

单位代码: 10359
学 号: 2014110246



中国热管理网
WWW.REGUANLI.COM

分 类 号: U469.72+2
密 级: 公开



合肥工业大学
Hefei University of Technology

硕士学位论文

MASTER DEGREE THESIS

论文题目: 电动汽车锂离子电池组热特性分析及电池箱体散热结构优化

学位类别: 学历硕士

学科专业: 机械设计及理论
(工程领域)

作者姓名: 方雄灿

导师姓名: 赵韩 教授

完成时间: 2017年3月

单位代码：10359
学 号：2014110246

密 级：公开
分类号：U469.72+2

合肥工业大学

Hefei University of Technology

硕士学位论文

MASTER'S DISSERTATION

论文题目： 电动汽车锂离子电池组热特性
分析及电池箱体散热结构优化

学位类别： 学历硕士

专业名称： 机械设计及理论

作者姓名： 方雄灿

导师姓名： 赵韩 教授

完成时间： 2017年3月20日

合 肥 工 业 大 学

学历硕士学位论文

电动汽车锂离子电池组热特性分析及电池
箱体散热结构优化

作者姓名： 方雄灿

指导教师： 赵韩 教授

专业名称： 机械设计及理论

研究方向： 数字化设计及现代设计理论

2017 年 3 月

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

**Thermal Characteristic analysis of Lithium-ion battery
pack for EV and Heat Dissipation Structure
Optimization**

By

Fang Xiongcan

Hefei University of Technology

Hefei, Anhui, P.R.China

03, 2017

合肥工业大学

本论文经答辩委员会全体委员审查, 确认符合合肥工业大学专业硕士学位论文质量要求。

答辩委员会签名 (工作单位、职称、姓名)

主席: 合肥工业大学教授 王卫军

委员: 合肥工业大学 教授 刘心恩

合肥工业大学 副教授 赵萍

安徽农业大学 副教授 陈永新

合肥工业大学 副教授 丁曙光

导师: 合肥工业大学

教授



学位论文独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行独立研究工作所取得的成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的内容外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得合肥工业大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。对本文成果做出贡献的个人和集体，本人已在论文中作了明确的说明，并表示谢意。

学位论文中表达的观点纯属作者本人观点，与合肥工业大学无关。

学位论文作者签名：方雄灿

签名日期：2017年4月20日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解合肥工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：除保密期内的涉密学位论文外，学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子光盘，允许论文被查阅或借阅。本人授权合肥工业大学可以将本学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库，允许采用影印、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授权书)

学位论文作者签名：方雄灿

指导教师签名：

签名日期：2017年4月20日

签名日期：2017年4月20日

论文作者毕业去向

工作单位：

联系电话：

通讯地址：

E-mail：

邮政编码：

致 谢

光阴似箭，我们已经退去稚嫩，即将要结束 3 年硕士研究生阶段而去开始一段崭新的人生。作为一名本硕在合肥工业大学读了近 7 年之久的学生，即将离开校园，走向未知的社会，心情有些凝重。但是想着我已经在合肥工业大学的光辉大道上走了近 7 年，将来前途肯定一片光明。在此毕业论文完成之际，我非常感谢一直以来关心和帮助过我的老师和同学。

首先，我要向我的导师赵韩教授致以最深切的敬意和最衷心的感谢，感谢赵老师对我学习和生活上莫大的帮助。本文从构思、开题到撰写完成，赵老师都给予了我明确的指导。赵老师学识渊博，治学严谨，带人宽厚，在学术研究和为人处世方面都让我受益匪浅，是我今后学习的榜样。

其次，非常感谢黄康教授。在研究生的三年时间里，黄老师不仅在学业上给予我精心的指导和帮助，在生活中也给予我莫大的关怀与照顾，从一入学就开始教导我们怎么做一名合格的研究生。在此向黄老师致以深深的谢意。

另外，感谢汽车技术与装备整个实验室团队的所以师兄姐妹。在这近三年的学习生活中都离不开他们的帮助，助我顺利完成学术论文。

最后，特别感谢我的家人，在我求学这么多年都一直支持鼓励我，默默无私地为我付出，他们的关心是我学习的动力，在即将毕业之际，特别感谢他们，并祝愿他们身体健康，永远幸福。

作者：方雄灿

2017 年 3 月

摘要

由于能源危机和环境污染越发严重，电动汽车在此背景下应运而生。国家“863”计划重点支持电动汽车的发展，近些年已经攻克了一系列电动汽车行业关键技术难题。动力电池作为纯电动汽车唯一的能量来源，其性能好坏决定着电动汽车整车性能的好坏。锂离子电池因为自身比能量高、无记忆效应、自放电低、循环性能好等优势成为电动汽车动力电池的主导电源。但是锂离子电池工作性能的好坏与工作温度息息相关，电池组温度太高、太低或者温度分布不均匀都会严重影响电池组的工作性能。因此，对电池组热管理系统的研究是很具有现实意义。

本文针对某纯电动汽车用方形磷酸铁锂电池温度场分布应用计算流体力学方法（CFD）进行研究。首先，对锂离子电池的结构和工作原理进行探讨，进一步研究锂离子电池的充放电特性和发热机理，得出锂离子电池生热量包括焦耳热、极化热、反应热和副反应热等四部分。其次，在空气自然对流时对锂离子电池单体进行不同放电倍率下温度场仿真实验，仿真结果表明电池单体在高倍率放电时，温度分布极不均匀，而且最高温度远远超过锂离子电池工作温度范围。第三，完成电池箱散热流道初步设计，对其进行不同放电倍率下的温度场仿真实验，对不足之处进行优化设计，优化之后的散热流道能够明显降低电池组最高温度。研究进风口风速对电池组散热效果的影响，一系列仿真结果表明，将风速限制在一定范围（10m/s）是有必要的。第四，特别针对电池组在不同工况下温度场均匀性提升进行研究，对电池箱体结构做进一步改进。在电池组上下都增加薄铝板，用以快速把电池组热量散开。针对改进结构做不同工况下的仿真实验，选出三种典型工况下的最佳风速。

通过本文的研究，最终设计出一套动力电池组散热流道，并且通过计算机仿真实验证实了其良好的散热性能。

摘要：锂离子电池；计算流体力学；放电倍率；温度场分布；散热结构

ABSTRACT

Along with the growing energy crisis and environmental problems, electric cars came into being. National “863” plan specially support the development of EV, and a series of key technical problems of electric car have been overcome in recent years. Power battery is the only source of energy for pure electric vehicles, the performance of which directly determines the performance of electric vehicle. Lithium-ion battery has become the dominant power of EV and HEV because of its advantages, such as high specific energy, no memory effect, low self-discharge, good cycle performance and so on. However, whether the performance of lithium-ion battery is good or not is closely related to the working temperature. If the temperature is too high, too low or uneven distribution, which will seriously affect the performance of the battery pack. Therefore, the research on battery thermal management system is very practical significance.

This thesis mainly research on temperature field distribution of a square lithium-ion battery used in EV through computational fluid dynamics(CFD). First, the structure and working principle of the lithium-ion battery were discussed. Further research on the charge and discharge characteristics and the heating mechanism of the lithium ion battery is conducted. The heat generation of the lithium-ion battery included Joule heat, polarization heat, reaction heat and side reaction heat. Second, do temperature field simulation of lithium-ion battery monomer under different discharge rate when environment is air natural convection. The simulation results show that temperature distribution of lithium-ion battery monomer is uneven under high rate discharge, and the highest temperature is far more than operating temperature range of lithium-ion battery. Third, finish the preliminary design of battery box heat dissipation passageway and the temperature field simulation experiment under different discharge rate is carried out. The shortcomings are optimized, and then the temperature of battery pack is reduced obviously. The effect of the air inlet on the heat dissipation of the battery pack is studied, and a series of simulation results show that it is necessary to limit the wind speed to a certain range (10 m/s). Fourth, especially do research on the temperature field uniformity of battery pack, and do further improvements on it. Thin aluminum plate is used up and down the battery pack to quickly spread the heat of the battery pack. According to the simulation experiment under different working conditions, the optimum wind speed under three typical working conditions is selected.

Through the research of this thesis, a set of power battery heat dissipation

passageway is designed, and its thermal performance is confirmed by computer simulation.

KEYWORDS: Lithium-ion battery; Computational Fluid Dynamics; discharge rate; temperature field distribution; heat dissipation structure

目录

第一章 绪论	1
1.1 电动汽车的发展背景.....	1
1.1.1 能源危机.....	1
1.1.2 环境问题.....	2
1.2 纯电动汽车动力电池发展概况.....	2
1.3 电池热管理系统国内外研究现状.....	4
1.3.1 电池生热速率研究现状.....	4
1.3.2 电池热模型研究现状.....	4
1.4 课题研究意义及主要研究内容.....	5
1.4.1 课题研究意义.....	5
1.4.2 课题研究主要内容.....	6
第二章 纯电动汽车锂离子电池热特性分析	7
2.1 锂离子电池概述.....	7
2.1.1 锂离子电池结构.....	7
2.1.2 锂离子电池工作原理.....	8
2.2 锂离子电池的失效机理.....	9
2.3 锂离子电池充放电特性.....	11
2.4 锂离子电池的发热机理分析.....	13
2.4.1 发热机理分析.....	13
2.4.2 传热特性分析.....	15
2.5 锂离子电池在高温下的性能特点.....	17
2.6 本章小结.....	18
第三章 锂离子电池单体散热温度场仿真分析	19
3.1 锂离子电池单体温度场仿真分析.....	19
3.1.1 计算流体力学理论基础.....	19
3.1.2 锂离子电池单体热效应模型建立.....	22
3.1.3 锂离子电池热物性参数的获取.....	23
3.1.4 锂离子电池单体仿真模型的建立以及网格划分.....	26
3.1.5 仿真模型初始条件、边界条件的设定及求解控制器的设定.....	28
3.1.6 温度场仿真结果分析.....	30
3.2 本章小结.....	32
第四章 锂离子电池组散热温度场研究及散热结构优化	33
4.1 电池组冷却方式的选择.....	34
4.2 电池组空冷散热系统的散热方式的选择.....	35
4.3 电池组空冷散热系统的三维散热模型的建立.....	36

4.3.1 流固耦合模型的建立.....	36
4.3.2 网格划分、材料属性与边界条件的设置.....	37
4.4 散热系统温度场仿真结果与分析.....	38
4.5 电池组散热系统结构优化与温度场仿真分析.....	39
4.5.1 散热结构优化方案.....	39
4.5.2 优化结构温度场仿真分析.....	41
4.5.3 优化前后不同放电倍率下温升对比.....	42
4.6 进风口风速对散热效果的影响.....	43
4.7 本章小结.....	47
第五章 不同工况下锂离子电池组温度场均匀性优化研究	48
5.1 锂离子电池箱结构改进模型的建立及边界条件的设定.....	48
5.1.1 电池箱体三维模型的建立.....	48
5.1.2 边界条件的设定.....	49
5.2 改进模型均匀性提升效果验证.....	49
5.3 高温（38℃）条件下温度场研究及最佳风速的选择.....	50
5.4 低温（0℃）条件下温度场研究及最佳风速的选择.....	54
5.5 常温（25℃）条件下温度场研究及最佳风速的选择.....	57
5.6 本章小结.....	60
第六章 全文总结及展望	61
6.1 全文总结.....	61
6.2 研究展望.....	62
参考文献	63
攻读硕士学位期间的学术活动及成果情况	67

插图清单

图 1.1	2005—2013 年我国汽车产销趋势.....	1
图 1.2	2005-2013 年中国汽车保有量趋势	2
图 2.1	锂离子电池内部结构.....	7
图 2.2	圆柱形和方形电池内部结构.....	8
图 2.3	锂离子电池工作原理.....	9
图 2.4	锂离子电池充放电电压曲线.....	11
图 2.5	锂离子电池 100A (0.5C) 放电过程曲线.....	12
图 2.6	对流换热示意图.....	17
图 2.7	电池容量与温度变化关系曲线.....	18
图 3.1	CFD 求解方式示意图.....	20
图 3.2	锂离子电池单体三维模型.....	27
图 3.3	锂离子电池单体简化三维模型.....	27
图 3.4	电池单体网格图.....	28
图 3.5	网格质量检查图.....	28
图 3.6	壁面边界条件设置图.....	29
图 3.7	求解控制器参数的选择.....	46
图 3.8	松弛因子的设置.....	30
图 3.9	0.5C 放电倍率电池温度分布云图.....	30
图 3.10	1C 放电倍率电池温度分布云图.....	31
图 3.11	2C 放电倍率电池温度分布云图.....	31
图 4.1	电池组热管理系统 (BTMS) 一般设计流程.....	33
图 4.2	串行通风散热方式.....	36
图 4.3	并行通风散热方式.....	36
图 4.4	电池组流固耦合模型三维图.....	37
图 4.5	1C 放电倍率温度分布云图.....	38
图 4.6	1C 放电倍率空气流场流线图.....	38
图 4.7	优化后电池组三维流固耦合模型.....	40
图 4.8	优化后网格模型.....	58
图 4.9	散热流道基本尺寸.....	40
图 4.10	优化后电池组温度分布云图.....	41
图 4.11	优化后空气流场流线图.....	42
图 4.12	电池组最高温度曲线图.....	45
图 4.13	电池组最大温差曲线图.....	46
图 5.1	改进模型三维图.....	48
图 5.2	网格图.....	49
图 5.3	1C 放电倍率风速 10m/s 温度场分布云图.....	50
图 5.4	风速 10m/s 时残差曲线.....	51
图 5.5	风速 10m/s 时电池组温度分布云图.....	51
图 5.6	风速 15m/s 时电池组温度分布云图.....	51

图 5.7	空调风速 10m/s 时电池组温度分布云图.....	53
图 5.8	低温、风速 5m/s 时电池组温度分布云图.....	54
图 5.9	低温、风速 8m/s 时电池组温度分布云图.....	55
图 5.10	低温、风速 10m/s 时电池组温度分布云图.....	56
图 5.11	风速 15m/s 时电池组温度分布云图.....	57
图 5.12	风速 8m/s 时电池组温度分布云图.....	58
图 5.13	风速 10m/s 时电池组温度分布云图.....	59

插表情单

表 2.1	不同温度电池充电参数.....	12
表 3.1	模型中的系数.....	22
表 3.2	磷酸铁锂电池内部各组份导热系数和密度.....	25
表 3.3	锂离子电池等效热物性参数.....	25
表 3.4	电池单体结构参数及热物性参数.....	26
表 3.5	不同放电倍率电池单体温度场仿真结果.....	32
表 4.1	不同冷却方式优缺点比较.....	35
表 4.2	空气热物性参数.....	37
表 4.3	关键参数.....	39
表 4.4	电池组散热流道优化前后散热效果对比.....	41
表 4.5	不同放电倍率下关键参数.....	42
表 4.6	1C 放电倍率下不同风速散热效果对比.....	43
表 4.7	2C 放电倍率、风速为 5m/s 条件下关键参数.....	44
表 4.8	2C 放电倍率、风速为 10m/s 条件下关键参数.....	44
表 4.9	2C 放电倍率、风速为 15m/s 条件下关键参数.....	44
表 4.10	2C 放电倍率、风速为 20m/s 条件下关键参数.....	45
表 4.11	放电倍率、风速为 25m/s 条件下关键参数.....	45
表 5.1	1C 放电倍率风速 10m/s 电池组单体关键参数.....	50
表 5.2	风速 10m/s 电池组单体关键参数.....	52
表 5.3	风速 15m/s 电池组单体关键参数.....	52
表 5.4	空调风速 10m/s 电池组单体关键参数.....	53
表 5.5	低温、风速 5m/s 电池组单体关键参数.....	54
表 5.6	低温、风速 8m/s 电池组单体关键参数.....	55
表 5.7	低温、风速 10m/s 电池组单体关键参数.....	56
表 5.8	风速 15m/s 电池组单体关键参数.....	57
表 5.9	风速 8m/s 电池组单体关键参数.....	58
表 5.10	风速 10m/s 电池组单体关键参数.....	59

第一章 绪论

1.1 电动汽车的发展背景

1.1.1 能源危机

世界应用最广泛的能源主要包括石油、天然气、煤炭等，而传统汽车的燃料主要就是汽油和柴油（由石油提炼得到）。石油是一种不可再生资源，根据 2013 年 6 月发布的《BP 世界能源统计》^[1]显示，截至 2012 年底，全球已探明的石油储存量是 16689 亿桶，以 2012 年的开采速度，可以供应 52.9 年。

我国石油人均占有量很少，所以更多地依赖进口。截至 2012 年年底，我国已探明石油储备为 173 亿桶，仅占全球石油总量的 1%。IEA 数据显示，如果我国汽车以现在这种速度增长，到 2030 年，我国燃油消耗量 80%将来自外贸。

汽车的快速发展导致我国能源压力倍增。自从 2009 年开始，我国汽车销量连续位居全球首位。2012 年，我国汽车保有量超过 1.2 亿辆，2005—2013 年我国汽车销量和保有量趋势如图^[2]1.1 和图 1.2 所示。预测到 2020 年，全国汽车保有量会达到 2 亿辆^[3-4]。面对如此严峻的能源形势，我国汽车工业必须加大对新能源汽车的研发力度^[5-6]。

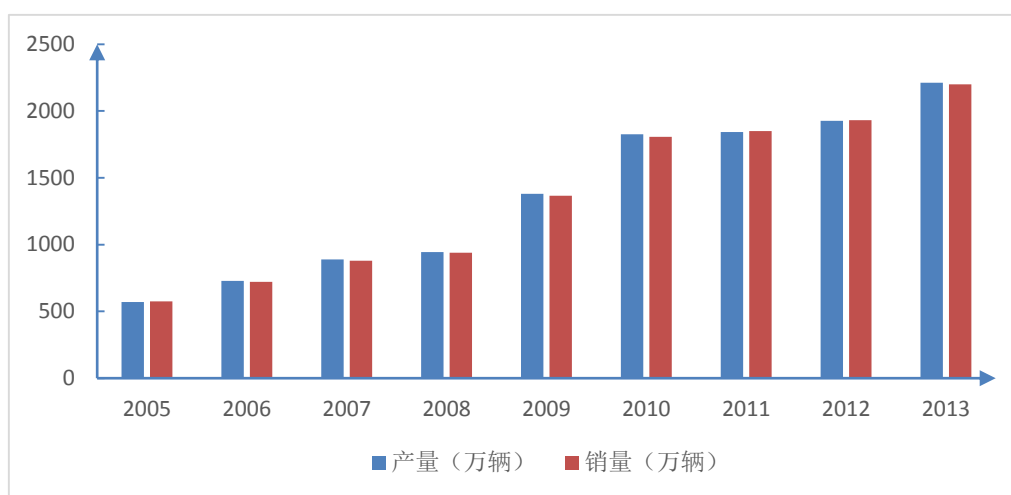


图 1.1 2005—2013 年我国汽车产销趋势

Fig 1.1 China's car production and sales trends in 2005-2013

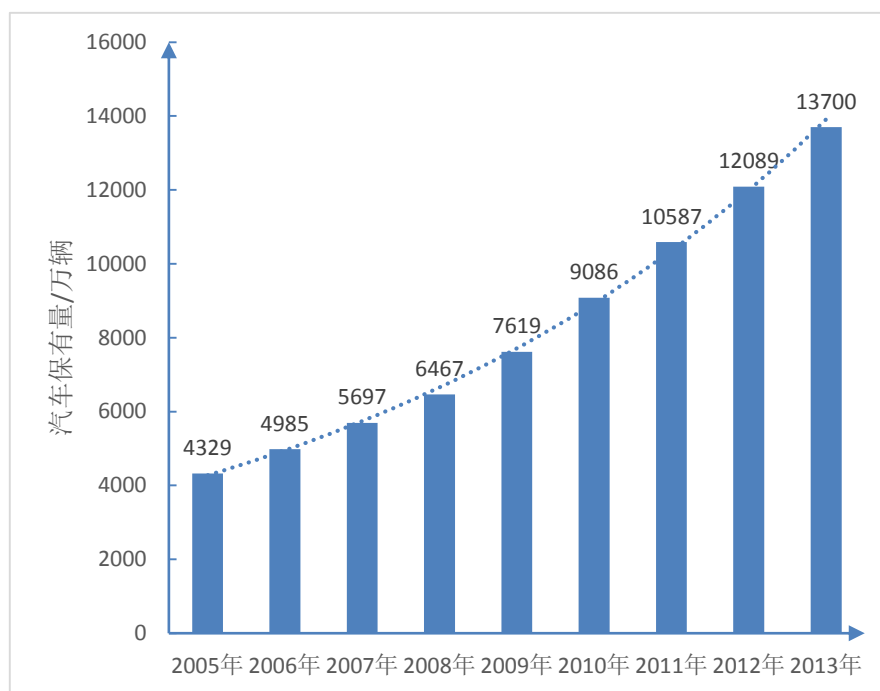


图 1.2 2005-2013 年中国汽车保有量趋势

Fig 1.2 the trend of China's car ownership in 2005-2013

1.1.2 环境问题

燃油车在工作的时候会产生多种污染环境的废气，并且有害于人类的健康。汽车排放的尾气当中主要污染物为一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化物、铅、细微颗粒物（PM）及硫化物等。尾气直接排放出来的属于一次污染物，它们能够通过大气化学反应生成光化学烟雾、硫沉降等二次污染物。

其中最常见的是雾霾天气，汽车尾气是 PM_{2.5} 的重要来源。因此，大力推广汽车节能减排，有效解决机动车尾气排放问题可以对城市雾霾治理起到很关键的作用^[7-8]。

其次是温室效应，汽车用油等大量的消耗会产生大量的二氧化碳，导致全球变暖问题越发严重。长此以往下去，燃油车对地球环境的影响将越发明显^[9-15]。

1.2 纯电动汽车动力电池发展概况

动力电池是纯电动汽车的唯一动力来源，能够为电动汽车提供行驶过程中所需要的所有能量，是电动汽车动力性能、续航里程、电力驱动等整车性能的决定性因素。之所以现在电动汽车还没有大面积推广使用，主要就是因为电动汽车不能像燃油汽车那样拥有那么大的续航里程，而且电池充电时间比较长，这都是限制电动汽车发展的主要原因。随着电动汽车以及手机等移动设备的快速发展，对电池的能量密度、循环寿命、可靠性等方面都提出了越来越高的要求。

从全球新能源汽车的发展历程来看，纯电动汽车动力电池主要有以下几种：

铅酸蓄电池、镍氢电池、锂离子电池、燃料电池和超级电容器，其中铅酸电池和超级电容器现在大多为辅助动力源^[16-20]。铅酸蓄电池已经逐渐淡出市场，技术发展最为成熟的是镍氢电池，目前市场上应用的主流电池是锂离子电池，也是动力电池未来发展的主要对象，而燃料电池的大规模应用则是新能源汽车未来发展的目标。

铅酸电池的发明距今已经有 150 年，它就有很多优点，比如材料丰富、价格低廉、安全性好、生产工艺简单和回收利用率高，曾经广泛应用在电动汽车上面。但是同时也有以下几大缺点：①比能量低，电池重量和体积都太大，占用车辆的空间太多，续航里程也很短；②循环寿命太短，这样就导致使用成本变高；③铅酸蓄电池含有硫酸和重金属铅，严重污染环境。这些缺点导致了铅酸蓄电池的发展和市场化应用受到了比较大的制约^[21-25]。

镍氢电池是电池行业的一次重大突破，镍氢电池是在镍镉电池的基础上发展起来的一种新型绿色电池。镍氢电池有很多优点：①能量密度高；②镍氢电池中没有铅、镉等重金属元素，无污染，所以是一种绿色电池；③可以大电流高功率充放电。这些优点让镍氢电池曾经在混合动力电动汽车上面得到广泛引用，例如日本丰田公司曾经在混合动力电动汽车 Prius 采用 288V、6.5Ah 的镍氢电池。但是镍氢电池也有一些致命的缺点导致了其发展受到很大的限制，比如：和铅酸电池相比，镍氢电池价格比较高，而且自放电损耗大，对环境温度的变化比较敏感，具有记忆效应和充放电发热问题，记忆效应正是限制镍氢电池发展的主要原因。

锂离子电池自从上世纪 90 年代面世以来，就迅速占领了电动车动力电池市场的主体地位，归根结底有以下几个原因：①电池单体工作电压是镍氢电池的 3 倍，能够达到 3.6~4.2V；②充放电效率高达 99%以上；③循环寿命长达 500 次以上；④能量密度高；⑤无记忆效应；⑥材料环保，是一种绿色电池。由于这些优势使锂离子电池立马成为了手机、平板电脑等设备的首选电池。锂离子电池材料的一系列研究也取得了长足的进展，特别是正极材料突飞猛进的发展，主要有钴酸锂、三元材料、锰酸锂和磷酸铁锂等作为正极材料，其中锰酸锂电池和磷酸铁锂电池在电动汽车中得到较为广泛的应用。北京奥运会的一大环保亮点之一的电动大巴使用的就是锰酸锂电池。磷酸铁锂电池具有循环寿命长、充放电平台平稳、低温环境下工作状态良好和安全性能良好等优点，其在大容量动力电池领域方面的应用前景也十分广阔。

燃料电池号称终极电池，效率高，无污染，是未来动力电池发展的方向。燃料电池是动力电池的愿景，现在还没能在电动车领域普遍使用，主要是因为燃料电池技术还存在一些问题：①现在的燃料电池的可靠性、环境适应性、系统成本都具有很大的问题；②不管是高压储氢还是液态储氢，单位体积储氢密度都不够

大,而且储氢的难度也是相当大。如果这些问题得到解决,燃料电池就会成为动力电池领域的一次革命性的变化,所以现在燃料电池已经成为当今世界新能源领域研究的热点。

1.3 电池热管理系统国内外研究现状

1.3.1 电池生热速率研究现状

在国外,很多国家对电动汽车的各种技术研究起步比较早,从上世纪 80 年代开始,对动力电池的研究一直在进行,研究对象从铅酸电池、镍氢电池到现在火热的锂离子电池。1985 年, D.Bernadi^[26]建立了一种经典的电池生热速率模型,同时假设在电池内部由于化学反应所产生的热量均匀分布,并且利用该模型对 LiAl/FeS 电池在两种不同的放电情况下进行研究,对该模型中不同热量参数的比重进行了探究。该经典模型奠定了电池生热的理论基础,后续被广泛应用;2000 年, Noboru Sato 和 Kazuhiko Yagi 采用实验法直接测电池生热速率 q ,开辟了实验法直接研究电池生热速率的先河。文中认为电池生热主要由四部分组成:化学反应产生的反应热,极化电阻产生的极化热,其他各种副反应产生的副反应热和欧姆内阻产生的焦耳热。

在国内,清华大学、上海交通大学等各大知名高校都在国家的支持下对电池生热速率进行研究。基本都是运用国外的 D.Bernadi 经典理论模型法和 Noboru Sato 实验法等两种方式研究电池的生热速率。

1.3.2 电池热模型研究现状

在国外,从上世纪 90 年代开始对锂离子电池的热效应进行研究。最开始是采用集中质量模型对锂离子电池的热效应进行研究。1998 年, Gerardine G.Botte^[27]等人使用集中质量模型研究了锂离子电池单体在不同条件下,其传热系数、电流密度等参数对电池热效应的影响。后来电池热模型逐渐发展到了一维模型、二维模型,到现在进一步发展到了三维模型;2002 年, JR Selman^[28]等人采用一维模型研究了大型锂离子电池温度场分布。同年, Mao-Sung Wu 等人采用二维模型对圆柱形锂离子电池在不同条件下的温度场分布进行了研究;2001 年, Pesaran A^[29]等人对 EV 和 HEV 动力电池采用三维模型进行了研究。文中指出,通过关于铅酸电池、锂离子电池和镍锌电池单体特定的阈值,提出电池热表征(发热,热容量和热图像)的方法。对于每种电池类型,发热率取决于初始充电状态、初始温度和充电/放电曲线。热成像图表明电池单体的温度分布取决于它们的设计。2014 年, Veth C^[30]等人采用三维模型对大型锂离子在大电流放电时的热效应进行研究,着重研究了其放电电流高达 300A 时的热效应。文中表明,充电和放电时电池的热效应明显不同,不同衰老程度的电池单体之间热特性不同。不同老化程度的锂

离子电池之间不同的热特性为突出了非原位非破坏性事后分析的可能性,同时提供了对不同程度衰老的电池单体的定性和定量表征的可能性。

在国内,对锂离子电池的研究起步较国外稍晚,研究重点是工程应用。2012年,刘振军^[31]、林国发等人运用质量守恒、动量守恒和能量守恒等三大定律建立了锂离子电池单体的三维非稳态导热模型,并且利用流体计算分析软件 FLUENT 对电动汽车锂离子电池组在自然风冷的条件下进行空气流场和温度的仿真模拟,同时做相应的试验来检测仿真结果,证明了仿真结果的准确性;2013年,欧阳唐文、张兴娟等人在将锂离子电池单体简化为一个整体、不计电池单体内部的对流换热和辐射换热的基础上建立了锂离子电池单体的三维瞬态仿真模型,运用分段线性插值的方式研究比热容、导热系数随电池单体 SOC 的变化而变化的情况。仿真结果表明,当散热环境相同时, Li/SO₂ 电池热物性参数改变对电池内部最高温度的影响可以忽略不计^[32]。2014年,李小爽利用二维热模型对锂离子电池组分别在自然对流冷却方式和强迫对流冷却方式两种条件下的温度场分布以及辐射换热量占电池总换热量的比例进行研究。研究表明,使用自然对流冷却方式时,辐射换热量占全部热量的 5.6%~17.9%,使用强迫对流冷却方式时,辐射换热量可以忽略不计^[33]。2015年,浙江大学的彭影、黄瑞等人采用三维流固耦合热模型对市场上应用最广泛的磷酸铁锂电池开展自然风强迫风冷、空调风强迫风冷及油冷等不同冷却方式的对比研究。文中表明,高速自然风冷或者低速空调风可以使电池组在正常工作温度范围内,油冷方式可以明显降低电池组的各项温度指标^[34]。

综上所述,现在国内外对锂离子电池生热速率的模型研究已经非常深入了,现在大家基本都采用 D.Bernadi 的经典理论生热模型,假设电池内部均匀生热。电池热模型也是从最初的集中质量模型发展到后来的一维模型、二维模型和三维模型,现在应用最广泛的就是三维模型。因此本课题选择 D.Bernadi 的经典理论生热速率模型和三维模型进行研究。

1.4 课题研究意义及主要研究内容

1.4.1 课题研究意义

现阶段的世界面临着石油短缺的严峻挑战,又迫于环境的压力,急需研究开发新能源来应对能源安全和环境污染。在汽车工业,纯电动汽车比传统的燃油汽车有着得天独厚的优势,能源可再生,清洁无污染。国家关于新能源汽车提出了“三纵、三横”的布局,因此,以纯电动汽车为主要研究对象,力求解决新能源汽车驱动、电池及控制方面的关键核心技术显得极为重要。

电动汽车所有的关键零部件中,动力电池的性能好坏尤其重要。纯电动汽车只能从动力电池获取能量,因此,动力电池能否正常工作对整车的影

其中对动力电池影响最大的因素就是温度，因为锂离子电池对于温度的变化非常敏感。所以，对动力电池组的温度场分布以及电池箱的散热性能进行深入研究具有深远的现实意义。

1.4.2 课题研究主要内容

本课题依托科技部和澳大利亚合作项目《电动汽车轻量化与动力传动系统合作研究》（编号：2014DFA80440），本文主要对电动汽车锂离子电池组生热温度场和热量传递进行研究，旨在探究出一种散热良好的空气散热流道，最终设计出一款质量轻、散热好的电池箱体。具体内容如下：

（1）在了解锂离子电池结构、工作原理及失效机理的基础上研究锂离子电池的充放电特性和使用的安全性。同时对锂离子电池的发热机理和传热特性进行深度剖析。分析锂离子电池在高温环境下的性能特点，找出温度与锂离子电池容量之间的关系。

（2）利用质量平均加权法获取锂离子电池单体热物性参数。基于 CFD 理论运用 ANSYS Fluent 软件仿真模拟锂离子电池单体自然对流时在不同放电倍率下温度场分布，找出电池单体的最高温度和最大温差。

（3）对锂离子电池组温度场进行仿真研究，对电池组冷却方式和散热系统的散热方式进行分析，初步设计出电池箱散热流道。针对电池箱体在不同放电倍率下进行温度场仿真实验，得出电池组温度场分布云图。针对不足之处对电池箱散热流道进行优化，针对优化后的结构进行仿真验证。同时，对电池箱流道入口风速与电池组散热性能的关系进行研究。

（4）对不同工况下电池组温度场均匀性提升进行研究。在良好散热流道的基础上，通过外加铝板来进一步提升电池组温度分布均匀性，使电池组能够在恶劣外界环境下能够正常工作。取三种典型的外界环境温度做仿真实验加以验证温度均匀性优化结果。同时，对三种典型工况下最佳风速进行选择。

第二章 纯电动汽车锂离子电池热特性分析

锂离子电池在工作过程中会伴随着热量的产生,而锂离子电池的性能对温度的变化比较敏感,在做好热管理系统的设计之前,我们有必要先对锂离子电池的结构和生热特性进行研究。

2.1 锂离子电池概述

2.1.1 锂离子电池结构

锂离子电池是一种通过锂离子从电池正负极材料之间嵌入和脱出 Li^+ , 从而进行充电和放电的高能电池。它的内部结构主要由以下几个部分组成: 电池正极, 电池负极, 电解质, 集流体和隔膜等^[35-40], 如图 2.1 所示。下面分别介绍各部分的功能和原理。



图 2.1 锂离子电池内部结构

Fig 2.1 the internal structure of lithium-ion battery

电极是锂离子电池的核心结构,锂离子电池的电能不能就是来源于正负极活性物质参加化学反应产生的能量,能够决定电池容量、电压、能量密度等基本特性。正极的活性物质是锂离子化合物,常见的材料有: $LiCoO_2$ 、 $LiMn_2O_4$ 、 $LiFePO_4$ 和三元材料。负极常见的材料有 TiS_2 、 Li_xC_6 和 V_2O_5 等。

集流体是电池正负极与外界连接的桥梁,与外界电路相连,导通电池内部与外部的电流,导电特性满足欧姆定律,常用的正极集流体材料是铝箔,常用的负极集流体材料是铜箔。

电解质是锂离子电池重要的组成部分,拥有较高的锂离子导电性能,电池内部正负极之间的电荷就是靠电解质来运输的。同时电解质也对电池工作温度、循环寿命长短及安全性能等多方面性能都有重要影响。由于锂离子电池工作时电压一般都会大于 3V,在这种电压下负极材料在水溶液体系中不稳定,因此现在的

锂离子电池电解液都是采用非水有机溶剂和具有更高分解电压的溶剂电解质盐等作为锂离子的载体。

隔膜位于正极与负极之间，主要作用是将电池正极和负极隔开，防止电子在电池内部从正极移动到负极。隔膜只允许离子通过，不具有导电性，但是会具有一定的电阻性。目前市场上主流隔膜是由聚乙烯和聚丙烯制作的微孔膜。市场上流行的锂离子电池形状主要有圆柱形和方形两种，他们的内部结构如图 2.2 所示。例如特斯拉的电动汽车都是采用 18650 型圆柱电池，而江淮的电动汽车 IEV4 采用的是国轩高科产的方形磷酸铁锂电池。

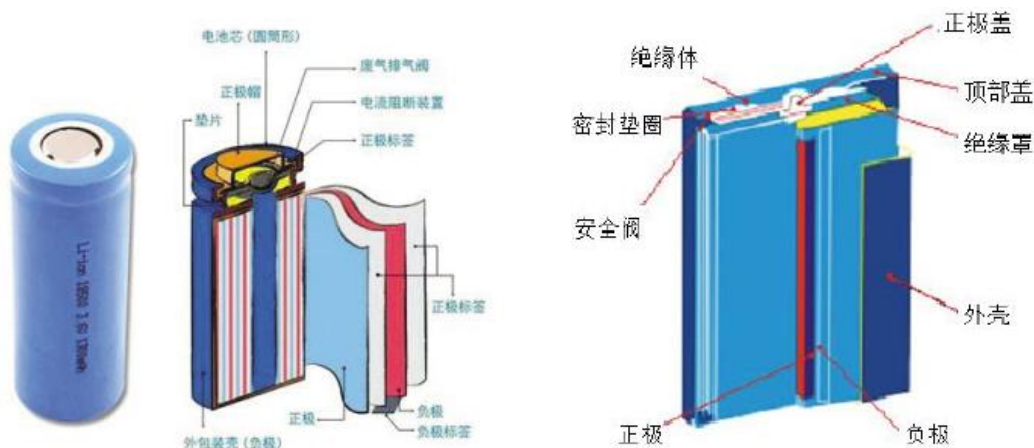


图 2.2 圆柱形和方形电池内部结构

Fig 2.2 the internal structure of cylindrical and square lithium-ion battery

新的锂离子电池在前几次循环充电过程中会在碳负极表面上发生还原和分解反应，形成一层覆盖在电极表面与电子绝缘却是锂离子优良导体的固体电解质钝化层膜，被称为 SEI (Surface Electrolyte Interface) 膜。在电极和电解液之间形成了电阻，在电池放电的时候会产生电压降。SEI 膜不溶于有机溶剂、致密性好，并且允许锂离子自由地在正负极之间流动而不让有机溶剂分子通过，这样可以避免有机溶剂分子共同嵌入对电极材料产生破坏。所以，锂离子电池在经过多次循环使用后，SEI 膜会逐渐变厚，同时相应的电阻也会增加。

相标是指电极体系中电池正负极材料和电解液两相之间接触的过度部分，是双电层结构，也会产生化学反正，具有一定的电压降。

2.1.2 锂离子电池工作原理

锂离子动力电池原理实际上是一种锂离子浓度差电池（如图 2.3 所示），金属元素锂以锂离子的形式不断的嵌入和嵌出正负极之间，与此同时，外部电路会有等量的电子做同样的迁移运动从而形成电流。锂离子电池的工作过程就是实现化学能和电能的互相转换，为了研究锂离子电池的生热机理，必须先弄清楚锂离子

子电池的工作原理。充电时，锂离子脱离正极通过电解质进入负极，这时负极锂离子含量超过正极，相应的电子就从外电路到达碳负极，从而保持负极的电平衡；放电过程恰恰相反。同时外部电路有等量的电子做同样的传递，所以锂离子电池被形象的称为“摇椅电池”^[41-44]。

锂离子电池在充放电过程中正极、负极和总反应方程式^[45]如下（以磷酸铁锂电池为例）：

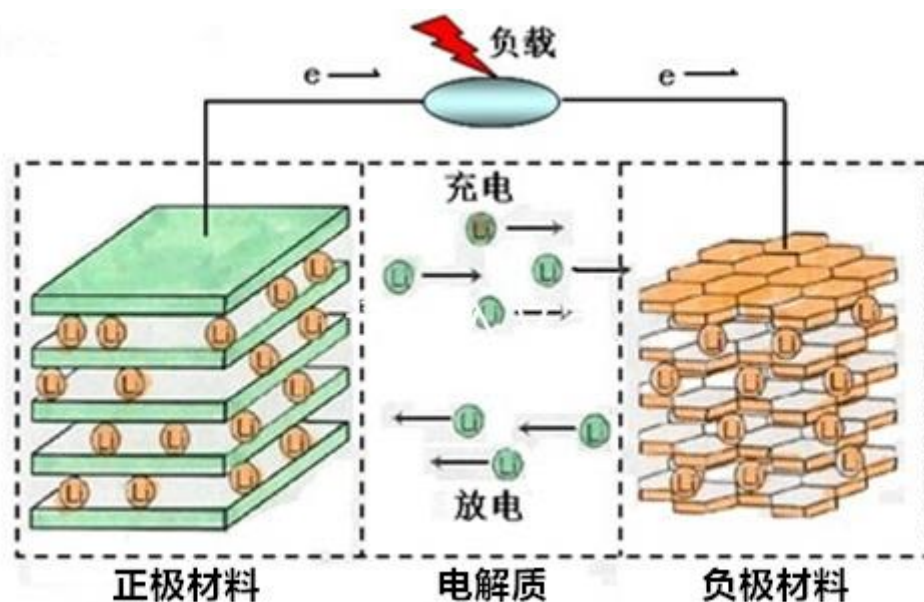
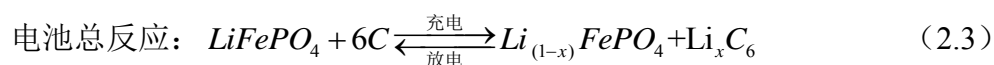
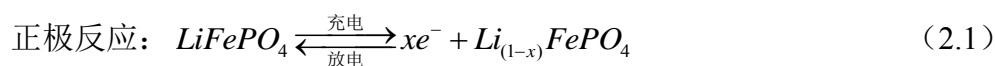


图 2.3 锂离子电池工作原理

Fig 2.3 the working principle of lithium-ion battery

2.2 锂离子电池的失效机理

理想状态的锂离子电池是不会发生锂离子的不可逆消耗，只会分别在正极和负极发生正常的化学反应。然而其在实际工作中时时刻刻都在发生副反应，锂离子也存在不可逆消耗，只是程度轻重不同而已。在实际应用过程中，每次电池系统的循环中，会产生或者消耗锂离子或者电子的副反应，这样就会导致电池容量的改变，并且这种改变是不可逆的，还会因为使用循环次数的增加而积累，进而对电池的性能产生严重的影响。锂离子电池容量减少的因素主要有以下几种：

(1) 正极材料的溶解

对于正极材料的溶解以尖晶石型锰酸锂电池为例，Mn 的溶解时引起锰酸锂电池可逆容量减少的主要原因。Mn 溶解之后会沉积进而造成正极活性物质减少；溶解之后的 Mn 处于游离状态，当 Mn 游离到达负极时就会使负极 SEI 膜处于不稳定状态，被破坏的 SEI 膜需要修复，但是修复过程需要消耗锂离子，进而造成锂离子的减少。造成锰酸锂电池容量减少的重要原因就是 Mn 的溶解，对于这一点学界已经基本达成共识，但是对于 Mn 的溶解的机理有多种不同的解释。

(2) 正极材料的相变化

一般情况下，我们认为锂离子正常脱嵌反应时，宿主结构摩尔体积都会发生变化，引起结构的膨胀与收缩，进一步导致氧八面体偏离球对称性而成为变形的八面体构型^[46]。此现象被称为 Jahn-Teller 效应（或 J-T 扭曲）。如果电池经常出现过度放电，则 J-T 效应就容易出现。不过有多中方法可以成功的减弱 J-T 效应，比如在电池材料的制造过程中加入过量的锂，或者加入一些 Ni 等阳离子亦或是 S 等阴离子均可。

(3) 电解液的分解

常用的锂离子电解液主要包括锂盐（ $LiPF_6$ 、 $LiClO_4$ 、 $LiAsF_6$ 等）组成的电解质和多种有机酸（如 PC、EC、DMC、DEC 等）的混合物组成的溶剂。在充电的时候，阴极在电解液中活性比较强，因此容易发生还原反应。电解液和电解质发生还原反应损耗相应的电解质和溶剂，因此就会减少电池的寿命。

(4) 过充电造成的容量损失

如果将电池过度充电，负极中的锂就会沉积，同时电解液也会发生氧化反应，由此会导致正极缺氧。这些副反应有的会消耗活性物质，有的会产生不溶物质堵塞电极孔隙，有的是由于正极氧的失会致高电压区 J-T 效应的产生，这些种种反应都会导致锂离子的减少，进而使得锂离子电池容量的减少。

(5) 自放电

锂离子电池经常会有自放电现象的发生，自放电现象分为两种：损失容量能够得到补偿的自放电，即容量损失部分是可逆的；损失容量无法得到补偿的自放电，这部分容量损失是不可逆的。只有小部分容量损失是不可逆的。造成不可逆自放电的主要原因有：锂离子的损失（形成不可溶的物质）、电解质氧化物堵塞电极微孔造成内阻增大等。

(6) SEI 界面的形成

SEI 膜的形成需要消耗锂离子，而锂离子的缺失将会打破两极间容量的平衡，在最开始的充放电循环中就会减少电池的容量。而且，SEI 膜的形成将导致部分石墨粒子因为离开电极整体从而丧失活性，同样将会导致电池容量的减少。

(7) 集流体的腐蚀

锂离子电池中正极集流体材料经常用铝，负极集流体经常用铜，而铝和铜都容易发生腐蚀。如果集流体发生腐蚀，电池内阻就会增加，从而造成电池容量的

损失。

2.3 锂离子电池充放电特性

根据近代对于锂离子电池的理论研究^[47-50]可知,锂离子电池充电过程需要考虑多方面因素,例如安全因素、可靠性和充电效率等,常用的充电方法采用两段式:第一阶段采用恒流限压充电,第二阶段采用恒压限流充电。锂离子电池充电的最高限压值是由电池正极材料决定的,正极材料不同则限压值不同。锂离子电池充放电电压曲线如图^[2]2.4所示。该实验采用的0.3C的充放电倍率。对于正极材料不同的锂离子电池,区别如下:正极材料及其制造工艺对第一阶段恒流值有一定的影响;不同的锂离子电池的恒流充电时间也存在很大的区别,电池在恒流充电时所冲入的电量占电池总体容量的比例也大不相同。

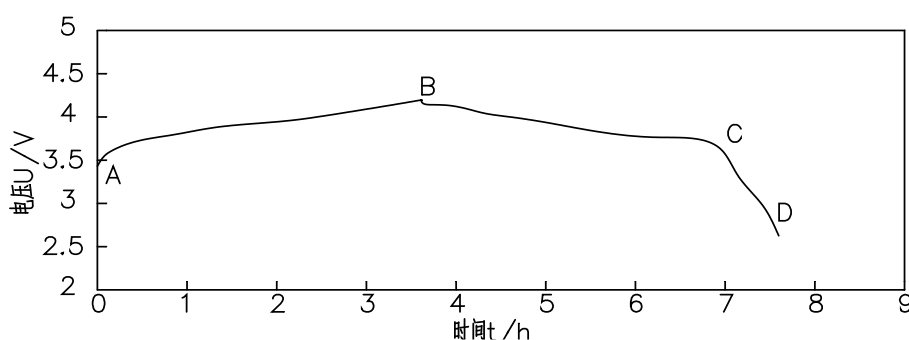


图 2.4 锂离子电池充放电电压曲线

Fig 2.4 charging and discharging voltage of lithium-ion battery

锂离子电池在放电的时候,中前期电压稳定,只会有缓慢地下降,但在后期电压迅速下降,如图^[2]2-5中的CD段所示。因此,对于此阶段的放电必须加以有效的控制,防止电池过度放电,从而可以避免对电池造成不可逆的损伤。下面从两个不同的方面来介绍充电特性所受到的影响。

① 充电温度对充电特性的影响

锂离子电池对于温度的变化比较敏感,下面以额定容量为200A·h锂离子电池为例来探究不同温度下锂离子电池的充电特性。采用恒流限压方式给电池充电,充电电流下限为1A,即充电截至电流为1A,记录充电截至时的充电参数,如下表^[2,52]2.1所示。

表 2.1 不同温度电池充电参数

Tab 2.1 charging parameters of lithium-ion battery in different temperature

环境温度 /°C	充电电流降至 5A			充电电流降至 1A		
	充入容量/ (A·h)	充入能量/ (W·h)	充电时间 /h	充入容量/ (A·h)	充入能量/ (W·h)	充电时间 /h
-25	118.09	516.81	9.0	147.08	640.79	21.0
-5	127.29	566.63	7.1	160.75	717.27	19.0
10	164.59	707.65	6.4	203.12	867.32	15.2
25	168.94	726.91	5.5	205.98	878.71	12.3

由表 2.2 可知,随着环境温度的降低,电池能够充进去的容量明显降低,而且充电时间却明显增加。低温(-25°C)与室温(25°C)相比,在充电结束电流相同的情况下,可充入的容量和能量大约降低 25%~30%。如果电流降至 5A 停止充电,则电池仅仅冲入额定容量的 75%~85%。但是充电电流一旦降低,充电时间就会大幅增加。在冬季低温的时候,电池能够充入的容量低,因此,为了防止电池过度放电,就必须降低电池单次可用容量。

②温度对放电特性的影响

下面以 200A·h 磷酸铁锂电池为例,在环境温度为 20°C 的外界条件下将电池充满电,分别在-20°C、0°C、20°C 条件下进行不同放电电流的放电实验,100(0.5C) 放电过程曲线如图^[2,53]2.5 所示。

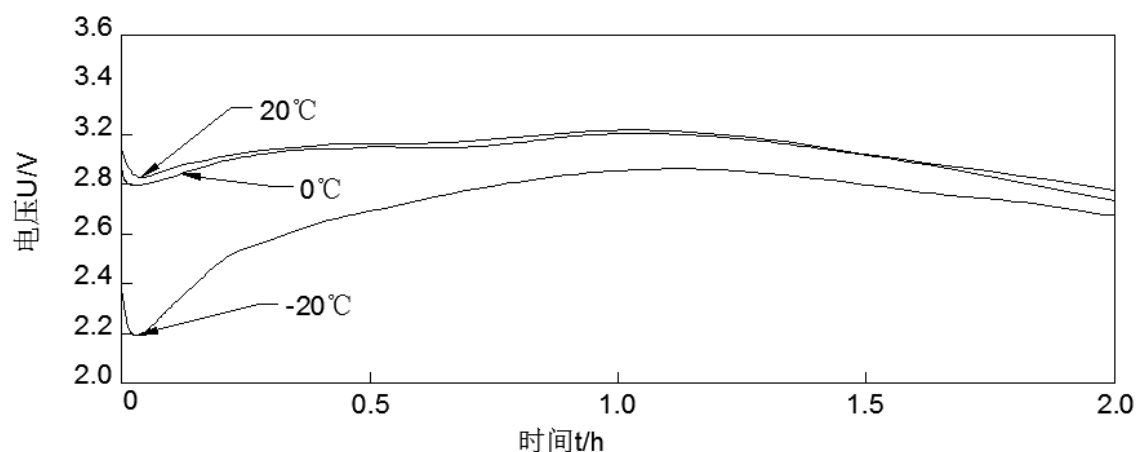


图 2.5 锂离子电池 100A (0.5C) 放电过程曲线

Fig 2.5 discharging process curve of lithium-ion battery in 100A (0.5C)

当环境温度比较低时,电池的放电电压比较低,特别是在放电初期同样大小

的放电电流下，电池电压将会出现一段急剧地下降过程，如图 2.5 所示，所以放电能量就会偏低；等到放电中期的时候，由于电池内阻消耗能量会产生焦耳热导致电池自身温度升高，锂离子电池活性物质的化学性质增强，电池电压就会有所增加，故电池可以放出来的能量会随之增加；但是到了放电后期，电池电压降低，单位时间内放出的能量又会接着降低。

2.4 锂离子电池的发热机理分析

如今锂离子电池最主要的安全隐患就是在高温环境条件下工作时，电池包热量不能及时散掉，导致电池包可能会发生起火或者爆炸等现象。产生这种问题的主要原因是电池内部的 SEI 膜在 80℃时会发生分解反应，从而使电极能够与电解液发生化学反应，化学反应会产生大量的热量，而这些热量不能在短时间内快速散失掉，从而让电池迅速积累了大量的热量，接着电池组温度在短时间内快速升高，有产生爆炸的可能。因此对锂离子电池热特性的研究很有现实意义和工程意义。

2.4.1 发热机理分析

目前大容量锂离子电池在电动汽车领域已经进入了大范围实用化和商用化阶段，但是从近几年多起电动汽车因为电池组温度过高而发生的一系列交通事故可以看出目前还不能完全做到保证锂离子电池在温度较高的环境中正常工作。据研究表明^[15]：锂离子电池生热机理主要是指电池内部各种电化学反应所产生的热现象和锂离子在电池内部结构中传递时所受到的物理阻力而产生的欧姆内阻热；除此以外，电极在发生电化学反应时会产生电化学极化内阻，锂离子在电池内部结构之间运动时会产生浓度差极化内阻，这两种内阻被统称为极化内阻。近代锂离子电池理论研究发现，锂离子动力电池在工作时所产生的总热量一共有以下几个部分组成：反应热 Q_1 ，极化内阻热 Q_2 ，欧姆内阻产生的焦耳热 Q_3 ，副反应热 Q_4 。锂离子电池实际生热总量为 $Q_{\text{总}}$ ，则有下式：

$$Q_{\text{总}} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (2.4)$$

目前实际工程应用中准确获得电池生热量比较困难，常用的方式就是实验分析法和理论计算法^[54-56]。

(1) 实验分析法

① 反应热 Q_1

通过上面对锂离子电池工作原理进行分析之后就可以知道，锂离子电池在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，同时在发生电化学反应的过程中伴随着大量的热量的生成，并且所产生的的热量与反应过程中的

熵变有关。 Q_1 在放电时为正值（放出热量），充电时为负值（吸收热量），计算公式为：

$$Q_1 = Q / (3600 \cdot F \cdot I) = 1.04 \times 10^{-5} QI (J/s) \quad (2.5)$$

式中， Q 表示化学反应过程中正负极产生热量的代数和， kJ/mol ； F 为法拉第常数， 96484.5 C/mol ； I 表示放电电流， A 。

②极化内阻热 Q_2

锂离子电池在充放电过程中，都存在一定大小的极化内阻，极化内阻会在充放电过程中产生极化内阻热 Q_2 ，是标量，恒为正值，计算公式为：

$$Q_2 = I^2 R_p \quad (2.6)$$

式中 I 为充放电电流，单位是 A ； R_p 为极化内阻，单位是 Ω 。

③焦耳热 Q_3

锂离子电池内部各组织结构包含不同的材料，每种材料都有电阻，在电池充放电时这些电阻上面都会产生热量，是不可逆反应热，其计算公式为：

$$Q_3 = I^2 R_\Omega \quad (2.7)$$

式中 I 为充放电电流，单位是 A ； R_Ω 为极化内阻，单位是 Ω 。

④副反应热 Q_4

当电池处在环境温度比较恶劣，比如环境温度超过 80°C ，SEI膜就会发生分解反应从而产生一定的热量使电池温升加剧；进一步引发电极与电解液的分解反应，产生大量的热量，导致电池起火甚至爆炸；在电池存在过充电和过放电时，电池正负极材料也会与电极发生反应，产生热量和气体，会在一定的程度上增加电池温度的升高；这些热量全部归类为副反应热 Q_4 。一般电池的正常工作温度为 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$ ，在电池正常使用的时候，副反应热 Q_4 比较小，可以忽略不计，因此，锂离子电池生热量计算主要考虑前三种热量。

如果锂离子电池在工作时内部温度高达 $70 \sim 80^\circ\text{C}$ ，则电池总生热量以反应热 Q_1 为主；如果锂离子电池在低于上述温度工作时，则电池总生热量以焦耳热 Q_3 和极化内阻热 Q_2 为主。正常情况下，电动汽车有热管理系统，电动汽车电池箱内电池温度不会超过 70°C 。因此，锂离子电池在充放电过程中生热量主要考虑焦耳热 Q_3 和极化内阻热 Q_2 。

综上所述，锂离子电池在充放电过程中总产热量可以表示为：

$$Q_{\text{总}} = Q_2 + Q_3 = I^2 (R_p + R_\Omega) = I^2 R \quad (2.8)$$

从上式 (2.8) 可以看出，想要估算出锂离子电池充放电过程中产热量，可以通过实验的方法获得单体电池的电压损失，即可得到电池总内阻 R ，也可以认为是极化内阻和欧姆内阻的总和。

(2) 理论计算法

现在普遍使用的理论计算法是由 1985 年 D.Bernadi 基于在假设电池内部热源稳定且产生的热量均匀分布的基础上,建立了一种典型的电池生热速率模型。生热速率 q 的估算公式如下:

$$q = \frac{I}{V_b} \left[(U_0 - U) - T \frac{\partial U_0}{\partial T} \right] \quad (\text{W/m}^3) \quad (2.9)$$

式中, U_0 和 U 分别表示电池开路电压和工作电压,单位 V; T 是温度,单位 $^{\circ}\text{C}$; $\partial U_0 / \partial T$ 是温度影响系数,是与化学反应有关的量; V_b 为电池体积,单位是 m^3 ; 其中 $I(U_0 - U)$ 、 $IT \partial U_0 / \partial T$ 分别表示焦耳热部分和可逆反应热(即化学反应热)部分。

根据上面实验分析法里面的分析和实际应用情况, $I(U_0 - U)$ 可以使用电流与内阻的乘机替换,式(2.9)中忽略反应热之后可以简化为下式:

$$q = \frac{I^2}{V_b} (R_p + R_{\Omega}) = \frac{I^2}{V_b} R \quad (2.10)$$

由于通过实验法准确获取锂离子电池生热速率比较困难,所以本课题采用现在比较主流的理论计算法式(2.10)来估算锂离子电池生热量。

2.4.2 传热特性分析

从高等传热学^[57]中可知,只要有温差的存在就一会有热量的传递,而且热量只会从温度高的地方传到温度低的地方,即从热运动强的地方传递到热运动弱的地方。以锂离子电池单体为研究对象,电池内部热量传递的方式主要有电池内部的热传导、电池对外的辐射换热以及电池和空气之间的对流换热等三种方式,同时,锂离子电池生热是一个能量转换的过程,必须遵循能量守恒定律:

$$Q_t = Q_a + Q_b \quad (2.11)$$

式中, Q_t 是电池内部产生的热量总和; Q_a 是电池自身吸热量,表现为电池自身的温度变化量 ΔT ; Q_b 是电池和环境交换的热量。

电池自身吸收的热量可以由下式计算:

$$\left(\sum_{i=1}^n m_i \Delta C_{pi} \right) \Delta T = Q_a = Q_t - Q_b \quad (2.12)$$

如果在绝热条件下,则上式可以简化为:

$$\left(\sum_{i=1}^n m_i \Delta C_{pi} \right) \Delta T = Q_a = Q_t \quad (2.13)$$

式中, m_i 是电池微元体质量; ΔC_{pi} 是电池微元体比热。

电池内部产生的热量和环境之间的热交换实际上式三种换热方式同时进行的, 只是在不同的条件下三种换热方式所占的主次地位不同, 这样就可以在估算电池温升的时候可以忽略某一些次要的换热方式。

(1) 热传导是由于物体内部微观粒子的热运动而产生的热量传递现象, 如果一个物体不同部分之间温度不同, 或者两个温度不同的物体之间由于微观粒子热运动强弱不同都会有热量传递, 这种微观粒子热运动传递热量的现象就称为热传导。锂离子电池内部产生的热量由内核传递到外壳的过程主要就是靠热传导发生的。导热热流密度矢量与温度梯度之间遵循傅里叶定律:

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}(t) = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} \vec{n} \quad (2.14)$$

式中, \vec{q} 为热流密度矢量, 方向是指向温度降低的方向; λ 是热导率, 或称导热系数; $\partial t / \partial n$ 为等温面法向温度变化率 (偏导数); \vec{n} 为等温面法向单位矢量, 方向是指向温度增加的方向。

(2) 辐射换热是指以热辐射进行的热量交换。实际存在的物体内部都具有内能, 都会以电磁波的形式像外界辐射能量。对于任何物体, 只要温度高于 $0k$, 就会向周围散发能量, 即使在真空中也是如此。辐射主要发生在物体表面, 其中黑体的辐射力最强, 可以根据斯忒藩-玻尔兹曼公式来计算:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.15)$$

式中, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / (m^2 \cdot K^4)$, 称为斯忒藩-玻尔兹曼常数或者黑体辐射常数; T 为黑体的热力学温度, 单位是 K 。

实际物体辐射力没有黑体强, 因此需要在相同温度下乘以发射率 ε , 所以实际物体的辐射力就可以用下式计算:

$$E_b = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.16)$$

(3) 对流换热是指流体与固体之间热对流和导热两种传热方式共同作用的结果。热对流是指流体的宏观运动使不同温度的流体发生相对位移导致的热量传递现象, 很明显热对流只能在流体之中进行。日常生活中流体遇到固体之后发生热交换, 当流体经过固体表面, 由于粘滞作用, 紧贴在固体表面的流体是静止不动的, 这时只存在导热现象; 当流体离开固体表面时, 流体就会恢复宏观运动, 这时才会有热对流现象产生。所以流体与固体之间的热量交换包含导热和热对流两种方式共同作用的结果, 即对流换热。对流换热示意图如图 2.6 所示。

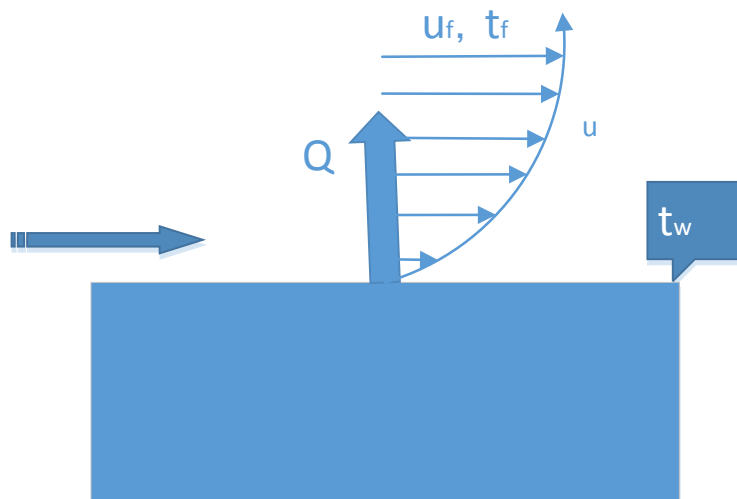


图 2.6 对流换热示意图

Fig 2.6 sketch map of convection heat transfer

图 2.6 示意是温度为 t_f 的流体流过温度为 t_w 的固体壁面。对流换热满足牛顿 1701 年提出的牛顿冷却公式，形式如下：

$$Q = Ah(t_w - t_f) \quad (2.17)$$

式中， h 为对流换热系数； A 为固体与流体接触的表面面积。根据相关文献研究结果，自然对流条件下的 h 经验值是 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，一般强迫对流条件下的 h 典型值是 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

2.5 锂离子电池在高温下的性能特点

从锂离子电池的工作原理可知，电池内部都是发生可逆的电化学反应，而温度既可以影响化学反应速率，又可以影响化学平衡，所以温度适当的增加可以促进电化学反应。但是随着温度增加，电化学反应速率加快，电解液的蒸发也会同样加快，由此将会导致电极的极化现象更加严重，随之更容易出现电池的过充电现象。同时，高温也会增加电池内部结构的老化速率，比如电解液、电极和隔板。当温度超过一定值时，液态锂离子电池正极材料化学活性增强，导致其发生分解反应，分解产物之一氧气将与电解液发生一些副反应，这就是为什么有时候我们看到一些废弃电池外表面上有鼓包。在高温环境下的锂离子活性强于常温状况下的锂离子，因此在高温环境中锂离子电池容量上升率会明显快于常温时锂离子电池容量上升率。但是随着时间的积累，不同锂离子电池单体之间的物性不一致性将越来越明显，温度分布也会越来越不均匀，从而导致电池组放电性能不一致性更加严重，这样就会使得整个电池组的放电容量迅速降低，充放电效率也会随之下降。在低温条件下，锂离子活性迅速降低，导致锂离子电池容量快速锐减。而且随着温度的降低，锂离子电池欧姆内阻和极化内阻均快速增加。下图 2.7 是根

据相关文献研究出的拟合曲线。

根据相关文献研究获悉，磷酸铁锂电池的容量对温度异常的敏感。当环境温度比较低时，电池容量衰减得很快；当温度略高于常温时，随着环境温度的持续升高，电池充放电容量会缓慢的增长。当环境下降到 -40°C 时，电池实际放电容量仅有标称容量的 1/3，在环境温度为 0°C 时放电容量为标称容量的 80%，在 60°C 时放电容量则为标称容量的 110%。不过上文也已经分析过锂离子电池长时间在高温下工作会有哪些弊端，所以在确定锂离子电池实际工作温度范围时也不能是只考虑放电容量这单一因素。为了让磷酸铁锂电池使用的安全性和使用寿命得到保证，应该将其实际工作温度控制在 60°C 以下，而且整个电池组的温差不宜超过 10°C 。通过充放电实验得到磷酸铁锂电池的放电容量与环境温度之间的一个拟合公式^[58]如下：

$$\begin{cases} C = -5.06974 \times \exp(-\theta / 55.90333) + 14.03729 \\ R^2 = 0.99784 \end{cases} \quad (3.1)$$

式中， C 是电池放电容量， θ 是环境温度， R^2 是拟合相关系数。

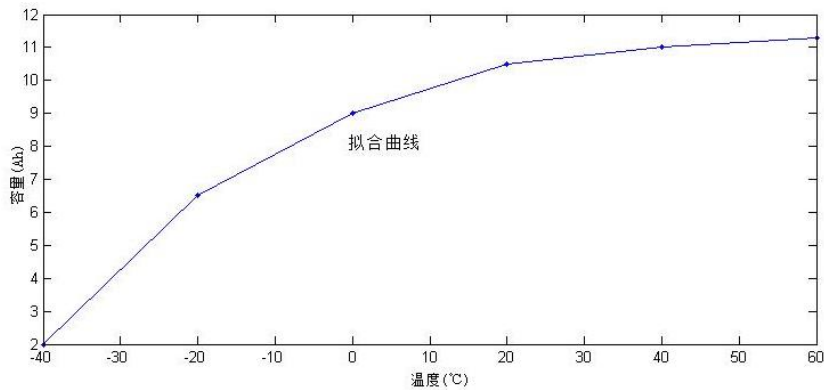


图 2.7 电池容量与温度变化关系曲线

Fig 2.7 relation curves between battery capacity and temperature changes

2.6 本章小结

本章对锂离子电池的结构进行了详细的分析，并且以磷酸铁锂电池为例对锂离子电池化学反应原理进行了深入的研究。只要有损失锂离子的行为都会导致电池容量的减少。对锂离子电池失效机理进行了深入的研究，并且找出了导致锂离子减少的主要因素。研究了锂离子电池的充放电特性和正常工作的安全性问题。对锂离子电池的发热机理和传热特性进一步分析，得出锂离子电池产热由焦耳热、极化内阻热、反应热和副反应热等四部分组成，为后面电池管理系统设计出更好的散热结构做理论储备。针对锂离子在高温下的性能特点进行深入的研究，得出磷酸铁锂电池的放电容量与环境温度之间的一个拟合公式。

第三章 锂离子电池单体散热温度场仿真分析

动力电池成本占一辆纯电动汽车总成本的一半,这足以证明动力电池组的性能对纯电动汽车的运行能力有多大的影响。随着电动汽车动力电池的发展,动力电池组比功率和比能量越来越大,体积越来越小,同时相应的产热量也就越来越多,而温度对锂离子电池的使用寿命和性能有严重的影响。因此,在设计合理的热管理系统之前需要先分析电池单体的温度分布情况和成组之后温度分布情况,针对成组之后温度的不均匀性有针对性的设计出良好的散热结构。

3.1 锂离子电池单体温度场仿真分析

人们分析流体从最初 17 世纪的实验流体力学,慢慢发展到 18 世纪和 19 世纪的理论流体力学。在高速计算机出现以后,就产生现在的计算流体力学(CFD)。CFD、实验流体力学和理论流体力学是研究流体的三种方法,同等重要,谁也取代不了谁。但是现在的 CFD 应用更为广泛,主要是因为只要理论模型建立正确,在不出现其他错误的时候可以在制造之前可以预测产品的性能,对于设计具有很强的指导意义,而且不用做实验,既可以节约物质成本也可以节约时间成本。因此,CFD 现在成为了研究流体和换热的最常用的方法。

3.1.1 计算流体力学理论基础

计算流体力学^[59](CFD)是建立在计算机技术基础之上的,以计算机作为工具,仿真模拟流体流动、对流换热以及其他能量传递的分析方法。CFD 不是这一种新的理论,只是运用计算机来解决一些很难用理论算法求出解析解的疑难问题,是运用数值模拟方法求解相关非线性联立理论方程的近似解,运用与求解流体流动、传热、传质等过程。利用这种数值模拟既可以得到一些复杂问题的近似解,也可以和 CAD 软件相结合进行结构优化设计,这样可以很大程度的节省实验设备和人力资源带来的巨大成本。不过这个方法的缺点就是不能得到确切的解析解,只能得到近似的数值解,因此存在一定的误差。

求解锂离子电池温度场实际上就是求解几个偏微分方程组,由于得出确切解析解比较困难,所以就利用 CFD 的方法来解决。CFD 温度场计算本质就是求出离散方程组的数值解,求解方法如下图 3.1 所示

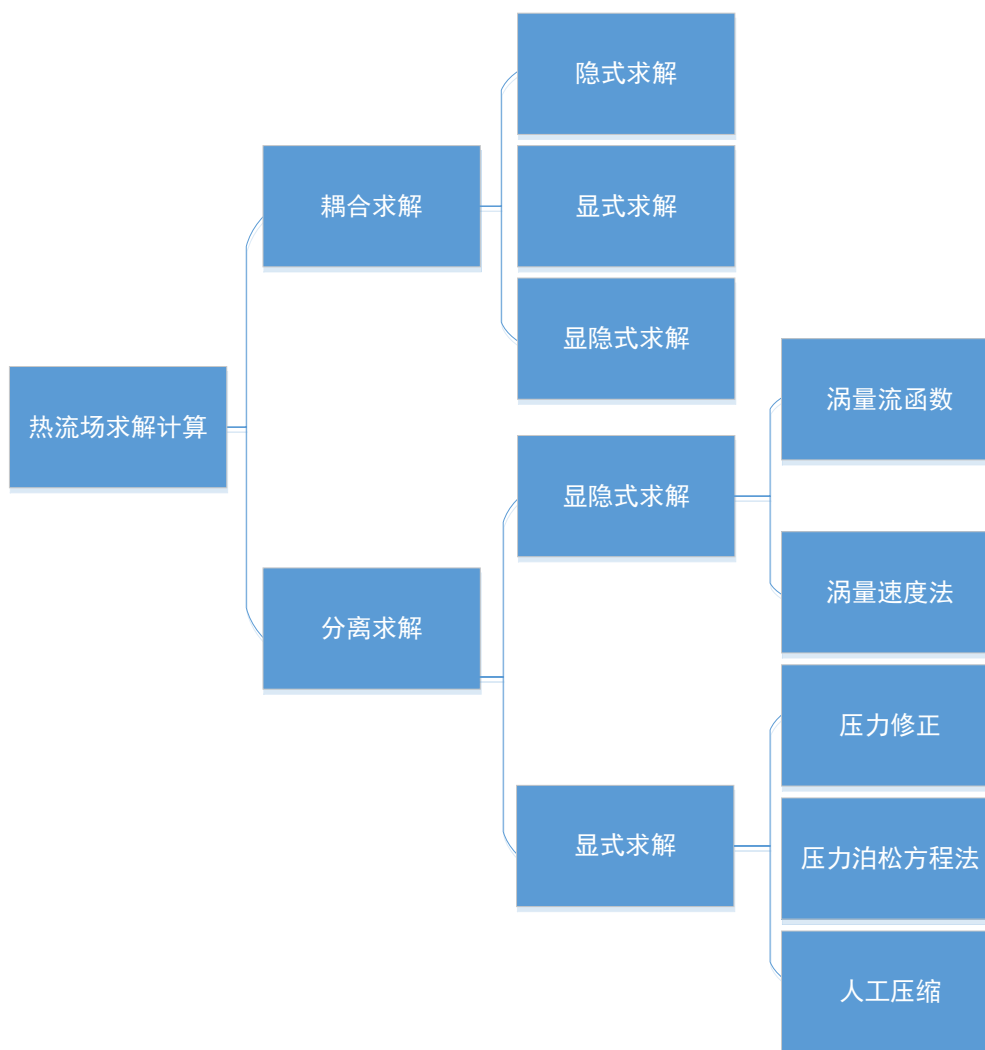


Fig 3.1 solution schematic of CFD

CFD 基本控制方程如下^[60-62]:

所有流动传热过程都满足基本物理定律，具体包括质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。如果流体处于湍流状态，则还需要遵守湍流方程。这些方程的数学描述统称为控制方程。

① 质量守恒方程

流体在运动过程中都必须遵循连续性方程，与能量方程、动量方程或者运动方程相结合即可求解各种流动相关的问题。连续性方程即质量守恒方程，具体的数学表述为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

式中： ρ 为流体密度； u 、 v 和 w 是流体在 X、Y、Z 方向上的速度分量。

由于电动汽车在行驶过程中动力电池组内空气的流速远小于声速,为不可压缩流体,其密度值可以近似认为常量,因此上式可以简化为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

②N-S 方程

动量守恒定律同样是任何流动系统都必须遵循的定律,其含义为:微元体中流体的合外力等于其动量对时间的变化率。动量守恒定律简称动量方程,也称为N-S 方程,具体数学表述如下:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho U u) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho U v) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho U w) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (3.6)$$

式中: $\text{div}(U)$ 为散度; grad 表示梯度; U 表示流体速度; μ 表示湍流的等效粘度; p 表示压力; S_u 、 S_v 和 S_w 分别表示 X、Y、Z 三个方向的广义源项。该定律实际上是牛顿的第二定律,引入牛顿切应力公式及 Stokes 公式即可得到以上各个分量公式。

③能量守恒方程

能量守恒定律是在有热交换的流动系统中必须遵循的基本定律,其含义为:微元体中能量的增加率等于进入微元体的净热流量加上微元体所受合外力做功之和。该定律实际上就是热力学第一定律。具体表达式如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \end{aligned} \quad (3.7)$$

式中: c_p 为比热容, k 是流体传热系数, T 是温度, S_T 流体的内热源及由粘性作用流体机械能转换为热能的部分。

上式 (3.3)、(3.4)、(3.5)、(3.6) 及 (3.7) 一共包含 u 、 v 、 w 、 p 、 T 及 ρ 等 6 个未知量,所以还需要一个方程才能使方程组封闭得到唯一解。状态方程如下:

$$p = \rho RT ; e = c_v T \quad (3.8)$$

式中： R 为气体常数， c_v 为气体比热容。

④ 湍流基本方程

流体流动基本形式主要包括层流和湍流，湍流是自然界中常见的流动现象。流体做湍流流动时所产生的对流换热现象也是一种常见的换热方式。目前工程应用中主要使用标准的 $k-\varepsilon$ 模型，本课题也是采用此模型进行数值模拟。标准的 $k-\varepsilon$ 模型包括两个方程：湍流脉动动能方程（也称为 k 方程），耗散率 ε 的控制方程，具体表达式如下。

湍流脉动方程：

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (3.9)$$

耗散率 ε 的控制方程：

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right] + \frac{c_1 \varepsilon}{k} \eta_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.10)$$

当使用 $k-\varepsilon$ 模型时，湍流粘性系数 η_t 可以使用下式计算得出：

$$\eta_t = c_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (3.11)$$

再使用 $k-\varepsilon$ 模型来计算湍流对流换热问题时会涉及到质量方程、动量方程、能量方程、 k 方程、 ε 方程以及 η_t 方程，一共引入了三个经验系数（ c_1 ， c_2 ， c_μ ）和三个常数（ σ_k ， σ_ε ， σ_T ）。从最近几年的文献^[63-65]中发现折 6 个经验常数取值基本一致，如下表 3.1 所示。

表 3.1 模型中的系数

Tab 3.1 coefficient in $k-\varepsilon$ model

c_μ	c_1	c_2	σ_k	σ_ε	σ_T
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	0.9~1.0

3.1.2 锂离子电池单体热效应模型建立

锂离子电池热效应模型是用来分析锂离子电池产热温度分布和变化，并且可以用来指导电池组热管理系统的设计，是研究改善锂离子电池安全性的重要工具。根据国内外对于锂离子电池热模型的研究进展，现在使用的热模型^[48]有电化学-热耦合模型、电-热耦合模型和热滥用模型。这三种不同的模型都是基

于不同的原理来研究电池生热情况。电化学-热耦合模型应用最为广泛，其原理是基于电化学反应生热来研究电池产热，该模型主要用来研究小型电池；电-热耦合模型主要用于研究电池的一致性问题的，其原理是基于电池中电流密度来研究电池产热；顾名思义，电池热滥用模型即是研究电池在热滥用的时候电池内部产热的变化，可以用来预测电池的损坏。本课题就是采用电化学-热耦合模型。

虽然电池内部的实际情况是包含多种固体和液体等多种不同的材料，热量传递的实际情况比较复杂，包含辐射、热传导和对流换热等三种方式。但是对电池单体内部热量传递方式的研究发现，电池内部的热辐射和对流换热所传递的热量比较少，所以为了简化电池热模型，本课题只考虑电池内部的导热，把锂离子电池整个简化为一个等效的固体，对于该等效固体需要做以下假设：

①锂离子电池内部各种材料的各种属性一致，均匀分布，除了导热系数各向异性；

②电池内部辐射散热和对流换热量比较小，忽略不计；

③电池比热容和导热系数为常数，不会随着电池放电深度和电池温度的变化而变化；

④电池在充放电时，其内部电流密度均匀分布，同时，各部分均匀产热。

根据以上假设利用高等传热学的相关知识，可以得到方形电池在直角坐标系中热模型如下：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q \quad (3.12)$$

式中： ρ 为锂离子电池的密度； C_p 为电池的比热容； T 为电池的温度； Q 为电池产生的热量； λ_x 、 λ_y 和 λ_z 分别为电池在X、Y、Z三个方向上的导热系数。

3.1.3 锂离子电池热物性参数的获取

在对本文所研究的磷酸铁锂电池做 CFD 仿真分析之前，为了保证仿真结果的准确性，需要较为准确的获取锂离子电池的密度 ρ 、比热容 C_p 、导热系数 λ 和电池的生热速率 Q 。基于上文等效所做的4条假设条件，可以将动力电池各部分热物性参数按照质量加权平均法^[47]来获取。

(1) 电池密度 ρ

为了获取电池单体的密度，可以先对其组份进行测量实验，获取各组份的密度值，然后根据质量加权平均法来计算，表达式如下：

$$\rho = \frac{m}{v} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n v_i} \quad (3.13)$$

式中： $\sum_{i=1}^n m_i$ 是锂离子电池单体总质量； $\sum_{i=1}^n v_i$ 是锂离子电池单体总体积。

(2) 电池比热容 C_p

电池在实际工作中，其比热容受到 SOC 和充放电倍率的影响不大，只与电池内部各组份材料的属性有关，所以在做 CFD 模拟时将其视为常数，既可以由实验直接获取，也可以通过对各组份进行分析按照质量加权平均法来计算，计算公式如下：

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n C_i m_i}{m} \quad (3.14)$$

式中： m 是电池单体总质量； m_i 、 C_i 为电池内部各组份的质量和比热容。

(3) 电池导热系数 λ

根据相关研究可知，电池内部包含多层不同物质，把垂直于电池正负极板设为 x 轴，平行于极片的方向设置为 y 轴和 z 轴。根据台湾清华大学 Chen 等人提出的类似于计算电路等效电阻的办法，运用传热学中串并联热阻原理来计算电池在三个不同方向上的导热系数，计算公式如下：

$$k_x = \frac{l}{\sum_i \frac{dx_i}{k_i}} = \frac{l}{\frac{dx_p}{k_p} + \frac{dx_n}{k_n} + \frac{dx_s}{k_s}} \quad (3.15)$$

$$k_y = \sum_i \frac{k_i dy_i}{b} = \frac{k_p dy_p + k_n dy_n + k_s dy_s}{b} \quad (3.16)$$

$$k_z = \sum_i \frac{k_i dz_i}{h} = \frac{k_p dz_p + k_n dz_n + k_s dz_s}{h} \quad (3.17)$$

式中： k_p 、 k_n 和 k_s 是锂离子电池正极材料、负极材料和隔膜的平均导热系数；

dx_p 、 dx_n 和 dx_s 分别为 x 轴方向正极材料、负极材料和隔膜的总厚度； dy_i 和 dz_i 类似。

锂离子电池内部各组份材料的热物性参数可以通过查表法和实验法两种方法来获取，最终结果如下表 3.2 所示。

表 3.2 磷酸铁锂电池内部各组份导热系数和密度

Tab 3.2 thermal conductivity coefficient and density of each component inside lithium-ion phosphate batteries

材料名称	正极材料	负极材料	隔膜	铝箔	铜箔	正极耳 (铝)	负极耳 (铜)
导热系数 (W/m·K)	3.91	3.28	0.354	238.0	398.0	236.0	398.0
密度 (kg/m ³)	2840.4	1671.54	658.67	2702.00	8933.00	2702.5	8935.0

(4) 电池生热速率 q

经过第二章对锂离子电池发热机理的分析可知, 电池内阻在电动汽车正常运行过程中基本可以认为是保持不变的, 只有当温度极低的时候内阻才会突然剧增, 所以只要保证不出现过放电, 电池内阻随 SOC 的变化不是很明显。为了简化计算, 本课题采用美国加州大学 D.Bernadi 提出的经典生热速率模型, 即第二章公式 (2.9), 基于本文研究的实际情况, 将式 (2.9) 简化为式 (2.10)。

根据以上分析, 利用质量加权平均法计算得出锂离子电池等效热物性参数, 如下表 3.3 所示。

表 3.3 锂离子电池等效热物性参数

Tab 3.3 equivalent thermal physical parameters of lithium-ion batteries

参数	数值
折算平均导热系数 X 方向 (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	1.05
折算平均导热系数 Y 方向 (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	21.1
折算平均导热系数 Z 方向 (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	21.1
折算平均密度/(kg·m ⁻³)	1542.9
折算平均比热容/(J·kg·K ⁻¹)	1337

本文研究的磷酸铁锂电池的正常工作温度范围是 18~60℃左右, 电池总内阻 R 变化不大, 作为常数看待, 通过实验测出电池在 25℃时的内阻为 R=0.73Ω。

(5) 对流换热系数的确定

对流换热系数的大小直接影响着电池散热性能的好坏, 对流换热系数越大, 电池通过对流换热散失的热量就越多, 电池内部和表面的温度就会越低。对流换热系数的影响因素有很多, 比如换热表面的形状和大小、换热表面与流体之间的温差大小和流体的流速等等。电池表面对流换热系数的获取方法有以下几种: 实验法, 分析法, 比拟法, 数值法。一般情况下对流换热表面局部平均对流换热系

数 h 都是通过实验法来获取。由传热学^[57,62]中的理论知识可知，流体扫掠平板时满足下面的关系式：

$$Gr = \frac{d^3 g (T - T_\infty)}{T_{ave} \nu^2} \quad (3.18)$$

$$Pr = \nu / \alpha \quad (3.19)$$

$$Nu = 0.48 (Gr \cdot Pr)^{1/4} \quad (3.20)$$

$$h = \frac{Nu \lambda}{d} \quad (3.21)$$

式中： Gr 是格鲁晓夫数； Pr 是普朗特数； Nu 是努塞尔数， α 是扩散系数； T_{ave} 为流体与换热平面的平均温度。

3.1.4 锂离子电池单体仿真模型的建立以及网格划分

利用上文所述的方法将本文研究对象磷酸铁锂电池三维模型简化为一个与外壳形状相同的矩形均匀实体，电池单体结构参数和热物性参数如下 3.4 所示。

表 3.4 电池单体结构参数及热物性参数

Tab 3.4 structure and thermal physical parameters of battery cell

参数	数值
单体电池标称容量/Ah	100
单体电池标称电压/V	3.2
电池单体长度/mm	150
电池单体宽度/mm	18
电池单体高度/mm	65
折算平均导热系数 X 方向 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	1.05
折算平均导热系数 Y 方向 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	21.1
折算平均导热系数 Z 方向 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	21.1
折算平均密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	1542.9
折算平均比热容/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	1337
极柱半径/mm	4.5
极柱高/mm	6

锂离子电池单体采用三维软件 SolidWorks 根据电池实际尺寸绘制，绘制完成的三维图如下图 3.2 示。

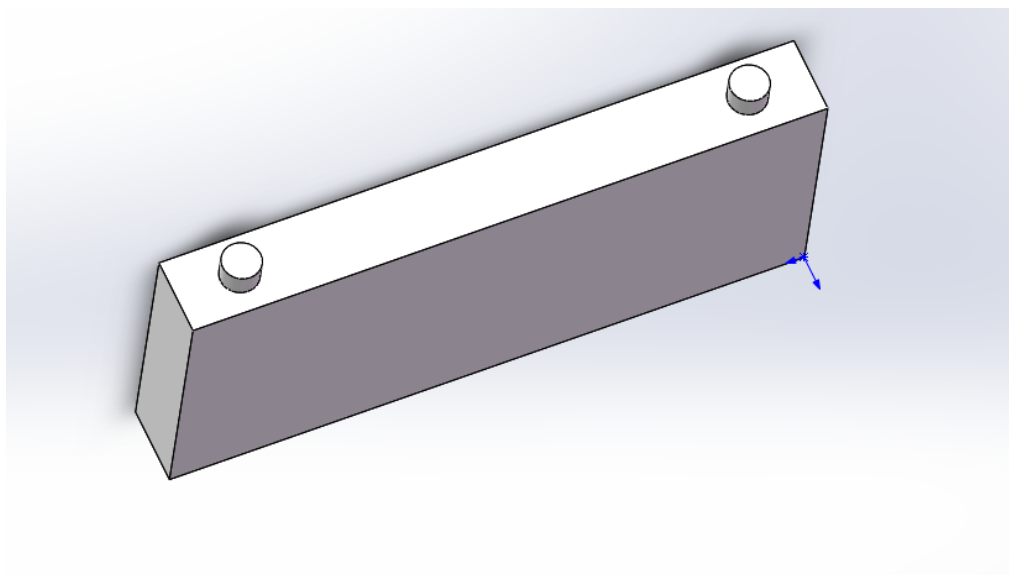


图 3.2 锂离子电池单体三维模型

Fig 3.2 three-dimensional model of lithium-ion battery cell

模型建好以后导入到 ICEM CFD 中进行网格划分, 由于极耳部分对于散热的影响不大和受到计算机条件的限制, 为了减小网格划分的难度, 在 ICEM 中对模型做进一步简化, 去掉极耳部分, 把极耳产生的热量等效的转入到电池主体部分中去。本章主要研究锂离子电池单体在自然对流条件下正常工作时的温度分布, 因此需要对电池所在的计算域空间放大, 本文采用对 y 和 z 方向扩大电池尺寸的 2 倍、 x 方向扩大电池尺寸的 4 倍来作为整个热流场的计算域。简化之后的模型如下图 3.3 所示。

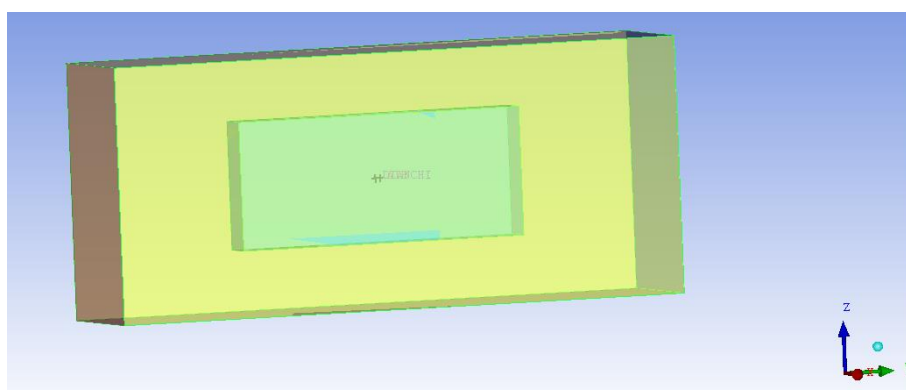


图 3.3 锂离子电池单体简化三维模型

Fig 3.3 simplify three-dimensional model of lithium-ion battery cell

模型简化完成之后, 首先需要在 ICEM CFD 中进行 part 的设置, 设置好空气的进口、出口、SYM 对称面和电池外表面的 part。完成模型的各个 part 设置之后需要进行 body 的建立 (即建立体), 分别建立空气的 body 为 AIR、电池的

body 为 dianchi。完成上述操作之后就可以对三维模型进行网格划分，采用八叉树算法（即 Octree 算法）。八叉树算法是空间非均匀网格剖算方法，八叉树算法将整个场景的空间立方体按照三方向总的剖面分成八个子立方体，组成一颗八叉树，选择一个好尺度阈后将八叉树不停地剖分子立方体网格直到满足条件。八叉树算法是 ICEM 中生成四面体网格的主要算法。划分好的网格如下图 3.4 所示，网格划分好之后还需要检查网格质量，看是否满足仿真分析的精度要求，本文采用 quality 方式来检查网格质量，网格质量图如下图 3.5 所示。

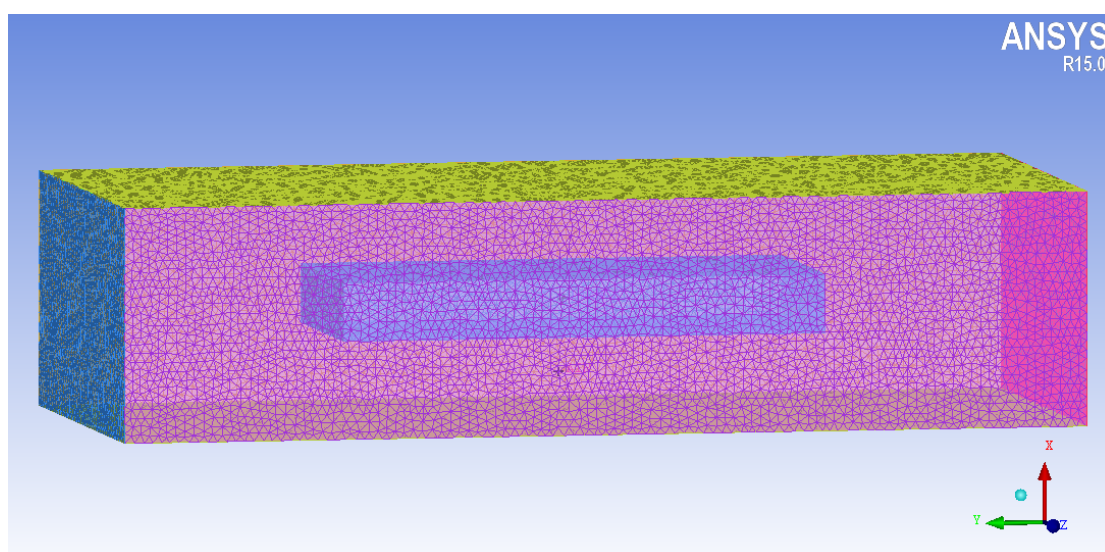


图 3.4 电池单体网格图

Fig 3.4 grid chart of battery cell

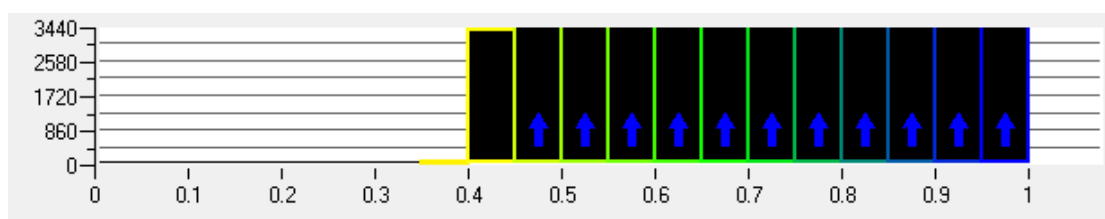


图 3.5 网格质量检查图

Fig 3.5 grid quality inspection chart

3.1.5 仿真模型初始条件、边界条件的设定及求解控制器的设定

(1) 初始条件的设定

对于稳态模拟，为了使仿真结果的准确，必须要给出仿真模拟的初始条件。为了方便计算结果和实验值进行对比，选取的模拟温度和实验环境温度一致，在进行 0.5C、1C 和 2C 条件下仿真模拟时环境温度都设置为 25℃。一般条件下，自然对流的换热系数范围是 3~5, 本文将对流换热系数设为 5。自然条件下风冷

的风速设置为 0.5，电池的生热率利用公式 (2.10) 来计算。

(2) 边界条件的设定

边界条件是指仿真模型边界上的热状态与外界环境之间的相互作用关系。本文对空气域边界条件做以下设置：

- ① 壁面温度设置为 25℃；
- ② 壁面法向压力梯度设置为零；
- ③ 壁面边界无滑移；
- ④ 由于通过壁面传导的热量极少，为了方便仿真可以将其简化为边界绝热，即壁面热流密度为零；
- ⑤ 壁面没有反射。

在 fluent 中的设置界面如下图 3.6 所示。

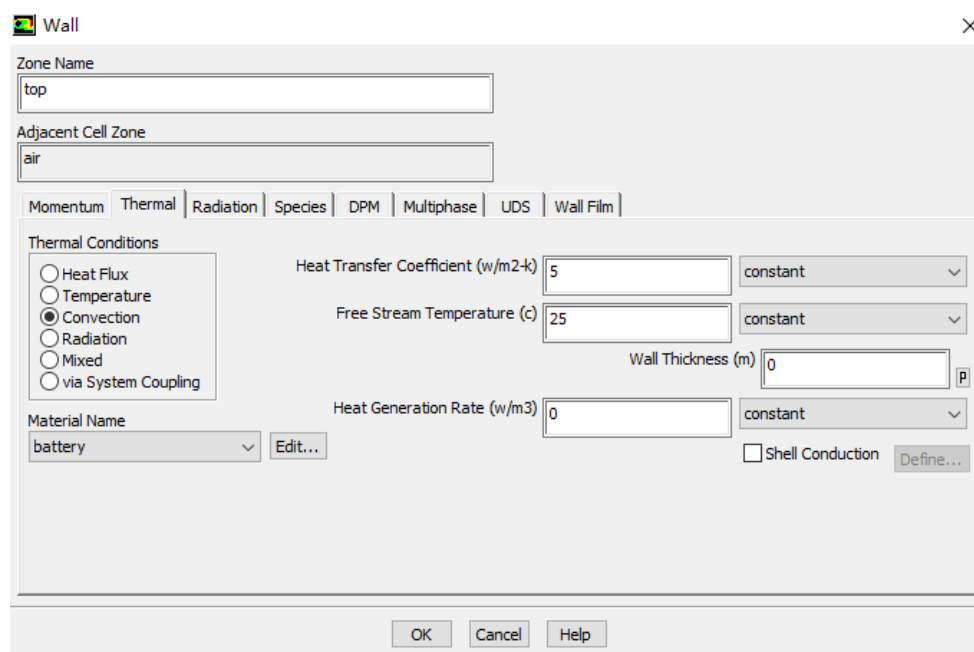


图 3.6 壁面边界条件设置图

Fig 3.6 figure of wall boundary conditions setting

(3) 求解控制器的设定

因为本章研究的是电池单体生热，而且仿真的是稳态时的温度场，所以采用 SIMPLE 离散算法。在 Spatial Discretization（空间离散化）选项下，动量和能量选项选择二阶迎风格式，其他选项采用默认设置，具体设置面板如下图 3.7 所示。仿真收敛速度的快慢跟松弛因子有关，松弛因子是方程迭代求解时各项变化的系数，松弛因子越大则需要越少的步数达到收敛，但是过大的松弛因子会导致求解不收敛或者发散。通常情况下，遇到不容易收敛的情况时，可以先调小松弛因子，然后随着计算步数的增多逐渐上调松弛因子到默认值即可。本文松弛因子的设置

如下图 3.8 所示。

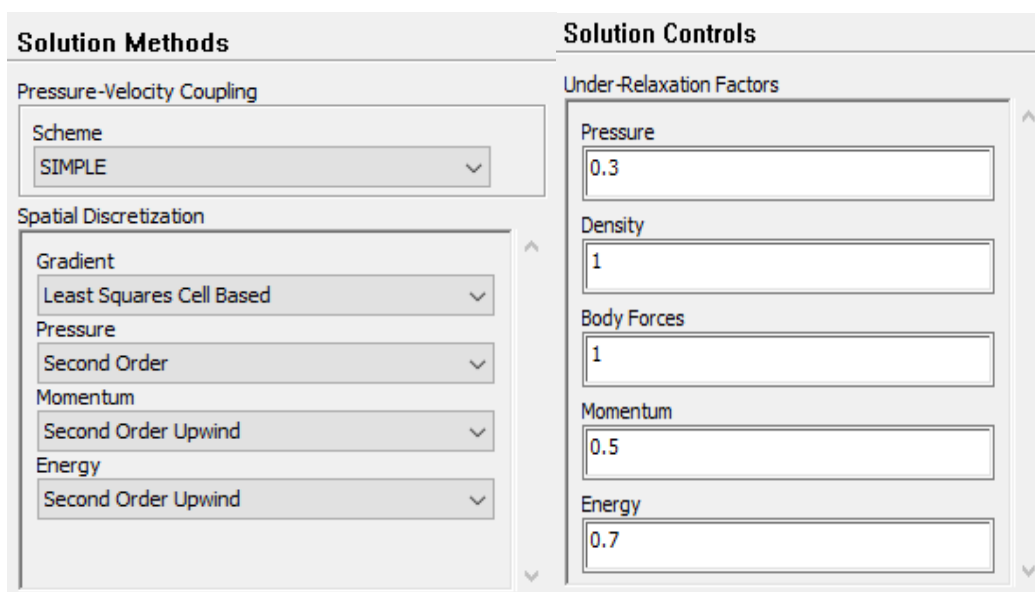


图 3.7 求解控制器参数的选择

图 3.8 松弛因子的设置

Fig 3.7 choice of solving controller parameters

Fig 3.8 the setting of relaxation factor

3.1.6 温度场仿真结果分析

完成以上各项设置之后就可以采用 hybrid 方式初始化流场，设置迭代步数为 400 步，能量方程收敛精度设置成 10^{-6} ，其余几个方程的收敛精度采用默认设置，当残差曲线达到收敛精度时，系统就会自动终止计算。本章分别对 0.5C、1C 和 2C 放电倍率条件下进行温度场仿真，残差曲线图和温度分布云图如下各图所示。

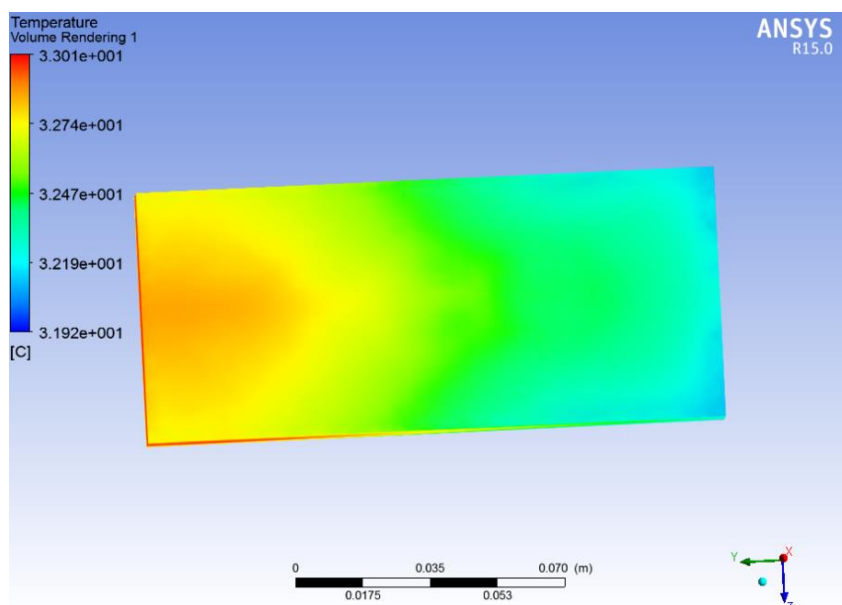


图 3.9 0.5C 放电倍率电池温度分布云图

Fig 3.9 temperature distribution of battery cell in 0.5C discharging

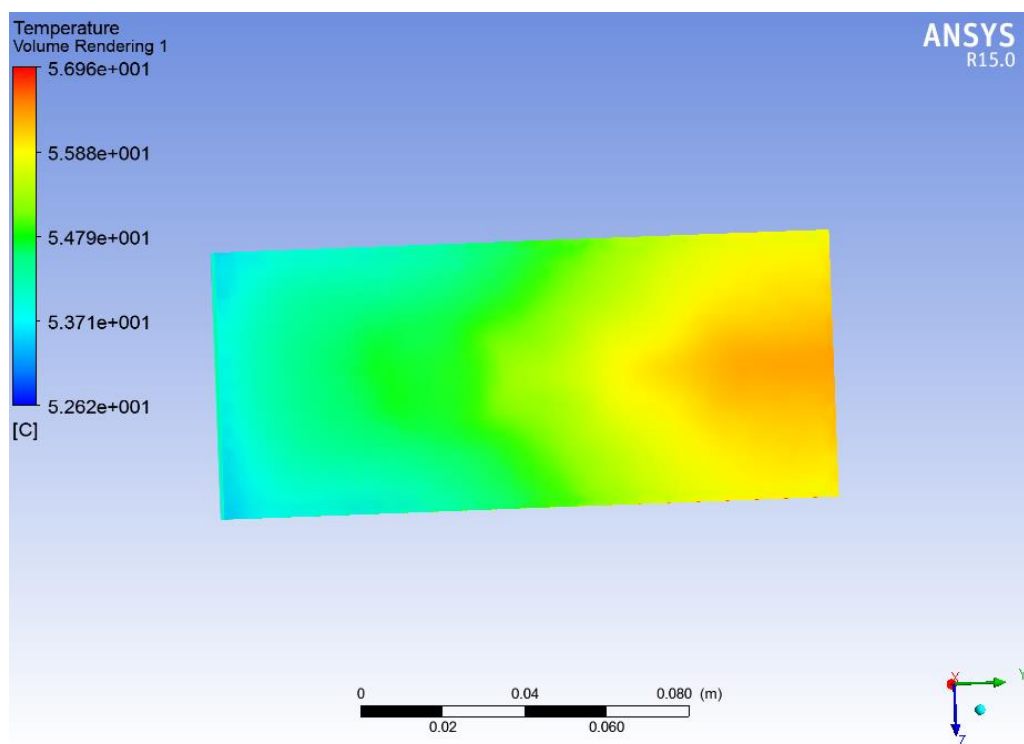


图 3.10 1C 放电倍率电池温度分布云图

Fig 3.10 temperature distribution of battery cell in 1C discharging

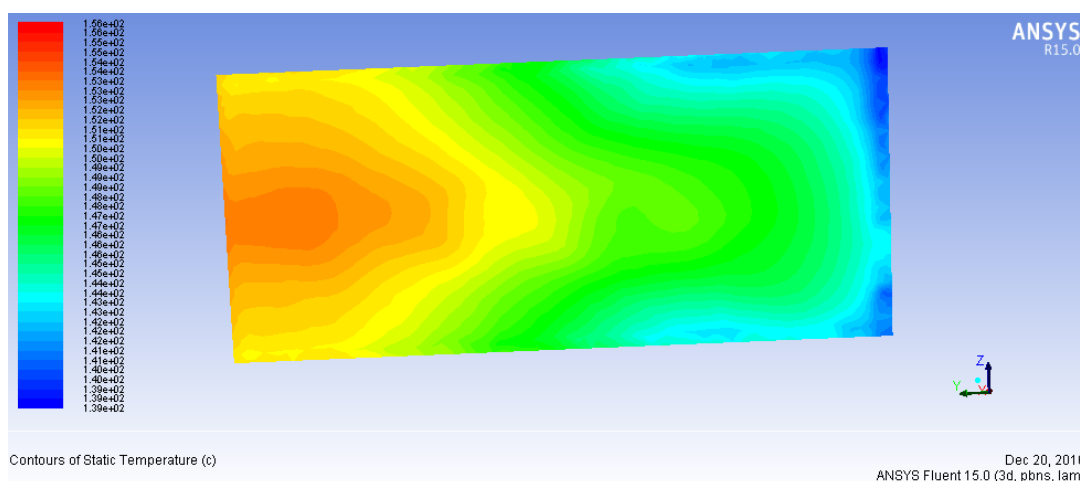


图 3.11 2C 放电倍率电池温度分布云图

Fig 3.11 temperature distribution of battery cell in 2C discharging

从仿真结果温度分布云图可以看出：

①当环境温度为 25℃时，在 0.5C 倍率放电条件下，即放电电流大小为 50A 时，电池单体最高温度为 33.0℃，最低温度为 31.9℃，最大温差为 1.1℃，最大温差非常小说明电池单体温度分布非常均匀，这时电池工作环境非常良好。电池单体生热量为 10398.75 W/m³，生热量比较小，对电池正常工作性能没有影响；

②在 1C 倍率放电条件下，即放电电流为 100A 的条件下，电池单体最低温度为 52.62℃，最高温度为 56.96℃，最大温差为 4.34℃，温差较小，在锂离子电池正常工作温差允许范围内。电池单体生热率为 41595W/m³，生热量相比 0.5C 条件下增长比较多，最高温度已经对电池正常工作性能有一定的影响；

③在 2C 倍率放电条件下，即放电电流为 200A 的条件下，电池单体最低温度为 138.52℃，最高温度为 156.04℃，最高温度太高可能导致热失控。最大温差为 17.52℃，最大温差超过 10℃，说明电池单体温度分布极不均匀，严重影响电池正常工作性能。电池单体生热率为 166382W/m³，生热量非常大导致最高温度严重超标，为了保证电池能正常工作，就必须采取散热措施来降温。

根据以上数据和分析结果，总结出以下仿真分析结果表 3.5 如下。

表 3.5 不同放电倍率电池单体温度场仿真结果

Tab 3.5 temperature field simulation results of battery cell in different discharge rate

特征量 电流	最高温度 (℃)	最低温度 (℃)	最大温差 (℃)	生热率 (W/m ³)
50A	33.0	31.9	1.1	10398.75
100A	56.96	52.62	4.34	41595
200A	156.04	138.52	17.52	166382

在环境温度不变的条件下，随着放电倍率的增大，电池单体的生热率增大，最高温度增大，最大温差也随之增大，从公式 (2.10) 中可以看出主要是因为电池单体生热率与电池平方成比例，因此电流增大时，电池单体生热率增大更快。

3.2 本章小结

基于计算流体力学 (CFD) 相关理论知识建立了锂离子电池单体的热效应模型。并根据相关理论研究推出了质量加权平均法来等效电池单体，用以获取电池单体相关热物性参数。然后运用 fluent15.0 进行锂离子电池单体温度场仿真，获取锂离子电池在 0.5C、1C 和 2C 三种放电倍率下的温度场分布云图。本章所建立的生热模型和等效方法为下文的电池管理系统的设计提供了理论支持。

第四章 锂离子电池组散热温度场研究及散热结构优化

纯电动汽车电池箱是电池热管理系统（BTMS）的关键组成部分，为了保证纯电动汽车正常运行，必须首先保证锂离子电池能正常工作，其中重要的条件就是保证锂离子电池能够在适宜的温度条件下工作，因此对于电池成组之后温度场分布的研究显得尤为重要。基于第三章的电池单体温度场仿真的分析可知，电池成组之后热量集中更难以自然散失，这样将导致电池组局部温度过高，将会严重影响电池组的正常工作，而且会有可能产生热失控现象。所以需要对电池组采取强制散热措施，电池组散热系统的设计就是其中的重要环节。因此设计出电池组高效散热空气流道和选取良好的散热方式是散热系统设计的主要内容。电池组热管理系统（BTMS）的一般流程如下图 4.1 所示。

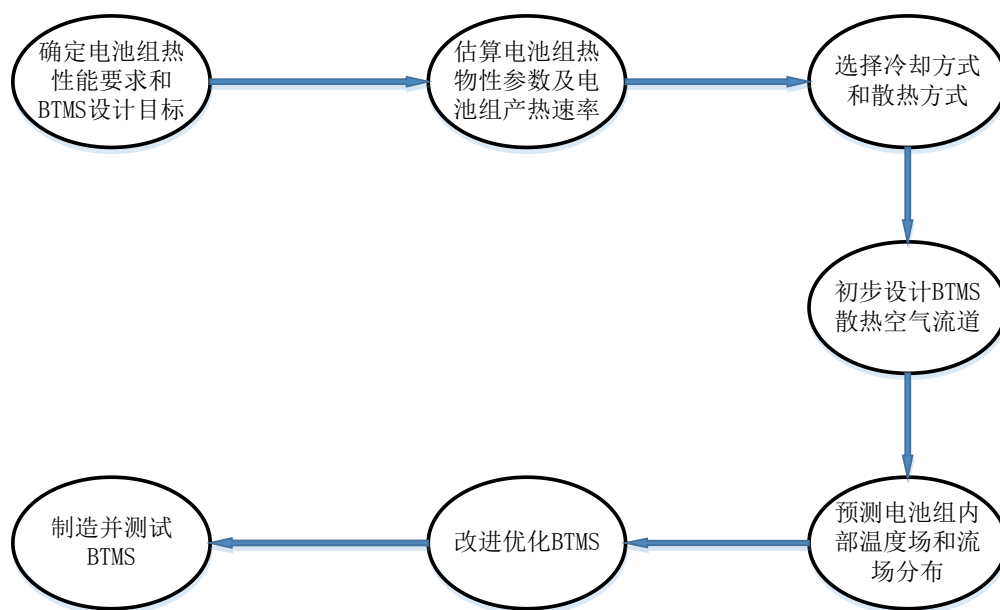


图 4.1 电池组热管理系统（BTMS）一般设计流程

Fig 4.1 general design process of battery thermal management system

锂离子电池组热管理系统的目的就是保证锂离子能够在外界环境温度和锂离子电池本身产热量增加的时候仍然能够在适宜的温度条件下正常工作，其首要要求就是能够将锂离子本身产生的热量及时地散发出去，保证锂离子电池最高温度不会太高。正常情况下，锂离子动力电池工作温度不能超过 60°C ，同时不能低于 20°C 。其次是要求能够保证电池组内部电池各单体之间和电池单体不同部位之间温度分布的均匀性，减小不同位置的温差，电池组内部最大温差不能超过 10°C 。

4.1 电池组冷却方式的选择

现在应用在市场上电动汽车的冷却方式有很多,根据传热介质分类,冷却方式可以分为以下几种:空气冷却,液体冷却,相变材料(PCM)冷却,冷却板冷却,冷媒冷却。

空气冷却方式最为常见和廉价,也是应用最为广泛的,即是利用冷却空气流经电池表面通过对流换热的方式将电池组的热量带走。空气冷却方式可以分为自然对流和强制对流两种对流方式。自然对流即是仅依靠电动汽车运行时车速形成的风对电池组进行冷却,不需要外部任何能量;强制对流即是采用风机或者风扇对电池进行吹风,这种方式需要额外消耗电池的能量,其散热效率高于自然对流方式。自然对流冷却方式的冷却效果很依赖于车速,因此冷却效果很受限制,散热效果也不是很理想,鉴于这些先天不足,自然对流方式很少得到实际应用。所以市场上多数电动汽车都是采用强制冷却方式。

液体冷却方式按照是否与电池单体直接接触分为直接冷却方式和间接冷却方式,冷却液经常采用水、乙醇或者导热油。在外界条件相同的情况下,液体冷却显然比空气冷却效果要好,但是液体冷却也有很大的弊端,主要有:①液体可能发生泄漏;②后期维修和保养比较困难;③电池箱体结构比较复杂。

相变材料(PCM)冷却方式是利用相变材料物理状态的改变(即熔化或者升华)来吸收或者放出热量,以达到控制电池箱内温度的目的。

冷却板冷却是在电池组上面和下面加冷却板用来快速将电池的热量散失掉,但是需要外加散热器,故使得电池箱体的结构比较复杂,而且在很大程度上增加了电池箱体的重量,会消耗电池额外的能量。

为了更好的对比以上几种常用冷却方式的优缺点,制作以下不同冷却方式冷却效果对比表 4.1。

表 4.1 不同冷却方式优缺点比较

Tab 4.1 comparison of different cooling patterns

冷却方式	原理	优点	缺点
风冷	局部散热器，风扇或者真发起来提供冷风。	结构简单质量小，生产安装维修方便，成本和能耗低，能排除有害气体，对封装设计的要求不高，空间位置不受限制。	半开放结构，密封性差，电池组安全防护等级低，换热速度一般，箱内空间需求大，内部温度均匀性差，噪声大。
液冷	在模块间布置管线或围绕模块布置夹套等各种方式将电池热量转移到液体中，然后采用液体与空气进行热交换把电池的热量排出。	散热能力强，降温速度快，内部温度均匀性好，箱内空间要求小，便于整车加热/冷却系统的整合，还可以整车降低能耗。	结构复杂，成本高，重量大，生产维修困难，有泄漏隐患，运行可靠性差，可能需要更多的外围设备。
PCM 冷却	相变材料有很大的相变潜热，把相变材料用于电池的热管理，当电池温度达到相变材料的相变温度时，相变材料开始发生相变，吸收电池散发出的热量，可以长时间保持电池的温度在相变温度范围内。	不需要类似风冷和水冷的那么多复杂的设备，便于回路的设计和简化，适用于各种形状的电池，无需额外功耗，高吸热密度，散热能力较强。	导热性能差，导致其储热的速度降低，而且会引起固化过程中的离析，而且还有一些技术问题有待解决。

基于以上各种冷却方式优缺点的分析结果，以及整车成本和可行性问题，本文采用强制空气冷却方式。

4.2 电池组空冷散热系统的散热方式的选择

空气冷却的散热方式包括串行通风和并行通风两种方式。串行通风冷却方式指冷却空气从电池箱的进口依次流经每个电池单体，将每个电池单体的热量历次带走，最后从出风口将热量排出。并行通风冷却方式是指从进风口进入电池箱的冷却风同时流经所有的电池单体，然后将电池组热量带走从出风口汇合同排出，每两个电池单体之间的空气流量根据压强差自动分配。对比这两种散热方式可知并行通风散热效果要强于串行通风。因为针对串行通风条件下，冷却空气在流经到后面的电池单体时，早已被前面的电池单体加热过，冷却空气的温度会越来越高，因此散热能力也会越来越小；对于串行通风条件下，冷却空气是同时流经各个电池单

体,流到后面电池单体的冷却空气并没有被前面电池单体加热,因此冷却能力不会降低。两种散热方式示意图如下图 4.2、4.3 所示。

经过对比两种散热方式的优缺点,本文采用并行通风散热方式来为电池组设计散热风道。

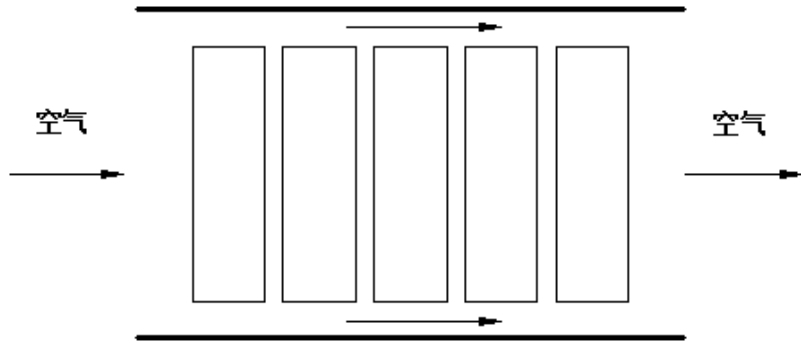


图 4.2 串行通风散热方式

Fig 4.2 serial ventilation

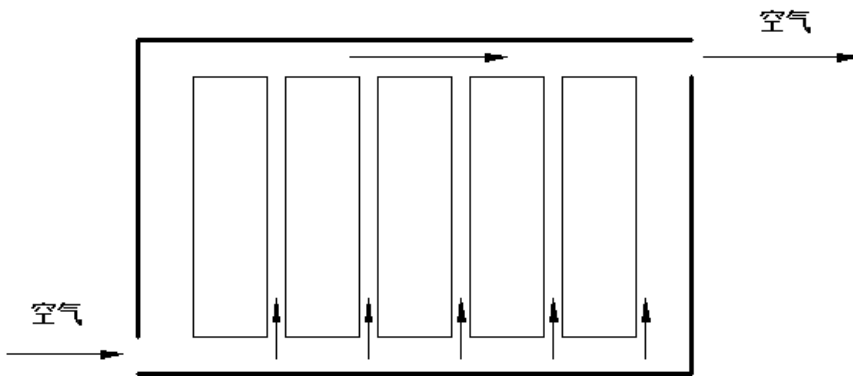


图 4.3 并行通风散热方式

Fig 4.3 parallel ventilation

4.3 电池组空冷散热系统的三维散热模型的建立

4.3.1 流固耦合模型的建立

电池单体相关热物性参数参照第三章表 3.4,将其成祖之后利用 ICEM CFD 软件建模。ICEM CFD 除了能用来为流体划分网格之外,还具有强大的三维建模功能。为了保证电池组仿真模型的精确性,避免其他三维软件绘制的三维图导入 ICEM 中划分网格时出现 hole 等不兼容问题,可以直接在 ICEM 中完成三维图的绘制,但是同样需要对电池组模型进行一些简化,比如简化电池单体的极耳和一些细小的结构。

ICEM 绘制三维图不同于其他的三维软件,ICEM 首先绘制电池单体的边界点,接着由点连成线,然后由每个面的 4 个点生成电池单体的底面,然后绘出电池的高度点,利用 sweep surface 命令完成电池壳体的绘制,最后就可以建立 body,这

样就完成了—个电池单体的建模。利用同样的方法完成所有电池单体的建模和空气流场的建模。由于冷却空气在电池箱体内部的流速远远小于声速的三分之一,所以可以将冷却空气当做不可压缩气体来处理。采用并行通风设计电池组散热流场,这样可以使每个电池单体获得同样来自进风口未经过其他电池单体加热过的冷却风,有利于电池组的散热。进口处采用渐缩型导流板以形成加速通道,通过减小入口流道的流通面积来增大电池单体间流体的流速;出口处采用渐扩型引流板以减小风阻。简化后的电池组和空气流场的流固耦合模型如下图 4.4 所示,电池单体之间的间距为 5mm。

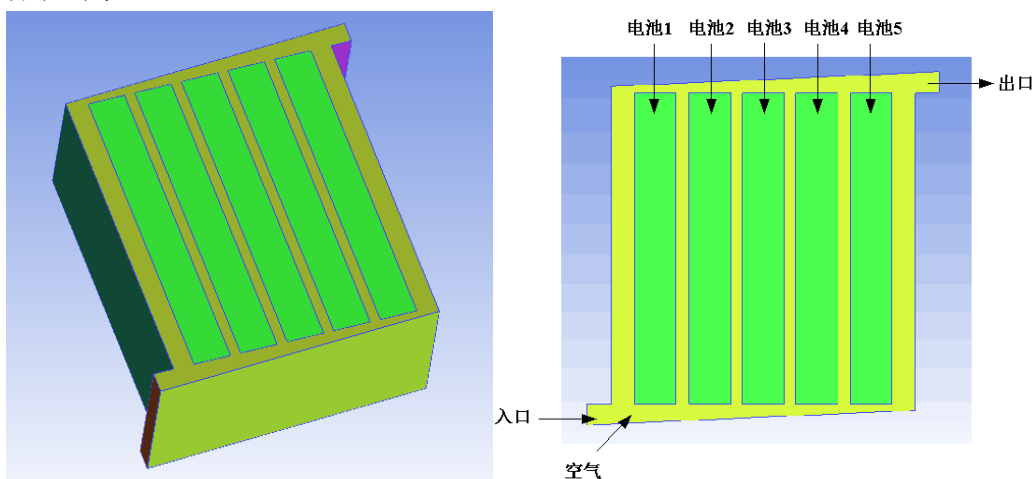


图 4.4 电池组流固耦合模型三维图

Fig 4.4 three-dimensional model of battery pack fluid-structure interaction

4.3.2 网格划分、材料属性与边界条件的设置

利用 ICEM CFD 进行流固耦合模型建立之后,运用于 3.2.4 节中相同的方法进行相关设置,可然后直接在 ICEM 中进行网格划分,采用非结构体网格。空气流体区域包括电池单体之间的部分和进出口流道部分,网格数约 260 万个,网格质量满足计算精度要求。

本章是仿真整个电池组散热温度场分布,因此需要模拟计算空气流动的流场和电池生热的热场两个过程,所以需要设置磷酸铁锂电池单体的材料属性和冷却空气的物理性质。电池材料的基本热物性参数参照表 3.4,空气在低速情况下处理为不可压缩气体,25℃时的空气的具体热物性参数如下表 4.2 所示。

表 4.2 空气热物性参数

Tab 4.2 thermophysical parameters of air

热物性参数	密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	导热系数 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热容 ($\text{J}\cdot\text{kg}\cdot\text{K}^{-1}$)	动力粘性系数 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
数值	1.177	0.0242	1006.43	1.847e^{-5}

跟电池单体仿真相似，需要对流固耦合模型进行边界条件的设置，主要涉及出口边界、进口边界、流体壁面边界及流固耦合边界等，具体设置方法参照第三章自然对流仿真步骤。

4.4 散热系统温度场仿真结果与分析

首先对 1C 放电倍率恒流放电条件下的温度场进行仿真。环境温度为 25°C ，入风口风速为 5m/s ，对流换热系数取 $10\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。流体部分和固体部分直接耦合，使用相同的离散规则和数值方法进行迭代计算，使用 $k-\varepsilon$ 湍流模型求解，压力、动量和能量的离散方法采用 2 阶迎风格式，动量方程中的压力和速度耦合方法采用 SIMPLE 方法。当计算结果收敛时，fluent 仿真得到 1C 放电倍率的温度分布云图如图 4.5 所示。空气流场的流线图如图 4.6 所示。

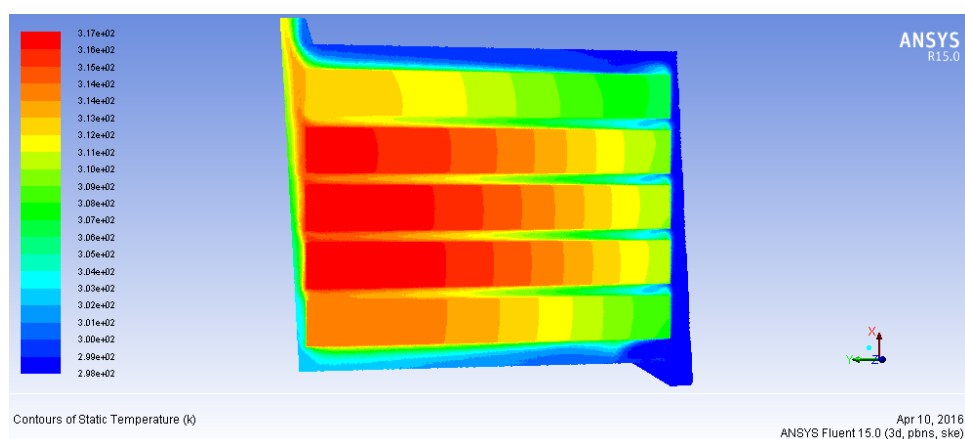


图 4.5 1C 放电倍率温度分布云图

Fig 4.5 temperature distribution nephogram in 1C discharging

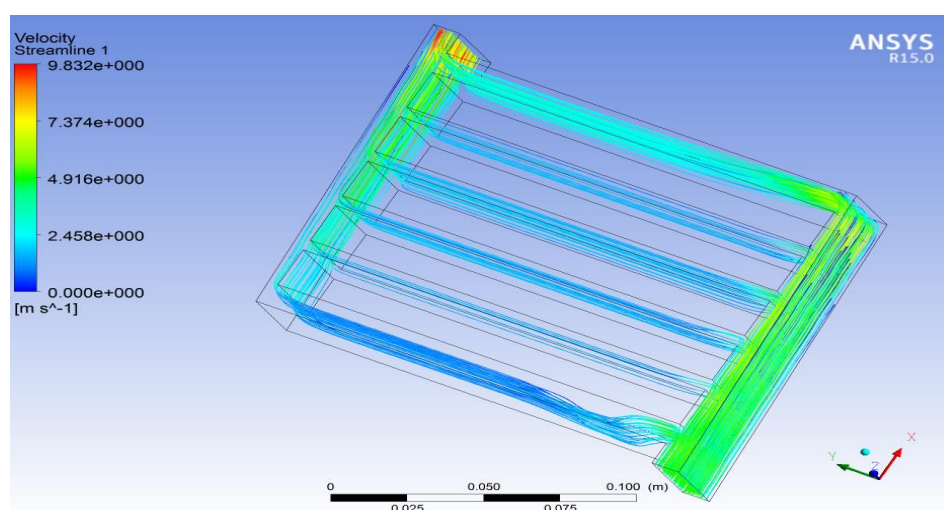


图 4.6 1C 放电倍率空气流场流线图

Fig 4.6 streamline chart of air fluid field in 1C discharging

由图 4.5 可知, 电池组最高温度达到 44°C , 最低温度为 30°C , 中间 3 个电池温度比 1 号和 5 号电池温度高, 电池组最大温差为 14°C , 超过 10°C 最大限制值, 说明本电池组温度分布不均匀, 不利于电池组正常工作。从图 4.6 中可知, 2 号、3 号和 4 号电池两侧空气流量分布近似相等, 但是 1 号和 5 号电池外侧空气流量均比其他 3 个电池多, 从而导致 1 号和 5 号电池温度比其他 3 个电池高。

为了探究电池组在更高倍率下温升情况和温度场分布, 继续在 1C、2C、3C 这三种放电倍率条件下做温度场仿真实验。考虑到放电倍率增大, 风速必须同样增大以加快电池组散热, 风速选择 20m/s , 利用 fluent 进行仿真分析。对电池组 5 个电池单体中最高温度、最低温度和最大温差等关键参数如表 4.3 所示。

表 4.3 关键参数

Tab 4.3 key parameters

关键参数	1C	2C	3C
最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	32	56	97
最低温度/ $^{\circ}\text{C}$	27	33	43
最大温差/ $^{\circ}\text{C}$	5	23	54

从表 4.3 可以看出, 虽然放电倍率只从 2C 增加到 3C, 但是电池组最高温度增加了 41°C , 温差增加了 31°C , 温差增加不止一倍, 增加极为显著。当电池温度达到 97°C 时, 公式 (2.10) 不再适用, 此时反应热占有很重要的一部分, 所以不能忽略反应热。因此, 在 3C 放电倍率下, 电池组实际最高温度应该超过 97°C 。可以看出在低倍率 (比如 1C) 时, 电池组最高温度和温差都是在正常工作温度范围内, 但是放电倍率稍微增大就会导致电池组最高温度急剧增大, 温度均匀性急剧降低, 最大温差远大于 10°C 。因此, 需要对散热通道加以优化。

由式 (2.10) 可知, 电池生热量是与放电电流的平方成正比的, 因此电流的细微改变会导致电池生热量的极大改变。由于生热量的增加, 空气流动差的地方热量会积累更多, 直接导致电池温度的均匀性更差, 温差更大。仿真结果与理论分析相符合, 说明该模型仿真结果可信。

4.5 电池组散热系统结构优化与温度场仿真分析

4.5.1 散热结构优化方案

分析原设计方案可知, 原方案中电池箱体四周流道的边缘均是采用直角设计, 从流线图可以看出来这种设计方案中空气阻力比较大不利于空气的流动。为了增强电池组的散热能力, 将散热结构优化为四周都采用圆角设计, 并且圆角半径为

5mm。同时由一个出风口改为 2 个出风口，优化后的电池组三维流固耦合模型图如图 4.7 所示、网格模型如图 4.8 所示、散热流道基本尺寸如图 4.9 所示，其中未标明圆弧半径均为 5mm。

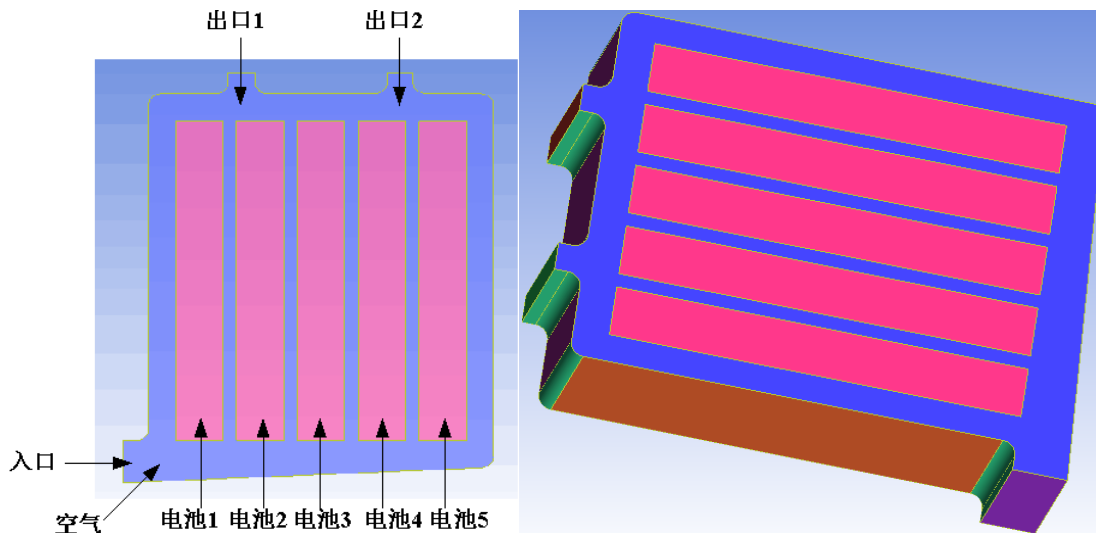


图 4.7 优化后电池组三维流固耦合模型

Fig 4.7 three-dimensional model of optimized battery pack fluid-structure interaction

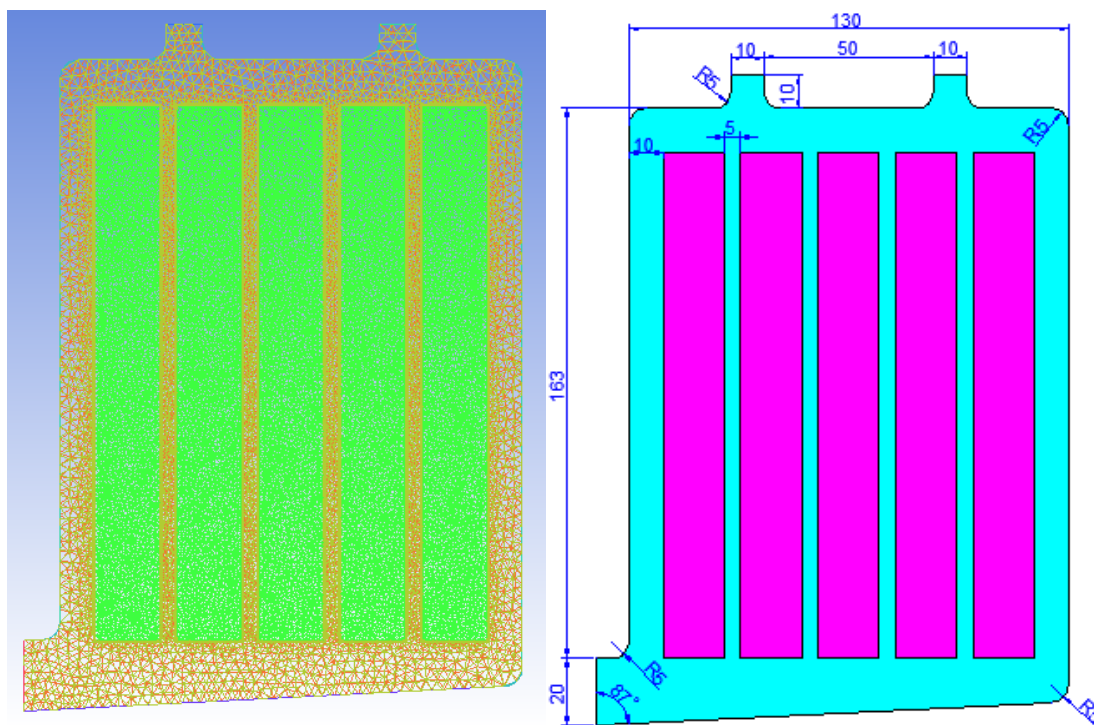


图 4.8 优化后网格模型

图 4.9 散热流道基本尺寸

Fig 4.8 optimized grid model

Fig 4.9 basic size of heat dissipation field

4.5.2 优化结构温度场仿真分析

为了与原来设计方案进行鲜明的对比，本次仿真初始条件条件采取与原来方案一样，风速仍然选择 5m/s，在 1C 放电倍率条件下进行温度场仿真。改进之后的温度场仿真结果收敛时，温度云图如图 4.10 所示，流线图如图 4.11 所示。

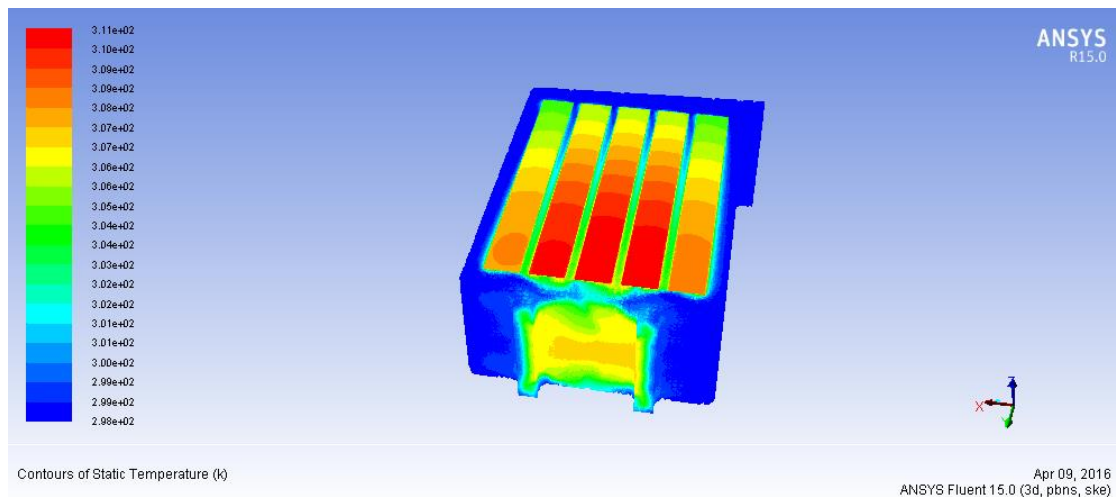


图 4.10 优化后电池组温度分布云图

Fig 4.10 temperature distribution nephogram of optimized battery pack in 1C discharging

由图 4.10 可知，电池组最高温度为 38℃，最低温度 30℃，最大温差为 8℃，温升为 5℃，电池组温度分布均匀性较之前有所改善，散热性能良好。因此，在 1C 放电倍率条件该散热流道设计方案可以满足电池组的正常工作。优化前后散热效果对比如表 4.4 所示。

表 4.4 电池组散热流道优化前后散热效果对比

Tab 4.4 cooling effect comparison of battery pack before and after heat dissipation passageway optimization

关键参数	优化前	优化后	优化效果
最高温度/℃	44	38	6
最大温差/℃	14	8	6

从表 4.4 可以看出，改变了出风口的设计，仅增加一个出风口而且加以圆角优化后，最高温度下降 6℃，最大温差同样下降 6℃，电池组温升有所下降，温度均匀性同样有所提高，说明优化后综合散热效果明显提升。

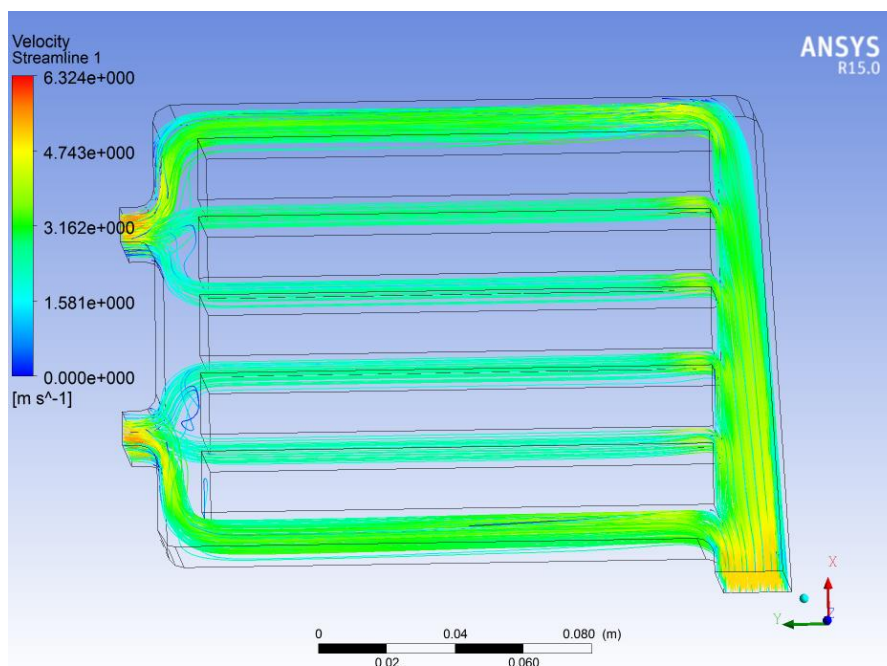


图 4.11 优化后空气流场流线图

Fig 4.11 streamline chart of optimized air fluid field

从流线图可以看出：在渐缩型导流板的作用下，从进口流入风的风速在各电池之间的入口处均有增加，符合理论分析。在出风口和四周引入圆角设计之后，减小了风阻，流线均在圆角处圆滑过度，没有回流，而原来设计的有回流，而且在渐缩型导流板和圆角的作用下可以使各电池单体流道入口处风速趋于相等，说明圆角设计更有利于冷却空气的流通，并且提升电池单体组温度分布均匀性。

4.5.3 优化前后不同放电倍率下温升对比

为了研究优化后的电池组在不同放电倍率下的温度场分布，分别做 1C、2C、3C 三种放电倍率条件下电池组温度场仿真。为了可以原来设计方案进行鲜明的对比，速度仍然选择 20m/s。对电池组中 5 个电池单体中最高温度、最低温度和最大温差等关键参数进行记录，记录结果如表 4.5 所示。

表 4.5 不同放电倍率下关键参数

Tab 4.5 key parameters of different discharging rate

关键参数	1C	2C	3C
最高温度/°C	29	42	69
最低温度/°C	27	32	41
最大温差/°C	3	12	28

对比表 4.3 和表 4.5 可知,在低放电倍率 1C 条件下,最高温度下降了 3℃,温差下降了 2℃,电池组温度均在理想工作温度范围内;在 2C 放电倍率下,电池组最高温度下降了 14℃,温差下降了 11℃,温差和最高温度均有较大降低,温度均匀性明显提升;在高放电倍率 3C 条件下,电池组最高温度下降 28℃,温差下降 26℃,温差和最高温度均有非常大的降低,温度均匀性得到很大的提升。由此可知,随着放电倍率的增加,优化后的散热结构对电池组温度降低更明显,均匀性同时提升。因此,在中低倍率放电时,该优化结果具有很好的散热性能,能够满足正常使用。

4.6 进风口风速对散热效果的影响

首先特别关注表 4.4 和表 4.5 中 1C 放电倍率条件下,风速不同的情况下电池组散热情况对比情况,对比结果如下表 4.6 所示。

表 4.6 1C 放电倍率下不同风速散热效果对比

Tab 4.6 cooling effect comparison of different wind speed in 1C discharging

关键参数	5m/s	20m/s	对比结果
最高温度	38℃	29℃	下降 9℃
最大温差	8℃	3℃	下降 5℃

从表 4.6 中可以看出,风速由 5m/s 增加到 20m/s 时,最高温度下降 9℃,最大温差下降 5℃,温度均匀性明显提高。对于对温度比较敏感的磷酸铁锂电池来说,散热性能是得到了很大的提升。

由于表 4-6 中风速设置跨度比较大,并不能完全说明电池组散热情况随着风速变化的变化规律。因此,本节选择在 2C 放电倍率条件下,探究改变风速对优化后的电池组在偏高放电倍率条件下散热性能的改变情况。从风速为 5m/s 逐渐提升,选择风速分别为 10m/s、15m/s、20m/s、25m/s,并建立相应的仿真模型进行温度场仿真计算,电池组在这 5 中不同风速下最低温度、最高温度和最大温差等特征参数如下表 4.7~4.11 所示。为了便于观察,画出电池组中每个电池单体最高温度和最大温差与进风口风速关系曲线,分别如图 4.12、图 4.13 所示。

表 4.7 2C 放电倍率、风速为 5m/s 条件下关键参数

Tab 4.7 key parameters in 2C charging and speed of 5m/s

关键参数	最低温度/°C	最高温度/°C	最大温差/°C
电池 1	46	66	20
电池 2	50	75	25
电池 3	51	75	24
电池 4	50	73	23
电池 5	47	65	18

表 4.8 2C 放电倍率、风速为 10m/s 条件下关键参数

Tab 4.8 key parameters in 2C charging and speed of 10m/s

关键参数	最低温度/°C	最高温度/°C	最大温差/°C
电池 1	37	51	14
电池 2	38	56	18
电池 3	38	56	18
电池 4	38	54	16
电池 5	37	50	13

表 4.9 2C 放电倍率、风速为 15m/s 条件下关键参数

Tab 4.9 key parameters in 2C charging and speed of 15m/s

关键参数	最低温度/°C	最高温度/°C	最大温差/°C
电池 1	34	46	12
电池 2	34	48	14
电池 3	34	48	14
电池 4	34	47	13
电池 5	34	44	10

表 4.10 2C 放电倍率、风速为 20m/s 条件下关键参数

Tab 4.10 key parameters in 2C charging and speed of 20m/s

关键参数	最低温度/°C	最高温度/°C	最大温差/°C
电池 1	32	42	10
电池 2	32	44	12
电池 3	33	44	11
电池 4	33	43	10
电池 5	32	41	9

表 4.11 放电倍率、风速为 25m/s 条件下关键参数

Tab 4.11 key parameters in 2C charging and speed of 25m/s

关键参数	最低温度/°C	最高温度/°C	最大温差/°C
电池 1	31	40	9
电池 2	31	42	11
电池 3	31	42	11
电池 4	31	41	10
电池 5	31	39	8

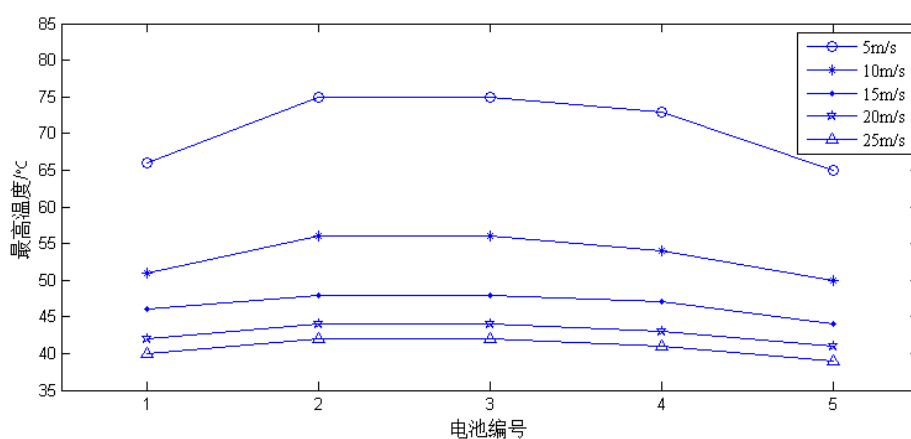


图 4.12 电池组最高温度曲线图

Fig 4.12 the highest temperature profile of battery pack

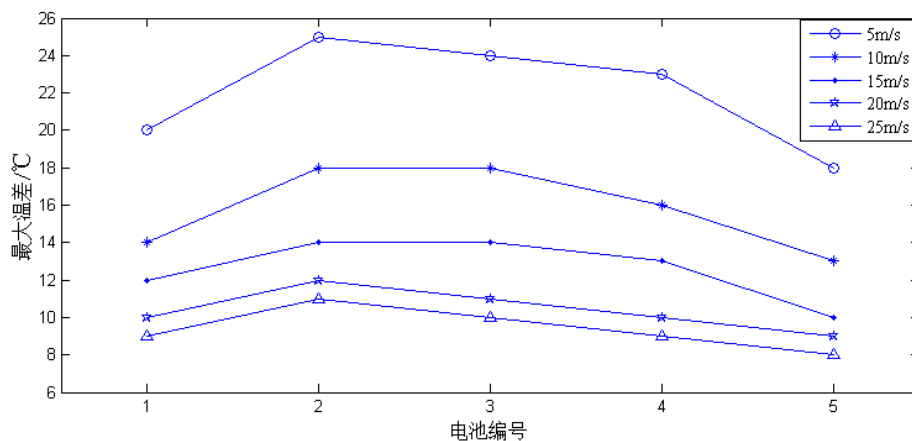


图 4.13 电池组最大温差曲线图

Fig 4.13 the highest temperature difference profile of battery pack

从图 4.12 和图 4.13 可以看出,随着风速的提升,电池组的最高温度和温差都在持续降低,说明提升入风口风速能够有效改善电池组的散热性能。在风速从 5m/s 提升至 10m/s 时,电池组最高温度显著下降,同时,电池单体的温差明显减小。但是,随着风速的继续提升,电池组最高温度和温差并没有继续明显下降,只是缓慢地下降。说明在 2C 放电倍率下,当风速不超过 10m/s 时,加大风速可以显著提升电池组散热性能;当风速高于 10m/s 时,风速的提升对电池组散热性能的提升效果越来越不明显。随着风速的增大,对电池散热的效果越来越小,对电池组的功耗却越来越大,并且不断增大噪声严重影响整车舒适性。因此,将电池组的风速限定在一定范围是有必要的,而且轴流风机最大风速不超过 15m/s。

4.7 本章小结

本章首先对电池组冷却方式进行选择，最终根据对几种冷却方式的分析结果选择强制空气冷却方式。由于并行散热系统散热效果强于串行散热系统，本文采用并行散热系统，根据本章的研究，可以得出以下结论：

(1) 在对初始设计的电池组散热系统进行 fluent 仿真分析，得到电池组最高温度、最低温度和每个电池单体的温差，同时发现温度均匀性偏低，2 号和 3 号电池散热性能不好。

(2) 在不同放电倍率的条件下进行温度场仿真，得到温度分布云图和流线图。结果表明虽然放电电流只改变一倍，但是生热量是急剧增加，最高温度和温差急剧增大。

(3) 提出了采用楔形导流板、四周圆角代替直角和双出口的优化方案，仿真结果表明温度均匀性和散热性能有明显提升，能够满足低放电倍率条件下使用要求。

(4) 在一定的速度范围内，提高风速可以有效的提高电池组的散热性能，但是风速超过一定范围（本文为 10m/s）之后，继续增大风速对提高电池散热效果提升的综合效果不明显，而且会带来更大的噪声，会严重影响整车的舒适性。

第五章 不同工况下锂离子电池组温度场均匀性优化研究

上文仅对电动汽车在常温（25℃）条件下做了锂离子电池组温度场研究，但是电动汽车在实际工作过程中外界环境变化莫测，所以必须要对多种典型的工况进行温度场的研究才能设计出能够应对各种不同外界条件的电池箱。本章主要研究以下三种不同典型工况：高温 38℃条件下；低温 0℃条件下；常温 25℃条件下。着重研究提升锂离子电池箱温度均匀性的措施以及不同工况下最佳风速的选择。

5.1 锂离子电池箱结构改进模型的建立及边界条件的设定

5.1.1 电池箱体三维模型的建立

通过第四章温度场研究可知，经过优化后的电池箱体在低倍率放电条件下能够满足使用要求，最高温度、最大温差和温升都满足条件。但是在炎热的夏天（空气温度达到 38℃），很明显这种电池箱结构并不能让电池组的最大温差限制在 10℃以内。从表 4.8 可以看出，虽然电池组最高温度在允许范围内，但是温差超过了 10℃，锂离子电池组温度均匀性差就会严重影响电池使用寿命。因此需要在电池温度均匀性上加以改善。

由于铝的质量轻，而且导热率非常高，所以可以利用铝板的高导热率让电池组产生的热量快速在各个电池单体之间散开，使电池组温度均匀性更高。本文采用的方式即是在电池组上下表面加上 3 毫米的铝板，改进之后的模型三维图如图 5.1 所示、网格图如图 5.2 所示。

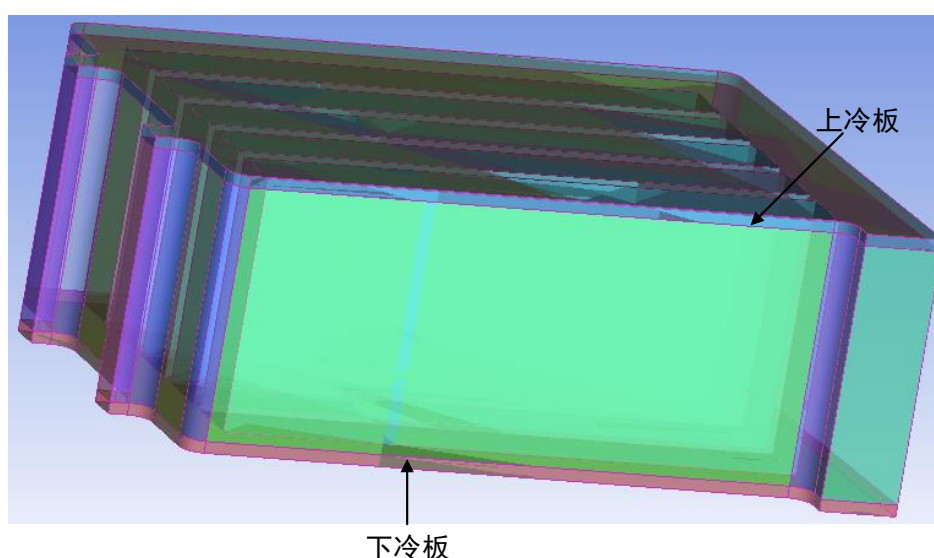


图 5.1 改进模型三维图

Fig5.1 optimized three-dimensional model

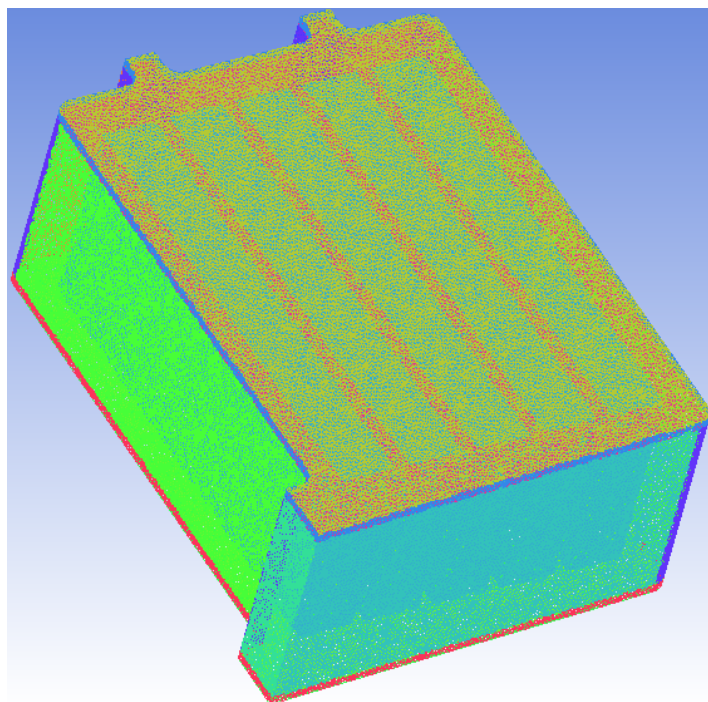


图 5.2 网格图

Fig5.2 grid chart

5.1.2 边界条件的设定

由于加入了铝板之后，边界的设定与第三章和第四章的边界条件有所不同。本模型一共涉及到电池和空气的流固耦合和电池与铝板的固固耦合两种不同的耦合方式。铝板内壁面与电池接触，设置为固固耦合方式；铝板外壁面与在电动汽车封闭的空间内，对流换热量极少，可以忽略不计，可以设置为绝热面；铝板侧面同样设置为绝热面。电池与空气接触的面涉及热传导和热对流，因此设置为流固耦合方式。其他的边界条件的具体设置参照第三章。

5.2 改进模型均匀性提升效果验证

由于铝板的导热率比较大，能在短时间内将电池组产生的热量分散开，不会聚集在一起导致电池局部温度过高。为了验证这种设计的实际效果，在炎热的夏天（环境温度为 38°C ）先对 1C 放电倍率、风速为 10m/s 的条件下电池组进行温度场仿真实验，着重关注电池组的最大温差和各个电池单体各自温差情况。在计算收敛之后，温度场温度分布云图如图 5.3 所示，各个电池单体温度关键参数如表 5.1 所示。

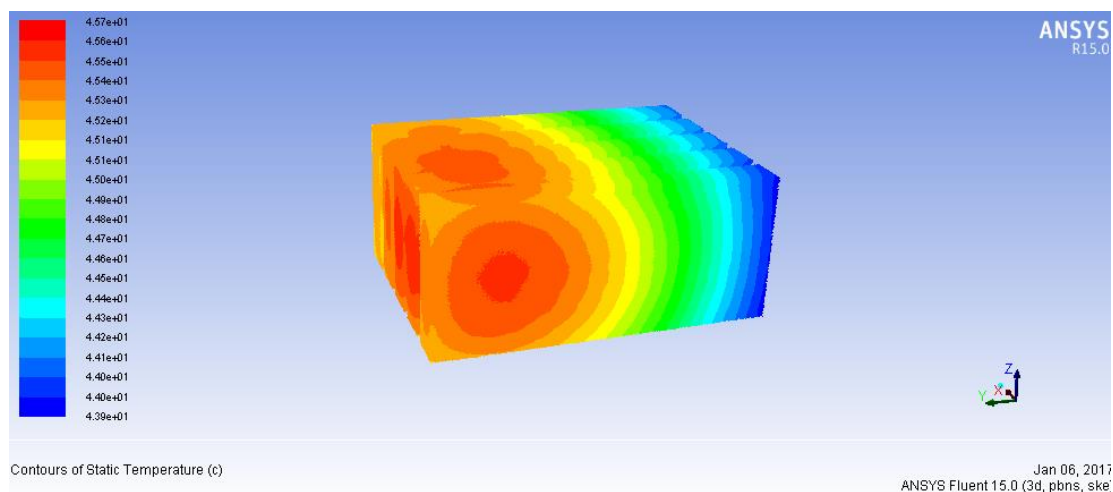


图 5.3 1C 放电倍率风速 10m/s 温度场分布云图

Fig5.3 temperature field distribution in 1C discharging and wind speed of 10m/s

表 5.1 1C 放电倍率风速 10m/s 电池组单体关键参数

Tab5.1 key parameters of battery cell in 1C charging and speed of 10m/s

关键参数	最低温度/°C	最高温度/°C	最大温差/°C
电池 1	43.9	45.6	1.7
电池 2	43.9	45.7	1.8
电池 3	43.9	45.7	1.8
电池 4	43.9	45.6	1.7
电池 5	43.9	45.5	1.6

结合图 5.3 和表 5.1 可知, 电池组最高温度为 45.7°C, 最大温差才 1.8°C, 温升才 7.7°C, 各项温度关键参数都验证了该改进结构对于温度均匀性的提升效果非常明显, 即说明了该电池箱在 1C 放电倍率条件下能够保证电池组温度分布非常均匀, 同时保证温升比较小、电池组最高温度在最适温度范围内。

因此, 该改进结构能够有效保证电池组温度均匀分布。

5.3 高温 (38°C) 条件下温度场研究及最佳风速的选择

为了与第四章形成鲜明对比, 同时为了检验本改进结构温度分布的均匀性提升效果, 同样采取 2C 放电倍率, 分别采取不同风速来探究在高温条件下最合适的风速。在环境温度为 38°C, 风速分别为 10m/s、15m/s 时, 仿真结果残差曲线和温度分布云图分别如图 5.4、图 5.5 和图 5.6 所示。

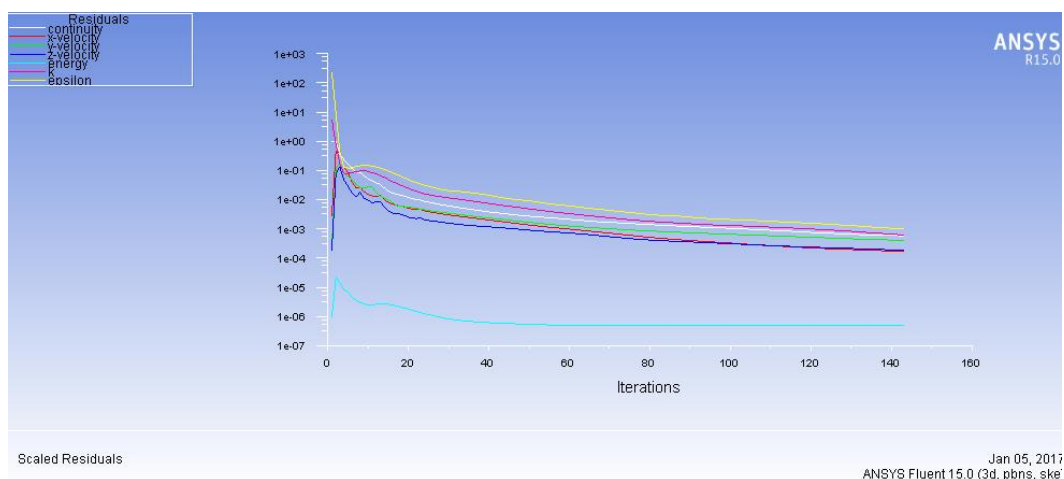


图 5.4 风速 10m/s 时残差曲线

Fig5.4 residual curve in speed of 10m/s

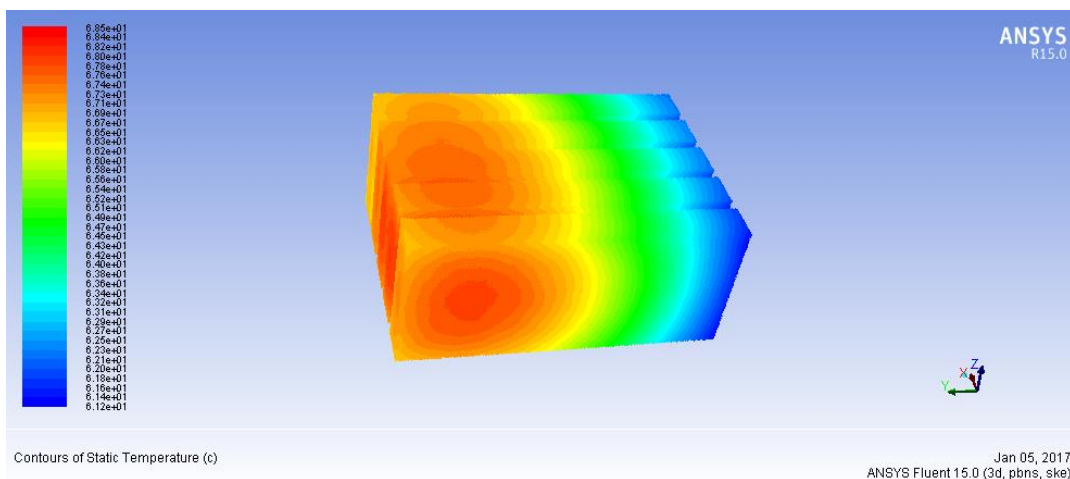


图 5.5 风速 10m/s 时电池组温度分布云图

Fig5.5 temperature field distribution of battery pack in speed of 10m/s

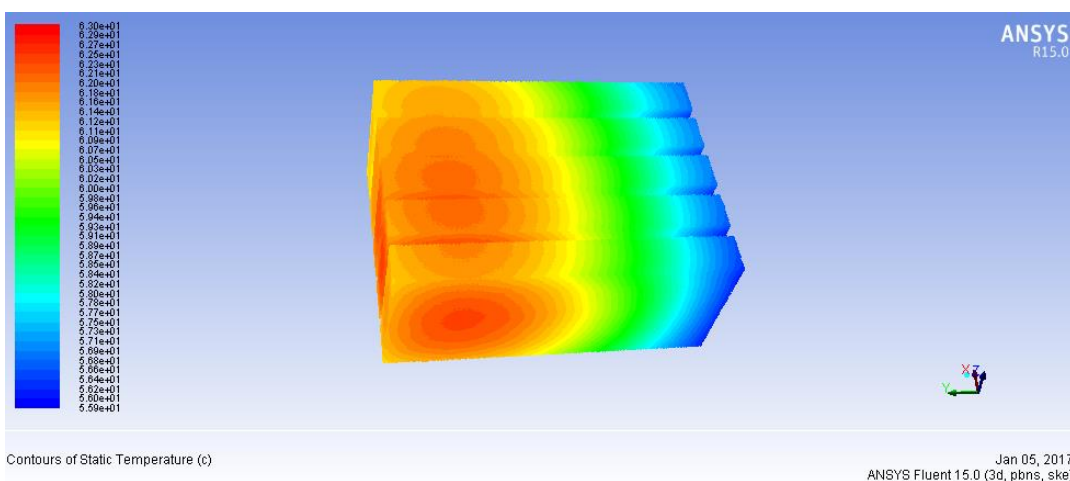


图 5.6 风速 15m/s 时电池组温度分布云图

Fig5.6 temperature field distribution of battery pack in speed of 15m/s

从图 5.4 可知，风速是 10m/s 时，迭代计算到 143 步收敛。从图 5.5 可知，

当电池组冷却风速为 10m/s 时, 电池组最高温度为 68.5℃, 最大温差为 7.3℃, 最大温升为 30.5℃。从图 5.6 可知, 当电池组冷却风速为 15m/s 时, 电池组最高温度为 63.0℃, 最大温差为 7.1℃, 最大温升为 25℃。为了便于观察每个电池电

表 5.2 风速 10m/s 电池组单体关键参数

Tab5.2 key parameters of battery cell in speed of 10m/s

关键参数	最低温度/℃	最高温度/℃	最大温差/℃
电池 1	61.3	68.1	6.8
电池 2	61.2	68.5	7.3
电池 3	61.4	68.5	7.1
电池 4	61.3	68.1	6.8
电池 5	61.4	67.7	6.3

表 5.3 风速 15m/s 电池组单体关键参数

Tab5.3 key parameters of battery cell in speed of 15m/s

关键参数	最低温度/℃	最高温度/℃	最大温差/℃
电池 1	56.1	62.6	6.5
电池 2	55.9	63.0	7.1
电池 3	55.9	62.9	7.0
电池 4	55.9	62.6	6.7
电池 5	55.9	62.2	6.3

对比表 4.8 和表 5.2 可知, 在风速相同的情况下, 在电池箱上下加入了铝板之后, 2 号电池最大温差从 18℃减到了 7.3℃; 对比表 4.9 和表 5.3 可知, 2 号电池最大温差从之前的 14℃降低到了 7.1℃。以上数据说明铝板对提升电池组温度均匀性的作用很明显, 温差降低非常明显, 能够将电池组的最大温差控制在 10℃以内。而且每个电池单体的最大温差都很接近, 说明各个电池单体的工作环境温度条件都相差不大, 能够保证各个电池单体的工作性能一致, 有利于延长电池组的使用寿命。

但是从表中同样可以看出, 在冷却风速为 15m/s 时电池组的最高温度仍然超

过了 60℃，一般情况下电池组的温度控制在 60℃ 以内，所以该结构虽然能解决温度均匀性问题，但是在高倍率放电情况下电池组温度仍然会超过使用范围。因此，为了既能满足最高温度不超过 60℃ 和电池组温差控制在 10℃ 以内的要求，在炎热的夏天必须使用空调风来冷却电池组。在外界环境温度为 38℃ 时，进口风速为 10m/s，采用空调风（温度为 25℃）来冷却电池组，在达到平衡状态时的温度分布云图如图 5.7 所示，各电池单体关键参数如表 5.4 所示。

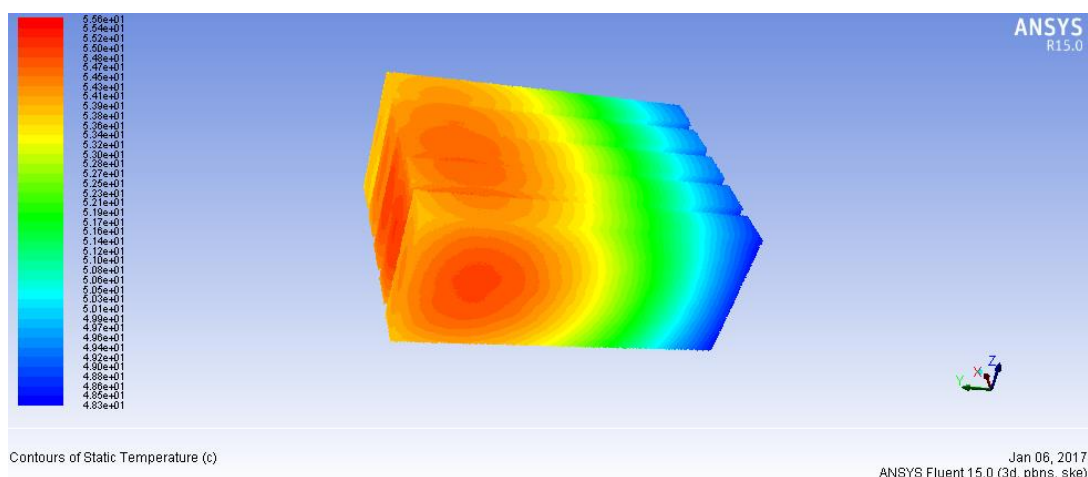


图 5.7 空调风速 10m/s 时电池组温度分布云图

Fig5.7 temperature field distribution of battery pack in air-condition wind speed of 15m/s

表 5.4 空调风速 10m/s 电池组单体关键参数

Tab5.4 key parameters of battery cell in air-condition wind speed of 10m/s

关键参数	最低温度/℃	最高温度/℃	最大温差/℃
电池 1	48.3	55.1	6.8
电池 2	48.3	55.6	7.3
电池 3	48.4	55.5	7.1
电池 4	48.3	55.2	6.9
电池 5	48.4	54.8	6.4

结合图 5.7 和表 5.4 可以看出，电池组最高温度为 55.6℃，最大温差为 7.3℃，最大温升为 17.6℃。最高温度和最大温差均控制在适宜范围内，说明该电池组改进结构在炎热的夏天采用空调风冷却电池组，风速只需要 10m/s 就可以保证电池组在适宜的温度范围内工作。满足第四章提出的最适风速 10m/s，而且不超过轴流风机最大风速 15m/s。

电动汽车高倍率放电时间一般不长，不会长期产生大量热量导致热量集中，

所以实际上电池组在空调风速为 10m/s 时的最高温度应该会低于 55℃，最低温度同样会低于 48℃。因此，在高温高倍率放电条件下，采用空调风冷却电池组最佳风速应选择 10m/s，既可以保证电池组正常工作，又不会带来很大的噪声。

5.4 低温（0℃）条件下温度场研究及最佳风速的选择

在冬天的时候气温比较低，本文以典型环境温度为 0℃ 时来进行电池组温度场的研究。分别采取不同的风速进行温度场仿真实验，探究在低温下综合最佳风速选择。同样采取 2C 放电倍率，风速分别为 5m/s、8m/s、10m/s 和 15m/s，在迭代计算收敛之后，对应的温度分布云图分别如图 5.8、图 5.9、图 5.10 和图 5.11 所示，对应风速条件下各个电池单体温度关键参数分别如表 5.5、表 5.6、表 5.7 和表 5.8 所示。

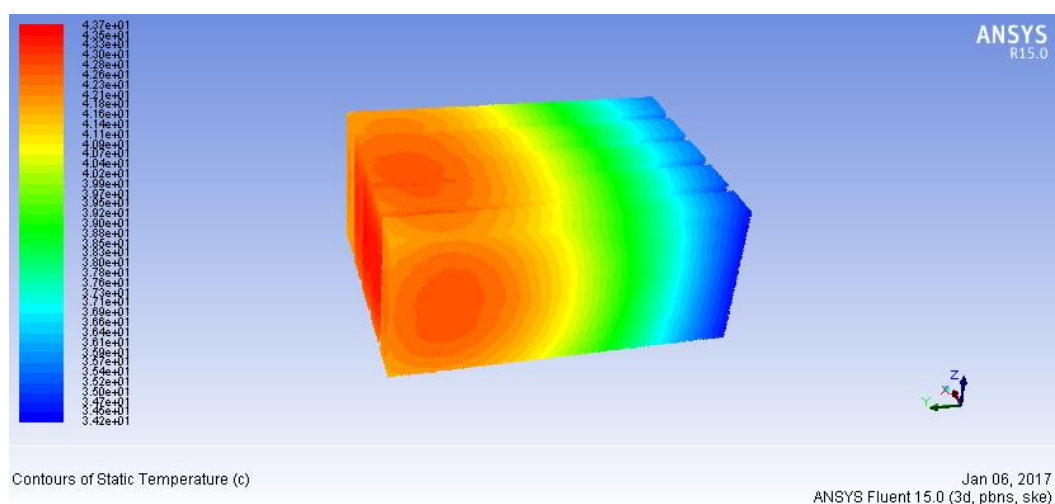


图 5.8 低温、风速 5m/s 时电池组温度分布云图

Fig5.8 temperature field distribution of battery pack in speed of 5m/s under low temperature

表 5.5 低温、风速 5m/s 电池组单体关键参数

Tab5.5 key parameters of battery cell in speed of 5m/s under low temperature

关键参数	最低温度/℃	最高温度/℃	最大温差/℃
电池 1	34.3	43.0	8.7
电池 2	34.3	43.7	9.4
电池 3	34.4	43.7	9.3
电池 4	34.2	43.4	9.2
电池 5	34.4	42.7	8.3

结合图 5.8 和表 5.5 可以看出：在 2C 放电倍率条件下，冷却空气风速为 5m/s 时，电池组最高温度为 43.7℃，最大温差为 9.4℃，最大温升 43.7℃。温升比较高，而且电池组最大温差接近 10℃，说明在这种较高的放电倍率下，虽然电池组最高温度在理想温度范围内，但是电池组产生的热量并不能及时在电池单体各部位散开，导致温度有局部集中现象、温差较大，因此需要提高风速。

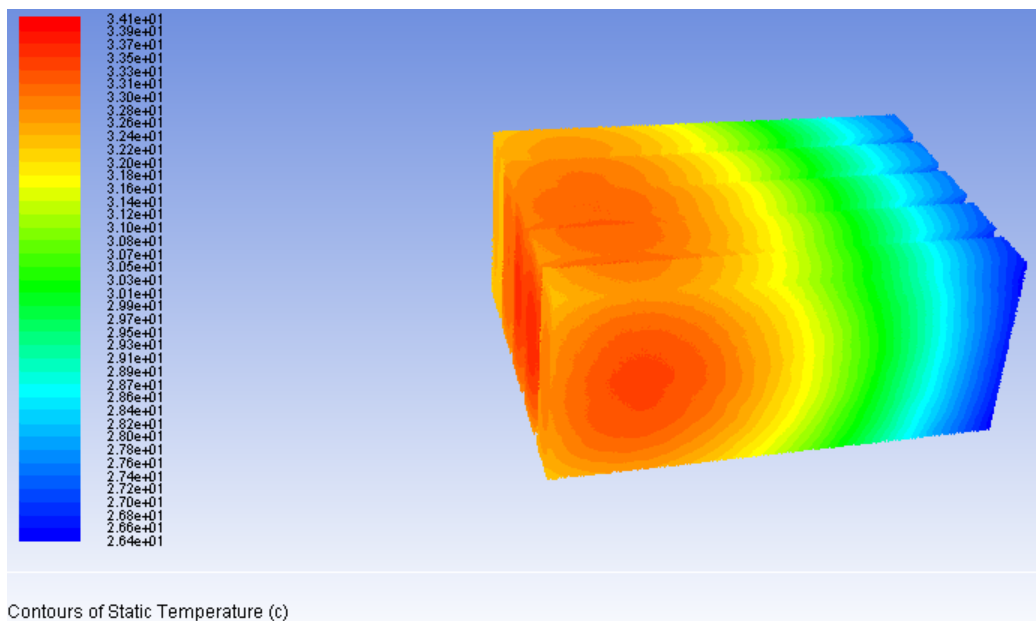


图 5.9 低温、风速 8m/s 时电池组温度分布云图

Fig5.9 temperature field distribution of battery pack in speed of 8m/s under low temperature

表 5.6 低温、风速 8m/s 电池组单体关键参数

Tab5.6 key parameters of battery cell in speed of 8m/s under low temperature

关键参数	最低温度/℃	最高温度/℃	最大温差/℃
电池 1	26.5	33.6	7.1
电池 2	26.5	34.1	7.6
电池 3	26.6	34.0	7.4
电池 4	26.4	33.7	7.3
电池 5	26.5	33.2	6.7

结合图 5.9 和表 5.6 可以看出：在 2C 放电倍率条件下，冷却空气风速为 8m/s 时，电池组最高温度为 34.1℃，最大温差为 7.6℃，最大温升 34.1℃。相比较于风速为 5m/s 时，电池组各项温度关键参数均在合理范围内，温差不大，电池组温度均匀性良好，风速仅增加 3m/s 就足以满足电池箱的散热要求。

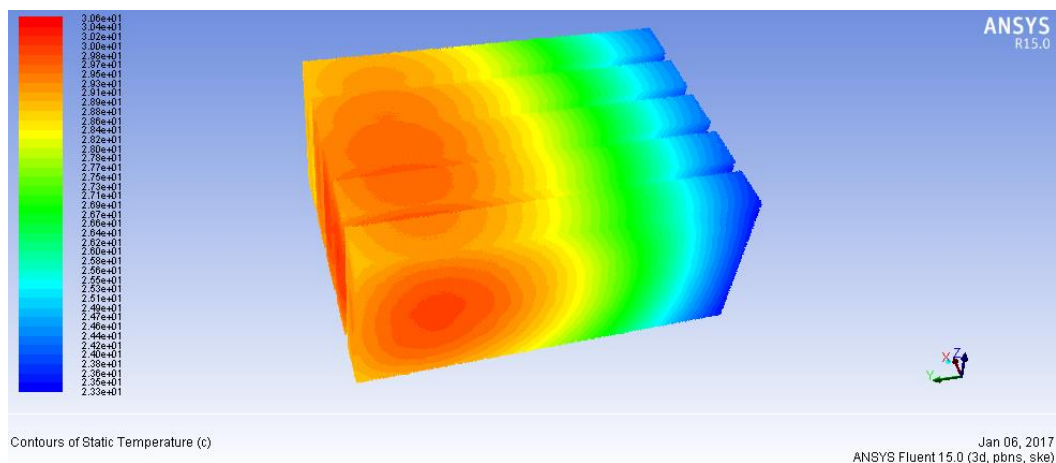


图 5.10 低温、风速 10m/s 时电池组温度分布云图

Fig5.10 temperature field distribution of battery pack in speed of 10m/s under low temperature

表 5.7 低温、风速 10m/s 电池组单体关键参数

Tab5.7 key parameters of battery cell in speed of 10m/s under low temperature

关键参数	最低温度/℃	最高温度/℃	最大温差/℃
电池 1	23.3	30.1	6.8
电池 2	23.3	30.6	7.3
电池 3	23.4	30.5	7.1
电池 4	23.3	30.2	6.9
电池 5	23.4	29.8	6.4

结合图 5.10 和表 5.7 可以看出：在 2C 放电倍率条件下，冷却空气风速为 10m/s 时，电池组最高温度为 30.6℃，最大温差为 7.3℃，最大温升 30.6℃。相比较于风速为 8m/s 时，电池组最高温度下降 3.5℃，最大温差仅下降 0.3℃，性能提升比较小，但是要消耗更多的能量，因此没有必要选择 10m/s 的风速。

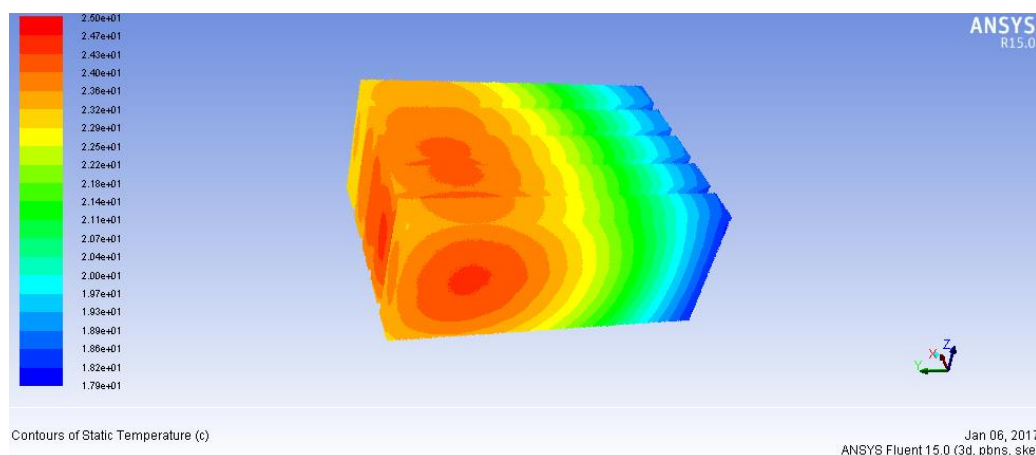


图 5.11 风速 15m/s 时电池组温度分布云图

Fig5.11 temperature field distribution of battery pack in speed of 15m/s under low temperature

表 5.8 风速 15m/s 电池组单体关键参数

Tab5.8 key parameters of battery cell in speed of 15m/s under low temperature

关键参数	最低温度/°C	最高温度/°C	最大温差/°C
电池 1	18.1	24.6	6.5
电池 2	17.9	25.0	7.1
电池 3	17.9	25.0	7.1
电池 4	17.9	24.6	6.7
电池 5	17.9	24.2	6.3

结合图 5.11 和表 5.8 可以看出：在 2C 放电倍率条件下，冷却空气风速为 15m/s 时，电池组最高温度为 25.0°C，最大温差为 7.1°C，最大温升 25.0°C。相较于风速为 10m/s 时，电池组最高温度下降 5.6°C，最大温差仅下降 0.2°C。因此可以得出以下结论：随着风速的进一步提高对于电池组温度均匀性的提升效果越来越不明显，但是却消耗越来越多的能量。

基于以上不同风速的分析，可以确定：在 2C 放电倍率、低温（0°C）条件下最佳风速为 8m/s，既能满足电池组散热的要求，同时也不会带来很大的噪声。

5.5 常温（25°C）条件下温度场研究及最佳风速的选择

在中国大部分地区温度极低的时间段很少，温度极高的时间段也很少，一年当中 20°C 左右居多。因此，本节就针对常温 25°C 进行电池组温度场仿真，并且

对最佳风速进行研究,选出常温下高放电倍率时的最佳风速。基于上节分析可知,在常温下最佳风速应该不会低于低温条件下最佳风速 8m/s。因此,同样采取 2C 放电倍率,分别采取自然风速 8m/s、10m/s 进行温度场仿真分析。在迭代计算收敛时,对应的温度分布云图分别如图 5.12、图 5.13 所示,对应风速条件下各个电池单体温度关键参数分别如表 5.9、表 5.10 所示。

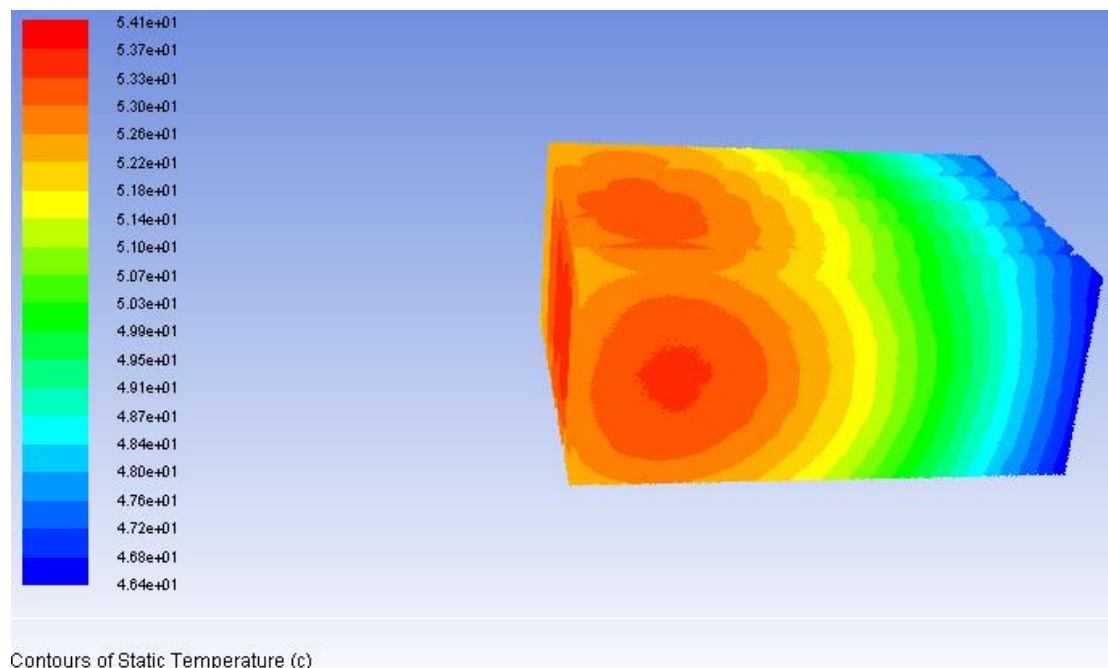


图 5.12 风速 8m/s 时电池组温度分布云图

Fig5.12 temperature field distribution of battery pack in speed of 8m/s

表 5.9 风速 8m/s 电池组单体关键参数

Tab5.9 key parameters of battery cell in speed of 8m/s

关键参数	最低温度/°C	最高温度/°C	最大温差/°C
电池 1	46.5	53.6	7.1
电池 2	46.5	54.0	7.5
电池 3	46.6	54.0	7.4
电池 4	46.4	53.7	7.3
电池 5	46.5	53.2	6.7

结合图 5.12 和表 5.9 可知:在 2C 放电倍率条件下,冷却空气风速为 8m/s

时，电池组最高温度为 54.0℃，最大温差为 7.5℃，最大温升 29.0℃。电池组最高温度略高，不是锂离子电池最理想的工作温度，可以进一步提升风速来降低电池组最高温度。

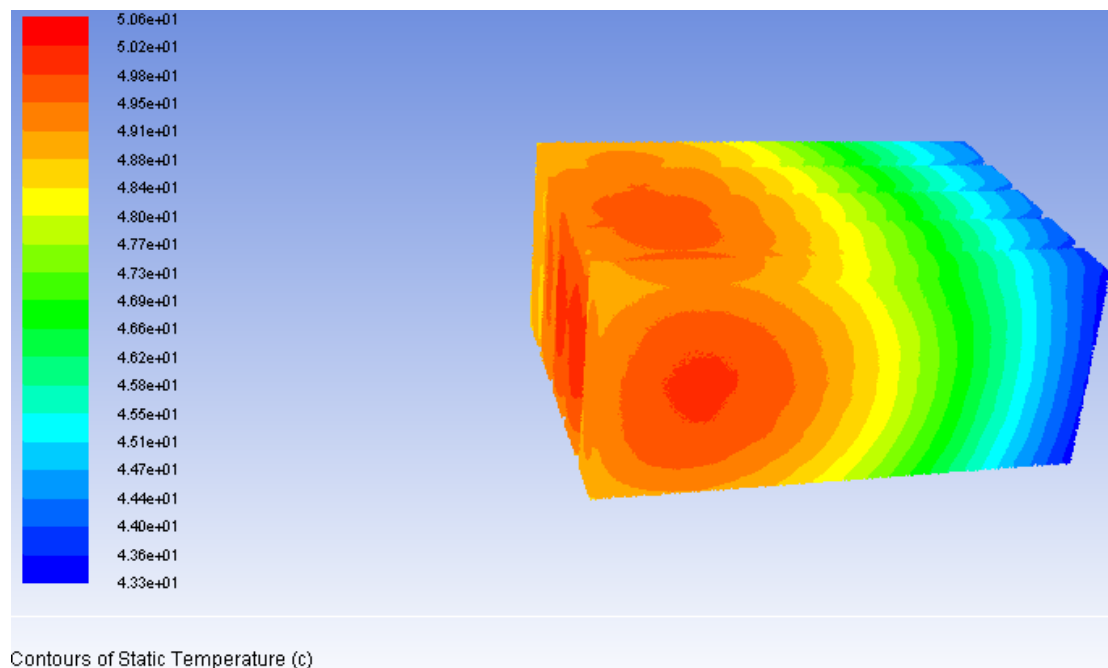


图 5.13 风速 10m/s 时电池组温度分布云图

Fig5.13 temperature field distribution of battery pack in speed of 10m/s

表 5.10 风速 10m/s 电池组单体关键参数

Tab5.10 key parameters of battery cell in speed of 10m/s

关键参数	最低温度/℃	最高温度/℃	最大温差/℃
电池 1	43.3	50.1	6.8
电池 2	43.3	50.6	7.3
电池 3	43.4	50.5	7.1
电池 4	43.3	50.2	6.9
电池 5	43.4	49.8	6.5

结合图 5.13 和表 5.10 可知：在 2C 放电倍率条件下，冷却空气风速为 10m/s 时，电池组最高温度为 50.6℃，最大温差为 7.3℃，最大温升 25.6℃。电池单体温度关键参数都在理想温度范围内。相比较于风速为 8m/s 时，电池组最高温度

下降 3.4℃，最大温差下降 0.2℃，使电池组最高温度接近 50℃，满足锂离子电池适宜长时间工作温度条件。由于仿真条件是忽略了电池箱体外壁微弱的对流换热，实际上电池组最高温度应该低于 50℃。

因此，在常温 2C 放电倍率条件下，最佳风速应该选择 10m/s 就可以满足使用要求，不需要更高的风速。

5.6 本章小结

本章主要针对电池组高倍率（2C）放电时温度均匀性提升进行研究，提出在电池上下表面增加 3 毫米的薄铝板可以极大提升电池组温度场分布的均匀性。这是由于铝板的热导率比较高，可以快速将电池组局部产生的热量在整个电池组中撒开，以达到温度场均匀分布的目的。

同时，对不同工况下的温度场进行研究，得出不同环境条件下的最佳风速的选择如下：

①在高温（38℃）高倍率放电条件下，必须采用空调风冷却电池组，才能使电池组处在合理温度范围内。最佳风速应选择 10m/s，既可以保证电池组正常工作，又不会带来很大的噪声。

②在低温（0℃）高倍率放电条件下，采用自然风冷却方式即可，最佳风速选择 8m/s，可以满足电池组散热的要求。随着风速的进一步提高对于电池组温度均匀性的提升效果越来越不明显，但是却消耗越来越多的能量。

③在常温（2C）放电倍率条件下，采用自然风冷却方式即可，最佳风速选择 10m/s 就可以满足使用要求，不需要更高的风速。

第六章 全文总结及展望

6.1 全文总结

随着电动汽车产业的快速发展,纯电动汽车越来越普及。动力电池作为纯电动汽车唯一能源,其地位越来越重要。锂离子电池因具有比能量高、单体电池电压高、比功率大、自然放电小、无记忆效应和循环寿命长等优点,一跃成为纯电动汽车主导热源。只有先对锂离子电池的生热和传热进行深入的研究,才能更好的指导动力电池箱的设计。本文主要研究工作和成果如下:

(1) 通过查阅国内外电动汽车动力电池和电池热管理系统的相关资料,了解锂离子电池的结构和工作原理及生热和传热特性,全面了解纯电动汽车电池热管理系统研究现状及研究热点。

(2) 对方形锂离子电池充放电特性、发热机理和传热特性进行深入研究。重点研究了锂离子电池发热机理、失效机理和传热特性。针对锂离子在高温下的性能特点进行深入的研究,得出磷酸铁锂电池的放电容量与环境温度之间的一个拟合公式。

(3) 对研究对象方形磷酸铁锂电池单体建立三维仿真模型,在常温(25℃)下,利用 fluent 软件对其进行不同放电倍率条件下的仿真实验。得出放电倍率分别为 0.5C、1C、2C 三种条件下的温度分布云图,得出放电稳定时电池单体最大温升、最高温度和最大温差。发现在 2C 放电倍率时,电池单体最高温度远远超过最适温度(60℃)范围,说明了自然对流冷却方式不能满足锂离子电池组在不同放电倍率条件下正常工作。因此,需要对电池组进行热管理,需要设计热管理系统来保证电池组在不同放电倍率条件下都能够正常工作。

(4) 采用并行通风强制空气冷却方式设计电池箱散热流道,利用 fluent 软件中 $k-\varepsilon$ 湍流模型求解,仿真分析电池组散热情况,得到不同放电倍率条件下电池箱的温度分布云图。发现在高倍率放电时,电池组温度超过锂离子电池正常工作温度范围。因此,需要对初始设计的电池箱散热流道进行优化设计。提出采用楔形导流板、四周圆角代替直角和双出口的优化方案,同时对优化方案进行不同放电倍率下的温度场仿真。仿真结果证明优化结果能够有效降低电池组在高倍率放电时的最高温度。研究进风口风速对电池组散热效果的影响,一系列仿真结果表明,需要将风速限制在一定范围(10m/s)是有必要的。

(5) 不同工况下,针对电池组高倍率(2C)放电时温度均匀性提升进行研究,在双出口结构方案基础上进一步改进。在电池组上下加薄铝板提升电池组温度场的均匀性。在炎热的夏天(38℃)1C 放电倍率调下对改进模型进行仿真验

证,结果表明改进结构可以显著降低电池组最大温差,极大的提升电池组温度场的均匀性。分别就高温、常温和低温三种工况下,电池组高倍率(2C)放电时最佳风速进行选择。仿真结果表明,三种工况下最佳风速分别为 10m/s、10m/s、8m/s,其中高温时必须使用空调风冷却。

6.2 研究展望

纯电动汽车的发展如火如荼,纯电动汽车电池热管理系统成为了研究的热点,本文利用 fluent 软件对电池组热特性进行了研究,取得了一定的成果,对于以后纯电动汽车电池箱体的设计具有一定的参考价值。但因本人专业水平有限,受到实验条件的限制,本文尚有很多问题没有解决。

(1) 在确定锂离子电池的单体热物性参数时,仅根据质量平均加权法来计算得到等效电池模型的参数,没有相应的实验来验证。如果有实验条件,可以根据实验结果对参数进行一定的修正。

(2) 锂离子电池在工作过程中,电池内阻会随着 SOC 有微小的变化,本文当做定值来处理;把锂离子等效为一个整体,与实际情况有一定的出入,如果条件允许,应该把锂离子电池单体分层建模,从而更好的反应实际情况。

(3) 本文仅针对稳态时电池组温度场仿真,后期可以进行瞬态的温度场仿真,更能实时反应出电池组温度场分布。

参考文献

- [1] 王睿. 2013 年世界能源供需浅析——《BP 世界能源统计 2014》解读[J]. 当代石油石化, 2014, 22(9):37-46.
- [2] 王震坡, 孙逢春, 刘鹏. 电动汽车原理与应用技术[M].北京: 机械工业出版社,2014.
- [3] 张毅, 孙洪磊. 《“十一五”我国新增炼油能力全部被新增汽车消耗-财经频道-新华网》. http://news.xinhuanet.com/fortune/2010-09/04/c_13478007.htm
- [4] 《工信部新车油耗限值标准发布 2016 年执行-央广网》. http://auto.cnr.cn/gdbkxw/20151225/t20151225_520922422.shtml
- [5] 苗坤坤. 北京市电动汽车基础设施商业模式创新研究[D].北京: 北京交通大学经济管理学院, 2016.
- [6] 王迪, 王旭东. 浅谈纯电动汽车的发展与研究现状[J].伺服控制, 2012, 7: 35-39.
- [7] 刘悦. 电动汽车发展现状研究[D].重庆大学, 2014.
- [8] 熊碧云, 康海波. 电动车动力锂离子电池的现状与发展趋势[J]. 电源技术, 2013, 137 (5): 880-882
- [9] 宋永华, 阳岳希, 胡泽春. 电动汽车电池的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2011, 35 (4): 1-7.
- [10] 李伟. 电动汽车电池现状及发展趋势研究[J]. 科技创新与应用, 2014(35):60-60.
- [11] 赵佳腾, 饶中浩, 刘新健, 等.大功率锂离子动力电池组散热特性数值模拟[J]. 新能源进展, 2014, 2 (6): 471-473.
- [12] 黄万友, 程勇, 曹红, 等. 纯电动汽车能量回馈效率特性测试分析[J]. 机械工程学报, 2012, 48 (12) :88-95
- [13] 霍宇涛, 饶中浩, 赵佳腾, 刘臣臻. 低温环境下电池热管理研究进展[J]. 新能源进展, 2015, 3 (1) :53-58.
- [14] 吴宏, 李育隆, 杨凯. 电动汽车电池箱通风冷却结构的研究[J]. 汽车工程, 2012, 34 (6): 556-565.
- [15] 李涛. 纯电动汽车锂离子电池组热效应及电池组散热结构优化[D].重庆大学.2013
- [16] 姬芬竹, 刘丽君, 杨世春, 徐斌. 电动汽车动力电池生热模型和散热特性[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40 (1): 18-24.
- [17] 郭艳萍, 周秋梅, 刘英泽. 电动汽车动力电池组风冷结构仿真及优化[J].汽车工程师, 2013.
- [18] 肖红林, 郭明明, 李洪亮. 电动汽车动力电池组散热特性数值模拟研究[J].汽车工程, 2011, 33 (11): 998-1002.

- [19] 葛子敬, 臧孟炎, 叶鹏, 谢金红. 电动汽车锂离子电池组风冷散热仿真分析[J]. 机械设计与制造工程, 2015, 44 (10): 24-28.
- [20] 胡小峰. 电动汽车锂离子电池组无机超导热管散热性能研究[D]. 湖南大学, 2012
- [21] 王治华, 殷承良. 电动汽车用 LiFePO_4 锂离子电池安全性分析[J]. 电池工业, 2008, 13 (3) :169-172.
- [22] 李平, 安富强, 张剑波, 王浩然. 电动汽车用锂离子电池的温度敏感性研究综述[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5 (3): 224-237.
- [23] 王宏伟. 国内电动车用动力锂离子电池现状[J]. 电子元件与材料, 2012, 31 (6): 84-86.
- [24] 邓元望, 钟俊夫, 张上安, 王兵杰. 混合动力车用锂电池相变材料-空气耦合散热[J]. 电源技术, 2013, 37 (10): 1751-1754.
- [25] Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. General energy balance for battery systems[C]// The Fall Meeting of the Electrochem Soc. Presented at the Fall Meeting of the Electrochem. Soc. New Orleans, 17 Oct. 1984, 1984:5-12.
- [26] Botte G G. Influence of Some Design Variables on the Thermal Behavior of a Lithium-Ion Cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1999, 146(3):914.
- [27] Al-Hallaj S, Selman J R. Thermal modeling of secondary lithium batteries for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications ☆[J]. Marine Electric & Electric Technology, 2004, 110(2):341-348.
- [28] Pesaran A A, Keyser M. Thermal characteristics of selected EV and HEV batteries[C]// Applications and Advances, 2001. the Sixteenth Battery Conference on. IEEE, 2001:219-225.
- [29] Veth C, Dragicevic D, Merten C. Thermal characterizations of a large-format lithium ion cell focused on high current discharges[J]. Journal of Power Sources, 2014, 267(3):760-769.
- [30] Wang W, Cheng L, Peng T, et al. Thermal Characteristic Analysis of Power Lithium-ion Battery System for Electric Vehicle[C]// Third International Conference on Digital Manufacturing and Automation. 2012:967-971.
- [31] 刘振军, 林国发, 胡明辉, 等. 基于 CFD 的纯电动汽车锂电池包温度场数值模拟[J]. 世界科技研究与发展, 2012, 34(6):923-926.
- [32] 欧阳唐文, 张兴娟, 杨春信. 基于 CFD 的锂电池温度场仿真[J]. 电子机械工程, 2013, 29(2): 14-17.
- [33] 李小爽. 动力锂离子电池温度场热分析[J]. 电源技术, 2014, 38(4):636-639.
- [34] 彭影, 黄瑞, 俞小莉, 等. 电动汽车锂离子动力电池冷却方案的对比研究[J]. 机电

- 工程, 2015, 32(4):537-543.
- [35] Cikanek S R, Bailey K E. Electric Vehicle Braking System [C]. The 14th International Electric Vehicle Symposium and Exposition . Orlando USA: Electric Vehicle Association of the America, 1997, CIKA_SB1.
- [36] 辛乃龙. 纯电动汽车锂离子动力电池组热特性分析及仿真研究[D]. 吉林大学, 2012.
- [37] 霍宇涛, 饶中浩, 刘新健, 赵佳腾. 基于液体介质的电动汽车动力电池热管理研究进展[J]. 新能源进展, 2014, 2 (2): 135-140.
- [38] 李新静, 张佳璐, 魏引利, 刘炎金, 丁绍玉. 锂离子动力电池的温升特性分析[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32 (6): 908-912.
- [39] Lamb J, Orendorff C J, Steele L A M, et al. Failure propagation in multi-cell lithium ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2015, 283:517-523.
- [40] Saw L H, Ye Y, Tay A A O. Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113:1032-1045
- [41] 杨志刚, 黄慎, 赵兰萍. 电动汽车锂离子电池组散热优化设计[J]. 计算机辅助工程, 2011, 20 (3): 1-5.
- [42] 车杜兰. 电动汽车锂离子电池包热特性研究与优化设计[D]. 武汉理工大学, 2009.
- [43] 彭强. 电动汽车用锂离子动力电池热效应研究[D]. 吉林大学, 2012.
- [44] Yuge R, Tamura N, Manako T, et al. High-rate charge/discharge properties of Li-ion battery using carbon-coated composites of graphites, vapor grown carbon fibers, and carbon nanohorns[J]. Journal of Power Sources, 2014, 266(10):471-474.
- [45] 罗曼. 纯电动汽车用锂离子电池组液体冷却散热结构分析及优化[D]. 重庆大学, 2014.
- [46] 《锂离子动力电池失效原理-新能源纯电动汽车网》.
<http://ddc.greenwheel.com.cn/ddqcdc/car-2953.html>
- [47] 赵立军, 佟钦智, 魏平涛. 电动汽车结构与原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [48] 江超. 纯电动汽车用动力电池组热特性研究[D]. 合肥工业大学, 2015.
- [49] 李腾, 林成涛, 陈全世. 锂离子电池热模型研究进展[J]. 电源技术, 2009, 33 (10): 927-932.
- [50] Panchal S, Dincer I, Agelin-Chaab M, et al. Experimental and theoretical investigations of heat generation rates for a water cooled LiFePO₄ battery[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016, 101:1093-1102.
- [51] 刘振军, 林国发, 秦大同等. 电动汽车锂电池组温度场研究及其结构优化[J]. 汽车工程, 2012, 34 (01): 80-84.
- [52] 蔡飞龙, 许思传, 常国峰. 纯电动汽车用锂离子电池热管理综述[J]. 电源技术,

- 2012, 36 (09): 1410-1413.
- [53] Lin CJ, Xu SC, Li Z. Thermal analysis of large-capacity LiFeO₄ power batteries for electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2015,294 (30), 633-642.
- [54] Sun X X, Wang Y C, Wang F C. Thermal Management Technology for Series-parallel HEV [C]. Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Xi'an, China, 2010: 213—218.
- [55] 林国发. 纯电动汽车锂电池组温度场研究及散热结构优化[D]. 重庆大学, 2011.
- [56] 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.
- [57] 费朝辉, 王学林, 凌玲,等. 基于 CFD 的锂离子动力电池箱散热分析[J]. 机械与电子, 2012(7):13-16.
- [58] 张靖周. 高等传热学.第 2 版[M]. 科学出版社, 2015.
- [59] 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.
- [60] 王福军. 计算流体力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 1-22.
- [61] 吴光中, 宋婷婷, 张毅. FLUENT 基础入门与案例精通[M]. 电子工业出版社, 2012.
- [62] 周俊杰, 徐国权, 张华俊. FLUENT 工程技术与实例分析: 全 2 册[M]. 中国水利水电出版社, 2013.
- [63] Matthias Wagner, 陆立明编. 热分析应用基础[M]. 东华大学出版社, 2011.
- [64] 傅德熏, 马延文. 计算流体力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [65] FLUENT Inc[J]. FLUENT 6.1.22 User's Guide, 2003.

攻读硕士学位期间的学术活动及成果情况

1) 参加的学术交流与科研项目

- (1) 电动汽车轻量化及动力传动系统关键技术合作研究(编号: 2014DFA80440), 国家国际科技合作专项项目, 2015-2017。

2) 发表的学术论文(含专利和软件著作权)

- (1) 赵韩, 方雄灿. 电动汽车锂离子动力电池组温度场仿真及散热结构优化[J]. 合肥工业大学学报, 2016. (对应本文第4章)
- (2) 赵韩, 方雄灿, 等. 电动汽车减速器常用齿轮材料疲劳寿命计算软件, 中国软件著作权: 2016SR235847.
- (3) 赵韩, 方雄灿, 等. 圆柱直齿轮按赤面接触强度设计计算软件, 中国软件著作权: 2016SR235866.

厚德 笃学 崇实 尚新

中国热管理网 www.reguanli.com