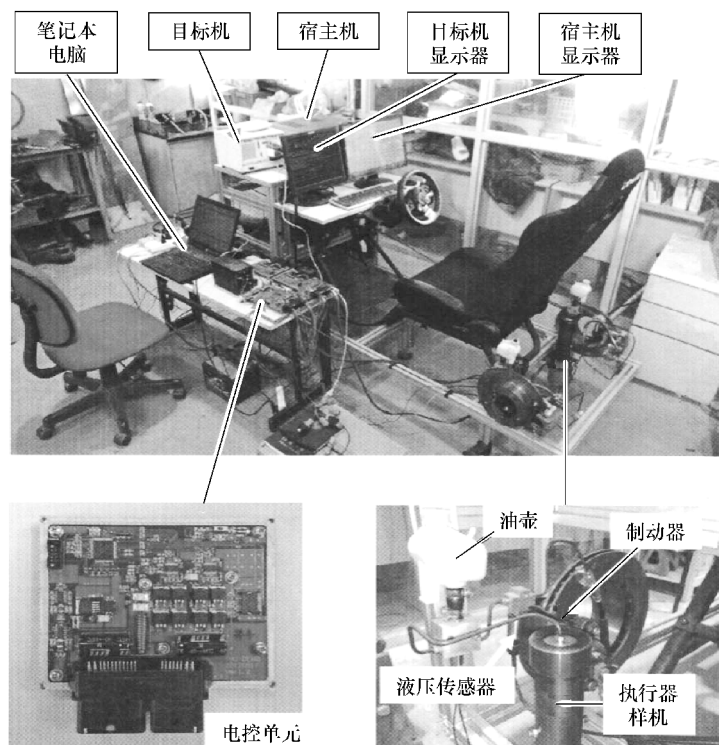
- [17] Wang J J, Sun X L. Understanding and recent development of carbon coating on LiFePO_4 cathode materials for lithium – ion batteries [J]. *Energy Environ Sci*, 2012 – 5 – 5163 – 85.
- [18] Liu N, Lu ZD, Zhao J, et al. A pomegranate – inspired nanoscale design for large – volume – change lithium battery anodes [J]. *Nat Nanotechnol*, 2014 – 9 – 187 – 92.
- [19] Lee J H, Urban A, Li X, et al. Unlocking the potential of cation – disordered oxides for rechargeable lithium batteries [J]. *Science*, 2014 (343): 519 – 522.
- [20] Song B H, Lai M O, Liu Z W, et al. Graphene – based surface modification on layered Li – rich cathode for high – performance Li – ion batteries [J]. *Mater Chem*, 2013 – A1 – 9954 – 65.
- [21] Catalan G, Seidel J, Ramesh R, et al. Domain wall nanoelectronic [J]. *Rev Mod Phys*, 2012 – 84 – 119 – 56.
- [22] Tang Y, Zhang Y, Deng J, et al. Mechanical force – driven growth of elongated bending TiO_2 – based nanotubular materials for ultrafast rechargeable lithium ion batteries [J]. *Adv Mater*, 2014 – 26 – 6111 – 8.
- [23] Wang C, Wu H, Chen Z, et al. Self – healing chemistry enables the stable operation of silicon microparticle anodes for high – energy lithium – ion batteries [J]. *Nat Chem*, 2013 – 17 – 1802 – 9.
- [24] Favors Z J, Wang W, Bay H H, et al. Stable cycling of SiO_2 nanotubes as high – performance anodes for lithium – ion batteries [J]. *Sci Rep*, 2014 – 4 – 5121 – 7.
- [25] Tee B C, Wang C, Allen R, et al. An electrically and mechanically self – healing composite with pressure – and flexion – sensitive properties for electronic skin applications [J]. *Nat Nanotechnol*. 2012 – 7 – 825 – 32.
- [26] Sathiya M, Rousse G, Ramesha K, et al. Reversible anionic redox chemistry in high – capacity layered – oxide electrodes [J]. *Nat Mater*, 2013 – 12 – 827 – 35.
- [27] Bouchet R, Maria S, Meziane R, et al. Single – ion BAB triblock copolymers as highly efficient electrolytes for lithium – metal batteries [J]. *Nat Mater*, 2013 – 12 – 452 – 7.
- [28] Szczech J R, Jin S. Nanostructured silicon for high capacity lithium battery anodes [J]. *Energy Environ Sci*, 2011 (4): 56 – 72.
- [29] Zhao Y L, Feng J G, Liu X, et al. Self – adaptive strain – relaxation optimization for high – energy lithium storage material through crumpling of graphene [J]. *Nat Commun*, 2014 – 5 – 4565 – 73.

附录

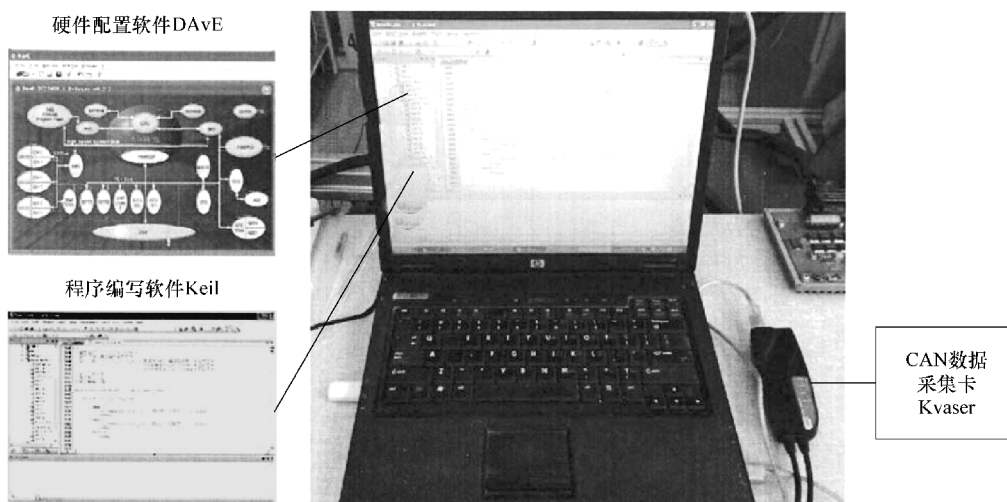
附录 A 电动车辆能量传输与回收技术实验设备简介



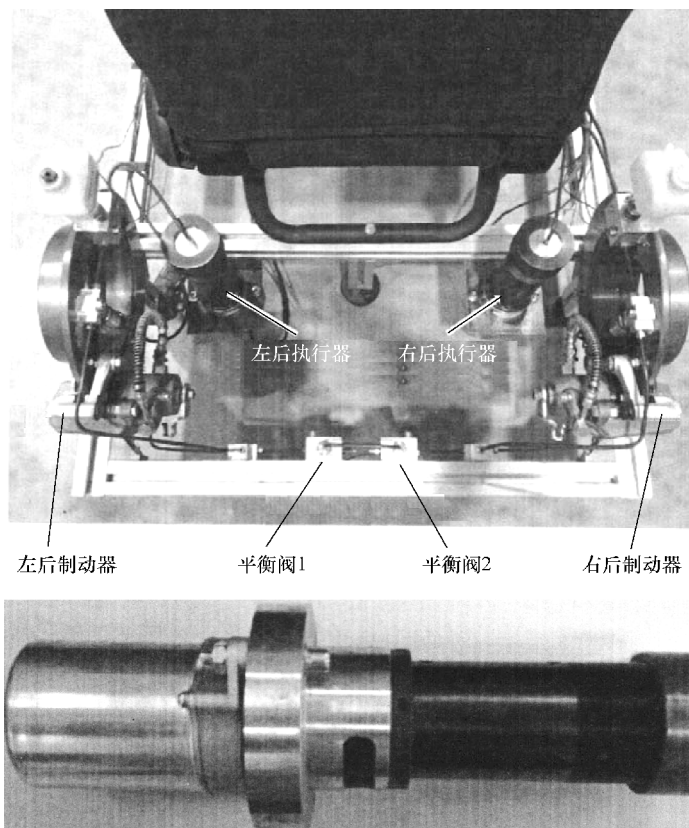
附图 A1 制动能量回收实验模拟台架装置



附图 A2 制动能量回收系统总体控制实验台



附图 A3 制动能量回收仿真环境



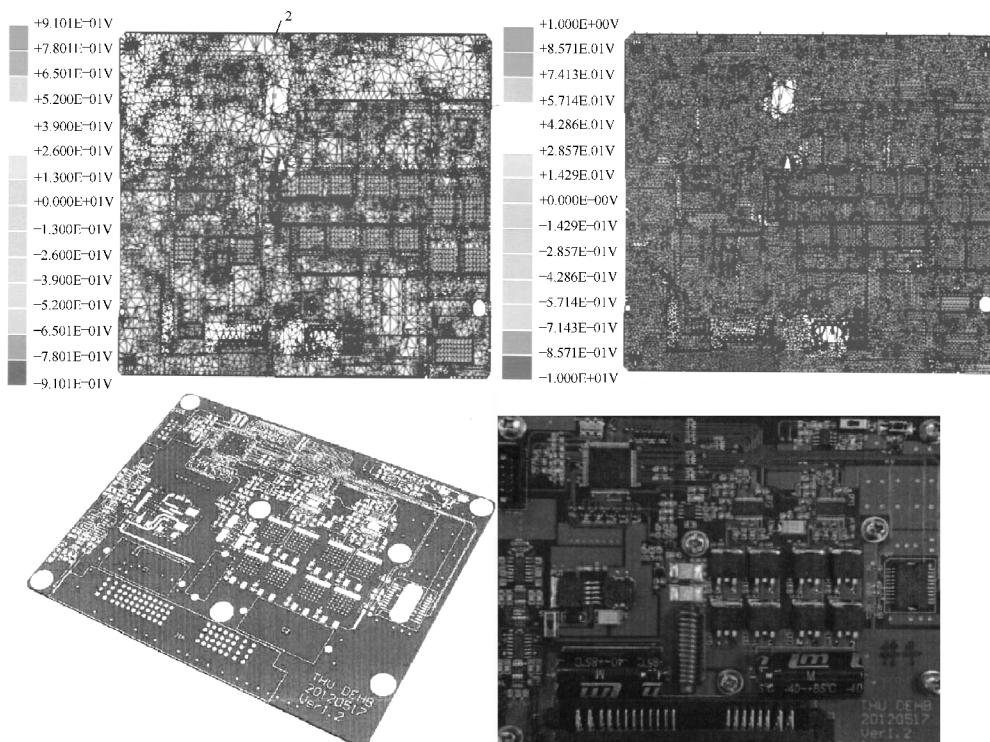
附图 A4 制动能量回收执行器布置



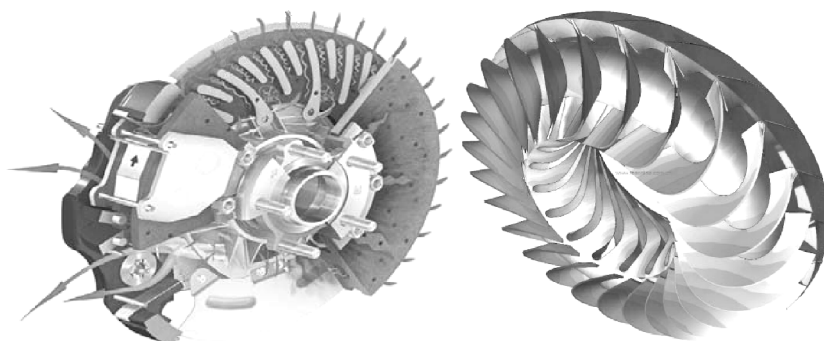
附图 A5 制动能量回收测试车辆



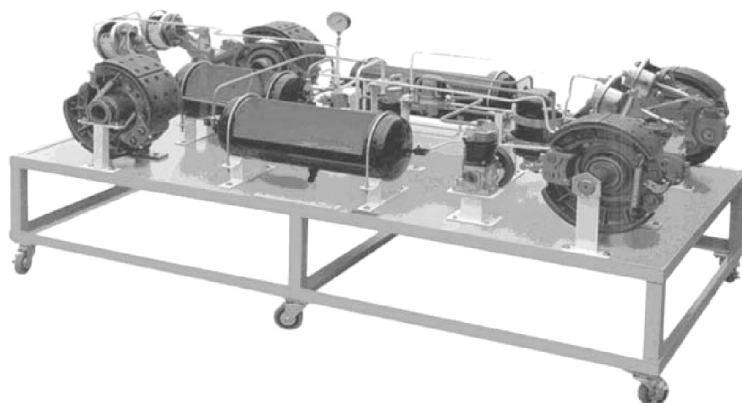
附图 A6 道路试验装置



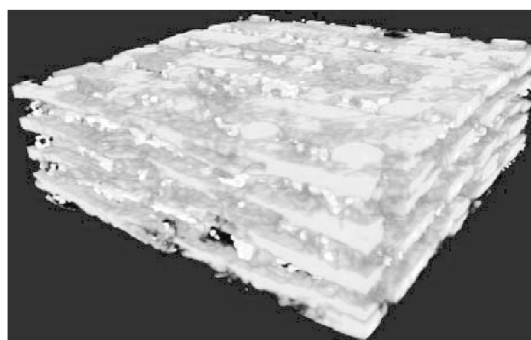
附图 A7 制动能量回收 ECU 实时仿真



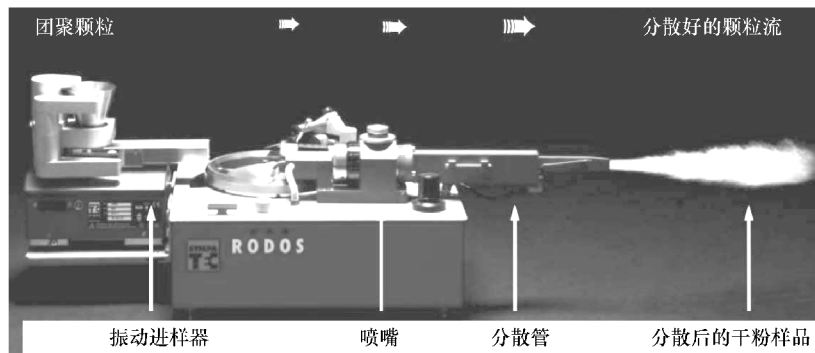
附图 A8 制动器结构与温度场仿真模型



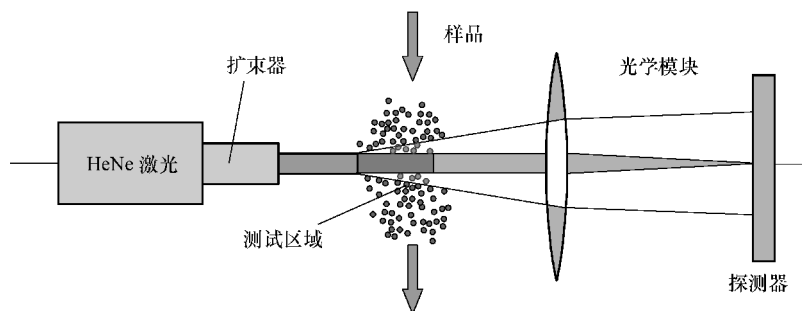
附图 A9 制动能量回收与传输的台架总体布置



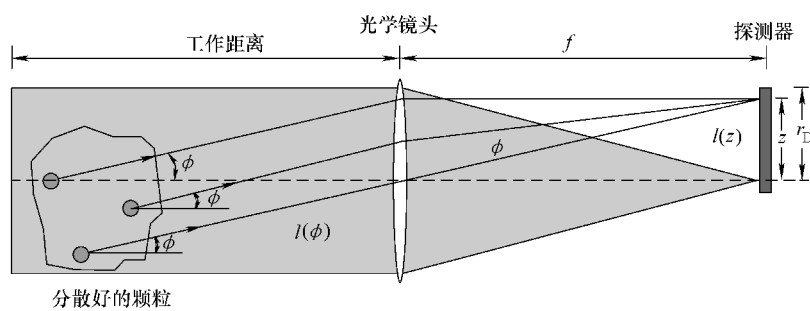
附图 A10 能量回收与传输的微结构模型



附图 A11 能量传输系统的台架实验模拟



附图 A12 能量传输系统的光路台架实验模拟



附图 A13 能量传输系统的光路设计



台架试验台



三坐标1



三坐标2



万工显微镜



投影仪



常规检测工具



专用检测工装



拉力试验机



光谱分析仪



硬度试验机



金相检测仪



盐雾试验机

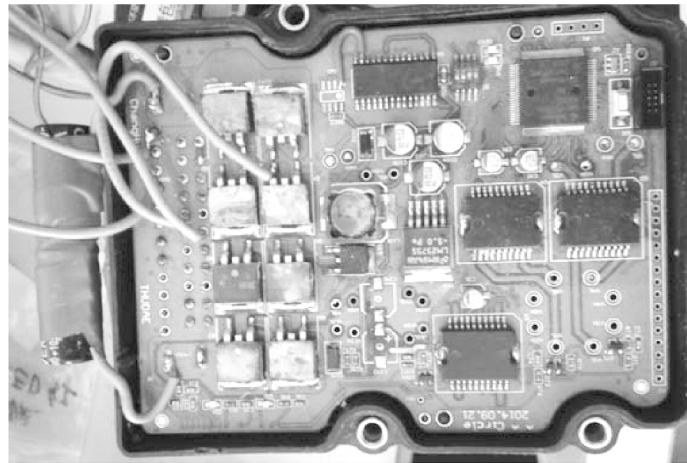


弹簧扭矩试验机

附图 A14 制动能量回收系统力学性能测试装置



附图 A15 制动能量回收系统实验数据采集卡



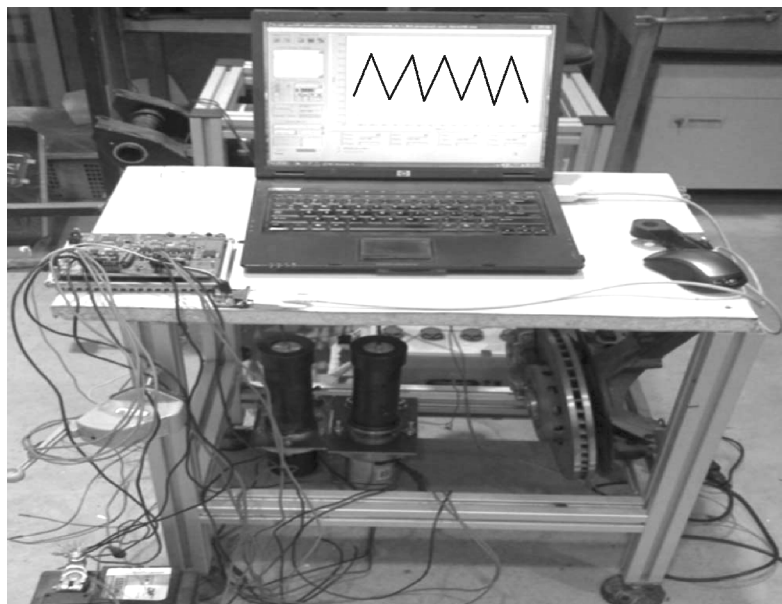
附图 A15 制动能量回收系统实验数据采集卡 (续)



附图 A16 电动汽车能量传输与回收技术整体样车



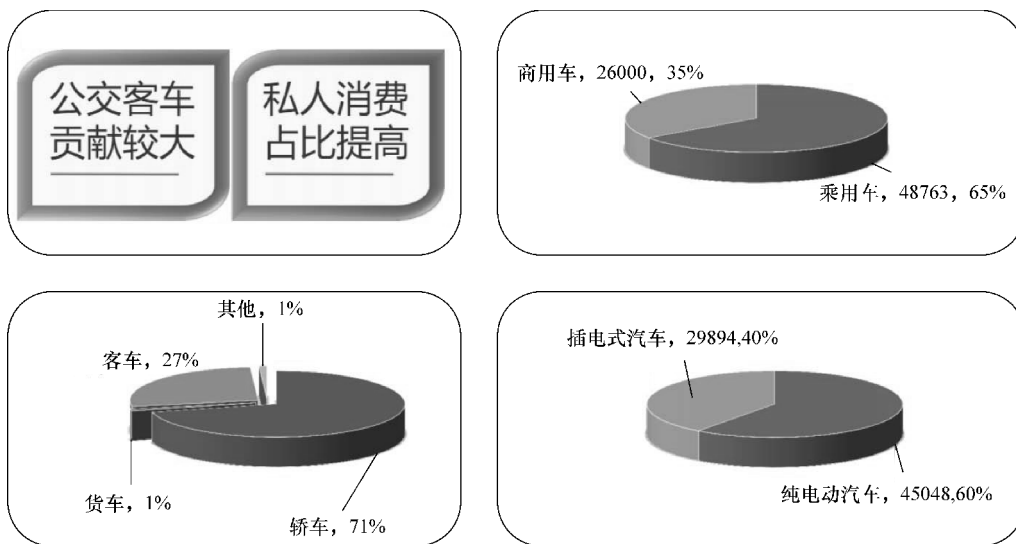
附图 A17 电动汽车能量传输与回收技术整体实验台架



附图 A18 电动汽车制动能量回收系统实验台架

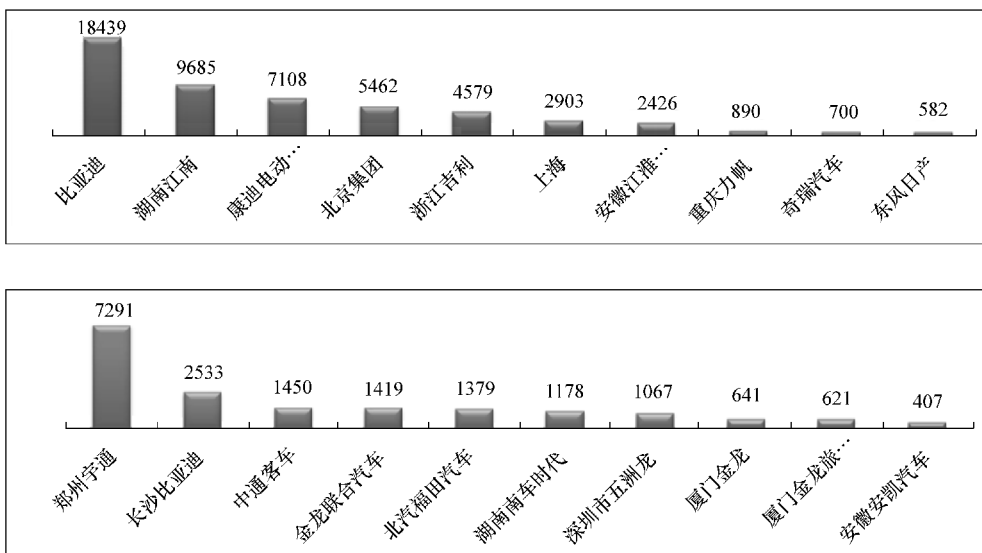


附录 B 电动车辆整体宏观运行状况

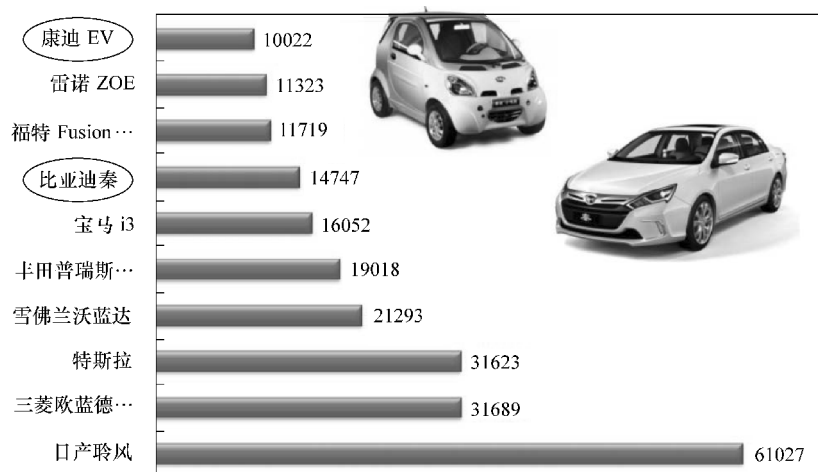


174

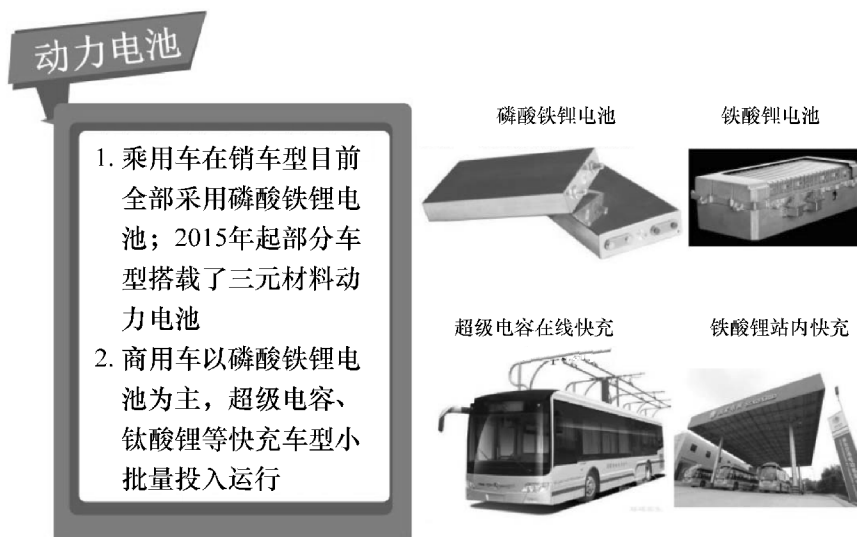
附图 B1 电动汽车整体宏观状况



附图 B2 国内电动汽车整体销售状况 (辆) (上小型客车, 下中大型客车)



附图 B3 国际电动车辆整体销售状况 (单位: 辆)



附图 B4 电动车辆动力电池概况



电动车辆能量转换与回收技术

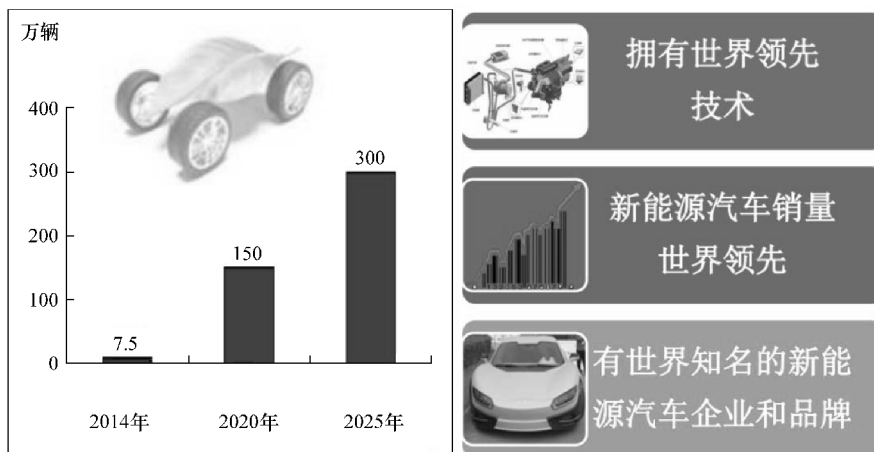


176

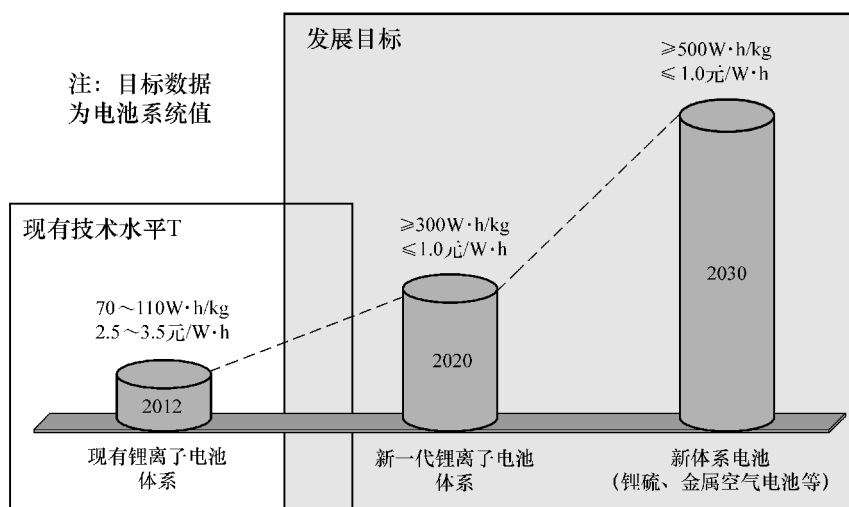
附图 B5 电动汽车结构增长趋势



附图 B6 电动汽车整体发展趋势



附图 B7 中国电动汽车发展优势与特色

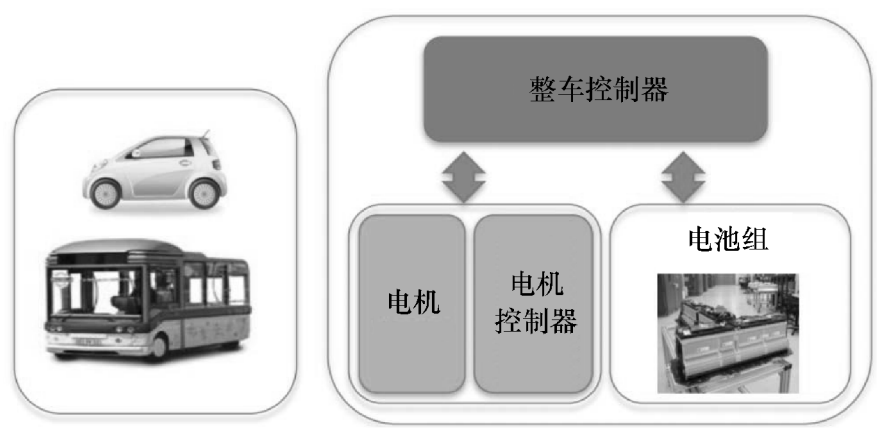


附图 B8 电动车辆动力电池发展目标

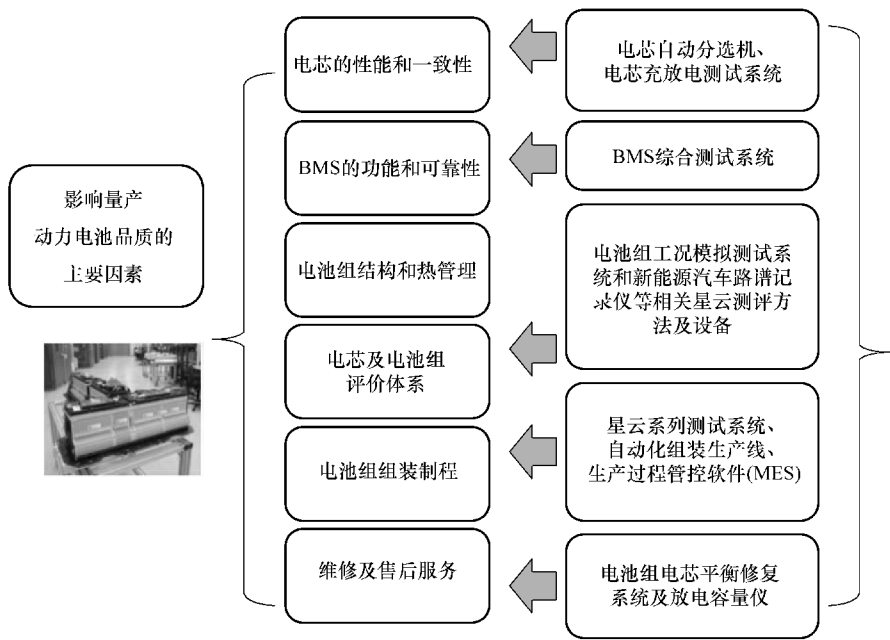


	2014年	2016年	2018年	2020年
正极材料	NMC (高容量三元)	NMC	LIRNMC	硫
		LIRNMC 富锂固溶体	硅碳复合	锂
负极材料	石墨	硅碳复合	LIRNMC	锂
		石墨	锂	空气
比能量/(W·h/kg)	180	250	350	500
能量密度/(W·h/L)	350	450	700	800
体积	X	0.7X	0.5X	0.3X
系统成本元/W·h	2.5~3.5	< 2.0	<1.5	<1.0

附图 B9 电动车辆动力电池技术路线图



附图 B10 电动车辆能量控制逻辑结构



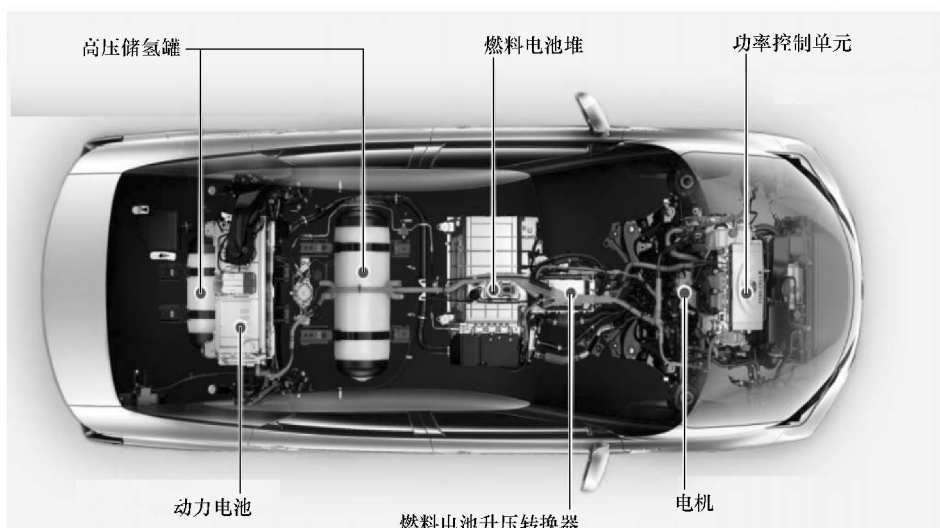
附图 B11 电动车辆动力电池组特性示意图



附图 B12 电动汽车动力电池研发技术路线



附录 C 电动车辆能量传输结构



附图 C1 燃料电池混合动力车辆结构



附图 C2 电动车辆基本结构

能源多元化
• 氢气的制取途径具有广泛的来源

驾驶的乐趣
• 平稳和安静，具有优良的低、中档加速特性

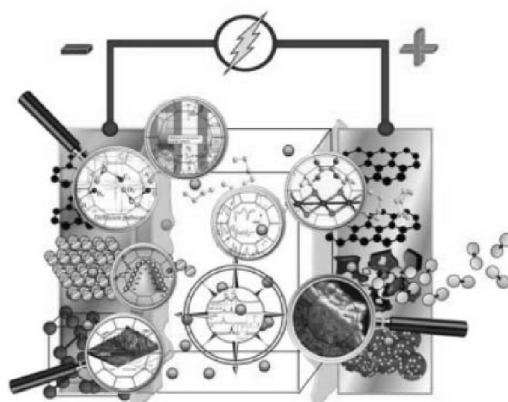


零排放
• 驾驶时有害物质零排放

性能
• 续航里程等同于传统的汽油车；
加氢需要大约3min

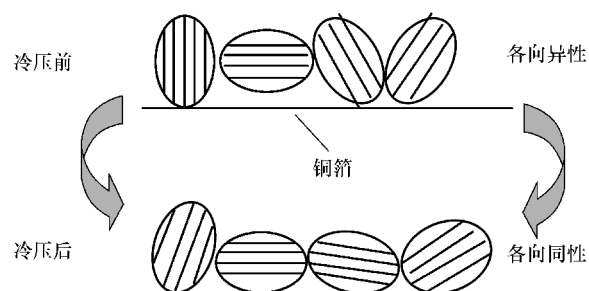
可作为电源使用
• 在紧急情况下可以用作大容量电源

附图 C3 燃料电池车辆特性分析

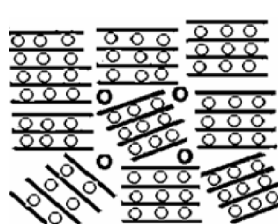


- 安全性 (难燃, 防过充)
- 工作温度 (高温, 低温)
- 成膜性 (正极, 负极)
- 与不同电极材料的兼容性

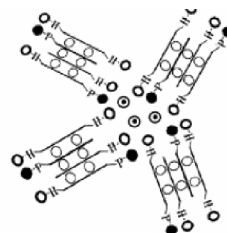
附图 C4 电动车辆电池基本特性



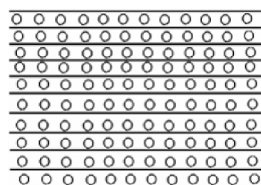
附图 C5 动力电池石墨电极基本结构



软碳



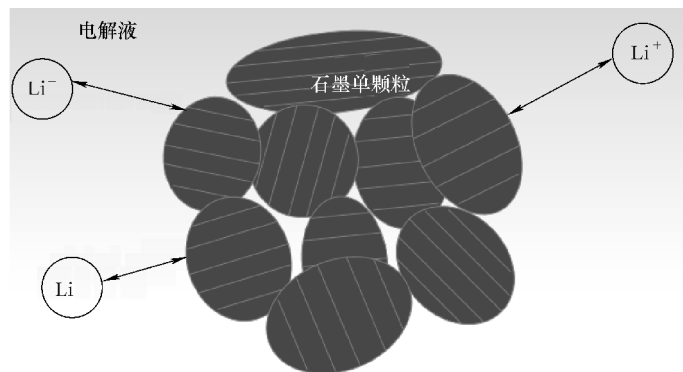
硬碳



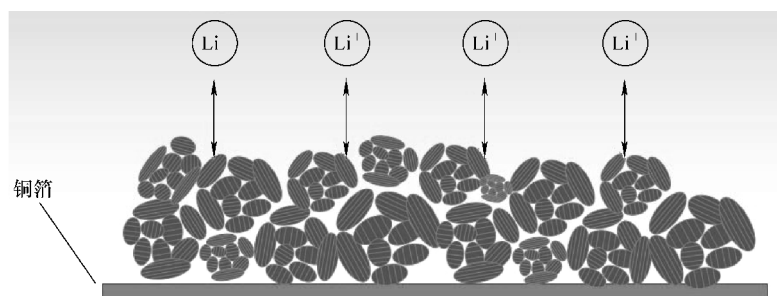
石墨

	软碳 (1500°C)	石墨 (2600°C)	硬碳
嵌锂容量	低	低	高
循环性能	差	好	差

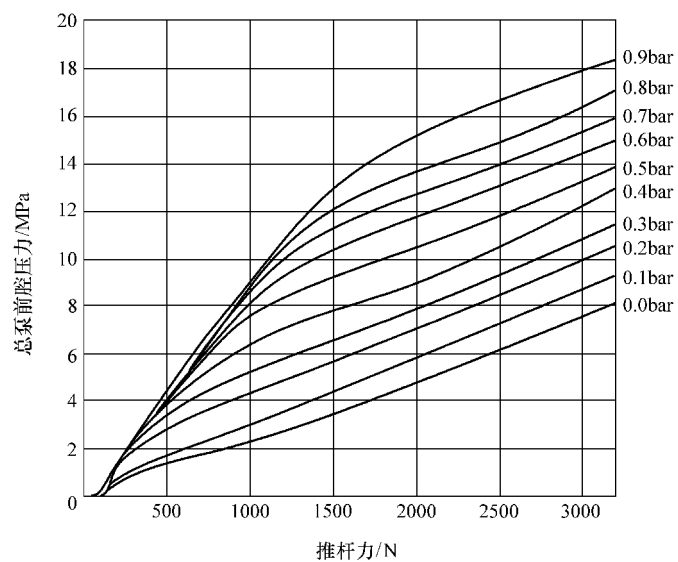
附图 C6 动力电池电极特性模型与分析



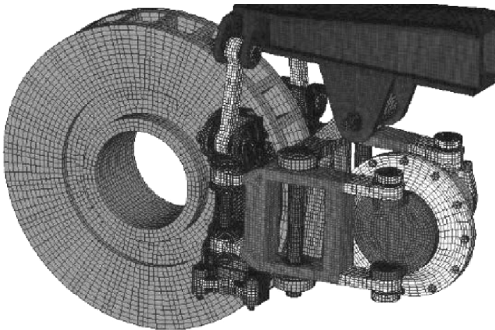
附图 C7 石墨嵌锂基本结构



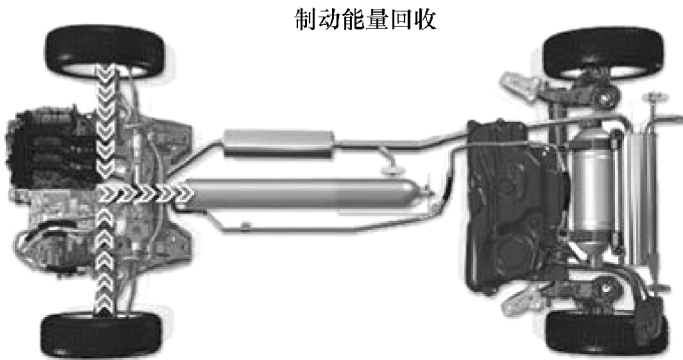
附图 C8 电池负极基本结构



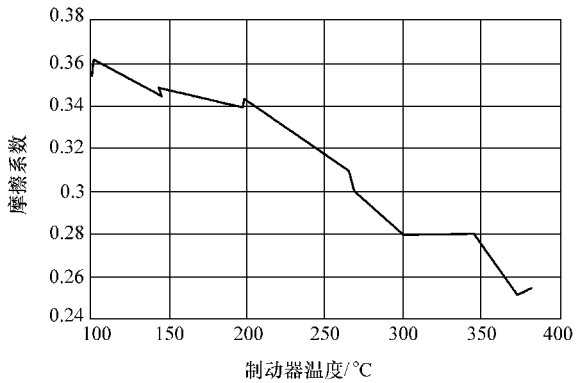
附图 C9 BERS 不同真空度下输入输出特性曲线



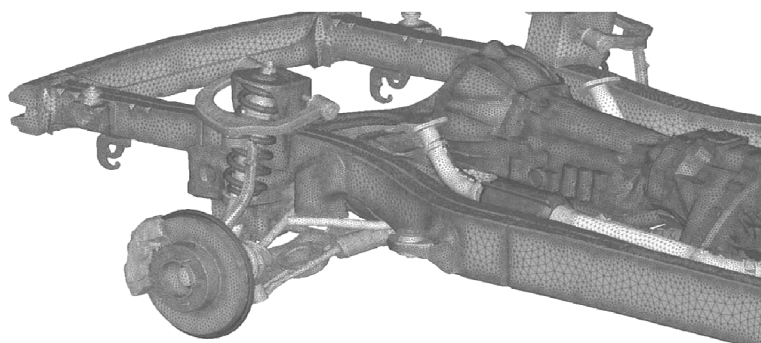
附图 C10 BERS 制动器结构



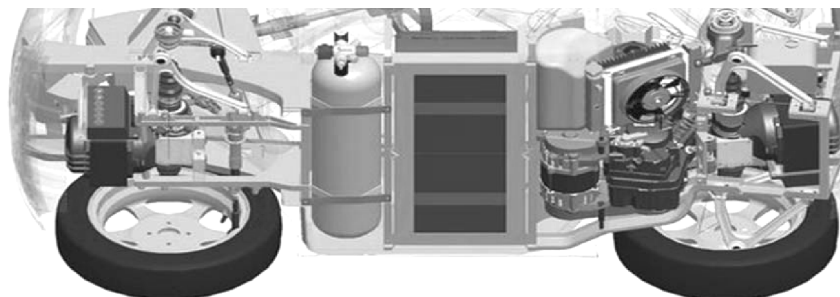
附图 C11 电动车辆 BERS 底盘实验布置



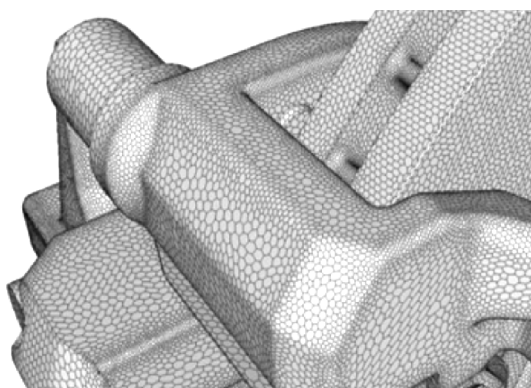
附图 C12 BERS 制动器摩擦系数随温度变化曲线



附图 C13 BERS 悬架结构示意图



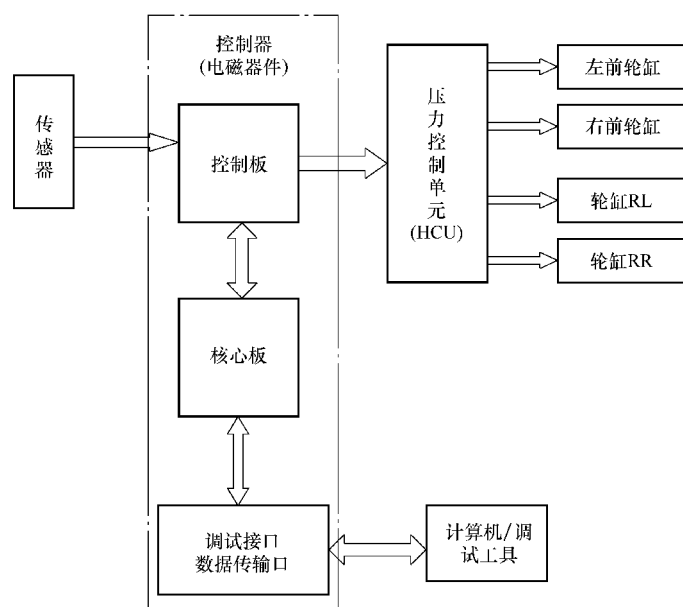
附图 C14 BERS 底盘结构示意图



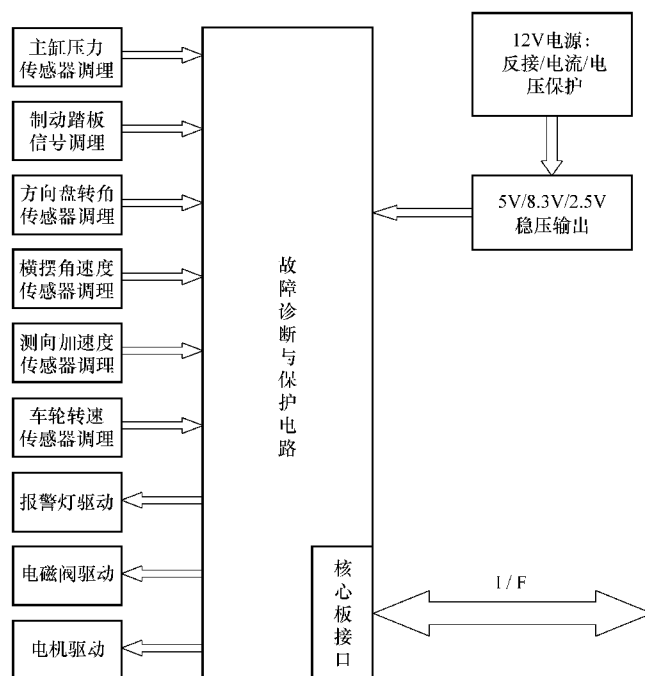
附图 C15 BERS 能量回收控制局部结构图



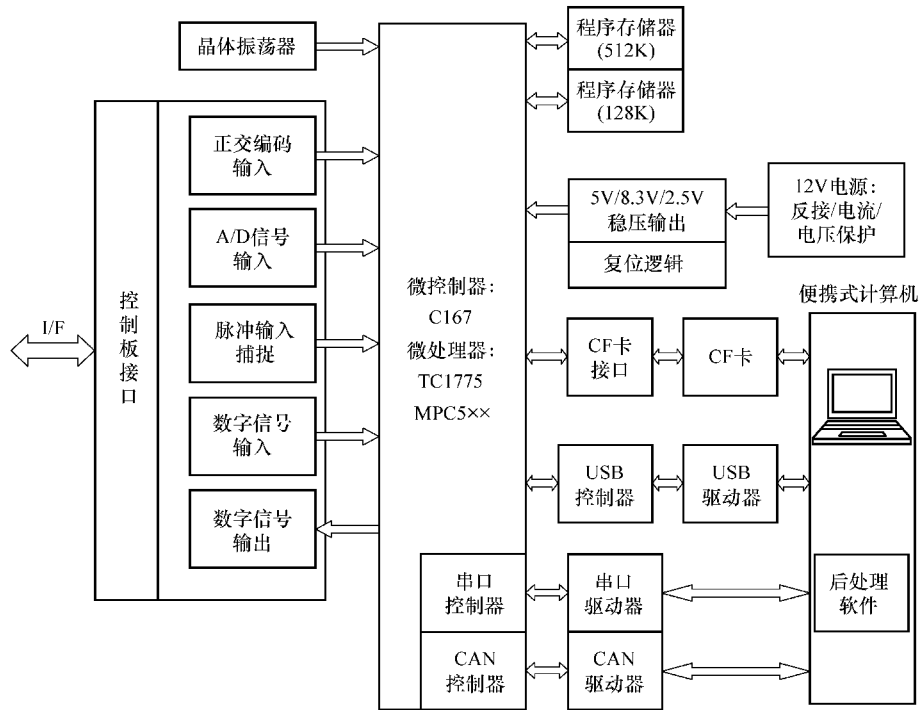
附录 D 电动车辆能量传输与回收硬件设计



附图 D1 总体设计硬件框图



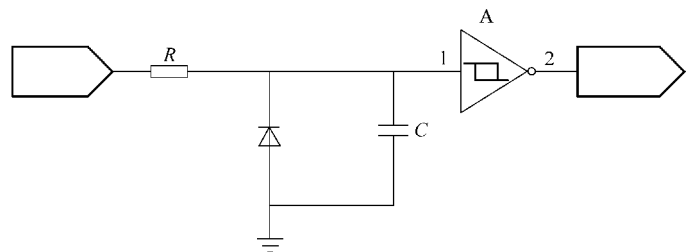
附图 D2 硬件控制板



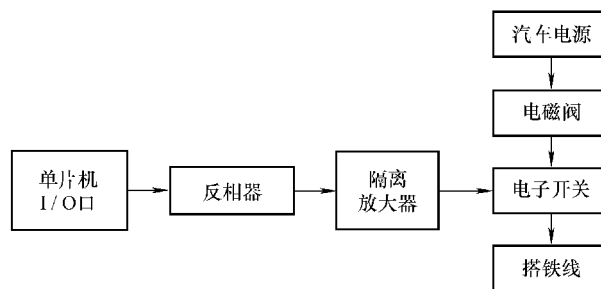
附图 D3 硬件核心控制板

附表 D1 硬件资源要求

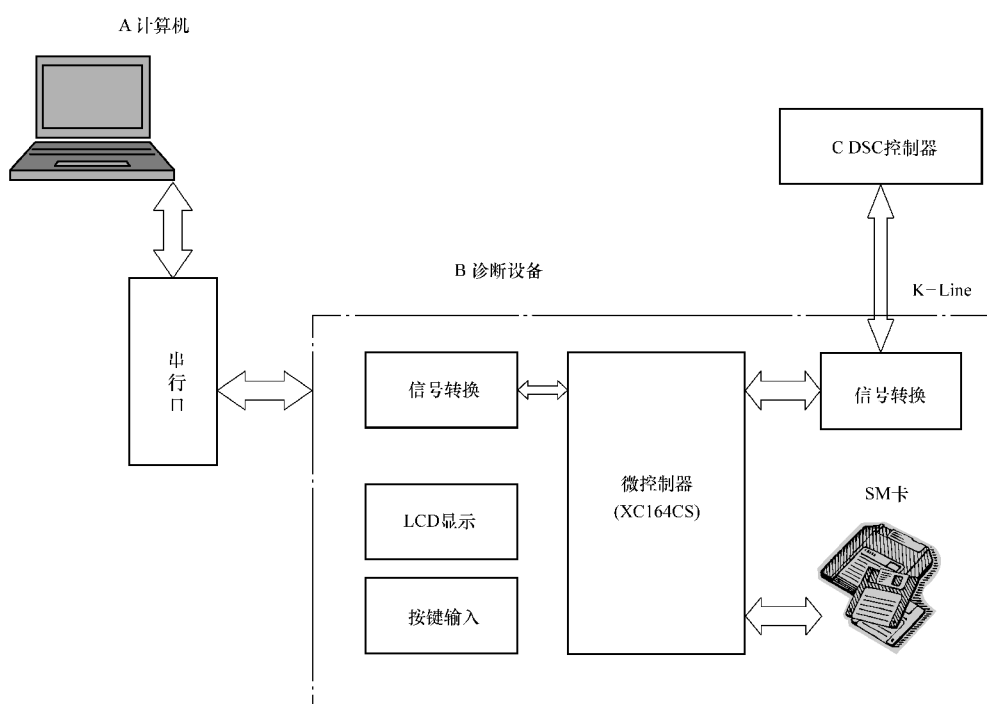
项目	主电子器件	从电子器件
指令周期/ μs	0.01	0.2
ROM 存储器/Kbyte	96	16
RAM 存储器/Kbyte	6	0.5
通用 IO	32	18
UART/SPI	是	是
CAN 接口	是	—



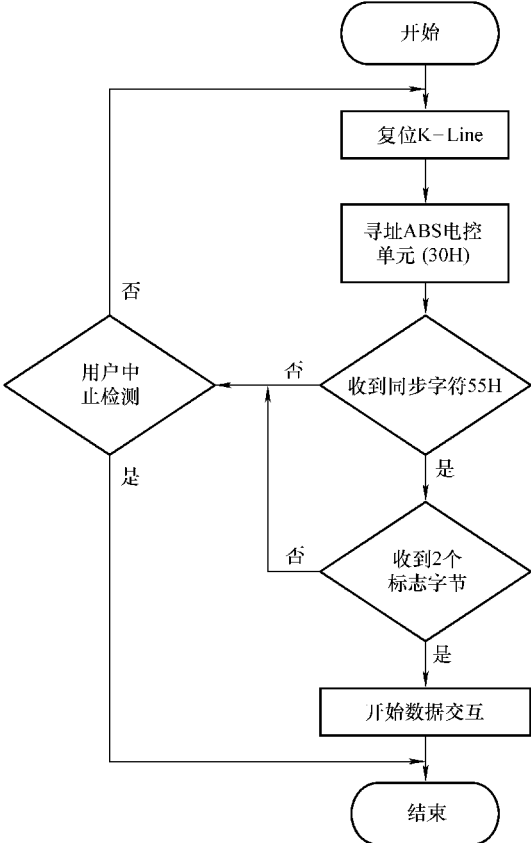
附图 D4 轮速滤波电路



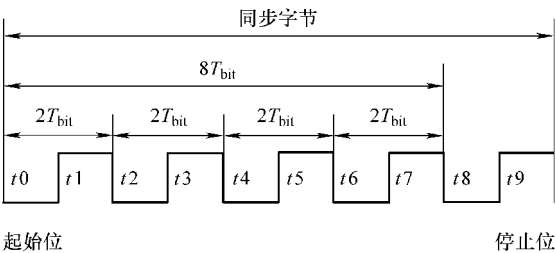
附图 D5 电磁阀驱动原理图



附图 D6 硬件诊断设备构成示意图



附图 D7 初始化流程



附图 D8 同步字节时序图

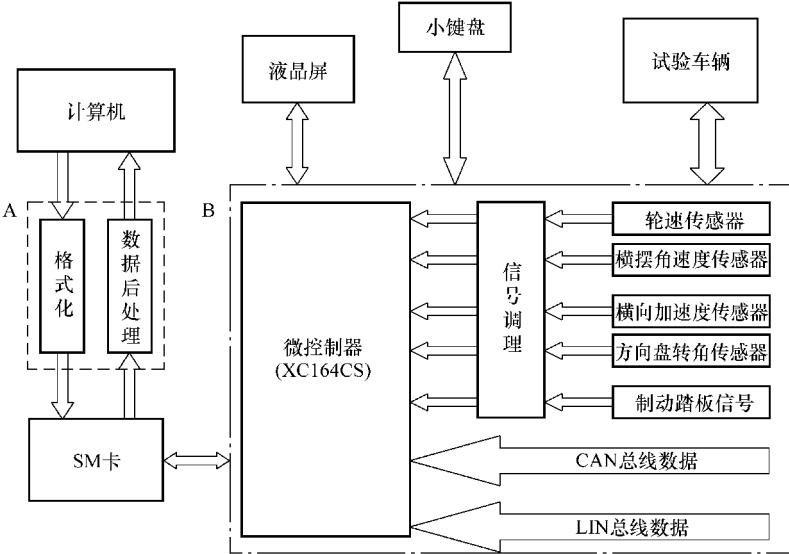
附表 D2 诊断设备内置函数

函数名	说 明
load_ engine	把 SM 卡中的二进制可执行代码调入内部 PSRAM
install_ engine	安装代码，包括设置入口、填写函数调用参数等



(续)

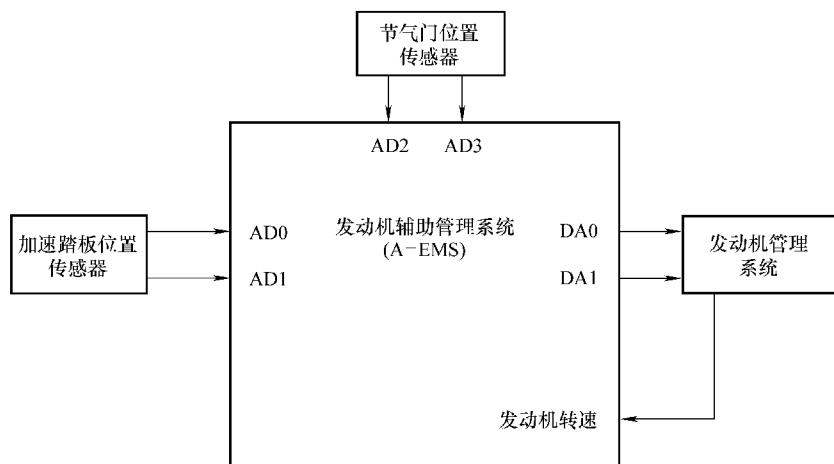
函数名	说 明
call_ engine	跳转到 0E00008H 处，调用已安装代码，进行数据传输。在调用开始时，先在参数表区设置命令类型，如读车速信号、控制电机转动等。call_ engine 执行完毕后，返回结果到参数表区
uninstall_ engine	停止数据传输



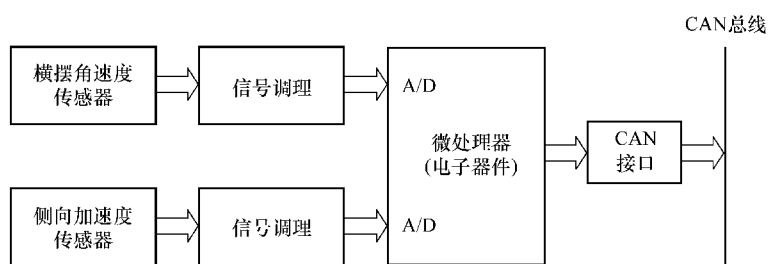
附图 D9 硬件数据采集系统构成

主引导记录 (MER)		绝对扇区编号
保留扇区	有效 SM卡标志 FLAG0	000000H
	有效数据标志 FLAG1	000001H
分区 1	数据扇区范围 [SEC0, SEC1]	
	DOS引导 (DBR)	000003H
	文件分配表 (FAT)	000065H
	文件目录表 (FDT)	000727H
数据区		000728H SEC0
分区2		00076BH SEC1
分区3		
分区4		

附图 D10 FAT16 文件系统结构



附图 D11 A-EMS 示意图



附图 D12 组合传感器示意图

新能源汽车研究与开发丛书

▲ 电动车辆能量转换与回收技术

电动汽车原理与应用技术

电动汽车电驱动理论与设计

新能源车辆储能与控制技术

混合动力电动汽车技术

电动汽车技术基础

Electric Vehicle Energy Conversion and Recover Technologies



机械工业出版社微信公众号



“汽车极客”微信订阅号
一键关注，获取最前沿最新鲜的汽车科技资讯，
免费赠送引进版汽车研发图书节选。

上架指导 交通运输 / 电动汽车

ISBN 978-7-111-51956-0

策划编辑◎何士娟 / 封面设计◎马精明

ISBN 978-7-111-51956-0



9 787111 519560 >

定价：59.80元

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037

电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203

网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
金书网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面防伪标均为盗版