

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.05.016

# 锂电池模组液冷并联蛇形流道结构设计及优化

罗心源, 金阳

(郑州大学电气与信息工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 锂离子电池被广泛应用于化学储能系统, 然而由于该电池固有的产热特性, 热失控成为了化学储能电站的一大安全隐患。因此优化设计电池热管理系统, 有效避免热失控现象, 对化学储能系统安全运行至关重要。文中设计了一种兼具串联折返与并联分支结构的新型并联蛇形流道液冷板, 通过仿真实验, 研究液冷板流道结构、液冷系统布置、冷却液入口流速对最高温度、温度分布均匀性、进出口压降的影响, 以达到优化液冷系统的目的。结果表明, 相同冷却液入口流速下, 与传统并联流道相比, 新型流道的最高温度降低 0.284 9 K、模组组内温差降低 0.466 3 K, 与传统蛇形流道相比, 其进出口压降减小 40.18%; 基于并联蛇形流道液冷板, 液冷系统的最佳布置方案为冷却液二分口注入+液冷板交错布置; 不同液冷板流速差异化设置, 即两侧液冷板入口流速设定为 0.1 m/s, 居中液冷板入口流速设定为 0.2 m/s, 较四板保持相同流速为 0.2 m/s 的方案, 电池模组组内温差降低 13.62%, 列间温差降低 82.59%, 能耗降低 44.87%, 达到“降本增效”的优化效果。合理的流道结构、交错的液冷板布置以及差异化的入口流速设计可以优化电池模组的液冷系统, 增加电池模组运行的安全性。

**关键词:** 锂离子电池模组; 热管理; 液体冷却; 并联蛇形液冷板; 液冷板布置; 差异化流速

中图分类号: TM912

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)05-0160-10

## 0 引言

2020年正式提出“碳达峰”“碳中和”目标后, 我国的电化学储能技术开始飞速发展<sup>[1-2]</sup>。该技术具有快速响应、布置灵活、建设周期短等优点, 是国家实现可再生能源大规模接入、保障国家能源安全的关键性技术。锂离子电池凭借其高能量密度、高放电电压、小自放电、长循环寿命等诸多优点<sup>[3-6]</sup>, 成为电化学储能系统中主要使用的电池种类之一。锂离子电池模组在充放电过程中会产生热量, 若不能及时有效散发, 其累积势必导致电池温度升高, 损害电池的循环性能, 引起恶劣的电池热失控现象, 给储能系统安全运行带来巨大隐患<sup>[7-15]</sup>。因此, 需要增强系统有效散热能力, 使系统运行在最佳温度范围内, 保障电池温度一致性, 减小热失控的风险。液冷散热的液冷介质换热系数高、热容量大、冷却速率高, 同时其布置形式灵活, 可在较低能耗下保障电池长期安全稳定运行<sup>[16-20]</sup>。

近几年来, 冷却板种类、流道几何结构、流体流动分布是液冷系统的研究重点<sup>[21-26]</sup>。文献[27]基于传统并联流道与传统蛇形流道结构, 设计了一种双层回旋树形流道结构, 流道出入口分层隔离, 显著提升了冷却性能, 又基于进化算法进行多目标设计, 得到了基于响应面逼近的帕累托。文献[28]建立了一套基于微型通道冷板的液冷系统, 从流道数

量、冷却液流速以及入口冷却剂温度等角度对系统性能进行了参数化研究。当该系统冷却液流量为 0.002 kg/s 且入口冷却剂温度为 30 °C 时, 电池在 2 C 放电倍率下的最高温度和温差分别为 33.8 °C 和 3.5 °C。文献[29]提出了一种微型矩形流道冷板, 通过改变通道宽度、通道数量、冷却剂流速与环境温度等, 对冷却性能进行了热力学分析, 最终发现当通道数量为 5、宽度为 4 mm、流量为 0.003 kg/s、温度为 25 °C 时, 可以在冷却效果与压降之间取得较为理想的平衡。文献[30]将复合硅胶板与冷却管组合, 利用铜管的优良冷却效果以及二者之间接触热阻低的特点, 设计了一种新型混合冷却系统, 其可以在 4 C 放电倍率下, 将电池模组最高温度控制在 42.7 °C 以下, 温差控制在 2.7 °C 以内。

研究者往往是从整个电池模组的空间尺度出发, 通过优化液冷板内部流道结构、改变液冷板与电池之间的接触面积以及组合多种冷却方式来提高液冷系统的散热能力。事实上, 模组内的液冷系统在空间上可以有多种布置方案且不同液冷板之间的参数也可以相互不同。研究者可以在不同行电池之间、不同列电池之间以及单体电池的空间尺度下去研究温度控制性能指标, 并进一步探究如何提高液冷系统的散热能力。

因此, 文中首先设计了一种兼具传统并联流道与蛇形流道结构特点的新型流道结构, 从整体电池模组、单列电池、单体电池 3 个尺度出发, 研究了新型流道结构的冷却性能。此外, 还讨论了液冷系统

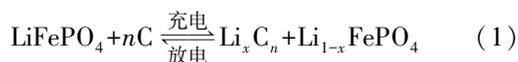
收稿日期: 2024-02-01; 修回日期: 2024-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52322708)

的布置方案、不同液冷板的冷却液差异化入口流速对液冷系统散热能力的影响。文中研究可为储能电站的热管理系统设计提供参考。

## 1 电池模组的生热及传热机理

磷酸铁锂电池正电极材料为磷酸铁锂,负电极材料常为石墨,电解液广泛使用六氟磷酸锂,其充放电化学反应公式如下:



根据锂离子电池的工作原理,锂离子电池的产热  $Q_t$  可以分为反应热  $Q_r$ 、极化热  $Q_p$ 、焦耳热  $Q_j$  以及副反应热  $Q_s$  四部分。

$$Q_t = Q_r + Q_p + Q_j + Q_s \quad (2)$$

反应热  $Q_r$  由正负极发生电化学反应产生。极化热  $Q_p$  由电池内部极化现象所引起的极化内阻产生。焦耳热  $Q_j$  由电池的欧姆内阻产生。副反应热  $Q_s$  为电池内部部分电解液和电池材料发生分解副反应所释放出的热量。

模组内导热微分方程为:

$$\rho C_p \frac{\partial^2 T}{\partial t} = k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为电池的平均密度;  $C_p$  为电池的比热容;  $T$  为电池的开尔文温度;  $t$  为时间;  $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$  分别为电池沿  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴方向的导热率;  $q$  为磷酸铁锂电池单位体积生热率。

实际应用中,电池单位体积生热率  $q$  的测量是非常困难的。Bernardi 提出一种电池单位体积产热率计算公式:

$$q = \frac{I}{V_b} \left[ (U - U_o) + T \frac{dU_o}{dT} \right] \quad (4)$$

式中:  $I$  为电池充放电过程中的额定电流;  $V_b$  为电池的体积;  $U$ 、 $U_o$  分别为电池单体额定电压和开路电压;  $dU_o/dT$  在一定充放电倍率下为常数,其数值极小,在计算中可以忽略。

因此,对电池单位体积生热计算公式进行简化,简化后的表达式为:

$$q = \frac{I}{V_b} (U - U_o) = \frac{I^2 R}{V_b} \quad (5)$$

式中:  $R$  为电池内阻。

由式(5)可知,简化后的电池单位体积生热率只与充放电电流、电池内阻以及电池体积有关。

## 2 液冷电池模组散热模型

### 2.1 液冷电池模组几何模型

文中使用某公司开发的磷酸铁锂 208 A·h 方形

电池,为达到简化仿真的效果,将锂离子电池单体简化为 170 mm×200 mm×50 mm 的均热长方体。图 1(a) 为液冷电池模组的简化模型,包含由 30 块单体电池构成的电池模组以及由 4 块液冷板构成的液冷系统。30 块电池分为 10 行 3 列,液冷板内含有冷却液流道,垂直安装于每一列电池两侧,液冷板长 870 mm、高 210 mm、厚 11 mm。图 1(b) 为流道截面模型,截面为矩形,面积为 100 mm<sup>2</sup>,高度与宽度比值为 8。

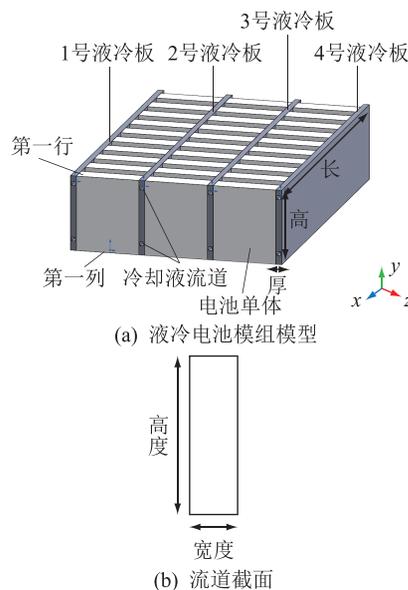


图 1 电池模组与流道截面几何模型

Fig.1 The geometric model of battery module and flow channel section

图 2 为 3 种不同流道结构的液冷板方案。方案一为传统蛇形流道,冷却液单向流动,没有分流。方案二为传统并联流道,冷却液分流后经过 4 个分支流道流向出口。方案三为优化设计后的流道结构,将其命名为并联蛇形流道。3 种方案的液冷板进出口流道截面面积均为 100 mm<sup>2</sup>,高度与宽度比值为 8。

### 2.2 材料参数与边界条件

通过式(5)计算出单体电池在 1 C 放电倍率下的产热约为 6 362 W/m<sup>3</sup>。液冷板与冷却液的材料以及相关热物性参数如表 1 所示,单体电池的热物性参数如表 2 所示。

使用 ANSYS Fluent 软件仿真,环境温度和液冷电池模组初始温度设定为 300 K;电池模组以及液冷板与外界环境之间设定为自然对流条件,对流换热系数值为 5 W/(m<sup>2</sup>·K);流道入口冷却液温度设定为 298 K,流道入口设定为速度入口,出口压力为 0 Pa;电池初始的荷电状态(state of charge, SOC)均为 100%。

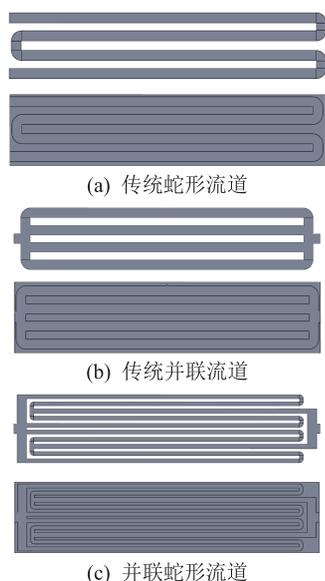


图2 3种方案的流道结构以及相应剖视图  
Fig.2 Channel structure and cross-sectional view for three schemes

表1 液冷板与冷却液材料热物性参数  
Table 1 Material thermophysical parameters of liquid cooling plate and cooling liquid

材料及参数属性	属性值
液冷板材料	铝
液冷板导热系数/( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	202
液冷板密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	2 719
液冷板比热容/( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	870
冷却液组成	50%水-乙二醇
冷却液导热系数/( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	0.399
冷却液密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	1 070
冷却液比热容/( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	3 396
冷却液动力粘度/( $Pa \cdot s$ )	0.003 39

表2 单体电池的热物性参数  
Table 2 Thermophysical parameters of single-cell battery

热物性参数	数值
密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	2 405
比热容/( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	1 329
导热系数/( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	3.72/28/26

注：“3.72/28/26”为锂电池内沿x轴/y轴/z轴方向的导热系数。

### 2.3 评价指标介绍

综合分析液冷系统性能的指标包括模组最高温度、模组组内温差、列间温差、行间温差、冷却液进出口压降。

模组最高温度为30块电池整体的最高温度。锂离子电池的温度必须保持在安全范围内,故最高温度是评估液冷系统性能的重要指标。相同工况下,液冷散热效果越好,模组的最高温度越低。

模组组内温差是电池模组内最高温度与最低温度的差值,用于观察电池模组内的温度分布均匀性。30块电池单体,呈10行3列分布。对于同一列中的电池,每块电池的最高温度代表该单体温度情况。对一列电池中10块单体电池的最高温度做差,取其最大值作为本列不同行电池的行间温差,表征同列不同行电池间的温度分布均匀性。同理,取一列电池中的最高温度代表本列电池温度情况,两列电池的最高温度差值即为其列间温差。在电池工作期间温差应当保持在一定范围内,以延长电池寿命。

液冷系统的冷却液一般由泵机注入,冷却液进出口压强差即为压降,其数值越低,泵机按既定流速注入冷却液所需的功耗越低。

## 3 基于并联蛇形流道液冷板的仿真实验结果及分析

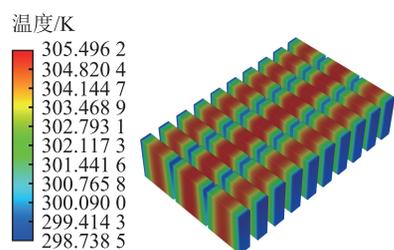
### 3.1 不同流道结构对散热效果的影响

采用2.1节中的3种不同流道结构的液冷板方案进行仿真分析,设定冷却液流速为0.1 m/s,模组在1 C放电倍率工况下放电1 h。

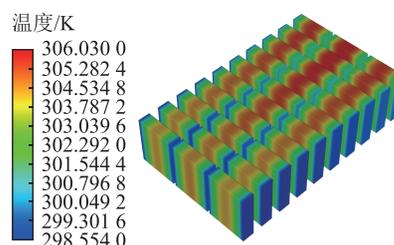
#### 3.1.1 电池模组尺度下流道结构对冷却性能的影响

应用3种不同流道结构,液冷电池模组的温度分布云图如图3所示。图4为3种流道结构的内部压力分布云图。表3为液冷电池模组温度场和压力场仿真结果统计。

从图3中可以看出,模组放电1 h后,3种流道结构下电池的温度分布基本一致。由于液冷板位于每一列电池的两侧以及热量的扩散累积现象,单体电池中间温度最高,越靠近液冷板,热量被带走越多,相应的温度越低;中间第二列电池较其他两



(a) 传统蛇形流道



(b) 传统并联流道

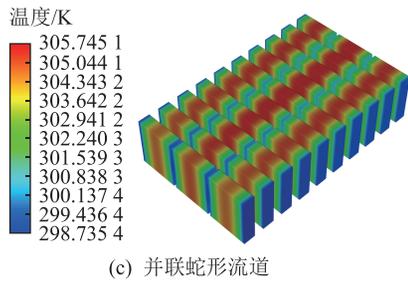


图3 电池模组的温度分布云图

Fig.3 The nephograms of temperature distribution of the battery module

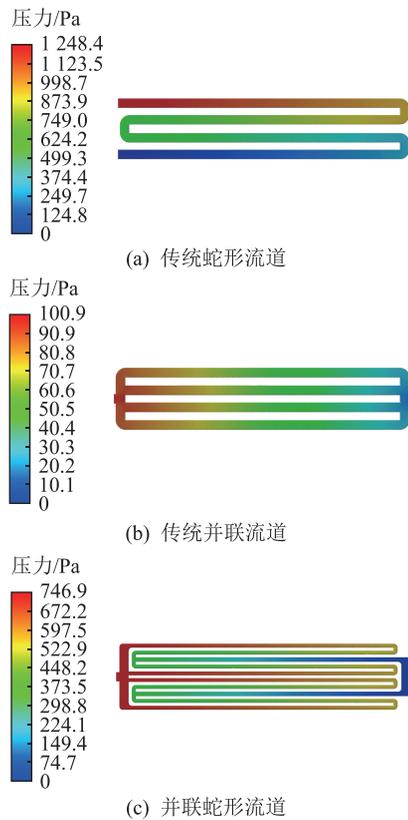


图4 3种流道结构的压力分布云图

Fig.4 The pressure nephograms of three channel structures

表3 液冷电池模组仿真结果统计

Table 3 The statistics of simulation results for liquid cooling battery modules

流道结构	最高温度/K	组内温差/K	列间温差/K	压降/Pa
传统蛇形	305.497 0	6.758 2	0.416 0	1 248.3
传统并联	306.030 0	7.476 0	0.518 3	101.1
并联蛇形	305.745 1	7.009 7	0.459 6	746.7

列电池温度更高,这是因为1号、4号液冷板只需要为单侧一列电池降温,而2号、3号液冷板则需要共同为3列电池降温,中间第二列电池热量累积相对较多,温度较高。

从表3中可知,使用传统并联流道的液冷电池

模组的最高温度、组内温差以及列间温差均为最大,冷却性能较差。传统蛇形流道的电池模组最高温度、组内温差、列间温差均为最低,冷却性能最好。仅从温度控制层面考虑,流道结构从优到劣排序为:传统蛇形、并联蛇形、传统并联。

分析图4流道压力分布云图以及表3中的压降数据可知,传统蛇形流道的进出口压降最大,达到了1 248.3 Pa,而传统并联流道的压降最低,仅有101.1 Pa,并联蛇形流道的压降位于两者之间。

图5为3种流道结构内部的流线图,可以看出流道内部冷却液的流速变化情况。综合分析图5及图4可知,蛇形流道的串联结构可以使冷却液流量集中,折返结构有助于增大冷却液流动区域和流动距离,二者结合使冷却液可以带走更多热量,提供较好的冷却效果,但这也导致蛇形流道进出口压降大,液冷系统能耗大;并联流道的多分支结构可以降低进出口压强差,减小能耗,但冷却液流量分散,经过单个分支流道后便流出液冷板,使得冷却效果不佳。

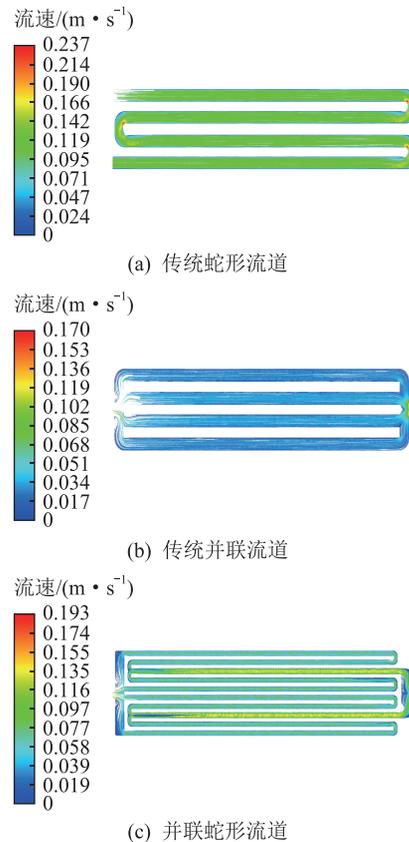


图5 3种流道结构的内部流线图

Fig.5 Internal streamline diagrams of three channel structures

从整个电池模组的层面分析3种不同流道的制冷效果以及能耗,可以看出,传统蛇形流道的最高温度以及温差最低,但其超高的进出口压降势必给

长期运行的液冷系统带来巨大能耗。而传统并联流道的进出口压降虽低,但其液冷效果并不理想,最高温度和温差不利于锂离子电池的长期运行。与前两者对比,并联蛇形流道的最高温度与模组组内温差较传统并联流道分别低 0.284 9 K 与 0.466 3 K,同时其进出口压降较传统蛇形流道降低 40.18%,极大地减小了系统能耗。并联蛇形流道在大幅度降低进出口压降,减小液冷系统长期运行能耗的前提下,取得了优于传统并联流道的温度控制效果,在液冷效果与系统能耗间达到平衡。因此可以认为文中设计的并联蛇形方案是较为优秀的流道结构。

### 3.1.2 单列电池尺度下流道结构对冷却性能的影响

电池模组 3 列电池中,第一列与第三列电池空间位置对称,其温度分布情况相似。由于模组内热量的扩散以及有限的液冷能力,中间一列电池的温度较高,不同行之间的温度差异相对外侧两列较小。因此,为观察不同流道结构对单列不同行电池温度分布的影响,选取第一列电池作为观察对象。

观察图 3 电池模组中第一列电池的温度分布情况,比较图 3(a)与图 3(b)可知,图 3(a)中第一列电池的不同行之间的温差较小,图 3(b)中电池模组温度变化方向与冷却液流向趋于一致,流道入口处温度低,出口处温度高,电池模组温度分布随冷却液流向呈增大渐变趋势;比较图 3(c)与图 3(b)可知,图 3(c)中第一列不同行电池之间的温差明显减小。

图 6 为电池模组第一列 10 块电池的最高温度趋势图,电池序号沿 z 轴负方向依次递加。

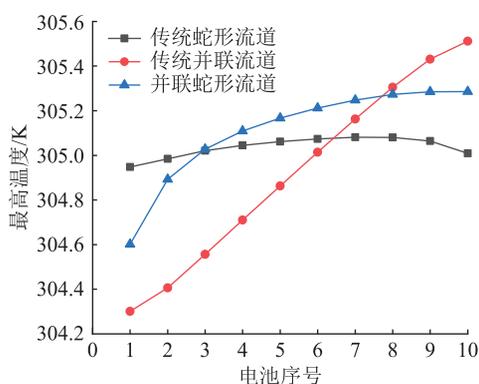


图 6 第一列电池最高温度趋势

Fig.6 The trend of the highest temperature of the first column of batteries

从图 6 中可以看出,传统并联流道和并联蛇形流道具有相同的最高温度走向趋势,其沿着冷却液流向逐渐增加,在 10 号电池处达到峰值。其中传统

并联流道温度升高趋势陡峭,而并联蛇形流道升高趋势放缓。与前两者不同,传统蛇形流道趋势最平缓,温度从 8 号电池起略微下降。

表 4 统计了在 3 种流道结构下第一列电池的行间温差。

表 4 3 种流道结构下第一列电池的行间温差

Table 4 The inter-row temperature difference of the first column of batteries under three channel structures

流道结构	行间温差/K
传统蛇形	0.132 7
传统并联	1.211 0
并联蛇形	0.684 0

由图 6 可知,传统并联流道的第一列电池最高温度峰值最大,而传统蛇形流道的第一列电池最高温度峰值最小。根据表 4 数据,3 种流道结构的行间温差从小到大依次排序为:传统蛇形、并联蛇形、传统并联。并联蛇形流道的行间温差高于传统蛇形流道 0.551 3 K,低于传统并联流道 0.527 0 K。

从第一列电池的最高温度和行间温差 2 个性能指标可以看出,蛇形折返结构可以减小电池的行间温差,提高温度分布的均匀性。

对流道空间结构分析可知,并联流道中的冷却液单向流动并吸收热量,冷却液入口温度低,出口温度高,前后冷却性能不一致,导致单列不同行电池间的温差较大。而蛇形流道的折返结构约束冷却液往返于一列电池的首尾,改善了冷却液单向流动的行间温差问题,同时其流量集中也有助于降低单列电池的最高温度。

而并联蛇形流道的 4 个分支流道采用了传统蛇形的折返结构,确保在降低能耗的同时保留传统蛇形流道的低行间温差的特点。综合来看,并联蛇形是较为优秀的液冷板流道结构。

### 3.1.3 单体电池尺度下流道结构对冷却性能的影响

观察单体电池的温度分布情况,图 7 为 3 种流道结构下第一列第五行单体电池与 2 号液冷板的接触面温度云图,体现了热量在电池高度维度上的分布情况。

从图 7 中可以看出,在电池高度维度上,传统蛇形流道中的单体电池温度分布均匀性差,随着高度的下降,其温度呈升高渐变趋势;在电池的厚度维度上,传统蛇形流道中单体温度分布均匀,温度近乎相同。与其相反,在传统并联流道中,单体电池在高度维度上差异很小,在厚度维度上温度呈现略微变化。

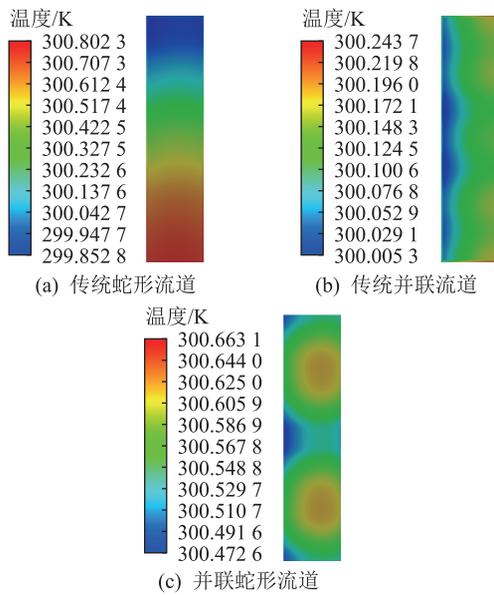


图7 单体电池侧面温度分布云图

Fig.7 The nephograms of temperature distribution of the side surface of single-cell battery

蛇形流道为串联形式,冷却液吸收热量,温度升高,冷却能力下降。电池下部冷却液的冷却能力最低,热量积累多,导致其温度最高。同时受益于流道高压强,流道内的冷却液流速较快,流过一个电池的厚度前后,冷却液温度变化小,冷却能力变化小。因此,单体电池在厚度维度上温度近乎相同。与传统蛇形流道不同,传统并联流道为并联形式,不同分支中的冷却液温度相近,单体电池在高度维度上温度分布相对均匀。

由图7可知,传统蛇形流道温差最高,为0.9485 K,并联蛇形流道温差最低,仅为0.1905 K。并联蛇形流道较传统蛇形流道温差降低了79.94%,极大改善了单体电池的温差情况。从数据中可看出,并联蛇形流道结构兼备串联折返结构与并联分支结构,也获得了二者在不同维度上的低温差优点,从而进一步降低了温差。

综上,考虑电池模组、单列电池、单体电池不同尺度,并联蛇形流道都具备优秀的冷却性能,故后续研究均在选定该结构的基础上进行。

### 3.2 不同液冷系统布置方案对散热效果的影响

如图8(a)与图8(b)所示,并联蛇形流道有2个冷却液出入口,分别具备2个和4个分支流道,故将其分别命名为二分口及四分口。冷却液的注入方式有2种,分别为图8(a)所示的四分口注入及图8(b)所示的二分口注入。此外,整个模组共配置4块液冷板,根据相邻2块液冷板的进出口相对关系,液冷板的布置方式有2种,一种是对称布置,另一种是交错布置。对称布置指相邻两液冷板的进出口

在液冷电池模组同侧,而交错布置指相邻两液冷板的进出口在液冷电池模组对侧。图8(c)与图8(d)为液冷板布置方式示意图。

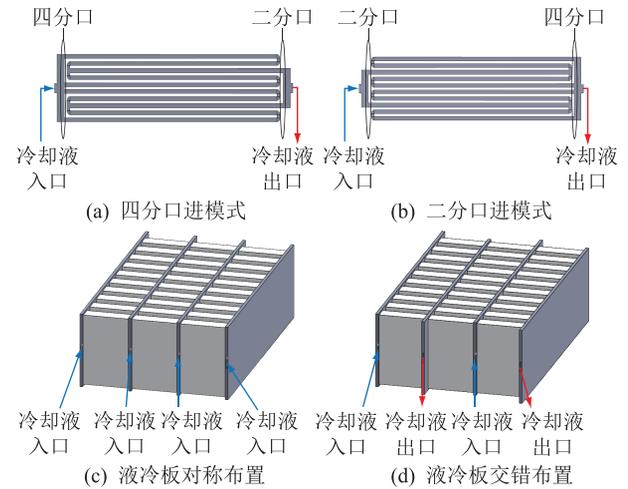


图8 液冷系统布置方式

Fig.8 Layout of liquid cooling system

综合冷却液注入方式与液冷板布置方式,液冷系统共有4种布置方案。方案一:冷却液四分口注入+液冷板对称布置;方案二:冷却液二分口注入+液冷板对称布置;方案三:冷却液二分口注入+液冷板交错布置;方案四:冷却液四分口注入+液冷板交错布置。

模组初始SOC为100%,在1C放电倍率下放电1h后,对4种不同液冷系统布置方案进行分析。模组和环境的初始温度为300 K;冷却液入口温度为298 K,流速设定为0.1 m/s。

#### 3.2.1 电池模组尺度下液冷系统布置方案对散热效果的影响

在电池模组尺度下对不同液冷系统布置方案进行效果观察,表5为仿真结果统计汇总。从表5中可知,4种液冷系统布置方案在最高温度上性能接近,而在温差控制方面差别较大。对于组内温差,方案二较方案一降低0.6083 K,方案四较方案一降低0.5255 K,方案三较方案二降低0.0314 K,因此方案三温差控制效果最好。分析数据可知,冷却液二分口注入与液冷板交错布置均可以降低电池模组组内温差,其中从二分口注入冷却液的改善幅度更大,2种因素的改善效果可以叠加。冷却液注入方式对压降的影响很小,从而可以在不增加能耗的前提下,改善电池模组的冷却效果。

#### 3.2.2 单列电池尺度下液冷系统布置方案对散热效果的影响

图9为4种液冷系统布置方案下,第一列10块电池最高温度的趋势图,体现了同列不同行电池的

表 5 4 种液冷系统布置方案的仿真结果  
Table 5 The simulation results of four liquid cooling system layout schemes

液冷系统布置方案	最高温度/K	组内温差/K	列间温差/K	压降/Pa
方案一	305.745 1	7.009 7	0.459 6	746.8
方案二	305.661 6	6.401 4	0.443 3	743.4
方案三	305.635 5	6.370 0	0.427 5	743.4
方案四	305.629 3	6.484 2	0.436 7	746.8

温度分布情况。由图 9 可知,方案一和方案二电池最高温度趋势相同,单体电池最高温度不断攀升。而使用液冷板交错布置的方案三和四,其列内电池的最高温度从 1 号电池到 5 号电池不断增大,之后逐渐下降。整体来看,交错布置可以改变列内单体电池的最高温度趋势,使其走向呈现倒 U 形,且采取冷却液二分口注入或液冷板交错布置均可降低列内最高温度。

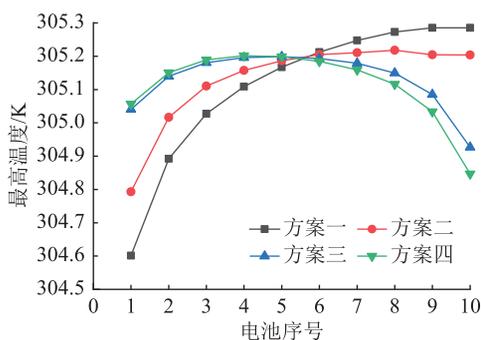


图 9 4 种液冷系统布置方案下第一列电池最高温度趋势  
Fig.9 Trend of the highest temperature of the first column of batteries under four liquid cooling system layout schemes

表 6 为在 4 种液冷系统布置方案下,第一列电池的行间温差。由表 6 可知,从二分口注入冷却液以及将液冷板交错布置都可以降低同列的行间温差,且效果可以叠加,交错布置降低行间温差效果较好。布置方案三的行间温差最低,较方案一改进了 60.23%。

表 6 4 种液冷系统布置方案下第一列电池的行间温差

Table 6 The inter-row temperature difference of the first column of batteries under four liquid cooling system layout schemes

液冷系统布置方案	行间温差/K
方案一	0.684 0
方案二	0.471 0
方案三	0.272 0
方案四	0.355 0

从二分口注入冷却液,入口流量一分为二流入 2 个并联分支流道。二分并联流道中的冷却液初始

温度低,有较强的吸热能力,同时冷却液流量大,又有较大的热量容纳能力,其流经同列不同行电池时,电池温度变化小,有利于降低整列电池行间温差。而交错布置则使一列电池的两端各有一个冷却液入口,两端均有低温冷却液流入,降低了电池的行间温差。

从电池模组与单列电池的 2 个尺度来看,液冷系统布置方案三为最优选择。

### 3.3 不同冷却液流速对冷却性能的影响

#### 3.3.1 液冷板无差别流速

为研究冷却液入口流速对冷却性能的影响规律,设置 4 块液冷板为相同入口流速,在入口流速分别为 0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35、0.4 m/s 7 种情况下对液冷电池模组进行仿真分析。保持其他条件不变,液冷系统布置方案选择方案三。

不同入口流速下,电池模组的最高温度、组内温差、列间温差以及压降趋势如图 10 所示。

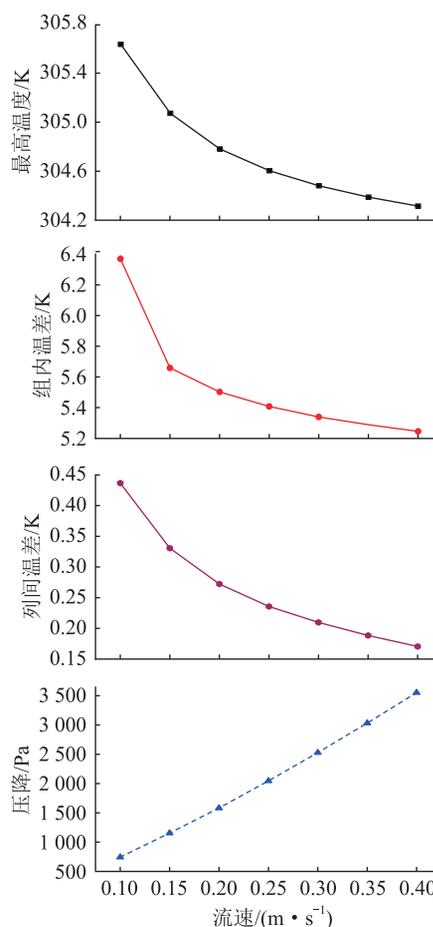


图 10 最高温度、组内温差、列间温差和压降随流速的变化曲线

Fig.10 Variation curves of maximum temperature, temperature difference within the group, intercolumn temperature difference and pressure drop with flow velocity

由图 10 可知,入口流速每提升 0.05 m/s,最高

温度分别降低为 0.562 8、0.291 0、0.177 7、0.122 7、0.092 9、0.072 7 K,其降低幅度逐渐减小。组内温差、列间温差与最高温度的趋势相似,分别从 6.370 0 K和 0.436 7 K降低至 5.245 1 K和 0.170 5 K,增加流速所起到的改善作用逐渐减弱。综合来看,适当提高冷却液流速,可以有效改善模组散热情况。但流速从 0.1 m/s 增加到 0.4 m/s,单个液冷板流道进出口压降上升了 378%。系统能耗等于冷却液流量和压降相乘,流速增加,流量和进出口压降增加,系统能耗成幂函数增加。因此,冷却液的入口流速应当控制在一定范围内,而不是无限制增大。

### 3.3.2 液冷板差异化流速

3.3.1 节中,在 4 块液冷板为相同入口流速下,提高入口流速,可以加快更新冷却液,从而使板内冷却液温度保持在较低水平,加强换热能力。图 11 为保持四板相同入口流速,在 0.15 m/s 和 0.2 m/s 流速下,1 号液冷板与 2 号液冷板的冷却液温度云图。由图可知,2 号液冷板的冷却液温度要远高于 1 号液冷板。

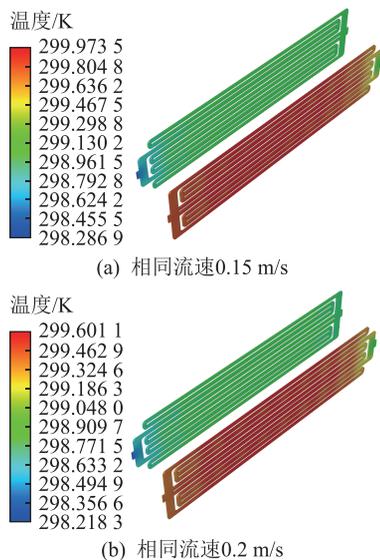


图 11 1 号液冷板与 2 号液冷板的冷却液温度云图

Fig.11 The nephograms of cooling liquid temperature for No.1 and No.2 liquid cooling plates

分析入口流速为 0.15 m/s 的实验,1 号液冷板进出口温度差值为 1.290 2 K,2 号液冷板进出口温度差值为 1.973 5 K,高于 1 号液冷板 53%。这表明在相同流速下,与 2 号液冷板相比,1 号液冷板具有一定的换热冗余能力,即冗余流量。在整体流量不变的前提下,降低 1 号与 4 号液冷板的入口流速,提高 2 号与 3 号液冷板的入口流速,对 4 块液冷板的整体流量进行差异化分配。

表 7 统计了通过调整流速对流量进行差异化分配后,5 种流速方案的仿真结果。其中方案一为 4

块液冷板保持相同流速 0.15 m/s;方案二为两侧液冷板流速为 0.1 m/s,居中液冷板流速为 0.2 m/s;方案三为两侧液冷板流速为 0.15 m/s,居中液冷板流速为 0.25 m/s;方案四为 4 块液冷板保持相同流速 0.2 m/s;方案五为两侧液冷板流速为 0.1 m/s,居中液冷板流速为 0.3 m/s。流速方案一、四为相同流速方案,方案二、三、五分别为方案一、四的差异化分配方案。差异化分配方案中的两侧液冷板指 1 号与 4 号液冷板,居中液冷板指 2 号与 3 号液冷板。

表 7 不同流速方案的液冷电池模组仿真结果

Table 7 The simulation results of liquid cooling battery modules with different flow velocity schemes

流速方案	最高温度/K	组内温差/K	列间温差/K	总压降/Pa
方案一	305.072 2	5.658 5	0.330 7	4 619.0
方案二	304.792 2	4.752 8	0.047 4	4 650.3
方案三	304.608 6	4.805 5	0.113 7	6 399.9
方案四	304.781 2	5.501 9	0.272 2	6 326.8
方案五	304.591 2	4.783 7	0.096 4	6 543.5

相较于方案一,方案二两侧液冷板流速下降 0.05 m/s,居中液冷板流速提升 0.05 m/s,整体流量相同,电池模组最高温度下降 0.280 0 K,组内温差下降 0.905 7 K,总压降仅上升 0.677%,列间温差降低 85.67%。对比方案二和方案四可知,方案二的流量仅为方案四流量的 75%,总压降比方案四低 1 676.5 Pa,能耗较方案四降低 44.87%;方案二的冷却效果远优于方案四,其电池模组组间温差比方案四低 13.62%,列间温差更是较方案四降低 82.59%。对比方案三和方案五可知,二者整体流量相同,方案五液冷板间速度差值为 0.2 m/s,方案三液冷板间速度差值为 0.1 m/s,方案五总压降大于方案三,而二者的冷却效果相近,无明显差异。综合考虑系统能耗,两侧液冷板入口流速设定为 0.1 m/s,居中液冷板入口流速设定为 0.2 m/s,即 5 种方案中方案二的冷却性能最好。

综上所述,在相同流量下,差异化流速方案在冷却性能上要远胜于相同流速方案。进一步地,通过采取差异化流速方案,可以在降低总体流量和总压降、极大改善能耗情况的同时,维持冷却性能不变。

## 4 结论

文中分析了液冷板流道结构、液冷系统布置、冷却液入口流速对液冷电池模组的最高温度、温度分布均匀性、进出口压降的影响。结论如下:

(1) 新型并联蛇形流道整体采用对称化设计,

将传统并联流道中的分支流道替换为蛇形流道结构,兼具串联折返结构的大冷却区域、长冷却距离特点和并联流道多分支结构的进出口低压降特点。仿真实验表明,在采用相同的冷却液入口流速以及温度下,并联蛇形流道的最高温度与组内温差均低于传统蛇形流道,且进出口压降显著低于传统蛇形流道,极大减小了系统能耗;单列电池尺度下,并联蛇形流道较传统并联流道减小了行间温差,改善了单列电池内的温度均匀性;单体电池尺度下,仿真实验观察热量在高度维度上的温度分布,并联蛇形流道温差低于2种传统流道。综上,新型流道具有降温效果好、节省能耗的优点。

(2) 对于优化流道结构后的液冷板,选择从二分口注入冷却液,可以有效降低液冷电池模组组内温差。液冷板交错布置使得列内电池的最高温度趋势呈倒U形,不同行电池间温度均匀性得到提高。相较于冷却液四分口注入+液冷板对称布置,维持入口流速为0.1 m/s,选择冷却液二分口注入+液冷板交错布置方案,压降略微下降,能耗减小,电池模组内温差降低9.13%,行间温差降低60.23%,显著改善了温度分布均匀性。

(3) 四板相同流速下,提高入口流速可以降低最高温度和温差,但随着流速增高,其降低幅度愈不明显,能耗显著增加。液冷板间采取差异化流速,可以在总流量不变、总压降近似的情况下,显著降低电池模组最高温度、组内温差以及列间温差,其温控性能指标甚至优于整体流量更高的方案,达到了“降本增效”的优化效果。

(4) 并联蛇形流道还存在一定的不足,无论是从二分口还是四分口注入冷却液,其进入后首先与正对入口的流道内壁撞击,产生了额外压降损耗,因此后续研究有待改善。

参考文献:

[1] 李相俊,刘晓宇,韩雪冰,等. 电化学储能电站数字化智能化技术及其应用展望[J]. 供用电,2023,40(8):3-12.  
LI Xiangjun, LIU Xiaoyu, HAN Xuebing, et al. Digitalization and intelligence technologies of electrochemical energy storage stations and their application prospects[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(8): 3-12.

[2] 李志勇,周鹏鹏,陈朋,等. 电化学储能电站协调控制器动模试验关键技术研究及应用[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(4):165-173.  
LI Zhiyong, ZHOU Pengpeng, CHEN Peng, et al. Key technologies research and application of a dynamic test for coordination controller of an electrochemical energy storage power station[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 165-173.

[3] 禹进,郭川钰,张伟阔,等. 磷酸铁锂电池在储能预制舱中的

火灾模拟及其消防应急技术仿真研究[J]. 高压技术, 2023, 49(12): 5187-5195.

YU Jin, GUO Chuanyu, ZHANG Weikuo, et al. Fire accident simulation and fire emergency technology simulation of lithium iron phosphate battery in prefabricated compartment for energy storage power station[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5187-5195.

[4] 陈银,肖如,崔怡琳,等. 储能电站锂离子电池火灾早期预警与抑制技术研究综述[J]. 电气工程学报,2022,17(4):72-87.  
CHEN Yin, XIAO Ru, CUI Yilin, et al. Research review on early warning and suppression technology of lithium-ion battery fire in energy storage power station[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(4): 72-87.

[5] 闫帅帅,陆洋,侯文会,等. 面向锂电储能系统的本质安全电池智能隔膜材料[J]. 发电技术,2022,43(5):792-800.  
YAN Shuaishuai, LU Yang, HOU Wenhui, et al. Smart separator materials of intrinsic safe lithium battery for large-scale electric energy storage[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 792-800.

[6] 周兴振,孙丙香,张智,等. 磷酸铁锂电池外短路损伤特性及熔断防护研究[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(12):78-89.  
ZHOU Xingzhen, SUN Bingxiang, ZHANG Zhi, et al. External short-circuit damage characteristics and fusion protection for lithium-iron phosphate batteries[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 78-89.

[7] 劳力. 高比能锂离子动力电池系统充电策略及热失控安全研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2020.  
LAO Li. Study on charging strategy and thermal runaway safety of high specific energy lithium ion power battery system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.

[8] 王怀铷. 磷酸铁锂储能电池过充热失控特性研究[D]. 郑州:郑州大学,2021.  
WANG Huairu. Research on overcharging thermal runaway characteristic of lithium iron phosphate energy storage battery [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021.

[9] 牛志远,王怀铷,金阳,等. 不同倍率下磷酸铁锂电池模组过充热失控特性研究[J]. 电力工程技术,2021,40(4):167-174.  
NIU Zhiyuan, WANG Huairu, JIN Yang, et al. Overcharging and runaway characteristics of lithium iron phosphate battery modules at different rates[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 167-174.

[10] 李正力,李肖辉,王京,等. 锂离子电池储能电站热失控预警与防护研究进展[J]. 高压电器,2024,60(1):87-99.  
LI Zhengli, LI Xiaohui, WANG Jing, et al. Research progress on thermal runaway warning and protection of lithium-ion battery in energy storage power station[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 87-99.

[11] 姚薇. 基于直冷及相变材料散热的电池组热管理系统研究[D]. 杭州:浙江大学,2022.

- YAO Wei. Research on battery pack thermal management system based on direct cooling and phase change material heat dissipation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [12] 赵泓伍. 基于相变材料与热管的大容量锂离子电池热管理技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- ZHAO Hongwu. Research on battery thermal management of large-capacity lithium-ion battery based on phase change material and heat pipe[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [13] 潘乐平. 电动汽车锂离子电池热失控安全防护系统的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- PAN Leping. Research on safety protection system of lithium-ion battery thermal runaway in electric vehicle[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2022.
- [14] SU T L, LYU N W, ZHAO Z X, et al. Safety warning of lithium-ion battery energy storage station via venting acoustic signal detection for grid application[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 38: 102498.
- [15] WANG Z P, YUAN J, ZHU X Q, et al. Overcharge-to-thermal-runaway behavior and safety assessment of commercial lithium-ion cells with different cathode materials: a comparison study[J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 55: 484-498.
- [16] XU J, CHEN Z L, QIN J, et al. A lightweight and low-cost liquid-cooled thermal management solution for high energy density prismatic lithium-ion battery packs[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 203: 117871.
- [17] CHEN J H, ZHAO X B, WANG B, et al. Multiobjective optimization of air-cooled battery thermal management system based on heat dissipation model[J]. Ionics, 2021, 27(3): 1307-1322.
- [18] TOUSI M, SARCHAMI A, KIANI M, et al. Numerical study of novel liquid-cooled thermal management system for cylindrical li-ion battery packs under high discharge rate based on AgO nanofluid and copper sheath[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 41: 102910.
- [19] 刘自强. 复合相变材料与液冷耦合的动力电池热管理系统的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- LIU Ziqiang. Study on thermal management system of power battery coupled with composite phase change material and liquid cooling[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [20] 王泽旭, 李冰辰, 许瑶, 等. 基于过冷相变材料热开关的锂离子电池热管理系统[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 328-340.
- WANG Zexu, LI Bingchen, XU Yao, et al. Lithium-ion battery thermal management system based on the combination of supercooled phase change material and thermal switch[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 328-340.
- [21] PATIL M S, SEO J H, PANCHAL S, et al. Numerical study on sensitivity analysis of factors influencing liquid cooling with double cold-plate for lithium-ion pouch cell[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(2): 2533-2559.
- [22] 钟肇达. 18650 型锂离子动力电池组液体冷却系统的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- ZHONG Zhaoda. Research on liquid cooling system for the 18650 li-ion power battery module[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [23] YATES M, AKRAMI M, JAVADI A A. Analysing the performance of liquid cooling designs in cylindrical lithium-ion batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 33: 100913.
- [24] KARTHIK A, KALITA P, GARG A, et al. A novel MOGA approach for power saving strategy and optimization of maximum temperature and maximum pressure for liquid cooling type battery thermal management system[J]. International Journal of Green Energy, 2021, 18(1): 80-89.
- [25] TAN X J, LYU P X, FAN Y Q, et al. Numerical investigation of the direct liquid cooling of a fast-charging lithium-ion battery pack in hydrofluoroether[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 196: 117279.
- [26] TANG Z G, GAO Q, LI J, et al. Numerical analysis of temperature uniformity of liquid cooling based battery module with incremental heat transfer area[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2020, 12(5): 051006.
- [27] 冉艳. 电动汽车锂离子动力电池组热管理系统优化设计[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- RAN Yan. Optimization design of thermal management system for lithium-ion power battery pack of electric vehicle[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [28] SHEN J B, WANG Y P, YU G Z, et al. Thermal management of prismatic lithium-ion battery with minichannel cold plate[J]. Journal of Energy Engineering, 2020, 146(1): 1-11.
- [29] MONIKA K, CHAKRABORTY C, ROY S, et al. An improved mini-channel based liquid cooling strategy of prismatic LiFePO<sub>4</sub> batteries for electric or hybrid vehicles[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 35: 102301.
- [30] XU Y R, LI X X, LIU X Y, et al. Experiment investigation on a novel composite silica gel plate coupled with liquid-cooling system for square battery thermal management[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 184: 116217.

#### 作者简介:



罗心源

罗心源(1997), 男, 硕士在读, 研究方向为储能安全(E-mail: 469813682@qq.com);

金阳(1989), 男, 博士, 教授, 研究方向为电网储能技术。

## Modeling and analysis of sliding motion of arc root along OGW during lightning strike

GUO Deming<sup>1,2</sup>, LIN Ziming<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>1,2</sup>, WANG Peifeng<sup>1</sup>, PENG Xiangyang<sup>3</sup>, WANG Rui<sup>3</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangdong Artificial Intelligence and Digital Economy Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 510335, China;

3. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Overhead ground wire (OGW) is an important equipment to prevent transmission wire from being struck by lightning. When OGW is struck by lightning, the sliding motion of arc root causes different damage mechanism. Therefore, it is necessary to analyze the sliding motion of arc root first, so as to provide data support of sliding displacement for the research of damage mechanism. In this paper, the sliding motion model of arc root along OGW is established based on the arc chain modeling method. By analyzing the main influence range of the electromagnetic force, the space boundary of modeling is narrowed, so the calculation amount is greatly reduced. Then, the model is verified by the needle-wire discharge experiment in the laboratory. Finally, based on the established model, the factors affecting the sliding displacement of arc root are analyzed, including thermal buoyancy, return stroke and continuous current. The results show that the effect of thermal buoyancy can be ignored under the action of return stroke. The sliding displacement of arc root is positively correlated with the wavelength time, but not with the wave head time. However, under the action of continuous current, thermal buoyancy affects the evaluation result of arc root sliding displacement, and the maximum error is more than 25%.

**Keywords:** lightning strike; arc root; sliding motion; overhead ground wire (OGW); arc chain model; return stroke; continuous current

(编辑 李栋)

(上接第 169 页)

## Design and optimization of liquid cooled parallel serpentine flow channel structure for lithium battery modules

LUO Xinyuan, JIN Yang

(School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Lithium ion batteries are widely used in chemical energy storage systems. However, due to their inherent heat generation characteristics, thermal runaway has become a major safety hazard for chemical energy storage power plants. Therefore, optimizing the design of a battery thermal management system to effectively avoid thermal runaway is crucial for the safe operation of chemical energy storage systems. A new type of parallel serpentine flow channel liquid cooling plate with both series turn back and parallel branch structures is designed. Through simulation experiments, the effects of the flow channel structure of the liquid cooling plate, the layout of the liquid cooling system, and the inlet flow velocity of the coolant on the maximum temperature, temperature uniformity, and inlet and outlet pressure drop are studied to optimize the liquid cooling system. The results show that, under the same coolant inlet flow rate, the maximum temperature of the new channel is reduced by 0.284 9 K, and the temperature difference within the module is reduced by 0.466 3 K compared with the traditional parallel flow channel. The inlet and outlet pressure drop is reduced by 40.18% compared with the traditional serpentine flow channel. Based on the parallel serpentine flow channel liquid cooling plate, the optimal layout scheme for the liquid cooling system is the injection of coolant at the two split ports and the staggered arrangement of the liquid cooling plate. Different liquid cooling plates have different flow velocity settings. The inlet flow velocity of the two liquid cooling plates is set to 0.1 m/s, and the inlet flow velocity of the central liquid cooling plate is set to 0.2 m/s. Compared with the same flow velocity of 0.2 m/s for the four plates, the temperature difference within the battery module group is reduced by 13.62%, the inter column temperature difference is reduced by 82.59%, and the energy consumption is reduced by 44.87%, achieving an optimization effect of 'cost reduction and efficiency enhancement'. A reasonable flow channel structure, staggered cold plate layout, and differentiated inlet flow rate design can optimize the liquid cooling system of battery modules and increase the safety of battery module operation.

**Keywords:** lithium ion battery module; thermal management; liquid cooling; parallel serpentine liquid cooling plate; layout of liquid cooling plate; differential flow velocity

(编辑 陆海霞)