



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

电动车辆动力电池系统 第2版 及应用技术

Electric Vehicle Battery Systems

王震坡 孙逢春 刘鹏 ◎ 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

电动车辆动力电池 系统及应用技术

第2版

王震坡 孙逢春 刘 鹏 编著



机械工业出版社

本书基于动力电池及动力电池组与整车的匹配和应用技术,突出电动汽车电池成组理论、动力电池管理技术方面的科研成果和理论。全书分为三部分内容。

第1章至第4章是基本概念方面的内容,主要介绍动力电池应用发展的历程,动力电池技术发展的现状和趋势,动力电池的基本原理、相关的基本概念,电动车辆对动力电池的性能要求以及动力电池及电池组的测试方法和测试手段。

第5章至第8章是对各种动力电池的特性介绍,重点对现阶段应用的铅酸动力电池、镍氢动力电池、锂离子动力电池等几种电动汽车上使用的动力电池的反应原理、基本特性进行了讲解,并介绍了未来有可能在电动汽车上应用的先进动力电池技术。

第9章至第12章是全书的重点,讲解了动力电池在电动车辆上应用的相关技术,包括电池应用的一致性、寿命、热场特性等基础理论,电池电量管理、安全管理和温度场管理技术,电池系统的设计匹配理论和设计方法以及动力电池系统充电基础设施。

本书可作为高等院校车辆工程专业的教材,同时也可供从事电动汽车和车用动力电池研究、开发、生产、销售和使用的有关人员参考。

本书配有PPT课件,可免费赠送给采用本书作为教材的教师,可登录 www.cmpedu.com 下载,或联系编辑 (tian.lee9913@163.com) 索取。

图书在版编目(CIP)数据

电动车辆动力电池系统及应用技术/王震坡,孙逢春,刘鹏编著.—2版.—北京:机械工业出版社,2017.6

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

ISBN 978-7-111-56639-7

I. ①电… II. ①王… ②孙… ③刘… III. ①电动汽车-蓄电池-高等学校-教材 IV. ①U469.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第084098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:宋学敏 责任编辑:宋学敏 李 然 责任校对:张 薇

封面设计:张 静 责任印制:李 昂

三河市宏达印刷有限公司印刷

2017年7月第2版第1次印刷

184mm×260mm·15印张·356千字

标准书号:ISBN 978-7-111-56639-7

定价:38.00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:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

序

在当前世界范围内展开的新能源汽车开发浪潮中，动力电池系统成了制约电动汽车发展的瓶颈，许多人都在进行不懈的努力，希望解决这个难题。我国政府在电动汽车的研发资金和政策方面给予了很大支持，但是要想使我国电动汽车的研发水平领先于世界先进水平是有难度的，需要正确认识我国电动汽车研发水平与世界先进水平之间存在的差距。重点解决动力电池系统多层面的技术问题，以满足电池组在电动汽车上使用的功率要求、能量要求、安全要求和可靠性要求是十分必要的。

本书从电池技术、管理系统技术、测试评估技术以及电池组合应用技术等几个方面，对电动车辆动力电池系统进行了比较系统、完整的介绍，特别是结合国内外电动汽车开发及示范运行实例进行的分析，非常值得仔细阅读，这会给现在正在进行或者将要进行电动汽车动力电池系统开发的人以非常有益的帮助。

国家 863 电动车动力电池测试中心 主任



第2版前言

2015年，以电动汽车为主的新能源汽车被确定为“中国制造2025”十大重点推动领域之一，并掀起了电动汽车产业化和商业化应用的热潮。随着新能源汽车技术的发展和规模化应用，新型动力电池陆续开发并应用，同时，动力电池的安全性问题凸显，促进了动力电池热失控理论和动力电池系统设计技术的深入研究。

本次修订主要优化了教材结构，精简和更新了第1章、第5章、第6章、第12章等章节的部分内容，调整了第9章和第10章的顺序和结构，在部分章节补充了新技术和新进展，突出了重点和应用性。主要修订内容如下：

1. 第2章，增加了动力电池的相关概念、动力电池放电方法及常见故障；
2. 第3章，增加了动力电池评价方法；
3. 第4章，增加了动力电池基本测试评价；
4. 第7章，增加了三元材料锂离子电池内容，并更新了部分内容；
5. 第8章，增加了一些新型动力电池内容，如铝空气电池等；
6. 第9章即第1版中的第10章，更新了动力电池一致性的部分内容，增加了动力电池状态估计的相关理论；
7. 第10章即第1版中的第9章，增加了电池热失控与热安全管理、BMS系统控制策略及可靠性设计等内容；
8. 第11章，增加了动力电池系统的布置、动力电池系统设计的发展趋势等内容。

本书由王震坡、孙逢春、刘鹏共同编著，以刘鹏为主完成了主要内容的补充和修订。北京理工大学电动车辆国家工程实验室的博士生曲昌辉、张文亮、洪吉超，硕士生朱敬娜、刘旭泽、樊文韬等协助进行了书稿资料的整理，在此对他们辛勤的工作表示感谢。

由于作者水平所限，书中若有不妥之处，恳切希望各位读者批评指正。

编著者

第1版前言

能源和环保问题日益受到国内外各界人士的关注,电动汽车已经成为汽车工业发展的趋势和方向之一。自2000年以来,在全球范围内掀起了电动汽车研发的热潮。我国科学技术部、发展和改革委员会、财政部、工业和信息化部四部委联合,已经在25个城市开展了电动汽车示范运行,并在6个城市开展了私人购买新能源汽车的试点工作。虽然各国发展电动汽车的技术路线各不相同,但动力电池作为电动汽车的关键部件和关键技术,长期以来一直受到研究者的重视。动力电池的能量密度低、使用寿命短、成本高是制约电动汽车产业化和商业化发展的瓶颈技术之一。

近十年来,动力电池技术飞速发展并逐步成熟,锂离子电池已经成为电动汽车用动力电池的主体,新型材料体系的动力电池也层出不穷。可以相信,在不久的将来,动力电池的能量密度、使用寿命将有质的飞跃。

在动力电池技术飞速发展的同时,人们在长期的科研工作过程中逐步发现,单体电池技术的进步并不代表成组应用的动力电池组整体寿命的提高,串、并联后的电池组性能并非单体电池性能的线性叠加。一致性控制、成组技术、电池监控和管理、热场控制、电池组性能与整车的匹配技术等逐步成为电动车辆用动力电池应用技术的核心和关键。

在现有关于动力电池的大量书籍中,多是对它的电化学原理和电池性能的介绍,而鲜有对动力电池成组应用技术的介绍,针对电动车辆的动力电池应用技术的介绍就更少了。

在多年的电动车辆开发过程中,北京理工大学电动车辆国家工程实验室形成了动力电池成组应用技术的优势,开发了北京奥运、上海世博和广州亚运用电动客车动力电池系统,与同级别车型动力电池系统相比,具有比能量高、监控完善、安全性好、使用寿命长等优势,为电动客车的成功应用奠定了基础。作者在总结多年电动车辆动力电池系统开发所形成的电动成组应用理论、经验和设计方法的基础上,结合电动车辆对动力电池的技术要求,以电动车辆应用为出发点,编著本书。希望将自己的理解和经验进行总结,能够对电动车辆动力电池系统的设计、匹配和应用提供一些技术方面的指导,为我国的电动汽车事业发展做些贡献。

本书由孙逢春教授构建了编写的框架并执笔完成了电池系统与整车匹配相关的第3章、第11章以及动力电池充电基础设施相关的第12章,其他章节由王震坡执笔完成。国家科技部863计划电动汽车动力电池测试中心的王子冬主任审阅了全稿,北京理工大学汽车系陈慧岩教授对本书的出版提供了大量建设性的意见,北京理工大学电动车辆国家工程实验室的何洪文教授、李军求副教授为本书提供了大量的资料,博士生刘鹏、张雷,硕士生陆春、韩海滨、孙晓辉、王越、张蕊、王朔等协助进行了书稿资料的整理,在此对他们辛勤的工作表示感谢。

受个人水平所限,在书稿的组织和编写过程中难免有不当之处,敬请各位读者谅解。希望以此书为交流的平台,与各位读者建立联系,促进技术的进步。

目 录

序	
第2版前言	
第1版前言	
第1章 动力电池及其驱动的 电动车辆	1
1.1 动力电池及电动车辆发展简史	1
1.2 国内外动力电池技术现状	4
1.3 动力电池驱动的车辆类型	7
1.4 动力电池及电动汽车发展趋势	12
第2章 动力电池的基本概念	13
2.1 蓄电池分类	13
2.2 化学能电能转换基本原理	14
2.3 电池的基本构成	14
2.4 电池及电池组	15
2.5 电池的基本参数	16
2.6 充、放电方法	26
2.7 常见电池故障	31
第3章 车辆对动力电池的要求	33
3.1 电动车辆驱动力的主要影响因素	33
3.2 动力电池的能量和功率需求	34
3.3 动力电池评价参数	36
3.4 动力电池评价方法	38
第4章 动力电池测试	41
4.1 动力电池基本测试原理与方法	41
4.2 动力电池基本测试评价	45
4.3 典型的测试设备	49
第5章 铅酸动力电池	53
5.1 概述	53
5.2 铅酸电池的工作原理及结构	53
5.3 铅酸电池的板栅合金	55
5.4 铅酸电池的电解液	56
5.5 铅酸电池的活性物质	57
5.6 铅酸电池的隔板	57
5.7 铅酸电池的性能	58
5.8 废旧铅酸电池的回收利用	62
第6章 碱性动力电池	63
6.1 概述	63
6.2 镍镉电池	63
6.3 镍氢电池	64
6.4 碱性动力电池的应用	71
第7章 锂离子动力电池	73
7.1 概述	73
7.2 锂离子动力电池的工作原理	74
7.3 正极材料	75
7.4 负极材料	79
7.5 锂离子电池的失效机理	80
7.6 锂离子动力电池的性能	81
7.7 锂离子动力电池的应用	90
第8章 其他电池	92
8.1 金属空气电池	92
8.2 钠硫电池	100
8.3 锂硫电池	103
8.4 Zebra 电池	104
8.5 飞轮电池	107
8.6 太阳能电池	108
8.7 超级电容器	111
8.8 燃料电池	115
第9章 动力电池应用理论	121
9.1 动力电池一致性	121
9.2 动力电池组使用寿命	134
9.3 动力电池状态估计	144
9.4 温度场设计方法	155
第10章 动力电池管理系统	162
10.1 基本构成和功能	162
10.2 数据采集方法	163
10.3 电量管理系统	169
10.4 均衡管理系统	173
10.5 热管理系统	176
10.6 电池热失控与热安全管理	179



10.7 电安全管理系统	181	11.3 电池包结构与设计	201
10.8 数据通信系统	183	11.4 电池系统的布置	206
10.9 电池组的峰值功率预测	185	11.5 动力电池系统充电方法	209
10.10 BMS 控制策略	189	11.6 动力电池的梯次利用与回收	213
10.11 BMS 系统可靠性设计	191	11.7 动力电池系统设计的发展趋势	214
第 11 章 动力电池系统设计及		第 12 章 动力电池充电基础设施	217
使用	194	12.1 充电机	217
11.1 电动车辆能耗经济性评价参数	194	12.2 充电站	219
11.2 电池系统与整车的匹配方法	196	参考文献	226

第1章

动力电池及其驱动的电动车辆

动力电池是电动车辆的主要能量来源，其技术历经了多次材料体系的变迁。每一次动力电池材料体系的变化都会带来电动车辆的一次发展高潮。最早的铅酸电池技术发展带来了20世纪初第一次电动汽车研发和应用高潮，20世纪80年代镍氢电池技术突破带来了混合动力电动汽车的产业化，20世纪90年代才出现的锂离子动力电池开启了现在以纯电动驱动为主的电动汽车研发和示范应用的新纪元。

本章将重点介绍动力电池及电动车辆的发展历程、现状和发展趋势以及不同种类电动车辆上动力电池的应用概况。

1.1 动力电池及电动车辆发展简史

早在1830年，苏格兰发明家罗伯特·安德森（Robert Anderson）便成功地将电动机装在一部马车上，随后在1834年与托马斯·达文波特（Thomas Davenport）合作，打造出世界上第一辆以电池为动力的电动汽车，该车采用的是不可充电的玻璃封装蓄电池。1873年，英国人罗伯特·戴维森（Robert Davidson）制作了世界上最初的可供实用的电动汽车，该车使用的是不可充电的一次性电池，比德国人戈特利布·戴姆勒（Gottlieb Daimler）和卡尔·本茨（Karl Benz）发明的汽油发动机汽车早了10年以上，但并没有被列入国际确认范围。1881年，法国工程师古斯塔夫·土维（Gustave Trouve）装配了世界上第一辆以铅酸电池为动力的三轮车。该电动汽车首次使用了可充电的蓄电池，而且符合当代汽车的雏形，在电动汽车的发展史上具有重要的意义，被认为是世界上第一辆电动汽车。

电池是早期电动汽车唯一的能量存储装置。19世纪，开发电动汽车所用的动力电池在能量密度、功率密度以及使用寿命方面远不能满足人类对高速行驶的交通工具的需要。1860年3月26日，法国科学家加斯顿·普兰特（Gaston Planté）最早发明了铅酸电池，之后经历了20多年的持续改进，铅酸电池在系统设计和制造工艺方面有了很大的改进，使其拥有了商业价值。随后，可充电碱性电池——镍镉电池和镍铁电池也进入了市场。19世纪末，由于多种可充电电池的大量生产和应用，电动车辆在一些工业化国家流行起来。法国的电动汽车一直保持着世界电动汽车行驶里程和车速的最高纪录。1899年，法国人考门·吉纳（Carmen Gina）驾驶一辆44kW双电动机为动力的后轮驱动的子弹头型电动汽车（见图1-1），创造了时速106km的记录，并且续驶里程达到了约290km。1900年，美国制造的汽车中，电动汽车为15755辆，蒸汽机汽车为1684辆，而汽油机汽车只有936辆。到了1912年，已经有几十万辆电动汽车遍及全世界，被广泛使用于出租车、送货车、公共汽车等领域。19世纪末的电动出租汽车如图1-2所示。



然而电动汽车的黄金时代仅仅维持了 20 多年。在 1890~1920 年期间,全世界的石油生产量增长了 10 倍,1911 年,查尔斯·凯特林 (Charles Kettering) 发明了内燃机自动启动技术;1913 年,福特 (Ford) 建立了内燃机汽车生产线。内燃机汽车进入了标准化、大批量生产阶段。内燃机汽车应用方便、价格低廉的优点逐步显现。虽然同一时期电动汽车用的动力电池技术也在飞速发展,在 1910~1925 年间,电池存储的能量提高了 35%,寿命增长了 300%,电动汽车的行驶里程增长了 230%,与此同时,价格降低了 63%,但汽油的质量能量密度是电池的 100 倍,体积能量密度是电池的 40 倍。在使用性能方面,动力电池充电时间明显长于内燃机汽车燃油的加注时间。因此,电动汽车续驶里程短、充电时间长成为无法与内燃机汽车相抗衡的致命因素。



图 1-1 法国的子弹头型电动汽车

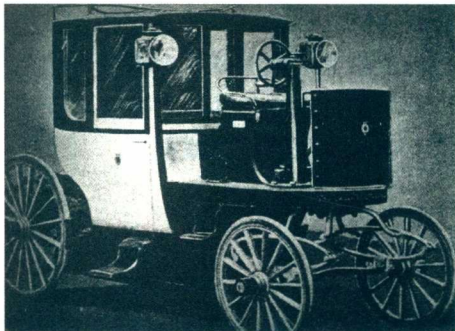


图 1-2 19 世纪末的电动出租汽车

第一次世界大战后,电力牵引技术应用的重点转移到公共交通领域,如火车、有轨电车和无轨电车。随着内燃机汽车设计和制造技术的发展,在很多地区,有轨电车和无轨电车也逐步被柴油驱动的内燃机汽车取代了。一方面是由于电动汽车技术多年没有大的进步,车速低、加速度小;另一方面是由于其使用区域受限以及电力供应网络和建设维护费用偏高。

第二次世界大战后,欧洲和日本的石油供给紧张,电动汽车在局部地区出现了复苏迹象。1943 年,仅仅在日本就有 3000 多辆电动汽车处于注册状态。20 世纪 40 年代,电动汽车续驶里程只有 50~60km,最高时速仅为 30~35km/h,其性能仅能满足短途、低速运输的需要。

进入 20 世纪 60 年代,内燃机汽车大批量使用导致了严重的空气污染。不仅如此,更严重的是内燃机汽车对石油的过分依赖,导致一系列的政治问题和国家安全问题。20 世纪 70 年代初,世界石油危机对美国乃至世界经济产生了重大影响,而电动汽车由于其良好的环保性能和能摆脱对石油的依赖性,重新得到社会各界的重视。

1976 年,美国国会通过了《纯电动汽车和混合动力电动汽车的研究开发和样车试用法令》(The Electric and Hybrid Vehicle Research Development and Demonstration Act),拨款 1.6 亿美元资助电动汽车的开发。1977 年,第一次国际电动汽车会议在美国举行,公开展出了 100 多辆电动汽车。1978 年,美国通过《第 95—238 公法》(Federal Nonnuclear Act),予以修订并增加对电动汽车研发的拨款,政府同时责成能源部电力研究所与电力公司加快研制电动汽车的技术,并加大资金投入,责成国家阿贡实验室与电池公司合作研制供电动



汽车用的高性能蓄电池。从此，国际上开始了第二轮的电动汽车研发高潮。

1988 年，在美国洛杉矶地区的市议会上曾有人提出，引入国际竞争机制，进行年产 10000 辆电动车辆，包括 5000 辆货车和 5000 辆两座乘用车并推向市场的计划。继洛杉矶倡议之后，1989 年 12 月 13 日，加利福尼亚州空气资源委员会（CARB）对汽车排放制定了规划，该项规划要求到 20 世纪 90 年代末，在加利福尼亚州销售的所有车辆中，有 2% 要符合零排放标准（Zero-emission-vehicles）。满足该标准的车辆只能是纯电动汽车或氢燃料电池电动汽车。随后，美国纽约、马萨诸塞等州也颁布了类似的法律。

为了满足电动汽车发展的需要，促进动力电池的发展，以美国的三大汽车公司——通用、福特和克莱斯勒为主，成立了美国先进电池联合会（USABC），提供巨额资金着重开发与电动汽车配套的动力电池，并制定了近期、中期、长期的电池技术发展规划和技术要求，美国先进电池联合会中长期开发指标见表 1-1。欧洲主要发达国家如法国、德国、意大利以及亚洲的日本也都成立了相应的机构或团体，协调电动汽车及电池技术的研发和产业化。

表 1-1 美国先进电池联合会中长期开发指标

性能指标	单位	中 期	过 渡 期	远 期
质量能量密度(3h 率)	W · h/kg	80~100	150	200
体积能量密度(3h 率)	W · h/L	135	230	300
质量功率密度(80%DOD/30s)	W/kg	150~200	300	400
体积功率密度(80%DOD/30s)	W/L	250	460	600
循环次数(80%DOD)	次	600	1000	1000
寿命	年	5	10	10
正常充电时间	h	6	6	4
充电效率	%	40	50	60
快速充电时间	min	<5	<20	<20
充电效率	%	75	80	80
工作温度	℃	-30~60	-30~65	-40~85
连续放电 1h 率	额定容量%	70	75	75

1991 年，可充电的锂离子蓄电池问世。1995 年，日本索尼公司首先研制出 100A · h 锂离子动力电池并在电动汽车上应用，展示了锂离子电池作为电动汽车用动力电池的优越性能，引起了广泛关注。到目前为止，锂离子动力电池被认为是最有希望的电动汽车用动力蓄电池之一，并在多种电动汽车上推广应用。近年推出的电动汽车产品绝大多数都采用锂离子动力电池，形成了以钴酸锂、锰酸锂、磷酸铁锂、三元锂为主的电动汽车锂离子动力电池应用体系。

其他电池如锌空气电池、钠硫电池等，在过去的 100 年中在电动汽车上也有所应用，但由于其电池的特性、价格、制备工艺等问题，均未成为电动汽车应用电池的主流。



2003年,以色列巴伊兰(Bar-Ilan)大学的D. Aurbach团队研究出极具潜力的充电镁电池,其具有能量密度高、镁资源丰富、价格低廉、操作安全、无环境污染等优点。充电镁电池的发展一直受到两个主要因素的制约:①可供镁离子嵌入的基质材料很少,这使得对正极材料的选择受到一定限制;②镁电极表面的电化学反应十分复杂,需要寻找合适的电解液体系以解决钝化膜问题。如何解决镁在电解质溶液中的电化学反应和沉积平衡,并提高电池的工作电压和能量密度是今后必须解决的问题,相信随着研究的不断深入,可充电镁电池最终有望在新能源技术中发挥重要作用。

铝空气电池作为非充电电池,早在20世纪60年代便已问世,它具有非常高的能量密度。然而,铝空气电池在放电过程中阳极腐蚀会产生氢,会导致阳极材料的过度消耗,增加电池内部的电学损耗。这严重阻碍了铝空气电池的商业化进程。2014年2月在亚特兰大世界先进汽车电池能源会议上,美国铝业加拿大公司(Alcoa)和以色列飞纳齐(Phinergy)公司展示的质量为100kg的铝空气电池能储存足可行驶3000km超级续航能力的电量。研发公司通过在高纯度金属铝中掺杂微量的特定合金元素以提高金属铝阳极耐腐蚀性,并在电解液中添加腐蚀抑制剂的方法来解决铝电池存在的阳极材料和电化学反应的损耗。除此之外,该种铝空气电池颠覆了传统电池一次一次充放电的方法,改为更换极板来更新电池,这些特性标志了电动车辆电源革命性的进展。

2014年北京国际车展上,丰田、本田、现代以及上汽等企业竞相展示了最新研制的氢燃料电池车型。2014年11月18日,丰田发布全球首款商业化燃料电池汽车Mirai(未来),单次加满氢气只需3min,续航里程可达650km。丰田部门研发人员表示,通过重新改造燃料电池组,例如在电池组的某些部件上,丰田从使用镀金不锈钢转向使用更便宜的钛,以及将铂金镀到催化剂表面的方式减少铂用量等来实现低成本。氢燃料电池汽车具有零排放或近似零排放,燃油经济性高,运行平稳、无噪声等诸多优点。此外,氢气的能源密度是车载锂离子电池的10倍,充一次氢气可以行驶更长距离,燃料电池的能量转换效率比内燃机要高2~3倍。

如今各种新型高能动力电池不断见诸报道。可以想象,随着技术的进步,动力电池必将向高比能量、高比功率、长寿命、低价格、安全可靠的方向发展。

1.2 国内外动力电池技术现状

长期以来,电池的寿命和成本问题一直是制约电动汽车发展的技术瓶颈。通过不断的技术创新与技术改进,电池技术得到了飞速的发展。动力电池已经从传统的铅酸电池发展到镍氢动力电池、钴酸锂、锰酸锂、聚合物、三元锂、磷酸铁锂等先进的绿色动力电池,动力电池在比能量、比功率、安全性、可靠性、循环寿命、成本等方面,都取得了很大进步。

表1-2列出了现阶段在电动汽车上使用的主流电池类型及其基本特性。其中铅酸电池由于技术成熟、成本低,在电动汽车尤其是纯电动汽车上应用广泛。锂离子动力电池具有容量高、比能量高、循环寿命长、无记忆效应等优点,因而成为当前电动汽车用动力电池技术研究开发的主要方向,尤其是Plug-in混合动力概念的推出,为锂离子电池的应用拓展了广阔的市场空间。



表 1-2 电动汽车用蓄电池现状概要

电池类型	铅酸电池	镍镉电池	镍氢电池	钠硫电池	锂电池
比能量/(W·h/kg)	30~45	40~60	60~80	100	110~200
比功率/(W/kg)	200~300	150~300	550~1350	200	250~450
循环寿命/次	400~600	600~1200	1000 以上	800	800~1200
优点	技术成熟、廉 价、可靠性高	比能量较高、 寿命长、耐过充 放性好	比能量高、寿 命长	比能量高	比能量高、 寿命长
缺点	比能量低、耐 过充放性差	镉有毒、价 高、高温充电 性差	价高、高温充 电性差	高温工作 稳定	价高、存在 一定安全性 问题

当前，国际上各大电池公司纷纷投入巨资研制开发锂离子动力电池，在技术上取得了一系列重大突破。美国 Vaknce 公司研制的 U-charge 磷酸铁锂电池，除了能量密度高、安全性好以外，可在-20~60℃ 的宽温度范围内放电及储存，其重量比铅酸电池轻了 56%，一次充电后的运行时间是铅酸电池的 2 倍，循环寿命是铅酸电池的 6~7 倍。韩国 SK inno-
vation 动力锂电池正极采用 NCM 三元材料，电池单体能量密度达到 180W·h/kg，电池组
能量密度为 110W·h/kg。随着锂离子动力电池技术的不断发展，其在电动汽车上的应用
前景被汽车企业普遍看好，在近两年的国际车展上，各大汽车公司展出的绝大多数纯电动
汽车和混合动力汽车都采用了锂离子动力电池。

在我国，权威部门对动力电池的测试结果表明，中国研制的动力蓄电池的功率密度和
能量密度实测数据达到了同类型电池的国际先进水平，电池安全性能也有了很大提高。镍
氢动力蓄电池荷电保持能力大幅度提升，常温搁置 28 天，荷电保持能力可达 95% 以上。
锂离子电池在系统集成技术及能力方面取得较大进展和突破，采用磷酸铁锂材料的动力电
池系统的能量密度达 90 (W·h)/kg，采用三元材料（1865 圆柱形动力电池）的动力电
池系统的能量密度达 110 (W·h)/kg，循环寿命超过 5 年/10 万 km 的质保要求。

在电池技术发展规划方面，世界主要发达国家均制定了国家层面的动力电池研究发展
规划，大力支持动力电池技术和产业的发展。

美国能效和可再生能源局（Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, EERE）
发布了“电动汽车无处不在大挑战蓝图”（EV everywhere grand challenge blueprint）”，设
置的动力电池系统技术指标：2022 年实现电池系统质量能量密度 250 (W·h)/kg，体积
能量密度 400 (W·h)/L，功率密度 2000 W/kg，成本 125 美元/kW·h 的目标。其中，
短期目标（2012—2017 年）采用高容量正极材料、高电压电解液和高容量锡基或硅基合
金负极材料，可使电池系统的质量能量密度由 100 (W·h)/kg 提高到 250 (W·h)/kg，
但在性能和寿命方面需要开展深入的研究工作；长期目标（2017—2027 年）则主要支持
后锂离子电池技术的开发，如锂硫、锂空气、镁离子及锌空气电池等，在寿命、能量效
率、功率密度以及其他重要性能参数等方面开展深入的研究工作，以实现其商业化应用。

日本经济产业省下属的新能源产业技术综合开发机构（New Energy and Industrial
Technology Development Organization, NEDO）牵头制定了较为详细的动力电池研发路线图



和行动计划，重点对锂离子电池单体、模块、标准及评价技术进行研发项目的设置，开展技术攻关。NEDO 于 2013 年发布了二次电池技术路线图 2013（Battery RM 2013），提出了电动汽车用及固定式用二次电池的技术指标（见表 1-3），其中对于车用动力电池的功率密度、能量密度及寿命等设置了明确的目标。

表 1-3 日本车用动力电池的主要技术指标

电池类别	要求	2012 年底	2020 年前	2030 年前	2030 年后
功率型电池	功率密度/(W/kg)	1400~2000	2500	—	—
	能量密度/(W·h/kg)	30~50	200	—	—
	使用寿命/年	5~10	10~15	—	—
	循环寿命/次	2000~4000	4000~6000	—	—
	价格/[美元/(W·h)]	1~1.5	0.2	—	—
能量型电池	功率密度/(W/kg)	330~600	~1500	~1500	~1500
	能量密度/(W·h/kg)	60~100	250	500	700
	使用寿命/年	5~10	10~15	10~15	10~15
	循环寿命/次	500~1000	1000~1500	1000~1500	1000~1500
	价格/[美元/(W·h)]	0.7~1	0.2	0.1	0.05

德国政府为推动电动汽车的发展，制定了国家电驱动平台计划（NPE），通过电池灯塔研发项目推动在动力电池领域建立单体电池及电池系统的生产能力，从材料开发及电池技术、创新性电池设计技术、安全性评估及测试流程、电池寿命的建模与分析、大规模生产的工艺技术五方面开展研发工作，提出了动力电池系统主要性能参数（2014—2020 年）：2014 年质量能量密度为 105（W·h）/kg，成本为 400 美元/（kW·h），2017 年为 110（W·h）/kg 和 300 美元/（kW·h），2020 年为 130（W·h）/kg 和 280 美元/（kW·h）。

韩国知识经济部大力支持电动汽车用锂离子电池的研发工作，着重对锂离子动力蓄电池单体、模块、系统及关键原材料等进行攻关研究。支持的世界首要材料项目（World Premier Material，WPM），涉及纯电动汽车和储能两大应用领域，纯电动汽车侧重于能量密度，储能侧重于成本，从高功率、高容量、低成本、高安全性四方面开展相关技术研究。引导绿色社会的二次电池技术研发项目，下设锂离子电池关键材料、应用技术研究（针对储能及纯电动汽车领域）、评价与测试基础设施、下一代电池研究-2020 电池计划 4 个子项目，涵盖基础研究、关键原材料、测试评价及标准、动力电池应用，以期在韩国打造完善的动力电池产业链。

中华人民共和国科学技术部（简称科技部）发布的“十二五”“十三五”规划电动汽车重大项目中，对混合动力用高功率动力电池、纯电驱动用高能量型锂离子动力电池以及下一代纯电驱动用新型锂离子电池和新体系电池进行了技术研发支持。国务院印发的节能与新能源汽车产业发展规划（2012—2020 年），对动力电池路线图进行了大致规划，重点支持动力电池的产业化和电池模块的标准化。在国家“十三五”计划中设立了新能源汽车重点研发专项（2016—2020 年），在动力电池方面从动力电池新材料新体系、高比能锂离子电池、高功率长寿命电池、动力电池系统、高比能二次电池、测试评估六方面进行支持，提升锂离子电池的技术水平，能量密度达到 300（W·h）/kg，实现批量应用；开展新型锂离子电池的技术开发，能量密度达到 400（W·h）/kg；开展新体系电池的技术开发，能量密度达到 500（W·h）/kg。



1.3 动力电池驱动的车辆类型

1.3.1 厂内车辆

在厂区或生产现场的产品或材料运输中,电动车辆已有很长的应用历史。1910年前后电动车辆就被应用于货物运输,1922年出现了电动举升式叉车,随后以电动叉车为主的电动车辆被广泛应用于工厂的货物举升、移动和码放。

当前,叉车种类繁多,从结构上分类,叉车主要包括三支点和四支点平衡重式叉车、前移式叉车、拣选车、三向堆垛机和托盘搬运车等。但不论哪种类型的叉车,基本上都由动力部分、底盘、工作部分和电气设备四大部分构成。电动叉车如图1-3所示。

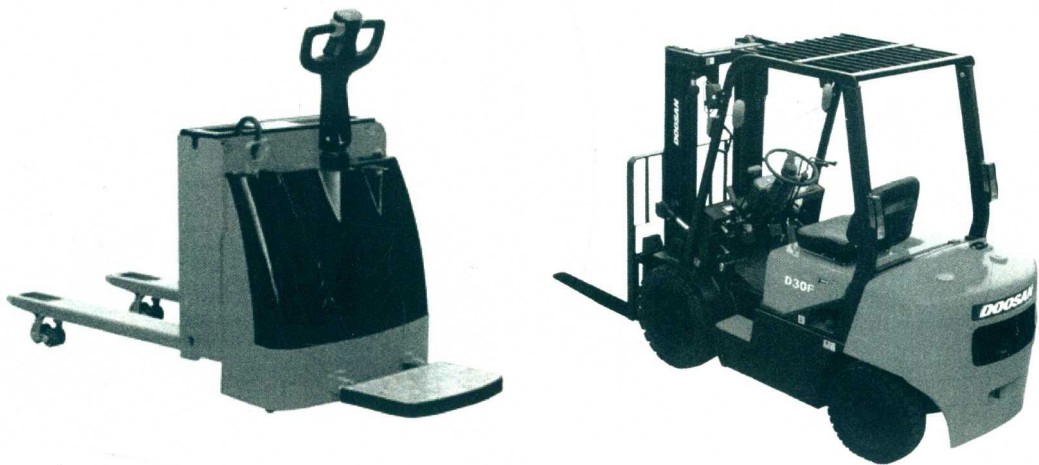


图 1-3 电动叉车

现阶段,电动叉车主要应用的蓄电池还是以铅酸电池为主,锂离子电池等先进电池的应用并不广泛。电动叉车具有运转平稳、检修容易、操纵简单、营运费用低的优点,尤其在封闭环境中作业,无噪声、不排废气,可以保证良好的工作环境;电动叉车应用的主要缺点是需要充电设备,初期投资高,充电时间较长(一般充电7~8h,快速充电2~3h),一次充电后的连续工作时间短。由于蓄电池容量和比功率的限制,一般电动叉车驱动电动机功率相对内燃机要小,车速低,爬坡能力差。因此电动叉车主要用于通道较窄、搬运距离不长、路面好、起重量较小、车速要求低的仓库和车间中。在一些特殊工况下,电动叉车成为货物运输最佳的选择,如在易燃品仓库或食品、制药、微电子及仪器仪表等对环境条件要求较高的行业,只能使用电动叉车;在冷冻仓库中,内燃机起动困难,也主要采用电动叉车。

其他由蓄电池作为动力源的厂内车辆还包括:电动拖车(用于无动力货箱或车厢的牵引)、移动式升降平台等。

国外市场特别是欧美发达国家市场,由于受环境保护法律法规的影响,电动叉车的产量已占叉车总产量的40%以上,日本电动叉车应用也已超过了叉车总量的1/3。在我国,电动叉车所占比例为20%左右,目前已逐步由室内作业走向室外作业,从小吨位作业向

大型化发展，市场需求逐年上升。

1.3.2 电力机车

早在 20 世纪初，德国已经采用以蓄电池为动力源的电力机车（电力火车）用于长途工作的人员和货物运输。到 1979 年，大约 20% 的德国长途轨道车辆为电力机车拖动，这些车辆工作由沿途的 100 个充电站提供能源。车上使用的是 VARTA AG 公司制造的铅酸蓄电池。每列机车的电池系统由 220 块电池单体组成，重 21t，存储能量 $650\text{kW}\cdot\text{h}$ ，单日运行 250~400km。动力电池的平均寿命为 4 年。根据德国的实践经验，电力机车的优点包括：可靠性高、噪声低、无污染、使用成本低、便于操作和维修。

随着铁路运输的发展，现阶段各国应用的轨道运输工具已经以电力机车为主，国外以及我国正在建设的高速列车均为电力拖动车辆。电力机车一般配备 750V 或 900V 动力蓄电池系统，供驱动以及机车附件系统应用。图 1-4 和图 1-5 所示为我国广泛应用的电力货运机车和已经开始应用的和谐号动车组列车。



图 1-4 电力货运机车



图 1-5 和谐号动车组列车

以蓄电池为动力源的电力机车多年来也广泛应用于采矿业中的矿石运输（见图 1-6）。由于采矿环境的潜在危险比较大，可能存在各种易燃、易爆的气体，同时在封闭矿井或作业空间内应用，内燃机机车容易造成严重的空气污染，不利于作业。为了保证矿用机车的安全性，各国都制定了严格的法规甚至法律，以保证电力机车蓄电池以及电气辅助设备（如充电器）能够达到防爆、防火要求。

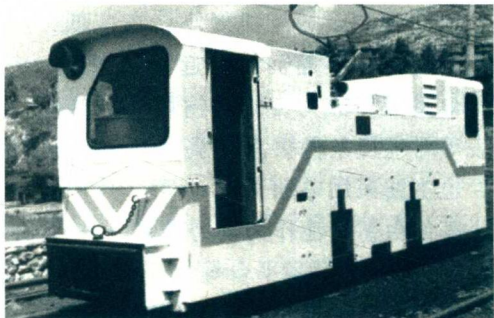
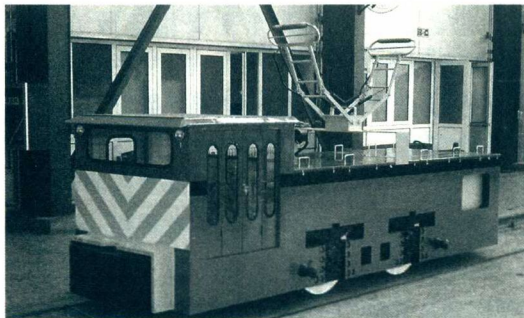


图 1-6 架线式矿用电力机车



1.3.3 娱乐及运动场地车辆

作为该类车辆的典型应用,高尔夫球车(见图1-7)主要用于高尔夫球场运送设备以及为球员服务。使用高尔夫球车的目的是加速娱乐和运动的进程,保护场地的安全,帮助残疾人以及老年人参与其中等。现阶段应用的高尔夫球车主要以铅酸电池为主,电池系统电压一般为48V或72V,容量在200A·h左右。

由于电动车辆具有无污染、低噪声等优点,类似高尔夫球车的电动旅游景点用车(见图1-8)在环境要求高的旅游景点被广泛用于游客运输。



图 1-7 高尔夫球车



图 1-8 电动旅游景点用车

1.3.4 残疾人或医疗服务用车

由于蓄电池驱动的车辆具有起步平缓、低噪声等优点,在医疗机构中应用电动车辆运输药品、作为重症监护车辆以及救护车(见图1-9)。另外,电动轮椅(见图1-10)已经广泛应用,使许多残疾人能够行动自如。还有为行动不便的老人代步的电动代步车(见图1-11),近年来也在该领域蓬勃发展并广泛应用。



图 1-9 电动救护车



图 1-10 电动轮椅



图 1-11 电动代步车