

# 基于浮动映射法的动力电池包散热结构设计\*

黄登峰<sup>1,2</sup> 周顺顺<sup>1,2</sup> 闫晓磊<sup>1,2</sup> 查云飞<sup>1,2</sup>

(1. 福建理工大学, 福州 350118; 2. 福建省汽车电子与电驱动重点实验室, 福州 350118)

**【摘要】**针对电动汽车运行过程中, 电池温度呈现中间高、四周低的分布, 从而影响电池使用寿命的问题, 以几何平均温度为目标函数, 提出基于浮动映射拓扑优化的稳态热传导结构设计方法, 通过算例对比分析了单工况和多工况动力电池包的最高温度及温差。分析结果表明, 所得到的拓扑构型在多工况时可以有效降低散热过程中的最高温度和温差, 使温度分布均匀。最后将该方法运用到动力电池包支撑结构中, 结果表明, 该方法在有效降低温度的同时, 不增加电池包结构的体积, 优化了材料的分布, 实现了电池包整体结构的轻量化。

**关键词:** 浮动映射法 拓扑优化 动力电池包散热 轻量化

**中图分类号:** TU318 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20230255

## Heat Dissipation Design of Power Battery Pack Structure Based on FPTO Method

Huang Dengfeng<sup>1,2</sup>, Zhou Shunshun<sup>1,2</sup>, Yan Xiaolei<sup>1,2</sup>, Zha Yunfei<sup>1,2</sup>

(1. Fujian University of Technology, Fuzhou 350118; 2. Fujian Key Laboratory of Automotive Electronics and Electric Drive, Fuzhou 350118)

**【Abstract】**As the battery temperature shows a high distribution in the middle and low distribution around during the operation of electric vehicles, it affects the battery service life. To this end, a steady-state heat conduction structure design method based on Floating Projection Topology Optimization (FPTO) is proposed using the geometric mean temperature as the objective function, and the maximum temperature and temperature difference of the power battery pack under single and multiple operating conditions are comparatively analyzed by means of an arithmetic example, which demonstrates that the obtained topological configuration can effectively reduce the maximum temperature and temperature difference in the heat dissipation process during the multiple operating conditions, so as to make the temperature distribution uniform. Finally, the method is applied to the power battery pack support structure, and the results show that the method effectively reduces the temperature without increasing the volume of the battery pack structure, optimizes the distribution of materials, and realizes lightweight of the overall structure of the battery pack.

**Key words:** FPTO method, Topology optimization, Power battery pack, Heat dissipation, Light weighting

**【引用格式】**黄登峰, 周顺顺, 闫晓磊, 等. 基于浮动映射法的动力电池包散热结构设计[J]. 汽车技术, 2024(7): 37-43.

HUANG D F, ZHOU S S, YAN X L, et al. Heat Dissipation Design of Power Battery Pack Structure Based on FPTO Method[J]. Automobile Technology, 2024(7): 37-43.

## 1 前言

锂离子电池包作为电动汽车的核心部件之一<sup>[1]</sup>, 在放电过程中对温度变化敏感, 需保证其工作在适当的温度范围内, 才能充分发挥其性能<sup>[2]</sup>。

利用电池热管理系统铺设散热片的方法可以对电池进行散热, 但同时也增大了其体积和质量。而采用热拓扑方法, 不仅节约材料、降低成本, 还能优化动力电池包的散热效果。因此, 采取拓扑优化方法<sup>[3]</sup>实现实际工程中的热防护及轻量化具有重要的研究意义。

\*基金项目: 福建省自然科学基金项目(2022J01921)。

通信作者: 黄登峰(1984—), 男, 福建莆田人, 博士, 讲师, 研究方向为汽车CAE与结构优化设计, hdfeng4950@fjut.edu.cn。

拓扑优化是在给定的设计域内寻求最佳材料分布的方法。应用较多的方法包括变密度法<sup>[4]</sup>、水平集法<sup>[5]</sup>、进化法<sup>[6]</sup>、均匀化<sup>[7]</sup>法等。Rodrigues<sup>[8]</sup>首次将拓扑优化方法应用到热传导结构中,研究了稳态热传导问题。Nishiwaki<sup>[9]</sup>以结构总体势能为目标函数,得到了最佳的稳态散热拓扑结构。王定标等<sup>[10]</sup>运用热拓扑方法,以平均温度最低为目标函数,对电子元件散热结构进行拓扑优化设计。乔赫廷等<sup>[11]</sup>引入几何平均温度作为目标函数,实现了最高温度最小化。侯丽园等<sup>[12]</sup>通过比较最优构型中的温度指标值和散热弱度值等,总结出各目标函数对不同工况的适用性。Xue等<sup>[13]</sup>将散热弱度指标应用于电池包结构散热中,以温度作为约束条件,在满足温度要求的同时,使电池包结构强度最大。Kambampati等<sup>[14]</sup>通过 $p$ 范数<sup>[15]</sup>近似得出电池包结构热处的最高温度,采用水平集方法得到最高温度下的拓扑构型。以上热传导拓扑优化方法得到的结果未考虑如中间密度单元、边界不清晰、锯齿状、精度差等问题。

浮动映射(Floating Projection Topology Optimization, FPTO)法<sup>[16]</sup>能够处理得到边界清晰且光滑的拓扑构型。为此本文以FPTO法为基础,采用几何平均温度为目标函数进行热拓扑优化,开展动力电池包支撑结构散热设计,以解决动力电池放电过程中温度分布不均及热集中等问题,获得便于制造、散热效率高的结构。

## 2 FPTO 算法原理

### 2.1 拓扑优化模型

基于FPTO法的结构散热设计包括确定设计变量、确定目标函数表达式和确定约束条件。图1为设计域模型,其中 $\Omega_1$ 为实材料区域, $\Omega_0$ 为空材料区域, $\partial\Omega$ 为边界区, $Q$ 为温度载荷向量,设计域左侧固定。

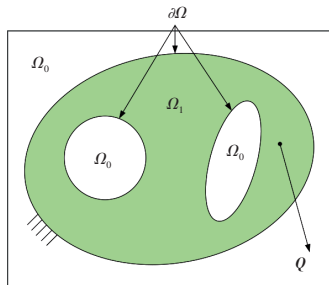


图1 设计域示意

本文基于浮动映射法,通过 $p$ 范数近似模拟电池包在发热过程中的最高温度,以电池包中几何平均温度最小化为目标函数,建立优化模型如下:

$$\begin{cases} \text{find } x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \\ \min T^{pn} = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^p \right)^{\frac{1}{p}} \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n x_i v_i \leq f \cdot V_0 \\ K(x_i)T = Q \\ x_i = 1 \quad \text{当 } x_i \in \Omega_1 \\ x_i = x_{\min} \quad \text{当 } x_i \in \Omega_0; i = 1, 2, \dots, n \\ x_{\min} < x_i < 1 \quad \text{当 } x_i \in \partial\Omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_i$ 为设计变量,取值范围通常为 $[x_{\min}, 1]$ ,为避免求解矩阵奇异, $x_{\min}$ 通常取值为0.001; $K$ 为结构的整体传热系数矩阵; $Q$ 为温度载荷向量; $T$ 为节点温度向量; $n$ 为设计域内单元总数; $v_i$ 为单元体积; $V_0$ 为初始状态下总体积; $f$ 为设定的体积分数; $t_i$ 表示第 $i$ 个单元节点的温度; $N$ 为设计域内单元节点总数; $T^{pn}$ 为几何平均温度; $p$ 为凝聚参数, $p$ 取值越大,越接近最高温度,在实际问题中较大的 $p$ 值易引发迭代振荡、收敛困难等问题,根据数值测试结果,本文 $p$ 取值为 $16^{[17]}$ 。

### 2.2 线性材料插值模型及灵敏度分析

采用浮动映射法求解散热问题时,单元材料的热传导系数与单元密度之间采用无惩罚的线性插值模型,存在如下关系:

$$E_i = x_i E_0 \quad (2)$$

式中: $E_0$ 为材料的热传导系数, $E_i$ 为插值后的单元热传导系数。

求解以几何平均温度为目标对设计变量的灵敏度时,由于存在隐式项,无法直接求解,故构造拉格朗日向量伴随方程,其目标函数如下:

$$f = T^{pn} + \lambda^T(Q - KT) \quad (3)$$

式中: $\lambda$ 为任意值,故引入拉格朗日向量构造出的新目标函数与原来的目标函数值是等价的。

对目标函数求导得:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial T^{pn}}{\partial x_i} + \frac{\partial(\lambda^T(Q - KT))}{\partial x_i} \quad (4)$$

其中:

$$\frac{\partial T^{pn}}{\partial x_i} = \frac{\partial T^{pn}}{\partial t_i} \frac{\partial t_i}{\partial x_i} = \left( \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^p \right)^{\frac{1}{p}-1} \frac{1}{N} t_i^{p-1} L_i^T \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

式中: $t_i = L_i^T T$ , $L_i$ 为索引矩阵。故有:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_i} &= \frac{\partial T^{pn}}{\partial x_i} L_i^T \frac{\partial T}{\partial x_i} + \lambda^T \left( \frac{\partial Q}{\partial x_i} - \frac{\partial K}{\partial x_i} T - K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \\ &= \left( \left[ \frac{\partial T^{pn}}{\partial x_i} L_i^T \right] - \lambda^T K \right) \frac{\partial T}{\partial x_i} - \lambda^T \frac{\partial K}{\partial x_i} T \end{aligned} \quad (6)$$

由于温度对设计变量的偏导数是隐式项,不能直接计算得到,故采用伴随法求解灵敏度,令其为零可得:

$$K\lambda = \frac{\partial T^{pn}}{\partial x_i} L_i = \left( \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i^p \right)^{\frac{1}{p}-1} \frac{1}{N} t_i^{p-1} L_i \right) \quad (7)$$

故以几何平均温度为目标的灵敏度表达式为:

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = -\lambda^T \frac{\partial K}{\partial x_i} T \quad (8)$$

求得目标函数的灵敏度后,根据热拓扑优化模型,在优化迭代的过程中需满足体积约束,故灵敏度表达式为:

$$\frac{\partial V_f}{\partial x_i} = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^n v_i} \quad (9)$$

式中: $V_f$ 为全局的单元体积。

### 2.3 变量更新及浮动映射约束施加

求得目标函数对设计变量的灵敏度后,浮动映射采用的单元求解方法为无阻尼最优性标准(Optimality Criteria, OC)法,其更新公式如下:

$$x_i^k = \begin{cases} 1, x_i^{k-1} B_i \geq 1 \\ x_{\min}, x_i^{k-1} B_i \leq x_{\min} \\ x_i^{k-1} B_i, x_{\min} \leq x_i^{k-1} B_i \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $B_i = -\frac{\partial C/\partial x_i}{\lambda \partial V_f/\partial x_i}$ ;  $\lambda$  为体积约束下的拉格朗日乘子; $k$  为迭代次数,通过二分法计算得到。

在迭代的过程中更新单元设计变量后,由于数值不稳定,会造成棋盘格现象和网格依赖性问题。FPTO法采用无惩罚的线性插值模型,通过 Heaviside 函数,删除中间密度单元,使材料中的设计变量  $x_i$  趋于 0/1 分布,即:

$$x_i^k = \frac{\tanh(\beta \cdot \phi) + \tanh[\beta(x_i - \phi)]}{\tanh(\beta \cdot \phi) + \tanh[\beta(1 - \phi)]} \quad (11)$$

式中: $\phi$  为投影函数的映射阈值,可以通过确保投影前后体积保持不变来确定; $\beta$  值控制映射函数的陡峭程度,其初始值通常设定为趋于 0 的正数,本文中的取值为  $10^{-6}$ ,“浮动”映射即表示在迭代过程中  $\beta$  的变化过程, $\beta$  取值越大,设计变量的值越趋向 0/1 分布。

### 2.4 收敛准则

为了便于实际工程中的应用与可制造性,浮动映射法通过构造水平集函数,以获得清晰、光滑的拓扑边界<sup>[18]</sup>。水平集函数的表达式为:

$$\begin{cases} \varphi^k = x^k(s,t) - \phi > 0, \text{当 } x^k(s,t) \in \Omega_1 \\ \varphi^k = x^k(s,t) - \phi = 0, \text{当 } x^k(s,t) \in \partial\Omega \\ \varphi^k = x^k(s,t) - \phi < 0, \text{当 } x^k(s,t) \in \Omega_0 \end{cases} \quad (12)$$

针对映射后的设计变量,通过线性插值,得到整个设计域中任一点  $(s,t)$  处的设计变量  $x^k(s,t)$ 。

定义拓扑误差  $\tau$  表示由水平集函数通过插值得到的光滑拓扑结构与实际拓扑结构的差值,其表达式为:

$$\tau = \frac{|C(v_i^k) - C(x_i^k)|}{C(v_i^k)} \quad (13)$$

式中: $C(v_i^k)$  为光滑设计的目标函数,通过细化变量  $x^k(s,t)$  的体积加权求得; $C(x_i^k)$  为单元设计的目标函数。

在更新迭代过程中,通过定义的拓扑误差,控制  $\beta$  的更新,当  $\tau$  达到设定值时,可认为拓扑的构型边界清晰、光滑,则停止增大  $\beta$  值。

## 3 算例分析

本文列举单工况多热源算例和多工况多热源算例<sup>[19]</sup>。单工况多热源是指集中热源的工况相同、数值相同、无权值系数;多工况多热源是指集中热源的工况不同、数值相同、权值系数相同。基于浮动映射热拓扑方法,以几何平均温度最小化为目标,通过二维算例、三维算例得到的拓扑构型及结果,得出所提出的目标函数降低最高温度、温差的有效性,并将其应用到动力电池包支撑结构中。

### 3.1 二维算例

图 2a 为单工况多热源算例,设计域尺寸为 0.05 m × 0.05 m。设计域内同时设置 5 个数值相同的集中热源  $q=100 \text{ W/m}^3$ , 设定温度  $T=0^\circ\text{C}$ , 导热系数  $K_0=200 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , 体积约束为 40%, 滤波半径  $r_{\min}=2 \text{ mm}$ 。

图 2b 所示为多工况多热源算例,设计域内设置 5 个数值相同的集中热源,  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5$  代表 5 个不同工况的热源线性叠加工况, 设定四角点温度  $T=0^\circ\text{C}$ , 其余参数同图 2a。

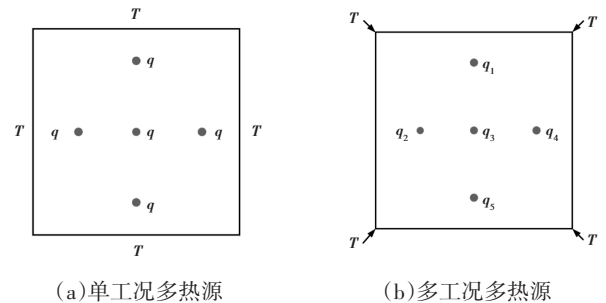

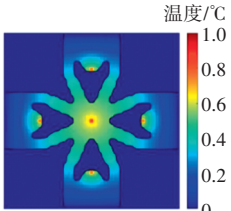
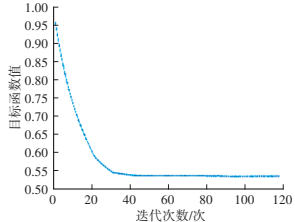
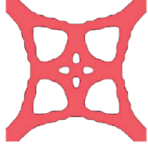
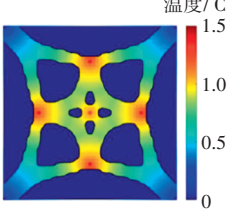
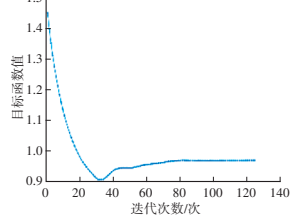


图 2 二维算例

二维算例最优拓扑构型及温度指标如表 1 所示。单工况多热源以及多工况多热源的情况下,拓扑构型及温度指标有着显著区别。单工况多热源算例中,各热源处的温度分别向四周进行扩散,导致中心点处温度较

表1 二维算例最优拓扑构型及温度指标

工况	目标函数	单元密度	温度分布	迭代曲线	热源处最高温度/°C	热源处最低温度/°C	温差/°C
单工况多热源	几何平均温度				0.83	0.74	0.09
多工况多热源	几何平均温度				1.35	1.22	0.13

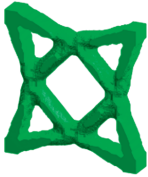
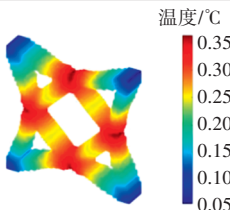
高;在多工况多热源算例中,各热源处的温度彼此相连后向四角低温区扩散,导致中心点处的热源温度较低,四周温度较高。图2a的热源处温差较小,为0.09 °C;图2b最低温度在中心热源处,由此可验证浮动映射热拓扑方法的有效性。多工况多热源的情况下得到的拓扑构型可以有效解决基于人工经验铺设散热片的方法造成的热量集中分布在中心处的现象。在此基础上,将二维算例拓展到三维,以进一步验证本文方法的准确性。

### 3.2 三维算例

三维多工况多热源算例示意如图3所示。设计域尺寸为0.06 m×0.06 m×0.01 m,设计域四边温度 $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,热源 $q_1、q_2、q_3、q_4$ 数值同为 $100\text{ W/m}^3$ ,且对称分布在正方体内部, $q_1\sim q_4$ 分别代表4种热源工况,导热系数 $K_0=200\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ,体积约束为40%,滤波半径 $r_{\min}=1.2\text{ mm}$ 。

三维算例最优拓扑构型及温度指标如表2所示。

表2 三维算例最优拓扑构型及温度指标

工况	目标函数	密度	温度分布图	热源处最高温度/°C	热源处最低温度/°C	温差/°C
多工况多热源	几何平均温度			0.32	0.32	0

热源处的温度相等,温差为零,这是由于该算例的拓扑构型具有对称性且各热源与散热边界处的距离相等。在多工况多热源情况下,各热源处的温度未直接向低温区的4个散热边界扩散,而是各热源在彼此相连后向散热边界处扩散,此时降低最高温度及减小温差的效果最佳。三维算例可以得到和二维算例相同的结论,因此以几何平均温度为目标函数在降低最高温度的同时,也降低了温差,使温度分布更均匀。故将此方法运用到新能源动力电池包支撑结构中。

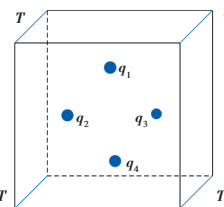


图3 三维多工况多热源

## 4 动力电池包支架设计

根据二维、三维算例得到的结果,考虑以多工况多热源几何平均温度最小化为目标,采用浮动映射热拓扑方法设计新型的电池包散热结构。

### 4.1 二维动力电池支撑结构优化模型

电池模型采用型号为18650的三元锂电池,根据出厂参数,将其简化为高度为65 mm、半径为9 mm的圆柱体。电池半径为10.5 mm(包含密封圈尺寸)。在理想状态下,电池作为非设计域,被看作一种特殊材料制作而成

的均匀发热体。传统的电池模组支架通常是注塑件,起到固定电池包的作用,并不具备良好的散热能力。为提高电池的使用寿命,降低电池最高温度及温差,本文采用浮动映射方法设计出散热性能良好的新型支撑结构。

由于电池包具有高度的对称性,本文以3×3的模型为例,设计域尺寸为0.12 m×0.12 m。设计域内设置9个50 W/m<sup>3</sup>的多工况多热源,设定四周温度 $T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,假设材料的导热系数 $K_0=200\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ,电池的导热系数 $K_1=10\text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ ,体积约束为50%,滤波半径 $r_{\text{min}}=3\text{ mm}$ 。电池支架如图4所示。

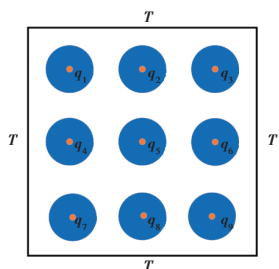
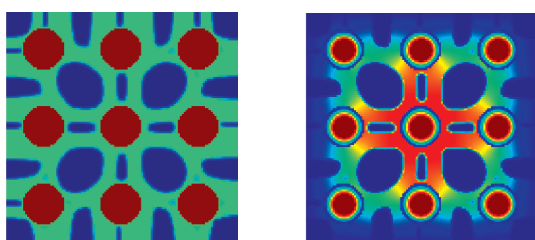
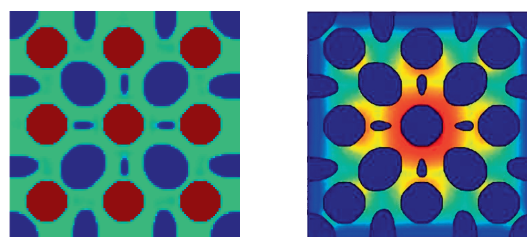


图4 动力电池支架示意

将本文所提出的浮动映射方法与传统固体各向同性材料惩罚模型(Solid Isotropic Material with Penalization, SIMP)法进行对比。图5a为SIMP法多工况多热源下的最优散热拓扑构型,其中,红色代表电池材料、深蓝色表示空材料、浅绿色代表拓扑结构材料。图5b为热源扩散示意图,其中红色部分为热源的高温区,蓝色部分为低温区。图6a和图6b为FPTO法多工况多热源下的最优散热拓扑构型和温度扩散示意图,其颜色分布与SIMP法相同。由图7可知SIMP法目标函数迭代曲线最终收敛值为22.62, FPTO法目标函数迭代曲线最终收敛值为22.61,降低了0.01。表3、表4所示分别为SIMP法和FPTO法得到的9个热源处的温度值。通过表5中对比结果可得:热源处最高温、热源处最低温度、温度差、全域的几何平均温度与传统多工况多热源SIMP方法相比,多工况多热源的FPTO方法的温度指标值更小,故散热效果更好。因此,在多工况多热源时采用浮动映射法以几何平均温度最小化为目标得到的电池包支撑结构拓扑构型,有效降低了中心热源处的最高温度,显著降低了温差,使温度分布更均匀。

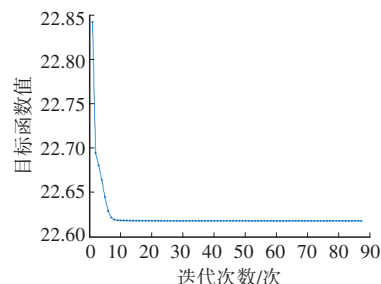


(a)拓扑构型 (b)温度分布  
图5 多工况多热源SIMP方法拓扑构型

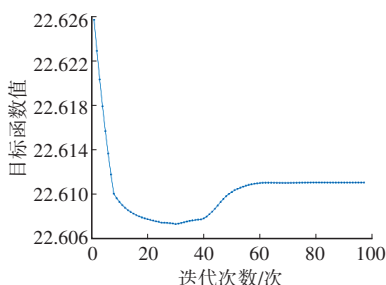


(a)拓扑构型 (b)温度分布

图6 多工况多热源FPTO方法拓扑构型



(a)SIMP法



(b)FPTO法

图7 多工况多热源迭代曲线对比

表3 SIMP法热源处温度

热源	温度/ $^{\circ}\text{C}$	热源	温度/ $^{\circ}\text{C}$
$q_1$	35.91	$q_6$	35.88
$q_2$	35.91	$q_7$	35.88
$q_3$	35.91	$q_8$	35.88
$q_4$	35.91	$q_9$	35.88
$q_5$	35.99		

表4 FPTO法热源处温度

热源	温度/ $^{\circ}\text{C}$	热源	温度/ $^{\circ}\text{C}$
$q_1$	35.91	$q_6$	35.88
$q_2$	35.91	$q_7$	35.88
$q_3$	35.91	$q_8$	35.88
$q_4$	35.91	$q_9$	35.88
$q_5$	35.99		

表5 温度指标对比  $^{\circ}\text{C}$

方法	热源最高温度	热源最低温度	温差	平均温度
SIMP	35.99	35.88	0.13	1.02
FPTO	35.96	35.87	0.09	0.99

## 4.2 三维动力电池支撑结构优化模型

基于FPTO法设计三维动力电池支撑结构优化模型如图8所示。设计域尺寸为 $0.12\text{ m}\times 0.12\text{ m}\times 0.008\text{ m}$ 。设计域内设置9个集中热源 $q=50\text{ W/m}^3$ ,设定4面绿色部分为动力电池包支撑结构散热区域,温度为 $T=0\text{ }^\circ\text{C}$ 。假设材料的导热系数 $K_0=200\text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,电池的导热系数 $K_1=10\text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,体积约束为50%,滤波半径 $r_{\min}=3\text{ mm}$ 。

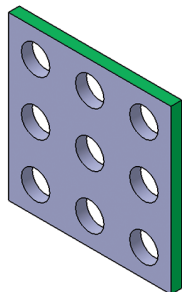
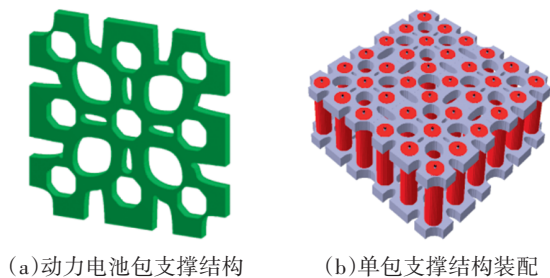


图8 新能源电池包支撑结构模型

在图8所示新能源电池包的支撑模型的基础上,采用几何平均温度最小化为目标函数的浮动映射拓扑优化方法得到的最优拓扑构型如图9a所示。根据图9a得到的最优散热拓扑构型并将其导入三维软件CATIA中进行后处理,得到整个单体电池包支撑结构如图9b所示。



(a)动力电池包支撑结构 (b)单包支撑结构装配  
图9 单个电池包装配模型

## 5 结束语

本文利用浮动映射拓扑优化方法以几何平均温度最小化为目标函数,进行电动汽车电池包散热结构优化设计。二维、三维算例及动力电池包支撑结构的拓扑优化结果表明:单工况多热源、多工况多热源的情况下,以几何平均温度为目标的热拓扑结构,降低了散热过程中的最高温度和温差,使温度分布更加均匀,散热性更好。

将此方法运用在新能源动力电池包支撑结构,通过SIMP法和FPTO法的对比,可以得出:所提出的FPTO方法降低了动力电池的最高温度,使温度分布更均匀,提高了电池的使用寿命和安全性,有效地解决了传统电池热管理方法增加电池包结构体积和质量

的问题,能够在合理分配材料的同时,减轻了电池包整体的质量。

## 参 考 文 献

- [1] 蔡扬扬,殷莎,赵海斌,等. 新能源汽车电池包箱体结构的轻量化研究现状[J]. 汽车技术, 2022(2): 55-62.  
CAI Y Y, YIN S, ZHAO H B, et al. Research Status of Lightweight on Battery Pack Box Structure for New Energy Vehicles[J]. Automobile Technology, 2022(2): 55-62.
- [2] CHEN F, WANG J, YANG X L. Topology Optimization Design and Numerical Analysis on Cold Plates for Lithium-Ion Battery Thermal Management[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 183.
- [3] 闫晓磊,谢露,陈佳文,等. 一种密度约束的拓扑优化方法[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(3): 350-355.  
YAN X L, XIE L, CHEN J W, et al. A Density-Constrained Topological Optimization Method[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2021, 40(3): 350-355.
- [4] SIGMUND O. A 99 Line Topology Optimization Code Written in Matlab[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 21: 120-127.
- [5] XIA Q, SHI T L, XIA L. Topology Optimization for Heat Conduction by Combining Level Set Method and BESO Method[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 200-209.
- [6] HUANG X, XIE Y M. Bi-Directional Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures with One or Multiple Materials[J]. Computational Mechanics, 2009, 43: 393-401.
- [7] XIA L, BREITKOPF P. Design of Materials Using Topology Optimization and Energy-Based Homogenization Approach in Matlab[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2015, 52(6): 1229-1241.
- [8] RODRIGUES H, FERNANDES P. Topology Optimal Design of Thermoelastic Structures Using A Homogenization Method [J]. Control and Cybernetics, 1994, 23(3): 553-563.
- [9] NISHIWAKI A S, IZUI K, YOSHIMURA M. Topology Optimization for Thermal Problems Based on Assumed Continuous Approximation of Material Distributions[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C, 2007, 19(9): 2426-2433.
- [10] 王定标,李昂,吴淇涛,等. 电子元件散热结构的拓扑优化设计[J]. 低温与超导, 2023, 51(5): 37-42.  
WANG D B, LI A, WU Q T, et al. Topology Optimization Design of Heat Dissipation Structures for Electronic Components[J]. Low Temperature and Superconductivity, 2023,51(5): 37-42.
- [11] 乔赫廷,张永存,刘书田. 散热结构拓扑优化目标函数的

- 讨论[J]. 中国机械工程, 2011, 22(9): 1112-1117+1122.
- QIAO H T, ZHANG Y C, LIU S T. Discussion of Objective Functions in Heat Conduction Topology Optimization[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 22(9): 1112-1117+1122.
- [12] 侯丽园, 丁晓红. 散热结构拓扑优化目标函数适用性讨论[J]. 半导体光电, 2016, 37(2): 202-206+212.
- HOU L Y, DING X H. Design Objectives of Heat Channel Layout Optimization[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(2): 202-206+212.
- [13] ZHU X F, ZHAO C, WANG X, et al. Temperature-Constrained Topology Optimization of Thermo-Mechanical Coupled Problems[J]. Engineering Optimization, 2019, 51(10): 1687-1709.
- [14] KAMBAMPATI S, GRAY J S, KIM H A. Level Set Topology Optimization of Structures Under Stress and Temperature Constraints[J]. Computers & Structures, 2020, 235.
- [15] KIYONO C Y, VATANABE S L, SILVA E C N, et al. A New Multi-P-Norm Formulation Approach for Stress-Based Topology Optimization Design[J]. Composite Structures, 2016, 156: 10-19.
- [16] HUANG X D. Smooth Topological Design of Structures Using the Floating Projection[J]. Engineering Structures, 2020, 208: 110330.
- [17] 张永存, 刘书田. 最优传热结构设计问题的数学模型[J]. 自然科学进展, 2008(6): 680-685.
- ZHANG Y C, LIU S T. Mathematical Model of Optimal Heat Transfer Structure Design Problem[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2008(6): 680-685.
- [18] YAN X L, CHEN J W, HUA H Y, et al. Smooth Topological Design of Structures with Minimum Length Scale and Chamfer/Round Controls[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, 383.
- [19] ZHUANG C G, XIONG Z H, DING H. A level Set Method for Topology Optimization of Heat Conduction Problem Under Multiple Load Cases[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2007, 196(4/5/6): 1074-1084.

(责任编辑 王 一)

修改稿收到日期为2023年5月30日。

## 《汽车工艺与材料》投稿须知

《汽车工艺与材料》于1986年创刊,是由中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车材料与制造技术类月刊,目前已入选《中文核心期刊要目总览》(第二版)、RCCSE中国准核心学术期刊(B+)、中国核心期刊(遴选)数据库、中国学术期刊综合评价数据库、欧洲学术出版中心数据库(EuroPub)、哥白尼精选期刊数据库(ICI Journals Master List)、EBSCO International数据库。

《汽车工艺与材料》以“为中国报道汽车制造,为汽车引领工艺材料”为办刊宗旨,致力于报道以汽车轻量化技术和智能制造技术为核心的先进制造技术与材料应用技术,重点关注电动汽车蓄电池、电机、电控关键材料技术,燃料电池材料技术,高强度钢、铝镁合金、非金属材料及其成形技术,连接技术,智能装备与绿色制造等,以期通过高质量学术内容的出版和传播助推行业创新技术的交流与发展。

《汽车工艺与材料》杂志关注领先的整车及零部件企业和材料、装备等供应商,及时报道汽车行业最新的产品设计、制造、材料、加工技术、生产装备、检测技术等方面的成功案例。

主要栏目:

AT&M视界、生产现场、材料应用、生产装备、检测技术、数字化园地、行业动态等。

投稿要求:

- (1) 来稿须具有独创性并结合与实践相结合,文章字数最好控制在5000~8000字之内。
- (2) 来稿不能在国内、外公开杂志上发表过,请勿一稿多投。
- (3) 来稿的试验方法、试验数据、试验结论必须准确、可靠。
- (4) 来稿须包括以下项目:题名、作者姓名、作者单位、摘要(200字左右)、参考文献等。来稿采用word文档的格式。
- (5) 来稿文章格式应符合一般科技论文格式,或参考近期刊所刊登文章格式。
- (6) 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献,且在文中应标注文献引用处。
- (7) 本刊使用网站投稿,投稿网址:<http://qcgycyl.cbpt.cnki.net>,咨询电话:0431-82026054。

竭诚欢迎汽车行业及相关各界的专家学者积极向本刊投稿。