



新能源汽车技术

王永富 陈泽宇 周楠 等◎编著

The New Energy
Vehicle
Technology



科学出版社

新能源汽车技术

王永富 陈泽宇 周楠等 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一本关于新能源汽车技术的实用教科书，共九章，其内容包括新能源汽车概述、纯电动汽车技术、混合动力汽车技术、燃料电池汽车技术、新能源汽车研发基础、整车控制器的研发、驱动电机及电机控制器的研发、锂离子动力电池及管理系统的研发、质子交换膜燃料电池建模和监控系统的研发等内容。本书从新能源汽车产业的实际出发，力图把新能源汽车基础知识、研发与实际应用融为一体。本书内容丰富、概念清晰、知识精炼、技术研发性强，为读者展现了一个绚丽多彩的新能源汽车世界，有助于开阅读者的视野、提升读者的科学思维、培养读者的探索精神。希望读者能从中体会到新能源汽车技术的先进性与实用性。

本书可以作为高等院校车辆工程专业学生的教材，也可作为机械工程和科学工程等专业相关人员的参考用书，还可以作为相关科学技术人员和工程技术人员的技术研发参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

新能源汽车技术 / 王永富等编著. — 北京: 科学出版社, 2018.4

ISBN 978-7-03-055917-3

I. ①新… II. ①王… III. ①新能源-汽车 IV. ①U469.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 308350 号

责任编辑: 张 震 姜 红 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

保定市中华美凯印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 4 月第一次印刷 印张: 22 3/4

字数: 540 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《新能源汽车技术》写作委员会

王永富 陈泽宇 周楠

王懋 马冰心 张化楷

齐晗 张晓宇 黄振荣

前 言

随着资源与环境双重压力的持续增大，发展新能源汽车已成为汽车工业发展的方向。当前，中国新能源汽车发展已进入关键时期，既面临重大的发展机遇，也面临着严峻的挑战。中国新能源汽车发展中还存在很多需要解决的问题，如核心技术还不具竞争优势，企业投入不足等。因此，必须加大攻坚力度，推动中国汽车工业向创新驱动转型，抢占技术制高点，培育新能源汽车战略性新兴产业，引领产业变革，确保中国新能源汽车行业在国际上具有领先优势。当代大学肩负人才培养、社会服务与科学研究三大使命，其中首要任务就是为社会培养高素质的人才，这是大学责无旁贷的任务。中国在新能源汽车技术的综合应用与研发方面的教材很少，急需这样的教材培养学生的研发能力和自主创新能力。这对推动中国新能源汽车行业的自主创新和培养学生综合创新能力具有双重重要意义。

本书由浅入深、理论联系实际、结构合理、文字精练、易于理解，并且其概念与物理现象相互协调，便于学生更好地理解和掌握所学内容。本书第一篇系统地介绍了学习新能源汽车技术所需掌握的基本知识和原理，第二篇阐述了新能源汽车核心部件的研发方法。本书以可产业化的新能源汽车为背景，分别讨论了纯电动汽车技术、混合动力汽车技术、燃料电池汽车技术、新能源汽车研发基础、整车控制器的研发、驱动电机及电机控制器的研发、锂离子动力电池及管理系统的研发、质子交换膜燃料电池建模和监控系统的研发等内容。本书除了注重知识的系统性和完整性以外，还特别注意工程应用与研发的紧密结合，力图把科研中的体会融入教材中。本书的显著特色有：①理论联系实际；②理论、研发和技术相互融合；③注重核心知识的提炼与掌握。

本书始于近十年来为东北大学本科开设的“汽车新技术”一课的讲义及实际科研项目的体会，经过逐年的积累与修改而成，因此在编写过程中，参考了国内外大量的相关文献和资料。在此，谨向所有文献作者表示衷心的感谢。

本书写作和出版过程得到柴天佑院士、东北大学同仁以及江苏振世达新能源汽车有限公司的鼓励和支持，作者谨表衷心感谢。同时，本书的出版得到国家自然科学基金（项目编号：51775103）和沈阳市科技基金（项目编号：F16-226-6-00）的资助，在此一并表示感谢。

鉴于作者知识和水平有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，敬请广大读者不吝批评、指正。

作 者

2017年10月

目 录

前言

第一篇 新能源汽车技术基础

第 1 章 新能源汽车概述	3
1.1 汽车工业技术的未来发展方向	3
1.1.1 先进内燃机技术	3
1.1.2 新能源汽车技术	4
1.1.3 车身及部件轻量化技术	6
1.1.4 车辆智能化技术	7
1.2 新能源汽车的定义与分类	9
1.2.1 新能源汽车的定义	9
1.2.2 新能源汽车的分类	9
1.3 新能源汽车发展概述	10
1.3.1 国外新能源汽车发展概述	10
1.3.2 国内新能源汽车发展概述	18
1.3.3 新能源汽车技术路线及关键技术	21
1.4 新能源汽车的性能指标	24
1.4.1 动力性能指标	24
1.4.2 续驶里程指标	25
1.4.3 安全性指标	25
1.5 本章小结	26
参考文献	26
第 2 章 纯电动汽车技术	27
2.1 纯电动汽车概述	27
2.1.1 纯电动汽车的定义	27
2.1.2 纯电动汽车的特点	27
2.1.3 纯电动汽车的分类	28
2.2 纯电动汽车的组成与原理	29
2.2.1 车身	29
2.2.2 底盘	31

2.2.3 动力电源系统	31
2.2.4 电力驱动系统	31
2.2.5 辅助系统	32
2.3 纯电动汽车关键技术	32
2.3.1 电机及控制器技术	32
2.3.2 电池及其管理技术	32
2.3.3 整车控制技术	33
2.4 纯电动汽车传动系统参数设计	34
2.4.1 驱动电机参数设计	34
2.4.2 传动比参数设计	37
2.4.3 动力电池参数设计	38
2.5 纯电动汽车动力性和经济性	40
2.5.1 纯电动汽车动力性	40
2.5.2 纯电动汽车能耗经济性	43
2.6 本章小结	50
参考文献	51
第3章 混合动力汽车技术	52
3.1 混合动力汽车概述	52
3.1.1 混合动力汽车的原理	52
3.1.2 混合动力汽车的节能机理	52
3.1.3 混合动力汽车的特点	53
3.1.4 混合动力汽车的发展趋势	55
3.2 混合动力汽车的分类	56
3.2.1 串联式混合动力汽车	57
3.2.2 并联式混合动力汽车	58
3.2.3 混联式混合动力汽车	59
3.3 混合动力汽车的耦合类型	60
3.3.1 动力耦合装置的功能	61
3.3.2 动力耦合装置的分类	61
3.3.3 动力耦合装置的发展趋势	63
3.4 混合动力总成功率参数匹配	64
3.4.1 混合动力客车功率匹配基本原则	64
3.4.2 混合动力车辆总功率匹配	65
3.4.3 混合动力车辆发动机参数匹配	67
3.4.4 电机系统主要参数匹配	69
3.4.5 深度混合动力客车电池参数匹配	70

3.5 混合动力汽车的能量管理与控制策略	71
3.5.1 基于规则的能量管理策略	72
3.5.2 基于瞬时优化的能量管理策略	73
3.5.3 基于全局优化的能量管理策略	76
3.5.4 问题和展望	78
3.6 本章小结	79
参考文献	80
第4章 燃料电池汽车技术	82
4.1 燃料电池汽车概述	82
4.1.1 燃料电池汽车发展概述	82
4.1.2 燃料电池汽车的特点	86
4.1.3 燃料电池汽车的分类	87
4.2 燃料电池汽车的组成与原理	88
4.2.1 PFC 型燃料电池汽车	88
4.2.2 FC+B 型燃料电池汽车	89
4.2.3 FC+C 型燃料电池汽车	90
4.2.4 FC+B+C 型燃料电池汽车	90
4.3 燃料电池的类型	91
4.3.1 质子交换膜燃料电池	91
4.3.2 碱性燃料电池	95
4.3.3 磷酸燃料电池	96
4.3.4 熔融碳酸盐燃料电池	97
4.3.5 固体氧化物燃料电池	99
4.3.6 直接甲醇燃料电池	101
4.4 燃料电池汽车传动系统的参数匹配	102
4.4.1 驱动电机参数匹配	102
4.4.2 燃料电池参数匹配	104
4.4.3 辅助动力源参数匹配	105
4.4.4 传动系统传动比匹配	106
4.5 燃料电池电动汽车能量控制策略	107
4.5.1 On/Off 控制策略	107
4.5.2 功率跟随控制策略	107
4.5.3 瞬时优化最佳能耗控制策略	109
4.6 本章小结	110
参考文献	110

第二篇 新能源汽车研发技术

第 5 章 新能源汽车研发基础	113
5.1 CAN 协议简介	113
5.1.1 CAN 协议概述	113
5.1.2 CAN 协议的特点	114
5.2 CAN 总线基本原理	115
5.2.1 CAN 总线的网络分层结构	115
5.2.2 CAN 总线的帧结构	118
5.2.3 CAN 总线的通信机制	122
5.2.4 CAN 总线的错误检测	122
5.3 SAE J1939 协议简介	124
5.3.1 SAE J1939 协议概述	124
5.3.2 SAE J1939 协议特点	125
5.3.3 SAE J1939 协议原理	125
5.4 实时操作系统与嵌入式实时操作系统	142
5.4.1 实时操作系统	142
5.4.2 嵌入式实时操作系统	144
5.5 μ C/OS-II 实时操作系统	145
5.5.1 μ C/OS-II 简介	145
5.5.2 μ C/OS-II 系统特点	146
5.5.3 μ C/OS-II 系统的任务	147
5.5.4 μ C/OS-II 系统的中断管理与时钟管理	158
5.5.5 μ C/OS-II 的内存管理	161
5.6 本章小结	163
参考文献	163
第 6 章 整车控制器的研发	164
6.1 整车控制器概述	164
6.2 整车控制器功能定义	166
6.2.1 整车控制器功能分析	166
6.2.2 整车控制器技术要求	167
6.2.3 整车控制器工作模式	168
6.3 整车控制策略	169
6.3.1 驱动控制策略	169
6.3.2 制动控制策略	171
6.3.3 安全控制策略	172

6.4 整车控制器硬件设计	174
6.4.1 电源电路设计	175
6.4.2 时钟电路设计	176
6.4.3 复位电路与 BDM 电路设计	177
6.4.4 开关信号处理电路设计	177
6.4.5 踏板信号处理电路设计	178
6.4.6 通信电路设计	179
6.5 整车控制器软件设计	181
6.5.1 整车控制器软件结构	181
6.5.2 整车控制器多任务管理	182
6.6 整车控制器硬件测试实验	192
6.6.1 ETAS 实时仿真系统硬件设计	193
6.6.2 ETAS 实时仿真系统软件设计	197
6.6.3 硬件测试仿真实验结果分析	199
6.7 本章小结	203
参考文献	203
第 7 章 驱动电机及电机控制器的研发	204
7.1 纯电动汽车驱动电机概述	204
7.1.1 纯电动汽车驱动电机类型	205
7.1.2 纯电动汽车驱动电机分布	206
7.2 永磁同步电机结构与工作原理	207
7.2.1 常用电机的分类	207
7.2.2 永磁同步电机的结构	209
7.2.3 永磁同步电机的工作原理	211
7.3 永磁同步电机常用控制方法	211
7.3.1 矢量控制	211
7.3.2 直接转矩控制	212
7.3.3 智能控制	213
7.4 永磁同步电机矢量控制	213
7.4.1 永磁同步电机矢量控制的基本原理	213
7.4.2 坐标变换	214
7.4.3 永磁同步电机的数学模型	217
7.4.4 基于转子磁场定向的矢量控制策略	220
7.4.5 空间矢量脉冲宽度调制	222
7.5 PMSM 矢量控制系统的 Simulink 仿真	231
7.5.1 矢量控制系统中各仿真模块的搭建	231

7.5.2 PMSM 矢量控制系统 Simulink 仿真模型	236
7.5.3 PMSM 矢量控制系统 Simulink 仿真与分析	238
7.6 PMSM 矢量控制系统的实现	241
7.6.1 英飞凌 XE164FN/XC2000 概述与开发平台介绍	241
7.6.2 电机控制器硬件模块	242
7.6.3 电机控制器软件模块	250
7.7 本章小结	261
参考文献	262
第 8 章 锂离子动力电池及管理系统的研发	263
8.1 锂离子动力电池概述	263
8.1.1 电动汽车对锂离子动力电池的要求	263
8.1.2 锂离子动力电池的工作原理	264
8.1.3 锂离子动力电池的种类	265
8.2 锂离子动力电池的基本参数	266
8.2.1 锂离子动力电池的物理参数	266
8.2.2 锂离子动力电池的电性能参数	266
8.2.3 锂离子动力电池的环境参数	270
8.2.4 锂离子动力电池的一致性参数	270
8.3 锂离子动力电池的建模与参数辨识	271
8.3.1 锂离子动力电池模型的类型	271
8.3.2 电池模型的参数辨识方法	273
8.3.3 应用实例	274
8.4 锂离子动力电池管理系统	280
8.4.1 基本构成与功能	280
8.4.2 数据采集功能开发	281
8.4.3 电池状态估计	286
8.4.4 均衡管理系统开发	292
8.4.5 热管理系统开发	294
8.4.6 应用实例	297
8.5 BMS 从板设计实例	301
8.5.1 BMS 系统结构	301
8.5.2 LMU 需求分析和总体设计	302
8.5.3 LMU 硬件设计	304
8.5.4 LMU 软件设计	313
8.6 本章小结	314
参考文献	314

第 9 章 质子交换膜燃料电池建模和监控系统的研发	315
9.1 PEMFC 系统简介	315
9.1.1 PEMFC 基本结构	315
9.1.2 氢燃料电池系统的工作原理	316
9.2 PEMFC 系统建模	316
9.2.1 电压模型	317
9.2.2 阴极模型	321
9.2.3 阳极模型	324
9.2.4 交换膜水合模型	326
9.2.5 辅助系统模型	328
9.3 PEMFC 空气供给系统的控制	333
9.3.1 PEMFC 空气供给系统的 PID 控制	333
9.3.2 基于模糊补偿的 PEMFC 空气供给系统 PID 控制	335
9.4 氢燃料电池的监控系统研发	338
9.4.1 PEMFC 监控系统的整体结构	339
9.4.2 下位机系统的设计	339
9.4.3 上位机系统的设计	347
9.5 本章小结	349
参考文献	349

第一篇 新能源汽车技术基础

第 1 章 新能源汽车概述

石油短缺、环境污染、气候变暖是全球汽车产业面对的共同挑战，发展新能源汽车已成为趋势，新能源汽车必将成为 21 世纪汽车工业发展的热点。《中国制造 2025》明确提出纯电动和插电式混合动力汽车、燃料电池电动汽车是国内未来重点发展的方向，并分别提出 2020 年和 2025 年的发展目标；继续支持电动汽车、燃料电池电动汽车发展，提升动力电池、驱动电机等核心技术的工程化和产业化能力，形成从关键零部件到整车的完整工业体系，推动新能源汽车同国际先进水平接轨。

1.1 汽车工业技术的未来发展方向

1.1.1 先进内燃机技术

内燃机的发展已经有 100 多年的历史，由于便捷、高效和运行可靠，已经被广泛应用于工农业生产的各个领域。但是，新能源汽车是以电化学技术为载体的，在实现更高的热效率（燃料电池热效率可以达到 50%）的同时，也实现了整车零排放或超低排放。而传统汽车的内燃机是以燃料的混合燃烧产生热能的方式工作的热机，无法实现零排放，也面临效率提升的瓶颈。因此，面对代表未来电驱动模式的电动汽车技术，内燃机技术面临被淘汰的巨大挑战。

但是，纯电动技术仍然需要面对动力电池成本、使用寿命、能量密度、生产一致性和精确控制等诸多难题，在相当长的时间内无法达到车辆常态运行的要求；而燃料电池技术在成本、环境适应性、可靠性、耐久性等方面需要解决的技术问题更多也更复杂，实现商业化尚无法准确预计时间表。而其他能源技术，包括气体燃料和混合动力，内燃机仍然是动力源。因此，在相当长的一段时间内，燃烧技术、尾气净化技术在不断提升的同时，高可靠性、低成本的内燃机仍然是性价比最高的动力源，仍然是汽车的首要选择。

尽管汽车界一致认为未来汽车的发展方向是纯电动或燃料电池，但是国外汽车公司并没有放弃发展内燃机技术，而是结合自身的情况实施“两条腿走路”的策略，即在研发新能源技术的同时，也积极推进先进内燃机技术的发展。其中，日本汽车企业重点发展以新型内燃机技术为载体的混合动力技术；美国汽车企业在积极推进纯电动增程技术的应用和燃料电池技术开发的同时，重点推进生物乙醇替代燃料技术；欧洲以大众、奔驰、宝马为代表的汽车企业在积极进行纯电动技术开发的同时，也在重点发展高效柴油机技术和生物柴油技术。

中国出台的新规为企业设定了每年油耗达标值,目标由松至紧。从2015年到2020年,中国工业和信息化部(以下简称工信部)为当年生产乘用车设立的平均油耗目标分别为每百公里6.9升、6.7升、6.4升、6升、5.5升和5升,年均降幅在6.2%左右。国家出台的相关政策也正在推进内燃机的发展。其中,传统内燃机不仅在节能技术提升上还有很大潜力,而且由于其遍布中国交通运输、工程机械、国防装备等领域的动力需求,节能影响会更为深远,因此传统内燃机仍是节能减排的主力。

近些年来,随着对内燃机工作过程的研究逐渐深入,在日益完善的电子精确控制技术的支撑下,内燃机技术在燃烧技术领域、尾气净化领域不断取得进步。汽油高压缸内直喷(gasoline direct injection, GDI)、柴油机高压共轨(common rail, CR)、变截面涡轮增压器(variable nozzle turbine, VNT)、废气再循环(exhaust gas recirculation, EGR)、发动机均质混合气压燃烧(homogeneous charge compression ignition, HCCI)等新技术不断实现产业化应用,内燃机的效率和排放控制水平不断提高^[1]。

我们也需要在不断提升内燃机技术的同时,结合中国新能源汽车的发展方向和实施策略,兼顾混合动力和纯电动增程技术的发展要求,开发适合混合动力专用的内燃机(例如,阿特金森循环汽油机)和适合增程式纯电动汽车发电、驱动需求的高效集成式内燃机。

1.1.2 新能源汽车技术

现在大多数的汽车厂家以及汽车技术研究中心已经开始或者正在规划开发新能源汽车。中国也已将继续发展新能源汽车列入“十三五”规划中。以能源的多元化为核心,新能源汽车技术开发主要有以下三大趋势。

1. 发展生物燃料

生物燃料,泛指由生物体组成或转化的液体、固体或气体燃料。不同于石油、煤炭、核能等传统燃料,生物燃料是新兴的可再生燃料,并且具有良好的储藏性和运输性,是可替代石油的新型燃料。目前,全世界范围内主要发展的生物燃料包括生物柴油、生物乙醇和生物丁醇。

自20世纪70年代以来,受传统能源价格、环境保护及全球气候变化的影响,世界各国日益重视生物燃料的开发。目前在全球范围内,美国是第一大生物燃料生产国,巴西其次^[2]。美国通过法律手段强制在汽车燃油中添加2%的生物柴油或5%的生物乙醇等生物燃料。2011年8月16日,美国推出一项5.1亿美元的计划,其目的是推动美国生物燃料发展。巴西是一个石油开采与生物乙醇生产大国,但早在1973年巴西便启动了乙醇代替石油发展道路。甘蔗是巴西生物乙醇的主要原料,在2006年之前巴西是世界上最大的生物乙醇生产国和出口国。巴西乙醇一般有两种提供方式,一种是体积分数为85%~100%的高浓度乙醇,另一种是在汽油中掺入体积分数为5%~25%的乙醇。2015年2月15日起,政府将乙醇掺混的体积分数由25%提高至27%。

在中国原油对外依存度不断增加,并且国内存在存粮需要消化的背景下,中国2002年前后开始推广用存粮做生物乙醇。中国玉米资源丰富,2006年产量1.44亿吨,位居世界第二,玉米秸秆年产量达6亿多吨。2016年10月28日,国家能源局印发《生物质

能发展“十三五”规划》。截至2015年,中国生物乙醇年产量约210万吨,生物柴油年产量约80万吨;规划提出到2020年中国生物乙醇产量达到400万吨,生物柴油200万吨^[3]。

在全球高度关注能源危机,关注可再生资源开发利用及国内生物乙醇消耗增加的大背景下,各企业竞相开发和投资以玉米为原料生产的生物乙醇。在汽油中掺入体积分数为10%的生物乙醇的方式已成为中国能源战略的方向之一。

2. 发展混合动力技术

十几年来,世界各大汽车产业集团陆续投入巨额资金研发电动汽车技术,目前均已从实验室开发试验阶段过渡到小批量生产阶段,并进一步转向大规模产业化批量生产阶段。但是,现阶段电动汽车关键部件之一的电池存在能量密度低、寿命短和价格高等问题,使电动汽车的性价比无法与传统的内燃机汽车相抗衡。在这种环境下,融合内燃机汽车和电动汽车各自优点的混合动力电动汽车成为当下最可行的产品方案,在世界范围内成为新型汽车发展的热点。

混合动力电动汽车将内燃机、电机与一定容量的蓄电池通过控制系统相组合,电机可补充提供车辆起步、加速时所需转矩,又可以存储吸收内燃机富余功率和车辆制动能量。混合动力系统效率很高,可以通过小排量发动机配合电机使用,达到良好的动力性,从而可大幅度降低油耗,减少污染物排放。而且混合动力汽车在电池的需求上比较低,能避免电池引起的诸多问题。混合动力汽车虽然没有实现零排放,但其动力性、经济性和排放等综合指标能满足当前严格的要求,可缓解汽车需求与环境保护及石油短缺的矛盾。混合动力汽车已成为新型动力汽车产业化的里程碑。

3. 发展燃料电池技术

燃料电池汽车是一种用车载燃料电池装置产生的电力作为动力的汽车。车载燃料电池装置所使用的燃料为高纯度氢气或含氢燃料经重整所得到的高含氢重整气。燃料电池汽车的工作原理是,作为燃料的氢在汽车搭载的燃料电池中,与大气中的氧气发生氧化还原化学反应,产生电能来带动电机工作,由电机带动汽车中的机械传动结构,进而带动汽车的前桥(或后桥)等行走机械结构工作,从而驱动电动汽车前进。与通常的电动汽车比较,其动力方面的不同在于燃料电池汽车用的电力来自车载燃料电池装置,而电动汽车所用的电力来自电网充电的蓄电池。因此,燃料电池汽车的关键是燃料电池。

燃料电池是一种能有效控制燃料和氧化剂的化学反应,并将其中的化学能直接转化为电能电化学装置,是一种把燃料中的化学能转换成电能能量转换器,被誉为继火电、水电及核电之外的第四种发电方式。燃料电池虽然名叫“电池”,但实际和电池是有区别的,电池属于储能器范畴,而燃料电池并不储能,本质上只是一个能量转换器,更像是一台“发电机”。与传统发电方式相比,燃料电池有其特殊之处。在反应过程中,燃料电池能量转换过程无明火燃烧活动,所以能量转换效率不受“卡诺循环”限制,除此之外,燃料电池还具有燃料多样化、噪声低、排气较清洁、对环境污染小、维修性好以及可靠性高等优点。

燃料电池汽车被普遍认为具有广阔的发展前景,因此美国、欧盟、日本和韩国都投