



国内图书分类号：TP601

国际图书分类号：621

密级：公开

西南交通大学
研究生学位论文

电动挖掘机锂电池组的散热研究

年	级	二零一五
姓	名	陈俊宇
申请学位级别		工程硕士
专	业	机械工程
指	导	于兰英 副教授

二零一八年五月

Classified Index: TP601

U.D.C:621

Southwest Jiaotong University
Master Degree Thesis

**RESEARCH ON HEAT DISSIPATION
OF LITHIUM BATTERY PACK FOR
ELECTRIC EXCAVATOR**

Grade: 2015

Candidate: Chen Junyu

Academic Degree Applied for: Master of Engineering

Speciality: Mechanical Engineering

Supervisor: Yu lanying

May. 2018

西南交通大学 学位论文版权使用授权书

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。本人授权西南交通大学可以将本论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复印手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1. 保密 ，在 年解密后适用本授权书；
2. 不保密 ，使用本授权书。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：

陈俊宇

指导老师签名：

于学勇

日期：2018.7.15

日期：2018.5.15

西南交通大学硕士学位论文主要工作（贡献）声明

本人在学位论文中所做的主要工作或贡献如下：

1、根据挖掘机的额定工作电压、功率和单次充电可工作时间等参数，选定单体电池，并分析串并联方式，通过串并联建立该电动挖掘机的电池组。

2、建立空气冷却系统，进行热力学计算，计算生热量和传热速率。

3、通过 Icepak 仿真结合理论分析，阐述了结构优化对于空气散热系统散热效果的优化作用。证明并行口的角度在 $0\sim 10^\circ$ 时，在 0° 时散热效果最优；讨论并验证了增加空气扩散距离对风冷散热效果有着明显改善，且增加距离为 200mm 时散热效果最优。

4、创新性地提出了通过滤板优化风冷散热效果，并初步讨论开孔率和安装位置对其的影响，证明其对风冷散热效果的显著的优化效果。并在单一开孔率滤板已经有出色的优化效果的基础上，提出按照散热效果划分滤板区域，并采用变开孔率的开孔率设置方案，即对应的区域电池温度高，散热差则开孔率增加；区域电池温度低，散热好则开孔率降低。这种方法的最高温度，平均温度，温度标准差分别为 34.2388°C ， 27.7634°C ， 1.91061°C ，比扩散距离优化方法的最高温度，平均温度，温度标准差分别降低了 14.8151°C ， 2.3752°C ， 1.06016°C ；比单一开孔率滤板（开孔率 $\Phi=0.1$ ）降低了 2.6447°C ， 0.3502°C ， 0.10219°C 。优化效果十分明显。

5、在验证散热系统可以满足电动车辆高功率工况下的散热（电池组最高温度 34.2388°C ，在锂动力电池最适宜的温度区间内）的基础上，提出根据工况的不同和温度的反馈控制风速，维持电池组温度恒定。在电动车两种典型工况使用不同的风速：功率为 30kW 的工况时使用 10m/s 的风速，功率为 10kW 的工况时使用 2m/s 风速。后来讨论了传统 PID 控制方法和模糊 PID 控制法，在温度反馈有时滞性，和强非线性的情况下，使用模糊 PID 控制法对风速进行反馈控制。

本人郑重声明：所提交的学位论文，是在导师指导下独立进行研究工作所得的成果。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研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中作了明确说明。本人完全了解违反上述声明所引起的一切法律责任将由本人承担。

学位论文作者签名：陈俊宇

日期：2018.5.15

摘 要

为解决日益严重的空气污染和化石能源枯竭的问题，同时为了克服在低氧高湿环境下燃油机燃烧效率低下的问题，推广使用电动工程车辆是目前工程车辆的一个发展方向。而动力电池组作为电动车辆的能量来源，是电动汽车最关键的部件之一。而要满足工程车辆对工作电压、放电电流和续航时间的要求，电动工程车辆的电池组往往需要大量的单体电池串并联。而为了避免差异性，延长电池组使用寿命，需要使用相同的电池单体，并且保证电池单体在相近的环境温度下工作。

除此之外，磷酸铁锂电池组作为动力电池，有比能量高，工作电压高，寿命长等优势，是目前作为动力电池的最佳选择之一。但是其热性能不稳定，放电温度不能大于 60°C ，最佳放电温度在 35°C 以下，在一些恶劣的工作环境下，高功率工况工作时，温度很容易升到 60°C 以上。

针对电动挖掘机的电池组进行成组和热管理设计，为了简化结构，增加安全性，使用风冷散热系统。通过结构优化和创新性的使用滤板，并控制滤板不同区域滤板开孔率的方式优化了散热效果并且降低了温度的不均衡性。

论文主要内容如下：

1、根据挖掘机的额定工作电压、功率和单次充电可工作时间等参数，选定单体电池，并分析串并联方式，通过串并联建立该电动挖掘机的电池组。

2、建立空气冷却系统，进行热力学计算，计算生热量和传热速率。

3、通过 Icepak 仿真结合理论分析，阐述了结构优化对于空气散热系统散热效果的优化作用。证明并行口的角度在 $0\sim 10^{\circ}$ 时，在 0° 时散热效果最优；讨论并验证了增加空气扩散距离对风冷散热效果有着明显改善，且增加距离为 200mm 时散热效果最优。

4、创新性地提出了通过滤板优化风冷散热效果，并初步讨论开孔率和安装位置对其的影响，证明其对风冷散热效果的显著的优化效果。并在单一开孔率滤板已经有出色的优化效果的基础上，提出按照散热效果划分滤板区域，并采用变开孔率的开孔率设置方案，即对应的区域电池温度高，散热差则开孔率增加；区域电池温度低，散热好则开孔率降低。这种方法的最高温度，平均温度，温度标准差分别为 34.24°C ， 27.76°C ， 1.911°C ，比扩散距离优化方法的最高温度，平均温度，温度标准差分别降低了 14.82°C ， 2.38°C ， 1.06°C ；比单一开孔率滤板（开孔率 $\Phi=0.1$ ）降低了 2.64°C ， 0.35°C ， 0.102°C 。优化效果十分明显。

5、在验证散热系统可以满足电动车辆高功率工况下的散热（电池组最高温度 34.2388°C ，在锂动力电池最适宜的温度区间内）的基础上，提出根据工况的不同和温度的反馈控制风速，维持电池组温度恒定。在电动车两种典型工况使用不同的风速：功率为 30kW 的工况时使用 10m/s 的风速，功率为 10kW 的工况时使用 2m/s 风速。后来讨论了传统 PID 控制方法和模糊 PID 控制法，在温度反馈有时滞性，和强非线性的

情况下，使用模糊 PID 控制法对风速进行反馈控制。

结果表明结构优化后加入变开孔率的滤板的方案的散热优化效果十分明显，能够满足电动挖掘机散热需求，并在此基础上提出的根据工况和温度调节风速的方案有效的降低了电池组散热系统功耗。为电池组散热设计提供了有用的参考。

关键词：电动挖掘机；锂离子动力电池组；散热优化；滤板；模糊 PID。

Abstract

To solve the increasingly serious problem on air pollution and fossil energy depletion, and in order to prevent the low combustion efficiency of fuel machine because of the low oxygen and high humidity, promoting electric engineering vehicles is a developing direction of engineering vehicles. As the energy source of electric vehicles, the power battery pack is one of the most critical parts of electric vehicles. In order to meet the requirements of the engineering vehicle for working voltage, discharge current and endurance, the battery pack of the electric engineering vehicle usually requires a large number of monomer batteries. And in order to avoid differences and prolong the service life of the battery pack, we should use the same kind of monomer battery, and ensure that the monomer batteries work under similar environmental temperature.

In addition, as a power battery, the lithium-iron phosphate battery pack has the advantages of higher energy, higher working voltage and longer life expectancy. It is one of the best choices for power monomer batteries. But its thermal performance is not stable, discharge temperature can't be greater than 60 °C, and the best discharge temperature is below 35 °C. However, in some poor working environment, the temperature is easy to rise to greater than 60 °C. We need cooling system for batteries.

The main contents of this paper are as follows:

1. Design the battery pack and choose the monomer battery by calculating the working voltage, current, capacity.
2. Establish an air cooling system for thermodynamic calculation, and calculate the heat and heat transfer.
3. Through Icepak simulation and theoretical analysis, the optimization effect of the structure optimization and the increase of filter plate on the cooling effect of air cooling system is proved.
4. Determine the optimization effect of the filter plate on the heat dissipation of the battery pack, and determine the influence of the opening rate on it. In order to let the wind flow more to the area with poor heat dissipation effect, the filter plate should be changed to open hole rate, high battery temperature, and increased porosity in the area with poor heat dissipation. Low battery temperature and low porosity in the area. After this design, the maximum temperature, average temperature and standard deviation were 34.23 °C, 27.76 °C and 1.911 °C, respectively, compared with the distance between the optimized filter plate decreased 14.82 °C, 2.38 °C, 1.060 °C; The filter plate (opening rate = 0.1) was reduced by 2.64 °C, 0.35 °C and 0.102 °C.

5. On the basis of verifying that the cooling system can meet the heat dissipation under high power condition, the paper puts forward that using fuzzy PID system to control the wind speed in different working conditions. When the power is 30kW, the wind speed is 10m/s, and when the power is 10kW, 2m/s wind speed is used. And the wind speed is adjusted according to the temperature feedback by system itself.

The results show that the optimization of filter plate with variable opening rate is even more effective than structural optimization. It provides useful reference for the cooling of battery pack.

Key words: Electric excavator; Lithium ion power battery pack; Cooling optimization; Thermal balance; grill; Fuzzy PID.

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究现状.....	1
1.2.1 电动车辆研究现状.....	1
1.2.2 电动挖掘机研究现状.....	2
1.2.3 车辆动力电池的研究现状.....	3
1.3 动力电池热管理必要性及其研究现状.....	4
1.4 研究目的与方法.....	6
1.4.1 研究目的.....	6
1.4.2 研究方法.....	6
1.5 研究意义和创新点.....	6
1.5.1 研究意义.....	6
1.5.2 主要创新点.....	6
第 2 章 生热传热模型和 CFD 仿真.....	8
2.1 磷酸铁锂电池生热原理.....	8
2.2 热量传递原理.....	9
2.3 CFD 软件在热力学中的应用.....	10
2.4 本章小节.....	12
第 3 章 电池组构建和散热系统设计.....	13
3.1 挖掘机型号及功率.....	13
3.2 本章小节.....	13
3.3 电源设计.....	13
3.4 单体电池选型.....	14
3.4.1 电池电芯 18650.....	14
3.4.2 电池包单体成组.....	16
3.5 散热系统设计.....	17
3.6 工作环境.....	18
3.7 本章小节.....	18
第 4 章 CFD 仿真及散热系统结构优化.....	20
4.1 初始方案仿真模拟.....	20

4.1.1 仿真环境设定.....	20
4.1.2 电池包单体.....	20
4.1.3 散热温度场模型建立.....	21
4.1.4 初始方案建模.....	22
4.1.5 雷诺数和其他参数设置.....	24
4.1.6 网格划分.....	25
4.1.7 结果分析.....	26
4.2 初始方案的结构优化.....	27
4.2.1 并行口角度的优化.....	27
4.2.2 扩散距离的优化.....	30
4.2.3 增加滤板的影响.....	32
4.2.4 优化结果分析与讨论.....	34
4.3 本章小节.....	35
第 5 章 滤板的变开孔率优化方案.....	36
5.1 待继续优化问题.....	36
5.2 区域细分后的开孔率设置方案.....	37
5.3 开孔率优化.....	38
5.3.1 优化参数取值思路.....	38
5.3.2 第一次区域划分后开孔率取值.....	39
5.3.3 第二次细分区域.....	40
5.4 优化结果分析.....	41
5.5 本章小结.....	42
第 6 章 不同工况下的温度模糊 PID 控制.....	43
6.1 控制风速对散热的影响.....	43
6.2 不同工况下的风速与温度.....	44
6.3 模糊 PID 控制方法.....	47
6.4 构建模糊 PID 控制系统.....	49
6.4.1 积分分离阈值设定.....	49
6.4.2 整定规则制定.....	50
6.5 本章小结.....	52
结论与展望.....	53
致 谢.....	55

参考文献.....	56
攻读硕士学位期间发表的学术论文.....	59

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

挖掘机作为常用的工程机械，有挖掘和运装两种功能，被广泛用于城市建设，挖碳采矿等行业。根据统计数据，全球 65%~70% 的土方工程是由液压挖掘机来完成的，且这个数据由于挖掘机出色的通用性，正在不断增长^[1]。但是其发动机燃油燃烧效率仅为 30%~40%，总能量利用率仅为 15%~25%。神钢建机公司试验表明，柴油机输出功率仅有 20% 转化为有用功^[2]，20% 损失在车辆运动中，60% 损失在液压原件和节流调速装置中。^[3]而且这个发动机的功率是由其最大负载和最大运行速度来确定的，但是实际上平均外负载只有最大负载的 50%~60%，所以发动机动力的利用率也很低^[4-8]。而电动挖掘机具有能量效率高的优点^[9]。且在低氧，高湿度的环境下，电动挖掘机也能比燃油挖掘机更加不受环境影响，保证较高的工作效率。再加上如今能源紧张^[10]和环境污染^[11-13]使得发展电动挖掘机是挖掘机的一个重要发展方向。

1.2 研究现状

1.2.1 电动车辆研究现状

电动挖掘机发展较为缓慢，且参考文献较少，而电动汽车是电动工程车辆重要的参考，所以研究电动汽车的发展，对电动挖掘机的发展具有十分明显的指导作用。当今社会，乘用车作为人们最常用的代步工具，而工程车辆也在相关的领域为人类建设提供了巨大的帮助，可以说车辆对社会发展的推动起了不可代替的作用。从 19 世纪 80 年代，德国人卡尔·奔驰发明了第一辆乘用车，车辆就进入了飞速发展时期，车辆外形推陈出新，车辆性能也是日新月异。车辆的飞速发展不但推动了其上下游产业的发展，更推动了整个工业社会，整个人类社会的发展与进步，成为了人类文明里不可获取的一部分。到 2012 年为止，全球汽车保有量已经达到了 10 亿辆。根据预期，到 2050 年，汽车保有量预计达到 25 亿辆。然而，随着车辆工业的飞速发展，也带来了很多问题。配套跟不上，城市拥堵日益加剧，空气污染等等。目前所有车辆大多以化石能源为主要能源，对资源消耗大，且对空气污染严重，同时燃烧化石能源产生的一氧化碳，碳氢化合物，氮氧化物以及硫化物和上百种其他有害物质也危害着人们的健康。

在这样的背景下，电动汽车成为了未来发展的方向。电动车的历史也可追溯到 19 世纪，甚至比传统动力汽车更早，法国工程师古斯塔夫·特鲁夫（Gustave Trouve）在 1881 年设计出了第一辆电动汽车^[14]。后来也曾经有过很好的发展，可二十世纪以后，

以化石能源为燃料的内燃机汽车得到长足的发展，而电动车由于受限于其远距离行驶的劣势和价格方面的劣势，发展停步不前，被内燃机汽车所替代。^[15]直到后来空气污染和能源问题才再次将电动车推到了历史舞台上。^[16]电动汽车分为混合动力汽车(HEV - Hybrid Electric Vehicle)和纯电动汽车(BEV - Battery Electric Vehicle)两种。混合动力汽车是靠内燃机和电动机共同驱动，是一种传统汽车向电动车过渡的车型。而要达到“无排放”，“低污染”等目的，纯动力电池必然是今后发展的目标。成立于2003年成立的特斯拉公司，是目前唯一一只销售和研发电动汽车的公司。以Tesla Roadster为例，其动力源主要是一个重达454kg的锂离子电池组，其发动机最大功率高达215kW，最高时速超过200km/h，0到100km/h加速仅需3.7s，最大续航里程400km，电机效率92%，而其Model X最新车型车速已经可以超过250km/h，0到100km/h加速仅需3.1s，纯电最大续航达到542km^[17]这些参数已经不落后与很多传统动力汽车，这让电动汽车代替传统动力汽车成为了一种可能。^[18]目前中国电动汽车发展也十分出色，具有代表性的有比亚迪，蔚来汽车等等。

来到20世纪，车辆的生产制造技术飞速提升，人们对其的使用频率也越来越高，以乘用车为例，到2012年为止，全球汽车保有量已经达到了10亿辆。根据预期，到2050年，汽车保有量预计达到25亿辆。我国车辆工业发展较晚，且仍落后于国外，对国外进口依赖较大，但是目前正是我国车辆产业的飞速发展期，目前乘用车保有量达到1.35亿辆，而在各行各业，工业车辆也被越来越多的运用起来。

然而，随着车辆工业的飞速发展，也带来了很多问题。配套跟不上，城市拥堵日益加剧，空气污染等等。目前所有车辆大多以化石能源为主要能源，对资源消耗大，且对空气污染严重，同时燃烧化石能源产生的一氧化碳，碳氢化合物，氮氧化合物以及硫化物和上百种其他有害物质也危害着人们的健康。比亚迪公司，凭借其在国内电池上的领先地位，在市场中占有不小的份额，其比亚迪“秦”，E5，E6车型等均有较高水准，E6最高车速可以达到140km/h，纯电续航里程可以达到400km。蔚来汽车的代表车型ES8，EP9拥有不亚于国外发达国家的性能水平，ES8最高车速高达200km/h，0到100km/h加速仅需4.4s，其电池最大续航里程为355km。

电动汽车的发展验证了以电作为车辆的动力源是可行的，在很多性能上都不会亚于燃油车辆。

1.2.2 电动挖掘机研究现状

1.国外

电动挖掘机的历史可以追溯到1912年，Bucyrus公司发明了电机驱动的履带行走式挖掘机。1946年又研发了斗容量为3.82m³的120B电机驱动挖掘机。而后，20世纪70年代中期，挖掘机发展迎来了高潮，产品逐渐成熟^[19]。1976年，P&H(Pawling&Harnischfeger-哈尼斯菲格)公司研发的电动挖掘机首次采用直流调速，并安装

有故障检测装置。到 1990 年 P&H 再次推出 4100 型的电力驱动的挖掘机，其利用速度可调节的 DC 直流电机作为电控系统的动力源，利用双电机驱动，能够在很大的坡度下进行工作。2001 年，P&H 又研发了 4100BOSS 型号的电力驱动的挖掘机，使用了数字计算机来进行电控；而后又与 SIEMENS 公司合作一起开发了 SIBAS 系统，进一步完整了挖掘机的数字化控制，使得其精准性，电控性能都得到优化。

2. 国内

1950 年前后，中国第一个五年计划执行，中国在前苏联的帮助下成立了太原重工和抚挖重工；1955 年，抚挖重工成功研制出 W100 型挖掘机；1959 年太重成功研发了 4m^3 的 D-4 型挖掘机，当时的电控系统是由继电器、三绕发动机和接触器组成的。

1966 年，太原重工联合上海电机与湘潭电机，研发出了 WK-4 型电力驱动的挖掘机。1971 年，太原重工又研发 WK-4M 型号的电力驱动的挖掘机，也实现了电机的可逆调速。

而后到 1980 年左右，又涌现了一批小型民营企业，这些企业持续进行研发创新，使得电动挖掘机得到长足的发展。2008 年，湖南科通公司研发的斗容量为 12m^3 的电力驱动挖掘机，其使用了多传动带反馈的变频调速电控，其优点有调速范围宽，集成化高，效率高^[20]。2012 年，中铁集团的工程师康宝生通过对 20t 级内燃液压挖掘机进行技术改造，成功将其改造为电动液压挖掘机，证明了通过内燃挖掘机进行改造变为电动液压挖掘机是可行的，且具有经济意义的。



图 1-1 三一 SY75C3EH 电动挖掘机、山河智能 SW30 电动挖掘机、山特 HXB-55 电动挖掘机

1.2.3 车辆动力电池的研究现状

目前，动力电池使用磷酸铁锂电池，已经是工程机械电动化中的一种趋势。虽然目前在电动挖掘机上的应用还不够普遍，但随着工程机械的轻量化要求和节能环保意识的增强，在新的可替代能源出现前，磷酸铁锂电池的发展势在必行。磷酸铁锂电池的能量效率为 95%，而铅酸电池只有 80%，且其比能量，可循环次数等等参数均优于其他种类电池单体（表 1-1）^[21]。目前，各国生产磷酸铁锂电池的方法为高温固相法，高温固相法又分为传统类和改进类（又称为碳热法）^[22~23]。目前我国有数十家磷酸铁锂电池的生产厂家，其中有很多家都有可以作为挖掘机动力电池的产品，比如 L2001998X35-S00、48V100AH 电池包、312V100AH 混合动力汽车锂电池以及本文所

使用的 24V200Ah 电池包。目前动力电池按照电芯的形状和结构可以分为圆柱形锂离子电芯，方形锂离子电芯，聚合物锂离子电芯，如图 1-2。



图 1-2 圆柱形锂离子电芯、方形锂离子电芯、聚合物锂离子电芯

1.3 动力电池热管理必要性及其研究现状

如表 1-1 锂电池相比较铅酸电池和镍氢电池有着单体电压高，自放电率低，比功率、比能量高，循环次数高等等优点，但是其安全性相比铅酸电池和镍氢电池更差，在高温下可能发生自燃，爆炸等现象。

表 1-1 铅酸电池、镍氢电池和锂电池的性能参数对比表

电池类型	铅酸电池	镍氢电池	锂电池
电压/V	约 2	约 1.2	2.5~4.5
自放电率（室温）/%	5	30	5
运行温度/℃	-20~60	-20~60	-20~60
比功率 W/kg	35~40	75~80	250~340
比能量 W·h/kg	30~50	30~100	100~250
循环次数	500~800	500~1500	400~2000
安全性	良好	良好	较差
成本	低	中等	中等

温度管理对于车辆动力电池十分重要。第一，如若温度过高，锂电池负极 SEI 膜变厚，电池内阻增大，长此以往，电池组的使用寿命迅速减少^[25~26]；第二，当温度不合适时，随着温度的改变，脱锂态电极电阻会远远小于嵌锂态电极电阻，不利于充放电^[27~28]；第三，同时根据 Noboru Sato^[29]的理论，随着温度改变，锂电池热量也会增加；最后，当电池没有处于适宜的温度长时间工作时，锂电池老化和安全事故的发生概率将会增加^[30~31]，特别是电池组在高温下长时间充电或者放电时，电池可能会出现漏液、

放气、冒烟等现象，严重时还会发生爆炸^[32]。

而且，散热不当会引起电池组的热量不均匀，使得各单体电池温度不均匀会引起各电池单体性能不均匀，从而影响使用性能和可靠性。

因此，对锂电池的温度控制并进行有效的热管理是电动车中十分重要的一个环节，直接影响电动车的性能甚至使用安全。根据使用的传热介质不同可以把热管理系统分为主要三类：液体热管理、空气热管理、相变材料热管理^[33]。

1. 空气热管理

空气热管理又称为风冷，是应用最广的一种冷却方法。强制对流与自然对流是风冷散热的两种冷却方式，这两种冷却方式的不同之处在于是否使用强制对流装置例如风扇来加强空气的流动。因为自然对流冷却方式的冷却效果较差，当使用其为大功率，高能耗的动力电池组散热的时候，其散热能力难以满足散热要求，所以，采用强制对流方式为电动工程车辆的动力电池散热^[34]。

在实际运用中，风冷散热方式的优点有：结构简单，可通过控制风扇转速改变空气流速，从而控制散热效果，也可以通过加热/制冷装置对循环空气温度进行控制，从而控制散热效果。其结构安全简单、维护方便。并且易于根据需求进行优化设计，例如通过改变模块间隙等，提高温度均匀性，优化散热效果。

2. 液体热管理

液体热管理即液冷，冷却散热的能力显然要优于风冷，且可以让电池组温度分布更加均匀。但是，作为一种非直接接触的散热方式，液冷对密封材料的密封性和绝缘性提出了更高的要求，这使得系统重量和成本进一步增加，因此其并没有被完全推广开来，超越风冷散热。其传热介质为水、矿物油等，换热系数较高，但是无疑会加重系统重量，并带来安全隐患。此外，其更加复杂的结构也一定程度上使得其可靠性不高。

3. 相变材料热管理

针对相变材料应用于电池热管理的研究相较于风冷和液冷起步较晚，一直到 2000 年，Illinois Institute of Technology 的 Al Hallaj 等才将相变材料使用到锂电池电池热管理中^[35]。相变材料散热法是将电池单元放在相变材料中或者将相变材料夹在电池单元之间利用相变材料和电池的接触辅助电池散热。根据目前的研究结果来看，相变材料散热法相较于风冷散热和液冷散热的散热性能都更加优秀，维护成本也更低，并且理论上能够使电池的温度分布更加均匀。但是相变材料在吸热和放热的过程中会带来不同程度的体积变化，这会让电池模块的整体均匀性受到很大的影响，出现相变材料与电池组接触不良或者过度挤压等问题，并且会增加系统重量和成本，这限制了相变材料散热的推广与应用。

目前相变材料研究还处在早期，仍有很多问题有待解决。实际应用的主流仍是风

冷和液冷。风冷结构简单，无漏液风险，安全。液冷安静且散热效果出色，但是结构要求复杂，且有漏液风险。从成本和可靠性考虑，本文采用风冷散热系统。

1.4 研究目的与方法

1.4.1 研究目的

本文拟将某型号传统的燃油驱动的液压挖掘机的动力源改为电力驱动，于是就需对其电力系统进行规划，并重点对其散热系统进行设计与优化。优化目标为电池组表面温度不超过电池组适宜的工作温度，该适宜的工作温度取值在第三章确定。

1.4.2 研究方法

文章主要针对在极端环境下，电动工程机械面临的环境温度过高或过低，需要额外的温度控制系统使得整个系统能够在锂电池适宜的温度下工作。其中主要涉及到电池组温度控制系统构建，动力锂电池电池组温度场仿真，理论分析和优化方案等研究方法。主要可以分为两个部分

1) 电池组的构建

首先根据电动工程机械的功率和电机运行电压，单次充电运行时间等参数计算动力电池组所需要的电池容量，并进行单体电池选型和串并联成组。而后对整个电池组进行热量估计，并对风冷系统进行设计。再对电池包部分进行 SolidWorks 三维建模，为仿真分析做准备。

2) 温度场仿真和优化分析

以电池组为主要研究对象，对不同工况的温度场进行仿真分析，找到温度分布规律，根据其仿真结果，对结构进行调整，使得散热效果能够达到最佳。

值得一提的是，本设计除了使用了常用的结构优化方法，例如角度改变，间距改变，还使用了加入滤板，并对滤板开孔率进行控制，最终通过仿真验证证明了优化效果。

1.5 研究意义和创新点

1.5.1 研究意义

电动挖掘机由于其工作环境的复杂性，和经济性等要求的限制，风冷相较于液冷是一个比较好的研究方向，其结构简单，成本较低，而且安全性和可靠性更强。然而风冷散热方案的散热效果，温度均匀性不如液冷散热，为了提高风冷散热方案的散热效果，扬长避短，进行必要的散热系统优化是十分有必要的。

1.5.2 主要创新点

本文的创新点如下：



- 1) 利用 CFD 软件来验证结构优化方案可行性，缩短优化方案设计周期，节约设计成本。
 - 2) 依据电池组散热原理和与空气流动原理等理论，提出了以让空气充分扩散来达到优化散热效果，提高温度电源系统均匀性的目的。并以此提出了几种散热优化方案。
 - 3) 首创性的提出了在适当位置增加滤板，并有目的性的改变滤板不同区域的开孔率的方法，即采用变开孔率滤板，来达到优化散热效果，提高电源系统温度均匀性的目的。并通过大量仿真对其效果进行了验证。
 - 4) 使用模糊 PID 控制挖掘机风冷系统风扇转速。
-

第 2 章 生热传热模型和 CFD 仿真

2.1 磷酸铁锂电池生热原理

磷酸铁锂电池作为动力电池，研究其散热性，需要清楚其生热原理。

下图 2-1 是磷酸铁锂电池内部结构，以此图来说明磷酸铁锂电池的生热原理。

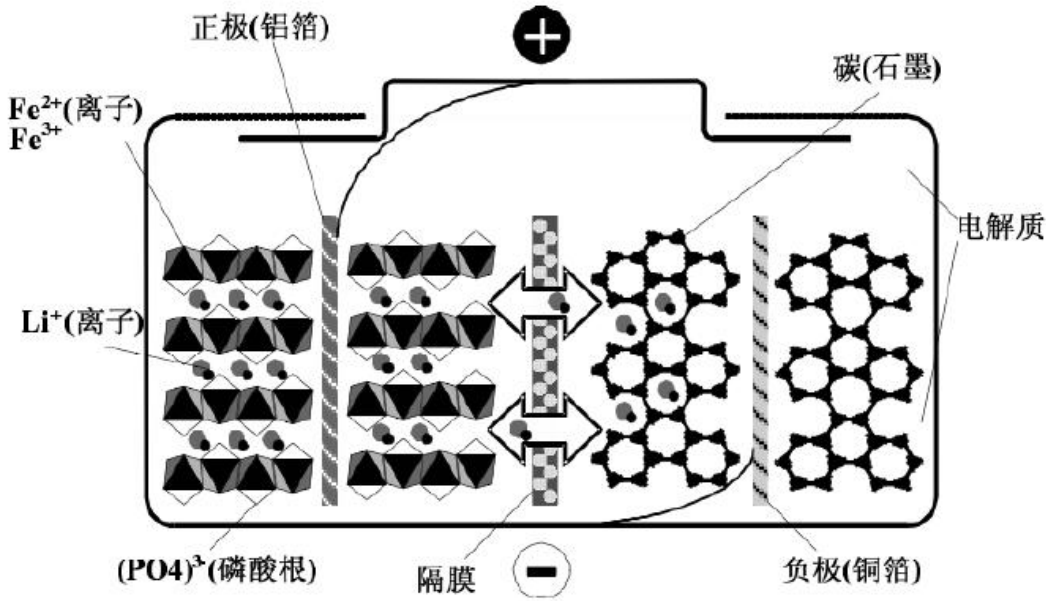
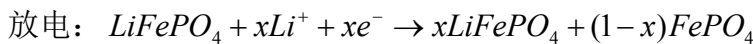
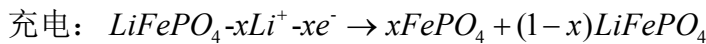


图 2-1 磷酸铁锂电池内部结构原理示意图

该电池正极为 LiFePO_4 ，负极为石墨，中间是聚烯 PP/PE/PP 板，作用是隔离其他负离子，阻止电子，只允许锂离子通过。在反应中，按以下反应式发生反应：



通过两个化学方程式可以看到，充放电的过程伴随着电子在正负极间的迁移。而同时电池中还有阻碍电子和离子运动的物质，这些物质被称为内阻，锂动力电池的内阻由很多部分组成：欧姆内阻、浓差极化内阻和电化学极化内阻等。电池产生热量的根本原因就是因为这些内阻的存在。陈玉红^[38-39]等根据锂动力电池的内部结构及反应原理将电池内部热源总结为 8 个部分，Noboru Sato^[40]通过分析锂电池生热的原因，总结锂动力电池的热量来源，得出热量的具体计算如式 2.1 所示：

$$Q_t = Q_r + Q_p + Q_s + Q_j \tag{2-1}$$

式中 Q_t —总生热量 (J)；

Q_r —锂磷酸铁锂电池中锂离子与电子发生转移产生的化学反应热 (J)；

Q_p —由欧姆极化、浓差极化以及电化学极化三种极化现象引起的极化反应

热 (J)；

Q_s —锂电池在过充、过放条件下产生的副反应热 (J) ;

Q_j —锂离子电池内部各部分包含不同种类的材料, 电流分别通过极柱、隔膜、电解液等部分时存在一定大小的电阻 (J) 。

实际上 Q_s 产生的热量相比另外三种热量显得十分小^[41], 可以忽略不计, 再将极化热转化为由于极化内阻 R_p 而产生的热量, 所以电池的总生热量为:

$$Q_t = Q_r + I^2 R \quad (2-2)$$

$$R = R_z + R_p \quad (2-3)$$

式中 R_z —电池的欧姆内阻。

且当 Q_r 足够小的时候, 该式可以简化为 $Q_t = I^2 R$

国外 Bernadi^[42]等人将锂电池内部看成是均匀的热源, 从焓增原理和电池内阻的角度分析提出了电池生热速率理论公式

$$\Phi = -IT \frac{dE}{dT} + I(E - V) \quad (2-4)$$

式中 I —充放电的电流;

E —两端的开路电压;

V —工作电压;

T —电池内部温度。

即锂动力电池的生热分为两部分, $-IT \frac{dE}{dT}$ 是锂电池的可逆反应产热, $I(E - V)$ 是欧姆内阻产生的热量或不可逆反应产生的热量。

2.2 热量传递原理

由热力学第二定律可知, 存在温差的地方总是伴随着热量传递, 且传递方向为高温向低温传递, 热传递方式有热传导, 热辐射, 热对流三种方式。而由于电池组在有散热的情况下不会太高, 热辐射十分微弱, 可以忽略。只考虑电池组本身内部向外的热传导和空气与电池组接触产生的热对流现象。

其中热对流表示热量通过流经固体表面的流体而传递热的过程^[43]。

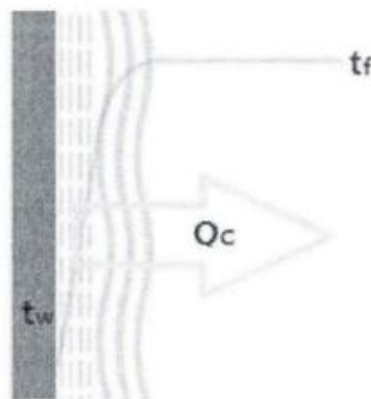


图 2-2 对流换热示意图

图中所示是温度为 t_f 的流体流经温度为 t_f 的固体表面时产生的热对流示意图，对流换热热量可以根据牛顿冷却公式计算得到：

$$Q_c = h_c A (t_w - t_f) \quad (2-5)$$

式中 h_c 一对流换热系数；

A 一固体与流体接触表面积。

所以，当 $t_w > t_f$ 时，即 $Q_c > 0$ 此时表现为流体对固体进行冷却；反之，当 $t_w < t_f$ 时，即 $Q_c < 0$ 此时表现为流体对固体进行加热。

风冷则是利用低温空气对高温固体热源通过热对流的方式进行降温散热。通过 (2-5) 式可以看出，当固体热源和气体的温度都已知的条件下，影响对流换热速率的主要因素是对流换热系数 h_c 和固体流体接触表面积 A 。由于本文中的研究对象电池的具体几何参数均已确定，则固体与流体接触表面积也已确定，因此优化系统温度可以看做对流换热系数 h_c 的值进行优化， h_c 大小主要与以下几点因素有关^[44]：

(1) 流体的性质

流体的性质对对流换热系数 h_c 影响很大，例如不同种类的流体，有不同的粘性，不同的比热，这些都会影响对流换热系数 h_c 。

(2) 流动速度

流体的流速越快，流体的对流换热系数 h_c 越高。

(3) 流动状态

这主要体现在流体的流动是层流还是湍流，湍流相较于层流更能带走热量，因此对流换热系数 h_c 更大。

(4) 换热面的形状

电池表面形状的改变也会对对流换热的速率产生影响，这个影响主要是因为当流体风速一定时，不同的电池表面形状会改变电池表面附近的风速，从而改变换热性能。

2.3 CFD 软件在热力学中的应用

CFD (Computational Fluid Dynamics) 即计算流体力学。是计算机科学和流体力学相互交融的一门新型交叉学科，能够通过计算机的模拟计算，计算出流体力学的近似解。CFD 基本定律是：动量守恒定律、能量守恒定律和质量守恒定律，把连续的计算域离散成许多个子区域并使用物理方程对每个区域进行分析，从而得到整个计算域里的流体流动性，传热量和力学性质等等^[45]。于 20 世纪 60 年代以后随着计算机的迅猛发展而兴起。其从物理定理着手，替代了成本高昂的流体力学实验器材，其能够十分有效的节约实验成本，并模拟出有效且较理想的过程。也有很多先由 CFD 软件仿真发现的规律，后来才经过实验证明的实例，说明了其准确性和有效性。

一般情况下，CFD 软件由前处理、求解器、后处理三个主要部分组成。前处理器用于几何模型建立，网格划分；求解器输入数值和环境参数，进行计算分析；后处理

器用于对速度场、温度场、压力场及其他参数进行可视化处理。

CFD 软件种类繁多,各有优势,主流的有 Fluent、Phoenics、Star-CD、Icepak、FloEFD、Flotherm、CFX、comsol、star-ccm+、flow-3D、AUTODESK CFD 等等。

本文采用 Icepak 进行仿真, Icepak 是专用于电热分析的 CFD 软件,专门仿真电子电机系统内部流体流动,分析温度分布的 CFD 软件。通过 Icepak 可以使客户有效节省设计成本、提高产品的一次成功率 (get right first time)。是由著名的流体力学计算软件公司 Fluent 公司针对电子器件的热性能设计的 CFD 软件,在 Fluent 被 ANSYS 收购以后, ANSYS 软件包内就集成了 Fluent 和 Icepak,在 ANSYS 的 Workbench 平台里便可直接使用,且能够有效得调用 ANSYS 中其他求解器和前后处理器。

在本文中,将电池包看作热源,通过对流过的空气进行模拟仿真,分析空气温度变化可以比较准确的电池包的温度。本文使用 Icepak 进行仿真计算的流程图如下。



图 2-3 Icepak 仿真流程图

2.4 本章小节

进行散热设计和优化前必要的准备工作，首先应该分析电池组的生热原理，升热量，分析散热方式，然后选定 CFD 软件 Icepak。在已知电池输出功率，电压，电池的电阻等参数以后，通过公式计算，可以计算出电池在该功率电压的情况下的升热量，而后确定散热方式主要为热对流散热，调用 CFD 软件进行仿真，得到结果后，通过对仿真的结果进行分析，找出可以优化的点，进行优化后再次仿真验证优化是否有效。且根据热对流理论可知，可以通过改变流体性质（如空气温度、状态）、增加空气流动速度、增加接触面积等方法来优化散热效果。

第 3 章 电池组构建和散热系统设计

3.1 挖掘机型号及功率

挖掘机按照自身重量可以分为 35, 60, 70, 120, 200, 220, 225, 240, 250, 270, 300, 400 等等。其数值代表着挖掘机自重, 35 表示 3.5 吨自重级别挖掘机, 70 表示 7 吨级。此次设计与某公司合作, 目的是以某型号的 70 型挖掘机为改装对象, 将其改为电动挖掘机, 替代之前燃油挖掘机。原燃油机的功率已知, 因为电动挖掘机电机的工作效率更高, 根据课题组给出的数据, 电动挖掘机需要的工作功率低于原燃油挖掘机的功率, 在两种不同的典型工况工作时所需功率分别为 30kW 和 10kW。而设计工作目标时间 2~5 小时, 经过公司和课题组的商议, 最终需要的电池组需满足功的容量达到 55~60kW·h。

3.2 本章小节

3.3 电源设计

根据其各个机构所需要的电机和工况要求, 我们需要 1 个 288V, 55~60kW·h 电池组作为电源为其供电, 且能够达到工况所需要的功率 (额定功率 30kW)。那么首先需要找到合适的电池 (或者电池包), 再用电池或者电池包串并联组成电池组, 以达到电压和容量的要求。

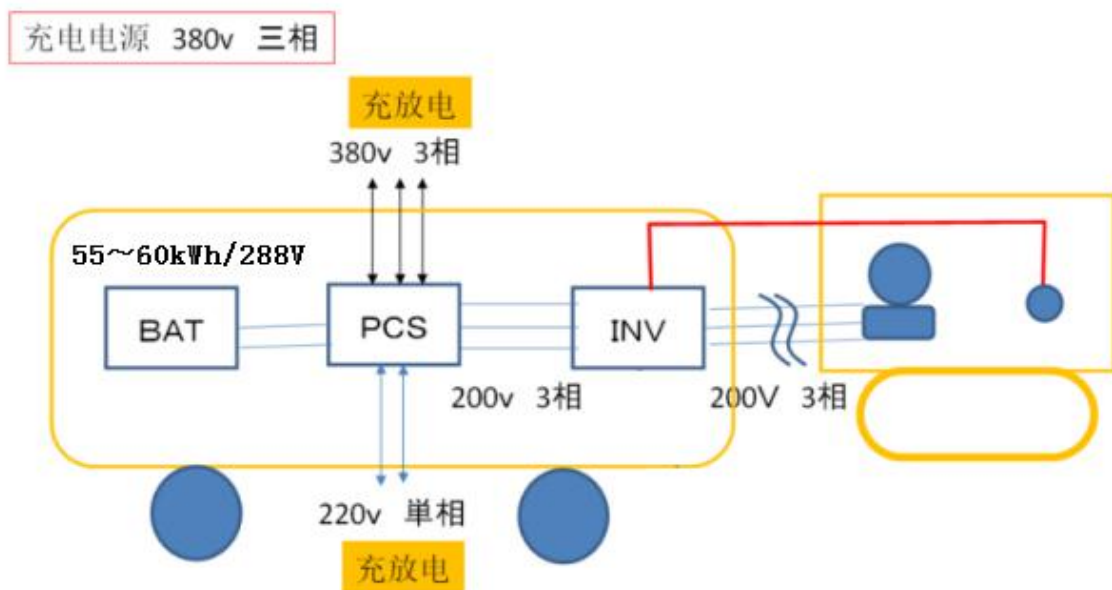


图 3-1 挖掘机电动装置示意图

然后通过图 3-1 的动力控制系统 (PCS:Power control system) 和逆变器 (INV) 等

装置，最后得到工程车辆需要的电能。

如图 4-1 所示，挖掘机的动力源是一个能量为 55~60kWh，额定电压为 288V 的动力电池组，该动力电池组接动力控制系统和逆变器后将电池组的直流电源转换为 200V 的三相交流电动挖掘机供电。而驾驶员在驾驶室通过逆变器上接的控制系统得到电池组信息的反馈（如图中红线所示）。

3.4 单体电池选型

通过分析，本挖掘机需要 1 个 288V，55~60kWh 的电源。很明显，以目前的技术，单体锂电池很难做到这么大，只能通过很多小型锂电池通过串并联的方式组合而成。电池成组有以下原则：

- 1) 先串后并联经济性好，先并后串可靠性高^[46]。
- 2) 并联要尽量保证各电池单体直流内阻一致^[47]；而串联需要保证各电池单体容量一致^[48]。

3.4.1 电池电芯 18650

要通过电池串并联组成电池组，就需要选定单体动力电池，而单体电池种类也有很多，通过形状区分有方形锂电池和圆柱形锂电池。动力电池的内部结构主要由电芯和电路保护板或者电池管理系统（BMS - Battery Management system）组成。电芯是电池最小的蓄电单元。本设计拟采用 18650 电池作为电芯。

18650 指的是 SONY 公司当年为了节约成本而设计的一种标准锂电池的型号，其中 18 表示该电池的直径为 18mm，65 表示该电池的长度为 65mm，0 表示为圆柱形电池。特斯拉等电动车企业一般采用 18650 电池作为电池单体，参考特斯拉的 Model S 纯电动车采用 7000 多颗单体 18650 型号电池^[49]。其主要有以下几大优势：

- 1、可以串并联成电池组：18650 锂电池的容量一般为 1200mah~3600mah 之间，工作电压 3.7V，而且 18650 电池可以通过串并联组成电池组，从而来提高容量和电压以满足电动车辆的需求。
- 2、寿命长：18650 电池正常使用下使用寿命可达 500 次，是普通电池使用寿命两倍以上。
- 3、安全性能高：18650 锂电池性能稳定可靠，早已通过了市场的考验，安全性能高，不爆炸，不燃烧；无毒，无污染，经过 RoHS 商标认证；耐高温性能好，65℃的情况下放电效率达 100%。且 18650 锂电池的正负极是分开的，一定程度上降低了短路的发生概率。还能防止过充过放现象。

4、没有记忆效应：18650 在充电前不需要清空剩余电量，可以随时充电。

5、电池内阻小。

由于以上种种优势，18650 成为市场非常常用的电池单体，也成为电动车辆理想的

电池电芯。



图 3-2 18650 电芯

但是由于电池组要求的电压和容量都比较大，用 18650 单体电池构建需要的数量很大，结构设计和电池管理系统是一个问题。根据：

$$n = (P/U \cdot t) / q = \frac{W}{Uq} \quad (3-1)$$

式中 P —功率 (kW) ;
 W —功 ($kW \cdot h$) ;
 U —电池组两端的直流电压 (V) ;
 n —所需电池组数量;
 t —续航时间 (h) ;
 q —单体电池容量 ($A \cdot h$) ; 。

那么若使用 $3.7V$, $2000mA \cdot h$ 的 18650 单体锂电池来构建 $60kW \cdot h$ 的电源，需要 8109 颗。如此庞大的单体如若直接装配在电池系统中在结构上极为复杂。为了解决这个问题，可以参照特斯拉的电源成组技术，特斯拉 Roadster 的电源是 6831 个 18650 型单体锂电池构成的，其结构为：

- 1) 69 节电池构成一个 Brick，其中所有单体电池并联；
- 2) 9 个 Brick 通过串联构成一个 Sheet；
- 3) 11 个 Sheet 又通过串联构成整个电池包。

这样， $69 \times 9 \times 11 = 6831$ 。整个电池包的输出电压将达到 $375V$ ，达到了特斯拉 Roadster 动力电池组的要求。而当某一个电池单体被检测出有问题时候，一般对整个 Sheet 进行更换，而对于每一层电池用电池管理系统对其进行监控，且都有保险丝，在紧急情况下，可以自行熔断。模仿这种方式，也可以将本设计需要的 8109 颗电芯成组分装，弄成单体电池包。

参考这样的设计，电动挖掘机也可以采用成套的电池组。而市面上也有不少公司将 18650 电池通过串并联组成电池组。而用户买来后也可以根据自己设计需求，继续

进行串并联。

3.4.2 电池包单体成组

使用 8109 颗 18650 电芯组成电源，我们就需要对电池单体进行分组，分成很多小组进行安装和管理。事实上，在很多大功率动力电源的设计中，都是采用的成组的电池包来进行组装。而市面上有很多单体电池，就是将例如 18650 的单体电池作为电芯加上电路保护装置拼装成的电池组，供客户选择。虽然实际上这样的单体电池是由很多电芯组成的电池组，不是严格意义上的“单体电池”，但是忽略其内部结构对散热的影响，不对内部组成进行考究，将其整体作为一个热源分析，其同样遵从电池组的生热原理公式。本文研究重点在电池组散热，不对如何通过电芯组成电池包进行分析，而采用市面上已有的电池包。通过与电池提供商沟通。通过结合所需要的电压和容量需求，对比多个方案。拟定采用其大功率电池包，优先考虑 48V100Ah 和 24V200Ah 两种，它们的优点如下：

电池包（下文简称电池）容量足够大，达到目标电压，容量所需电池包数目较小。则整个电源系统结构和对应的 BMS 电源管理系统就会相对简单。而在电池包里面有故障发生时，可以直接更换整个电池包，再对电池包进行排查，工程车辆继续工作，提升了机械工作效率。

结合公式 3-1，因此主要有以下两种方式：

- 1) 48V100Ah，2 并 6 串；
- 2) 24V200Ah，12 个串联。

北京理工大学的王震坡等使用概率论分析和数学归纳法得出先并后串的连接方式在可靠性上要优于先串后并的结论^[50]。

因为两种电池单体内部都是由众多 18650 电池电芯并联串联组成。方案一中就相当于将 18650 电池电芯在电池包内先并联，再串联，再将电池包并联，再串联。而方案 2 则是 18650 先并联，再串联。从可靠性分析，方案 2 优于方案 1。

表 3-1 单体电池包工作参数（厂商提供）

电池包工作参数		
电气特性	标称电压	24V
	标称容量	200Ah
	功率	4800Wh
	内阻	≤20mΩ
	循环寿命	>2000 cycles @1C 100%DOD
	月自放电	<3%
	充电效率	100% @0.5C
	放电效率	96~99% @1C
	充电电压	14.6±0.2V
	标准充电	充电方式
充电电流		60A
最大充电电流		120A

标准放电	充电限制电压	15.6V±0.2V
	持续电流	120A
	最大脉冲电流	140A(<3s)
	放电截止电压	17V
环境特性	充电温度	0~45℃
	放电温度	-20~60℃
	储存温度	0~40℃
	湿度	60±25%
机械特性	防水等级	IP56
	电芯	18650
	塑料外壳	ABS
	尺寸	1000*240*120mm
	重量	54.3kg
	端口	M8
	通讯协议(可选)	SMBus/RS485/RS232
SOC(可选)	LED	

所以最终采用的是 12 个 24V，200Ah 的电池包串联组成电池组。12 个电池包分为 3 组散热，每组 4 个电池包。

3.5 散热系统设计

散热系统使用风冷散热，系统由电池组，风冷管道，冷却装置（若需要加热还要加热装置），风机组成，如图 3-3 所示。

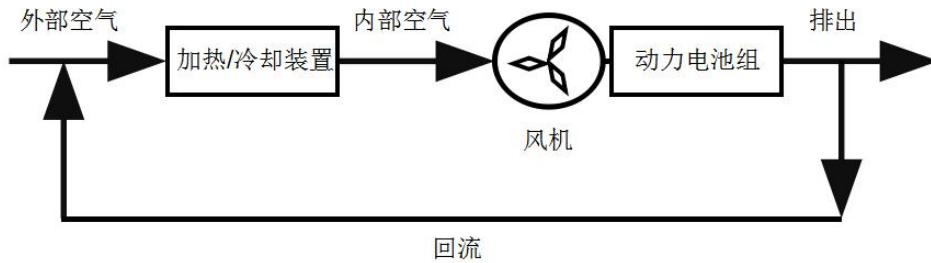


图 3-3 散热系统设计原理图

散热电池组内部通风方式分为串行通风和并行通风。如图 4-4 和图 4-5 所示。

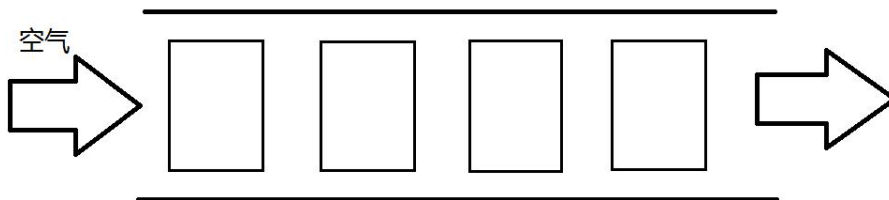


图 3-4 串行通风方式

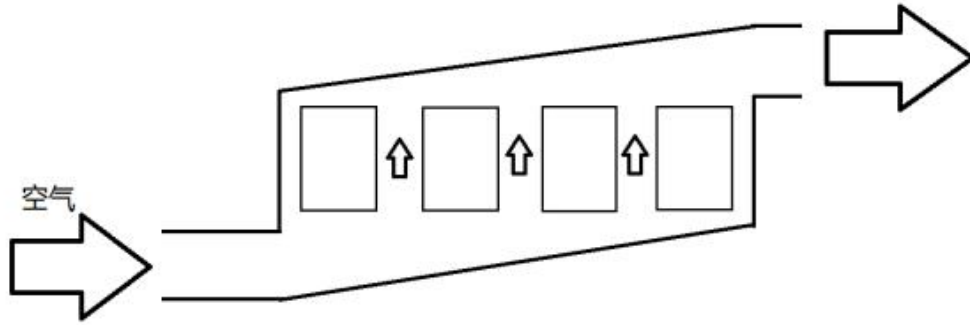


图 3-5 并行通风方式

通常在使用了多个电池包的系统内，若用串行方式排列，散热效果从入风口到出风口逐渐变差，容易使后边电池组散热效果不佳，温度过高，也明显影响温度均衡性。所以采用并行通风方式。

电池组共有 12 节 24V, 200Ah 电池包, 每个电池包 1000mm × 240mm × 120mm, 使用风冷散热。风冷散热系统分为串行通风和并行通风散热。

将 12 个电池包分为 3 组, 每组 4 个电池包通过并行通风方式排列, 每组电池单独散热。每一个电池散热组如下图所示, 电池间距为 40mm, 并行口的角度暂设定与铅锤面垂直, 后通过仿真模拟优化, 对角度进行优化值的探讨。

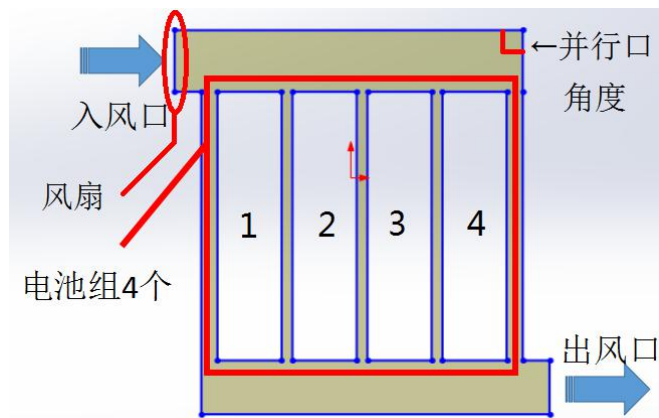


图 3-6 电池散热系统内部结构示意图

3.6 工作环境

工程机械车辆相比于乘用车，工作环境并不是那么稳定，在很多时候会在极端环境下工作，如极端高温，极端低温的环境，或者低氧，高湿度的隧道、山洞等，都有可能是工程机械的工作环境，所以对电池组的安全性能提出了更高的要求。为了模拟严热环境，在仿真中，设置外界环境温度稳定为 40℃。

3.7 本章小节

本设计目的是将某型号燃油挖掘机改成电动挖掘机，70 型挖掘机表示挖掘机自重

为 7T，在不同的两种工况下，电动挖掘机工作功率分别为 10kW 和 30kW。为了验证结构是否能够满足散热要求，假设挖掘机长时间在 30kW 的功率下工作，且设置环境温度为炎热（40℃）不通风的环境下，设计目的是能够让锂电池组在这样炎热，高工况工作的条件下满足温度 60℃以下，甚至能达到在锂电池最适宜的温度 35℃^[53]以下。

本章根据电池成组的技术，结合挖掘机工作需要的功率、电压和工作时间等参数选定了电池电芯，单体电池包单体并确定电芯电池单体数量，用电池包单体串并联组成了电池组作为电动挖掘机电源。并且为了提高可靠性，确定了电芯先并后串的连接方式，而电池包则采用 12 个包相互串联的连接方式。随后将电池包单体按四个一组进行散热。设计了散热系统结构，确定了并行通风方式，至此，电池组的结构组合完成，在后文将根据仿真和分析对散热结构进行优化。

第 4 章 CFD 仿真及散热系统结构优化

4.1 初始方案仿真模拟

为了对研究对象进行优化设计，需要对初始方案进行仿真计算。首先需要建立研究对象的模型，而实际的对象模型十分复杂，部分零件轮廓不规则，研究起来相对繁琐。为了减少工作量，符合本论文的论述要求，在建立模型的时候采取必要的手段简化研究对象，使其反映系统中流体真实流动特性和电池组的温度特性的同时，便于研究计算，缩短工作时间。

4.1.1 仿真环境设定

本文主要目的是电池组的散热系统分析，通过仿真分析电池组的散热能否满足条件。所以我们假设环境温度为夏日温度较高且无风的时候，环境温度为 40°C。为了模拟工作中最高生热量，设置挖掘机长时间在高功率工况下工作，功率 30kW，以此来验证散热系统能否满足极端情况下的散热。

4.1.2 电池包单体

在此次设计中，将系统采用的 24V，200Ah 的电池包作为最小电池单体。其内部热能不做分析，而将这种电池的工作温度-20~60°C 作为极限条件，将其适宜的最佳温度 15~35°C 作为优化目的，即默认当该电池包在规定的适宜的电流，适宜的温度下工作时，默认电池包内部单体电池也能在适宜的温度工作。根据表 3-1，电池包的工作温度为 60°C 以下，而锂电池最适宜的工作温度是 35°C^[53]，那么优化的最终目的为尽量将电池包表面温度控制在 35°C 以内。

单体电池包如文中第 3 章所选，尺寸为 1000mm × 240mm × 120mm，。为了方便建模，可以再 Icepak 界面将其抽象为长方体的发热源与外边的壳体。电池包基本参数如下所示：

表 4-1 单体电池包基本属性

项目	指标		单位
尺寸	长	1000	mm
	宽	240	mm
	高	120	mm
额定电压	24		V
标准容量	200Ah		Ah
内阻	18		mΩ
ABS 材料	密度	1.05	g/cm ³
	比热容	1500	J/kg·K
	导热系数	0.25	W/m·K

4 个这样的电池包组成电池组，由于

$$I = P / U \tag{4-1}$$

式中 I—电流 (A)；

P—功率 (W)；

U—电压 (V)。

其中 I, P, U 分别为同一工况下的电流，功率和电压，代入该系统的设计测试数据，所以可以确定 $I = 104.1667 A$ 。

根据同济大学张志杰，李德茂等人的^[53]研究，当温度高于 25℃ 时，电池内阻趋于基本稳定，随温度的变化量很小。由于本文中讨论的仿真环境温度高于 25℃，所以温度对电阻的影响可以忽略。根据厂家提供的试验数据。当温度高于 25℃ 时，内阻为 18mΩ。

根据公式 (2-2)，由于 4 个电池包采用串联连接，所以各个电池包通过的电流一致，所以每个电池包单体的产热率约为 48.8281W。

4.1.3 散热温度场模型建立

因为电池包，风扇等装置的简化模型在 Icepak 系统中可以直接设置加入。而整个温度散热区域外壳结构较为复杂，可以使用 Solidworks 建模后导入 Icepak。那么首先，我们需要对温度散热的区域外壳进行建模。

电池组散热系统外壳采用绝热材料硬质聚氨酯，由此对此电池组进行风冷散热设计,使用并行口设计。本文只对距离和滤板的影响进行分析，不考察并行口角度对仿真结果的影响，故此处初始模型并不对角度进行限定，暂采用直角，如图 4-6。

如图 3-6 所示，风扇在入风口处，为了方便仿真结果显示，我们将 4 个电池包分别编号电池包 1，电池包 2，电池包 3，电池包 4。电池组系统外壳采用的硬质聚氨酯绝热材料，外壳的具体参数如下表所示：

表 4-2 电池组外壳基本参数

项目	指标	单位
硬质聚氨酯	密度	38 kg / m^3
	比热容	1.38 $J / kg \cdot K$
	导热系数	0.024 $W / m \cdot K$
外壳尺寸	长度	1000 mm
	宽度	1200 mm
	高度	200 mm
入风口大小	长度	229.23 mm
	宽度	200 mm
出风口大小	长度	200 mm
	宽度	200 mm
风扇风速	10	m/s
外壳厚度	30	mm

建立好模型后，保存好模型，待后续 Icepak 调用。

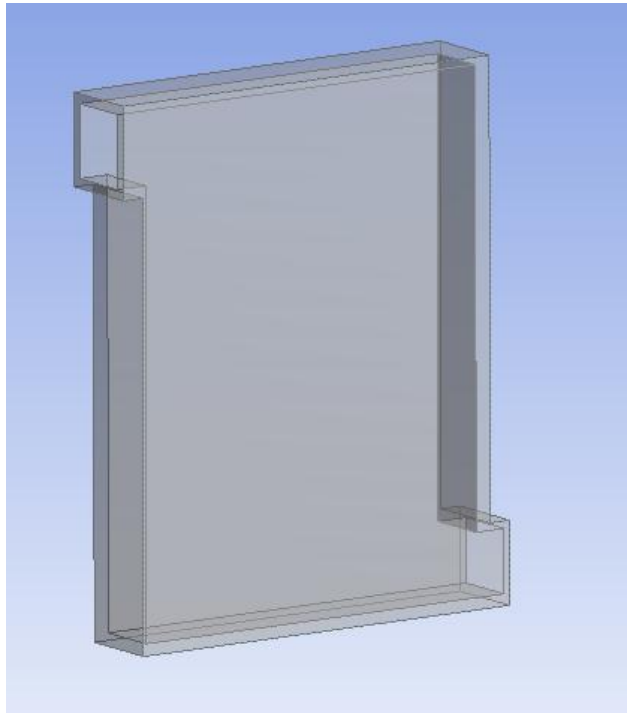


图 4-2 电池组散热系统外壳模型图

用 SolidWorks 对电池组外壳建立三维模型。并且使用 Icepak 对电池包、风扇等整个系统进行仿真。

4.1.4 初始方案建模

然后使用 ANSYS Workbench 中调用 Icepak 对初始方案进行热力学分析。

首先，要导入之前 Solidworks 中建立的散热温度区域外壳模型，在 Workbench 的 Tool Box 中调用 Geometry 和 Icepak 建立连接，并在 Geometry 中导入之前 Solidworks 的模型文件。

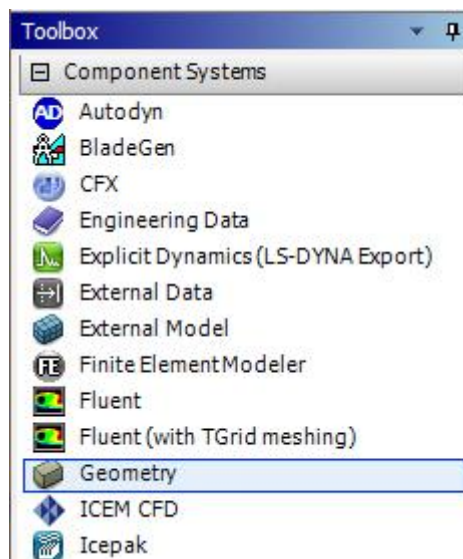


图 4-3 Workbench 的 Toolbox 界面

然而，在 Icepak 中，可以调用的图形不能太复杂，否则会出错，需要对模型进行简化。打开 Geometry 文件选择 Tool-Electronics-Simplify。选择模型，并在 Details 中将 simplification Type 设置为 Level3。

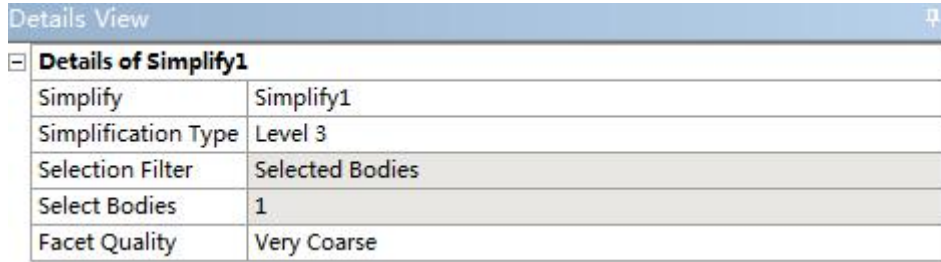


图 4-4 对调入模型进行简化

然后模型处理完毕，回到 Workbench 界面建立 Icepak 和 Geometry 的连接以后，进入 Icepak。

首先，在进风口设置风扇，向仿真系统内输入冷空气。其输入空气的温度和风速按照风机的转速和冷却装置的设定温度而定。

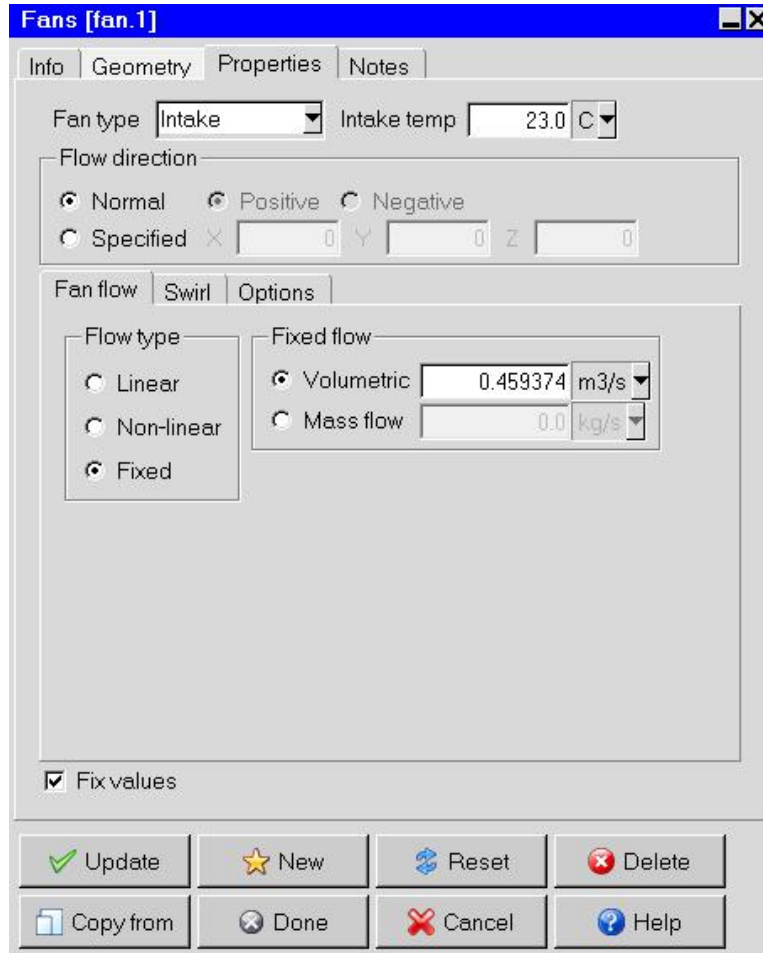


图 4-5 风扇参数设置界面

在设定风扇尺寸和风速后，我们可以计算出风扇的鼓风量：

$$V = A \cdot v = 0.459374 m^3 / s \tag{4-2}$$

式中 A—入风口的有效面积 (m^2)；

v —进风口风速 (m/s)。

在 Icepak 操作界面输入其他各个部件, 并设置好参数。其中用壳体 (Enclosure) 和热源 (Source) 将电池包抽象为简单的外壳与内部热源的组合。

在整个系统构建完成以后, 进入求解设置 Solution Setting, 如下所示设置好迭代步数 (number of iteration), 收敛判别标准 (convergence criteria) 后。这里需要注意点击 Reset, 会自动弹出系统的雷诺数, 方便判断流体的流动状态。



图 4-6 求解设置参数设定

4.1.5 雷诺数和其他参数设置

雷诺数是流体力学中流体的惯性力和粘滞力的比值, 是一个无量纲量。当雷诺数的值较小时, 粘滞力在流体运动中起决定性作用, 流速的扰动会因为粘滞力的存在而逐渐衰减, 流体较为稳定, 这种流场称之为层流; 相反, 当雷诺数的值较大的时候, 惯性力在流体运动中其决定性作用, 流体流动不太稳定, 流速的变化和扰动被逐渐增强, 形成紊流, 不规则的流场, 这种流场称之为紊流^[51]。雷诺数可以由下式计算得出:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (4-3)$$

式中 Re —雷诺数;

ρ —流体的密度;

μ —流体的动力粘度;

v —流场的特征速度;

L —流场的特征长度。

雷诺数的大小主要与流速, 管道直径和粘滞性有关。在管道中, 一般雷诺数 $Re < 2000$ 为层流, $Re \geq 4000$ 为紊流 (湍流), $2000 \leq Re \leq 4000$ 为过渡状态^[52]。通过系统估算, 本系统的雷诺数为 12651。系统为紊流。

在得到雷诺数以后，根据点击 Solution setting 中 reset 得到的雷诺数后，可在初始化（Problem setup）中的基本参数环境设定（Basic parameters）对其流动状态（层流 Laminar/紊流 Turbulent）进行设置，同时在基本参数设定列表中，对系统初始状态等进行设置。

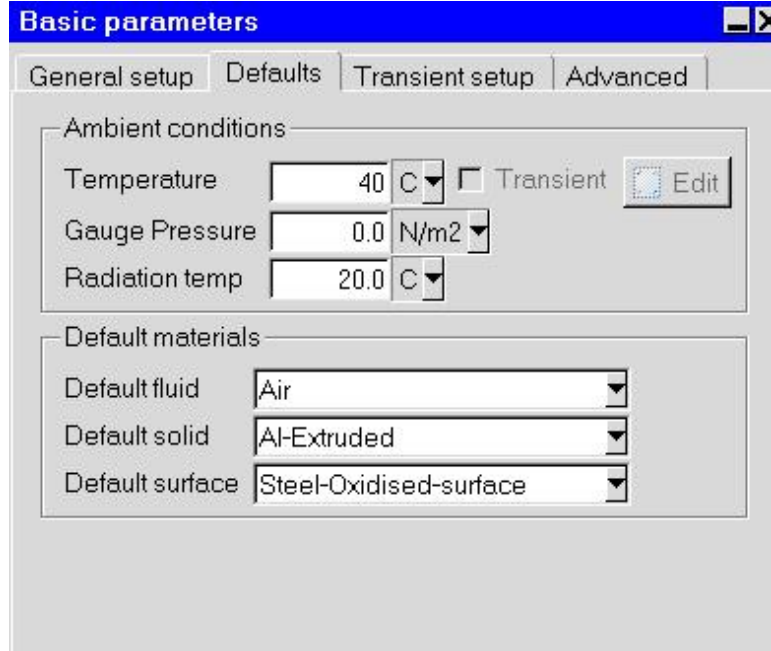


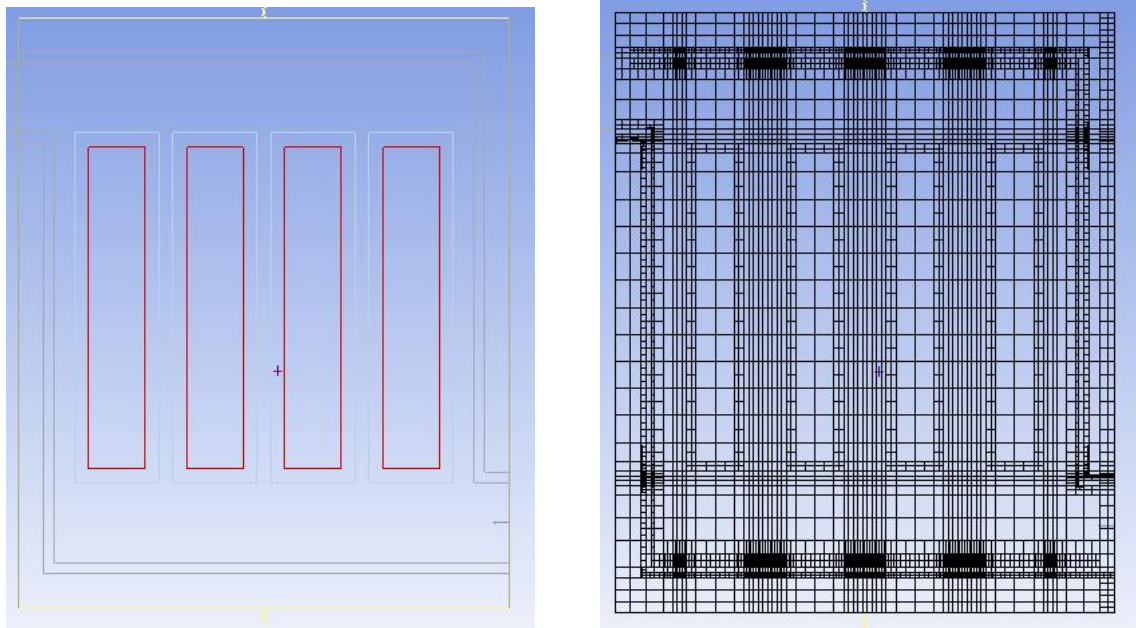
图 4-7 环境参数设置

4.1.6 网格划分

在完成 Icepak 中搭建完散热系统后，在求解之前需要对网格进行划分。

网格划分思想是有限元分析中十分重要的一步，将求解对象划分为众多小的，相互接触的单元体，然后通过计算模拟每个单元体间的相互作用从而模拟处整个求解对象各个部分的受力受热状态。由于结构离散后的网格质量如何对求解时间和求解结果有很大的影响，一般来说，网格增加，计算精度提高，但是计算量也增大，因此在设定网格数量的时候，应该仔细权衡。

网格划分的实体单元种类主要有两类：六面体单元和四面体单元。由于六面体单元结构划分要求比较高，对于壳体等结构相对复杂的三维结构自动划分难度非常大，而四面体单元的划分十分灵活，也可以很好的逼近三维结构，而且四面体单元结构的自动划分也已经非常成熟。在分析该散热系统时，由于有大量壳体，且避免六面体手动划分中过多的人工干预，使用四面体网格。



(a) 网格划分前

(b) 网格划分后

图 4-8 网格划分

4.1.7 结果分析

将散热系统初始方案热仿真模型建立完毕后，进行求解。然后对几个电池包和空气温度进行可视化处理。如下图所示，可以看到空气分布十分紊乱，且电池包单体温度分布很不均匀，散热效果差。

参数设定完成后，导入三维模型使用 Icepak 对优化前的初始方案进行仿真，图 3-6 中 4 个电池包的的温度数据分别如下表所示。

表 4-3 优化前初始方案仿真结果

电池	最低温度	最高温度	平均温度	温度标准差
电池包 1	23.1516℃	47.5759℃	32.7023℃	4.51065℃
电池包 2	23.1061℃	56.9393℃	32.4798℃	6.48705℃
电池包 3	23.1072℃	32.7952℃	26.462℃	1.57956℃
电池包 4	23.1347℃	28.8104℃	25.6835℃	1.31504℃
全部电池	23.1061℃	56.9393℃	29.3319℃	3.47308℃

其中，平均温度为 4 个电池包单体的平均温度；最大温差为所有电池包中每个单位面积上最大温度与最低温度的差值；总温度标准差为所有电池包的温度标准差；最大标准差为 4 个单体电池包标准差的最大值。

此时全部电池组平均温度、单位面积最大温差、电池组平均标准差、最大单个电池包标准差分别为 29.33℃、33.83℃、3.47℃、6.49℃。温差与温度标准差都较大，与此同时，电池组系统中局部最高温度高达 56.94℃，远高于磷酸铁锂电池最佳温度 35℃^[54]。散热效果不理想，仍需优化。

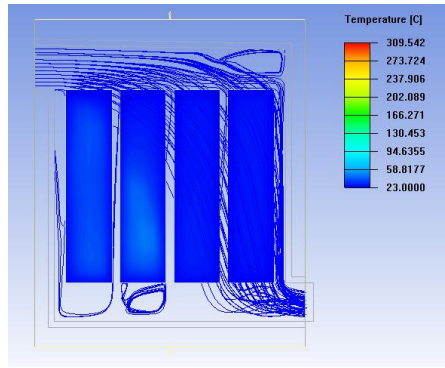


图 4-9 初始方案效果图

4.2 初始方案的结构优化

结合上图 4-9 的空气流向曲线分析散热效果差的原因：局部温度过高和温度均衡性不好，很大一部分原因是冷风经过几个电池包时，分散性较差。空气集中流向后两个电池包，使得前两个电池包散热效果很差。

因此，优化方案的设定以让空气更均匀的在系统内流动为目的。

4.2.1 并行口角度的优化

首先考虑更改空气与并行口的角度 α ，取并行入射线与水平夹角（后文统称夹角）为 θ ， $\theta = \alpha - 90^\circ$ 。以 θ 的取值为优化对象。如第 3 章图 3-6，初始方案使用 α 为直角即 $\theta = 0^\circ$ ，这里探讨使用其他角度有无明显改善。由于风扇入射范围有限，为避免空气过分折射。以风扇下边缘延长线处为并行口极限点，即如下图所示， $\theta = 10^\circ$ 的时候为极限情况。

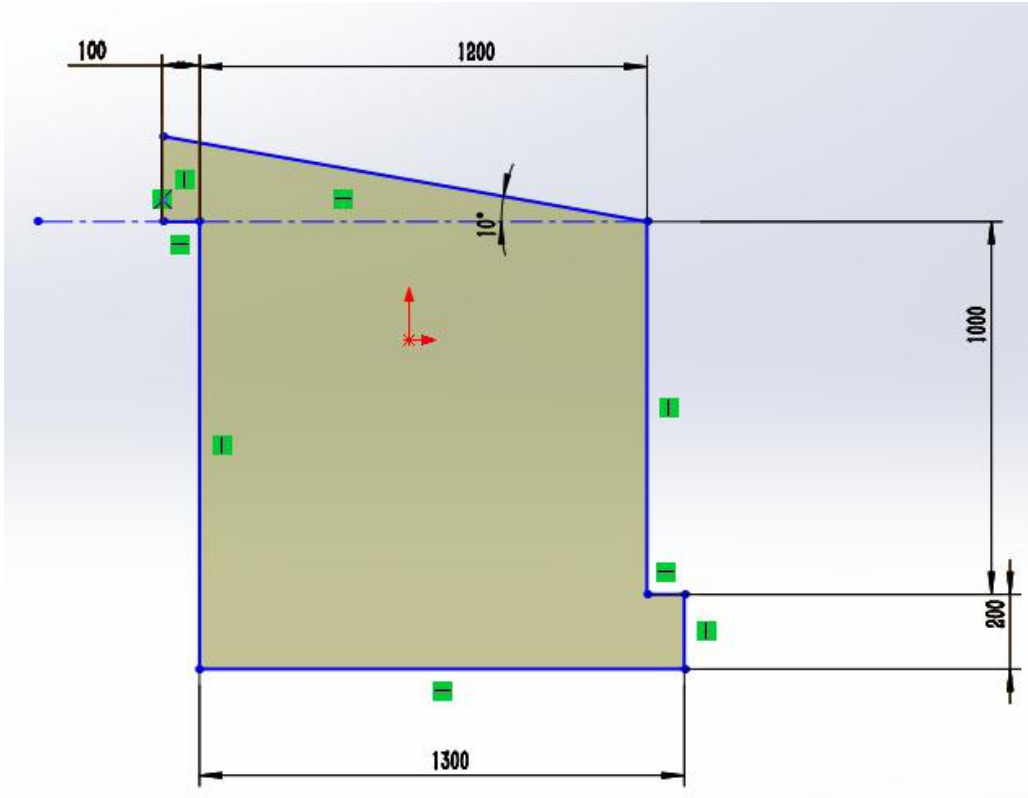


图 4-10 并行口角度示意图

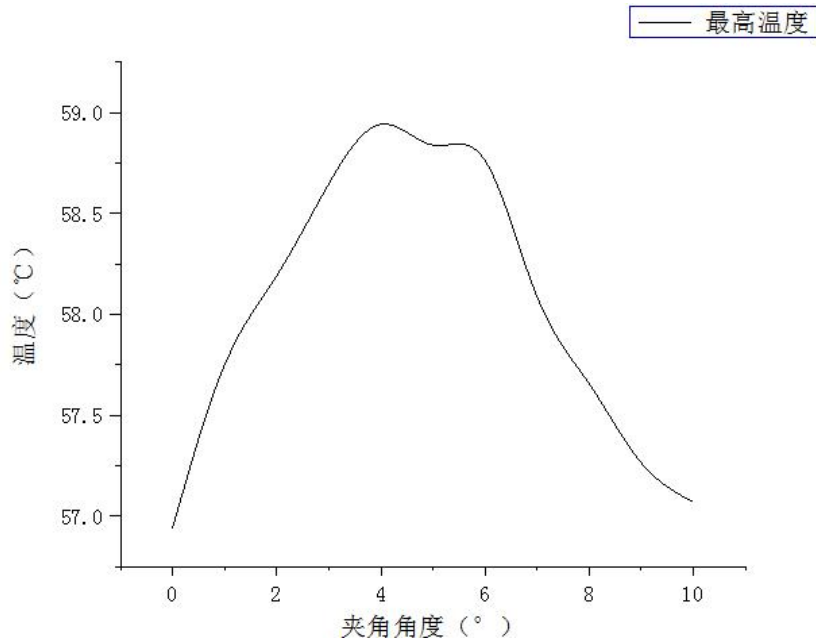
所以取夹角 0~10 度进行仿真分析，每隔 1 度进行一次仿真，对比仿真结果，通过仿真对比不同的角度来分析角度对仿真结果的影响。最后所得散热效果如表 5-4 所示。

表 4-4 不同角度优化后仿真结果对比

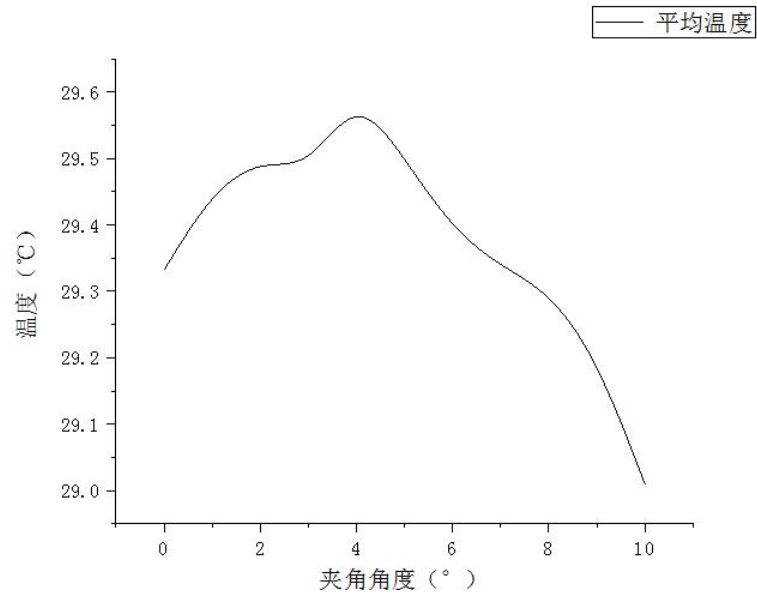
入射挡板与水平面夹角角度 θ	最高温度	平均温度	温度标准差
0°	56.9393℃	29.3319℃	3.47308℃
1°	57.749℃	29.4385℃	3.56791℃
2°	58.191℃	29.4877℃	3.59428℃
3°	58.6469℃	29.5045℃	3.61597℃
4°	58.9425℃	29.5629℃	3.61615℃
5°	58.8387℃	29.4989℃	3.59886℃
6°	58.7636℃	29.4021℃	3.59624℃
7°	58.0887℃	29.3409℃	3.54596℃
8°	57.6559℃	29.2895℃	3.51826℃
9°	57.2649℃	29.1847℃	3.49974℃
10°	57.0696℃	29.0096℃	3.4839℃

图 4-11 表示了 0~10 不同角度下，最高温度，平均温度，温度标准差的变化趋势。当夹角小于 5° 的时候，最高温度、平均温度、温度标准差均呈现上升趋势，散热效果越来越差；而当夹角大于 5° 的时候，最高温度、平均温度、温度标准差均呈现下降趋势，散热效果越来越好。曲线一定程度上类似于 $a < 0$ 时一个一元二次方程 $y = ax^2 + bx + c$ 的曲线，在温度最高值后，会随着夹角的增大，温度逐渐降低，但是受

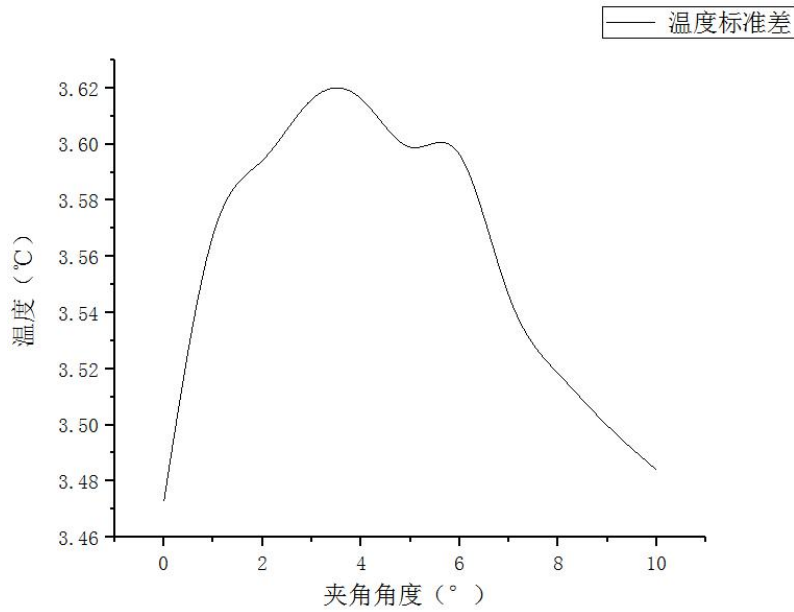
空间大小和风口大小的局限，不能设置角度太大，只比较 $0^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 时散热效果，综合比较，角度为 0° 时，散热效果更优。



(a) 最高温度



(b) 平均温度



(c) 温度标准差

图 4-11 不同夹角下最高温度、平均温度、温度标准差变化趋势

因此可以看到，一定范围内，通过角度来进行优化的手段并不有效，尝试分析原因，如图 4-12 所示，为不同角度电池组温度分布图和空气流向图。可以看到风的流向虽然因为角度的变化有一些变化，然而，并没有改变后边两个电池组散热效果出色前两个电池组散热效果差的问题。因此，不妨将问题的关键放到让空气充分扩散，解决前两个电池包单体温度过高的目的上来。提出增加风扇到电池组的距离，方便空气扩散和增加滤板两个方案。

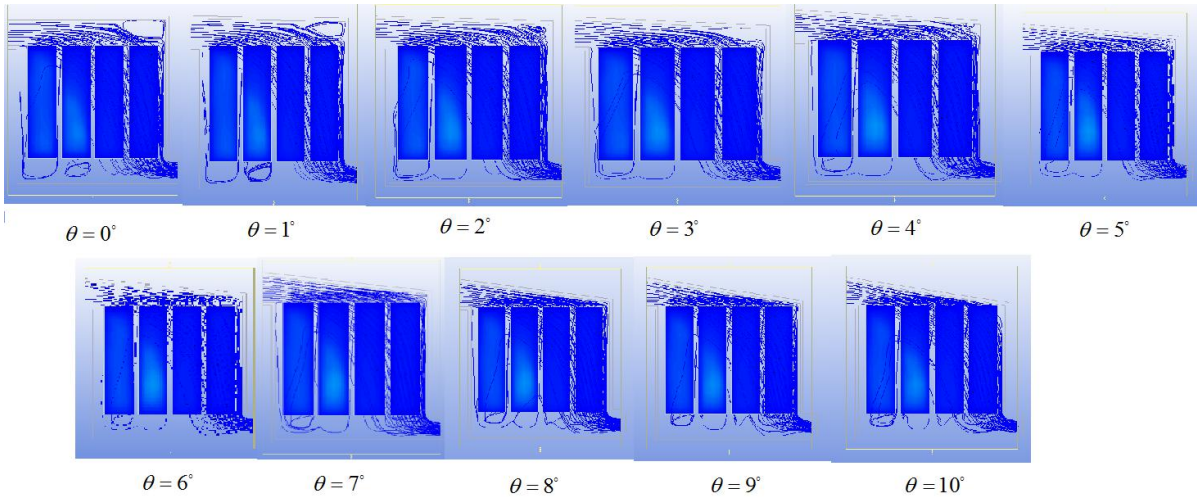


图 4-12 不同角度下温度区域分布图和空气流动图

4.2.2 扩散距离的优化

为了更优良的冷空气分散效果，提出优化方案：增加电池包到风扇的纵向扩散距离 h （后文简称扩散距离）。然后再考虑增加滤板，滤板位置在电池包上方距离为 a

的位置， a 的最优值也在下一节中讨论。

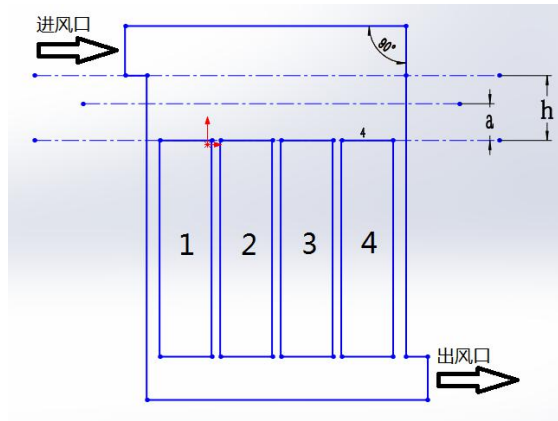


图 4-13 距离优化 (h) 和安装滤板 (a) 示意图

增加风扇到电池包的纵向扩散距离 h (如图 4-13 所示)，使得冷空气在接触电池包前有充分的距离分散开，避免了电池包部分区域因过分冷却温度低，而其它部分没有得到充分冷却而温度过高，而使温度均衡性降低。从 0mm 开始每隔 50mm 进行一次仿真。由于更长的扩散距离对应着更高的散热材料要求和更大的空间，我们取扩散距离增加最大值 300mm 。对扩散距离值分别为 0mm , 50mm , 100mm , 150mm , 200mm , 250mm , 300mm 进行仿真分析，通过仿真结果比较电池组平均温度、单位面积最大温差、电池组平均标准差、最大单个电池标准差这四个参数以验证优化结果。

表 4-5 不同扩散距离优化后仿真结果对比

扩散距离	平均温度	最大温差	总温度标准差	最大标准差
$h=0$	29.3319°C	33.8332°C	3.47308°C	6.48705°C
$h=50\text{mm}$	29.5638°C	31.9232°C	3.19409°C	5.33751°C
$h=100\text{mm}$	29.8761°C	36.0123°C	3.14822°C	5.59416°C
$h=150\text{mm}$	30.5433°C	27.0161°C	3.27543°C	5.56153°C
$h=200\text{mm}$	30.1386°C	25.9152°C	2.97077°C	4.49428°C
$h=250\text{mm}$	29.9292°C	32.1448°C	3.08376°C	4.624°C
$h=300\text{mm}$	31.0787°C	35.1547°C	3.26534°C	6.22418°C

从仿真结果不难看出，扩散距离的改变对平均温度的影响很小，差别都在 1°C 以内。而其最大温差、总温度标准差和最大标准差而这三个数据的最小值均出现在 200mm 的扩散距离处，通过分析不难得出，当扩散距离小于 200mm ，空气未能得到良好的扩散，而当扩散距离大于 200mm ，由于沿程空气与外界的热交换，空气温度升高，空气散热效果降低，所以扩散距离增加值 200mm 时优化效果最佳。与表 4-5 对应，表 4-6 为扩散距离增加 200mm 时各个电池包的温度特性，通过对比即可看出优化效果。

表 4-6 扩散距离优化后 (h=200mm) 仿真结果

电池	最低温度	最高温度	平均温度	温度标准差
电池包 1	25.2401℃	46.5375℃	34.7677℃	4.49428℃
电池包 2	23.9303℃	49.0539℃	33.2919℃	4.36395℃
电池包 3	23.285℃	31.7874℃	26.762℃	1.67351℃
电池包 4	23.1387℃	28.7012℃	25.7329℃	1.35134℃
全部电池	23.1387℃	49.0539℃	30.1386℃	2.97077℃

通过与表 4-5 对比对比，我们可以得到的优化结果是温度上升了 0.81℃（同比上升 2.75%）；电池组单位面积最大温差下降了 7.92℃（同比下降 23.40%）；电池组平均标准差下降了 0.50℃（同比下降 14.46%）；最大单个电池包标准差下降了 1.99℃（同比下降 30.72%），在平均温度仅有 2.75% 的上升的情况下，其它三个均衡性相关参数分别有 23.40%、14.46%、30.72% 的改善，而且，电池组局部最高温度降到 49.05℃，优化效果比较理想。

4.2.3 增加滤板的影响

之前的几种方法为常规优化方案，均旨在结构上的优化使风更均匀的分布，而滤板在流体运动中起阻碍气体流动的作用，与此同时，滤板也一定程度上有助于空气均匀流动。那么增加滤板能否对风冷系统的均匀性有帮助从而优化散热效果？本节将通过计算机仿真计算进行验证。

在扩散距离优化以后，为了得到进一步的温度优化结果。考虑到让风更平稳均衡的经过电池包可以得到更佳均衡的温度。那么不妨尝试在电池包与风扇之间如图 4-13 所示的第二根点划线处（距离电池包顶部距离为 a 处）增加一个滤板。滤板作为空气滤板时，对风有一定的阻碍作用，但同时也有利于空气的均匀分布。其效果除了受放置位置的影响，还受其开孔率 Φ 的影响。

$$\Phi = A_0 / A \tag{4-4}$$

式中 A_0 —滤板上筛孔的总面积 (mm^2)

A —开孔区(又称有效传质区)面积 (mm^2)



图 4-14 滤板

本文不对滤板 A_0 和 A 进行设定而直接设定开孔率 Φ 。滤板开孔率从 0 到 1（不包括 0 和 1），每隔 0.1 进行一次仿真。

为了与距离仿真后的结果做横向对比，此时固定电池包与风扇距离为 200mm，将滤板位置从风扇处到电池包上方 $a=5\text{mm}$ 处（接近但不接触电池包顶部）安装在距离电池包 200mm,150mm,100mm,50mm,5mm 处，滤板厚度忽略。9 种开口率，5 个位置，因此总共进行 45 次仿真，得到的平均温度、最大温差、总温度标准差、单个电池最大标准差如图 5, 6, 7, 8 所示。

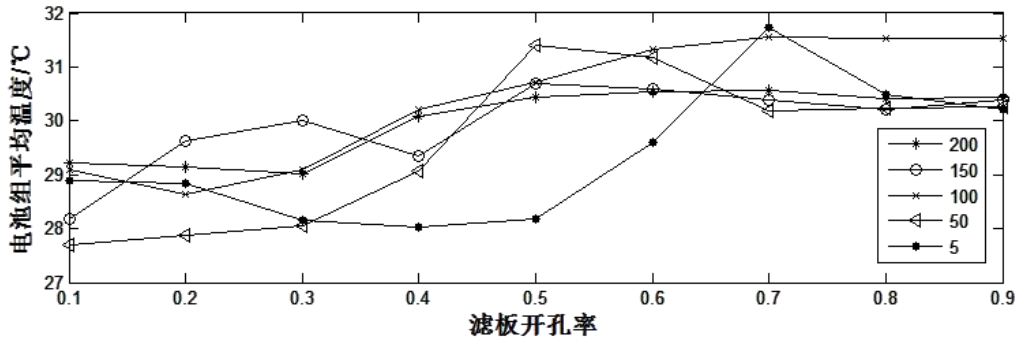


图 4-15 增加滤板后平均温度

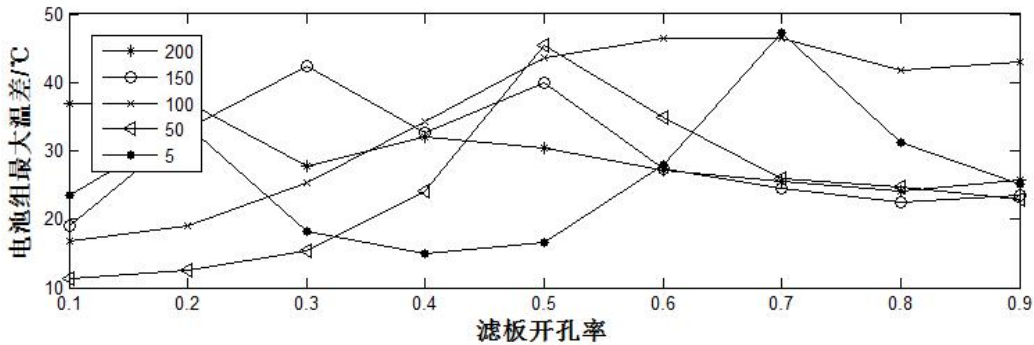


图 4-16 增加滤板后最大温差

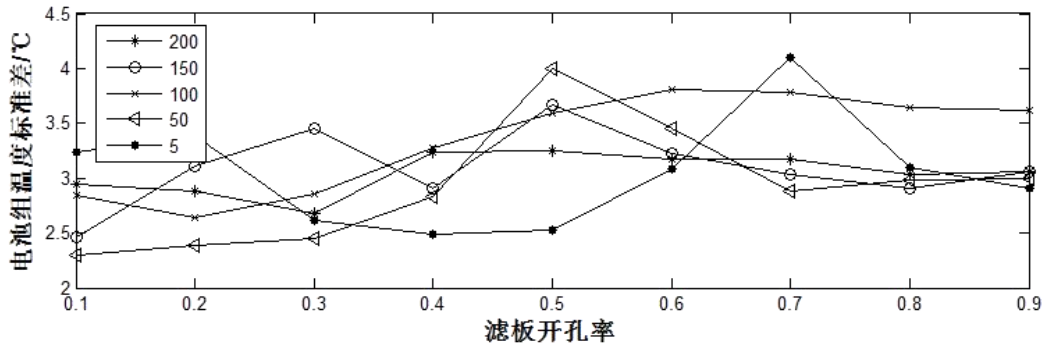


图 5-17 增加滤板后总温度标准差

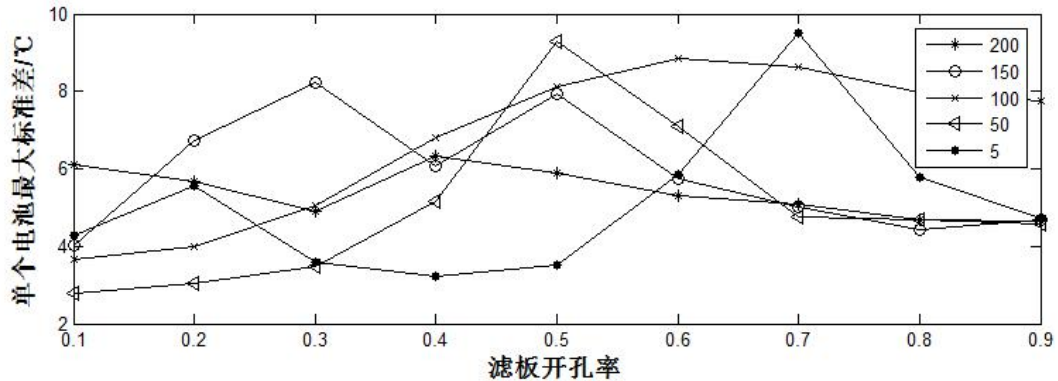


图 4-18 最大单个电池包温度标准差

这四张图中 5 条不同的曲线分别表示滤板到电池包的距离为 200mm, 150mm, 100mm, 50mm, 5mm 时平均温度、最大温差、温度标准差、单个电池包最大温度标准差, 横坐标为滤板开孔率, 纵坐标为此时的温度(温差/标准差)。

图形显得变化规律十分复杂, 其变化规律具有一定的不可预测性, 分析其原因, 在保证仿真计算正确的前提下, 因为距离和开孔率对电池组的散热效果影响是十分复杂的, 改变距离或者开孔率, 可能在某些区域散热效果更优, 而其他地方散热又更差了。因此不做更多的理论分析, 仅仅从图形中寻找散热最优点。通过图形不难看出其中最优平均温度, 最优最大温差, 总温度标准差, 最大标准差均是滤板距离电池包顶端 50mm, 开口率为 0.1 时。此时仿真结果如表 4-7 所示:

表 4-7 第二次优化后仿真结果

电池	最低温度	最高温度	平均温度	温度标准差
电池包 1	23.2021℃	36.8835℃	28.5195℃	2.77639℃
电池包 2	23.1877℃	36.7223℃	28.528℃	2.66598℃
电池包 3	23.163℃	31.6057℃	27.1857℃	1.9917℃
电池包 4	23.1815℃	31.0034℃	26.5549℃	1.75718℃
全部电池	23.163℃	36.8835℃	28.1136℃	2.0128℃

将此表同样与表 4-5 对比, 我们可以得到的最终优化结果是温度下降了 1.63℃ (同比下降 5.57%); 电池组单位面积最大温差下降了 22.48℃ (同比下降 66.44%); 电池组平均标准差下降了 1.18℃ (同比下降 33.84%); 最大单个电池标准差下降了 1.99℃ (同比下降 57.20%)。可见平均温度、单位面积最大温差、平均标准差、最大单个电池标准差均有了比第一次优化更优的结果, 而且, 电池组局部最高温度降到 34.52℃, 优化结果理想。

4.2.4 优化结果分析与讨论

图 4-19, 4-20, 4-21 分别为初始方案、增加的扩散距离 $h=200\text{mm}$ 优化方案、和扩散距离 $h=200\text{mm}$ 的基础上在电池包上方 50mm 增加开孔率为 0.1 的滤板的温度分布图和冷空气流体分布图。

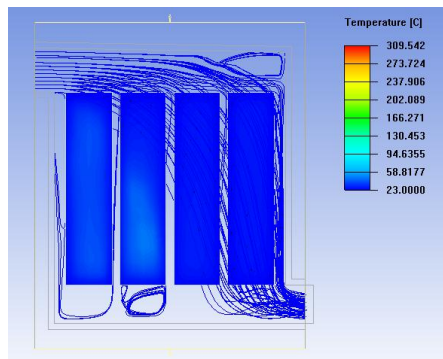


图 4-19 初始方案效果图

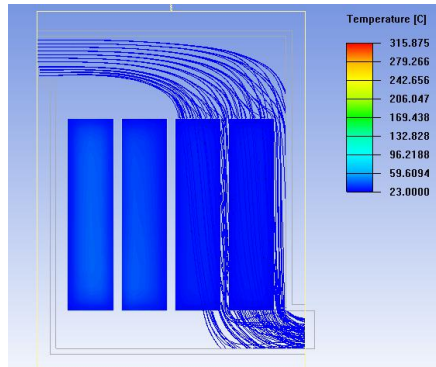


图 4-20 扩散距离优化无滤板方案效果图

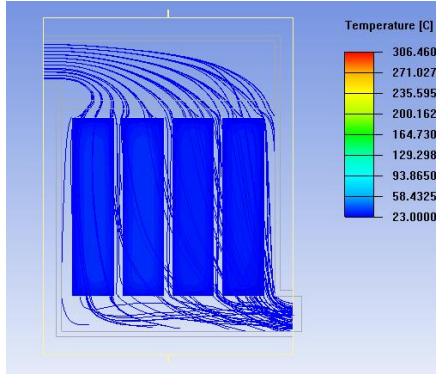


图 4-21 扩散距离优化并增加滤板效果图

可见距离优化前，冷空气流动较乱，有部分流动路径很不规则；距离优化后，冷空气流动规则，然而集中在右半区；最后加入滤板后，空气流动规则，且分布均匀。

4.3 本章小节

在最大功率工作条件下，优化前初始散热方案局部温度过高，温差大，均衡性差。为了改善温度均衡性，降低局部温度，考虑改善冷风的分散效果。针对这一目的，本章提出三个改善措施：改变并行口的入射夹角、增加扩散距离、增加滤板。最后得到增加空气到电池顶部的扩散间距 h ($h=200\text{mm}$)，以及在 $a=50$ 增加一个开孔率为 0.1 的滤板两种方案对散热效果优化明显。通过 ANSYS、Icepak 建立三维模型后的热力学仿真结果来看，通过本章的优化，电池组最高温度，平均温度，温度标准差分别从 56.9393°C 、 29.3319°C 、 3.47308°C 降低到 36.8835°C 、 28.1136°C 、 2.0128°C ，优化方案效果明显。所以这两种优化方案可作为散热系统优化的一种思路。而第 5 章则提出了一种开孔率随区域改变的变开孔率优化方案。

第 5 章 滤板的变开孔率优化方案

这一章对开孔率的优化取值进行了进一步探讨。

按照 4.2.3 和 4.2.4 章节的仿真结果，滤板对于散热的优化效果十分明显，但是还有一些问题有待解决。首先，由于风扇位置固定，不同的电池包单体，离风扇近的电池包单体，散热好，温度低；离风扇远的电池包单体，散热差，温度高；其次，由于电池包的立体几何形状为长方体，在长方体每一个表面的温度不可能完全均匀分布。这些问题就造成了电池包散热的不均匀性，而为了解决这些问题，提出了变开孔率板优化方案。

变开孔率滤板是指在一块滤板上，不同区域局部的开孔率是变化的，而不是一个固定取值。

显而易见的，开孔率越低，滤板对空气的阻碍作用越大；开孔率越大，滤板对于空气的阻碍作用越小。所以我们可以有目的性的通过增加滤板开孔率促进冷空气在附近区域的流动；相反，也可以通过使用低开孔率，抑制冷空气在附近区域的流动。变开孔率有利于控制系统局部风速。

5.1 待继续优化问题

问题 1：如前文表 4-7 电池包 1,2,3,4，由于所处位置不同，单体电池包间最高温度/平均温度/温度标准差差异明显，且均有以下关系：电池包 1 > 电池包 2 > 电池包 3 > 电池包 4；

问题 2：如图 5-1 所示（此温度云图中颜色越深，温度越低），每个电池包单体每一面的温度都有不同程度的温度不均衡性。且都是中间区域温度大于周围温度；



图 5-1 电池包温度分布云图

问题 3: 如表 5-1 所示, 在每个电池包单体的侧面(侧面/背面/前面的划分按照图 5-2 所示)温度均高于其他面。都有第 1,4 单体电池包前面温度高于后面; 第 2,3 单体电池包前面温度低于后面。而上面由于冷空气垂直于该面, 空气直接打在该面上, 散热最均匀, 温度最低。

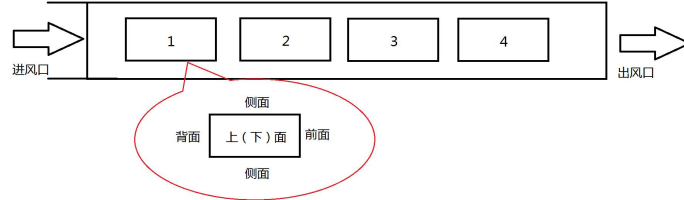


图 5-2 侧面/背面/前面位置示意图

图 5-2 为位置示意图, 表 5-1 为图 5-2 各面几何中心点的温度。

表 5-1 开孔率为 0.1 的滤板时各个风速下各面几何中心点温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

电池编号	区域	温度 ($^{\circ}\text{C}$)
电池包 1	背面	29.1576
	侧面	32.4248
	前面	30.2712
电池包 2	背面	30.3773
	侧面	32.3168
	前面	28.9775
电池包 3	背面	28.2339
	侧面	30.162
	前面	27.9988
电池包 4	背面	27.4876
	侧面	29.3256
	前面	28.0989

5.2 区域细分后的开孔率设置方案

在之前采用的是单一开孔率, 即整块滤板的 $\Phi=0.1$, 而这里提出一种, 不同区域采用不同开孔率的变开孔率方案。

那么首先分析 5.1 中的几个问题, 并根据这些问题提出区域划分方案。

问题 1 分析: 由于风扇的风朝向原因, 冷风必然会远端流速大于近端流速, 如前文图 4-19 中空气流动轨迹图, 由于风扇安装位置不能照顾到所有电池包, 使得空气分散不充分, 所以会出现部分电池包散热差, 温度高, 部分电池包散热好, 温度低的问题, 加入滤板后风分散性得到改善, 温度不均匀性降低, 但仍然没有根本上解决这个问题。考虑使用变开孔率, 近端高开孔率增强冷空气流通, 远端低开孔率限制冷空气流通。从而抵消由于风扇朝向造成的不均匀。

问题 1 优化方案: 将电池散热系统以电池包边界和电池间中线为界限, 将电池包分为四个区域, 每个区域按离出风口由近到远, 区域整体开孔率递增。

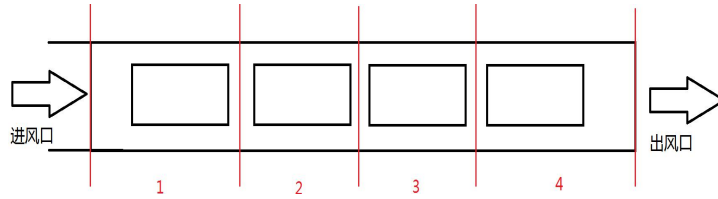


图 5-3 第一次区域细分区域划分图

问题 2 分析：该系统使用的电池包单体几何形状为长方体热量向中央区域集中。

问题 2 优化方案：通过改变对应滤板开孔率大小，使得通过电池包侧面中心处风速更大。

问题 3 分析：由于风的自然流向，各个电池包前面和后面流过的风速各不相同，而由于上面距离风扇最近，且自上而下的冷风会直接作用在上面，使得上面的温度较低。

问题 3 优化方案：电池包正上方对应滤板区域开孔率降低，限制冷风流入，让风更多从其他地方通过；并且在前面侧面后面每个电池包通过仿真得到的温度数据来调整开孔率方案。

最终得到如下图所示滤板区域划分。

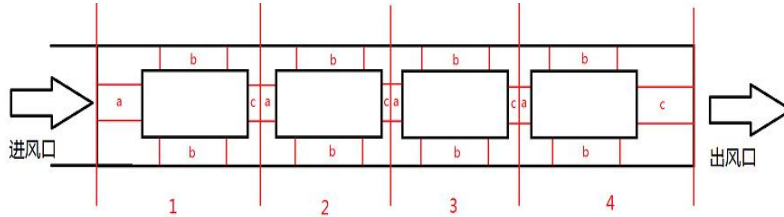


图 5-4 最终区域划分（第二次细分）区域示意图

最终将整块滤板按该图 5-4 方式划分：

- a.先划分为 1, 2, 3, 4 四个大的矩形区域（如图 5-3），四个边分别为临近的电池包内壁或者相邻电池包单体之间的正中间平面，这四个区域开孔率不同；
- b.每个电池包单体正上方，即途中中间黑色矩形区域使用更小的开孔率；
- c.在每个区域中间部分（大小为电池包每个面的一半）使用更高的开孔率，以降低每个侧面中心区域温度。

5.3 开孔率优化

5.3.1 优化参数取值思路

目前优化参数主要是不同区域开孔率的选择上，在此问题上，目前并无特定的公式参考，不妨按照仿真结果，对开孔率取值进行反馈优化，最终达到最优的散热效果。

不同区域开孔率设置原则：在同一风速，滤板同一开孔率下，温度越高，散热越差的区域使用越高的开孔率。即给定一个大概的优化初始值，通过仿真结果，调整不同区域的取值：提高高温（散热效果差）区域的滤板开孔率，或者降低低温（散热效果好）区域的滤板开孔率。然后将调整后的开孔率代入重新仿真，再继续根据仿真结

果进行调整。以此为循环直到仿真后优化效果达到预期。

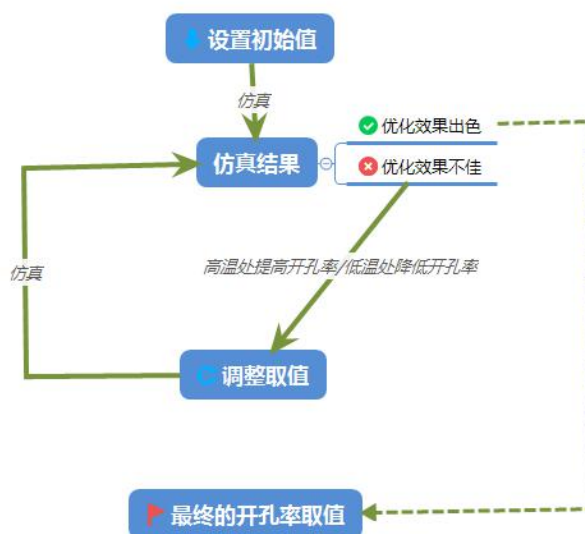


图 5-5 开孔率优化值确定流程图

按照图 5-5 的确定开孔率取值的方法，对细分开孔率的取值进行分析。可将开孔率的取值分为两步，第一步，按照图 5-3 方式第一次划分区域，确定 4 各大区域开孔率的取值关系；第二步，每个大区域中，按照图 5-4 的划分方式进行小区域划分，每个每个小区域进行一次开孔率调整，确定这些小区域相互之间开孔率关系。

5.3.2 第一次区域划分后开孔率取值

按照之前图 5-3 的划分区域，以每两个单体电池包和电池包外壳为界限将滤板分为 4 大块。

以滤板开孔率为 0.1 为初始状态进行仿真。

再按照图 5-5 的反馈值优化方式确认优化取值，保证单体电池包散热差的区域开孔率提高，散热较好的区域保持不变或者降低。直到各个区域标准差均小于 2，整体标准差小于 1.95 停止优化，得到优化后的结果。

通过多次开孔率调整后，当区域 1,2,3,4 的开孔率分别为 0.5，0.3，0.13，0.12 时得到：

表 6-2 第一次细分区域改变开孔率后仿真结果

电池	最高温度	平均温度	温度标准差
电池包 1	35.039℃	27.7234℃	1.98491℃
电池包 2	33.9021℃	27.7671℃	1.97198℃
电池包 3	32.525℃	27.8106℃	1.88282℃
电池包 4	32.4101℃	27.9185℃	1.92679℃
全部电池	35.039℃	27.8049℃	1.94163℃

对比表 5-1 和表 5-2，第一次细化区域后优化效果已经远远好于单一开孔率。

5.3.3 第二次细分区域

通过上面的仿真可以看到，改变 4 个单体电池包对应区域的滤板开孔率可以对散热效果（最高温度，平均温度，温度标准差）有明显的提升。

而通过 5.2 节中的分析，单体电池包每个面都有中心温度高，周边温度相对较低的特点，那么通过改变如前文图 5-4 中 a,b,c 等区域的开孔率是否能够抑制这种差异，降低各个局部区域间温度差，从而达到优化散热效果。

如表 5-3 所示因为每个面位置不同，温度不同，我们通过检测每个面几何中心点的温度来确定其散热效果，并对其进行开孔率的调整。

当第一次细分区域后，区域 1，2，3，4 的开孔率分别为 0.5，0.3，0.13，0.12 时，各面中心点温度如下表所示。

表 5-3 第一次细分区域后各面中心点温度（风速=10m/s）

电池包单体编号	位置	中心点温度（℃）
1	背面	28.4975
	侧面	30.3851
	前面	28.276
2	背面	27.7585
	侧面	30.023
	前面	31.2045
3	背面	28.7762
	侧面	30.3842
	前面	28.9711
4	背面	28.6299
	侧面	30.8018
	前面	28.8289

根据每面中心点的温度通过图 5-5 的方法来调整对应的滤板开孔率。温度高的区域调高，温度低的地方维持不变或者降低的规律，进行仿真调整，再仿真。以此探索最优开孔率取值。

并且使用分步分解法，1,2,3,4，四个区域先对区域 1 的背面（a），侧面（b），前面（c）对应滤板开孔率的取值进行探索，得到较优结果后再分别探索 2,3,4 的 a,b,c 面开孔率取值。最终，图 5-4 中各区域的开孔率如下表所示：

表 5-4 第二次细分区域时各区域开孔率

	a	b	c	其余
1	0.55	0.6	0.55	0.5
2	0.32	0.38	0.4	0.3
3	0.15	0.17	0.15	0.13
4	0.14	0.16	0.14	0.12

如表 5-4 所示，横坐标为 4 个不同区域，纵坐标分别对应该区域 a, b, c 区域和其余区域内的开孔率。

此时仿真散热效果得到进一步优化，如下表所示：

表 5-5 滤板开孔率优化设计以后仿真结果

电池	最高温度	平均温度	温度标准差
电池包 1	34.2388℃	27.7586℃	1.95226℃
电池包 2	33.6731℃	27.7174℃	1.94689℃
电池包 3	32.1189℃	27.7355℃	1.85214℃
电池包 4	32.0273℃	27.8421℃	1.89115℃
全部电池	34.2388℃	27.7634℃	1.91061℃

对比表 5-5 和表 5-2 可以看到，第二次细化区域后，优化效果变得更加出色。

5.4 优化结果分析

此时滤板整体开孔率为滤板每区域开孔率乘该区域面积的和除以整个滤板面积，即：

$$\Phi_{\text{总平}} = \frac{\sum \Phi_x \cdot A_x}{\sum A_x} = 0.278 \quad (5-1)$$

式中 Φ_x —某区域开孔率；

A_x —某区域的面积。

很明显，开孔率和之前初始方案的 0.1 不一样，但是在单一开口率中，模拟出的曲线图 3, 4, 5 来看，单一开孔率当开孔率=0.1 时，电池组最高温度、平均温度、温度标准差都可取得最低值。且当使用单一开孔率滤板并且开孔率为 0.278 时，所有电池包最高温度、平均温度、温度标准差分别为 40.1784℃，28.4129℃，2.12109℃，均远远大于变开孔率时的值，所以排除是开孔率的改变造成的散热效果优化。变开孔率滤板散热效果优于单一开孔率滤板的设想得到验证。

表 5-6 仿真效果对比

滤板开孔率	最高温度	平均温度	温度标准差
无滤板	49.0539℃	30.1386℃	2.97077℃
0.278	40.1784℃	28.4129℃	2.12109℃
0.1	36.8835℃	28.1136℃	2.0128℃
变开孔率	34.2388℃	27.7634℃	1.91061℃

同时从表 5-6 可以看出,使用细分区域后变开孔率的滤板对不同区域的冷风流速进行调整是可行的。此时最高温度、平均温度、温度标准差分别比无滤板降低了 14.8151℃, 2.3752℃, 1.06016℃;比单一开孔率滤板($\Phi=0.1$)降低了 2.6447℃, 0.3502℃, 0.10219℃。

5.5 本章小结

针对风冷中散热效果不佳的情况,创新地提出并分析了一种在使用滤板散热效果大幅度得到提升,并提出将滤板开孔率按照不同区域不同取值的方法设定后的,散热效果优于使用单一开孔率。那么使用滤板并且进行细分区域后改变开孔率在散热系统中的应用是可行的,为锂电池系统散热提供了新的思路。

第 6 章 不同工况下的温度模糊 PID 控制

在之前的章节为了讨论散热结构的优化问题，考虑的是散热系统最大能力的问题，并没有考虑经济性。因此，讨论的是散热系统散热能力的问题，即默认风扇为最高转速，在最高外界温度，且挖掘机长时间在最大生热量的工况下工作的情况下，讨论散热系统能不能完成散热目标。在证明了散热系统能够完成散热目标之后，更需要考虑经济性的问题。随着外界温度的降低，或者挖掘机长时间使用低功率工况时，散热压力不大的情况下，通过降低风速减少散热系统的能量损耗。

6.1 控制风速对散热的影响

根据热传递机理把电池热量的发散方式分为热传导、热对流和热辐射。由于风冷系统中电池反应产生的热量是从内往外通过热传导传递到电池组表面，电池组表面与流动的空气接触后通过热对流将热量传递给空气。由于系统中使用的空气是冷却后的温度，而电池组表面局部在无散热的情况下温度往往大于 60℃。在风冷系统热交换的过程中，空气温度升高，而电池组表面温度的升高被抑制，最终达到一个平衡状态，这个时候的电池组产生的热量和空气带走的热量动态平衡。温度能够稳定在一个特定的值。

即：

$$Q_w = Q_e \tag{6-1}$$

式中 Q_w —电池组产生的热 (J)；

Q_e —外界环境带走的温度 (J)。

由于锂电池组本身的热传导速率是由其材料和结构决定的；而在电池组工作时，温度低于 100℃，热辐射很小，其改变可以忽略不计。所以设计改善散热结构可以主要是通过改善其热对流来实现。

对流换热是指空气与固体表面有相对运动且两者存在温度差所发生的热传递现象。其数学模型可以用牛顿冷却方程：

$$\dot{q} = h_f(T_b - T_a) \tag{6-2}$$

或者

$$Q = \dot{q} \cdot A = h_f A(T_b - T_a) \tag{6-3}$$

式中 \dot{q} —热流密度 (W/m^2)；

h_f —表面对流传热系数 ($W/(m^2 \cdot K)$)；

T_b 、 T_a —分别代表固体表面和相接触的流体的温度；

A —电池组表面积；

Q —单位时间内面积 A 内传递的热量 (W)。

根据牛顿冷却方程, 散热速度和温度差以及 h_f 成正比, 当温度差一定的情况下, h_f 越大, 散热速度越快, 因此增加 h_f 的值是散热系统优化的重要途径。

h_f 在流体和固体不变的情况下, 和流速有着密切的联系, 固体边界处流体流速越快, 表面对流系数值越大, 单位体积单位时间内散热量也越大。在电池产生热量一定的情况下, 温度也越低。

在电池组不变的情况下, 其表面积不变, 所以在特定的温度下, 要使得在高温处温度更低, 就可以有针对性地对温度较高的地方风速更快, 单位时间内更多的空气流过, 带走热量多; 而温度不高的区域风速可以适当的低一点, 使得流动的空气更多的流向高温区域。这可以通过改变对应区域的滤板开孔率来实现。

风速越快, 散热越好。但是更高的风速意味着更高的能量消耗。在不计能量损耗, 假设风扇所有的输入功率全部转换为空气的动能:

$$P = \frac{1}{2} m'v^2 = \frac{1}{2} \rho V'v^2 \quad (6-4)$$

又因为风速送入的风体积 $V = A \cdot v$ 。

所以有

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (6-5)$$

所以在不计能量损耗, 当风速提高 a 倍, 我们需要转换的能量提高为 a^3 倍。而实际上更高的风速意味着更高的空气阻力, 能量损耗更高。

所以从节能的角度来看, 每降低一半的风速, 风扇的能量损耗至少降低到 1/8。

6.2 不同工况下的风速与温度

因为本挖掘机主要工况只有两种, 一种低功率 (10kW) 工况, 一种高功率 (30kW) 工况。通过仿真对比两种工况下, 不同风速的电池组散热情况, 可以得到如下表所示:

表 6-1 不同风速下的散热效果对比(两种工况)

风速	高功率 (30kW) 工况			低功率 (10kW) 工况		
	最高温度	平均温度	温度标准差	最高温度	平均温度	温度标准差
10m/s	34.2388	27.7634	1.91061	25.1818	24.6667	0.873702
9m/s	34.5697	28.1266	2.22797	25.5194	24.8091	0.93331
8m/s	35.0879	28.5937	2.38813	25.9283	24.9815	1.00448
7m/s	35.8628	29.1619	2.58312	26.4364	25.1953	1.09113
6m/s	36.9829	29.8405	2.82684	27.0827	25.4685	1.19943
5m/s	38.4064	30.7293	2.84206	27.9398	25.8327	1.33985
4m/s	40.0951	32.0489	3.5713	29.1347	26.3437	1.53023
3m/s	43.4064	34.0016	3.74426	30.9527	27.1295	1.80978
2m/s	51.2773	35.8389	4.74426	34.1102	28.5191	2.27146
1m/s	61.2148	41.8477	5.74426	38.543	31.1977	3.03692

可以看到当采用低功率工况的时候，由于生热量的降低，很低的风速也能达到比高功率工况高风速时更优的散热效果。要维持电池组平均温度和最高温度变化不太大，避免温度频繁升降带来的系统不稳定性，就需要设定不同工况下使用不同的风速。例如在若高功率工况下设置风速为 10m/s，其电池组最高温度，平均温度，温度标准差分别为 34.2388℃，27.7634℃，1.91061℃；相应地，可设置在低功率工况下风速设定为 2m/s，其电池组最高温度，平均温度，温度标准差分别为 34.1102℃，28.5191℃，2.27146℃。这样既能降低散热系统的能量消耗，又能使得电池组温度在不同功率下能维持稳定。

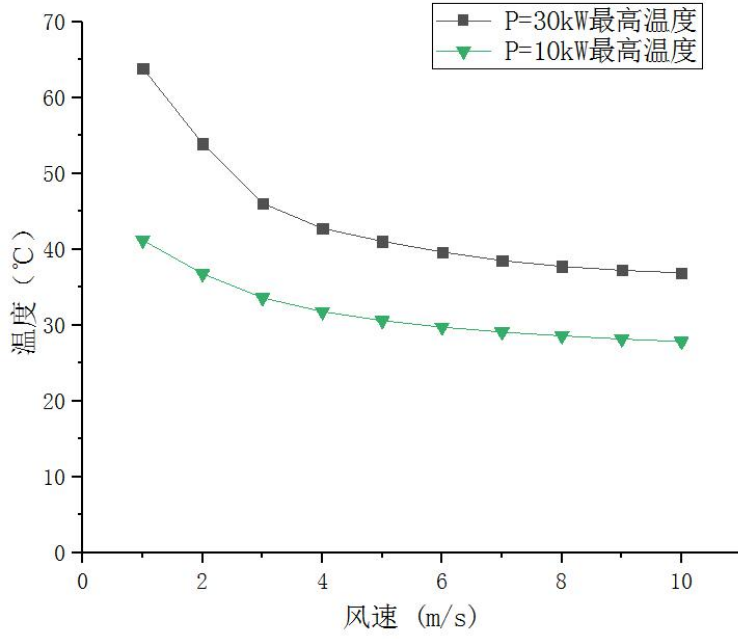


图 6-1 两种工况下最高温度随风速变化曲线

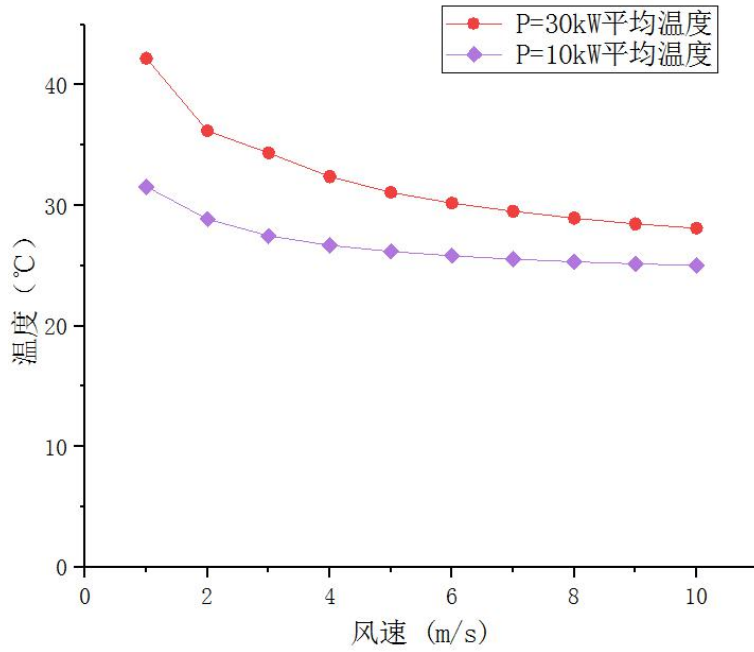


图 6-2 两种工况下平均温度随风速变化的曲线

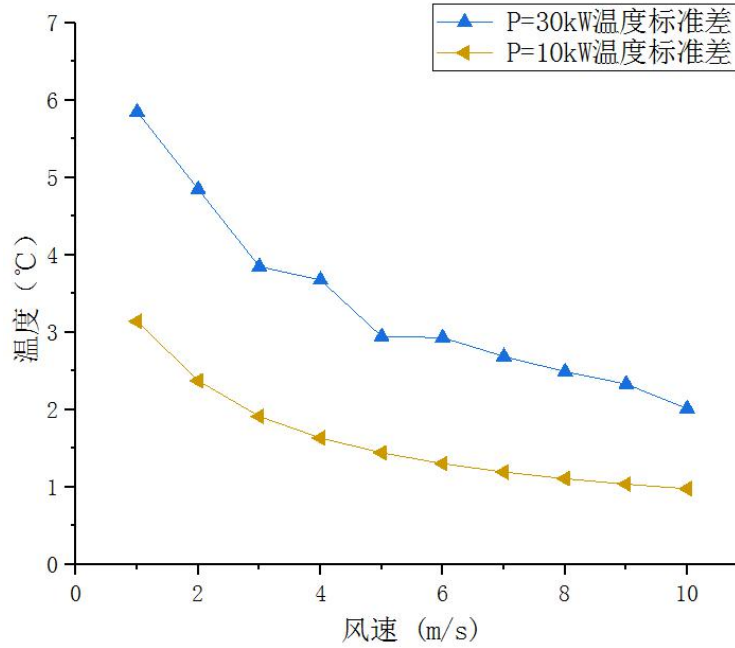


图 6-3 两种工况下温度标准差随风速变化的曲线

6.3 模糊 PID 控制方法

由于受到外界温度，冷却机冷却效果，电池组本身的性能等因素的不确定性和渐变性，直接设定 30kW 的高功率工况使用 10m/s 的风速，10kW 的低功率工况使用 2m/s 的风速是远远不够的，还需要设定一个反馈控制器，来对风速进行微调。使用温度传感器，对温度进行监控，通过温度值的反馈，来控制风扇的转速，从而达到反馈控制的目的，根据控制算法不同来区分，例如 PID 控制(比例-积分-微分控制)是一种广泛应用于工业过程中的一种控制方式，该控制方法有简单可靠、容易实现、静态性能好等优点。但是其也有一定局限性，如容易超调、控温时间长，不能适应过程中的未知性。

而模糊 (Fuzzy) 控制是一种以电脑模拟人脑思维，从而对系统进行控制的控制方法，不需要被控对象的数学模型，只是运用工作人员的经验来制定规则体系。对外界干扰有很好的抗性。而且自身有很强的鲁棒性，因此在系统被控对象的参数改变时，仍然能有较好的控制效果，且能够对本身具有不确定性和强非线性的被控对象进行控制，在具有复杂性，不确定性，时滞性的系统中优势明显。

因为风扇对各个电池包进行散热需要一定的时间，有惯性大，时滞性，所以单独使用 PID 法并不适合。且如图 6-1,6-2,6-3 所示，风速与散热效果的你和曲线虽然接近于线性，但是明显随着风速的增加，优化效果越来越差，曲线越来越平，所以并不是线性。

这里采用一种模糊 PID 控制方法。这是一种将 PID 控制方法与模糊控制理论相结合的控制方法。

这两种控制方法相结合是一种很常见的控制组合。其组合方式主要有两种。

当偏差较大时,采用模糊控制法,相应快,适应力强,并且动态性能好,当偏差较小时,采用 PID 能满足更高精度要求的 PID 控制。

模糊自适应 PID 控制器:使用模糊控制思想,根据实际情况,利用模糊控制的原理通过计算机的辅助调整 PID 控制中各个参数的取值,以达到控制目标。

采用第二种模糊自适应 PID 控制,其优点有相比 PID 控制器超调量小,反应快,抗干扰性好,鲁棒性出色;并且相比传统模糊控制提高了稳态的稳定度^[54]。

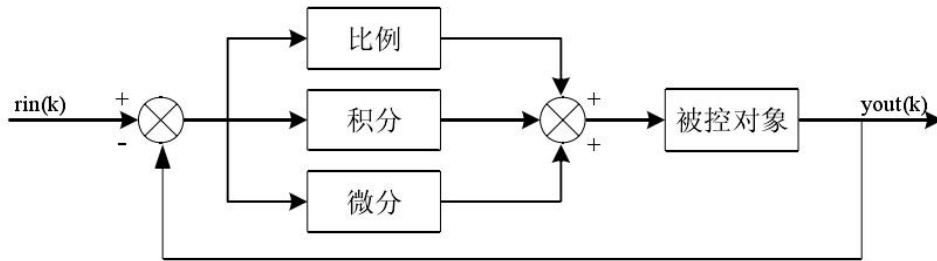


图 6-4 PID 控制原理框图

传统的 PID 控制器的控制原理如图 6-4,它根据给定的目标值 $r(t)$ 和实际输出值 $y(t)$ 之间的偏差:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (6-6)$$

再将偏差的比例 (P), 积分 (I), 微分 (D) 通过线性组合以搭建控制规律对被控对象进行控制, 其控制规律为

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (6-7)$$

写成传递函数形式

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_D s \right) \quad (6-8)$$

式中 K_p 为 PID 控制中的比例 (P) 系数, T_i 为 PID 控制中的积分时间 (I) 常数, T_D 为 PID 控制中的微分时间 (D) 常数。

同时,在通过温度反馈控制风速的系统中,可以将连续的偏差量变为离散的偏差量并使用增量式 PID 控制算法,

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (6-9)$$

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = (K_p + K_I + K_D)e(k) - (K_p + 2K_D)e(k-1) + K_D e(k-2) \quad (6-10)$$

式中 T —采样周期;

$$K_I = \frac{K_p T}{T_i}, \quad K_D = \frac{K_p T_D}{T}。$$

对于 PID 控制器,各校正环节有如下作用:

(1) 比例环节

即控制器的输出与误差值 $e(t)$ 成比例,控制器的输出与误差的产生没有延迟。 K_p 值越大,相应速度越快,精度越高,但是过大的 K_p 值会带来超调现象。

(2) 积分环节

即控制器的输出与误差值 $e(t)$ 的积分成比例,积分环节可以消除系统的静态误差,积分作用的强弱取决于积分时间常数 T_i 。

(3) 微分环节

即控制器的输出与误差值 $e(t)$ 的微分成比例,PID 控制中的微分环节能预测误差的变化趋势,避免系统超调,并且能改善系统动态性能。

表 6-2 PID 参数整定规则

	上升时间	超调量	稳定性
增加 K_p	快	增加	变差
增加 T_D	慢	减少	改善
增加 $1/T_i$	快	增加	变差

针对自适应模糊 PID 控制,如图 6-5 为原理图。即根据系统的 e 和偏差导数 e_c 值的大小,对 PID 的三个控制参数使用模糊控制理论进行调整 [55]。

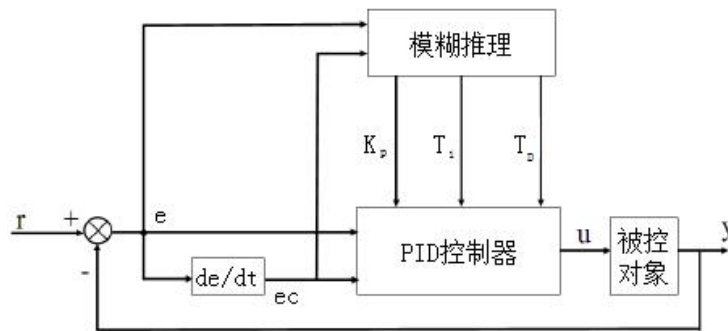


图 6-5 模糊 PID 系统控制原理图

6.4 构建模糊 PID 控制系统

设计的温度控制系统目标是将电池系统平均温度控制在 35°C 以内并且保持温度稳定。首先要根据测定温度点的温度反馈估算得到系统温度的平均值。取如图 5-2 所示第三个电池包前方电池包为温度测量点,根据之前的仿真,此点在各个风速下都最接近电池组的平均温度;设定 2°C 的余量,则设定该测定点的给定值 $r(t)$ 为 33°C 。

6.4.1 积分分离阈值设定

在本反馈控制系统中,PID 控制可以有效消除系统静差、提高控制精度。但是在启动,停止,对设定值进行调节时,容易因为 PID 控制中的积分环节带来系统震荡和较大的超调。为了保持积分变量,又消除超调量。采用积分环节分离[56],即设定一个

阈值 ε :

当偏差量 $|e(k)| > \varepsilon$ 时, 即实际值与设定值偏差较大时, 积分环节分离, 采用 PD 控制, 在保证系统较快响应的同时, 避免过大超调。

当偏差量 $|e(k)| < \varepsilon$ 时, 即实际值与设定值偏差较小时, 采用普通 PID 控制, 保证系统控制精度。

另外, 当 $|e(k)| < \varepsilon$ 时, 设定另外一个阈值 δ , 使得 $\delta < \varepsilon$, 当并在 $\delta < |e(k)| < \varepsilon$ 区域和 $|e(k)| < \delta$ 区域分别使用不同的 PID 控制参数, 使得在不同的偏差条件下, PID 参数能够有合适的调整速度, 避免超调量, 增加控制精度。

因为电池的极限工作温度在 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$, 即电池应该在 60°C 以下的条件下工作, 设定 15°C 的余量, 到了 45°C , 就应该取用积分分离的控制方法, 使风速调节速度变快。因为 $r(t) = 33^\circ\text{C}$, 则 $\varepsilon = 45 - 33 = 12^\circ\text{C}$ 。另取 δ 为 6°C 。

6.4.2 整定规则制定

利用模糊规则对 K_p , K_I 和 K_D 取值探讨。参照表 6-3, 由于 K_I , K_D 和 T_D , $1/T_I$ 存在一定关系, 所以, 在设定其取值的时候应考虑不同偏差范围时的上升速度, 超调量和稳定性。

引入模糊 PID 控制后, PID 参数模糊控制算法如下式所示:

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{j=0}^k e(k) + K_D e_c(k) \quad (6-11)$$

$e(k)$ 和 $e_c(k)$ 为偏差值和偏差变化率。为了增强不同工况和环境下的控制适应能力和控制精度, 利用模糊 Fuzzy 几何理论, 建立参数 K_p , K_I , K_D 和 $|e|$ 与 $|e_c|$ 之间的函数关系。此时引入两个阈值 ε 和 δ 。有如下关系:

在系统阶跃相应曲线图 6-6, 使得当 $|e| > \varepsilon$ 时, 如图中 I 段, 应取 K_p 较大, K_I 较小, $K_D = 0$, 使得避免超调的前提下, 系统调节速度足够快; 当 $\varepsilon \geq |e| > \delta$ 时, 如图中 II 段, K_p 取值小点, 避免较大超调量, K_I 取值适当, K_D 对系统影响比较明显; 得当 $\varepsilon \geq |e|$ 时, 位于图像中 III 段, K_p 和 K_I 取值适当大一点, 使得稳定性较好, K_D 取合适值避免调节过程中出现震荡现象。

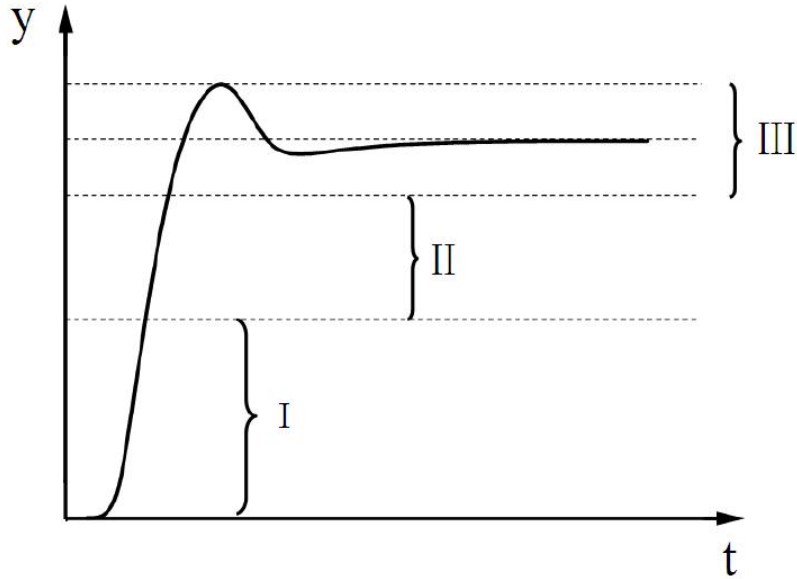


图 6-6 被控系统阶跃相应图像

则有表 6-3

表 6-3 PID 参数取值规律

	K_p	K_I	K_D
$ e > 12^\circ\text{C}$	大	0	小
$12 \geq e > 6$	小	适当	适当
$ e \leq 6$	大	大	适当

利用模糊理论推理出各个工况和环境下的 PID 控制器的参数以后，就能建立起自适应模糊 PID 控制系统，其原理图如下图所示：

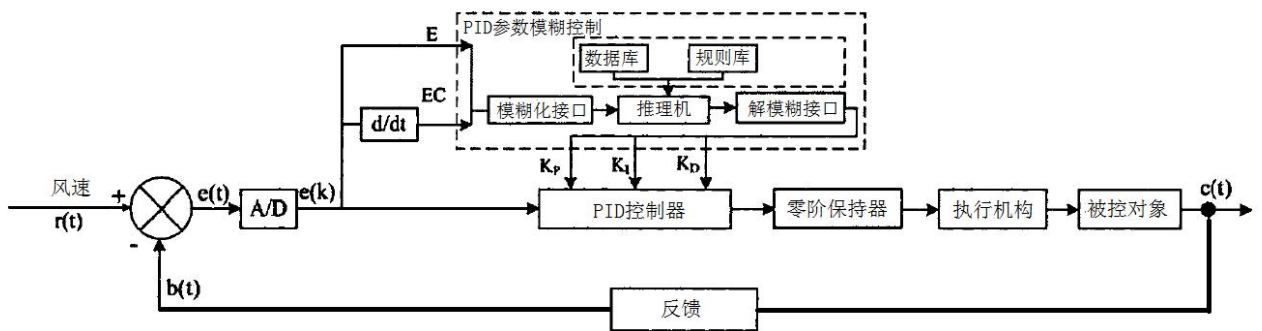


图 6-7 PID 参数模糊化控制系统

风速控制分步骤为：

(一) 判定此时工况，若此时为 30kW 工况，以风扇风速为 10m/s 的模式启动；若 10kW 工况，以风扇风速为 2m/s 的模式启动。

(二) 启用模糊 PID 控制对风扇风速根据温度的测定值进行调整。检测其温度和给定值之间的偏差值 e 。并根据 e 值落在 $|e| > 12^\circ\text{C}$ ， $12 \geq |e| > 6$ 和 $|e| \leq 6$ 中的哪个区域里，

再经过 PID 参数的模糊控制得到 K_p , K_I , K_D , 代入 PID 控制器, 对系统根据温度反馈值进行反馈控制风扇风速的转速。

6.5 本章小结

分析了不同工况风速与温度的曲线, 为了维持温度恒定, 需根据工况和温度与设定值的偏差值反馈进行风扇风速调定。本章通过对比两工况温度曲线, 得出在功率为 30kW 时风速设定为 10m/s 左右, 功率为 10kW 时风速设定为 2m/s 左右, 能够维持系统平均温度 28°C 左右, 最高温度 34°C 左右。而具体风速则根据模糊 PID 控制方法调整。

结论与展望

首先，分析磷酸铁锂电池的生热原理和空气散热的热传导原理，确定生热量并阐述风冷散热的可行性；再根据需要改造挖掘机需要的工作电压，功率，容量等参数从电芯，单体电池，电池组三个层次对其电池组系统进行设计；设计散热系统，用 solidworks 建模，Icepak 进行仿真，分析其生热模型和改进方式，尝试从改变角度、距离、间隙和增加滤板等方式进行优化，通过仿真的方式来分析其优化效果和确定优化值。并提出用模糊 PID 控制电池组温度恒定，详细内容如下：

1、根据挖掘机的额定工作电压、功率和单次充电可工作时间等参数，选定单体电池，并分析串并联方式，通过串并联建立该电动挖掘机的电池组。

2、建立空气冷却系统，进行热力学计算，计算生热量和传热速率。

3、通过 Icepak 仿真结合理论分析，证明了结构优化对于空气散热系统散热效果的优化作用。

4、创新性的提出了增加滤板方案，并初步讨论开孔率和安装位置对其的影响，证明其对风冷散热效果的显著的优化效果。提出按照散热效果划分滤板区域，并采用变开孔率的开孔率设置方案，即对应的区域电池温度高，散热差则开孔率增加；区域电池温度低，散热好则开孔率降低。这种方法的最高温度，平均温度，温度标准差比扩散距离优化方法的最高温度，平均温度，温度标准差分别低了 14.8151°C ， 2.3752°C ， 1.06016°C ；比单一开孔率滤板（开孔率 $\Phi=0.1$ ）降低了 2.6447°C ， 0.3502°C ， 0.10219°C 。优化效果十分明显。

5、在验证散热系统可以满足高功率工况下的散热的基础上，提出使用模糊 PID 控制器风速。功率为 30kW 的工况使用 10m/s 的风速，功率为 10kW 的工况使用 2m/s 风速，且根据温度反馈，自行控制风速微调。

其中，仿真和散热结构优化是本文的重点。结果表明结构优化后和增加滤板对于风冷散热的优化效果明显，而且滤板的开孔率设置为变开孔率比单一开孔率效果更加明显。为电池组散热提供了有用的参考。然而，本篇论文也有一些不足和局限处，有待后续研究者继续研究。

其一，在距离选取和开孔率选取时均使用的选取特征值，仿真对比的方式得到的最优值。希望能提出一种计算方法，直接由计算确定出最优值；

其二，滤板的变开孔率方案可行性很强，但是滤板区域划分不够细致，可以尽量将滤板开孔率进一步细分，并找到确定其最优开孔率的方法。

其三，本文先讨论了最大功率下散热能否满足，在能满足的条件下又设计反馈控制系统，使得不同的温度使用不同的风速，然而实际情况下，工况是十分复杂的，而

不是一直维持在一个功率下，研究散热应该实际工况结合起来，结合挖掘机的工作时序图来进行散热的相应时间，温度特性研究。

致 谢

时光飞逝，3 年的硕士时光如白驹过隙，转眼就已经快要毕业。在这三年的时间里，我收获了一段宝贵的人生经历。感谢陪伴我这三年的老师和同学们，有你们的陪伴，我这三年的时光才变得绚丽多彩，有你们的帮助，我才能够攻克一个又一个难关，完成这篇毕业论文，顺利毕业。

本论文是在于兰英老师的悉心指导下完成的。论文每一阶段的工作都倾注了老师的心血和汗水。我会永远记住老师一字一句给我讲解论文中存在问题，一遍又一遍的提醒我需要完成的任务。于老师细心、严谨、和善的品质给我留下了深刻的印象，没有于老师的教导，我也不会顺利完成论文，而于老师优秀的品质也成为我今后学习生活的榜样。

同时感谢实验室的柯坚老师、王国志老师、邓斌老师、刘桓龙老师、秦剑老师、吴文海老师在学习和生活中所提供的指导和帮助。

也要感谢一起生活了三年的实验室小伙伴们，王彬、郑忠、付虹、邓慧心、王斌汉、王奇、陈建强、王文、王宇强、李波、陈武、党帅涛、唐田以及博士师兄杨帆，有了你们的陪伴，这三年的生活才能如此多彩，留下这么多美好的回忆。

感谢我的父母，感谢你们对我无私的奉献和关爱，你们的支持和关心是我失落时的依靠，不仅能给我心灵上的慰藉和温暖，也是我坚持奋斗、不断前行的不竭动力。

最后，衷心感谢在百忙中审阅本文的老师，感谢各位老师提出的宝贵意见和建议！

陈俊宇

2018 年 5 月于西南交通大学

参考文献

- [1] 肖清. 液压挖掘机混合动力系统的控制策略与参数匹配研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [2] KAGOSHIMA M, KOMIYAMA M, NANJO T, et al. Development of new hybrid excavator[J].Kobelco Technology Review, 2007 (27): 39-42.
- [3] 张栋. 基于功率匹配的挖掘机节能技术的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [4] 孙延伟. 液压挖掘机节能控制系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [5] 林添良. 混合动力液压挖掘机势能回收系统的基础研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2011.
- [6] Tianliang Lin, Qingfeng Wang, Baozan Hu, Wen Gong, Development of hybrid powered hydraulic construction machinery[J]. Automation in Construction, 19 (2010) : 11-19.
- [7] Masayuki KAGOSHIMA, Masayuki KOMIYAMA, Takao NANJO. Development of New Hybrid Excavator[J]. KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW No. 27 NOV 2007.
- [8] 代鑫, 张承宁, 梁新成. 混合动力液压挖掘机能量回收系统仿真研究[J]. 北京工商大学学报(自然科学版)[J], 2010, 1 (28) : 43-47
- [9] 张骥. 电动挖掘机动力与传动系统设计及仿真[D]. 青岛大学, 2015.
- [10] Statistical Review of World Energy 2012 [EB/OL]. www.bp.com. 2012.06
- [11] Amjad S., Neelakrishnan S., Rudramoorthy R. Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles[J], Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3):1104-1110.
- [12] Ross Morrow W., Gallagher K.S., Collantes G., et al. Analysis of policies to reduce oil consumption and greenhouse-gas emissions from the US transportation sector[J]. Energy Policy, 2010, 38(3):1305-1320
- [13] Nishihara M. Hybrid or electric vehicles? A real options perspective[J]. Operations Research Letters, 2010 38(2):87-93. Avadikyan A., Lerena P. A real options reasoning approach to hybrid vehicle investments[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2010, 77(4):649-661.
- [14] 胡骅, 宋慧. 电动汽车[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003:10-13
- [15] 睦艳辉, 王文, 夏宝佳, 等. 混合动力汽车镍氢电池组通风结构优化分析[J]. 汽车工程, 2010 (3): 203-208
- [16] 李春卉. 电动汽车的发展现状及趋势研究[J]. 汽车工业研究, 2005(05):44-46.
- [17] 久陵. 从特斯拉电动车看中国新能源汽车[J]. 汽车与配件, 2013 (23) : 11-13.
- [18] 刘宏龙, 张文谦. 特立独行的特斯拉[J]. 时代汽车, 2013 (4) : 93-96
- [19] 李伟雄, 黄宗益. 挖掘机的发展动态[J]. 工程机械, 2012, 42(11): 52-55.

- [20] 朱大可, 奚汉章, 李建军. 露天电动挖掘机及其电控系统的发展历程[J]. 矿业装备, 2011, (3):54-56.
- [21] 康宝生. 从技改效能看电动液压挖掘机在隧道施工中的推广应用[J]. 2012 年中铁隧道集团低碳环保优质工程修建技术专题交流会论文集, 2012.
- [22] 朱小明. 我国液压行业技术创新策略研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2011.
- [23] 方佩敏. 新型磷酸铁锂动力电池[J]. 今日电子, 2007 (9): 95-98.
- [24] 唐任远, 安忠良, 赫荣富. 高效永磁电动机的现状与发展[J]. 电气技术, 2008 (9): 1-6.
- [25] J.Vettera,P.Novaka,M.R.Wagnerb,C.Veitb,et.Ageing mechanisms in lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources,2005,147:269-281.
- [26] 郑明森, 金明钢, 董全峰, 等. $LiMn_2O_4$ 在聚合物锂离子蓄电池中的高温性能[J]. 电源技术, 2003, 27:166-168.
- [27] 谢晓华, 解晶莹, 夏保佳. 锂离子电池低温充放电性能的研究[J]. 化学世界, 2008.10: 581-583.
- [28] 曾令杰. 锂离子电池 $LiFePO_4/C$ 正极材料低温性能研究:[D]. 上海: 上海交通大学化学化工学院, 2011.
- [29] Noboru Sato. Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric And hybrid vehicles[J]. Journal of Power Sources,2001,99:70-77.
- [30] 唐致远, 陈玉红等. 锂离子力电池安全性的研究[J]. 锂动力电池, 2006, 36(1):74-76.
- [31] 陈玉红, 唐致远, 卢星河, 等. 锂离子电池爆炸机理研究[J]. 化学进展, 2006, 18(6):823-831.
- [32] 车杜兰. 电动汽车锂离子电池包热特性研究与优化设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [33] 陈全世主编. 先进电动汽车技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [34] 王峰, 李茂德. 电池热效应分析[J]. 电源技术, 2010,34(3):288-291.
- [35] Michael R. Giuliano, Suresh G. Advani, Ajay K. Prasad. Thermal analysis and management of lithium - titanate batteries[J]. Journal of Power Sources, 2011,196:6517-6524.
- [36] 郭小强, 郝永辉, 徐瑞芬, 童书辉. 锂离子电池组耐大量级力学的结构设计和优化[J]. 电源技术, 2014,(05):822-825.
- [37] 师振中. 仿真分析在蓄电池组结构材料优化方面的应用[J]. 电源技术, 2015,(08):1632-1635.
- [38] 陈玉红, 唐致远, 卢星河 等. 锂离子电池爆炸机理研究[J]. 化学进展, 2006, 18(6):823-831.
- [39] 许超. 混合动力客车电池包散热系统研究:[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2010.
- [40] Noboru Saco. Thermal behavior analysis of lithium-ion batteries for electric And hybrid vehicles[J]. Journal of Power Sources,2001,99:70-77.
- [41] 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., 2005,3(22):119-123.
- [42] Bernadi D, Pawlikowski E, Newman J.T A general energy balance for battery system[J]. J Electrochem Soc, 1985, 132:5-12

- [43] 贾力, 方肇洪编著. 高等传热学[M]. 高等教育出版社, 2008.
- [44] 张冲. 电动汽车电池组散热的仿真研究与优化 [D]. 哈尔滨工业大学, 2014.
- [45] 尹中伟, 何磊. CFD 介绍及其在建筑通风中的应用[J]. 江西建材, 2015(10):5-6.
- [46] Gregory L.Plett, Martin J.Klein. Simulating Battery Packs Comprising Parallel Cell Modules and Series Cell Modules[C]. EVS24, Stavanger, 2009.
- [47] 李腾, 林成涛, 陈全世. 磷酸铁锂电池组成组过程的不一致性分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(7):1001-1006.
- [48] 王琳霞, 王涌, 郑荣鹏. 锂离子电芯一致性对电池组影响的研究[J]. 电源技术, 2012, 36(9):1282-1284.
- [49] 谢靖飞. 特斯拉电源管理系统和快速充电技术的研究综述[J]. 东莞理工学院学报, 2016(23): 83-84
- [50] 王震坡, 孙逢春. 电动汽车电池组连接可靠性及不一致性研究[J]. 车辆与动力技术, 2002(4):11-15.
- [51] 王福军. 流体机械旋转湍流计算模型研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(02):1-14.
- [52] 武宇, 易仕和, 陈植, 张庆虎, 冈敦殿. 超声速层流/湍流压缩拐角流动结构的实验研究[J]. 物理学报, 2013, 62(18):316-327.
- [53] 张志杰, 李茂德. 锂离子电池内阻变化对电池温升影响分析[J]. 电源技术, 2010, 34(02):128-130.
- [54] 陈岩. 模糊 PID 控制在温室环境中的应用[J]. 农机化研究, 2010, 8(2):23-25.
- [55] 栾义忠. 基于 FUZZYPID 的温度控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2006, 12(6):58-60.
- [56] 振垒. 基于超快速冷却的热轧带钢轧后冷却控制系统与策略研究[D]. 东北大学, 2014.
-
-

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1]陈俊宇, 于兰英, 王国志. 某车辆动力电池组风冷散热系统优化分析[J]. 电源技术.
- [2]于兰英, 陈俊宇, 王国志. 滤板在车辆电池组的风冷散热中的应用[J]. 电源技术.
- [3]陈俊宇, 于兰英. 某车辆动力风冷散热系统温度模糊 PID 控制系统方案设计[J]. 车用发动机.