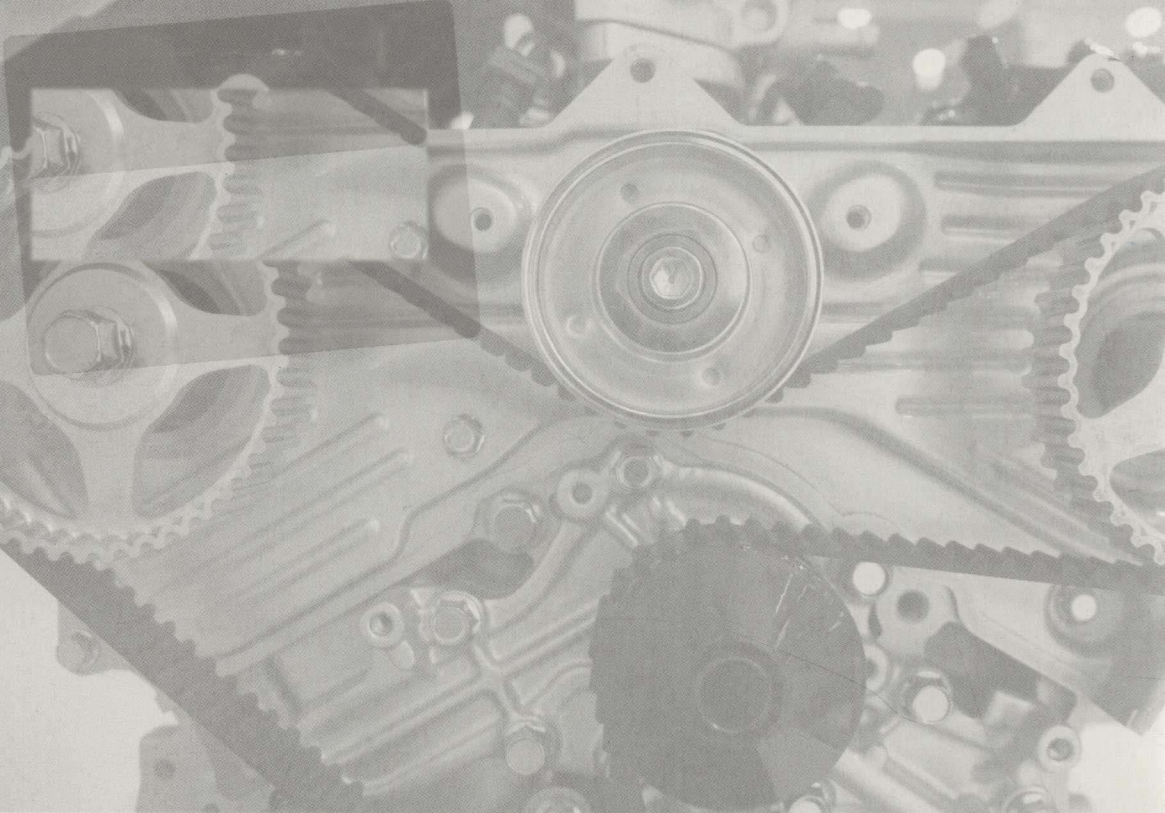




电动汽车前沿技术及应用

文浩 曾涛 徐淳川◎等编著

韩维建◎主编



机械工业出版社
China Machine Press

汽车工程专业系列丛书

电动汽车前沿技术及应用

文浩 曾涛 徐淳川 ◎等编著
韩维建 ◎主编



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目(CIP)数据

电动汽车前沿技术及应用 / 文浩等编著; 韩维建主编. —北京: 机械工业出版社, 2019.1
(汽车工程专业系列丛书)

ISBN 978-7-111-61259-9

I. 电… II. ①文… ②韩… III. 电动汽车—研究 IV. U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 244209 号

电动汽车前沿技术及应用

出版发行: 机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 袁 银

责任校对: 李秋荣

印 刷: 北京市兆成印刷有限责任公司

版 次: 2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 170mm×242mm 1/16

印 张: 15

书 号: ISBN 978-7-111-61259-9

定 价: 60.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 68995261 88361066

投稿热线: (010) 88379007

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjg@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光/邹晓东

丛书总序

中国的汽车产业发展迅速，已经成为我国国民经济的支柱产业之一。随着家庭平均汽车保有量的迅速增长，汽车给整个社会带来的能源、环境、交通和安全的压力日益加大。尽管汽车在轻量化、电动化、排放控制技术和安全技术方面已经有了长足的进步，尤其是近几年互联网和通信技术在汽车的独立驾驶和智能化方向提供了极大的发展和创新的空间，但诸多的发展给汽车产业带来无限的挑战和机遇。因此，行业的快速变化急需培养一大批不仅懂专业技术，更熟悉跨界知识的创新型人才。

重庆大学汽车协同创新中心认识到人才培养的迫切需求，组织我们为新成立的汽车学院编写一套教材。参与这套教材编写的所有作者都身在汽车行业的科研和技术开发的第一线，其中大部分作者是近年海归的年轻博士。教材的选题经过专家在传统学科和新兴学科中反复地论证和研讨，遴选了汽车行业面临紧迫挑战性的技术和话题。第一批教材有八本，包括《汽车材料及轻量化趋势》《汽车设计的耐久性分析》《汽车动力总成现代技术》《汽车安全的仿真与优化设计》《汽车尾气净化处理技术》《智能汽车关键技术与设计方法》《中国汽车二氧化碳减排路径》和《电动

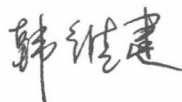
汽车前沿技术及应用》。

这套教材的一个共同特点就是与国际发展同步、内容新颖。编著者对于比较传统的学科，在编写过程中尽可能地把最新的技术和理念包括进去，比如在编写《汽车材料及轻量化趋势》的过程中，不仅介绍了各种轻量化材料的特点和动向，而且强调了轻量化材料的应用必须系统地考虑材料的性能、部件的加工方法和成本。有些选题针对汽车行业发展的新的技术动向，比如《汽车安全的仿真与优化设计》主要介绍汽车安全仿真的模型验证和优化，这是汽车产品开发采用电子认证的必经之路。《电动汽车前沿技术及应用》阐述了现代电动汽车的基本原理、关键技术，以及锂电池汽车和氢燃料电池汽车在未来发展中的优势和挑战。《智能汽车关键技术与设计方法》对智能汽车的感知、控制、定位和测试验证等关键技术进行了详尽的分析与解释，并运用实验与仿真来论证书中所提出方法的正确性和实际可行性。

这套教材的另一个突出的特点是实用，比如一般汽车设计要求非磨损件的寿命是 24 万千米。《汽车设计的耐久性分析》着重介绍了汽车行业用于耐久性分析的主要工具和方法，以及这些方法的理论基础。这是进行汽车整车和零部件寿命耐久性正向设计的基础。随着环境保护的法规日益严格，汽车排放控制技术也在不断发展提高。汽车动力技术已经形成化石燃料到其他燃料的多元化发展，《汽车尾气净化处理技术》和《中国汽车二氧化碳减排路径》介绍了排放控制技术的进程和法规实施的协调，以及达到法规要求的不同技术路线。

本套丛书不仅对汽车专业的学生大有裨益，也可以作为汽车从业人员和所有对汽车技术感兴趣者的参考读物。由于时间有限，选

题的范围还不全面。每本书的内容也会反映出作者的知识和经验的局限性。在此，真诚地希望广大读者提出意见，供我们不断修改和完善。

A handwritten signature in black ink, consisting of the characters '韩' (Han) and '建' (Jian) in a cursive style.

2016年8月5日

推荐序一

随着我国汽车工业的快速发展，先进的汽车设计理论和技术在车身开发中越来越受到重视。同时，汽车发展遇到了环保、能源、交通等各个方面的诸多问题，在这种新形势下，从业者掌握和熟练运用核心设计技术显得尤为重要。

汽车的设计与制造是一个非常复杂的系统工程，需要考虑零件、子系统、系统，乃至整车等各个层面，综合运用材料科学、能源科学、信息科学和制造科学的相关知识、理论和方法。本套“汽车工程专业系列丛书”涵盖了汽车制造系统和质量、汽车动力总成、汽车材料及轻量化、车身耐久性、汽车安全仿真与优化、汽车系统控制及其智能化、汽车尾气排放处理与二氧化碳减排等多个方面的内容，涉及汽车轻量化、安全、环保、电子控制等关键技术。

本套丛书的作者既有在汽车相关领域工作多年、有丰富经验的专家，也有学成回国、已崭露头角的后起之秀；内容安排上既有适合初学者学习的大量基础理论知识，也融入了编著者在相关领域多年来的研究体会和经验，从中我们能充分体会到现代汽车技术节能、环保和智能化的发展趋势。丛书结合大量实例，取材丰富、图

文并茂。

本套丛书可作为汽车设计的参考工具，也可作为车辆工程、机械工程、环境工程等专业研究生的专门教材及学习参考书。相信该书对于汽车行业相关领域的研究生、企业研发人员和科研工作者会产生重要的启发作用，特作序推荐。

A handwritten signature in black ink, reading '陈建康' (Chen Jiankang).

上海交通大学

推荐序二

作为《中国制造 2025》战略部署的主要支点之一，汽车业的持续、快速、健康发展将为中国制造业强国目标奠定坚实的基础。面对中国汽车产业大而不强的现状，自主品牌汽车产业的发展壮大时不我待。重庆自主品牌汽车协同创新中心，立足于重庆地区汽车产业，依托国家“2011 计划”，以我国自主品牌汽车发展重大需求为牵引，以体制机制创新为手段，探索我国汽车自主品牌的发展模式。中心面向国内自主品牌汽车产业，重点开展培养高端人才，汇聚优秀团队，研发核心技术，推广产业应用，整合优势资源，搭建交流平台等工作。重庆自主品牌汽车协同创新中心瞄准“节能环保、安全可靠、智能舒适”的国际汽车三大发展趋势，凝练学科发展方向，汇聚创新资源和汽车及相关领域的优势学科群，建立了全面涵盖汽车行业研究领域的创新团队。本套丛书由汽车中心特别顾问、福特汽车亚太区技术总监韩维建博士积极推动。丛书主编韩维建博士基于数十年国际一流汽车工程经验以及独到全面的行业技术趋势把握，整合及组建了编著团队进行丛书各个书籍的编著。编著团队的成员主要由具有多年国际汽车公司工作经验，并且在高校及企业科研一线工作的归国人员组成。丛书内容拥有立足成熟技术、

紧跟国际前沿、把握领域创新的特点及优势，丛书的成功出版将为国内汽车行业及学科提供全面而翔实的参考材料。

书籍是知识传播的介质，也是人才培养及创新意识传承的基础。正如重庆大学建校宣言“人类之文野，国家之理乱，悉以人才为其主要之因”所阐释的，本套丛书秉承重庆自主品牌汽车协同创新中心人才培养方针，主要面向高校汽车相关学科本科及研究生的教学，同时也可可为汽车行业工程人员提供参考。相信本套丛书会对我国汽车领域学科及行业产生积极良好的推动作用。



江苏省产业技术研究院

前 言

汽车已经成为人们优质的现代生活中不可缺少的部分。然而，近100多年历史的以燃油为动力的内燃机汽车正面临着原油枯竭和人类生存环境不断恶化的挑战，以电能为动力的电动汽车可能在能源和碳排放两个限制条件下赋予汽车新的生命力。因为电动汽车不仅可能利用人们正在开发的清洁、可再生的新能源而避免或者减少使用原油这一化石燃料，而且电动汽车以电机提供动力，大大减少了动力传递的机械复杂程度，提高了能量转换效率和使用效率。然而，如果电动汽车不是用清洁、再生能源发电来充电，而继续使用化石燃料，特别是煤作为电能的来源，那么碳排放量并不能得到减少，甚至还会增加。在这个意义上，电动汽车并非等同于使用新能源汽车。锂电池作为电能的储存设备如果不能进一步提高单位重量和体积的电能储藏密度，那么电动汽车能量转换的高效率会大打折扣。氢燃料电池汽车也许能在电动汽车中弥补碳排放和高效率两个方面的不足，可昂贵的氢燃料电池汽车和加氢站的普及也面临着市场化的艰难步履。电动化汽车产业的发展方向仍然迷雾重重，并非一蹴而就，也不可以弯道超车。本书以能量转换效率和碳排放这两个潜在的要素为指南，阐述电动汽车的基本原理和在未来发展中的优势与挑战。

第1章以内燃机燃油汽车、锂电池电动汽车以及氢燃料电池汽车的对比,说明了电动汽车的显著优势和市场化挑战。作者从储能方式上的对比,对汽车的动力源能量密度和能量转换效率方面做了简要阐述。本章由文浩、徐淳川博士联合编写。

第2章介绍了电池的电化学原理,类比水的势能对电池的电化学势能进行了描述。然后从工业应用的角度,对如何以低成本实现大量生产进行了介绍。在单电池的基础上,对如何进一步使用串并联的方式,将其组装成高达300V、可以驱动汽车的电池组进行了阐述。最后,作者对当前的电动汽车行业和相关电池产业进行了描绘。本章由文浩博士编写。

第3章重点介绍了新能源车用电机,作者从电磁场以及电机用磁性材料出发,导出了旋转电机的机-电转换机制,以帮助读者理解电机工作原理,并介绍了电动汽车驱动电机的主要类型、结构以及这些类型的电机在电动汽车上的应用。最后作者讨论了电机中的能量损耗,以及驱动电机的发展趋势。本章由李万锋博士编写。

第4章介绍了车用动力电机(直流电机和交流电机)的建模原理及其常用控制方法,即直流电机的定压定流控制、交流电机的矢量控制,以及直流电机的滑模控制等。本章由曾涛博士编写。

第5章介绍了混合动力汽车的基本原理以及控制方法,其中包括混合动力的分类方法和运行原理、发动机的工作过程,细分混合动力常见的控制和优化问题,还介绍了常用混合动力控制策略和方法。本章由曾涛博士编写。

第6章介绍了氢燃料电池。作者试图从燃料电池的理论基础和在汽车上的应用两个方面做一个较为详细的介绍。在前两节中作者简单介绍了汽车用聚合物电解质燃料电池的构造和物理化学过程。从6.3

节开始,作者讨论了燃料电池的热力学原理和动力学过程,目标是揭示燃料电池的运行机制和影响因素。6.3节介绍了燃料电池的理论最大输出电压及其影响因素。6.4节介绍了燃料电池的电极电荷转移过程及其引起的极化电压损失。6.5节和6.6节讨论了物质的传输,包括电荷(特别是质子在电解质中)(6.5节)和中性物质(6.6节)的传输及其导致的燃料电池电压的降低。6.7节简单介绍了燃料电池堆和辅助系统,并介绍了燃料电池系统的水热管理。本章由鲁自界博士编写。

第7章介绍了燃料电池在汽车动力运用上的基本测试技术,通过分析燃料电池材料的微观结构、燃料电池的电化学性能,从而达到评价燃料电池材料的物理特性的优劣、电化学性能的好坏和电堆设计是否足够优化的目的。本章由张财志博士编著。

在第8章中,作者以氢气物质特性为基础,对氢气这一能量的载体进行了阐述,并以其与其他能量载体进行的比较,说明了氢气作为一种清洁、可再生能源在未来电动汽车能源中的重要地位;还讨论了使用氢气的安全性以及氢燃料电池汽车的氢气储存方式,并提供了氢燃料电池汽车的氢气储存相关参数和氢气体积及重量密度的目标。本章由徐淳川博士编写。

由于本书的知识面跨度比较大,特别是燃料电池汽车部分属于正在发展的新能源汽车技术,所以我们邀请了在电动汽车领域工作的多名作者参与编写。他们都分别在美国及新加坡获得博士学位,并长期从事电动汽车领域的工作。鲁自界博士、李万锋博士、徐淳川博士、曾涛博士和文浩博士是美国福特汽车公司的高级工程师,张财志博士是重庆大学、汽车工程学院汽车协同创新中心和机械传动国家重点实验室的博士生导师。由于作者能力所限,书中错误在所难免,恳请各位读者指正。

目 录

丛书总序

推荐序一

推荐序二

前 言

第1章 电动汽车概述	1
1.1 电动汽车的定义	1
1.2 电动汽车简史	2
1.2.1 史前时代	2
1.2.2 黄金时代	3
1.2.3 黑暗世纪	3
1.2.4 文艺复兴	4
1.3 锂电产业	5
1.4 挑战	6
1.5 氢燃料电池汽车	7
1.6 能源对汽车与环境的影响	8
1.7 能量密度与汽车的续航能力	13
1.8 电动汽车的基础设施	17
参考文献	18

第2章 汽车充电电池概述	19
2.1 电化学原理	20
2.2 活性材料	24
2.2.1 电压曲线	24
2.2.2 正负极材料	26
2.2.3 电解液	28
2.2.4 惰性材料	29
2.3 结构和形态	30
2.3.1 电芯、模组和电池	30
2.3.2 内部结构	31
2.3.3 形态	32
2.4 整车驱动	34
2.4.1 Ragone 图	35
2.4.2 行驶里程	36
思考题	37
参考文献	38
 第3章 汽车动力驱动电机基础	 39
3.1 电磁场与磁性材料	40
3.1.1 磁场的产生与电磁感应	41
3.1.2 磁路	43
3.1.3 电机中的磁性材料	45
3.2 电-力转换	49
3.3 驱动电机分类	53
3.3.1 感应电机	54
3.3.2 永磁同步电机	55
3.3.3 开关磁阻电机	57
3.3.4 不同电机类型的比较	58
3.4 电机中的能量损耗	60

思考题	62
参考文献	62
第4章 动力电机建模与控制	64
4.1 电动汽车控制概述	66
4.2 电机建模原理	67
4.2.1 线圈的电磁感应	67
4.2.2 直流电机模型	73
4.2.3 交流电机建模	75
4.3 电机控制	83
4.3.1 直流电机控制	83
4.3.2 交流电机控制	94
思考题	102
参考文献	102
第5章 混合动力汽车控制	104
5.1 混合动力汽车的基本原理	104
5.1.1 混合动力汽车的动力系统分类	106
5.1.2 混合动力汽车的工作原理	110
5.2 车用内燃机的工作原理	111
5.3 混合动力系统建模	113
5.3.1 运动学模型	113
5.3.2 准静态模型	114
5.3.3 动态模型	115
5.4 混合动力系统控制问题分类	116
5.4.1 等效油耗的能量管理问题	117
5.4.2 SOC 的能量管理问题	118
5.4.3 排放的能量管理问题	119
5.4.4 瞬态工况油耗的能量管理问题	120

5.4.5 结构参数影响的能量管理问题	121
5.5 混合动力系统控制	122
5.5.1 基于规则的能量管理策略	124
5.5.2 基于优化方法的能量管理策略	132
思考题	138
参考文献	138
第6章 汽车燃料电池基础和应用	140
6.1 什么是燃料电池	140
6.1.1 燃料电池的分类	141
6.1.2 燃料电池的特点	143
6.2 燃料电池的物理化学过程简介	143
6.3 热力学电压 E_{thermo} (或 E_{rev})	146
6.3.1 燃料电池的反应热 (ΔH_{rxn}) 和 电功 (W_{elec})	147
6.3.2 燃料电池的热力学可逆电压	147
6.3.3 反应物浓度的影响——Nernst 方程	149
6.3.4 燃料电池的效率	149
6.4 反应动力学和激活电压损失	150
6.4.1 燃料电池电流与电位的实质	150
6.4.2 燃料电池电流 - 电位的关系: Butler-Volmer 方程	151
6.4.3 燃料电池的 TAFEL 近似	153
6.4.4 氢氧燃料电池的电极动力学概况	154
6.4.5 改善阴极 ORR 动力学速度的方法	156
6.5 燃料电池的电荷传输和欧姆损失	159
6.5.1 电荷的传输	159
6.5.2 欧姆电压损失	159
6.5.3 聚合物膜的离子导电率	160