

锂离子电池液冷散热通道拓扑优化设计研究

陈瑶¹, 詹森¹, 黄文姣², 刘聪¹, 许重阳¹

(1. 重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074; 2. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

摘要: 针对传统通道型电池液冷板压降高和均温性差的问题, 采用多目标拓扑优化方法对液冷板进行优化设计。通过试验建立电池产热模型, 基于变密度法构建液冷板拓扑优化模型, 研究了不同进出口位置布置形式对拓扑优化后液冷板的性能影响, 从中优选出性能最佳的液冷板, 并将其与传统直通道液冷板对比分析。结果表明, 不同进出口位置布置形式下得到的拓扑通道在温度和压降性能方面差异较大, 当进出口布置在沿液冷板长边中心对称线时, 拓扑优化后的液冷板具有最好的综合性能, 其与直通道液冷板相比具有更强的流动换热性能, 在入口流量为 5 g/s 时, 最高温度、温度标准差和压降分别下降了 1.38%、22.35% 和 28.36%。这种新型液冷板可为后续电池热管理系统散热设计提供新思路。

关键词: 电池热管理系统; 液冷板; 拓扑优化; 进出口位置

中图分类号: U469.72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2025.04.13

Study on the Topology Optimization Design of Liquid Cooling Heat Dissipation Channels for Lithium-Ion Batteries

CHEN Yao¹, ZHAN Sen¹, HUANG Wenjiao², LIU Cong¹, XU Chongyang¹

(1. School of Mechatronics & Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: To address the issues of high pressure drop and poor temperature uniformity in traditional channel-type battery liquid cooling plates, a multi-objective topology optimization method was employed for the design optimization of the liquid cooling plate. An experimental model of battery heat generation was established, and a topology optimization model of the liquid cooling plate was constructed based on the variable density method. The impact of different inlet and outlet arrangements on the performance of the optimized liquid cooling plate was investigated, and the best-performing liquid cooling plate was selected and compared with the traditional straight-channel liquid cooling plate. The results indicate that the topology channels obtained under different inlet and outlet arrangements exhibit significant differences in temperature and pressure drop performance. When the inlet and outlet are arranged along the central symmetry line of the long edge of the liquid cooling plate, the topology-optimized liquid cooling plate demonstrates the best overall performance. Compared to the straight-channel liquid cooling plate, it exhibits stronger flow and heat

收稿日期: 2024-05-27 改稿日期: 2024-07-24

基金项目: 重庆市教委青年项目 (KJQN202000734); 机械传动国家重点实验室开放基金项目 (SKLMT-MSKFKT-202112); 重庆市技术创新与应用发展重点项目 (cstc2020jscx-dxwtBX0025)

参考文献引用格式:

陈瑶, 詹森, 黄文姣, 等. 锂离子电池液冷散热通道拓扑优化设计研究[J]. 汽车工程学报, 2025, 15(4): 567-577.

CHEN Yao, ZHAN Sen, HUANG Wenjiao, et al. Study on the Topology Optimization Design of Liquid Cooling Heat Dissipation Channels for Lithium-Ion Batteries[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2025, 15(4): 567-577. (in Chinese)



transfer performance, with the maximum temperature, temperature standard deviation, and pressure drop reduced by 1.38%, 22.35%, and 28.36%, respectively, at an inlet flow rate of 5 g/s. This novel liquid cooling plate can provide new insights for the thermal design of future battery thermal management system.

Keywords: battery thermal management system; liquid cooling plate; topology optimization; inlet and outlet position

以电池为主要动力来源的电动汽车在解决能源与环境问题方面将发挥关键作用^[1]。锂离子电池以其高能量密度、低自放电率和较长的使用寿命等优点,成为电动汽车动力电池的首选^[2]。但是锂离子电池在充放电过程中焦耳热和电化学反应导致大量热量聚集,使锂离子电池容量和寿命衰减,极端情况下会发生热失控等安全性问题^[3-4]。因此,设计合理的电池热管理系统(BTMS)以确保锂离子电池工作在合理的温度范围内尤为重要,研究表明,锂离子电池最佳的工作温度范围为20~40℃,电池组各单元的最大温差不超过5℃^[5-6]。

根据冷却方式不同,BTMS大致可以分为风冷、液冷和相变材料冷却^[7]。其中,液冷BTMS因其优异的冷却性能、适中的制造和运行维护成本,目前已经被各大车企推广应用^[8]。液冷BTMS冷却性能的关键在于配置合适的液冷板。合理的液冷板通道结构设计可以改善电池组工作环境。BAO Yunhao等^[9]研究了一种超薄宽直流道液冷板,与蛇形、分叉和U形通道冷板相比,超薄宽直流道液冷板具有更低的最高温度、温差和运行功耗。陈雅等^[10]针对蛇形流道压降高、功耗大的问题设计了一种新型的二次流蛇形液冷板,结果表明,传统蛇形液冷板在增加了二次流结构后,液冷板进出口压降下降了90.69%。LIU Feifei等^[11]设计了一种仿生叶脉通道液冷板,并通过遗传算法对通道宽度、角度、数量和入口流量进行了优化,在3C放电倍率下,优化后的液冷板可以将电池最高温度控制在33.34℃以内。此外,也有学者采用先进的拓扑优化方法对液冷板进行设计。陈帆^[12]讨论了换热量、出口流体焓值和固体域温度这3种不同目标函数对拓扑优化液冷板设计结果的影响,结果发现出口流体焓值为目标函数的液冷板的流动特性换热性能最

佳。ZHANG Kezheng等^[13]针对多通道蛇形冷板中冷却剂流动路径长、压降高的问题,设计了一种多约束拓扑优化液冷板,相比于多通道蛇形冷板可使综合性能指标提高2~3倍。

传统液冷板通道结构设计很大程度上依赖于经验,手动优化结构参数提升液冷板性能具有较大局限性,而拓扑优化设计根据目标函数与优化算法自动求解符合特定性能要求的最佳通道结构,能设计出性能更优的液冷板通道结构。此外,不同进出口位置下拓扑优化后液冷板的通道结构不同,从而进一步影响液冷板温度和压降等性能。针对不同进出口位置对电池液冷板拓扑优化结果的影响进行的系统性研究较少,不能有效发挥拓扑优化的潜力。对此,本文以平均温度和流体耗散功为双目标函数,拓扑优化设计得到了8种典型位置下的二维通道拓扑形态,通过拉伸构建了三维模型,对所有模型进行了三维数值模拟,优选出了进出口位置性能最佳的液冷板,并和传统直通道液冷板进行了流动换热性能对比,优化设计结果能有效提高电池热管理系统性能。本文的研究框架如图1所示。

1 模型与方法

1.1 电池产热模型

由Bernardi生热模型可知,电池放电过程中的产热与吸热分别可表示为^[14]:

$$Q_1 = I^2 R_j + IT(\partial U_{ocv}/\partial T)。 \quad (1)$$

$$Q_2 = mc_p(dT/dt)。 \quad (2)$$

式中: R_j 为焦耳内阻; T 为温度; U_{ocv} 为开路电压; I 为电流; m 为质量; c_p 为比热容。

在试验环境为绝热条件下时,电池的产热量等于吸热量,由式(1)和式(2)可得:

$$\frac{1}{I} \frac{dT}{dt} = \frac{R_j}{mc_p} I + \frac{1}{mc_p} T \frac{\partial U_{ocv}}{\partial T} \quad (3)$$

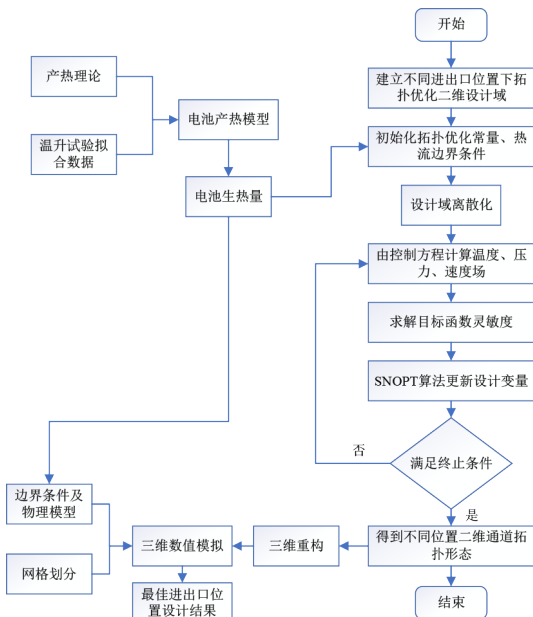


图1 研究框架

针对同一个电池在较短时间的放电过程中， dT/dt 和 $T(\partial U_{ocv}/\partial T)$ 可以视为常数，式(3)可视为电池温度随时间变化的线性关系式，如图2所示，电池温升试验平台对容量为30 Ah，内阻为2 mΩ，质量为0.55 kg的软包锂离子动力电池在不同放电电流下的温升变化进行了测量。通过不同放电电流下温升试验数据建立了 $(1/I) \times (dT/dt)$ 与 I 的关系曲线，如图3所示。则式(3)可以表示为：

$$\frac{dT}{dt} = 4.21 \times 10^{-6} I^2 + 1.49 \times 10^{-4} I \quad (4)$$

式中： R_j/mc_p 为拟合公式斜率。

因此，可计算电池比热容 c_p 为 864 J/(kg·K)，综合式(1)~(4)可得电池的产热公式为：

$$Q = 2 \times 10^{-3} I^2 + 7.08 \times 10^{-2} I \quad (5)$$

最终可以得到电池的单位体积产热率为：

$$q = Q/V = 8.13 I^2 + 287.78 I \quad (6)$$

由式(6)可知，电池在不同放电倍率下的产热量。

1.2 液冷板拓扑优化设计

1.2.1 设计域描述

液冷板在电池组中的布置方式如图4所示，为了简化模型和减少计算量，电池产生的热量被假设

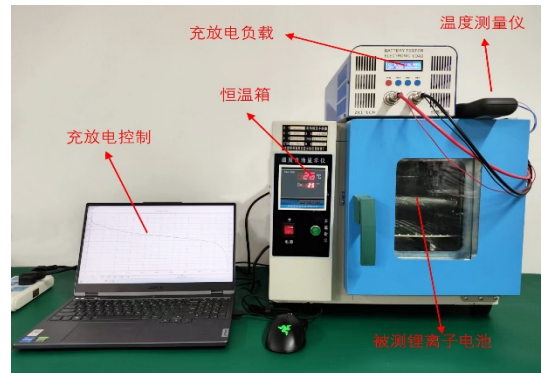


图2 锂电池温升试验平台

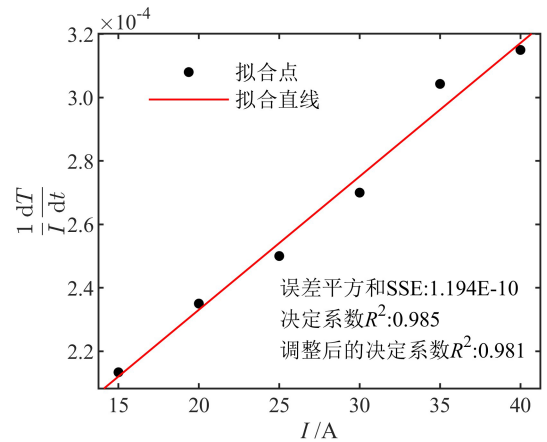


图3 温度线性拟合曲线

为均匀通过冷板，冷却液在冷板内循环流动，冷板表面与电池表面发生热交换，从而带走电池工作时所产生的热量。

本文基于变密度法对电池液冷板进行二维拓扑优化设计。变密度拓扑优化方法的基本原理是将设计域离散为多个设计微单元，赋予设计单元一个0~1的伪密度参数来描述该处是否有材料存在，当改变各个单元的密度值时可以表征出所需的拓扑结构，同时当密度为非0和1的状态时会出现不清晰的结构灰度单元，可通过密度过滤和投影来获得清晰的结构拓扑形态，最终优化问题是在目标函数下根据优化算法与约束条件寻求设计域内最佳的材料密度分布问题。拓扑优化设计域描述如图5所示，优化设计域的大小为200 mm×130 mm，为避免生成的流道与设计域边缘相交，在设计域的周围设置了2 mm的不可优化区域，设计域的总大小为134 mm×204 mm，其与电池表面大小一致，以此获得最大的热交换量。对于流体拓扑优化问题，设计域

内被视为一个多孔介质区域, 在进行拓扑优化时, 多孔介质区域被离散为多个变量计算单元, 当设计变量 γ 为 1 时, 代表该区域为液体, 当 γ 为 0 时, 代表该区域为固体。

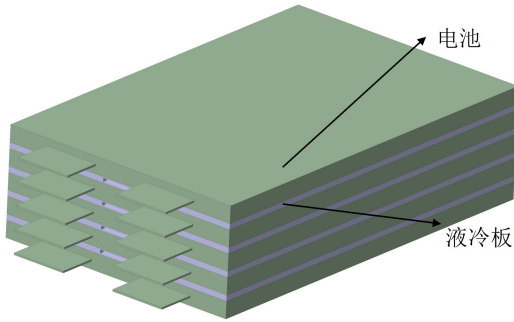


图 4 液冷板在电池组中的布置形式

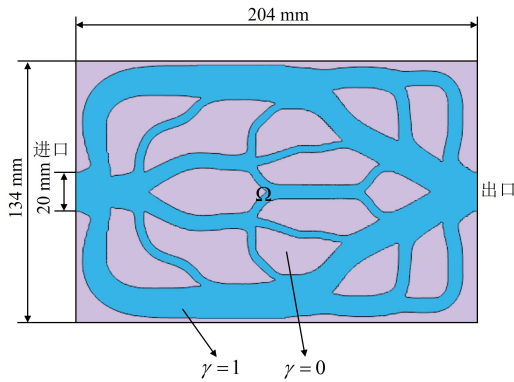


图 5 拓扑优化设计域

1.2.2 控制方程

在电池液冷板内, 流体与冷板壁发生热交换, 属于流固共轭传热问题, 在稳态条件下满足流体力学三大控制方程。拓扑优化设计域中能量平衡方程可表示为:

$$\rho(\gamma)C_p(\gamma)(u \times \nabla T) = \nabla \times (k(\gamma)\nabla T) + Q \quad (7)$$

式中: ρ 为密度; C_p 为比热容; u 为流速; T 为温度; k 为导热系数; Q 为体积产热率。

方程中材料密度、比热容和导热系数均为设计变量 γ 的函数, 通过函数形式将控制方程与设计变量进行耦合。

设计域连续性方程:

$$\nabla \times u = 0 \quad (8)$$

动量守恒方程:

$$\rho(\gamma)(u \times \nabla)u = -\nabla P + \mu \nabla \times (\nabla u + \nabla u^T) + F \quad (9)$$

式中: P 为压力; μ 为动力黏度; F 为体积力项, 在动量方程中加入此项用于模拟多孔介质中流体流动所受到的摩擦阻力。

由 Brinkman 惩罚模型可知, 多孔介质中流体流动的阻力与 u 相关, 同时引入反渗透率 α 来控制多孔介质的局部渗透率, 体积力可以表示为:

$$F = -\alpha(\gamma)u \quad (10)$$

当 α 为 0 时流体流动无障碍, 而当其趋近于无穷大时, 摩擦阻力无穷大, 因此, 改变 α 的值可以控制流体与固体的分布情况, 同时 α 也是设计变量 γ 的函数。

1.2.3 材料插值

通过插值函数建立起反渗透率与设计变量之间的关系^[15]:

$$\alpha(\gamma) = \alpha_{\min} + (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \times \left(\frac{q(1-\gamma)}{q+\gamma} \right) \quad (11)$$

$$\alpha_{\max} = \frac{\mu}{Da \times L^2} \quad (12)$$

式中: q 为惩罚因子, 用于调节 α 的变化趋势, 取值为 0.05; α_{\max} 和 α_{\min} 为仅存在固相和液相时的反渗透率; Da 为达西数, 用于描述多孔介质中黏性力和摩擦力的关系, 其值越大则多孔介质渗透率越大, 本文取值为 1×10^4 ; L 为模型特征长度。

同理可建立材料导热率 k 、密度 ρ 和比热容 c 的插值函数, 从而实现对固体与流体之间物理属性的转化:

$$k(\gamma) = k_s + (k_f - k_s) \times \left(\frac{\gamma(1+q_k)}{q_k + \gamma} \right) \quad (13)$$

$$c(\gamma) = c_s + (c_f - c_s) \times \left(\frac{\gamma(1+q_c)}{q_c + \gamma} \right) \quad (14)$$

$$\rho(\gamma) = \rho_s + (\rho_f - \rho_s) \times \left(\frac{\gamma(1+q_\rho)}{q_\rho + \gamma} \right) \quad (15)$$

式中: s 和 f 分别代表固体和流体。

1.2.4 过滤和投影

由于伪密度参数为人为假设, 在拓扑优化后会存在密度为 0~1 的中间状态, 这将导致结构不清晰、数值不稳和出现棋盘格分布现象等。为了消除网格依赖和棋盘格问题, 采用了 Helmholtz 密度滤波器对设计变量进行过滤处理, 其表达式为:

$$-r^2 \nabla^2 \tilde{\gamma} + \tilde{\gamma} = \gamma \quad (16)$$

式中： $\tilde{\gamma}$ 为过滤后的设计变量； r 为过滤半径。

同时使用正切投影来消除滤波后的灰度单元以获得清晰的拓扑形态：

$$\hat{\gamma} = \frac{\tanh(\beta(\tilde{\gamma} - \gamma_\beta)) + \tanh(\beta\gamma_\beta)}{\tanh(\beta(1 - \gamma_\beta)) + \tanh(\beta\gamma_\beta)} \quad (17)$$

式中： $\hat{\gamma}$ 为投影后的设计变量； β 和 γ_β 为投影斜率和投影点，本文取值为16和0.5。

1.2.5 目标函数及约束

对于电池液冷板的设计要求一般包括散热性能指标和功耗性能指标，是一个多目标优化问题。本文考虑散热性能指标为使设计域的整体平均温度最小化：

$$\Phi = \int_{\Omega} T d\Omega / \int_{\Omega} 1 d\Omega \quad (18)$$

功耗目标函数由进出口总压降表示，其进一步可表示为设计域黏性耗散功：

$$\Psi = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \mu \sum_{i,j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 + \sum_i \alpha(\gamma) u_i^2 \right] d\Omega \quad (19)$$

总的目标函数可以表示为两个性能指标的加权求和：

$$J = \omega \frac{\Phi}{\Phi_0} + (1 - \omega) \frac{\Psi}{\Psi_0} \quad (20)$$

式中： Ψ_0 和 Φ_0 为两个目标函数的初始值，同时除以初始值以此实现目标函数归一化； ω 为权重系数，本文取值为0.8。

为了使拓扑优化的结果具有实际工程意义，对设计域中流域体积分数进行了限制：

$$\int_{\Omega} \gamma d\Omega / \int_{\Omega} d\Omega \leq V_f \quad (21)$$

式中： V_f 为流域占整个设计域的比例，本文取值为0.5。

1.3 拓扑优化设计结果

本文基于COMSOL平台实现拓扑优化算法的编译，采用SNOPT算法进行迭代求解，模型迭代终止条件为目标函数误差值低于 $1e^{-6}$ 。拓扑优化模型的目标函数和流域体积分数的迭代过程如图6所示，目标函数值和体积分数在60步后逐渐趋于稳定，150步时达到收敛条件，停止迭代。

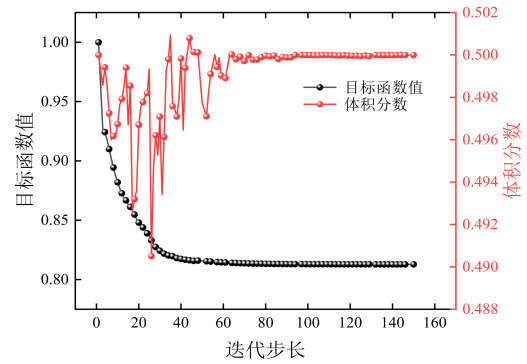


图6 目标函数与体积分数迭代

进出口在液冷板上的布置位置对液冷板的最终拓扑结果和综合性能具有较大的影响。对于进出口位置的选取原则，通过总结大量液冷板设计的参考文献发现，进出口位置设置一般位于冷板边长的中部或边缘位置，而进口与出口的相对位置一般为对向、对角或位于同一条边上，同时进口与出口不能相距太近以避免换热不够充分。对此，本文设计了一共8种不同进出口位置下的拓扑优化液冷板，包括沿着设计域的短边和长边布置的4种直进直出的对向位置，2种平行对角位置和2种进出口位于相同侧的位置，分别命名为Case1至Case8。8种不同进出口位置下的拓扑优化结果如图7所示。不同进出口位置下的流道拓扑形态均表现出由较宽的主流道和较细的次级流道构成，总体上呈现出自然界中的植物根系分布形态，这种结构将有利于强化散热和减少流体压降。本文将在后续三维仿真中具体分析这些不同进出口位置拓扑优化液冷板的性能。

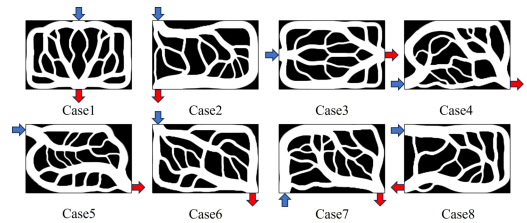


图7 不同进出口位置下的拓扑优化结果

2 三维流热耦合数值模型与验证

2.1 边界条件

为了研究不同进出口位置下拓扑优化液冷板的三维热力学性能，对所有拓扑结果进行了纵向拉伸

以获得三维数值模拟模型, 拉伸的总高度为 3 mm, 流道高度为 2 mm。在 CATIA 中将二维拓扑结果进行拉伸后, 再导入流体仿真软件 STAR-CCM+ 中进行数值模拟研究。液冷板和冷却液仿真的物理属性见表 1。此外雷诺数可以衡量流体流动状态, 其表示为:

$$Re = \frac{\rho_f D_h u_{in}}{\mu} \quad (22)$$

式中: D_h 为通道水力直径; u_{in} 为入口流速; μ 为流体动力黏度。

雷诺数小于 2 300 时可认为流体处于层流状态, 本文所采用的入口最大质量流量为 5 g/s, 对应的雷诺数为 419.18, 其值小于 2 300, 因此, 本文数值模拟中均采用层流模型。

表 1 冷却液和液冷板的物理特性

参数	液冷板 (铝)	冷却液 (水)
比热容 c_p [J/(kg·K)]	903	4 181.72
导热系数 k [W/(m·K)]	237	0.62
动力黏度 μ (Pa·s)		1.003E-3
密度 ρ (kg/m ³)	2 702	997.561

为了简化仿真, 作出如下假设:

- 1) 冷却水在流动传热过程中是稳定的;
- 2) 冷却水为不可压缩流动流体, 液冷板的热物理性质不发生改变;
- 3) 入口为质量流量入口, 出口为压力出口;
- 4) 忽略重力、黏性耗散和接触热阻的影响;
- 5) 流体与固体交界面无滑移;
- 6) 液冷板除发热面外的表面, 其余表面为绝热。

由表 2 可知具体边界条件, 其中热通量由电池热模型中式 (6) 计算出电池 3 C 放电倍率下的体积热再乘以电池厚度所得。

表 2 仿真边界条件

边界条件	参数值
入口温度/°C	25
出口压力/Pa	0
入口质量流量/(g/s)	1~5
热通量/(W/m ²)	826

2.2 控制方程

三维数值模拟中质量守恒方程为:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \times (\rho_f u_f) = 0 \quad (23)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial (\rho_f u_f)}{\partial t} + \nabla \times (\rho_f u_f u_f) = -\nabla P + \mu \nabla^2 u_f \quad (24)$$

能量方程为:

$$\begin{cases} \rho_f C_{p,f} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \times (u_f T) = k_f \nabla^2 T(\text{Fluid}), \\ \rho_s C_{p,s} \frac{\partial T}{\partial t} = k_s \nabla^2 T(\text{Solid}). \end{cases} \quad (25)$$

式中: u_f 为冷却液流速; ρ_f 和 ρ_s 分别为流体和固体密度; k_f 和 k_s 分别为流体和固体导热率; $C_{p,f}$ 和 $C_{p,s}$ 分别为流体和固体比热容。

电池热管理系统的设计要求是将电池最高温度和温差控制在合理的范围内, 同时降低系统功耗。液冷板温度性能可以由表面最高温度 T_{max} 和表征温度均匀性的温度标准差 T_σ 定义, T_σ 表示为:

$$T_\sigma = \sqrt{\frac{\int_{A_c} (T - T_{avg})^2 dA_c}{\int_{A_c} dA_c}} \quad (26)$$

式中: T_{avg} 为液冷板表面平均温度; A_c 为液冷板受热面的面积。

平均换热系数定义为:

$$h_{avg} = \frac{Q}{A_c (T_{avg} - \frac{T_{in} + T_{out}}{2})} \quad (27)$$

式中: T_{in} 和 T_{out} 分别为冷却液的进口和出口温度。

努塞尔系数定义为:

$$Nu = h_{avg} D_h / k_f \quad (28)$$

流动阻力系数定义为:

$$f = \frac{\Delta P}{\rho_f u_{in}^2} \quad (29)$$

PEC 指标用于评估液冷板换热与功耗的综合性能:

$$PEC = \frac{Nu/Nu_{ref}}{(\Delta P/\Delta P_{ref})^{1/3}} \quad (30)$$

式中: Nu_{ref} 和 ΔP_{ref} 分别为参照模型的努塞尔系数和进出口压降。

2.3 网格独立性分析

本文采用多面体网格对三维冷板模型进行了网格划分，同时为了保证计算的准确性，在流固边界层细化了网格数量，网格划分如图 8 所示。Case3 的表面平均温度和压降随网格划分数量的变化如图 9 所示，网格范围在 297 306~1 482 958 个之间，当网格数达到 778 628 个时，平均温度和压降的变化范围均在 0.2% 以内，为了保证计算精度的同时节约计算时间，本文采用了网格数为 778 628 个进行数值模拟。

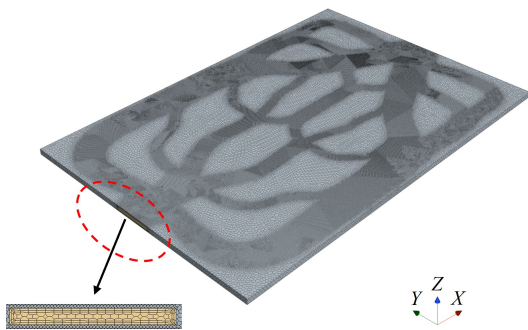


图 8 网格划分

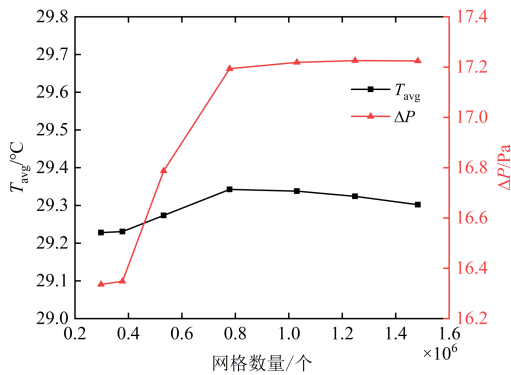


图 9 网格独立性验证

3 结果与讨论

3.1 不同进出口位置的影响分析

3.1.1 温度分布

图 10 和图 11 分别为在入口质量流量为 2 g/s 时不同进出口位置拓扑优化液冷板的表面温度云图，以及最高温度、平均温度和温度标准差的具体数值对比。由表面温度云图可知，不同进出口位置布置下对拓扑优化后液冷板表面温度分布影响较大。其

中 Case2 表面温度最高，达到了 36.4 °C，Case4、Case7 和 Case8 均出现出一些极热区域，而 Case3 和 Case6 的表面温度梯度较小。由图 11 可知，Case3 具有最低的平均温度为 29.34 °C，第 2 低的最高温度 32.06 °C 和温度标准偏差 1.5 °C。而 Case6 具有最低的温度标准偏差 1.47 °C 和最高温度 31.70 °C，第 2 低的平均温度 29.42 °C。以上结果表明，当进出口位置位于沿液冷板长边中心对称线和平行对角时，拓扑优化后液冷板表面具有较好的温度性能，采用这两种布置方式所形成的流道布局更均匀，冷却液在液冷板内充分均匀流动换热，从而降低了最高温度，提升了温度均匀性。

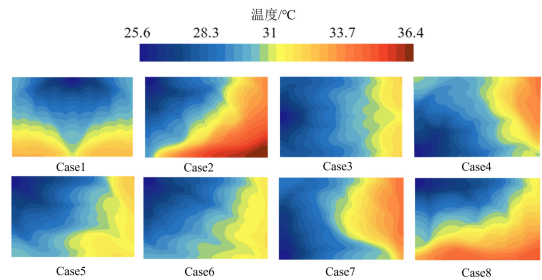


图 10 不同进出口位置下冷板表面温度云图

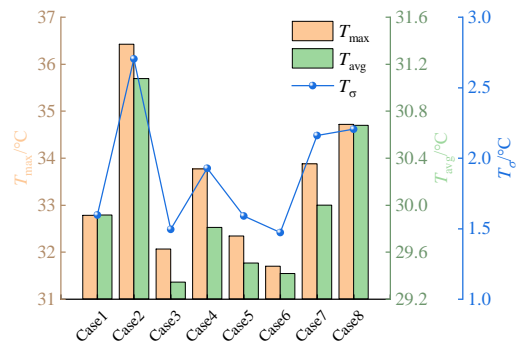


图 11 不同进出口位置下冷板温度指标

3.1.2 压力分布

图 12 和图 13 分别为不同进出口位置拓扑优化液冷板的中部截面压力云图和进出口压降数值对比。由压力云图可知，Case1 和 Case3 的高压区域较少，而其他进出口类型液冷板的高压区域较多，其中 Case8 中的高压区域最多，在 Case2 和 Case8 这种进出口布置下，冷却液在液冷板内进行了较长的流动循环，导致较高的压力损失。由图 13 可知，Case1 具有最小的压降为 14.04 Pa，而 Case3 次之，

压降为 17.19 Pa。由于这两种进出口位置位于液冷板中心对称线上，其拓扑优化后形成的流道对称，且流动距离较短，使流体压降较低。而对于平行对角布置下的 Case6，尽管其在温度性能方面表现优异，但由于这种布置下进出口的距离较远，导致拓扑优化后形成的流道路径较长，进而导致其压降较高，这将增加液冷板的能耗。因此，进出口位置的布置应当避免拓扑优化后形成较长的流动路径。

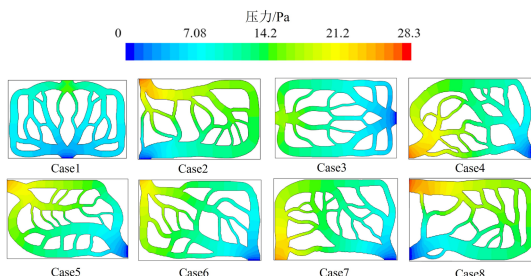


图 12 不同进出口位置下冷板中部截面压力云图

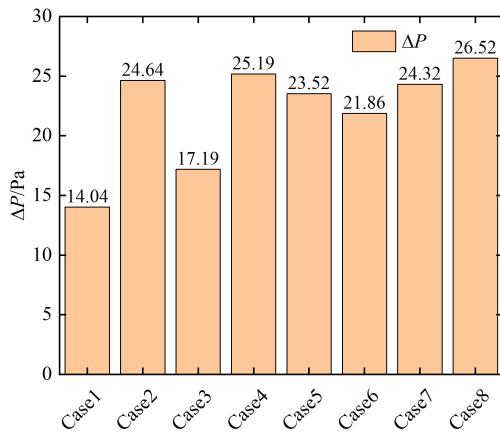


图 13 不同进出口位置下冷板进出口压降

图 14 展示了以 Case1 为参照模型的所有类型液冷板的 PEC 值。由图可知，Case3 具有最高的 PEC 值为 1.32，这意味着 Case3 的综合性能最好，而尽管 Case1 压降低，但温度性能略差，Case5 和 Case6 的温度性能虽然优于 Case1，但压降性能略差。综合来看，进出口沿液冷板长边中心对称线布置下的 Case3，在权衡温度和压降性能指标后是用于电池热管理系统的最佳选择。

3.2 流动与换热分析

3.2.1 流动特性

为了更深入地研究最优设计结果 Case3 的流动

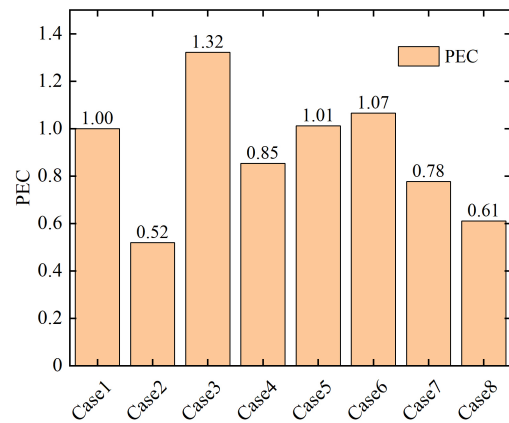


图 14 不同进出口位置下冷板 PEC 值

换热性能，选取 1~5 g/s 范围，间距为 0.5 g/s 的质量流量进行了仿真研究。同时为了对比拓扑优化液冷板与传统直通道液冷板的性能差异，建立了一块目前工业上常用的直通道电池液冷板。为了性能对比的公平性，其外形总尺寸大小与 Case3 相同，且流域体积分数同样保持为 0.5，将其命名为 RCP，如图 15 所示。

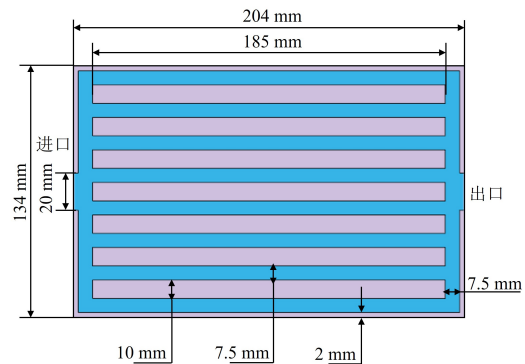
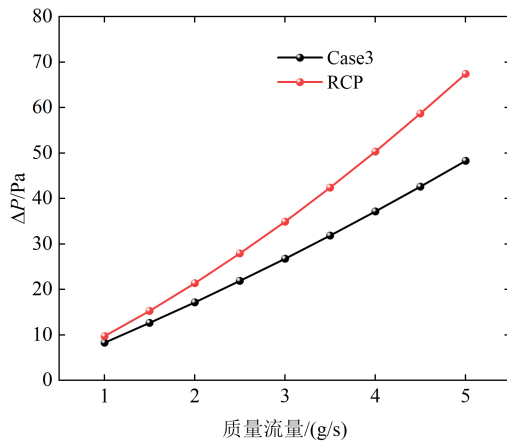


图 15 直通道液冷板基本尺寸

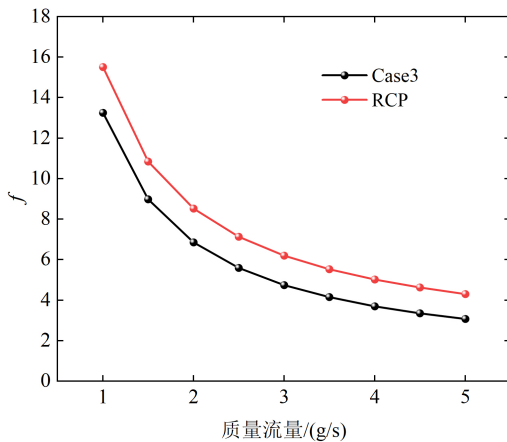
由图 16a 可知，Case3 与 RCP 的压降随着质量流量的变化趋势。两种类型液冷板的压降都与质量流量成正相关。Case3 的压降低于 RCP，且随着质量流量的增加，差距变得明显，在 5 g/s 时，压降相比传统直通道液冷板降低了 19.12 Pa (28.36%)。这是由于拓扑优化目标函数中有表征流动阻力的耗散功函数存在，在拓扑优化过程中会尽可能形成平滑的流道曲线以最小化流动阻力，其所形成的流道由截面积较宽和较细的分支流道组合而成，减少了速度梯度带来的能量损失，有效分散了流体压力。压降与液冷板泵送功率成正比，因此，拓扑优化液冷

板可以有效减少泵功率，从而降低电池热管理系统的能耗。

由图 16b 可知，2 种类型液冷板的流动阻力系数随质量流量的变化趋势。Case3 的流动阻力系数小于 RCP。传统直通道液冷板在拐角处为直角，这将导致较大的流动阻力，而拓扑优化通道在拐角处平滑过渡，减少了涡流的产生，且拓扑优化能降低流道壁面粗糙度，使拓扑优化形成的流道具有更小的流动阻力系数。因此，在流动性能方面，拓扑优化液冷板要优于传统直通道液冷板。



(a) Case3 与 RCP 的 ΔP 随流量变化



(b) Case3 与 RCP 的 f 随流量变化

图 16 Case3 与 RCP 的流动特性

3.2.2 换热特性

由图 17a 可知，2 种类型液冷板的最高温度随质量流量的变化趋势。Case3 的最高温度低于 RCP，拓扑优化目标函数中有温度性能指标，所形成的流

道会尽可能地分布在液冷板的各个角落，使冷却液可以对所有受热位置进行冷却，从而减少了温度热点的出现，降低了最高温度。在流量较低时，两种液冷板的最高温度差距不明显，而随着质量流量的增加，拓扑优化液冷板的温度性能优势逐渐增加，在 5 g/s 时，最高温度相比于传统直通道液冷板降低了 0.4 °C (1.38%)。

由图 17b 可知，2 种类型液冷板的温度标准差随质量流量的变化趋势。与最高温度类似，Case3 的温度标准差也低于 RCP，拓扑优化通过优化流道布局，寻找了给定热负荷下的最优流道分布，针对热源强度及分布，不断通过迭代寻优调整流道布局，最终形成了对称且均匀分布的流道，能有效提升温度均匀性，降低温度标准差。这种优势同样随着流量的增加而增加，在 5 g/s 时，温度标准差降低了 0.19 °C (22.35%)。这表明了拓扑优化液冷板能有效提升电池组的温度均匀性，延长电池寿命。

努塞尔系数可深入表征液冷板的对流传热能力。由图 17c 可知，2 种类型液冷板的努塞尔系数随质量流量的变化趋势。Case3 的努塞尔系数大于 RCP，优化后的流道结构使流体流动更加均匀，改善了直通道存在流动死角或流速不均的问题，同时较复杂的流道形状增加了冷却液的接触面积，提高了对流换热的效率。此外，增加质量流量不能无限地提高液冷板的换热能力，在初始时努塞尔系数增幅较大，而随着流量进一步增加，趋势变缓，继续增加流量将会导致更高的压降。

入口质量流量为 5 g/s 时 2 种类型液冷板的温度、中部截面压力与速度云图对比如图 18 所示，Case3 相比于 RCP 的高温区域要少，其表面温度分布更均匀。Case3 的整体压力分布也比 RCP 更低，RCP 在进口及转角处受到的阻力较大，而拓扑优化所形成的流道在拐角处近似于流线型，有效地降低了压降，从而减少泵功率。此外，均匀的流速分布能降低液冷板表面温度梯度，从而降低电池组温差，Case3 的整体流速分布更均匀，而 RCP 中部流速明显高于两侧。综合前面的分析，Case3 的流动与换热性能要远优于 RCP，能有效提升电池热管理

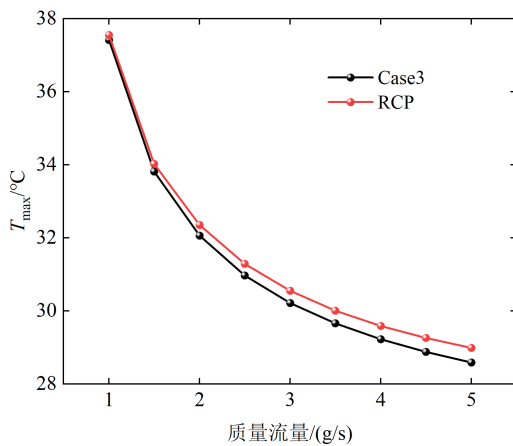
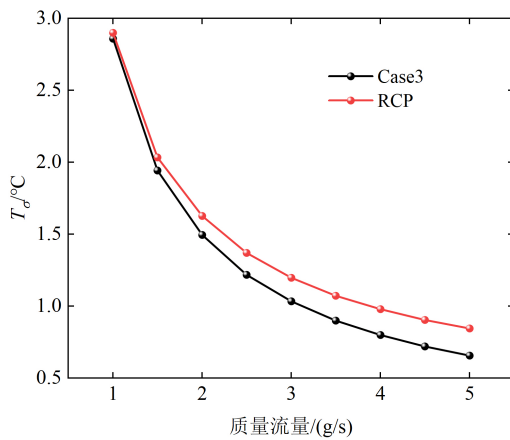
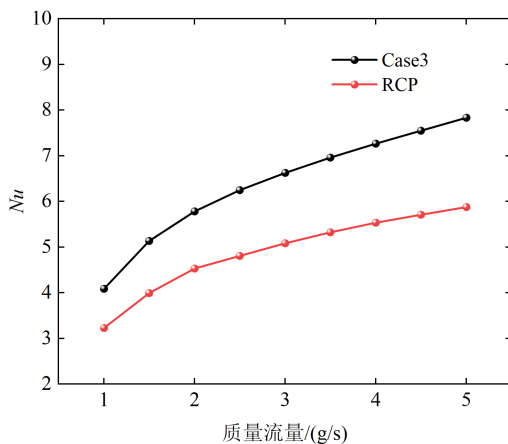
(a) Case3 与 RCP 的 T_{\max} 随流量变化(b) Case3 与 RCP 的 T_{σ} 随流量变化(c) Case3 与 RCP 的 Nu 随流量变化

图 17 Case3 与 RCP 的换热特性

系统性能并降低系统功耗，证明了本文设计方法的有效性。

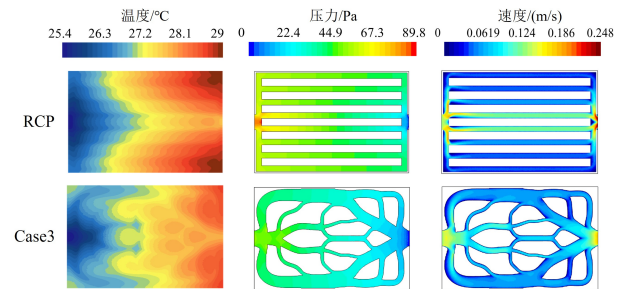


图 18 Case3 与 RCP 的温度、压力和速度云图对比

4 结论

本文为了设计传热能力优异和流动阻力较低的电池液冷板，采用了双目标拓扑优化方法对液冷板进行了优化设计，研究了不同进出口位置布置下对拓扑优化后液冷板的性能影响，并将最优设计结果与传统直通道液冷板进行了对比。主要结论如下。

1) 不同进出口位置布置下拓扑优化后的电池液冷板在温度和压降性能方面差异较大。进出口沿液冷板长边中心对称线布置的 Case3 的平均温度最低，而平行对角布置的 Case6 的最高温度和温度标准差最低。

2) 当进出口布置在沿液冷板中心对称线时可以降低压降，而其余位置则导致较高的压降。进出口沿液冷板短边中心对称线布置的 Case1 具有最低的压降，Case3 次之。

3) 在权衡温度和压降性能指标下，Case3 具有最好的综合性能，与传统直通道液冷板相比，其具有更强流动换热性能，在入口流量为 5 g/s 时，最高温度、温度标准差和压降分别下降了 1.38%、22.35% 和 28.36%，有效提升了电池热管理系统性能。

参考文献 (References)

- [1] 陈昊鹏, 张天时, 林晓东, 等. 应用于动力电池热管理的重力型热管仿真研究[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(1): 54-63.

- CHEN Haopeng, ZHANG Tianshi, LIN Xiaodong, et al. Simulation Study of Gravity Heat Pipe for Power Battery Thermal Management[J]. Chinese Journal of Automotive

- Engineering, 2023, 13 (1): 54-63. (in Chinese)
- [2] 李嘉鑫, 李鹏钊, 王苗, 等. 锂离子电池热管理技术研究进展[J]. 过程工程学报, 2023, 23(8): 1102-1117.
LI Jiaxin, LI Pengzhao, WANG Miao, et al. Research Progress in Thermal Management Technology of Lithium-Ion Batteries[J]. Journal of Process Engineering, 2023, 23 (8): 1102-1117. (in Chinese)
- [3] 曾少鸿, 吴伟雄, 刘吉臻, 等. 锂离子电池浸没式冷却技术研究综述[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(9): 2888-2903.
ZENG Shaohong, WU Weixiong, LIU Jizhen, et al. Review of Research on Immersion Cooling Technology for Lithium-Ion Batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12 (9): 2888-2903. (in Chinese)
- [4] 李顶根, 邹时波, 徐鹏, 等. 不同热管理方案下锂离子电池模组温度特性分析[J]. 汽车工程学报, 2020, 10(2): 98-106.
LI Dinggen, ZOU Shibo, XU Peng, et al. Analysis of Temperature Characteristics of Lithium-Ion Battery Modules Under Different Thermal Management Schemes [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2020, 10 (2): 98-106. (in Chinese)
- [5] ZHAO Gang, WANG Xiaolin, NEGNEVITSKY M, et al. An Up-to-Date Review on the Design Improvement and Optimization of the Liquid-Cooling Battery Thermal Management System for Electric Vehicles [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119626.1-119626.21.
- [6] WANG Jiao, CHEN Fan, SHAO Zhenyu, et al. Study of the Influence of Objective Functions on the Topology Optimization Design of Battery Cold Plate [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 226: 120326.1-120326.12.
- [7] 王毅军, 周舟, 李军. 锂离子电池热管理技术[J]. 新能源进展, 2023, 11(1): 54-62.
WANG Yijun, ZHOU Zhou, LI Jun. Thermal Management Techniques for Lithium-Ion Batteries [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2023, 11 (1): 54-62. (in Chinese)
- [8] SHENG Lei, ZHANG Hengyun, SU Lin, et al. Effect Analysis on Thermal Profile Management of a Cylindrical Lithium-Ion Battery Utilizing a Cellular Liquid Cooling Jacket [J]. Energy, 2021, 220: 119725.1-119725.12.
- [9] BAO Yunhao, SHAO Shuangquan. Numerical Study on Ultrathin Wide Straight Flow Channel Cold Plate for Lithium-Ion Battery Thermal Management [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 64: 107263.1-107263.16.
- [10] 陈雅, 范立云, 李晶雪, 等. 二次流蛇形通道锂离子电池散热性能[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(6): 1880-1889.
CHEN Ya, FAN Liyun, LI Jingxue, et al. Heat Dissipation Performance of Secondary Flow Serpentine Channel Lithium-Ion Batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12 (6): 1880-1889. (in Chinese)
- [11] LIU Feifei, CHEN Yangyang, QIN Wu, et al. Optimal Design of Liquid Cooling Structure with Bionic Leaf Vein Branch Channel for Power Battery [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 218: 119283.1-119283.16.
- [12] 陈帆. 电池热管理系统中冷板流道的拓扑优化设计研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2023.
CHEN Fan. Research on Topology Optimization Design of Cold Plate Flow Channel in Battery Thermal Management System [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [13] ZHANG Kezheng, LI Yang, CHANG S M, et al. Hydraulic and Thermal Performance Enhancement for the Cold Plate Using Topology Optimization [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236: 121829.1-121829.16.
- [14] DENG Tao, RAN Yan, YIN Yanli, et al. Multi-Objective Optimization Design of Thermal Management System for Lithium-Ion Battery Pack Based on Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 164: 114394.1-114394.11.
- [15] XIA Yang, CHEN Li, LUO Jiwang, et al. Numerical Investigation of Microchannel Heat Sinks with Different Inlets and Outlets Based on Topology Optimization [J]. Applied Energy, 2023, 330: 120335.1-120335.16.

作者简介



陈瑶 (2000-), 男, 重庆市人, 硕士研究生, 主要研究方向为电池热管理系统设计与控制。

E-mail: cyey5369@163.com

通信作者



詹森 (1986-), 男, 湖北十堰人, 博士, 讲师, 主要研究方向为新能源汽车动力传动系统及控制。

E-mail: fishjason@163.com