



国际电气工程先进技术译丛

CRC Press
Taylor & Francis Group

现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车 ——基本原理、理论和设计

**Modern Electric,
Hybrid Electric,
and Fuel Cell Vehicles**

Fundamentals, Theory,
and Design

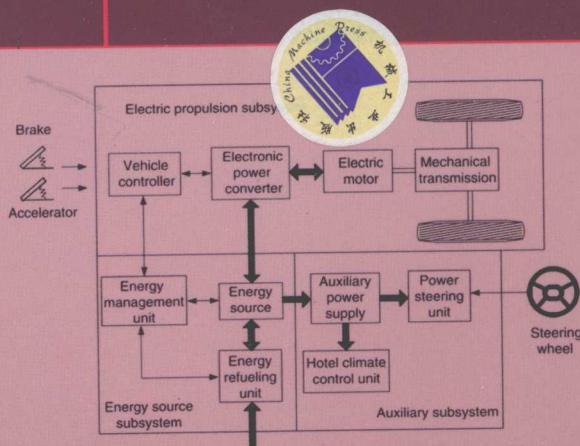
(美) Mehrdad Ehsani

Yimin Gao 著

Sebastien E. Gay

Ali Emadi

倪光正 倪培宏 熊素铭 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

现代电动汽车、混合动力 电动汽车和燃料电池车

——基本原理、理论和设计

(美) Mehrdad Ehsani

Yimin Gao

Sebastien E. Gay

著

Ali Emadi

倪光正 倪培宏 熊素铭 译



机械工业出版社

本书论述了传统的内燃机汽车 (ICEs)、电动汽车 (EVs)、混合动力电动汽车 (HEVs) 和燃料电池车 (FCVs) 的基本原理、理论和设计。基于数学方程, 对各种传统的和现代的车辆, 全面地描述了它们的性能、配置、控制策略、设计方法、模拟和仿真。

本书还论及车辆系统的分析, 即基于内燃机的驱动系, 电动汽车设计, 混合动力电动汽车构造, 电驱动系统, 串联式、并联式和轻度混合动力电驱动系的设计方法, 能量存储系统、再生制动, 燃料电池及其在车辆中的应用, 以及燃料电池混合动力电驱动系设计。其中, 强调整体的驱动系的系统, 而不仅限于其特殊部件的分析。书中通过逐步展开数学方程描述了设计方法, 而且, 在阐述各种驱动系的设计方法时, 均有仿真结果所对应的设计实例。

本书对与汽车相关的制造工业、管理机构和学术界的工程师、从业者、研究生、高年级大学生、研究工作者和经理们而言, 在关于现代汽车体系方面, 也是一本内容广泛、综合的参考书。

Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: fundamentals, theory, and design 1st Edition / by Mehrdad Ehsani... [et al.] / ISBN: 0-8493-3154-4

Copyright© 2005 by CRC Press.

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。

China Machine 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授权由机械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。

本书版权登记号: 图字 01-2006-6154 号

图书在版编目(CIP)数据

现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车: 基本原理、理论和设计 / (美) 爱塞尼 (Ehsani, M.) 等著; 倪光正, 倪培宏, 熊素铭译. —北京: 机械工业出版社, 2008.6
(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory, and Design

ISBN 978-7-111-24405-9

I. 现… II. ①爱… ②倪… ③倪… ④熊… III. ①电传动汽车 ②混合—动力装置—电传动汽车 ③燃料电池—汽车 IV. U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 094426 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 牛新国 版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉
封面设计: 马精明 责任印制: 李妍
北京蓝海印刷有限公司印刷
2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷
169mm × 239mm · 23 印张 · 448 千字
0001—4000 册
标准书号: ISBN 978-7-111-24405-9
定价: 68.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话: (010) 88379178
封面无防伪标均为盗版

译者的话

众所周知，汽车是人类文明和科学技术发展史中现代工业技术成果之一，随着全球石油资源面临枯竭，以及日趋紧迫的全球大气环境污染与温室效应的进程，以节能、环保为终极目标的电动汽车历经上一世纪以来的开发与应用，现已成为全球推进清洁汽车行动计划的共识。

《Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles》（《现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车》）一书全面、系统地论述了电动汽车这一专题的科学内容，并在该新技术的深广度上为从事电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车的科研、开发工作者，工程技术人员，以及相关的大专院校师生提供了丰富、系统的工程知识与实践设计的经验、数据和资料。译者深信机械工业出版社选择并引入这一专著，有助于当前我国进行电动汽车研发的学术与工程界的借鉴与参考。

在本书翻译过程中，译者得到了浙江大学电气工程学院及其所属电动汽车研究室的关注与支持，并承浙江大学电动汽车、内燃机和电力电子学科领域的陈立铭、夏来庆和徐德鸿教授对有关译文内容的指点，谨在此致以衷心的感谢。此外，译者在本书翻译过程中就有关词汇的含义以及更正原书印刷、笔误之处，得以与作者高义民博士切磋，也谨致衷心的感谢。

译文中不妥或失当之处，敬请读者指正。

译者

于浙江大学求是园

2008年3月

前 言

热力发动机汽车的发展是现代工业技术最重大的成就之一。然而，高度发展的汽车工业和大量汽车的应用，在全球已经产生并正在继续引发严重的社会与人类生存问题。大气质量的恶化，全球变暖，以及石油资源的减少成为当前人类面临的主要威胁。越来越严格的排放和燃料消耗的法规促进了发展安全、清洁和高效运输工具的影响力。当今，人们公认电动汽车、混合动力电动汽车和由燃料电池供电的各类驱动系的技术应用科学是未来最有指望解决陆上运输工具问题的办法。

为满足变革的需要，不断增加的多所北美等地的工程学院已在大学生和研究生培养计划中设立现代车辆技术应用科学专业。1998年，本书第一作者在得克萨斯农工大学机械和电气工程专业对研究生首次开设了“现代车辆技术应用科学—电动汽车和混合动力电动汽车的设计方法论”课程。在准备讲课时，作者发现即使在技术文献和报告中已有丰富的信息，但到目前为止，对学生尚无综合、完整的教科书。此外，熟练的工程师们也需要系统、综合的参考书，以理解这一新技术应用科学的要素。本书目的即在于填补这一空白。

本书论述了传统的内燃机汽车（ICEs）、电动汽车（EVs）、混合动力电动汽车（HEVs）和燃料电池车（FCVs）的基本原理、理论及设计。基于数学方程，对各种传统的和现代的车辆，全面地描述了它们的性能、配置、控制策略、设计方法、模拟和仿真。

本书还论及车辆系统的分析，即基于内燃机的驱动系，电动汽车设计，混合动力电动汽车构造，电驱动系统，串联式、并联式和轻度混合动力电驱动系的设计方法，能量存储系统，再生制动，燃料电池及其在车辆中的应用，以及燃料电池混合动力电驱动系设计。其中，强调了整体的驱动系的系统，而不仅限于其特殊部件的分析。书中通过逐步展开数学方程描述了设计方法，而且，在阐述各种驱动系的设计方法时，均有仿真结果所对应的设计实例。

全书共由十三章组成。第1章讨论了与现代运输工具相关的社会和环境问题，其主要包括与现代运输工具发展相伴随的空气污染，全球变暖，以及石油资源枯竭的问题。该章分析了未来车辆技术应用科学对油供应的影响，这对制定未来下一代车辆的发展策略是有益的。此外，概要地回顾了电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车的发展历史。

第2章给出了关于车辆性能、动力特性和传动特性的基本认识，并提供了用

以描述车辆性能的数学方程。该章主要目的在于为理解车辆驱动系的设计提供必须的基本知识。

第3章介绍了各类热力发动机的主要运行特性。在传统的和混合动力驱动系的系统中,作为主动力源,发动机是最重要的子系统。对传统汽车和混合动力电动汽车的设计与控制而言,必须完整理解发动机的特性。

第4章引入了电动汽车,该章主要讲述电驱动系统和储能装置的设计,牵引电机和传动装置的设计,车辆性能的预测及其仿真。

第5章建立了混合动力牵引的基本概念。讨论了多种混合动力电动汽车的配置,例如,串联式、并联式混合动力配置,以及转矩耦合与速度耦合的混合动力配置等。并且给出了这些配置的主要运行特性。

第6章介绍了几类电驱动系统,包括直流、交流、永磁无刷直流电机和开关磁阻电机驱动系统。并从牵引应用观点着手,论述了这些系统的结构、运行原理,以及控制和运行特性。

第7章给出了串联式混合动力电驱动系的设计方法。该章关注于发动机和储能装置的功率设计,牵引电机、传动装置特性和控制策略的设计。此外还提供了—个设计实例。

第8章给出了并联式混合动力电驱动系的设计方法。该章内容包含驱动型式和模式分析,控制策略,主要部件(发动机、储能装置和传动装置)的设计,以及车辆的性能仿真。

第9章介绍了采用两种主要配置(并联式转矩耦合,以及串、并联式的转矩—转速耦合)的轻度混合动力驱动系的设计方法。该章关注于运行分析,控制的开发,以及仿真。

第10章中引入了包括蓄电池、超级电容器和飞轮储能器的各不相同的储能应用技术。论述集中于它们的功率和能量容量。此外,还介绍了混合储能的概念。

第11章中介绍了车辆的再生制动。其中,分析了各种再生制动的控制,包括前、后轮制动力的分布,各种驾驶模式中制动能量的总量,以及通过再生制动回收的能量。

第12章中描述了各种燃料电池系统。主要关注于它们的工作原理和特性,应用技术和燃料的供给,也阐明了燃料电池车的应用。

第13章中介绍了燃料电池混合动力驱动系的系统设计。首先,建立燃料电池混合动力车的概念;其次,分析驱动系的运行原理和控制;最终,阐述了设计方法,集中关注于燃料电池系统、电驱动系统和储能系统的功率设计,并提供了一个设计实例,及其相应的仿真检验。

本书素材可推荐应用于研究生或高年级大学生的课程。取决于不同学科如机

械、电气工程类的学生背景，讲课中，教员由本书可灵活选取素材或略去某些导言性章节。在得克萨斯农工大学已有应用于研究生课程的教科书。基于课程中学生们评论和反应，该书早期版本已多次修订，在此，感谢学生们的帮助。

本书对与汽车相关的制造工业、管理机构和学术界的工程师、从业者、研究生、高年级大学生、研究工作者和经理们而言，在关于现代汽车体系方面，也是一本内容广泛、综合的参考书。

除指明的他人工作外，书中许多应用技术和进展是作者们和得克萨斯农工大学现代车辆系统研究计划的其他成员们多年研究和开发成果的汇集。作者感谢现代车辆研究组，以及电力电子和电机驱动研究组全体成员，特别是 Hyung-Woo Lee 博士和皮门-阿萨迪 (Peymen Asadi) 分别对书中无刷直流电机和开关磁阻电机驱动部分做出了很多贡献。关于开关磁阻电机的振动、噪声及其设计部分大量取自于巴贝克-法希米 (Babak Fahimi) 教授的博士论文，谨致谢意。此外，作者衷心感谢哈桑-穆比林 (Hassan Moghbelli) 教授仔细审阅本书早期的手稿，并就完善本书提出了宝贵的建议。

我们也衷心感谢格伦·C·克雷尔 (Glenn C. Krell) 对本书的校对和修正，并且感谢 CRC 出版社编辑们，尤其是诺雷-科诺卡 (Nora Konopka) 和杰弗-霍尔 (Jeff Hall) 的努力和帮助。最后但一样重要的是，作者们感谢各自家庭在写作本书期间所给予的无条件的支持和绝对的理解。

梅尔达德-爱塞尼 (Mehrdad Ehsani)

高义民 (Yimin Gao)

塞巴斯汀·E·盖伊 (Sebastien E. Gay)

阿里-埃玛迪 (Ali Emadi)

作者简介

第一作者梅尔达德·爱塞尼 (Mehrddad Ehsani) 教授简历

梅尔达德·爱塞尼于1973和1974年在奥斯汀的得克萨斯大学先后获电机工程学士与硕士学位，并于1981年获威斯康星-麦迪逊大学电机工程博士学位。

1974~1977年，在得克萨斯大学核聚变研究中心任研究工程师。1977~1981年，在伊利诺斯州的阿贡国家实验室任驻室副研究员，同时，在威斯康星-麦迪逊大学进行能量与控制系统方面的博士学位课题工作。1981年至今，现为得克萨斯农工大学电机工程学院教授，得克萨斯应用电力电子中心主任。在脉冲电源、高电压工程、电力电子和电机驱动方面已发表200余篇论文，并在IEEE工业应用学会1985、1987和1992年的年会上，获得静止式功率变换器和电机驱动方面的论文奖，以及许多其他的荣誉和赏识。1984年，他被得克萨斯专业工程师学会的布拉佐斯 (Brazos) 分会提名为该年杰出的年轻工程师。1992年在得克萨斯农工大学被提名为该校工程学院的哈利伯顿 (Halliburton) 教授，1994年又被提名为工程学院的德莱塞 (Dresser) 工业教授。2001年，在得克萨斯农工大学实施“课堂指导、学者活动和专业服务的工程规划”中，他被选为2001~2002年度工程学院的鲁思和威廉·尼莱 (Ruth & William Neely) /道尔 (Dow) 化学教授会会员，也因在“混合动力电动汽车的理论和设计”方面的贡献被IEEE车辆学会推选获2001年度创新奖。他是应用于超导磁储能系统的变换器电路一书的合作作者，且是自换向变换器和其他专论的IEEE手册的撰稿人。他有13项已批准或正在申报的美国和EC专利。目前致力于电力电子、电机驱动、混合动力电动汽车及其控制系统的研究工作。

爱塞尼博士是IEEE电力电子学会 (PECS) 执行委员会的成员，曾任PECS教育事务委员会和IEEE-IAS工业功率变换器委员会主席，以及IEEE迈伦·祖克尔 (Myron Zucker) 学生-教授会资助规划的前任主席。1990年，担任IEEE电力电子专家会议总主席，也是IEEE VTS车辆动力、牵引和联谊委员会的主席。2002年，被选入VTS指导委员会。他是多个技术刊物编辑委员会的成员，也是IEEE工业电子学、车辆技术应用科学两会刊的副主编。他是IEEE会员，既是IEEE工业电子学和车辆技术应用科学两学会，也是

IEEE 工业应用学会和电力工程学会杰出的演讲者，是得克萨斯州注册的专业工程师。

高义民 (Yimin Gao) 博士简历

高义民于 1982、1986 和 1991 年先后在中国吉林省长春市吉林工业大学获机械工程（主修汽车系统的开发、设计和制造）学士、硕士和博士学位。1982 至 1983 年，在中国湖北省十堰市东风汽车公司任汽车设计工程师，完成了 5 吨载重卡车（EQ144）的布局设计，并参与其原型生产和试验工作。1983 至 1986 年，在吉林工业大学汽车工程学院攻读研究生，专注于通过发动机和变速箱间的优化匹配以提高车辆燃料经济性的研究。

1987 至 1992 年，在吉林工业大学汽车工程学院攻读博士学位，专注于有腿车辆的研究，这类车辆在苛刻的、轮式车辆难以活动的环境中有运行的潜力。1991 至 1995 年，在吉林工业大学汽车工程学院任副教授和汽车设计工程师，开设数次大学生的汽车理论与设计课程，以及两次研究生的汽车试验研究技术课程。当时，他也指导车辆性能、底盘和组件分析，以及指导包括底盘、电气线路、悬浮、转向系统和制动设计在内的汽车设计工作。

1995 年，作为研究同行，他参加了得克萨斯农工大学的现代车辆系统研究计划。此后，在该计划中研究开发电动汽车和混合动力电动汽车，主要研究范围为其基本原理、结构、控制、模拟和设计，及其主要组件。他是美国汽车工程师学会（SAE）的成员。

塞巴斯汀·E·盖伊 (Sebastien E. Gay) 简历

2001 年，塞巴斯汀·E·盖伊在得克萨斯农工大学获电机工程硕士学位。此前，1996 和 1997 年，先后在法国格伦诺贝尔科技大学获得机械工程和电机工程学士学位，2000 年在格伦诺贝尔国立工业学院获工程师文凭。现正攻读博士学位，专注于涡流制动的研究。其研究关注范围为混合动力电动汽车、无轨和有轨电动车辆、车辆系统的近代组件、燃料电池和往复式电动机。他是基于数字信号处理（DSP）控制的机电运动装置一书，以及两项发明的合作作者。其中一项发明在 2003 年 5 月由得克萨斯农工大学应用技术科学核证办公室颁发了“革新精神奖”。

阿里-埃玛迪 (Ali Emadi) 博士简历

阿里-埃玛迪在伊朗德黑兰的沙立夫科技大学以最高荣誉获得电机工程学士和硕士学位。后在得克萨斯农工大学专注于电力电子和电机驱动研究，获

电机工程博士学位，并在其研究生期间被该校授予电力和电力电子的学院 (EPPEI) 研究基金奖。1997 年，曾任沙立夫科技大学电机工程系讲师。2000 年 8 月进入伊利诺斯科技学院的电机和计算机工程系。

阿里-埃玛迪博士现任伊利诺斯科技学院的克雷英格尔 (Grainger) 电力电子和电机驱动研究所主任，建立了电力电子、电机驱动和车辆动力系统方面的研究与教学实验室，以及相应的课程。在现代汽车系统方面，他也是伊利诺斯科技学院国际协作的合作创办人和副主任。其主要关注的研究领域为电力电子变流装置与系统的模拟、分析、设计和控制，以及电机驱动，还包括集成变换器，车辆动力系统，混合动力电动汽车和燃料电池车的研究领域。

2003 年，由于对混合动力电动汽车变换的杰出贡献，以及优秀的教学和指导学生的实践，他被电机工程荣誉学会、埃特-凯帕-纽 (Eta Kappa Nu) 协会提名为埃特-凯帕-纽杰出的年轻电机工程师，获 2002 年度伊利诺斯科技学院优秀教学奖和 2004 年度伊利诺斯科技学院西格玛-希 (Sigma Xi) 优秀研究奖。2003 年，在 IEEE/DOE/DOD 国际未来能量挑战的电动机竞赛中，他指导学生团队以家用的新型、低成本的无刷直流电机装置的设计与制作赢得了综合一等奖。他是 IEEE 电力电子和 IEEE 工业电子学两会刊的副主编，是电力组件和系统学报的编委会成员。以阿里-埃玛迪博士为主要作者发表了 120 余篇学术刊物和会议论文，并出版了 3 部著作，即“车辆动力系统：陆地、海洋、天空和空间车辆” (纽约：Marcel Dekker, 2003)、“高效能电动机：选择与应用” (纽约：Marcel Dekker, 2004) 和“单向可开断的动力供应与有源滤波器” (Boca Raton: CRC 出版社, 2004)。是“汽车电力电子与电机驱动手册” (纽约：Marcel Dekker, 2005) 的编者。他是 IEEE 的高级会员和美国汽车工程师学会 (SAE) 的成员，并名列国际专业和工程学术名人录。

目 录

译者的话
前言
作者简介

第 1 章 环境影响与现代交通运输的历史	1
1.1 大气污染	1
1.1.1 氧化氮化合物	1
1.1.2 一氧化碳	2
1.1.3 未完全燃烧的碳氢化合物	2
1.1.4 其他的污染物质	2
1.2 全球变暖	3
1.3 石油资源	5
1.4 引发的代价	7
1.5 应对将来石油供应的各种交通运输发展策略的重要性	8
1.6 电动汽车的历史	11
1.7 混合动力电动汽车的历史	13
1.8 燃料电池车的历史	15
参考文献	16
第 2 章 车辆的基本原理	18
2.1 车辆运动的一般描述	18
2.2 车辆的阻力	19
2.2.1 滚动阻力	19
2.2.2 空气阻力	21
2.2.3 爬坡阻力	22
2.3 动力学方程	23
2.4 轮胎与地面间的附着力和最大牵引力	25
2.5 动力系的牵引力和车速	26
2.6 车辆动力装置和传动装置特性	28
2.6.1 动力装置特性	28

2.6.2	传动装置特性	31
2.6.2.1	手动齿轮传动装置	31
2.6.2.2	流体动力传动装置	32
2.6.2.3	连续变速传动装置	37
2.7	车辆性能	37
2.7.1	最高车速	37
2.7.2	爬坡能力	39
2.7.3	加速性能	39
2.8	运行燃油的经济性	41
2.8.1	内燃机的燃油经济性能	41
2.8.2	车辆燃油经济性的计算	42
2.8.3	改进车辆燃油经济性的基本技术	45
2.9	制动性能	46
2.9.1	制动力	46
2.9.2	前后轮轴上的制动力分布	47
	参考文献	51
第3章 内燃机		52
3.1	四冲程火花点火内燃机	52
3.1.1	工作原理	52
3.1.2	运行参数	54
3.1.2.1	发动机额定值	54
3.1.2.2	每一循环的指示功和平均有效压力	54
3.1.2.3	机械效率	56
3.1.2.4	比油耗和效率	56
3.1.2.5	排放率	57
3.1.2.6	燃油/空气和空气/燃油之比值	57
3.1.2.7	容积效率	58
3.1.3	运行与性能参数之间的关系	59
3.1.4	发动机运行特性	59
3.1.4.1	发动机性能参数	59
3.1.4.2	指示功率和有效功率与扭矩	60
3.1.4.3	油耗特性	61
3.1.5	影响火花点火发动机性能、效率和排放特性的运行变量	63
3.1.5.1	点火定时	63

3.1.5.2 燃油/空气的当量比	63
3.1.6 排放控制	66
3.1.7 改善性能、效率和排放特性的基本技术	67
3.2 四冲程压燃式内燃机	69
3.3 二冲程发动机	70
3.4 汪格尔转子式发动机	73
3.5 斯特林发动机	75
3.6 燃气轮机发动机	80
3.7 拟等温布雷托循环发动机	82
参考文献	83
第4章 电动汽车	84
4.1 电动汽车的结构	84
4.2 电动汽车的性能	87
4.2.1 牵引电动机的特性	87
4.2.2 牵引力和传动装置要求	88
4.2.3 车辆性能	90
4.3 正常行驶工况下的牵引力	93
4.4 能量消耗	97
参考文献	99
第5章 混合动力电动汽车	100
5.1 混合动力电驱动系的概念	100
5.2 混合动力电驱动系的构造	103
5.2.1 串联式混合动力电驱动系	103
5.2.2 并联式混合动力电驱动系	105
5.2.2.1 转矩耦合的并联式混合动力电驱动系	105
5.2.2.2 转速耦合的并联式混合动力电驱动系	111
5.2.2.3 转矩耦合与转速耦合的并联式混合动力电驱动系	113
参考文献	116
第6章 电驱动系统	118
6.1 直流电动机驱动	120
6.1.1 工作原理及其性能	121
6.1.2 组合的电枢电压与励磁控制	124

551	6.1.3	直流电动机的斩波控制	124
551	6.1.4	斩波馈电直流电动机的多象限控制	128
551	6.1.4.1	正转和正转再生制动的两象限控制	128
551	6.1.4.1.1	含换向开关的单个斩波器	128
081	6.1.4.1.2	C型两象限斩波器	129
181	6.1.4.2	四象限运行	131
481	6.2	感应电动机驱动	131
481	6.2.1	感应电动机的基本工作原理	132
781	6.2.2	稳态性能	134
281	6.2.3	恒压频比控制	136
281	6.2.4	电力电子控制	138
681	6.2.5	磁场定向控制	140
681	6.2.5.1	磁场定向原理	140
681	6.2.5.2	控制	147
781	6.2.5.3	直接转子磁通定向法	148
781	6.2.5.4	间接转子磁通定向法	151
881	6.2.6	应用于磁场定向控制的电压源逆变器	152
881	6.2.6.1	电压源逆变器中的电压控制	154
881	6.2.6.2	电压源逆变器中的电流控制	156
9	6.3	永磁无刷直流电动机驱动	159
981	6.3.1	永磁无刷直流电动机驱动的基本原理	161
981	6.3.2	永磁无刷直流电动机的结构和分类	161
591	6.3.3	永磁体材料性能	164
591	6.3.3.1	铝镍钴	165
891	6.3.3.2	铁氧体	165
491	6.3.3.3	稀土永磁体	165
191	6.3.4	永磁无刷直流电动机的性能分析和控制	165
291	6.3.4.1	性能分析	166
791	6.3.4.2	永磁无刷直流电动机驱动的控制	167
291	6.3.5	扩展转速技术	169
291	6.3.6	无检测器技术	169
991	6.3.6.1	应用检测量和数学的方法	170
	6.3.6.2	使用观测器的方法	170
509	6.3.6.3	使用反电动势感测的方法	170
509	6.3.6.4	独特的无检测器技术	171

6.4	开关磁阻电动机驱动	172
6.4.1	基本磁结构	173
6.4.2	转矩生成	176
6.4.3	开关磁阻电动机驱动变换器	178
6.4.4	运行模式	180
6.4.5	发电运行(再生制动)模式	181
6.4.6	无检测器控制	184
6.4.6.1	基于相磁链的方法	184
6.4.6.2	基于相电感的方法	185
6.4.6.2.1	基于相电感的无检测器控制	185
6.4.6.2.2	基于相增量电感的无检测器控制	185
6.4.6.3	调制信号注入法	186
6.4.6.3.1	频率调制方法	186
6.4.6.3.2	幅度调制和相位调制方法	186
6.4.6.3.3	基于诊断脉冲的方法	187
6.4.6.4	基于互感电压的方法	187
6.4.6.5	基于观测器的方法	188
6.4.7	开关磁阻电动机驱动的自校正技术	188
6.4.7.1	应用算术方法的自校正	188
6.4.7.1.1	具有平衡电感模式的最优化	189
6.4.7.1.2	参数变化下的最优化	189
6.4.7.2	应用人工神经网络的自校正	190
6.4.8	开关磁阻电动机的振动与噪声	192
6.4.9	开关磁阻电动机设计	193
6.4.9.1	定、转子极数	193
6.4.9.2	定子外径	194
6.4.9.3	转子外径	194
6.4.9.4	气隙	195
6.4.9.5	定子极弧	195
6.4.9.6	定子铁心底座	195
6.4.9.7	性能预测	195
	参考文献	196
第7章	串联式混合动力电驱动系的设计	202
7.1	运行模式	203

7.2	控制策略	204
7.2.1	峰值电源最大荷电状态的控制策略	204
7.2.2	恒温控制策略(发动机开/关控制)	206
7.3	主要部件的分类定位	207
7.3.1	牵引电动机额定功率值的设计	207
7.3.2	发动机/发电机组额定功率值的设计	209
7.3.3	峰值电源设计	211
7.3.3.1	峰值电源的功率容量	211
7.3.3.2	峰值电源的能量容量	211
7.4	设计实例	212
7.4.1	牵引电动机量值的设计	212
7.4.2	齿轮传动比的设计	213
7.4.3	加速性能的检验	213
7.4.4	爬坡能力的检验	213
7.4.5	发动机/发电机组量值的设计	214
7.4.6	峰值电源功率容量的设计	215
7.4.7	峰值电源能量容量的设计	216
7.4.8	耗油量	216
	参考文献	218
第8章	并联式混合动力电驱动系的设计	219
8.1	并联式混合动力电驱动系的控制策略	220
8.1.1	峰值电源最大荷电状态的控制策略	221
8.1.2	发动机开/关的控制策略	223
8.2	电驱动系参数的设计	224
8.2.1	发动机功率容量设计	225
8.2.2	电动机功率容量设计	227
8.2.3	传动装置设计	230
8.2.4	能量存储设计	231
8.3	仿真	233
	参考文献	234
第9章	轻度混合动力电驱动系的设计	235
9.1	制动和传动装置中消耗的能量	235
9.2	并联式轻度混合动力电驱动系	237

9.2.1	结构	237
9.2.2	运行模式和控制策略	237
9.2.3	驱动系统设计	239
9.2.4	性能	243
9.3	串、并联式轻度混合动力电驱动系	246
9.3.1	含行星齿轮构件的驱动系结构	246
9.3.2	运行模式和控制	248
9.3.2.1	转速耦合的运行模式	248
9.3.2.2	转矩耦合的运行模式	249
9.3.2.3	单发动机牵引模式	250
9.3.2.4	再生制动模式	250
9.3.2.5	发动机起动	251
9.3.3	控制策略	251
9.3.4	配置浮动定子电动机的驱动系	252
	参考文献	253
第 10 章	能量存储	255
10.1	电化学蓄电池组	255
10.1.1	电化学反应	257
10.1.2	热力学电压	258
10.1.3	比能量	259
10.1.4	比功率	261
10.1.5	能量效率	263
10.1.6	蓄电池技术	263
10.1.6.1	铅酸蓄电池	263
10.1.6.2	镍基蓄电池	264
10.1.6.2.1	镍/铁系统	264
10.1.6.2.2	镍/镉系统	265
10.1.6.2.3	镍/金属氢化物 (Ni-MH) 蓄电池	265
10.1.6.3	锂基蓄电池	266
10.1.6.3.1	锂聚合物 (Li-P) 蓄电池	266
10.1.6.3.2	锂离子 (Li-Ion) 蓄电池	267
10.2	超级电容器	267
10.2.1	超级电容器特性	268
10.2.2	超级电容器的基本原理	268