



新能源汽车关键技术研发系列

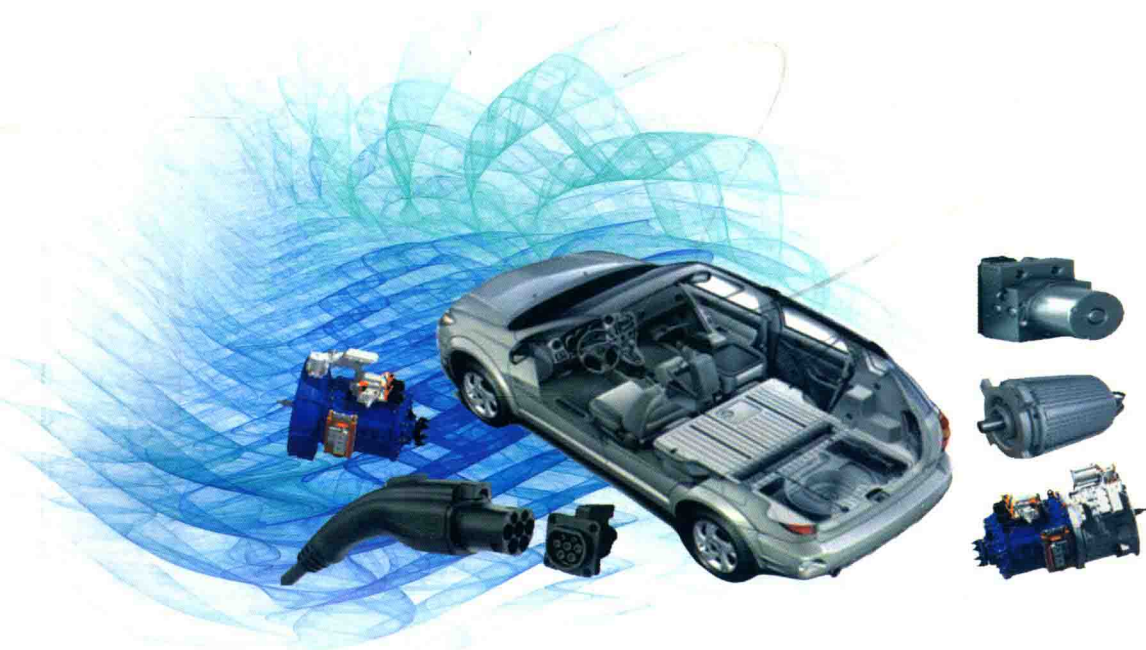
新能源汽车

电驱动-能量传输系统

建模、仿真与应用

Modeling, Simulation and Application of
Electric Drive Energy Transmission System for EVs

李永 宋健 编著

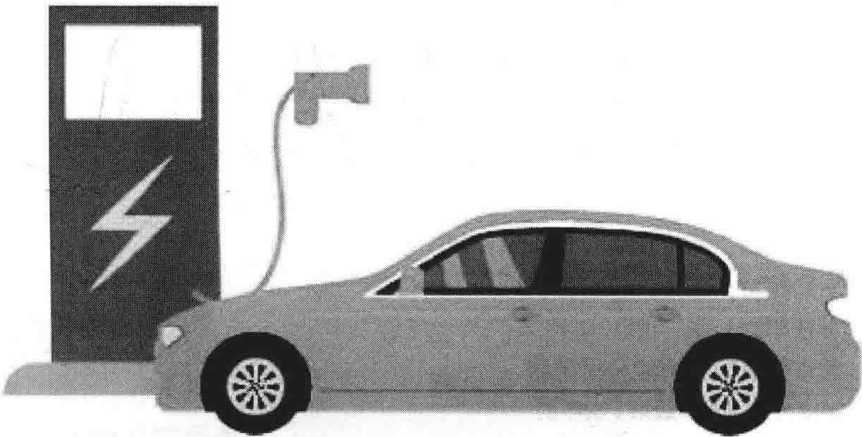


机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新能源汽车关键技术研发系列

新能源汽车电驱动-能量传输系统 建模、仿真与应用

李 永 宋 健 编著



机械工业出版社

本书系统而全面地阐述了新能源汽车电驱动与能量传输新理论及新能源汽车工业应用技术,是新能源汽车电驱动与能量传输方面的一部学术著作。全书共8章,前4章完整论述了新能源汽车电驱动与能量传输的理论体系,包括建模、计算、匹配;后4章介绍了新能源汽车电驱动与能量传输仿真方法、实验方法及工程应用等,以新能源汽车电驱动与能量传输为主线,重点围绕匹配问题,阐述电驱动与能量传输理论在新能源汽车动力学中的应用。本书以作者近年来在新能源汽车电驱动与能量传输方面的系列化研究成果为主要内容,是一部具有较为完整理论体系和实验验证的著作,可以为新能源汽车动力学的仿真和实验提供理论和方法。

本书适合于汽车、交通、力学、机电、宇航等专业的科研、设计人员及工程技术人员阅读参考,并可兼作高等院校相关方向的教师、博士、硕士研究生教学用书,也可作为相关专业本科生的学习参考书和工具书。

图书在版编目(CIP)数据

新能源汽车电驱动-能量传输系统建模、仿真与应用/李永,宋健编著. —北京:机械工业出版社,2019.3

(新能源汽车关键技术研发系列)

ISBN 978-7-111-62281-9

I. ①新… II. ①李… ②宋… III. ①新能源-汽车-电力传动-系统建模②新能源-汽车-电力传动-系统仿真 IV. ①U469.703

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第050331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:何士娟 责任编辑:何士娟

责任校对:李 杉 封面设计:张 静

责任印制:张 博

北京铭成印刷有限公司印刷

2019年6月第1版第1次印刷

169mm×239mm·16.25印张·312千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-62281-9

定价:89.90元

电话服务

网络服务

客服电话:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

010-88379833

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-68326294

金书网:www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版

机工教育服务网:www.cmpedu.com

图 7-24 锂空气电池循环特性

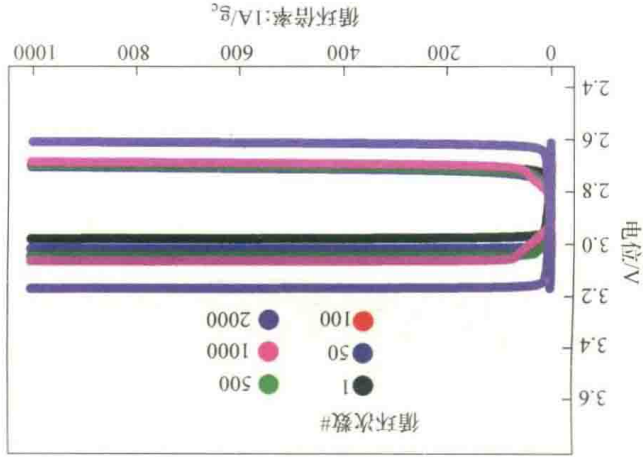


图 5-8 附着系数低→高对接水平路面起步加速电驱动状态 (有 TCS 控制)

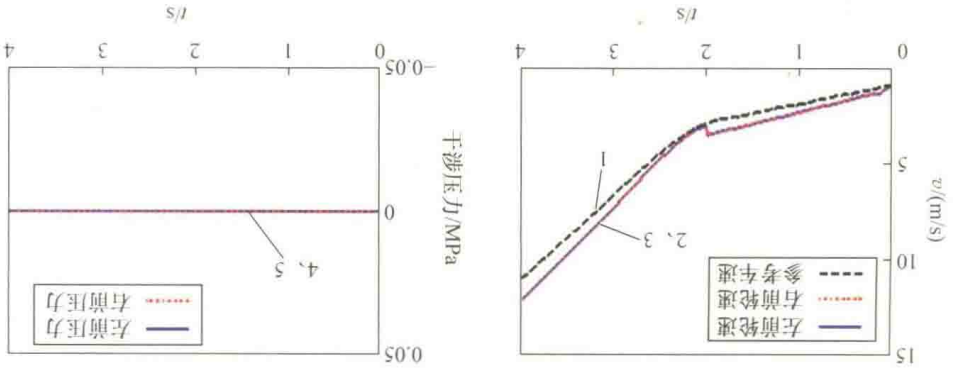
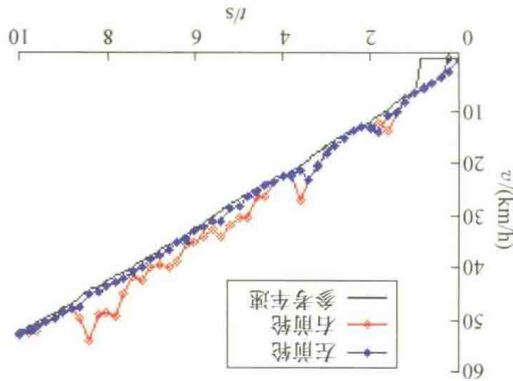


图 5-4 两前轮轮速及参考车速



42
1469.7



在新能源汽车成为战略新兴产业之一等国家战略的背景下，以纯电动汽车和燃料电池汽车、插电式混合动力汽车为代表的新能源汽车，作为能源网络中用能、储能和回馈能源的终端，成为我国乃至经济新体系中的重要组成部分。我国经过4个五年计划的科技攻关，基本掌握了新能源汽车的整车技术和关键零部件技术，实现了跨越式发展，并逐步实现了产业化。

但是，在世界这个完全开放的市场中，中国新能源汽车核心关键技术尚未彻底突破，技术竞争压力越来越大，加快新能源汽车持续创新，推进中国汽车产业技术转型升级，是中国科技发展的重大战略需求。尽管我们头顶着全球最大新能源汽车市场的光环，但中国的新能源汽车产业正遭遇成长的烦恼：

1. 与国际先进水平和市场需求相比，中国的新能源汽车技术水平及产品性能需要进一步提高。
2. 推广应用区域的市场发展尚不平衡，高寒地区推广应用新能源汽车存在环境适应性等技术问题。
3. 充电基础设施发展相对滞后，已建成充电桩总体使用率较低。
4. 推广政策尚需完善。

本套丛书将聚焦于新能源汽车整车、零部件关键技术，以及与新能源汽车配套的科技体系和产业链，邀请行业内各领域一直从事研究和试验工作的产品第一线技术人员编写，内容系统、科学，极具实用性，希望能够为我国新能源汽车的持续发展提供技术支撑和智力支持。

前言



新能源汽车电驱动-能量传输系统是当今世界汽车行业发展的动力，发展新能源汽车电驱动-能量传输关键技术极为迫切。电驱动系统和高效能量系统是新能源汽车替代传统汽车的重要标志。电驱动与能量传输技术是新能源汽车的核心技术之一，高效的电驱动技术与安全的能量传输技术构成了新能源汽车发展的双引擎。

本书是根据作者近年在新能源汽车电驱动与能源技术方面的积累，系统凝练和归纳而撰写成的学术著作。书中既有新能源汽车电驱动与能量传输的新理论、新方法、新技术和新思路等，还充分融入国内外该领域研究的亮点成果。主要内容包包括新能源汽车电驱动理论、能量传输系统建模方法、电驱动-电池系统仿真技术和智能网联应用技术等。本书在介绍新能源汽车电驱动系统的基础上，充分阐述电驱动-能量传输系统建模理论、仿真方法和应用技术。在内容上突出工业背景、实用性、新思路、新设计和新颖性，力求对读者有所启迪和帮助。

本书由北京理工大学李永、清华大学宋健编著。

本书得到汽车安全与节能国家重点实验室开放基金和北京理工大学科研项目（GZ2017015105，20160141090，201720141052，201720141103，201720141104）资助，在此表示感谢。

本书中引用的文献、报告等尽可能在参考文献中作了说明，但由于工作量大及作者不详，对没有说明的文献作者表示歉意和感谢。

新能源汽车电驱动与能量传输理论正在蓬勃发展，本书中一些关键技术还处于研究阶段，希望读者能提出建议并发展新技术。

由于作者水平有限，难免有不当和疏漏之处，欢迎读者不吝指正。

编著者

目 录

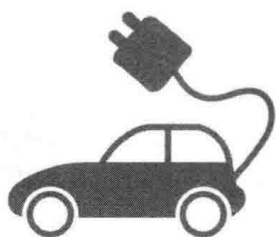


丛书序 前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 汽车发展沿革	1
1.2 新能源汽车发展概述	2
1.3 新能源汽车技术变革	8
1.4 新能源汽车电驱动技术概述	9
1.5 新能源汽车技术与应用的总体特征	13
1.6 新能源汽车电驱动技术	18
1.7 未来新能源汽车智能网联技术	20
1.8 未来新能源汽车轻量化设计	23
第 2 章 电机耦合驱动 AMT 变速系统的建模 - 仿真方法	27
2.1 电机耦合驱动 AMT 变速系统	27
2.2 电机耦合驱动 AMT 变速系统建模	33
2.3 AMT 换档过程的控制策略	37
2.4 低附路面变速系统建模	42
第 3 章 新能源汽车电驱动耦合转向系统	47
3.1 电驱动系统电机发展概述	47
3.2 驱动电机的分类	48
3.2.1 直流电机	48
3.2.2 交流异步电机	48
3.2.3 开关磁阻电机	49
3.2.4 永磁电机	50
3.3 EDS 系统建模及驱动电机原理	51
3.3.1 EDS 系统建模	51

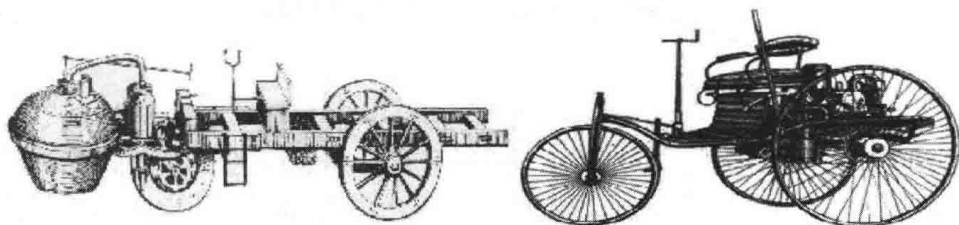
3.3.2	三相 PMBLDC 电机	51
3.3.3	四相 PMBLDC 电机	53
3.4	电机控制器硬件	55
3.4.1	微控制器	55
3.4.2	电机驱动模块与电路设计	57
3.5	EDS 系统控制器软件开发	59
3.5.1	系统底层设计	59
3.5.2	电机特性设计	60
3.6	EDS 系统控制器程序设计	63
3.7	EDS 系统实验	66
3.7.1	电机调速模式切换实验	66
3.7.2	EDS 系统特性实验	68
3.7.3	EDS 系统跑合实验	69
第 4 章	电驱动线控稳定性系统控制理论	70
4.1	EDWCS 概述	70
4.2	EDWCS 的建模方法	74
4.3	EDWCS 执行机构	77
4.4	ECU 设计	79
4.5	基于 EDWCS 的线控稳定性系统控制策略	83
4.6	基于 EDWCS 的 ABS 控制策略	89
第 5 章	牵引力控制系统的驱动电机建模与仿真	93
5.1	TCS 驱动力矩耦合控制策略	94
5.2	TCS 电机控制策略	97
5.3	TCS 与 ABS 共享系统的耦合结构分析	99
5.4	TCS 软硬件匹配参数的正交试验方法	100
第 6 章	新能源汽车电驱动系统空间结构分析与设计方法	106
6.1	电驱动系统的状态空间分析方法	107
6.1.1	电驱动系统空间结构的建模与分析	107
6.1.2	电驱动系统空间弹簧和扭簧的结构分析	110
6.2	建立基于知识管理的电驱动系统建模 - 仿真的设计平台	112
6.2.1	建立电驱动系统的知识库和专家系统	113
6.2.2	基于知识管理的电驱动系统设计平台关键技术	114
6.2.3	基于知识管理的电驱动系统设计平台技术路线	115
第 7 章	基于电驱动的新能源汽车能量传输系统建模 - 仿真	118
7.1	基于电驱动 - 能量传输系统的锂电池	120

7.1.1 锂电池的结构	122
7.1.2 锂电池正极	129
7.1.3 锂电池负极	133
7.2 锂空气电池	139
7.3 锂硫电池	140
7.4 复合离子电池	142
7.5 动力电池衰退的位错动力学	145
7.6 热电电池	147
7.7 基于电驱动的质子交换膜燃料电池能量传输理论	150
7.7.1 PEMFC 的纳米结构薄膜与界面模型	153
7.7.2 Pt 纳米电催化剂的结构设计与纳米能源系统模型	154
7.7.3 聚合物复合电解质膜的仿真与纳米通道调控	155
7.7.4 离子与电子高效输运纳米电极建模与界面演化机制	157
7.7.5 高聚物膜纳米催化结构界面模型与纳米尺度表征	158
7.8 石墨烯燃料电池	162
7.8.1 质子穿越燃料电池石墨烯薄膜的机理	162
7.8.2 石墨烯纳米电池能量传输表征方法	165
7.8.3 高比能量石墨烯电池的非局部纳米尺度建模 - 仿真	167
第 8 章 新能源汽车技术与应用	171
8.1 新能源汽车技术与应用理论	171
8.2 新能源汽车智能网联技术与应用	174
8.3 基于 AI 技术的 ICV 区块链技术	184
8.4 新能源汽车等值 - 不确定分析与更新应用	188
8.5 新能源汽车应用的价值分析理论	192
8.6 新能源汽车应用效果评价方法	197
附录	206
附录 A 电驱动控制基本术语和概念	206
附录 B 电驱动线控系统机械结构	210
附录 C 典型电驱动系统软 - 硬件在环仿真设计	218
附录 D 电驱动系统典型结构原理与电路设计	231
附录 E 主要符号与缩写系统对照表	240
参考文献	244



1.1 汽车发展沿革

汽车工业是国民经济的支柱产业，它与人们的生活息息相关，已成为现代社会必不可少的组成部分。1886 年，德国工程师卡尔·本茨和戴姆勒分别研制成功世界上第一辆三轮汽车和四轮汽车，这标志着现代意义上的汽车由此诞生。1887 年，世界上第一家汽车制造公司——奔驰汽车公司成立。1910 年，亨利·福特在汽车生产中首次引进了流水线作业方式，这一做法降低了汽车生产成本，扩大了汽车生产规模，从而使汽车成为一种大众化的消费品。随后欧洲的汽车厂商打破了美国采用的单一标准汽车尺寸，利用产品多样化的特色大量进入美国市场。1960 年，日本汽车工业发展带来的质量管理、准时供应等管理理念，被广泛应用于汽车生产。目前汽车工业正在经历着重大变革，即新能源在汽车上的应用与拓展。我国和其他相关国家新能源汽车工业的兴起也再次影响世界汽车工业的发展变革。汽车动力能源系统的沿革，如图 1-1 所示。



a) 蒸汽汽车

图 1-1 汽车动力能源系统的沿革

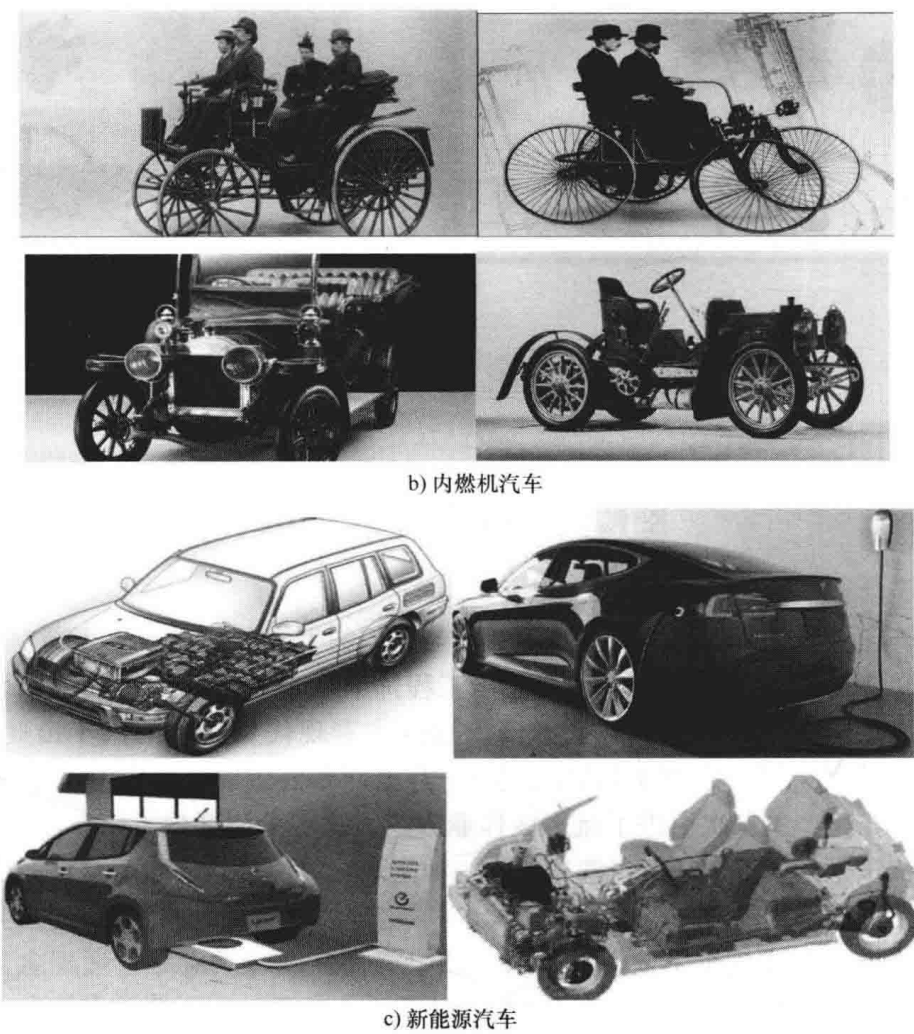


图 1-1 汽车动力能源系统的沿革（续）

1.2 新能源汽车发展概述

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未来汽车工业发展的方向。发展新能源汽车是减少对石油依赖、解决快速增长的能源需求与石油资源终将枯竭之间的矛盾的必要之路。汽车工业石油能源消耗与排放示意图，如图 1-2 所示。石油危机和空气污染问题使得各国政府开始寻求内燃机汽车的替代品，新能源汽车开始崛起。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，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。发展新能源汽车是降低汽车燃料消耗量、缓解燃油供求矛盾、减少尾气排放、改善大气环境、促进汽车产业技术进步和优化升级的重要举措。

相比于传统的内燃机汽车，新能源汽车有着可持续的能源来源和智能的能量管理系统等，但是要具有市场竞争能力，新能源汽车还需要更好的成本效益。目前新能源汽车面对的主要问题是技术、成本与性能之间的平衡，其关键技术为动力电池、电驱动系统、电控系统及智能网联技术、轻量化技术等，如图 1-3 所示。

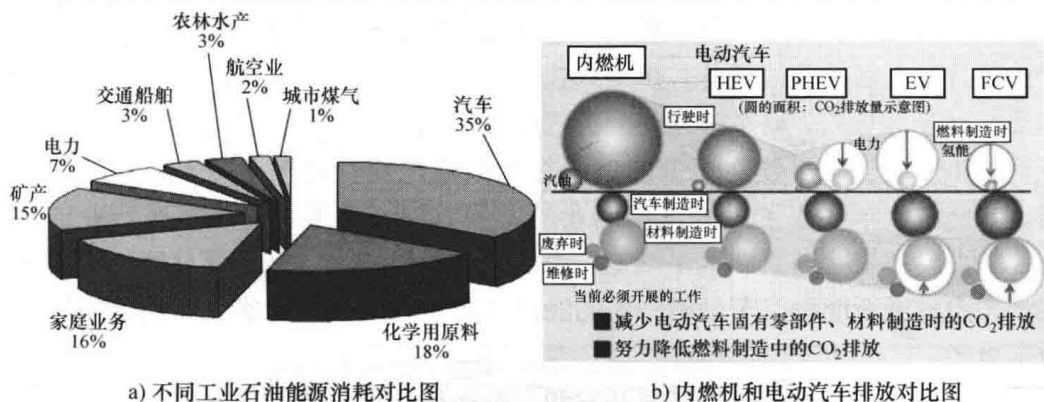


图 1-2 汽车工业石油能源消耗与排放示意图

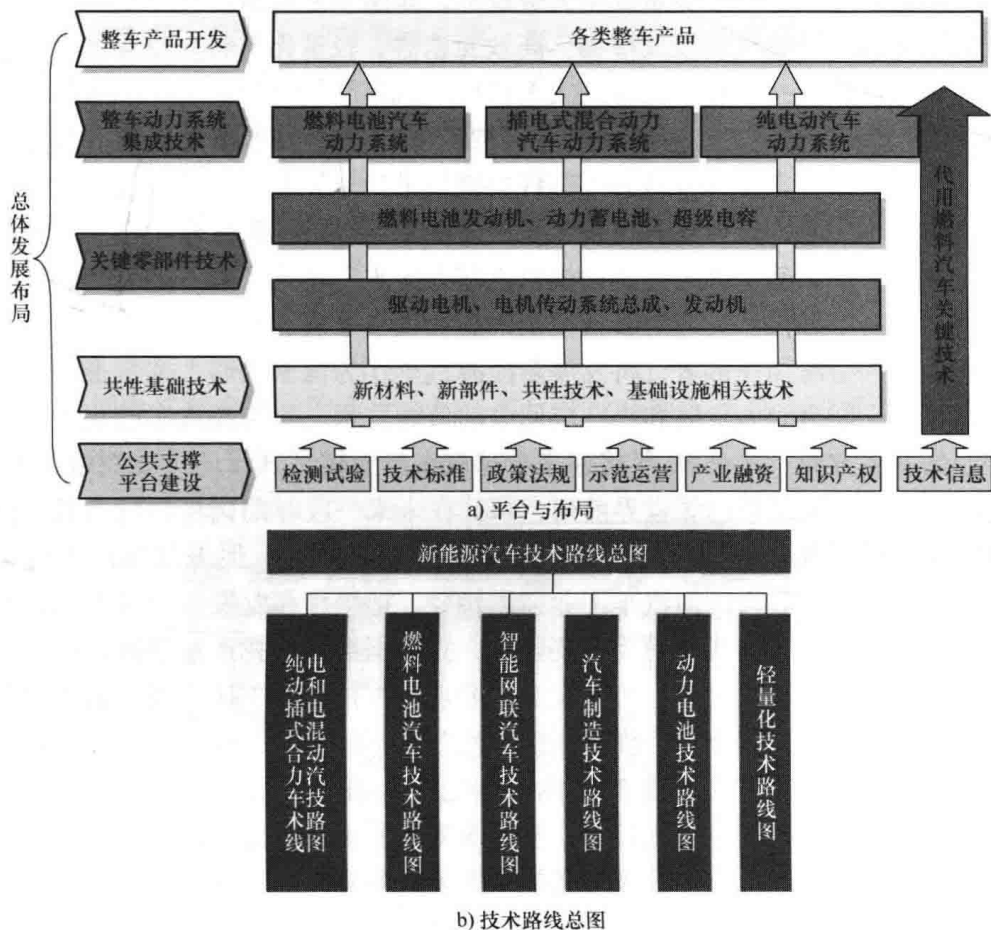


图 1-3 新能源汽车关键布局与技术路线总图

新能源汽车产业在国民经济和社会发展中发挥着重要作用。目前,新能源汽车产业正处于快速成长期。在这个过程中,新能源汽车相关核心技术有待提升的方面还有很多。随着我国经济持续快速发展和城市化进程加速推进,今后较长一段时期汽车需求量仍将保持增长势头,由此带来的能源紧张和环境污染问题将更加突出。加快培育和发展新能源汽车,既是有效缓解能源和环境压力、推动汽车产业可持续发展的紧迫任务,也是加快汽车产业转型升级、培育新的经济增长点和国际竞争优势的战略举措。新能源汽车催生汽车动力技术的一场革命,并必将带动汽车产业升级,建立新型的国民经济战略产业,是汽车工业发展的必由之路。新能源汽车代表了世界汽车产业的发展方向,是未来世界汽车产业的制高点,是世界各主要国家和汽车制造厂商的共同战略选择。从国家战略的高度来审视,大力发展新能源汽车是新一轮的经济增长点的突破口和实现交通能源转型的根本途径。

新能源汽车经过近年的研究开发和示范运行,具备产业化发展基础,新能源汽车的电池、电机、电控等系统是关键技术,如图 1-4 所示,纯电动汽车和插电式混合动力汽车开始规模投放市场。高效变速器、轻量化材料、整车优化设计以及混合动力等节能技术和产品得到大力推广,汽车平均燃料消耗量明显降低;天然气等替代燃料汽车技术基本成熟并实现产业化,形成了市场规模。但总体上看,新能源汽车整车和部分核心零部件关键技术尚未完全突破,产品成本高,社会配套体系不完善,产业化和市场化发展受到制约;新能源汽车关键核心技术尚未完全掌握,动力经济性与传统内燃机汽车先进水平相比还有一定差距,新能源汽车市场占有率偏低。为应对日益突出的燃油供求矛盾和环境污染问题,世界主要汽车生产国纷纷加快部署,将发展新能源汽车作为国家战略,加快推进技术研发和产业化,同时大力发展和推广应用电动节能技术。新能源汽车已成为国际汽车产业的发展方向,未来 30 年将迎来全球汽车产业转型升级的重要战略机遇期。目前我国汽车产销规模已居世界前列,预计在未来一段时期仍将持续增长,必须抓住机遇、抓紧部署,加快培育和发展新能源汽车产业,促进汽车产业优化升级,实现由汽车工业大国向汽车工业强国转变。把培育和发展新能源汽车产业作为加快转变经济发展方式的一项重要任务,立足国情,依托产业基础,按照市场主导、创新驱动、重点突破、协调发展的要求,发挥企业主体作用,加大政策扶持力度,营造良好发展环境,提高新能源汽车创新能力和产业化水平,推动汽车产业优化升级,增强汽车工业的整体竞争能力。加快培育和发展新能源汽车产业,推动汽车动力系统电动化转型。坚持统筹兼顾,在培育发展新能源汽车产业的同时,促进汽车产业技术升级。坚持自主创新与开放合作相结合。加强创新发展,把技术创新作为推动我国新能源汽车产业发展的主要驱动力,加快形成具有自主知识产权的技术、标准和品牌。充分利用全球创新资源,深层次开展国际科

技合作与交流，探索合作新模式。

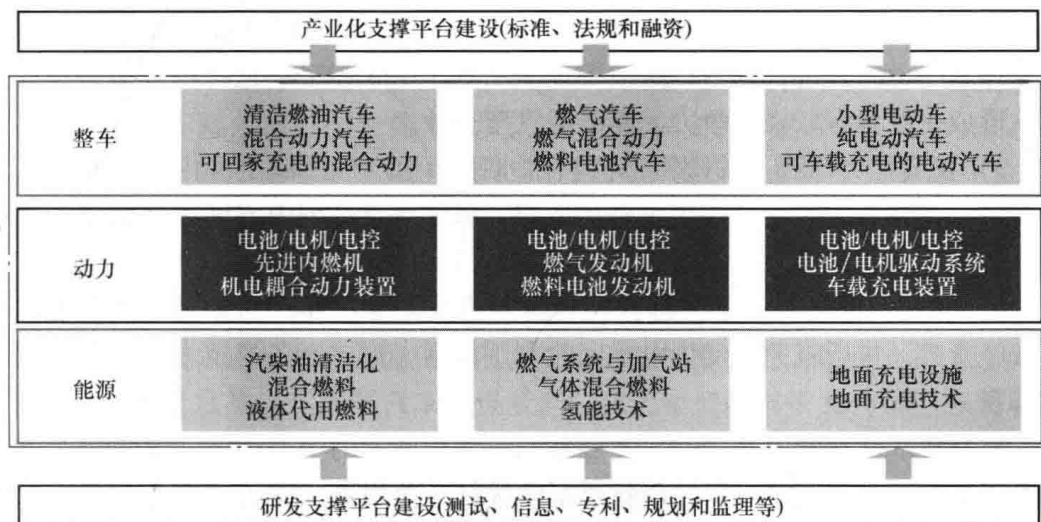


图 1-4 新能源汽车关键技术集成

积极发挥规划引导和政策激励作用，聚集科技和产业资源，鼓励新能源汽车的开发生产，引导市场消费。进入产业成熟期后，充分发挥市场对产业发展的驱动作用和配置资源的基础作用，营造良好的市场环境，促进新能源汽车大规模商业化应用。坚持培育产业与加强配套相结合，以整车为龙头，培育并带动动力电池、电机、汽车电子、高效变速器等产业链加快发展。加快充电设施建设，促进充电设施与智能电网、新能源产业协调发展，做好市场营销、售后服务以及电池回收利用，形成完备的产业配套体系，如图 1-5 所示。以燃料电池、混合动力与纯电驱动为新能源汽车发展和汽车工业转型的主要战略取向，当前重点推进纯电动汽车和插电式混合动力汽车产业化，推广普及非插电式混合动力汽车，提升我国汽车产业整体技术水平。

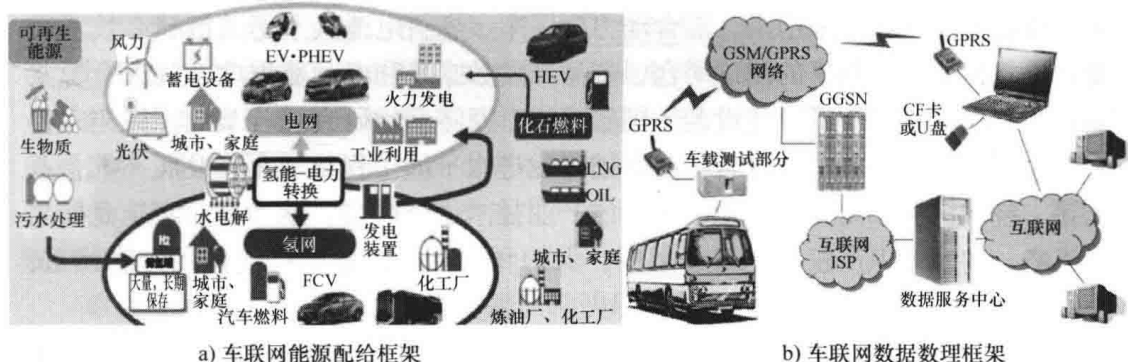


图 1-5 车联网基本框架

1) 产业化取得进展。纯电动汽车和插电式混合动力汽车生产能力迅猛发展，

燃料电池汽车、车用氢能源产业与国际同步发展。

2) 技术水平提高。新能源汽车、动力电池及关键零部件技术整体上达到国际先进水平,掌握混合动力、高效变速器、汽车电子和轻量化材料等关键核心技术,形成一批具有较强竞争力的新能源汽车企业。

3) 配套能力增强。关键零部件技术水平和生产规模满足国内市场需求。充电设施建设与新能源汽车产销规模相适应,满足重点区域内或城际间新能源汽车运行需要。

4) 管理制度完善。建立起有效的新能源汽车企业和产品相关管理制度,构建市场营销、售后服务及动力电池回收利用体系,形成完备的技术标准和管理规范体系。

增强技术创新能力是培育和发展新能源汽车产业的中心环节,要强化企业在技术创新中的主体地位,引导创新要素向优势企业集聚,完善以企业为主体、市场为导向、产学研用相结合的技术创新体系,突破关键核心技术,提升产业竞争力。加强新能源汽车关键核心技术研究。大力推进动力电池技术创新,重点开展动力电池系统安全性、可靠性研究和轻量化设计,加快研制动力电池正负极、隔膜、电解质等关键材料及其生产、控制与检测等装备,开发新型驱动电机及其与电池组合系统,推进电驱动系统及相关零配件、组合件的标准化和系列化。在动力电池重大基础和前沿技术领域超前部署,重点开展高比能动力电池新体系、新结构、新工艺等研究,集中力量突破一批支撑长远发展的关键共性技术。加强新能源汽车关键零部件研发,重点支持驱动电机系统及核心技术,电动空调、电动转向、电动制动等电动化产品研发。开展燃料电池电堆及关键材料核心技术研究。把握新能源汽车发展动向,对其他类型的新能源汽车技术加大研究力度。加快建立新能源汽车研发体系,引导企业加大新能源汽车研发投入,鼓励建立跨行业的新能源汽车技术发展联盟,加快建设共性技术平台。重点开展纯电动乘用车、插电式混合动力乘用车、混合动力商用车、燃料电池汽车等关键核心技术研发;建立相关行业共享的测试平台、产品开发数据库和专利数据库,实现资源共享;整合现有科技资源,建设若干国家级整车及零部件研究试验基地,构建完善的技术创新基础平台;建设若干具有国际先进水平的工程化平台,发展一批企业主导、科研机构 and 高等院校积极参与的产业技术创新联盟。推动企业实施商标品牌战略,加强知识产权的创造、运用、保护和管理,构建全产业链的专利体系,提升产业竞争能力。

发展新能源汽车既要利用好现有产业基础,也要充分发挥市场机制作用,加强规划引导,以提高发展效率。统筹发展新能源汽车整车生产能力。根据产业发展的实际需要和产业政策要求,合理发展新能源汽车整车生产能力。现有汽车企业实施改扩建时要统筹考虑建设新能源汽车产能。在产业发展过程中,要注意防

止低水平盲目投资和重复建设。重点建设动力电池产业聚集区域,积极推进动力电池规模化生产,加快培育和发展一批具有持续创新能力的动力电池生产企业,力争形成2~3家产销规模超过百亿瓦时、具有关键材料研发生产能力的龙头企业。增强关键零部件研发生产能力。鼓励有关市场主体积极参与、加大投入力度,发展一批符合产业链聚集要求、具有较强技术创新能力的关键零部件企业,在驱动电机、高效变速器等领域分别培育骨干企业,支持发展整车企业参股、具有较强国际竞争力的专业化汽车电子企业。加快推广应用和试点示范。新能源汽车尚处于产业化初期,需要加大政策支持力度,积极开展推广试点示范,加快培育市场,推动技术进步和产业发展。需要综合采用标准约束、财税支持等措施加以推广普及,扎实推进新能源汽车试点示范。在大中型城市扩大公共服务领域新能源汽车示范推广范围,开展私人购买新能源汽车补贴试点,重点在国家确定的试点城市集中开展新能源汽车产品性能验证及生产使用、售后服务、电池回收利用的综合评价。探索具有商业可行性的市场推广模式,协调发展充电设施,形成试点带动技术进步和产业发展的有效机制。探索新能源汽车电池租赁、充换电服务等多种商业模式,形成一批优质的新能源汽车服务企业。继续开展燃料电池汽车运行示范,提高燃料电池系统的可靠性和耐久性,带动氢的制备、储运和加注技术发展。

根据新能源汽车产业化进程,积极推进充电设施建设,将充电设施纳入城市综合交通运输体系规划和城市建设相关行业规划中来,科学确定建设规模和选址分布,适度超前建设,积极试行个人和公共停车位分散慢充等充电技术模式,确定符合区域实际和新能源汽车特点的充电设施发展方向。开展充电设施关键技术研究。加快制定充电设施设计、建设、运行管理规范及相关技术标准,研究开发充电设施接网、监控、计量、计费设备和技术,开展智能网联汽车融合技术研究和应用,探索新能源汽车作为移动式储能单元与电网实现能量和信息双向互动的机制。探索商业运营模式,积极吸引社会资金参与,根据电力供应和土地资源状况,因地制宜建设慢速充电桩、公共快速充换电等设施。鼓励成立独立运营的企业,建立分时段充电定价机制,逐步实现充电设施建设和管理系统化。制定动力电池回收利用管理办法,建立动力电池梯级利用和回收管理体系,明确各相关方的责任、权利和义务。引导动力电池生产企业加强对废旧电池的回收利用,鼓励发展专业化的电池回收利用企业。

根据应用示范和规模化发展需要,加快研究制定新能源汽车以及充电、加注技术和设施的相关标准。引导金融机构建立鼓励新能源汽车产业发展的信贷管理和贷款评审制度,积极推进知识产权质押融资、产业链融资等金融产品创新,加快建立包括财政出资和社会资金投入在内的多层次担保体系,综合运用风险补偿等政策,加大金融支持力度。支持符合条件的新能源汽车及关键零部件企业在境

内外上市、发行债务融资工具；支持符合条件的上市公司进行再融资。在新能源汽车关键核心技术领域，培养一批领军人才。加强电化学、轻量化、汽车电子、汽车工程、机电一体化等相关学科建设，培养技术研究、产品开发、经营管理、知识产权和技术应用等人才。鼓励企业、高校和科研机构引进优秀人才。重视发展职业教育和岗位技能提升培训，加大工程技术人员和专业技术人员培养力度。支持汽车企业、高校和科研机构在新能源汽车基础和前沿技术领域开展合作研究，积极创造条件开展多种形式的技术交流与合作，学习和借鉴先进技术和经验。支持新能源汽车产品、技术和服务出口。加强技术标准、政策法规等方面国际交流与协调，合作探索推广新能源汽车的新型商业化模式。

1.3

新能源汽车技术变革

美国、日本、德国等发达国家均对新能源汽车技术高度重视，从汽车技术变革和产业升级的战略出发，制定了优惠的政策措施，积极促进本国新能源汽车工业发展，以期提升本国汽车工业国际竞争力、在全球汽车工业新一轮竞争中占据有利地位。在政策的激励和引导下，全球各主要汽车生产厂家都加快了新能源汽车产业化的步伐。目前，“低排放”的混合动力汽车已进入大规模产业化阶段，在当前新能源汽车市场上占据主导地位，如图 1-6 所示。中国新能源汽车发展始于 20 世纪 90 年代，中科院、清华大学、北京理工大学等把新能源汽车及相关零部件的研发列为重点，对主要技术路线进行研究，取得了成果，并培养了能力较强的研发队伍，为新能源汽车产业的发展打下了良好基础。在北京、天津、上海等城市开展示范应用，为新能源汽车推广提供了技术、产品和运行经验的保障。近年来，随着全球汽车工业重心开始向我国市场转移，新能源汽车的产业化进程明显加快。国内许多企业已开始涉足新能源汽车电池、电机等关键零部件的研制和生产。近年来，我国新能源汽车产量迅速增加，质量快速提升，研发步伐明显加快，具备了实现产业化发展的基本条件。但总体来看，新能源汽车产业仍然处于起步阶段，尚有许多问题亟待解决，在电池系统集成技术、大规模工艺设计、生产质量和成本控制等方面，仍有待提高，特别是在电池、电机、电控等核心技术领域，电驱动系统效率低、电池充电时间长、寿命较低、研发力度不足。要使新能源汽车成为用户满意的产品，无论是整车还是零部件技术，都还有大量的研发工作。

在我国，新能源汽车产业能力建设比较薄弱，没有建立起从科研、设计到设备制造的比较完备的产业体系，产业链建设有待进一步加强，特别是消费者所必需的充电站等配套基础设施建设严重滞后，新能源汽车有关测试和试验的技术规