



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书
出版规划项目



*Principles and Applications of
Powertrain Controls for Hybrid and Electric Vehicles*



《新能源出版工程》丛书共 23 分册，分别论述太阳能、风能、生物质能、海洋能、核能、新能源汽车、智能电网和煤制油等新能源相关领域的理论研究和关键技术

新能源汽车 动力系统控制原理及应用

朱 军 主编

上海科学技术出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书
出版规划项目



新能源汽车动力系统控制 原理及应用

Principles and Applications of Powertrain Controls
for Hybrid and Electric Vehicles

朱 军 主编

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

新能源汽车动力系统控制原理及应用/朱军主编.

—上海:上海科学技术出版社,2013.1

(新能源出版工程)

ISBN 978-7-5478-1537-3

I. ①新… II. ①朱… III. ①新能源—汽车—动力系统—研究 IV. ①U469.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 281902 号

本书出版由上海科技专著出版资金资助

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海市钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 15.5 插页 6

字数:336 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-1537-3/U·17

定价:98.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内容提要

新能源汽车涉及电机系统、电池系统、内燃机、变速箱、整车,以及相应的复杂软/硬件控制集成,电控技术已成为推动新能源汽车发展的主要技术之一。

本书的编写目的是提供较完整的涵盖新能源汽车动力系统电控技术软件和硬件理论与应用的资料,填补目前国内该方面的空白。

本书内容从新能源汽车动力系统的结构和原理入手,讨论新能源汽车的动力性和经济性,阐述混合动力系统的控制策略,并介绍动力系统主控制器的硬件和软件开发及测试技术,系统安全以及相应的开发流程和质量体系。

本书的特点是以理论为基础,结合产品开发实例介绍新能源汽车控制系统工程化开发中的具体实施方法和步骤。

希望本书能为国内新能源汽车动力系统电控领域的研发技术人员提供理论和实践的帮助。本书也适合高校汽车相关专业的师生作为参考书,同时也可作为广大对新能源汽车技术感兴趣的读者的有益的学习资料。

《新能源出版工程》

学术顾问 (以姓氏笔画为序)

阮可强	中国工程院院士
严陆光	中国科学院院士
杨裕生	中国工程院院士
林宗虎	中国工程院院士
倪维斗	中国工程院院士
徐大懋	中国工程院院士
翁史烈	中国工程院院士
黄其励	中国工程院院士
潘 垣	中国工程院院士

《新能源出版工程》

编委会

主 任

倪维斗

委 员(以姓氏笔画为序)

毛宗强	朱 军	贡 俊	李 春
张家倍	张德祥	周凤翱	徐洪杰
殷承良	閻耀保	喜文华	董长青
董亲翔	鲍 杰	戴松元	

本书编委会

主 编

朱 军

编 委

冷宏祥 周宇星 栾云飞 张剑锋

蒋新华 马成杰 阎全忠

前 言

进入 21 世纪,人类社会面临日益严重的能源危机;各国政府都在制定和实施各自的能源战略。随着国民经济的快速发展和国民收入的大幅提升,中国汽车产销量已经成为世界第一。传统动力汽车使用的石油等化石燃料是不可再生的,化石燃料的储藏量和可开采量正面临枯竭。我国汽车保有量的急剧增加造成了严重的城市交通拥堵,进一步恶化了能源危机,威胁到国家能源供给的安全。汽车尾气造成的环境污染问题也日趋严重,比如大城市 PM 2.5 的主要来源就是尾气中的细微排放物,汽车尾气已经成为严重影响空气质量和国民健康的根源。国家为了鼓励节能减排,将新能源汽车作为重点扶持的新兴产业,在“十一五”期间已经投入了大量的研发资金,在“十二五”期间会有更大的投入。在我国政府新发布的 2012—2020 年《节能与新能源汽车产业发展规划》中指出,加快培育和发展节能与新能源汽车产业,对于缓解能源和环境压力,推动汽车产业转型升级,培育新的经济增长点,具有重要意义。

我国 2009 年 7 月 1 日正式实施的《新能源汽车生产企业及产品准入管理规则》明确指出: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。

传统动力汽车的动力源以使用汽油或柴油的内燃机最为常见。新能源汽车根据动力源的不同,可以分为以下 4 大类:1. 仍以内燃机为动力源的新型燃料汽车,使用气体燃料,如氢气、压缩天然气(CNG)、液化天然气(LNG)、液化石油气(LPG),或使用不由原油裂化得到的液体燃料,如乙醇、生物柴油(bio-diesel)等生物燃料;2. 以太阳能为动力源的汽车;3. 以氢燃料电池(Hydrogen Fuel Cell, HFC)为动力源的汽车;4. 电能可以作为动力源的汽车,其中,根据电力驱动的程度,进一步可以分为完全由电力驱动的纯电动汽车,具有电机和内燃机作为动力源且可由外接电源充电的插电式混合动力汽车(Plug-in HEV, PHEV),内燃机动力为主电力驱动为辅的不具有插电功能的一般混合动力汽车(Hybrid Electric Vehicle, HEV)。

本书讨论的重点是上述第 4 类新能源汽车。纯电动汽车、插电式混合动

力汽车和一般混合动力汽车,近年来在国内外得到快速发展,已经有多种车型达到不同规模的产业化。

与欧、美、日等发达国家和地区相比,我国的传统汽车工业起步晚了几十年,最近十几年才开始自主研发,与世界一流的汽车企业相比在技术上的差距十分明显。新能源汽车在世界范围内的起步始于二十多年前,国内的新能源汽车研发始于近七八年。我国政府对新能源汽车在资金和政策方面给予大力度的支持,因此近年来国内新能源汽车技术研究发展很快,与国际上的差距相对于传统车要小。另外,新能源汽车的发展也为相关传统车技术,包括汽车电子等的快速进步注入全新的活力。

汽车电动化在我国具有巨大的节能减排现实意义。这里,以造成大气温室效应的二氧化碳排放的粗略分析为例说明电动车的环保意义。目前国内能耗最低的小型传统车的油耗大约为 5 L/100 km,折合排放二氧化碳 117 g/km。

我国的电力分为火电和由水电、风电和核电等构成的非火电。我国目前非火电占总电力的 30% 左右,非火电可以看作二氧化碳零排放的电力;火电占其余 70% 左右。我国的火电以煤电为主,燃烧重油或气体燃料的火电比例很低,可以忽略不计。目前我国火力发电厂的平均效率大约是每度电消耗 300 g 动力煤。动力煤的含碳量变化较大,以较常见的含碳量 70% 的动力煤来计算每度电造成的二氧化碳排放量为

$$300 \times 70\% \times [(12 + 2 \times 16)/12] = 770 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$$

考虑目前我国电力的 30% 是二氧化碳零排放的非火电,因此平均每度电的二氧化碳排放量是 $770 \times 70\% = 539 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。那么由电网充电的小型纯电动车行驶造成的二氧化碳排放又如何呢? 以上汽 E50 电动车为例,实测真实路况 128 km 的行驶耗电 16 kW · h,即单位电量的里程为 $128/16 = 8 \text{ km}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。这样,二氧化碳排放约为 $539/8 = 67 \text{ g}/\text{km}$ 。在以上分析中,输配电和充电过程中的损耗没有计算在内。同样,对于传统车而言,燃油提炼、运输和加注过程中的损耗也没有计算在内。

根据上述粗略分析可以看出,与节能小型传统车相比,纯电动车的二氧化碳减排效果是很明显的。另外,发电厂多数建在较偏远地区,且污染物是集中排放的,回收处理相对方便,利用所收集的二氧化碳气体制成工业塑料等材料的研究成果也已经见诸报道;而汽车的尾气排放难以集中回收,并往往发生在居民密集的城市内,直接危害人群的健康。从长远来看,随着火力发电效率和非火力发电占比的稳步提升,电力驱动的二氧化碳减排效果将更加明显。

必须指出,新能源汽车技术复杂,成本、可靠性、安全性、配套基础设施等问题需要持续努力才能逐步解决。另外,新能源汽车需要一定时间的市场考验,才能得到消费者的认可。所以,期望通过走捷径获得新能源汽车的快速突破是不现实的。

1. 新能源汽车发展简史

1839 年,苏格兰人罗伯特·安德森(Robert Anderson)制造了世界上第一部纯电动车。费迪南德·保时捷博士(Dr. Ferdinand Porsche)在 1901 年制造的装有轮毂电机的样

车通常被认为是世界上最早的串联式混合动力车,它的汽油内燃机可以为电池充电。

1966年,美国国会提出推荐使用电动车以减少空气污染的议案。在1968年到1971年间,三位美国TRW公司的科学家发明了一种实用的混合动力系统。他们开发和展示了一个称为机电传动的系统,能够为搭载小型化内燃机的车辆提供良好的动力性能,并申请了专利。该系统集成的许多工程概念被广泛应用在当今的混合动力车中。

1973年的石油危机重新唤起了人们对节油汽车的兴趣。在1974年,美国环保署测试了一部使用别克Skylark车身的混合动力样车。该车被认证为符合环保署规定的清洁车辆。1976年,美国国会启动了《纯电动车和混合动力车辆研发和示范运行法案》,目的是鼓励电池、电机、控制器和其他零部件的发展。通用电气公司被选中制造一款并联混合动力轿车,丰田公司制造了自己的第一款混合动力车——一辆小型运动车,由一部燃气轮机发电为电机提供动力。

1989年,奥迪公司展示了以奥迪100 Avant Quattro为原型的奥迪Duo实验车。该车有一部9.4 kW的电机驱动后轮,而前轮由一台101 kW内燃机驱动,并用镍镉电池来储存电能。两年以后,奥迪展示了第二代Duo,仍以奥迪100 Avant Quattro为原型。奥迪后来成为第一个批量生产混合动力车的欧洲公司,生产在A4 Avant基础上的Duo,该车由67 kW柴油机和22 kW的电机联合为前轮提供动力,并用铅电池储藏电能。该车未能获得商业成功。

1993年,当美国克林顿政府宣布《新一代汽车合作关系》项目的时候,丰田公司被排除在外。于是丰田公司启动了自己的秘密开发计划。经过几年的时间,花费了10亿美元后,《新一代汽车合作关系》项目推出了三辆混合动力样车达到80 mile/USgal。1997年,丰田展示了第一代普锐斯(Prius),并在第一年就售出了18 000辆。1997年丰田还在日本推出了混合动力小型公共汽车Coaster。

通用汽车公司在20世纪90年代研发的EV1纯电动车应用了镍氢电池;但镍氢电池的成本和可靠性问题限制了EV1的推广。

随丰田之后,本田1999年推出了外形古怪的Insight混合动力车,也是美国市场的第一款混合动力车。2001年,丰田将混合动力技术应用到日本的皇冠(Crown)和Estima车型。本田在2002年推出思域(Civic)混合动力。第一款美国制造的混合动力车是2004年福特翼虎(Ford Escape)。

2010年底,美国通用汽车公司雪佛兰沃兰达(Chevrolet Volt)插电式混合动力车上市。2012版搭载的16 kW·h锂电池可以提供动力在纯电动模式下行驶35 mile (56 km)。在电池电量不足时,内燃机起动为驱动电机供电并可为电池充电。美国环保署认证该车的综合油耗为2.5 L/100 km(注:由于使用外接充电,其能耗测量和计算方式较复杂,在本书第2章有详细描述)。

同样在2010年底上市的尼桑聆风(Nissan Leaf)纯电动车搭载24 kW·h锂电池,在NEDC工况下续驶里程可以达到175 km。另一款在2010年上市的4人座三菱i MiEV纯电动车搭载16 kW·h锂电池,在NEDC工况下实测续驶里程为134 km。

2. 我国新能源汽车战略

我国政府发布的 2012—2020 年《节能与新能源汽车产业发展规划》中指出,发展节能与新能源汽车产业,要依托现有产业基础,科学规划产业布局,防止低水平盲目投资和重复建设。《规划》的重要意义包括:① 确定技术路线:以纯电驱动为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、节能内燃机汽车,提升我国汽车产业整体技术水平;② 确定销量目标:2015 年,纯电动汽车和插电式混合动力汽车累计产销量达到 50 万辆,2020 年超过 500 万辆;③ 确定乘用车平均油耗:2015 年当年生产的乘用车平均燃料消耗量降至每百公里 6.9 L,到 2020 年降至 5.0 L;④ 对技术水平提出要求: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。

3. 新能源汽车的技术挑战

无论是一般混合动力汽车、插电式混合动力汽车,还是纯电动汽车,动力系统的核心都是“三电”,即动力系统控制(简称“电控”)、动力电池系统(简称“电池”)和电机/逆变器系统(简称“电机”)。与传统车相比,除上述动力系统“三电”以外,新能源汽车还有电辅系统,主要包括电空调、电转向、电真空泵、电加热等;电辅系统现阶段也处于逐步完善过程之中。

日本的丰田、本田、尼桑,美国的通用、福特,德国的大众、奔驰、宝马,法国的 PSA,韩国的现代等技术和财力雄厚的主流车企,已经和正在投入巨资,打造从一般混合动力、插电式混合动力,到纯电动的面向市场的多款新能源汽车。丰田普锐斯(Prius)的巨大成功标志着新能源汽车技术的日臻成熟和消费者对该技术的认可。

中国的新能源汽车事业还处于起步阶段,面临核心技术不足,产业链不成熟,专业人员稀缺的不利局面;目前国内的各类新能源汽车,仍以国家扶持的示范运行和小批量生产为主,仍处于技术积累和市场培育阶段。但正如国家 2012—2020 年《节能与新能源汽车产业发展规划》中指出的,能源安全和环境的压力决定了大力发展适合我国市场的新能源汽车是我国汽车业必须面临的挑战。以上汽为代表的国内数家整车厂,经过近几年的学习和自主研发,已经初步掌握新能源汽车产业化的核心技术,已经和正在将一批混合动力汽车、插电式混合动力汽车和纯电动汽车推向市场。

“三电”技术中,动力电池系统是能量存储装置,相当于传统燃油车辆的油箱。传统车辆将化石能源储存于油箱中,而新能源车辆将电能储存于动力电池中。对比两种不同能量存储装置的理论能量密度,油箱的能量密度是目前电池系统的上百倍(汽油低热值约为 44 MJ/kg,目前先进的电池系统能量密度约 100 W·h/kg 或 0.36 MJ/kg)。因此即使电机驱动能量转化效率远高于传统的内燃机动力系统,单独依靠动力电池能量驱动的纯电动汽车在续驶里程方面还是无法与传统汽车相比。对于电池技术的挑战,除大幅度提高能量密度外,还包括成本、安全、寿命、环境适应性、电磁兼容、充电便利性等多方面。

电机系统是能量转换装置:在电动模式下将动力电池系统中储存的电能转换为驱动车辆的机械能;在充电模式下,根据需要将部分内燃机的机械能转化为电能,或在车辆减

速时,将车辆的动能转化为电能,并储存于动力电池系统中。交流发电机在汽车上早已应用,但应用于高压系统,能够驱动车辆,并提供大功率充电和能量回收的电机系统是近二十年随着新能源汽车快速发展起来的。目前,电机和电机控制器在功率密度、扭矩密度、效率、成本、电磁兼容等领域仍有提升的空间。

动力系统控制(电控)是新能源汽车动力系统的“指挥中心”,包括主控制器硬件、底层软件,包含控制策略和标定的上层应用软件,以及与其他子系统控制器之间的网络通讯。主控制器不断接收动力系统和整车的各类信息,并经过复杂的信号处理和计算,判断动力系统是否处于合理的运行状态。由于路况、驾驶员需求、外界环境、各子系统状态等处于经常的变化之中,动力系统的各个子系统也要经常调整工作状态以满足实时变化的各种需求。纯电动汽车的电控,主要是协调和控制动力电池系统和电机系统;混合动力系统的电控,还要实时选择电驱动和内燃机驱动的最佳运行模式,并控制从当前模式到最佳模式的平稳过渡,在同一种运行模式中,各子系统的运行参数也需要实时调整,满足动力性、驾驶舒适性和经济性的多方面需求。

4. 本书的特点

本书讨论的重点是新能源汽车“三电”核心技术中的“电控”。就像人类必须通过大脑来指挥和协调各种运动,新能源汽车必须通过电控来指挥和协调各种行驶需求。优秀的电控,可以充分发挥各子系统的能力,并指挥整车和各子系统平稳、高效、安全、可靠地运行。

本书的八位编委成员均为上汽集团下属的上海捷能汽车技术有限公司控制集成部的高级管理及骨干技术人员。上海捷能汽车技术有限公司(下面简称“捷能公司”)是由上汽投资、专注于发展新能源汽车业务的公司。其核心业务包括四个方面:一、动力系统开发——即提供完整的混合动力/电动车动力系统开发服务,包括电力电子/电驱变速箱/电池系统等在内的工程解决方案;二、系统匹配集成——即提供混合动力/电动车控制集成开发服务,包括动力系统控制策略、控制软件及标定和诊断的技术开发;三、电驱变速箱开发及销售——即提供电驱变速箱的开发服务和产品,包括电机、离合器、减/变/差速装置等在内的集成设计解决方案和产品;四、为支撑上述服务和产品开发的新能源汽车核心技术前期研发。捷能公司于2009年1月正式成立,目前拥有180余名工程技术人员,含2名国家“千人计划”在内的6名海归专家,目前已具备国内领先的整车电控、电池、电驱动“三电”技术开发能力。

捷能公司控制集成部是上汽新能源汽车开发“三电”核心之一“电控”开发的责任部门。控制集成部下设系统工程科、电气集成科、控制策略科、软件应用科和系统标定科,目前有100多名研发工程师。部门的工作涵盖新能源汽车控制系统开发的所有业务链,负责上汽乘用车所有新能源汽车控制系统的开发,为荣威750混合动力汽车、荣威E50纯电动汽车成功上市作出贡献,目前正致力于荣威550插电式混合动力汽车的早日量产。

本书主编朱军博士,现任上汽集团乘用车技术中心副主任、上海捷能汽车技术有限公司总经理。朱军1983年毕业于上海交通大学,1987年起在同济大学担任讲师,1997

年获新加坡南洋理工大学机械工程博士学位,并在新加坡科技工程有限公司工作多年。2004 年回国后,朱军博士先后在上海通用及上汽集团乘用车公司主导新能源项目开发,领导上海通用君越混合动力轿车、荣威 750 混合动力轿车和荣威 E50 纯电动轿车项目成功上市。

朱军博士在汽车工业应用与学术研究领域拥有近 30 年的工作经验,在混合动力控制、发动机冷起动及排放控制等方面发表多篇论文,擅长于先进驱动系统的设计与开发,并持有该方面的全球专利。朱军博士在 2008 年获“改革开放 30 年中国汽车工业杰出人物”称号,2009 年获“上海新能源汽车专家”称号,2011 年获“上汽优秀专业技术带头人”称号,目前是同济大学的兼职教授及博士生导师。

其他编委简介:

阎全忠,海归博士,国家“千人计划”特聘专家,在美国克莱斯勒和通用汽车公司工作多年,在 SUV 底盘控制、自动变速箱及混合动力传动系统控制方面拥有丰富经验,现任控制集成部总工程师。

栾云飞,海归博士,在美国通用汽车公司负责 Saturn VUE Green Line, E-Assist 等量产混合动力系统控制策略和油耗的研究与优化,现任混合动力平台总工程师,控制策略专家。

周宇星,具有多年的传统动力总成标定及新能源汽车控制系统开发经验,负责荣威 750 混合动力车及荣威 550 插电式混合动力车的控制策略,现任控制策略高级经理。

冷宏祥,负责动力系统电控集成,有多年控制器软硬件开发经验,参与了上汽燃料电池车、荣威 550 插电式混合动力车和荣威 E50 纯电动车等项目,负责控制系统电气集成,现任电气集成高级经理。

张剑锋,博士,有多年嵌入式系统和控制器硬件平台开发经验,负责上汽荣威 750 混合动力平台 CAN 协议开发及荣威 E50 纯电动整车控制集成开发,现任电气集成主任工程师。

蒋新华,有多年软件集成及其自动化和软件测试经验,负责荣威 750 混合动力、荣威 550 插电式混合动力及荣威 E50 纯电动系统的软件集成及测试工作,现任软件应用主任工程师。

马成杰,有多年汽油机 EMS 标定、新能源汽车标定和策略开发经验,现担任荣威 550 插电式混合动力项目整车控制集成系统工程师,并管理系统标定团队。

本书第 1 章由冷宏祥执笔,朱军、周宇星、栾云飞审阅。

第 2 章由周宇星执笔,朱军、栾云飞审阅。

第 3 章由栾云飞执笔,朱军、周宇星审阅。

第 4 章由张剑锋执笔,冷宏祥审阅。

第 5 章由蒋新华执笔,张剑锋审阅。

第 6 章由马成杰执笔,阎全忠、周宇星审阅。

第 7 章由阎全忠执笔,马成杰审阅。

本书全体编委诚挚感谢上汽集团对新能源汽车的高度重视。近年来上汽集团投入大量资金,重点扶持新能源汽车产业化开发,并取得令人鼓舞的成果:继 2011 年节油 20% 的荣威 750 混合动力车上市以来,2012 年 11 月荣威 E50 纯电动车成功上市,2012 年底综合油耗仅为 2.3 L/100 km 的荣威 550 插电式混合动力车实现小批量生产。这一系列产业化开发的成功表明上汽集团已经初步掌握了从一般混合动力车,到插电式混合动力车和纯电动车的核心技术。上汽集团将通过未来多个产业化项目,进一步扩大和巩固在新能源汽车核心技术方面的领先优势,完善产业供应链,为新能源汽车早日走进千家万户作出贡献。

本书编委大力感谢上海捷能汽车技术有限公司员工的辛勤工作,以及为本书的编写和审阅付出的劳动。

本书的编写历经一年多时间,几易其稿。编写工作基本上是各编委在业余时间完成的,全书的主要内容来自各编委的工程实践经验。由于新能源汽车技术在国内外的发展很快,加上我们的理论表述方面能力有限,本书的疏漏和错误之处在所难免,欢迎广大读者对本书的不足之处不吝指出。

全体编委

目 录

第 1 章 新能源汽车动力系统概述 / 1

- 1.1 新能源汽车关键零部件及分类 / 1
 - 1.1.1 传统内燃机汽车系统 / 1
 - 1.1.2 新能源汽车系统 / 2
 - 1.1.3 新能源汽车动力系统关键零部件 / 3
 - 1.1.4 新能源汽车分类 / 8
- 1.2 混合动力系统结构、控制工作原理及功能 / 9
 - 1.2.1 混合动力系统概述 / 10
 - 1.2.2 混合动力系统结构 / 11
 - 1.2.3 混合动力系统功能 / 21
- 1.3 纯电动汽车动力系统结构、控制工作原理及基本功能 / 23
 - 1.3.1 纯电动汽车动力系统结构 / 24
 - 1.3.2 纯电动汽车动力系统控制工作原理 / 24
 - 1.3.3 常见纯电动汽车动力系统结构举例 / 25
 - 1.3.4 纯电动汽车动力系统基本功能 / 27
- 1.4 插电式混合动力汽车动力系统结构及工作原理 / 27
- 参考文献 / 29

第 2 章 新能源汽车的动力性和能量经济性 / 30

- 2.1 新能源汽车的动力性 / 30
 - 2.1.1 新能源汽车的动力性指标 / 30
 - 2.1.2 汽车的行驶方程 / 31
 - 2.1.3 汽车的行驶阻力 / 31
 - 2.1.4 新能源汽车的驱动力 / 34
 - 2.1.5 新能源汽车的动力性能 / 39
 - 2.1.6 轮胎与路面的附着条件和最大驱动力 / 43
- 2.2 新能源汽车的能量经济性 / 44
 - 2.2.1 新能源汽车的能量经济性评价方法和指标 / 44

- 2.2.2 新能源汽车的能量经济性计算方法 / 48
- 2.2.3 影响新能源汽车能量经济性的因素及降低能耗的方法 / 51
- 2.3 新能源汽车的动力性、能量经济性试验规范和方法 / 55
 - 2.3.1 新能源汽车的动力性试验规范和方法 / 55
 - 2.3.2 新能源汽车的能量经济性试验规范和方法 / 61
- 参考文献 / 66

第3章 混合动力汽车动力系统控制 / 68

- 3.1 混合动力系统的主要运行模式及切换条件 / 68
 - 3.1.1 微混的主要运行模式及切换条件 / 69
 - 3.1.2 中混的主要运行模式及切换条件 / 70
 - 3.1.3 强混的主要运行模式及切换条件 / 74
 - 3.1.4 插电式混合动力的主要运行模式及切换条件 / 80
- 3.2 智能充电 / 86
 - 3.2.1 最佳充电时机选择 / 87
 - 3.2.2 控制动力电池荷电状态在合理范围内浮动 / 90
 - 3.2.3 最佳充电扭矩的选择 / 91
- 3.3 能量回收 / 96
 - 3.3.1 并联式能量回收 / 97
 - 3.3.2 串联式能量回收 / 98
- 3.4 电机助力和纯电动行驶 / 99
 - 3.4.1 电机助力 / 99
 - 3.4.2 纯电动行驶 / 101
- 3.5 小结 / 102
- 参考文献 / 103

第4章 整车控制器硬件 / 104

- 4.1 整车控制器系统功能 / 104
- 4.2 整车控制器硬件架构 / 105
- 4.3 整车控制器硬件系统 / 107
 - 4.3.1 电源模块 / 107
 - 4.3.2 CAN 通讯模块 / 109
 - 4.3.3 数字量输入模块 / 111
 - 4.3.4 模拟量输入模块 / 115
 - 4.3.5 输出模块 / 117
- 4.4 整车控制器可靠性设计 / 120

- 4.4.1 部件的冗余设计 / 120
- 4.4.2 电磁兼容性设计 / 122
- 4.4.3 控制器散热设计 / 123
- 4.5 控制器硬件的测试 / 124
 - 4.5.1 硬件单元电路测试 / 125
 - 4.5.2 单元电路测试实例 / 125
 - 4.5.3 硬件集成测试 / 131
 - 4.5.4 硬件测试台架介绍 / 132
- 参考文献 / 134

第5章 控制器软件 / 135

- 5.1 软件开发 / 135
 - 5.1.1 软件架构 / 135
 - 5.1.2 底层驱动软件 / 139
 - 5.1.3 应用软件 / 144
- 5.2 软件测试 / 145
 - 5.2.1 测试概念 / 146
 - 5.2.2 测试分类 / 146
 - 5.2.3 建模规范性测试 / 147
 - 5.2.4 单元测试 / 149
 - 5.2.5 集成测试 / 151
 - 5.2.6 系统测试 / 152
- 5.3 软件开发常用工具 / 154
 - 5.3.1 建模工具 / 154
 - 5.3.2 模型测试工具 / 154
 - 5.3.3 代码生成工具 / 155
 - 5.3.4 静态检查工具 / 158
 - 5.3.5 运行时错误检查工具 / 159
 - 5.3.6 交叉编译器 / 160
 - 5.3.7 调试工具 / 162
 - 5.3.8 硬件在环测试工具 / 162
 - 5.3.9 其他小工具 / 165
- 参考文献 / 166

第6章 新能源汽车控制系统功能安全 / 167

- 6.1 系统安全标准及管理 / 167