

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201653

储能锂离子电池包强制风冷系统热仿真分析与优化

吕超¹, 张爽¹, 朱世怀¹, 宋彦孔², 葛亚明³

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学(深圳)机电工程与自动化学院, 广东 深圳 518055; 3. 哈尔滨工业大学(深圳)实验与创新实践教育中心, 广东 深圳 518055)

摘要: 基于电化学-热耦合模型借助 ANSYS Fluent 平台对储能系统中的锂离子电池包进行仿真分析与结构优化。首先建立电池的热仿真模型, 基于该模型利用 ANSYS Fluent 仿真软件得到电池单体温度分布, 并通过与实验测量的结果对比验证所建立的仿真模型的准确性。接着进行了电池包风冷系统的仿真分析, 完成了对电池包温度分布和风道流速分布的求解。最后通过改变出风孔数量和风扇挡板形状改善了冷却系统的冷却效果。研究表明, 基于电化学-热耦合模型对储能电池包的温度与内部流速分布的分析是可行的, 对强制风冷系统的结构优化能够大幅度提高系统的散热性能, 实现更低的最高温度与更均匀的温度分布。

关键词: 锂离子电池; 热管理系统; 仿真分析; ANSYS Fluent

Thermal simulation analysis and optimization of forced air cooling system for energy storage lithium-ion battery pack

LÜ Chao¹, ZHANG Shuang¹, ZHU Shihuai¹, SONG Yankong², GE Yaming³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China; 3. Education Center of Experiments and Innovations, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

Abstract: This paper uses the ANSYS Fluent platform to perform simulation analysis and structural optimization of a lithium-ion battery pack in an energy storage system based on an electrochemical-thermal coupling model. First, a thermal simulation model of the battery is established. With it, the temperature distribution of the battery cell is obtained. The accuracy of the established simulation model is verified by comparison with the experimental measurement results. Then the simulation analysis of the air cooling system of the battery pack is carried out, and the solution of the temperature distribution of the battery pack and the flow velocity distribution of the air duct is completed. Finally, the cooling effect of the cooling system is improved by changing the number of air outlets and the shape of the fan baffle. The results show that it is feasible to analyze the temperature and internal flow velocity distribution of energy storage battery packs based on the electrochemical-thermal coupling simulation model. The structural optimization of the forced air cooling system can greatly improve the heat dissipation performance of the system, and achieve a lower maximum temperature and a more uniform temperature distribution.

This work is supported by the Key Research and Development Program of Guangdong Province (No. 2020B090919004).

Key words: lithium-ion battery; thermal management system; simulation analysis; ANSYS Fluent

0 引言

锂离子电池具有能量密度大、循环寿命长、环境友好等优点, 对于未来可靠的能源供给具有重要

意义^[1-3]。目前锂离子电池广泛应用于新能源汽车、电网储能领域, 在能源供给领域的发展中有很大的潜在应用价值^[4-10]。

在工况恶劣的情景中使用锂电池的主要挑战之一是热管理问题。电池在充放电过程中会产生大量热量, 如果不能有效地散热, 电池温度会不断升高, 一方面可能造成整个系统的热失控^[11-12], 另一方面

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目资助 (2020B090919004)

也会加速电池老化, 缩短电池寿命。因而, 对锂离子电池组进行热分析与优化设计是十分重要的, 这也逐渐成为了当前研究的热门问题^[13-15]。

电池热管理系统的三种主要冷却技术是空气冷却、液体冷却和相变材料(PCM)冷却^[16]。其中, 强制风冷因其结构简单、成本低廉而被广泛应用^[17], 然而对强制风冷热管理系统通过实验进行结构设计有一定难度^[18]。通常, 空气冷却和液体冷却在商业上比 PCM 冷却更成熟。空气冷却和液体冷却方面的最新改进集中在锂电池组冷却流道的新颖设计和参数研究中, 以在模块中不同电池的最高温度和高温均匀性方面达到最佳的散热性能, 用计算流体力学仿真(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法对电池组进行分析和设计是目前的主流手段。梅盼^[19]在对电池组进行风冷结构设计时采用的是分布式参数模型, 考虑到了电池内部结构产热、传热差异性所导致的生热因素及其分布特征, 得到较为精确的生热模型, 再利用 CFD 方法对电池组进行风冷结构优化。Stephan Kosch 等^[20]利用二维电-热极化模型研究了锂离子电池极柱的形状和位置对大尺寸锂离子电池的热特性的影响。高肖璟^[21]基于等效电路模型在 ANSYS 中对锂电池组风冷散热系统进行仿真。洪文华^[22]在利用相变材料冷却锂离子电池的研究中采用了伪二维模型(Pseudo Two Dimension Model, 简称 P2D 模型), 并使用 CFD 仿真办法对相变冷却锂电池模块的散热情况进行了仿真分析。当前文献中对锂电池的热仿真主要都是采用传统的 P2D 机理模型或者等效电路模型^[23], 然后再用 CFD 方法在 ANSYS 软件平台上进行仿真验证, 综合考虑电池热仿真的准确性和计算效率, 本文基于电池电化学 SP+模型^[24]实现电池单体及其热管理系统的“电-热-流”多物理场仿真, 并通过实际强制风冷装置对仿真精度进行了实验验证, 方法进一步用于实现某储能集装箱电池包的风冷热管理系统结构优化。

1 锂离子电池电化学-热耦合仿真模型

1.1 锂离子电池电化学模型建立

由于 SP+模型具有模型参数易辨识、计算精度和效率较高的优点, 本文采用 SP+模型作为锂离子电池单体的电化学模型。

SP+模型可以用 6 个参数进行描述, 这些参数具有明确的物理意义, 不仅简化了复杂的偏微分计算形式, 而且能够作为锂离子电池的内部参数反映电池内部电化学反应状态和进行的程度。这些参数的定义及其物理意义总结如表 1 所示。

SP+模型将电池的开路电压用正负极开路电

压之差的形式表示, 如式(1)所示。

$$E_{ocv} = U_p(y_{surf}) - U_n(x_{surf}) \quad (1)$$

式中: E_{ocv} 为电池的开路电压; U_p 与 U_n 分别为电池的正负极开路电压, 单位为 V; y_{surf} 与 x_{surf} 分别为电池的正负极表面嵌锂浓度分数。

表 1 SP+模型参数定义

参量	定义	物理意义
y_0	正极初始嵌锂浓度 分数(-)	描述电池的 SOC 状态
Q_p	正极容量(C)	描述电池正极有效活性 材料总量
Q_n	负极容量(C)	描述电池负极有效活性 材料总量
y_{ofs}	正负极配比偏移(-)	描述正负极配置的相对位置
τ_p^s	正极固相扩散时间常数(s)	正极固相扩散特征参量
τ_n^s	负极固相扩散时间常数(s)	负极固相扩散特征参量

根据 SP+模型, 电池充放电过程可分为基本过程和固相扩散过程两部分。

锂离子电池工作的基本过程可用式(2)一式(5)进行描述。

$$y_{avg} = y_0 + \left(\int Idt \right) / Q_p \quad (2)$$

$$x_{avg} = (1 - y_{avg} - y_{ofs}) \cdot Q_p / Q_n \quad (3)$$

$$y_{surf} = y_{avg} + \Delta y \quad (4)$$

$$x_{surf} = x_{avg} - \Delta x \quad (5)$$

式中: y_{avg} 与 x_{avg} 分别为电池的正负极平均嵌锂浓度分数; I 为锂电池工作电流, 单位为 A; Δy 和 Δx 分别为电池的正负极表面嵌锂浓度分数和平均嵌锂浓度分数之差。

锂离子电池的固相扩散过程可由式(6)一式(9)计算得到。

$$\frac{d}{dt} \Delta y'(t) = \frac{1}{\tau_p^s} \left[\frac{12}{7} \cdot \frac{\tau_p^s}{Q_p} \cdot I(t) - \Delta y'(t) \right] \quad (6)$$

$$\Delta y(t) = \Delta y'(t) + \frac{2}{7} \frac{\tau_p}{Q_p} I(t) \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta x'(t) = \frac{1}{\tau_n^s} \left[\frac{12}{7} \cdot \frac{\tau_n^s}{Q_n} \cdot I(t) - \Delta x'(t) \right] \quad (8)$$

$$\Delta x(t) = \Delta x'(t) + \frac{2}{7} \frac{\tau_n}{Q_n} I(t) \quad (9)$$

1.2 锂离子电池热模型建立

锂离子电池充放电过程中的热特性包括产热过程和传热过程两部分。

1) 产热过程

锂离子电池产热率使用 Bernardi 方程进行计算, 如式(10)所示。

$$q_{\text{bat}} = \frac{I}{V} \left[(E_{\text{ocv}} - U) - T \frac{dE_{\text{ocv}}}{dT} \right] \quad (10)$$

式中: q_{bat} 为电池单位体积的产热速率, 单位为 W/m^3 ; V 为电池体积, 单位为 m^3 ; U 为电池端电压, 单位为 V ; T 为电池温度, 单位为 K ; dE_{ocv}/dT 为熵变系数, 本文中取 $dE_{\text{ocv}}/dT \approx 0.22 \text{mV}/\text{K}$ 。

2) 传热过程

锂离子电池工作时的传热过程包括热传导、热对流两个部分^[25]。

锂离子电池热传导过程由傅里叶定律描述, 如式(11)所示。

$$\rho_{\text{bat}} C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_{\text{bat}} \quad (11)$$

式中: ρ_{bat} 为电池平均密度, 单位为 kg/m^3 ; C_p 为电池定压比热容, 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k 为电池导热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

锂离子电池热对流过程由牛顿冷却定律描述, 如式(12)所示。

$$q = h(T_s - T_B) \quad (12)$$

式中: q 为热流密度, 单位为 W/m^2 ; h 为对流换热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T_s 为电池表面温度, 单位为 K ; T_B 为环境温度, 单位为 K 。

1.3 锂离子电池电化学-热耦合模型

锂离子电池单体的产热模型中的发热功率由公式(10)所描述。其中, 开路电势由 SP+ 电化学模型计算获得, 故相当于 SP+ 电化学模型为传热模型提供热源, 在电池仿真过程中反映为温度场分布。而温度场分布又为公式(10)中的温度 T 提供数据, 从而将电化学模型与锂离子电池温度场耦合起来, 完成了锂离子电池电化学-热耦合模型的构建。

2 锂离子电池风冷系统热仿真

2.1 锂离子电池单体温度场仿真分析

本文运用 ANSYS Fluent 软件对方形铝壳三元锂离子电池进行建模仿真。所用方形铝壳三元锂离子电池尺寸为 $65 \text{mm} \times 18 \text{mm} \times 125 \text{mm}$, 标称容量为 11Ah , 充电截止电压为 4.2V , 放电截止电压为 2.7V , 最大充放电倍率为 2C 。锂离子电池单体网格划分图如图 1 所示, 考虑到模型的对称性, 采用半边模型计算。并在电池周围添加空气域, 空气与电池基体之间的夹层材质为铝, 厚度为 1mm 。网

格采用结构化网格划分, 节点数为 $9\,972$, 网格数为 $49\,697$ 。出于对仿真精度的考虑, 在固体域与空气域之间采用细化网格处理。

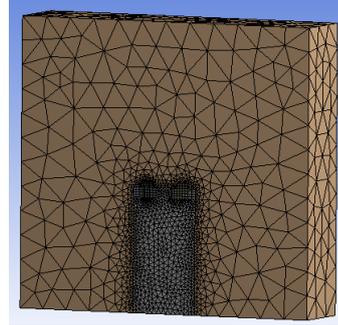


图 1 锂离子电池单体网格模型

Fig. 1 Lithium-ion battery cell mesh model

仿真分析参数设定: 空气环境的温度为 22.5°C , 选用可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型求解, 空气与电池表面的传热方式为自然对流散热, 电池底部绝热, 求解器算法采用耦合求解器。锂离子电池单体在 2C 放电倍率下工作 $2\,200 \text{s}$ 时刻的温度分布如图 2 所示。

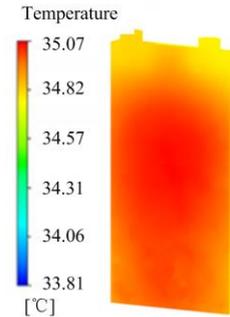


图 2 2C 放电倍率下电池温度分布图

Fig. 2 Battery temperature distribution diagram at 2C discharge rate

为了验证电池单体热仿真模型的准确性, 使用充放电测试仪对实际电池单体进行 2C 倍率下恒流放电实验, 利用热电偶和温度测试仪测量电池外壳中心点的温升情况。将仿真结果与实测结果进行对比来验证模型的准确性。仿真与实测温度对比图如图 3 所示。

可以看出, 仿真结果在温度随时间的变化趋势上与实验测量结果基本吻合且误差较小, 进一步说明了所建立的锂离子电池电化学-热耦合模型具有较高的准确性, 能够利用该模型准确描述锂离子电池的热特性和温度分布, 为接下来的锂离子电池组 and 实际储能电池包的热仿真奠定基础。

2.2 锂离子电池组温度场仿真分析

为了进一步验证仿真方法的准确性, 搭建了实

物验证系统如图 4 所示。系统由 24 个电池构成 3 并-8 串结构, 并配有 Z 型槽强制风冷热管理系统, 气流从左下方进风口流入对电池进行冷却, 并从右上方出风口汇集流出。

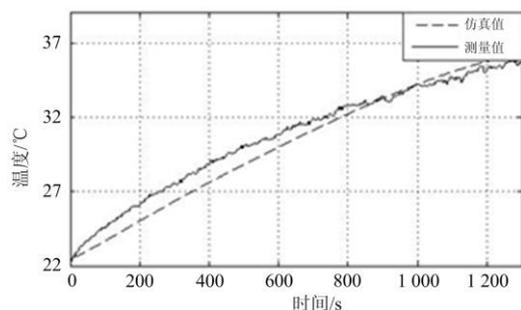


图 3 2C 放电倍率下单体电池仿真与实验温度比较

Fig. 3 Comparison of single battery simulation and experimental temperature at 2C discharge rate



图 4 强制风冷系统实验台

Fig. 4 Forced air cooling system test bench

本文利用 ANSYS Fluent 建立的电池组几何模型和网格模型分别如图 5 和图 6 所示。底部导流板的角度为 2.6° , 顶部导流板角度为 0° 。气流从左下边流入, 右上边流出。电池的前后间距为 30 mm, 电池的左右间距为 5 mm, 忽略了电池单体极柱和焊接座对有限元仿真计算结果的影响。网格采用结构化网格划分, 其中节点数为 25 480, 网格数为 35 421。

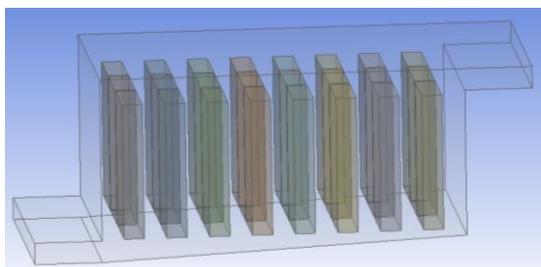


图 5 锂离子电池组几何模型

Fig. 5 Geometric model of lithium ion battery pack

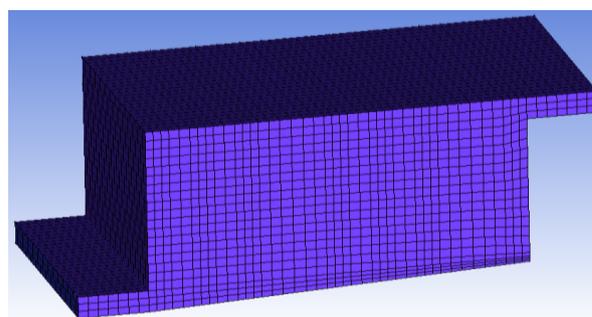


图 6 锂离子电池组网格模型

Fig. 6 Lithium-ion battery pack mesh model

仿真分析参数设定: 进风口空气温度为 25°C , 入口风速为 5 m/s , 出口背压为 0 pa 。装置外壁面与空气自然对流散热, 热流密度设置为 5 W/m^2 ; 选用 $k-\varepsilon$ 湍流模型求解; 空气与电池表面进行流固耦合换热; 仿真时间 2 200 s。锂离子电池组在 1.5C 放电倍率下的温度分布和流场分布分别如图 7 和图 8 所示。

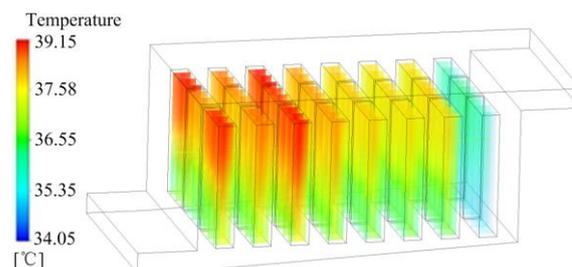


图 7 电池组温度分布图

Fig. 7 Battery pack temperature distribution graph

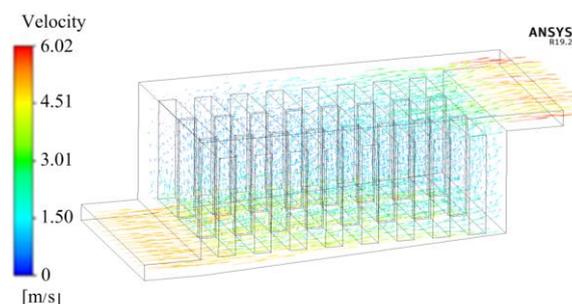


图 8 流道风速分布图

Fig. 8 Flow channel wind speed distribution map

为了验证仿真结果的准确性, 本文对该强制风冷系统在 1.5C 倍率下进行 2 200 s 放电实验, 并测量电池组中各电池单体外壳中心点的温度和各流道流速。实验结果与仿真结果对比情况如图 9 和图 10 所示。

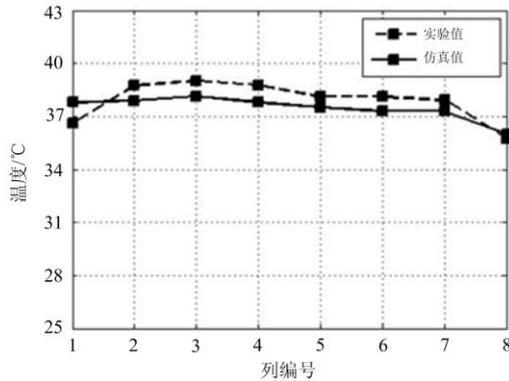


图 9 电池组温度分布的仿真值与实验值的比较

Fig. 9 Comparison of simulated and experimental values of battery pack temperature distribution

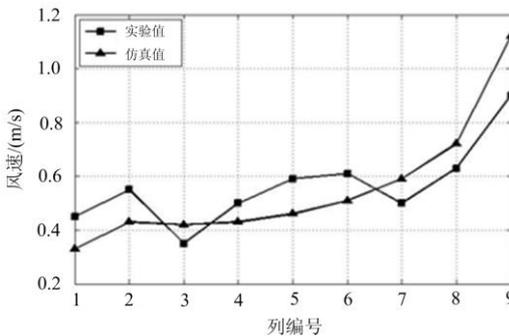


图 10 电池组流道风速的仿真值与实验值的比较

Fig. 10 Comparison of simulated and experimental values of wind speed in the flow channel of battery pack

可以看出，每一排电池温度的实验结果与仿真值基本都吻合，仿真结果较好。从风速的比较也可以看出，每个流道的风速误差也基本限制在 0.2 m/s 以内。总的来说电化学-热耦合模型在电池组仿真中的温度和风速的误差依然在可控范围之内，仍具有较高的精度，实验结果表明将上述热仿真模型和仿真方法应用于锂离子电池组热管理系统是可行且准确的。这为接下来的实际储能电池包的仿真奠定了基础，可认为储能电池包的热仿真结果是准确的。

2.3 锂离子电池包风冷系统热仿真

为了更好地将热仿真模型和该仿真方法运用到实际的电池热管理系统的研究中，对某实际电池储能集装箱中的电池包单元进行仿真，并尝试改变电池系统结构和热管理系统参数配置对冷却效果进行优化。

储能电池包模型如图 11 所示。该电池包由 32 个电池串联组成。风扇位于电池包顶端中部，其下有一个挡板用来调整气流的方向。出风口包括两侧的长条孔和背部的圆孔两部分。

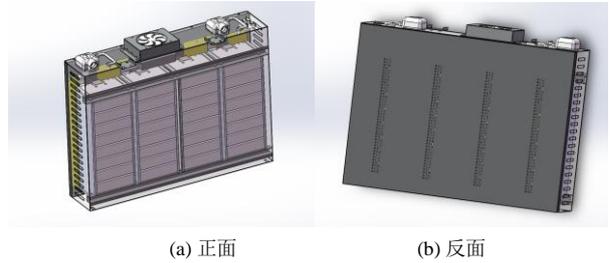


图 11 锂电池储能集装箱中的电池包模型

Fig. 11 Battery pack model in lithium battery energy storage container

出于简化计算方面考虑，将原来的电池包模型结构进行一定的简化，去除所有与流道分布无关的结构，简化后的三维模型如图 12 所示。

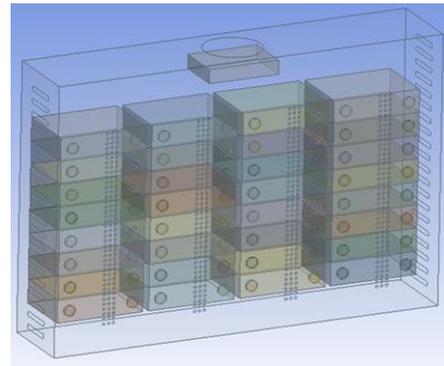


图 12 简化后的电池包模型图

Fig. 12 Simplified battery pack model diagram

得到简化模型后，将基于 ANSYS Fluent 平台对锂离子电池包温度场以及流场分布进行仿真研究。初步仿真设置如下：进风口空气温度为 300 K，入口风速为 5 m/s；电池包外壁面与空气自然对流散热，散热功率 5 W/m²；选用 $k-\epsilon$ 湍流模型求解；空气与电池表面进行流固耦合换热，电池包外壳与外界空气自然对流散热。仿真得到的流道风速分布如图 13 所示，电池温度场分布如图 14 所示。

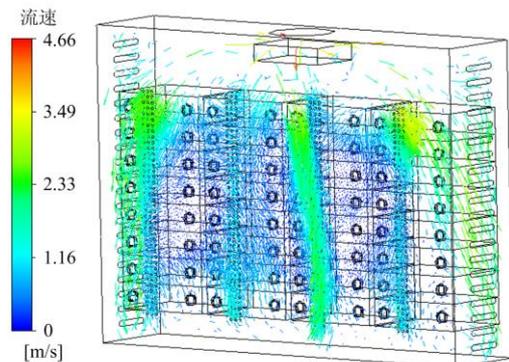


图 13 电池包流速分布图

Fig. 13 Battery pack flow rate distribution graph

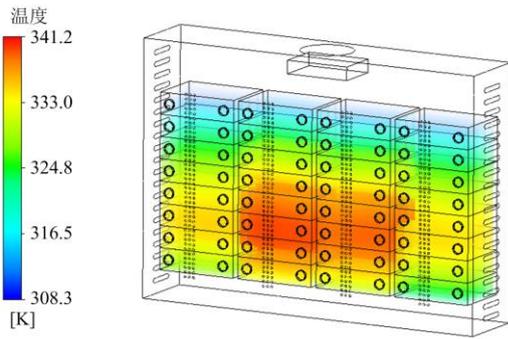


图 14 电池包温度分布图

Fig. 14 Battery pack temperature distribution graph

从温度分布图可以看出, 储能电池包内冷却效果不均匀, 中间两列电池温度偏高, 电池包结构需要进一步改进。从流道风速分布图可以看出, 由于风扇挡板的作用, 气流被冲散到四周, 由背面和侧面通风口提前流出, 导致中间两列以及底部的电池没有得到足够多的冷却空气。

经过不断尝试, 改变风扇挡板的形状使其能够均匀分配风扇的送风, 以及减小开孔数量使冷却空气能够在电池包中滞留更长时间。

结构改进后对电池包进行热仿真得到的流道流速分布及电池温度场分布如图 15 和图 16 所示。

从改进前后流道流速分布图对比可以看出, 改进后的结构将气流更加均匀地分布到了四周, 并且在电池包内部的移动路径更长, 大大改善了电池包的冷却环境。

从改进前后电池温度场分布图对比可以看出, 平均温度和温差均有了较大的改善。为定量分析改进后结构的冷却效果, 将电池进行编号比较每个电池的平均温度, 如图 17 所示。

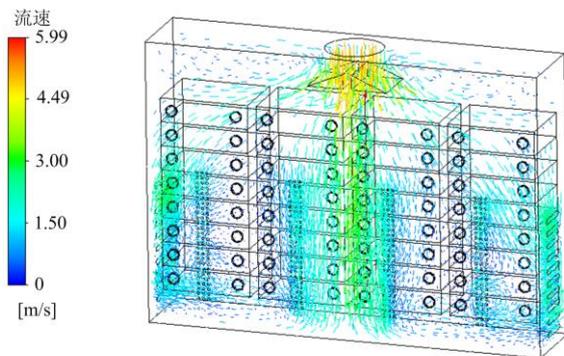


图 15 改进后电池包流速分布图

Fig. 15 Flow rate distribution diagram of battery pack after improvement

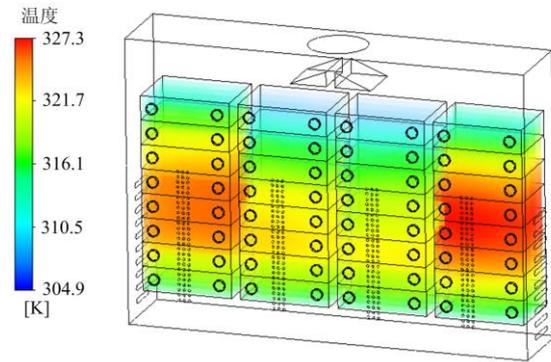


图 16 改进后电池包温度分布图

Fig. 16 Temperature distribution diagram of battery pack after improvement

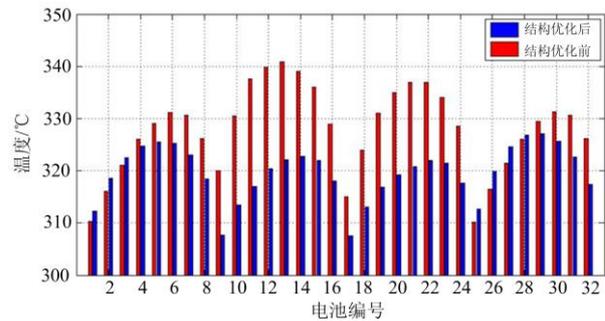


图 17 结构优化前后电池的平均温度

Fig. 17 Average battery temperature before and after structural optimization

可以看出, 结构改进前电池单体最大温升为 41.2°C , 最大温差为 32.9°C , 调整后单体最大温升为 27.3°C , 最大温差为 22.4°C 。经过计算, 储能电池包的最高温度降低了 13.9°C , 最大温差降低了 10.5°C 。另一方面, 利用 ANSYS 平台导出电池包网格节点电池温度并计算其标准差。结构改进前电池包温度标准差为 8.0°C , 结构改进后温度标准差下降到 4.9°C 。从以上数据能够充分说明改变风扇挡板结构和出风孔数量对改善储能电池包的散热效果有着显著作用。

3 结论

本文在 ANSYS Fluent 平台上将电化学-热耦合模型应用于锂离子电池单体和电池组中, 仿真结果与实验结果基本吻合, 证明了电化学-热耦合仿真模型和该仿真方法都可以很好地应用于电池热管理系统的研究。在此基础上进一步对实际储能锂离子电池包强制风冷系统进行热仿真, 改进原有的冷却结构, 降低了最大温度并减小了电池之间的温差, 明显改善了冷却效果。其优越性在于避免了繁琐复杂

的实验,基于电化学-热耦合模型即可对实际储能锂离子电池包进行准确的热仿真并进行结构优化。所提电池及热管理系统建模仿真方法,可应用于任意风冷电池储能实际工程中,具有一定的普适性。方法目前的不足之处在于优化过程中的热管理系统结构参数调整依赖于工程经验,需要不断尝试,未来在结构优化算法方面仍有待进一步研究。

参考文献

- [1] HALES A, MARZOOK M W, DIAZ L B, et al. The cell cooling coefficient: a standard to define heat rejection from lithium[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, 166(12): 2383-2395.
- [2] 吴勇, 吕林, 许立雄, 等. 考虑电/热/气耦合需求响应的多能微网多种储能容量综合优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(16): 1-10.
WU Yong, LÜ Lin, XU Lixiong, et al. Optimized allocation of various energy storage capacities in a multi-energy micro-grid considering electrical/thermal/gas coupling demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(16): 1-10.
- [3] 刘大同, 周建宝, 郭力萌, 等. 锂离子电池健康评估和寿命预测综述[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(1): 1-16.
LIU Datong, ZHOU Jianbao, GUO Limeng, et al. Survey on lithium-ion battery health assessment and cycle life estimation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36 (1): 1-16.
- [4] 符晓玲, 商云龙, 崔纳新. 电动汽车电池管理系统研究现状及发展趋势[J]. *电力电子技术*, 2011, 45(12): 27-30, 89.
FU Xiaoling, SHANG Yunlong, CUI Naxin. Research and development trend on battery management system for EV[J]. *Power Electronics*, 2011, 45(12): 27-30, 89.
- [5] 郭明亮, 戴朝华, 邓惠文, 等. 基于单体光伏/单体储能电池模组的新型光伏储能发电系统[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(3): 56-61.
WU Mingliang, DAI Chaohua, DENG Huiwen, et al. A novel PV energy storage generating system based on single PV cell/single energy storage cell module[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(3): 56-61.
- [6] 程俊, 曲妍, 李媛, 等. 基于剩余电量估计的电池组充放电均衡策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(3): 122-129.
CHENG Jun, QU Yan, LI Yuan, et al. Charge and discharge equalization strategy for battery packs based on remaining capacity estimation[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(3): 122-129.
- [7] 李建林, 李雅欣, 周喜超, 等. 储能商业化应用政策解
- 析[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(19): 168-178.
LI Jianlin, LI Yaxin, ZHOU Xichao, et al. Analysis of energy storage policy in commercial application[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(19): 168-178.
- [8] 钟国彬, 王羽平, 王超, 等. 大容量锂离子电池储能系统的热管理技术现状分析[J]. *储能科学与技术*, 2018, 7(2): 203-210.
ZHONG Guobin, WANG Yuping, WANG Chao, et al. The review of thermal management technology for large-scale lithium-ion battery energy storage system[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7(2): 203-210.
- [9] 步传字, 姜昆, 任军, 等. 基于改进型ASRCKF算法的锂离子电池荷电状态估计[J]. *广东电力*, 2020, 33(10): 16-25.
BU Chuanyu, JIANG Kun, REN Jun, et al. Estimation of SOC of lithium-ion battery based on improved ASRCKF[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(10): 16-25.
- [10] 康道新, 李立伟, 杨玉新, 等. 基于DAUKF的锂电池SOC值和SOH值的估算研究[J]. *广东电力*, 2020, 33(4): 9-16.
KANG Daoxin, LI Liwei, YANG Yuxin, et al. Estimation of SOC and SOH values of lithium battery based on DAUKF[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(4): 9-16.
- [11] LI Junhui, GAO Fengjie, YAN Gangui, et al. Modeling and SOC estimation of lithium iron phosphate battery considering capacity loss[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(1): 61-69. DOI: 10.1186/s41601-018-0078-0.
- [12] GRANDJEAN T, BARAI A, HOSSEINZADEH E, et al. Large format lithium ion pouch cell full thermal characterisation for improved electric vehicle thermal management[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 359: 215-225.
- [13] 罗庆凯, 王志荣, 刘婧婧, 等. 18650型锂离子电池热失控影响因素[J]. *电源技术*, 2016, 40(2): 277-279, 376.
LUO Qingkai, WANG Zhirong, LIU Jingjing, et al. Influencing factors of thermal runaway of 18650 lithium ion battery[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2016, 40(2): 277-279, 376.
- [14] 张剑波, 吴彬, 李哲. 车用动力锂离子电池热模拟与热设计的研发状况与展望[J]. *集成技术*, 2014, 3(1): 18-26.
ZHANG Jianbo, WU Bin, LI Zhe. Thermal modeling and thermal design of lithium-ion batteries for automotive application: status and prospects[J]. *Journal of Integration Technology*, 2014, 3(1): 18-26.

- [15] 罗伟林, 周少云, 刘辉, 等. 48 V/50 Ah 磷酸铁锂电池组热仿真[J]. 装备环境工程, 2018, 15(12): 6-15.
LUO Weilin, ZHOU Shaoyun, LIU Hui, et al. Thermal simulation for a 48 V/50 Ah lithium-ion battery pack[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(12): 6-15.
- [16] 程昀, 李劫, 贾明, 等. 动力锂离子电池模块散热结构仿真研究[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(6): 1607-1616.
CHENG Yun, LI Jie, JIA Ming, et al. Simulation research of heat dissipation structure for automotive lithium-ion battery packs[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(6): 1607-1616.
- [17] AL-ZAREER M, DINCER I, ROSEN M A. Novel thermal management system using boiling cooling for high-powered lithium-ion battery packs for hybrid electric vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2017, 363: 291-303.
- [18] 朱浩, 王文清, 鄂加强, 等. 基于电化学热耦合模型锂电池热管理系统优化[J]. 电源技术, 2018, 42(4): 497-499, 542.
ZHU Hao, WANG Wenqing, E Jiaqiang, et al. Optimization of thermal management system for lithium ion battery based on three-dimensional thermal coupling model[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(4): 497-499, 542.
- [19] 梅盼. 锂离子动力电池热状态仿真及瞬时热特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
MEI Pan. Numerical simulation and transient study on thermal status of cylindrical lithium-ion battery[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [20] KOSCH S, RHEINFELD A, ERHARD S V, et al. An extended polarization model to study the influence of current collector geometry of large-format lithium-ion pouch cells[J]. Journal of Power Sources, 2017, 342: 666-676.
- [21] 高肖璟. 基于风冷散热的电动汽车电池组电热耦合模型及温度控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
GAO Xiaojing. A study on electro-thermal coupling model and temperature control of an air-cooled battery pack for electric vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [22] 洪文华. 相变材料在锂离子动力电池热管理中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
HONG Wenhua. Application of phase change material in thermal management of lithium ion power battery[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [23] 高金辉, 朱迎正. 基于新电源模型的动力锂电池荷电状态估计研究[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2019, 47(1): 58-61, 92.
GAO Jinhui, ZHU Yingzheng. Study on state estimation of power lithium battery based on new power supply model[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition, 2019, 47(1): 58-61, 92.
- [24] 吕超, 郑君, 罗伟林, 等. 锂离子电池热耦合 SP+模型及其参数化简[J]. 电源学报, 2015, 13(3): 28-35.
LÜ Chao, ZHENG Jun, LUO Weilin, et al. Thermal coupling SP+ model of lithium-ion battery and parameters simplification[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(3): 28-35.
- [25] 雷治国, 张承宁, 雷学国, 等. 电动汽车用锂离子电池热特性和热模型研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(12): 59-64.
LEI Zhiguo, ZHANG Chengning, LEI Xueguo, et al. Research on thermal characteristics and thermal model of EVs lithium-ion battery[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(12): 59-64.

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-02-23

作者简介:

吕超(1978—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为动力/储能电池管理新理论与新技术。E-mail: lu_chao@hit.edu.cn

(编辑 魏小丽)