



中国热管理网

WWW.REGUANLI.COM

分类号 U469.72

单位代码 10618

密 级 公开

学 号 2150940012



重庆交通大学

专业硕士学位论文

电动汽车锂动力电池组液气复合冷却 结构与散热分析

研究生姓名: 皇献清

导师姓名及职称: 李军 教授

申请专业学位类别 工程硕士 学位授予单位 重庆交通大学


论文提交日期 2018 年 4 月 24 日

专业领域名称 车辆工程 论文答辩日期 2018 年 6 月 03 日

2018 年 6 月 5 日

重庆交通大学学位论文原创性声明


本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期：2018 年 6 月 7 日

重庆交通大学学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆交通大学可以将本学位论文的全部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和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本人学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并进行信息服务（包括但不限于汇编、复制、发行、信息网络传播等），同时本人保留在其他媒体发表论文的权利。


学位论文作者签名：

日期：2018 年 6 月 7 日

指导教师签名：

日期：2018 年 6 月 7 日

本人同意将本学位论文提交至中国学术期刊（光盘版）电子杂志社 CNKI 系列数据库中全文发布，并按《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》规定享受相关权益。

学位论文作者签名：

日期：2018 年 6 月 7 日

指导教师签名：

日期：2018 年 6 月 7 日

Designing Liquid-gas Cooling Structure and Analyzing Heat Dissipation for Li-Ion Battery Packs of Electric Vehicles

A Dissertation Submitted for the Degree of Master

Candidate: Huang Xianqing

Supervisor: Prof. Li Jun

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China

摘 要

随着节能环保的思想深入人心，电动汽车将会成为未来的主流交通工具。锂离子动力电池作为纯电动汽车的主流动力源，具有环保、低自放电率、长循环寿命等优势。锂离子动力电池是整车的核心部件，在充放电过程中其由于自身的特性会产生大量的热量。这些热量若不能快速地散发出去，会导致锂电池组的温度急剧上升，严重影响电池组的性能以及循环寿命。严重时可能造成热失控问题，车辆出现燃烧的情况，危及车辆和人身安全。故而，对锂电池组进行热管理十分有必要。

本文以磷酸铁锂单体 (LiFePO_4) 为研究对象，建立实体三维模型和生热仿真模型，应用仿真软件模拟单体的温度分布。再根据此分析结果，设计磷酸铁锂动力电池模组的冷却结构和箱体结构。采用被动风冷和液冷两种方式，通过 CFD 软件对电池模组进行散热分析，验证仿真结果是否满足电池模组的设计目标。

本文研究的主要内容有以下几个方面：

① 阐述长方形 LiFePO_4 电池结构及充放电时电池内部 Li^+ 的移动规律，分析 LiFePO_4 电池的生热来源和传热特点。且阐述计算流体的四个基本方程以及方程求解的一般步骤。

② 合理地简化 LiFePO_4 电池单体结构，建立生热速率模型和三维模型。且确定电池单体的密度、空间方向上的导热系数、比热容等参数值以及生热速率函数表达式。应用 fluent 软件分析在常温环境和自然对流条件下电池单体以不同倍率放电后的温升云图。设置电池单体模型的验证实验，证明热模型的可靠性。

③ 以纯电动车的动力性和续航里程为约束目标，在 ADVISOR 中建立整车模型。并在不同工况下对整车模型进行仿真，得到整车和 LiFePO_4 电池模组的相关参数的变化曲线。同时以满足车辆最大动力性为目标，得到极限工况下电池模组的生热速率与时间 ($q-t$) 关系式。

④ 设计冷却管道和箱体外形的结构，并建立 LiFePO_4 电池模组的几何模型。且设定 LiFePO_4 模组的热管理目标。在复合冷却条件下，分析 LiFePO_4 模组的温升情况，其结果满足电池组最高温度和单体温差的设计要求。

关键字：电动汽车；磷酸铁锂电池；散热结构；复合散热模型

ABSTRACT

With the energy-saving and environmental-protecting ideas deeply rooted in people's minds, electric vehicles will become the mainstream transportation in the future. As the mainstream power source for battery electric vehicles, power lithium batteries have the advantages such as environmental protection, low self-discharge rate, and long cycle life, etc. Lithium-powered batteries are the core components of the vehicle. They generate a lot of heat due to their own characteristics during charge and discharge. If these heats cannot be quickly emitted, the temperature of the lithium battery pack will rise sharply, which will seriously affect the performance and cycle life of the battery pack. Even worse, it may cause thermal runaway problems and the vehicle will burn, which will endanger the safety of vehicles and people. Therefore, it is necessary to perform thermal management of the lithium battery pack.

In this paper, with the lithium iron phosphate monomer (LiFePO_4) as the research object, solid three-dimensional model and heat simulation model are established, and the temperature distribution of the monomer is simulated by the simulation software. Based on the analysis result, the cooling structure and the box structure of the lithium iron phosphate power battery module are designed. Passive air cooling and liquid cooling are used to analyze the heat dissipation of the battery module through CFD software to verify whether the simulation results meet the battery module design goals.

The main contents of this paper's research are as follows:

① The structure of rectangular LiFePO_4 battery and the movement law of Li^+ inside the battery during charge and discharge are introduced. And the heat source and heat transfer characteristics of LiFePO_4 battery are analyzed. The four basic equations for the computational fluid and the general steps for solving the equation are described.

② Rationally simplifying the single structure of LiFePO_4 battery, the heat rate model and three-dimensional model are established. The parameters such as the density of the battery cell, the thermal conductivity in the space direction, the specific heat capacity, and the function expression of the heat generation rate are determined. The fluent software is used to analyze the temperature rise cloud diagrams after the battery cells are discharged at different rates under ambient temperature and natural convection conditions. A battery cell model verification experiment is set up to demonstrate the

reliability of the thermal model.

③ With the power and cruising range of battery electric vehicles as the constraint, an entire vehicle model is built in ADVISOR. The vehicle model is simulated under different operating conditions to obtain the curve of relevant parameters of the vehicle and LiFePO₄ battery modules. At the same time, in order to meet the maximum power of the vehicle as the goal, the relationship between the heat generation rate and the time (q-t) of the battery module under extreme conditions is obtained.

④ The structure of the cooling pipe and the box shape is designed, and the geometric model of the LiFePO₄ battery module is established. And the thermal management goals of the LiFePO₄ module are set and the stress intensity of the pipeline is checked. Under compound cooling conditions, the temperature rise of the LiFePO₄ module is analyzed. The results meet the design goals of the maximum temperature and the monomer temperature difference of the battery pack.

KEY WORDS: Electric vehicle; Lithium iron phosphate battery; Thermal structure; Composite thermal model

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
目 录	IV
1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 电动汽车动力电池的发展	3
1.3 电动汽车 BTMS 概述	4
1.3.1 电动汽车 BTMS 功能	4
1.3.2 电动汽车 BTMS 研究意义	4
1.3.3 锂动力电池组冷却方法	5
1.4 电动汽车 BTMS 国内外研究现状	8
1.4.1 热效应模型的研究现状	8
1.4.2 生热速率模型的研究现状	10
1.4.3 冷却方式的研究现状	11
1.5 主要研究内容	14
2 LiFePO₄ 电池的热特性及 CFD 基础	17
2.1 LiFePO ₄ 电池的结构及反应原理	17
2.1.1 LiFePO ₄ 动力电池的结构	17
2.1.2 LiFePO ₄ 动力电池反应原理	18
2.2 LiFePO ₄ 电池的生热机理	19
2.3 LiFePO ₄ 电池的传热特性	21
2.4 流体力学的理论基础	22
2.5 小结	25
3 LiFePO₄ 单体的热仿真及验证	27
3.1 Fluent 模块简介	27
3.2 LiFePO ₄ 单体电池热仿真及分析	27
3.2.1 建立 LiFePO ₄ 单体热模型	27
3.2.2 LiFePO ₄ 电池各参数的确定	29
3.2.3 LiFePO ₄ 单体的建模与仿真	34
3.3 实验验证	36
3.3.1 实验步骤	36
3.3.2 实验和仿真结果对比分析	37

3.4 小结.....	38
4 多工况下 LiFePO₄ 模组的生热特性分析.....	39
4.1 整车参数和约束目标.....	39
4.2 建立纯电动汽车整车模型.....	39
4.2.1 建立动力电池组模型.....	40
4.2.2 驱动电机及其控制器模型.....	42
4.3 设定整车仿真参数.....	48
4.4 整车仿真工况的结果分析.....	49
4.5 小结.....	54
5 LiFePO₄ 模组结构设计和热仿真分析	55
5.1 LiFePO ₄ 模组热管理设计目标.....	55
5.2 LiFePO ₄ 电池模组及冷却系结构设计	56
5.3 LiFePO ₄ 电池模组各参数确定.....	61
5.4 仿真温度场分析.....	62
5.5 温度场影响因素分析.....	65
5.6 小结.....	68
6 总结与展望	69
6.1 总结.....	69
6.2 展望.....	70
致 谢	71
参考文献	72
在学期间发表的论文和取得的学术成果	77

1 绪论

1.1 研究背景及意义

自 2010 年以来,面对温室效应、城市热岛效应以及能源危机,人们深刻地意识到保护生态环境和节约不可再生资源的重要性,传统汽车已经不在符合新时代发展的潮流,而纯电动汽车将是未来出行必备的主流交通工具。随着石油等一些不可再生资源需求不断增加,很多国家在石油进行了掠夺式开采,有些国家甚至因为石油引发战争,利用石油进行经济制裁。这也导致了石油的产量与需求严重失衡,使其价格不断上涨^[1]。石油是传统汽车的主要动力来源,石油失衡现象将导致全球性的能源危机。截止到 2017 年底,我国汽车的制造量和销售量连续 8 年居于世界第一位。其中汽车的保有量已高达 2.17 亿辆,新能源汽车占比仅为 0.7%,约有 160 万辆。随着我国汽车产业的发展,汽车保有量的增长,对石油的需求和依赖也会持续走高,在能源形势的严峻情形下,汽车工业的能源转型势在必行^[2-3]。

此外,石油、煤炭等不可再生资源消耗量不断加大,环境问题日趋严峻,既严重威胁人类的健康、出行,同时也阻碍了社会的可持续发展。图 1.1 所示为雾霾天气时某地的交通情况。因此,纯电动汽车的诞生以及使用,既能缓解能源压力,又能保护生态环境,是推进和发展绿色交通工具的必然选择。



图 1.1 雾霾天气时某地的交通情况

Fig.1.1 Traffic conditions of the certain place during hazy weather

与燃油汽车(CV)相比较,电动汽车有以下几个方面的显著优点^[4]:

- ① 具有广阔的发展前景:其最主要的优势是利用动力电池驱动电机运转,简化了动力系统,同时降低了城市的噪声和改善了城市的热岛效应。
- ② 电动汽车属于环境友好型汽车:排放很低且可实现零排放,对城市环境保

护较好。即使考虑发电厂排放对环境的污染，发电厂的污染物可以集中处理，达到安全标准再排放。

③ 可利用夜间“谷电”充电：大多数汽车夜间都是停在停车场或者小区内，利用夜间人们用电量较小，对电动汽车进行充电，用“谷电”平抑电网的谷峰差，将极大的提高能源利用的整体经济效益。

④ 具有制动能量回收功能：纯电动汽车的驱动电机具有较宽的调速范围，应用其调速特性，在电动汽车减速制动时可以为电池组充电，实现能量的回收，从而减少动力电池能耗，提高整车经济性。

电动汽车是以电能作为唯一动力来源的新型车辆，其性能受到电池的制备工艺、本身固有属性等相关技术的制约^[5]。近几年来，世界各国的政府机构、科研部门以及公司团队都聚焦在电池产业，旨在研发出能量比高、热稳定性好、循环寿命长以及能实现快充的电池。

电动汽车电池组过热会给整车带来重大的安全隐患，甚至出现燃烧现象危及人身安全。自 2015 年以来，各大媒体纷纷报道各地发生的电动汽车自燃的事件，电动汽车的安全性和可靠性被受到广泛质疑。最被关注的是作为电动汽车行业标杆的特斯拉在 2016 年法国和荷兰发生的自燃事故，事故发生的原因是电池没有进行规范充电操作和受到异物的撞击^[6]。2016 年 1 月，在安徽合肥市某小区内，一辆电动汽车突然燃烧，同时还引燃了两辆轿车和一辆摩托车。经调查发现，汽车的电池组部位先燃烧起来，进而引发整车自燃并引燃了周围的其他车辆^[7]。2015 年 7 月，厦门一辆电动的公交车突然着火，引燃周边 11 辆公交车，导致巨大的经济损失，之后调查，着火的最主要原因是其搭载的动力电池，动力电池的过热引起了这场事故^[8]。可以看出导致上述事故的很大部分原因是电池组的温度过高引起的，那么控制动力电池组的温度就可以有效避免车辆自燃和减少火灾发生率，所以对电池组热管理系统的研究就显得尤为重要。



图 1.2 特斯拉 Model 系的燃烧情形

Fig.1.2 Burning situation of the Tesla Model series

在电池单体成组之后，温度过高对锂电池的容量、SOC 等性能影响十分显著^[9]。由于电池单体紧密排列在密闭的壳体中，电池包的热量不容易传递出去，这样会对电池组的性能产生影响，甚至造成热失控^[10]。故而为了提高电池的安全性和延长循环使用寿命，必须将电池组内电池单体之间的温差和电池组的整体温度控制在合理的范围内。因此，根据动力电池单体的温度分布情况和传热特点，设计出安全可靠的冷却结构和电池组壳体结构以保证电动汽车安全、高效的运行^[11-12]。

1.2 电动汽车动力电池的发展

动力电池经历了四个阶段：铅酸蓄电池——镍基电池——锂基电池——燃料电池，其中燃料电池是最理想的电池，同时也是电池发展的终极目标^[13-14]。此四类电池性能对比，如表 1.1 所示。

表 1-1 四种类型动力电池的性能对比

Tab.1-1 Comparison of performance of four types of power batteries

电池种类	功率密度 (W/kg)	循环次数	最佳温度区间 (°C)	优点
铅酸	90	600	0~40	价格低廉
镍基电池	225	1000 以上	0~40	比能量高
锂基电池	300	1500	0~60	功率密度高
燃料电池	60	——	——	能效高

(1) 铅酸电池

铅酸电池出现的最早，距今已有 150 年的历史。由于其具有体积大、铅污染、高自放电率等缺点，此类电池已逐渐被淘汰掉，目前主要应用于一些低端的电动汽车上^[15]。镍氢电池技术比较成熟，而最近几年，锂离子电池逐渐占据了市场，成为电动汽车车用动力电池的主体，发展前途越来越好，同时一些大型的汽车企业将目光投向了燃料电池。

(2) 镍氢电池

镍氢电池是镍基电池中一种对环境友好型电池，不含重金属。其主要优点是电池的比能量高、功率高以及循环寿命长等，它的缺点是价格较高，对温度敏感、自放电率较大等问题^[16]。

(3) 锂离子电池

锂离子电池是目前的主流电池，与上述两种电池相比，有以下优点^[17]：①高工作电压，单体的工作电压在 3.6V 以上；②高比能量，单体的比能量可达到 150Wh/kg 及以上，是镍基电池的 2 倍；③长循环寿命，深度放电时循环次数有 1000 次以上；④无记忆效应；⑤低自放电率，一般为容量的 5%~9%；⑥清洁环保。

按照正极材料分类，锂离子电池可分为钴酸锂电池（ LiCoO_2 ）、锰酸锂电池（ LiMnO_2 ）、磷酸铁锂电池（ LiFePO_4 ）和三元材料电池等^[18]。锂离子电池在电动汽车上的应用情况：北京奥运纯电动大巴——锰酸锂电池；秦、E6、K9——磷酸铁锂电池；特斯拉 Roadster——钴酸锂电池，Model S 和未上市的小鹏汽车 G3——三元材料电池。

LiFePO_4 电池的优点：具有较高的比容量（ 150Ah/kg ）、充放电平台稳定、热稳定性，耐低温性以及循环寿命高，在车载动力电池和备用电源领域应用广泛，是目前比较热门的正极材料。它的主要缺点是振实密度小、端电压较低、比能量较低等，但随着电池技术的不断突破，其推广程度将进一步加大。

（4） 燃料电池

燃料电池是将反应的化学能转化为电能的装置。燃料电池的优点是效率高、无污染、振动噪声小等。燃料电池缺点是的安全性差、制造成本高、环境适应性差等。燃料电池是电池的理想状态，目前其推广应用很不乐观。

1.3 电动汽车 BTMS 概述

1.3.1 电动汽车 BTMS 功能

电池热管理系统（Battery Thermal Management System）实时检测单体和电池组的温度，且根据温度的大小对电池组进行冷却或者加热，使其工作在适宜的温度范围内，提高电池组的整体性能，并保证其安全、可靠。该系统主要功能有：
①实时对电池组温度准确测量。②低温快速加热，高温快速冷却，保证纯电动汽车运行在复杂工况下，电池组都可以工作在理想的温度范围^[19]。

1.3.2 电动汽车 BTMS 研究意义

BMS（Battery Management System）是联结电池与整车之间的纽带，其主要功能是保障电池组高效运行以及监控电池组状态。而其中 BTMS 是电池管理系统的核心组成部分，它与电池技术、成组技术协同相关，王芳、夏军等人^[20]曾形象地将三者之间的关系比喻成一个闭环的“铁三角”。电池技术——“长寿基因”，决定着电池组的容量、荷电量、循环寿命等先天属性；BMS——“聪明大脑”，监控和反馈电池组各单体的温度，并调节电池温度达到均一性；成组技术——“强健体格”，包括模组排列方式以及箱体结构，其主要功能是当电动汽车运行在复杂工况时保障电池包的安全、可靠。故而，良好的电池系统必须配备“长寿密码”、“最强大脑”和“强健体格”。

对于电动汽车来说，动力电池作是能量源泉和储能单元，其性能直接与温度相关。电动汽车行驶过程中，电池组产生了大量热，如果散热不及时或不均衡，

就会降低电池组的整体性能、容量以及循环寿命，并且也易于引发热失控甚至造成人员伤亡的重大事故。此外，由电池的内阻特性可知，其在低温条件下，内阻会有所增大，相应的电池容量也会减小。同时大量文献研究证明，电池工作在高温或低温条件下，或电池组的单体之间温差过大时，这三种电池状态都会影响其性能以及寿命^[21]。

相比其他类型的电池，锂离子电池的比功率更高，生热量更多，散热能力就更重要了。实验表明：在 45℃环境温度、高倍率充电条件下锂电池组的循环使用次数减少了 60 次，并且电池组的温度每升高 5℃，其循环寿命减少一半，若应用合理的热管理方法，能使其整体性能提高 30%~40%^[22]。因此，热管理直接影响整车和锂动力电池的性能，必须对电池组进行热管理。

1.3.3 锂动力电池组冷却方法

几十或上百个电池单体采用并联或串联的方式组成具有大电流和高电压的电池组，其在复杂多变的环境中运行时，极易发生电池单体的温度和荷电量分布不均匀，各单体间的温差也比较大。此种情况下不但会加速电池劣化，严重损坏电池寿命和容量，而且严重时会导致电池燃烧甚至爆炸。因此，从电动汽车电池的可靠性、安全性以及稳定性等方面考虑，必须选择合适的冷却方式并且设计相应的冷却结构对电池组内部的各个单体进行有效的冷却。当下，对动力电池组常用的冷却方式有三种：液体冷却、空气冷却和相变材料冷却^[23]。

(1) 液体冷却

液体冷却是指利用冷却液介质与电池组的各个单体的生热表面间接或直接接触，并把热量快速带走以降低单体温度和电池组整体温度的一种冷却形式。采用液体冷却时，必须要求冷却介质具有较高的导热系数，这样才能达到对电池组快速降温的目的和满足其工作在合理温度范围的要求。液冷的原理示意图如 1.3 所示：

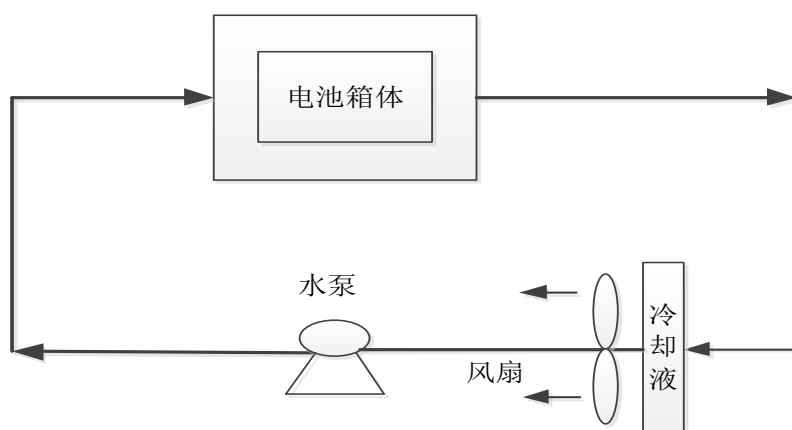


图 1.3 液体冷却原理

Fig.1.3 Liquid cooling principle

液冷方式——间接接触，一般地是采用冷板或冷却管道使其与电池单体相接触，冷却液流经冷板或冷却管道进而对单体和箱体进行降温冷却。其原理是电池组产生的大部分热量通过冷板或冷却管道传递到冷却液介质中，再由流动的冷却液快速地将热量传递走，使电池组的温度降低。当下，该冷却方式常用的冷却液流体介质主要包括质量分数为 50% 的 $C_2H_6O_2$ 溶液和水。

液冷方式——直接接触，是指选取绝缘属性的冷却液体直接与各个电池单体相接触。此冷却方式的优点是冷却液和电池充分接触，使的电池组温度差不大，均一性很好，缺点是冷却液的粘度系数较大，降低了冷却液的流速，电池组的降温效果比较慢，冷却能力有限。同时尤其是冷却结构相对复杂，需要增加各种冷却的配套设施，系统比较笨重。此外该冷却方式在使用过程中也容易发生冷却液泄漏的状况^[24]。目前，此种冷却方式常用的冷却液有矿物油和硅基油等。在设计冷却结构过程中，可根据上述缺点，有针对性地对其改进和优化，使冷却效果不断地提高。

(2) 空气冷却

空气冷却是一种易于实现的且应用广泛的冷却方式，其主要优点是成本低、系统结构单一、易于操作等。从冷却装置和空气流经方式两方面来分类，可把空冷方式分为两类。第一类从是否安装冷却装置来讲，可把空冷分为自然对流和强制对流，即是是否使用风扇、空调等对电池模组进行冷却；第二类是根据电池组的箱体结构和单体的排列形式来设计冷却空气的流道结构，以此可把空冷方式分为串行风冷和并行风冷^[25]。

第一类中的自然对流方式目前在电动汽车上很少采用，由于该空冷方式在动力电池组产热大时散热效率太低，无法达到快速给电池组降温的目的。强制对流冷却是借助外界的冷却装置对电池组进行冷却的方式，相比自然对流，其冷却速度快，冷却效果明显较好，因此市面上出产的电动汽车大部分都选择此冷却方式。

图 1.4 所示为第二类中的串行风冷，其原理是冷却空气从电池组的一端进入，然后依次经过各个单体电池，最后热量随着空气从电池组的另一端被带出。明显地，在靠近冷却空气进风口处的电池单体，空气的温度较低，与单体对流换热充分，冷却效果比较好。而对于靠近冷却空气出风口的电池模块，随着冷却空气换热能力的减弱，该出口处单体的冷却效果明显较差，这是由于冷却空气从进风口到出风口，形成一定的温度梯度，冷却效果逐渐减弱。此种冷却方式，电池单体温度的一致性和电池组的整体性能比较差，在电动汽车上很少应用。

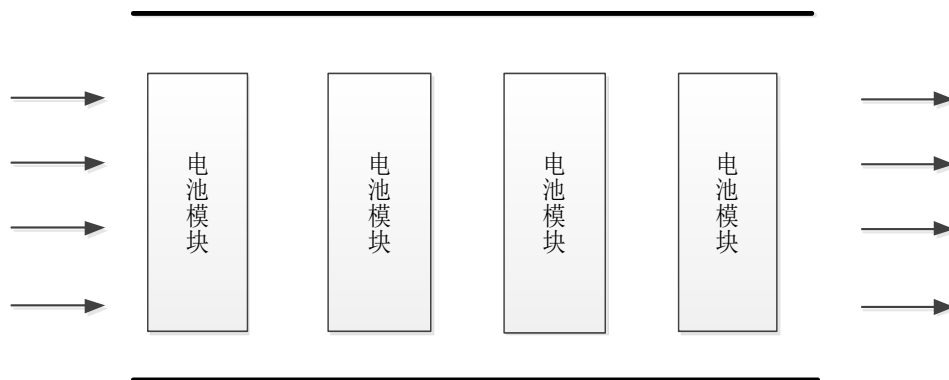


图 1.4 电池组的串行通风

Fig.1.4 Serial ventilation of the battery pack

图 1.5 所示为第二类中的并行风冷，与串行风冷方式不同的是，该种冷却方式需要考虑冷却空气的进口和电池单体的排列方式，使冷却空气同时流过电池组内每个单体的表面，不会因为电池位置不同，冷却效果变差，电池组的温度均匀，解决串行通风冷却的冷却梯度问题，但是同时电池组冷却系统的结构更加复杂，占空间。相对串行通风来说，并行式通风在实际应用中更加广泛。

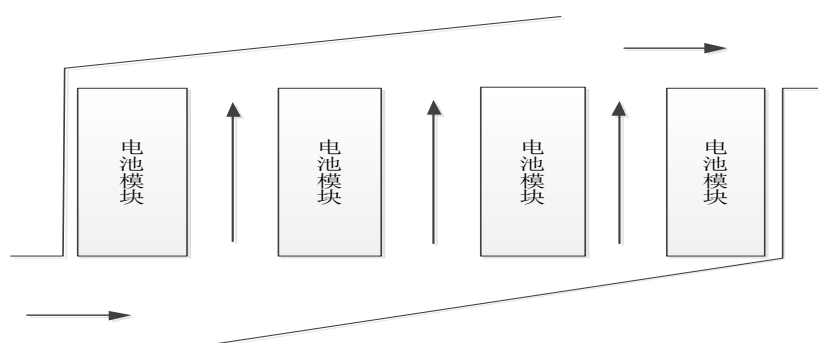


图 1.5 电池组的并行通风

Fig.1.5 Parallel ventilation of the battery pack

(3) 相变材料冷却

相变材料冷却是通过吸收热量或者放出热量并且在此过程中改变了冷却材料自身物理属性状态的一种冷却方式。另外，相变材料的冷却能力有限只能够在一定温度范围内改变材料物理属相^[26]。在实车电池组的应用过程中，将相变材料填充在电池组各单体之间或者直接包裹在电池组的周围，电池组工作产生的热量，会被相变材料吸收，从而使电池单体的温度降低，保障它们温升的一致性。此外，当电池组处于低温环境时，相变材料能释放相变时储存的热量对电池进行适当的加热^[27]。该冷却结构的主要缺点十分明显，由于相变材料需要内部填充，这使得电池组的体积变得比较大，也使其结构相对复杂。此外，电池组的安装和后期维护操作也比较困难。

表 1-2 三种冷却形式的对比
Tab.1-2 Comparison of three cooling types

冷却形式	难易实现程度	电池的一致性	冷却效果	泄漏情况	维修情况
空冷	容易	较差	较差	无	容易
液体冷却	复杂	良好	良好	有	难操作
相变材料冷却	一般	中等	中等	有	适中

综上所述，对比分析三种冷却形式，当电池组发热量比较小时，可选取易于实现和操作的空冷形式；当电池组的生热量很大或者电动汽车的额定功率比较大时，可以采用液冷；当电池组的体积尺寸不影响整车布置时，可选择相变材料冷却。考虑到本文的研究课题是电池组的应用研究，所以本文根据实际情况选用被动空冷和间接接触式液冷的复合冷却形式对电池组进行热仿真分析。

1.4 电动汽车 BTMS 国内外研究现状

电动汽车的动力来源于动力电池组，它的功率密度、温升等性能决定了车辆的续驶里程、循环使用寿命以及行车的安全性。此外电池的性能和寿命也决定着车辆的舒适性和使用成本。大量的实验和文献研究证明，电池组的温升是影响其性能的主要因素。只有当电池组的每个电池单体具有良好的一致性，整体温升在合理地范围，才能保证电池组具有良好的充放电性能、较小的内阻以及良好的导通性。以下分别介绍了电池组 BTMS 中热效应模型、生热速率模型以及冷却形式的国内外的研究现状，如下所述：

1.4.1 热效应模型的研究现状

从 20 世纪 90 年代就开始对锂离子电池的生热情况和温度分布进行了研究。在研究过程中，所建立的电池热效应模型可分为两大类：集中质量模型、空间维度模型（包括一维模型、二维模型、三维模型）。

(1) 集中质量模型

集中质量模型，就是把电池看作一个理想的质点。这是基于假设电池内部发热是均匀的，并且忽略其内部材料经过物理反应和化学反应后自身属性的差异等基础上所建立的。然后通过求解流体的守恒方程以及定义电池的初始条件和边界，得出电池的温度云图。仿真结束之后，集中质量模型中的物性参数需要通过做实验的方式进行验证，同时对所建模型进行合理的修正。这种模型的主要优点是模型简单、易于计算等。该模型适用于不同类型的电池组或者电池单体整体性能的模拟分析。

(2) 一维热模型

一维模型一般是研究电池投影在其厚度方向上的温度的分布状况。HALLAJ S A 和 MALEKI H 等人^[28]合理地简化了锂离子电池的一维热模型，并得到了模型中温度的分布云图。然后对所建模型的可靠性，进行了实验验证。使用加速测量计对所建立的锂离子电池一维热模型的温度分布情况进行了实验测量，仿真结果和实验结果对比表明该模型的正确性，能较为准确地反映电池内部的生热情况和电池表面的温度场分布状况。同时实验也得出一个结论：冷却速率影响温度场分布。并且冷却速率越大，得到的平均温度就越低，电池内部的温差会比较大，影响电池温度的一致性。该模型不利于提高电池的整体性能和增加循环使用次数，故而目前已很少使用。

虢放和薛明喆等人^[29]应用多孔电极基础理论建模方法，建立了锂离子电池的一维电化学模型。定义了和仿真了在改变电极厚度的情况下，得到了锂离子电池放电时电流、电压、电解质浓度等参数的变化曲线，并做了电极不同厚度时的放电实验。对比仿真结果和实验结果得到，锂离子电池的各参数的变化曲线都在误差允许的范围之内。同时得出结论：电极具有不同的厚度时，电池区域中的电解液的浓度、电势能、活性粒子 Li^+ 的浓度都各不相同，这些参数的差异是致使电池放电倍率差异和容量衰退的原因。

(3) 二维热模型

与一维模型热模型不同的是，二维热模型主要研究在某个截面平面上电池的生热情况。Mao-Sung Wu 等人^[30]设置了不同的边界条件，分别对外型形状为圆柱型的锂电池进行温度场的模拟仿真，得到了圆柱电池的温度分布在圆形截面的径向以及轴线方向上的云图。此外为了验证仿真的正确性，并做了圆柱型锂电池的放电实验。对比分析得，温度的仿真值和测量值误差在合理的范围内，仿真结果是可靠的。与此同时也得到以下结论：圆柱锂电池大电流放电时，电池的生热量比较大，其温度急剧增大，均匀性比较差，也容易出现事故——热失控。

北京交通大学的段瑶娟、姜久春等人^[31]建立了锰酸锂电池箱体的二维热模型，并且把计算得到的电池单体生热速率作为电池组的热源输入，应用 CFD 软件模拟并求解得到了在强迫风冷条件下该电池组的温度场云图和空气流场分布云图。另外，研究人员又设置了实验步骤，应用温度传感器、充放电仪器、恒温箱等设备测量了电池箱内每个锰酸锂电池单体的温度。通过模拟结果和测验结果对比分析得，模拟和测验得到的电池温升值误差很小，与实际测验数据基本符合。此种方法可以可用来分析电池箱体内部的温升情况和温度分布状况，并且也可根据其温度分布初步设计出相应的电池箱体散热结构。

(4) 三维热模型

三维模型更接近真实电池的外型构造，其一般分为两种类型，一种是分层模

型, 另一种是不分层模型。三维模型主要适用于分析电池单体和电池组整体的温度场、流场、压力场等。此外, 这种模型主要缺点是在求解热问题时建模过程比较复杂。

Andreas Vlahinos 等人^[32]建立了三维模型中电池的不分层模型, 并且仿真分析了电池模块整体的温升情况。此外文章的主要研究内容是: 设计了四种对锂离子电池模块的加热方案, 并且讨论了四种加热方案的仿真结果以及优缺点, 同时确定了最佳的加热方案。得到的结论是: 在低温环境下对电池模块进行加热, 最理想的加热方案是在模块外面加装热-电装置对其加热为主, 并结合模块内阻生热。

S.C. Chen, C.C. Wan^[33]建立了一个外型形状为长方体的三维锂离子电池热模型, 首先研究人员对所建模型分别进行了 10 种合理的假设和不同程度的简化, 之后共得到 11 个三维热模型。第二步是在针对某个具体问题, 对 11 个模型应用有限差分法并选用合适的热传递方程进行求解。根据最终的仿真结果得出结论: 温度在电池表面呈现出均匀分布, 同时出现的最高温度位于电池中心偏下处; 在热传递过程中, 可以用平均值法来简化中心区域, 但不能忽略电池单体的金属外壳以及和它相邻的接触层对热传导的影响, 该简化方式符合电池实际的工作情况, 对模型的仿真结果影响不大; 电池的放电倍率显著地影响其温度分布, 特别地, 放电倍率越大, 电池的表面的温度分布越不均匀。

KEYER MA 等人^[34]对建立的三维某聚合物电池模型, 并利用计算机工具以及应用热成像技术对电池的放电过程中温度的分布情况以热成像方法显示出来。从成像结果可得出结论: 温度在单体表面呈梯度分布的且分布情况是不均匀的, 此外极耳处的温度没有明显的梯度分布, 并且在单体表面靠近该处的温升较高。

同济大学张立军、李文博等人^[35]基于有限单元建模法, 综合考虑电解液的内阻和正负极板等对温度的影响因数, 建立了一个一维模型和三维模型相耦合的锂离子电池电化学热模型。在放电倍率为 1C 时, 得出了电池单体的温度变化规律和分布云图, 并分析了影响电池不均匀发热的因素。另外, 通过实验验证了该耦合模型能够较为准确地、合理地反映锂离子单体电池的温度分布情况以及其电池内部分层结构中正负电极处的温度分布和发热情况。

1.4.2 生热速率模型的研究现状

生热速率模型的研究是从国外开始的, 最早且较为著名的理论有, 1985 年提出的 Bernadi D 生热速率模型理论。该理论是基于电池内部温度均匀分布的假设上, 认为电池产热量的来源主要是电池内部正负电极的化学熵变反应和克服欧姆内阻做功。这样的电池模型较为简单、较为典型, 是在理想状态下对电池生热量的预估。

Yoshiyasu Saito, Katsuhiko Kanari 等人^[36]建立了以正极材料为 LiCoO_2 ，负极材料为碳的电池生热速率模型，并模拟仿真得到了其温度场分布状况。最后得出电池在放电过程中三个产热来源：正、负电极板处可逆熵变电化学反应产出的热量；放电时克服焦耳内阻和极化内阻产出的热量；在放电过程中， LiCoO_2 电池内部电解质溶液浓度、电动势等参数的变化引起产热量的改变。此种建模方法能够准确反映电池的温升情况，不足之处是该模型的对象是锂离子电池，对其他类型的电池是否可靠还有待验证。此外，该模型只能测量和分析电池表面温度，对内部温度场无法准确反映。

Noboru Sato 和 Kazuhiko Yagi^[37]通过分析充放电过程中电池单体的生热机理，得出了其产热的两个主要来源：反应热和欧姆内阻热。其中欧姆内阻热又包含极化内阻生热和焦耳内阻生热。同时他们也给出了计算这两种产热来源的计算公式，并且通过实验方法验证了公式的正确性，对解决产热问题具有理论指导意义。

Kandler Smith 等^[38]应用电池热效应模型中的一维模型，在电池的厚度投影方向上，模拟并分析电池的温度分布。同时定量分析了电池的三大产热来源，即是电极材料的反应热、焦耳热以及接触电阻产出的热量，并得到了生热量计算公式和生热速率计算公式。

在国内，对电池生热速率的研究主要集中在高校和研究机构中。其中比较著名的高校有清华大学、同济大学、吉林大学以及上海交通大学等都在做此模型的研究，目前从已有的文献来看，在研究生热速率模型时大都沿袭 Bernadi D 理论模型法和采用 NorboruSato 实验法来得到电池生热量和生热速率的大小。而 Kandler Smith 一维模型法由于自身存在的缺点，所以国内采用此方法的很少。

1.4.3 冷却方式的研究现状

由 1.3 节的论述可知，根据不同的传热介质可把热管理分成三大类即是：液冷热管理、空冷热管理以及应用相变材料的热管理^[39]。以下主要介绍这三种热管理系统在国内外具体发展和研究的现状。

(1) 液冷热管理研究现状

液冷热管理中通过液体介质，利用水泵、加热器等其他附属设备对电池组中每个单体的热量都可以传递到冷却液介质中，进而冷却液把热量带走达到对电池组冷却的目的。此外还可以通过液体介质对单体电池进行加热，一般来说液冷热管理的冷却系统和结构比较复杂，但其冷却效果要比其他的冷却方式显著一些^[40]。

美国通用汽车公司旗下品牌 GM Volt 采用浓度为 50% 的乙二醇溶液作为液冷传热介质，利用水泵使乙二醇溶液在散热片中不断地往复循环，这样设计的目的是：当电池组处于高温时，产生的热量通过冷却液的流动被带走；当电池组处于

低温时，乙二醇溶液经过加热线圈加热后再对电池组进行加热^[41]。此外，现在市场上最为火热的纯电动汽车品牌——特斯拉，它使用的液冷传热介质也是质量分数为 50% 乙二醇溶液。

Jarrett A、Kim I Y^[42]设计了一种新型的电池冷却结构，命名为冷却盘。经过合理地布置冷却盘结构，使冷却液体在盘中循环流动，进而完成对矩形电池的冷却。此外，文章中还对冷却盘的流道、壁厚等做了优化，使之对电池的冷却效果更好，同时也更贴近于实际应用。

福特公司的某款福克斯纯电动版以延长电池循环使用寿命和提高电池整体性能为主要目的，采用了主动式的液冷结构对锂离子电池包进行热管理。保证电池包在不同的外部环境温度时，能够通过冷却液对其进行冷却或者加热，从而使电池包处于性能最优和使用寿命次数最多的区间内。此外，该热管理结构还可以均衡每个单体之间的温度，使之温度分布呈现一致性^[43]。

广东工业大学吴忠杰、张国庆^[44]分析和总结了 HEV 中 Ni-MH 电池组的液体冷却结构的特点，又重新设计了一套液体冷却系统。经过仿真验证得出，新设计的冷却结构能够使电池组工作在最佳的温度范围，保证了电池组具有良好的性能。此外，他们还利用相变材料填充在电池组的单体电池之间，并经过仿真验证得到的冷却效果要比液冷要好一些，主要原因在于相变材料的吸热能力要比液体的效率高。

同济大学王健，许思传等^[45]基于 AME Sim 仿真平台（Advanced Modeling and Simulation Environment for Systems Engineering），对国产某款纯电动汽车的动力舱、电池包以及空调的冷却系统进行优化设计，规划好各部件的冷却形式和液体冷却之间的协同操作。在优化设计过程中着重考虑了电池包的热管理结构优化，其他两个部件的冷却优化次之。

吉林大学的李明、陈伟波^[46]总结了目前动力电池的优缺点以及发展情况，同时也分析了相应的热管理系统的研究现状以及对比分析了热管理中不同冷却形式的优缺点，并提出相应的改进措施。此外，文章中还总结了求解和测试电池的物性参数的不同方法，并对这些方法做了对比分析以及适用说明。

（2）空冷热管理研究现状

空冷热管理就是利用风扇或者自然风，以空气为冷却介质使之根据研究者设计的风道走向对动力电池组进行冷却或者加热的一种热管理形式，其结构原理图如 1.6 所示。

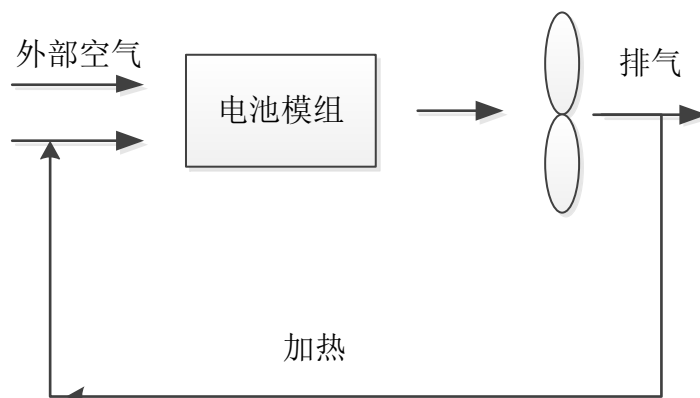


图 1.6 空冷或加热原理

Fig.1.6 Air cooling principle or heating principle

Michael R.Giuliano 等^[47]提出一种强制风冷的冷却结构，即是制作一个导热铝制槽并使之与电池组的导流通风槽相连接的结构形式，利用该结构对电池组进行冷却热管理，对冷却效果进行分析。并把该结构应用在 Mitsubishi I-MiEV Minicap 和 Enerl Think City 两款车上。此外，还有 Toyota Prius PHV 利用空气作为传热介质的，根据不同的环境温度情况温度控制板能够从定义的四种工作模式中，选择出最佳的冷却或者加热方案。

重庆大学林国发^[48]建立了电池组的三维模型，并在自然风冷条件下，设置了求解方程的初始条件和边界条件后对热模型进行温度场、流场的模拟仿真。分析了其温度场的分布特点，在此基础上以保持电池容量的前提下提出了自然风冷结构的优化方法。

(3) 相变材料热管理研究现状

相变材料热管理就是利用相变材料在固体-液体之间的相际转化过程中吸收或者释放热量的特性，对电池进行冷却或者加热，以使电池的工作温度不致于过高或者过低^[49]，其结构原理图如 1.7 所示。S.A.Hallaj 和 J.R. Selman 首先提出应用相变材料对锂动力电池进行热管理，并且设计了相应配套的冷却系统^[50]。

国内在相变材料的研究方向主要是把其应用在电池组上，设计合适的冷却结构，并对其系统进行了理论分析以及试验验证。而国外研究的侧重点是在相变材料的选择上，而其中石蜡复合材料应用的较为广泛，但由于其导热系数较小，需要向石蜡中添加其他导热系数大的材料，目前制成的复合材料有：石蜡-石墨、石蜡-泡沫等相变材料。此外，石墨复合相变材料也有较为的应用。但这些复合相变材料对电池的冷却效果都建立在模拟仿真上，相应的试验验证还没有进行^[51]。

DUAN X^[52]通过实验的方法测得应用相变材料对电池进行冷却时电池不同位置的温度值。经过分析得到，测得的温度在合适的范围，即是应用相变材料对电池散热是可行的并且能够满足其散热要求，不需要加入另外的散热结构。

Rao^[53]选用相变材料为石蜡-石墨复合材料仿真分析该复合材料对锂离子动力电池组热分布的影响和生热量情况。同时利用 DSC 设备检测到当复合材料吸收的热量最多时，石墨的质量分数为 20%。即是复合材料吸热效果最好时，相变潜热占纯石蜡得百分比是 89.6%。

Zhang^[54]选用应用熔融浸渗法制成的复合相变材料——石蜡-泡沫铜材料。采用实验的方法测量在不同放电电流的条件下单体的实时温度值，并分析使用石蜡-泡沫铜相变材料时电池的温升情况。实验结果表明：这种相变材料能够达到电池组的冷却目标，电池组的整体温度维持在 50℃ 内，每个单体的温差仅为 3℃。

广东工业大学李军等^[55]采用导热系数小的石蜡作为电池冷却的相变材料，同时基于该材料设计了多种强化冷却效果的方案，并且对这几种方案做了对比分析，得出了它们之间的优缺。最后阐述了石蜡材料在相变热管理系统的意义和应用前景。

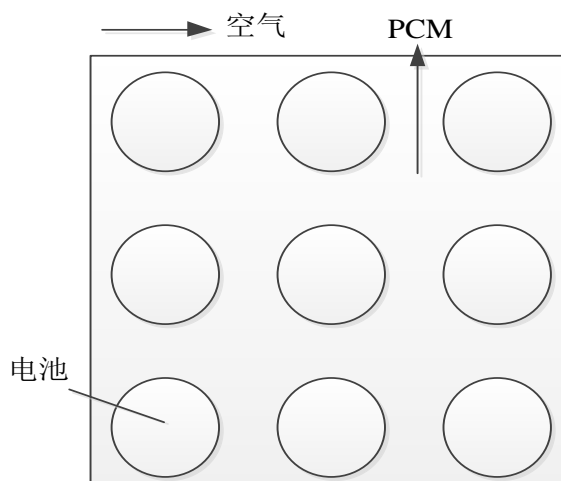


图 1.7 PCM 材料的冷却原理

Fig.1.7 Cooling principle of PCM materials

1.5 主要研究内容

本文对电动汽车动力电池组冷却系统的研究主要手段是：应用计算机技术，仿真分析电池组以及单体的温升分布情况。本文选择 LiFePO_4 动力电池作为研究对象，分别建立锂离子电池单体三维热模型和锂离子电池组三维热模型。根据电池组三维模型设计相应的冷却结构，并提出合理的电池热管理设计目标。然后应用 CFD 和 ADVISOR 等软件，在自然对流风冷和液冷复合冷却方式条件下对电池组进行散热分析，实现电池单体发热的一致性和电池组发热的均匀性，从而有效地提高电动汽车的动力性、安全性和增加续航里程。

本文研究的方法和主要内容如下：

① 绪论部分简述了课题的来源及意义，并介绍了四类电池的优缺点以及 BTMS 的热效应模型、生热速率模型和冷却方式的研究现状。并且确定了本论文的研究对象和冷却方式。

② 分析长方体 LiFePO_4 电池结构特点及充放电时电池内部 Li^+ 的移动规律。研究了 LiFePO_4 电池的产热机理、热量来源以及传热特性。此外，阐述了计算流体的四个基本方程和 CFD 求解一般步骤。

③ 合理地简化 LiFePO_4 电池单体结构，建立了生热速率模型和三维几何模型，并得到了 LiFePO_4 单体的热物性值和 UDF 编写热源程序。以不同放电倍率对单体热模型进行仿真，并验证所建热模型的可靠性。

④ 基于 ADVISOR 建立整车模型、电池模型和电机模型。运行得到不同工况下锂离子电池组的生热速率变化，并选择较大的生热速率作为下一章动力电池组温度场仿真计算时的热源输入。

⑤ 设计冷却管道和箱体外形的结构，并建立 LiFePO_4 电池模组的几何模型。在复合冷却条件下，对电池模组进行仿真分析，仿真结果满足电池组最高温度和单体温差的设计要求。

2 LiFePO₄ 电池的热特性及 CFD 基础

在对 LiFePO₄ 电池建立三维模型和生热模型仿真前,首先要了解 LiFePO₄ 电池的内部结构,分析 LiFePO₄ 电池内部的电化学反应和研究其产热机理及特性,同时掌握流体仿真实论基础。

2.1 LiFePO₄ 电池的结构及反应原理

2.1.1 LiFePO₄ 动力电池的结构

一般地,锂电池的结构主要包括电池的正负极、隔膜、电解液、正负极耳等。锂电池的外形形状有圆柱体和长方体两种,图 2.1 所示为长方体 LiFePO₄ 动力电池的内部结构。

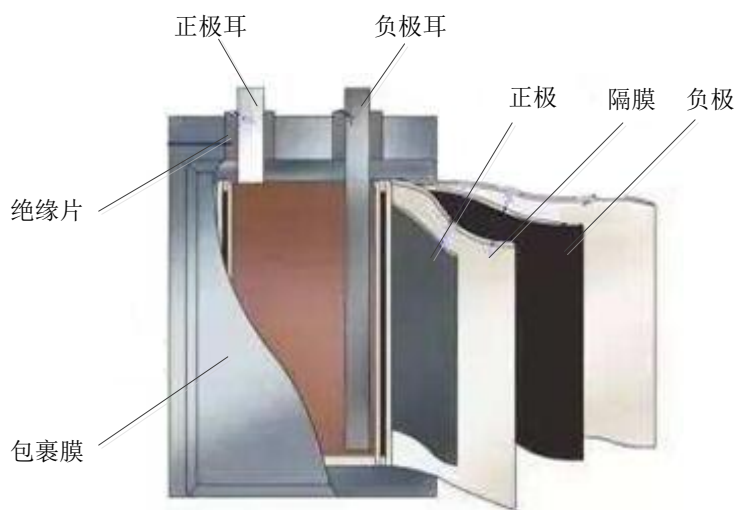


图 2.1 LiFePO₄ 动力电池结构图

Fig.2.1 LiFePO₄ power battery structure

(1) 正负电极

LiFePO₄ 动力电池是一种浓差型电池,正极材料是含锂元素的化合物^[56]。正负电极是锂电池的核心组成部分,电池在充放电时的电-化学反应都是由电极完成的,它反映了电极之间化学能和电能相互转化的关系。LiFePO₄、Li(Ni Co Mn)O₂、LiMn₂O₄、Li(Ni Co Al)O₂、LiCoO₂ 等都是常用的锂电池正电极活性材料。其中 Li(Ni Co Mn)O₂ 和 Li(Ni Co Al)O₂ 两种三元锂材料是现阶段国家大力推广发展的材料,而 LiFePO₄ 材料是新兴材料正处于推广应用阶段。锂离子电池负极活性材料有。石墨取材方便、价格便宜是作为锂电池负极活性材料的首选,此外还有 TiS₂ 和 V₂O₅ 等也可作为锂电池负极活性材料^[57]。目前国内外开始研究石墨乙烯和硅基合金材料等新型负极材料以取代石墨材料。

(2) 隔膜

隔膜位于正负电极之间，具有多孔结构、绝缘和只允许锂离子通过形成单向电流的特性。其主要功能是隔绝正、负电极防止它们联通形成短路，起到保护电路的作用。其种类主要有三层隔膜、PE 隔膜、SEI 隔膜等三种，国内外比较著名的隔膜生产商有旭华成、Celgard 等。

(3) 电解液

电解液具有导电率高、稳定性好等优点，同时它也是电池电化学反应的场所，承担锂离子电荷的传导。其主要组成成分是非水有机溶液和电解质盐。目前电解液的制造工艺技术由国外垄断，国内在电解液与电解质配比方面还有所欠缺。

(4) 正负极耳

正负极耳是连接外部电路和正负极活性材料的桥梁，负责电荷的输出和输入，电阻特性符合欧姆定律。锂电池极耳常用材料是铝箔（正极耳）和铜箔（负极耳）。

目前动力锂电池种类多样，根据第一章所述可把动力电池分为四类。经对比分析得到它们的各化学性能，如下表 2-1 所示：

表 2-1 不同锂电池的性能对比

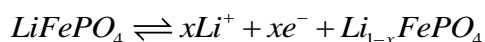
Tab.2-1 The comparison of different lithium battery performance

锂电池种类	比能量 (Wh/kg)	标称电压 (V)	优缺点
钴酸锂	150 以上	3.6~3.7	比能量高，耐高温性能差，循环寿命低
锰酸锂	200	3.7	化学结构稳定，低温性能好，高温易膨胀
磷酸铁锂	150	3.2	耐高温，高循环寿命，振实密度小
三元锂	240	3.5~3.6	比能量高，电化学稳定性一般

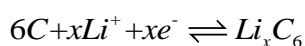
2.1.2 LiFePO₄ 动力电池反应原理

LiFePO₄ 动力电池的充放电过程实质就是锂离子从正负电极材料逸出和嵌入的过程。LiFePO₄ 电池处于充电状态时，Li⁺从正电极材料中挣脱出来，在电解液中形成由正极指向负极的电流，穿过多孔隔膜，然后嵌入负极碳素材料的微孔中。此过程中，正电极材料中的 Li⁺不断逸出减少，处于贫锂状态；负极碳素材料中 Li⁺不断嵌入增加，处于富锂状态。当 LiFePO₄ 电池处于放电状态时，Li⁺又从负极碳素微孔中逸出，并与正极材料结合^[58]。本文以 LiFePO₄ 电池为例，其充放电过程中在正负电极上的化学反应情况表示为：

正电极化学反应式：



负电极化学反应式：



总反应式:

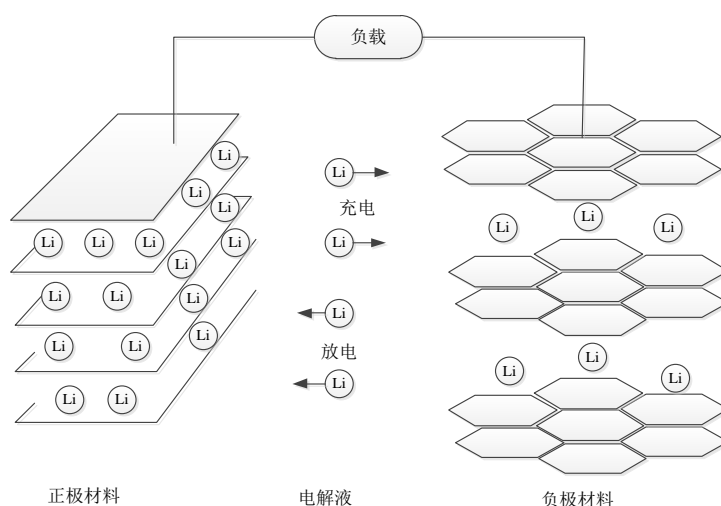
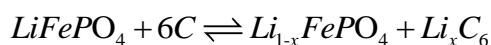


图 2.2 LiFePO₄ 电池充放电过程

Fig.2.2 The charge and discharge process of LiFePO₄ battery

2.2 LiFePO₄ 电池的生热机理

由上述可知, 充放电的过程中锂离子电池常会生化学反应以及伴有电化学反应, 这个过程不可避免的会产生热量且产热源特别复杂。产热量来源主要包括三个方面, 一是由于 Li⁺从正负电极材料上逸出和嵌入而产出的热量, 二是 Li⁺离子移动过程中克服内部电阻做功的产热量, 三是锂电池内部各材料之间相互反应的产热量^[24]。经上述分析可得出结论: 锂电池的热量主要由发生电化学反应的反应热、克服电池内部电阻做功的焦耳热、由充放电时正负电极不平衡产生的极化热、电池额外产出气体与氧气发生反应的副反应热等四大部分组成。

其中锂电池的副反应热是在充放电末期温度过高等极端条件下出现的情况并且产热量比较小, 可忽略这部分热量。则放热总量 Q 表达式为:

$$Q = Q_r + Q_j + Q_p + Q_s \quad (2.1)$$

式中:

Q_r ——反应热 (J);

Q_j ——焦耳热 (J);

Q_p ——极化热 (J);

Q_s ——副反应热 (J);

(1) 反应热

电池的反应热产出的热量是可逆的。它发生在 LiFePO_4 电池的充放电过程中, 是由电池中的 Li^+ 和 e^- 在其内部结构中的移动引起的, 使电池发生熵变以及焓变。对 LiFePO_4 电池进行充电时, 电池是处于为吸热过程, 此吸热热量值为“-”; 对 LiFePO_4 电池进行放电时, 电池是处于放热过程, 此放热热量值为“+”。

$$Q_r = nFT \frac{\partial E_e}{\partial T} \quad (2.2)$$

式中:

E_e ——电动势 (V);

T ——温度 (K);

n ——充放电结束时电池通过隔膜的电荷数 (C);

F ——法拉第常数 96485.4C/mol ;

(2) 焦耳热

LiFePO_4 电池充、放电时 Li^+ 和 e^- 在其内部结构移动的过程中, 克服电阻所做功为焦耳热。该电阻包括组成材料物理属性内阻和各材料间密度的不均匀产生的内阻。焦耳热用字母 Q_j 表示, 其值为标量。焦耳热 Q_j 的表达式为:

$$Q_j = I^2 R_j \quad (2.3)$$

式中:

R_j ——焦耳内阻 (Ω);

Q_j ——焦耳热 (J);

I ——充放电电流 (A);

(3) 极化热

极化热在完整的外接电路系统中, 由于充放电流的作用, 使其在正负电极处产生高、低电位, 破坏了原来的电位平衡而产生的热量。极化热和内阻分别用字母表示为 Q_p 、 R_p , 其值也为标量。极化热 Q_p 的表达式为:

$$Q_p = I^2 R_p \quad (2.4)$$

极化反应产出的热量 Q_p 是不可逆的, 热量值很难测量出来。此外极化内阻值在充放电过程中也是难以测量的, 其值大小主要与电流 I 、温度和 DOD (放电深度) 相关。

上述的总生热量 Q 也可写成:

$$Q = nFT \frac{\partial E_e}{\partial T} + I^2 R, \quad R = R_j + R_p \quad (2.5)$$

由式 (2.5) 可得, 电池生热量 Q 的表达式可以看出来, Q_j 和 Q_p 均是标量, 而反应热的大小 Q_r 则要取决于电池是吸热反应还是放热反应。易得放电时的

LiFePO₄ 电池总热量要大于充电时的热量。

2.3 LiFePO₄ 电池的传热特性

应用传热学分析知,在电化学反应过程中 LiFePO₄ 电池生产的热量必定会与电池所在的环境或者其他物质进行热传递,热量传递的形式主要有传导、对流和辐射三种^[59]。

(1) 热传导

一个物体的不同部分或者两个接触物体间存在温差就会有热交换,热量传递的方向是从高温区域向低温区域传递,其热传递的形式为热传导。由此可知,电池在充放电后产生的热量在电池内部各组成部分之间传递的主要形式为热传导,正负电极、极耳以及隔膜都是传热导体^[60]。应用傅里叶定律得到热传导表达式如下所示,其中“-”表示热量由高温区域向低温区域传递。

$$q_f = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \quad (2.6)$$

式中:

q_f ——热流密度 (W/m²);

λ ——导热系数 (W/m · K);

$\frac{\partial T}{\partial n}$ ——电池内部的温度梯度 (K);

(2) 热对流

热对流遵守牛顿冷却定律,发生在物体与其周边介质间的热量传递现象。本文中的热对流是指在 LiFePO₄ 电池放电的情况下,电池单体和电池箱体的表面与它们周围流经的冷却空气之间的热量传递^[61]。方程式表示为:

$$q = h_f(T_b - T_f) \quad (2.7)$$

式中:

q ——热流密度 (W/m²);

h_f ——对流换热系数 (W/m² · K);

T_b ——电池外表面温度 (K);

T_f ——介质的温度 (K);

(3) 热辐射

热辐射是以物体自身的通过电磁波形式向外辐射能量, LiFePO₄ 电池的热辐射值,与单体表面包裹材料的物理属性和辐射面积大小有关^[62]。由 Stefan-Boltzmann 定律可得,热辐射表达式可表示为:

$$Q_w = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.8)$$

式中:

Q_w ——辐射热量 (W);

ε ——辐射率 ($\varepsilon=1$);

σ ——斯蒂芬—波尔兹曼常数 ($5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2$);

A_1 ——辐射面 1 的面积 (m^2);

F_{12} ——辐射面 1 相对于辐射面 2 的形状系数;

T_1 、 T_2 ——辐射面 1、2 的绝对温度 (K);

由以上述公式 (2.6)、(2.7)、(2.8) 得, 热辐射以及热对流发生在电池单体和箱体表面, 受到周围热交换介质的限制, 同时热辐射和热对流决定着它们表面的温度分布情况; 热传导受到电池内部材料导热系数和温度梯度的制约, 它们共同决定了电池的生热量。此外, 也可得出热传导是热量传递和温度分布的决定性因素。

2.4 流体力学的理论基础

CFD (Computational Fluid Dynamics) 研究的手段是借助计算机的模拟计算能力和生成图像功能, 对所研究对象中出现的传热特性和流体状态等物理现象进行模拟分析。CFD 数值模拟的基本思路为: 将空间上或者时间上的场域 (如压力场、温度场等) 以若干个一定变量值的点集合进行替代, 并把这些点进行离散化处理, 生成有限的离散点, 在这些离散点集合的基础之上建立相关的代数方程组, 最终通过求解方程组来得到相关温度场、压力场等物理量的近似值^[63]。

CFD 的主要理论依据和原理是在三大守恒方程或者湍流方程控制下进行流体的数值模拟, 三大守恒方程包括: 能量守恒方程、动量守恒方程 (也称牛顿第二定律)、质量守恒方程。

(1) 能量守恒

此守恒是指所研究对象在热交换过程中满足热力学第一定律, 可以表述为: 物体增加的内热能等于外部的热流量和其他外力对物体做的功。其守恒方程如下:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (2.9)$$

式中:

C_p ——流体的比热容 ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

t ——流体所用的时间 (s);

ρ ——流体的密度 (kg/m^3);

k ——流体的导热系数 W/(m·K);

u 、 v 、 w ——流体的速度矢量 u 在 x 、 y 、 z 上的投影 (m/s);

S_T ——流体本身热能与由其机械能转化的热能之和 (W);

(2) 动量守恒

其本质就是牛顿第二定律, 本论文中的流体为不可压缩的, 密度和粘度系数都是定值, 故守恒方程表示为:

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial x}$$

(2.10)

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial y}$$

(2.11)

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

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{\partial p}{\partial z}$$

(2.12)

式中表示为 μ 流体的粘度 (pa·s), 其影响因素主要与流体的浓度和温度有关。

总之, 流体动量的变化量是流体的压力和其他外力共同作用的结果。

(3) 质量守恒

该守恒方程表示的是, 流体的增加的质量等于单位时间内流入的质量。其方程可列为:

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

(2.13)

一般地, 当流体是密度均匀且不可压缩时, 其守恒方程又可列为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

(2.14)

(4) 湍流方程

流体的流动模式有层流、紊流和湍流三种形式, 其中紊流是流体从层流向湍流过渡的一种中间状态。判断流体流动形式的依据是以雷诺实验中下限和上限两个临界雷诺数判定, 其下限值为 2320, 上限值为 13800。小于下限雷诺数时, 流体为层流形式; 大于上限雷诺数时, 流体为湍流形式; 在下限和上限两个临界雷

雷诺数之间时，流体为紊流形式^[64]。流体的层流形式比较简单，紊流形式在实际情况中应尽量避免的，故而本小结主要介绍标准的 $k-\varepsilon$ 湍流方程，表示如下：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.16)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.17)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.18)$$

式中：

k ——流体的湍动能；

ε ——流体的耗散率；

$C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 C_μ 、 σ_ε 、 σ_k ——均为常数，其值为 1.44、1.92、0.09、1.3、1.0^[65]；

μ_t ——流体的粘性系数 ($\text{pa} \cdot \text{s}$)；

CFD 技术是把流体问题合理转化为数学模型，并依托现代计算机技术进行数值模拟。利用该技术能有效地解决诸多复杂问题，同时也节约了成本和大量的时间。流体的求解过程一般要经过前处理、选择求解器、后处理三个步骤。

前处理的主要内容包括运用 CAD 软件对研究对象进行几何建模和划分网格，定义模型中的材料属性、物性参数以及边界条件等。选择求解器就是选择合理的求解算法，使所建立的离散方程能快速的收敛，输出所求的温度、压力等物理量。后处理是输出图像和仿真计算结果，有利于研究者对其进行分析。具体的流体求解流程如图 2.3 所示：

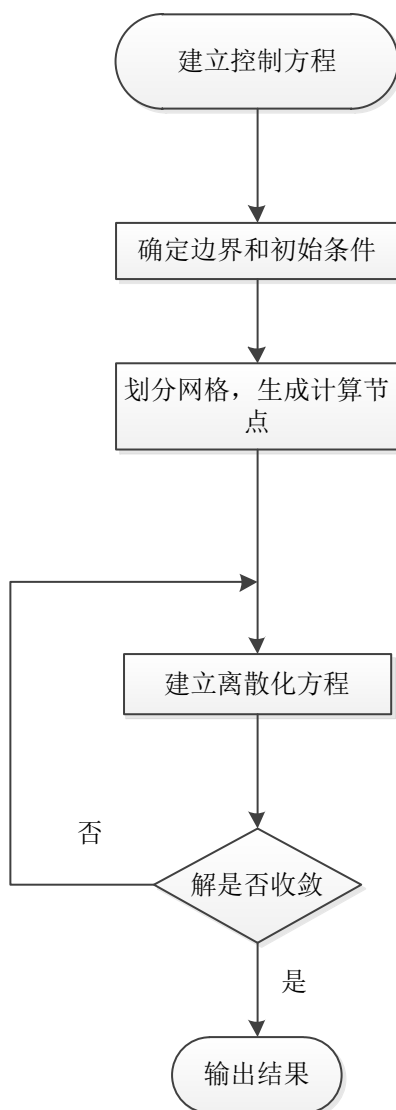


图 2.3 CFD 求解流程

Fig.2.3 CFD solution process

2.5 小结

本章介绍了长方体 LiFePO₄ 电池结构及充放电时电池内部 Li⁺ 的移动规律。研究了 LiFePO₄ 电池的产热机理、热量来源以及传热特性，并得出了结论：副反应热对 LiFePO₄ 电池的生热影响很小，反应热和内阻热是 LiFePO₄ 电池生热的主要来源；热传导、热对流以及热辐射是 LiFePO₄ 电池热量传递的主要形式，热传导主要发生在电池的內部，热对流和热辐射主要发生在电池的外部。此外，阐述了计算流体的四个基本方程和 CFD 求解一般步骤。

3 LiFePO₄ 单体的热仿真及验证

LiFePO₄ 电池的最佳工作温度区间在 20℃~40℃之间, 电池的温升对其自身的性能影响巨大^[66]。若电池的温升过高会导致电池的内阻增大和温度升高, 也会损害电池的循环寿命, 更甚者会造成 LiFePO₄ 电池的热失控而出现安全事故。为避免上述情况, 需要对 LiFePO₄ 电池单体的生热特性进行仿真分析。此外, 在单体成组后, 为实现其工作在合理的温度范围和温度分布的均匀性, 单体的热仿真也对冷却方式和结构的选择上提供理论依据。

研究 LiFePO₄ 电池的热分布情况, 首先要建立单体三维模型进行模拟仿真, 并应用仿真结果来设计及优化下文中 LiFePO₄ 电池模组的冷却方案。主要的热分析软件有 ANSYS 中 fluent 模块和 Star CCM+两种, 经过对比本文采用 fluent 模块对单体和后文电池模组进行热分析。

3.1 Fluent 模块简介

与其他 CFD 处理软件相比, Fluent 模块适用的范围很广包括航天、高铁以及汽车等流场问题的分析, 尤其对所研究对象的热问题, 可以用 UDF 编程定义热源, 同时也易于设置各种所需的物理参数和边界条件。在 Fluent 模块中模拟物体或系统的热分布时, 首先要根据研究对象的状态和输出参数在仿真过程中的大致变化选择传热的方式是稳态还是瞬态。在 Fluent 模块的结果中不仅能得出研究对象的温度场分布图, 还可以得到与热仿真相关联的压力场分布图、流速场分布图等参数云图。此外, 它也可以模拟多种耦合场, 采用多种求解方法加快收敛速度和提高求解精度, 输出所求物理参量实时数据和分布云图。

Fluent 模块仿真的 CFD 理论基础是能量守恒方程。所研究对象的网格节点温度、压力等参量可以通过热量和压力传递、有限元法计算进而得到温度场、压力场等其他参数云图。Fluent 仿真一般需要 7 个步骤: 网格化几何模型—几何模型导入到 Fluent—检查网格质量等—定义和赋予各材料属性—定义边界条件—求解器设置开始计算—输出结果。最后应用后处理软件对仿真得到的仿真数据以图形或云图的方式显示出来。

3.2 LiFePO₄ 单体电池热仿真及分析

3.2.1 建立 LiFePO₄ 单体热模型

从生热原理和所建模型的维度两个方面对电池热模型进行分类。以生热原理来分类, 电池热模型主要有电-化学、电-热耦以及热滥用三种模型, 以所建模型的维度数分类, 电池热模型有一、二、三维度三种热模型^{[67][68]}。本章节是以某公司

生产的容量为 100Ah 的 LiFePO_4 单体电池为建模对象，建立三维 LiFePO_4 单体热模型，并导入到 Fluent 中获得仿真数据、应用后处理软件得到电池的温度云图。 LiFePO_4 单体的技术参数见下表 3-1。

表 3-1 LiFePO_4 单体的参数值Tab.3-1 The parameter values of LiFePO_4 monomer

单体参数	数值	单体参数	数值
容量	100Ah	最大瞬时电流	200A
标称电压	14.6V	循环次数	2000 次以上
过充保护电压	14.8V	工作温度	-20°C~60°C
放电终止电压	9.6V	质量	7.2kg
内阻	5m Ω	长*宽*高	212mm*62mm*300mm

由于 LiFePO_4 单体电池材料各异、结构复杂，建立与单体实体一样的电池模型是难以实现的，也是完全不必要的。所以在建立单体模型过程中，在不影响热分布的前提下，对电池单体实体进行合理地简化，依据其主要的外形结构和尺寸来建立模型，忽略单体外形结构和极柱结构中的圆角以及单体表面不规则的形状。在第二章的传热特性可知，生热量是从电池的内部经过热传导传递到表面，之后再以与电池表面相接处的固体和流体或热传导或热对流等方式把热量带走。本章节是以 Pesaran A.A 为理论基础，定义单体是均匀发热的，其主要包括内部热源和外壳^[69]。单体简化结构图，如图 3.1 所示：

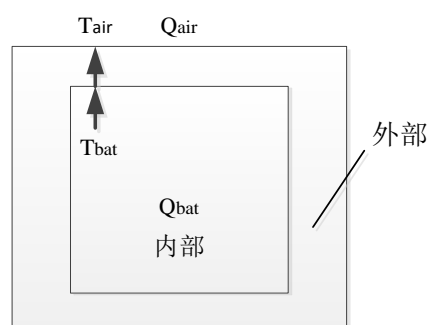


图 3.1 电池热传递简化模型

Fig.3.1 Battery heat transfer model

图中， Q_{air} ——电池单体外壳在外部环境中散失的热量 (w)； T_{air} ——外部环境温度 (K)； T_{bat} ——单体内部温度 (K)； Q_{bat} ——单体内部热源的生热量 (w)。

在电池单体实际的仿真过程中，考虑到其复杂的热化学反应和建立的微分方程有解值，对电池单体各部分作出合理的假设：电池单体内部是均匀发热的；电池单体的比热容是常量；电池单体各物质的密度是均匀的，且各材料的物理属性

不受温度和时间的影响；电池单体内部没有对流和辐射，热量的传递方式为热传导^[70-71]。根据上述的条件建立了方形单体电池的生热模型，表达式如下所示：

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \quad (3.1)$$

式中：

ρ ——单体的平均密度 (kg/m^3)；

C_p ——单体内核比热容 ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)；

T ——单体温度 (K)；

t ——单体充放电时间 (s)；

k_x 、 k_y 、 k_z ——分别沿 x 、 y 、 z 轴方向的导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)；

要使上述的方程有解，必须确定电池单体在以下三个方面的物理参量：①单体电池生热速率 q ；②电池单体的热物性值 ρ 、 C_p 、 k ；③电池单体的环境温度、热对流系数、流体速度等条件。

3.2.2 LiFePO₄ 电池各参数的确定

在对 LiFePO₄ 电池单体仿真过程中，需要定义电池单体和极耳等各材料的物性参数包括 ρ 、 C_p 、 k 等^[72]。其中正、负极耳的物性参数从热工手册查询得到，正负极材料和隔膜的物性参数及尺寸大小可以借鉴文献得到，下表 3-2 所示为电池内部各材料具体参数值^[73]。

表 3-2 LiFePO₄ 各材料的物性参数

Tab.3-2 The physical parameters of LiFePO₄ materials

名称	密度 (kg/m^3)	比热容 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]	导热系数 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]
磷酸铁锂材料	2840.39	1200.00	1.5800
石墨材料	1347.33	1437.40	1.0400
正极 (铝)	2710.000	903.00	238.00
负极 (铜)	8975.600	385.00	398.00
隔膜	659	1978.16	0.3344
壳体 (钢)	7800.00	478.00	16.8

(1) 确定物性参数

① 比热容的确定

电池单体的比热容与其各部分的材料直接相关，一般可以定义为常数。其数值不能直接测量，可以以已知的其各部分材料质量、密度、体积等物理参数由加权法得到单体的比热容值^[74]：

$$C_p = \frac{1}{m} \sum_i C_i m_i = \frac{\sum_i \rho_i C_i V_i}{\rho \sum_i V_i} \quad (3.2)$$

式中:

m ——电池单体各部分的质量总和 (kg);

C_i ——电池单体各部分的比热容 ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$);

m_i ——电池单体各部分的质量 (kg);

ρ_i ——电池单体各部分的密度 (kg/m^3);

V_i ——电池单体各部分的体积 (m^3);

② 导热系数的确定

LiFePO_4 电池单体的导热系数的确定方法主要有实验测量和加权计算。由于学校实验条件的限制,无法进行实验精确测量,所以本文采用加权法计算来确定导热系数。在直角坐标系中定义电池单体的几何模型,单体的长、宽、高分别平行于坐标系中的 X、Y、Z 轴。即是 LiFePO_4 电池单体的热量在 X 轴方向上各部分之间的传递方式是串联传热,在 Y、Z 轴方向上各部分之间的传递方式是并联传热。由上述 RC 串并联方法和加权法得到电池单体在 X、Y、Z 轴方向上的导热系数^[75]:

$$k_x = \frac{a}{\sum_i \frac{dx_i}{k_i}} \quad (3.3)$$

$$k_y = \sum_i \frac{k_i dy_i}{b} \quad (3.4)$$

$$k_z = \sum_i \frac{k_i dz_i}{c} \quad (3.5)$$

式中:

k_x 、 k_y 、 k_z ——电池单体沿 x 、 y 、 z 方向的导热系数 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$];

a 、 b 、 c ——分别是单体的宽、长、高 (m);

k_i ——单体相对应材料的导热系数 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;

dx_i 、 dy_i 、 dz_i ——电池单体各材料在 x 、 y 、 z 方向上的厚度 (m);

一般地,在电池在 y 、 z 方向的传热系数相差很小,为了简化计算可令 y 、 z 方向的两个传热系数相等。

③ 电池平均密度的确定

电池的平均密度等于各材料质量与其各体积的比值之和,可以简化为单体总质量与体积的比值。

$$\rho = \frac{\sum_i \rho_i V_i}{\sum_i V_i} \quad (3.6)$$

联立 (3.2) ~ (3.6) 的方程, 可计算出电池的热物性参数如表 3-3 所示:

表 3-3 LiFePO₄ 电池单体的物性参数

Tab.3-3 The physical parameters of LiFePO₄ monomer

	密度 (kg/m ³)	比热容[J/(kg·K)]	导热系数[W/(m·K)]
参数数值	1521.61	1351.24	$k_x=3.6, k_y=k_z=13.4$

(2) 计算生热速率

根据第二章长方体 LiFePO₄ 电池的生热机理和上述建模时的简化假设, 可知由于电池内部化学反应的生热过程比较复杂, 很难计算单体的热量。单体的生热率主要通过实验测量和 Bernardi 生热公式得到。实验测得的单体的生热率可以准确地反映实体的生热情况, 但由于实验条件要求比较苛刻, 不易实现。故而本文使用理论计算来获得生热率。其公式表示为:

$$q = \frac{I}{V_b} \left[(E_{oc} - U_1) - T \frac{dE_{oc}}{dT} \right] \quad (3.7)$$

式中:

- q ——电池单体的生热速率 (W/m³);
- I ——电池单体的充放电电流 (A);
- V_b ——电池单体的内核体积 (m³);
- E_{oc} 、 U_1 ——电池单体的开路电压、端电压 (V);
- T ——电池单体的温度 (K);
- dE_{oc}/dT ——温度影响系数 (V/K);

上式中, 温度影响系数在 20°C~50°C 时, 一般为常数 0.0005 V/K。此外 ($E_{oc} - U_1$) 可约等于充、放电流 I 和电池内阻 R 的乘积。在电池正常充放电情况下, R 是定值^[76]。因此生热速率表达式可变换为:

$$q = \frac{1}{V_b} \left[I^2 R - IT \frac{dE_{oc}}{dT} \right] \quad (3.8)$$

已知电池的内阻是 5mΩ, 则可得到电池放电时的表达式:

$$q = 1.27I^2 + 0.13IT \quad (3.9)$$

由式 (3.9) 得, 在单体模型仿真计算时设定的放电电流是常数, 上式 (3.9) 中单体温度 T 是不定的, 即是单体的生热速率是随着 T 而变化的, 因此 I 、 T 与 q 三个参数变量之间的函数关系, 在 Fluent 中采用用户自定义赋予电池单体为发热热源。

将式 (3.9) 的生热速率公式用 UDF 编程为热源程序, 把其定义为数学表达式

为:

$$q = AT + B \quad (3.10)$$

以电池的环境温度为 25℃，放电倍率为 1C 即放电电流为 100A 的情况下，编写热源程序，如下所示：

```
#include "udf.h"
#define A= 13
#define B =12700
//电池容量为100Ah; 电池体积Vb 是0.0039m3; 电池放电电流为100A; 电池内阻R为0.005Ω;
DEFINE_SOURCE (heat_source, c, t, dS, eqn)
{
  real source, T_K, ts;
  T_K=C_T (c, t) ;//电池热力学温度;
  ts=RP_Get_Real ("flow-time") ;//电池放电时间;
  source= A* T_K +B; //电池热源;
  dS[eqn]= A;
  return source;
}
```

热源包括电池主体的发热外还有两极耳的发热。负极集流体和正极集流体的材料分别是铜和铝，它们的电阻率随时间变化的公式表示为：

$$L = L_0 \times [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3.11)$$

式中：

L ——不同温度下极耳电阻率 ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$);

L_0 ——环境温度为 25℃ 下极耳电阻率 ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$);

T ——环境的实际温度 ($^{\circ}\text{C}$);

T_0 ——环境初始温度为 25℃;

α ——温度系数;

单体极耳的内阻表示为：

$$R_e = \frac{Lh}{S} \quad (3.12)$$

式中：

R_e ——单体极耳内阻 (Ω);

h ——单体极耳高度 (m);

S ——单体极耳横截面积 (mm^2);

LiFePO₄ 电池单体极耳的生热率表达式为:

$$q_e = \frac{I^2 R_e}{V_e} \quad (3.13)$$

式中:

q_e ——LiFePO₄ 单体极耳生热率 (W/m³);

V_e ——LiFePO₄ 电池极耳体积 (m³);

I ——充放电电流 (A);

已知电池的极耳的直径是 20mm, 高度 10mm。铜、铝的在 25℃ 温度下的电阻率和温度系数如下表 3-4 所示^[77]。

表 3-4 铜、铝的电阻率和温度系数

Tab.3-4 The resistivity and temperature coefficient of copper and aluminum

材料名称	电阻率 (Ωmm ² /m)	温度系数 (°C)
铜	0.0175	0.004
铝	0.0294	0.0043

联立 (3.10)、(3.11)、(3.12) 可得出铜、铝极耳关于电流 I 的表达式:

$$q_{cu} = 1.77I^2, q_{Al} = 2.98I^2 \quad (3.14)$$

(3) 定义初始条件和边界条件

边界条件表示的是所研究对象在导热边界上的温度、热交换等状态与外部环境间的相互关系。在瞬态计算和稳态计算时, 边界条件作用在所研究对象上并影响其温度分布, 在本章节中, 边界条件的实际意义是物体表面与外部环境的对流换热系数。初始、边界条件影响 LiFePO₄ 单体内部和单体表面温度场的分布, 同时其分布情况会随着时间和空间不同而出现相应不同的变化^[78]。

① 初始条件

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (3.15)$$

上式中 T_0 是模拟计算时 LiFePO₄ 单体的初始温度。

② 边界条件

在电池单体和模组建模仿真时, 一般都是冷却空气或者冷却液与电池表面之间的对流换热, 低温区的空气或者冷却液把高温区的电池表面热量带走, 经过这些边界换热, 使电池表面的温度降低。根据牛顿冷却定律得到该边界条件^[79]。

$$-k_x \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_\infty), x = 0 \text{ 和 } l$$

$$\begin{aligned}
 -k_y \frac{\partial T}{\partial y} &= b(T - T_\infty), y = 0 \text{ 和 } b \\
 -k_z \frac{\partial T}{\partial z} &= h(T - T_\infty), z = 0 \text{ 和 } h
 \end{aligned}
 \tag{3.16}$$

式中:

h ——电池表面上的对流换热系数 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$);

T ——电池单体温度 (K);

T_∞ ——电池单体处所在的环境温度 (K);

l 、 b 、 h ——LiFePO₄ 电池单体的长度、宽度、高度 (m);

$\partial T / \partial x$ 、 $\partial T / \partial y$ 、 $\partial T / \partial z$ ——单体沿 x 、 y 、 z 方向的温度梯度 (K/m);

3.2.3 LiFePO₄ 单体的建模与仿真

根据 LiFePO₄ 电池单体的外形尺寸, 利用 CATIA 三维建模软件建立单体电池几何模型, 如图 3.2 所示。利用 workbench 软件画出单体网格, 其网格类型采用三角形网格和混合网格两种, 得到网格数量 35124 个, 单体网格模型如图 3.3 所示。把网格模型导入到 Fluent 软件中, 并在软件中检查网格质量, 查验网格精度是否能够达到计算精度。然后定义电池单体各部分主要包括单体外壳、正极耳、负极耳的材料属性, 然后定义边界条件、赋予电池单体热源和设置求解器得到电池仿真模型。

在对电池单体做热效应模拟时, 仿真的边界条件和外部条件: 电池单体与空气定义为自然对流, 并设定环境的初始温度为 25°C , 自然对流换热系数一般取 $5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [80]。设置求解方式为瞬态分析, 并定义仿真时间和时间步长, 即可对单体电池模型求解, 得到仿真结果。

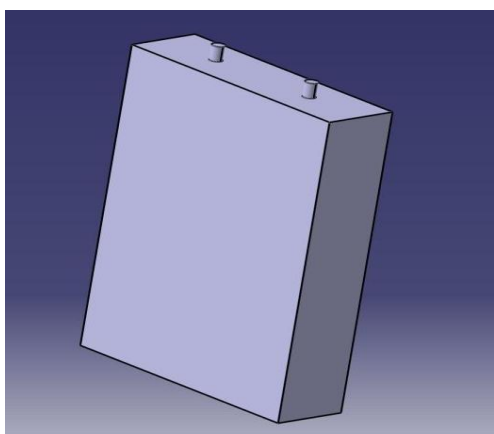


图 3.2 单体的三维模型

Fig.3.2 Three-dimensional model of monomer

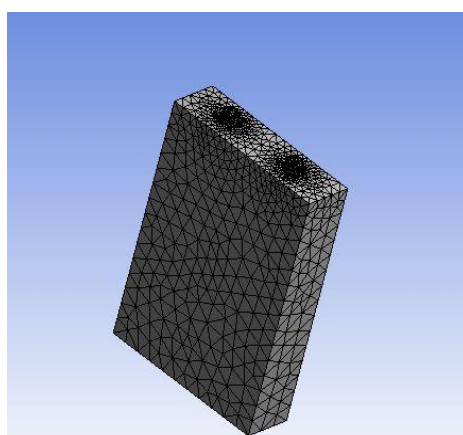


图 3.3 单体的网格模型

Fig.3.3 Monolithic mesh model

在定义热源时, 将电池单体在 1C 和 2C 放电倍率时的生热速率, 即上文式(3.10)

的热源公式通过 Fluent 中的 Interpreted UDF 语言进行编译，然后作为单体发热热源赋予到电池模型当中，同时定义正负极耳的生热速率。仿真结果图如下所示：

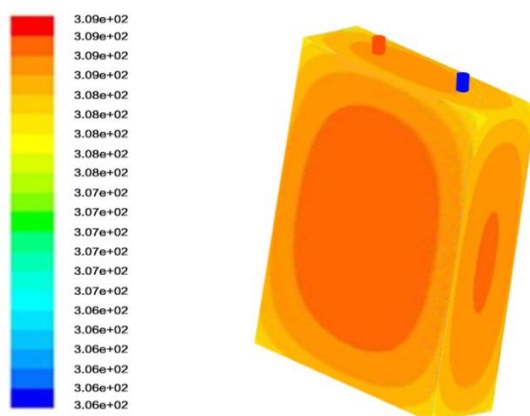


图 3.4 单体 1C 放电时的温度云图

Fig.3.4 Temperature contour of monomer in 1C discharge

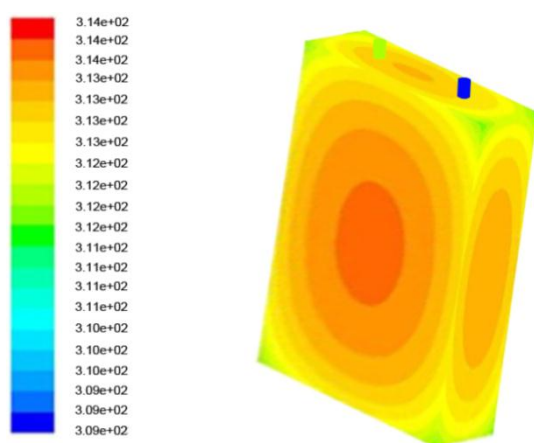


图 3.5 单体 2C 放电时的温度云图

Fig.3.5 Temperature contour of monomer in 2C discharge

图 3.4 和图 3.5 所示为电池单体的仿真云图，常温环境下电池单体在分别以放电倍率 1C 和 2C 放电完成后温度分别上升了 11℃ 和 16℃，且放电倍率为 2C 时单体的表面的温度梯度比放电倍率为 1C 时分层多，这是由于在散热条件相同的情况下放电电流大的产热量比较多，温度在单体表面聚集形成的梯度明显比小电流放电时多。此外可以直观地看出电池放电的时候发热的最高温度在中心位置，其主要原因就是中心的温度向外传导热量比较慢，热量容易聚积在中心处，从而形成高温区域，不利于单体温度的均匀性，同时电池单体的这种发热特点也为后面冷却管道设计提供理论依据。

另外，由温度云图中可以得到放电倍率为 2C 时单体的正负极耳的温度要比 1C

的高约 3°C 。同时相同放电倍率下，电池的两个极耳发热没有明显的梯度变化，正电极的温度要比负极的要大，这是因为正负极的体积小，发热量小，很容易与外界发生热量交换，热量不易堆积，正极的生热速率要大于负极的生热速率，故而正电极的温度要高一些。

3.3 实验验证

电池的生热是一个复杂的化学反应和物理反应的过程，在建立单体模型过程中，对其结构进行了相对简化，故而需要对上述的电池单体热模型的准确性进行实验验证，看其生热情况是否与实际情况相符。此外，电池单体热模型准确与否直接影响电池模组的散热结构设计及电池模组的仿真效果。本次电池单体的验证实验，由于受到学校实验条件和设备的限制，所以委托校外机构进行实验的具体操作。

3.3.1 实验步骤

实验的主要设备有电池充放电仪（宁波百特），其与电脑连接，用于设置充放电时电流和电压的值。恒温箱给电池单体提供稳定的环境温度，其可调节的温度范围为 $-40^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 。温度采集仪实时读取温度传感器测量到的温度值。主要的实验步骤如下所示：

- ① 设置 LiFePO_4 电池单体的四个侧面中心作为温度监测点；
- ② 将单体置于恒温箱中，设定恒温箱的环境温度为 25°C ，并把单体用绝热材料包裹；
- ③ 以 0.3C 的充电倍率对电池进行充电，至截止电压 14.8V 止，静置 15min ；
- ④ 以 1C 、 2C 的放电倍率分别对单体进行放电，至电压达到放电截止电压 9.6V 止，静置 30min 。同时用温度采集仪记录单体不同时刻的温度值。



(a)

(b)



(c)

图 3.6 (a)、(b)、(c) 为验证实验中所需设备

Fig.3.6 The equipment needed in the experiment

3.3.2 实验和仿真结果对比分析

实验测量的温度需要四个温度的平均值，然后选取 1C、2C 的放电倍率下，温度采集仪采集到的若干时间点的温度值，如图 3.7 所示。实验数据和仿真结果对比如表 3-5 所示：

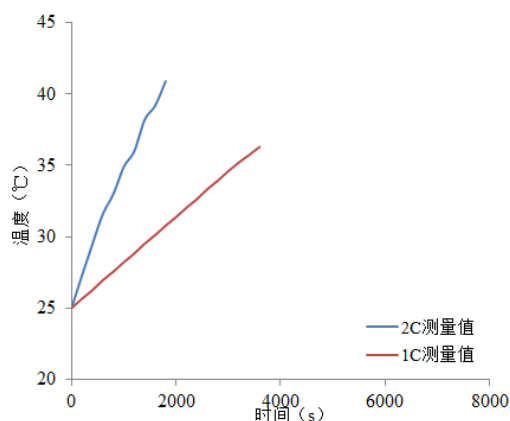


图 3.7 1C、2C 放电时的实验数据

Fig.3.7 Experimental data of the 1C and 2C discharge

表 3-5 实验和仿真数据对比

Tab.3-5 Comparison of experimental data and simulation data

放电倍率	单体终了温度 (°C)
实测 1C	36.3
实测 2C	40.9
仿真 1C	36.4
仿真 2C	41.3

由表 3-5 可知电池单体在放电倍率 1C、2C 下的实测温度与仿真温度分别相差 0.1℃、0.4℃。即得仿真温度与实测温度误差在 1%之内，验证了所建的 LiFePO₄ 单体模型的可行性和准确性。

3.4 小结

本章将长方体 LiFePO₄ 电池单体经过合理地简化建立了生热速率模型和三维几何模型。并且得出了电池单体的各参数数值（密度、三维方向上的导热系数、比热容）和确立了生热速率函数表达式。简介了 fluent 的仿真原理，用 UDF 编写热源程序，并应用该软件分析了在常温环境以及自然对流条件下单体模型以放电倍率 1C、2C 放电后的温升及温度云图。同时委托校外机构对所建的电池单体热模型做了温度采集实验，结果显示：仿真结果与实验结果误差在合理的范围内约为 1%，验证了热模型的可靠性。此外，单体在大电流放电时，单体的最高温度超过了 40℃。

4 多工况下 LiFePO₄ 模组的生热特性分析

研究电池模组的生热特性有静态和动态两种仿真方法。静态仿真时，设定电动汽车的电池模组在恒电流充电或放电的条件下，分析 LiFePO₄ 模组生热情况。此方法设置的工况较为简单，无法反映电池模组的实际使用性能。故而，为了得到准确的模组生热速率以及反映模组的 SOC、电流 I 等性能参数的变化规律，需要在多种工况中即是动态仿真分析模组的生热特性。

动态仿真的原理：实际循环工况运行过程中，电动汽车在爬坡、匀速、加速等工况运行时车辆的需求功率是不断变化的，随着电池组输出的电压和电流的动态变化，电池模组的生热量 Q 和生热速率 q 也发生相应的改变。

本章利用 ADVISOR 软件建立整车模型，并设置 NEDC、匀速和爬坡三种工况。仿真分析纯电动汽车在三种工况下的 LiFePO₄ 模组充放电时各参数的变化规律，获得电池组实时的生热速率的数学表达式，为后续第五章中的电池模组提供热源数据。

4.1 整车参数和约束目标

整车技术参数是以国内某车企的纯电动汽车为参照，如表 4-1 所示。其中电池模组参数和电机参数可参照下文小节中的设置。根据该组参数建立的整车仿真模型时，应达到设定的动力性和续航里程技术目标。

表 4-1 整车技术参数

Tab.4-1 Vehicle technical parameters

整车技术参数	数值	整车技术参数	数值
整车整备质量 (kg)	1200	电池	LiFePO ₄
满载质量 (kg)	1500	风阻系数*迎风面积 (m ²)	0.6
轴距 (mm)	2400	滚动阻力系数	0.012
轮胎滚动半径 (m)	0.235	主减速比	6.39
质心高度 (m)	0.52	机械传动效率	0.92

以纯电动汽车的动力性和续航里程为双约束目标，要求整车的动力性：最大爬坡度 30%、最高车速 100 km/h；加速能力：0~50 km/h 加速时间 (s) 小于等于 10s；50~80 km/h 加速时间 (s) 小于等于 15s；续航里程：续驶里程≥160Km^[77]。

4.2 建立纯电动汽车整车模型

Advisor(全称是 Advanced Vehicle Simulator)主要是对 CV、EV、HEV 和 FCEV 四种类型车辆的动力性能、燃油经济性以及排放在选择的循环工况下进行仿真分

析而开发的汽车仿真软件。此外,该仿真软件可为新能源汽车的电池组、变速器、车轮车轴以及电机等部件的参数匹配提供仿真优化平台,以及还可以对这些部件进行策略控制的研究。

Advisor 是一款实用的汽车专业分析软件,具有操作简单、GUI 界面友好、输出结果可视化等优点。它是基于 Matlab /Simulink 平台下开发的,其内部的各种部件的仿真模型均采用程序模块化的方法来建立的。此外软件中的模型都可以免费调用,源程序代码也是公开的。使用者可以根据自己需求修改模型功能或直接在原有模型的基础上进行二次开发。同时 Advisor 具有多个开放接口,可以与其他软件进行联合仿真^{[48][75]}。

根据本文的研究对象选择了动力模型 (Drivetrain Model),建立基本纯电动汽车整车模型,如图 4.1 所示。该整车模型主要包含的部件模型有五个:基本模型 (vehicle)、主减速器模型 (final drive)、变速器模型 (transmission) 车轮&车轴模型 (wheel&axle)、电机模型 (motor) 和动力电池组模型 (ESS)。首先在仿真之前根据约束条件,对上述五个部件的参数在 GUI 界面相应的 M 文件上分别进行自定义设置。然后在选择的工况中对电动汽车开始仿真并进行结果分析。

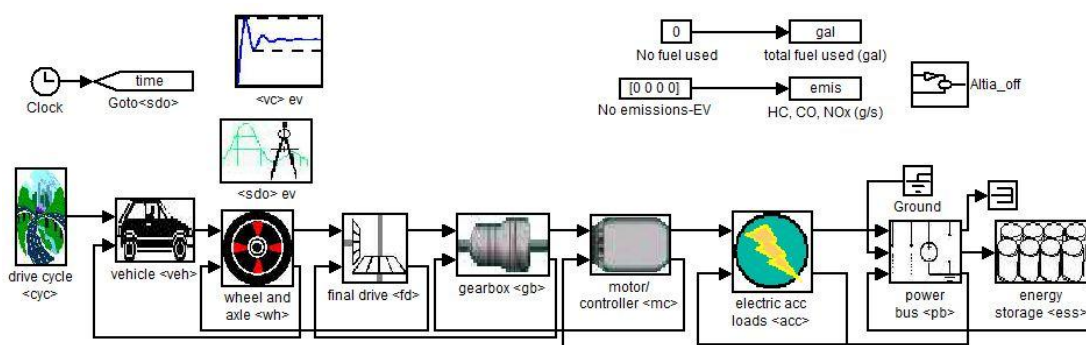


图 4.1 纯电动汽车整车模型

Fig.4.1 Battery electric vehicle model

4.2.1 建立动力电池组模型

本文所研究的 LiFePO_4 动力电池组应用在实际的整车行驶工况时,电池组产生大量的热,且这些热量不能够及时的散发出去,导致电池组的温度迅速升高。过高的温度会影响电池的 SOC 值、充放电电流值等参数值,所以电池组的生热特性是与多个电池参数变量表现为非线性的函数关系。

(1) 电池组 Rint 模型

该模型是建立电池组模型的基础,主要包括的参数有电池组的开路总电压和总电阻。这两个参数的求解方式为:依据电机的需求功率、SOC 值以及电池单体温升通过它们之间的关系曲线查表得到一个单体的开路电压值和电阻值。然后再

乘以单体的串联个数，得到电池组的总电压和总电阻。

(2) 最大功率限定模块

该模块通过电机的最小电压限值、电池组的 SOC 以及电池组的电压等参数来限值 LiFePO₄ 电池组的最大输出功率。该限定模块的工作原理是：当电池荷电量接近为 0 时，若电动汽车的需求功率仍为正值，则此时 LiFePO₄ 电池组的放电电流限值为 0，即是电池组的输出功率为 0；相反的，当电池荷电量接近为 1 时，如果电机的输入功率为正值或者外电路继续向电池组充电情况下，则此时功率同样限制为 0。功率限定的实质就是避免电池组过放和过充的情况，起到保护电路和电池组的作用。综上可得，限定 LiFePO₄ 电池组的最大输出功率公式如下：

$$P = \frac{(E-U)U}{r} - 0.1 \quad (4.1)$$

式中：

E ——电池组开路电压 (V)；

U ——电池组端电压 (V)；

r ——电池组内阻 (Ω)；

(3) 计算外电路电流模块

该模块实质是根据电池组安全工作时的最大输出限定功率、电压等参数值来计算负载电路中正常工作时的电流和最大的充放电电流。当 LiFePO₄ 模组处于充电状态时，必须限制最大电流值以保护电池组的容量等免受损害。计算外电路电流的公式如下所示：

工作电流：

$$I = \frac{U_{oc} - \sqrt{U_{oc}^2 - 4RP}}{2R} \quad (4.2)$$

限制电流：

$$I_{lim} = \frac{U_{oc} - U_{max}}{R} \quad (4.3)$$

式中：

U_{oc} ——LiFePO₄ 模组的开路电压 (V)；

R ——LiFePO₄ 模组的内阻 (Ω)；

U_{max} ——LiFePO₄ 模组的最大的截止电压 (V)；

P ——LiFePO₄ 模组的输出功率限值 (W)；

(4) 计算 SOC 模块

SOC (State of capacity) 一般用百分数表示，其值在 0~1 的范围内。它表示电池组的剩余荷电荷数与额定荷电量的比值。计算 SOC 值一般有两种方法：对电池组进行放电实验测得 SOC 值，另一种就是安时积分法。在本文中采用的是第二种计算方法，其 SOC 计算公式如下所示：

磁无刷电机、开关磁阻电机等，其中交流电机具有结构简单、坚固耐用、成本较低、过载能力强等优点。随着交流变频调速技术和矢量控制技术的发展，交流电机逐步取代直流电机成为纯电动汽车的驱动电机。因此，本文选取交流感应电机作为纯电动汽车的驱动电机。

为了实现纯电动汽车驱动电机较宽的调速范围，通常综合运用减弱磁通和降低电枢电压两种电机调速方法来获得低速恒转矩、高速恒功率的驱动电机调速特性，如图 4.3 所示，其具体表达式如下：

$$T = \begin{cases} 9550P_e/n_e, & n \leq n_e \\ 9550P_e/n, & n > n_e \end{cases} \quad (4.5)$$

式中：

T ——电机驱动转矩 (N·m)；

P_e ——电机额定功率 (kW)；

n_e ——电机基速 (r/min)；

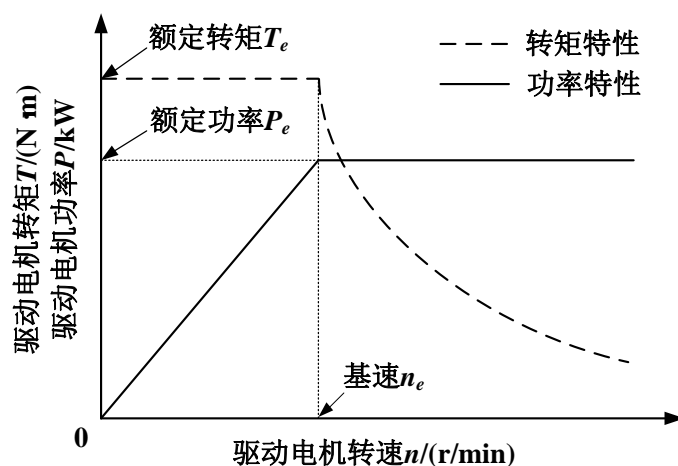


图 4.3 驱动电机调速特性

Fig.4.3 Governing characteristics of the driving motor

电机的建模方法主要分为理论建模法和实验建模法两类，本文综合考虑驱动电机的调速特性及其控制系统的功能，采用理论建模法来建立驱动电机的模型。纯电动汽车驱动电机的建模过程具体如下：

(1) 驱动电机需要提供的转速、转矩及功率计算

驱动电机转速和纯电动汽车纵向车速之间的关系式为：

$$n = \frac{30i_g i_0 u}{\pi R} \quad (4.6)$$

式中：

n ——电机转速 (r/min)；

i_g ——变速器传动比；

i_0 ——主减速器传动比；

行驶于水平路面的纯电动汽车驱动力——行驶阻力平衡方程为：

$$\left(m + \frac{I_m i_g^2 i_0^2}{R^2} + \frac{I_w}{R^2} \right) \frac{du}{dt} = \frac{T i_g i_0 \eta_m}{R} - F_f - F_w \quad (4.7)$$

式中：

I_m ——电机转子绕转轴的转动惯量 (kg m^2)；

I_w ——车轮绕车轴的转动惯量 (kg m^2)；

η_m ——电机转矩输出效率；

由上式 (4.7) 可以求得纯电动汽车驱动电机所需的电磁转矩和功率分别为：

$$T = \left[\left(m + \frac{I_m i_g^2 i_0^2}{R^2} + \frac{I_w}{R^2} \right) \frac{du}{dt} + F_f + F_w \right] \cdot \frac{R}{i_g i_0 \eta_m} \quad (4.8)$$

$$P = \left[\left(m + \frac{I_m i_g^2 i_0^2}{R^2} + \frac{I_w}{R^2} \right) \frac{du}{dt} + F_f + F_w \right] \cdot \frac{u}{\eta_m} \quad (4.9)$$

(2) 驱动电机的矢量控制

交流感应电机的数学模型具有非线性、多变量、强耦合等特点，采用矢量控制通过坐标变换可将电机数学模型解耦线性化，使交流感应电机具备类似于直流电机的动态特性。纯电动汽车驱动电机的矢量控制过程具体如下：

① 交流感应电机的坐标变换

基于 Clarke 变换和 Park 变换，将交流感应电机的三相静止坐标系 ABC 转换为两相同步旋转坐标系 MT，如图 4.4 所示。通过上述变换可将三相静止坐标系下的交流量转化为两同步旋转坐标系下的直流量，其变换矩阵为：

$$C_{3s/2r} = C_{3s/2s} \cdot C_{2s/2r} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma \\ -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

式中， γ 为三相静止坐标系 A 轴与两相同步旋转坐标系 M 轴之间的夹角，rad。

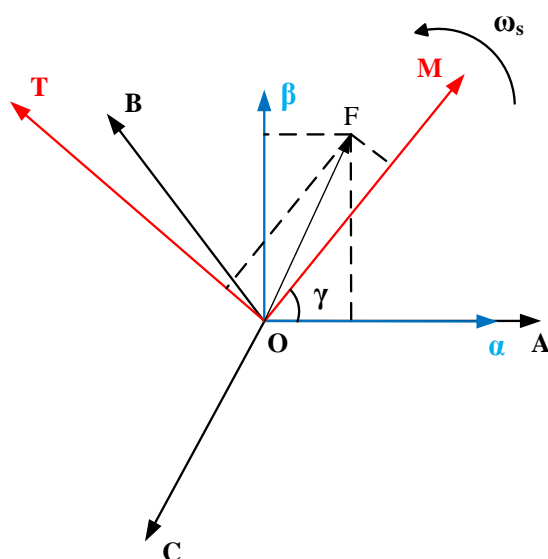


图 4.4 驱动电机坐标变换图

Fig .4.4 Coordinate transformation diagram of the driving motor

② 交流感应电机同步旋转坐标系数学模型

笼型交流感应电机在两相同步旋转坐标系 MT 中的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_M \\ u_T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -\omega_s L_s & L_s p & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s + L_s p & \omega_s L_m & L_m p \\ L_m p & 0 & R_r + L_r p & 0 \\ L_m (\omega_s - \omega) & 0 & L_r (\omega - \omega_r) & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_M \\ i_T \\ i_m \\ i_t \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

式中:

u_M 、 u_T ——电机定子 M 轴、T 轴的电压 (V);

R_s 、 R_r ——坐标系 MT 中电机定子、转子绕组的电阻 (Ω);

L_s 、 L_r ——坐标系 MT 中电机定子、转子绕组的自感系数 (H);

p ——微分算子;

ω_s ——电机的电角速度 (rad/s);

L_m ——坐标系 MT 中电机定子、转子绕组之间的互感系数 (H);

ω ——电机转子的角速度 (rad/s);

i_M 、 i_T ——电机定子 M 轴、T 轴的电流 (A);

i_m 、 i_t ——电机转子 M 轴、T 轴的电流 (A);

电机在坐标系 MT 中的磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \psi_M \\ \psi_T \\ \psi_m \\ \psi_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_M \\ \psi_T \\ \psi_r \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_M \\ i_T \\ i_m \\ i_t \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

式中:

ψ_M ——电机定子 M 轴磁链 (Wb);

ψ_T ——电机定子 T 轴磁链 (Wb);

ψ_m ——电机转子 M 轴磁链 (Wb);

ψ_t ——电机转子 T 轴磁链 (Wb);

ψ_r ——电机转子磁链 (Wb);

电机的转矩及动力学方程为:

$$T_e = p \frac{L_m}{L_s} i_T \psi_r = T_L + \frac{I_m}{p} \frac{d\omega}{dt} \quad (4.13)$$

式中:

T_e ——电机电磁转矩 (N m);

T_L ——电机输出轴上的机械转矩 (N m);

③ 驱动电机的工作效率图及电机控制模型结构图

驱动模式下, 纯电动汽车驱动电机处于电动机状态, 而在制动工况下, 驱动电机处于发电机状态, 电机控制器控制驱动电机回收再生制动能量, 纯电动汽车驱动电机的工作效率图如图 4.5 所示。

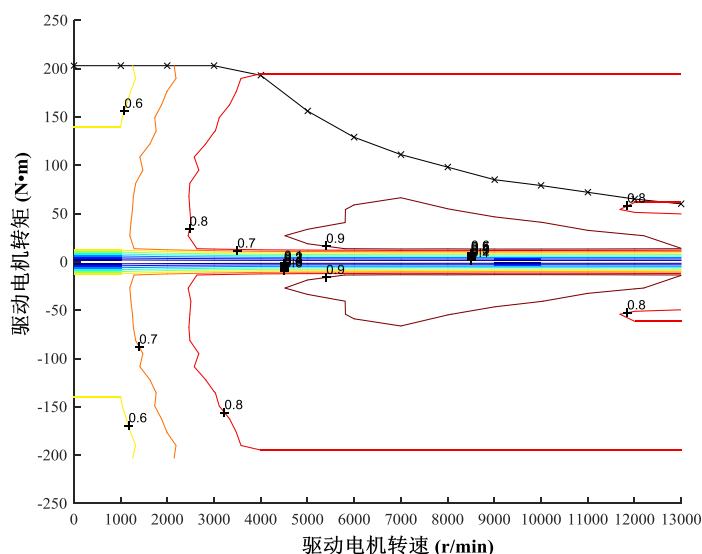


图 4.5 驱动电机工作效率

Fig.4.5 Working efficiency diagram of the driving motor

驱动电机的输入转矩、转速取决于不同工况下纯电动汽车的车速以及所需的驱动转矩/再生制动力矩，同时电机需求的输入功率由输入转矩和转速共同决定，并由电机控制系统控制，而电机的最大输入功率则受转子最大驱动转矩以及电机温控模型的限制，因而可以确定出驱动电机控制模型结构，如图 4.6 所示。

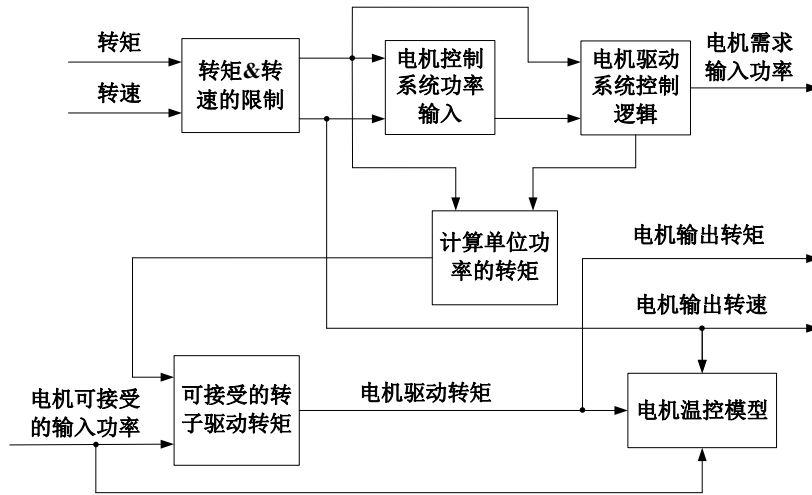


图 4.6 驱动电机控制模型结构

Fig.4.6 Control model structure diagram of the driving motor

综上所述,采用 MATLAB/Simulink 建立纯电动汽车驱动电机及其控制器模型,如图 4.7 所示。

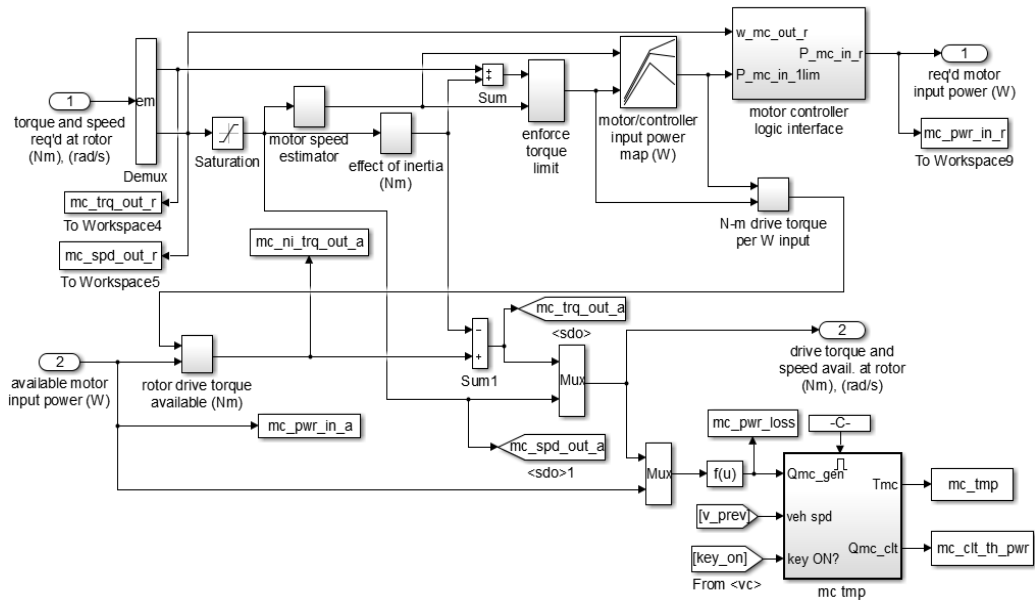


图 4.7 驱动电机及其控制器模型

Fig.4.7 Driving motor model and its controller model

4.3 设定整车仿真参数

以纯电动汽车的动力性和续航里程为约束目标，分别对各模型中的参数进行修改，其包括 vehicle 模型、motor 模型、Energy Storage 模型等。GUI 界面如图 4.8 所示：

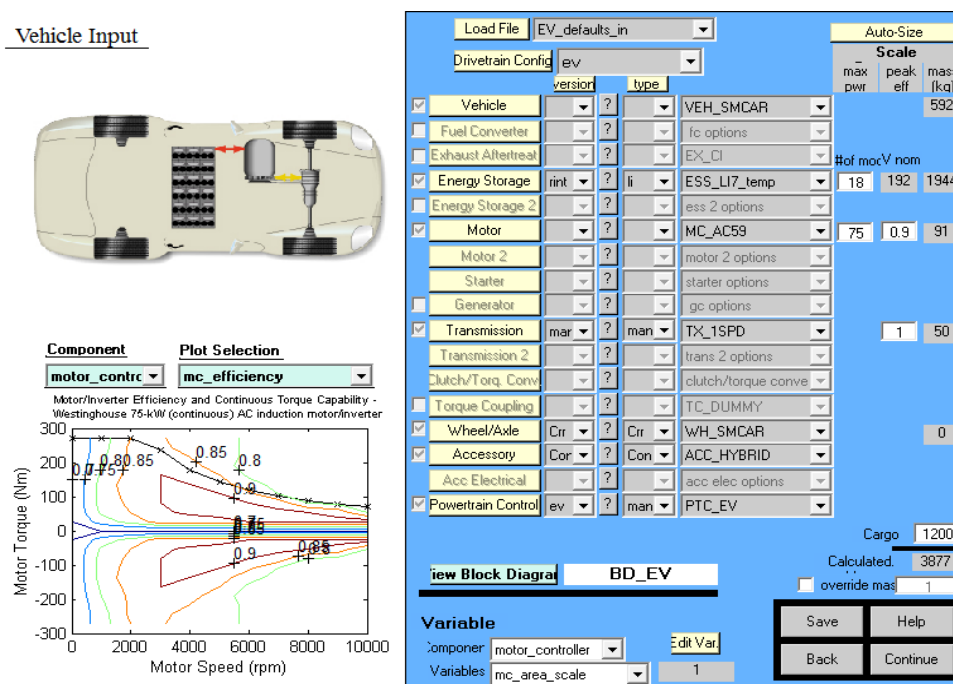


图 4.8 整车仿真参数定义界面

Fig.4.8 Definition interface of vehicle simulation parameters

(1) 设定整车参数

整车参数包括整车的整备质量、风阻和滚动阻力系数、迎风面积等参数分别赋予到 vehicle 的 M 文件中。设置整车参数：

整备质量 (veh_cargo_mass) 为 1200 (kg)；车辆的风阻系数 (veh_CD) 值为 0.2；车辆的后轴载荷 (veh_front_wt_frac) 等于 0.64；车辆的受力面积 (veh_FA) 值为 0.3 (m²)；车辆轴距 (veh_wheel) 等于 2.4 (m)。

(2) 电池参数的定义

在 Energy Storage 选中 rint 内阻模型、电池类型为 li。并在其 M 程序文件中自定义 LiFePO₄ 电池组相关参数：

LiFePO₄ 电池组中单体电池的块数 (ess_module_num) 是 18 个；LiFePO₄ 电池组的最大电压为 270 (V)；LiFePO₄ 单体的质量 (ess_module_mass) 是 7.2 (kg)。

(3) 电机参数的定义

把建立的电机模型导入到 advisor 整车模型中，并对电机的 M 文件进行修改：分别定义电机的转速和转矩范围如下所示：

$$mc_map_spd = [0,500,1000,1500,2000,2500,3000,3500,4000,4500,5000,5500,6000,6500,7000] * (2 * pi / 60)$$

$$mc_map_trq =$$

$$[-200, -175, -150, -125, -100, -75, -50, -25, 0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200]$$

本文除定义以上的模型参数之外，还自定义了变速器模型的参数、车轮/车抽模型的参数等，这里不做叙述。

4.4 整车仿真工况的结果分析

完成整车模型参数设定以后，在整车仿真的 GUI 界面中选择合适的循环工况，如图 4.9 所示。advisor 中提供了主要包括美、欧、日等国家的三十几种 Drive Cycle（道路循环工况）^[81]。本章节采用我国车辆测试常用的循环工况——新欧洲循环工况(NEDC 工况)，在此工况中车辆需要经历四个城市循环工况和一个市郊工况，同时设定加速时间和爬坡坡度的动力性约束和电池模组放电深度的续航里程约束。仿真结果如图 4.10~图 4.12 所示：

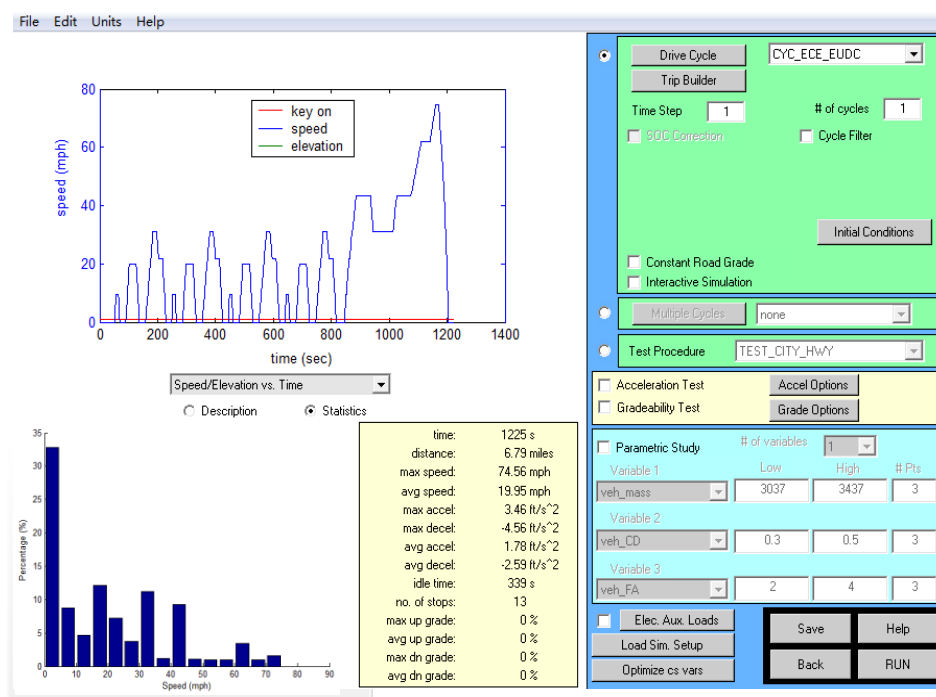


图 4.9 仿真工况的选择界面

Fig.4.9 Selection interface of the simulation conditions

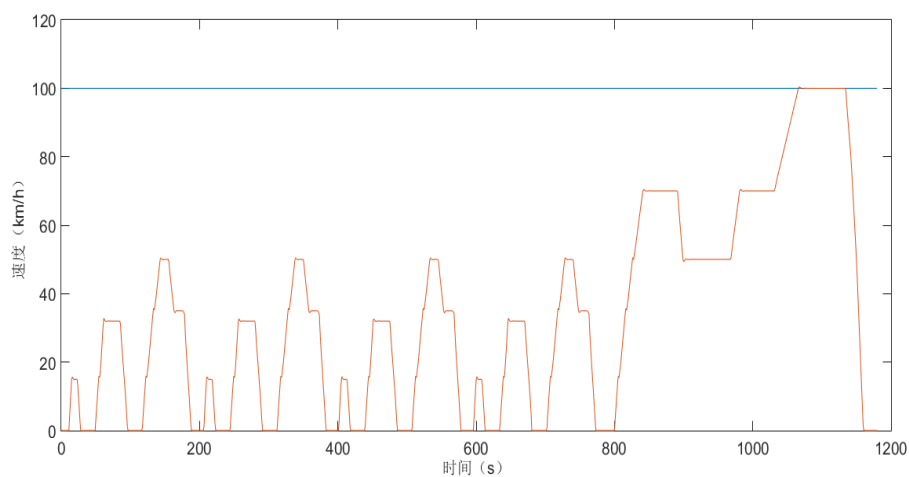


图 4.10 NEDC 工况下车速的变化曲线

Fig.4.10 Speed curve under NEDC conditions

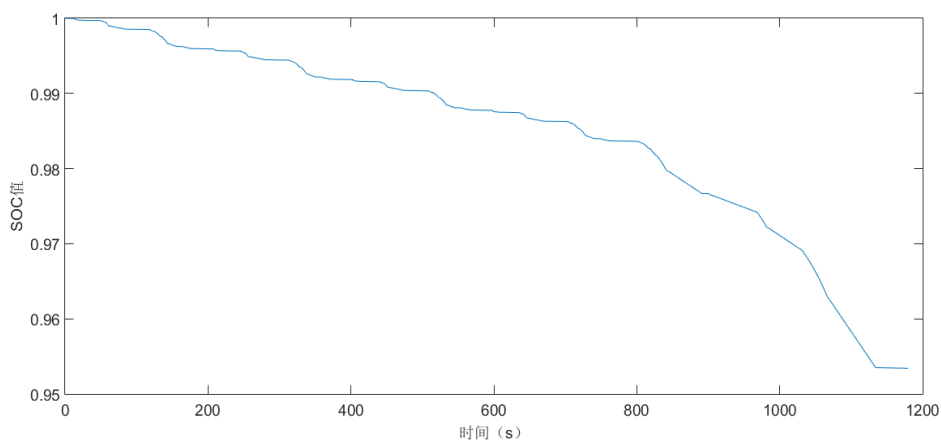


图 4.11 NEDC 工况下 SOC 的变化曲线

Fig.4.11 SOC curve under NEDC conditions

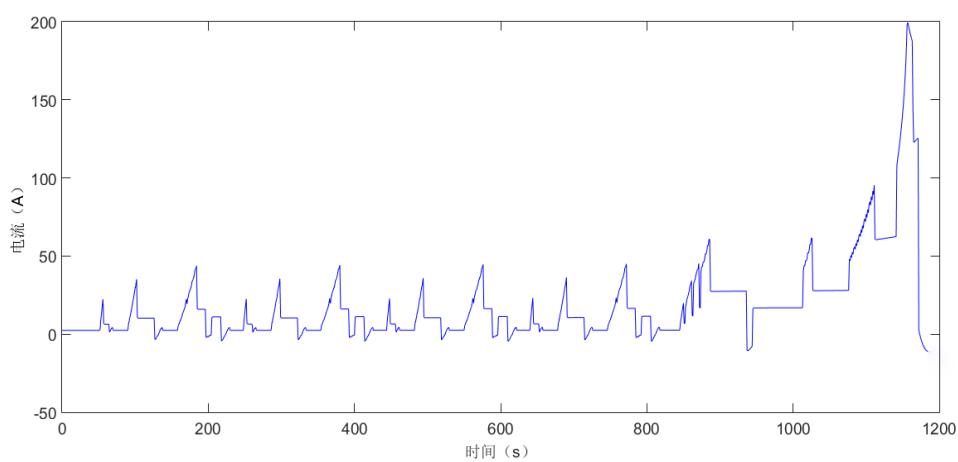


图 4.12 NEDC 工况下电流的变化曲线

Fig.4.12 Current curve under NEDC conditions

仿真结果图 4.10~4.12 中分别列出了 NEDC 工况中纯电动汽车的车速、SOC、电流三种参数的变化曲线。仿真结果表明,纯电动汽车在整个工况中共怠速 14 次,其中城市循环工况怠速 13 次,市郊工况怠速 1 次, SOC 值从 1 下降到 0.953, 荷电量降低了 4.7%。

在四个城市循环工况中纯电动汽车的车速都在 0km/h~60km/h 范围内, SOC 变化曲线较为缓慢, 其值从 1 下降到 0.984, 电池模组荷电量下降了 1.6%, 放电倍率则在 0.5C 以下且伴有给电池模组充电过程(即是电机制动能量的回收过程)。此外, 在市郊工况中, 车速运行在 0km/h~100km/h 范围内, 且以最高车速 100km/h 运行时间为 69s。此工况中 SOC 值则迅速下降了 3.1%, 电流出现最大瞬时电流, 其值为 200A, 放电倍率为 2C。

由公式 (3.8) 和从上图中易得, 在 NEDC 工况下四个城市循环工况中电池模组的放电电流在 50A 以下, 车辆的需求功率小, 电池模组的生热量也较小。而在市郊工况下车辆主要表现其动力性, 由于车辆的车速高、需求功率变大, 电池组的输出功率和电流也会相应增大, 该过程中电流出现了最大瞬时电流, 电池模组也达到了最大的生热速率。此外, 该工况中的生热速率会使电池组的温度迅速升高, 若不对其温度加以控制会影响车辆行驶的安全性和电池的寿命。综合考虑在充分展现车辆电池组的动力性条件下, 求得电池的生热速率, 作为第五章电池模组热仿真的热源输入, 并对此时的模组进行温度控制才具有实际意义。

故而下文分别设定了对纯电动汽车进行两种极限工况的仿真, 一种工况是在坡度 30% 的长坡上以 20km/h 匀速行驶, 另一种工况是以最高车速 100km/h 匀速行驶, 同时定义仿真时长为 1800s。分别得到不同工况下各物理参量随时间的变化曲线, 如图 4.13~4.18 所示:

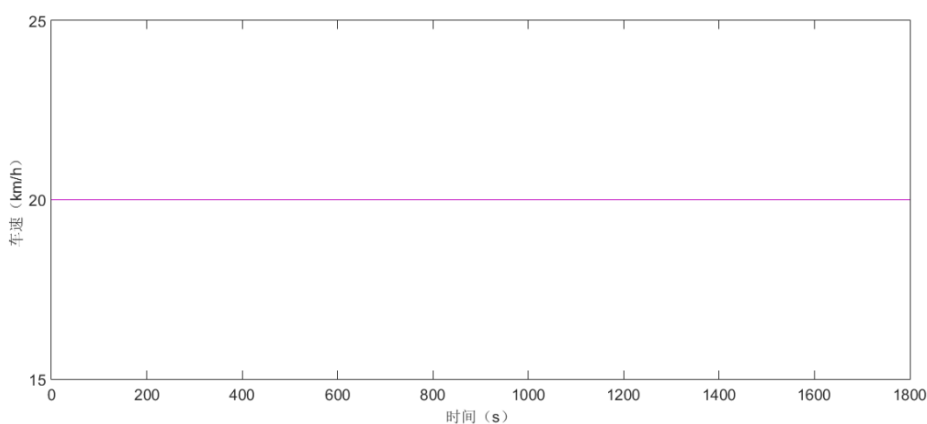


图 4.13 20km/h 匀速爬坡

Fig.4.13 Uniform speed of 20km/h under climbing condition

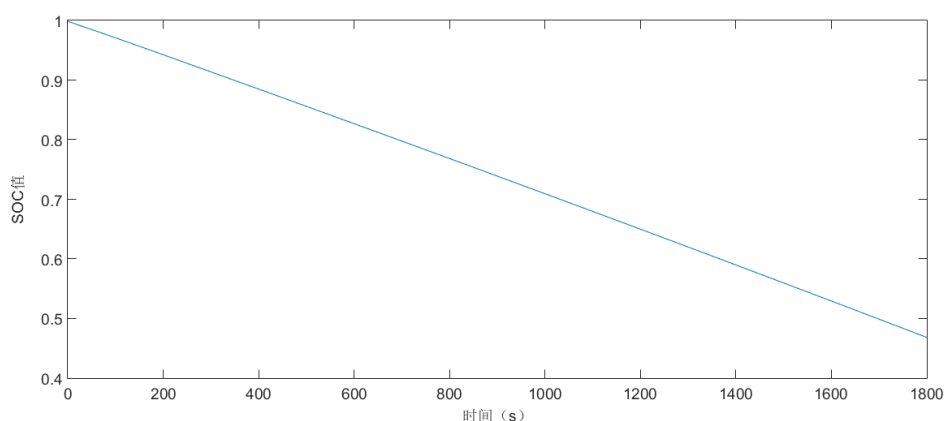


图 4.14 爬坡工况下 SOC 值的变化曲线

Fig.4.14 SOC curve under climbing condition

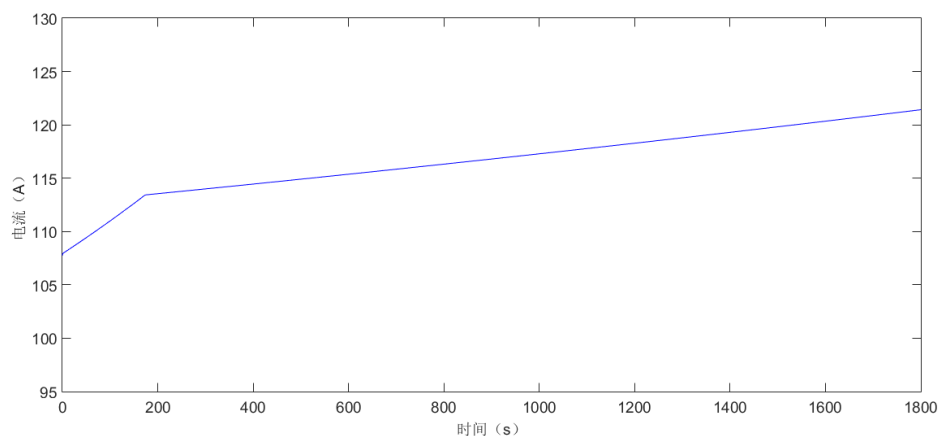


图 4.15 爬坡工况下电流的变化曲线

Fig.4.15 Current curve under climbing condition

图 4.13~图 4.15 是纯电动汽车在坡度 30% 的长坡上以 20km/h 匀速行驶工况下车速、SOC、电流的变化曲线。锂离子电池模组的 SOC 值从 1 下降到了 0.47，荷电量减少了 53%。电流从 107.7A 增长到 121.4A，增长了 13.7A。在 0s~180s 时间段，电池模组的输出电流急剧增加，这是由于匀速爬坡的所需功率是恒定的，随着电池模组的深度放电，其输出电压逐渐减小，电流则逐渐增大。180s 之后电流的曲线趋势变得缓慢，电池模组的生热量不断累加，此时模组的温度也会不断的升高。

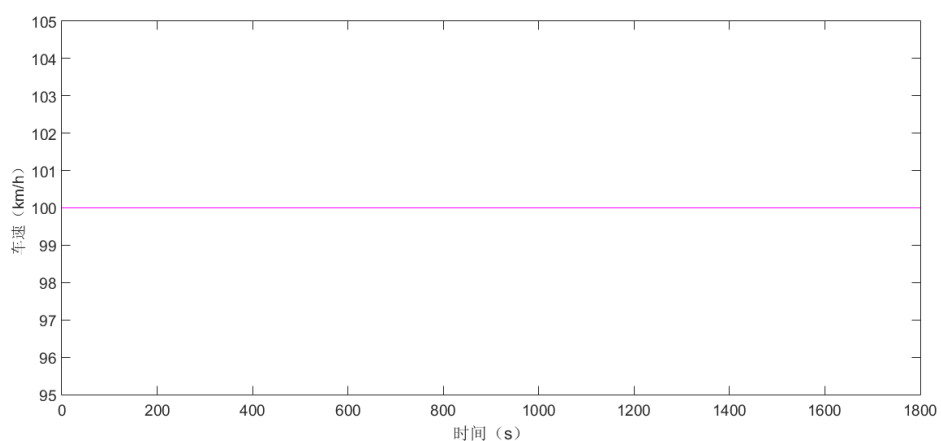


图 4.16 匀速 100km/h 工况

Fig.4.16 Uniform speed of 100km/h operating conditions

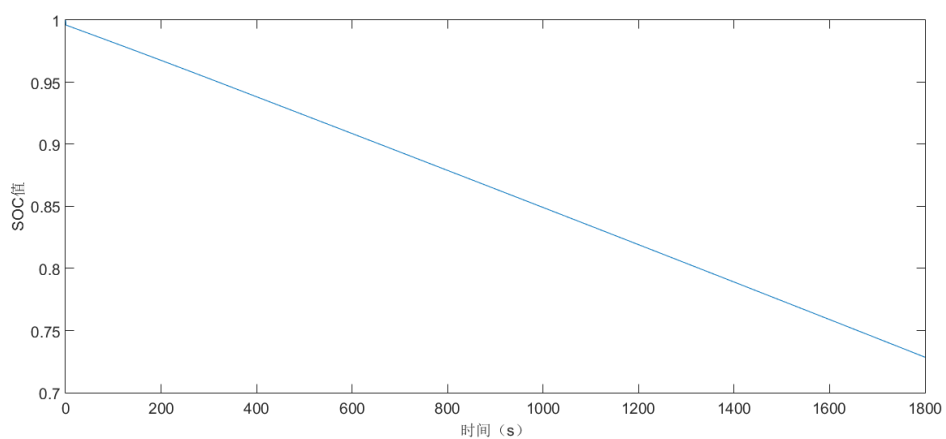


图 4.17 匀速工况下 SOC 的变化曲线

Fig.4.17 SOC curve under uniform conditions

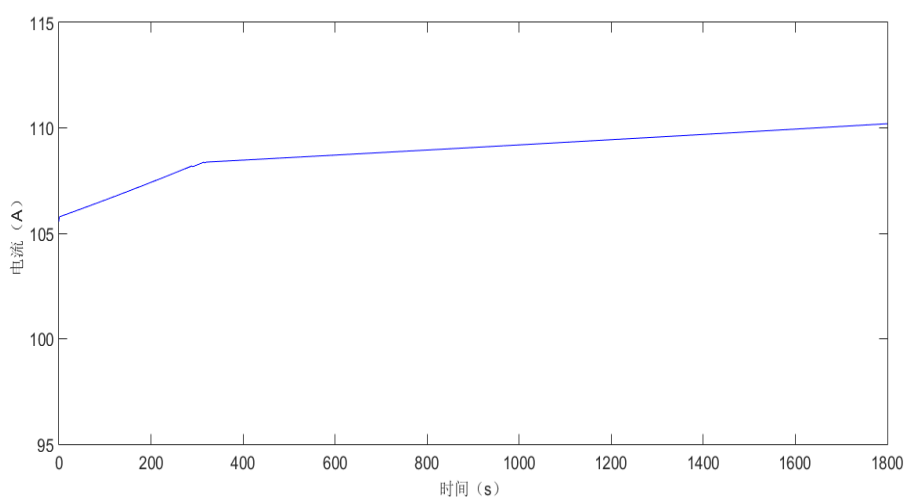


图 4.18 匀速工况下电流的变化曲线

Fig.4.18 Current curve under uniform conditions

图 4.16~图 4.18 是纯电动汽车在 100km/h 匀速工况下车速、SOC、电流的变化

曲线。SOC 值从 1 降低到 0.73，荷电量降低了 27%。电流的变化趋势与爬坡工况下的相似，都是先迅速增加，然后电流的变化量变得缓慢。在仿真时间内电流值从 105.5A 增加到 110.1A，与爬坡工况相比其电流的变化量较小，生热量也较小。

从两种极限工况比较易得，纯电动汽车在坡度 30% 的长坡上以 20km/h 匀速行驶工况下电流值最大，生热量和生热速率也最大，故而得到此工况下电流与时间的关系式，并把该拟合公式 $I-t$ 代入到式 (3.8) 中得到生热速率与时间 ($q-t$) 的关系式：

$$I = \begin{cases} 0.2t + 105.75 & (0 \leq t \leq 170) \\ 0.01t + 99 & (170 < t \leq 1800) \end{cases} \quad (4.14)$$

$$q = \begin{cases} 0.05t^2 + 61.45t + 18298.5 & (0 \leq t \leq 170) \\ 0.00013t^2 + 2.89t + 16282.53 & (170 < t \leq 1800) \end{cases} \quad (4.15)$$

4.5 小结

本章节以纯电动车的动力性和续航里程为约束目标，在 ADVISOR 中建立了整车模型，并修改了相应的模型参数。在新欧洲循环工况下对整车模型进行了仿真，得到了车辆的车速和 LiFePO_4 电池模组的电流及 SOC 的变化曲线，得出车辆在市郊工况下较大的生热速率。同时以满足车辆最大动力性为目标，定义了爬坡工况和匀速工况，得到两工况下电池模组的电流等物理参量的变化规律。然后两个极限工况相比较，求得爬坡工况下电池模组的生热速率最大，并作为热源输入到第五章 LiFePO_4 模组热仿真中。

5 LiFePO₄ 模组结构设计和热仿真分析

作为纯电动汽车的动力部件，LiFePO₄ 模组是由十几甚至几十个单体组成，在纯电动汽车行驶时提供车辆所需的功率，并在此过程中产生大量热。这些热量分布的不均匀，会使电池组的温度升高，导致电池单体温差变大，影响电池组的整体性能和单体的循环寿命以及一致性。故而，本章需要设计合理的箱体结构和冷却结构，使 LiFePO₄ 电池模组的温度在最佳的工作区间并保证单体的一致性。

5.1 LiFePO₄ 模组热管理设计目标

LiFePO₄ 模组的最高温度和各单体之间温差是影响电池的循环寿命和单体一致性的主要因素，同时它们也直接关系着车载 LiFePO₄ 动力电池组的性能。本文以上述两个参量为设计目标，设定了电池模组的最高温度值和单体之间的最大温差值。

(1) 温度对循环寿命的影响

温度和电池的循环寿命关系式表示为：

$$\frac{dX}{dT} = A_0 e^{-G/RT} \quad (5.1)$$

式中：

dX/dT ——电池的 SOC 随着温度变化的失效退化率 (/K)；

A_0 ——反应常数；

G ——LiFePO₄ 电池的吉布斯自由能 (kJ/mol)；

R ——气体常数，取值为 8.14；

由式 (5.1) 可知，电池的温度越高，失效退化率越大，电池的 SOC 值越小、循环次数越少。同时有实验证明，电池温度从 25℃ 增加到 26℃ 时，电池的失效退化率就增加 5%^[75]。

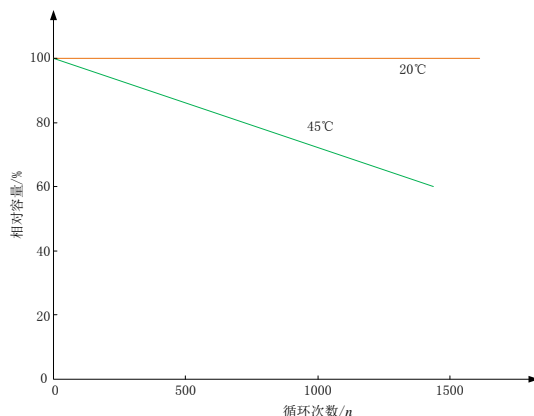


图 5.1 LiFePO₄ 电池循环寿命与温度关系的示意图

Fig.5.1 Schematic diagram of relationship between cycle life and temperature of LiFePO₄ battery

故而，为了 LiFePO_4 电池有良好的工作性能和较大的循环使用次数，需使其工作在最佳温度区间 $20^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$ 。本文设定电池组的最大温度不超过 32°C 。

(2) 电池单体的一致性

从制造工艺方面减小电池单体的发热的差异性，是不现实的，这主要是受限于现阶段的制造工艺水平。本文是依据美国 Ahmad A. pesaran 等人实验数据来设定单体一致性目标。实验得出的结论： LiFePO_4 电池组中单体温差不超过 $5^\circ\text{C}\sim 8^\circ\text{C}$ ，各单体之间的容量和功率密度差别在 5% 的范围之内^[82]。故而本文设定 LiFePO_4 电池单体之间的温差不超过 5°C 。

5.2 LiFePO_4 电池模组及冷却系结构设计

(1) 电池模组的整体设计

利用 CATIA 软件建立 LiFePO_4 电池模组的三维模型，其整体结构如图 5.2 所示。电池模组的总体布置情况：综合分析目前市场上出现的电池箱体的结构和材料，选取本文的箱体外壳为钢材料并经过钣金工艺处理，其结构尺寸长*宽*高为 $680\text{mm}\times 428\text{mm}\times 301\text{mm}$ 。模组总共有 18 块单体电池组成，成轴对称排列，每列有 9 个单体，且两列的间隙为 6mm 。单体与单体之间有 12mm 的缝隙，冷却管道镶嵌其中，并与单体紧密接触，共有 20 个管道。此外，模组的顶部是镂空的，有利于模组上表面与空气对流换热。

图 5.3 所示是未加冷却盘管时模组结构，其尺寸长*宽*高为 $538\text{mm}\times 428\text{mm}\times 301\text{mm}$ 。加装冷却盘管后，箱体在长度方向上增加了 42mm ，空间占比增加了 0.0054m^3 ，相对于原模组空间占比增加较小。此外单体成组之后，根据磷酸铁锂单体的相关参数可计算得到其能量密度为达到 200.3Wh/kg ，按照 pack 成组效率 70% 粗略计算可得该模组的能量密度为 140Wh/kg ，相对于原模组的能量密度降低了约 6.1%。但根据电池成组后的行业标准和现有的成组（主要是参照宁德时代、国轩和比亚迪的成品），本文模组的能量密度符合成组后大多数模组的能量密度在 140Wh/kg 及以上的现行要求，其值能够满足车辆的行驶需求。

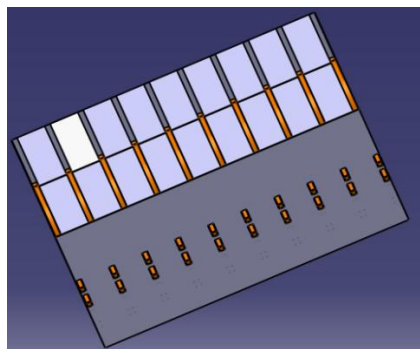


图 5.2 箱体结构

Fig.5.2 Box structure

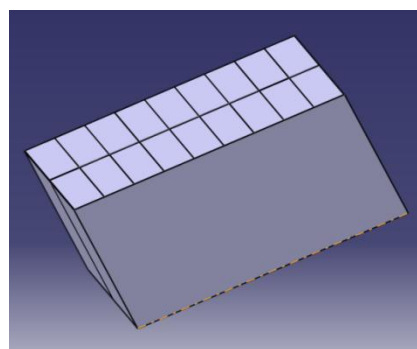


图 5.3 原箱体结构

Fig.5.3 Original box structure

(2) 模组上盖结构设计

图 5.4 是箱体的上盖结构，长*宽为 680mm *428mm、厚度为 2mm。此种结构主要用于固定电池单体、降低箱体的重量以及便于模组上表面与空气进行对流换热，同时该结构也用于密封模组中相邻单体之间的间隙。为了使箱体轻量化，从设计手册中选取上盖的材料为碳纤维复合材料 T700，其主要优势是具有较好的力学性能、耐高温性能和传热性能。此外，为了达到上盖的密封效果即冷却管与空气之间没有对流，在壳体与上盖结合处以及单体与上盖的结合处使用有机硅胶进行密封处理，以保障冷却液对模组有良好散热。该有机硅胶具有耐高温、耐腐蚀和抗冲击等优点。在进行热仿真过程中，考虑到其密封和轻量化的作用，其对上表面的对流换热影响不大，故而简化了该结构。

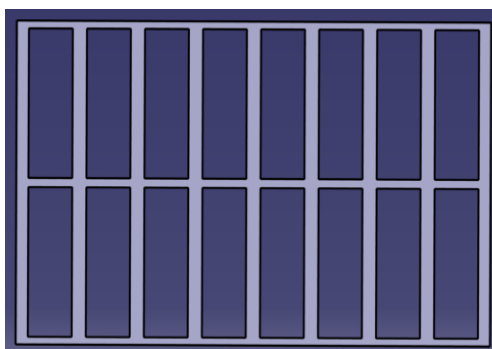


图 5.4 箱体的上盖结构

Fig.5.4 Box Superstructure

(3) 冷却管道设计

在进行本文冷却管道设计之前，首先对常见的夹套液冷结构进行总结，分析它们的结构特点，并结合其优点设计出本文中电池单体和模组进行冷却时所需的冷却结构。

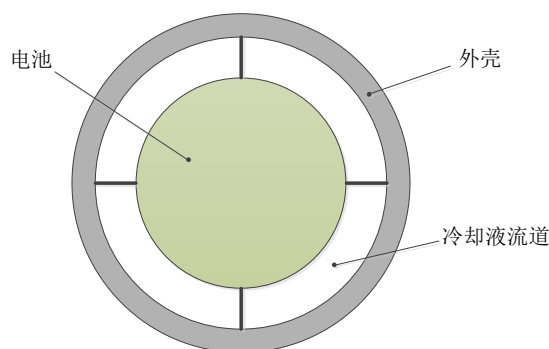


图 5.5 圆柱单体的冷却结构示意图

Fig.5.5 Cylindrical monomer cooling structure

如图 5.5 是圆柱单体的冷却结构示意图。该夹套冷却系统中以圆柱形电池单体为基体，外部加装外壳，内部在圆周方向均布四条肋以固定单体，外壳与单体之间的空腔为冷却液流动通道，冷却液流动方向由单体下部流道流进，上部流道流

出，冷却液持续流过电池壁面对其进行冷却。该冷却结构对单体有良好的冷却作用，也能保证单体发热的均匀性。但其主要缺点是冷却液必须使用导电能力弱或者绝缘的材料，选择该种材料时相应地冷却液的导热能力较为有限，故而该冷却结构仅适用于发热量小的单体。而本文选用的方形单体体积容量和发热量都较大，所以冷却液直接接触单体的冷却方式不可取，需使用冷却管道间接接触对单体和模组进行冷却。

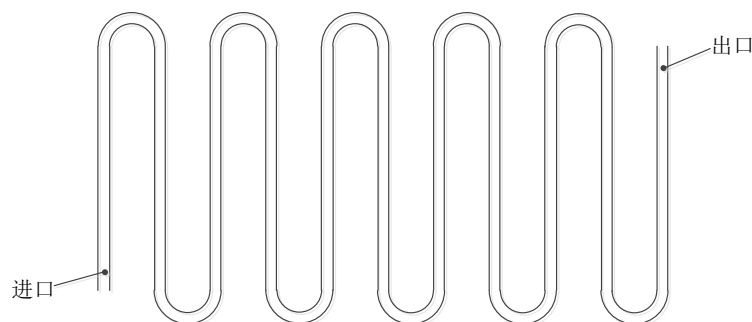


图 5.6 单进单出式冷板结构

Fig.5.6 Single-entry and single-out cold plate structure

如图 5.6 是单进单出式冷却结构示意图。该冷板结构适用于方形电池，嵌入在相邻多个单体之间，冷板材料一般选用导热系数较高的铜或者铝，冷却液可选用比热容大和粘度系数小的水或者乙二醇溶液等。该结构具有高效的冷却能力、安装方便和降低短路等特点。为了增大冷却管道和单体的接触面积以提高冷却效率，可采用扁平管式结构，将管道压平，置于相邻电池之间，然后由冷却液对电池进行冷却。此结构的主要缺点是：管道的弯道过多，液体的压力损失较大；另该结构是对并排的两个及其以上单体进行冷却，容易造成进出口的温差过大，不利于电池温度的均一分布。

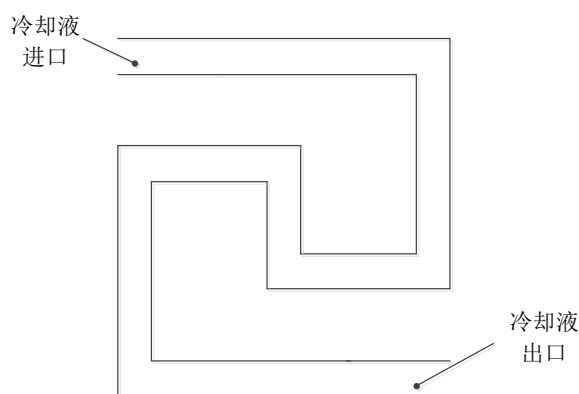


图 5.7 蛇形冷板结构

Fig.5.7 Cold plate structure of the serpentine

如图 5.7 是蛇形冷却结构示意图。此蛇形结构是基于单出单进式流道设计的，

该结构中流道在板内呈蛇字回旋走势而非平行分布，布置时冷板嵌入相邻两个电池单体之间，而非像单进单出式冷板嵌入并排单体与并排单体之间，这样能减少弯道的数量，减小液体压力的损耗。同时也能避免进口端和出口端温差较大，保障进、出口端有良好的温度分布。但此结构不能有效地解决单体中心温度高的问题。

综上所述，首先根据本文所选电池的容量大小和发热量，又考虑到直接接触方式冷却液易泄漏、粘度大等缺点，故采用间接接触方式。其次冷却液选择导热系数较大的乙二醇溶液(C₂H₆O₂)，原因是乙二醇溶液具有降低水的凝固点的特性，有效增强水溶液的抗低温性能，更贴合实际应用。最后基于单进单出式冷板和蛇形冷板，并结合其主要优势，明确本文设计冷板的目标是：冷板应嵌入在两个相邻单体之间且尽量减少弯道的数量；冷却液首先进入单体的中心位置以解决该处温度过高问题。

根据放电时单体温度云图特点，可知电池的发热的高温区域在单体的中心部位且高温区域约占其最大面表面积 2/3，结合蛇形冷板结构形式故而设计了管道的形状即圆盘状的冷却板，以控制模组的整体温度和保障单体发热的均匀性，冷却液管道的结构如图 5.8 所示。同时设定冷却液的流动方向为：从冷却管道入口进入到中心位置，再从另一端流出，且在装配模组时冷却液的进口在下端，出口位于上端，另外冷却盘管应稍微靠近模组下表面。冷却盘管的尺寸是以单体的外形尺寸和单体的发热面积为边界设置的，设定盘管的匝数为 4 且每匝数的直径分别为 200mm、150mm、100mm、50mm。此外，为了增大管道与单体的接触面积，保障单体与冷却液之间快速地进行热量交换，故而将管道设计成扁平式的形状，该零件可通过冲压工艺得到。

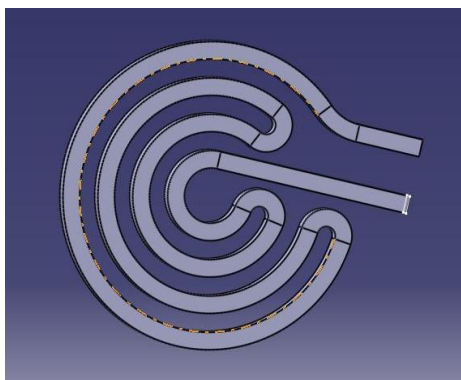


图 5.8 冷却管道结构

Fig.5.8 The structure of cooling pipe

为了满足上述结构要求和工艺要求，可参考 GB/T 17791-2007 和行业标准选取盘管流道的外形尺寸、壁厚和材料。考虑到冷却液管道应具备高导热性能和良好

的力学性能，故而采用铜材料。此外通过上述标准可得到冷却液管道的最小外形尺寸是 12mm x 12mm 的方形不锈钢无缝铜管，其壁厚的范围在 0.25mm~2mm。又根据机械设计手册中铜管弯曲时的相对应力值等，最终确定管道的壁厚为 1.5mm。并根据壁厚和冲压工艺要求，有 TU1（软）、TU2（半软）、T2（半硬）、TP1（半硬）、TP2（硬）等 5 种型号的铜材可供选择，经综合对比分析确定使用易加工且价格便宜的 TP1 铜材。

（4） 电池模组的网格划分

在电池模组三维建模的基础上，需要对其进行网格划分，并选择合适的网格划分方式。电池组模型的网格划分与电池单体的划分方法完全不同，电池单体结构简单，网格可以划分的精细一些，得到较高质量的网格，同时生成的网格数量也在合理的范围之内。但是模组的结构过于复杂，尤其是冷却管的圆盘状结构，此外又要考虑工作站计算机的内存和计算时长的问题，需要合理地划分网格，并将网格数量控制在一定的范围内。

为了得到合理的网格数量和高质量的网格，在划分网格之前，对电池单体的结构进行合理的简化，忽略了单体中生热量较小的极柱。并且由于冷却管道只是一个导热部件，它对网格的数量要求不高，可选择较大的网格尺寸来划分冷却管道。此外，为得到较高的仿真计算精度，本文利用四面体网格对模型进行网格划分。

网格划分的步骤为：启动 Workbench 15.0，在软件左侧的工具栏中选择 CFX，并将其拖至右边窗口处建立 Fluid Flow (CFX) 的模块，选择“Geometry”导入 step 或者 iges 格式的三维模型，并确定电池模组各区域的耦合面：电池模组的壳体与电池单体以及冷却管道与电池单体为固-固耦合；冷却管道与冷却液为流-固耦合。然后在“Mesh”选项的窗口内进行网格划分。最终模型网格数量总数为 420 万，其网格模型如图 5.9 所示：

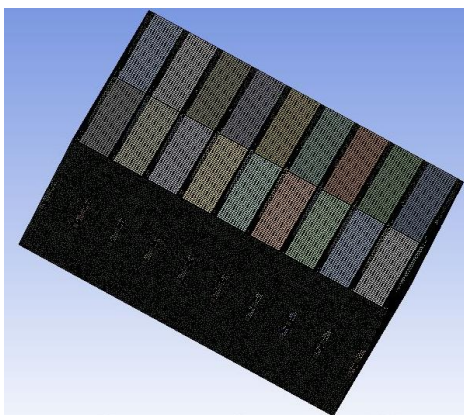


图 5.9 电池模组的网格模型

Fig.5.9The grid model of battery module

5.3 LiFePO₄ 电池模组各参数确定

(1) 确定材料的物性参数

对 LiFePO₄ 电池模组仿真之前，要确定电池单体、铜制冷却管道、冷却液-C₂H₆O₂ 溶液的物性参数，前两个零件的参数在表 3-2 和表 3-3 可以得到。C₂H₆O₂ 溶液作为 LiFePO₄ 电池模组的冷却液，直接影响模组的温度场分布，它的物性参数可以通过查询手册得到。表 5-1 列出了三种温度下，C₂H₆O₂ 溶液浓度为 50% 的物性参数。

表 5-1 浓度 50% C₂H₆O₂ 溶液的物性参数
Tab.5-1 Physical parameters of 50% C₂H₆O₂ solution

溶液温度 (°C)	密度 (kg/m ³)	比热容[J/(kg·K)]	导热系数[W/(m·K)]	粘度 (Pa·S)
10	1077.46	3232	0.373	0.0055
15	1075.46	3261	0.377	0.00463
20	1073.35	3281	0.38	0.00394
25	1071.11	3300	0.384	0.00339

数据来源：ASHRAE 手册 2005

(2) 确定冷却液流动状态

液体的流动形式有三种，包括层流、湍流以及紊流。层流时，液体只有轴向运动，流动层次分明；湍流和紊流时，液体既有轴向运动，又有层与层之间的横向运动。判断液体流动形式，可以利用临界雷诺数 R_e 来判定。其公式为：

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (5.2)$$

$$D = 4A / L \quad (5.3)$$

式中：

ρ ——冷却液的密度 (kg/m³)；

V ——冷却液的流速 (m/s)；

D ——方形管道的当量直径 (m)；

μ ——冷却液的粘性系数 (pa · s)；

A ——冷却管道的横截面积 (m²)；

L ——充满冷却液时的周长 (m)；

由式(5.2)和式(5.3)可得冷却液的雷诺数 R_e 为 2579，大于临界雷诺数 2300，故而冷却液的流动形式是湍流。

(3) 确定模组边界和热源

模组表面换热系数的确定：电池模组的热源公式是在爬坡工况下得到的，此时的车速为 20km/h 折算到电池模组表面的风速为 5m/s，则此时模组的表面的散热为自然风冷，其与空气对流换热系数可取 $10\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ [70][72]。

环境温度和入口流速确定：已知冷却管道的横截面积为 0.00018m^2 ，另根据其他论文的热管理的成功案例冷却液的流速一般设为 $0.2\text{m/s} \sim 0.7\text{m/s}$ ，故而本文冷却液体入口流速、温度分别设为 0.7m/s 、 25°C 。同时设定环境的初始温度为 25°C 。

LiFePO₄ 电池模组的热源：根据式 (4.15) 生热速率与时间 ($q-t$) 的关系，利用 UDF 编写热源程序并赋予到 fluent 仿真中，表达式为：

if (ts=>0&&ts<=170) source=a1*ts^2+b1*ts+c1;

if (ts>170&&ts<=1800) source=a2*ts^2+b2*ts+c2;

(4) 仿真计算参数确定

设置 Time step size (时间步长) 为 10s，Number of Time step (时间步数) 为 180，则有仿真的总时间为 1800s，又设一个时间步长的迭代次数为 20 步，则总迭代数 (Iterations) 为 3600 步。

LiFePO₄ 电池模组各参数确定之后，点击 calculate 开始仿真。求解方程中各参数随着迭代步数的增大而逐渐趋于稳定值，则计算结果是收敛的，其收敛趋势如图 5.10 所示：

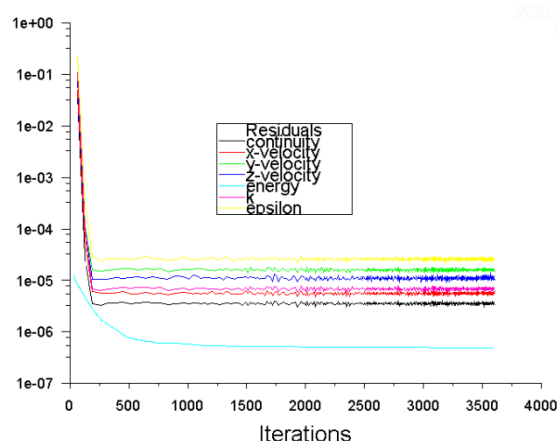


图 5.10 能量方程中各参量的收敛曲线

Fig.5.10 Convergence Curves of Parameters in Energy Equation

5.4 仿真温度场分析

仿真结束后，利用 ANSYS 中的后处理软件 CFD-Post 对 LiFePO₄ 电池模组的温度和冷却液体的压力、温度等数据进行处理。故而在自然风冷和液冷冷却下仿真得到电池组的温度场云图、液体的压力场云图以及温度场云图，如图 5.11~图 5.17 所示：

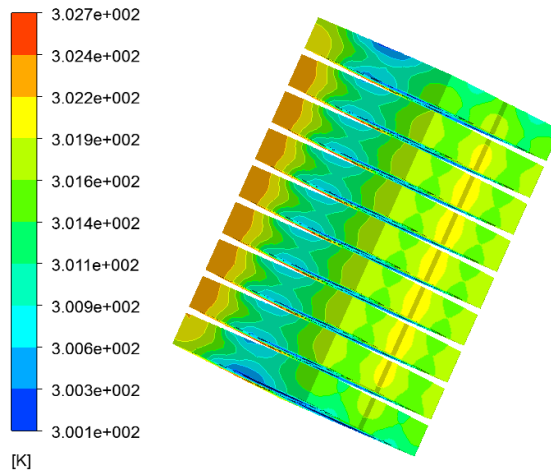


图 5.11 LiFePO₄ 模组温度云图

Fig.5.11 Temperature contour of the LiFePO₄ module

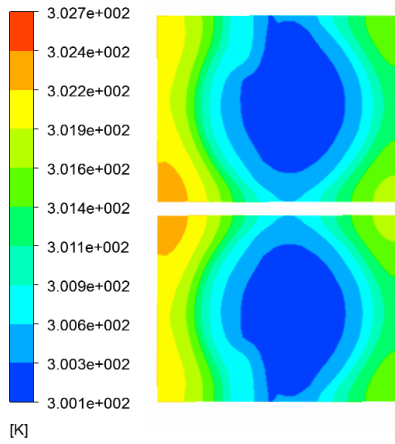


图 5.12 侧面流体域的温度云图

Fig.5.12 Temperature contour of Fluid domain

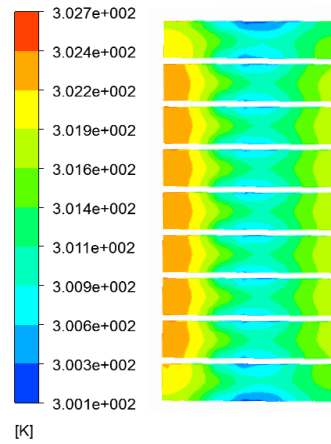


图 5.13 LiFePO₄ 模组侧面的温度云图

Fig.5.13 Temperature contour of the side of module

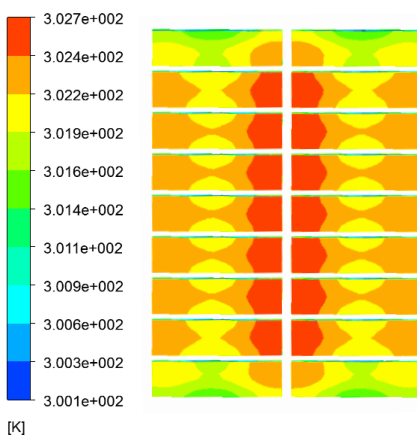


图 5.14 LiFePO₄ 模组上部的温度云图

Fig.5.14 Temperature contour at the top

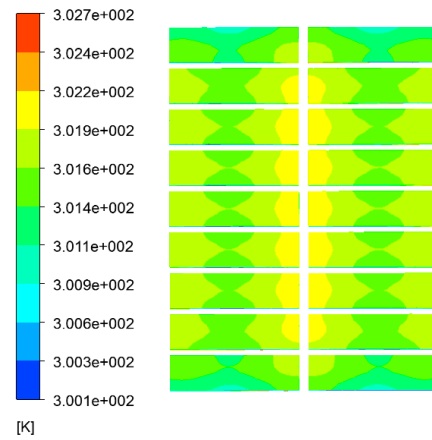


图 5.15 LiFePO₄ 模组底部的温度云图

Fig.5.15 Temperature contour at the bottom

如图 5.11 所示为 LiFePO_4 电池模组的温度整体分布情况。由图可知，电池模组的高温区域主要分布在模组的上表面和下表面，且上表面的温度要比下表面的温度要高，出现此温度分布的原因：其一在装配时冷却液管道靠近模组底面，即冷却液对下表面的冷却效果要比上表面要好。其二是上表面主要受到自然空冷和部分液体冷却但总体的冷却效果却没有液冷对下表面的冷却效果好。总体上模组的整体温度分布合理且较为均匀，温度梯度层次分明，冷却效果比较理想。

如图 5.12 所示为靠近壳体两端的单体温度云图，该图的左边是模组的上部。由图可知，在单体表面的冷却液流域范围内，出现最低温度 27.1°C ，靠近进水口的流域范围内及以下的部分的平均温度明显低于出水口区域及其以上部分，它们的平均温度分别约为 27.75°C 、 28.25°C ，且单体的最高温度 29.4°C 位于出水口上部区域。此外进水口的流域最低温面积大于出水口区域面积。此外，模组中间部位冷却管道处单体的温度分布情况与上述有相似的温度分布。出现此温度分布的原因除了在分析整体温度时的两个因素外，还因为随着冷却液在管道中流动其自身温度不断增加，冷却液体在出口流域温度上升到一定数值与单体间的热交换能力减弱。

如图 5.13 所示为电池模组的侧面云图，该图的左边是模组的上部。由图可知，在单体的纵向上进水口位置的冷却的面积范围要比出水口的大，同样地，进水口及以下的部分平均温度比出水口及以上的部分温度要低，且模组的上部和底部的温度较高，其在此侧面上的温度值为 29.4°C 和 28.9°C ，此外模组的两端出现最低温度为 27.3°C 。

如图 5.14、图 5.15 所示为电池模组上、下表面温度分布情况。总体来看，电池模组上、下面的温度分布规律大体上相同，且高温区域都位于模组两列之间，其值分别为 29.7°C 、 29.2°C ，电池组的上表面和下表面的温差值为 0.5°C 。出现此高温区域的原因是模组的两列之间液冷和风冷对其冷却效果影响很小，热量容易聚集在该部位。此外，模组上、下表面的低温区位于两端，这是由于两端的冷却盘管不但与单体接触还与壳体直接接触，故而其冷却能力要比中间盘管的要强。另外，除去两端的四个单体，由于冷却液的作用，因而上、下面的低温区域位于每列的两单体之间。

总之，电池组的整体散热良好，温度分层均匀，最高温度为 29.7°C 且位于电池模组上部两列之间，最低温度为 27.1°C 且位于单体表面的冷却液流域范围，相对于环境温度分别上升了 4.7°C 、 2.1°C 。此外模组各单体之间的最大温差在 2.6°C 之内，满足电池组最高温度和各单体温差的设计要求。

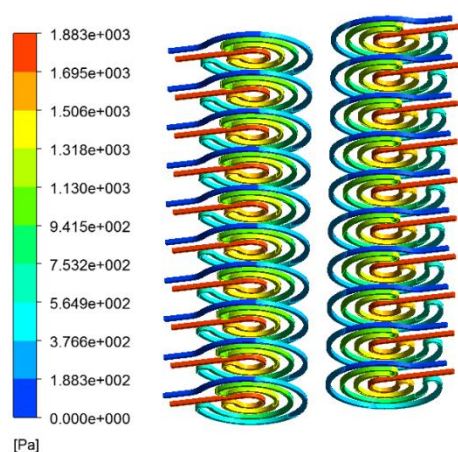


图 5.16 冷却液体的压力场云图

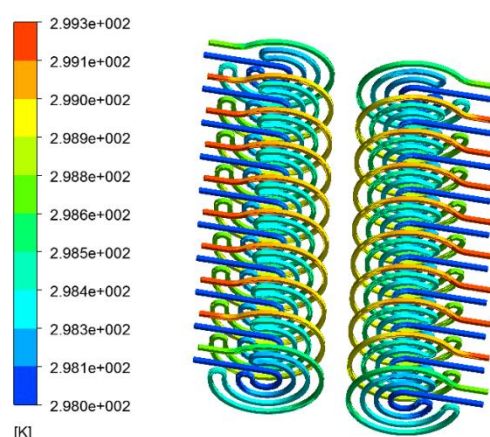


图 5.17 冷却液体的温度场云图

Fig.5.16 Pressure contour of the cooling liquid Fig.5.17 Temperature contour of the cooling liquid

由图 5.16 液体压力云图可知，压力值得变化趋势是从冷却液进口到出口逐渐减小。进口处的相对压力最大为 1883 Pa，出水口的相对压力为 0 Pa，每个管道的冷却液的压力损失为 1883Pa，20 个冷却管道压力损失共计 37.7kPa，按照此压力损失可以选择合适的水泵。

由图 5.17 液体温度云图可知，冷却液温度呈现规律分布：冷却液进口温度恒定为 25℃，冷却液由进口流入到出口温度逐渐增加，且在出口处温度有最大值 26.3℃，冷却液体的温度上升 1.3℃。然而两端四个冷却液的出口最高温度为 25.8℃，冷却液体的温度上升 0.8℃。出现上述现象的原因是冷却管与壳体的接触面积大，其与外界的对流换热效果较好。

综上所述，由冷却液体的温升可得到该冷却结构的冷却效率。根据式 (3.9) 可得到一个单体的生热功率为 77.4W，在未进行任何冷却的条件下，模组的总生热功率为 1393.2W。冷却液温升为 1.3℃时，根据吸热公式得到冷却液的吸热功率为 57.9W，则模组中部 16 个管道中冷却液吸热功率为 926.4W；冷却液温升为 0.8℃时，根据吸热公式得到冷却液的吸热功率为 35.63W，则模组位于外部 4 个管道中冷却液吸热功率为 142.52W。最后 20 个盘管中的冷却液的吸热功率为 1068.92W，得到冷却液体的冷却效率为 76.72%。

5.5 温度场影响因素分析

为了分析冷却液流速和温度对电池组温度分布的影响，设定了两种不同参数值，如表 5-2 所示：

表 5-2 设置冷却液的流速和温度

Tab.5-2 Flow rate and temperature of the cooling liquid

数值组数	冷却液温度 (°C)	冷却液流速 (m/s)
1	15	0.7
2	20	0.7
3	25	0.2

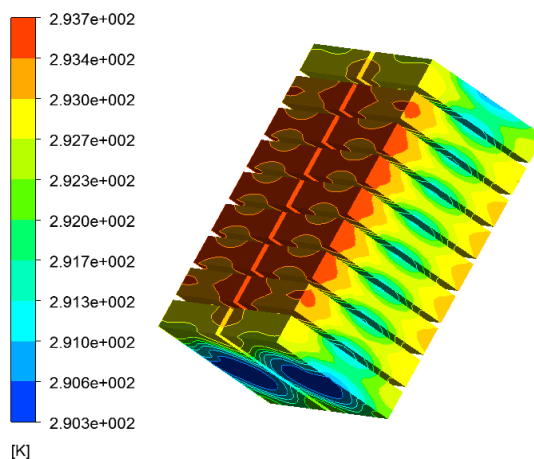


图 5.18 冷却液温度 15°C 时模组温度云图

Fig.5.18 The temperature contour of the module at the coolant temperature of 15 °C

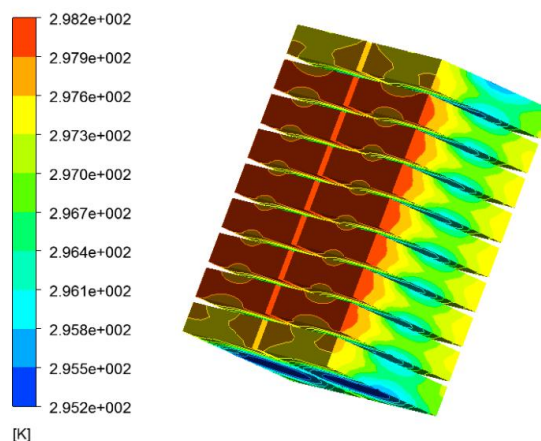


图 5.19 冷却液温度 20°C 时模组温度云图

Fig.5.19 The temperature contour of the module at the coolant temperature of 20 °C

图 5.18 和图 5.19 分别表示冷却液流速是 0.7m/s 时冷却液温度分别为 15°C、20°C 的模组温度云图。由图可知，它们具有相似的温度分布，高温区域位于模组的上表面和两列单体之间，低温区位于冷却液流域。冷却液温度为 15°C 时，模组的最高温度和最低温度分别为 20.7°C、17.3°C，与冷却液温度为 25°C 时相比，最高温度下降 9°C。且它们均处在环境温度以下，单体间的最大温差相差 3.4°C；冷

却液温度为 20℃时，模组的最高温度和最低温度分别为 25.2℃、22.2℃，与冷却液温度为 25℃时相比，最高温度下降 4.5℃，且它们的温度值与环境温度相近，单体间的最大温差相差 3℃。

综上，以冷却液温度 15℃、20℃分别对电池模组冷却时其最高温度显著下降，各单体之间的最大温差也比较小。然而本文的研究对象是微型车辆上电池模组，选择较低的冷却液温度对模组进行冷却不但会影响车辆的经济性，还会缩短电动汽车的续航里程。

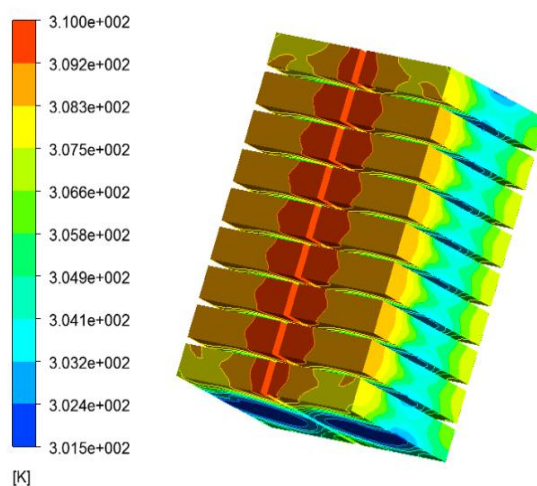


图 5.20 冷却液流速 0.2m/s 时模组温度云图

Fig.5.20 The temperature contour of module when the coolant flow rate is 0.2m/s

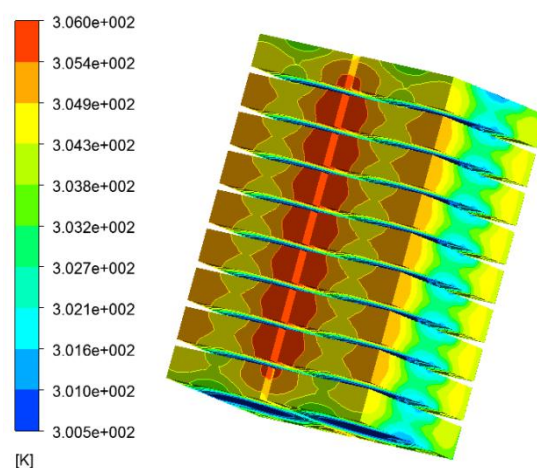


图 5.21 冷却液流速 0.4m/s 时模组温度云图

Fig.5.21 The temperature contour of module when the coolant flow rate is 0.4m/s

图 5.20 和图 5.21 分别表示冷却液温度 25℃时冷却液流速 0.2m/s、0.4m/s 的模组温度云图。由图可知，当冷却液流速 0.2m/s、0.4m/s 时模组的最高温度集中在上

表面和两列单体之间,最低温度位于冷却液流域,其值分别为 37℃和 33℃、28.5℃和 27.5℃,与环境温度相比分别升高了 12℃和 8℃、3.5℃和 2.5℃,且单体之间最大温差分别为 8.5℃和 5.5℃。另外由于冷却液的流速 0.2m/s 较小,在上表面两单体之间温度梯度不明显或者没有温度梯度。而冷却液的流速为 0.4m/s 时在上表面两单体之间有明显的温度梯度且与同冷却液温度下流速为 0.7m/s 时相比有相似的整体温度分布。这说明冷却液流速 0.4m/s 增大到 0.7m/s,该过程中模组的整体温度分布情况不会有明显的变化,但模组的整体温度和各单体的最大温差会逐渐减小。

由于本文模组主要利用圆盘冷却结构进行模组散热,改变冷却液的温度可以使电池模组最高温度显著地下降很多,降温效果显著。但从提高模组的电能利用率和整体性能方面考虑,选择冷却液的温度时应使其尽量趋近于环境温度,然后通过改变冷却液的流速,使模组工作在适宜的温度区间以及各单体温度保持一致性。此外控制冷却液的流速易于实现,消耗电池功率不大。综合考虑,本文采用冷却液流速为 0.7m/s,冷却液温度为 25℃是比较合理的。

5.6 小结

本章节根据 LiFePO_4 电池单体的生热分布情况和单体的排列分布,完成了冷却管道、箱体外形和上盖的设计。并设定了模组热管理的目标:电池模组的工作温度最大温度不超过 32℃,电池单体的温差不超过 5℃。此外,根据行业标准和国标确定了管道厚度为 1.5mm 和型号为 TP1 铜材料。以爬坡工况的生热速率为热源,在自然对流风冷和液冷的条件下,应用 fluent 仿真分析了 LiFePO_4 模组的温度分布情况,结果表明:温度分层均匀,电池组的整体散热良好,最高温度为 29.7℃,单体之间的温差在 2.6℃之内,满足设计要求。同时也得到该冷却结构的冷却效率约为 76.72%。

6 总结与展望

6.1 总结

本文以环境生态、能源和电动汽车的安全性三个方面为出发点,研究了电动汽车 LiFePO_4 动力电池的单体模型温度分布特点,并委托校外机构进行了模型验证。根据单体的分析结果,设计了冷却管道、箱体壳体结构和上盖结构。以爬坡工况的生热速率为热源,建立了 LiFePO_4 模组的热模型。并在自然对流和液冷的条件下,仿真得到模组的散热特点,满足了设计目标要求。

全文的具体工作和结论如下:

① 根据长方形 LiFePO_4 电池结构及充放电时电池内部 Li^+ 的移动规律,分析了 LiFePO_4 电池的生热来源和传热特性。同时得到与单体生热和传热有关的结论:副反应热对 LiFePO_4 电池的生热影响很小,反应热和内阻热是 LiFePO_4 电池生热的主要来源; LiFePO_4 电池热量传递的三种形式发生的位置,其中热传导主要发生在电池的內部,而对流和辐射主要发生在电池的外部。

② 合理地简化长方体 LiFePO_4 单体实体结构,建立了非稳态的生热速率模型和三维几何模型。并应用 fluent 得到仿真结论:在常温环境以及自然对流条件下单体以放电倍率 1C、2C 放电后温度分别上升了 11°C 和 16°C ,放电倍率 2C 的正负极耳的温度要比 1C 的高约 3°C ;单体在大电流放电时,单体的最高温度超过了 40°C 。同时委托校外机构验证了所建的电池单体模型,结果显示:仿真温度值与测验温度值误差在 1% 内。

③ 以纯电动车的动力性和续航里程为约束目标,在 ADVISOR 中建立了整车模型和电池、电机模型。在新欧洲循环工况下对整车模型进行了仿真,得到了车辆的车速和 LiFePO_4 电池模组的电流及 SOC 的变化曲线,并得出结论:车辆在市郊工况下有较大的生热速率。同时以满足车辆最大动力性为目标,定义了爬坡工况和匀速工况,得到极限工况下电池模组的电流等物理参量的变化规律,求得了 LiFePO_4 模组的热源模型,即是生热速率与时间 ($q-t$) 的函数关系式。

④ 设定了模组热管理的设计目标:电池模组的工作温度最大温度不超过 32°C ,电池单体的温差不超过 5°C 。根据电池单体的生热分布情况和单体的排列分布,完成了冷却管道和箱体外形的设计,并根据国标和行业标准得到了冷却管道的铜材型号为 TP1 和壁厚为 1.5mm。然后以爬坡工况的生热速率为热源,在风冷和液冷的条件下,得到模组的温度分布情况,结果表明:温度分层均匀,电池组的整体散热良好,最高温度为 29.7°C ,单体之间的温差在 2.6°C 之内。同时根据冷却液的温升得到该冷却结构的效率为 76.72%。

6.2 展望

本文根据三维单体生热模型,设计了 LiFePO_4 电池模组的箱体结构和冷却结构,并对电池模组模型在风冷和液冷的条件下进行了仿真分析,仿真结果满足电池模组模型设定的设计目标。由于受学校实验条件的限制,仿真的电池模组结果无法做到实车测验。除此之外,研究中仍有欠缺之处,后续需要对 LiFePO_4 电池模组进一步研究。

① 在 LiFePO_4 电池模组的结构设计时没有充分考虑其在整车布置的情况,同时在模组仿真过程没有分析当冷却液具有不同流速时电池模组温度分布情况以及最大温差的影响。在后续研究中可以对上述两点进行深入研究。

② 在 LiFePO_4 电池模组的仿真过程中,只是考虑了常温情况下电池的生热情况,没有对电池处于低温和高温状况下进行分析,所以在后续研究中需要对管道中的液体温度进行控制,实现低温时快速加热、高温时快速冷却的目标,使之处在最佳的工作温度区间内。

③ 在 LiFePO_4 电池模组的生热仿真中,考虑到网格数量比较大以及实验室工作站的计算能力的情况,对固定匝数的冷却管道进行了合理地网格划分,并且简化了电池模组的结构,忽略了正、负极耳的生热量。下一步研究中,需要细化冷却管道的网格,同时也要考虑到冷却管道的匝数、截面积和两个极耳对电池模组生热情况的影响,得到更为准确地模组的生热情况。

致 谢

远岫微岚，春江潏潏。校园内外繁花锦簇，老树葳蕤如冠，尽是盎然绿意。当值仲春之际，不觉已来渝有三载。临近离别，珠泪潸然；念及往事，思虑良多。记得初来之时，去家怀乡，满目萧然，瞿瞿四顾，形单只影。每到夜深独行，倍感孤独、寂寥。惶惶然，天下之大无同侪之人。幸得师兄弟同谊之情、失联故旧再续之义、父母及师长宽慰之恩，助我破除心障，步出井隅。

儿行千里母担忧。离家求学已近十载，恍然白驹过隙。感吾父母，稼墙艰难，箪食瓢饮，供我读书；辛劳茹苦，育我成材。父母大人，十年一日；容颜故去，法令深叠，两鬓斑白。儿及近而立之年，正值韶华，最是不肖。上不能膝前尽孝，下无有娶妻生子。终身之事，烦劳父母挂怀，每念至此，酸楚油然。凡林总总，结草衔环，亦难报父母瓜蔓之恩。

失路之人，终日昏昏。三载从师为学，无所建树。忝为须眉之身，愧对门墙。吾师谆谆之言，声犹在耳：勿殆劳，戒骄躁。师者温和恭谦之品质，终身受之不尽；言传身教，宽心解惑。吾师体恤关爱之情，逡逡护佑之恩，无以报答，须臾不敢忘怀。得幸同门襄助之义，亦铭记在怀。

倾尽笔墨之所有，不能尽述心中之感激，亦不能报答父母、师长恩情之万一。灼灼之言皆为肺腑，行文粗陋，谨表寸心。

今日为别，伏惟珍摄。运筹期许，山水相逢。此致恭颂父母、师长心意顺达、福寿康安，顺祝同门师弟师妹运交华盖、前程如锦。

文章不能尽善至美，偶有瑕疵，望请师长斧正。

参考文献

- [1] 李玉明, 杨慧. 国际石油价格波动与我国经济发展影响分析[J]. 生产力研究, 2012(3):126-127.
- [2] 冯江峰, 王军, 李碧云. 新能源汽车的发展趋势[J]. 汽车实用技术, 2015(8):121-123.
- [3] 王盟. 论新能源汽车产业发展面临的困境及对策[J]. 经营者, 2015(8):44-44.
- [4] 武仲斌. 考虑电动空调能耗的纯电动汽车动力传动系统参数匹配[D]. 重庆大学, 2012.
- [5] 程益川. 电动汽车的现状和发展趋势[J]. 汽车零部件, 2013(7): 89-90.
- [6] 中国储能网新闻中心. 2016 年国内外 37 起锂电池相关起火事故一览[EB/OL]. <http://www.escn.com.cn/news/show-362113.html>, 2016.11.8.
- [7] 凤凰资讯中安在线. 合肥一小区充电电动车突起火殃及两辆轿车被烧毁[EB/OL]. http://news.ifeng.com/a/20160119/47134141_0.shtml, 2016.01.19.
- [8] 搜狐新闻网. 分析动力电池是否存在安全风险[EB/OL].<http://auto.sohu.com/20150724/n417434953.shtml>, 2015.07.24.
- [9] 李新静, 张佳璐, 魏引利, 等. 温度对磷酸铁锂动力锂离子电池性能的影响[J]. 电池工业, 2014(2):66-70.
- [10] 周萌. 动力电池成组液流热管理系统设计分析[D]. 吉林大学, 2014.
- [11] 方莹, 陈军峰, 吴智正. 一种双锂电池组供电的混合动力汽车电池组设计[J]. 现代电子技术, 2015, 38(22):155-157.
- [12] 曾凡帅, 魏学哲. 混合动力汽车镍氢动力电池包热管理研究[J]. 机电一体化, 2014(5):31-35.
- [13] 宋永华, 岳阳希, 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.
- [14] 侯明, 衣宝廉. 燃料电池技术发展现状与展望[J]. 电化学, 2012, 18(1):1-13.
- [15] 李伟, 胡勇. 动力铅酸电池的发展现状及其使用寿命的研究进展[J]. 机械设计与制造工程, 2011, 40(7):70-72.
- [16] 梁昌杰. 混合动力车用镍氢电池组散热性能 CFD 仿真与试验研究[D]. 重庆大学, 2010.
- [17] 闫金定. 锂离子电池发展现状及其前景分析[J]. 航空学报, 2014, 35(10):2767-2775.
- [18] 和祥运, 刘恩华, 张嘉禾. 锂离子动力电池产业链研究[J]. 北京汽车, 2011, 4:9-11.
- [19] 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(1):18-26.
- [20] 王芳, 夏军等. 电动汽车动力系统安全分析与设计[M]. 北京:科学出版社, 2016.
- [21] 雷治国, 张承宁. 电动汽车电池组热管理系统的研究进展[J]. 电源技术, 2011,35(12):1609-1612.

- [22] 张凤涛, 胡欲立, 温杰, 等. 锂离子蓄电池温度场仿真分析[J]. 电源技术, 2014, 38(2):241-244.
- [23] 胡棋威, 彭元亭, 李文斌. 锂离子电池成组安全技术研究进展[J]. 船电技术, 2015, 35(5):35-39.
- [24] 李涛. 纯电动汽车锂离子电池热效应及电池组散热结构优化[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
- [25] 张冲. 电动汽车电池组散热的仿真研究与优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- [26] Cabeza L F, Castell A, Barreneche C, et al. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(3):1675-1695.
- [27] Soares N, Costa J J, Gaspar A R, et al. Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency[J]. Energy & Buildings, 2013, 59:82-103.
- [28] Hallaj S A, Maleki H, Hong J S, et al. Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 1999, 83(1-2):1-8.
- [29] 虢放, 薛明喆, 张存满. 电极厚度对锂离子电池电化学性能的影响[J]. 电源技术, 2017, 41(8):1114-1117.
- [30] Wu M S, Liu K H, Wang Y Y, et al. Heat dissipation design for lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2002, 109(1):160-166.
- [31] 段瑶娟, 姜久春, 刘正耀, 等. 基于 Fluent 的锂离子动力电池箱二维热模拟[J]. 电源技术, 2014(11):2055-2058.
- [32] Ahmad A Pesaran. Characteristics of selected EV and HEV batteries[C]. California: Annual Battery Conference: Advances and Applications Long Beach, 2011.
- [33] S.C. Chen, C.C. Wan, Y.Y. Wang. Thermal analysis of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Source. 2005, 140(1):111-124.
- [34] KEYER M A, PESARAN A, MIHALIC M. Thermal characterization of advanced lithium-ion polymer cells[EB/OL].2003-06-01.
- [35] 张立军, 李文博, 程洪正. 三维锂离子单电池电化学-热耦合模型[J]. 电源技术, 2016, 40(7):1362-1366.
- [36] Saito Y, Kanari K, Takano K. Thermal studies of a lithium-ion battery[J]. Journal of Power Sources, 1997, 68(2):451-454.
- [37] Norboru Sato, Kazuhiko Yagi. Thermal behavior analysis of nickel metal hybride batteries vehicles[J]. J SAE Review, 2000, 21:208-209.
- [38] Kandler Smith, Chao-Yang Wang Power and thermal characterization of lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles, The Pennsylvania State University[C].University Park, 2006, 2:671-672.
- [39] 陈全世. 先进电动汽车技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.

- [40] Yeow K, Teng H, Thelliez M, et al. Thermal Analysis of a Li-ion Battery System with Indirect Liquid Cooling Using Finite Element Analysis Approach[J]. Sae International Journal of Alternative Powertrains, 2012, 1(1):65-78.
- [41] 王峰, 李茂德. 电池热效应分析[J]. 电源技术, 2010, 34(3):288-291.
- [42] Jarrett A, Kim I Y. Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(23):10359-10368.
- [43] 王健, 许思传, 陈黎. 基于 AMESim 的纯电动汽车热管理系统的优化设计[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2011, 29(5):656-660.
- [44] 吴忠杰, 张国庆. 混合动力车用镍氢电池的液体冷却系统[J]. 广东工业大学学报, 2008, 25(4):28-31.
- [45] 王健, 许思传, 陈黎. 基于 AMESim 的纯电动汽车热管理系统的优化设计[D]. 上海:同济大学, 2011.
- [46] 李明, 陈伟波. 动力电池热管理系统的研究进展[J]. 吉林:吉林大学, 2012.
- [47] Giuliano M R, Advani S G, Prasad A K. Thermal analysis and management of lithium-titanate batteries[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(15):6517-6524.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 付正阳, 林成涛, 陈全世. 电动汽车电池组热管理系统的关键技术[J]. 公路交通科技, 2005, 22(3):119-123.
- [51] Sabbah R, Kizilel R, Selman J R, et al. 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(2):630-638.
- [52] Duan X, Naterer G F. Heat transfer in phase change materials for thermal management of electric vehicle battery modules[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2010, 53(23):5176-5182.
- [53] Rao Z H, Zhang G Q. Thermal Properties of Paraffin Wax-based Composites Containing Graphite[J]. Energy Sources, 2011, 33(7):587-593.
- [54] Zhang G, Zhang Y, Rao Z. Phase Change Materials Coupled with Copper Foam for Thermal Management of Lithium-Ion Battery[J]. Advanced Science, 2012, volume 4(6):484-487(4).
- [55] 李军, 李庆彪, 黄际伟, 等. 基于相变材料的锂离子电池组热管理研究进展[J]. 电源技术, 2014, 38(9):1762-1764.
- [56] 范亮, 卢惠民, 孙泽高. 浅谈汽车动力电池现状与发展[J]. 新材料产业, 2014(10):20-25.

- [57] 王震坡, 孙逢春, 刘鹏. 电动汽车原理与应用技术[M]. 机械工业出版社, 2014.
- [58] 范亮, 卢惠民, 孙泽高. 浅谈汽车动力电池现状与发展[J]. 新材料产业, 2014(10):20-25.
- [59] 辛文彤, 李志尊, 胡仁喜. Ansys 13.0 热力学有限元分析从入门到精通[M]. 机械工业出版社, 2011.
- [60] 田爽. 锂离子电池热特性研究[D]. 天津:天津大学, 2017.
- [61] Jarrett A, Kim I Y. Design optimization of electric vehicle battery cooling plates for thermal performance[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(23):10359-10368.
- [62] 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:吉林大学, 2012.
- [63] 郭立刚. 锂离子动力电池热分析及散热优化[D]. 长安大学, 2016.
- [64] 张福龙. 流体力学经典实验雷诺实验 FLASH 模拟[J]. 科技风, 2013(11):60-60.
- [65] 傅德熏, 马延文. 计算流体力学[M]. 北京:高等教育出版社, 2002.
- [66] 王珂. 纯电动汽车动力电池特性及应用研究[D]. 武汉理工大学, 2011.
- [67] 李斌, 常国峰, 林春景等. 车用动力锂电池产热机理研究现状[J]. 电源技术, 2014, 38(2):378-381.
- [68] 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.
- [69] Pesaran A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(2):377-382.
- [70] 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(1):80-84.
- [71] 冯竟阳, 戴作强, 张纪鹏, 等. 基于 Ansys Workbench12.0 的磷酸铁锂动力电池温度场特性研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2013, 28(1):51-55.
- [72] 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.
- [73] Dong H J, Baek S M. Thermal modeling of cylindrical lithium ion battery during discharge cycle[J]. Energy Conversion & Management, 2011, 52(8-9):2973-2981.
- [74] Wenwei W, Cheng L, Peng T, et al. Thermal Characteristic Analysis of Power Lithium-ion Battery System for Electric Vehicle[M]. 2012.
- [75] 李存俊. 锂离子动力电池组液冷结构设计及散热性能分析[D]. 合肥工业大学, 2016.
- [76] 李甜甜. 电动汽车锂离子动力电池热特性分析及散热优化[D]. 南昌大学, 2016.
- [77] 罗曼. 电动汽车用锂离子动力电池组液体冷却散热结构分析及优化[D]. 重庆大学, 2014.
- [78] 冯娜. 锂电池化成过程中的热效应分析及散热结构设计[D]. 东华大学, 2014.
- [79] 杨凯, 李大贺, 陈实, 等. 电动汽车动力电池的热效应模型[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(9):782-785.
- [80] 陈全世. 先进电动汽车技术[M]. 化学工业出版社, 2013.

- [81] 王禹寒. 考虑循环工况的纯电动汽车动力传动系统[D]. 重庆大学, 2013.
- [82] 新能源纯电动汽车网. 电池热管理系统的设计目标[EB/OL]. <http://ddc.greenwheel.com.cn/ddqcs/car-928.html>, 2013.01.29.

在学期间发表的论文和取得的学术成果

发表的论文：

- [1] 皇献清, 李军. 电动汽车动力总成的参数匹配方法的研究[J]. 汽车工业研究, 2018(5):57-61.
- [2] 李军, 皇献清. 汽车车载诊断系统的基本原理及其应用[J]. (在审)

在学期间参与的科研项目：

在校期间参与了纯电动汽车申报项目、长安民生轿运车项目、重庆市社会民生申报项目、重庆市小康工业科技进步奖申报项目、重庆市山地交通申报项目等。