DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.210 **中图分类号**：TM912 **文献标志码**：A

液冷-风冷耦合的锂离子电池热管理研究及优化

王见信，王 斌，马淑倩
(甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司，兰州 730000)

摘要：高效的电池热管理系统对于电池的性能和安全性至关重要。提出一种液冷-风冷耦合的锂离子电池热管理系统，分析了冷却工质流速和电池径向热导率对系统冷却性能的影响，并研究了液冷-风冷复合系统对电池散热特性的综合效果。研究结果表明，增大冷却工质流速，在提高冷却性能的同时会导致压降增大，使得系统功耗增加和经济性降低；电池热导率的各向异性特征越明显，其温度分布均匀性越差。通过提高电池径向热导率，有效降低了电池的最高温度并提高了其温度均匀性。与单一液冷系统相比，液冷-风冷复合系统显著优化了电池模组的温度分布和散热性能，电池最高温度降低了3.20 K，最大温差降低了3.36 K。此外，采用间歇式风冷运行策略能有效降低系统能耗，同时保持电池在最佳温度范围内运行。

关键词：锂离子电池；复合热管理系统；液冷-风冷；热导率各向异性；优化设计

Research and Optimization of Thermal Management for Lithium-ion Batteries with Liquid Cooling-air Cooling Coupling

WANG Jianxin, WANG Bin, MA Shuqian
(Gansu Water Resources and Hydroelectric Investigation and Design & Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: An efficient battery thermal management system is crucial for the performance and safety of batteries. A liquid cooling-air cooling coupling thermal management system for lithium-ion batteries was proposed, and the effects of coolant flow rate and radial thermal conductivity of batteries on the system's cooling performance were analyzed. In addition, the comprehensive effect of the liquid cooling-air cooling composite system on the heat dissipation characteristics of batteries was also investigated. Results show that increasing the coolant flow rate can improve the cooling performance while leading to an increase in pressure drop, resulting in higher system power consumption and a lower economic efficiency. The more pronounced the anisotropic characteristics of battery thermal conductivity, the worse the uniformity of temperature distribution. By increasing the radial thermal conductivity of batteries, the maximum temperature of batteries was effectively reduced, and the temperature uniformity was also improved. Compared with a single liquid cooling system, the liquid cooling-air cooling composite system significantly optimized the temperature distribution and heat dissipation performance of the battery module, e.g., the maximum temperature was reduced by 3.20 K, and the maximum temperature difference was reduced by 3.36 K. Moreover, adopting an intermittent air cooling operation strategy can effectively reduce the system energy consumption while maintaining the operation of batteries within the optimal temperature range.

Keywords: Lithium-ion battery; composite thermal management system; liquid cooling-air cooling; anisotropic thermal conductivity; optimization design

收稿日期：2024-02-23；**修回日期**：2024-04-05，2024-05-26，2024-06-28，2024-07-23；**录用日期**：2024-09-15；**网络首发日期**：2024-09-26

交通运输行业长期以来被视为全球温室气体排放的主要来源。电动汽车凭借其高能源利用效率和较低污染物排放等优势，逐渐成为传统燃油汽车

的有效替代品[1]。锂离子电池因其低自放电率、长循环寿命和高比能量，已成为电动汽车动力源的首选方案[2-3]。然而，在充放电过程中，锂离子电池由于欧姆内阻和化学反应的影响，会产生热量积聚，这可能导致电池过热，进而使得电池模组内的最高温度和温差过高，严重影响电池的性能和安全[4-5]。锂离子电池的性能对温度极其敏感，其最佳工作温度范围为 20~40 ℃，而电池模组的最大温差应控制在 5 ℃以内[6]，温度超过 60 ℃时，电池可能会发生热失控，导致电池出现起火或爆炸的风险[7]。因此，电池热管理系统在确保电池模组维持在最佳温度范围内工作方面显得尤为重要。

目前，电池的热管理系统根据冷却介质可分为风冷、液冷、相变材料冷却及复合冷却系统[8-9]。其中，液冷系统因其传热效率高、能耗低的特点而被广泛应用，成为大功率和高能量密度应用中，尤其是电动汽车电池管理中的首选技术。针对圆柱形电池侧面呈弯曲结构且侧面面积显著大于底部面积的特点，目前采用的液冷技术一方面是设计适合电池侧面的管道[10]，另一方面是设计与电池侧面相匹配的导热块，并通过均匀分布的冷却通道有效传递和散发热量[11-12]。Rao 等[11]提出了一种导热块接触面可变的冷却系统，结果表明，该系统优于导热块接触面恒定的冷却系统，使用具有不同接触表面的导热块可显著提高电池组的温度均匀性。

基于液冷技术对圆柱形电池的研究，大多数研究人员专注于确保电池组在合理的温度范围内运行并减少不同电池之间的温差[13]，而忽略了单体电池本身的温度均匀性，未考虑电池自身热物性参数对冷却系统性能的影响；同时，液冷系统所使用的液冷板无法完全覆盖整个电池模组，中间部分电池均与 2 块液冷板壁面接触散热，最外面的电池仅与 1 块液冷板壁面接触散热，导致电池模组温差较大[14]，这种不平衡的温度分布会影响电池的工作效率，也会显著缩短电池的使用寿命。为解决上述问题，本文基于液冷电池热管理系统，分析了冷却介质流速和电池径向热导率与电池模组冷却性能的关系；在此基础上，结合风冷技术，研究了液冷和风冷相结合的复合冷却系统对电池模组散热特性的影响。

1　模型建立

1.1　电池模组构建

本研究选取 18650 型 NCM 三元锂电池构建电池模组，标称容量为 2.6 A·h，标称电压为 3.6 V。模型构建过程中将单体电池简化为直径 18 mm、高度 65 mm 的圆柱体。电池模组冷却系统结构如图 1(a)所示，包含 24 节单体电池和 3 组液冷板，单块液冷板厚度为 8 mm，在液冷板的长度方向上布置壁厚为 1 mm 的圆柱形冷却介质通道，流经冷却通道的冷却介质将液冷板吸收的热量从电池中带走，为确保电池散热均匀，3 组液冷板沿电池轴向均匀布置。构建的电池模组冷却系统中，内部电池均与 2 块液冷板壁面接触散热，但最外侧的电池仅与 1 块液冷板壁面接触散热，因此，电池组中最外侧的电池具有最高的热负荷。考虑到电池模组具有高度几何对称性，且需捕捉关键热特性、评估研究中冷却系统的性能，选择非中间区域 2 排电池和 1 组液冷板作为研究对象，进行数值模拟研究，如图 1(b)和(c)所示。

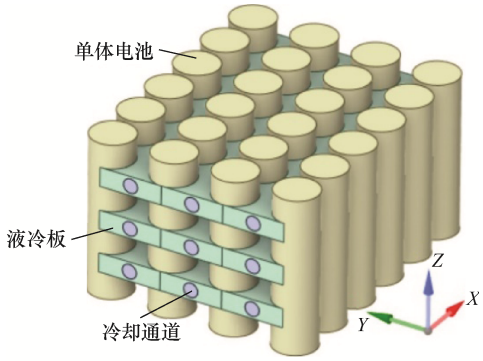
1.2　电池模型

本研究中电池产热计算选用 Bernardi 等提出的产热模型[15]，其产热方程为

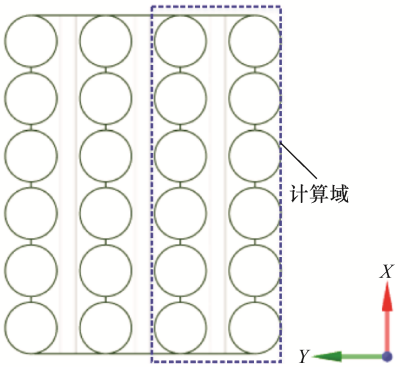
$$q_{\mathrm{b}}=\frac{1}{V_{\mathrm{b}}}\left(I^{2}R_{\mathrm{b}}-IT_{\mathrm{b}}\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}T}\right) \tag{1}$$

式中：q_{b} 为电池产热速率；V_{b} 为电池体积，m^3；I 为电池放电电流，A；R_{b} 为电池总内阻，Ω；T_{b} 为温度，K；$\mathrm{d}U/\mathrm{d}T$ 为电池熵系数，V/K。

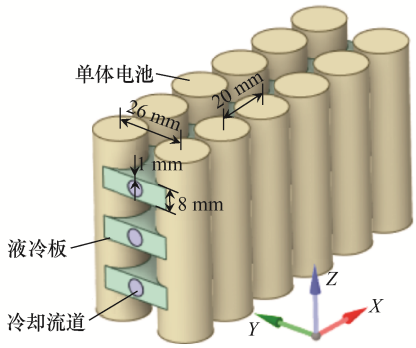
在整个放电过程中，假设电池产热速率 q_{b} 为恒定值，电池总内阻 R_{b} 为恒温常量，取值 2.855×10^{-2} Ω，电池熵系数 $\mathrm{d}U/\mathrm{d}T$ 取值 3×10^{-4} V/K[16]。在 298.15 K、3C 倍率放电条件下，计算得到电池体积产热速率为 1.11×10^{5} W/m^3。



(a) 电池模组冷却系统结构



(b) 研究对象俯视图



(c) 研究对象结构

图 1 电池模组冷却系统结构示意

Fig. 1 Schematic of structure of cooling system for battery module

1.3 控制方程及边界条件

在构建锂离子电池三维热数学模型时，假设电池内部产热均匀，其能量守恒方程[17]为

$$\rho_{\mathrm{b}} c_{\mathrm{b}} \frac{\partial T_{\mathrm{b}}}{\partial t}=\left(\lambda_x \frac{\partial^2 T_{\mathrm{b}}}{\partial x^2}+\lambda_y \frac{\partial^2 T_{\mathrm{b}}}{\partial y^2}+\lambda_z \frac{\partial^2 T_{\mathrm{b}}}{\partial z^2}\right)+q_{\mathrm{b}} \tag{2}$$

式中：ρ_{b} 为电池密度，kg/m^3；c_{b} 为电池比热容，J/(kg·K)；t 为时间，s；λ_x、λ_y、λ_z 分别为电池轴向、径向和周向的热导率，W/(m·K)。

冷却介质水遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒[17]，表达式为

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u}=0 \tag{3}$$

$$\rho_{\mathrm{w}} \nabla \cdot(\boldsymbol{u} \boldsymbol{u})+\nabla P-\mu_{\mathrm{w}} \Delta \boldsymbol{u}=0 \tag{4}$$

$$\rho_{\mathrm{w}} c_{\mathrm{pw}} \frac{\partial T_{\mathrm{w}}}{\partial t}+\nabla \cdot\left(\rho_{\mathrm{w}} c_{\mathrm{pw}} \boldsymbol{u} T_{\mathrm{w}}\right)-\nabla \cdot\left(k_{\mathrm{w}} \nabla T_{\mathrm{w}}\right)=0 \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{u}$ 为速度矢量，m/s；ρ_{w} 为水的密度，kg/m^3；P 为静压力，Pa；μ_{w} 为动力黏度，Pa·s；c_{pw} 为水的比热容，J/(kg·K)；T_{w} 为水的温度，K；k_{w} 为水的热导率，W/(m·K)。

冷却介质水可看作不可压缩的均质流体且热物性参数恒定。雷诺数 Re 可作为判断冷却液流动状态是层流或湍流的依据，其计算式为

$$Re=\frac{\rho_{\mathrm{w}} v_{\mathrm{w}} d}{\mu_{\mathrm{w}}} \tag{6}$$

式中：v_{w} 为截面方向速度，m/s；d 为管道当量直径，m。

瞬态模拟用于研究锂离子电池在 3C 放电倍率下的热特性，使用 Ansys Fluent 对流动和传热进行仿真分析。后续工作中每个冷却通道的冷却介质入口流速变化范围为 0~0.200 m/s，得到最大 Re= 1 194.26<2 300.00，可知流动状态为层流，计算中选用层流模型；入口和出口边界条件分别为速度入口和压力出口；环境温度为 298.15 K，冷却水、液冷板和电池初始温度均为 298.15 K，与环境温度相同；与空气接触的电池表面和液冷板换热视为对流换热，对流换热系数取值 5 W/(m^2·K)[18]。参考软件内置参数及相关文献[16]，数值计算采用的材料属性参数见表 1。

1.4 网格划分及独立性检验

网格的大小和数量影响模拟结果的准确性。通常网格数越多，计算精度越高。然而，当网格数量增加至一定数值时，其计算精度没有或仅略有提高。因此，验证所建立模型的网格独立性对计算结果的影响至关重要。采用 0.100 m/s 的冷却流速研究了不同网格数量对电池最高温度和冷却介质压降的影响，随着网格数量的增加，电池最高温度逐

表 1　模拟中使用的材料属性参数

Tab. 1 Property parameters of materials used in simulation

材料	密度/(kg·m^{-3})	比热容/[J·(kg·K)$^{-1}$]	导热系数/[W·(m·K)$^{-1}$]	动力黏度/(Pa·s)
电池	2 707.900	1 242.38	λ_y=1.220 0 λ_x=λ_z=34.400 0	—
铝	2 719.000	871.00	202.400 0	—
空气	1.225	1 006.43	0.024 2	1.789 4×10^{-5}
水	998.200	4 128.00	0.600 0	1.003 0×10^{-3}

渐上升，如图 2 所示。当网格数量从 532 976 增加至 690 185 时，电池最高温度从 307.80 K 增加至 307.87 K，仅增加 0.07 K，冷却介质压降从 21.88 Pa 降低至 21.77 Pa，仅降低 0.11 Pa。基于网格独立性分析结果，兼顾后期计算的效率和准确性，后续模拟计算选择 532 976 的网格划分方法。电池模组网格划分结果如图 3 所示。

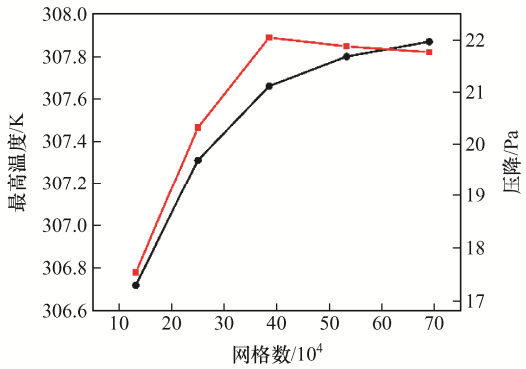


图 2　网格独立性检验

Fig. 2 Grid independence test

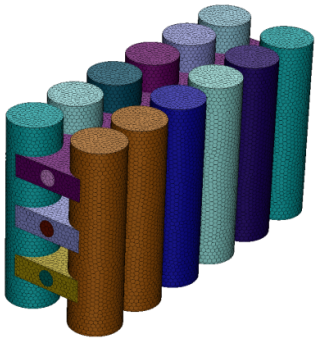


图 3　电池模组网格划分

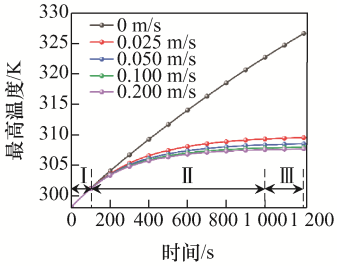
Fig. 3 Grid division of battery module

2　结果与讨论

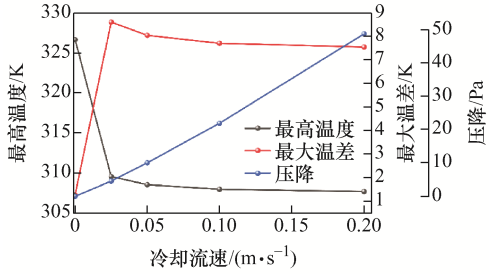
2.1　冷却流速对系统冷却性能的影响

冷却流速是影响液冷电池热管理系统设计和性能的关键参数。本节探讨了不同流速下液冷电池热管理系统的温度分布和冷却性能，研究过程中，将电池组看作 1 个整体，实时监测其最高温度、最低温度和最大温差。依据前期的文献调研及典型液冷系统的工作条件[11]，每个冷却通道的冷却介质入口流速变化范围为 0~0.200 m/s，不同冷却流速条件下电池模组的温度分布如图 4 所示。在无冷却条件(流速为 0)和冷却流速为 0.025 m/s 的条件下，电池最高温度从 326.66 K 降低至 309.51 K，减少了 17.15 K，说明了液冷系统有着明显的降温效果，而最大温差从 1.27 K 升高到 8.61 K，升高了 7.34 K。电池模组最高温度降低而最大温差升高，这主要是因为液体冷却介质流过电池时，电池表面散热热流密度增大，表面散热更加有效，而电池内部的热量传导速度相对较慢，从而产生了温度梯度。随着冷却能力的进一步提高，内部热量能够更有效地被带走，温度梯度会逐渐减小。由图 4(a)可知冷却过程中电池最高温度随放电时间变化，该过程分为 3 个阶段：阶段Ⅰ(0~100 s 左右)，放电初始，电池最高温度随放电时间线性上升，且基本上不受冷却流速的影响，这主要是因为冷却介质、液冷板和电池模组之间的温差较小，电池温度正在快速上升；阶段Ⅱ(100~1 000 s 左右)，放电中期，电池最高温度随时间呈非线性上升，随冷却流速的增加，非线性程度减弱、电池最高温度降低，这是由于冷却介质、液冷板和电池模组之间存在一定温差，该阶段热交换强度较强，电池模组温度的快速上升受到了限制；阶段Ⅲ(1 000~1 200 s 左右)，放电末期，电池最高温度达到峰值，且随着放电时间的变化电池最高温度几乎不再变化，以 0.100 m/s 流速为例，在电池放电末期阶段Ⅲ，电池最高温度分别为 307.75 K

和 307.87 K，温差仅为 0.12 K。该阶段冷却介质、液冷板和电池模组之间达到热平衡，电池温度整体稳定。



(a) 最高温度随时间变化



(b) 最高温度、最大温差和压降随冷却流速变化

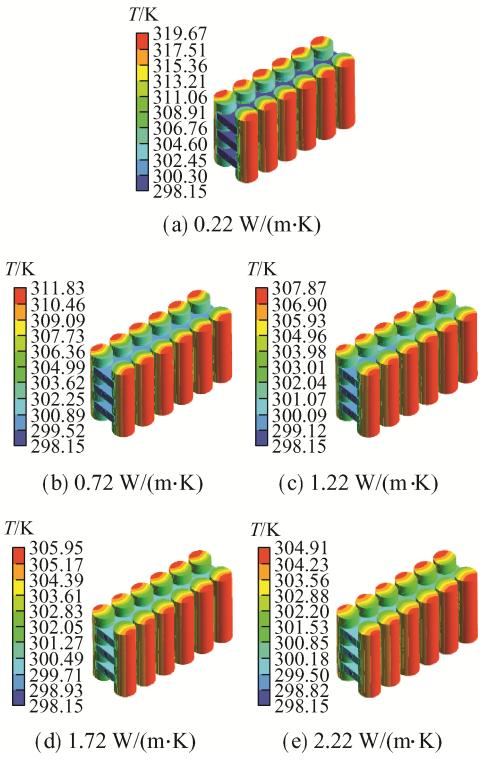
图 4 不同入口流速条件下电池模组的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of battery module under different inlet velocity conditions

电池放电结束时，冷却介质流速越高，电池最高温度越低，电池最低温度下降至冷却介质温度附近并保持稳定，此时最大温差主要受最高温度影响。图 4(b)清楚地描绘了最高温度、最大温差、压降与冷却流速之间的关系。当冷却流速增大时，最高温度和最大温差减小，且变化幅度逐渐减小。即当冷却流速达到一定水平，以增加系统功耗为代价来增加流速仅能略微提高系统冷却性能，这并不是最优选择。系统的功耗可用冷却通道的压降来表征，当冷却流速从 0.100 m/s 增加至 0.200 m/s 时，电池最高温度从 307.87 K 降低至 307.56 K，仅减少了 0.10%；最大温差从 7.71 K 降低至 7.55 K，仅减少了 2.08%；而压降从 21.88 Pa 增大到 48.72 Pa，增加了 122.67%。综合考虑液冷系统冷却性能和功耗，冷却流速最佳取值为 0.100 m/s，此时，电池模组最高温度为 307.87 K，最大温差为 7.71 K。

2.2 电池径向热导率对系统冷却效率的影响

圆柱形锂离子电池因内部层状卷绕结构，其径向热导率比轴向热导率低约 2 个数量级，其热导率呈现各向异性[19]。电池的径向热导率直接影响其散热性能和冷却效率，理解电池热导率的各向异性对于设计高效的热管理系统至关重要。电池模组在不同径向热导率下，放电结束时温度分布如图 5 所示。由图 5 可见，电池的最高温度随径向热导率的减小而增大，当电池径向热导率从 0.22 W/(m·K)增加至 2.22 W/(m·K)时，电池模组最高温度从 319.67 K 降低至 304.91 K，降低了 4.62%。相比电池径向热导率对电池最高温度的影响，其对电池最大温差的影响更为显著，不同径向热导率条件下电池温度变化情况见表 2。在 0.22 W/(m·K)和 2.22 W/(m·K)时，电池最大温差为 18.66 K 和 4.89 K，降低了 73.79%。可见，电池热导率各向异性特征越明显，其温度分布均匀性越差。



(a) 0.22 W/(m·K)

(b) 0.72 W/(m·K)

(c) 1.22 W/(m·K)

(d) 1.72 W/(m·K)

(e) 2.22 W/(m·K)

图 5 不同径向热导率条件下电池温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of batteries under different radial thermal conductivity conditions

电池径向热导率也是影响系统冷却效率的关键因素。液冷电池热管理系统通过冷却介质来吸收和分散电池产生的热量，热导率较高意味着热量可

以快速从电池内部传导到外部，在这种情况下，即使使用相对简单或较小面积的液冷系统，也能有效传递热量，从而保持电池在最佳温度范围内运行；相反，在热导率较低的情况下，热量传导至电池表面的速度较慢，限制了热量被冷却介质带走的速度，需要更大流量的冷却介质或更加密集的冷却通道布局来补偿热交换效率上的不足，这将使液冷系统能耗增加，需要更高的能量输入才能保持电池温度的稳定。因此，在设计电池模组冷却系统时，应充分考虑电池的热物理特性，确保系统兼具有效性与经济性，保障电池运行性能与安全。

表 2　不同径向热导率条件下电池温度变化情况

Tab. 2 Temperature variation of batteries under different radial thermal conductivity conditions

径向热导率/[W·(m·K)$^{-1}$]	最高温度/K	最低温度/K	温差/K
0.22	319.67	301.01	18.66
0.72	311.83	300.42	11.41
1.22	307.87	300.16	7.71
1.72	305.95	300.10	5.85
2.22	304.91	300.02	4.89

2.3 液冷-风冷复合冷却系统散热性能分析

液冷系统电池放电结束时，电池组整体温度分布如图 6 所示，电池组外侧温度明显高于内侧温度，原因是电池仅内侧有液冷板、外侧无液冷板，进而导致电池模组产生较大的温度梯度，本节将液冷-风冷复合冷却技术作为此问题的解决方案，保持液冷系统最佳参数，冷却介质流速为 0.100 m/s，电池模组最高温度为 307.87 K，最大温差为 7.71 K，将冷却空气直接吹向电池外部，降低相应部位的温度，使电池温度不均匀性降到最低。液冷-风冷耦合的锂离子电池热管理系统原理如图 7 所示，风扇布置在电池组的外侧，风扇驱动的冷却空气流经格栅，均匀地流经电池组。需要说明的是，在电动汽车的应用中，液冷-风冷复合冷却系统必须采用防水风冷组件，并对整个系统进行密封处理，以满足电池的安全标准，确保电池在潮湿和涉水环境下仍能安全运行。本文研究重点为通过优化冷却系统设计，提高电池模块的热管理性能，以确保其在最佳温度范围内安全运行。因此，关于液冷-风冷复合冷却系统的防水设计，本文不做详细分析。

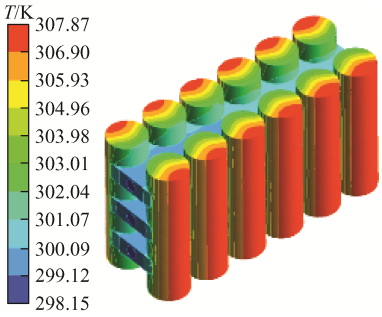


图 6　电池放电结束时的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of batteries at the end of discharge

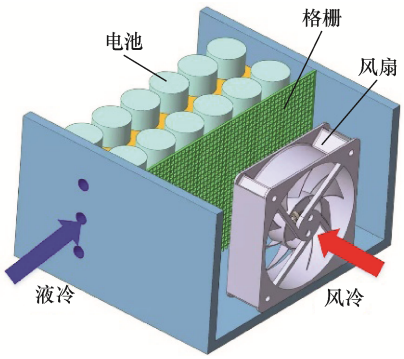
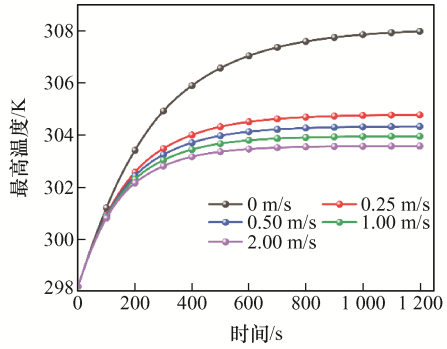


图 7　液冷-风冷耦合的锂离子电池热管理系统原理

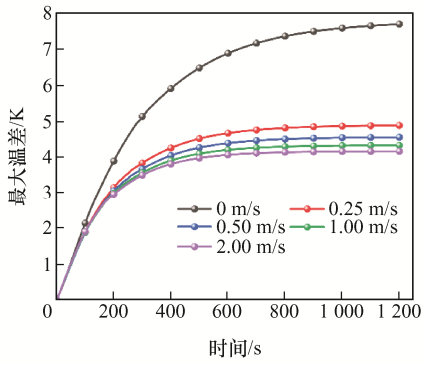
Fig. 7 Schematic of thermal management system for lithium-ion batteries with liquid cooling-air cooling coupling

液冷-风冷复合冷却系统下电池模组温度分布如图 8 所示，可以观察到，与液冷系统(冷却风速为 0 m/s)相比，复合风冷后，电池模组最高温度和最大温差明显下降，这是因为风冷系统主要靠空气流动将热量带走，随着风速提升，能够更快地将电池产生的热量转移至环境中，整个散热过程中，空气流动导致的热对流起主导作用，显著降低了电池内部热传导的影响。提高冷却风速可以降低电池最高温度，但随着风速进一步增大，温度变化幅度逐渐减小。类似于调节冷却流速的现象，风速的增加也会导致电池组内部和风道中的压力损失增加，不同风速下电池组压力损失的变化如图 9 所示。结合

图 8 分析可知，当风速从 1.00 m/s 增加至 2.00 m/s 时，电池最高温度从 304.67 K 降低至 304.30 K，仅减少了 0.12%；最大温差从 4.35 K 降低至 4.20 K，仅减少了 3.45%；而压力损失从 43.22 Pa 增大至 130.37 Pa，增加了 201.64%。综合考虑复合系统冷却性能和功耗，冷却风速最佳取值为 1.00 m/s。此时，电池最高温度从 307.87 K 降低至 304.67 K，降低了 3.20 K。最大温差从 7.71 K 降低至 4.35 K，降低了 3.36 K。



(a) 最高温度



(b) 最大温差

图 8 复合冷却系统下电池放电结束时的温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of batteries at the end of discharge under composite cooling system

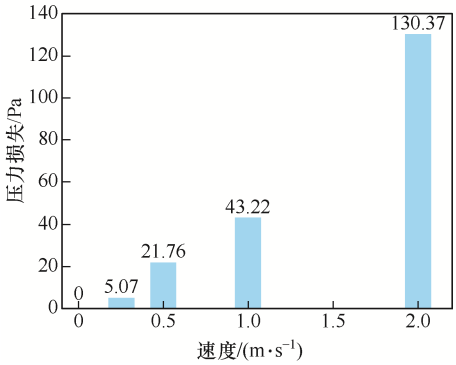


图 9 不同风速下电池组压力损失变化

Fig. 9 Variations of pressure loss of battery pack at different wind speeds

复合风冷增加了系统功耗，因此需要对复合冷却系统功耗进行优化。本研究提出间歇式风冷运行策略以降低系统功耗，冷却间歇时间分别为 50、100、200、300 和 600 s。间歇式风冷运行策略的系统功耗为每个间歇周期内系统的平均功耗，其计算式为

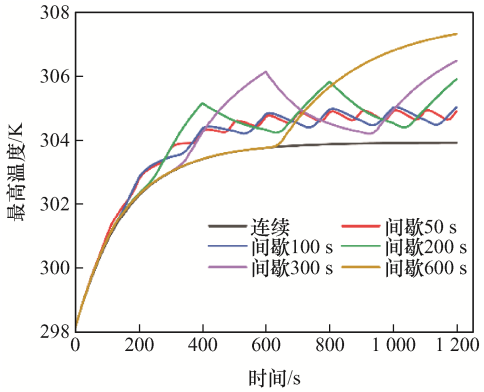
$$P_{\mathrm{i}}=\frac{t_1P_1+t_2P_2}{t_1+t_2} \tag{7}$$

式中：t_1 为运行时间，s；t_2 为关闭时间，s；P_1 为系统运行时的功耗，W；P_2 为系统关闭时的功耗，取值为 0。

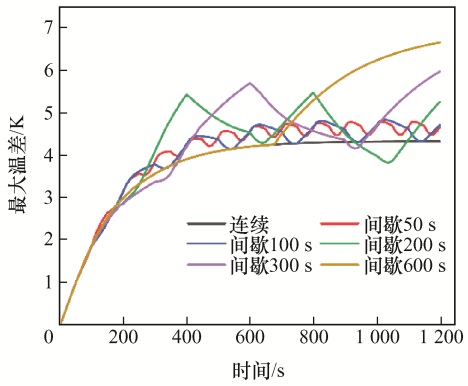
以连续风冷运行策略的系统功耗 P_{c} 为基准，功耗降低百分比 φ 的计算式为

$$\varphi=\left(1-\frac{P_{\mathrm{i}}}{P_{\mathrm{c}}}\right)\times 100\% \tag{8}$$

相比连续风冷运行策略，采用间歇式风冷运行策略后系统功耗降低了 50%，可见间歇式风冷运行策略显著降低了系统功耗。不同风冷运行策略条件下电池最高温度和最大温差分布如图 10 所示。由图 10 可见，风冷运行策略显著影响电池最高温度和最大温差，连续风冷运行策略在控制电池温度方面最为有效，能够将电池的最高温度和最大温差维持在较低水平；在间歇式风冷策略下，风扇的关闭导致电池热量积聚，从而使得电池的最高温度和最大温差升高，该现象在冷却间歇时间较大时尤为明显。连续风冷运行策略对应电池最高温度和最大温差最低，分别为 303.93 K 和 4.33 K；冷却间歇时间 600 s 时风冷运行策略对应电池最高温度和最大温差最高，分别为 307.33 K 和 6.66 K。为直观对比液冷-风冷耦合热管理系统在不同运行策略下的冷却性能，表 3 给出了不同运行策略条件下电池模组的最高温度、最低温度及最大温差。锂离子电池的性能对温度极其敏感，其最佳工作温度范围为 293.15~313.15 K，电池模组的最大温差应在 5.00 K 以内，以此标准来选择风冷运行策略，冷却间歇时间



(a) 最高温度



(b) 最大温差

图 10　不同风冷运行策略下电池的温度分布

Fig. 10 Temperature distribution of batteries under different air cooling operation strategies

100 s 为最优策略，此时，电池最高温度为 305.06 K，最大温差为 4.73 K。因此，在确保电池的运行温度在最佳范围内且冷却系统功耗较高时，可采用间歇式风冷运行策略以降低系统功耗。

目前，市面上许多主流电动汽车制造商(如特斯拉、宝马、奔驰等)，均在其高性能电动汽车中采用了液冷热管理系统。本文研究的液冷-风冷耦合的锂离子电池热管理系统，在理论技术层面对于电动汽车的热管理应用具备一定的可行性。在该系统中，液冷系统可提供较高的热传递效率，非常适合于高负荷工作条件和快速充放电场景下的散热，风冷系统作为液冷系统的辅助系统，适用于日常低负荷状况下的热管理以减少能耗。此外，该系统应用于电动汽车热管理的优势在于其能够根据不同的运行条件优化能量使用和冷却效率。低负荷状况时，风冷是更为经济和节能的选择，因为其不需要液冷系统中的水泵和其他辅助设备的连续运作；在环境温度较高或者在电池充放电速率高的情况下，可以启动液冷系统以提供更有效的冷却性能，保持电池的温度在最佳工作范围内；在极端条件下，如在高速行驶或在高温环境中长时间工作时，液冷和风冷系统可以同时启动，以确保热量可以尽可能高效地从电池中被带走。

表 3　不同运行策略下的电池模组温度变化

Tab. 3 Temperature variation of battery module under different operation strategies

风冷运行策略	最高温度/K	最低温度/K	最大温差/K	电池模组温度是否在最佳区间 (最高温度<313.15 K，最大温差<5.00 K)
连续	303.93	299.60	4.33	是
间歇 50 s	304.91	300.25	4.66	是
间歇 100 s	305.06	300.33	4.73	是
间歇 200 s	305.91	300.46	5.45	否
间歇 300 s	306.49	300.52	5.97	否
间歇 600 s	307.33	300.67	6.66	否

3　结论

本文以圆柱形锂离子电池模组为研究对象，基于液冷热管理系统分析了冷却流速和电池径向热导率与电池模组冷却性能的关系；并结合风冷技术，研究了液冷和风冷复合冷却系统对电池模组散热特性的影响。

(1)冷却流速增大，电池最高温度和最大温差减小，当冷却流速达到一定水平时，增加流速仅能略微提高系统冷却性能。综合考虑液冷系统冷却性能和功耗，冷却流速最佳取值为 0.100 m/s，此时，电

池组最高温度为 307.87 K，最大温差为 7.71 K。

(2)电池热导率各向异性特征越明显，其温度分布均匀性越差。当电池径向热导率从 0.22 W/(m·K)增加至 2.22 W/(m·K)时，电池最高温度从 319.67 K 降低至 304.91 K，降低了 4.62%；电池最大温差从 18.66 K 降低至 4.89 K，降低了 73.79%。

(3)液冷-风冷复合冷却系统结合间歇式风冷运行策略，在有效降低电池最高温度和提升温度均匀性的同时，显著降低了系统功耗。相比液冷系统，电池最高温度从 307.87 K 降低至 304.67 K，降低了 3.20 K；最大温差从 7.71 K 降低至 4.35 K，降低了 3.36 K。采用间歇式风冷运行策略后系统功耗降低了 50%。

本研究主要针对电动汽车，所采用的 18650 电池规格具有广泛的代表性和应用性，其研究方法和结果也可应用于其他储能系统中。通过本文的研究，深化了对液冷热管理系统中关键参数及电池自身热物性参数影响的理解，为电池热管理系统的设计和优化提供了重要的理论依据。此外，本文提出了液冷-风冷复合冷却系统，并结合间歇式风冷运行策略，为电池热管理领域的研究提供了新的方法和思路。

参考文献：

[1] Álvarez Fernández R. A more realistic approach to electric vehicle contribution to greenhouse gas emissions in the city [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 949-959.

[2] 杨梦洁, 杨爱军, 叶奕君, 等. 基于气体分析的锂离子电池热失控早期预警研究进展[J]. 电工技术学报, 2023, 38(17): 4507-4538.
Yang Mengjie, Yang Aijun, Ye Yijun, et al. Research progress on early warning of thermal runaway of Li-ion batteries based on gas analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(17): 4507-4538. (in Chinese)

[3] 任可美, 戴作强, 郑莉莉, 等. 锂离子电池热失效机理和致爆时间研究综述[J]. 电源学报, 2018, 16(6): 186-193.
Ren Kemei, Dai Zuoqiang, Zheng Lili, et al. Review on thermal failure mechanism and explosion time of lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(6): 186-193. (in Chinese)

[4] 王春生, 孙含笑, 薛晨博. 基于电化学-热耦合的锂电池热效应分析[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 265-273.
Wang Chunsheng, Sun Hanxiao, Xue Chenbo. Analysis of thermal effect of lithium battery based on electrochemical-thermal coupling [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 265-273. (in Chinese)

[5] 熊康, 黎灿兵, 樊飞龙, 等. 电池储能温度-功率特性建模及其在综合能源系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5238-5250.
Xiong Kang, Li Canbing, Fan Feilong, et al. Modeling of temperature-power characteristics of battery energy storage and its application in integrated energy system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5238-5250. (in Chinese)

[6] Pesaran A A. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations [J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(2): 377-382.

[7] Li Ke, Yan Jiajia, Chen Haodong, et al. Water cooling based strategy for lithium ion battery pack dynamic cycling for thermal management system [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 132: 575-585.

[8] Zhao Ding, An Chao, Jia Zhixue, et al. Structure optimization of liquid-cooled plate for electric vehicle lithium-ion power batteries [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2024, 195: 108614.

[9] 徐晶, 相飞飞, 王翔, 等. PCM-风冷耦合的锂电池冷却系统优化设计[J]. 电源学报, 2025, 23(6): 281-287.
Xu Jing, Xiang Feifei, Wang Xiang, et al. Optimization design of PCM-air cooling coupled lithium-ion battery cooling system [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6): 281-287. (in Chinese)

[10] Dong Fei, Cheng Ziyang, Zhu Jianwei, et al. Investigation and optimization on cooling performance of a novel double helix structure for cylindrical lithium-ion batteries [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 189: 116758.

[11] Rao Zhonghao, Qian Zhen, Kuang Yong, et al. Thermal performance of liquid cooling based thermal management

system for cylindrical lithium-ion battery module with variable contact surface [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 1514-1522.

[12] Tang Zhiguo, Zhao Zhijian, Yin Chao, et al. Orthogonal optimization of a liquid cooling structure with straight microtubes and variable heat conduction blocks for battery module [J]. Journal of Energy Engineering, 2022, 148(3): 04022017.

[13] Xu Jun, Guo Zhechen, Xu Ziming, et al. A systematic review and comparison of liquid-based cooling system for lithium-ion batteries [J]. eTransportation, 2023, 17: 100242.

[14] Liu Fen, Wang Jianfeng, Liu Yiqun, et al. Performance analysis of phase-change material in battery thermal management with bionic leaf vein structure [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 210: 118311.

[15] Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A general energy balance for battery systems [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5-12.

[16] 时天禄, 安周建, 刘在伦. 基于风冷散热的锂电池热管理数值模拟研究[J]. 电源技术, 2021, 45(7): 885-889.
Shi Tianlu, An Zhoujian, Liu Zailun. Research on numerical simulation of lithium-ion battery thermal management based on air-cooling [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2021, 45(7): 885-889. (in Chinese)

[17] Fan Xu, Meng Chao, Yang Yawen, et al. Numerical optimization of the cooling effect of a bionic fishbone channel liquid cooling plate for a large prismatic lithium-ion battery pack with high discharge rate [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108239.

[18] Shi Tianlu, An Zhoujian, Du Xiaoze, et al. Performance analysis of an innovative PCM-based internal cooling design for cylindrical lithium-ion battery considering compact structure and uniform temperature [J]. Journal of Energy Engineering, 2023, 149(3): 04023006.

[19] Drake S J, Wetz D A, Ostanek J K, et al. Measurement of anisotropic thermophysical properties of cylindrical Li-ion cells [J]. Journal of Power Sources, 2014, 252: 298-304.



王见信

作者简介：

王见信(1979—)，男，通信作者，本科，高级工程师。研究方向：新能源光伏发电，风力发电，抽水蓄能发电及自动化设计。E-mail：gssdy_wangjx@163.com。

王斌(1987—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：新能源光伏发电，风力发电,抽水蓄能发电及自动化设计。E-mail：gssdy_wangb@163.com。

马淑倩(1989—)，女，本科，工程师。研究方向：新能源光伏发电，风力发电，抽水蓄能发电及自动化设计。E-mail：gssdy_msq@163.com。

(责任编辑：耿越)