

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.034

基于 CFD 热分析的动力电池包基础模组优化设计

马之辉¹, 李兵兵², 陈南^{1,2}

(1. 南京工业大学 浦江学院汽车工程学院, 江苏 南京 211134; 2. 东南大学 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要:以某型电动汽车在综合工况条件下续航里程需求为目标,基于 18650 单体锂离子电池设计一组 34 串 36 并的动力电池包。为实现对整体动力电池包热管理优化,对其中一个基础并联模组进行热管理分析,散热方式采用强制风冷并行通风;对 18650 单体电池进行内阻和发热实验,验证基础热源数据的精确性。以 Z 型电池模组强制散热系统为基础,对基础电池模组构型进行热仿真分析。依次改变汇流腔倾角和分流板高度,发现当汇流腔腔角为 7°、分流板高度为 9 mm 时散热效果最佳,此时并联模组的最高温度及最大温差可满足设计要求。这为动力电池包整体热管理系统完成了其基础模组的优化设计。

关键词:CFD 仿真;热管理系统;锂离子电池模组;强制风冷

中图分类号:TG156;TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)06-0168-06

Basic Module Optimization Design of Power Battery Pack Based on CFD Thermal Analysis

MA Zhihui¹, LI Bingbing², CHEN Nan^{1,2}

(1. Automotive Engineering Department of Pujiang Institute, Nanjing Tech University, Nanjing 211134, China;

2. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Designs a 34-string 36-parallel power pack based on 18650 single-cell lithium-ion batteries with a certain type of electric vehicle under certain comprehensive working conditions as the target range requirement. In order to optimize the overall power pack thermal management, one of the basic parallel modules is analyzed for thermal management, and forced air cooling parallel ventilation is used for heat dissipation. Internal resistance and heat generation experiments are conducted on the 18650 single cell battery to verify the accuracy of the basic heat source data. Based on the forced heat dissipation system of Z-type battery pack, the thermal simulation analysis of the basic battery pack configuration is conducted. It is found that the inclination angle of the sink cavity and the height of the manifold are changed in turn, and that the best heat dissipation effect is achieved when the angle of the sink cavity is 7° and the height of the manifold is 9 mm, at which time the maximum temperature and the maximum temperature difference of the parallel module can meet the design requirements, thus completing the optimized design of the basic module for an overall thermal management system for the power pack.

Keywords:CFD simulation;thermal management system;lithium-ion battery pack;forced air cooling

0 引言

中国新能源汽车产业在政策和市场的双重推动下,呈现迅猛发展之势^[1]。动力电池是新能源汽车中关键的部件之一,其制造成本约占整车成本的 40%,重要性不言而喻。然而电动汽车因不合理的电池包散热设计而时有着火现象发生。因此,改善动力电池包的热管理系统使其在适宜温度范围内运行、减少车辆自燃等风险是确保电动汽车在稳定的续航里程基础上安全运行的重要保障^[2]。

风冷式热管理系统具有结构简单、成本低、易于维护等特点,广泛应用于电池包热管理系统

中^[3]。这种系统是使用空气作为冷却介质。该系统分为自然对流和强制对流两种方式。自然对流通过利用温度差引起空气流动来带走电池产生的热量,但散热速度较慢;强制对流可以加快空气流动速度,提高散热效果,通常通过车速导风或使用风扇实现。

MUSTAFA^[4]使用 3 个电池组评估了电池组之间距离和入口尺寸对电池组温度、通道内压降和传热系数的影响。该研究表明,电池组之间的距离和入口尺寸对电池温度、通道内压降和传热系数等参数有显著影响。增加电池之间的距离可导致通道内压降增加,而增加入口尺寸则有助于

第一作者简介:马之辉(1999—),男,江苏盐城人,本科,研究方向为新能源汽车,mazhihuimy@163.com。

降低温度。IBRAHIM 等^[5]研究了4种不同的空气速度下,45个圆柱形锂离子电池单元排列成菱形,电池组中的压降随着空气速度的增加而增加,当出入口直径增加时,电池组最高温度和平均温度都增加,出口空气温度随着空气速度的增加而减少。ZHANG 等^[6]分析二次出口尺寸参数和挡板对于电池热管理系统冷却性能的影响,发现二次出风口数量为6时散热效果最佳,增加挡板可以进一步改善风量分布,提高冷却性能。与初始型电池热管理系统相比,最优模型的最高温度降低了4.95%,最大温差降低了91.89%。ZHANG 等^[7]在Z型和U型流动的风冷电池热管理系统的基础上,通过改变出口位置设计了几种不同流型的热管理系统,并使用数值模拟评估了它们的性能。研究表明,空气冷却热管理系统的流型对其冷却性能有显著影响。当出口位于电池模块的顶部并且出口的中心平面更靠近入口时,热管理系统具有更好的冷却性能。在该系统中,当入口风速达到5 m/s时,与Z型热管理系统流动模式相比,平均温度和最高温度降低了约3℃,同时大大提高了电池组的温度均匀性;与U型流型相比,平均温度和最高温度分别降低了约0.8℃和2.4℃。此外,随着入口风速的增加,热管理系统的流型对其冷却性能也会受到影响。

本文为满足某型电动汽车续航里程要求,设计了一个34串36并的电池包。设计过程分为两步:先实现一个由36个单体锂离子电池并联的基础模组热管理优化设计,再集成基础模组设计形成整体动力电池包。限于篇幅,本文主要讨论基础模组的热管理仿真优化设计。

整个系统运用强制风冷并行通风方式,进行了单体锂离子电池的电阻实验和温升实验,以保证锂离子电池热仿真基础数据的精确性。对基础模组的初步设计进行热仿真分析,发现它不能满足设计要求。为此改变基础模组箱汇流腔倾角度数和添加分流板进行仿真,对比最高温度和最大温差,获得可行的基础模组箱方案,完成电池包的基础模组的热优化设计。

1 电池包设计方案确定

1.1 电池包参数的确定

本文针对某综合工况条件下续航里程达到250 km的纯电动汽车的动力电池包进行设计,该电池包参数要求如表1所示,所选锂离子电池单

体参数如表2所示。

表1 某电动汽车动力电池包参数要求

序号	参数	技术要求
1	总能量/kWh	7.54
2	可用能量/kWh	≥6.7
3	SOC 运行窗口/%	≥80
4	动力电池标称电压/V	120
5	工作电压范围/V	96~144
6	持续放电功率/kW	≥9.5(30 min, 25℃)
7	工作温度范围/℃	-30~60
8	实验寿命	8年或20万 km

表2 锂离子电池单体参数

型号	材料	标称容量/mA	标称电压/V	电压范围/V	内阻数值/Ω
18650	钴酸锂	2 200	3.7	4.20~2.75	40.85

选用的18650锂离子电池标称电压3.7 V,为满足动力电池120 V标称电压的要求可通过串联电池单体实现,用串联单体数量 a 保证动力电池包总能量7.54 kWh的要求,可以用电池单体并联数量 b 保证,计算公式如下:

$$a = \frac{U}{U_0} = \frac{120}{3.7} \approx 33 \quad (1)$$

$$c_z = \frac{W}{U \cdot \eta} = \frac{7.54}{120 \times 0.8} \approx 79 \quad (2)$$

$$b = \frac{c_z}{c_0} = \frac{79}{2\ 200} \approx 36 \quad (3)$$

式中: U 为动力电池标称电压; U_0 为电池单体标称电压; W 为电机额定功率; η 为电池有效容量系数,取0.8; c_z 为系统总容量; c_0 为电池标称容量。

按需求选取电池单体串联数量为34,并联数量为36,选择先并联后串联的成组模式。这种组合方式BMS监控简单,成本低^[8]。

1.2 电池包冷却方式选择

考虑到风冷式热管理系统冷却系统结构简单、成本较低、易于维护等优点,而强制风冷散热效果优于自然对流冷却,故采用强制风冷散热方式,按照风道排列方法。强制风冷又被分成串行通风和并行通风,如图1所示。

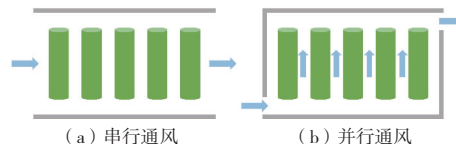


图1 风道排列类型

串行通风空间利用率高,但是散热不佳,并行通风的气流同时经过电池间的并行气道,使空气能较均匀的带走热量,使电池模组温度分布均匀。为了保证电池模组能有良好的散热,本文采用强制风冷并行通风散热系统。

1.3 电池包总体方案设计

由上文可知,本文需要集成的单体电池数量为1 224个,电池的基础模组数量为34个,并联了36个18650单体电池为一个基础模组,在整体动力电池箱里再串联排列34个并联的基础模组。基础模组都有自己的安装箱盒,因此需要先对基础模组进行热管理优化设计,以建立整体动力电池包热管理分析的基础。整个设计思路是:先选取基础模组进行建模与热仿真优化设计,使它的热管理系统满足设计要求,然后集成基础模组组成完整的动力电池包,完成整体动力电池包的散热设计。

针对基础模组,设计一种36并联电池模组箱,电池之间的间距为2mm,模组箱模型如图2所示。

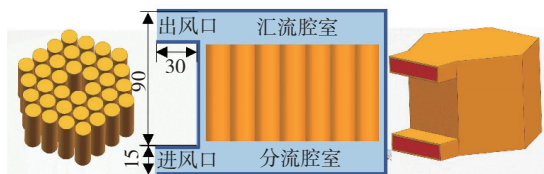


图2 电池模组箱建模过程

对整体动力电池包,将基础模组箱错位相排,错位相排的基础模组与相邻的基础模组之间各风口之间距离约66mm,如图3所示。考虑到送风成本,将电池包进、出风口设置在同一平面内,而且可以保证电池包风冷系统的密闭性,可以将后排基础模组进风口尺寸加66mm,使所有进出风口都在同一平面,最终电池模组排列如图4所示。对整体动力电池包进行初步设计,电池包厚为2mm,模型如图5所示。电池包尺寸为:长1 990mm,宽234mm,高224mm。

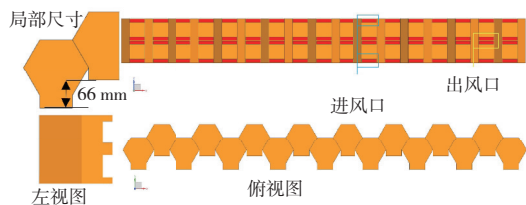


图3 电池模组排列三视图

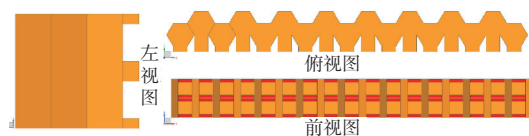


图4 电池模组最终排列三视图

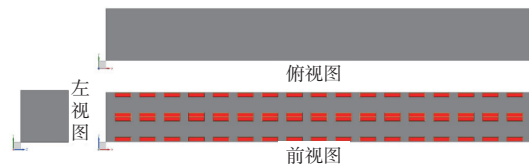


图5 整体动力电池包模型三视图

本文主要对一组并联模组组成的电池基础模组进行热管理系统设计,主要任务是使电池温度保持在 $10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ 的适宜工作范围,特别是要控制或者防止局部过热,使最大温差低于 5°C 。本文使用强制风冷散热、并行通风散热方法,以Z型风冷散热模组为基础进行设计。

2 电池单体的仿真分析与实验验证

2.1 电池内阻特性实验

实验主要研究单体锂离子电池内阻与电池荷电状态的关系,18650单体锂离子电池参数如表2所示。电池分别以2A、3A、4A和5A的电流进行恒流放电,之后进行脉冲放电,测量获取所需数据,整理得内阻特性,如图6所示。

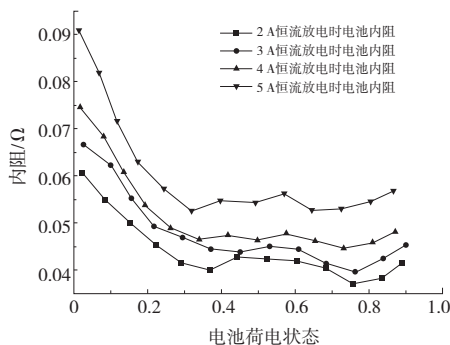


图6 不同恒流放电时电池内阻特性示意图

由图6可知:1)实验所得单体锂离子电池内阻随放电电流的增大而变大;2)单体锂离子电池的荷电状态数值处在 $0.3\sim 1.0$ 之间时,其内阻值发生的变化不是很大,但是在单体锂离子电池荷电状态值处在 $0\sim 0.3$ 之间时,电池放电内阻变化剧烈,向上变大的趋势非常明显,在电池进行5A恒流放电、电池的荷电状态值约为0.1时,电池的

放电总内阻几乎都已经超过 $90\text{ m}\Omega$ 。

2.2 锂离子单体参数获取

本文使用的锂离子电池热物性参数如表 3 所示。

表 3 电池各项热物性参数

密度/ (kg/m^3)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)		
		λ_r	λ_θ	λ_z
2 722	970	2.6	2.6	28.0

在计算电池工作时的生热速率时,选取了 BEMARDI 等所研究的模型,计算得电池的产热速率如表 4 所示。

表 4 不同放电倍率下电池产热速率

放电倍率 $\times C$	1.0	1.5	2.0	2.5
产热速率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)	27 815.75	50 688.63	79 538.17	114 364.39

2.3 电池单体热仿真与温升实验

测量 18650 电池实物模型,使用 UG 进行三维建模,使用 mesh 进行网格划分,导入 fluent,设置温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$,换热系数为 $5\text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,电池单体为热源,进行仿真,得到电池单体在不同放电倍率下放电结束后电池的温度情况。单体锂离子电池 CFD 仿真结果如图 7 所示。

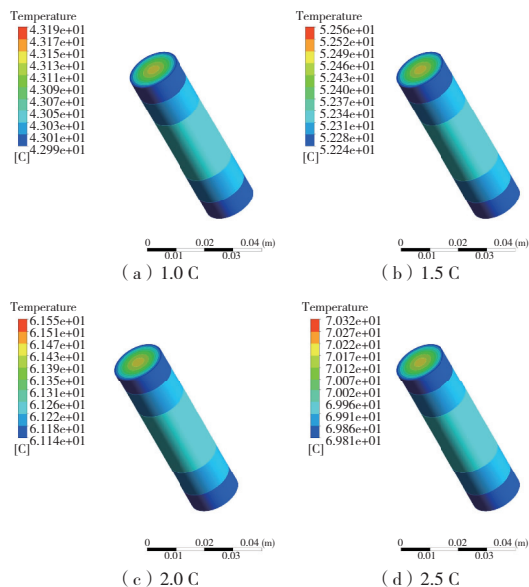


图 7 不同放电倍率下电池温度场分布云图

实验在高低温度箱中进行,设置温度与仿真温度相同,电池单体分别以 $1.0C$ 、 $1.5C$ 、 $2.0C$ 、 $2.5C$ 进行放电,进行数据采集。

根据实验结果,记录 4 种放电倍率下电池单体的温度数据,将 4 种实验数据与仿真数据拟合,数据拟合如图 8 所示。

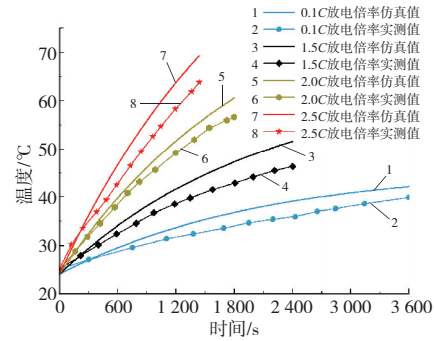


图 8 电池模拟温升与电池实验温升对比图

从图 8 中可以看出,电池温升随着放电倍率的增大而加快,电池放电倍率为 $2.5C$ 时温升最快,最终超过 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 。仿真曲线和实测曲线较接近,说明产热数据可靠性较高,模型精度满足工程要求,这对利用电池模型进行热力学仿真提供了扎实的基础。

3 电池模组热仿真及优化设计

3.1 电池模组热仿真分析

对前述电池模组箱进行 CFD 热仿真。对模型进行网格划分,导入 fluent 中设置电池参数(表 3),设置电池单体为热源,放电倍率为 $1.0C$,进风口速度为 5 m/s ,进风温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$,出风口压力为 0 Pa ,回流温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$,电池模组与空气组成流固耦合边界,进行计算仿真,最后导入 CFD-POST 中进行后处理,仿真结果的电池模组温度场云图和 $y-z$ 平面速度场云图如图 9 所示。观察可知,最高温度为 $32.38\text{ }^\circ\text{C}$,最大温差为 $5.64\text{ }^\circ\text{C}$,不能满足热管理系统的要求,因此需要进行优化设计

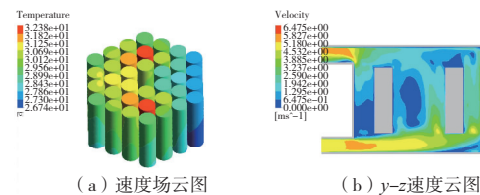


图 9 电池模组仿真结果

3.2 改变汇流腔室倾角

对基础模组箱内部结构进行改进,在保持出风口不变,改变汇流腔角度,使其与水平方向形成一个夹角 α ,如图 10 所示。考虑到电池模组箱不

能与电池模组接触, α 最大不能超过 7.3° 。因此, 设计 7 个度数进行实验, 分别是 1° 、 2° 、 3° 、 4° 、 5° 、 6° 、 7° , 包括原始模型在内的 8 种电池组模型放电, 结束时的最高温度 $T_{\max}$ 和最大温差 $\Delta T_{\max}$ 的仿真结果, 如图 11 所示。当汇流腔倾角为 7° 时的温度场和速度场云图如图 12 所示。

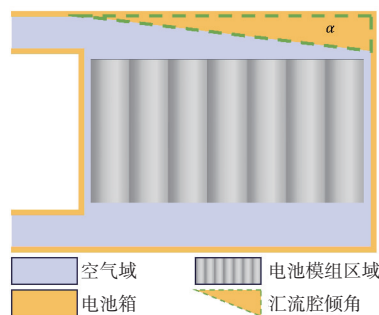


图 10 汇流腔角度变化模型简图

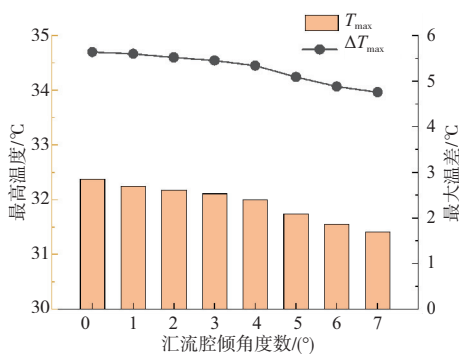


图 11 不同汇流腔倾角的电池模组仿真结果

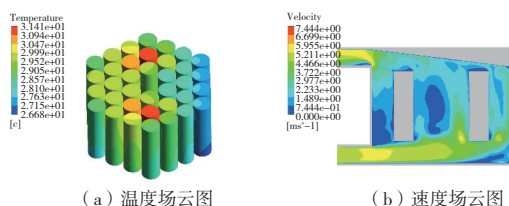


图 12 汇流腔倾角为 7° 时电池模组温度场和速度场分布云图

当倾角增大时, 出风口的风速逐渐增大, 主要原因是电池基础模组箱整体结构和仿真时的边界条件不变, 但是由于倾角变大, 使得基础模组箱内部体积减小, 且空气进入的速度不变, 导致出口速度加快, 从而加快了电池组的散热。因此, 当倾角变大时, 电池最大温度减低, 最低温度几乎不变, 保持在 26.6°C , 而最大温度由 32.38°C 降低到 31.41°C 。因此, 选择汇流腔倾角为 7° 时的基础模组箱进行优化设计。

3.3 添加分流板并改变其高度

观察上述电池组温度场云图, 发现温度集中在两个电池上, 这两个电池对称分布在电池模组的中间部分, 可见此区域的散热较差。于是, 在电池模组箱模型添加分流板, 使气流在流动过程中能经过此区域, 分流板布置在最高温度两个电池后方, 距离进风口 114 mm , 分流板顶部距离电池底部 1 mm 。设分流板底部距离基础模组箱底部为 H , 分流板位置如图 13 分流板位置简图所示。设 H 分别为 0 mm 、 3 mm 、 6 mm 、 9 mm 、 12 mm 、 15 mm 和 18 mm , 进行仿真。

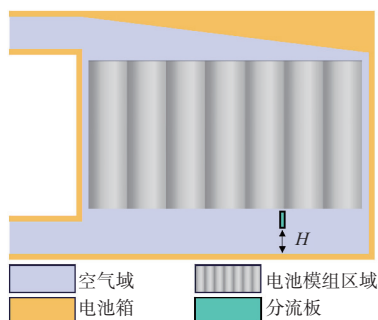


图 13 分流板位置简图

对不同汇流板高度的基础组模型仿真结果进行对比分析, 包括原始模型在内的 8 种电池组模型放电结束时的 $T_{\max}$ 和 $\Delta T_{\max}$, 如图 14 所示。分流板为 0 mm 、 9 mm 和 18 mm 的温度场云图和 $y-z$ 平面速度场云图如图 15 所示。

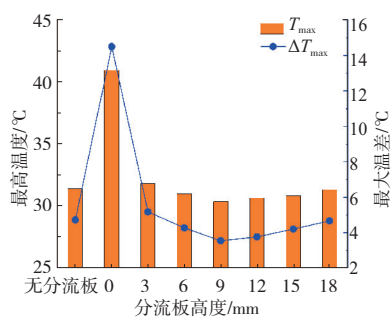


图 14 不同分流板高度的电池模组仿真结果

由图 14 可知, 当分流板高度为 0 mm 时, 最大温度和最大温差都是最大; 当分流板高度为 $3\sim 9\text{ mm}$ 时最大温度和最大温差逐渐降低; 当分流板高度为 $9\sim 18\text{ mm}$ 时, 最大温度和最高温差逐渐变大; 当为 18 mm 时, 最大温度与最大温差与无分流板时几乎一样。

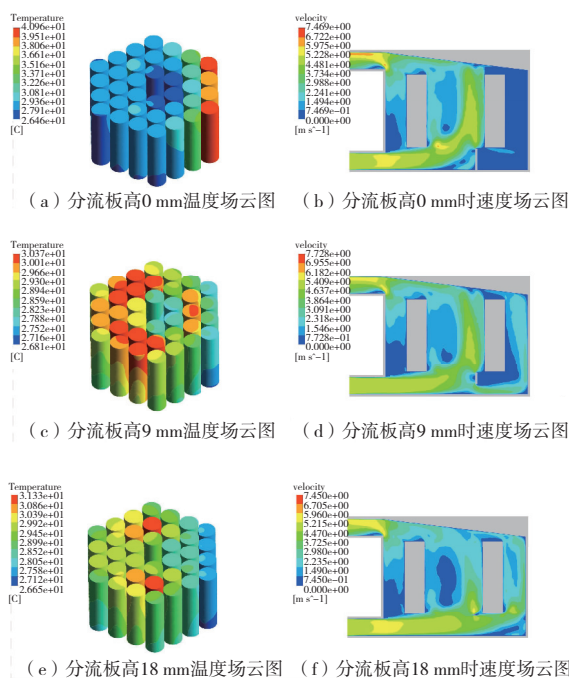


图15 不同分流板高度基础模组温度场和速度场分布云图

观察图15可知,此时分流板底部与基础模组箱底部接触,空气从进风口快速进入,到达分流板后,直接从分流板前方向上流动,大部分空气经过分流板前方电池模组,到达汇流腔,最后从出风口离开基础模组箱,只有很少部分空气会到分流板后方的电池模组。这导致后方的电池模组散热不良,分流板前的电池模组温度远低于分流板后的电池模组。这一现象表明在此位置加分流板可以使分流板前方电池散热效果更好,即使上一节高温区域散热更好;当分流板高度逐渐增加时,位于分流板后方的电池温度逐渐变低,此时进风口的空气进入时气流会有两个主通道离开分流腔,一部分到达分流板之后沿分流板向上经过电池模组,到达汇流腔后,从出风口离开箱体,达到散热的目的;另一部分没有被分流板阻挡,气流能够到达分流板后方,之后流到基础模组箱后端,沿箱体壁面和电池模组向汇流腔流动,最后从出风口离开基础模组,达到散热的目的。当分流板高度为9 mm时,电池模组的最高温度为30.37℃,最大温差为3.56℃,与上一节最佳方案相比,最大温度下降了3.3%,最大温差下降了24.7%。可见通过分流板改变空气流动而改善基础模组散热效果是有效的。当分流板高度逐渐增加到12 mm时,基础模组的最高温度和最大温差相比较9 mm高分流板的时候逐渐变大。观察云图可知,当分流板高度达到12 mm时,汇流腔内被分流板分流的

空气比9 mm时少,使得分流板前方电池模组散热效果下降;当分流板高度为15 mm和18 mm时,分流腔中已经没有分流板了,所以散热效果逐渐接近无分流板状态。由此可见,当分流板高度为9 mm时散热效果最佳,达到设计要求。

在第一节中,有一部分基础模组箱需要加长进出风口,使用优化后的模型进行加长,其仿真结果如图16所示,最高温度30.55℃,最大温度差3.82℃,满足设计要求。

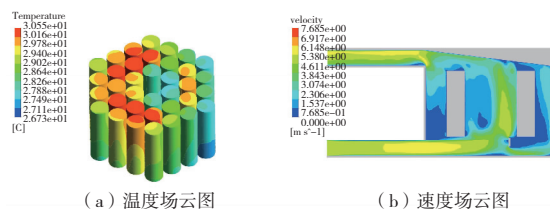


图16 加长进出风口模型仿真结果

综上所述,基础模组的热性能满足要求,这为整个动力电池包的热管理设计打下了必要的基础。

4 结语

1) 选取某型电动汽车为研究对象,为满足其续航要求,基于18650单体锂离子电池设计了34串36并的电池包,使用强制风冷并行通风的散热方式。

2) 对单体锂离子电池进行内阻实验。结果表明:当放电电流增大时,电池单体内阻增大;对单体锂离子进行仿真模拟温升与温升实验对比发现,电池放电倍率越大,温升越快,实验结果和仿真结果接近,模型精度满足工程要求。

3) 对基础模组进行汇流腔倾角优化,发现汇流腔倾角为7°时,模型散热效果最好;添加分流板并改变其高度,当分流板高度为9 mm时散热效果最好,满足设计要求,即电池包热管理系统满足要求。

参考文献:

- [1] 邱彬,王芳.2023年中国汽车行业发展趋势展望[J]. 汽车工业研究,2023(1):2-9.
- [2] 张利. 新能源汽车动力电池热管理系统优化[J]. 汽车与新动力,2023,6(1):40-42.
- [3] 杨永贵. 电动车动力锂电池系统强制风冷散热特性研究[J]. 内燃机与配件,2022(6):191-193.
- [4] MUSTAFA J. Numerical investigation of the effect of inlet dimensions air duct and distance of battery packs for thermal management of three lithium-ion battery packs[J]. Journal of Energy Storage,2022,48:1039059.

(下转第179页)

分析表3中的实验数据可知,所提算法的图像分类丢失比例未随着样本数量的增加而增加,在测试中,最大丢失比例为0.04%,而文献算法的丢失比例均随着样本数量的增加而增大。文献[3]算法的最大丢失比例为0.21%,最小值为0.04%;文献[4]算法的最大丢失比例为0.34%,最小值为0.08%。三者相比,文献算法的最小丢失比例与所提算法的最大值相等,而随着样本数量的增加,丢失比例相差越大,最高分别差0.20个百分点和0.33个百分点。因此,说明所提算法有效降低了机械零件图像分类丢失比例。

3 结语

针对传统机械零件图像分类算法存在的一系列问题,本文对基于双目加权模型的机械零件图像分类算法进行了研究。其创新之处在于利用双目加权模型抑制机械零件图像融合系数波动,通过前向传播可以完成输入特征提取和分类。实验结果表明,所提算法能够有效降低分类偏差和分类复杂度,同时减少机械零件图像分类丢失比例。但是,由于时间以及环境等因素的限制,所提算法仍然存在一定的弊端,后续将对其改进,提升整个算法的综合性能。

参考文献:

- [1] 梁承权. 电子器件测试设备信息远程监控方法仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(7): 134-138.
- [2] 鲍文霞, 阎少梅, 梁栋, 等. 基于椭圆-双曲线马氏度量的图像分类算法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(2): 456-462.
- [3] 李鸣, 张鸿. 基于卷积神经网络迭代优化的图像分类算法[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(1): 198-202, 214.
- [4] 王鑫, 李可, 徐明君, 等. 改进的基于深度学习的遥感图像分类算法[J]. 计算机应用, 2019, 39(2): 382-387.
- [5] 史静, 朱虹. 多特征融合的场景图像分类算法[J]. 计

算机系统应用, 2018, 27(5): 171-175.

- [6] 刘启超, 肖亮, 刘芳, 等. SSCDenseNet: 一种空-谱卷积稠密网络的高光谱图像分类算法[J]. 电子学报, 2020, 48(4): 751-762.
- [7] 许开炜, 杨学志, 艾加秋, 等. 点特征相似与卷积神经网络相结合的 SAR 图像分类算法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2019, 35(3): 28-36.
- [8] 杨红红, 曲仕茹, 金红霞. 基于包级空间多示例稀疏表示的图像分类算法[J]. 西北工业大学学报, 2017, 35(4): 690-697.
- [9] 赵浩如, 张永, 刘国柱. 基于 RPN 与 B-CNN 的细粒度图像分类算法研究[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(3): 210-213, 264.
- [10] 齐永锋, 李发勇. 基于局部保留降维卷积神经网络的高光谱图像分类算法[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 136-143.
- [11] 毕晓君, 周泽宇. 基于双通道 GAN 的高光谱图像分类算法[J]. 光学学报, 2019, 39(10): 297-308.
- [12] 姜代红, 张三友, 刘其开. 基于特征重标定生成对抗网络的图像分类算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(3): 932-935.
- [13] 马晓丽, 陆键. 基于灰度分析的路面裂缝图像分类算法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(5): 748-752, 756.
- [14] 王燕, 曹建芳, 李艳飞. 融合混合优化组合的大规模场景图像分类算法[J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(9): 86-91.
- [15] 宋海峰, 陈广胜, 景维鹏, 等. 基于(2D)~2PCA 的受限玻尔兹曼机图像分类算法及其并行化实现[J]. 应用科学学报, 2018, 36(3): 495-503.
- [16] 吴蓉, 赵敏, 孙通, 等. 基于深度卷积神经网络的 γ 光子图像分类识别研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(5): 139-141.
- [17] 洪庆, 宋乔, 杨晨涛, 等. 基于智能视觉的机械零件图像分割技术[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49(5): 203-206.

收稿日期: 2022-11-02

(上接第 173 页)

- [5] IBRAHIM M, SAEED T, EL-SHORBAGY M A, et al. RETRACTED: study of pressure drop and heat transfer in cooling of lithium-ion battery with rhombic arrangement with two different outlets and different inlet dimensions [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 50: 104255.
- [6] ZHANG F R, LIU P W, HE Y X, et al. Cooling performance optimization of air cooling lithium-ion battery thermal management system based on multiple

secondary outlets and baffle [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 52: 104678.

- [7] ZHANG S B, HE X, LONG N C, et al. Improving the air-cooling performance for lithium-ion battery packs by changing the air flow pattern [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 221: 119825.
- [8] 李兵兵. 某型电动汽车动力电池包的设计与分析[D]. 南京: 东南大学, 2020.

收稿日期: 2023-05-04