

基于热弹耦合特性的电池支架超结构设计与软件研发

付钰

江汉大学 智能制造学院 武汉 430056

DOI: 10.32629/ems.v8i9.22165

[摘要] 针对新能源汽车电池支架在轻量化设计中面临的动刚度与导热性能相互矛盾的问题，本文聚焦热弹耦合效应对结构性能的影响，研究高力学性能导热超结构的拓扑优化设计方法。基于热力学与连续介质力学理论，协同考虑热场与应力场的强耦合作用，引入渐近均匀化理论与稳态力热解耦求解技术，构建了微结构材料构型与等效热力学性能之间的预测模型与多目标优化框架。基于此，开发了一套面向热弹耦合超结构性能拓扑优化的专用软件系统，通过数值算例验证了该优化设计方法与软件系统的有效性，为高力学性能导热超结构的高稳定性设计提供了理论方法与工具支持。

[关键词] 热弹耦合；电池支架；导热超结构；拓扑优化；软件系统设计

中图分类号：TP391.9

Design and Software Development of Battery Bracket Metamaterials Based on Thermoelastic Coupling

Fu Yu

School of Intelligent Manufacturing, Jiangnan University, Wuhan 430056

[Abstract] To address the contradictory problem between dynamic stiffness and thermal conductivity in the lightweight design of new energy vehicle battery brackets, this paper focuses on the influence of thermoelastic coupling effects on structural performance and investigates the topology optimization design method for high mechanical performance thermally conductive metamaterials. Based on the theories of thermodynamics and continuum mechanics, and synergistically considering the strong coupling effect of thermal and stress fields, the asymptotic homogenization theory and steady-state thermo-mechanical decoupling solution techniques are introduced to construct a prediction model and a multi-objective optimization framework between the microstructural material configuration and equivalent thermo-mechanical properties. Based on this, a dedicated software system for the topology optimization of thermoelastic coupled metamaterial performance is developed. The effectiveness of the optimization design method and the software system is verified through numerical examples, providing theoretical methods and tool support for the highly stable design of high mechanical performance thermally conductive metamaterials..

[Key words] Thermoelastic coupling, Battery bracket, Thermally conductive metamaterial, Topology optimization, Software system design

引言

发展新能源汽车是我国从汽车大国迈向汽车强国的必由之路^[1]。对于关键部件电池组支架，其首要目标是在轻量化下提高承载能力，同时需及时散热防止过热。现有液冷方法会增加结构复杂度及泄露风险^[2]。因此，支架的轻量化、动刚度与导热性能存在互斥关系，如何在保证刚度的同时实现高热导率，是一个多学科交叉的多目标优化设计问题。在复

杂工作环境中，热弹耦合会导致形变与不可逆的热传导，引起系统性能下降^[3]。

超结构已成为设计满足超轻质、多目标热弹耦合结构的最有希望途径。然而，目前针对高力学性能导热超结构的设计多为参数与经验式设计，缺少理性工具^[4]。随着3D打印技术的发展，含复杂内部构型的高力学性能导热超结构制备已成为可能^[5]。

结构拓扑优化方法能够在不改变结构宏观尺寸的情况下改善结构性能,已在轻量化、比刚度设计等领域广泛应用。近年来,已有许多学者研究了考虑热力多物理场的结构优化方法。然而,现有的热弹耦合拓扑优化大多局限于宏观单一尺度,或仅针对特定的简单载荷工况,难以充分发挥材料在复杂热力环境下的性能潜力^[6]。在工程设计初始阶段,通过微观构型设计提升材料固有等效属性是改善宏观性能的有效途径。此外,对于大规模复杂结构的多尺度优化,完全耦合的瞬态非线性求解会导致极其庞大的计算量^[7]。因此,如何在保证物理意义的前提下,合理解耦热力方程以提取关键的等效属性,并建立高效的多尺度拓扑优化框架,从而实现复杂结构热学与力学性能的协同提升,仍是当前亟待解决的问题。

在软件研发方面,现有的商业有限元分析软件优势多集中于复杂系统的解耦与前向分析,在结构优化设计方面功能较弱,尚无针对热弹耦合超结构的专用优化设计功能^[8]。设计直觉上,为了抵抗复杂的机械载荷,材料倾向于分布成交叉的斜杆或复杂的桁架;而为了最快地散热,材料又倾向于分布成连接热源与冷源的最短直线。针对上述挑战,本文以新能源汽车电池支架为对象,基于热力学与连续介质力学理论,协同考虑热场与应力场的强耦合影响,建立热弹耦合超结构性能优化框架,为高力学性能导热超结构的高稳定性设计提供方法支持。

1. 热弹耦合特性优化算法研究

对于考虑热传导与力传导以及两者之前耦合作用影响的标准热弹耦合结构设计域,其热力学与动力学边界条件可表示为:

$$\begin{cases} T = T_D & \text{on } \Gamma_D \\ \mathbf{q} = \bar{\mathbf{q}} & \text{on } \Gamma_N \\ \mathbf{q} = \mathbf{h}(T_\infty - T) & \text{on } \Gamma_C \\ \mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}}_0 & \text{on } \Gamma_{u_0} \\ \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \bar{\mathbf{f}} & \text{on } \Gamma_\sigma \end{cases} \quad (1)$$

其中,固定温度边界(Dirichlet 边界) Γ_D 上的温度为定值 T_D , 固定热流密度边界(Neumann 边界) Γ_N 上的热流为定值 $\bar{\mathbf{q}}$, 对流换热边界 Γ_C 上的散热与对流换热系数 $\mathbf{h}$ 以及环境温度 T_∞ 与边界温度 T 的差值相关,位移固定边界 Γ_{u_0} 上的位移为 $\bar{\mathbf{u}}_0$, 外力边界 Γ_σ 上的外力为 $\bar{\mathbf{f}}$ 。

在定义了宏观结构的常规热力学与动力学边界条件后,

针对超结构单胞的等效性能分析,需要引入基于渐近均匀化理论的周期性边界条件。单胞的周期性边界条件要求其在变形和传热过程中,边界上的物理量波动必须保持连续,以确保相邻单胞之间能够完美拼合。具体而言,单胞相对平行边界上的位移与温度关系可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{u}^+ - \mathbf{u}^- = \boldsymbol{\varepsilon}^0 (\mathbf{x}^+ - \mathbf{x}^-) = \boldsymbol{\varepsilon}^0 \Delta \mathbf{x} \\ T^+ - T^- = \nabla T^0 \cdot (\mathbf{x}^+ - \mathbf{x}^-) = \nabla T^0 \cdot \Delta \mathbf{x} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{u}^+$ 与 $\mathbf{u}^-$ 分别表示单胞相对平行边界上的节点位移向量, T^+ 与 T^- 分别表示相对边界上的节点温度, $\mathbf{x}^+$ 与 $\mathbf{x}^-$ 为对应节点在坐标系下的空间位置向量, $\Delta \mathbf{x}$ 为相对边界之间的固定距离向量, $\boldsymbol{\varepsilon}^0$ 为作用于单胞的宏观应变张量, ∇T^0 为作用于单胞的宏观温度梯度向量。通过在单胞边界节点对之间施加上述差值约束,可以有效消除边界效应对微观结构等效性能计算的影响。

基于有限元方法,考虑一个超结构单胞,经典傅里叶热传导下的热弹强耦合结构系统经典控制方程可表示为^[6]:

$$\begin{cases} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} - \mathbf{G}\boldsymbol{\Theta} = \mathbf{P}_b + \mathbf{P}_t \\ \mathbf{S}\boldsymbol{\Theta} + \mathbf{H}\dot{\boldsymbol{\Theta}} + \mathbf{F}\mathbf{U} = \mathbf{P}_N + \mathbf{P}_C \end{cases} \quad (3)$$

其中,运动控制方程中的 $\mathbf{M}$, $\mathbf{K}$, $\mathbf{G}$ 分别为系统的质量阵,刚度阵,热应力矩阵,这里 $\mathbf{P}_b$ 和 $\mathbf{P}_t$ 是由体积力与外力产生的载荷矩阵。此外,热传导控制方程中的 $\mathbf{S}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{F}$ 分别为系统的热传导矩阵、热生成矩阵、由应变引起的热生成耦合矩阵, $\mathbf{P}_N$ 和 $\mathbf{P}_C$ 分别为边界固定热流与对流换热产生的载荷矩阵。然而,在本文针对超结构单胞进行等效刚度与等效热导率的均匀化计算与拓扑优化时,主要关注结构在稳态和静力学条件下的宏观等效固有属性。因此,可结合实际物理工况对上述强耦合方程进行合理的简化与解耦。首先,由于不考虑结构的瞬态动力学响应,系统处于静力学平衡状态,加速度与速度项为零,即可以忽略质量惯性力项以及由应变率引起的热生成耦合项。其次,在稳态热传导假设下,系统温度场不随时间发生变化,温度变化率项亦为零。最后,在基于渐近均匀化理论独立评估单胞的等效力学与热学属性时,通常分别在等温条件下求解静力学平衡方程以获取等效刚度,以及在无机械载荷条件下求解稳态热传导方程以获取等效热导率。经过上述合理的物理简化,复杂的强耦合控制方程退化为相互独立的静态线弹性方程与稳态热传导方程,这不仅符合宏

观等效属性的物理定义，也大幅降低了后续多目标拓扑优化与灵敏度分析的计算成本。

在将系统解耦为稳态静力学与稳态热传导方程后，单胞等效属性的灵敏度分析可基于经典的伴随变量法（在均匀化理论中表现为自伴随特性）进行推导^[9]。为了实现力热协同设计，本文构建了由等效力学性能 C_{force} 与等效热学性能 C_{heat} 组成的加权多目标函数：

$$C = \omega C_{force} + (1 - \omega) C_{heat} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \text{Max } \{C = \omega C_{force} + (1 - \omega) C_{heat}\} \\ & \text{s.t. } \begin{cases} \mathbf{K}\mathbf{U}^* = \mathbf{F}^0 \\ \mathbf{S}\boldsymbol{\Theta}^* = \mathbf{Q}^0 \\ \sum_{e=1}^N \Omega_e p_e - l_v \Omega_0 \leq 0 \\ p_e = p_{min} > 0 \text{ or } 1, (e=1, 2, \dots, N) \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

其中， ω 为权重系数， $\mathbf{U}^*$ 和 $\boldsymbol{\Theta}^*$ 分别为单胞在周期性边界条件下的节点波动位移向量与波动温度向量， $\mathbf{F}^0$ 和 $\mathbf{Q}^0$ 分别为由宏观单位应变场与宏观单位温度梯度在单胞节点上引起的等效力学载荷向量与等效热载荷向量。在约束条件中， Ω_e 为单元的体积， Ω_0 为单胞设计域的总体积， l_v 为目标体积分数上限， N 为有限元网格划分的总单元数。设计变量 p_e 在BESO算法中取离散值，当单元为实体材料时为1；当单元为孔隙时，为了避免有限元矩阵奇异， $p_{min} = 0.001$ 。

在拓扑优化设计中，材料的弹性模量与热导率可通过基于单元伪密度的固体各向同性材料惩罚模型(SIMP)进行插值^[10]：

$$\begin{cases} E_e(p_e) = p_e^{p_E} E_0 \\ \kappa_e(p_e) = p_e^{p_K} \kappa_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中， p_E 与 p_K 分别为弹性模量与热导率的惩罚因子， E_0 与 κ_0 分别为实体材料的标准弹性模量与标准热导率。基于渐近均匀化理论，单胞在给定宏观应变场下的等效力学性能（如等效刚度或应变能）对设计变量的偏导数，可通过单元局部的应变能密度直接表示：

$$\frac{\partial C_{force}}{\partial p_e} = \frac{1}{V} (\mathbf{u}_e^0 - \mathbf{u}_e^*)^T \frac{\partial \mathbf{K}_e}{\partial p_e} (\mathbf{u}_e^0 - \mathbf{u}_e^*) \quad (7)$$

其中， V 为单胞的总体积， $\mathbf{u}_e^0$ 为由宏观应变场在单元上引起的节点位移向量， $\mathbf{u}_e^*$ 为通过求解周期性边界条件下的单胞平衡方程得到的单元局部波动位移向量， $\mathbf{K}_e$ 为单元刚度矩阵，其对伪密度的偏导数可由前述插值模型直接求得。同理，

单胞在给定宏观温度梯度下的等效热学性能对设计变量的偏导数，可通过单元局部的热耗散能表示：

$$\frac{\partial C_{heat}}{\partial p_e} = \frac{1}{V} (\mathbf{t}_e^0 - \mathbf{t}_e^*)^T \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial p_e} (\mathbf{t}_e^0 - \mathbf{t}_e^*) \quad (8)$$

其中， $\mathbf{t}_e^0$ 为由宏观温度梯度在单元上引起的节点温度向量， $\mathbf{t}_e^*$ 为单胞内部的局部波动温度向量， $\mathbf{S}_e$ 为单元热传导矩阵。

综合上述推导，结合链式法则，多目标综合性能 C 对设计变量 p_e 的总灵敏度可显式表达为力学灵敏度与热学灵敏度的线性加权：

$$\frac{\partial C}{\partial p_e} = \omega \frac{\partial C_{force}}{\partial p_e} + (1 - \omega) \frac{\partial C_{heat}}{\partial p_e} \quad (9)$$

上述推导给出了综合性能目标对设计变量的显式偏导数，结合前文的加权公式即可获取全局灵敏度梯度。此外，为克服拓扑优化中易出现的“棋盘格”与网格依赖现象，本文引入灵敏度过滤机制对上述计算结果进行平滑修正，完成单胞微观构型的迭代更新与最优分布求解。

2. 热弹耦合超结构优化系统架构

针对多尺度超结构单胞在复杂热力耦合环境下的设计需求，本文基于渐进拓扑优化理论、有限元数值均匀化方法以及并行计算架构，开发了一套面向热力协同设计的超结构单胞拓扑优化系统。该系统旨在将微观构型的演化机制与宏观等效物理性能深度融合，为高性能多功能超材料的设计提供理论支撑与高效的数值工具。在软件架构方面，系统采用面向对象编程思想，以 Matlab 为核心计算引擎，并依托其图形用户界面(GUI)开发环境构建了交互式操作平台，兼顾了操作的便捷性与数据管理的安全性。

为提升多尺度建模的通用性，该系统实现了与 HyperMesh 等主流有限元前处理软件的无缝数据接口，支持复杂单胞初始网格模型的高效导入。同时，系统底层集成了前文所述的稳态热力解耦算法与双向渐进演化策略，能够精准、稳定地执行单胞等效刚度与等效热导率的多目标协同优化。此外，系统内置了严格的输入数据校验机制以保障程序的鲁棒性，并提供了优化迭代过程的实时可视化与结果导出模块，为先进热力超结构的工程应用与设计提供可靠的参考依据。

2.1 热弹耦合超结构优化系统总体设计

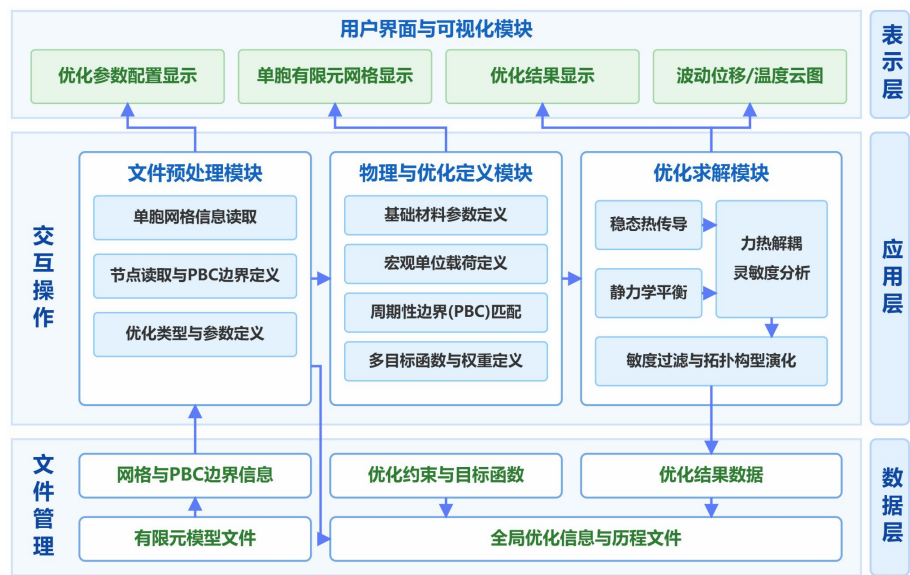


图 1 热弹强耦合结构优化系统架构图

热弹耦合超结构拓扑优化系统总体架构共分为三层，如图 1 所示：（1）表示层由用户界面与可视化模块构成，提供人机交互功能，支持单胞有限元网格、优化参数配置、拓扑构型演化过程以及波动位移与温度云图的实时显示与提取。（2）应用层包含文件预处理、物理与优化定义以及优化求解三大核心模块，负责完成单胞网格与周期性边界读取、宏观载荷与基础材料参数定义，并执行稳态力热解耦求解、灵敏度分析、敏度过滤与拓扑构型演化等关键算法逻辑。（3）数据层负责底层文件管理，涵盖有限元模型文件解析与全局优化信息存储，实现网格与边界信息向应用层的输入，以及优化约束、目标函数与最终构型密度矩阵等结果数据的统一汇集与持久化。

2.2 热弹耦合超结构优化系统数据结构

如表 1 所示，网格与约束信息包含单元编号、节点编号及坐标等基础有限元数据。系统支持读取商业软件（如 COMSOL、HyperMesh 等）已划分完成的网格模型，并能够根据单胞的几何特征自动计算匹配周期性边界条件所需的主从节点关系。

表 1 网格与约束信息表

列名	数据类型	描述
MeshEleID	Int	单元编号
MeshEleNodes	Int	单元节点号
MeshNodeID	Int	节点编号
MeshNodePos	Int	节点坐标

如表 2 所示，材料与载荷信息涵盖了基础材料的密度、杨氏模量、泊松比及热导率等物理参数。基于均匀化理论，传统的节点载荷被更新为施加在单胞上的宏观单位应变与宏观单位温度梯度，同时该表也记录了多目标协同优化所需的权重系数等算法参数。

表 2 材料与载荷信息表

列名	数据类型	描述
MatDensity	Float	密度
MatYoungsMod	Float	杨氏模量
MatPoiRatio	Float	泊松比
MatHeatCon	Float	热导率
MacroStrain	Float	单元应变
MacroTempGrad	Float	单元温度梯度
WeightFactor	Float	权重系数

如表 3 所示，优化结果信息完整记录了拓扑演化后的单胞构型网格、综合目标函数值、单胞内部的波动位移场与波动温度场，以及目标函数与体积分数的迭代收敛历史。此外，系统支持将上述场变量的优化结果云图直接转化为常用的位图格式以供后续分析与展示。

表 3 优化结果信息表

列名	数据类型	描述
OptMeshResult	Cell	优化结构网格
OptObjResult	Float	优化目标函数
OptDispResult	Cell	优化结构位移场
OptTempResult	Cell	优化结构温度场
IterHistory	Array	目标函数与体积分数迭代收敛历史

2.3 热弹耦合超结构优化流程

在本软件中, 热弹耦合超结构优化流程是一个反复迭代的演化过程。结合前文建立的系统控制方程与多目标优化求解方法, 本软件的优化流程如图2所示, 具体迭代过程如下:

步骤1: 定义设计域、有限元网格、基础材料特性以及周期性边界条件。

步骤2: 定义迭代优化参数, 例如目标体积分数上限、敏感度过滤半径、材料插值惩罚因子、多目标权重系数等。

步骤3: 执行稳态有限元分析, 该过程可拆分为单元与整体系统矩阵计算组装、施加周期性边界条件、求解单胞波动位移与温度场等子步骤。

步骤4: 开展设计变量灵敏度分析, 该过程可拆分为力热多目标偏导数计算、节点敏感度过滤与平滑处理等子步骤。

步骤5: 基于过滤后的各单元灵敏度数值更新伪密度, 构建新的单胞拓扑构型。

步骤6: 判断当前构型是否满足体积分数约束以及目标函数是否收敛, 若不满足则重复步骤3-5直至达到收敛条件结束优化。

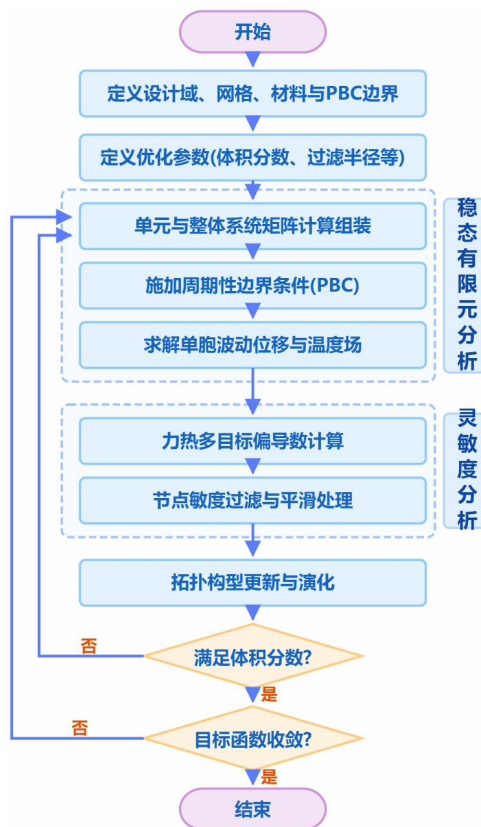


图2 热弹耦合超结构优化流程

3. 热弹耦合超结构优化软件功能验证

热弹耦合超结构优化软件界面如图3所示, 其中左侧为优化数据树状视图, 右侧为主界面, 有限元模型可通过商业软件导入也可由用户自行建模。为了验证本文提出的基于渐近均匀化理论的多尺度热力协同优化方法的有效性, 本节基于自主开发的优化软件平台进行单胞拓扑优化算例测试。与传统的宏观结构优化不同, 本算例的设计域为微观周期性单胞。单胞模型采用正方形设计域, 离散为 100×100 的平面应变有限元网格。基体材料假设为各向同性材料对的铝合金, 其杨氏模量为 $E_0 = 71 \text{ GPa}$, 泊松比为 $\nu = 0.33$, 热导率为 $\kappa_0 = 160 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。在边界条件方面, 不再施加传统的宏观固定约束与集中载荷, 而是对单胞的相对边界施加周期性边界条件, 并通过施加3个独立的单位宏观应变工况与2个独立的单位宏观温度梯度工况来驱动单胞的局部变形与热传导。优化过程中, 力学与热学惩罚因子分别取为3和2, 敏感度过滤半径设定为5。优化目标为最大化等效刚度与等效热导率的加权和, 默认力学性能的权重系数为0.5。

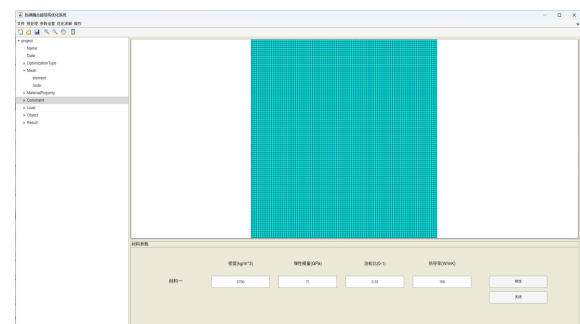


图3 热弹耦合超结构优化软件界面

由于现有的商业软件均没有热弹耦合超结构优化功能, 因此优化结果不与商业软件对比, 仅与同体分比的原始结构对比, 优化结果可显示为 1×1 也可显示为 3×3 以帮助用户确保连接处不会断开。

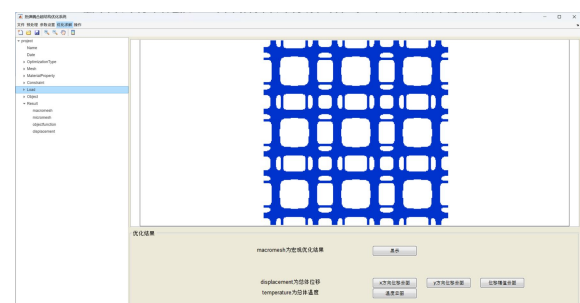


图4 热弹耦合超结构优化结果

对于 $\omega=0.5$ 时的优化结果的 3×3 拓扑结构如图4所示, 相比默认体分比0.5的原始结构, 优化后的综合目标函数为96.52%, 为了探究权重系数 ω 对优化结果的具体影响, 图5展示了不同取值下的微观拓扑构型及其对应的综合目标函数 C 。从图中可以看出, ω 分别为0.25、0.5和0.75时, 优化后的综合目标函数分别提升了98.22%、96.52%和97.56%。结果表明, 通过合理调节权重系数进行拓扑优化设计, 能够有效引导材料的空间分布, 从而显著提升结构的综合力学等效性能。

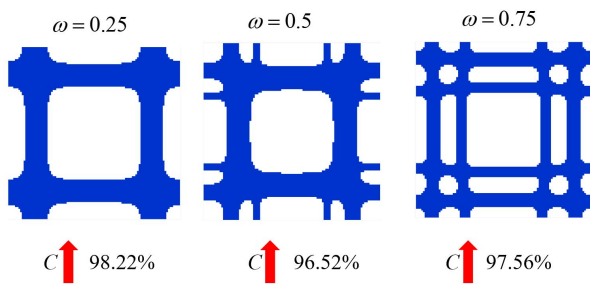


图5 不同权重系数 ω 下的微观拓扑结构与综合目标函数对比

4. 结束语

本文针对新能源电池支架轻量化设计中刚度与散热的矛盾, 提出了热弹耦合超结构拓扑优化方法并研发了专用软件, 主要结论如下: (1) 基于渐近均匀化理论, 将复杂的热弹强耦合方程合理耦为独立的稳态静力学与热传导方程, 构建了微观构型与等效热力学性能的多目标优化框架。(2) 基于 Matlab 开发了热弹耦合超结构优化软件系统, 集成了模型导入、参数定义、力热解耦求解、灵敏度分析及结果可视化等核心模块, 打通了微观构型设计全流程。(3) 数值算例表明, 该系统能稳定执行多目标协同优化, 优化后的超结构综合性能显著提升, 调节权重系数可有效引导材料分布。本研究为高力学性能导热超结构设计提供了理论与工具支持。

[参考文献]

[1]Miao Y, Hsieh P, Ma S Y, et al. Commercial progress of new energy vehicles in China. Energy, 2019, 172: 1065-1077.

[2]Wu W, Wang S, Wu W, et al. A critical review of battery thermal performance and liquid cooling technologies for lithium-ion batteries. Applied Energy, 2019, 255: 113771.

[3]张文明, 闫寒, 彭志科, 孟光. 微纳机械谐振器能量耗散机理研究进展. 科学通报, 2017, 2(19):2077-2093.

[4]Wu J, Sigmund O, Groen J P. Topology optimization of multi-scale structures: a review. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2021, 63(3): 1455-1480.

[5]Askari M, Hutchins D A, Thomas P J, et al. Additive manufacturing of metamaterials: A review. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101562.

[6]Fu Y, Li L, Hu Y. An Efficient and Robust Topology Optimization Method for Thermoelastically Damped Microresonators. Applied Sciences 2023, 13(15).

[7]Sivapuram R, Dunning P D, Kim H A. Simultaneous material and macroscopic topology optimization of thermoelastic structures. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016, 54(5): 1267-1281.

[8]Aage N, Andreassen E, Lazarov B S, et al. Giga-voxel computational morphogenesis for structural design. Nature, 2017, 550(7674): 84-86

[9]熊启林, 尉亚军, 田晓耕. 热弹塑性力学概论[M]. 华中科技大学出版社:2024.

[10]李海艳, 宣领宽, 郭旭. 基于 SIMP 方法的多尺度热力耦合超材料拓扑优化[J]. 力学学报, 2023, 55(4): 901-912.

作者简介: 付钰(1989-), 男, 汉族, 籍贯: 湖北武汉, 学历: 博士, 职称: 讲师, 研究方向: 多场耦合结构动特性分析与设计。

基金简介: 湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(编号: B2023258)资助。