



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

混合动力电动汽车 原理及应用前景

Hybrid Electric Vehicles: Principles and
Applications with Practical Perspectives

Chris Mi

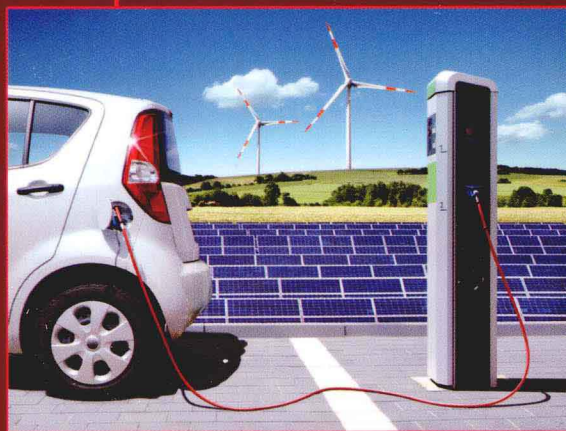
(美) M. Abul Masrur 著

David Wenzhong Gao

赵治国 姜娇龙 等译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

混合动力电动汽车原理 及应用前景

Chris Mi

(美) M. Abul Masrur 著

David Wenzhong Gao

赵治国 姜娇龙 等译



机械工业出版社

本书介绍了混合动力电动汽车的基本原理和核心技术。从系统层面,结合混合动力技术的具体应用,归纳总结了先进混合动力系统结构特征和传动系统动力学,插电式、增程式混合动力电动汽车的基本概念及设计方法,混合动力电动汽车故障诊断、可靠性和电磁兼容性设计方法,混合动力电动汽车的建模和仿真方法,车辆功率控制、能量管理及其优化方法。从部件层面,全面阐述了混合动力电动汽车电力电子学,混合动力电动汽车用电机及其驱动,电池、超级电容器、燃料电池及其控制等技术。本书取材新颖、内容丰富、体系完整,是一部反映混合动力领域基础理论与最新研究成果的著作。

本书可作为汽车及相关专业高年级本科生的选修教材以及研究生的专业课教材,也可作为从事电动汽车研发的科技人员和工程技术人员提供参考。

Copyright© 2011, John Wiley & Sons, Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives >, ISBN < 978-0-470-74773-5 >, by < Chris Mi, M. Abul Masrur, David Wenzhong Gao >, Published by John Wiley & Sons, Ltd. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有,翻印必究。

本书版权登记号:图字01-2011-6608号。

图书在版编目(CIP)数据

混合动力电动汽车原理及应用前景/(美)米春亭(Mi, C.)等著,赵治国等译. —北京:机械工业出版社,2013.12
(国际电气工程先进技术译丛)
ISBN 978-7-111-44712-2

I. ①混… II. ①米…②赵… III. ①混合动力汽车-电动汽车-研究 IV. ①U469.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第267745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:刘星宁 责任编辑:刘星宁

责任校对:丁丽丽 封面设计:赵颖喆

责任印制:杨曦

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2014年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·25印张·488千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-44712-2

定价:98.00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

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

作者简介

Chris Mi (米春亭) 现为密歇根大学迪尔伯恩分校 (位于美国密歇根州迪尔伯恩市) 电气与计算机工程系副教授、DTE 电力电子实验室主任。米博士是电动汽车和混合动力汽车方面的权威专家, 多次参加美国汽车工程师学会 (SAE)、美国电气电子工程师学会 (IEEE)、国家专业工程师学会以及主要汽车制造商和零部件供应商如通用汽车 (GM)、福特 (Ford)、克莱斯勒 (Chrysler) 和德尔福 (Delphi) 等举行的相关专题报告会和学术研讨会。并且, 他在中国、韩国、意大利、新加坡和墨西哥等国家也做过相关专题报告。迄今为止, 他发表了 100 多篇文章, 50 多次受邀参加和发表重要演讲, 同时也是多个组织的专家小组成员。

米博士荣获多次奖励和表彰。2009 年获得密歇根大学迪尔伯恩分校杰出研究奖, 2007 年因“电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池汽车的创新型教育和培训计划”而荣获 SAE 交通环保优秀奖 (简称 E2T), 2005 年获得密歇根大学迪尔伯恩分校杰出教学奖。也获得 IEEE Region 4 杰出工程师奖, IEEE 密歇根州东南地区杰出专业人才奖。还获得中国政府颁发的国家创新奖 (1992 年) 和政府特别津贴奖 (1994 年)。2007 年 12 月, 米博士因“教育的榜样和优良品德的典范”而成为 Eta Kappa Nu——电气与计算机工程荣誉学会会员。

米博士在西北工业大学 (位于中国西安) 获得学士学位和硕士学位, 在加拿大多伦多大学获得博士学位。2008 ~ 2010 年, 他是 1Power Solutions 公司首席技术官。2000 ~ 2001 年, 他在通用电气公司工作。1988 ~ 1994 年, 他是西北工业大学的教师。1994 ~ 1996 年, 他是西安石油大学 (位于中国西安) 的自动控制系副教授和副主任。

米博士是《IEEE 车辆技术学报》的副主编,《IEEE 电力电子学报》——读者投稿专栏的副主编, 期刊《电路、系统和计算机》的副主编 (2007 ~ 2009 年), 国际期刊《电动汽车和混合动力电动汽车》编委会成员,《IET 交通运输电气系统学报》编委会成员,《IEEE 车辆技术学报》车辆动力和驱动专栏客座编辑 (2009 ~ 2010 年), 国际期刊《电力电子》车辆电力电子和电机驱动专栏客座编辑 (2009 ~ 2010 年)。他曾先后担任 IEEE 密歇根州东南地区副主席 (2006、2007 年) 和主席 (2008 年)。2009 年 9 月 7 ~ 11 日, 在密歇根州迪尔伯恩市举行的第五届国际车辆动力和驱动会议上, 他担任大会主席。他还担任过美国国家科学基金会、美国能源部 (2006 ~ 2010 年) 和加拿大自然科学与工程研究委员会 (2010 年) 审查委员会委员。

米博士是2011年IEEE国际未来能源挑战赛的两位理事之一。

M. Abul Masrur (M. 阿布·马斯鲁) 于1984年在德克萨斯农工大学(位于美国德克萨斯州大学城)获得电气工程博士学位。马斯鲁博士现为底特律梅西大学的兼职教授,主要教授先进电动汽车和混合动力汽车、车辆动力系统、电驱动和电力电子等课程。1984~2001年,他在福特汽车公司的科学研究实验室任职,从事电驱动和电力电子、先进汽车动力系统架构、汽车电子主动悬架系统、电动助力转向和独立UPS保护设计等相关工作。

从2001年4月开始,马斯鲁博士在美国陆军RDECOM-TARDEC(R&D)研发中心任职,从事车辆电力系统架构的概念设计和研发、电力管理以及基于人工智能的电驱动故障诊断等工作。迄今为止,他发表了70多篇文章,其中大部分刊载在公众熟知的国际期刊上或被大会论文集收录。他拥有8项美国专利,其中有两项还获得欧洲专利,有一项还获得日本专利。1998年,他在《IEEE车辆技术学报》发表的论文中提出了一种新颖的车辆动力系统架构,获得IEEE车辆技术学会颁发的最佳汽车电子论文奖。2006年,由于与他人共同开展混合动力电动汽车指导课程,他与别人一起获得SAE交通环保优秀奖——教育、培训和公共意识(即E2T)。

马斯鲁博士是IEEE的高级会员,在1999~2007年期间担任IEEE车辆技术学报副主编(车辆电子专栏)。他还担任过两年IEEE动力和能源学会——电机委员会电动机下属委员会主席,并于2010年12月结束任期。

David Wenzhong Gao(高文忠)现为丹佛大学(位于美国科罗拉多州丹佛市)电气与计算机工程系主任、可再生能源和电力电子实验室主任。高博士在混合动力电动汽车、可再生能源、电力系统和智能电网等领域进行了广泛的研究,并在国际期刊和会议论文集上发表了100多篇论文。2006年,他在美国陆军车辆电子研究所(位于密歇根州沃伦市)开展了“车辆动力系统的建模和仿真工具”的指导课程。在2007年9月,他被选为Sigma Xi的一员。他是Eta Kappa Nu——电气与计算机工程荣誉学会的会员,也是HKN的顾问。从2003年6月起,他就是IEEE的高级会员。在2002年1月举行的2002年夏威夷系统科学国际会议(HICSS)上,他获得了复杂系统跟踪方面的最佳论文奖。

高博士在西北工业大学(位于中国西安)获得学士学位,在东北大学(位于中国沈阳)获得硕士学位,在佐治亚理工学院(位于美国亚特兰大州)获得博士学位。

高博士现在是《IEEE可持续发展能源学报》的编辑,并且一直是很多核心期刊如《IEEE车辆技术学报》、《IEEE电力电子学报》、《IEEE智能电网学报》、《IEEE能量转换学报》、《IEEE可持续发展能源学报》、《IET可再生能源发电》、

《IEEE 功率输出学报》以及《IEEE 动力系统》的积极审稿人，也是一些会议如 IEEE 车辆动力和驱动会议（VPPC）以及 IEEE 动力和能源学会大会的积极审稿人。2009 年 9 月 7~11 日，在美国密歇根州迪尔伯恩市举行的 IEEE 车辆动力和驱动会议上，他担任这次大会组委会的技术副主席。他还担任过美国国家科学基金会、美国能源部和加拿大自然科学与工程研究协会审查委员会委员。

译者序

面对交通能源短缺与环境污染问题的巨大挑战，以能源多元化、排放洁净化、燃料节约化为主要特征的节能与新能源汽车迅速发展，相互竞争，并引发了汽车动力的电控化和电气化两大技术变革，促进了汽车能源及动力的快速转型。混合动力电动汽车（Hybrid Electric Vehicle, HEV）可最大限度地发挥内燃和纯电动汽车的双重优点，达到节能和环保的目的。被业界认为是目前最现实可行的节能环保方案。在过去约 10 年的时间里，随着高功率电力电子技术、动力蓄电池技术和电动机技术发展，促使 HEV 技术飞速发展，并使 HEV 技术的广泛应用成为可能。

作为 HEV 动力系统控制方面近 7 年的研发者，在日常研发与教学工作中发现，目前混合动力技术方面的资料往往有两种不足：一种是关注的命题过于狭窄、不系统或学术化，缺乏一定的学科背景很难真正理解，读者读起来也生涩难懂；另外一种是原理性或科普性的介绍，往往比较浅显，缺乏一定的深度，读者读起来总觉得隔靴搔痒。《混合动力电动汽车原理及应用前景》是难得的一部佳作，一方面，它全面综合了混合动力技术的各类研究，融合了该领域的最新研究成果；另一方面，它采用通俗易懂的行文方式，在关键点上采用了详尽的案例来解释抽象的过程，读者并不需要具备专业的知识就很容易掌握混合动力技术的精髓所在。本书已经在国内外多所高校作为研究生与本科生的教材，广受好评。

本人非常有幸应机械工业出版社之邀翻译这本混合动力技术领域的佳作，加之本书的两位著者（Chris Mi 和 David Wenzhong Gao）也是西北工业大学的校友，他们均是 HEV 电力电子和控制方面的权威专家，对我及我的研究生而言，是一次难得的向师兄学习的过程。在翻译过程中，主要分工如下：姜娇龙负责翻译本书的第 1、2、5 章；王琪负责翻译第 3、4 章；胡笑天负责翻译第 6、7、8 章；刁威振负责翻译第 9 章；王艺帆负责翻译第 10 章；张赛负责翻译第 11、12 章；郝怡颖负责翻译第 13、14、15 章；最后，赵治国博士对全书进行了全面审校。

本书可作为汽车及相关专业高年级本科生的选修教材以及研究生的专业课教材，也可为从事电动汽车研发的科技人员和工程技术人员提供参考。

翻译从来就不是一件轻松的事，尽管科研及教学任务非常繁重，但我们依然克服各种困难，抱着严谨的学术态度，尽可能忠实地表达出作者的原意。在苦行僧式的翻译学习过程中，往往也会从作者迸发的思维和精巧的话语中感受到一种平淡而又无穷的智慧。

在此，我要感谢原书作者 Chris Mi、M. Abul Masrur 与 David Wenzhong Gao 的卓

越工作，感谢我的研究生姜娇龙忍受我的各种严格要求；感谢机械工业出版社刘星云编辑给予我们这次学习的机会。同时，我要感谢同济大学汽车学院余卓平教授、章桐教授、孙泽昌教授对我在新能源汽车集成控制方面的指导。最后，我特别感谢我的妻子和女儿，感谢她们在这段艰难的时光的默默支持。

限于水平有限，错误在所难免，恳请读者批评指正。

赵治国 于同济大学新能源汽车工程中心

Email: zhiguo Zhao@tongji.edu.cn

前 言

由于具有较好的燃油经济性和环保性，现在混合动力电动汽车（Hybrid Electric Vehicle, HEV）和电动汽车（Electric Vehicle, EV）越来越受到人们的认可。HEV 技术和 EV 技术对汽车工业和汽车消费者来说至关重要。在过去的 10 年，这些技术取得了意义非凡的飞速发展。与此同时，学术领域也取得了进步。大量的论文在会议论文集和期刊中发表，相关的教材和参考书也相继出版。是什么动力驱使作者去写这本书呢？这个问题引起了作者的思考。作者发现现有的教材将重点放在循环工况、燃油经济性和驱动技术等问题上。另外，作者还发现这些教材主要的研究对象是常规乘用车。这与当前的汽车发展背景是不相符的。因此，作者认为有必要用一个更开阔的视野去看待当前的技术。也就是说，HEV 技术不仅可以应用于常规汽车、非常规车辆如机车和越野车辆（建筑与采矿车辆）等，也可以应用于轮船甚至某些飞行器。作者相信，这方面的信息可能存在，但并没有以教材的形式将整个观点呈现出来。事实上，HEV 技术并不是全新的，它与多年前应用在柴油电动机车上的技术相比，只有一些较小的变化。但是，在过去约 10 年的时间里，大功率电力电子技术和电动机材料技术的发展，促使 HEV 技术飞速发展，并使 HEV 技术的广泛应用成为可能。

教科书与期刊论文不同，自成一套独立的体系。因此，作者在书中回顾了一些基本的概念，包括电力电子、电机、储能元件如电池、电容和飞轮等。这些都是 HEV 技术的组成要素。书中也包括了由车辆、建模和仿真方法、传动和耦合等组成的系统级架构。循环工况及其作用、车辆动力使用策略优化和能量管理也包括在书中。多能源的动力分配问题则包含在能量管理范围里。当一种以上的能源被使用时，能量管理在整个动力系统中就显得极其重要。这些能源的性质可能相似也可能不同，既可能是电能、机械能或化学能等，也可能看似相似但本质特性却不同。在这种情况下，通过优化来决定资源的分配。某些优化方法已经真实存在，应用于工业生产中，但这些方法在车辆上的应用最近才引起了人们的兴趣。为了使本书在内容上相对完整，在逻辑上更加严密，有关越野车辆、机车、轮船和飞行器上 HEV 技术的应用也包括了进来。近年来，为了获得电动汽车的插电能力，车辆和公用电网之间的接口技术也愈显重要。有关插电式混合动力、车辆到电网或车辆与车辆之间的能量传递等主题也包括了进来。同时，本书从系统层面对 HEV 的故障诊断和预测以及可靠性进行了讨论，对噪声、振动和不平顺性（Noise Vibration Harshness, NVH）、电磁兼容和电磁干扰（Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Interference, EMC/EMI）以及产品生命周期等问题也进行了讨论。据作者

所知，这些问题在其他 HEV 图书中很少涉及。事实上，其中的若干问题在学术界也甚少讨论，但却十分重要。一项技术最终的成功既在于消费者和使用者的认可，也和大批量生产紧密相连。一项技术只是本身好是不够的。除非这种技术能够服务于普通消费者，并且能够相对便宜地大批量生产，否则它对整个社会不会有大的影响。这对于 HEV 来说也适用。因此，本书也包括了 HEV 的商业化问题。

对于书中述及的诸多技术领域，作者具有宝贵的实践经验，这些都体现在相关的资料和演讲报告中。同时，作者承担了 HEV 和 EV 系统及零部件领域的学术研究和工程专业课程的教学工作。从某种程度上来说，是上述课程促成了这本书。但是，其他一些很有意义的、课程上未涉及的资料也加进了本书中。

作者希望本书能够弥补现有著作的不足，弥补 HEV 和 EV 技术领域中国传统汽车和越野车辆知识上的不足，帮助读者建立一个更好的系统思维。

全书共有 15 章，由 3 位作者共同完成。米春亭是第 1、4、5、9 和 10 章的主要作者；M. 阿布·马斯鲁是第 2、6、7、8、14 和 15 章的主要作者；高文忠是第 3、11、12 和 13 章的主要作者。

由于这是本书的第 1 版，作者非常欢迎读者进行评论、提供建议，以便在将来的版本中进行更正和修改。

作者非常感谢那些帮助完成这本书的人们。特别地，本书中所展现的大部分资料都是作者和密歇根大学迪尔伯恩分校、田纳西技术大学和丹佛大学的同事和研究小组多年来的研究成果。非常感谢那些为本书做出巨大贡献和提供相关资料的同事们和研究生们。

作者也对自己的家庭所做出的努力非常感激。在本书的写作过程中，他们给予了很大的支持，做出了巨大的牺牲。

对书中授权使用某些资料和图片的人们表示诚挚的感谢。在书中，引用来源均进行了标注。作者也尽力对书中引用的来自公共领域和互联网上的资料进行了标注，但有些资料的来源（特别是互联网）已经不存在或无法找到。在这种情况下，作者标明了找到这些资料的地方，并表达了感激之情。如果某些来源弄错了，作者对自己的疏忽表示歉意。一旦出版商注意到了这些，在本书以后的版本中，这些错误将会得到更正。本书所参考的任何作品仅为提供信息而用，并且获得出版方和相关作者的许可。

最后，作者特别感谢 John Wiley & Sons 有限公司和相关编辑人员。他们给予了本书出版的机会和尽可能的帮助。在此，作者尤其感激 John Wiley & Sons 有限公司已故尼基·斯金纳女士所做出的巨大努力。她代表出版方策划了本书的写作。令人惋惜的是，最近她却因意外而过世，没能看到自己的努力带来的丰硕成果。

目 录

作者简介

译者序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 可持续发展的交通运输	2
1.1.1 人口、能源和交通运输	3
1.1.2 环境	5
1.1.3 经济增长	6
1.1.4 新的燃油经济性要求	7
1.2 混合动力电动汽车简史	7
1.3 20 世纪 90 年代, 纯电动汽车出现和失败的原因以及 从中能获得的启示	9
1.4 混合动力电动汽车架构	11
1.4.1 串联式混合动力电动汽车	11
1.4.2 并联式混合动力电动汽车	12
1.4.3 混联式混合动力电动汽车	14
1.4.4 复合式混合动力电动汽车	14
1.4.5 柴油机混合动力电动汽车	14
1.4.6 车辆动力源混合的其他方法	15
1.4.7 混合度	16
1.5 混合动力电动汽车的跨学科性质	16
1.6 混合动力电动汽车技术现状	17
1.6.1 丰田 Prius	19
1.6.2 本田 Civic	20
1.6.3 福特 Escape	20
1.6.4 双模式混合动力电动汽车	20
1.7 混合动力电动汽车的关键技术和面临的挑战	21
1.8 看不见的手——政府的支持	22
参考文献	24

第2章 汽车动力源混合的概念	25
2.1 汽车基础知识	25
2.1.1 传统汽车的结构	25
2.1.2 驱动负载和非驱动负载	26
2.1.3 循环工况和驾驶地形	27
2.2 纯电动汽车基础知识	29
2.2.1 为什么需要纯电动汽车	29
2.2.2 纯电动汽车的结构	29
2.2.3 驱动负载和非驱动负载	31
2.3 混合动力电动汽车基础知识	32
2.3.1 为什么需要混合动力电动汽车	32
2.3.2 混合动力电动汽车的结构	32
2.4 插电式混合动力电动汽车基础知识	33
2.4.1 为什么需要插电式混合动力电动汽车	33
2.4.2 插电式混合动力电动汽车的结构	34
2.4.3 常规混合动力电动汽车与插电式混合动力电动汽车的比较	35
2.5 燃料电池电动汽车基础知识	35
2.5.1 为什么需要燃料电池电动汽车	35
2.5.2 燃料电池电动汽车的结构	35
2.5.3 燃料电池电动汽车的相关课题	35
参考文献	36
第3章 混合动力电动汽车基本原理	37
3.1 引言	37
3.2 车辆模型	37
3.3 车辆性能	40
3.4 纯电动汽车动力系统部件设计	42
3.5 串联式混合动力电动汽车	45
3.6 并联式混合动力电动汽车	50
3.6.1 电力峰值混合概念	51
3.6.2 内燃机特性	56
3.6.3 爬坡度要求	56
3.6.4 内燃机到车轮的传动比选择	56
3.7 车轮动力学	58
参考文献	59

第4章 先进混合动力电动汽车结构和传动系统动力学	61
4.1 行星齿轮机构基本原理	61
4.2 丰田 Prius 和福特 Escape 混合动力系统	63
4.3 通用双模式混合动力变速器	66
4.3.1 双模式动力系统的工作原理	67
4.3.2 模式0: 车辆起步和倒车	67
4.3.3 模式1: 短里程	68
4.3.4 模式2: 长里程	69
4.3.5 模式3: 再生制动	70
4.3.6 从模式0到模式3的切换	70
4.4 双离合混合动力变速器	73
4.4.1 传统的双离合变速器技术	73
4.4.2 换挡规律	74
4.4.3 基于双离合变速器的混合动力系统	75
4.4.4 基于双离合变速器的混合动力系统工作模式	76
4.5 张毅等人提出的混合动力变速器	78
4.5.1 电动机单独工作模式	78
4.5.2 发动机和电动机共同工作模式	79
4.5.3 发动机单独工作模式	79
4.5.4 电动无级变速器工作模式	79
4.5.5 能量回收模式	80
4.5.6 停止模式	80
4.6 雷诺无级变速混合动力变速器	80
4.7 铁姆肯双模式混合动力变速器	81
4.7.1 模式0: 启动和倒车	82
4.7.2 模式1: 低速工作模式	82
4.7.3 模式2: 高速工作模式	82
4.7.4 模式3: 串联工作模式	82
4.7.5 模式切换	84
4.8 蔡隆文提出的混合动力变速器	84
4.9 带有转速耦合和转矩耦合机构的混合动力变速器	86
4.10 电子四轮驱动的丰田 Highlander 和 Lexus 混合动力系统	87
4.11 Camry 混合动力系统	88
4.12 Chevy Volt 混合动力系统	89
4.13 基于行星齿轮机构的变速器动力学	91

4.13.1	行星齿轮机构中的非理想化齿轮	91
4.13.2	行星齿轮变速器动力学	91
4.14	结论	92
	参考文献	93
第5章	插电式混合动力电动汽车	94
5.1	引言	94
5.1.1	插电式混合动力电动汽车和增程式混合动力电动汽车	94
5.1.2	混合型插电式混合动力电动汽车	94
5.1.3	为什么需要插电式混合动力电动汽车	95
5.1.4	插电式混合动力电动汽车能够使用的电能	96
5.2	插电式混合动力电动汽车结构	97
5.3	混合型插电式混合动力电动汽车的等效电动里程	98
5.4	插电式混合动力电动汽车的燃油经济性	98
5.4.1	从油井到车轮的效率	99
5.4.2	插电式混合动力电动汽车的燃油经济性	99
5.4.3	电动因子	100
5.5	插电式混合动力电动汽车的能量管理	101
5.6	插电式混合动力电动汽车设计及部件选型	103
5.7	增程式混合动力电动汽车设计及部件选型	104
5.8	混合型插电式混合动力电动汽车设计及部件选型	104
5.9	常规混合动力电动汽车向插电式混合动力电动汽车转化	105
5.9.1	替换已有的电池组	105
5.9.2	增加电池组	107
5.9.3	传统汽车向插电式混合动力电动汽车转化	107
5.10	插电式混合动力电动汽车的相关课题	107
5.10.1	废旧电池用来支持电网	107
5.10.2	插电式混合动力电动汽车冷起动排放的减少	108
5.10.3	插电式混合动力电动汽车极端天气下性能的强化	108
5.10.4	插电式混合动力电动汽车的维修	109
5.10.5	插电式混合动力电动汽车的安全	109
5.11	车辆到电网技术	110
5.11.1	插电式混合动力电动汽车的充电机制	110
5.11.2	G2V 的影响	112
5.11.3	V2G 的概念	117
5.11.4	V2G 的优势	117

5.11.5 V2G 案例研究	118
5.12 结论	121
参考文献	121
第 6 章 特殊的混合动力汽车	123
6.1 液压式混合动力汽车	123
6.2 越野混合动力电动汽车	127
6.3 柴油机混合动力电动汽车	132
6.4 电动或混合动力轮船、飞机和机车	133
6.4.1 轮船	133
6.4.2 飞机	136
6.4.3 机车	139
6.5 其他工业用途车辆	142
参考文献	142
拓展阅读	143
第 7 章 混合动力技术在军用车辆上的应用	144
7.1 为什么混合动力电动汽车有利于军事用途	144
7.2 地面车辆的军事用途	145
7.2.1 架构——串联式、并联式和复合式	145
7.2.2 哪种车辆最好	146
7.3 非地面车辆的军事应用	149
7.3.1 电磁发射器	150
7.3.2 混合动力轮船	150
7.3.3 飞机上的应用	151
7.3.4 单兵系统上的应用	151
7.4 耐久性问题	153
参考文献	154
拓展阅读	155
第 8 章 混合动力电动汽车的故障诊断和预测、可靠性、电磁兼容及 其他相关议题	156
8.1 混合动力电动汽车和纯电动汽车的故障诊断和预测	156
8.1.1 车载故障诊断	156
8.1.2 故障预测问题	158
8.2 混合动力电动汽车的可靠性	160

8.2.1 混合动力电动汽车结构可靠性分析	161
8.2.2 可靠性和稳定降功率	163
8.2.3 软件可靠性问题	165
8.3 电磁兼容问题	167
8.4 NVH、机电和其他问题	169
8.5 报废和回收问题	171
参考文献	172
拓展阅读	172
第9章 混合动力电动汽车电力电子学	173
9.1 引言	173
9.2 电力电子学基本原理	175
9.3 混合动力电动汽车用整流器	176
9.3.1 理想整流器	176
9.3.2 实际整流器	176
9.3.3 单相整流器	177
9.3.4 电压纹波	179
9.4 混合动力电动汽车用降压变换器	182
9.4.1 工作原理	182
9.4.2 非线性模型	183
9.5 非隔离式双向 DC-DC 变换器	184
9.5.1 工作原理	184
9.5.2 保持恒定的转矩范围和功率能力	186
9.5.3 减小电池的电流纹波	187
9.5.4 再生制动	189
9.6 电压源逆变器	189
9.7 电流源逆变器	191
9.8 隔离式双向 DC-DC 变换器	191
9.8.1 基本原理和稳态操作	192
9.8.2 电压纹波	197
9.9 混合动力电动汽车 PWM 整流器	200
9.10 纯电动汽车和插电式混合动力电动汽车电池充电器	202
9.10.1 正激/反激变换器	203
9.10.2 半桥 DC-DC 变换器	203
9.10.3 全桥 DC-DC 变换器	204
9.10.4 功率因数校正级	204

9.10.5	双向电池充电器	207
9.10.6	其他充电器拓扑结构	207
9.10.7	感应充电	208
9.10.8	无线充电	208
9.11	混合动力电动汽车电力电子建模和仿真	210
9.11.1	设备级仿真	210
9.11.2	系统级模型	211
9.12	新兴电力电子设备	211
9.13	电路封装	212
9.14	混合动力电动汽车电力电子热管理	212
9.15	结论	214
	参考文献	215
第 10 章 混合动力电动汽车电机及其驱动		217
10.1	引言	217
10.2	感应电动机驱动	217
10.2.1	感应电动机的基本原理	218
10.2.2	感应电动机的等效电路	219
10.2.3	感应电动机的转速控制	222
10.2.4	感应电动机的变频变压控制	223
10.2.5	感应电动机的效率和损耗	224
10.2.6	由 PWM 供电引起的附加损耗	225
10.2.7	感应电动机的定向磁场控制	234
10.3	永磁电动机驱动	240
10.3.1	永磁电动机基本构造	241
10.3.2	永磁电动机的基本工作原理	242
10.3.3	内置式永磁电动机的磁路分析	246
10.3.4	永磁电动机的磁铁尺寸计算	253
10.3.5	永磁电动机的涡流损耗	257
10.4	开关磁阻电动机	258
10.5	双凸极永磁电动机	260
10.6	牵引电动机的设计计算	263
10.6.1	A 和 B 的选取	264
10.6.2	牵引电动机的额定转速	264
10.6.3	内部功率的确定	264
10.7	牵引电动机热分析和建模	264