

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209044

# 基于均匀设计的电池组液冷结构多目标优化\*

李昕光 元佳宇 王文超

(青岛理工大学机械与汽车工程学院 青岛 266500)

**摘要:** 为了获得动力电池组蛇形液冷结构的合理参数,提出了一种均匀设计法、BP神经网络算法以及多目标遗传算法相结合的动力电池液冷结构优化设计方法。首先进行了单体电池温升试验,对电芯仿真计算模型进行了验证,为均匀设计试验与参数处理的数据准确性提供支持。然后以电池组温差与液冷结构压降为设计目标,以冷却液入口质量流量、冷却液入口口径及液冷管管道宽度为设计参数,通过均匀设计试验进行CFD仿真,获取液冷结构具体参数,并通过BP神经网络算法进行训练获得设计目标与设计参数之间代理模型。最后通过NGSA-II多目标遗传算法对该代理模型进行计算获得Pareto解集,根据工程经验选取Pareto最优解进行优化结果验证和优化前后仿真结果对比。仿真结果表明,电池组最高温度降低 $5.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降幅为 $14.3\%$ ;电池组最大温差降低 $4.88\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,较优化前下降 $51.5\%$ ;液冷结构压降上升 $122.8\%$ ,解决了负压问题,减小了冷却液压力损耗,验证了该优化方法的有效性。

**关键词:** 均匀设计;BP神经网络;多目标优化;电池热管理

中图分类号: TM912 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 530.4130

## Multi-objective optimization of battery pack liquid cooling structure based on uniform design

Li Xinguang Yuan Jiayu Wang Wenchao

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266500, China)

**Abstract:** In order to obtain reasonable parameters for the serpentine liquid-cooled structure of the power battery pack, an optimal design method for the liquid-cooled structure of the power battery pack combining the uniform design method, BP neural network algorithm and multi-objective genetic algorithm is proposed. Firstly, a single cell temperature rise test is carried out to verify the cell simulation calculation model and provide support for the data accuracy of uniform design test and parameter processing. Then it was determined that the temperature difference of the battery pack and the pressure drop of the liquid cooling structure were the design objectives, and the coolant inlet mass flow rate, coolant inlet diameter and liquid cooling tube pipe width were the design parameters. CFD simulation was conducted through uniform design test to obtain the specific parameters of the liquid cooling structure, and the agent model between the design objectives and the design parameters was obtained by training with BP neural network algorithm. Finally, the NGSA-II multi-objective genetic algorithm is used to calculate the proxy model to obtain the Pareto solution set, and the optimal Pareto solution is selected according to the engineering experience to verify the optimization results and compare the simulation results before and after optimization. The comparison results before and after optimization show that: the maximum temperature of the battery pack is reduced by  $5.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ , with a decrease of  $14.3\%$ ; the maximum temperature difference of the battery pack is reduced by  $4.88\text{ }^{\circ}\text{C}$ , with a decrease of  $51.5\%$  compared with that before optimization; the pressure drop of the liquid cooling structure is increased by  $122.8\%$ , which solves the negative pressure problem and reduces the coolant pressure loss, which verifies the effectiveness of the optimization method.

**Keywords:** uniform design method;BP neural network;multi-objective optimization;battery thermal management

## 0 引言

随着环境保护和节约能源的共同推进,电动汽车发展

已经引起了许多国家的关注<sup>[1]</sup>。在电动汽车组成结构中,动力电池是电动汽车的主要动力源,然而动力电池在放电过程中会产生大量的热,若不能及时将其冷却降温,高温会

收稿日期:2022-02-20

\* 基金项目:山东省自然科学基金(ZR2020MG017)项目资助

在影响其自身使用寿命以及输出性能的同时,还会造成热失控等安全事故<sup>[2,3]</sup>。所以,采取合适的动力电池散热系统,是当下亟待解决的问题。

电池散热系统一般分为液冷、风冷和相变冷却。液冷因其具有良好的导热性及比热容成为应用最为广泛的散热结构设计方向。目前,许多研究者做了动力电池组液冷结构优化研究。文献[4]研究了冷却通道的不同表面形态对冷却结果的影响。文献[5]则提出了一种蛇形通道方案来改善电池组的温度一致性。文献[6]对树型分岔通道网络的流动特性和传热特性进行了数值研究。上述对液冷结构的研究均未涉及关键参数的优化,而文献[7]通过修改不同液冷板流道结构参数,对其散热性能及温度一致性进行了仿真分析。文献[8]利用变接触角度对电池组液冷管道进行了优化设计。针对利用参数处理方法进行结构优化的研究中,文献[9]利用拉丁超立方设计方法进行试验,基于 Kriging 模型建立了电池组液冷结构设计变量与设计目标之间代理模型,利用多目标遗传算法对其进行了寻优求解。文献[10]利用中心符合有界设计法设计试验,使用响应曲面法和 Screening 优化算法对电池组液冷结构进行了最优设计。

通过上述研究发现,通过参数处理方法研究动力电池液冷系统的案例较少,现有参数处理方法优化过程较为复杂,所需试验次数与数据量较大。本文以方形锂离子电池组蛇形液冷结构为研究对象,以冷却液入口质量流量、冷却液出入口口径和液冷管道宽度为设计参数,以电池组最大温差与液冷结构压降为设计目标,通过均匀设计试验以及 CFD 仿真获得试验数据,然后利用 BP 神经网络算法对试验数据进行训练,建立设计参数与设计目标代理模型,最后利用多目标遗传算法求解,选取工程实用的 Pareto 最优解。

## 1 电芯模型与电池组结构

### 1.1 电芯仿真计算模型

#### 1) 生热模型

本文通过 Bernardi 的电池生热速率模型<sup>[11]</sup> 计算获得生热速率  $q$ 。生热速率  $q$  表示为:

$$q = \frac{I}{V_b} \left[ (E_0 - U_1) + T \frac{dE_0}{dT} \right] \quad (1)$$

式中:  $V_b$  为单个电池的体积( $m^3$ );  $I$  为电池充放电的电流(A);  $E_0$  为单个电池的开路电压(V);  $U_1$  为单个电池端电压(V);  $T$  表示开氏温标(K);  $dE_0/dT$  为温度影响系数(V/K);  $(E_0 - U_1)$  为单个电池在进行充放电反应时产生的焦耳热(J),  $T(dE_0/dT)$  为可逆反应热,一般取  $0.0514 V^{Li2}$ 。

#### 2) 传热模型

假设单体锂离子电池为导热系数各向异性的长方体,不同方向的导热系数如下:

$$u = \frac{L_x}{\sum \frac{dx_i}{\varphi_i}} \quad (2)$$

$$v = \sum \frac{\varphi_i dy_i}{L_y} \quad (3)$$

$$w = \sum \frac{\varphi_i dz_i}{L_z} \quad (4)$$

式中:  $u, v, w$  分别为单体电池在  $x, y, z$  方向上的平均导热系数( $W/m \cdot K$ );  $\varphi_i$  为各层材料导热系数( $W/m \cdot K$ );  $dx_i$  为  $i$  种材料在  $x$  方向上厚度(mm);  $dy_i, dz_i$  同理;  $L_x$  为  $i$  种材料在  $x$  方向长度(mm);  $L_y, L_z$  同理。

#### 3) 平均比热容与平均密度

平均比热容公式如下:

$$C_p = \frac{\sum m_i C_{p,i}}{\sum m_i} \quad (5)$$

式中:  $C_{p,i}$  为第  $i$  种材料的比热容( $J/kg \cdot K$ );  $C_p$  为电池平均比热容( $J/kg \cdot K$ );  $m_i$  为电池第  $i$  种材料的质量(g)。

平均密度公式如下:

$$\rho C_p = \frac{\sum \rho_i C_{p,i} v_i}{\sum m_i} \quad (6)$$

式中:  $v_i$  为第  $i$  种材料的体积( $m^3$ );  $C_p$  为电池平均比热容( $J/kg \cdot K$ );  $\rho$  为电池平均密度( $kg/m^3$ );  $C_{p,i}$  为第  $i$  种材料比热容( $J/kg \cdot K$ )。

### 1.2 计算模型验证

进行了单体方形锂离子电池的 1C 倍率放电温升试验,试验所用的恒温箱和电子负载如图 1 所示。恒温箱温度设置为  $25^\circ C$ ,电子负载放电电流设置为恒流 50 A,分别对单体电池表面最高温度进行了检测。单体电池的 CFD 仿真热物性参数,经计算如表 1 所示。图 2 为单体电池表面最高温度的试验与仿真结果对比图,如图所示,二者误差在 2.6% 以内,电芯的计算模型精度较好。

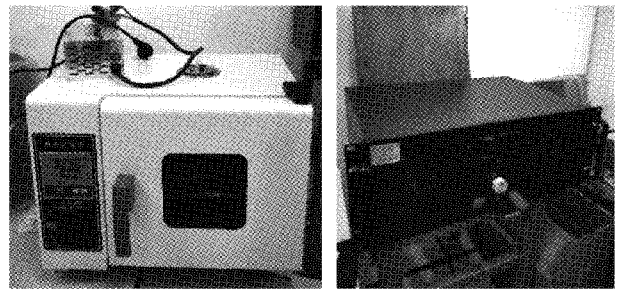


图 1 试验用恒温箱(左)与电子负载(右)

表 1 单体电池热物性参数

放电倍率	标准容量/Ah	产热量/ ( $W \cdot m^{-3}$ )	导热系数/ ( $W/m \cdot K$ )	平均比热容/ ( $J/kg$ )	平均密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )
1 C	50	6 153	$x=0.72$ $y=z=2.88$	1 207	1 876

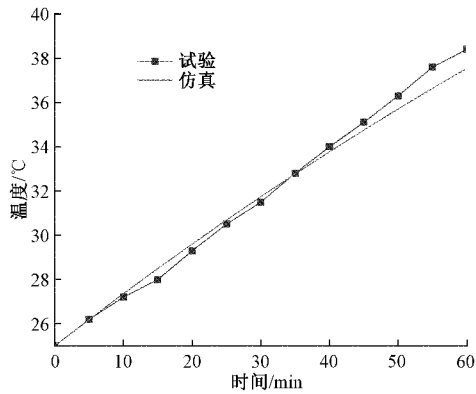


图 2 电池表面最高温试验与仿真对比图

### 1.3 电池组几何模型和有限元模型

电池组共由 90 块单体锂离子电池构成,冷却系统为双向对流的蛇形结构,冷却液分别从上入口和下入口流入,经蛇形结构的上下两部分,从上出口和下出口流出。电池组的液冷结构尺寸参数如表 2 所示,图 3 为液冷结构示意图。

表 2 液冷结构参数

表 2 液冷结构参数				mm
冷却液出入口 口径	管道宽度	电池尺寸	导热垫厚度	
25	5	180×130×30	5	

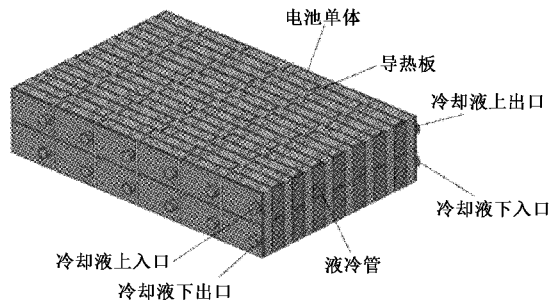


图 3 液冷结构示意图

对电池组几何模型进行多面体网格划分,网格单元数为 7 501 518,网格面数为 35 314 266,图 4 为电池组网格划分示意图。环境温度设置为 25 ℃,液冷板材设置为铝材,冷却液为体积分数 50% 的乙二醇水溶液,其物性参数如表 3 所示。

表 3 冷却液物性参数

动力粘度/ (Pa·s)	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	导热率/ (W/m·K)	比热容/ (J/kg·K)	湍流普朗 特数
0.003 94	1 071.1	0.419	3 485.0	0.9

## 2 试验设计与建立代理模型

### 2.1 设计参数与设计目标

本文采用 3 个设计参数分别为冷却液入口质量流量、

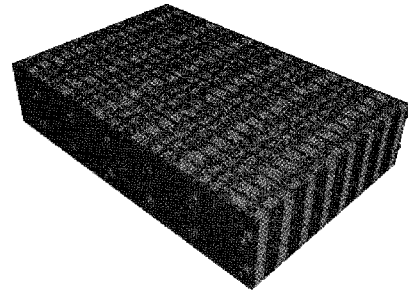


图 4 动力电池组液冷结构网格划分示意图

冷却液出入口口径及液冷管的管道宽度,其他参数如液冷管高度、液冷管管壁厚度与导热垫厚度等一般为定值,因此不将其纳入分析范围,具体设定如下。

1) 冷却液入口质量流量是指整个蛇形液冷结构单侧各冷却液入口质量流量之和,冷却液入口质量流量是决定电池组散热效果的最主要因素,流量太小不能有效散热,流量太大会给液冷结构造成较大压强,不利于其长期使用,经多次仿真设定其变化范围为 0.3~3.0 kg/s。

2) 冷却液出入口口径。在相同质量流量下,出入口口径越大,冷却液的压强越小,但也会导致冷却液流速变小,降低冷却效率,其参数变化范围设定为 20~40 mm。

3) 液冷管道宽度为蛇形液冷结构内部流道宽度,其高度随电池高度而定,故调节其管道宽度,变化范围为 2~10 mm。

为保证在电池组温度一致性较好的基础上使冷却液在液冷结构中压力损失更小,该结构设计目标设定为电池组温差  $\Delta T$  与液冷结构压降  $\Delta P$ ,表示如下。

1) 电池组温差  $\Delta T$

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \quad (7)$$

式中:  $T_{\max}$  与  $T_{\min}$  分别为电池组中最大电池表面温度与最小电池表面温度(℃)。

2) 液冷结构压降  $\Delta P$

$$\Delta P = P_{\text{inlet}} - P_{\text{outlet}} \quad (8)$$

式中:  $P_{\text{inlet}}$  与  $P_{\text{outlet}}$  分别为液冷结构冷却液入口压强与冷却液出口压强(Pa)。

### 2.2 均匀设计试验方案与结果

均匀设计试验的重点是在试验范围内试验点的均匀分布,以便从最少的试验中获得最多的信息,其所得样本的均匀度较好,试验次数较少,所以非常适合作为 BP 神经网络的样本数据<sup>[13]</sup>。均匀设计表的通用符号为  $U_n(q^s)$ 。其中,  $U$  为均匀设计表;  $n$  为试验总次数;  $q$  为水平数;  $s$  为最多可以安排的因素数。本文采用 3 个设计因素(冷却液入口质量流量、冷却液出入口口径、液冷管道宽度),15 水平的  $U_{15}(15^3)$  均匀设计表进行试验设计。通过进行 15 次 3 C 倍率下放电仿真试验,其方案设计及其试验结果如表 4 所示。

### 2.3 BP 神经网络训练代理模型

本文选用 BP 神经网络建立液冷结构的冷却液入口质

表 4 均匀设计试验方案及结果

试验组号	均匀设计表			试验方案及结果				
	1	2	3	质量流量/ (kg·s <sup>-1</sup> )	出入口口径/ mm	管道宽度/ mm	温差/ ℃	压降/ Pa
1	1	4	7	0.3	24.2	5.4	10.36	-6 542
2	2	8	14	0.5	29.8	9.4	8.69	-6 017
3	3	12	6	0.7	35.4	4.9	8.18	-5 863
4	4	1	13	0.8	20	8.8	7.36	-4 556
5	5	5	5	1.0	25.6	4.3	6.57	-3 249
6	6	9	12	1.2	31.2	8.3	5.76	-1 940
7	7	13	4	1.4	36.8	3.7	5.34	1 602
8	8	2	11	1.6	21.4	7.7	4.95	5 144
9	9	6	3	1.8	27	3.1	4.45	8 685
10	10	10	10	2.0	32.6	7.1	4.13	11 802
11	11	14	2	2.2	38.2	2.6	3.84	14 919
12	12	3	9	2.4	22.8	6.6	3.52	18 035
13	13	7	1	2.6	28.4	2	3.9	12 088
14	14	11	8	2.8	34	6	4.31	6 141
15	15	15	15	3.0	40	10	4.79	194

量流量、冷却液出入口口径、液冷管道宽度与电池组温差与液冷结构压降之间的映射关系。

1)BP 神经网络模型

(1)将均匀设计试验的 15 组结果作为 BP 神经网络的训练样本,为使实验数据更加有连续性,将数据平滑处理。由于各参数在量纲上的不同,数值差距较大,为减少过大或者过小数据引起训练误差,将数据做归一化处理,公式如下:

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (9)$$

式中: X' 为参数归一化后的值; X 为参数归一化前的值; X<sub>max</sub> 为参数最大值; X<sub>min</sub> 为参数最小值。

(2)将均匀设计试验方案的 3 个因素作为 BP 神经网络模型的输入层节点,节点数用 n 表示。以均匀设计试验方案的 2 个目标作为输出层节点,节点数用 m 表示。隐含层节点数 J 的计算公式<sup>[14]</sup>如下:

$$J = \frac{n + m}{2 + a}, a = 1, \dots, 10 \quad (10)$$

(3)利用 newff 函数建立网络模型,设模型输入层和模型隐含层传递函数为 tansig 函数,模型输出层传递函数为 purelin。网络结构如图 5 所示。设置学习率为 0.01,学习次数为 18 000 次,许可误差为 0.001。

2)BP 神经网络模型训练结果

电池组温差与液冷结构压降的仿真数值与 BP 预测值对比如图 6 和 7 所示,从图中可以看出,经 BP 神经网络训练后的预测值与 CFD 仿真数值拟合较好。图 8 为电池组

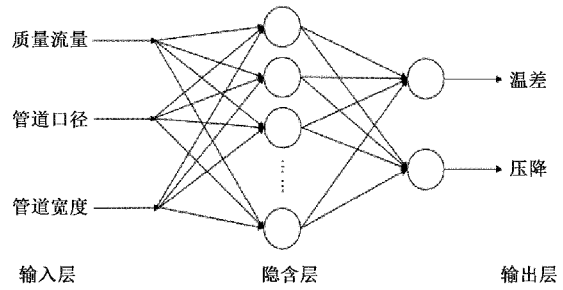


图 5 BP 神经网络拓扑结构

温差与压降的 BP 预测值误差曲线,从图中可以看出训练结果误差均控制在±5%以内,由此可见 BP 神经网络模型能充分反映输入层与输出层之间的映射关系,可作为代理模型用于多目标结构优化研究。

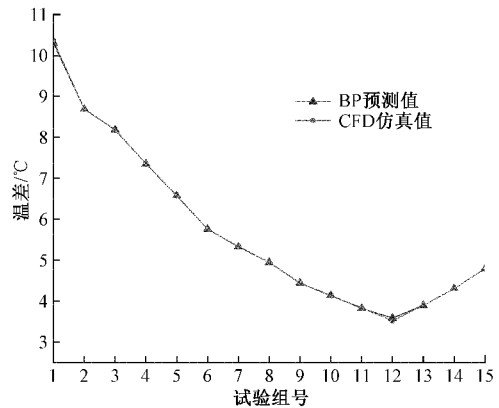


图 6 电池组温差的 CFD 仿真值与 BP 预测值对比

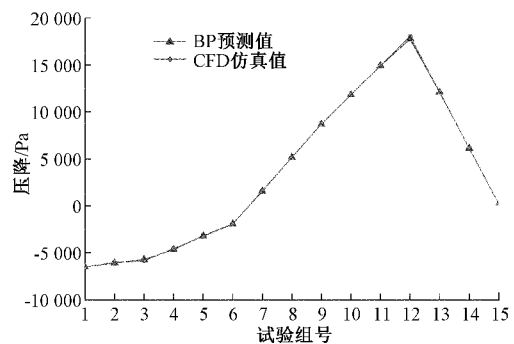


图 7 液冷结构压降的 CFD 仿真值与 BP 预测值对比

3 基于 NSGA- II 多目标遗传算法结构优化

3.1 NSGA- II 多目标遗传算法寻优与结果验证

经 BP 神经网络训练建立起映射关系后,还要求解由该代理模型作为目标函数的最优化问题,本文考虑电池组最大温差与液冷结构压降的最优化。

1)多目标遗传算法寻优

NSGA-II 算法不但计算复杂度较低,还有较高的运算速度和鲁棒性<sup>[15]</sup>。本文设置的 NSGA-II 多目标优化主要

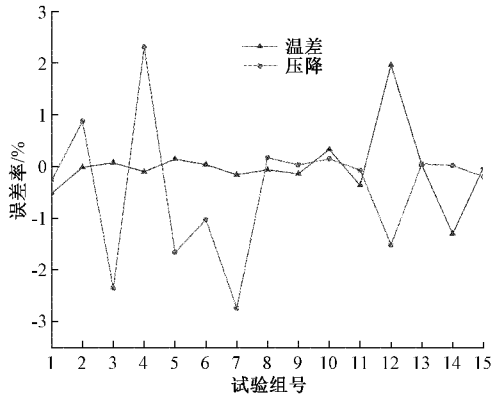


图 8 电池组温差与液冷结构压降的 BP 预测值误差率

参数有:种群大小 20,迭代次数 200,变异率 0.1,交叉概率 0.8。经过 NSGA-II 多目标优化计算,得到如图 9 所示的由部分 Pareto 解集拟合的 Pareto 前沿分布。在本文的多目标优化问题中,电池组温差作为主要优化目标,液冷结构压降为保证其不出现负压强应在大于 0 的基础上尽量小。在本文中,图中红点标记的方案被选为 Pareto 方案集中的最优方案,其各项参数分别为:冷却液入口质量流量 2.8 kg/s,冷却液出口口径 21.5 mm,液冷管管道宽度 9.4 mm,电池组温差为 4.45 °C,液冷结构压降为 1 414.07 Pa。

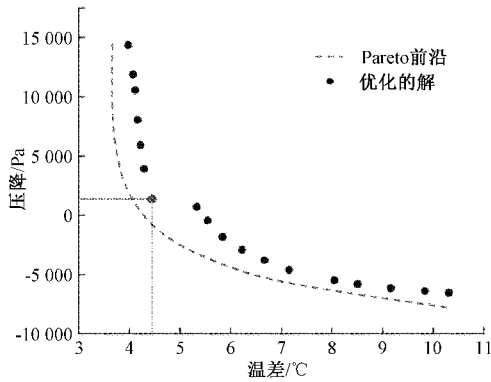


图 9 Pareto 解集

2) 优化结果验证

为了验证基于 NSGA-II 的多目标遗传算法求解的准确性,对其计算出的 Pareto 最优解和 CFD 仿真结果进行了对比,具体数值如表 5 所示。由表 5 可以看出,电池组温差优化结果与 CFD 仿真误差为 3.1%,液冷结构压降误差为 4.2%,满足工程应用 5% 的要求,说明基于 NSGA-II 的多目标遗传算法优化结果具有较高的准确性。

3.2 优化前后仿真对比

为了对比优化前与优化后的电池组液冷结构的散热性能,对优化后的模型进行了 3C 放电倍率 CFD 热仿真计算,计算结果如表 6 所示。相对于优化前液冷结构,优化后液冷结构冷却液入口质量流量增加了 833.3%,冷却液出入口口径减少 14%,液冷管管道宽度增大 88%,电池组温差

表 5 NSGA-II 优化结果与 CFD 仿真结果对比

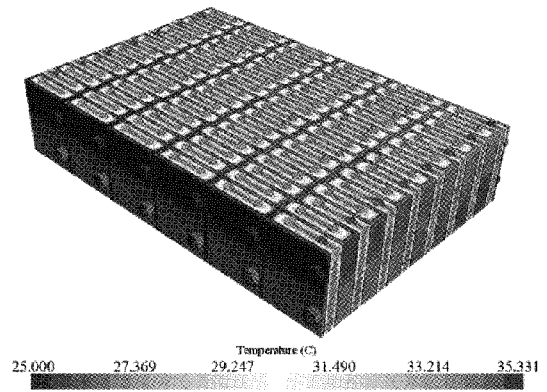
	质量流量/ (kg·s <sup>-1</sup> )	出入口口径/ mm	管道宽度/ mm	温差/ °C	压降/ Pa
NSGA-II	2.8	21.5	9.4	4.45	1 414.07
CFD 仿真	2.8	21.5	9.4	4.59	1 473.51
误差	—	—	—	3.1%	4.2%

表 6 液冷结构优化前后对比

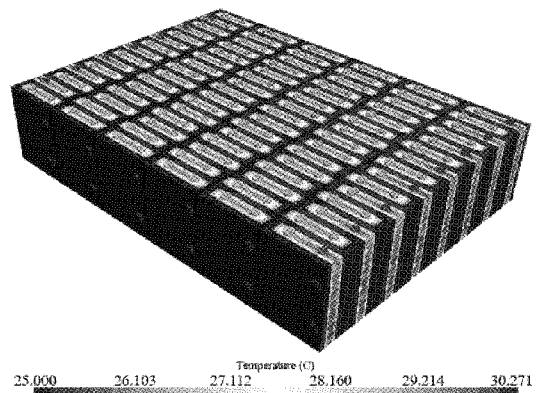
	质量流量/ (kg·s <sup>-1</sup> )	出入口口径/ mm	管道宽度/ mm	温差/ °C	压降/ Pa
优化前	0.3	25	5	9.47	-6 459.04
优化后	2.8	21.5	9.4	4.59	1 473.51
对比	上升 833.3%	下降 14%	上升 88%	下降 51.5%	上升 122.8%

降低 51.5%,可以看出在优化后液冷结构中电池组温度一致性显著提高。液冷结构压降增加 122.8%,解决了负压强问题,压降绝对值降低了 77.2%。优化后的液冷结构对电池组温差以及液冷结构压降均有显著改善。

图 10 是 3C 放电倍率结束时优化前后的温度分布云



(a) 优化前



(b) 优化后

图 10 液冷结构优化前与优化后

图,从图中可以看出,两个结构电池组温度分布大体相同,优化后冷却液温度一致性较好,从而使每块单体电池冷却效果大体相同。优化后电池组最高温度比优化前低  $5.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相比于优化前降幅约为  $14.3\%$ 。

由图 11 优化前后冷却液压力分布云图可以看出,优化前液冷结构的冷却液入口处压强较低,而出口处压强较高,出现负压强现象,液冷管内压强沿流向梯度分布。优化后液冷管内压强分布较为均匀,最大压强在冷却液入口处,最小压强在出口处。对比优化前后压强分布图,优化后压强整体增大,主要原因为冷却液入口质量流量增大幅度较大,而冷却液出入口口径与液冷管管道宽度变化幅度较小引起的。

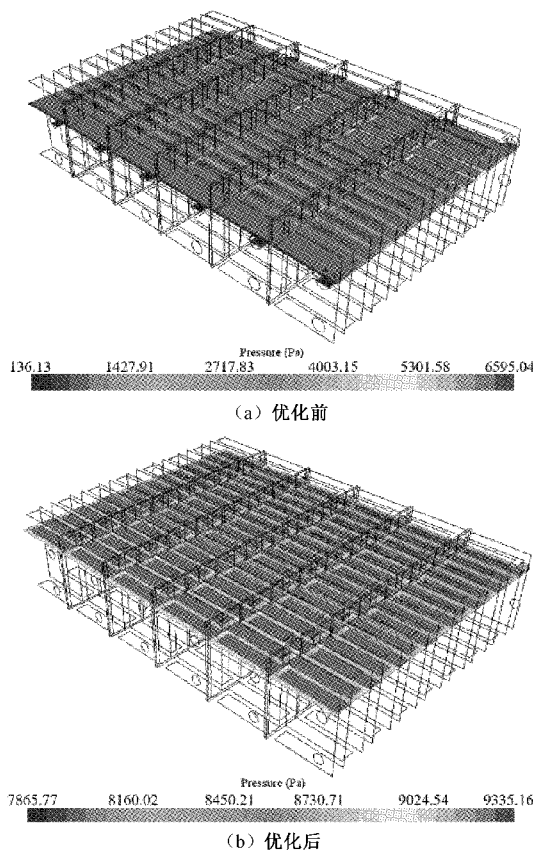


图 11 液冷结构优化前与优化后冷却液压力分布云图

#### 4 结 论

为了获得电池组液冷结构合理设计参数,利用参数处理的方法对其进行优化设计,得出如下结论:

通过进行单体电池温升试验,验证了电芯仿真计算模型的准确性,为后续进行均匀设计试验与参数处理提供数据可靠性支持。

利用均匀设计试验方法得到液冷结构参数,结合 BP 神经网络训练代理模型和 NSGA-II 多目标遗传算法进行优化求解,通过对优化前后液冷结构仿真对比发现:电池组

在液冷结构参数为冷却液入口质量流量  $2.8\text{ kg/s}$ 、冷却液出入口口径  $21.5\text{ mm}$  与液冷管管道宽度  $9.4\text{ mm}$  条件下,较优化前电池组最高温度降低  $14.3\%$ ,电池组温差降低  $51.5\%$ ,液冷结构压降绝对值降低  $77.2\%$ ,优化效果显著。

通过对液冷结构进行参数处理和优化结果对比,表明该优化方法在保证满足优化效果的同时,能够降低计算复杂度,提高优化效率,为纯电动汽车动力电池组多目标优化提供重要参考。

#### 参 考 文 献

- [1] TRAN M K, AKINSANYA M, PANCHAL S, et al. Design of a hybrid electric vehicle powertrain for performance optimization considering various powertrain components and configurations [J]. *Vehicles*, 2020, 3(1):20-32.
- [2] 戴冬冰,冯冬梅,张军,等.动力电池均衡充放电系统的研究和设计[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(11): 111-115.
- [3] 张宁,汤建林,彭发豫,等.磷酸铁锂动力电池循环寿命预测方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(1): 33-39.
- [4] YANG Y, XU X, LI W, et al. Simulation analysis of the influence of internal surface morphology of mini-channel on battery thermal management[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 8854-8864.
- [5] ZHAO C, SOUSA A, JIANG F. Minimization of thermal non-uniformity in lithium-ion battery pack cooled by channeled liquid flow[J]. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 2018, 660-670.
- [6] WANG X, MUJUMDAR A, YAP C. Thermal characteristics of tree-shaped microchannel nets for cooling of a rectangular heat sink[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, 45: 1103-1112.
- [7] 杨志红,廖向阳,包有玉,等.电池模组液冷板冲压结构设计及其散热性能研究[J]. *锻压技术*, 2021, 46(10): 112-118.
- [8] 王翔,徐品,丁亚军,等.基于 VCALB 的电池模组液冷管道优化设计[J/OL]. *储能科学与技术*, 2021: 1-8 [2021-12-28].
- [9] 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.
- [10] 金标,邹武元,刘方方,等.基于响应面法的混合式电池热管理系统优化[J]. *电源技术*, 2021, 45(8): 1073-1076,1081.
- [11] BERNARDI D, PAWLIKOWSKI E, NEWMAN J. A general energy balance for battery systems[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 1985, 132(1): 5-12.
- [12] 魏本建,鲁怀敏,朱红萍,等.软包装锂离子动力电池生

- 热速率测算方法研究[J]. 电源技术, 2017, 41(11): 1550-1552, 1568.
- [13] 张良, 许思传, 万玉. PEM 燃料电池用空压机多参数多目标优化[J]. 电源技术, 2016, 30(1): 81-83, 93.
- [14] 马健, 滕召胜, 邱伟, 等. 基于 IGA-BP 神经网络的智能电能计量设备退化趋势研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 123-131.
- [15] 刘新天, 李强, 郑昕昕, 等. 基于多目标优化的燃料电池汽车能量管理策略[J]. 电子测量技术, 2021, 36(6): 81-89.

### 作者简介

**李昕光**, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为新能源汽车动力电池测试技术。

E-mail: tutulxg@126.com

**元佳宇**, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源汽车动力电池热管理技术。

E-mail: yuanjiayu2014@outlook.com

**王文超**, 硕士研究生, 主要研究方向为混合动力汽车能量管理策略。

E-mail: ygwangwcnchao@foxmail.com