



节能与新能源汽车
关键技术研究丛书



国家出版基金项目



国家出版基金资助项目
湖北省公益学术著作出版专项资金资助项目
节能与新能源汽车关键技术研究丛书

丛书主编：欧阳明高

新能源汽车综合热管理

张扬军 谢翌 彭杰 钱煜平 诸葛伟林 丹聃 著

新能源汽车综合热管理



INTEGRATED THERMAL MANAGEMENT FOR NEW ENERGY VEHICLES

华中科技大学出版社



华中科技大学出版社
<http://press.hust.edu.cn>

节能与新能源汽车关键技术研究丛书

总主编：欧阳明高

新能源汽车综合热管理

张扬军 谢 翌 彭 杰 著
钱煜平 诸葛伟林 丹 聃

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

动力电池、燃料电池和电动空调为新能源汽车电动化的关键部件,热管理对新能源汽车动力电池、燃料电池、电动空调及整车性能具有决定性影响,是新能源汽车研究与开发的核心技术。本书共7章,分为三个部分:第1章至第3章为第一部分,系统介绍了动力电池的产热特性、热管理系统建模及散热系统设计;第4章和第5章为第二部分,主要围绕燃料电池水热管理和冷启动进行分析和论述;第6章和第7章为第三部分,重点探讨电动空调及整车热管理系统的建模和控制策略。

本书可供新能源汽车领域的科研人员和研究生参考使用,也可供从事新能源航空和新能源电力研究的相关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

新能源汽车综合热管理/张扬军等著. —武汉:华中科技大学出版社,2023.1
(节能与新能源汽车关键技术研究丛书)
ISBN 978-7-5680-8560-1

I. ①新… II. ①张… III. ①新能源-汽车-散热-研究-中国 IV. ①U469.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 147762 号

新能源汽车综合热管理

Xinenergyuan Qiche Zonghe Reguanli

张扬军 谢 翌 彭 杰 著
钱煜平 诸葛伟林 丹 聃

策划编辑:俞道凯

责任编辑:胡 芬

封面设计:原色设计

责任校对:刘 竣

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)
武汉市东湖新技术开发区华工科技园

电话:(027)81321913

邮编:430223

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:19.5

字 数:316千字

版 次:2023年1月第1版第1次印刷

定 价:168.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

新能源汽车与新能源革命（代总序）

中国新能源汽车研发与产业化已经走过了 20 个年头。回顾中国新能源汽车的发展历程：“十五”期间是中国新能源汽车打基础的阶段，我国开始对电动汽车技术进行大规模有组织的研究开发；“十一五”期间是中国新能源汽车从打基础到示范考核的阶段，科技部组织实施了“节能与新能源汽车”重大项目；“十二五”期间是中国新能源汽车从示范考核到产业化启动阶段，科技部组织实施了“电动汽车”重大项目；“十三五”期间是中国新能源汽车产业快速发展升级阶段，科技部进行了“新能源汽车”科技重点专项布局。

2009—2018 年的 10 年间，中国新能源汽车产业从无到有，新能源汽车年产量从零发展到 127 万辆，保有量从零提升到 261 万辆，均占全球的 53% 以上，居世界第一位；锂离子动力电池能量密度提升两倍以上，成本降低 80% 以上，2018 年全球十大电池企业中国占 6 席，第一名和第三名分别为中国的宁德时代和比亚迪。与此同时，众多跨国汽车企业纷纷转型，大力发展新能源汽车。这是中国首次在全球率先成功大规模导入高科技民用大宗消费品，更是首次引领全球汽车发展方向。2020 年是新能源汽车发展进程中具有里程碑意义的年份。这一年是新能源汽车大规模进入家庭的元年，也是新能源汽车从政策驱动到市场驱动的转折年。这一年，《节能与新能源汽车产业发展规划（2012—2020 年）》目标任务圆满收官，《新能源汽车产业发展规划（2021—2035 年）》正式发布，尤其是 2020 年年底习近平主席提出中国力争于 2030 年前碳达峰和 2060 年前实现碳中和的宏伟目标，给新能源汽车可持续发展注入强大动力。

回顾过去，展望未来，我们可以更加清晰地看出当前新能源汽车发展在能源与工业革命中所处的历史方位。众所周知，每次能源革命都始于动力装置和交通工具的发明，而动力装置和交通工具的发展则带动对能源的开发利用，并引发工业革命。第一次能源革命，动力装置是蒸汽机，能源是煤炭，交通工具是火车。第二次能源革命，动力装置是内燃机，能源是石油和天然气，能源载体是汽、柴油，交通工具是汽车。现在正处于第三次能源革命，动力装置是各种电池，能源主体是可再生能源，能源载体是电和氢，交通工具就是电动汽车。第一次能源革命使英国经济实力超过荷兰，第二次能源革命使美国经济实力超过英

国,而这一次可能是中国赶超的机会。第四次工业革命又是什么?我认为是以可再生能源为基础的绿色化和以数字网络为基础的智能化管理。

从能源与工业革命的视角看新能源汽车,我们可以发现与之密切相关的三大革命:动力电动化——电动车革命;能源低碳化——新能源革命;系统智能化——人工智能革命。

第一,动力电动化与电动车革命。

锂离子动力电池的发明引发了蓄电池领域百年来的技术革命。从动力电池、电力电子器件的发展来看,高比能量电池与高比功率电驱动系统的发展将促使电动底盘平台化。基于新一代电力电子技术的电机控制器升功率提升一倍以上,可达50千瓦,未来高速高电压电机升功率提升接近一倍,可达20千瓦,100千瓦轿车的动力体积不到10升。随着电动力系统体积不断减小,电动化将引发底盘平台化和模块化,使汽车设计发生重大变革。电动底盘平台化与车身材料轻量化会带来车型的多样化和个性化。主动避撞技术与车身轻量化技术相结合,将带来汽车制造体系的重大变革。动力电动化革命将促进新能源汽车的普及,最终将带动交通领域全面电动化。中国汽车工程学会《节能与新能源汽车技术路线图2.0》提出了我国新能源汽车的发展目标:到2030年,新能源汽车销量达到汽车总销量的40%左右;到2035年,新能源汽车成为主流,其销量达到汽车总销量的50%以上。在可预见的未来,电动机车、电动船舶、电动飞机等都将成为现实。

第二,能源低碳化与新能源革命。

国家发改委和能源局共同发布的《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》提出到2030年非化石能源占能源消费总量比重达到20%左右,到2050年非化石能源占比超过一半的目标。实现能源革命有五大支柱:第一是向可再生能源转型,发展光伏发电和风电技术;第二是能源体系由集中式向分布式转型,将每一栋建筑都变成微型发电厂;第三是利用氢气、电池等相关技术存储间歇式能源;第四是发展能源(电能)互联网技术;第五是使电动汽车成为用能、储能和回馈能源的终端。中国的光伏发电和风电技术已经完全具备大规模推广条件,但储能仍是瓶颈,需要靠电池、氢能和电动汽车等来解决。而随着电动汽车的大规模推广,以及电动汽车与可再生能源的结合,电动汽车将成为利用全链条清洁能源的“真正”的新能源汽车。这不仅能解决汽车自身的污染和碳排放问题,同时还能带动整个能源系统碳减排,从而带来一场面向整个能源系统的新能源革命。

第三,系统智能化与人工智能革命。

电动汽车具有出行工具、能源装置和智能终端三重属性。智能网联汽车将

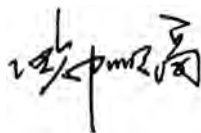
重构汽车产业链和价值链,软件定义汽车,数据决定价值,传统汽车业将转型为引领人工智能革命的高科技行业。同时,从智能出行革命和新能源革命双重角度来看汽车“新四化”中的网联化和共享化:一方面,网联化内涵里车联信息互联网和移动能源互联网并重;另一方面,共享化内涵里出行共享和储能共享并重,停止和行驶的电动汽车都可以连接到移动能源互联网,最终实现全面的车网互动(V2G, vehicle to grid)。分布式汽车在储能规模足够大时,将成为交通智慧能源也即移动能源互联网的核心枢纽。智能充电和车网互动将满足消纳可再生能源波动的需求。到2035年我国新能源汽车保有量将达到1亿辆左右,届时新能源车载电池能量将达到50亿千瓦时左右,充放电功率将达到25亿~50亿千瓦。而2035年风电、光伏发电最大装机容量不超过40亿千瓦,车载储能电池与氢能结合完全可以满足负荷平衡需求。

总之,从2001年以来,经过近20年积累,中国电动汽车“换道先行”,引领全球,同时可再生能源建立中国优势,人工智能走在世界前列。可以预见,2020年至2035年将是新能源电动汽车革命、可再生能源革命和人工智能革命突飞猛进、协同发展,创造新能源智能化电动汽车这一战略性产品和产业的中国奇迹的新时代。三大技术革命和三大优势集成在一个战略产品和产业中,将爆发出巨大力量,不仅能支撑汽车强国梦的实现,而且具有全方位带动引领作用。借助这一力量,我国将创造出主体产业规模超过十万亿元、相关产业规模达几十万亿元的大产业集群。新能源汽车规模化,引发新能源革命,将使传统的汽车、能源、化工行业发生翻天覆地的变化,真正实现汽车代替马车以来新的百年未有之大变局。

新能源汽车技术革命正在带动相关交叉学科的大发展。从技术背景看,节能与新能源汽车的核心技术——新能源动力系统技术是当代前沿科技。中国科学技术协会发布的2019年20个重大科学问题和工程技术难题中,有2个(高能量密度动力电池材料电化学、氢燃料电池动力系统)属于新能源动力系统技术范畴;中国工程院发布的报告《全球工程前沿2019》提及动力电池4次、燃料电池2次、氢能与可再生能源4次、电驱动/混合电驱动系统2次。中国在20年的节能与新能源汽车的研发过程中实际上已经积累了大量的新知识、新方法、新经验。“节能与新能源汽车关键技术研究丛书”立足于中国实践与国际前沿,旨在总结我国节能与新能源汽车的研发成果,满足我国节能与新能源汽车技术发展需要,反映国际节能与新能源汽车关键技术研究趋势,推动我国节能与新能源汽车关键技术转化应用。丛书内容包括四个模块:整车控制技术、动力电池技术、电机驱动技术、燃料电池技术。丛书所包含图书均为国家自然科学基金项目、国家科技重大专项或国家重点研发计划项目等支持下取得的研究

成果。该丛书的出版对于增强我国新能源汽车关键技术知识积累、提升我国自主创新能力、应对气候变化、推动汽车产业的绿色发展具有重要作用,并能助力我国迈向汽车强国。希望通过该丛书能够建立学术和技术交流的平台,让作者和读者共同为我国节能与新能源汽车技术水平和学术水平跻身国际一流做出贡献。

中国科学院院士
清华大学教授



2021年1月



发展新能源汽车是汽车行业实现碳达峰、碳中和的主要途径,世界各国纷纷出台各项支持政策,大力推动新能源汽车产业发展。发展新能源汽车也是我国从汽车大国走向汽车强国的必由之路,是应对气候变化、推动绿色发展的战略举措。

常见的新能源汽车可分为混合动力汽车、纯电动汽车和燃料电池汽车。新能源汽车与传统汽车的关键区别在于动力系统(由动力电池或燃料电池等新能源动力系统替代了传统的内燃机动力系统)、空调系统(由电动空调系统替代了传统的发动机驱动空调系统)。

动力电池为纯电动汽车提供能量,是纯电动汽车的核心系统。动力电池为具有复杂产热与传热过程的电化学动力源,温度是影响动力电池的关键因素之一。电池充放电过程的电化学反应都是在特定的温度范围内才能发生,温度对动力电池的电化学系统运行、充放电效率、功率、容量、可靠性、安全性和寿命等性能有着重要影响。动力电池热管理主要是在电池热特性研究的基础上,通过设计合理的电池组热管理系统结构和发展先进的热管理控制策略,使电池工作在合适的温度范围内,并有效控制电池组各单体之间的温差,以提高动力电池的性能。随着新能源汽车发展对动力电池寿命、充放电性能和环境适应性等要求的逐渐提高,动力电池热管理的重要性日益突显。

质子交换膜燃料电池为燃料电池汽车提供动力来源,是燃料电池汽车的核心系统。质子交换膜燃料电池是一种以氢气和氧气为原料,将化学能转化成电能的装置,其电化学反应将生成热和水,燃料化学能通过燃料电池堆转化的电能和热能约各占 50%。质子交换膜燃料电池内部热平衡与水平衡紧密联系、互相影响,对燃料电池的性能、寿命和运行安全起着关键作用。质子交换膜燃料电池热管理又称水热管理,主要是对电池内部气、液流动传质与传热进行控制,保持电池的热平衡和水平衡。温度升高有利于提高电化学反应速率和质子在

电解质膜内的传递速率,电池性能变好。水含量强烈影响膜的导电性能,高温将使质子交换膜脱水,不满足膜的湿润条件,其电导率下降,电池性能变差。当电池温度过高或超温运行时,质子交换膜会出现微孔,导致氢气泄漏,危及运行安全。由于燃料电池堆和运行环境间温差较小,热传递需随电流密度变化而迅速变化,热管理成为一个极具挑战性的难题。

新能源汽车电动空调系统采用电动压缩机取代了传统发动机皮带驱动的空压机,工作所需能量均来自动力电池或燃料电池,电动空调系统的能效水平直接影响新能源汽车整车经济性和续航里程。新能源汽车电动空调与传统汽车空调的制冷工作原理基本相同,传统汽车空调可利用发动机余热进行采暖,而新能源汽车电动空调有制热需求,通常采用 PTC(正温度系数)加热器直接加热空气或先加热冷却液再间接加热空气的电加热方式。通过优化控制策略保障乘员的热舒适性并降低电动空调系统能耗,为新能源汽车电动空调系统研究的重要内容。

本书正是围绕上述三个方面的研究工作逐章展开的。研究工作得到了国家自然科学基金(中国汽车产业创新发展联合基金重点支持项目)“车用动力电池系统热特性、热传输及热管理机制研究”(U1864212)以及国家 973 计划、国家重点研发计划等相关项目的支持。感谢团队博士生李伟、杨瑞、刘钊铭、王悦齐,以及硕士生王晨阳、何天祺、尧磊等同学,本书凝聚了他们学位论文的研究成果。感谢团队的科研助理杨艺馨,她对书中的细节、措辞等进行了认真审核,为本书的顺利出版做出了贡献。

鉴于新能源汽车热管理所涉及系统的内在复杂性,本书仅仅是从一个角度诠释了我们的研究进展。由于我们的研究水平有限,书中难免会有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2022 年 8 月



目录

CONTENTS

第 1 章 动力电池产热模型与热特性	1
1.1 锂离子电池产热原理及模型	1
1.1.1 锂离子电池产热原理	1
1.1.2 锂离子电池产热模型	2
1.2 基于内阻的锂离子电池热特性模型	3
1.2.1 锂离子电池热特性模型	3
1.2.2 基于电池内阻的产热模型	4
1.3 圆柱电池热分析建模及热特性	6
1.3.1 圆柱电池热分析模型	6
1.3.2 圆柱电池热特性分析	17
1.4 软包电池热分析建模及热特性	20
1.4.1 软包电池热分析模型	20
1.4.2 软包电池热特性分析	30
1.5 方形电池热分析建模及热特性	32
1.5.1 方形电池热分析模型	32
1.5.2 方形电池热特性分析	36
本章参考文献	38
第 2 章 动力电池热管理系统设计	42
2.1 锂离子电池热管理系统概述	42
2.2 锂离子电池风冷系统热分析及设计	45
2.2.1 风冷电池组热特性分析建模	45

2.2.2	流道结构对单排电池热特性的影响	48
2.2.3	流道结构对多排电池热特性的影响	58
2.3	锂离子电池水冷系统热分析及设计	66
2.3.1	锂离子电池水冷系统及强化换热	66
2.3.2	微通道波纹水冷板流动换热特性	67
2.3.3	基于微通道波纹水冷板的电池热特性	73
	本章参考文献	83

第3章 动力电池平板热管强化传热 87

3.1	基于热管的锂离子电池热管理	87
3.2	电池热管理的平板热管建模及设计	89
3.2.1	基于平板热管的电池传热过程	89
3.2.2	电池组热电耦合产热建模	91
3.2.3	平板热管多热源多尺度参数化建模	93
3.2.4	平板热管多热源参数化模型验证	103
3.2.5	动力电池平板热管设计	105
3.3	基于平板热管的电池热特性	113
3.3.1	稳态放电工况电池组热特性	113
3.3.2	动态工况电池组热特性	120
	本章参考文献	121

第4章 燃料电池水热管理 124

4.1	燃料电池水热传输特性	124
4.1.1	质子交换膜燃料电池基础	124
4.1.2	质子交换膜燃料电池热力学基础	126
4.1.3	质子交换膜燃料电池水热传输过程	127
4.2	燃料电池水热管理建模	129
4.2.1	水蒸气输运与管理	129
4.2.2	液态水输运与管理	135
4.2.3	燃料电池热管理	143
4.2.4	燃料电池三维两相流动与传热模型	146

4.2.5 燃料电池系统仿真建模	152
4.3 燃料电池双极板设计	158
4.3.1 双极板气体流道设计	158
4.3.2 双极板/冷却板散热设计	161
4.4 燃料电池余热利用	164
本章参考文献	168

第5章 燃料电池冷启动

5.1 燃料电池冷启动特点	170
5.1.1 层分离	171
5.1.2 材料损坏	171
5.1.3 冷启动过程随机性	172
5.1.4 冷启动过程的三个阶段	174
5.2 燃料电池冷启动建模	175
5.2.1 过冷水结冰概率模型	176
5.2.2 低温下质子交换膜饱和含水量	178
5.2.3 低温启动过程中质量和能量运输	179
5.3 燃料电池冷启动性能	181
5.3.1 不同初始条件冷启动性能	183
5.3.2 不同运行参数冷启动性能	187
5.3.3 不同结构参数冷启动性能	188
5.4 燃料电池冷启动失败模式	192
5.4.1 两种冷启动失败模式比较	192
5.4.2 冷启动失败模式分类图	194
本章参考文献	195

第6章 电动空调系统及其控制策略

6.1 电动空调系统及其建模	198
6.1.1 电动空调系统组成	198
6.1.2 电动空调系统建模	201
6.2 电动空调系统 PID 控制策略	207

6.2.1 自适应模糊 PID 控制策略	207
6.2.2 自适应模糊 PID 控制应用	217
6.3 电动空调系统模型预测控制策略	226
6.3.1 智能模型预测控制策略	227
6.3.2 智能模糊 MPC 控制应用	241
本章参考文献	244

第 7 章 电动汽车整车综合热管理 247

7.1 电动汽车热管理系统建模	247
7.1.1 电动汽车低温热管理系统建模	247
7.1.2 电动汽车协同热管理系统建模	251
7.2 动力电池热管理系统控制	262
7.2.1 电池热管理系统控制策略	262
7.2.2 车速预测及对控制的影响	264
7.2.3 自适应电池温度参考值控制器	271
7.2.4 对照组控制策略	273
7.2.5 电池热管理控制策略对比分析	274
7.3 电池与乘员舱协同热管理系统控制	278
7.3.1 电池与乘员舱协同热管理控制策略	278
7.3.2 电池最佳工作温度控制策略	280
7.3.3 对照组系统控制策略	283
7.3.4 协同热管理系统控制策略对比分析	285
本章参考文献	293

第 1 章

动力电池产热模型与热特性

锂离子电池为纯电动汽车提供能量,是纯电动汽车的核心系统,其性能的优劣直接影响整车的性能。锂离子电池是一个具有复杂产热与传热过程的电化学生动力源,电池充放电过程的电化学反应都是在特定的温度范围内才能发生,温度直接影响电池的电化学系统运行、充放电效率、功率、容量、可靠性、安全性和寿命等性能。电池产热模型和热特性是电池热管理研究的基础和前提。

1.1 锂离子电池产热原理及模型

1.1.1 锂离子电池产热原理

1985年,Bernardi等基于热力学第一定律提出了锂离子电池热平衡方程^[1]。该模型考虑了电池的焓变、相变、不可逆热以及热容对电池充放电过程热量的影响,揭示了电池的电化学发热机理和内部热量的来源,并详细给出了电池产热的电化学机理。电池产热机理的基本表达式如下:

$$q_t - IV = \sum_l \left[I_l T^2 \frac{d \frac{U_{l,avg}}{T}}{dT} \right] - \sum_j \frac{d}{dt} \left[\int_{v_j} \sum_i c_{i,j} RT^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln \left(\frac{\gamma_{i,j}}{\gamma_{i,j}^{avg}} \right) dv_j \right] - \sum_{j,j \neq m} \sum_i \left[(\Delta H_{i,j \rightarrow m}^o) - RT^2 \frac{\partial}{\partial T} \ln \left(\frac{\gamma_{i,m}^{avg}}{\gamma_{i,j}^{avg}} \right) \frac{dn_{i,j}}{dt} \right] + \frac{dT}{dt} \left[\sum_j \sum_i n_{i,j}^o C_{p_{i,j}}^{avg} + \sum_l \int_0^t I_l dt \frac{\Delta C_{p_l}}{n_l F} + \sum_{j,j \neq m} \sum_i (C_{p_{i,j}}^{avg} - C_{p_{i,m}}^{avg}) (n_{i,j} - n_{i,j}^o) \right] \quad (1-1-1)$$

式中, q_t 为电池与周围环境的热交换率, I 为总电流, V 为电池端电压, I_l 为电极

反应的局部电流, T 为电池温度, $U_{l, \text{avg}}$ 为局部反应 l 贡献的平均开路电压, C_p^{avg} 为恒压下的平均比热容, t 为时间, ΔH 为焓变, R 为摩尔气体常数, v_j 为电池中第 i 种物质在 j 相内的体积, $\gamma_{i,j}$ 为第 i 种物质在 j 相内的活度系数, $n_{i,j}$ 为第 i 种物质在 j 相内的物质的量, $c_{i,j}$ 为第 i 种物质在 j 相内的浓度, 上标“o”表示标准参考状态。

尽管 Bernardi 等提出的产热方程与电化学反应直接相关, 但该方程形式比较复杂而且包含大量的不确定参数, 给研究以及产热量的计算带来了极大的困难, 因此 Thomas 等人对该理论模型进行了简化。他们将电池内部的产热分为可逆热和不可逆热两部分, 并将其直接与宏观电池电参数挂钩^[2]。这一简化所形成的电池产热方程如下所示:

$$q = I \left(V - U + T \frac{dU}{dT} \right) + C_p \frac{dT}{dt} \quad (1-1-2)$$

式中, U 为开路电压(OCV), C_p 为比热容。

1.1.2 锂离子电池产热模型

式(1-1-2)是目前通用的电池产热方程, 广泛应用于电池的研究以及设计中。在工程实际应用时, 其产热模型主要有三种。

第一种产热模型基于电池内阻。该产热模型将电池的不可逆热中的 $V-U$ 项与欧姆内阻和极化内阻联系起来, 将其表达为内阻的形式, 以简化建模和计算。尽管该模型不考虑电池内部产热率的分布, 但其因简单的建模方法和较高的建模精度而深受电池热管理系统相关工程师的喜爱。在相关研究方面, Wang 等将电池的内阻假设为常数, 并根据欧姆定律建立了电池的产热模型^[3]; Rania Rizk 等将电池不可逆热部分假设为由恒定电阻所引起^[4]。这样将可逆热部分简化为恒定电阻或将不可逆热部分处理为恒定电阻均会导致建模误差。这是因为电池内阻受电池温度、SOC(荷电状态)、电池大小、老化程度等多方面因素的影响。杨勇^[5]将电池内阻与 SOC 和自身温度联系起来, 建立了电池内阻的预测模型, 进而形成了相关的电池产热模型。实验结果证明了电池产热模型中考虑电池温度以及 SOC 对电池内阻影响的重要性与必要性。

第二种电池产热模型为电化学-热耦合模型。这种产热模型由电池电化学

模型和热模型组成。电化学模型通过仿真发生在内部固相、液相间的电化学反应过程和固相、液相的锂离子传质过程,计算电池的液相电压、固相电压以及工作电压,再根据 Thomas 等人提出的电池产热理论计算电池的产热。尽管该模型结构复杂,且很多参数不易获得,但它能够揭示电池内部电化学反应以及电荷输运特性对电池产热的影响。对于该模型的研究和使用,李博蓝建立了 18650 锂离子电池的电化学-热耦合模型^[6],黄伟建立了方块电池的电化学-热耦合模型^[7]。电化学-热耦合模型在电化学参数准确测量的前提下,能够准确地预测电池在中、低电流倍率下的电、热特性,但在高电流倍率下误差较大。此外,虽然这种模型可基于电化学反应机理计算电池的产热,能准确预测电池各阶段的产热情况,但精确测量建模所需的参数需要大量复杂的实验,建立这种模型的成本较高。

第三种电池产热模型为电-热耦合模型。此类可细分为基于集总参数法的电-热耦合产热模型和分布式电-热耦合产热模型。前者的电池产热模型直接套用 Thomas 的简化模型,但对于模型中电池端电压的计算则需要建立相关电池等效电路模型。后者的电模型根据电流守恒计算出电流密度的分布、电压分布,而热模型则是将 Thomas 的简化模型进行离散化处理,并与电池模型相耦合计算产热率的分布。基于集总参数法的电-热耦合产热模型在电池状态估计、电池系统建模中被广泛使用,其使用者主要是电池系统电气工程师。分布式电-热耦合产热模型由 Kwon 等^[8]提出,经过 Kim 等^[9]的发展已经成功应用于软包电池的产热分布以及温度分布预测中。电-热耦合产热模型建模难度高于基于电池内阻的产热模型,但其在提供热力学参数的同时,还能提供电池电学参数,可进一步拓展对温度对电池电气性能影响的理解和认识。

1.2 基于内阻的锂离子电池热特性模型

1.2.1 锂离子电池热特性模型

锂离子电池热特性模型包括产热模型、电池内部的传热模型,以及电池间和电池与外界的传热模型,其主要用途为求解电池的温度。下面主要介绍电池

自身的热建模和热特性,所涉及电池热模型包括电池产热模型和电池内部的热模型。

电池热模型按空间维度分类,可分为基于集总参数法的热模型和基于温度分布的热模型。前者将电池温度简化为单一温度,计算所得温度为电池平均温度。该模型计算量小,主要用于电池系统建模及其控制。后者通过求解三维导热方程计算电池的温度分布。尽管求解三维偏微分方程的计算量大,但基于温度分布的热模型能获得电池温度的空间分布信息,有利于电池热管理系统的结构设计。对于基于集总参数法的热模型,电池内部温度分布的计算如式(1-2-1)所示。

$$\rho V_{\text{cell}} C_p \frac{\partial T}{\partial t} = q - hA(T - T_{\text{am}}) \quad (1-2-1)$$

式中, h 为对流换热系数, A 为电池的传热面积, T_{am} 为周围环境温度, ρ 为电池密度, q 为电池产热量, V_{cell} 为电池的体积。对于温度分布式热模型,电池内部温度分布由三维导热方程式(1-2-2)求解。

$$\rho V_{\text{cell}} C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q \quad (1-2-2)$$

式中, k 为导热系数。

1.2.2 基于电池内阻的产热模型

产热模型作为锂离子电池的热模型核心,其建立过程至关重要。1985年,Bernardi等人基于电池内阻和熵增反应,并假设电池内部热源稳定且均匀产热,将极化热与反应热处理成不可逆的反应热,提出了一种锂离子电池生热速率估算模型^[1]。

$$q = \Delta G + T\Delta S + W_{\text{el}} \quad (1-2-3)$$

式中, ΔS 为熵变, ΔG 为吉布斯自由能变, W_{el} 为电功。 ΔG 和 W_{el} 可分别由式(1-2-4)和式(1-2-5)获得。

$$\Delta G = -nFU \quad (1-2-4)$$

$$W_{\text{el}} = nFV \quad (1-2-5)$$

式中, n 为电子数, F 为法拉第常数(其值为96485.3 C/mol), V 为电池端电压,