



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM

中图分类号: U473
学科分类号: 080204

论文编号: 1028702 17-S017

硕士学位论文

基于典型城市工况的电动汽车动力电池热管理策略研究

研究生姓名	郭阳东
学科、专业	车辆工程
研究方向	电动汽车技术
指导教师	李玉芳 副教授

南京航空航天大学
研究生院 能源与动力学院
二〇一六年十二月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics
The Graduate School
College of Energy and Power Engineering

**Research on Thermal Management Strategy
of Power Battery Based on Typical City
Driving Cycles of Electric Vehicles**

A Thesis in
Vehicle Engineering

by
Guo Yangdong

Advised by
Associate Prof. Li Yufang

Submitted in Partial Fulfillment
of the Requirements
for the Degree of
Master of Engineering

December, 2016

承诺书

本人声明所呈交的硕士学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京航空航天大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

本人授权南京航空航天大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本承诺书）

作者签名： 郭阳东
日 期： 2017.3.22

摘 要

由于能源紧缺和环境污染的问题，电动汽车在近二十年来得到了快速迅猛的发展。动力电池作为电动汽车最为核心的部件之一，将影响到电动汽车未来的发展方向。而电池的热管理系统是动力电池技术最为关键的一环，直接关系到动力电池以及整个电动汽车的安全与寿命。

本文以城市电动轿车为应用背景，以 18650 锰酸锂动力电池为对象，研究了典型城市工况下动力电池生热特性，总结出了动力电池的一般温升规律，并针对当前传感器测量电池温度的滞后问题，结合电池内部温度估计算法，提出了基于电池内部估计温度的热管理策略，该策略结合了动力电池的温度特性以及电动汽车的工况特性，并实时监测、反馈动力电池的电压、电流、温度以及电动汽车的行驶工况，以电池内部估计温度为温度管理依据，最大限度地保障动力电池工作在理想的温度范围内，对提高动力电池及电动汽车的安全和寿命具有重要意义。本文主要的研究工作如下：

(1) 阐述探究锂电池的生热机理，并总结了动力电池温升的影响因素；厘清了动力电池生热与电动汽车工况特性的关系，并基于 advisor 仿真软件，在典型城市工况下，得到了动力电池的输出特性，为动力电池的建模仿真提供工况数据。

(2) 分析总结动力电池现有的建模方法，并基于 Comsol 软件建立了动力电池的电化学-热三维模型；在典型城市工况及不同环境温度下，对动力电池单体和模块分别进行了仿真计算，得到了不同典型城市工况下的动力电池温升特性，为热管理策略提供了理论依据。

(3) 搜集整理国内外热管理系统的现状，并提出了基于电池内部估计温度的热管理策略；基于电池内部温度估计方程，在 Matlab/Simulink 软件上搭建了电池内部温度估计模型，并分析了内部温度估计误差；设计了热管理系统的软硬件框架，为热管理系统的搭建提供支持。

(4) 为了验证动力电池的温度特性，搭建了热特性实验台架，并对测试数据进行了处理，得到了端电压与 SOC 的关系曲线和内阻与 SOC 的关系曲线；搭建了热管理系统半物理仿真平台，验证了基于电池内部估计温度热管理策略的有效性和合理性，改善了基于电池表面测量温度策略的滞后性。

关键词：电动汽车，动力电池，典型城市工况，温度特性，内部温度估计，热管理策略

ABSTRACT

Due to energy shortage and environmental pollution, electric vehicles in the recent 20 years have obtained rapid and great development. Power battery which is the key to battery cars would have a great influence to the future of electric vehicles. And battery thermal management system is the most essential for power battery technology, directly related to the safety and the lifetime of power battery and the electric car.

This paper is in a 18650 manganese acid lithium power battery for the object based on application background of urban electric vehicle, the thermal characteristics of the power battery under the condition of typical city is on research, and the general law of temperature rise of power battery is summarized. And in view of the temperature sensor's lag issues, combined with the battery internal temperature estimation algorithm, the battery thermal management strategy is proposed based on the inside temperature estimated. The battery thermal management system with the strategy which combines the temperature characteristic of power battery and the characteristics of the operation condition of the electric vehicle could be maximum keep power battery working in an ideal temperature range by real-time monitoring and feedback battery voltage, current, temperature and electric vehicle driving condition to improve the safety and service life of power battery and electric vehicle. The main research work is as follows:

(1)The heat generating mechanism of the lithium battery is expounded and the influence factors of power battery temperature rise are analyzed. The relationship between heat production of battery and working condition of electric vehicle is clarified by the simulation based on software advisor under typical urban condition, and the output performance of power battery is gained to provide battery modeling and simulation with the data.

(2)The method and classification of battery modeling are analyzed and a three-dimensional electrochemical-thermal model is established based on Comsol Multiphysics software. Under typical urban conditions and different ambient temperature, some simulations about the battery module and cell are respectively conducted, the temperature performance of power battery has been summed up to provide theoretical basis for the thermal management strategy.

(3)The thermal management system at home and abroad is summarized, and a thermal management strategy based on internal estimation temperature is put forward. Based on the battery estimating equations of internal temperature, the estimation model of internal temperature has been

built on Matlab/Simulink software to analysis of estimation error. The hardware and software framework are designed to provide support for thermal management system construction.

(4)In order to verify the temperature performance of power battery, the experiment platform of thermal characteristics is built and the related test data is handled to get the relationship curve of SOC with open circuit voltage and internal resistance. Semi-physical test bench of the thermal management system is set up to improve the hysteresis based on the strategy of cell surface measuring temperature and verify the effectiveness based on the strategy of cell internal estimating temperature.

Key words: Electric vehicle, power battery, typical city working condition, temperature performance, internal temperature estimation, thermal management strategy

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT	II
目 录.....	V
图表清单.....	VIII
注释表.....	X
缩略词.....	XII
第一章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 研究背景及意义.....	2
1.3 国内外研究现状及发展趋势.....	4
1.3.1 研究现状.....	4
1.3.2 发展趋势.....	7
1.4 存在的关键问题.....	7
1.5 本文主要研究内容.....	8
第二章 电池产热机理与典型城市工况特性分析.....	9
2.1 产热机理.....	9
2.2 温升影响因素分析.....	10
2.2.1 环境温度.....	10
2.2.2 SOC/SOH.....	11
2.2.3 工作电流.....	12
2.2.4 热管理系统.....	13
2.3 典型城市工况下动力电池工作电流仿真计算.....	14
2.3.1 整车参数与动力电池匹配计算.....	14
2.3.2 工况仿真计算.....	16
2.3.3 动力电池工况数据分析.....	17
2.4 本章小结.....	19
第三章 动力电池温升模型与仿真.....	20
3.1 动力电池热模型.....	20
3.2 动力电池电化学-热耦合模型的搭建.....	20

3.2.1 电化学模型.....	21
3.2.2 热模型.....	22
3.2.3 电化学-热耦合模型.....	23
3.2.4 模型搭建.....	24
3.3 典型城市工况下的动力电池热仿真分析.....	26
3.3.1 单体仿真分析.....	27
3.3.2 电池模块仿真结果分析.....	30
3.4 本章小结.....	32
第四章 基于电池内部估计温度的热管理系统研究.....	33
4.1 电池内部温度估计.....	33
4.1.1 电池内部温度估计模型.....	33
4.1.2 电池内部温度估计模型搭建.....	34
4.1.3 内部温度估计误差影响.....	35
4.2 热管理系统硬件设计.....	35
4.2.1 动力电池信息采集部分.....	36
4.2.2 信息通信部分.....	37
4.2.3 系统电源部分.....	38
4.2.4 执行驱动部分.....	39
4.2.5 处理器最小系统部分.....	40
4.2.6 故障预警及避险部分.....	40
4.3 热管理系统软件设计.....	40
4.3.1 电池信息读取和判断部分.....	41
4.3.2 工况信息读取和识别部分.....	41
4.3.3 热管理策略综合处理部分.....	42
4.4 上位机显示及控制系统设计.....	43
4.5 本章小结.....	44
第五章 电池热特性试验及热管理系统半物理试验仿真.....	45
5.1 电池热特性试验台架搭建.....	45
5.2 电池热特性试验测试.....	46
5.3 热管理系统半物理试验台架搭建.....	49
5.4 热管理策略试验验证.....	51
5.5 本章小结.....	54

第六章 全文总结与展望.....	55
6.1 全文总结.....	55
6.2 展望.....	55
参考文献	57
致 谢.....	61
在学期间的研究成果及发表的学术论文.....	62

图表清单

图 1.1 风冷式电池散热结构图.....	5
图 1.2 并行通风示意图.....	6
图 1.3 串行通风示意图.....	6
图 2.1 放电欧姆内阻与 SOC 关系曲线图.....	11
图 2.2 充电欧姆内阻与 SOC 关系曲线图.....	12
图 2.3 UDDS 循环工况曲线.....	12
图 2.4 动力电池的温升计算流程图.....	13
图 2.5 advisor 软件中的纯电动汽车模型.....	17
图 2.6 动力电池输出电流-时间曲线.....	17
图 2.7 爬坡时动力电池电流输出曲线.....	17
图 3.1 电化学模型示意图.....	21
图 3.2 电化学-热耦合模耦合模式.....	23
图 3.3 一维电化学几何模型示意图.....	25
图 3.4 三维热模型的截面示意图.....	25
图 3.5 电池单体三维热几何模型.....	26
图 3.6 动力电池单列并联结构图.....	26
图 3.7 匀速工况下电池温升特性曲线.....	27
图 3.8 急加速工况下电池温升特性曲线.....	27
图 3.9 爬坡工况下电池温升特性曲线.....	28
图 3.10 急减速工况下电池温升特性曲线.....	28
图 3.11 UDDS 工况下电池温升特性曲线.....	28
图 3.12 故障工况下电池温升特性曲线.....	29
图 3.13 典型工况下的温升速率曲线.....	29
图 3.14 环境温度对电池放电时间的影响.....	30
图 3.15 典型工况下电池模块温度场分布.....	31
图 4.1 动力电池等效热电阻模型.....	33
图 4.2 内部温度估算模型.....	34
图 4.3 电池内部估算温度曲线.....	35
图 4.4 凌力尔特 LTC6803 芯片引脚配置图.....	36
图 4.5 电池电压采集电路.....	36
图 4.6 两路温度采集电路.....	37
图 4.7 电流采集电路.....	37
图 4.8 SPI 通信接口连接.....	38
图 4.9 CAN 通信接口电路.....	38
图 4.10 SCI 串口连接电路.....	38
图 4.11 高压降压模块电路.....	39
图 4.12 电流传感器电源电压模块电路.....	39

图 4.13 稳定 5V 电源电路.....	39
图 4.14 执行驱动电路.....	39
图 4.15 处理器最小系统电路连接.....	40
图 4.16 预警及避险部分电路.....	40
图 4.17 电池信息读取和判断部分软件流程图.....	41
图 4.18 车辆信息读取和工况识别部分软件流程图.....	42
图 4.19 热管理策略综合软件流程图.....	43
图 4.20 热管理系统前面板界面显示系统.....	44
图 4.21 上位机后台程序框图.....	44
图 5.1 热特性台架结构图.....	45
图 5.2 电池单体和模块实物图.....	46
图 5.3 热特性试验台架实物图.....	46
图 5.4 动力电池标准放电电流曲线.....	47
图 5.5 电池端电压随放电时间的变化曲线.....	47
图 5.6 端电压 OCV 与 SOC 关系曲线.....	48
图 5.7 电池内阻与 SOC 关系曲线.....	48
图 5.8 匀速工况和 UDDS 动态工况下动力电池温度曲线.....	49
图 5.9 加速工况下电池单体和模块的平均温度曲线.....	49
图 5.10 电池热管理系统功能框图.....	50
图 5.11 半物理仿真试验台架框图.....	50
图 5.12 前期 LTC6803 电压检测调试.....	50
图 5.13 前期 BTMS 软件调试和硬件测试.....	51
图 5.14 BTMS 半物理仿真试验台架实物图.....	51
图 5.15 策略一下的温度管理效果.....	52
图 5.16 策略二下的温度管理效果.....	52
图 5.17 两种策略下的电池表面平均温度对比.....	53
图 5.18 两种策略下的散热风扇的档位状态对比.....	54
表 2.1 锂电池中的产热反应 ^[54,55]	10
表 2.2 电动汽车主要性能参数.....	16
表 2.3 电机和动力电池主要性能参数.....	16
表 2.4 动力电池在典型城市工况下的工作电流倍率.....	18
表 3.1 锂电池电化学-热模型主要参数表.....	24
表 3.2 不同环境温度下急减速工况的电池温升速率.....	30
表 4.1 典型工况下估计模型参数值列表.....	34

注释表

A	车辆迎风面积	j_n	反应电流密度
A_e	电极面积	k_D^{eff}	锂离子有效扩散电导率
α_a, α_c	阳极、阴极反应转换系数	k^{eff}	电解液有效电导率
α	道路坡度	L_x	电池内各层厚度
a_s	电极单位体积有效反应面积	m	汽车质量
b	重心到后轴的距离	n_m	驱动电机的工作转速
b_m	电机阻尼比系数	n_{max}	驱动电机最高工作转速
C_D	空气阻力系数	n_{cell}	电池组中并联的单体数量
C_{cell}	动力电池单体额定容量	n_{bat}	电池串联数
C_p	平均热容	OCV	开路电压
C_{bat}	电池包额定容量	P_e	电机额定功率
$C_{p,x}$	电池内各层热容	P_i	电机瞬时功率
c_e	液相中锂离子平均体积浓度	P_m	电动汽车功率
c_s	固相中锂离子平均体积浓度	q_1	可逆热
$c_{s,max}$	固相锂离子最大浓度	q_2	不可逆热
$c_{s,surf}$	固相表面锂离子浓度	q	生热速率
D_e^{eff}	液相锂离子有效扩散系数	R	通用气体常数
D_s	固相锂离子扩散系数	R_s	活性材料颗粒半径
ϵ_e	电解液相体积分数	R_{in}	电池内部等效热阻
F	法拉第常数	T_{surf}	电池表面测量温度
F_t	车辆最大驱动力	R_{out}	电池外部等效热阻
f	车轮滚动阻力系数	r	活性材料颗粒径向距离
h	传热系数	S	续航里程
I	动力电池输出电流	T_{in}	电池内部估计温度
$i_{t,min}$	系统最小传动比	T	热力学温度
i	爬坡度	T_{amb}	环境温度
i_z	主减速器传动比	T_b	电池温度
i_0	电极反应交换电流密度	t_+^0	锂离子迁移数
i_g	变速器传动比	U	工作电压

U_{bat}	电池包额定电压	ψ	通用理化性能
U_{cell}	单体额定电压	σ^{eff}	电极活性物质固相有效导电率
v_a	汽车与空气相对速度	ρ	电池平均密度
v	汽车速度	ρ_x	电池内各层密度
η	传动系统效率	λ	平均热导率
η_b	电池包电能转换效率	λ_x	电池内各层导热率
η_{dia}	动力电池允许放电深度	ϕ_e, ϕ_s	液、固相平均电势
η_v	过电位	δ	汽车旋转质量转换系数

缩略词

缩略词	英文全称
BTMS	Battery Thermal Management System
BMS	Battery Management System
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule
SEI	Solid Electrolyte Interface
CRC	Cyclic Redundancy Check
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
OCV	Open Circuit Voltage

第一章 绪论

1.1 引言

能源是人类生存发展与经济繁荣增长的重要物质基础，然而，随着全球人口和经济持续快速增长，能源稀缺问题逐渐加深，能源供求矛盾日益突出。当前世界能源消费以石化资源为主，其中我国等少数国家是以煤炭为主，大部分国家则是以石油和天然气为主。根据能源专家预测，按目前的能源消耗速度，石油、天然气只能维持半个世纪左右，煤炭也只能维持一两个世纪。所以不管哪种传统能源结构，人类都将面临巨大的能源危机。我国能源资源一个重要特点是“多煤缺油少气”，是当前世界上唯一以煤炭为主要能源的发展大国。随着经济的发展，我国汽车销量持续快速增长，尤其是2009年以来，中国汽车市场进入到黄金10年，汽车市场规模从小变大，在2010年就已经成为世界第一，比早期预期的2015年提前了5年，持续成为全球最大汽车产销国^[1,2]。在我国，交通运输业是仅次于制造业的石油消费第二大行业，全行业的能耗占全国总能耗的8%左右，但是石油制品消耗占全国的34%左右^[3]。我国汽车汽油、柴油消费量占石油制品总消费量的一半左右，而我国交通运输业的能源利用效率与世界先进水平相比明显偏低，其中载货汽车、内河船舶每百吨公里油耗分别比发达国家高出30%、20%以上^[4]。参考目前汽车的增长速率以及油耗水平，我国汽车保有量将在2020年突破1.5亿辆，年耗油量将超过2.5亿吨^[5]。

汽车保有量的持续攀升，不仅给能源带来了危机，同时传统汽车排放的尾气也给环境带来了巨大的危害。2012及2013年，全国大面积持续长时间被雾霾笼罩，空气质量已经达到了严重污染程度，如何控制和降低汽车尾气排放带来的污染也是亟须解决的一大课题。环保部在2012年发布的《中国机动车污染防治年报》显示，我国已经持续三年成为全球机动车产销第一大国，机动车辆的尾气成为我国空气污染的重要来源，是雾霾、光化学烟雾污染形成的重要原因^[6]。车辆的污染物排放主要来源于尾气、燃油蒸发和油箱通风，其中后两部分排放污染物中CO、NO_x为总排放量的1%-2%，碳氢化合物为20%左右^[7]，因此汽车尾气排放为主要排放源。尾气中含有大量的一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化物、细微颗粒物及硫化物等，这些污染物还通过大气发生化学反应生成光化学烟雾、酸雨等污染物，危害人类身体健康、大气环境以及生态系统。

能源短缺和环境污染是我国汽车行业面临的巨大挑战，大力发展新能源汽车是迎接新挑战的一个重要举措。目前，世界各国都依据自己的资源条件和产业技术状况制定和实施国家交通能源发展战略，增加投入，制定各种政策和计划，加快新能源汽车产业的发展。电动汽车代表了全球汽车产业的发展动向，是将来汽车产业的制高点，是当前各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，大力发展电动汽车是解决能源、环境问题的新途径，是新一轮经济增长点的突破口，是实现交通能源转型的根本途径。我国汽车工业正积极参与到这场全球性的电动汽车的竞争当中，实现我国汽车工业的健康快速发展^[8,9,10]。

1.2 研究背景及意义

早在二十年前，我国已经在新能源汽车领域展开布局了。“八五”期间，实施了国家电动汽车关键技术攻关项目。“十五”期间，科技部组织实施了“电动汽车重大科技专项”，电动汽车开发被列入863计划，国家投入8.8亿元，是最大的科技专项之一，国内众多单位及大量科技骨干人员直接参与实施，初步形成了官、学、研、产的合作机制。“十一五”期间，国内基本形成了完整的电动汽车研发、示范布局，基本建立了以纯电动汽车、混合动力汽车、燃料电池汽车三种车型为“三纵”，动力总成控制系统、驱动电机及其控制系统、动力电池及其管理系统三种共性技术为“三横”的“三纵三横”和标准测试、能源供给、集成示范的“三大平台”构成的矩阵式的技术创新体系^[3]。

在一系列的优惠政策推动下，我国电动汽车产业取得了一定进展，汽车企业电动汽车生产研发能力增强，汽车车型数量增长。截至2013年6月，前46批《节能与新能源汽车示范推广应用工程推荐车型目录》显示，节能与新能源汽车的车型总数已有764个，其中新能源乘用车93个。在插电式混合动力汽车方面：我国插电式混合动力技术主要应用于乘用车，比亚迪插电式混合动力已发展到第二代，技术明显提升，最高车速和加速性能均有加大提高，上汽荣威550插电式混合动力、一汽奔腾B50插电式混合动力等车型也在2012年开始了示范运行活动^[6]。在纯电动汽车方面：我国已基本掌握了纯电动汽车的整车控制、动力系统匹配和集成设计等关键技术，部分企业开始进入产业化阶段，主要整车企业均将纯电动汽车纳入企业产品规划，投入也在逐渐加大，例如比亚迪、江淮、东风、长安、奇瑞、吉利等主要汽车生产企业均研制了纯电动轿车，部分车型技术已有显著提高。在燃料电池汽车方面：近年来，我国燃料电池汽车技术也取得了重要进展，自主搭建了具有知识产权的燃料电池汽车动力系统技术平台，初步形成了燃料电池发动机、动力电池、DC/DC变换器、驱动电机、储氢与供氢系统等关键零部件配套的研发体系，具有燃料电池汽车动力系统平台开发与整车生产的能力。在关键零部件技术方面：在动力电池方面，初步具备了产品研发能力和基础生产装备制造设计制造能力，动力电池性能指标逐步接近国际先进水平，锂离子电池正负极材料、电解液三大关键材料实现了国产化；在驱动电机系统方面，产品主要技术指标达到国际先进水平，性价比在国际上具有一定的优势、纯电动驱动系统的小批量生产能力，掌握了部分核心技术，部分企业形成了年产5万套以上的生产能力^[9]。

电动汽车的车载能源供给主要来自动力电池，动力电池可以说是电动汽车的能源库。目前市场上电动汽车用动力电池类型主要有铅酸电池、镍氢电池、燃料电池、锂电池等，其中铅酸

电池能量密度低、循环使用寿命短、对环境污染大，当前只在传统汽车上当辅助电源用；镍氢电池的能量密度低、体积大，已逐渐被市场所淘汰；燃料电池是新型电池，能量密度高、体积小、清洁无污染，但是安全系数低、制氢储氢难，目前技术还不成熟；而锂电池具有自放电率低、循环使用寿命长、环保、允许工作温度范围宽、比能量高、高低温性能好等优点，是电动汽车目前应用最为广泛的动力电池^[11]，如目前市场上最火的电动汽车江淮iEV3、iEV4，北汽EU260、E150等车型都是采用的锂离子电池。目前锂电池种类很多，汽车动力市场上可选择的类型众多，如有钴酸锂电池、镍酸锂电池、锰酸锂电池、磷酸铁锂电池、镍钴铝三元锂电池、镍钴锰三元锂电池等。虽然锂离子电池有众多优点，而且得到了很好的应用和发展，但是，锂电池一旦应用到电动汽车上，就需要从小的单体串并联成大的电池组，电池组内部单体数量大、结构复杂、容量大、工作电流大、工作电压高，电池组的安全系数和使用寿命都远远低于电池单体，特别是车用锂动力电池组的安全问题，始终围绕在电池生产研发者和使用者之间。随着电动汽车的不断发展，电动汽车的安全问题也越来越凸显。自从锂离子电池在各领域得到广泛应用以来，由于各类问题引发的电池自燃事件不断发生，尤其在电动汽车领域，国内各城市发生的电池组自燃甚至爆炸事件足以引起我们重视^[12]。这些现象很大程度上是由于动力电池组内部在汽车运行过程中，电池充放电伴随大量热量生产，最终导致热失控。锂离子电池的充放电伴随着电化学反应，因此其对温度变化十分敏感。过高的运行温度下将对电池组的放电性能产生严重影响，电池容量、循环寿命、电压均衡等关键参数都会受到影响；低温条件下充电，由于电极材料物理性质过于稳定、电化学反应阻抗加大，从而导致极化内阻迅速增大，充放电效率和容量急剧下降。温度制约着电动汽车性能的提升，高温对动力电池是一把双刃剑^[13]。一方面，高温有利于化学反应的进行，随着温度的上升，电解液的活性提高，离子扩散的速度加快，电池内阻减小，电池的性能得到改善。另一方面，过高的温度则会导致电极降解、电解液分解，严重降低电池的使用寿命，甚至造成电池内部结构的永久性损坏。

动力电池的热安全问题成为电动汽车推广应用的拦路虎，引起了汽车企业、电池企业以及科研高校的足够重视。特别是近年来，随着新能源汽车市场的快速发展，对更大单体容量、更高比能量锂离子电池的需求提高，促使电池生产商在电极材料及工艺上不断创新，电池单体容量和比容量不断提升，相对应的热安全问题，制约了大型锂离子动力电池的商业化推广。电池厂商需要和汽车厂商在电池应用研究上合作起来，大多数电池厂商不仅需要负责制造性能达到测试要求的电池，还需要负责满足汽车厂商的功率需求和安全需求。两者只有通力合作，才能保证动力电池在研发、生产、制造、应用上畅通无阻，促进电动汽车良性发展，达到共赢的目的。针对锂离子电池单体与模组以及电池包，特别是在电动汽车工程背景的应用下，开展其温度特性的分析研究是十分重要和迫切的。

1.3 国内外研究现状及发展趋势

1.3.1 研究现状

锂离子动力电池的热管理系统主要包括单体热模型研究、电池模块及电池组模型研究、电池箱结构建模仿真研究、冷却结构和介质研究以及热管理策略研究等，国内外各大汽车厂商及电池厂商、高校研究结构都对动力电池的热管理系统进行了较为深入的研究。

在对单体电池产热行为的研究方面，CHEN S C 等在 Bemardi 生热速率模型的基础上，分别对锂离子单体电池一维、二维以及三维模型进行比较，认为在考虑辐射换热、对流换热的情况下，单体电池的三维仿真计算结果更为理想，并分析得出放电倍率、壳体结构、对流换热系数等方面对电池的散热影响较为显著^[14]；Y.Inui 等实验测试了充放电过程中锂离子电池的内阻变化，证明了工作温度会影响锂离子电池的内阻^[15]；陈玉红等根据锂离子电池的爆炸机理分析了产热机理，阐述了电池产热量与放电倍率、电池内阻和电化学反应之间的关系，为锂离子电池产热行为的研究奠定了基础^[13]；张遥、白杨等通过 CFD 三维仿真分析，说明电解液和电极是决定电池热效应的主要因素，电极极柱和壳体的设计也影响到锂离子电池的温度分布^[16]。

对锂离子动力电池组的研究方面，Kenneth J. Kelly 等利用空气作为传热介质，对丰田 Prius 和本田 Insight 混合动力汽车用电池组进行热管理，分别在 0℃、25℃、40℃ 和 FTP-75、US06 工况下测试电池组的温升，结果说明 US06 工况下电池组温升比 FTP-75 工况下高，但温升均匀性控制在 5℃ 之内^[17]；美国可再生能源实验室首次通过实验分析和数值模拟相结合的方式对动力电池组热管理系统进行了研究，并对测试结果和数值计算结果进行对比分析，为电池组热管理系统的优化工作奠定了基础^[18]；同济大学王峰、李茂德等基于电池组的热管理研究现状，根据锂离子电池的产热机理估算理论产热速率，并在不同放电倍率下模拟了电池组内部温度场分布情况，这对电池组散热结构设计具有一定的指导意义^[19]；张国庆等设计了一种结合液体冷却与相变材料冷却的装置，能够实现电动汽车电池在比较恶劣的热环境下对电池装置整体有效地降温，又能很好保证各单体电池之间温度分布的均匀性^[20]；张国庆等人还采用热管对电池组进行冷却，起到了很好地散热效果，电池组在放电过程温度降低很多，与在自然对流条件下相比，温度降低 10℃ 以上，而且处于同一模块中各单体电池间的温差较小，有利于实现电池组间的温度平衡，从而保证电池组工作的稳定性^[21]；TESLA 在专利中提出对电池包的预加热策略，当电池箱温度低于预期温度时，向处理器发出低温信号，处理器根据低温信号计算预热时间，发出可预加热相关指令，驱动加热系统对电池进行预加热，并通过温度监测系统反馈电池箱内温度^[22]；武汉理工大学在对电池包热特性进行仿真分析后，给出了电池管理系统的设计步骤和方案，并对比了各种散热方式的优缺点以及电池箱结构的设计，但并没有给出切实有效的温度控制策略^[23]；胡明辉等人提出了联合动力电池散热结构优化措施和充电策略的控制方法，并在 Matlab/Simulink 和 Fluent 计算平台下，对电池包热管理控制方法进行了仿真计算，通过电池

包温度场实验台，验证了该电池包热管理方法的优越性^[24]。吉林大学的研究学者根据锂动力电池组的理想温度范围，制定了锂动力电池组热管理系统的总体框架和温度控制策略，采用分档的控制方法，总共分为三个档，即高速工作模式，中速工作模式，低速工作模式^[25]。该控制策略的实现依赖于高精度的温度传感器和高速率的温度采集器，而且在复杂工况下，电池内部生成大量热量的时候，并不能有效及时散热，控制策略依据的参数太过单一，而且单纯的温度传感器测试的是电池表面的温度，难以反映电池内部的温度，不能依据汽车的实际行驶工况和电池内部温度来调节散热情况。

综合以上可以看出，当前锂离子动力电池组的热管理系统根据使用传热介质不同进行分类：空气热管理、液体热管理、相变材料热管理。热管理策略的依据主要是温度传感器采集的电池箱内温度。以空气为传热介质的动力电池组热管理系统是根据动力电池组的布置形式设计空气流场，利用风机将外部的空气带入动力电池包内进行循环或者将车厢内的空气带入动力电池包对动力电池组进行散热或者加热。实际应用方面，Mitsubishi MiEV Minicap 和 Enerl Think City 车上采用的就是强制风冷却的热管理方式，散热装置是铝制的导热槽，利用导热槽与锂动力电池组整体的通风导流槽连接来进行散热。丰田普锐斯的 PHV 车上采用的也是利用空气作为传热介质的，利用风扇工作，如图 1.1 所示，分为四种工作模式，由温度控制主板决定其工作模式^[26]。

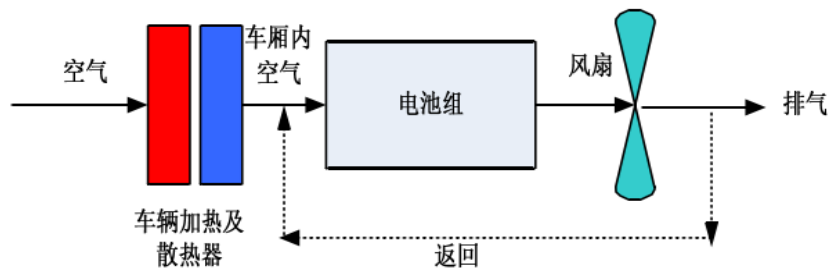


图 1.1 风冷式电池散热结构图

以空气作为传热介质的热管理系统，根据动力电池间的空气通道的不同分为两种散热方式：并行通风方式和串行通风方式，如图 1.2、图 1.3 所示。并行散热设计中可以通过改变电池组不同位置处通风道的通风量和压力角度使流过动力电池表面的空气流量均匀，实现动力电池组温度分布均匀性，而串行通风设计中冷却空气从一端进入动力电池箱内，从一端到另一端由于空气流量不变，空气的温度会逐渐升高，造成动力电池组的温度分布不均匀，出风端的动力电池的温度会比较高，因此在保证动力电池组温度均匀性方面，并行散热相对于串行通风更好，但是并行散热结构相对比较复杂。但是随着现在电动乘用车以及公交车的安全等级要求越来越高，空气冷却很难满足国家及企业的安全等级要求，所以空气冷却的热管理系统在高速及大功率的乘用车上逐渐被淘汰。但是本文为了研究热管理策略的有效性，并不涉及整车应用和安全问题，在后期试验台架搭建过程中，采用了串行通风冷却的热管理系统，在不影响课题研究前提下，可以很大程度上降低试验成本。

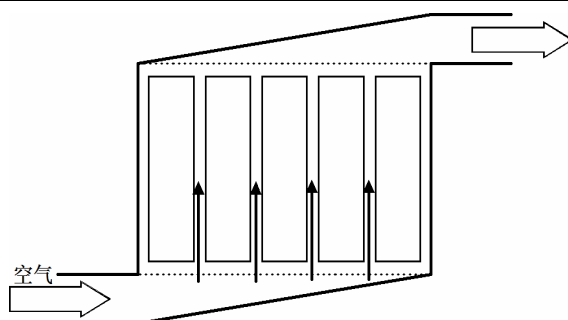


图 1.2 并行通风示意图

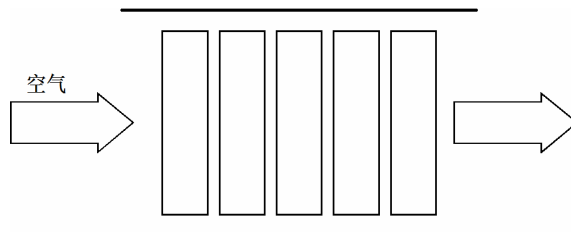


图 1.3 串行通风示意图

以液体作为传热介质的动力电池组热管理系统是利用在动力电池单体间嵌入水套，利用外部的加热器对介质加热，再利用泵将传热介质从动力电池表面流过带走表面的热量或者加热电池单体，如图 1.4 所示，在结构上会比空气作为介质的复杂，但效果一般会更好^[27]。美国的 GM Volt 和 Tesla Motors 公司的 Roadster 纯电动汽车都是采用液冷作为传热介质，将 50% 水和 50% 乙二醇混合物在散热片内封闭循环对锂动力电池组进行冷却，同时当温度过低时，加热线圈可加热上面的传热介质对动力电池组加热^[22]。

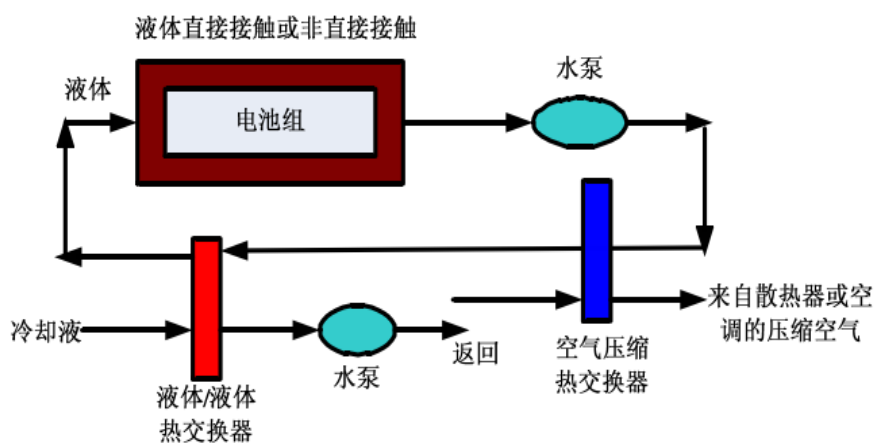


图 1.4 液冷式冷却结构示意图

以相变材料作为散热介质的动力电池热管理系统是利用相变材料在相变的过程中吸收或者释放热量的原理进行工作。系统设计时将锂动力电池组四个侧面完全浸在相变材料中。当动力电池与相变材料接触处温度达到相变材料的相变温度点时，相变材料逐渐从固态转化成液态吸收热量来降低动力电池组的温度，当动力电池温度降低时，相变材料由液态转化成固态释放相

变产生的热量给锂电池对锂电池进行加热^[28]。目前常使用的相变材料是石蜡复合材料，即在石蜡中添加些热导率比较高的材料，石蜡具有比较高的相变潜热，材料相变发生在动力电池最佳工作温度附近，且成本比较低，但是石蜡的导热系数相对较低，需要加入导热系数大的材料制成复合材料使用。

动力电池的温度管理系统以温度传感器采集的温度为参数依据的热管理策略，高度依赖 AD 采集芯片、传感器精度以及布置形式。在电池温度的采集处理上，目前虽然有专门的电池芯片公司，生产研发电池组相对应的温度采集芯片，如凌力尔特公司 LTC2983、LTC6803 等，但这些高精度高速率的采集芯片、密集的传感器布置都会导致成本过高，另外测量的温度也是电池的表面温度，温度本身是一个状态量，电池温度管理需求的是电池内部的实际温度，所以表面温度作为温度管理的参考依据，具有一定的滞后性。

1.3.2 发展趋势

当前热管理系统主要有两个方面的研究^[29]：一是从电池箱结构上的研究；二是热管理控制上的研究。在结构方面主要通过分析电池包的温度场分布、冷却介质的速度场分布，从而改进介质的出入口位置，流道的设计等；在控制方面，主要对冷却及加热系统的启动条件、时间、策略以及流速进行相应的设计。

随着电动汽车电池不断发展和市场化以及动力电池动力性能与循环寿命的提升，未来电池热管理系统将会按照以下要求进行发展：电池表面温度信息能够准确测量和监控，电池内部温度能够准确估计；电池包温度过高时能够进行有效散热；在低温环境下能够进行快速加热，达到电池包理想温度范围；实时的温度管理以保障动力电池的温度场能够均匀分布；温度异常时的故障信息预警与紧急情况避险。

1.4 存在的关键问题

根据相关文献^[30-38]，电池温度场的研究一般是在电池的表面不同位置取点，利用测温仪器如红外线测温仪、多点记录仪等监测每个取点温度的变化情况，然而，这种方式只能大概的分析动力电池表面温度的分布情况，不能总结出电池内部温度的变化规律，所以电池的热管理系统能够准确采集动力电池的表面温度、电池箱内温度，却不能准确获得动力电池的内部温度。动力电池组装配到电动汽车之前，所处的实验室环境和条件只允许进行有限工况的生热和热特性试验，无法在电动汽车复杂的行驶工况下进行相关的热特性测试，也就无法获得电动汽车工况特性下的温升特性。对于电动汽车动力电池系统来讲，其具有单体数量大、连接方式、运行工况、使用环境和健康状态多变等特点，实车动力电池的温升特性应与电池厂家的实验室温升测试特性存在不同。在动力电池热管理策略方面，大多数局限在空气冷却，由于电池包的内部空间结构狭小复杂，空气冷却是否依然有效，很难得到有效的证明，而且热管理策略参数单一，

大多数采用温度闭环或温度开环控制, 过于简单。国内外很多文献都对电池的温度特性进行了仿真分析, 其中大多数文献是对动力电池在随机工况或者大倍率工况下进行温度场的分析^[39-44], 但对于电动汽车的运行工况下动力电池的充放电实际倍率, 没有进行过多的研究。综合以上分析, 目前电池热管理系统存在的关键问题在于:

1. 现有电池热管理系统通过在电池箱内部布置有限测量点测量, 电池表面温度变化不能反映电池内部温度特性, 也不能反映每个单体内部温度, 电池内部的电化学生热模型难以准确建立, 电池的生热及温升特性规律需要进一步探索。

2. 动力电池的热特性实验条件脱离了电动汽车的应用背景, 电池的工作倍率没有与电动汽车的行驶工况联系起来, 在动力电池热管理相关的研究工作中, 缺少电动汽车整车性能及工况特性的研究。电池厂家实验室少量单体的温度特性测量, 无法满足电动汽车电池组特别是纯电动汽车大量单体的电池组的测量要求。

3. 电池热管理策略参考的温度参数过于单一, 没有考虑环境温度以及电动汽车典型的行驶工况特性等因素, 电池温度测量和温度控制都具有滞后性。

1.5 本文主要研究内容

针对动力电池的热管理现状以及关键问题, 本文将对以下内容进行研究:

1. 基于电动汽车的工程应用背景和动力电池的产热机理, 分析影响动力电池温升的主要因素; 为了研究电动汽车行驶工况下动力电池的温升特性, 根据某款纯电动汽车的整车参数、动力性以及续航里程要求, 将对电动汽车动力电池进行匹配计算和工况仿真计算, 得到典型城市工况下动力电池的输出功率和电流, 并将进一步分析得到一般动力电池在典型城市工况下的工作倍率规律;

2. 基于 Comsol 软件平台, 建立单体和电池模组的三维几何电化学-热模型, 并在典型城市工况下对动力电池进行仿真计算, 得到典型城市工况下单体电池的温升特性及电池模块的温度场分布, 为动力电池的热管理策略提供参考建议;

3. 根据电池单体及模组的温升特性及温度场分布, 提出基于电池内部温度估计的热管理策略, 并在 Simulink 中搭建电池内部温度估计模型, 将电池内部估计温度与仿真温度进行对比分析;

4. 最后将搭建动力电池的热特性实验台架, 获取仿真实验及模型搭建所需的物理性参数, 并搭建热管理系统的半物理仿真实验, 验证基于电池内部温度估计热管理策略的有效性和合理性。

第二章 电池产热机理与典型城市工况特性分析

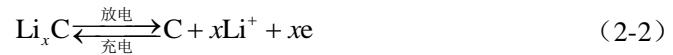
2.1 产热机理

温度对锂离子电池工作性能的影响十分显著，在研究动力电池的热管理策略之前，了解动力电池的产热机理十分必要。动力电池在充放电过程中，电池内部化学反应复杂。以锰酸锂电池为例，动力电池内部化学反应可以表示为如下形式^[29,45]。

正极反应式为



负极反应式为



总反应式为



锂离子电池在充放电过程中，电池内部发生复杂的化学反应，锂离子在正、负极之间进行运动，电池内部会伴随着热量的释放和吸收。从整个电池充放电的过程来看，锂离子电池的热量来源主要存在四种方式^[23]，主要包括充放电时进行的可逆反应产生的反应热 Q_r ；过充或者过放时电解质分解产生的副反应热 Q_s ；电流通过时，由电池内阻产生的焦耳热 Q_j ；极化反应产生的极化反应热 Q_p 。

(1) 反应热 Q_r

电池工作过程中锂离子的移动是由于电池内部发生电化学反应的结果，并在此过程中伴随热量的生成。反应热的大小与电化学反应过程中的熵变有关。

(2) 副反应热 Q_s

锂离子电池在过充、过放的条件下产生的副反应热，在电池实际工作运行过程中很小。而且，电动汽车上有保障电池组正常充放电的电池管理系统，除故障或其他人为因素外，过充、过放的情况很少发生，因此副反应热通常忽略不计。

(3) 焦耳热 Q_j

锂离子电池内部各层各部分包含不同材料，电流通过极柱、电解液、隔膜等部分时存在一定大小的电阻，电池充放电过程中，由于焦耳效应，会有较为明显的热量随之产生，这部分热量是电池组产热的主要热源，不仅与电池的本身的材料有关，还与电池的工作功率有关。

(4) 极化反应热 Q_p

锂离子动力电池在以某些倍率充放电时，一般存在极化内阻的现象，经过研究后发现，这部分内阻通常是由欧姆极化、浓差极化以及电化学极化三个方面引起的^[23]。当电流通过电池内

部时, 和电池内阻一样, 极化内阻也会造成一定压降, 且产生热量, 与电池的工作状态密切相关。

以上四种热源除了焦耳热以外, 其他均来自锂离子电池内部复杂的化学反应, 主要的产热反应包括固体电解质界面膜(SEI, Solid Electrolyte Interface)的分解^[46,47,48]、电解液的分解^[49]、正极的分解^[50,51,52]、负极与电解液的反应^[48]、负极与黏合剂的反应^[53]。而且这些化学反应发生的条件温度也各不相同, 当达到条件温度时, 锂离子电池内部各反应连锁发生, 放出或吸收热量。各温度条件下具体的产热反应如表 2.1 所示。

表 2.1 锂电池中的产热反应^[54,55]

温度范围/°C	化学反应	热量/(Jg ⁻¹)	说明
110~150	Li _x C 电解质	350	钝化膜破裂
130~180	PE 隔膜熔化	-190	吸热
160~190	PP 隔膜熔化	-90	吸热
150~300	Li _{1-x} Mn ₂ O ₄ 与电解质的分解	450	释氧温度 T=300°C
130~220	溶剂与 LiPF ₆	250	能量较低
240~350	Li _x C 与 PVDF	1500	剧烈的链增长
660	铝的熔化	-395	吸热

由以上机理分析可知, 锂电池产热大多与电化学反应有关, 与电池材料、电池温度、电池工作状态都有密切关系。由于各类电化学反应的不确定性以及电池材料等参数的未知性, 在计算电池生热量的时候, 存在一定困难。

2.2 温升影响因素分析

电池的设计和使用是影响锂离子动力电池温升的两个主要因素。在电池设计上, 主要因素是电池外形、尺寸、容量、外壳材料等^[56], 这主要是电池设计师或制造商要解决的问题, 在本文中不予讨论和研究。而本文中我们的主要工作是针对电动汽车动力电池的工程应用背景, 主要研究在电池大量成组使用过程中, 除了电池本身的结构与材料等自身因素外的其他造成温升的影响因素, 主要包括环境温度、SOC(State of Charge)/SOH(State of Health)、工作电流以及热管理系统, 本节将逐一对这些因素进行讨论, 并在后续章节中进行深入研究。

2.2.1 环境温度

环境温度对电池温度的影响主要体现在两方面, 一个是低温时, 一个是高温时。低温会严重缩减电池输出容量, 同时也会增大电池内阻, 尤其是欧姆内阻^[57]。当环境温度较低时, 电池内部的电解液活性、隔膜活性较差, 锂离子在电解液中移动或者是通过隔膜比较困难, 导致电池内部阻抗增大, 输出容量减小, 同时电池内局部产热量增多, 导致电池内部温差加大, 影响

电池寿命。一般对于锂离子电池而言，温度低于 0°C 时，避免对其充电，因为低温充电容易导致电池内部发生枝晶反应，使得电解液中的锂离子还原成金属锂，刺穿隔膜，产生安全隐患^[55]。

高温虽然会提高材料的电化学反应活性，提高离子扩散速率，加快锂离子的迁移，因此从某种意义上讲高温有助于提高锂离子电池的充放电性能。但是温度过高会加速 SEI 膜分解反应、嵌锂碳与电解液的反应、嵌锂碳与粘接剂的反应、电解液分解反应以及正极材料的分解反应，从而严重影响电池的使用寿命和使用性能^[53]，而且以上所发生的这些反应几乎都是不可逆的，当这些反应速率加快时，电池内部可用于进行可逆电化学反应的物质会迅速减少，使电池性能在短时间内衰退。并且当电池温度持续上升超过电池安全温度后电池内部自发发生电解液及电极的分解反应，这将在极短的时间内产生大量的热量，即发生电池的热失效，这将导致电池彻底被破坏。在电池箱狭小的空间内，热量难以及时散出，短时间内出现热量的迅速堆积，这极有可能导致电池热失效的迅速蔓延，使电池包冒烟、自燃甚至爆炸等安全事故的发生。

环境温度也会影响散热效果，热交换系数会随着环境温度的改变而发生变化。若通过利用温度传感器测量电池外部温度，来表征或者估计电池内部温度，环境温度的变化会影响到估计精度。

2.2.2 SOC/SOH

锂离子电池的内阻实际上不是一个恒定值，影响内阻大小的关键因素就是电池的 SOC 和 SOH，在一定使用范围内，一般不考虑 SOH 的影响，尽管 SOH 对电池内阻的影响更大，但 SOH 一般是在电池劣化到一定程度后，才对内阻有重大影响^[58]。在正常使用过程中，电池的内阻随 SOC 有一定变化，特别是在 SOC 处于很小值时。电池内阻是电池产热过程重要的因素，在 SOC 很小时，电池的温升速率加快。根据文献^[59]可以明显看出，内阻和 SOC 之间的一般关系，在 20°C 下充放电过程中，SOC 与内阻关系见图 2.1、图 2.2。

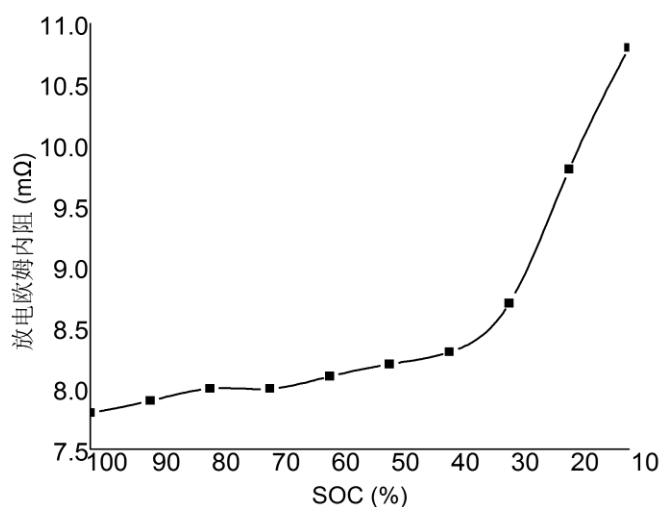


图 2.1 放电欧姆内阻与 SOC 关系曲线图

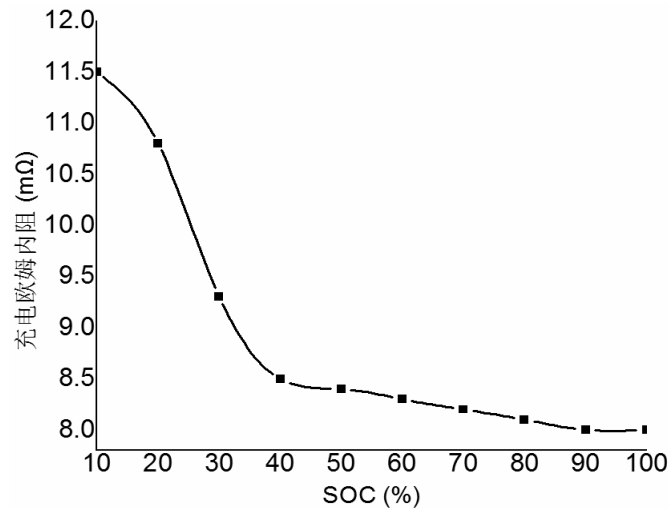


图 2.2 充电欧姆内阻与 SOC 关系曲线图

一般电池的热特性实验都会拟合出内阻与 SOC 之间的曲线关系，从曲线关系中，可以清晰的看到内阻随 SOC 变化的规律，从而得出电池的生热温升与 SOC 之间的关系。本文在第五章的内容中，将会通过标准的放电实验，得到电池 SOC 与内阻之间的关系。

2.2.3 工作电流

由上节电池产热机理分析可知，电池的大部分热量来自于欧姆热，而决定欧姆热量大小最关键的因素是工作电流。热量是过程量，温度是状态量，大量热量的产生必然会导致温度的上升。由相关文献可知^[56,57]，电池在实际工作过程中，电池温度随着工作电流的增大而提高，电池内外的温度之差也随着工作电流的提高而增大。而动力电池的工作电流主要由电动汽车的实际工作状态决定，所以说电池的温升还与电动汽车的工况特性有密切关系。

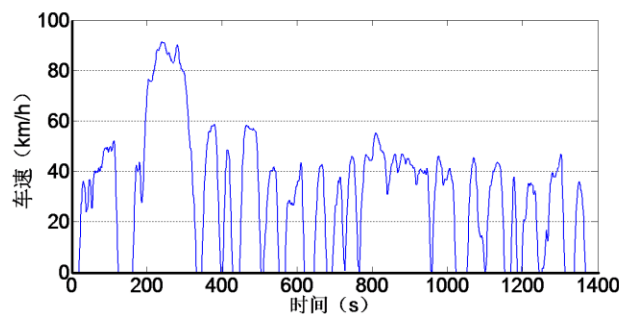


图 2.3 UDDS 循环工况曲线

电动汽车在实际行驶过程中，由于道路交通原因，经常需要急起急停，起停频率高、平均车速低、瞬时加速大、紧急制动强，在某些特殊路段还要求很大的爬坡能力。复杂多变的电动汽车行驶工况和使用工况与动力电池厂家的台架性能测试工况差别较大。温度是影响动力电池工作、安全、寿命的关键因素，而复杂苛刻的工况条件会造成动力电池急剧生热，温度瞬时过高。一旦温度出现异常，动力电池轻则不能正常工作，重则引起燃烧甚至爆炸等安全事故。本

文根据电动汽车的实际行驶工况特性，选择美国环境保护署 EPA 制定的城市道路循环 UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) 作为循环工况。UDDS 循环工况曲线如图 2.3 所示，其工况循环时间为 1367s，行驶路程为 11.99km，最高车速为 91.25km/h，平均车速为 31.5km/h，最大加速度为 1.48m/s^2 ，最大减速度为 -1.48m/s^2 ，空载时间为 259s，停车次数为 17。它是根据美国洛杉矶市中心的交通情况拟定的，包括了一系列不重复的加速、减速、怠速和接近于等速的行驶过程，十分切合电动汽车城市交通行驶的实际工况^[58]。

典型城市工况特性与温升的关系，其实就是动力电池在电动汽车典型城市工况下的输出功率与电池温升的关系。正常工作时，锂离子动力电池的输出功率，一方面与电动汽车的整车参数、行驶工况密切相关；另一方面，也与动力电池的 SOC 和实际输出电流相关。所以工况特性往上是整车参数和实际行驶工况，往下可以转化为动力电池实际 SOC 和输出电流。动力电池的温升计算流程如图 2.4 所示，整车参数、行驶工况、动力电池信息决定电动汽车的工况特性，并与输出电流、SOC、环境温度作为电池热模型的输入，经过热力学计算，得到动力电池的实际温升。

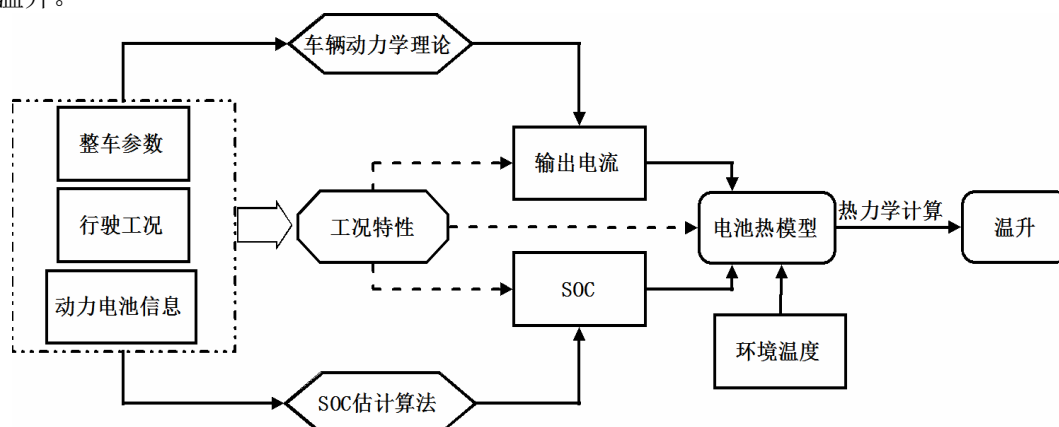


图 2.4 动力电池的温升计算流程图

汽车的整车参数由汽车厂商确定，主要由质量、尺寸、车辆动力性等要素构成，行驶工况主要由环境因素、交通状况、道路状况、驾驶员需求确定。整车参数可以确定，但是行驶工况的不确定因素很多，很难确定，在本文选取典型城市工况作为基本的行驶工况，典型城市工况主要由六个典型的汽车行驶工况决定，即匀速工况、加速工况、爬坡工况、减速工况、UDDS 动态工况、特殊故障工况。根据整车参数和行驶工况，运用车辆动力学理论，得到动力电池的输出电流，再根据动力电池信息，运用 SOC 估计算法，得到 SOC 估计值，当然，SOC 值也可以通过电池管理系统直接获取，再根据动力电池的热模型，经过热力学计算，得到动力电池的温升情况，这些内容将会在接下来的章节中详细论述。

2.2.4 热管理系统

在动力电池生热一定的情况下，电池的温升直接受热管理系统的影响，不同的热管理系统

采取的散热、加热方式不同，对电池温度的影响也不相同。通常来说，主要与热管理系统的传热介质、冷却结构、加热方式、电池包结构等有密切关系，涉及到的最核心的参数是电池包的换热系数^[57]。低温加热时，换热系数越高，电池温度达到理想工作温度的速度越快；高温散热时，换热系数越高，电池从高温降到理想工作温度的时间越短。换热系数的大小主要由动力电池热管理系统采取的结构、介质以及策略决定。本文在研究热管理策略的过程中，动力电池包的结构、冷却介质，没有过多地进行讨论，即采用常规的串行被动空气冷却的方式。热管理策略有温度开环、温度闭环等方式，本文采用的是基于典型城市工况特性的电池内部温度热管理策略，将在第四章内容中展开详述。

2.3 典型城市工况下动力电池工作电流仿真计算

在确定动力电池在典型城市工况下的工作电流前，首先涉及的是研究对象的选型，包括电动汽车整车参数的选配、动力电池的匹配等。在匹配计算时，一方面要满足本文研究内容的需要，另一方面还必须满足车辆一些性能指标的要求。选型匹配计算后，通过 advisor 软件对研究对象进行仿真计算，得到动力电池在典型城市工况下的工作电流倍率，该工作倍率虽然由具体车型仿真所得，但是对于纯电动汽车具有普遍意义。

2.3.1 整车参数与动力电池匹配计算

电动汽车动力性能的主要评价指标有：最高车速，续航里程，加速时间，最大爬坡度。电动汽车加速时间主要是指起步加速时间和超车加速时间，不论哪种加速时间，只要时间越短，车辆的加速性能就越好，车辆的动力性能也就越优。最大爬坡度是指电动汽车满载荷时在良好路面上以最低档通过的最大坡度，一般用道路坡度角的正切值的百分数表示爬坡度^[60]。和传统汽车一样，电动汽车在行驶过程中也受到行驶阻力，主要有滚动阻力、空气阻力、加速阻力和坡度阻力，在行驶的过程中，汽车的驱动力总是等于这些行驶阻力之和。电动汽车与传统燃油汽车不一样的是驱动力的来源，传统燃油汽车来自发动机，而电动汽车的驱动力来自电动机。

电动汽车的行驶动力方程式为^[60]

$$\frac{T_m i_g i_z \eta_t}{r} = mgf \cos \alpha + \frac{C_D A}{21.15} v_a^2 + mg \sin \alpha + \delta m \frac{dv}{dt} \quad (2-4)$$

式中， i_g 表示变速器传动比， i_z 表示主减速器传动比， η_t 表示传动系统效率， m 表示汽车质量， f 表示车轮滚动阻力系数， C_D 表示空气阻力系数， A 表示迎风面积， α 表示道路坡度角， δ 表示汽车旋转质量转换系数， v 表示车速， v_a 表示汽车与空气相对速度（当风速为零时， $v_a = v$ ）。

在纯电动汽车行驶的过程中，车辆的行驶阻力不仅与驱动力相互平衡，行驶阻力功率还与电机功率相平衡。电动汽车的行驶阻力功率主要包括滚动阻力功率、空气阻力功率、坡度阻力功率以及加速阻力功率。假设风速为零，公式（2-4）经变换得到电动汽车功率 P_m 平衡方程式为

$$P_m = \frac{1}{\eta_t} \left(\frac{mgfv}{3600} + \frac{mgiv}{3600} + \frac{C_D Av^3}{76140} + \frac{\delta mv}{3600} \frac{dv}{dt} \right) \quad (2-5)$$

式中, i 为爬坡度 ($i = \tan\alpha$)。

电动汽车动力匹配时, 一般从保证预期的最高车速来初步选择驱动功率。电动汽车在水平道路上匀速行驶时, 驱动力主要用于克服滚动阻力和空气阻力, 此时驱动电机的额定功率 P_e 应该不小于车辆以最高车速行驶时的行驶阻力功率, 即

$$P_e \geq \frac{1}{\eta_t} \left(\frac{mgfv_{\max}}{3600} + \frac{C_D Av_{\max}^3}{76140} \right) \quad (2-6)$$

电机的瞬时功率 P_i 还应该能够满足汽车的爬坡性能要求, 即

$$P_i \geq \frac{1}{\eta_t} \left(\frac{mgfv}{3600} + \frac{mgiv}{3600} + \frac{C_D Av^3}{76140} \right) \quad (2-7)$$

车辆的最高车速是指在没有风的条件下, 在水平、良好的水泥或沥青道路路面上, 车辆所能达到的最高行驶速度。车辆的最高车速越大, 对驱动电机额定功率的要求也越高, 电动汽车的后备功率也就越足。实际上电动汽车的最高车速也就反映了其加速能力和爬坡能力。在电动汽车设计过程中, 最高车速的计算公式为^[61]

$$\begin{cases} v_{\max} = 0.377r \cdot n_{\max} / i_{t\min} \\ n_m \leq n_{\max} \\ F_t(n_m) \geq \sum F(v) \end{cases} \quad (2-8)$$

式中, $i_{t\min}$ 为系统最小传动比, n_m 为驱动电机的工作转速, F_t 为汽车在驱动电机以最大限流工作时获得的驱动力, n_{\max} 为驱动电机最高工作转速。

电池组的容量不仅影响车辆的续航里程, 还影响到车辆的整车质量和行驶动力性^[62]。电动汽车在匹配电池组容量时, 首先采用匀速法进行续航里程计算, 再通过国标中规定的工况来仿真校核续航里程。

驱动电机的输出功率也就是动力电池的输出功率, 电动汽车动力电池的额定电压一般保持不变, 根据驱动电机的功率变化需求, 变化的是动力电池的输出电流, 其计算公式为^[61]

$$I = \frac{1000P_m}{U_{bat}\eta_b} \quad (2-9)$$

式中, I 为动力电池输出电流, U_{bat} 为电池包额定电压, η_b 为电池包电能转换效率。

动力电池包由单体电池串并联或混联组成, 最基本的电池串联数 n_{bat} 的计算公式为

$$n_{bat} = \frac{1000P_m}{C_{bat}U_{cell}\eta_{dia}} \cdot \frac{S}{v} \quad (2-10)$$

式中, n_{bat} 为动力电池包串联数, S 为续航里程, C_{bat} 为电池包额定容量, U_{cell} 为单体额定电压, η_{dia} 为动力电池允许放电深度。

电池组中, 基本的并联电池单体数 n_{cell} 的计算公式为

$$n_{cell} = \frac{C_{bat}}{C_{cell}} \quad (2-11)$$

式中， n_{cell} 为电池组中并联的单体数量， C_{cell} 为动力电池单体额定容量。

为了匹配计算方便，本文从 advisor 中选定了电动汽车整车参数，主要性能参数如表 2.2 所示。

表 2.2 电动汽车主要性能参数

主要参数	参考数据	备注
长/宽/高/mm	4650/1765/1283	
迎风面积 A/m^2	1.7	
整车质量 (kg)	1273	
轴距 (mm)	2600	
轮胎滚动半径 r (mm)	282	
车轮滚动阻力系数 f	0.015	
风阻系数 C_D	0.19	
传动效率 η_t	0.92	
质量转换系数 δ	1.04	
最高车速 (km/h)	140	
最大爬坡度	20%	
最大续航里程 (km)	150	UDDS 工况下

经过以上动力电池选型匹配计算，得到的电机和动力电池参数，其主要性能参数如表 2.3 所示。

表 2.3 电机和动力电池主要性能参数

主要参数	参考数据	备注
电池包额定电压 (V)	360	
电池包额定容量 (Ah)	60	
单体额定电压 (V)	3.6	锰酸锂电池
单体容量 (Ah)	3.0	18650 型
电池包组合方式	20 并 100 串	混联
驱动电机额定电压 (V)	320	交流异步电机
驱动电机额定功率 (kw)	75	

2.3.2 工况仿真计算

在 advisor 软件中匹配相关整车参数，根据动力性匹配的计算结果设置相关动力性参数。

advisor 软件中纯电动汽车模型如图 2.5 所示, 主要由车辆行驶工况、整车、车轮、主减速器、变速器、电机/电机控制器、电器负载、功率总线、电池/电池管理系统等子模型构成, 在仿真计算时根据具体车型改变各子模型相应的参数就可以快速得到所需模型, 本文中重点匹配的是车辆行驶工况、整车参数、驱动电机参数、动力电池参数, 主要涉及车辆行驶工况模型、整车子模型、电机子模型、电池子模型。

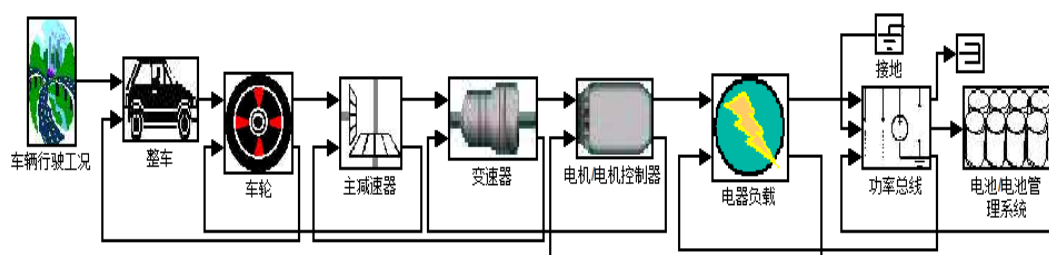


图 2.5 advisor 软件中的纯电动汽车模型

在 UDDS 工况下, 对研究对象进行仿真计算, 得到动力电池的输出电流曲线如图 2.6 所示。

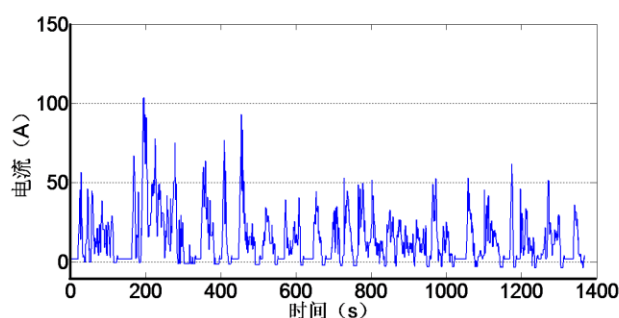


图 2.6 动力电池输出电流-时间曲线

为了分析动力电池在爬坡工况下的电流输出情况, 本文设置了以 32km/h 的常规车速匀速通过 20% 的斜坡的爬坡测试工况, 仿真计算得到动力电池的电流输出如图 2.7 所示。

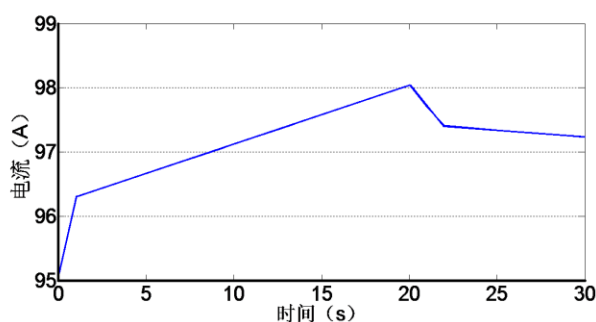


图 2.7 爬坡时动力电池电流输出曲线

2.3.3 动力电池工况数据分析

由图 2.3、图 2.6 分析可知, 电动汽车在 240s 左右时达到最大行驶车速, 而此时的电池包输出电流为 45A, 并未达到电池包的最大放电电流; 电池包在 196s 左右时达到最大放电电流,

为 103A，而此时电动汽车的车速为 54km/h。对比数据可知，在最大电流附近，电动汽车的正处于急加速的行驶工况，车速由 28km/h 在几秒时间内加速到 58km/h，加速度达到最大值，说明在急加速工况下，动力电池的输出电流非常大。而汽车在常规车速 40~60km/h 匀速行驶时，动力电池的电流输出稳定在 15~20A 左右。在急减速工况下，由于电动汽车存在制动能量回收，此时动力电池处于充电状态，循环工况里的最大减速度达到了 -1.48m/s^2 ，而回收电流始终维持在 1~2A 的范围内，制动反馈电流的大小受限于当前电机的工作状态、动力电池的 SOC 和整车的回馈控制逻辑。而通过文献^[7]可知，在急减速的工况下，制动反馈电流在不受限制或受限较少的条件下，甚至达到 2C 电流倍率，也不容忽视。由图 2.7 的仿真结果可知，电动汽车在爬坡工况下，动力电池的输出电流达到 98A。当电动汽车出现某些故障，特别是动力电池及其管理系统出现局部短路、通信中断等故障时，不论此时电动汽车能否运行，会造成动力电池的瞬时电流输出倍率将达到 3~5C，甚至更高，虽然出现的概率很少，但是仍然需要关注和研究。

通过以上分析可知，电动汽车在各类工况下的放电倍率如表 2.4 所示。在急加速工况下，电池的输出电流在 100A 左右，放电倍率约为 2.0C；在常规车速匀速行驶工况下，动力电池的输出电流大约为 20A，放电倍率在 0.4C 左右；在急减速行驶工况下，考虑极限情况下峰值充电倍率，大约为 2.0C；在爬坡行驶工况下，动力电池的输出电流大约为 95A，放电倍率在 1.5C 左右；而在某些电路故障出现时，动力电池的电流输出倍率将达到 3~5C。尽管本节讨论的汽车典型工况下动力电池的工作倍率是在具体车型仿真条件下得到的，但是一般纯电动汽车的续航里程为二百公里左右，城市路况下的平均车速范围为 40km/h~50km/h，如果以平均车速 40km/h 为行驶车速标准，纯电动汽车的续航时间为 5 小时，平均工作倍率为 0.2C，与本文匀速工况下的仿真倍率差不多，而其他非匀速工况下的电流倍率，通过定性分析纯电动汽车在城市道路上的行驶情况，也大多在合理的工作倍率范围内，所以动力电池在典型城市工况下的工作电流倍率具有普遍意义，适用于大多数纯电动汽车。

表 2.4 动力电池在典型城市工况下的工作电流倍率

工况类型	电流倍率
急加速工况 (1.48m/s^2)	-2.0C
匀速工况 (60km/h)	-0.4C
爬坡工况 (20% @32km/h)	-1.5C
急减速工况 (-1.48m/s^2)	+2.0C
UDDS 动态工况 (如图 2.3)	平均倍率-0.2C (如图 2.6)
故障工况	-3~-5C

2.4 本章小结

本章分析了动力电池的产热机理，总结了影响动力电池温升的四大因素：环境温度、SOC/SOH、工作电流、热管理系统。本章还以城市电动轿车为对象，匹配计算其动力系统，在advisor 中仿真计算典型城市工况下动力电池的输出电流特性，从而得到一般城市电动汽车动力电池的工作倍率规律，为第三章的动力电池温升仿真提供工况数据支持。

第三章 动力电池温升模型与仿真

3.1 动力电池热模型

动力电池的热模型用于分析充放电过程中, 电池内部的产热、传热行为, 利用热模型可求解电池内部温度场的分布, 理论上可解释动力电池在工作中出现的产热行为和温升现象, 从而进一步优化电池结构和热管理系统设计, 提高电池工作性能及其安全性能。目前, 锂电池热模型按建模原理主要可分为电化学-热耦合模型和电池生热模型。电池生热模型^[22,25]主要是基于能量守恒的数学模型, 采用均匀内热源, 均匀热物性参数, 主要用于计算电池在不同工况下的温度变化及分布, 在热模型求解时, 比热系数及热导率一般取动力电池各功能层的加权平均值。而电化学-热耦合模型^[63,64,65]则基于电芯内部反应物浓度分布和电势分布, 充放考虑了电池工作过程导致的不均匀产热, 精确求解电池内部的温度场分布。电化学-热耦合模型是基于电荷守恒、电化学反应成分守恒、能量守恒和电极动力学的数学模型, 能够对锂电池充放电过程中的电化学反应与传热特性进行综合分析, 该模型通过引入温度及浓度相关的参数, 建立温度场与组分浓度场、电场之间的联系, 将微观尺度上的电化学反应和扩散与宏观尺度上的生热传热进行耦合计算, 使仿真计算更接近于真实, 结果准确性更有保障。

国内外研究者在锂离子电池电热模型方面的研究工作归纳起来可分为四类: (1) 为了获取电池准确的生热速率, 运用仿真计算和实验方法, 研究动力电池的生热特性; (2) 为了理论指导电池的结构设计, 建立多维度单体的电化学-热模型, 研究电池的内部温度分布; (3) 为提高电池实际使用效率和寿命, 优化电池包的热管理系统, 研究电池包的散热性能; (4) 使用均匀内热源的产热模型与等效电路-热阻模型用于电池简单仿真及实际热管理。

由第二章分析可知, 动力电池的实际工况非常复杂, 单纯使用实验测量的方法研究电池的温升特性需要花费大量的人力、物力, 并且难以实时描述和定量分析实际工况对电池内部生热的变化。建立动力电池的数学模型, 普遍以热传导方程为依据的一维、二维或三维热模型、等效电路-热模型、电化学-热模型为主, 并主要以 CFD 数值软件 ANSYS、FLUENT、COMSOL 等为研究手段, 不仅降低了研究成本, 还大大提高了研究的准确性, 缩短了研究周期。

3.2 动力电池电化学-热耦合模型的搭建

为了研究动力电池在使用过程中, 电动汽车不同工况特性对其生热特性和温升特性的影响, 动力电池建模的出发点在于研究使用工况与生热特性的关系, 更好地使用动力电池, 而不是改进电池原有的结构设计和参数, 所以本文采用的动力电池模型参数来源于现有动力电池的结构参数。本文采用目前广泛使用的电化学-热耦合模型, 建立耦合模型前, 需要分别建立动力电池的电化学模型和热模型, 再将两种模型的关联参数进行耦合, 得到电化学-热耦合模型, 用于研

究动力电池内部的生热特性与温升特性，并验证相关的热物性参数。而本文第四章动力电池热管理系统策略研究中建立的动力电池模型为简单的等效电热阻模型，用于估计动力电池内部温度。

3.2.1 电化学模型

实际工作过程中，锂电池内部的电化学反应非常复杂，在合理范围内，为简化计算，假设电池放电过程中不产生气体，不发生副反应，活性物质是理想球体，均匀分布在电极上。

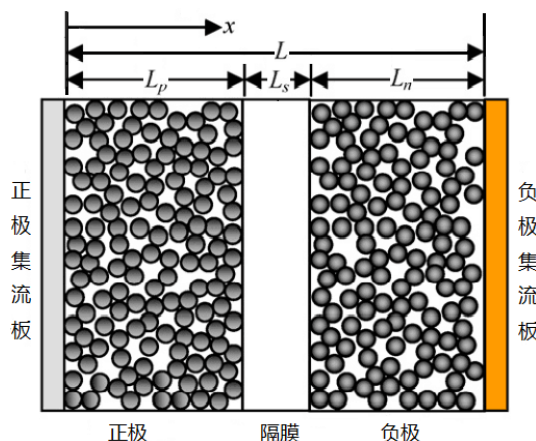


图 3.1 电化学模型示意图

锂电池的一维电化学模型如图 3.1 所示，电芯为分层结构，其中，正、负集流板为金属铝和金属铜，正极活性材料为锰酸锂 (LiMn_2O_4)，负极材料为石墨 (Li_xC_6)，电解液为 1000mol/m^3 的 LiPF_6 溶液 (1:1EC/DEC 溶剂) [66]。放电时，负极固相 Li_xC_6 内部的 Li^+ 扩散至电极表面，在电极/电解液的固液相界面发生电化学反应，并进入到电解液中，通过离子扩散和电迁移传递到正极固相颗粒表面，在固液相界面发生电化学反应后，嵌入到正极固相颗粒中，而电子经由外部电路进行反向迁移。其中，电极/电解液界面单位面积的电化学反应速率由 Butler-Volmer 方程计算 [56]。

$$j_n = i_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta_v\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_c F}{RT} \eta_v\right) \right] \quad (3-1)$$

式中， j_n 为反应电流密度， i_0 为电极反应交换电流密度， α_a 、 α_c 分别为阳极、阴极电极反应转换系数， F 为法拉第常数， R 为通用气体常数， T 为热力学温度， η_v 为过电位。

液相锂离子浓度由电解液中锂离子的平衡方程控制，根据浓溶液理论可得 [56]：

$$\frac{\partial (\varepsilon_e c_e)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_e^{eff} \frac{\partial c_e}{\partial x} \right) + \frac{1-t_+^0}{F} j_n \quad (3-2)$$

此时，电极活性物质涂覆层与集流板界面的边界条件为：

$$\frac{\partial c_e}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial c_e}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad (3-3)$$

式中， ε_e 为电解液相体积分数， c_e 为液相中锂离子平均体积浓度， D_e^{eff} 为液相锂离子有效扩散系数， t_+^0 表示锂离子迁移数。

固相锂离子浓度由锂离子在固相球形活性材料颗粒中的扩散程度控制，动力学方程为^[54]：

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{D_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) \quad (3-4)$$

此时，边界条件为

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial c_s}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \\ -D_s \left. \frac{\partial c_s}{\partial r} \right|_{r=R_s} = \frac{j_n}{a_s F} \end{cases} \quad (3-5)$$

式中， c_s 表示固相中锂离子平均体积浓度， D_s 表示固相锂离子扩散系数， r 为活性材料颗粒径向距离， R_s 为活性材料颗粒半径， a_s 为电极单位体积有效反应面积。

液相电势的控制方程^[56]为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k^{eff} \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_D^{eff} \frac{\partial \ln c_e}{\partial x} \right) + j_n = 0 \quad (3-6)$$

此时，电极活性物质涂覆层与集流板界面的边界条件为

$$\left. \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial \phi_e}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (3-7)$$

式中， k^{eff} 为电解液有效电导率， ϕ_e 为液相平均电势， k_D^{eff} 为锂离子有效扩散电导率。

固相电势根据欧姆定律可得^[54]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma^{eff} \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right) = j_n \quad (3-8)$$

此时，边界条件为

$$\begin{cases} -\sigma_-^{eff} \left. \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right|_{x=0} = -\sigma_+^{eff} \left. \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right|_{x=L} = \frac{I}{A_e} \\ \left. \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right|_{x=L_p} = \left. \frac{\partial \phi_s}{\partial x} \right|_{x=L_p+L_s} = 0 \end{cases} \quad (3-9)$$

式中， σ^{eff} 表示电极活性物质固相有效电导率， ϕ_s 为固相平均电势， I 为工作电流， A_e 为电极面积。

电池荷电状态(State of Charge , SOC)表示电极剩余容量与完全充满时容量的比值，根据文献^[54,67]可知，SOC 在微观状态，可由电极固相表面锂离子浓度 $c_{s,surf}$ 与固相锂离子最大浓度 $c_{s,max}$ 之比表示，计算公式为：

$$SOC = \frac{c_{s,surf}}{c_{s,max}} \quad (3-10)$$

3.2.2 热模型

根据文献^[40]电池内部的能量守恒方程式为

$$\rho C_p \frac{\partial T_m}{\partial t} - \lambda \nabla T = q \quad (3-11)$$

式中： ρ 为电池平均密度； C_p 为平均热容； λ 为平均热导率； ΔT 为电池内外温度之差； q 为生

热速率, T_{in} 为电池内部温度。

由文献^[68]可知, 充放电过程生热速率 q 由两部分组成, 包括可逆热 q_1 和不可逆热 q_2 。单位体积可逆热和不可逆热的计算如下

$$q_1 = \frac{\int_0^L j_n (\phi_s - \phi_e - OCV) dx}{L} \quad (3-12)$$

$$q_2 = \frac{\int_0^L \sigma^{eff} \left(\frac{\partial \phi_s}{\partial x}\right)^2 + k^{eff} \left(\frac{\partial \phi_e}{\partial x}\right)^2 + k_D^{eff} \left(\frac{\partial \ln c_e}{\partial x}\right) \left(\frac{\partial \phi_e}{\partial x}\right) dx}{L} \quad (3-13)$$

式中, OCV (Open Circuit Voltage) 为开路电压。

根据牛顿冷却定律^[68], 电池热模型的边界条件为

$$-\lambda \nabla T = h_{in} (T_{surf} - T_{in}) + h_{out} (T_{surf} - T_{amb}) \quad (3-14)$$

式中, h_{in} 、 h_{out} 分别为电池内外传热系数, T_{amb} 为环境温度, T_{surf} 为电池表面温度。

建立电池的三维几何传热模型, 需要知道电池的热物性参数, 电池相关的物性参数一方面通过热特性试验获取, 一方面可通过数值计算, 由文献^[65]可知, 电池在各个方向上的平均导热率、平均密度和平均热容的计算公式分别为

$$\lambda = \frac{\sum L_x}{\sum L_x / \lambda_x} \quad (3-15)$$

$$\rho = \frac{\sum L_x \rho_x}{\sum L_x} \quad (3-16)$$

$$C_p = \frac{\sum L_x C_{p,x}}{\sum L_x} \quad (3-17)$$

式中, L_x 表示电池内各层厚度, λ_x 表示电池内各层导热率, ρ_x 表示电池内各层密度, $C_{p,x}$ 表示电池内各层热容。

3.2.3 电化学-热耦合模型

根据基本传热学原理, 结合电池内部电化学反应的平均生热速率及传热物性参数, 理论计算热模型中电芯的平均温度, 实时引入到电化学模型计算中, 并作为电化学反应的实时温度条件, 同时, 由电化学模型计算得到的平均生热率会实时反馈到动力电池的热模型中, 作为电芯的平均生热率, 通过相关性能参数的传递, 最终实现电化学-热模型的耦合^[59], 如图 3.2 所示。

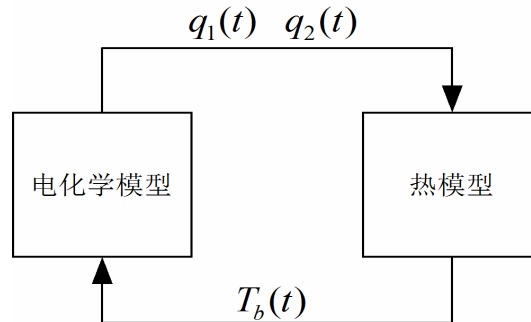


图 3.2 电化学-热耦合模耦合模式

在耦合计算中,利用 Arrhenius 公式来定量描述电化学反应模型中因温度变化而带来的参数改变^[69], 具体公式为

$$\psi = \psi_{ref} \exp \left[\frac{E_{act}^{\psi}}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3-18)$$

式中, ψ 表示通用理化性能, 活化能 E_{act}^{ψ} 决定参数 ψ 随温度的变化率, ψ_{ref} 表示参考温度为 298.15K (25°C) 时 ψ 的取值。

本文研究对象为螺旋卷绕式 18650 圆柱形锰酸锂动力电池, 基于上述数学理论模型, 在 Comsol 多物理场仿真软件平台上, 利用电池与燃料电池模块的锂电池接口搭建电化学反应模型, 利用传热模块的固体传热接口搭建热模型, 将生热速率和温度作为耦合函数, 实现动力电池的电化学-热模型的耦合, 电池模型的主要参数见表 3.1, 其余参数数据参见 Comsol 软件材料库^[69]。

表 3.1 锂电池电化学-热模型主要参数表

模型参数	正极	隔膜	负极	正极集流板	负极集流板
ε_e	0.400	0.370	0.444	-	-
ε_s	0.43	-	0.384	-	-
L_x /(um)	55	30	30	10	7
R_s /(um)	2	-	2	-	-
c_e /(mol/m ³)	-	1200	-	-	-
$c_{s,max}$ /(mol/m ³)	31370	-	22860	-	-
λ_x /(W/m*K)	1.58	0.344	1.04	170	398
ρ_x /(kg/m ³)	2328.5	1008.98	1347.33	2770	8933
$C_{p,x}$ /(J/kg*K)	1269.21	1978.16	1437.4	875	385
T_{ref} /K	-	298.15	-	-	-

3.2.4 模型搭建

(1) Comsol 多物理场软件介绍

Comsol 多物理场仿真软件由瑞典公司开发, 目前广泛应用于各个领域的科学研究和工程计算, 主要优势在于能够精确模拟科学和工程领域的各种物理过程, 能够通过高效的计算和杰出的多场直接耦合实现任意多物理场的高精确数值仿真。Comsol 多物理场软件的主要特点还有: 多物理场直接耦合方式简单, 界面友好, 使用者只需要选择或者自定义不同专业的偏微分方程进行任意组合, 就能够实现多物理场的直接耦合分析; 软件架构完全开放, 使用者能在图形界面中轻松定义所需要的专业偏微分方程; 能够利用任意独立的控制函数求解参数, 材料属性、载荷分布、边界条件等也都支持参数化控制; 拥有大规模的超强计算能力, 具备多种系统下 64 位处理和并行计算能力; 后处理功能非常丰富, 且可以根据使用者的分析需要, 进行各种曲线图片、数据及动画的输出和分析。

近年来, 瑞典公司在 Comsol 软件中推出了电池与燃料电池模块, 用于当前主要的电化

电池和燃料电池，其中包括铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池、固体氧化物燃料电池、质子交换膜燃料电池等。利用该模块，科学工作者们能够高效率地在不同材料、几何结构以及工况条件下，对电池各方面的性能进行细致的研究。该模块已经预定义了电化学反应、流动、热交换和电场的耦合，所以使用者能够快速地对具体研究对象，模拟电池的电化学反应、生热过程、传热过程。

(2) 电池单体模型搭建

利用 Comsol 多物理场软件平台搭建锂电池的电化学-热模型。首先利用 Comsol 软件中的锂离子接口界面，建立锂离子电池的一维电化学模型，并定义几何模型中各区域的功能属性，主要包括五个区域：负极集流板、负极多孔电极、隔膜、正极多孔电极、正极集流体，具体区域如示意图 3.3 所示。在该一维电化学模型下，锂电池通过化学反应方程，一方面为热模型提供生热量，另一方面化学反应方程中的各项参数都收到来自热模型温度的影响，会随着温度的改变自动修正反应参数。



图 3.3 一维电化学几何模型示意图

利用 Comsol 软件中的固体传热接口界面，建立锂离子电池的三维热模型，并定义几何模型中各区域的功能属性，主要包括四个区域：电池壳体、活性材料、卷芯、端子，具体区域的截面示意图如图 3.4 所示，典型的圆柱形缠绕式锂电池的结构，图中将电池中间的缠绕层简化成传热均匀的活性材料区域，该区域主要由正极涂层、隔膜、负极涂层以及电解液组成，在建立三维热模型时，将活性材料区域定义为均匀热源，但也作为固体传热介质，其中轴向传热系数和径向传热系数需要自定义，电池单体三维热模型结构如图 3.5 所示。

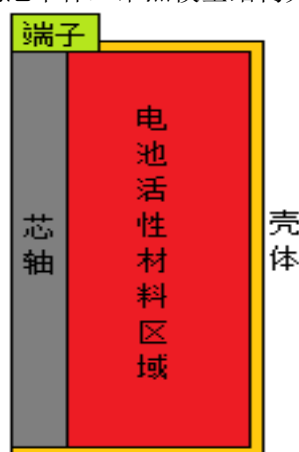


图 3.4 三维热模型的截面示意图

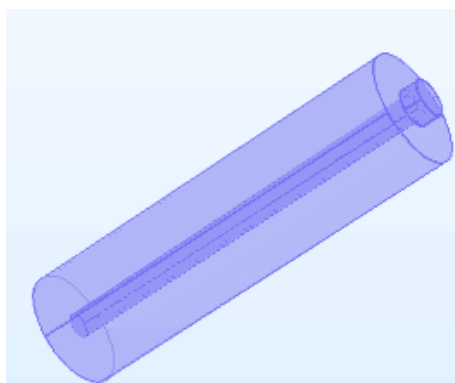


图3. 5电池单体三维热几何模型

(3) 电池模块模型搭建

本文研究对象的动力电池的组合方式是 20 并 100 串，根据文献^[14]可知，动力电池都是由多个模块串并联而成，20 并 100 串是动力电池总的布局模式，各个电池模块中的串并联数量和结构则相对简单，通常只是单纯的并联，然后各个模块间再进行串并联，从而构成整个电池包。本节搭建了 5 个电池单体并联的电池模块模型，如图 3.6 所示，该模块虽然在结构和数量上难以代表整个电池包，但是电池包正是由这些小模块串并联而成。电池模块的生热情况直接决定了动力电池包的温度场分布，模块之间的传热与散热间接影响动力电池包的温度场特性。如果电池模块的温度场分布均匀，一直处于理想的温度范围内，那么动力电池包也会处于理想的温度范围内，所以本文只重点分析了电池模块的温度场分布。电池单体的电化学模型和热模型在前文中已经给出，这里重点搭建的是电池模块的几何组合方式，5 个单体并联的电池模块空间结构大多为散热面积最大的单列并联结构^[27]。

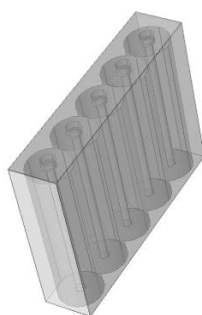


图3. 6动力电池单列并联结构图

3.3 典型城市工况下的动力电池热仿真分析

文章第二章内容在六种典型城市工况下，对电动汽车进行了仿真分析，得到了六种工况下动力电池的工作电流输出特性及相应的工作倍率。本节为了研究动力电池在六种典型行驶工况下的温升特性，即急加速工况、匀速工况、爬坡工况、急减速工况、故障工况以及 UDDS 工况，对动力电池进行了仿真计算。

3.3.1 单体仿真分析

环境温度分别为253.15K (-20℃)、273.15K (0℃)、298.15K (25℃)、308.15K (35℃)、318.15K (45℃)，匀速、急加速、爬坡、急减速、UDDS动态工况下的温升特性曲线分别如图3.7、图3.8、图3.9、图3.10、图3.11所示。环境温度在298.15K (25℃)下，故障工况下动力电池的温升特性曲线如图3.12所示。

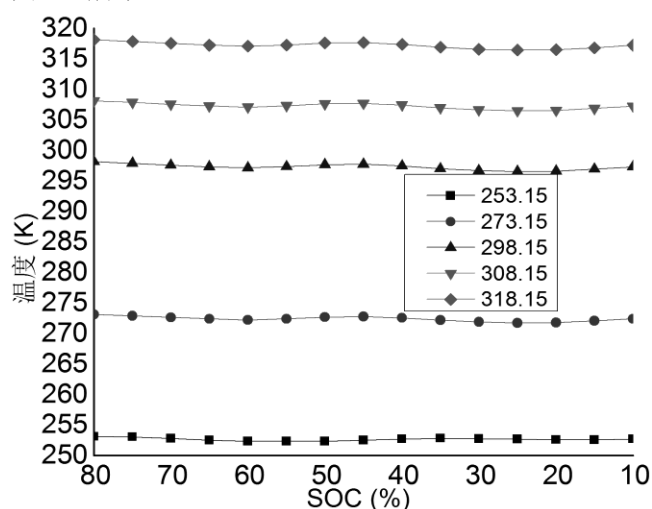


图3.7 匀速工况下电池温升特性曲线

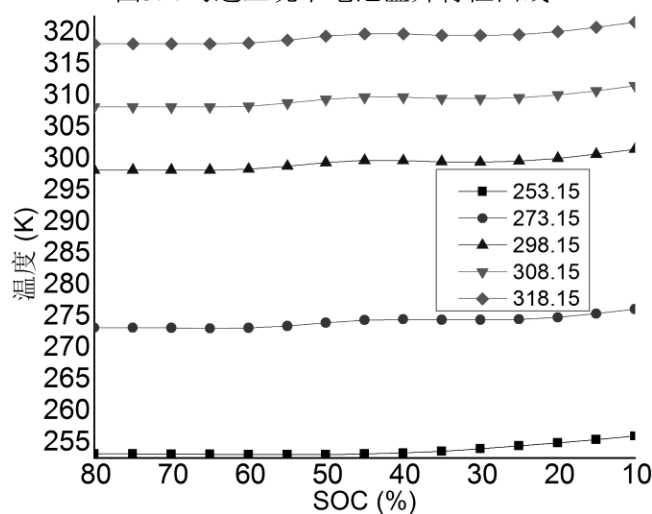


图 3.8 急加速工况下电池温升特性曲线

对比各个典型工况下的温升特性曲线可知，电池温度在各环境温度下随SOC的变化趋势基本一致。电动汽车行驶工况，即电池放电倍率是影响电池的温升大小的关键因素，汽车工况要求功率越大，电池温升越大。另外，SOC也影响到电池的温升，电池温度变化速率在SOC为60%~40%，20%~10%两个区间明显增加。SOC与电池内阻的关系在前面章节已经提及过，再结合本节温升和SOC的关系曲线，明显可以看出电池内阻和生热的关系，在工作电流倍率一定的条件下，内阻越大，生热越多，温升越高。

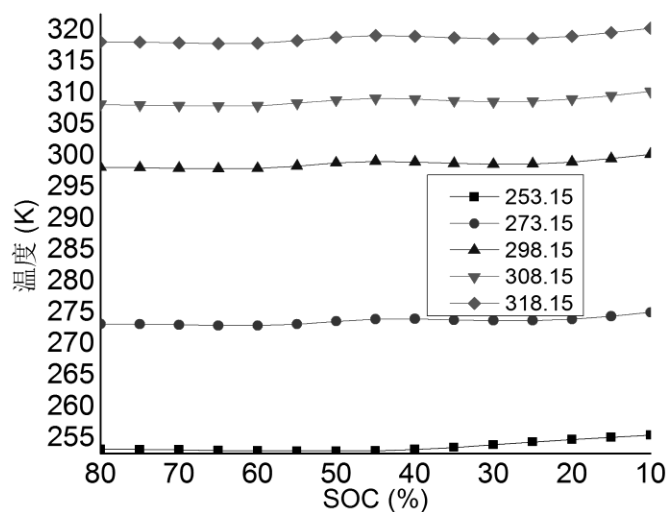


图 3.9 爬坡工况下电池温升特性曲线

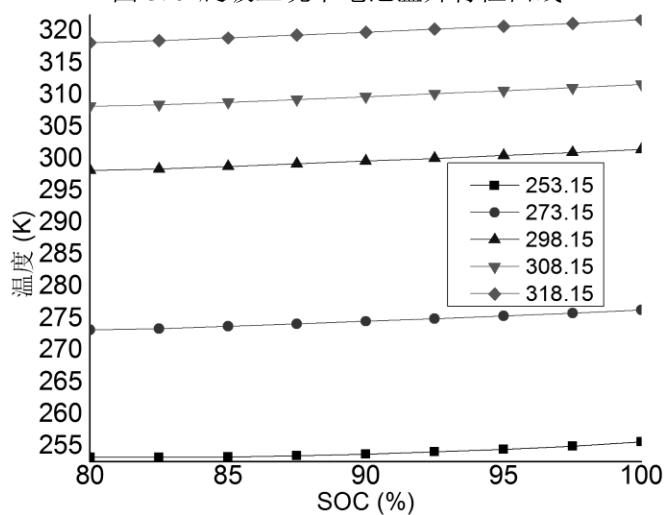


图 3.10 急减速工况下电池温升特性曲线

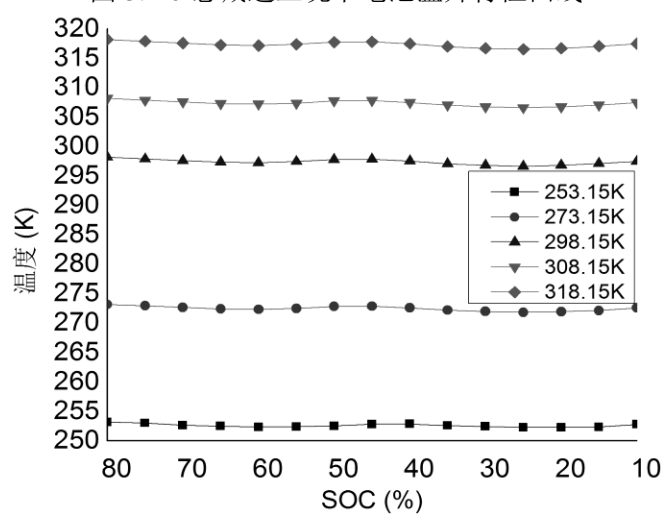


图 3.11 UDDS 工况下电池温升特性曲线

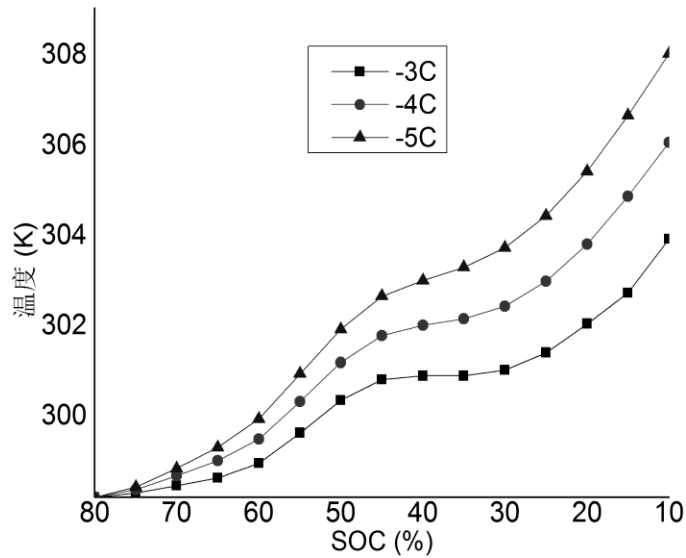


图 3.12 故障工况下电池温升特性曲线

在环境温度为298.15K (25℃) 下，典型工况下的动力电池温升随时间的关系曲线如图3.13所示。急加速工况是电动汽车最常用的行驶工况，功率需求较大，电池放电倍率较高，电池温升较为明显。在故障工况下，动力电池的温升几乎呈线性增长的趋势，温升速率达到最大。匀速工况和UDDS动态工况下，电池温升不明显，UDDS工况的平均放电倍率为0.2C，而匀速工况的放电倍率为0.4C，都处于小倍率放电区间，电池反应热为吸热可逆反应，在电池内阻很小的情况下，欧姆热小于反应热。

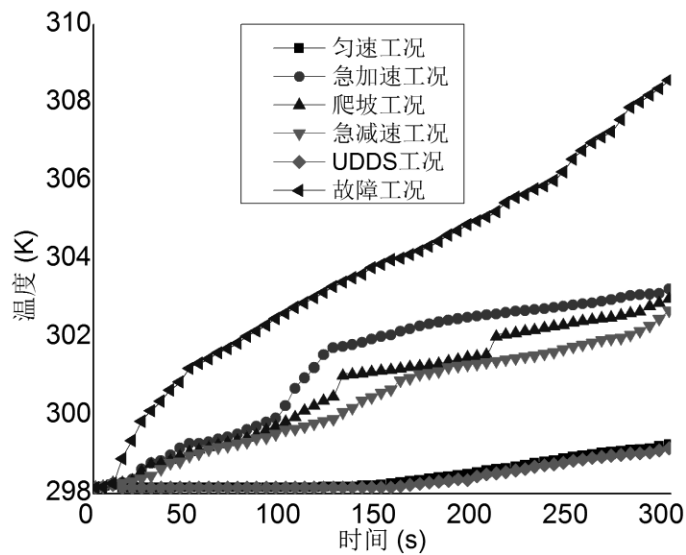


图 3.13 典型工况下的温升速率曲线

在匀速工况条件下，各种环境温度下的放电时间随 SOC 的变化曲线如图 3.14 所示。放电倍率一定时，放电时间对应的是动力电池的输出容量，放电时间越长，说明电池所释放的能量越多。不同环境温度对电池电量输出特性有一定影响，环境温度较低时，动力电池内部材料活性很低，化学反应很慢，电池化学能转换成电能的效率很低，电池的放电性能很差；环境温度

较高时，动力电池在 SOC 前期输出较高，但到后期由于电解质浓度下降，动力电池的输出有所降低；在适宜温度条件下，动力电池在 SOC 不同阶段的放电时间都比较平均。

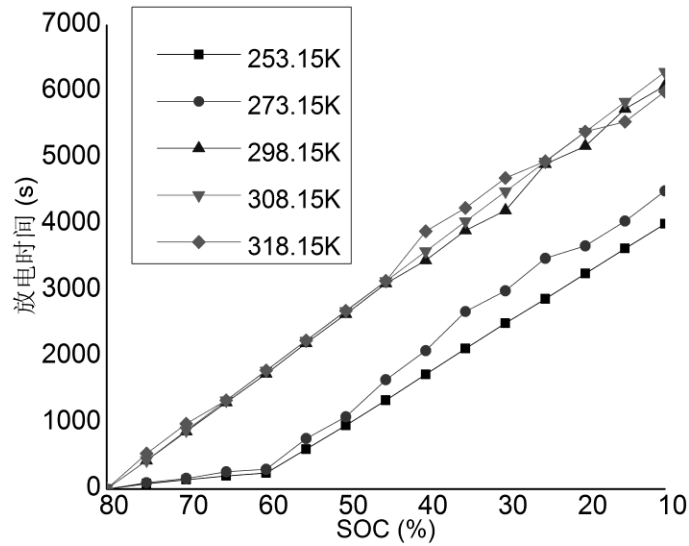


图 3.14 环境温度对电池放电时间的影响

在急减速工况下，即 2C 充电倍率下，电动汽车在制动能量回收的时候，电池的平均温升速率如表 3.2 所示，制动能量回收时动力电池的平均温升速率很高，一旦遇到极限路况，特别是大长陡坡，长时间高倍率的制动能量回收，所造成的动力电池温升就不容忽视。

表 3.2 不同环境温度下急减速工况的电池温升速率

环境温度 (K)	平均温升速率 (K/min)
253.15	1
273.15	0.9
298.15	0.78
308.15	0.76
318.15	0.72

3.3.2 电池模块仿真结果分析

在环境温度为 298.15K (25°C) 下，对电池模块进行仿真计算，六种典型工况下的电池模块温度场如图 3.15 所示。急加速工况、爬坡工况、减速工况下，电池模块温度场分布特性与单体的温升特性相似，需要及时散热；匀速工况和 UDDS 工况下，电池模块相对于单体的温升情况有小幅上升；故障工况下电池模块的温升最高，大量热量在模块内积聚，容易引发热失控。单体电池的生热可以假设为均匀热源并且传热均匀的过程，电池模块内的单体仍然为均匀热源，但是电池模块所处的边界条件与单体有很大不同，电池模块传热不再是均匀传热的过程了，所以在相同工况下，电池模块的温升会比单体更高，模块内也会存在温度不均，温差过大的现象。

电池模块只在理想工作温度 298.15K (25°C) 下进行了仿真实验，在急加速、爬坡、减速等大功率工况下就已经显示出热积聚的趋势了，如果在极端环境温度下，这种热积聚将更加明显，特别是超低温和超高温的条件下，电池模块内外的温差将会进一步加大。

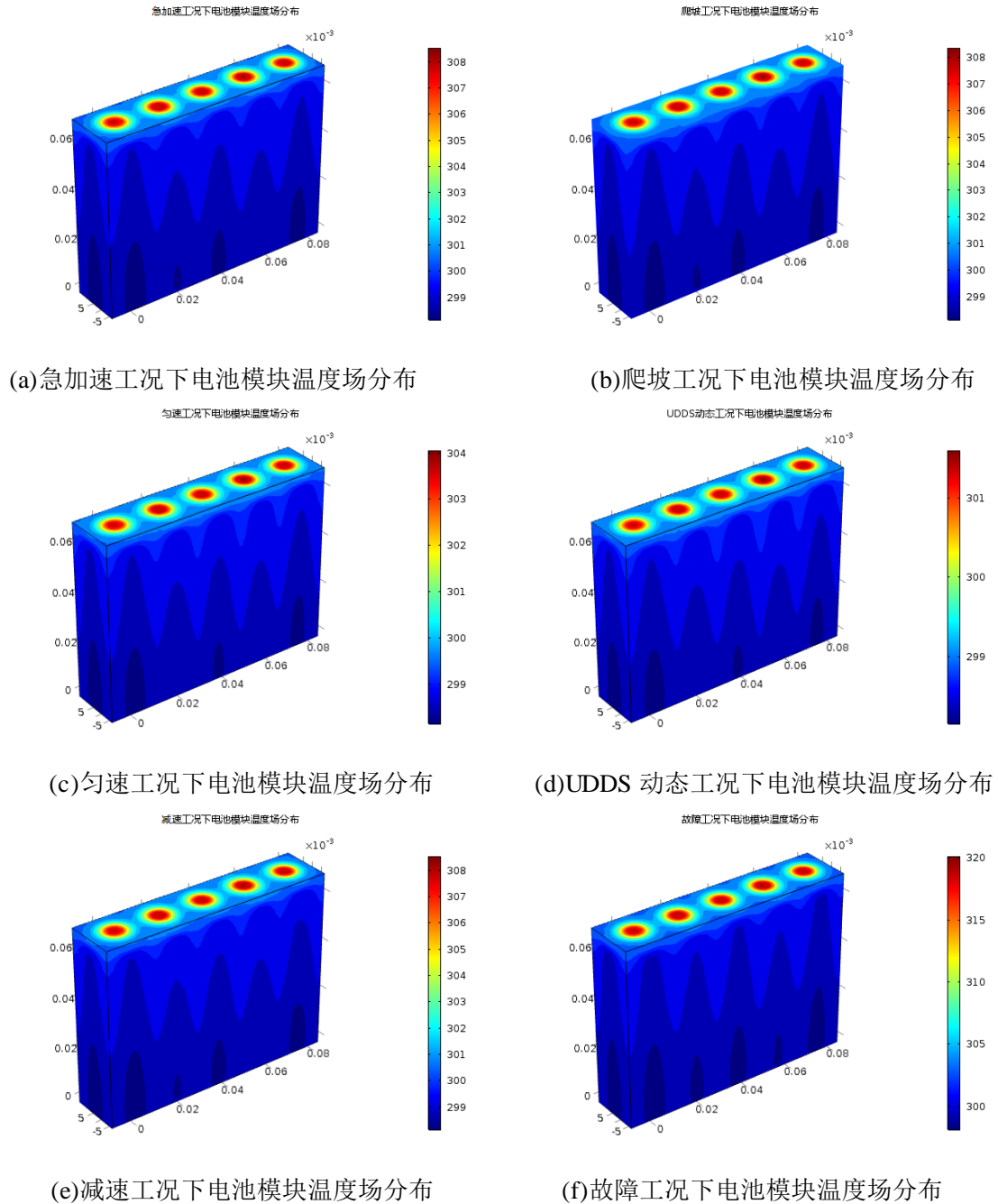


图 3.15 典型工况下电池模块温度场分布

对比模块和单体的仿真温度，可以明显发现电池模块的最高温度已经超过了单体的最高温度，特别是在急加速、急减速、爬坡、故障等大功率输出工况下，出现了温度分布不均匀的情况。电池模块还只是动力电池包的基本构成模块，当数十个电池模块构成电池组，电池组再构

成电池包时，可以想象电池包内部将会发生热积聚，温升速率更快，温差过大，局部温度过高，温度场分布极不平衡等现象。当电动汽车的电池包发生这些情况肯定直接影响到动力的输出、电池的使用寿命，甚至会发生冒烟、起火、爆炸等事故。根据电池模块的温度场分布，明显看出电池内部和两极端子位置温度过高，在布置温度传感器位置时，要尽量将温度传感器布置在这些温度高的区域，这样更能反映电池内部的实际温度。

3.4 本章小结

本章基于 COMSOL 平台建立了动力电池的电化学-热模型，最后通过对动力电池在电动汽车典型工况下的仿真分析，根据仿真结果，可以得出以下结论：

1、环境温度、电动汽车的行驶工况对动力电池温升的特性影响很大，在设计动力电池热管理系统时，要充分考虑这两点因素。另外，动力电池内部会存在温度分布不均的现象，在温度传感器布置时，要充分考虑温差现象以及高温区和低温区对温度测量带来的误差影响。

2、低温环境不仅降低动力电池的输出特性，还可能造成电池温度分布不均，内外温差过大，所以电池热管理系统在冬季特别是我国东北区域要充分考虑加热保温系统。

3、电动汽车在匀速工况或一般城市行驶工况下，不需要额外进行散热，但在急加速、大上坡、下长陡坡等工况下，根据这些工况时间的长短，需要进行实时散热。所以电池热管理系统要实时监测电动汽车的行驶状态，结合电池箱温度，进行有效管理，需要外加散热装置和温度管理控制，进行强制辅助散热冷却。

4、一旦电动汽车出现故障，电池管理系统的故障在线识别模块根据故障等级给出警告甚至直接切断动力电池的输出回路，否则，动力电池在故障工况下，极可能发生热量积聚，温度骤升，轻则影响动力电池寿命，甚至造成热失控。

总之，动力电池的热管理系统设计不仅要考虑电池箱温度参数，还需要结合具体环境温度、车辆实时行驶状态等工况参数，综合分析各类参数影响因子，估计电池内部温度，根据内部温度，制定相关热管理系统策略，将更符合动力电池的实际需求。另外，根据行驶工况、环境温度以及 SOC 的状态，估计出电池内部温度的合理范围，通过该温度也能反推和判断动力电池是否处于正常状态，可以将此作为动力电池的故障判读依据之一。

第四章 基于电池内部估计温度的热管理系统研究

当前动力电池散热控制策略多采用开关式闭环控制，动力电池温度高于门限值时对电池包进行冷却，当温度低于该门限值时则关闭冷却系统，控制策略比较单一，而且对温度测量和采集的硬件要求较高，对散热的控制参数仅限于温度传感器采集的温度，也没有针对电动汽车实际行驶工况下的散热控制策略。而未来热管理系统将要求不仅在电池包结构上达到最优化，在控制策略上也能够根据具体车型参数、道路交通、环境因素以及电动汽车实际行驶工况实施有效管理。

根据前文的仿真分析可知，温度传感器测量的电池表面温度与电池内部温度存在一定差异，如果仅根据电池箱内有限点的测量温度来进行相应的热管理，会导致电池组温度差异过大，散热不及时，温度管理滞后。根据当前的温度管理的现状，结合前文的研究结果，本文提出一种电池内部温度估计算法，用于修正温度传感器测量值的延时误差和精度误差，并基于该估计温度，结合车辆工况特性，实现动力电池温度的精确管理。

4.1 电池内部温度估计

4.1.1 电池内部温度估计模型

从第三章的热模型中，生热来源于电池内部的电化学反应，但是电化学反应复杂，影响因素众多，而温度估计模型需要简单、直接的影响因子，所以电化学生热模型不能满足估计模型的基本要求，为了准确估计电池内部温度，需要建立动力电池的等效热电阻模型^[70]，如图 4.1 所示， q 为生热速率， C_p 为电池等效热容， R_{in} 为电池内部与表面的等效热阻， R_{out} 为电池表面与环境之间的等效热阻。

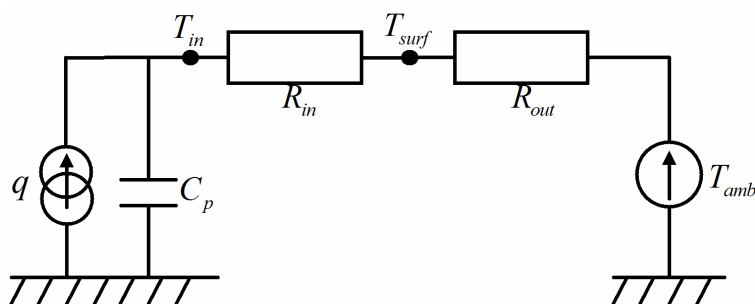


图 4.1 动力电池等效热电阻模型

通过微分方程 (4-1) 求解电池表面温度，当电池表面温度到达稳定状态时，可得到边界方程 (4-2)，式中下标 ∞ 表示热稳态时刻。根据为第三章的仿真结果，可以得到典型工况下热稳态时刻的生热速率 q_{∞} ，从而得出外部等效热阻 R_{out} 。

$$\frac{dT_{surf}}{dt} = \frac{T_{amb} - T_{surf}}{C_p (R_{in} + R_{out})} + \frac{qR_{out}}{C_p (R_{in} + R_{out})} \quad (4-1)$$

$$R_{out} = \frac{T_{surf,\infty} - T_{amb}}{q_{\infty}} \quad (4-2)$$

由能量守恒可知，流经内部热阻和外部热阻的生热量是相同的，那么内部热阻和外部热阻的比值就可通过电池内部温度、外部温度、环境温度的表达式（4-3）给出

$$\frac{R_{in}}{R_{out}} = \frac{T_{in} - T_{surf}}{T_{surf} - T_{amb}} \quad (4-3)$$

根据式（4-3）最后推出动力电池内部温度的预测模型方程（4-4）为

$$T_{in} = T_{surf} \left(1 + \frac{R_{in}}{R_{out}}\right) - T_{amb} \frac{R_{in}}{R_{out}} \quad (4-4)$$

由于不同工况下，动力电池的工作倍率不同，导致动力电池的生热速率不一样，所以预测模型的热阻参数也会有所差异，表 4.1 列出了六类工况下预测模型参数的计算值。

表 4.1 典型工况下估计模型参数值列表

车辆工况 热阻参数	匀速	急加速	急减速	UDDS 工况	爬坡	故障工况
$R_{out}(KW^{-1})$	9.08	7.68	7.89	9.12	7.68	6.88
$R_{in}(KW^{-1})$	3.223	6.31	6.28	3.228	6.001	6.791
R_{in}/R_{out}	0.355	0.822	0.796	0.354	0.782	0.987

4.1.2 电池内部温度估计模型搭建

前一节建立电池内部温度估计模型方程，并得到了典型城市工况下温度估计模型的参数数值，本节在 MATLAB/SIMULINK 平台上搭建电池内部温度估计模型，如图 4.2 所示，该模型的输入量分别是工作电流、温度传感器测量的电池表面温度、环境温度，输出量是电池的内部温度。工作电流与动力电池的输出功率成正比，根据动力电池的输出功率判断车辆的运行工况，从而得到对应的模型参数值，当识别到参数值，结合电池表面温度和环境温度，估计出电池内部温度。

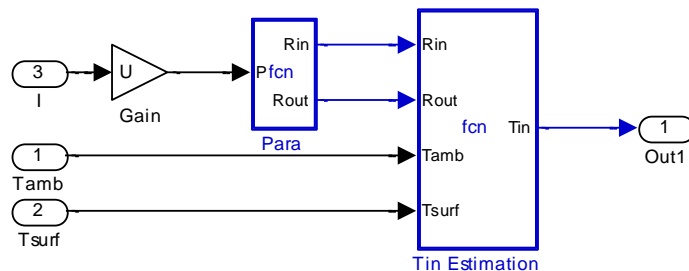


图 4.2 内部温度估算模型

4.1.3 内部温度估计误差影响

由于电池内部温度在实际电池热管理系统中，不能直接获取，只能参考传感器采集的电池表面温度，该温度作为热管理系统的关键参数，直接影响温度管理的实际效果。理论上表面温度越接近内部温度，越具有参考价值，但是即使高精度高速率的采集系统，也无法测得电池内部的实际温度。

为了验证内部温度估计模型的有效性，本节利用内部温度估计模型，对动力电池急加速工况下的内部温度进行了估计，并和第三章电池内外的仿真温度进行了对比，如图 4.3 所示。由于锰酸锂动力电池的理想工作温度范围一般在 298.15K (25°C) 左右，所以将仿真的环境温度设为 298.15K (25°C)。

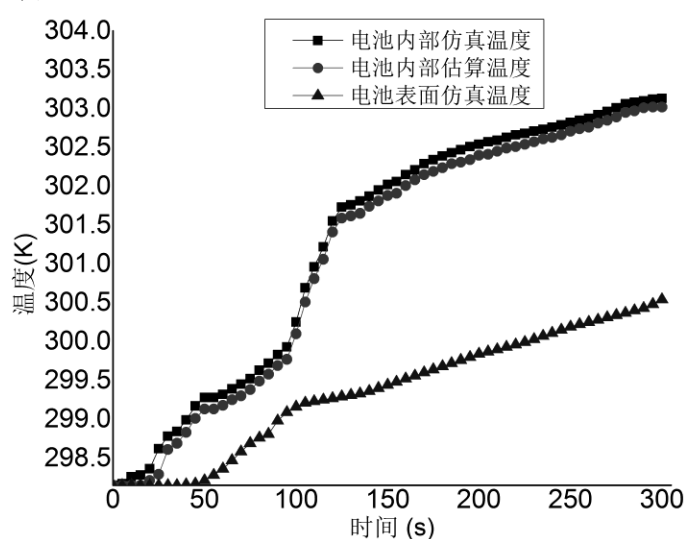


图 4.3 电池内部估算温度曲线

根据电池表面温度、环境温度，基于工况参数模型，对电池内部温度进行估计，通过图 4.3 中曲线可以看出，内部估算温度始终处于电池内部实际温度和电池表面温度之间，内部估计温度始终跟随着内部实际仿真温度，在电池表面温度和环境温度差异很小的电池工作初期阶段，电池内部估算误差较大，因为此时受环境温度影响较大，而环境温度与电池内部温度差异很小，所以此时的估计误差较大，但此时的内部实际温度也处于理想的温度范围内，该估计误差对电池的温度管理影响较小。当电池工作一段时间，电池内部实际仿真温度与电池表面温差超过 1°C 后，此时电池内部温度的估计误差开始缩小，内部估算温度紧紧跟随内部实际仿真温度，而这时动力电池的散热管理也需要适时开启，基本可以实现电池温度的精确管理。

4.2 热管理系统硬件设计

根据前文提到动力电池热管理系统的基本功能和本章提出的基于内部估计温度的热管理策略，本节对热管理系统的硬件部分进行设计，主要分为动力电池信息采集部分、信息通信部分、

系统电源部分、执行驱动部分、处理器最小系统部分、故障预警及避险部分。

4.2.1 动力电池信息采集部分

动力电池信息采集部分又分为电池单体电压采集、电池包总线电流采集、电池温度采集、绝缘检测、故障检测等。本文采用凌力尔特公司推出的 LTC6803IG-3 电池专用芯片，芯片的引脚配置如图 4.4 所示，可测量多达 12 节串联电池的电压，可堆迭式架构，支持相邻器件的串行接口菊式链接，0.25% 的最大总测量误差，可用 13ms 完成一个系统中所有电池的测量，集成电池均衡电路，内置温度传感器和热敏电阻输入，抗电磁干扰的能力强。本文利用 LTC6803 实现对 12 个单体电池电压的采集，并预留了菊式串口连接通道，以备更多节电池电压采集的需要，外设了被动均衡电路，避免因过充或过放引起的电池不平衡问题。此外，还利用该芯片实现了两路温度的采集和芯片本身温度的采集，所有信息都通过 SPI 通信传送给处理器，具体电路如图 4.5 所示。

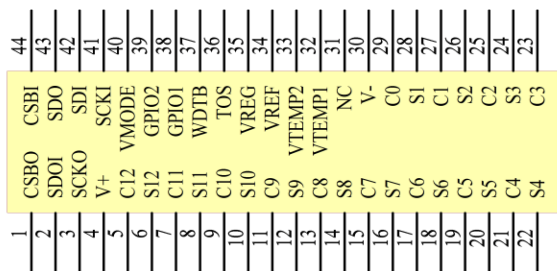


图 4.4 凌力尔特 LTC6803 芯片引脚配置图

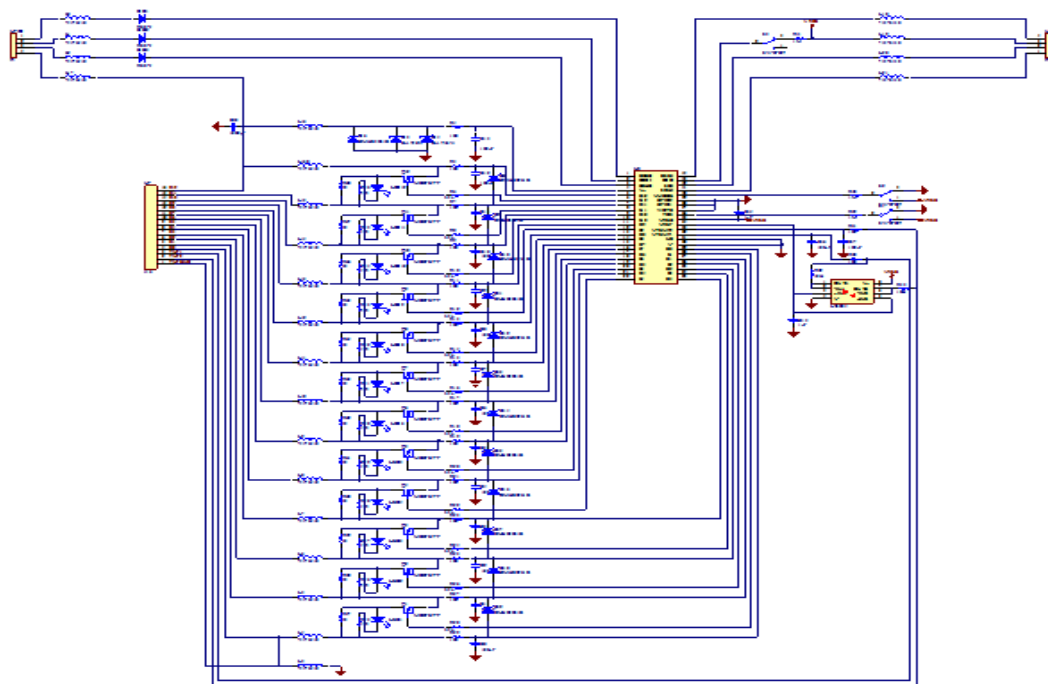


图 4.5 电池电压采集电路

电池单体温度信息采集，LTC6803 上现有的两路温度采集通道远远满足不了对温度信息的需求，还需要设计单独的温度信息采集电路，并将温度信息传送给热管理器芯片内的 AD 转换通道，温度传感器采用 PT100，具体电路如图 4.6 所示。

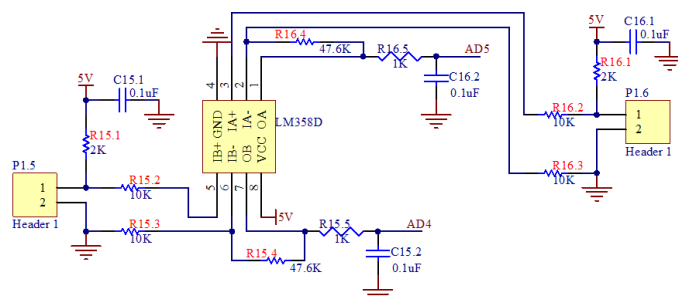


图 4.6 两路温度采集电路

根据电流精度以及正负极性的需要选用合适的电流传感器，本文采用的某款霍尔电流传感器，输出信号为电压。电压信号经过电压跟随器和滤波电路，传到热管理处理器芯片的 AD 转换通道，电流采集电路具体如图 4.7 所示。

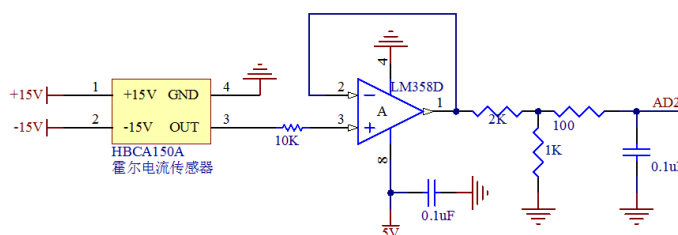


图 4.7 电流采集电路

4.2.2 信息通信部分

信息通信部分是整个电池热管理系统正常运行的关键，本文涉及到的通信主要有 SPI 通信、CAN 通信、SCI 通信。LTC6803 采集的电池电压和温度通过 SPI 通信将数据信息传输到电池热管理处理器，电池热管理处理器和整车控制器、电池管理系统、充电机以及负载控制器之间的通信采用 CAN 通信，电池热管理处理器与上位机之间的通信采用 SCI 通信。

SPI 通信是由一个主设备和一个或多个从设备组成的串行同步通讯协议，SPI 接口由串行数据输入 SDI 接口、串行数据输出 SDO 接口、串行移位时钟 SCK 接口、从使能信号 CS 接口构成，唯一与主设备通信的从设备由 CS 接口信号决定，假如没有 CS 接口信号，通讯系统就只存在一个从设备。主设备通过 SCK 接口产生移位时钟来发起通讯，SPI 的通讯连接如图 4.8 所示，正常通讯时，数据信号从 SDO 输出，由 SDI 读入，数据在时钟的上升或下降沿从 SDO 输出，在下一个下降或上升沿从 SDI 读入，经过这样的 8/16 次时钟改变，从而完成 8/16 位数据的传输。

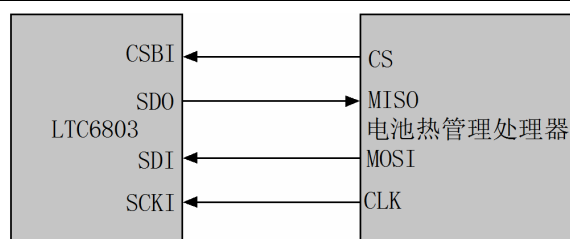


图 4.8 SPI 通信接口连接

CAN 是一种车载专用串行数据通信总线，CAN 总线主要由双绞线组成，其接口电路如图 4.9 所示，该电路将热管理处理器的 MSCAN 模块与其他模块的 CAN 总线连接，PCA82C250 是接收发器。芯片 PCA82C250 是 CAN 协议控制器和物理总线之间的接口，该芯片为总线提供差动发送能力并为 CAN 控制器提供差动接收能力。CANH 是双绞线中的 CAN-HIGH 线，CANL 是双绞线中的 CAN-LOW 线。电阻 R12 的作用是防止数据在线端被反射，以回声的形式返回，影响数据的传输。1 引脚连接 MSCAN 模块的 TXCAN 引脚（数据发送），4 引脚连接 MSCAN 模块的 RXCAN 引脚（数据接收）。

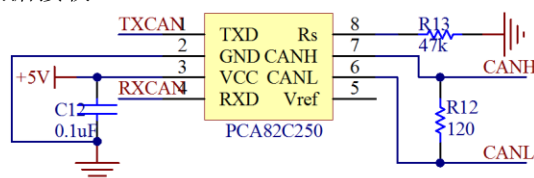


图 4.9 CAN 通信接口电路

SCI 通信是一种串行异步通讯协议，为了进行串行通信，需要相应的串行接口电路，这个接口电路一般集成在处理器芯片内部，本文采用的热管理处理器芯片内部集成了一个可编程的全双工的串行通信口，它可作为异步通信方式与串行传送信息的外部设备连接，SCI 外部连接电路如图 4.10 所示，本文采用标准 RS-232 物理串口，将热管理处理器与电脑上位机进行连接。

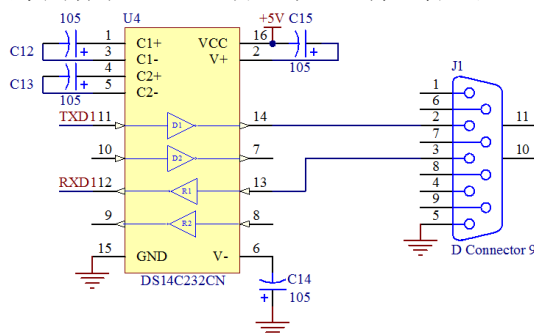


图 4.10 SCI 串口连接电路

4.2.3 系统电源部分

电池热管理系统的电源部分由电池包供给，但是电池包电压属于高压，需要一定的电压转换系统，将高压转换成系统所需的低压，主要的低压电源需求有+5V 电压、+12V 电压、+15V 电压、-15V 电压、+24V 电压等。从电池包高压降为+12V 和+24V 的开关电源模块如图 4.11 所示，

为电流传感器提供±15V转换电源的电路如图 4.12 所示，为各芯片提供稳定的+5V 电源电路如图 4.13 所示。

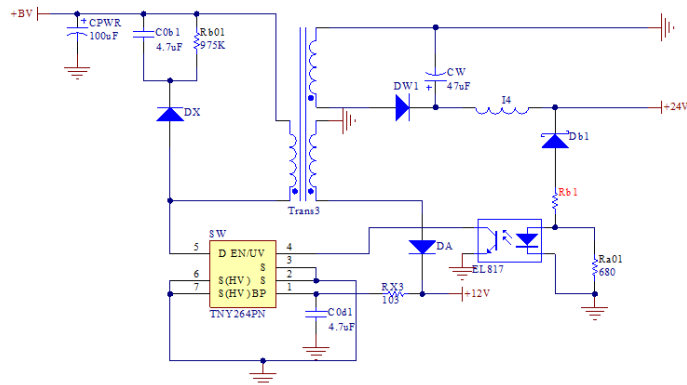


图 4.11 高压降压模块电路

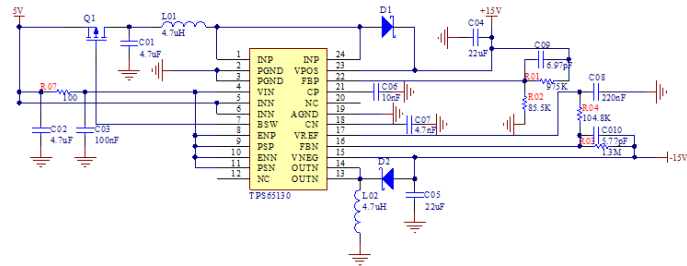


图 4.12 电流传感器电源电压模块电路

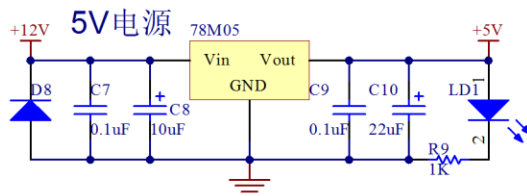


图 4.13 稳定 5V 电源电路

4.2.4 执行驱动部分

本文采取的热管理系统是风冷系统，根据热管理控制策略，需要对冷却风扇实现开环控制，具体的驱动电路如图 4.14 所示。

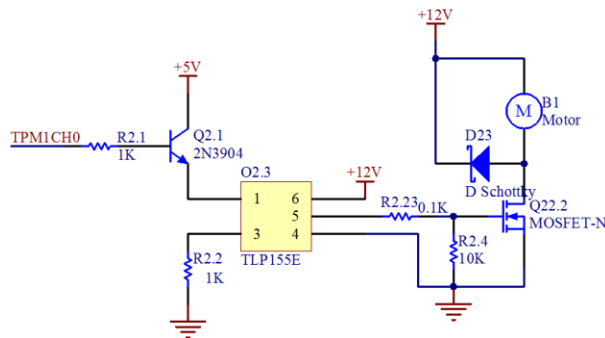


图 4.14 执行驱动电路

4.2.5 处理器最小系统部分

根据热管理系统的功能需求，本文选用飞思卡尔 MC9S08DZ60 芯片作为热管理处理器，其最小系统部分包括晶振电路、调试电路、电源电路、复位电路等，具体电路如图 4.15 所示。

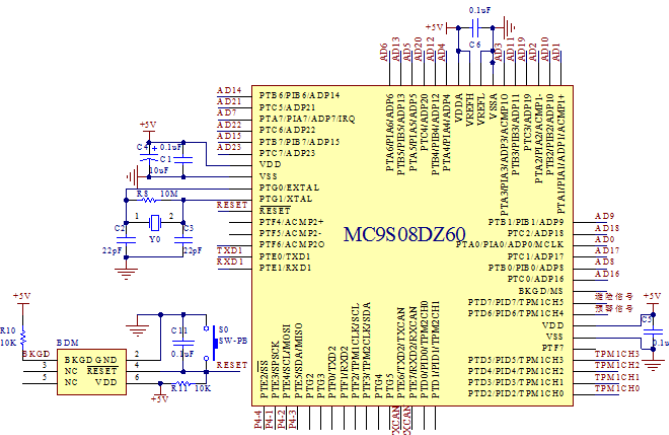


图 4.15 处理器最小系统电路连接

4.2.6 故障预警及避险部分

故障预警及避险部分是在处理器判断出故障之后做出的预警和紧急避险措施，这部分属于备用部分，预警一般采用报警器警报或者警示灯，避险一般采用断开主回路上的电磁继电器开关，具体电路如图 4.16 所示。

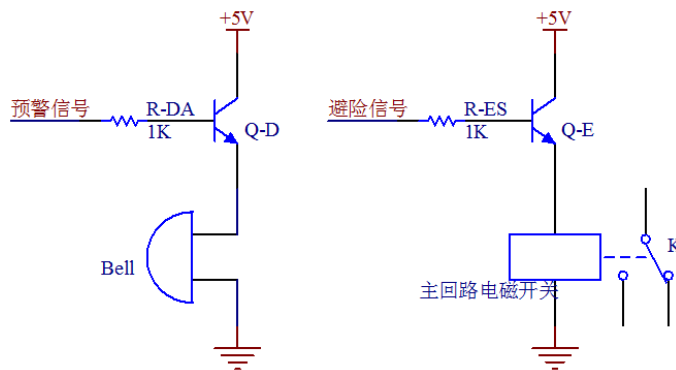


图 4.16 预警及避险部分电路

4.3 热管理系统软件设计

根据热管理策略和相关硬件电路，热管理系统软件设计主要包括电池信息读取和判断部分、车辆信息读取和判断部分、热管理策略综合处理部分。各部分软件设计中涉及到很多子模块程序，包括系统初始化程序、模块初始化程序、AD 转换程序、数据采集程序、SPI 通信程序、SCI 通信程序、CAN 通信程序、滤波程序、中断程序、延时程序以及 PWM 输出程序等，各子程序模块通过 C 语言进行编写。本文采用的是飞思卡尔 MC9S08DZ60 处理器芯片，其开发软件为 CodeWarrior IDE。另外，CodeWarrior 自带的 PE 功能，里面包含各个子模块函数程序，在使用

时直接调用 PE 平台上的子模块函数功能，就能完成相应软件的编写，既简单又准确，还能节省开发编程时间，但在软件调试部分要花费大量功夫。

4.3.1 电池信息读取和判断部分

电池信息读取包括单体电压、温度、电流等信息，电压信息和部分温度信息通过 SPI 通信读取，部分温度和电流主要通过 AD 转换通道直接读取。处理器将采集到的电池信息跟电池的正常信息进行对比，判断电池是否处于正常，并将电池信息通过 CAN 和 SCI 通信传给其他子系统，最后等待处理器其他模块的综合处理。电池信息读取和判断部分的软件流程如图 4.17 所示。

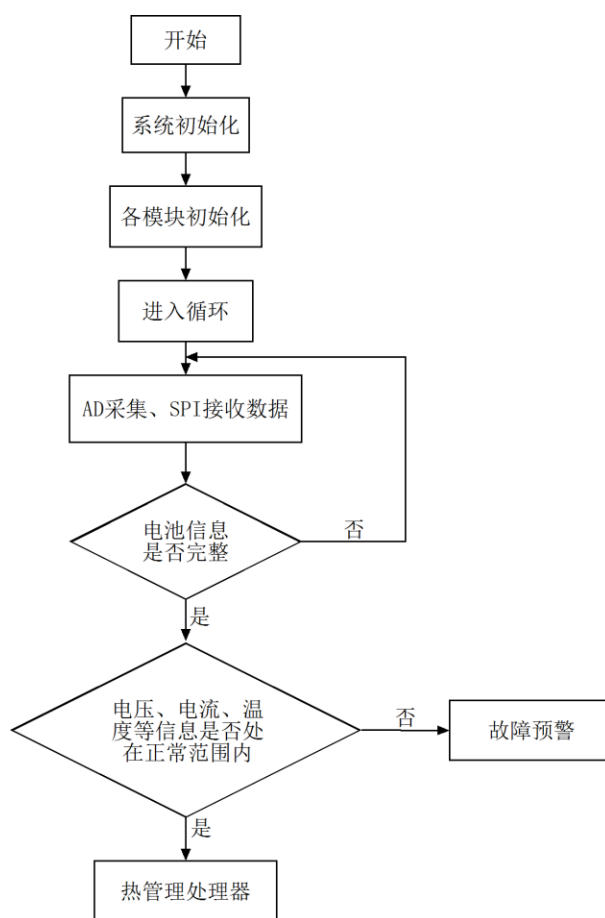


图 4.17 电池信息读取和判断部分软件流程图

4.3.2 工况信息读取和识别部分

通过前文的叙述可以知道，车辆工况信息主要通过整车控制器获取，整车控制器通过 CAN 总线将车辆行驶状态信息，发送给热管理处理器。热管理处理器接收车辆工况信息，主要包括车速信息、加速度信息，对车辆的行驶状态进行判断，并将判断信息留给下一阶段的综合处理部分。具体的软件流程如图 4.18 所示。

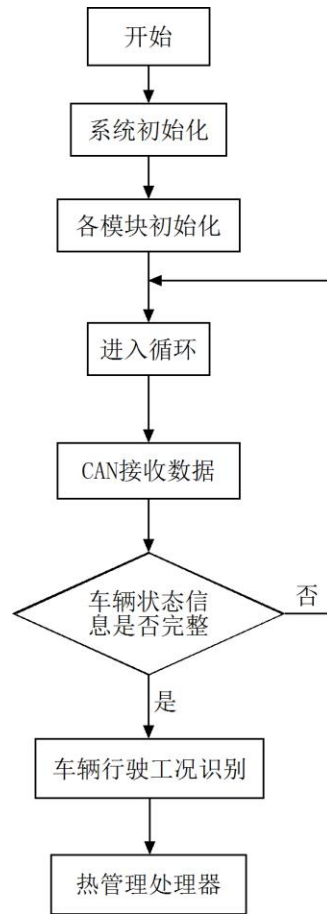


图 4.18 车辆信息读取和工况识别部分软件流程图

4.3.3 热管理策略综合处理部分

本章第二节中提出了基于电池内部估计温度的热管理策略，电池内部温度估计与电池的状态信息和车辆状态信息密不可分，热管理处理器根据电池内部温度发出不同的热管理指令。在这部分软件设计中，主要软件流程如图 4.19 所示。热管理处理器一方面接收动力电池信息的处理结果，得到电流、电压、温度信息；一方面接收车辆状态信息的处理结果，得到正确的工况特性及内部温度估计模型的参数。热管理处理器将这两方面的信息导入到内部温度估计算法里，得到电池内部估计温度，并根据该温度发出相应的热管理指令，最后把电池包温度作为反馈信息，判断热管理效果，如果电池包达到理想的温度，则系统进入下一个综合处理阶段；如果电池包的温度不理想，系统则重复热管理指令，直至电池包温度达到理想状态。

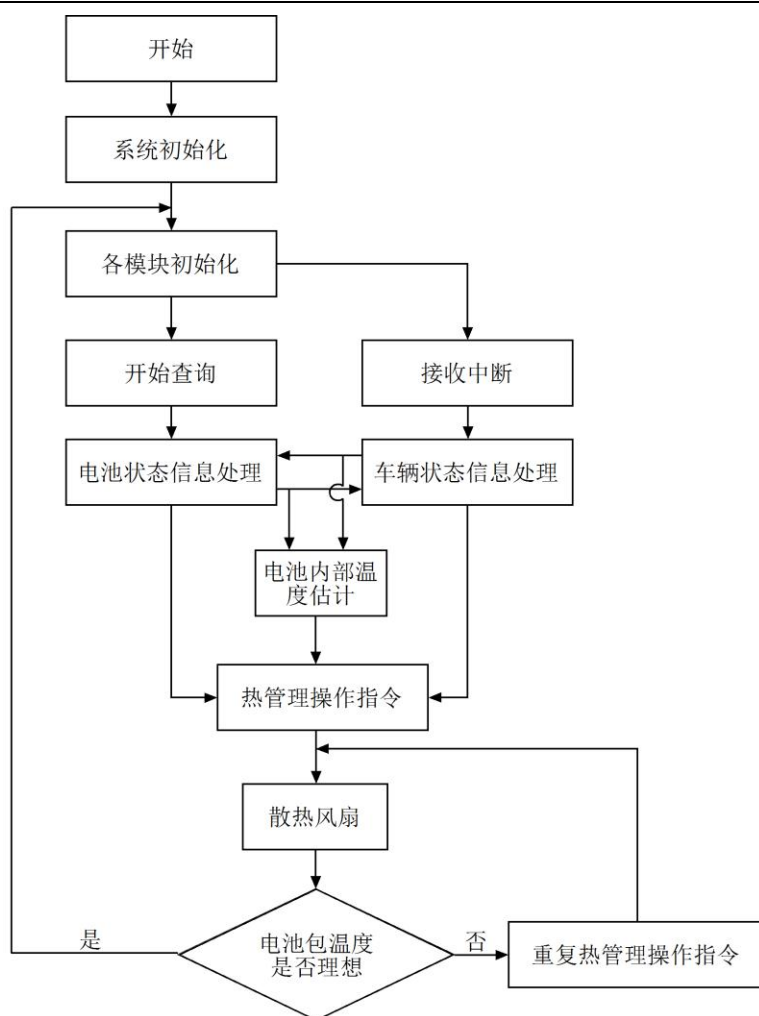


图 4.19 热管理策略综合软件流程图

4.4 上位机显示及控制系统设计

上位机作为热管理处理器和管理者之间的交互平台，不仅直接显示监测的电池状态信息、车辆状态信息，还可以对电池信息和车辆信息进行上位机处理，估算的 SOC 和车辆运行状态，节省热管理处理器的运行内存。LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) 是一种用图标代替文本行创建应用程序的图形化编程语言，作为一个人机交互界面的开发平台，深受研发人员的欢迎。LabVIEW 的功能非常强大，本文不仅用到了开发上位机界面和串口接收发送的功能，还用到了它的上位机数据处理和运算功能。利用 LabVIEW 开发热管理系统的上位机系统，主要包括前面板设计和程序框图设计。前面板主要作为显示窗口，如电池状态信息（各单体温度、电池包总电压、各单体电压、电流、SOC 等）显示、车辆状态信息（速度、加速度、车辆状态）、串口调试信息，信息量庞大，需要分门别类，系统化显示，如图 4.20 所示。

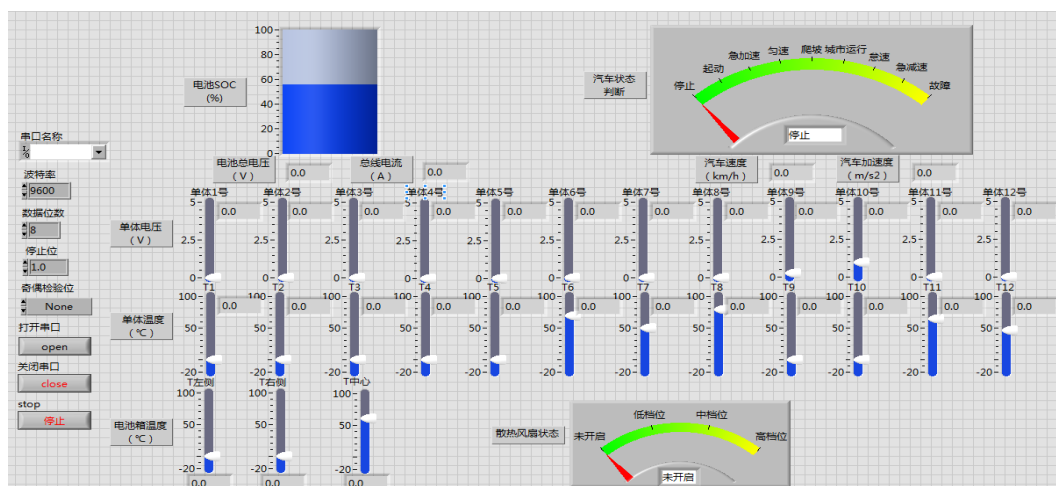


图 4.20 热管理系统前面板界面显示系统

程序框图的主要设计内容是串口通信后台的配置以及数据的处理判断等，包括电压 AD 转换程序设计、温度 AD 转换程序设计、电池 SOC 估计算法程序设计、汽车状态判断程序设计等，前文提到利用 CodeWarrior 对各类软件程序进行编程，本节为了节省热管理处理器的计算内存，将一部分计算工作分配给上位机，具体的程序框图如图 4.21 所示。

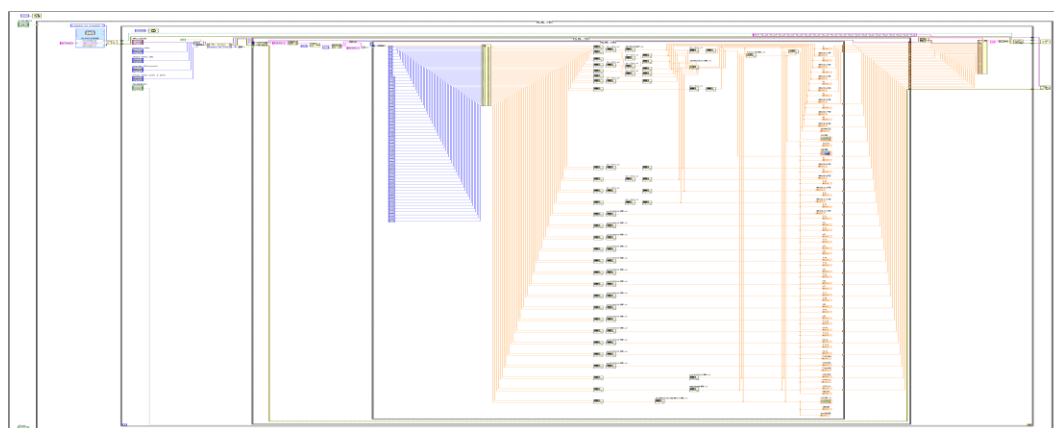


图 4.21 上位机后台程序框图

4.5 本章小结

本章分析了热管理系统的散热控制策略现状，提出了基于电池内部温度的散热策略，并总结了动力电池的内部温度估计方程，在 Matlab/Simulink 搭建了动力电池内部温度估计模型，验证了内部温度估计的正确性，最后搭建了热管理系统的软硬件框架及上位机控制系统。

第五章 电池热特性试验及热管理系统半物理试验仿真

5.1 电池热特性试验台架搭建

动力电池的热特性试验主要是指动力电池在不同环境温度下和不同充放电倍率下，表现出的温度特性。第三章已经在 Comsol 软件中对动力电池的热特性进行了仿真，本节搭建动力电池的热特性试验台架，在试验的基础上进一步研究动力电池的温度特性，验证仿真结果。另一方面，动力电池的 SOC 估计，需要大量的充放电试验数据支持，在热特性台架的基础上，也完成了相关数据的积累和统计，得到动力电池端电压与 SOC 关系曲线及内阻与 SOC 关系曲线。热特性试验台主要由上位机、充电设备、放电设备、电压测试设备、温度测试设备、温控设备以及动力电池构成，主要框架如图 5.1 所示。

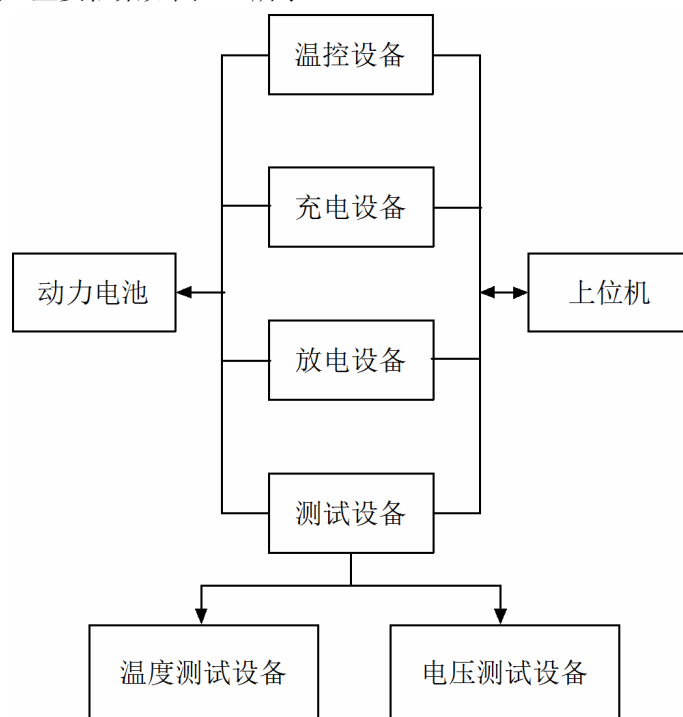


图 5.1 热特性台架结构图

由于试验条件和设备有限，本次台架试验在空调恒温 25℃ 的密闭试验室里开展，没有采用温控设备，试验的温度测试点仅为 25℃。本次动力电池采用 LG 公司生产的型号为 HE4 的可充电锰酸锂 18650 电池，电池额定电压为 3.6V，额定容量为 2.5Ah，充电截止电压为 4.2V，在 0.5C 放电倍率下，放电截止电压为 3.2V，理想工作温度范围为 25℃~30℃，电池单体和模块实物如图 5.2 所示。充电设备为 IT6800 标准型可编程电源，放电设备为 IT8500C 型直流可编程电子负载，电压测试设备为高精度 SI 7063 万用表，温度测试设备为高精度数字测温仪 DT-610B，具体试验台架实物如图 5.3 所示。



图 5.2 电池单体和模块实物图

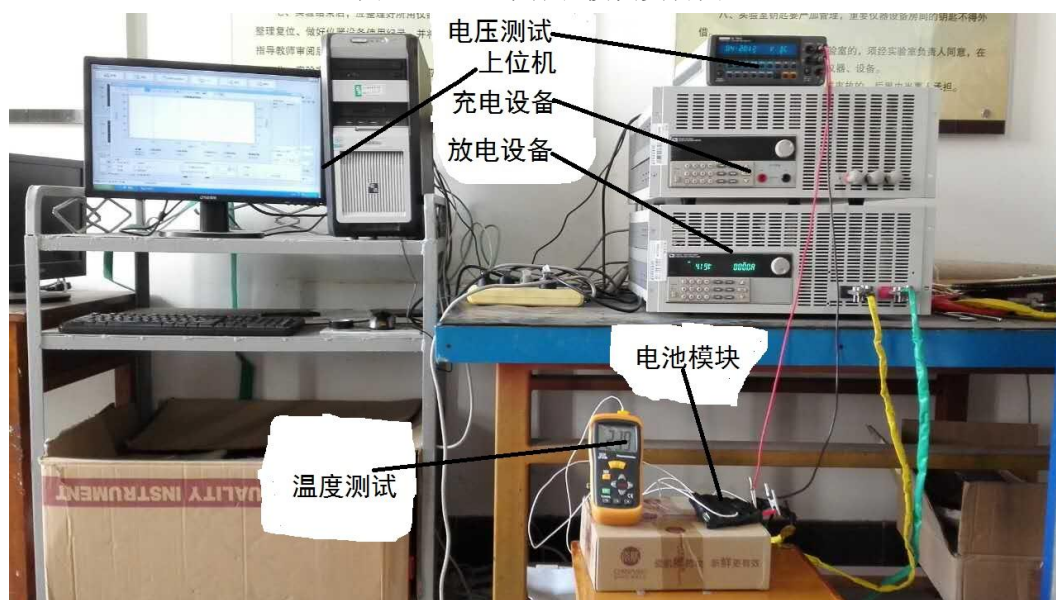


图 5.3 热特性试验台架实物图

5.2 电池热特性试验测试

在室温 25°C 下，进行单体电池的标准放电试验，具体试验操作步骤为：将充满电的单体， $1/3\text{C}$ 放电倍率， 1080 秒放电时间，静置 3600 秒，继续 1080 秒放电时间，静置 3600 秒，循环往复，直至单体电压达到截止电压 3.2V ，该截止电压来自电池出厂数据参数。动力电池标准放电试验的放电电流曲线如图 5.4 所示，电流为负值表示电池处于放电状态。在试验过程中记录电池单体的两端电压变化，将其整理成端电压-时间曲线如图 5.5 所示。在每一个放电-静置的循环试验中，一般把最后一秒的放电电压记为工作电压 U ，把最后一秒的静置电压记为开路电压 OCV (Open Circuit Voltage)，放电时电池内部有电流通过，静置时电池内部电流为零，由于电

池内阻的影响，一般情况下开路电压大于工作电压，两者压差可视为电池内阻造成的压降。

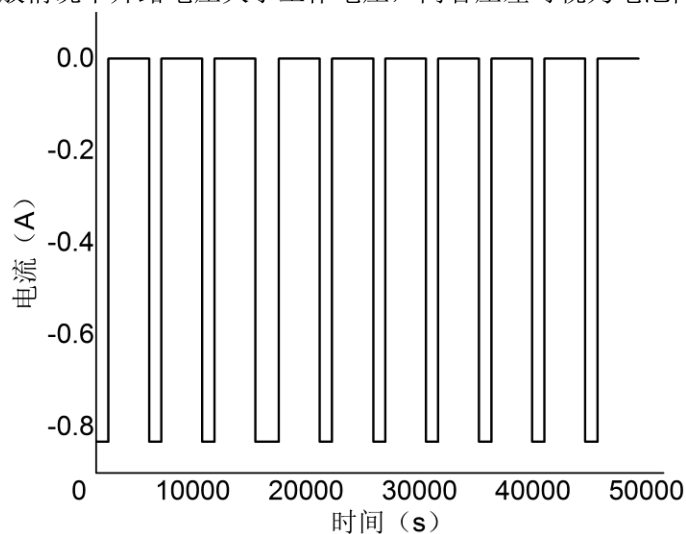


图 5.4 动力电池标准放电电流曲线

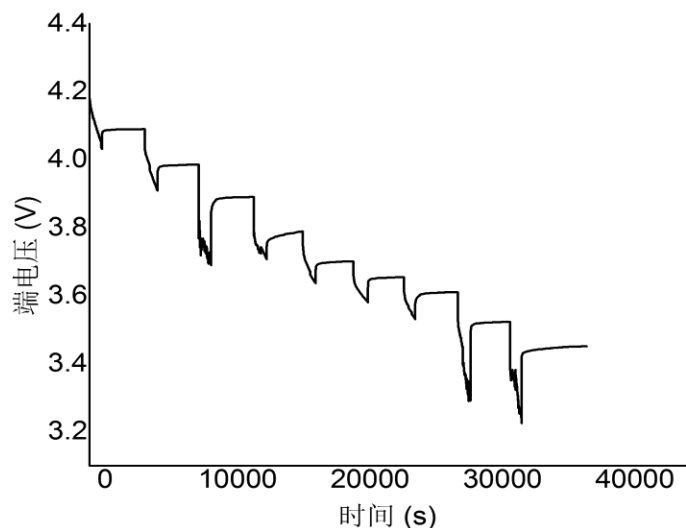


图 5.5 电池端电压随放电时间的变化曲线

整理图 5.4 中的放电电流数据，利用安时积分法^[30]公式 (5-1) 计算动力电池的放电容量 Q_d ，根据公式 (5-2) 计算电池的当前 SOC 值。

$$Q_d = \frac{1}{3600} \int_0^{t_d} I_d(\tau) \cdot d\tau (Ah) \quad (5-1)$$

$$SOC = SOC_0 + \frac{Q_d}{Q_n} \times 100\% \quad (5-2)$$

式中， Q_d 为放电总容量， I_d 为实时放电电流，取值为负， t_d 为放电时间， SOC_0 为初始荷电状态，电池充满放电初始时 $SOC_0=100\%$ ， Q_n 为额定容量。通过以上容量计算，对比图 5.5 中的放电时间，并截取对应的开路电压，得到动力电池端电压 OCV 和 SOC 的关系曲线，如图 5.6 所示，该曲线为动力电池的 SOC 估计算法及热管理策略修正提供了支持。

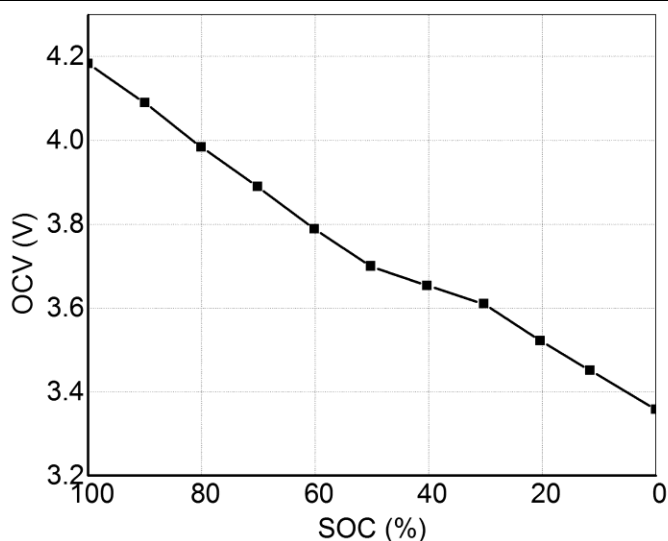


图 5.6 端电压 OCV 与 SOC 关系曲线

从图 5.5 中，提取电池的工作电压 U 和开路电压 OCV ，根据公式 (5-3) 计算电池的等效内阻 R_o ^[14]

$$R_o = (OCV - U) / I_d \quad (5-3)$$

经过计算，得到动力电池等效内阻 R_o 和 SOC 之间的关系曲线，如图 5.7 所示，该曲线为动力电池的内部生热估计和内部温度估计提供了数据支持。

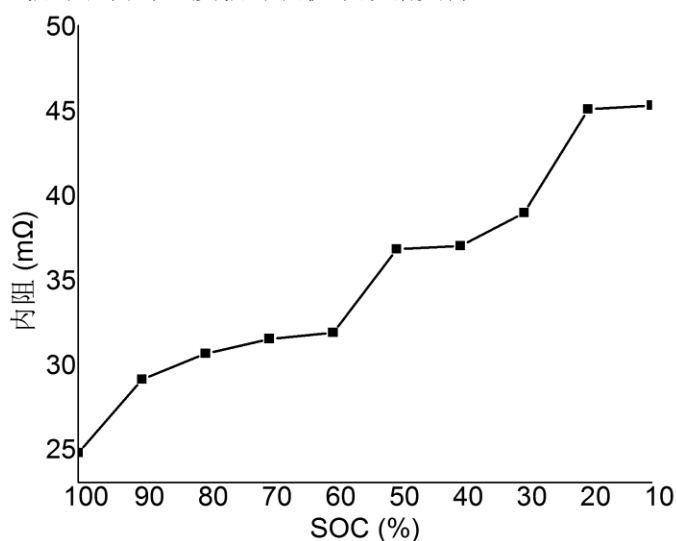


图 5.7 电池内阻与 SOC 关系曲线

在室温 25℃下，进行单体电池及电池模块的相关工况特性试验，为了避免损坏电池，只进行了 UDDS 动态工况试验、匀速工况试验和加速工况试验。单体和模块在匀速工况和 UDDS 工况下的温度特性曲线分别如图 5.8 所示，加速工况下的单体和模块的温度特性曲线如图 5.9 所示。试验曲线表明，UDDS 动态工况、匀速工况下动力电池的平均温升很小，而加速工况下动力电池的平均温升特别明显，特别是在电池模块中，由于散热条件局限，温度上升很快。同

等工况条件下，试验测试的温度比仿真的温度略高，原因主要在于电池仿真所选取的热物性参数略高，特别是在热容和热导率参数，利用试验数据可以修正仿真热容与热导率参数。温度数据虽然有所误差，但是所反映的温升趋势一致，进一步验证了仿真模型的正确性。

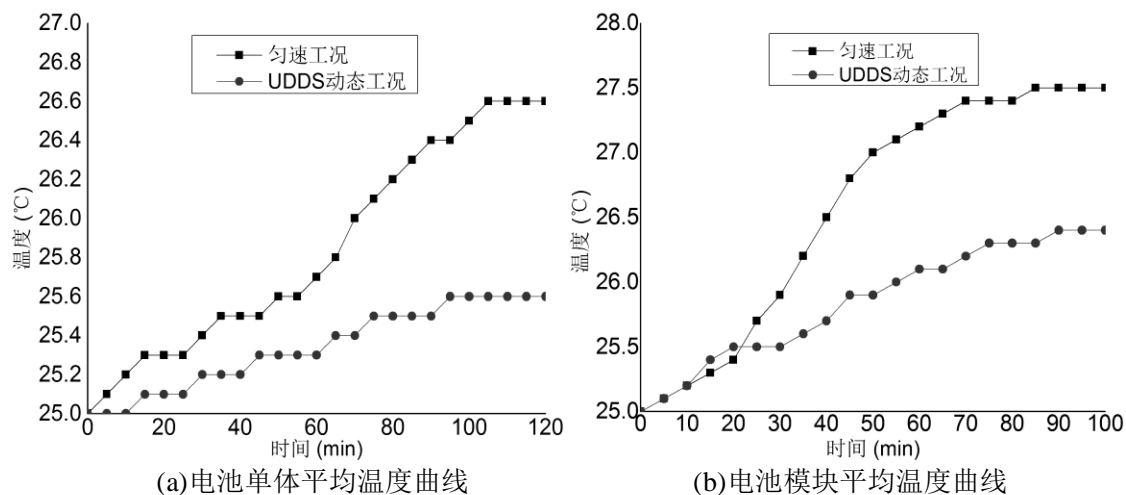


图 5.8 匀速工况和 UDDS 动态工况下动力电池温度曲线

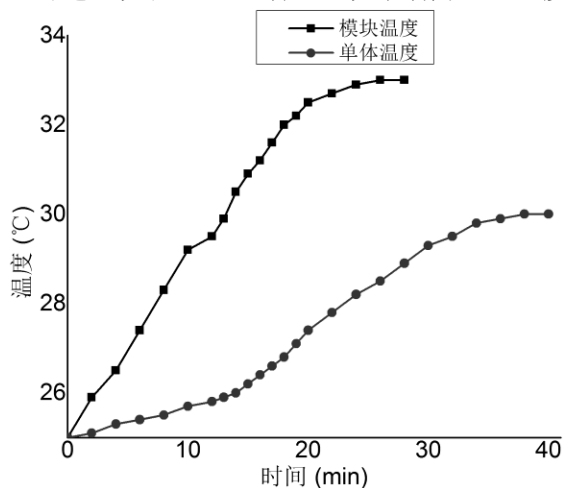


图 5.9 加速工况下电池单体和模块的平均温度曲线

另外，匀速工况下，电池模块的温升明显高于单体温升，而电动汽车的动力电池包由大量模块串并联而成，结构更加复杂，匀速工况下，温升会更加明显，所以在电池包的散热策略中，匀速工况下的散热也必不可少，加速、爬坡等大功率工况则需要进一步加大散热功率。

5.3 热管理系统半物理试验台架搭建

本文搭建的热管理系统半物理试验台架要完成的主要功能有电池状态信息采集、工况识别、SOC 估计、温度控制、故障预警等，台架的功能框架如图 5.10 所示，其中 SOC 估计通过电池管理系统直接获取，工况识别通过整车控制器获取。半物理仿真试验台架主要包括上位机、负载机、充电器、散热器、电池包等部分，台架的主要框架如图 5.11 所示。

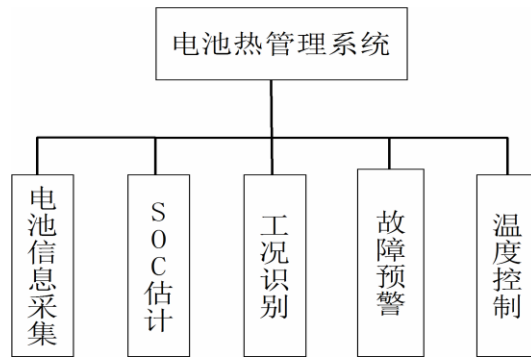


图 5.10 电池热管理系统功能框图

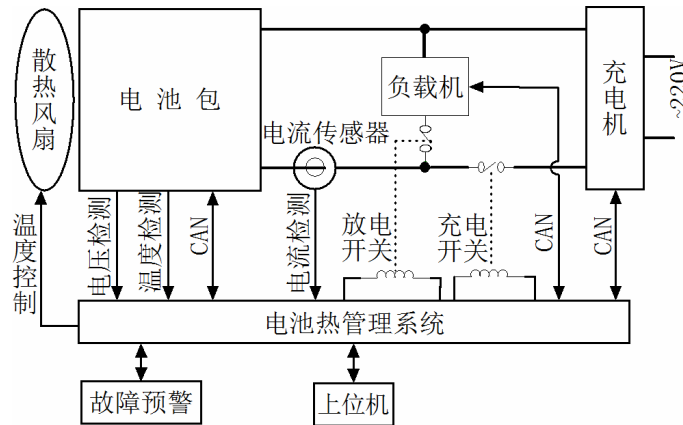


图 5.11 半物理仿真试验台架框图

热管理系统半物理试验台架搭建的难点在于电池信息的采集上，特别上电压信息，因为电池包是由许多单体或模块串联而成，由第四章硬件设计部分内容可知，本文采用了LTC6803 电池电压专用采集芯片，电压信息采集和两路温度采集的前期调试如图 5.12 所示。电池热管理系统前期软件下载调试及硬件测试如图 5.13 所示。整个热管理系统实物台架如图 5.14 所示。



图 5.12 前期 LTC6803 电压检测调试



图 5.13 前期 BTMS 软件调试和硬件测试

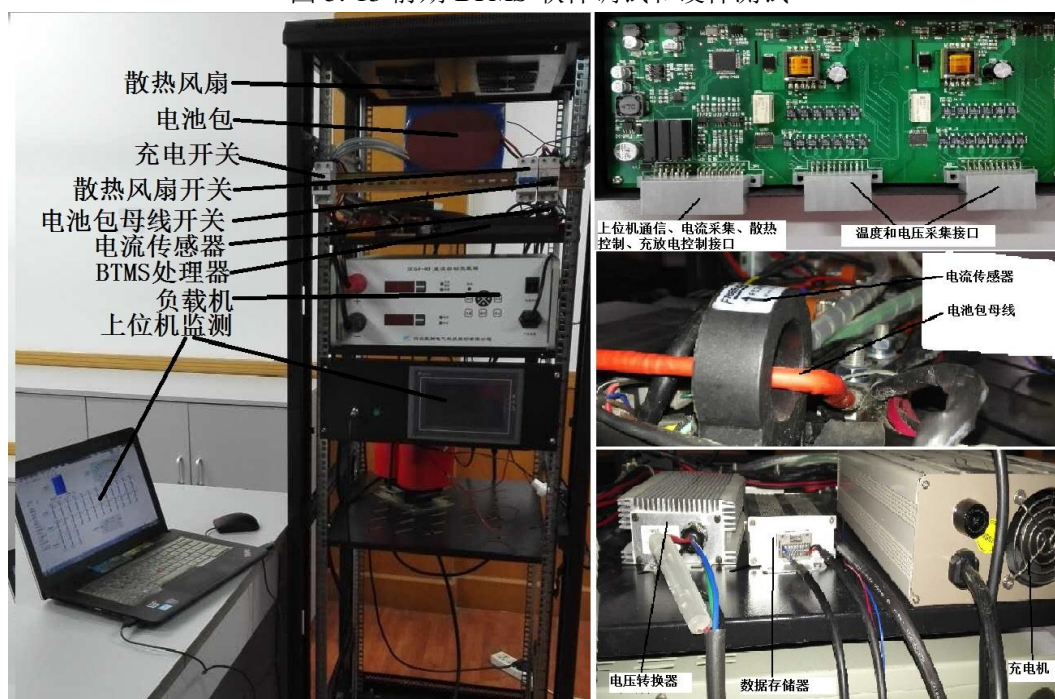


图 5.14 BTMS 半物理仿真试验台架实物图

5.4 热管理策略试验验证

由于台架缺少必要的温控设备，只能在室温 25°C 下对热管理策略进行验证，另外，实验台架没有连接动态车辆，无法对车辆进行工况识别，实验中无法满足车辆的瞬态工况的需求，根据第二章的内容及文献^[58]，本文简化了电动汽车的瞬态工况，组合加速、爬坡、匀速、减速、加速、匀速工况作为电动汽车典型城市的常用工况，并在电子负载中编程该工况组合作为实验用工况。半物理仿真试验中电池的理想温度区间是 $25^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ ，试验中分别采取两种热管理策

略，策略一为以电池表面平均温度为依据的温度管理策略，策略二为以电池内部估计温度为依据的温度管理策略，温度管理效果分别图 5.15、图 5.16 所示。

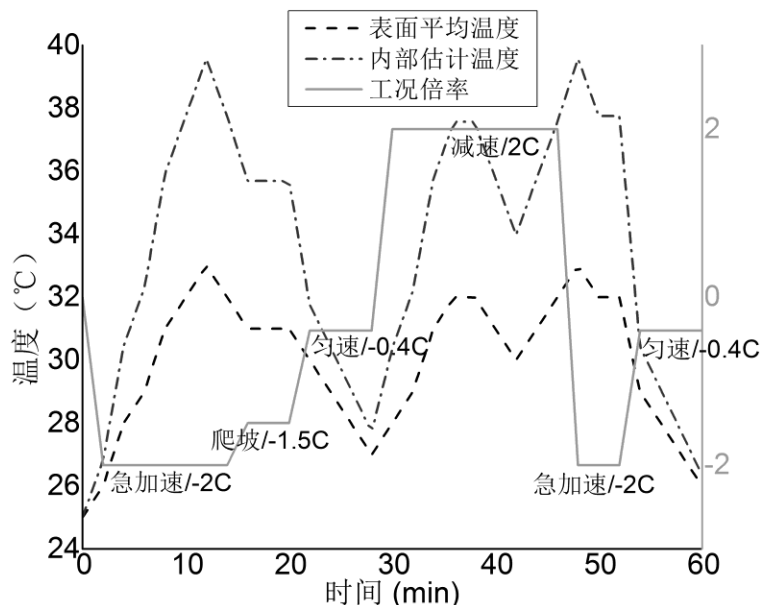


图 5.15 策略一下的温度管理效果

从图 5.15 可以看出，以电池表面测量温度为参考依据进行温度管理时，温度传感器的测量温度维持在 30°C 左右，但是电池内部温度事实上早已超过了理想的温度范围，因为内部温度不可测量，仅通过内部估计温度可以看出，在急加速工况下，动力电池表面温度虽然只达到了 33°C，但是内部温度却已达到 40°C，内外温差达到 7°C，不仅超过了理想温度范围，还造成电池内外温差过大。

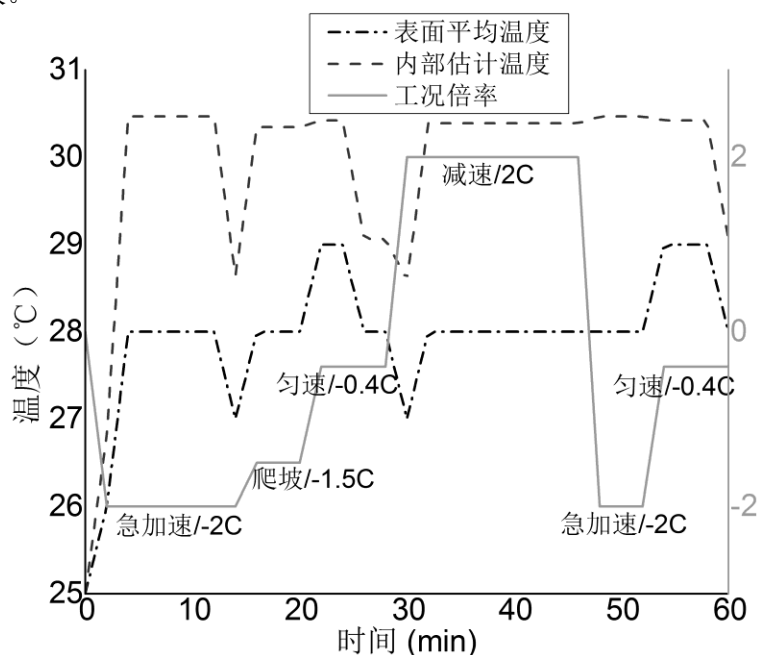


图 5.16 策略二下的温度管理效果

从图 5.16 可以看出, 以电池内部估计温度为参考依据进行热管理时, 电池表面平均温度, 即温度传感器的测量温度始终维持在 28°C 左右, 而电池内部估计温度也维持在 30°C 左右, 电池内外温差维持在 2°C 以内, 电池始终工作在理想的温度范围内, 特别是在加速工况下, 电池虽然处于大功率放电、急剧生热的条件下, 但是电池的工作温度没有出现温升加剧的现象。

电池的理想温度依据是电池表面的实测温度, 其本文实验用电池的理想温度范围是 $25^{\circ}\text{C} \sim 30^{\circ}\text{C}$, 将两种策略下的电池表面平均温度提取出来进行对比分析, 如图 5.17 所示, 图中实线策略一所代表的是以电池表面平均温度为依据的温度管理策略, 图中虚线策略二所代表的是以电池内部估计温度为依据的温度管理策略, 从图中可以看出, 在同样的工况模式下, 温度管理策略一下的电池表面温度经常超出理想温度范围, 最高达到了 33°C , 电池的最大温差达到了 8°C , 电池的温度起伏波动很大, 在这种差异化温度下很容易造成电池一致性变差, 输出功率降低, 可输出容量减少, 使用寿命缩短。而温度管理策略二下的电池表面温度却始终维持在理想温度范围内, 电池的温度变化幅度很小, 最大只有 4°C , 电池基本处于一个恒温的状态, 大大优化了电池使用条件, 能够最大限度的发挥电池的容量输出, 延长电池的使用寿命。

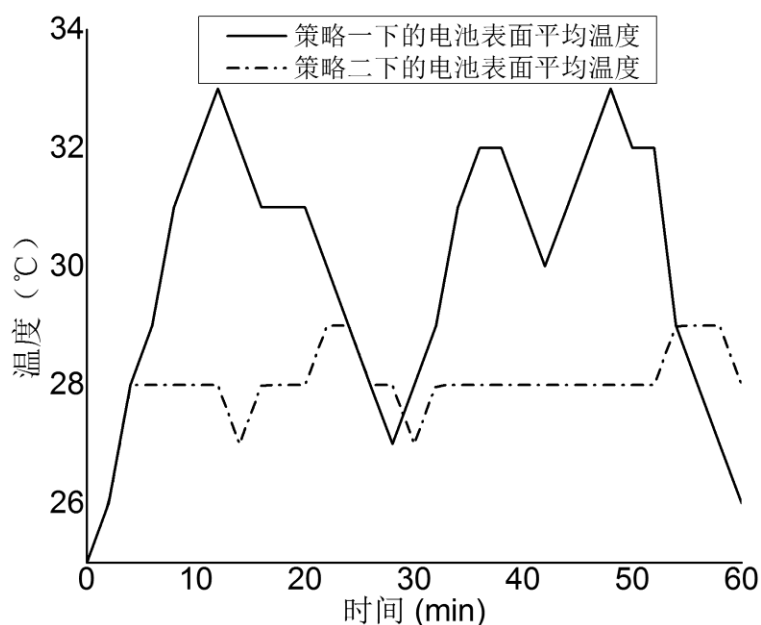


图 5.17 两种策略下的电池表面平均温度对比

电池热管理系统的执行器为散热风扇, 散热风扇根据参考温度与理想温度的差值范围以及散热功率需求, 分为四个不同的档位, 分别是 0 档, 表示未开启或停止状态, 1 档表示小功率低速散热状态, 2 档表示中等功率快速散热状态, 3 档表示大功率高速散热状态。以表面测量温度和内部估计温度为参考依据的散热风扇的档位状态如图 5.18 所示, 以内部估计温度为依据的热管理策略, 随着工况模式的变换, 散热风扇出现提前开启、延迟关闭、提前关闭的情况, 在散热模式上基本处于中、低速散热模式; 而以表面测量温度为依据的热管理策略, 散热风扇状态紧随温度参数变化, 响应延迟, 基本维持在中、高速散热模式。

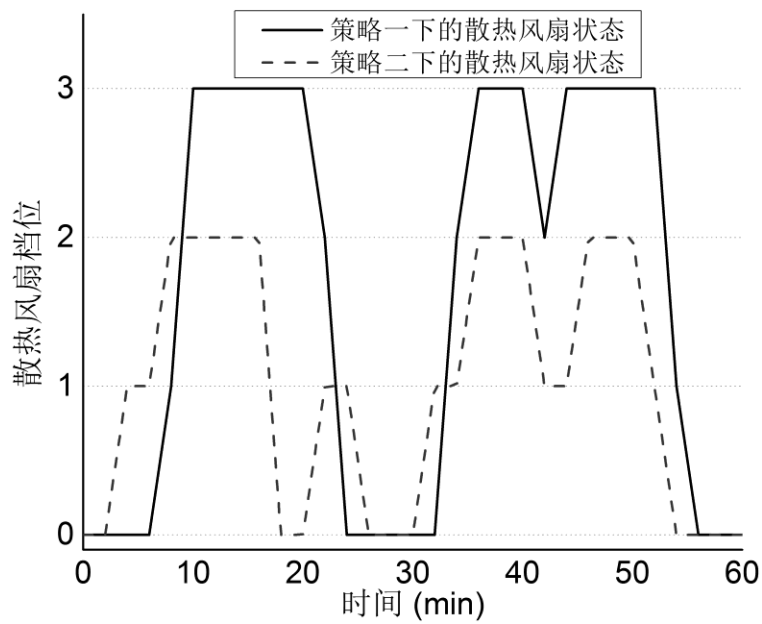


图 5.18 两种策略下的散热风扇的档位状态对比

综合以上分析，以内部估计温度为依据的热管理策略，电池内外温差小，并且始终维持在理想的工作范围内，温度管理效果优于以表面测量温度为依据的热管理策略；且在温度管理耗能上，散热风扇基本处于中、低速散热模式，紧密结合工况特性，适时开启关闭，耗能小，节能效果也优于以表面测量温度为依据的热管理策略。由此，验证了本文提出的以电池内部估计温度为参考依据的热管理策略的有效性。

5.5 本章小结

本章属于论文的试验部分，搭建了电池的热特性试验台架，并在标准工况下对动力电池单体和模块进行了充放电试验，拟合出了开路电压-SOC 曲线、内阻-SOC 曲线，为前面章节的数值模拟提供了参数支持；搭建了简单的热管理系统半物理仿真试验平台，在线验证了基于内部估计温度的热管理策略的有效性和合理性。

第六章 全文总结与展望

6.1 全文总结

基于电动汽车典型城市工况的热管理策略不仅结合了动力电池的温升特性规律，还综合利用了电动汽车的工况特性，实现了温度闭环、电池状态闭环、车辆状态闭环的在线热管理模式，能够有效的使电池温度维持在理想的工作温度范围内，对提高动力电池输出性能和安全性能、延长动力电池使用寿命具有重要意义。

本文主要完成的工作如下：

1、阐述了动力电池的生热机理，分析了影响动力电池温升的因素；将电动汽车与动力电池进行了动力性匹配工作，并基于 advisor 软件平台，在典型城市工况下进行了仿真，得到了动力电池温升影响因素之一的工作电流特性。

2、分析动力电池建模方法的现状，阐述了电化学-热模型的建模原理，并基于 Comsol 软件，分别搭建了动力电池单体和模块的三维几何模型，在典型城市工况下，对单体和模块分别进行了热特性仿真，得到了单体的温升特性规律及模块的温度场分布特性。

3、基于典型城市工况下单体及模块的温度特性，提出了基于电池内部估计温度的热管理策略，并在 Simulink 中搭建了电池内部温度估计模型，在线验证了内部估计温度的可靠性；并对电池热管理系统的硬件、软件及上位机显示进行了相关研究设计。

4、搭建了电池热特性试验台架，对单体及模块进行了标准的放电试验，拟合出了 OCV-SOC 曲线、内阻-SOC 曲线，为动力电池前期的仿真试验提供基本的参数支持；热特性试验还得到了典型城市工况下单体和模块的试验温度曲线，进一步验证了前期的仿真结果。

5、搭建了电池热管理系统半物理仿真试验台架，实际验证了基于电池内部估计温度的热管理策略的有效性。

6.2 展望

本文对典型城市工况下的动力电池温升特性进行了研究，提出了基于动力电池内部估计温度的热管理策略，并进行了相应的软硬件设计，搭建了热管理系统半物理仿真台架。但是由于试验条件及工作时间的有限，本文以下工作还需要进一步研究：

1、本文虽然对电池模块的温度场进行了仿真研究，但是模块对象太小，与实际电动汽车动力电池的模块相比，还存在较大差距，如果今后条件允许，可以采用电动汽车实际电池模块进行仿真研究。另一方面，电动汽车的实际工况比典型城市工况更复杂，如果有机会，可以基于电动汽车实际工况来进行进一步研究。

2、热管理系统不仅仅是热管理策略，还涉及到电池包结构、冷却方式、电池大小等因素，

而本文只优化了热管理策略，未对其他因素进行匹配协调，这一点上需要进一步研究，以谋求热管理系统最理想的工作效果。

3、本文的试验工作开展得十分有限，缺少必要的温控设备，对于不同环境温度下的电池升温特性规律缺乏必要的试验验证。如果基于典型城市工况特性的热管理策略再将不同环境温度下的电池温度特性结合起来，将进一步扩大该策略的使用的地域范围，提高适用性。

4、热管理系统的半物理仿真台架缺少必要的车辆状态信息，试验无法验证热管理系统识别车辆状态信息的能力，如果能将车辆状态信息糅合进热管理系统的台架中去，可以进一步验证基于典型城市工况特性的热管理策略对车辆信息的识别和判断。

参考文献

- [1] 中国汽车技术研究中心,等.中国新能源汽车产业发展报告(2013)[M].北京:社会科学文献出版社,2013.
- [2] 徐斌.新能源汽车[M].北京:人民交通出版社,2015.
- [3] 电动汽车重大专项总体组,电动汽车重大专项办公室.“十五”国家高技术研究发展计划(863计划)-电动汽车重大专项进展[J].汽车工程,2003,25(6):533-536.
- [4] 辛凤影,王海博.电动汽车发展现状与商业化前景分析[J].国际石油经济,2010,32(7):20-25.
- [5] 吕志坚,孟捷,等.国际科技动态跟踪—新能源汽车[M].北京:清华大学出版社,2013.
- [6] 田美娥.我国发展电动汽车的必要性与趋势[J].西安石油大学学报(自然科学版),2010,23(5):89-91.
- [7] 张天舒.日本新能源汽车发展及对我国的启示[J].可再生能源,2014,32(2):246-252.
- [8] 陈翌,孔德洋.德国新能源汽车产业政策及其启示[J].德国研究,2014,29(1):71-81.
- [9] 张锐楠,顾宇方.我国电动汽车推广配套政策研究—以上海电动汽车发展为例[J].管理观察,2015,(17):81-84.
- [10] 刘志伟.日本、美国、欧盟新能源汽车产业政府扶持措施研究[D].保定:河北大学,2010.
- [11] 其鲁,等.电动汽车用锂离子二次电池[M].北京:科学出版社,2010.
- [12] 王芳,夏军.电动汽车动力电池系统安全分析与设计[M].北京:科学出版社,2016.
- [13] 陈玉红,唐致远,卢星河,等.锂离子电池爆炸机理研究[J].化学进展,2006,18(6):823-831.
- [14] CHEN S C, WANG C C. Thermal analysis of lithium-ion batteries [J]. Power Sources,2005,140(1): 111-124.
- [15] TNUI Y, KOBAYASHI Y, WATANABE Y. Simulation of temperature distribution in cylindrical and prismatic lithium ion secondary batteries [J]. Energy Conversion and Management, 2007,48(7):2103-2109.
- [16] 张遥,白杨,刘兴江.动力用锂离子电池热仿真分析[J].电源技术,2008,32(7):461-463.
- [17] KENNETH J K, MIHALIE M, ZOLOT M. Battery usage and thermal performance of the Toyota Prius and Honda Insight during chassis dynamometer testing XVII[C]. The Seventeenth Annual Battery Conference on Applications and Advances. US: National Renewable Energy Laboratory, 2002.
- [18] KIM G H, PESARAN A, SPOTNITZ R. A three-dimensional thermal abuse model for lithium-ion cells [J]. Power Sources,2007,170(2):476-489.

- [19] 王峰,李茂德. 电池热效应分析[J]. 电源技术,2010,34(3):288-291.
- [20] 张国庆,饶中浩. 一种高效散热电动汽车电池装置[P]. 中国:ZL2009-20060473.5,2010-05-05.
- [21] 张国庆,吴忠杰,饶中浩,等. 动力电池热管冷却效果实验[J]. 化工进展,2009,28(7):1165-1169.
- [22] 张剑波,吴彬,李哲. 车用动力锂离子电池热模拟与热设计的研发状况与展望[J]. 集成技术,2014,3(1):18-26.
- [23] 车杜兰. 电动汽车锂离子电池包热特性研究与优化设计[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
- [24] 胡明辉,秦大同,叶心. 混合动力汽车用镍氢蓄电池组热管理方法[J]. 江苏大学学报,2011,32(2):148-152.
- [25] 李策园. 纯电动汽车锂动力电池组温度场特性研究及热管理系统实现[D]. 吉林:吉林大学,2014.
- [26] 张剑波,吴彬,李哲. 车用动力锂离子电池热模拟与热设计的研发状况与展望[J]. 集成技术,2014,3(1):18-26.
- [27] 赵卫兵. 电动车锂电池热管理系统研究[D]. 吉林:吉林大学,2014.
- [28] 张国庆,张海燕. 相变储能材料在电池热管理系统中的应用研究进展[J]. 材料导报,2006,20(8):9-12.
- [29] 饶中浩,张国庆. 电池热管理 = Battery Thermal Management[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [30] 谭晓军. 电动汽车动力电池管理系统设计[M]. 广州:中山大学出版社,2011,11.
- [31] SERRAO L., CHEHAB Z., GUEZENNEE Y., et al. An aging model of Ni-MH batteries for hybrid electric vehicles[C]. Vehicle Power and Propulsion,2005 IEEE Conference,7~9 Sept.2005,61pp8.
- [32] SOMOGYE R. An Aging Model of Ni-MH Batteries for Use in Hybrid-Electric Vehicles [D]. The Ohio State University, Columbus, 2004.
- [33] 陈全世. 先进电动汽车技术[M]. 北京:化学工业出版社,2007.
- [34] 梁金华,李建秋,卢兰光,等. 纯电动车电池组散热必要性的初步析[J].2012,34(7):589-591.
- [35] Michael R. Giuliano, Suresh G. Advani, Ajay K. Prasad. Thermal analysis and management of lithium-titivate batteries[J].Journal of Power Sources,2011,196:6517-6524.
- [36] Kim Yeow, Ho Teng, Marina Thelliez, et al. Thermal Analysis of a Li-ion Battery System with Indirect Liquid Cooling Using Finite Element Analysis Approach[J]. SAE Int.J.Engines,2010,3(2): 65-78.
- [37] 宋丽,魏学哲,戴海峰,等. 锂离子电池单体热模型研究动态[J]. 汽车工程,2013,35(3):285-291.
- [38] Chen huixian, Wang shangfeng, Dong xinli, et al. Optimal matching of electric vehicle driving system based on ADVISOR, Science Technology and Engineering, no. 2, 2010.

- [39] Rami Sabbah, Kizilel R., Selman J.R. Active (air-cooled) vs. passive (phase change material) thermal management of high power lithium-ion packs: Limitation of temperature rise and uniformity of temperature distribution[J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 182(1): 630-638.
- [40] L.H. Saw, K. Somasundaram, Y. Ye, et al. Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles, *Journal of Power Sources*, vol. 249, pp. 231-238, 2014.
- [41] PESARAN AA. Battery thermal management in EVs and HEVs: Issues and Solutions[C]. *Advanced Automotive Battery Conference*, as Vegas, Nevada, February 6~8, 2001.
- [42] 李哲, 韩雪冰, 卢兰光, 等. 动力型磷酸铁锂电池的温度特性[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(18): 115-120.
- [43] 黄倩. 锂离子电池的热效应及其安全性能的研究[D]. 上海: 复旦大学, 2007.
- [44] 李仲兴, 李颖, 等. 纯电动汽车不同行驶工况下电池组的温升研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(16): 180-185.
- [45] 饶中浩. 锂离子动力电池强化传热关键技术研究. 广州: 广东工业大学, 2008.
- [46] Maleki H, Deng G P, Anani A, et al. Thermal stability studies of Li-ion cells and components. *Journal of the Electrochemical Society*, 1999, 146(9): 3224-3229.
- [47] Zhang Z, Fouchard D, Rea J R. Differential scanning calorimetry material studies: implications for the safety of lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*, 1998, 700(1): 16-20.
- [48] Richard M N, Dahn J R. Predicting electrical and thermal abuse behaviors of practical lithium-ion cells from accelerating rate calorimeter studies on small samples in electrolyte. *Journal of Power Sources*, 1999, 79(2): 135-142.
- [49] 黄倩. 锂离子电池的热效应及其安全性能的研究[D]. 上海: 复旦大学, 2007.
- [50] Schilling O, Dahn J R. Thermodynamic stability of chemically delithiated $\text{Li}(\text{Li}_x\text{Mn}_{2-x})\text{O}_4$. *Journal of the Electrochemical Society*, 1998, 145(2): 569-575.
- [51] MacNeil D D, Dahn J R. Test of reaction kinetics using both differential scanning and accelerating rate calorimetries as applied to the reaction of Li_xCoO_2 in non-aqueous electrolyte. *Journal of Physical Chemistry A*, 2001, 105(18): 4430-4439.
- [52] Venkatachalapathy R, Lee C W, Lu W Q, et al. Thermal investigations of transitional metal oxide cathodes in Li-ion cells. *Electrochemistry Communications*, 2000, 2(2): 104-107.
- [53] Biensan P, Simon B, Peres J P, et al. On safety of lithium-ion cells. *Journal of Power Sources*, 1999, 82: 906-912.
- [54] Sato N. Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric and hybrid vehicles[J]. *Journal of Power Sources*, 2001, 99(1/2): 70-77.

- [55] Onda K, Ohshima T, Nakayama M, et al. Thermal behavior of small lithium-ion battery during rapid charge and discharge cycles. *Journal Power Sources*, 2006, 158(1):535-542.
- [56] 林成涛,李腾,陈全世. 锰酸锂动力蓄电池散热影响因素分析[J]. *兵工学报*,2010,31(1):88-93.
- [57] 张志杰,李茂德. 锂离子动力电池温升特性的研究[J]. *汽车工程*,2010,32(4):320-321.
- [58] 林春景,李斌,常国峰,等. 不同温度下磷酸铁锂电池内阻特性实验研究[J]. *电源技术*,2015:39(1):22-26.
- [59] 郭宏榆,姜久春,王吉松,等. 功率型锂离子动力电池的内阻特性[J]. *北京交通大学学报*,2011:35(5):119-224.
- [60] 余志生. *汽车理论*[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [61] 郑怡颖,赵志国. 燃料电池轿车动力系统匹配研究[J]. *机械与电子*,2012,07:6-9.
- [62] 国家发展与改革委员会. QC/T 743—2006 电动汽车用锂离子蓄电池[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- [63] 徐蒙. 磷酸铁锂动力电池放电过程电化学-热耦合模型研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [64] Todd Bandhauer, Srinivas Garimella, Thomas F. Fuller. Electrochemical-Thermal Modeling to Evaluate Battery Thermal Management Strategies[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2015, 162 (1) A125-A136.
- [65] 徐蒙,张竹茜,贾力,等. 圆柱形锂离子动力电池放电过程电化学与传热特性研究[J]. *中国电机工程学报*,2013,33(32):54-60.
- [66] Patnaik R S M, Ganesh S, Ashok G. Heat management in aluminium/air batteries: sources of heat. *Journal of Power Sources*, 1994, 50(3):331-342.
- [67] Meyer M, Komsijska L, Lenz B, et al. Study of the local SOC distribution in a lithium-ion battery and electrochemical modeling and simulation[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2013, 37(4): 2016- 2027.
- [68] M. Doyle, J. Newman, A. S. Gozdz, et al. Comparison of Modeling Predictions with Experimental Data from Plastic Lithium Ion Cell[J]. *Journal of Electrochemical Society*, vol. 143, no. 6, pp. 1890-1903,1996.
- [69] Long Cai, Ralph E. White. Mathematical modeling of a lithium ion battery with thermal effects in COMSOL Inc. Multiphysics (MP) software, *Journal of Power Sources*, 196 (2011) 5985–5989.
- [70] Christophe Forgez, Dinh Vinh Do, Guy Friedrich, et al. Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄ /graphite lithium-ion battery [J]. *Journal of Power Sources*, 195 (2010) 2961–2968.

致 谢

研究生生活紧张而又充实，眼看着两年半的南航学习生活就要结束，心里有些不舍。回首在南航的学习生活，首先要感谢导师李玉芳副教授，李老师严谨的治学态度，广博的学识，丰富的经验都给予我科研工作中诸多的指导和帮助，她豁达开朗的性格也让我受益颇多、充满动力。在课题选定、仿真研究、实验开展以及论文创作过程中无不倾注着导师的细心指导和谆谆教诲。

同时也要感谢课题组魏民祥老师对我日常科研工作的帮助督促，魏老师严谨治学帮我形成了良好的学习习惯，感谢车辆系实验室主任陈国平老师，陈老师的工程应用背景对提高我的实验动手能力有很大的帮助，感谢赵万忠老师对我论文开题时的建议与帮助，感谢教研室里一起科研、学习、吃饭、打球的兄弟姐妹们，感谢南京林业大学孙伟明同学对我实验的帮助，在此对他们表示感谢。

感谢我的家人，感谢他们一直以来对我的默默付出和关怀。

最后，衷心感谢评审老师，感谢你们百忙之中对我的论文提出宝贵意见。

在学期间的研究成果及发表的学术论文

攻读硕士学位期间发表（录用）论文情况

1. 郭阳东, 李玉芳, 张文浩. Performance of power battery temperature simulation based on the typical work condition of the electric vehicle. 第四届南航研究生国际学术会议（已发表）.
2. 郭阳东, 李玉芳, 张文浩, 邵东骁. 行驶工况下的动力电池温度特性研究. 电源技术（已录用）.
3. 郭阳东, 李玉芳. 典型工况下的动力电池温升特性研究. 南京航空航天大学第十八届研究生学术会议优秀论文.
4. 张文浩, 李玉芳, 郭阳东. Research on thermal management strategy optimization for the power battery in electric vehicle based on characteristics of working conditions. 第四届南航研究生国际学术会议（已发表）.

申请专利

1. 人脸识别跟随电风扇及其人脸定位跟随方法（已公开），发明专利。申请号：CN20160180638.7 公开号：CN105697403A
2. 一种动力电池组 SOC 和 SOH 的自适应估计方法（已受理），发明专利。申请号：201710141906.9
3. 一种基于工况特性的动力电池热管理方法（在审），发明专利。

攻读硕士学位期间参加科研项目情况

江苏省普通高校研究生科研创新计划项目（kfjj20160215）