



国防科技著作精品译丛

Next-Generation Batteries and Fuel Cells
for Commercial, Military, and Space Applications

下一代商业、军事、 空间应用电池和燃料电池

【美】A.R.JHA 著 毛仙鹤 赵维霞 陶 钧 译



CRC Press
Taylor & Francis Group



国防工业出版社
National Defense Industry Press



下一代商业、军事、空间应用电池和燃料电池

Next-Generation Batteries and Fuel Cells for Commercial, Military, and Space Applications

[美] A. R. JHA 著
毛仙鹤 赵维霞 陶钧 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军 - 2012 - 234 号

图书在版编目 (CIP) 数据

下一代商业、军事、空间应用电池和燃料电池/ (美) 杰哈 (Jha, A. R.) 著; 毛仙鹤, 赵维霞, 陶钧译. -- 北京: 国防工业出版社, 2015. 3

(国防科技著作精品译丛)

书名原文: Next-Generation batteries and fuel cells for commercial, military, and space applications

ISBN 978-7-118-10085-3

I. ①下… II. ①杰… ②毛… ③赵… ④陶… III. ①电池—研究 IV. ①TM911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 050368 号

Next-Generation Batteries and Fuel Cells for Commercial, Military, and Space Applications by A. R. JHA

Copyright© 2012 by Taylor & Francis Group LLC

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC

All rights reserved.

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版。版权所有, 侵权必究。

National Defense Industry Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版由国防工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

下一代商业、军事、空间应用电池和燃料电池

【美】 A. R. JHA 著

毛仙鹤 赵维霞 陶钧 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 700 × 1000 1/16

印 张 21¼

字 数 360 千字

版 印 次 2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—2500 册

定 价 98.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717

译者序

电池如今已是现代生活不可或缺的一部分,几乎每个人每时每刻都使用着至少一块电池,这并不夸张,看看身边的手机、笔记本电脑、电动车、太阳能热水器……即使这些也只是电池家族的一小部分。本书的作者 A. R. Jila 博士,会引领广大读者进入电池的一方更广阔的世界:上至浩茫无穷的宇宙太空,下至广袤无垠的陆地海洋;小到人们的日常工作娱乐、旅游出行、医疗保障,大到风云诡谲的战场上各式尖端的武器装备,保障生命安全的探测装置,甚至浩渺宇宙中的各种飞行器和科学测量设备……电池的应用领域遍布人类智慧能够触及的每一个角落,给人类的生存和发展带来了无限的可能。

在翻译这本书的过程中,译者一直感慨于原作者 A. R. Jila 博士卓越、广博的专业知识。他丰富的研究和从业经历,使他能够将复杂的理论物理概念融合到现代工业实际应用的技术框架当中。这本书几乎涵盖了蓄电池和燃料电池技术的每一方面,包括使用的材料、特殊技术、性能参数、应用领域、研发现状、成本效益等,特别强调了电池技术与其他技术领域的关键的相互依存关系。因此这本书不仅是机械和材料工程领域的专业书籍,对于航空航天、生命研究、临床医学等领域的工程设计者来说,也具有极大的参考价值。

因为译者专业知识和能力有限,译文中不免有错漏之处,恳请大家在阅读中提出宝贵意见。

序言

目前全世界对石油的需求量越来越大,而可以预见在不久的将来石油资源会出现严重短缺。为了减少对外国石油的依赖,消除与石油相关的温室效应,一些汽车制造公司一直在从事电动汽车 (EV)、混合动力电动汽车 (HEV) 和插入式混合动力汽车 (PHEV) 的大规模开发和生产。为了满足当前的需求,本书作者 A. R. Jha 对尖端电池技术给予了高度重视。先进材料技术是研发电动汽车和混合动力电动汽车使用的下一代蓄电池和燃料电池所必须考虑的一个方面。此外, Jha 还确定和描述了能够完成隐蔽通信、监视和侦察任务的各种商业、军事、航天器和卫星使用的下一代一次和二次 (可充电) 电池。他重点强调了工作在严酷的热和机械环境下的下一代高容量电池的成本、可靠性、寿命和安全性。

本书几乎考虑了蓄电池和燃料电池技术的每一个方面,包括最适合于特定组件以及可能应用在电动汽车、混合动力电动汽车和插入式混合动力汽车上的稀土材料。使用某些稀土材料能够显著改善电池的电气性能,并减小在车辆内部占用额外空间的交流电流感应电动机和发电机的尺寸。Jha 建议在进行最适合植入式医疗设备和诊断应用的低功率电池的设计和开发时,采用超高纯金属纳米技术 PVD 薄膜。这种特殊技术在不久的将来可用于非侵入式的医疗诊断设备的研发,如磁共振成像和计算机断层扫描。

本书贯穿了 Jha 杰出的叙述方式,将复杂的理论物理概念浓缩到一个可扩展到现代工业广泛实用和容易理解的技术框架中。他采用叙述方法,兼顾基础科学的同时,又让人觉得耳目一新。这会帮助当今的学生,包括

本科生和研究生,以充分的信心掌握这些复杂的科学概念,并将其应用于商业工程,使世界各地的新兴经济体受益。

本书具有良好的组织结构,并提供了数学公式来估算充电电池的关键性能参数。Jha 涵盖了充电电池的全部重要设计方面和潜在的应用,强调了电池的便携性、可靠性、寿命和成本效益等。本书还对电池组中单电池的基本热力学进行了论述。Jha 指出单电池的有害热效应会影响电池组的可靠性和电气性能。值得注意的是,对集成电池组的热力学评价至关重要,因为它可能会影响电池组的可靠性、安全性和寿命。Jha 的工作经历,使他能够提出众多新兴应用对小体积、轻质、高可靠性的充电电池的需求,特别是对便携式和植入式医疗设备和诊断胶囊的要求。Jha 总结了用于低功率医疗设备的全固态锂离子电池的优点,如心脏起搏器、心律转变器和植入型心律转复除颤器使用的电池。

本书明确了充电电池的关键性能参数和局限性,如充电状态、放电深度、循环寿命、放电速率和开路电压。同时也确定了各种电池的老化效应。并总结了电动汽车、混合动力电动汽车、插入式混合动力汽车对充电电池的要求,强调了电池的可靠性、安全性和寿命。本书还详细讨论了电压下降所产生的记忆效应。由于聚合物电解质可能增加室温离子导电性,作者还简要提及了固体聚合物电解质技术的优点。这种离子导电性的增加使电池的性能在中到高的温度范围即 $60 \sim 125^{\circ}\text{C}$ 得到了改进。

本书总结了长寿命、低成本的充电电池的性能,包括银锌电池和其他电池。这些电池最适合航空航天和国防应用。还确定了用于无人水下航行器、无人驾驶飞机、反简易爆炸装置、执行监视侦察和跟踪星载目标任务的卫星或航天器的电池,重点强调了可靠性、寿命、安全性、重量和尺寸。本书还概括了多种充电电池的正极、负极和电解质材料。

Jha 专门用一章的篇幅来介绍燃料电池,描述了三种不同类型的实用燃料电池,即采用水电解质、熔融电解质和固体电解质的燃料电池。燃料电池是一种结合氧化反应和还原反应的发电系统。在燃料电池中,燃料和氧化剂都从外部源添加,在两个独立的电极反应;而在蓄电池中,两个独立的电极是燃料和氧化剂。因此,在燃料电池的能量转换装置中,化学能等温转换成直流电。这些装置比较笨重,主要在高温下 ($500 \sim 850^{\circ}\text{C}$) 工作。氢-氧燃料电池能以最廉价的成本产生高功率,最适合交通巴士使用。电极动力学在研究如何实现燃料电池高效工作中发挥了关键作用。Jha 指出了电化学动力学的基本规律,并说明优良的养分——电解质媒介是生化燃料电池产生更高的电能所必需的。

不同行业的读者,特别是从事机械和材料工程专业,希望在下一代蓄电池和燃料电池的设计领域有所建树的高年级本科生和研究生都会从本书中获益。并且,由于电池技术与其他技术领域密切相关、相互依存,这本书也是医疗设备、国防电子、安全和空间等行业,及其他即将建立的学科领域的,广大工程专业的学生和工程师的兴趣所在。这本书特别适用于参与研究设计最适合医疗、军事和航空航天系统的便携式设备的科学家和工程师们。技术经理也会发现这本书对未来应用的潜在价值。我强烈推荐这本书给广大读者,包括沉浸在设计和开发适合工业、商业、军事和空间应用的,结构紧凑、轻质的电池工作中的学生、项目经理、航空航天工程师、生命科学家、临床科学家和项目工程师们。

A. K. Sinha 博士
美国加利福尼亚州圣克拉拉市
应用材料公司高级副总裁

前言

当前发达国家与石油生产国由于政治分歧等因素, 矛盾纷争不断, 可能会使石油供应中断, 在面临这一威胁的时期, 笔者出版了这本书。西方和其他发达国家正在寻找替代能源, 以避免对成本高昂的石油资源的依赖, 以及减少温室气体的排放。本书简要总结了现有的一次和二次 (充电) 电池的性能和局限性。笔者陈述了影响商业军事和航空航天应用的下一代蓄电池和燃料电池性能的重大关键问题, 并提出了最适用于全电动和混合动力电动汽车 (HEV) 的尖端电池技术, 以尽力帮助消除对不可预知的外国石油资源和供应的依赖。

笔者也确定了最具有成本效益的下一代充电电池中电解质、阴极、阳极所使用的独特材料, 它们在重量、尺寸、效率、可靠性、安全性和寿命方面有了显著的改善。同样, 笔者确定了对植入式医疗设备、无人驾驶飞行器 (UAV) 和空间系统应用最理想的, 最小重量、尺寸和形状因子的充电电池。并且确定了采用微机电系统 (MEMS) 和纳米技术的电池的设计方面, 这些电池设计最适合重量、尺寸、可靠性和寿命至关重要的应用。这些技术的整合将显著改善电池的重量、尺寸和形状因子, 而不损害它们的电性能和可靠性。

笔者阐述了最适合基于汽车、飞机和卫星的系统应用的高功率电池技术, 强调了它们的长期可靠性、安全性和电气稳定性。在这类应用中, 笔者推荐了独特的电池技术, 可提供超过 $500 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 的非常高的能量密度。笔者还介绍了下一代充电密封镍镉电池和密封铅酸蓄电池的性能, 它们是卫星通信、天基侦察和监视系统、无人地面战车 (UGCV)、无人机和其他

战场应用最理想的选择,在这些应用场合中,高能量密度、最小的重量和尺寸、在恶劣条件下的可靠性是主要的电池性能要求。

本书总结了为各种商业、军事和空间应用开发的充电电池的关键性能参数,这些数据来自于可靠的实验室实际参数测量值。本书组织良好,数据可靠,涵盖广泛应用的充电电池的性能特点,包括了商业、军事和航空航天学科应用的电池。本书讨论了尖端的电池设计技术,并尽可能由数学公式和推导来支持。本书提供了能够预测不同温度下关键性能参数的数学分析。它特别为设计工程师准备,希望能够拓展他们在新一代电池领域的认识。

笔者已经尽一切努力提供组织良好的素材,为了方便理解,使用传统的命名法、固定的符号系统和易于理解的单位。本书提供了某些电池的最新性能参数,这些数据来自于可信赖的作者和组织。本书包括 8 章,每一章致力于描述一种特定的应用。

第 1 章描述了各种不同应用的一次/二次(充电)电池和燃料电池的现状。为读者和设计工程师总结了蓄电池和燃料电池的性能和局限性。目前的电源受到重量、尺寸、效率、放电速率、报废和充电容量等问题的困扰,因此它们不适合医疗、战场和航空航天等应用。通用汽车公司和西门子子公司已经投入了大量资金,来研究和发展可能应用在电动汽车(EV)和混合动力电动汽车上的锂基充电电池。目前的燃料电池通过电化学转化技术产生电能,存在严重的缺陷。笔者讨论了未来可能应用的直接甲醇燃料电池(DMFC),它将会被认为是最理想的高能、便携式电源。DMFC 技术改进了可靠性,外形紧凑,并显著减少了重量和尺寸。笔者确定了适当的阳极、阴极和膜电极的集成配置,这种配置将以最小的成本和复杂性,在长时间范围内表现出显著改善的电气性能。

第 2 章简要描述了目前应用于各种场合的充电电池的性能和局限性。确定了下一代一次和二次电池的性能需求和展望,重点是成本、可靠性、充电速率、安全性和寿命。笔者讨论了最适合需要高能量和功率密度应用的,下一代高功率充电锂基电池和密封镍镉及铅酸电池的性能要求。确定了一些特定应用程序的电池的结构设计,特别强调其安全性、可靠性、寿命和便携性。

在第 3 章,笔者讨论了最适合电力需求在几千瓦(kW)到几兆瓦(MW)的应用的燃料电池。燃料电池通过电化学转换技术产生电能。早期的燃料电池采用这种技术,使得设备重量和尺寸过大,可靠性也存在问题。在过去的研究中,笔者已发现,在以紧凑的外形因子、增强的可靠性、显著减少

的重量和尺寸为燃料电池的主要设计要求的应用中,DMFC 技术提供了最有前途的燃料电池设计配置。DMFC 是一个以最方便的方式结合氧化反应和还原反应的,以最小的成本和复杂性来产生电力的系统。这样的燃料电池,预计将来会被广泛使用。由 C. H. J. Broers 和 J. A. A. Ketelaar(1963 年 5 月 IEEE) 进行的研究表明,早在 1990 年之前就采用高温和半固体电解质开发了燃料电池。甚至更早研发的燃料电池,如 Bacon HYDROXZ 燃料电池,可在中等温度和较高压力下工作。据 C. G. Peattie 报道 (IEEE 论文,1963 年 5 月),这种燃料电池难以持续工作,需要不断监测以确保其可靠性。笔者讨论了能够长时间以高效率和高输出功率水平工作的下一代燃料电池的设计结构。

第 4 章介绍了电动汽车和混合动力汽车当前使用的高功率电池。对这些电池的性能评估表明,充电电池存在效率低下,重量和尺寸过大,以及工作成本过高等问题。笔者描述了最适合全电动汽车、电动汽车、混合动力电动汽车的各种下一代充电电池。某些下一代电池可能采用稀土材料,来提高电池在恶劣的工作环境下的电性能和可靠性。笔者建议了能够在放电深度、充电状态、工作时间和寿命方面得到显著改善的充电电池的结构设计。

第 5 章重点论述最适合商业、工业和医疗应用的紧凑的低功率电池的配置。笔者阐述了最适合检测、传感和监控设备的微型电池和纳米电池的设计和性能特点。这些电池重量和尺寸小,寿命长,非常适合周边安全设备、温度和湿度传感器、健康监测及诊断医疗系统等应用。笔者确定了可在低至 -40°C 的温度下工作的紧急无线电通信和安全监测设备中应用的,采用独特的封装技术,结构紧凑、低功率的电池。大多数电池都不能在这样的超低温下工作。

第 6 章介绍了军事和战场上应用的充电电池,可持续性、可靠性、安全性和便携性是它们主要的工作要求。在包含严酷的热和结构参数的战场环境中要认真考虑充电电池的持续的电气性能、可靠性、安全性和寿命。笔者强调了能够在军事和战场系统,如坦克、无人机、UGCV 和机器人战场战斗系统运行的电池的可靠电气性能、安全、寿命、紧凑包装、先进材料以及便携性。

第 7 章专门介绍了可能应用在航空航天设备和对天基目标进行监视、侦察和跟踪的天基系统上的充电电池。定义了部署在商用飞机和军用飞机,包括战斗机、直升机、执行进攻性和防御性任务的无人机、电子攻击无人机和机载干扰设备上的充电电池的严格性能要求,它们要确保可持续

的电能和显著提高的可靠性、安全性和寿命,这是任务成功进行必不可少的。笔者提出在严重振动、冲击和热环境中,必须达到严格的安全性和可靠性要求。提出了通信卫星应用的采用碱性电解质的铝—空气电池的改进的设计概念,高能量密度 ($> 500 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$)、超高的可靠性和高便携性是其主要性能指标。定义了密封镍镉和铅酸电池的可靠的建模和严格的测试要求,因为这些电池是新一代通信卫星、超音速战斗机和进行精密监视、侦察和跟踪任务的天基系统的理想选择。

第8章论述了广泛用于在纳瓦到微瓦电力下工作的各种商业、工业、医疗设备的低功率电池。低功率电池被广泛应用于消费类电子产品,如红外摄像机、烟雾探测器、手机、医疗设备、微型计算机、平板电脑、iPhone手机、iPad和许多电子元件。这些低功率的电池必须符合最低重量、尺寸和成本的要求,除此之外还要非常安全和持久。在过去的研究中,笔者曾表明,材料和包装技术的进步对现有电池的性能改进会起到显著作用,如镍镉电池、碱锰、锂基电池。笔者简要总结了本章中的低功率电池的性能特点。

笔者衷心感谢 Ed Curtis(项目编辑)和 Marc Johnston(高级项目经理),他们提供了有益的建议,帮助进行了文本的最后修改,他们的热情、高效和坚持到底的精神使此书能够按时完成。

最后,特别地,笔者要感谢妻子 Urmila D. Jha, 女儿 Sarita Jha 和 Vineeta Mangalani, 儿子美国陆军上校 Sanjay Jha, 尽管成书计划很紧迫,但他们的支持激励本人按时完成了这本书。

A.R. JHA

作者

A. R. Jha 于 1954 年获得阿里格尔穆斯林 (Aligarh Muslim) 大学 (电气) 工程的学士学位, 获得约翰斯·霍普金斯 (Johns Hopkins) 大学的电气和机械硕士学位, 获得美国里海大学 (Lehigh University) 的博士学位。

Jha 博士撰写了 10 本高技术书籍, 并发表了超过 75 篇的技术论文。曾任职通用电气 (General Electric) 公司、雷神 (Raytheon) 公司和诺斯罗普·格鲁门 (Northrop Grumman) 公司, 对用于商业军事和空间应用的雷达、高功率激光器、电子战系统、微波、各种应用的毫米波天线、基于纳米技术的传感器和器件、光子器件和其他电子元件等领域有广泛和全面的研究、开发和设计经验。Jha 博士拥有卫星通信方面的毫米波天线专利。

目录

第 1 章 充电电池和燃料电池的研究现状	1
1.1 充电电池	1
1.2 充电电池基础	2
1.2.1 充电电池的关键性能特征	4
1.2.2 商业应用中广泛使用的充电电池的性能	5
1.2.3 电池的回收利用	5
1.2.4 充电电池的三个主要特征	8
1.2.5 在特定的应用中使用充电电池的成本效益	8
1.3 不考虑功率能力的充电电池	12
1.3.1 低中等功率应用的充电电池	13
1.4 充电电池的商业和军事应用	14
1.4.1 高功率电池的商业应用	14
1.4.2 镍镉充电电池在军用飞机上的关键作用	15
1.4.3 用于军用飞机的镍金属氢化物充电电池的优点	16
1.4.4 用于航空航天和国防的热电池	19
1.4.5 商业应用的充电电池	20
1.4.6 电动和混合动力电动汽车对充电电池的要求	23
1.5 低功率电池的应用	29
1.5.1 使用薄膜和纳米技术的电池	29
1.5.2 TF 微型电池	30
1.5.3 低功率电池的充放电循环次数和充电时间	31

1.5.4	低功率电池的结构配置	32
1.5.5	用于低功率电池的最流行的材料	32
1.5.6	采用纳米技术的低功率电池	34
1.5.7	使用纳米技术的纸电池	34
1.6	燃料电池	34
1.6.1	最热门的燃料电池类型和它们的配置说明	35
1.6.2	燃料电池的类型	35
1.7	结论	36
	参考文献	36

第 2 章 航空航天和通信卫星所用的电池 38

2.1	简介	38
2.2	机载电力系统	40
2.2.1	电源总线设计配置	40
2.2.2	太阳能阵列板	40
2.3	电池的电源要求和相关的关键组件	41
2.3.1	太阳能电池阵列的性能要求	43
2.3.2	太阳能电池阵列在黑暗期的电力需求	43
2.3.3	从太阳达到最佳功率的太阳能电池阵列定向的要求	44
2.3.4	最适合航天器或通信卫星的太阳能电池阵列配置	44
2.3.5	直接能量传递系统	44
2.4	航天器电池型电源系统的成本效益设计标准	46
2.4.1	航天器电力系统最佳选择的比较方法	46
2.5	航天器电源系统的可靠性	51
2.5.1	各种系统组件的故障率	52
2.5.2	故障率估计	52
2.5.3	使用 CC 和 PWM 稳压器技术的航天器电源系统的可靠性改进	53
2.5.4	使用 DET 系统、CC 和电池增压器技术的航天器电源系统的可靠性改进	55
2.5.5	与冗余系统相关的重量和成本代价	56
2.6	航空航天和通信卫星的理想电池	59
2.6.1	天基电池典型的功率需求	59

2.6.2	天基电池的关键老化效应	61
2.7	最新的商用和军用卫星系统的性能和电池电源的需求	62
2.7.1	商业通信卫星系统	62
2.8	通信、监视、侦察、目标跟踪用军事卫星	64
2.8.1	军事通信卫星及其功能	65
2.8.2	军事卫星通信系统	66
2.8.3	欧洲通信卫星系统	67
2.9	最适合给通信卫星供电的电池	67
2.9.1	通信卫星最理想的充电电池	68
2.10	结论	70
	参考文献	71
第 3 章	燃料电池技术	72
3.1	简介	72
3.1.1	燃料电池的分类	73
3.1.2	根据电解质的燃料电池分类	75
3.2	基于电解质的燃料电池的性能	75
3.3	使用不同电解质的低温燃料电池	77
3.3.1	使用水溶液电解质的低温和低压燃料电池的性能	78
3.3.2	水燃料电池的输出功率性能	79
3.4	使用组合燃料的燃料电池	80
3.4.1	液 — 气燃料电池设计	80
3.4.2	液 — 液燃料电池的设计性能	80
3.5	多种应用的燃料电池设计	81
3.5.1	燃料电池在蓄电池中的应用	81
3.5.2	使用氢基双骨架催化剂 (DSK) 电极、工作在恶劣的 条件下的双骨架催化剂燃料电池	81
3.6	离子交换膜燃料电池	84
3.6.1	空间应用的 IEM 燃料单电池和电池组的性能规格	84
3.6.2	使用低成本、多孔硅衬底材料的燃料电池	85
3.7	燃料电池潜在的应用	94
3.7.1	燃料电池的军事和航天应用	95
3.7.2	为什么燃料电池要用于反暴乱	96

3.7.3	无人机的低成本燃料	98
3.8	飞机应用的燃料电池	100
3.8.1	全电动飞机或车辆的性能和局限	100
3.8.2	用于电动汽车和混合动力电动汽车的燃料电池	101
3.9	燃料电池的商业、军事和空间应用	101
3.9.1	汽车、公交车和摩托车应用的燃料电池	102
3.9.2	理想的家用燃料电池	108
3.10	能在超高温环境下工作的燃料电池	111
3.10.1	在超高温燃料电池中使用的材料类型	111
3.10.2	工作在较高温度 (600 ~ 1000℃) 的燃料电池最理想的固体电解质	111
3.10.3	电极动力学和它们对高功率燃料电池性能的影响	113
3.10.4	化学吸附 — 解吸率极化	114
3.11	发电站应用的燃料电池的要求	114
3.12	结论	115
	参考文献	116

第 4 章 电动和混合动力汽车电池 118

4.1	简介	118
4.2	早期电动汽车的年代发展史及其性能参数	120
4.3	各种公司较早研发的电动和混合动力电动汽车及其性能规格	121
4.3.1	ZAP TRUCK	121
4.3.2	ZAP ALIAS	121
4.3.3	Aptera 汽车	121
4.3.4	特斯拉汽车公司	122
4.3.5	贝克汽车	123
4.4	最新的电动和混合动力电动汽车的发展史及其性能和局限性	123
4.4.1	通用汽车雪佛兰 Volt	124
4.4.2	福特	125
4.4.3	日产	128

4.5	不同充电电池的性能要求	129
4.5.1	电池组能量要求	130
4.5.2	电池材料及相关成本	131
4.6	充电电池的材料	135
4.6.1	锂离子电池的三个功能组件的材料要求	135
4.6.2	锂离子电池的主要性能特点	136
4.6.3	镍金属氢充电电池的特性	137
4.6.4	电动汽车和混合动力电动汽车所用的锌空气充电 燃料电池	137
4.6.5	各种充电电池的能量密度水平	138
4.6.6	结合智能电网技术的设计理念	144
4.6.7	最适合充电电池的材料及其性能	147
4.6.8	组件成本对电池组的采购成本的影响	149
4.7	稀土材料对电动汽车和混合动力电动汽车发展的关键作用	151
4.7.1	电动汽车和混合动力电动汽车使用的各种稀土材料 的确定	152
4.7.2	未来稀土材料对电动汽车和混合动力电动汽车性能 的影响	153
4.7.3	稀土材料提炼、加工和质量控制检验相关成本	154
4.8	结论	155
	参考文献	157

第 5 章 低功率充电电池在商业、空间和医学上的应用 158

5.1	引言	158
5.2	低功率电池结构	160
5.2.1	圆柱形低功率电池	160
5.2.2	碳锌低功率原电池及其特点	161
5.2.3	碱锰电池的性能和局限性	162
5.2.4	锂原电池的发展史及其性能参数	162
5.2.5	镍金属氢化物、镍镉电池和锂离子充电电池	164
5.3	电池在小型化电子系统中的应用	168
5.3.1	最适合嵌入式系统应用的充电电池简述	170
5.3.2	用于航空航天方面的电池的适用性和独特性能要求	172