DOI：10.20271/j.cnki.1673−9833.2026.5007

NPR 防撞电池包底壳液冷系统散热性能分析及优化

张　勇，连钰轲，刘水长，蒋运波，晏宇枭

（湖南工业大学 机械工程学院，湖南 株洲 412007）

摘　要：在内凹六边形负泊松比（NPR）底部抗撞防护结构的基础上，针对底盘一体式电池包（CTC）液冷系统的散热、均温及流阻性能进行了分析与优化。首先在 2*C* 放电倍率、冷却液入口流速为 0.3 m/s 和温度为 25 ℃的条件下，对比分析了 3 种液冷流道方案的系统散热性能和压降，并选定温差和压降最小的方案 3 进行优化。提出在流道内增设扰流元结构，并基于第二代非支配排序遗传算法（NSGA-II），以液冷系统的最高温度 T_{max}、最大温差 ΔT_{max} 以及流道压降 ΔP 作为目标函数，将扰流元宽度 W、间距 D 以及冷却液流速 v 作为变量进行多目标优化。结果表明：当 W=2.356 mm、D=48.468 mm、v=0.216 m/s 时，液冷系统的综合性能最佳。优化后液冷系统的最高温度、最大温差和流道压降分别为 300.46 K、2.22 K 和 6 376.77 Pa，流道压降较初始方案降低了约 38.3%，在保证散热性能的同时降低了系统能耗，为 CTC 型电池包热安全设计提供了理论参考。

关键词：底盘一体式电池包；液冷系统；扰流元；多目标优化

中图分类号：TM912　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673−9833(2026)05−0050−09

引文格式：张　勇，连钰轲，刘水长，等 . NPR 防撞电池包底壳液冷系统散热性能分析及优化 [J]. 湖南工业大学学报，2026，40(5)：50−58.

Heat Dissipation Performance Analysis and Optimization of Liquid Cooling System for NPR Anti-Collision Battery Pack Bottom Shell

ZHANG Yong，LIAN Yuke，LIU Shuichang，JIANG Yunbo，YAN Yuxiao

（School of Mechanical Engineering，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China）

Abstract：Based on the concave hexagonal negative Poisson’s ratio (NPR) bottom anti-collision protection structure, the heat dissipation, an analysis and optimization have been made of the heat dissipation, temperature equalization, and flow resistance performance of the chassis integrated battery pack (CTC) liquid cooling system. Firstly, under the conditions of 2*C* discharge rate, a comparison, as well as an analysis, is made of coolant inlet flow rate of 0.3 m/s, and ambient temperature of 25℃ , and the system heat dissipation performance and pressure drop of three liquid cooling channel schemes, scheme 3 with the smallest temperature difference and pressure drop to be selected for optimization. A disturbance element structure is proposed in the flow channels, based on the second-generation non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), with the maximum temperature T_{max}, maximum temperature difference ΔT_{max}, and flow channel pressure drop ΔP of the liquid cooling system taken as the objective functions, and the disturbance element width W, spacing D, and coolant flow rate v used as variables for multi-objective optimization. The results indicate that the optimal performance of the liquid cooling system can be achieved when W=2.356 mm,

收稿日期：2025−07−26

基金项目：国家自然科学基金资助项目（52372352）；湖南省自然科学基金资助项目（2023JJ50192）；海南省自然科学高层次人才基金资助项目（721RC547）

作者简介：张　勇，男，湖南工业大学教授，博士，主要研究方向为空气动力学，新能源电池包安全性与控制优化等，E-mail：289714423@qq.com

通信作者：刘水长，女，湖南工业大学副教授，博士，主要研究方向为流体力学，优化设计，E-mail：834130255@qq.com

D=48.468 mm, and *v*=0.216 m/s. After optimization, the maximum temperature, maximum temperature difference, and flow channel pressure drop of the liquid cooling system are 300.46 K, 2.22 K, and 6 376.77 Pa, respectively. The flow channel pressure drop is reduced by about 38.3% compared to the initial scheme, which ensures heat dissipation performance as well as reduces system energy consumption, thus providing theoretical reference for the thermal safety design of CTC-type battery packs.

Keywords：chassis-integrated battery pack；liquid cooling system；flow disturbance element；multi-objective optimization

0　引言

动力电池包作为新能源工程车的核心部件，其性能和安全性备受关注，已成为当前研究的热点问题之一。电池包结构由传统的电芯组成模组（cell to module，CTM）发展为无模组技术（cell to pack，CTP），即直接将电池单元组装到电池包内，以获得更高空间利用率[1]。为进一步满足车辆轻量化与集成化需求，将电池直接集成于车辆底盘结构，形成了电池底盘一体化（cell to chassis，CTC）技术，该技术显著提高了空间利用率和电池装载量，提升了整车轻量化水平与续航里程，是电池包未来发展趋势[2]。

然而，在 CTC 设计模式下，工程车电池包内部缺少模组支撑，若受碎石等硬物撞击会导致挤压变形，极易引发电池内部短路、热失控甚至起火爆炸等安全事故[3]。电池包箱体成为抗撞击的关键安全屏障，因此学者们开展了大量箱体防护结构方面的研究。如柯彦舜[4]在电池包箱体的侧面设计了一种新型仿生薄壁结构。L. I. Scurtu 等[5]通过在电池包外壳的构造中使用内凹六边形负泊松比结构，提供了能量吸收结构。本团队基于内凹六边形负泊松比（negative Poisson’s ratio，NPR）结构，探明了其结构参数比例、壁面厚度以及胞元层数对抗撞结构的吸能效果，确定了最优结构参数比例和胞元层数，实现了电池包箱体底部优良的抗撞击防护性能[6]。

在确保结构安全的同时，实现电池高效的散热性能与温度均匀性管理，成为亟待解决的问题。Zhao D. 等[7]在液冷板中设计了蜂窝状流道，用密集的蜂窝通道增加冷却通道的换热面积，达到改善电池表面的均温性能目的。刘霏霏等[8]针对电池均温性差和液冷能耗高等问题，设计了串并对称式液冷流道的冷板结构，经 5 组流道构型方案对比，发现最优方案使电池组最大温差降幅达 12%。为进一步提升液冷板传热性能，优化流道结构以改善冷却液流动状态的相关研究增多。J. S. Sakkera 等[9]将矩形肋与矩形和三角形凹槽集成为新型螺旋通道散热器，通过增加湍流和破坏热边界层而增强了传热效果。李纪元等[10]对流道内不同扰流结构的冷板传热性能进行了研究，发现水滴柱扰流结构冷板的传热性能最好，其散热效果较无扰流冷板大幅提高。然而，上述研究主要关注传统电池液冷板传热性能的提升，并未考虑 CTC 模式下电池组及液冷板在碰撞中的损坏风险。

基于上述分析，本文提出在底部抗撞防护结构中集成液冷系统，对比分析不同流道形状方案液冷系统的综合性能，并在流道内添加扰流元，开展扰流元结构和冷却液流速的多目标优化。最后分析优化后液冷系统的散热性能及流道压降，以期获得电池组液冷系统高效、低流阻、均匀散热的效果，有效提升 CTC 型电池包的碰撞－热安全性能。

1　电池组底部抗撞结构及液冷系统

1.1　电池组及 NPR 抗撞底壳结构

电池组和 NPR 抗撞底壳结构示意图见图 1。

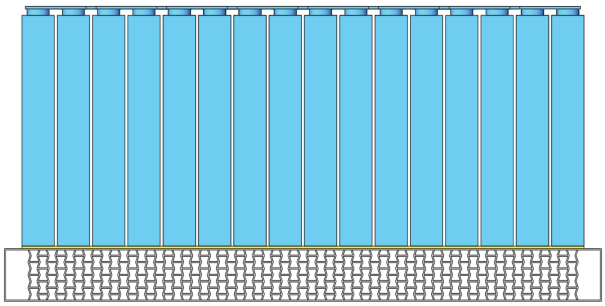


图 1　电池组及防撞底壳结构示意图

Fig.1　Schematic diagram of the battery pack and anti-collision bottom shell structure

图 1 所示电池组尺寸为 478 mm（长）×275 mm（宽）×185 mm（高），由 32 个电池单体串联构成。电池组底部增设高 41 mm 的 NPR 抗撞防护结构，抗撞底壳与电池组之间加装导热垫，以便将热量快速散出。液冷系统集成于 NPR 底部抗撞防护结构最上层的梯形中空胞元内。冷却液选用体积分数为 50% 的乙醇水溶液，系统初始温度设为 298.15 K（25 ℃）。各材料的热物性参数见表 1。

表 1 材料热物性参数

Table 1 Thermal properties of materials

组件	材料	密度 /（kg·m^{-3}）	比热容 /（J·kg^{-1}· K^{-1}）	导热系数 /（W·m^{-1}·K^{-1}）
极柱连接板	铜	8 978	381	387.6
导热垫	硅胶	2 000	1 800	1.8
冷却液	乙醇水溶液	1 071	3 300	0.384
NPR 底壳	铝	2 719	871	202.4

内凹六边形 NPR 抗撞底壳结构通过周期性排列的胞元实现负泊松比效应，该结构在轴向受压时可产生横向收缩响应，显著提升能量吸收效率与抗冲击性能。如图 2 所示，内凹六边形胞元的结构参数由 4 个尺寸表征，平行布置的长边 l_1 和短边 l_2 与相连的两条斜边构成等腰梯形。在此基础上，给定胞元高度 H 和壁厚 t，单个胞元结构参数为 l_1=10 mm、l_2=6.28 mm、H=10 mm、t=1 mm。

在 NPR 抗撞底壳靠近电池组侧集成液冷流道系统，通过并行或蛇形流道的几何布局嵌入 NPR 结构中空管层。液冷流道截面为正梯形，流道的轴向截面沿热流传导方向渐扩，可将电池热量传递至液冷系统及抗撞底壳，且该流道截面构型可实现冷却液在流道内更均匀地流动分布，有利于减少局部高温区域 [11]。

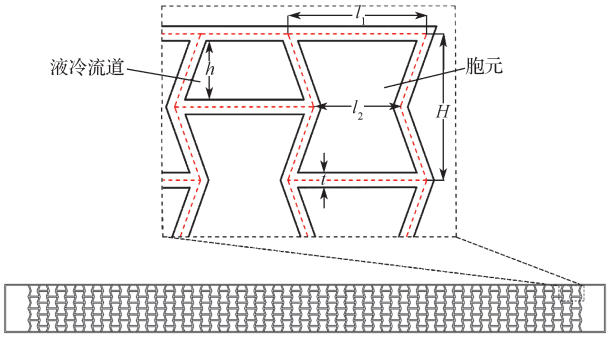


图 2 内凹六边形 NPR 结构胞元及液冷流道示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the concave hexagonal NPR structural cell and liquid-cooled flow channel

1.2 电池发热模型及参数

本文选取 LF50K-50 A·h 的方形磷酸铁锂电池（亿纬锂能）为研究对象。在研究电池发热量时选用多尺度多域（MSMD）的子模型——NTGK 模型（Newman, Tiedemann, Gu, and Kim Model）开展电池热预测数值模拟 [12]。在 NTGK 模型中，体积电流传输率 j_{ECh} 与电势场的关联关系式如下：

$$j_{\mathrm{ECh}}=\frac{Q_{\mathrm{n}}}{Q_{\mathrm{r}}V_{\mathrm{ol}}}Y\left[U-V\right], \tag{1}$$

式中：Q_{n} 为电场总电量，单位为 A·h；Q_{r} 为实验中用于获取模型参数 U 与 Y 所采用的电池容量；V_{ol} 为单体电池活动区域体积；V 为电池电压，可通过电路网络法或 MSMD 方法直接求得。

U 和 Y 均为电池放电深度（depth of discharge，DoD）函数。对给定电池，可通过实验获取其电压 – 电流响应曲线。U 和 Y 可根据实验数据作为 DoD 和温度函数进行拟合，U、Y 和 DoD 的函数关系式如下：

$$DoD=\frac{V_{\mathrm{ol}}}{3\,600Q_{\mathrm{n}}}\int_0^t j(t)\mathrm{d}t, \tag{2}$$

$$U=\left[\sum_{n=0}^{5}a_n\left(DoD\right)^n\right]-C_2\left(T-T_{\mathrm{ref}}\right), \tag{3}$$

$$Y=\left[\sum_{n=0}^{5}b_n(DoD)^n\right]\times\exp\left[-C_1\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_{\mathrm{ref}}}\right)\right]。 \tag{4}$$

式（2）~（4）中：j 为电荷从正极移动到负极所需的电流密度；T 为电池平均温度；T_{ref} 为参考温度；a_n 和 b_n 为数据拟合后的多项式系数；C_1 与 C_2 为校正常数，分别取值 1 800 与 −0.000 958。

参照文献 [13] 中电池单体的倍率放电曲线实验数据，并根据以上公式进行拟合，可得如下参数 U 和 Y 与 DOD 的关系式：

$$U=3.36-0.86(DoD)+5.35(DoD)^2-15.36(DoD)^3+19.04(DoD)^4-8.46(DoD)^5; \tag{5}$$

$$Y=807.44-6\,209.15(DoD)+31\,990.13(DoD)^2-68\,158.6(DoD)^3+63\,608.28(DoD)^4-22\,097.2(DoD)^5。 \tag{6}$$

电池单体的主要性能参数见表 2。

表 2 电池单体的主要性能参数

Table 2 Key performance parameters of battery cells

参 数	取值	参 数	取值
容量 /（A·h）	50	最大截止电压 /V	3.65
标称电压 /V	3.2	最小截止电压 /V	2.5
密度 /（kg·m^{-3}）	2 141	轴向导热系数 /（W·m^{-1}·K^{-1}）	2.73
比热容 /（J·kg^{-1}·K^{-1}）	1 296	径向导热系数 /（W·m^{-1}·K^{-1}）	0.91

1.3 电池组热场模拟

基于电池组几何模型建立其网格模型，网格单元数量为 2.04×10^6，节点数量为 3.9×10^5。采用瞬态仿真，初始温度设为 298.15 K，电池组外部表面与空气自然对流换热系数为 5 W·m^{-2}·K^{-1}，内部壁面间传热边界条件设为耦合，忽略辐射换热。在 2C 的恒流放电倍率下开展电池组的热仿真，仿真结果的温度云图和温升曲线见图 3 和 4。由图可知，放电结束后，电池组边缘的电芯与周围空气接触面积较大，对流换热效果较显著，因此温度相对较低。相比之下，内部电芯由于排列紧密、彼此间隙狭小，导致空气流动受阻，对流换热能力大幅减弱，电池组内部温度

超过了理想工作区间（298.15 ~ 313.15 K）。除外围区域温度较低外，电池组内部存在大面积高温区域，局部表面温度可达 318.49 K（45.34 ℃）。因此，在 2*C* 放电倍率下，需要对电池热管理系统的冷却性能开展研究。

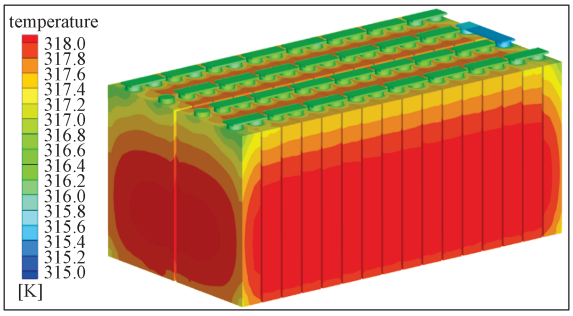


图 3　电池组在 2*C* 放电倍率下的温度云图

Fig. 3　Temperature contour of the battery pack at 2*C* discharge rate

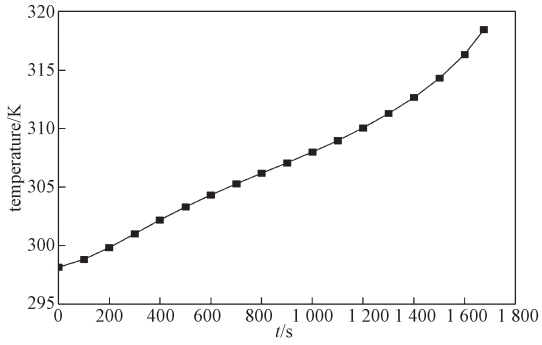


图 4　2*C* 放电倍率下电池组的温升曲线

Fig. 4　Temperature rise curves of the battery pack at 2*C* discharge rate

2　液冷流道布置方案的散热性能分析

2.1　液冷流道布置方案设计

在液冷系统梯形截面流道的基础上，设计了 3 种液冷流道布置方案，如图 5 所示。



a）No.1　　b）No.2　　c）No.3

图 5　3 种液冷流道布置方案示意图

Fig. 5　Three-liquid cooling channel layout scheme diagram

方案 1，即 No.1，为 30 个通道并行连接的结构，流道入口和出口均在底壳中间位置处；方案 2，即 No.2，将 30 个通道串行连接形成蛇形流道，流道入口和流道出口分布在底壳两侧；方案 3，即 No.3，分别将 15 个通道串行连接形成蛇形流道，流道入口在底壳中间位置处，流道出口在底壳两侧。

2.2　边界条件设计

为探索不同液冷布置方案下 NPR 抗撞底壳的热安全保障性能，综合考虑计算成本与研究重点，研究基于热预测结果简化电池包的生热计算，以 2*C* 倍率下的 11 000 W·m^{-3} 热源功率等效为单体电芯的发热功率，开展数值模拟。

在对液冷系统进行数值模拟时，首先设置湍流模型，而所选用的湍流模型类型通常取决于雷诺数 *Re*，其计算公式如下：

$$Re = \rho v L / \mu \text{。} \tag{7}$$

式中：ρ 为流体密度；v 为流体的特征速度（来流速度）；μ 为流体的动力黏度，25 ℃条件下，体积分数为 50% 的乙醇水溶液的动力黏度为 0.003 39 Pa·s；L 为流体特征长度，非圆管道中的 L 计算式为

$$L = 4S/l \text{，} \tag{8}$$

其中，S 为流通面积，即管道截面积，l 为湿周长，即管道截面周长。

对于光滑管道，通常情况下取 *Re*=2 320 作为分界值：*Re* > 2 320，其中流体的流动状态为湍流，一般选择 *k*-ε 湍流模型进行计算；*Re* < 2 320，流体的流动状态选层流状态，一般选择层流模型进行计算 [14]。

经计算，初始流道设计（即图 2 中的梯形中空胞元结构）中水流的 *Re* ≈ 473，远低于临界值 2 320，液冷流道状态表现为层流状态，因此选择 Laminar（层流模型）进行计算。系统初始温度设为 298.15 K，入口采用速度入口边界条件，速度为 0.3 m/s，入口温度同样设为 298.15 K。出口设定为压力出口，压力值为 0 Pa。数值计算采用 SIMPLE 算法进行压力 – 速度耦合处理，压力离散采用 Standard 方法，动量和能量方程采用二阶迎风格式离散，当监测速度、能量与质量流量的残差均低于 1.0×10^{-6} 时，判定计算结果达到收敛状态。

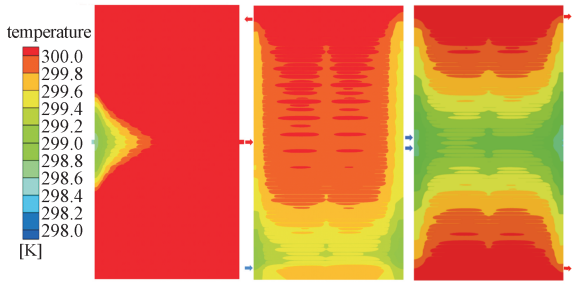
针对液冷板 – 电池组系统开展数值模拟，通过设置监测点并结合温度云图，分析液冷板温度和压力分布。流体域与液冷板、液冷板与导热垫及导热垫与电池之间界面共享拓扑，实现热交换。电池发热考虑了热传导的各向异性特征，计算时忽略与外部空气的辐射换热影响，电池和冷板表面与空气接触面采用自然对流散热，对流换热系数设置为 5 W/（m^2·K），来流温度设为 298.15 K。

2.3　3 种布置方案的液冷性能对比

从液冷系统最高温度、最大温差以及流道压降 3

个关键指标展开对比分析，其中液冷系统最高温度越低表示液冷系统的换热效果越好，最大温差越小表示液冷系统的温度分布越均匀，流道压降越低表示液冷系统耗能越小。

仿真所得 3 种液冷布置方案温度分布云图见图 6。



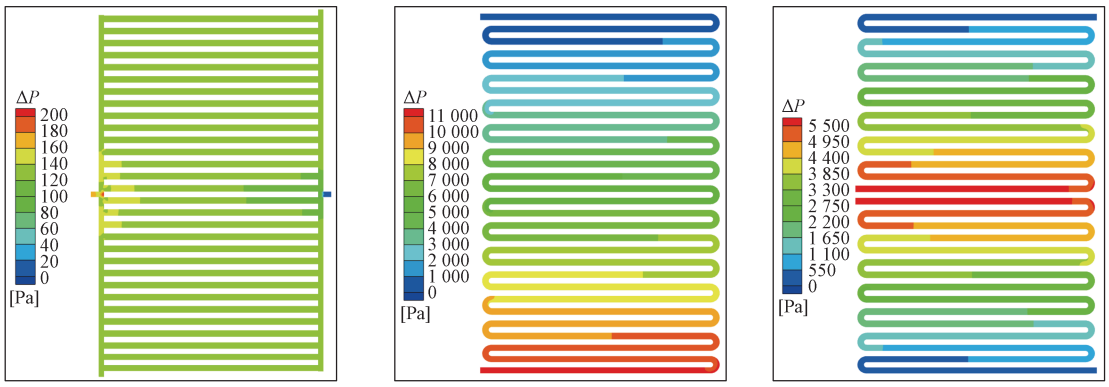
a）No.1 b）No.2 c）No.3

图 6 3 种液冷布置方案下液冷板上表面的温度云图

Fig. 6 Temperature contour of the upper surface of the liquid-cooling plate under three liquid-cooling layout schemes

由图 6 可知，No.1 方案靠近液冷板入口处的温度较低，远离入口区域呈现出较显著的热量集中现象，其最高温度达 305.86 K，最大温差达 7.71 K；No.2 方案从入口处到出口处的温度呈递增分布，温度分布较 No.1 方案更均匀；No.3 方案的冷却液从冷板中部流入，温度梯度呈对称分布，液冷系统上表面温度更均匀。在最高温度指标上，由高到低依次为 No.1（305.86 K）、No.2（300.57 K）、No.3（300.55 K），No.3 较 No.1 显著降低，达 5.31 K；在温度均匀性方面，温差由高到低依次为 No.1（7.71 K）、No.2（2.43 K）、No.3（2.40 K），可见 No.3 的最大温差较 No.1 大幅降低，降幅约 68.9%。其中 No.2 和 No.3 方案的最高温度和最大温差相差不大，但由于 No.2 方案电池模组的热量多积聚在中间区域，实际上中间区域的温度相比外侧温度更高，而 No.3 方案的中间部分散热能力较 No.2 方案更强，因此 No.3 方案更佳。

仿真所得 3 种液冷布置方案的压降云图见图 7。



a）No.1 b）No.2 c）No.3

图 7 3 种液冷布置方案下流道的压降云图

Fig. 7 Pressure drop contour map of the flow channel under three liquid cooling layout schemes

由图 7 可知，No.1 方案与其他两个方案相比压降较低，流道 No.2 的压降最大，为 11 363.4 Pa，流道 No.3 的压降相对较低，为 5 848.84 Pa。图 8 为 3 种液冷布置方案下液冷板温度及流道压降对比图。

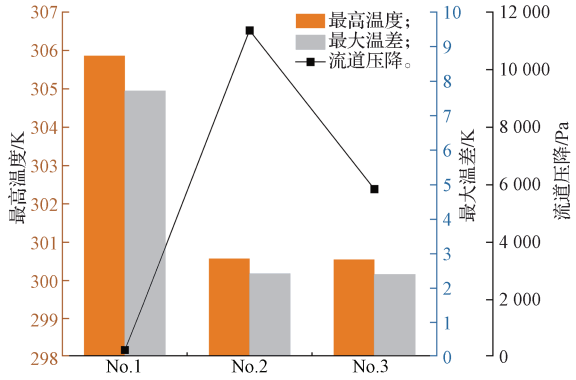


图 8 3 种液冷布置方案下液冷板温度及流道压降

Fig. 8 Liquid-cooled plate temperature and flow channel pressure drop under three liquid-cooling layout schemes

综上，No.3 方案因最低峰值温度（T_{max}=300.55 K）、最小温差（ΔT_{max}=2.4 K），以及较小的压降（ΔP=5 848.84 Pa）成为最佳方案；No.2 方案虽可作为次选方案，但性能稍差，而 No.1 方案因温差较大不采用。因此优先选用 No.3 方案作为液冷系统的布置方案。

3 电池组液冷系统优化

3.1 扰流元初始模型

在蛇形流道实际应用中，随着冷板内部嵌入蛇形流道的长度逐渐增加，冷却液温度随之增加，出口位置的换热效率降低。基于以上问题，根据 2.3 的分析，为实现方案 No.3 具有更低的峰值温度和更小的温差，在流道内增设扰流元结构，以此提高液冷板的温度均匀性，其扰流元初始模型如图 9 所示。

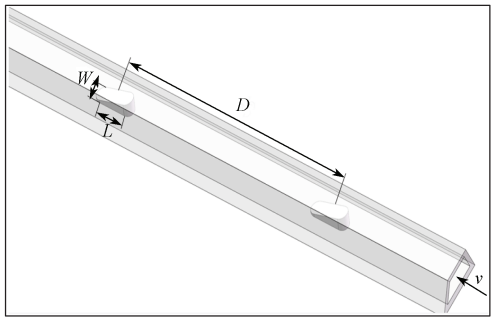


图 9　扰流元初始几何模型

Fig. 9　Initial geometric model of the disturbance element

增设扰流元液冷系统的结构如图 10 所示，结合液冷板尺寸，从冷却液入口处开始，均匀竖直排列 6 个扰流元结构，并在隔列流道内再次布置。扰流元模型属于对称结构，采用中心对称方式布置于流道中，以确保流场的均匀性。

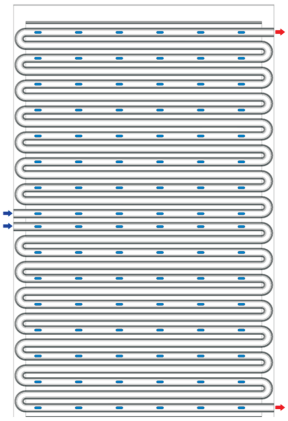
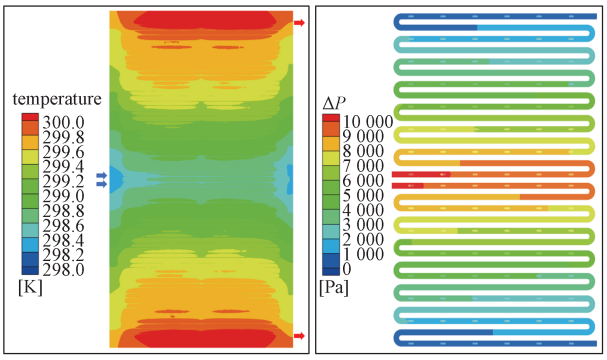


图 10　增设扰流元液冷系统示意图

Fig. 10　Schematic diagram of adding disturbance element liquid cooling system

3.2　增设扰流元的液冷系统性能分析

采用 2.2 所述的仿真方法，对增设扰流元液冷系统进行仿真计算，其温度和压降云图如图 11 所示。



a）温度云图　　b）压降云图

图 11　增设扰流元液冷板温度分布和流道压降云图

Fig. 11　Temperature distribution and flow channel pressure drop of the liquid cooling plate with added disturbance elements

由图 11 可知，在流道内加入扰流元，能够增加冷却液的湍流强度，流道与冷却液固液之间的热量传递更加充分有效，提升了局部换热系数，改善了流道中后段因冷却液温升导致的换热弱化问题。与方案 No.3 对比可知，增设扰流元的液冷系统最高温度和温差均减小了 0.364 K，但增设扰流元后液冷系统的压降为 10 340.4 Pa，系统能耗增大。

3.3　扰流元结构及液冷系统参数优化

为降低增设扰流元液冷系统的压降，且确保液冷系统最高温度和最大温差在合理范围内，建立了基于 Isight 的液冷板温度及压降优化平台，通过集成调用 SolidWorks、SpaceClaim 以及 ANSYS Fluent 软件，计算设计空间中的多组样本点，建立基于径向基神经网络（radial basis function，RBF）近似模型的 NSGA-II 算法，对扰流元结构及冷却液流速进行优化，以得到设计空间中的最优解，优化流程如图 12 所示。

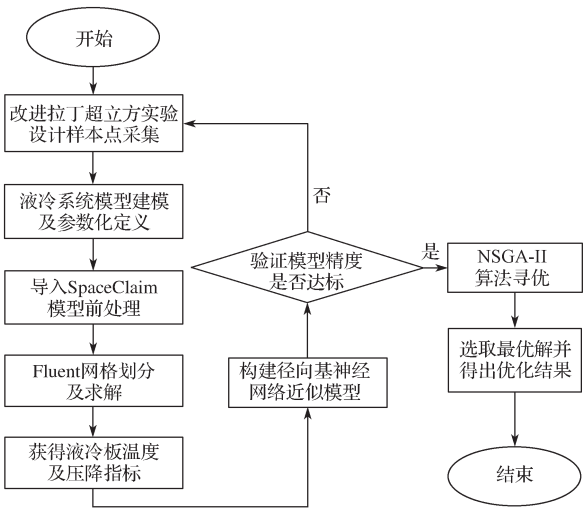


图 12　液冷系统设计优化流程图

Fig. 12　Liquid cooling system design optimization flowchart

3.3.1　设计变量与试验设计

对于设计变量的选择，选取扰流元的宽度 W、扰流元间距 D 以及入口流速 v 作为设计变量，目标函数为液冷板的最高温度 T_{max}、液冷板最大温差 ΔT_{max} 以及流道进出口压降 ΔP。将电池组和液冷系统的模型进行简化，电池组和导热垫的热量等同为 150 W 的热源施加在液冷板上表面，除入口流速外的其他边界条件不变。初始结构参数及变量优化范围见表 3。

表 3　初始参数及变量优化范围

Table 3　Initial parameters with variable optimization range

设计变量	初始参数	优化范围
W/mm	2.86	1~5
D/mm	50	46~54
v/（m·s^{-1}）	0.30	0.01~0.40

在明确设计变量及优化范围后，需通过试验设计（design of experiments，DOE）生成样本点，为后续

构建近似模型提供数据。拉丁超立方试验设计方法是 Isight 中的一个典型试验设计方法，其特征在于各因子的水平数等于样本点数，并通过随机抽样组合构建出相应的设计矩阵[15]。最优拉丁超立方方法能够更好地保证样本点在整个设计空间中的分布均匀。因此，本研究建立如图 13 所示的集成计算模型，并采用该方法生成了包含 60 组样本点的设计矩阵。

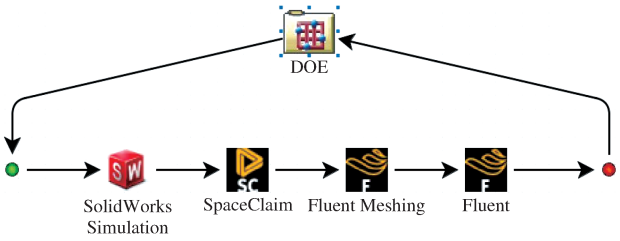


图 13 试验设计集成计算模型示意图

Fig. 13 The experimental design integrated computational model

各样本点及其对应的仿真计算结果如表 4 所示。

表 4 优化拉丁方样本点及仿真结果

Table 4 Optimized Latin square sample points and simulation results

样本	设计变量			优化目标		
	W/mm	D/mm	v/（m·s^{-1}）	T_{max}/K	ΔT_{max}/K	ΔP/Pa
1	1	46.14	0.431 4	301.66	3.09	13 065.07
2	1.068	46.27	0.057 6	307.92	6.82	1 260.45
3	1.136	52.92	0.133 9	304.43	4.91	3 267.11
4	1.203	46.81	0.477 1	301.44	2.87	15 106.23
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
60	5	48.17	0.080 5	304.90	4.91	3 355.16

3.3.2 近似模型与优化算法

为了构建准确的近似模型，使用上述 DOE 结果中的 60 个样本点分别构建二阶响应面近似模型和径向基神经网络近似模型。然后通过与原结果对比分析建立两种模型的误差，采用可决系数 R^2 判断模型的精度。从表 4 中选取 10 个样本点，分别对比这两个模型的可决系数 R^2，当 R^2>0.9，且越趋近 1.000，近似模型的可信度越高，可以用来替代原始三维模型进行后续优化[16]。表 5 列出了两个近似模型对应的可决系数 R^2。

表 5 近似模型及其 R^2

Table 5 Approximation models with their R^2

模型	响应	R^2	模型	响应	R^2
响应面近似模型	T_{max}	0.947	径向基神经网络近似模型	T_{max}	0.966
	ΔT_{max}	0.963		ΔT_{max}	0.979
	ΔP	0.982		ΔP	0.997

表 5 中的 T_{max}、ΔT_{max}、ΔP 为响应，拟通过比较选择精度更高的径向基神经网络（RBF）近似模型进行优化。

基于所建立的近似模型，液冷系统的多目标优化数学模型如下：

$$\begin{aligned}&\min\{f(X_1),f(X_2),f(X_3)\},\\&f(X_1)=\hat{f}(X_1),\\&f(X_2)=\hat{f}(X_2),\\&f(X_3)=\hat{f}(X_3),\\&\text{s.t. } \boldsymbol{X}=[W,D,v]^{\mathrm{T}},\end{aligned}$$

式中：$f(X_1)$、$f(X_2)$、$f(X_3)$ 为 3 个优化目标函数，其中 $f(X_1)$ 为电池包最高温度 T_{max}，$f(X_2)$ 为电池包最大温差 ΔT_{max}，$f(X_3)$ 为液冷板压降 ΔP；$\hat{f}(X_1)$、$\hat{f}(X_2)$、$\hat{f}(X_3)$ 分别为 3 个优化目标的近似代理模型。

建立 NSGA-II 的优化约束函数，种群规模为 12，最大迭代步数为 100，交叉概率为 0.8。优化得到的三维 Pareto 最优解集如图 14 所示，由图可知最优解集是互相制约的，即 T_{max} 和 ΔT_{max} 越小，ΔP 越大。

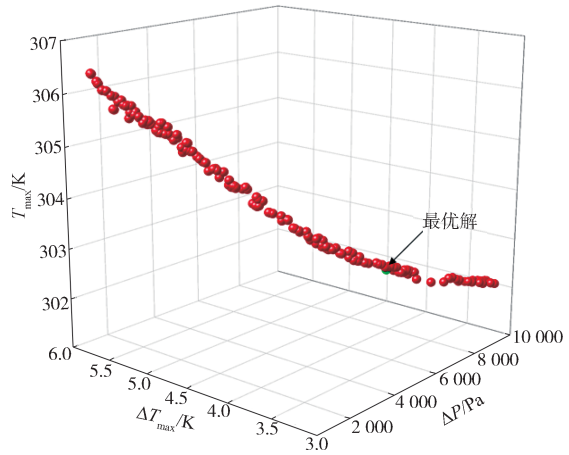


图 14 多目标优化帕累托前沿图

Fig. 14 Multi-objective optimization Pareto frontier diagram

为从 Pareto 解集中客观选取综合性能最优的设计方案，引入熵权法（entropy weight method，EWM）对解集进行归一化处理与权重确定。首先，对优化目标进行归一化处理，3 个目标均为负向指标，采用如下归一化公式：

$$X'=\frac{X_{\max}-X}{X_{\max}-X_{\min}}。$$

随后，基于归一化数据计算各目标信息熵与信息效用值，得出 T_{max}、ΔT_{max} 和 ΔP 的权重分别为 29.742%, 31.444%, 38.814%。进而计算每组数据的综合得分 S：

$$S=0.297\,42X'_{T_{\max}}+0.314\,44X'_{\Delta T_{\max}}+0.388\,14X'_{\Delta P}。$$

对电池组液冷系统进行优化，主要是减小扰流元对液冷系统的压降，且确保液冷系统最高温度和最大温差在合理范围内。因此，在设定压降 ΔP 的约束区间为（1 000, 7 000）条件下，综合得分最

高的参数组合为 T_{max}=302.663 K、ΔT_{max}=3.680 K、ΔP=6 408.875 Pa，对应的液冷板设计参数为 W=2.356 mm、D=48.468 mm、v=0.216 m/s。其中目标函数的值为简化后扰流元液冷板的相关参数，最终液冷系统的相关指标将通过更新后的电池组液冷系统模型计算得出。

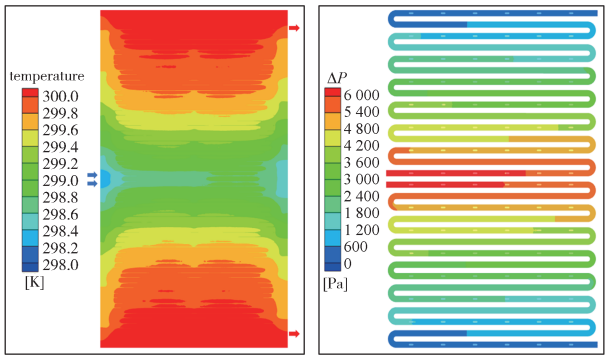
3.3.3　优化结果分析

最优解更新扰流元模型得到新的液冷板结构后，对其进行数值模拟，优化前后的参数与性能对比如表 6 所示，优化后扰流元液冷板温度分布和流道压降云图见图 15。

表 6　优化前后的参数与性能对比

Table 6　Comparison of parameters and performance before and after optimization

参数	扰流元宽度 W/mm	扰流元间距 D/mm	入口流速 v/(m·s^{-1})	最高温度 T_{max}/K	最大温差 ΔT_{max}/K	压降 ΔP/Pa
优化前	2.860	50.000	0.300	300.19	2.04	10 340.40
优化后	2.356	48.468	0.216	300.46	2.22	6 376.77



a）温度云图　　b）压降云图

图 15　优化后扰流元液冷板温度分布和流道压降云图

Fig. 15　Optimized disturbance element liquid cooling plate temperature distribution and channel pressure drop cloud map

分析表 6 中的数据可知，多目标优化后液冷系统的散热性能与能耗得到了有效平衡，优化后的扰流元液冷板最高温度和最大温差分别为 300.46 K 和 2.22 K，较初始方案分别上升了 0.27 K 和 0.18 K，变化幅度较小，处于可接受范围内。在压降方面，优化后的系统表现出显著优势，压降由 10 340.40 Pa 降低至 6 376.77 Pa，降幅约达 38.3%，表明流动阻力大幅减小，系统运行能耗显著降低。

4　结论

本文在 NPR 底部抗撞防护结构基础上提出一种液冷系统，对 3 种不同液冷流道方案的系统散热性能和流道压降进行了研究，选出温差和压降较小的方案，在其流道内增设扰流元结构，并开展了扰流元结构参数和冷却液流速多目标优化，主要结论如下：

1）在不改变冷却液入口流速的前提下，与 No.1 方案的并行流道相比，No.3 方案的流道能够使液冷板的最高温度降低 5.31 K，最大温差较 No.1 方案大幅降低，降幅达 68.9%；No.2 方案的流道和 No.3 方案的流道的最高温度和最大温差数值相近，但 No.3 方案的流道压降比 No.2 方案低约 48.5%，表明 No.3 方案的流道液冷系统具有更好的散热性能和较小的运行能耗。

2）在流道内部增设扰流元结构，可增加换热面积，提升液冷系统的传热能力和均温性，并增加流体的扰流效果，可以改善流道中后段因冷却液温升导致的换热弱化问题。

3）基于 Isight 优化平台，建立了几何模型、网格划分以及仿真求解多软件集成技术，实现了液冷系统自动化优化仿真，并且采用 NSGA-II 算法开展多目标优化，最终使液冷系统流道压降降低了 38.3%，而液冷系统的最高温度和最大温差较初始方案相差不超过 0.3 K。

参考文献：

[1] 时培成，单子贤，朱海龙，等 . 新能源汽车动力电池系统的集成化设计技术 [J]. 中国机械工程，2025，36(7)：1611-1623.
SHI Peicheng，SHAN Zixian，ZHU Hailong，et al. Integrated Design Technology for New Energy Vehicle Power Battery Systems[J]. China Mechanical Engineering，2025，36(7)：1611-1623.

[2] JIN C Y，SUN Y D，YAO J，et al. No Thermal Runaway Propagation Optimization Design of Battery Arrangement for Cell-to-Chassis Technology[J]. eTransportation，2022，14：100199.

[3] 山彤欣，王震坡，洪吉超，等 . 新能源汽车动力电池“机械滥用－热失控”及其安全防控技术综述 [J]. 机械工程学报，2022，58(14)：252-275.
SHAN Tongxin，WANG Zhenpo，HONG Jichao，et al. Overview of “Mechanical Abuse-Thermal Runaway” of Electric Vehicle Power Battery and Its Safety Prevention and Control Technology[J]. Journal of Mechanical Engineering，2022，58(14)：252-275.

[4] 柯彦舜 . 仿生薄壁结构耐撞性能及其在电池包上的应用研究 [D]. 福州：福建农林大学，2024.
KE Yanshun. Crashworthiness of Bionic Thin-Walled Structures and Their Application to Battery Packs[D]. Fuzhou：Fujian Agriculture and Forestry University，2024.

[5] SCURTU L I，SZABO I，GHERES M. Numerical

Analysis of Crashworthiness on Electric Vehicle's Battery Case with Auxetic Structure[J]. Energies，2023，16(15)：5849.

[6] 刘 赫 . 动力电池包高倍率热特性预测与防护技术研究 [D]. 株洲：湖南工业大学，2024.
LIU He. Research on High Rate Thermal Characteristic Prediction and Protection Technology of Power Battery Pack[D]. Zhuzhou：Hunan University of Technology，2024.

[7] ZHAO D，LEI Z G，AN C. Research on Battery Thermal Management System Based on Liquid Cooling Plate with Honeycomb-Like Flow Channel[J]. Applied Thermal Engineering，2023，218：119324.

[8] 刘霏霏，虞帮强，秦 武，等 . 基于串并对称式液冷流道的锂电池散热分析 [J]. 湖南大学学报（自然科学版），2024，51(2)：198−207.
LIU Feifei，YU Bangqiang，QIN Wu，et al. Heat Dissipation Analysis of Lithium-Ion Battery Based on Series-Parallel Symmetrical Liquid Cooling Channel[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences)，2024，51(2)：198−207.

[9] SAKKERA J S，CHINTALAPUDI R，PAPPULA B，et al. Novel Design of Serpentine Channel Heat Sinks with Rectangular and Triangular Ribs and Grooves for 25 A·h Li-Ion Battery Thermal Management[J]. International Journal of Thermofluids，2025，25：101011.

[10] 李纪元，李金旺，周刘伟 . 不同扰流结构冷板传热性能研究 [J]. 化工学报，2023，74(4)：1474−1488.
LI Jiyuan，LI Jinwang，ZHOU Liuwei. Heat Transfer Performance of Cold Plates with Different Turbulence Structures[J]. CIESC Journal，2023，74(4)：1474−1488.

[11] 喻继江，虞阳波，陈继洋 . 一种基于梯形截面流道的电池包液冷板结构：CN120341436A[P]. 2025−07−18.
YU Jijiang，YU Yangbo，CHEN Jiyang. A Battery Pack Liquid Cooling Plate Structure Based on Trapezoidal Cross-Section Flow Channels：CN120341436A[P]. 2025−07−18.

[12] KIM U S，YI J，SHIN C B，et al. Modelling the Thermal Behaviour of a Lithium-Ion Battery During Charge[J]. Journal of Power Sources，2011，196(11)：5115−5121.

[13] ZHANG Y，LIU H，LIU S C，et al. Prediction Model of Thermal Behavior of Lithium Battery Module Under High Charge-Discharge Rate[J]. Journal of Energy Storage，2023，74：109366.

[14] 陈凌宇 . 车用动力电池液冷板优化设计研究 [D]. 武汉：武汉理工大学，2023.
CHEN Lingyu. Research on Optimization Design of Power Battery Liquid Cooling Plate for Vehicle[D]. Wuhan：Wuhan University of Technology，2023.

[15] 童高鹏，王之丰. 基于 Kriging 模型多目标遗传算法的高功率动力电池包冷却性能研究 [J]. 机械强度，2021，43(6)：1366−1372.
TONG Gaopeng，WANG Zhifeng. Research on Cooling Performance of High Power Battery Pack Based on Multi-Objective Genetic Algorithm[J]. Journal of Mechanical Strength，2021，43(6)：1366−1372.

[16] 范蓉蓉，李文浩，刘志恩，等 . 基于 Isight 的动力电池液冷板流道结构优化设计 [J]. 江苏大学学报（自然科学版），2024，45(6)：660−665, 731.
FAN Rongrong，LI Wenhao，LIU Zhien，et al. Optimization Design of Flow Channel Structure of Power Battery Liquid Cooling Plate Based on Isight[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition)，2024，45(6)：660−665, 731.

（责任编辑：廖友媛）