国际电气工程先进技术译丛

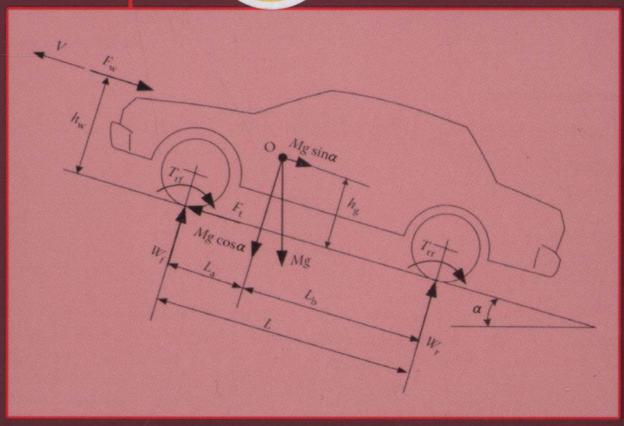
CRC Press
Taylor & Francis Group

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（原书第2版）

Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles

Fundamentals, Theory, and Design Second Edition

（美）Mehrdad Ehsani
Yimin Gao 著
Ali Emadi
倪光正 倪培宏 熊素铭 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

原书第2版特色

原书第2版附加的内容

- 一个典型实例的研究（见附录），分解了丰田Prius汽车的混合动力系统；
- 对原书第1版内容的修改和更新；
- 在驱动系设计方法和控制原理方面，引入了3章新内容；
- 完全重写了再生制动基本原理的新章节。

原书第1版给予实践工程师和大学生们系统的参考资料，以充分地理解这一新科技的精髓。原书第2版与第1版相比，引入了新的专题，并给予了更深层次的论述。在多年中，本书历经多次修改，必将极大地有助于工程师、大学生、研究工作者和从事于与汽车相关行业的其他专业人员，以及政府和学术界的有关人们。



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

（原书第2版）

（美） Mehrdad Ehsani
Yimin Gao 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（ICE）、电动汽车（EV）、混合动力电动汽车（HEV）和燃料电池车（FCV）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。

本书不仅对从事电动车辆研发的工程学术界，以及研究生和高年级大学生们，而且对与汽车相关的制造工业、管理机构和学术界的工程师、学生、研究工作者和其他专业人员，在关于现代汽车体系方面，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 2nd Edition / by Mehrdad Ehsani... [et al.] / ISBN: 978-1-4200-5398-2

Copyright© 2010 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 01-2010-0487 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：第 2 版/（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，2010.8（2016.7重印）
（国际电气工程先进技术译丛）
Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory and Design Second Edition
ISBN 978-7-111-31134-8

Ⅰ.①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.①U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 121541 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：牛新国 责任编辑：顾 谦
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：常天培
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
2016年 7 月第 1 版第 6 次印刷
169mm × 239mm · 30.5 印张 · 593 千字
标准书号：ISBN 978-7-111-31134-8
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
服务咨询热线：010 - 88361066
读书购书热线：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

封面无防伪标均为盗版

译 者 的 话

全球石油资源递减、大气环境污染以及温室效应显露的态势，对人类社会与经济的可持续发展带来了不容忽视的影响。聚焦于交通运输的应用领域，近年来，以节能、环保为终极目标的电动汽车、混合动力电动汽车的工程科学技术，其发展进程令人瞩目，并已开始在传统的汽车制造业中呈现出新科技成果的生长点。毫无疑问，在明天的、生活更美好的城市、乡村及其辐射的公路网中，各种类型的电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车必将构建并实现全球清洁汽车行动计划的蓝图。

本书诚如作者所言，它在原书第 1 版畅销的基础上，立足于全面的车辆驱动系系统的观点，进行了更深层次的论述，并引入了若干新的应用技术专题。从而，全书为开发安全、清洁和高效率的电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车提供了丰富、系统的工程科学技术知识与实践设计的经验、数据和资料。译者深信，机械工业出版社继续选择并引入这一专著（原书第 2 版），将极大地有助于我国从事电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车研发以及实践产业化的学术和工程界借鉴与参考。译者还愿进一步指出，本书新增内容对当前我国已较成熟的混合动力电动汽车的商品化开发，尤其具有重要的应用价值。

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。为此，谨再次致以衷心的谢意。

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

2010 年 6 月

前　言

内燃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持续大量汽车的应用，在全球已经引发了严重的环境和碳氢资源问题。大气质量的恶化、全球变暖以及石油资源的匮乏成为了现代生活必须认真对待的威胁。日益严格的排放和燃料效率的标准促进了安全、清洁和高效车辆的迅猛发展。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最有指望在可预见的未来解决车辆问题的办法。

为满足这一需要，在美国和全世界，不断增多的工程学院已在大学生和研究生培养中设立了现代能量和车辆技术应用科学专业。1998 年，本书作者在美国德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，但对学生和愿意授课的教授们尚无严谨、综合的教科书。此外，熟练的工程师们也需要系统的参考书，以完整地理解这一新技术应用科学的要素。本书第 1 版即在于填补这一需求。第 2 版与第 1 版相比，引入了更新的专题和更深层次的分析。

本书论述了传统的内燃机汽车（ICE）、电动汽车（EV）、混合动力电动汽车（HEV）和燃料电池车（FCV）的基本原理、理论基础及设计方法。基于数学严密性，对现代车辆全面地描述了它们的性能特征、配置、控制策略、设计方法、模拟和仿真。本书包括驱动系结构的分析，基于内燃机的驱动系，电动汽车和混合动力电动汽车配置，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。本书聚焦于整体的驱动系的系统，而不仅限于其特殊部件的分析。书中通过数学推理逐步展开描述了设计方法，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。

更准确地说，本书第 2 版包含了第 1 版内容中多处的修正和更新，并添加了新的 3 章内容和附录，即第 9 章：混联式（转矩和转速耦合）混合动力电驱动系设计和控制方法；第 10 章：插塞式混合动力电动汽车设计和控制原理；第 16 章：应用于越野车辆的串联式混合动力电驱动系设计；附录：丰田 Prius 技术概述。基于作者新的研究成果，第 13 章：再生制动的基本原理已全部重写。此外，大量新技术资料已增添入原章节。所有这些新内容将使第 2 版更为完善而有益于读者。

全书共由16章和一个附录组成。第1章讨论了与现代运输工具相关的社会和环境问题，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，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，还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、动力装置特性和传动特性的基本认识，并引入了用以描述车辆性能的数学方程。该章主要目的在于为车辆驱动系的设计提供必需的基本知识。为构成应用于电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车混合制动系统设计更坚实的基础，作为对第1版的完善与充实，加强了关于制动系统及其设计和性能描述的内容。

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，作为主动力装置，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，该章主要阐述了电驱动系统和储能装置的设计、牵引电动机和传动装置的设计、车辆性能的预测及其系统仿真结果。

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，其中有串联式、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章介绍了几类电动力装置，包括直流、交流、永磁无刷直流电动机和开关磁阻电动机驱动系统。并从牵引系统观点着手，论述了这些系统的基本结构、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、牵引电动机、传动装置、控制策略和功率变换器面向系统的设计，此外还提供了一个设计实例。作为对第1版的完善，增加了关于多种功率变换器配置的阐述。

第8章给出了并联式混合动力电驱动系的设计方法。该章内容包含驱动形式和模式分析，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2版中增添了基于动态规划的受控发动机开/关控制策略、模糊逻辑控制策略和优化控制概念的内容。

第9章为第2版中的新内容，该章介绍了混联式混合动力驱动系的运行特性、设计方法和控制策略。

第10章也属第2版新增内容，其中介绍了插塞式混合动力电动汽车的设计与控制原理。该章主要讲述了涉及驱动系的控制策略、储能设计和电动机设计的持续充电的混合动力驱动系。

第11章介绍了采用两种主要配置（并联式转矩耦合，以及混联式的转

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，控制系统的开发及其仿真。

第 12 章引入了包括蓄电池、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 13 章阐述了混合制动系统的设计和控制原理。其中，制动的安全性和可回收的能量是主要关注点。研究了在典型行驶循环中，相对于车速和制动功率的有效制动能量特性。为保证车辆安全制动的性能，分析了前、后轮制动力的分布。此外，该章还讨论了在机械和电再生制动之间总制动力分布的重要论点。阐述中引入了两个含其控制策略的高效混合制动系统。本章是在作者近期研究的基础上重写的。

第 14 章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 15 章中介绍了燃料电池混合动力驱动系的系统设计。首先，建立了燃料电池混合动力车的概念；其次，分析了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设计，并提供了一个设计实例，及其相应的性能仿真研究。

第 16 章拓展了越野履带式的串联式混合动力电动汽车的设计方法。研究的关注点在于：软地面上运动阻力的计算；牵引电动机系统的设计；发动机/发电机组系统设计；以及峰值电源系统的设计。此为第 2 版中的新章节。

典型示例以附录形式列入第 2 版，其为丰田 Prius 混合动力电动汽车的技术综述。目的是给予读者一个实例，以了解连同商品化的混合动力电驱动系一起，它的构造、运行模式和控制系统等。

本书适用于研究生或高年级大学生有关现代车辆专业的课程。取决于不同学科如机械、电气工程类的学生背景，讲课中教师由本书可灵活选取特定的素材。本书在美国德克萨斯农工大学已多年用于研究生课程。基于课程中学生们的评论和反应，本书已多次修订，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、学生、研究工作者和其他专业人员而言，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美国德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。作者感谢美国德克萨斯农工大学现代车辆研究组，以及电力电子和电机驱动研究组的全体成员，他们为本书作出了很多贡献。

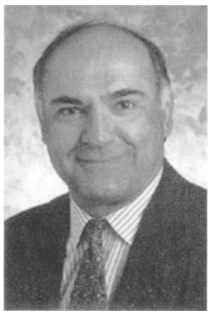
我们也衷心感谢格伦·C·克雷尔（Glenn C. Krell）对本书的校对和修正，并且感谢 CRC 出版社的编辑们，尤其是诺雷·科诺卡（Nora Konopka）女士的

努力和帮助。最后但一样重要的是，我们感谢各自家庭对写作本书长期以来所给予的支持和理解。

梅尔达德·爱塞尼（Mehrdad Ehsani）
高义民（Yimin Gao）
阿里·埃玛迪（Ali Emadi）

作 者 简 介

梅尔达德·爱塞尼（Mehrdad Ehsani）



梅尔达德·爱塞尼于1973和1974年在美国奥斯汀的德克萨斯大学先后获电机工程学士与硕士学位，并于1981年获美国威斯康星大学麦迪逊分校电机工程博士学位。

1974～1977年，梅尔达德·爱塞尼在美国德克萨斯大学核聚变研究中心任研究工程师。1977～1981年，在美国伊利诺斯州的阿贡国家实验室任驻室副研究员，同时在美国威斯康星大学麦迪逊分校进行能量与控制系统方面的博士学位课题工作。1981年至今，为美国德克萨斯农工大学电机工程学院教授，美国德克萨斯应用电力电子中心主任。他在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表彰。1984年，他被美国德克萨斯专业工程师学会的布拉佐斯（Brazos）分会提名为该年度杰出的年轻工程师。1992年在美国德克萨斯农工大学被提名为该校工程学院的哈力伯顿（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，在美国德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。2003年，他因在工程学院中的杰出教学获BP阿莫可（Amoco）学院奖，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。2003年因电力电子和驱动技术的高级课程开设和教学的杰出贡献，被授予IEEE大学教学奖。2004年，在美国德克萨斯农工大学电机工程学院被选为罗伯特.M.肯尼迪（Robert M. Kennedy）讲座教授。2005年，被选为汽车工程学会会员。他在脉冲电源、高电压工程、电力电子、电机驱动和现代车辆系统方面已发表300余篇论文，并为电力电子、电机驱动和现代车辆系统方面12部（含本书第1版）著作的合作作者。他有超过23项已批准或正在申报的美国和欧洲专利。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（PELS）执行委员会的成员，曾任

PELS 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。他是 IEEE 动力和推进会议的发起人，也是创造 IEEE VTS 车辆动力、推进委员会的主席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，是美国德克萨斯州注册的专业工程师。

高义民（Yimin Gao）



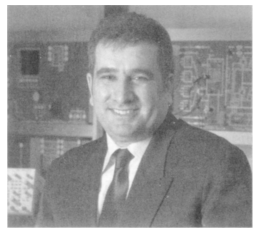
高义民于 1982、1986 和 1991 年先后在中国吉林省长春市吉林工业大学获机械工程（主修汽车系统的开发、设计和制造）学士、硕士和博士学位。1982～1983 年，在中国湖北省十堰市东风汽车公司任汽车设计工程师，完成了 5t 载货汽车（EQ144）的布局设计，并参与其原型生产和试验工作。1983～1986 年，在吉林工业大学汽车工程学院攻读研究生，专注于通过发动机和变速箱间的优化匹配以提高车辆燃料经济性的研究。

1987～1991 年，他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发，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。1991～1995 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，开设数个学期大学生的汽车理论与设计课程，以及两学期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，他参加了美国德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，以及电驱动系、混合动力电驱动系及其主要组件的设计。他是美国汽车工程师学会（SAE）的成员。

阿里·埃玛迪（Ali Emadi）

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，后在美国德克萨斯农工大学获得电机工程博士学位。他现为美国芝加哥伊利诺斯科技学院电机工程方面的哈力斯·帕尔斯汀（Harris Perlstein）讲座教授，电力、电力电子中心主任，以及克雷英格尔（Grainger）实验室主



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，开展相应的课程。他是混合动力电动汽车应用技术股份有限公司（HEVT）——伊利诺斯科技学院所属公司的创办人、总经理和技术总管。

埃玛迪博士获多次奖励和表彰。2009 年被提名为美国芝加哥事务协会（Chicago Matters）2009 年度极有远见的人物。2003 年，由于对混合动力电动汽车变换的杰出贡献，被电机工程荣誉学会提名为埃特·凯帕·纽（Eta Kappa Nu）杰出的年轻电机工程师（惟一的国际奖）。2005 年由 IEEE 电力电子学会授予理查德 . M. 巴斯（Richard M. Bass）杰出的年轻电力电子工程师奖，该年度也在美国伊利诺斯科技学院被学生评选为该年度最佳教授。他获得了 2002 年度美国伊利诺斯科技学院优秀教学奖和 2004 年度美国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，他指导学生团队以新型电动机装置的设计与制作赢得了综合一等奖。

以阿里·埃玛迪博士为主要作者发表了 250 余篇学术刊物和会议论文，并出版了多部著作有《车辆电动力系统：陆地、海洋、天空和空间车辆（Vehicular Electric Power Systems：Land，Sea，Air，and Space Vehicles）》（Marcel Dekker 出版社，2003）；《高效能电动机（Energy Efficient Electric Motors）》（Marcel Dekker 出版社，2004）；《单向可开断的动力供应与有源滤波器（Uninterruptible Power Supplies and Active Filters）》（CRC 出版社，2004）；本书（第 1 版）（CRC 出版社，2004）和《集成的电力电子变换器和数字控制（Integrated Power Electronic Converters and Digital Control）》（CRC 出版社，2009）。他也是《汽车电力电子与电动机驱动手册（Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives）》（Marcel Dekker 出版社，2005）的编者。

埃玛迪博士是创办首届 IEEE 车辆动力和推进会议（VPPC′05）的总主席，该会议借助其主席职位与美国汽车工程师学会（SAE）的国际未来运输应用技术会议同期举行。他现为 IEEE 车辆动力和推进会议指导委员会主席，IEEE 电力电子学会的交通运输电力电子技术委员会主席和 IEEE 工业电子学会电力电子技术委员会主席。他也担任 2007 年 IEEE 国际未来能源需求会议主席。

埃玛迪博士是国际电动汽车和混合动力电动汽车学报的编辑（北美地区）。为 IEEE 电力电子学报的汽车电力电子和电机驱动专题的客座主编，IEEE 车辆应用技术学报的混合动力电动汽车与燃料电池车专栏以及 IEEE 工业电子学学报的汽车电子和电驱动专栏的客座编辑。他还担任 IEEE 车辆应用技术学报、IEEE 电力电子学报和 IEEE 工业电子学学报的副编辑。

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　车辆驱动和制动的基本原理 …… 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 …… 23
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 …… 27
2.6　车辆动力装置和传动装置特性 …… 29
2.6.1　动力装置特性 …… 29
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 …… 33
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 …… 38
2.7.2 爬坡能力 …… 39
2.7.3 加速性能 …… 39
2.8 运行的燃油经济性 …… 41
2.8.1 内燃机的燃油经济性 …… 42
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 …… 48
2.9.3 制动规程和制动性能分析 …… 52
2.9.3.1 制动规程 …… 52
2.9.3.2 制动性能分析 …… 54
参考文献 …… 56

第3章 内燃机 …… 57

3.1 四冲程火花点火内燃机 …… 57
3.1.1 工作原理 …… 57
3.1.2 运行参数 …… 59
3.1.2.1 发动机额定值 …… 59
3.1.2.2 每一循环的指示功和平均有效压力 …… 59
3.1.2.3 机械效率 …… 61
3.1.2.4 比油耗和效率 …… 61
3.1.2.5 排放率 …… 62
3.1.2.6 燃油/空气和空气/燃油之比值 …… 63
3.1.2.7 容积效率 …… 63
3.1.3 运行与性能参数之间的关系 …… 64
3.1.4 发动机运行特性 …… 64
3.1.4.1 发动机性能参数 …… 64
3.1.4.2 指示功率和有效功率与转矩 …… 65
3.1.4.3 油耗特性 …… 66
3.1.5 影响火花点火发动机性能、效率和排放特性的设计和运行变量 …… 68
3.1.5.1 压缩比 …… 68
3.1.5.2 点火定时 …… 68

3.1.5.3 燃油/空气的当量比 …… 70
3.1.6 排放控制 …… 71
3.1.7 改善发动机性能、效率和排放的基本技术 …… 72
3.1.7.1 强制进气 …… 72
3.1.7.2 汽油直接喷射和稀燃发动机 …… 73
3.1.7.3 多气门和可变气门定时 …… 73
3.1.7.4 无节流转矩控制 …… 73
3.1.7.5 可变压缩比 …… 73
3.1.7.6 废气再循环 …… 73
3.1.7.7 智能点火 …… 74
3.1.7.8 新发动机材料 …… 74
3.2 四冲程压燃式内燃机 …… 74
3.3 二冲程发动机 …… 75
3.4 汪格尔转子式发动机 …… 79
3.5 斯特林发动机 …… 81
3.6 燃气轮机发动机 …… 85
3.7 拟等温布雷托循环发动机 …… 87
参考文献 …… 88

第 4 章 电动汽车 …… 89

4.1 电动汽车的结构 …… 89
4.2 电动汽车的性能 …… 92
4.2.1 牵引电动机的特性 …… 92
4.2.2 牵引力和传动装置要求 …… 93
4.2.3 车辆性能 …… 95
4.3 正常行驶工况下的牵引力 …… 98
4.4 能量消耗 …… 102
参考文献 …… 104

第 5 章 混合动力电动汽车 …… 105

5.1 混合动力电驱动系的概念 …… 105
5.2 混合动力电驱动系的构造 …… 108
5.2.1 串联式混合动力电驱动系（电耦合） …… 109
5.2.2 并联式混合动力电驱动系（机械耦合） …… 111
5.2.2.1 转矩耦合的并联式混合动力电驱动系 …… 112
5.2.2.1.1 转矩耦合配置 …… 112
5.2.2.1.2 转矩耦合的电驱动系结构 …… 113

5.2.2.2 转速耦合的并联式混合动力电驱动系 …… 118
5.2.2.2.1 转速耦合配置 …… 118
5.2.2.2.2 转速耦合的电驱动系结构 …… 120
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 …… 122
5.2.2.3.1 可供选择的耦合模式 …… 122
5.2.2.3.2 两种耦合模式的配置 …… 124
参考文献 …… 127

第6章 电驱动系统 …… 128

6.1 直流电动机驱动 …… 130
6.1.1 工作原理及其性能 …… 131
6.1.2 组合的电枢电压与励磁控制 …… 134
6.1.3 直流电动机的斩波控制 …… 134
6.1.4 斩波馈电直流电动机的多象限控制 …… 138
6.1.4.1 正转和正转再生制动的两象限控制 …… 138
6.1.4.1.1 含换向开关的单个斩波器 …… 138
6.1.4.1.2 C型两象限斩波器 …… 139
6.1.4.2 四象限运行 …… 141
6.2 异步电动机驱动 …… 141
6.2.1 异步电动机的基本工作原理 …… 142
6.2.2 稳态性能 …… 144
6.2.3 恒压频比控制 …… 146
6.2.4 电力电子控制 …… 148
6.2.5 磁场定向控制 …… 150
6.2.5.1 磁场定向原理 …… 150
6.2.5.2 控制 …… 156
6.2.5.3 直接转子磁通定向法 …… 158
6.2.5.4 间接转子磁通定向法 …… 161
6.2.6 应用于磁场定向控制的电压源逆变器 …… 162
6.2.6.1 电压源逆变器中的电压控制 …… 164
6.2.6.2 电压源逆变器中的电流控制 …… 167
6.3 永磁无刷直流电动机驱动 …… 169
6.3.1 永磁无刷直流电动机驱动的基本原理 …… 171
6.3.2 永磁无刷直流电动机的结构和分类 …… 171
6.3.3 永磁体材料性能 …… 174
6.3.3.1 铝镍钴 …… 174
6.3.3.2 铁氧体 …… 175
6.3.3.3 稀土永磁体 …… 175

6.3.4　永磁无刷直流电动机的性能分析和控制 …… 175
6.3.4.1　性能分析 …… 176
6.3.4.2　永磁无刷直流电动机驱动的控制 …… 177
6.3.5　扩展转速技术 …… 178
6.3.6　无检测器技术 …… 179
6.3.6.1　应用检测量和数学的方法 …… 179
6.3.6.2　使用观测器的方法 …… 180
6.3.6.3　使用反电动势感测的方法 …… 180
6.3.6.4　独特的无检测器技术 …… 181
6.4　开关磁阻电动机驱动 …… 182
6.4.1　基本磁结构 …… 183
6.4.2　转矩生成 …… 186
6.4.3　开关磁阻电动机驱动变换器 …… 187
6.4.4　运行模式 …… 190
6.4.5　发电运行（再生制动）模式 …… 191
6.4.6　无检测器控制 …… 193
6.4.6.1　基于相磁链的方法 …… 194
6.4.6.2　基于相电感的方法 …… 194
6.4.6.2.1　基于相电感的无检测器控制 …… 195
6.4.6.2.2　基于相增量电感的无检测器控制 …… 195
6.4.6.3　调制信号注入法 …… 196
6.4.6.3.1　频率调制方法 …… 196
6.4.6.3.2　幅度调制和相位调制方法 …… 196
6.4.6.3.3　基于诊断脉冲的方法 …… 197
6.4.6.4　基于互感电压的方法 …… 197
6.4.6.5　基于观测器的方法 …… 197
6.4.7　开关磁阻电动机驱动的自校正技术 …… 198
6.4.7.1　应用算术方法的自校正 …… 198
6.4.7.1.1　具有平衡电感模式的最优化 …… 199
6.4.7.1.2　参数变化下的最优化 …… 199
6.4.7.2　应用人工神经网络的自校正 …… 200
6.4.8　开关磁阻电动机的振动与噪声 …… 201
6.4.9　开关磁阻电动机设计 …… 203
6.4.9.1　定、转子极数 …… 203
6.4.9.2　定子外径 …… 204
6.4.9.3　转子外径 …… 204
6.4.9.4　气隙 …… 205
6.4.9.5　定子极弧 …… 205