

本书第一版荣获
中国机械工业科学技术二等奖

先进电动汽车技术

陈全世 主编 ■ 朱家珏 田光宇 副主编

3

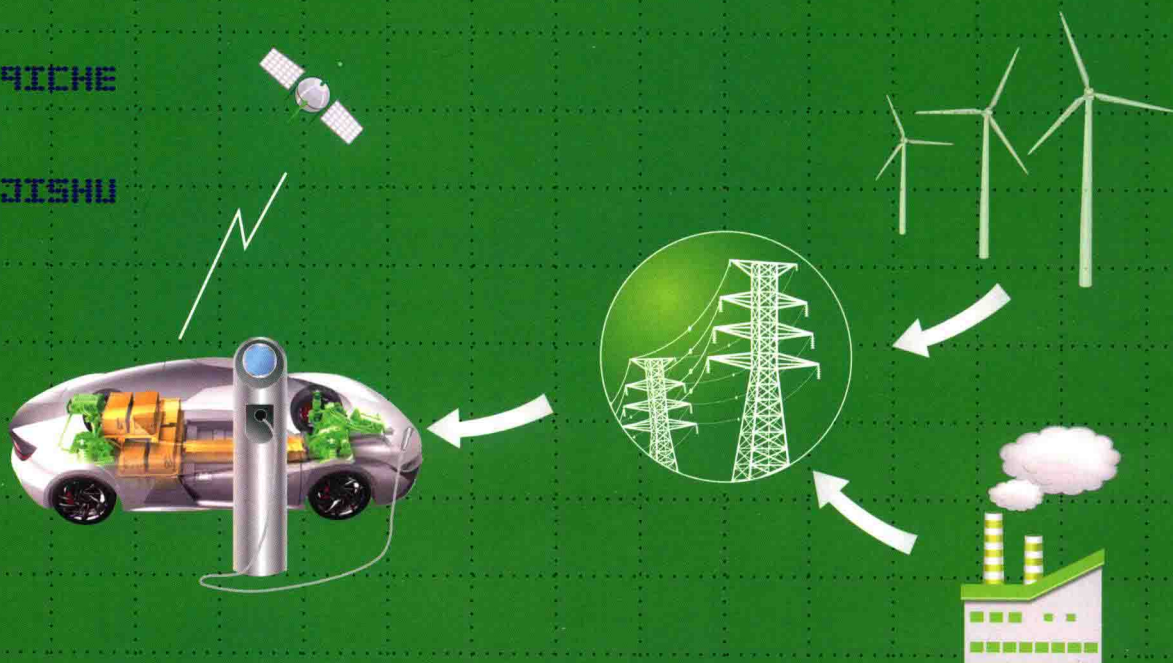
第三版
The Third Edition

XIANGJIAN

DIANDONG

QICHE

JISHU



化学工业出版社

本书第一版荣获
中国机械工业科学技术二等奖

先进电动汽车技术

陈全世 主编 ■ 朱家琰 田光宇 副主编

3

第三版
The Third Edition



化学工业出版社

· 北京 ·

定价：38.00元

本书是作者所在研究团队（清华大学电动车辆研究室）多年来从事纯电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车的工作体会和经验总结，作者期望通过本书与广大读者交流与分享。

本书第二版自出版以来，电动汽车技术取得更多新发展，本次第三版进行了全面修订，全新补充内容包括：驱动电机系统、纯电动车辆、燃料电池技术与车辆、自动驾驶、高级驾驶员辅助系统和车联网，以及国内外新电动汽车标准与规范等，使本书技术内容更先进、更实用。

本书可供广大从事电动汽车相关领域工程技术人员、管理人员和科研人员参考，也可作为高等院校车辆工程专业本科生和研究生的选修课教材，还可作为其他专业如机械、电机、材料等本科生和研究生教学参考书使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

先进电动汽车技术/陈全世主编. —3 版. —北京:
化学工业出版社, 2017. 9

ISBN 978-7-122-30288-5

I. ①先… II. ①陈… III. ①电动汽车 IV. ①U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 174259 号

责任编辑：朱 彤

责任校对：王 静

文字编辑：陈 喆

装帧设计：刘丽华

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：三河市航远印刷有限公司

装 订：三河市瞰发装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 21¼ 字数 562 千字 2018 年 1 月北京第 3 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：78.00 元

版权所有 违者必究

前 言

《先进电动汽车技术》一书初版自 2007 年出版以后，继 2009 年被评为化学工业出版社优秀图书一等奖，2010 年又被评为机械工业科学技术二等奖。经 2012 年修订后，于 2013 年 1 月又出版了第二版，承蒙关心和厚爱，仍受广大读者关注和欢迎。

我国新能源汽车产业在政府各项政策的推动下，取得了快速发展。中国汽车工业协会的数据显示，2016 年我国新能源汽车销量达到 50.7 万辆，保有量达到了 100 万辆，稳居全球第一名。全国的公共充电桩运营数字也超过了 15 万个。发展电动汽车是我国能源和环保战略的一个重要方向，中国电动汽车仍处于持续发展阶段，产业即将进入快速发展的机遇期，并开始步入创新之路，现在我国电动汽车的驱动电机、电池系统、电控等关键技术以及整车技术已经取得了显著进步。

随着汽车技术的飞速发展，电动汽车底盘结构、混合动力及氢燃料电池汽车技术、高级驾驶员辅助系统、车联网和自动驾驶技术等新趋势、新方向领域的课题也已被我国相关部门专门列入重点研发专项，电动汽车产业的商业化创新模式也有了飞速发展。为了满足上述要求，第三版对原第二版中的每一章内容都进行了认真审查和更新，尽可能将新的技术和创新成果补充到第三版之中，全新补充内容包括：驱动电机系统、纯电动车辆、燃料电池技术与车辆、自动驾驶、高级驾驶员辅助系统和车联网，以及国内外全新电动汽车标准与规范等，以备读者参考。

由于本次补充的许多内容是近几年来迅速发展的新技术，许多关键技术仍在研究、发展和解决中，限于编著者的知识和水平，不足之处在所难免，敬请专家和读者及时予以批评指正，我们在不胜感激的同时，将在后续的版本中加以补充、修改和更正。

编著者

2017 年 8 月

第一版前言

汽车在全球保有量的不断增加使人类面临能源短缺、全球变暖、空气质量水平下降等诸多挑战,同时也推动汽车自身技术的发展,为此汽车工程师正在不断研究降低油耗的方法,寻求各种代用燃料以及开发不用或少用汽油的新型车辆;越来越多的人士已认识到各种类型电动汽车和燃料电池汽车是实现清洁汽车的解决方案,全世界的汽车业界也正在为此努力并投入巨大的资金和人力。

本书所论述的先进电动汽车绝不是一百多年前的陈旧电动汽车,或电瓶车技术的重复,它是20世纪末直到目前研究开发出的集机械、电子、汽车、电机、智能控制、化学电源、计算机、新材料等科学领域和工程技术中最新成果于一身,是多种高新技术凝聚的结果。先进电动汽车包括以车载储能装置(包括各种蓄电池、超级电容等)为动力源的纯电动汽车;以电驱动系统(包括车载储能装置和电机)与传统内燃机(包括微型涡轮发动机、斯特林发动机等热机)混合的混合动力电动汽车(Hybrid Electric Vehicle, HEV);以氢燃料电池(Fuel Cell)为动力源的燃料电池电动汽车(FCEV)。

电动汽车的最大特点是在行驶过程中很少甚至没有排放污染,热辐射低,噪声低且环境友好。电动汽车可应用多种能源,能节省甚至不消耗汽油或柴油,解决汽车的能源需求问题。毫无疑问,电动汽车是一种节能、环保、可持续发展的新型交通工具,具有广阔的发展前景。

本书主要内容是作者所在的科研团队——清华大学电动车研究室,在国家“八五”~“十五”计划期间的十几年内所承担的国家电动汽车重大项目研究基础上,取得的电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车研究工作的体会和成果。编者力图通过本书将多年的各种研究实践和心得,与有志于从事和希望深入了解先进电动汽车技术的人士进行交流,并希望无保留地与广大读者分享,以推动我国先进电动汽车的技术进步。

本书主要介绍电动汽车的基本构成;关键部件,包括电机及其控制系统、蓄电池、超级电容、氢燃料电池的最新技术;共性技术,电动汽车的高低压电路、整车控制系统、充电站及制氢加氢系统等方面研究进展和发展趋势;3种类型的电动汽车,纯电动汽车、混合动力电动汽车、氢燃料电池电动汽车的结构特点和适用范围;最后介绍了有关电动汽车的标准、法规及相关规范。

本书共分14章。第1、7章由朱家珺编写,第2章由仇斌编写,第3章由宋建国编写,第4章由林成涛、韩晓东编写,第5章由陈勇编写,第6章由常秋英编写,第8章由黄勇编写,第9、10章由朱家珺、陈全世编写,第11章由陈全世编写,第12章由田光宇编写,第13章的13.1~13.5由钱良国编写,第14章由施双蓉编写,其余章节由陈全世编写并担任本书主编。朱家珺、田光宇担任本书副主编。瞿文龙教授对第3章进行了认真审阅,并提出宝贵意见;谢起成教授和博士后江发潮、晏伟光、王健、陈树勇对全书的内容进行系统审阅,提供了有价值的资料,并对插图和参考文献进行核对和补充。清华大学电动车研究室的博士研究生朱元、齐占宁,硕士研究生孙鸿航、李宗华、陈昊、赵立安、张涵、彭涛、李海晨、管华、熊建、梁伟铭、刘国权、黄文华、付正阳、王波、

傅春江、项晓波、周伟波、李佳、吴临政、曾帆、周强、张宾、裴晟、赵广平等为本书的写作提供了有价值的资料和热情帮助，在此谨表示衷心感谢。本书的诞生也是清华大学电动车研究室集体努力的结果。

由于电动汽车技术是近十多年来迅速发展的新技术,许多关键技术问题正在研究和解决中,同时由于作者知识和水平所限,不足之处在所难免,敬请广大专家和读者批评指正。

编者

2007 年 3 月

第二版前言

《先进电动汽车技术》第一版自 2007 年 3 月出版以来, 恰逢国内外大力研发和推广应用以电动汽车为代表的新能源汽车浪潮, 承蒙广大读者关心和厚爱, 在社会和读者中产生了积极反响。该书 2009 年被评为第十届中国石油和化学工业优秀科技图书一等奖, 2010 年本书荣获中国机械工业科学技术二等奖。

在第一版出版后的 5 年来, 电动汽车技术开始从研发逐渐走向产业化, 许多新技术、新材料、新结构、新车型不断涌现, 电动汽车产业的商业化创新模式也有了飞速发展, 因此, 对第一版中的内容就有了更新要求。本书对每一章内容都进行认真审查和更新, 尽可能将最新技术和创新成果反映在本书中。

动力电池是电动汽车产业化的最大瓶颈之一, 也是近期发展最快、成果最多的领域, 因此本书中第 4 章动力电池系统增加新内容最多, 包括目前应用广泛的正极材料为磷酸铁锂、锰酸锂、三元(锰-钴-镍)锂离子电池的性能对比, 以及聚合物锂离子电池、电容型锂离子电池等新型锂离子电池。本书还对全球锂资源储藏和生产情况进行了简要介绍。此外, 本书还简要介绍了锂-空气电池的基本原理 and 研发情况。

纯电动汽车、插电式混合动力汽车是近期发展最快的领域, 除了乘用车、商用车以外, 纯电动工程车、特种车在节能减排的总目标下, 也取得了可喜进展。在本书第 9 章纯电动车辆中, 对此进行了补充介绍。

充电系统是关系到电动汽车产业化的关键瓶颈, 也是电动汽车推广应用过程中“利益相关方”最多的领域, 包括汽车制造商、动力电池生产商、能源(电力)供应商、中间服务商和各级政府。本书第 13 章中不但介绍了充电系统的关键技术, 而且对国内外充电系统建设、运营管理模式进行了介绍, 以期引起读者和各“利益相关方”的关注。

技术标准和规范是电动汽车产业化的重要支撑条件。国内外在电动汽车标准方面的竞争也非常激烈, 第 14 章对国内外电动汽车标准体系进行了比较详细的介绍, 并收集了迄今为止比较全面的国内外电动汽车标准目录, 以供读者查询。

在本书的编写过程中得到了上海教育基金会、威海东生能源科技有限公司、北京精进电驱动有限公司、朝阳立源新能源有限公司、山东沂星电动汽车有限公司、威海广泰空港设备股份公司、上海(北京)电巴新能源科技有限公司、Better Place 中国业务部、北京民航协发机场设备有限公司等单位和个人的大力协助, 他们提供了宝贵的技术资料, 在此一并表示谢意。

电动汽车技术是近几年来迅速发展的新技术, 许多关键技术问题正在研究和解决当中。由于编者知识和水平有限, 不足之处在所难免, 敬请专家和读者批评指正。

编者

2012 年 10 月

目 录

第 1 章 概述	1	3.2.1 直流电机工作原理	23
1.1 电动汽车	1	3.2.2 直流电机数学方程	25
1.1.1 电动汽车的定义	1	3.2.3 直流电机机械特性分析	26
1.1.2 电动车辆	1	3.2.4 直流电机控制器原理	27
1.1.3 新能源汽车	1	3.2.5 直流电机驱动系统	28
1.2 新能源汽车在国外的的发展概述	2	3.3 交流感应电机驱动系统	30
1.2.1 各国的优惠政策概述	2	3.3.1 交流感应电机工作原理	30
1.2.2 美国对新能源汽车的激励政策	2	3.3.2 交流感应电机在额定电压和额定 频率下的转矩-转速特性	32
1.2.3 美国加州的零排放政策和零排放 汽车积分	3	3.3.3 交流驱动系统	34
1.2.4 日本“新一代汽车”政策及发展 概况	3	3.3.4 基于感应电机稳态模型的变压变 频下交流电机系统的机械特性	34
1.3 国内新能源汽车产业的发展情况	4	3.3.5 交流感应电机矢量控制算法	36
1.3.1 新能源汽车产业发展的原动力	4	3.3.6 交流感应电机直接转矩控制算法	39
1.3.2 我国政府发展新能源汽车的战略和 优惠政策	5	3.3.7 交流感应电机驱动系统的特点	40
1.3.3 我国新能源汽车产业的快速发展	5	3.4 交流永磁电机驱动系统	40
1.4 汽车工业和技术的未来发展方向	6	3.4.1 交流永磁同步电机驱动系统	40
参考文献	6	3.4.2 永磁同步电机工作原理	41
第 2 章 整车行驶工况与性能匹配	7	3.4.3 永磁同步电机转矩-转速特性	44
2.1 汽车行驶工况概述	7	3.4.4 无刷直流电机工作原理	44
2.2 国外汽车行驶工况介绍	8	3.4.5 无刷直流电机数学模型及控制 系统	44
2.2.1 美国行驶工况	8	3.4.6 交流永磁电机驱动系统特点	47
2.2.2 欧洲行驶工况	10	3.5 开关磁阻电动机	47
2.2.3 日本行驶工况	10	3.5.1 开关磁阻电机工作原理	47
2.2.4 检测循环工况的动态化趋势	11	3.5.2 开关磁阻电动机的数学模型	48
2.3 我国行驶工况的发展状况	11	3.5.3 电动汽车开关磁阻电机控制 系统	49
2.4 行驶工况的特征分析	12	3.5.4 开关磁阻电机驱动系统的特点	49
2.5 汽车行驶工况开发方法	14	3.6 电动车辆电机驱动系统设计概要	50
2.5.1 开发规划	14	3.6.1 概述	50
2.5.2 数据的获取	15	3.6.2 电动汽车驱动电机的工作制	50
2.5.3 数据的分析与处理	15	3.6.3 汽车驱动电机系统的转矩-转速特 性确定	52
2.5.4 工况的解析与合成	16	3.6.4 工程车辆驱动电机系统的转矩-转 速特性确定	53
2.5.5 工况的验证	16	参考文献	54
2.6 行驶工况在整车性能分析和匹配研究 中的应用	17	第 4 章 动力电池系统	55
2.6.1 确定动力性能指标	17	4.1 概述	55
2.6.2 整车参数匹配与仿真	17	4.2 动力电池的基本术语	56
2.6.3 整车能量消耗和排放试验	18	4.3 电动车辆对电池性能的要求	57
参考文献	19	4.3.1 纯电动汽车对电池的要求	58
第 3 章 驱动电机及其控制系统	20	4.3.2 混合动力汽车对电池的工作要求	58
3.1 概述	20		
3.2 直流电机驱动系统	23		

4.3.3 可外接充电式混合动力汽车 (PHEV)	59	5.6.1 飞轮储能装置的结构及原理	100
对电池的工作要求	59	5.6.2 飞轮储能装置与其他储能装置的比较	102
4.3.4 电动车用电池的具体指标要求	59	5.6.3 飞轮储能装置发展现状	102
举例	59	5.6.4 飞轮储能装置关键技术	104
4.4 电动车用电池的主要种类及特点	61	参考文献	105
4.4.1 铅酸电池	61	第6章 质子交换膜燃料电池	106
4.4.2 镍氢电池	62	6.1 燃料电池概述	106
4.4.3 ZEBRA 电池	63	6.1.1 燃料电池的分类	106
4.4.4 锂离子电池	64	6.1.2 车用燃料电池及其关键技术	107
4.4.5 锂空气电池	66	6.1.3 燃料电池的性能指标	109
4.4.6 锂资源	68	6.2 质子交换膜燃料电池的工作原理	110
4.5 电池测试方法	69	6.3 膜电极	111
4.5.1 单体、模块与电池组	69	6.3.1 聚合物电解质膜	112
4.5.2 电动汽车动力电池国内标准	69	6.3.2 电催化剂	115
4.5.3 国外动力电池的试验方法	69	6.4 双极板	116
4.6 电池管理系统	70	6.5 燃料电池的水管理和热管理	118
4.6.1 电池管理系统概述	70	6.5.1 燃料电池的水管理	118
4.6.2 电动汽车电池管理系统举例	72	6.5.2 燃料电池的热管理	121
4.7 电动车用电池管理的关键技术	72	6.6 增压式燃料电池和常压式燃料电池	122
4.7.1 电池模型应用	72	6.6.1 增压式燃料电池	122
4.7.2 SOC 估计	76	6.6.2 常压式燃料电池	124
4.7.3 电池组热管理	78	6.7 燃料电池的相关计算	126
4.8 动力电池技术前景展望	81	6.7.1 燃料电池单体的电压及效率的计算	126
4.8.1 电动汽车动力电池类别	81	6.7.2 空气流量计算	129
4.8.2 电容型电池	81	6.7.3 氢气流量	129
4.8.3 聚合物锂离子电池	82	6.7.4 水的生成量计算	130
4.8.4 石墨烯表面驱动锂离子交换	84	6.8 燃料电池技术的发展	130
4.8.5 动力电池的发展展望	84	6.8.1 面向示范和产品验证的燃料电池系统开发	130
参考文献	85	6.8.2 下一代燃料电池系统研究与开发	130
第5章 超级电容与飞轮储能装置	87	6.8.3 车载储氢与高压加注关键技术及装备研发	131
5.1 超级电容的研究现状	87	6.8.4 高效低成本制氢技术及储氢装置研发	131
5.2 超级电容的储能机理及分类	88	参考文献	131
5.2.1 超级电容的储能机理	88	第7章 电动助力转向、制动及其他电	
5.2.2 超级电容的分类	89	动化辅助系统	133
5.3 碳镍体系超级电容	91	7.1 电动助力转向系统	133
5.3.1 充电过程	91	7.1.1 电动助力转向系统概述	133
5.3.2 放电过程	91	7.1.2 电动助力转向系统的分类	133
5.4 超级电容的模型	92	7.2 用于电动车辆的气压制动系统	139
5.4.1 超级电容的理论模型	92	7.2.1 电动车辆的空气压缩机控制回路	139
5.4.2 超级电容等效电路模型	93	7.2.2 电动制动空气压缩机	140
5.5 超级电容在电动汽车上的应用	96		
5.5.1 超级电容与动力电池的比较	96		
5.5.2 超级电容组的电压均衡问题	96		
5.5.3 超级电容在车辆上的应用	97		
5.5.4 车用超级电容的发展方向	98		
5.6 飞轮储能装置	99		

7.3 电动制动器 (EMB)	142
7.4 电动空调制冷压缩机	143
7.4.1 制冷方式	143
7.4.2 电动压缩机驱动方式	146
7.4.3 高效节能压缩机的选用	147
参考文献	149

第8章 电动汽车的电气系统

8.1 电气系统概述	150
8.1.1 低压电气的控制逻辑	150
8.1.2 高压电气系统	150
8.2 电源变换器	151
8.2.1 电动汽车中的电源变换器	151
8.2.2 降压变换器	152
8.2.3 升压变换器	153
8.2.4 双向电源变换器	154
8.3 电气系统的电磁兼容性	156
8.3.1 电磁兼容概述	156
8.3.2 电磁噪声的分析	156
8.3.3 电磁噪声的传播	158
8.3.4 减少电磁干扰的主要措施	159
8.4 电动汽车的电气安全技术	163
8.4.1 电气绝缘检测的一般方法	163
8.4.2 电动汽车电气绝缘性能的描述	164
8.4.3 绝缘电阻检测原理	164
参考文献	165

第9章 纯电动车辆

9.1 纯电动车辆概述	166
9.2 美国的电动汽车计划	167
9.2.1 美国通用汽车公司的 EV-1 纯电动轿车	167
9.2.2 美国特斯拉汽车公司的纯电动 动车	169
9.3 法国的电动汽车发展历程和标致-雪铁 龙 (PSA) 集团的纯电动轿车	176
9.4 德国的纯电动汽车	176
9.4.1 奔驰公司的纯电动微型车 Smart	176
9.4.2 宝马 (BMW) 公司的纯电动 汽车 i3	177
9.5 日本的纯电动汽车研发概况	177
9.6 中国的纯电动汽车和电动汽车示范 城市	178
9.7 轻型 (低速) 电动车	179
9.7.1 车型和用途简介	179
9.7.2 中小型电动牵引车	182
9.7.3 轻型电动车的一般结构	182
9.7.4 四轮轻型电动车的安全设计	183

标准	185
9.8 机场地面支持与服务电动车辆	186
9.8.1 概述	186
9.8.2 我国近年开发的机场地面支持与 服务电动车辆	186
参考文献	190

第10章 混合动力电动汽车

10.1 混合动力电动汽车概述	191
10.2 传统内燃机车辆的能量利用情况	192
10.3 混合动力驱动系统的节能潜力	194
10.4 混合动力汽车的排放问题	195
10.5 混合动力电动车的分类	195
10.5.1 串联混合动力系统	197
10.5.2 并联混合动力系统	198
10.5.3 混联式混合动力电动车	201
10.6 混合动力电动车的能量管理与控制 策略	205
10.6.1 串联式混合动力系统的工作 模式	205
10.6.2 并联式混合动力系统的工作 模式	206
10.6.3 混合动力系统的能量管理 策略	206
10.7 插电式混合动力汽车 (PHEV)	207
10.7.1 PHEV 的发展背景	207
10.7.2 PHEV 的工作模式	208
10.7.3 PHEV 的研发现状	208
10.7.4 当前 PHEV 研究的主要问题	212
10.8 不同类型混合动力车与传统汽油车 总效率的比较	214
参考文献	214

第11章 燃料电池汽车

11.1 燃料电池汽车的基本结构	216
11.2 燃料电池汽车动力系统的参数 匹配方法	218
11.2.1 理想的动力驱动系统的参数优化 匹配方法	218
11.2.2 实用的动力驱动系统的参数优化 匹配方法	219
11.2.3 整车参数、动力性指标与目标 工况	221
11.3 燃料电池汽车燃料经济性的计算	221
11.3.1 燃料电池系统氢气消耗量的 计量方法	221
11.3.2 蓄电池等效氢气消耗量的折算	223
11.4 燃料电池汽车动力驱动系统的参数 匹配举例	225

11.4.1	车辆行驶需求功率及功率谱分析	225	12.4.1	CAN 总线及其应用	271
11.4.2	驱动电机参数的选择	228	12.4.2	TTCAN 协议及通信实时性分析	273
11.5	传动系速比的选择	231	12.4.3	FlexRay 总线及其应用	276
11.5.1	传动系最小传动比的选择	232	12.5	整车容错控制系统	278
11.5.2	传动系最大传动比的选择	232	12.5.1	容错单元及容错控制系统	279
11.5.3	固定速比齿轮传动系的传动比选择	232	12.5.2	容错的 CAN 通信系统	281
11.6	动力源参数匹配与系统构型分析	234	12.6	汽车驾驶新技术——自动驾驶、高级驾驶员辅助系统和车联网	283
11.6.1	双动力源之间的基本能量分配策略	234	12.6.1	自动驾驶	283
11.6.2	“FC+B ₂ DC/DC (功率混合型)”构型的能量分配策略	234	12.6.2	先进驾驶员辅助系统	287
11.6.3	“FC ₂ DC/DC+B (能量混合型)”构型的能量分配策略	236	12.6.3	车联网	288
11.6.4	燃料电池系统的特性参数	237	参考文献		289
11.6.5	蓄电池系统的参数选择	237	第 13 章	充电装置与氢系统基础设施	290
11.7	国外燃料电池汽车的研究进展	238	13.1	充电装置与电动汽车	290
11.7.1	总体进展情况	238	13.2	电动汽车充电装置的分类	291
11.7.2	日本丰田汽车公司的燃料电池汽车	240	13.3	电动汽车充电技术和充电装置	293
11.7.3	日本本田汽车公司的氢燃料电池车	242	13.4	电动汽车充电模式的选择	294
11.7.4	德国大众汽车公司的燃料电池汽车	244	13.4.1	充电站的主要结构和功能	294
11.7.5	通用汽车公司的最新概念车“自主魔力”	247	13.4.2	电动汽车的充电方式	294
11.8	国内燃料电池汽车的研究进展	248	13.4.3	几种电动汽车充换电模式简介	295
11.8.1	燃料电池轿车动力系统技术平台与整车研发	249	13.5	电动汽车充电装置的展望	297
11.8.2	燃料电池客车动力系统技术平台与整车研发	249	13.6	燃料电池汽车和氢能	298
参考文献		250	13.6.1	燃料电池和氢能	298
第 12 章	整车控制与系统仿真	251	13.6.2	氢的基本性质	298
12.1	整车控制系统及其功能分析	251	13.7	氢的制取	299
12.1.1	控制对象	251	13.7.1	电解水制氢	300
12.1.2	整车控制系统结构	252	13.7.2	天然气蒸汽重整制氢	300
12.1.3	整车控制器功能	253	13.7.3	来自焦化厂、氯碱工厂或石油精炼厂的副产品氢	301
12.2	整车控制器开发	254	13.7.4	集中与分布制氢的氢成本比较	302
12.2.1	开发模式	254	13.8	加氢站构成与系统方案	302
12.2.2	硬件在环开发系统	256	13.8.1	加氢站组成	302
12.2.3	仿真模型	258	13.8.2	加氢站系统类型	303
12.2.4	快速控制器原型	263	13.8.3	加氢机	304
12.3	能量管理策略及其优化	265	13.8.4	加氢站建设成本	305
12.3.1	混联式混合动力系统	266	13.8.5	全球主要燃料电池大客车示范项目的加氢站	306
12.3.2	燃料电池串联式系统	268	13.9	氢安全	311
12.4	整车通信系统	270	参考文献		312
			第 14 章	电动汽车标准与规范	314
			14.1	我国电动汽车标准的制定	314
			14.2	国外电动车辆标准化组织及所制定的标准简介	315
			14.2.1	国际标准化组织	315
			14.2.2	国际电工委员会 (IEC)	316

14.2.3	欧洲标准化技术委员会/电驱动道路车辆技术委员会	317
14.2.4	联合国世界车辆法规协调论坛 (UN/WP29)	317
14.2.5	美国汽车工程师学会	318
14.2.6	美国电动运输协会标准	319
14.2.7	日本工业标准调查会 (JISC)	319
附录	我国已经发布的电动汽车和电动摩托车相关标准	320
附录 1	我国已经发布的电动汽车和电动摩托车相关标准	320
附录 2	国外电动汽车相关标准	321
参考文献		327

14.2.8	日本电动车辆协会	319
附录		320
附录 1	我国已经发布的电动汽车和电动摩托车相关标准	320
附录 2	国外电动汽车相关标准	321
参考文献		327

第1章 概述

1.1 电动汽车

1.1.1 电动汽车的定义

根据国家标准 GB/T 19596—2004《电动汽车术语》(3.1.1)的规定,下述汽车总称为电动汽车 [Electric Vehicle (EV)]。

纯电动汽车 [Battery Electric Vehicle (BEV)] 是由电动机驱动的汽车。电动机的驱动电能来源于车载可充电蓄电池或其他能量储存装置。

混合动力(电动)汽车 [Hybrid Electric Vehicle (HEV)] 是指能够至少从下述两类车载储存的能量中获得动力的汽车:

① 可消耗的燃料;

② 可再充电能/能量储存装置。

燃料电池(电动)汽车 [Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)] 是指以燃料电池作为动力源的汽车。

本书中所论述的电动汽车包括以上三种类型的电动汽车。

1.1.2 电动车辆

电动车辆迄今还没有一个公认的统一的定义,一般是指以电动机驱动行驶的车辆。它包括从公共和专用电网中获得电力的车辆,如电动火车、地铁、轻轨电车、有轨和无轨电车,即我们常说的“电车”。另外一种是指从车载储存电源(包括蓄电池、超级电容、燃料电池、飞轮电池和车载发电机组等)获得电能,以电机驱动的车辆,如低速的工业用电动车(即我们常说的电瓶车)、机场、码头、车站、仓库用的电动车、电动叉车、残疾人用车、高尔夫球场用车、观光游览用车、电动自行车以及一些专用车。这些“电动车辆”一般不必满足道路交通安全法规(GB 7258—2012《机动车运行安全技术条件》)对汽车的各项要求且不能获许在正规道路上行驶。

1.1.3 新能源汽车

新能源汽车的定义和范围:

关于新能源汽车的定义和范围,业界一直存在争议。由国家工业和信息化部制定,2009年7月1日起施行的《新能源汽车生产企业及产品准入管理规则》第三条中规定:“本规则所称新能源汽车,是指采用非常规的车用燃料作为动力来源(或使用常规的车用燃料、采用新型车载动力装置),综合车辆的动力控制和驱动方面的先进技术,形成的技术原理先进、具有新技术、新结构的汽车。”

新能源汽车包括混合动力汽车、纯电动汽车(BEV,包括太阳能汽车)、燃料电池电动汽车(FCEV)、氢发动机汽车、其他新能源(如高效储能器、二甲醚)汽车等各类别产品。”

国务院在2012年6月28日公布的《节能与新能源汽车产业发展规划(2012~2020年)》中提出:“新能源汽车是指采用新型动力系统,完全或主要依靠新型能源驱动的汽车,本规划所指新能源汽车主要包括纯电动汽车、插电式混合动力汽车及燃料电池汽车。”

本书中叙述的新能源汽车是指后者,即纯电动汽车、插电式(包括增程式)混合动力汽车和燃料电池汽车,而非插电的混合动力汽车(HEV)则属于节能汽车范畴。

1.2 新能源汽车在国外的概述

世界各国政府都在实施新能源汽车计划,从而减少燃油消耗,减少对气候产生影响的排放物和减少区域空气污染,同时在这一新兴技术领域取得行业领先地位。采用了许多既结合本国实际又切实可行的优惠政策,促进了新能源汽车技术的发展和市场推广应用。

1.2.1 各国的优惠政策概述

新能源汽车产业作为新生事物,前期发展需要政府的扶持。世界主要国家都相继出台了各种类型的支持政策,从不同方面推动新能源汽车产业的发展。纵观国内外各国政府的支持政策,可以大体分为4大类、41种。

4大类包括生产、购置、使用和基础设施,其中有直接资金拨付的货币类和非货币类优惠政策。

生产类激励政策:主要指对新能源汽车生产环节发生作用的激励政策,例如,地方政策为鼓励本地新能源汽车企业开发和生产高质量的、更适合消费者需求的车型,对企业的生产/销售方面予以奖励。美国加州的零排放政策以及欧美广泛采用的碳排放限额与积分交易计划,这两种政策对于汽车生产商的影响较大。

购置类激励政策:主要指对车辆的购置环节和购置行为发生作用的激励政策,主要包括:购置价格补贴、购置费减免、销售网点建设补贴等。这类政策对消费者选购燃油车或者新能源汽车的决策产生一定影响。

使用类激励政策:指政府针对车辆使用过程推出的、旨在提高车辆使用便利性的激励政策,主要有:电价优惠/补贴、车辆使用费税减免、公共充电设施免费、有权使用专用车道、不限号出行、减免道路桥梁通行费、车辆检测费用、减免/车检专用通道、保险费用优惠、出租车运营补贴、电池回收利用补贴等。

基础设施类激励政策:政府为加快基础设施建设和运营,实现城市充电基础设施适度超前建设目标所采用的激励政策,主要有:基础设施建设直通窗口、经费补贴、用地优先满足、专用停车位补贴、公共充电桩在线服务管理系统等。

1.2.2 美国对新能源汽车的激励政策

美国对新能源汽车的激励政策尤为多种多样。不仅是联邦政府,许多州州府、地方城市、电力公司和汽车制造商也都在促进民众认识和购买先进的新能源汽车并辅以必要的管理、充电设施和财政支持。各种各样的激励政策能够使新能源汽车更加受到消费者的青睐,无论是直接补贴,还是间接补贴,所有这些措施都通过节约货币成本和时间来降低车主的总体成本。

美国联邦政府的电动汽车推进措施如下:根据美国联邦政府管理方案,电池容量 $\geq 5\text{kW}\cdot\text{h}$ 的插电式混合动力车可获得每辆车2500美元的免税额,免费额度按417美元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ 的标准递增;对于电池容量在 $16\text{kW}\cdot\text{h}$ 或以上车辆,单车最高可免税7500美元。这些联邦政府的激励政策在各州和各城市都是统一实施的。此外,各州和各个城市还有自己的激励政策。

美国有些州对纯电动汽车(BEV)和插电式混合动力汽车(PHEV)都大力实施激励政策,如科罗拉多州、加利福尼亚(以下全书简称加州)州、马里兰州、伊利诺伊州、德克萨斯州、马萨诸塞州和宾夕法尼亚州。各州的激励政策有很大差异。对于大部分州而言,最主

要的货币化收益就是补贴。另外两项能够带来明显货币化收益的就是使用公用充电装置和拼车专用道。

1.2.3 美国加州的零排放政策和零排放汽车积分

美国加州曾经有过最堵塞的交通和最严重的空气污染。20 世纪 30 年代，加州的人口少于 600 万，但汽车保有量突破 200 万辆，深受交通问题和环境问题的困扰。在美国联邦政府出台国家空气质量管理政策前，加州率先出台该州的空气质量管理法案。其最引人注目的一项举措是 20 世纪 90 年代推出的零排放车政策，建立了通过政策干预的手段促进低排放和零排放汽车的技术革新与推广应用机制。该机制通过强制规定大型汽车生产商零排放汽车销售比例，用政策手段赋予车企生产销售零排放汽车的责任，迫使车企推广零排放汽车；同时引入零排放汽车积分，并允许该积分交易，构建市场机制，一方面使完不成积分目标的车企通过购买积分而达标；另一方面使零排放车企可以通过积分交易获取部分资金，从而达到优化资源配置的目的。此外，该机制还制定了有力的惩罚办法，来保证计划能够顺利推行。该政策经过 20 多年来的不断革新，现行的政策与法规取得了非常明显的效果。随着现在技术快速发展和成熟，电动汽车零部件供应链已经基本形成，全球几乎所有的汽车制造商至少拥有一款零排放车型。加州空气资源局认识到零排放汽车的快速增长已经可以实现。因此，制定了从 2018~2025 年零排放汽车的比例规定（见表 1-1）。

表 1-1 零排放汽车的比例规定

年份	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
ZEV	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0
PHEV	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
合计	4.5	7.0	9.5	12.0	14.5	17.0	19.5	22.0

比例要求分为两大类：一类是零排放汽车（ZEV），即纯电动汽车和燃料电池汽车；另一类是插电式混合动力汽车（PHEV）。零排放汽车规定部分是对汽车厂商必须实现的最低要求，插电式混合动力汽车的比例要求，既可以通过插电式混合动力汽车满足，也可以通过零排放汽车积分来满足；反过来则不允许，插电式混合动力汽车积分不能用来抵扣对汽车厂商的零排放汽车积分要求。

1.2.4 日本“新一代汽车”政策及发展概况

近年来，日本对于新一代汽车的投入力度逐渐加大，并制定了面向未来的《新一代汽车战略 2010》。以此战略为前提，日本政府经济产业省和国土交通省的相关部门制定了一系列的财税和非财税政策，大力推动新一代汽车的普及、基础设施的建设以及新一代汽车社会的构建。在日本，新一代汽车包括：混合动力汽车（HEV）、纯电动汽车（EV）、插电式混合动力汽车（PHEV）、燃料电池汽车（FCV）、清洁柴油汽车（CDV），以及天然气汽车（CNG）等低排量、低能耗车型。日本没有节能汽车和新能源汽车的政策区分。

在财税政策上，日本政府针对新能源汽车的购置和使用、充电站和加氢站等基础设施的普及，先后出台了一系列财税政策。经济产业省先后实施了“环保车补贴”“清洁能源汽车导入补贴”“充电设施补贴”“加氢设备补贴”以及“绿色税制”和“环保车减税”等新财税政策。此外，还在 18 个地区设立了“EV/PHEV 城市”示范区，以示范城市的方式推广新能源汽车。日本各地方政府也分别对新一代汽车给予适当的政策补贴。

然而，由于 EV/PHEV 在充电时间、续驶里程等方面依然存在技术瓶颈，销售一直徘徊不前。2014 年 12 月丰田的首款燃料电池汽车 Mirai（未来号）率先上市，领跑全球 FCV，其全球市场表现出强劲态势。2014 年 6 月日本政府公布了“氢燃料电池战略规划”，提出打

造“氢社会”的新能源战略,政府的政策重点也开始从EV/PHEV等电动汽车类型向燃料电池汽车转移。FCV将是日本新能源汽车发展的战略重点,其市场潜力或将大于EV/PHEV等电动汽车。

除了整车外,日本在动力锂离子电池的研发和产业化方面也处于世界前列。为了促进电动汽车的核心技术——动力锂离子电池的研发,日本经济产业省所属的新能源汽车产业技术综合开发机构——NEDO建立了“All Japan”的官民一体化协作体制。除了丰田、日产等多家汽车厂商外,三洋等电池企业以及大学等研究机构共同参与,对新一代锂离子电池技术进行合作攻关。上述战略还引用了2006年8月“新一代电池技术研究会”提出的《面向新一代汽车用电池未来的建议》中的目标,即将电池性能在2015年提高到2006年的1.5倍,到2020年提高到3倍,2030年提高到7倍;同时将电池成本在2015年降低到2006年的1/7,2020年降低到1/10,2030年降低到1/40。除此之外,还将加强新一代汽车关键零部件的研发,如电机、半导体、空气自动调节系统等。此外,还将构筑日美、日中、日欧政府间和研发机构的共同研发体系,并制定相应的国际标准。

1.3 国内新能源汽车产业的发展情况

1.3.1 新能源汽车产业发展的原动力

能源、环境和经济转型是发展新能源汽车的主要动力。目前全球汽车的保有量为7亿辆左右,主要集中在经济发达国家。据统计,美国每千人拥有汽车800辆左右;日本、德国、法国、英国、意大利、加拿大等国家平均每千人拥有汽车600辆左右。每年汽车所消耗的燃油(折合成原油)约为10亿吨,占全球石油总消耗率的40%左右。汽车排放的温室气体(CO_2)和有害物质[其中主要成分是氮氧化物(NO_x)、微粒等]对环境的影响至关重要。

(1) 环境保护的压力

我国改革开放30多年来,基本实现了工业化和信息化,国民收入大幅提高,汽车作为重要消费品,已经走入了千家万户。但工业化和汽车社会的发展,给我国温室气体和氮氧化物排放控制带来了巨大压力。我国在中美温室气体减排协议中承诺,到2030年不再增加温室气体排放。根据估算,我国汽车平均年成品油消耗总量为1.5亿吨,按每升汽油燃烧后将产生2.4kg CO_2 计算,每年将产生 CO_2 4.76亿吨。要实现减排承诺,就必须以新能源代替化石燃料。

汽车社会所带来的大气污染问题比较严重。据国家环保部的统计数字和我国大城市的污染物排放量分析显示:北京、杭州、广州、深圳等大型或者超大型城市的主要污染物($\text{PM}_{2.5}$)的排放源以汽车尾气排放为主,约占总排放量的1/3以上。其他城市和地区的总排放量中汽车尾气排放量所占总污染物的比例也在1/4左右。

其实,中国政府2012年发布的《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020)》所规定的燃油消耗限值目标,已经给了传统汽车企业很大的压力。该项规定:到2015年,当年生产的乘用车平均燃料消耗量降至6.9L/100km,节能型乘用车燃料消耗量降至5.9L/100km以下。到2020年,当年生产的乘用车平均燃料消耗量降至5.0L/100km,节能型乘用车燃料消耗量降至4.5L/100km以下;商用车新车燃料消耗量接近国际先进水平。

如果说2015年还相对温和的话,2020年的目标将对于目前的传统燃油汽车企业是一个非常艰巨的挑战。未来的汽车世界,将是传统燃油汽车逐渐衰落的时代,新能源汽车将成为汽车世界的主宰,尽管未来主宰新能源汽车的不知道是哪一类纯电动车。

(2) 能源安全的需要

人类社会的生存和发展必须消耗能源。目前全球能源消耗量不断增加,但化石能源却不可再生,如果不尽快寻找新的能源,研发新的耗能工具,那么人类将必然面临能源枯竭的境地。谁率先掌握了新能源技术,谁就掌握了未来世界能源领域的领导权。

根据海关总署和国土资源部统计,2014年我国石油进口量达3.1亿吨,对外石油依存度达59.6%,其中机动车消耗量约占30%。而我国主要的石油进口通道必须穿过印度洋和马六甲海峡,极易受到战略竞争对手的制约。为了保障能源安全,必须发展并普及新能源汽车,降低国民经济对石油资源的依存度。

(3) 产业发展和经济转型、增长的需要

自2014年以来,我国经济发展进入增速放缓的新常态,经济增长率下降至7%,传统制造业面临转型升级的巨大压力。从全国来看,汽车工业产值约占国民经济的5.6%;汽车工业是国民的支柱性产业之一,汽车工业的健康发展是国民经济实现“调结构、稳增长”目标的重要基础。根据中汽协数据,2015年1~12月,全国汽车总产销分别达到2450.33万辆和2459.76万辆,同比增长3.25%和4.68%。

由于外企与合资品牌纷纷推出更廉价的车型,市场竞争愈演愈烈,自主品牌的盈利空间已大幅下降。部分整车企业已开始酝酿减产裁员,零部件配套企业则更面临着更加艰难的局面。同时,我国仍未掌握内燃机核心技术,不具备发动机和自动变速器的设计、生产能力,继续发展传统能源汽车,技术层面只能是跟在美日欧发达国家的身后,经济层面则只能坐视巨额利润流入他国。

1.3.2 我国政府发展新能源汽车的战略和优惠政策

我国政府从环保、能源安全及经济和社会发展转型的高度出发,非常重视新能源汽车产业的发展,希望未来将其打造成又一个在全球有特色的高科技绿色产业名片。国家从购置补贴、税费减免、研发支持、消费优惠、基础设施以及标准规范等各方面出台了一系列的重大政策措施。根据各应用领域电动汽车对充电基础设施的配置要求,经分类测算,2015~2020年需要新建公交车充/换电站3848座,出租车充/换电站2462座,环卫、物流等专用车充电站2438座,公务车与私家车用户专用充电桩430万个,城市公共充电站2397座,分散式公共充电桩50万个,城际快充站842座。

在北京、天津、河北、辽宁、山东、上海、江苏、浙江、安徽、福建、广东、海南等电动汽车发展基础较好、雾霾治理任务较重、应用条件较优越的加快发展地区,预计到2020年推广电动汽车规模将达到266万辆,需要新建充/换电站7400座,充电桩250万个。

在山西、内蒙古、吉林、黑龙江、江西、河南、湖北、湖南、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃等示范推广地区,预计到2020年推广电动汽车规模将达到223万辆,需要新建充/换电站4300座,充电桩220万个。在广西、西藏、青海、宁夏、新疆等尚未被纳入国家新能源汽车推广应用范围的积极促进地区,预计到2020年推广电动汽车规模将达到11万辆,需要新建充/换电站400座,充电桩10万个。

综上所述,新能源汽车产业的发展,是全球主要工业国的共识,是关系到我国人民居住环境、国家能源安全、经济增长和社会可持续发展的重大举措,是国家战略的需要。

1.3.3 我国新能源汽车产业的快速发展

我国在新能源汽车产业飞速发展的同时,在核心技术领域也取得了明显进步:动力电池、关键材料的国产化进程快速提升,能量密度提升、成本显著降低、安全性和工艺技术持续得到了改进。通过将2014年动力蓄电池的几个技术数据与2010年相比,能量密度提高了将近一倍,成本价格降低了50%。

我国电动汽车标准体系在逐渐完善过程中,现行的有效标准达到了87项;同时,正在