

电动车辆 复合电源系统 集成管理基础

熊瑞 何洪文 著

Fundamentals of Energy Management for
Hybrid Energy Storage Systems Used
in Electric Vehicles



化学工业出版社

电动车辆 复合电源系统 集成管理基础

熊瑞 何洪文 著

Fundamentals of Energy Management for
Hybrid Energy Storage Systems Used
in Electric Vehicles



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书对近些年来电动车辆复合电源系统中的新方法、新技术进行了概述,详细介绍了电动车辆复合电源系统的关键部件性能实验、建模理论、参数匹配和实时能量管理策略,叙述了复合电源系统台架试验搭建与验证方法。

本书注重理论与实际案例的结合,内容新颖、图文结合、通俗易懂,可作为从事电动车辆领域科研和工程技术人员的参考资料,也可作为高等院校教师、研究生和高年级学生教学教材与参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电动车辆复合电源系统集成管理基础/熊瑞,何洪文著. —北京:化学工业出版社,2019.3

ISBN 978-7-122-33680-4

I. ①电… II. ①熊… ②何… III. ①电动汽车-电源 IV. ①U469.720.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第005926号

责任编辑:刘琳

装帧设计:王晓宇

责任校对:王素芹

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:北京京华铭诚工贸有限公司

装订:三河市振勇印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张11 $\frac{1}{2}$ 彩插4 字数186千字 2019年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888

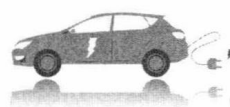
售后服务:010-64518899

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:68.00元

版权所有 违者必究



前言

Preface

发展节能与新能源汽车是国际共识，也是我国的战略性新兴产业和“中国制造2025”确立的重点领域。据中国汽车工业协会统计，我国新能源汽车2017年全年产销量分别达到79.4万辆和77.7万辆，连续三年位居全球第一，目前累计推广总量已突破200万辆。显然，新能源汽车产业迎来了前所未有的重大发展机遇，与此同时带动了动力电池系统产业的迅猛发展。然而，当前的动力电池系统技术难以同时兼顾高比功率、高比能量和低温高启动功率的多重要求，开发动力电池和超级电容等组成的复合电源系统已成为一种有效的解决途径。

本专著依托北京理工大学电动车辆国家工程实验室多年来在新能源汽车领域的设计与开发中的相关积累，结合2008年北京奥运会、2010年上海世博会和2010年广州亚运会中电动车辆的成功示范应用经验，并在筹备2022年北京冬奥会电动车辆新技术储备的基础上，详细讲述了电动车辆复合电源系统集成管理相关理论与技术。第1章剖析了国家新能源汽车发展战略和规划以及复合电源系统集成管理的技术要点。第2章详细介绍了复合电源系统关键部件实验平台搭建、实验方案设计与特性分析，系统分析了动力电池、超级电容和DC/DC变换器的工作特性及建模理论。作为系统集成管理的基础，第3章阐述了多种复合电源系统参数匹配优化方法。第4章和第5章深入地论述了基于规则策略的、基于全局优化的、基于实时优化和工况识别技术的多种复合电源系统能量管理方法，并结合具体实例进行对应算法的模型构建与系统仿真分析。第6章从半实物仿真验证角度论述了基于xPC-Target环境的复合电源系统集成管理验证方法。秉承理论与实践相结合的理念，力求能够更好地为读者所理解，本书在进行理论内容讲解时使用了许多具体的实例。本书虽然聚集动力电池和超级电容组成的复合电源系统，但阐述的理论和方法对于动力电池、超级电容、燃料电池、发动机、电动机等多种类型能量与动力源协同管理问题也具有较好的适用性。

本专著由熊瑞副教授和何洪文教授共同完成，何洪文教授负责此书的总体

框架，熊瑞副教授负责全书的撰写和统稿。书稿资料的整理是由课题组博士生陈铨、陈欢、田金鹏、王春、王渠、杨瑞鑫，硕士生段砚州、靳琪、李幸港、李琳琳、林倩、刘晓炜、马骥骁、潘悦、王侃、吴舒婕等共同完成，曹家怡、王熠、张潇华、张硕和刘伟为全书提供了部分撰写材料与修改，在此向他们表示感谢。在本书的编写和修改过程中得到重庆大学刘永刚教授、哈尔滨理工大学吴晓刚教授以及北京交通大学鲍谚副教授与牛利勇副教授的大力帮助和指导，并为本书的定稿做了大量细致认真的审阅和修改工作，在此表示特别感谢。

此著作经过多年酝酿和努力，笔者力图将该领域国内外最新的研究进展以及课题组在新能源汽车能量管理方面的研究成果与心得体会奉献给同仁和读者，助力我国在该领域的创新与进步，推动行业技术发展。虽经多次修改，但仍有不尽如人意之处，主要是有些工作仍然没有结束，有些理论与技术还在探讨，自然谬误也难以避免。望读者体谅笔者初衷，欢迎通过电子邮件（rxiong@ieee.org）进行沟通，提出批评与斧正意见，共同推动我国新能源汽车电源管理的研究与开发工作快速发展。

熊瑞
北京

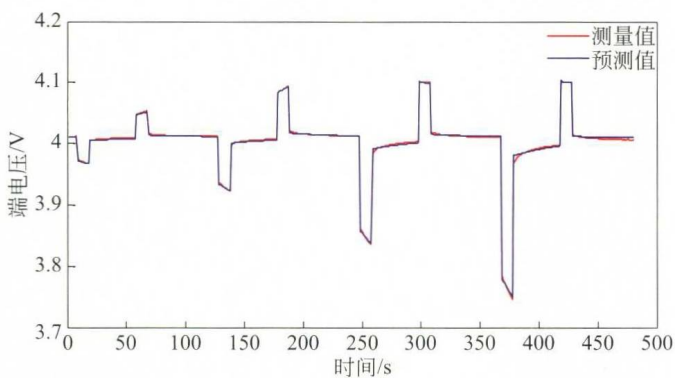


图2-10 带滞后的1阶RC模型90%SOC下端电压拟合结果

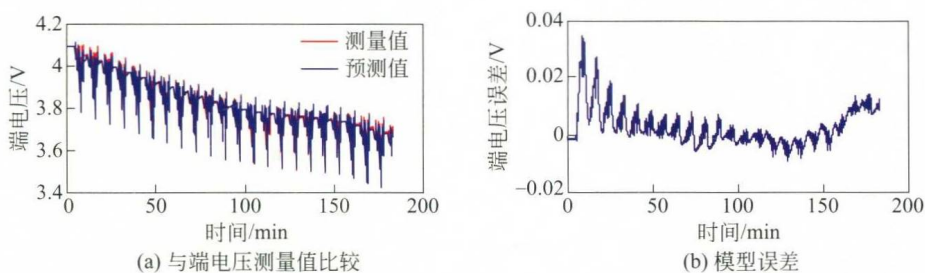


图2-11 基于离线参数辨识的带滞后的1阶RC模型的端电压响应(NCM1)

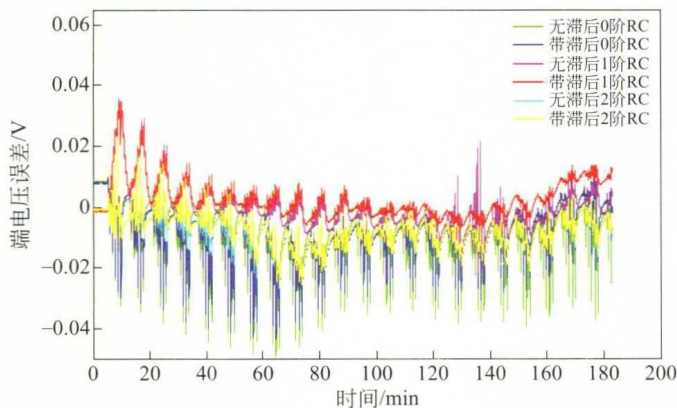


图2-12 6种不同模型的端电压误差对比

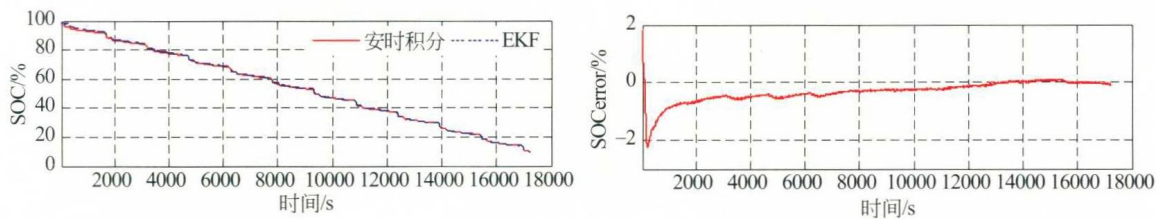


图2-16 基于EKF的SOC估计结果及误差

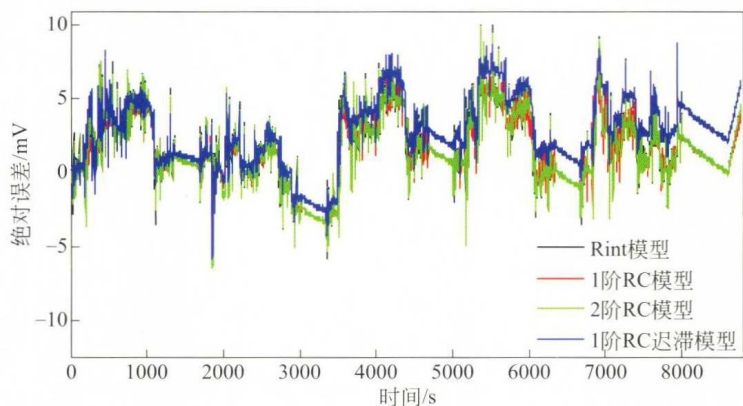


图2-19 四种模型误差

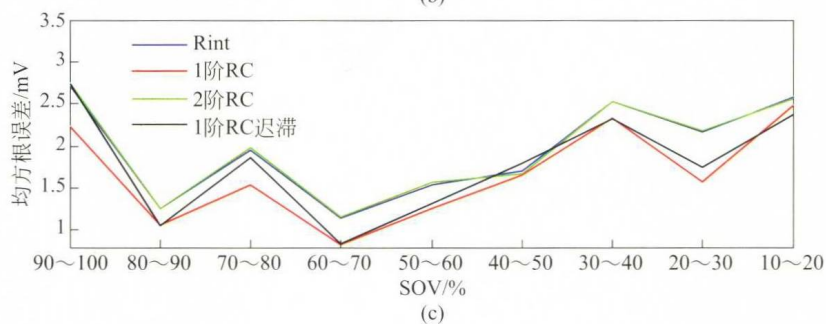
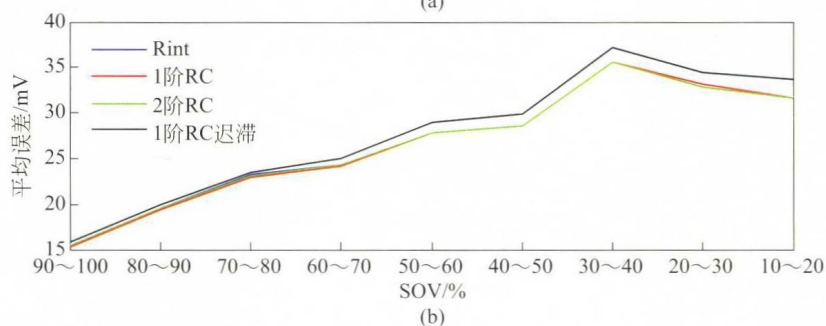
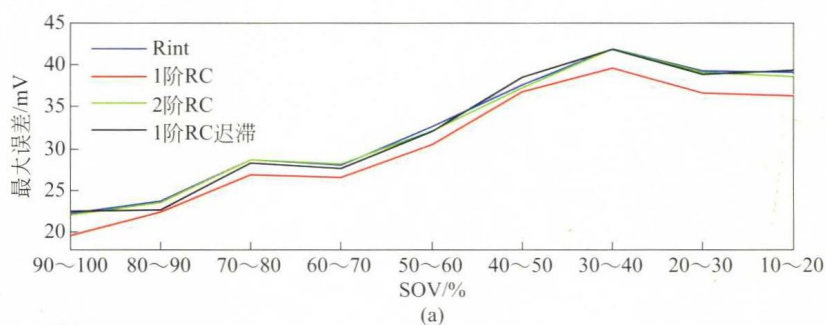


图2-20 四种模型在不同SOV区间的误差

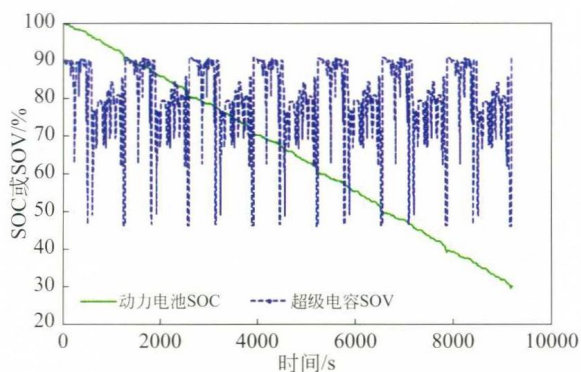


图3-11 基于逻辑门限策略的动力电池组SOC与超级电容组SOV

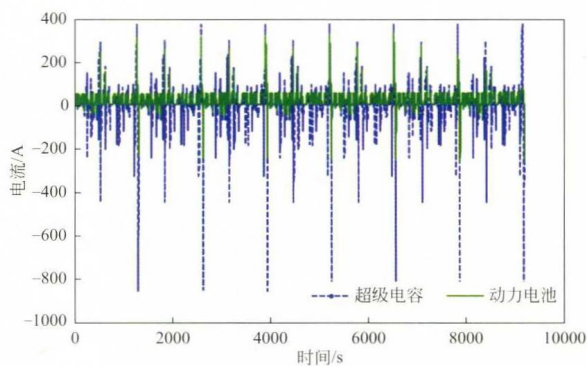


图3-12 基于逻辑门限策略的动力电池组与超级电容组电流

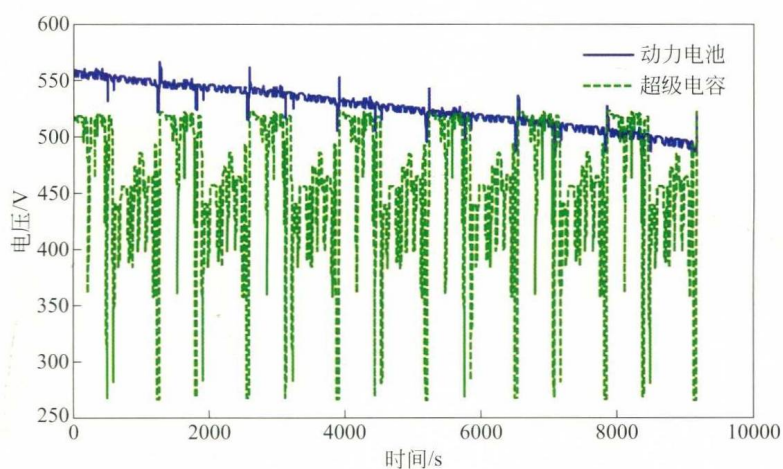


图3-13 基于逻辑门限策略的动力电池组与超级电容组电压

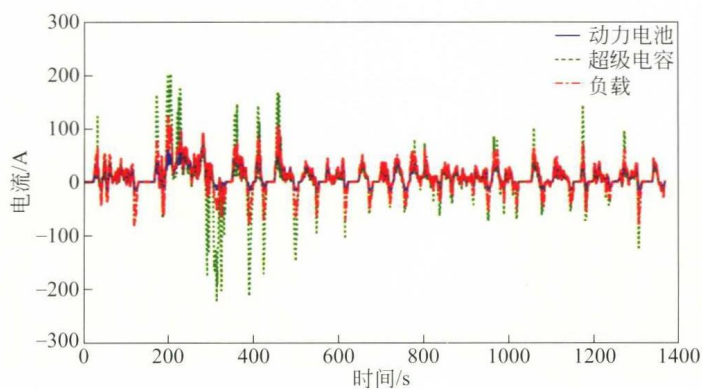


图3-17 基于模糊逻辑控制策略的动力电池组与超级电容组电流

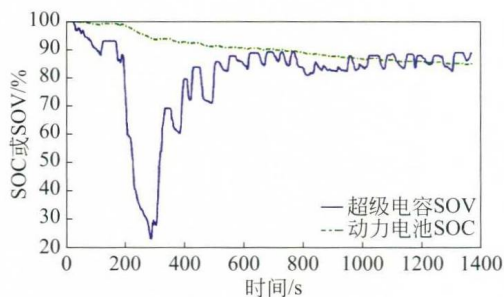


图3-18 基于模糊逻辑控制策略的动力电池组
SOC和超级电容组SOV

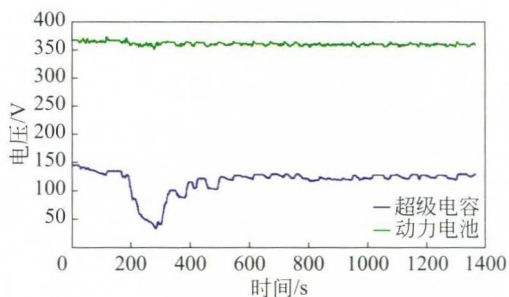


图3-19 基于模糊逻辑控制策略的动力电池组
与超级电容组电压

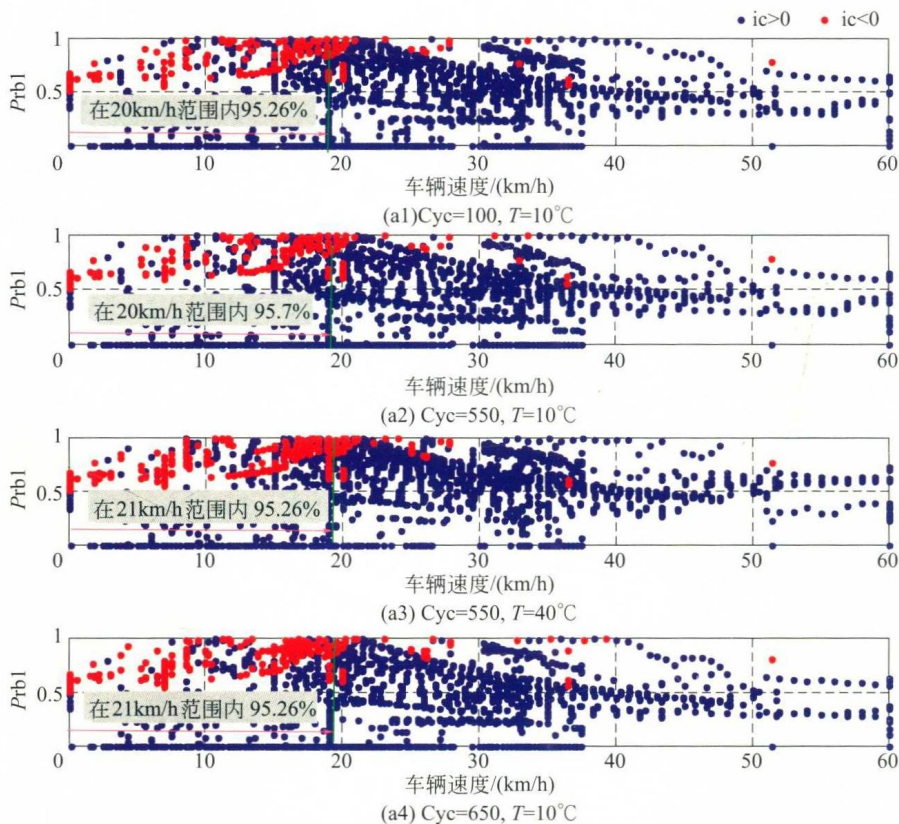


图4-14 需求功率大于0时动力电池功率比与车辆速度的关系

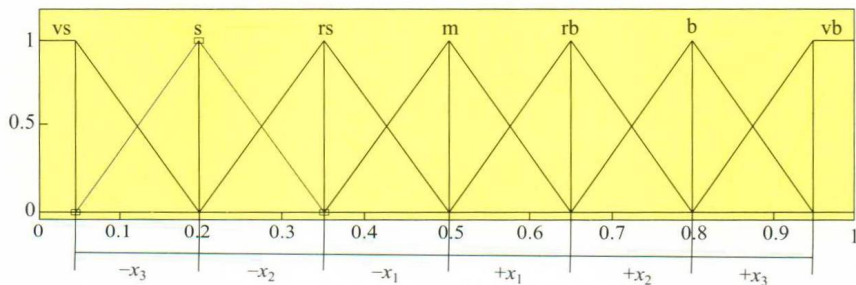
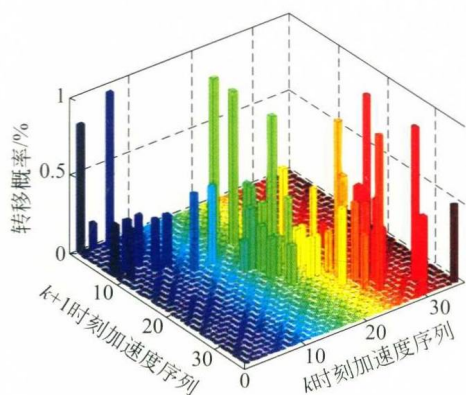
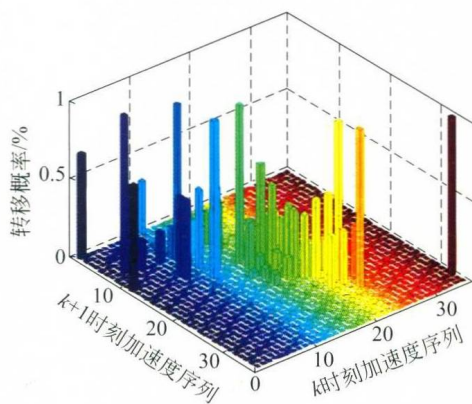


图4-19 模糊逻辑控制器的隶属度函数编码方式

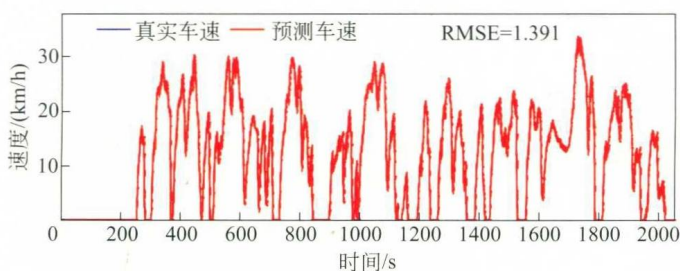


(a) 车速为27km/h的转移概率

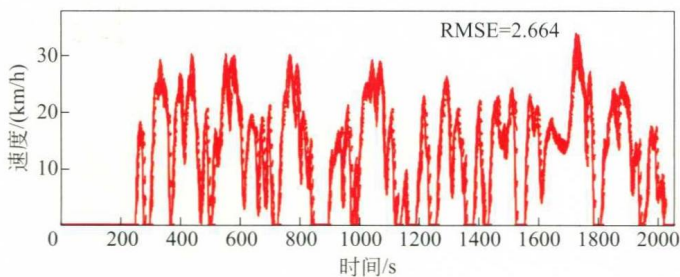
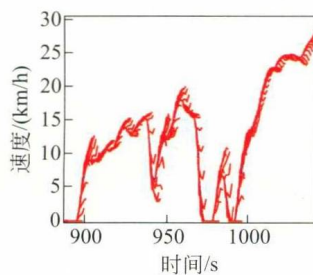


(b) 车速为39km/h的转移概率

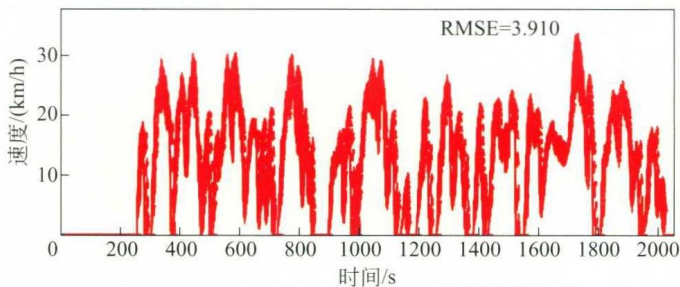
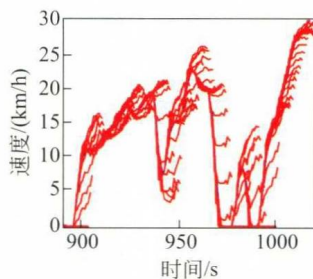
图5-18 不同车速状态下的马尔可夫转移概率矩阵



(a) 5s预测时域



(b) 10s预测时域



(c) 15s预测时域

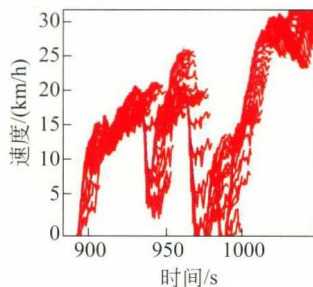


图5-20 基于LSTM神经网络的工况预测

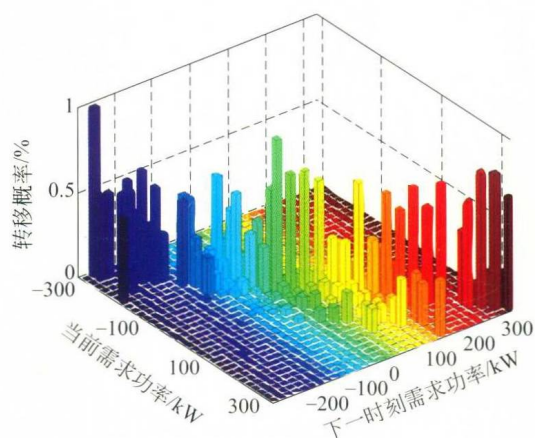
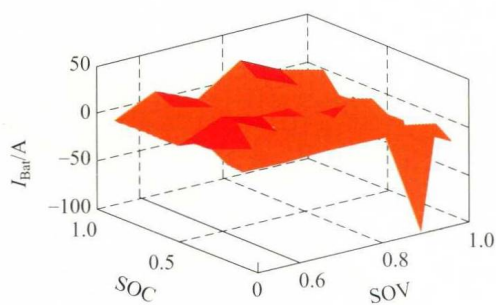
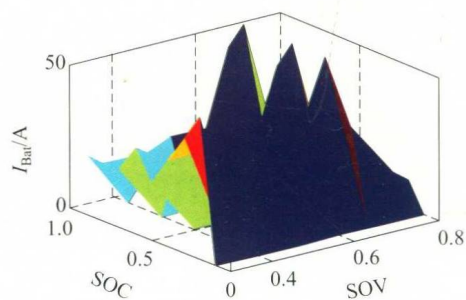


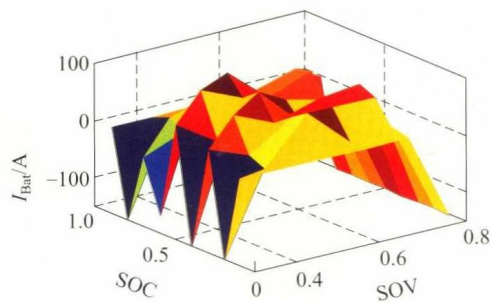
图5-28 需求功率转移概率矩阵分布图



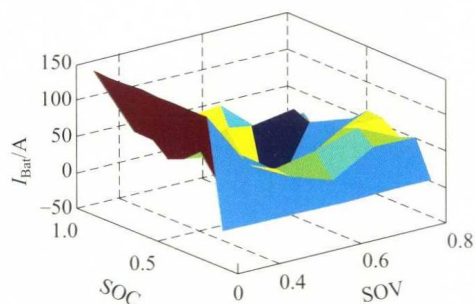
(a) 需求功率为-10kW



(b) 需求功率为10kW



(c) 需求功率为-150kW



(d) 需求功率为150kW

图5-31 动作变量分布图

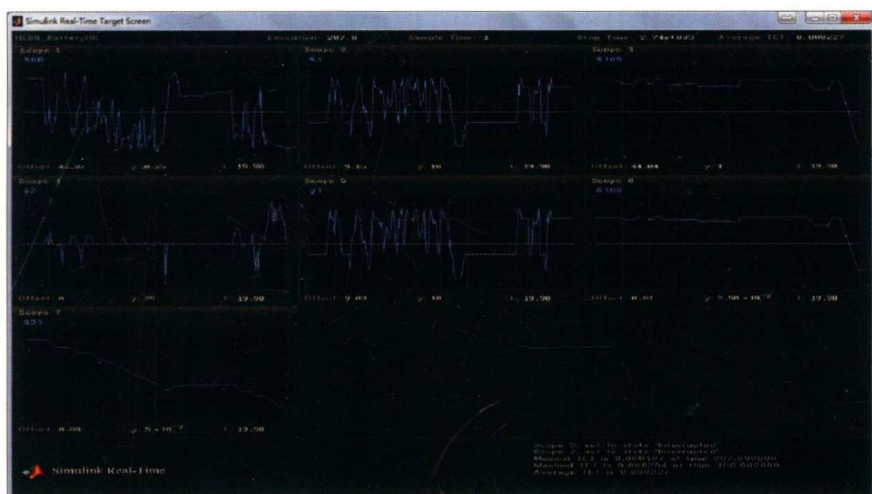


图6-8 RCP仿真实验过程中系统主要参数变化

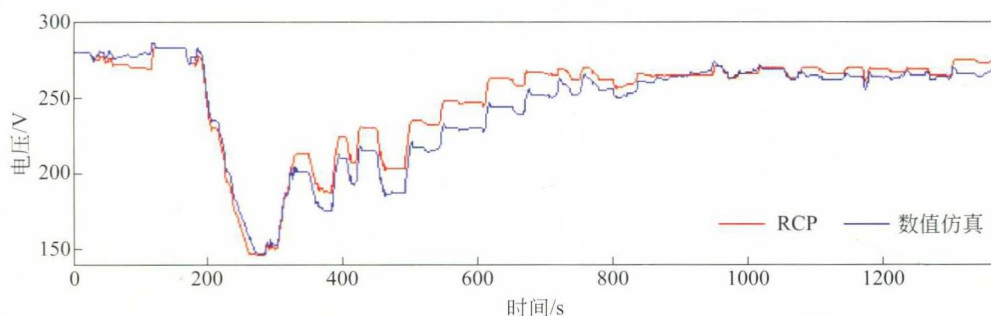


图6-9 实验与仿真的超级电容组电压

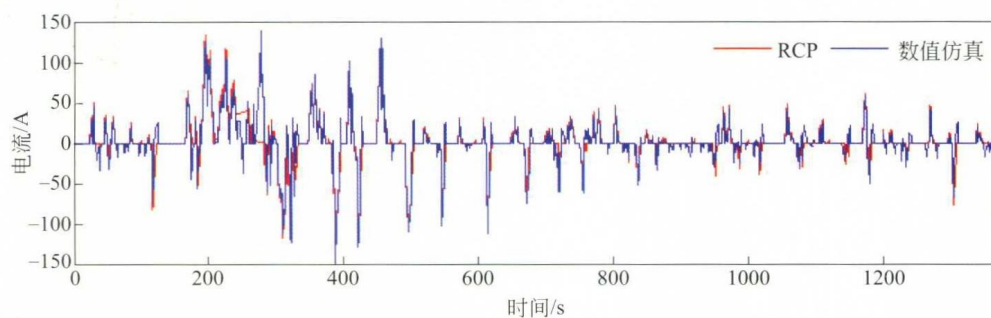


图6-10 实验与仿真的超级电容组电流

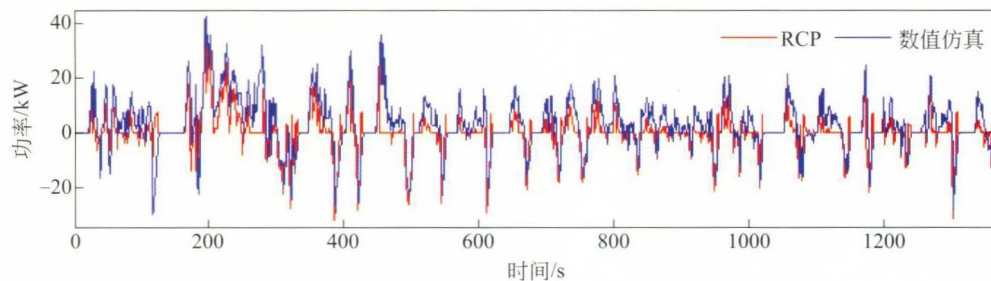


图6-11 实验与仿真的系统需求功率

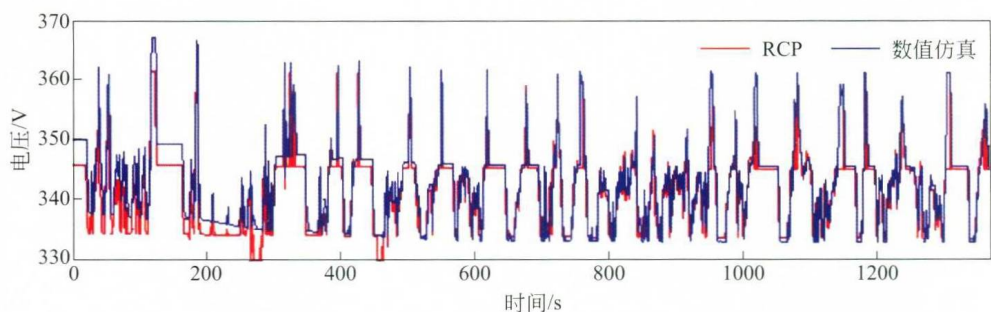


图6-12 实验与仿真的动力电池组电压

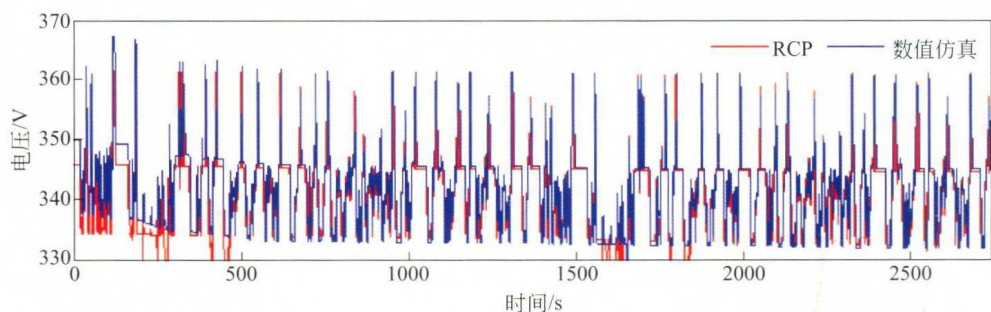


图6-13 实验与仿真的动力电池组电压(两个工况循环)

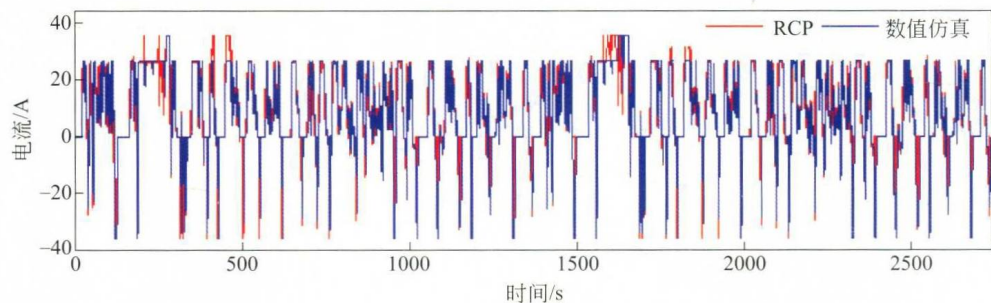


图6-14 实验与仿真的动力电池组电流(两个工况循环)

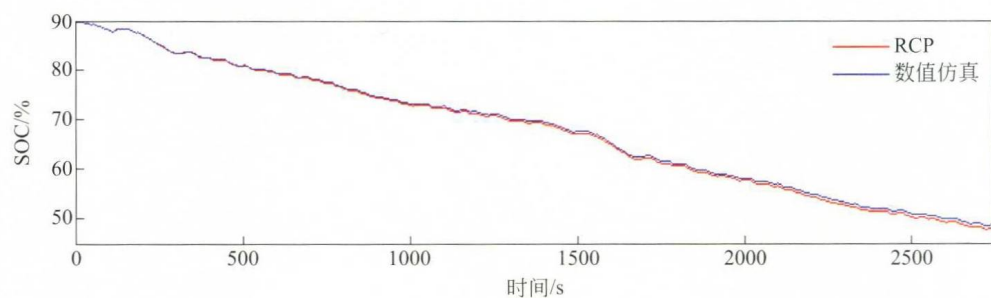


图6-15 实验与仿真的动力电池组SOC(两个工况循环)



目录

CONTENTS

第1章

新能源汽车复合电源系统概述 / 001

1.1 国家新能源汽车发展战略和规划 / 001

1.2 电动汽车电源需求 / 010

1.3 复合电源系统 / 013

第2章

电源系统部件特性建模研究 / 022

2.1 实验平台介绍 / 022

2.2 部件性能实验 / 024

2.3 动力电池建模方法 / 029

2.4 超级电容建模方法 / 044

第3章

基于规则的参数匹配与能量管理策略 / 051

3.1 车辆工作模式 / 051

3.2 基于规则的参数匹配方法 / 052

3.3 基于规则的复合电源能量管理策略 / 064

第4章

系统参数与能量管理策略的协同优化 / 080

4.1 优化目标 / 080

4.2 基于动态规划的能量管理策略 / 081

4.3 基于动态规划的复合电源参数匹配方法 / 088

4.4 基于动态规划的规则能量管理策略研究 / 091

4.5 基于遗传算法优化的能量管理策略 / 104

目录



CONTENTS

第5章

能量管理策略的实时优化与在线标定 / 112

5.1 能量管理应用的工况识别 / 112

5.2 基于模型预测控制的能量管理策略 / 132

5.3 基于强化学习的能量管理策略 / 141

第6章

快速控制原型仿真与策略验证 / 154

6.1 半实物仿真介绍 / 154

6.2 基于xPC-Target的复合电源RCP仿真平台 / 155

6.3 RCP仿真实验及结果分析 / 161

6.4 展望 / 165

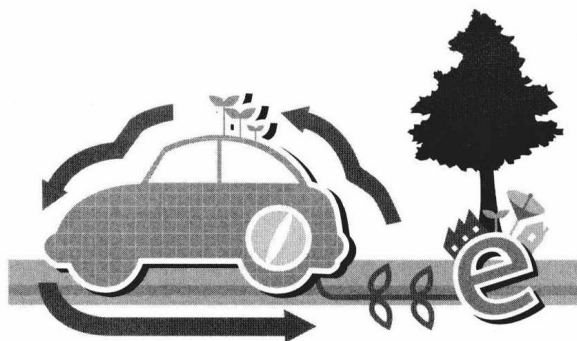
附录

常用变量 / 167

参考文献 / 173

第 1 章

新能源汽车复合电源系统概述



1.1 国家新能源汽车发展战略和规划

在目前能源危机、环境污染日益严重的情况下，大力发展新能源汽车以减少对化石能源的依赖、降低大气污染已逐渐成为国际共识。我国能源和环境问题突出，正面临着能源紧缺和环境污染的双重压力。图 1-1 为我国 2008~2017 年石油消耗总量、进口量与对外依存度的相关数据。

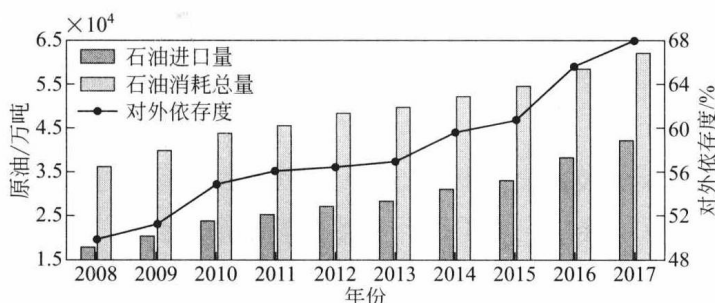


图1-1 我国2008~2017年石油消耗总量、进口量与对外依存度

从图 1-1 中可以看出，早在 2011 年我国的石油对外依存度就超过了 56%。2015 年对外依存度首次突破了 60%，这一数字在 2017 年达到了 68%，过高的石油对外依存度严重威胁着我国的能源安全。另一方面，近年来在我国部分地区频繁出现的雾霾天气不仅容易诱发急性呼吸道系统疾病，还易引发神经系统、心血管系统等方面的慢性疾病，严重威胁人民群众的身体健康。

在此背景下，越来越多的国家鼓励汽车制造商加大清洁能源汽车的投资和研发力度，向着清洁、高效和可持续的方向发展，并给予相应的政策扶持。电



电动汽车作为解决上述问题的最有潜力的选择，近几年来在工业和商用领域得到了长足的进步和发展。我国政府十分重视汽车产业的可持续发展，在新能源汽车领域给予高度重视和大力支持，早在“八五”期间就开始对电动汽车技术进行了攻关布局。

“十五”期间，国家 863 计划“电动汽车”重大科技专项确立了以混合动力汽车、纯电动汽车、燃料电池汽车为“三纵”，以多能源动力总成控制系统、驱动电机和动力电池为“三横”的电动汽车“三纵三横”研发布局，全面组织启动大规模电动汽车技术研发，为我国电动汽车发展奠定了技术基础。

“十一五”期间，我国组织实施了“节能与新能源汽车”重大项目，继续坚持“三纵三横”的总体布局，围绕“建立技术平台，突破关键技术，实现技术跨越”“建立研发平台，形成标准规范，营造创新环境”“建立产品平台，培育产业生态，促进产业发展”三大核心目标，全面展开电动汽车关键技术研究 and 大规模产业化技术攻关，并成功开展了“北京奥运”“上海世博”“深圳大运会”“十城千辆”等示范推广工程。

“十二五”期间，我国组织实施了“电动汽车科技发展”重大专项，紧紧围绕电动汽车科技创新与产业发展的三大需求，继续坚持“三纵三横”研发布局，更加突出“三横”共性关键技术，着力推进关键零部件技术、整车集成技术和公共平台技术的攻关与完善、深化与升级，形成“三横三纵三大平台”战略重点与任务布局。

2009 年 1 月，科技部、财政部、发改委和工信部共同启动“十城千辆节能与新能源汽车示范推广应用工程”，通过提供财政补贴，计划用 3 年左右的时间，每年发展 10 个城市，每个城市推出 1000 辆新能源汽车开展示范运行，涉及这些大中城市的公交、出租、公务、市政、邮政等领域，力争使全国新能源汽车的运营规模到 2012 年占到汽车市场份额的 10%。

2010 年 10 月，国务院印发《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》（国发〔2010〕32 号），将新能源汽车列为七大战略性新兴产业之一，着力突破动力电池、驱动电机和电子控制领域关键核心技术，推进插电式混合动力汽车、纯电动汽车推广应用和产业化。

2012 年 6 月，国务院印发《节能与新能源汽车产业发展规划（2012~2020 年）》（国发〔2012〕22 号），以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，重点推进纯电动汽车和插电式混合动力汽车产业化，提