

引文格式: 吴志强, 蒋国璋, 张严, 等. 多参数点阵结构多尺度拓扑优化设计方法[J]. 航空制造技术, 2025, 68(22): 97–104.

WU Zhiqiang, JIANG Guozhang, ZHANG Yan, et al. Multi-scale topological optimization design method for multi-parameter lattice structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(22): 97–104.

多参数点阵结构多尺度拓扑优化设计方法*

吴志强, 蒋国璋, 张 严, 段现银, 苑 森

(武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室, 武汉 430081)

[摘要] 点阵结构具有质量轻、比强度/比刚度高、减振吸能效率高等优势, 被广泛应用于航空航天及深海领域等高端装备关键承载部件设计。然而, 传统点阵结构在微观尺度上, 其单胞仅能通过单一参数描述; 在宏观尺度上, 单胞分布则局限于均布式假设, 导致设计空间未被充分利用, 制约了力学性能提升, 难以满足关键承载部件极致轻量化设计的严苛需求。本文提出一种多参数点阵结构多尺度拓扑优化设计方法: 在微观尺度上, 采用近似模型辅助的粒子群优化算法实现多参数点阵单胞拓扑构型设计; 在宏观尺度上, 利用参数化水平集拓扑优化方法实现点阵单胞的拓扑分布优化。所提方法实现了微观点阵材料设计与宏观结构优化的耦合, 最大限度挖掘材料潜力, 提升点阵结构的力学性能。算例结果表明, 与传统单参数点阵结构相比, 所提方法优化后的结构力学性能提升 53.42%; 相较于仅经微观单尺度优化或宏观单尺度优化的点阵结构, 其性能分别提升 48.07% 和 12.69%。这表明多尺度优化设计的点阵结构具有更优异的承载能力。本文方法显著拓展了点阵结构设计空间, 能有效提升其力学性能, 在航空航天等重点领域装备结构的轻量化设计中具有重要应用前景。

关键词: 点阵结构; 参数化水平集法; 粒子群优化算法; 多尺度拓扑优化

中图分类号: V214; TB33

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.22.097



吴志强

硕士, 研究方向为点阵结构智能设计。

点阵结构具有质量轻、比强度高、比刚度高、减振吸能效率高、隔热防热性好等优异性能, 被认为是最有前景的新一代轻质强韧结构, 广泛应用于航空航天、船舶海工、车辆工程、生物医疗等重点工程领域^[1-2]。随着新材料、新工艺和新技术的快速发展, 结构轻量化设计迎来了全新机遇^[3]。尤其是点阵结构设计方法与增材制造工艺的深度结合, 极大地提升了复杂几何结构的设计自由度和制造灵活性, 使得具有优异力学性能的点阵结构成为研究热点^[4-5]。

目前, 点阵结构设计大多基于单参数描述的设计框架展开, 即点阵单胞各杆件尺寸相同, 且点阵单胞呈均匀分布状态, 这一局限严重限制了

点阵结构的设计空间。相比之下, 采用多参数描述的点阵结构为点阵单胞内所有杆件直径赋予独立的设计变量, 能够充分扩展点阵结构的设计灵活性, 从而提升点阵结构的力学性能。汤洛天等^[6]对杆件夹角参数不同的体心立方点阵结构开展准静态压缩试验, 通过研究杆间夹角参数对点阵结构失效模式的影响规律, 获得了综合性能最优的点阵结构。Tancogne-Dejean 等^[7]开发了一种具有锥形梁的点阵结构, 通过减小横截面参数可使杨氏模量和能量吸收率分别提高 70% 和 45%。吴佳豪等^[8]研究了均匀与梯度点阵结构压缩性能及能量吸收的影响规律, 结果表明, 在大应变状态下, 采用不同杆径

* 基金项目: 国家自然科学基金(52205280、52575308); 湖北省自然科学基金(2024AFB624); 中国博士后科学基金(2024M763044)。

参数梯度分布的点阵结构性能最优。柏龙等^[9]通过设计具有不同尺寸参数的点阵单胞,获得了最优构型尺寸的点阵单胞,相比传统尺寸单一的点阵结构,其弹性模量增加了121.5%。

然而,上述研究采用的点阵结构几何模型主要通过CAD软件建模或几何隐式模型表达的方式,不仅资源消耗大、效率低,且对于复杂形状建模困难,难以有效实现点阵单胞构型的参数化描述,通过水平集函数来显式描述点阵的几何构型可有效解决上述问题。例如,向艳^[10]基于水平集函数构建了变截面点阵单胞的显式几何描述模型,获得了等效体积模量和剪切模量最优的变截面点阵单胞设计。张树伯等^[11]基于水平集函数建立了面向宏观力学性能的变截面点阵优化模型,得到了具有优秀承载性能的变截面点阵结构。

上述研究主要聚焦于具有特定性能的点阵单胞,且点阵单胞大多为均匀分布在宏观设计域内,未考虑宏观点阵结构的拓扑设计。点阵结构具有显著的跨尺度结构特性,融合了微观尺度的点阵单胞构型设计与宏观尺度的点阵拓扑分布设计。因此,单一尺度的优化设计能够在一定程度上提升点阵结构的力学性能,但未能充分发挥点阵结构的跨尺度特性和优化潜力。龙凯^[12]和王宪杰^[13]等基于双向渐进结构优化法开展了以宏观结构刚度为优化目标的材料微结构拓扑优化,实现了宏观、微观结构的多尺度优化,使结构力学性能

得到显著提升。Guo^[14]和Zhao^[15]等基于宏观、微观协同优化模型,开展了宏观结构拓扑与微结构构型的并行拓扑优化,突破了传统拓扑优化主要集中在宏观结构优化的限制,获得了具有微观拓扑构型和最优材料分布的多尺度结构,使其力学性能得到进一步提升。可见,多尺度优化方法能够更全面地考虑点阵结构在不同尺度上的力学行为,从而进一步提高点阵结构的承载能力和能量吸收效率,得到力学性能更优的多尺度点阵结构^[16]。

因此,本文将微观点阵单胞构型设计与宏观点阵拓扑分布优化深度结合,提出了一种多参数点阵结构多尺度拓扑优化设计方法,以实现点阵单胞拓扑构型设计及其宏观拓扑分布的并行优化。在微观尺度上,基于水平集函数构建点阵微结构的几何描述模型,采用能量均匀化方法计算点阵单胞的宏观等效属性,通过近似模型辅助的智能优化算法(Efficient surrogate-assisted particle swarm optimization, ESPSO)实现多参数点阵单胞拓扑构型设计。在宏观尺度上,通过参数化水平集方法优化宏观结构的材料分布。通过两组数值算例验证本文所提方法的有效性和优势。

1 多参数点阵结构的多尺度设计框架

多参数点阵结构的多尺度设计框架如图1所示,将承受载荷和边界

条件下的结构划分为宏观结构和点阵微结构,其中宏观结构由点阵单胞在空间内均匀周期性排列组合而成。通过多尺度优化,可同时实现宏观结构拓扑与点阵单胞构型的优化,且宏观、微观尺度之间具有交互性,宏观尺度优化决定了微结构在宏观结构内的存在性,微观尺度优化决定了微结构的宏观等效属性,得到微观点阵单胞构型与宏观结构拓扑的最终点阵结构。

2 多参数点阵的显式几何描述及其等效属性计算

水平集方法是一种用于隐式描述结构几何边界的技术,其核心思想是通过高一维水平集函数的零等值线或等值面来表征目标曲线或曲面。本文通过定义水平集函数的显式数学关系,将结构几何边界由隐式描述转化为显式描述,以实现其几何特征的精确调控。基于水平集函数的点阵杆件显式几何描述模型如下。

$$\begin{cases} \phi_m(x) > 0, & \text{if } x \in \Omega \\ \phi_m(x) = 0, & \text{if } x \in \partial\Omega, \text{ where} \\ \phi_m(x) < 0, & \text{if } x \in D/\Omega \end{cases}$$

$$\begin{cases} \phi_m(x) = \max(\phi_{m,r}(x, y), \phi_{m,c1}(x, y), \phi_{m,c2}(x, y)), \\ \phi_{m,r}(x, y) = \min(\phi_{m,r1}(x, y), \phi_{m,r2}(x, y)), \\ \phi_{m,r1}(x, y) = 1 - \frac{(-\sin\theta_m \cdot (x-x_0) + \cos\theta_m \cdot (y-y_0))^2}{(l/2)^2}, \\ \phi_{m,r2}(x, y) = 1 - \frac{(\cos\theta_m \cdot (x-x_0) + \sin\theta_m \cdot (y-y_0))^2}{(L/2)^2}, \\ x_0 = \frac{x_1+x_2}{2}, y_0 = \frac{y_1+y_2}{2}, \sin\theta_m = \frac{y_2-y_1}{L}, \cos\theta_m = \frac{x_2-x_1}{L}, \\ L = \sqrt{(x_2-x_1)^2 + (y_2-y_1)^2}, \\ \phi_{m,c1}(x, y) = 1 - \frac{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2}{(t/2)^2}, \\ \phi_{m,c2}(x, y) = 1 - \frac{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2}{(t/2)^2} \end{cases} \quad (1)$$

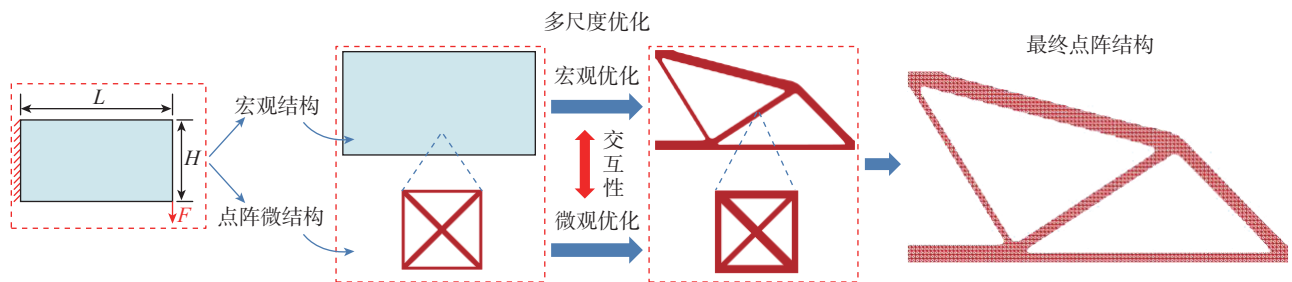


图1 多参数点阵结构的多尺度设计框架

Fig.1 Multi-scale design framework for multi-parameter lattice structures

式中, D 为设计域; Ω 为杆件部分所在的实体区域; $\partial\Omega$ 为杆件结构边界。点阵杆件由一个矩形和两个圆组成, 其水平集函数分别为 $\phi_{m,r}(x,y)$ 、 $\phi_{m,c_1}(x,y)$ 、 $\phi_{m,c_2}(x,y)$, 圆心的坐标分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) , 矩形的宽 t 和两个圆的直径相等; (x_0, y_0) 和 L 分别为矩形的中心点坐标和长度。点阵单胞杆件的几何参数如图 2 (a) 所示, 采用如式 (1) 所示的基于水平集的显式拓扑描述函数实现点阵杆件几何的显式描述, 图 2 (b) 为杆件构成的点阵单胞。图 3 是点阵单胞的三维水平集函数及其结构设计域等值面。

点阵结构由点阵单胞周期性重复排列组成, 通常采用均匀化理论计算点阵微结构的等效弹性性能^[17]。根据均匀化理论, 多参数点阵单胞的宏观等效弹性张量 E_{ijkl}^H 可由式 (2) 计算。

$$E_{ijkl}^H = \frac{1}{|V|} \int_V E_{pqrs} (\mu_{pq}^{0(ij)} - \mu_{pq}^{(ij)}) (\mu_{rs}^{0(kl)} - \mu_{rs}^{(kl)}) dV \quad (2)$$

式中, $i, j, k, l=1, 2, \dots, d$, d 表示空间维度; p, q, r, s 表示张量指标, 分别对应三维空间中的坐标方向; H 表示 Heaviside 函数; $|V|$ 表示点阵单胞

的体积; $\mu_{pq}^{0(ij)}$ 表示初始的单元测试应变场, 在二维问题中包含 3 个独立的单位应变; $\mu_{pq}^{(ij)}$ 是由初始的单元测试应变施加后, 点阵单胞对应的未知应变场。

3 多参数点阵结构的多尺度优化数学模型

3.1 微观点阵单胞构型的优化模型

以点阵单胞的几何描述参数为设计变量, 给定的材料用量为约束条件, 点阵结构的整体柔度最小化为目标函数, 构建优化模型如下。

$$\begin{aligned} \text{Find: } & t=(t_1, t_2, \dots, t_n), n=1, 2, \dots, N \\ \text{Minimize: } & C(t)=U^T K U = \sum_{E=1}^{NE} (u_E^{MA})^T k_E(t) u_E^{MA} \\ \text{Subject to: } & G(t)=v(t)-fv_0 \leq 0 \\ & F=K U \\ & t_{\min} \leq t_n \leq t_{\max} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, t_n 表示点阵单胞内第 n 个杆件直径, 即微观设计变量; N 表示点阵单胞内的杆件总数; C 表示点阵结构的整体柔度; U 表示点阵结构的位移场; K 表示点阵结构的总体刚度矩阵; NE 表示点阵结构被离散成有限单元的总数; u_E^{MA} 和 k_E 分别表示第 E 个宏观有限单元的位移和刚度矩阵; F 表示外载荷矩阵; G 表示微观点阵单

胞优化的体积约束; $v(t)$ 表示点阵单胞的材料区域体积; f 表示给定的材料体积率; v_0 表示点阵单胞的设计域体积。

为了实现近似模型辅助 PSO 智能优化算法对上述模型的高效求解, 采用在高维度建模中具有更高建模精度和更快建模速度的径向基函数 (Radial basis function, RBF) 近似模型。通过引入 RBF 近似模型建立粒子群优化 Particle swarm optimization (PSO) 算法中的全局和局部近似模型以提高优化效率。RBF 模型定义如下: 假定有 n 个样本点 $x_1, x_2, \dots, x_n \in R^D$, 响应为 $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)$, 则由这 n 个样本点建立的 RBF 近似模型可以表示为

$$\hat{f}(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \Phi_i(\|x - x_i\|) + p(x) \quad (4)$$

式中, $\Phi_i(\cdot)$ 为第 i 个基函数; $\|\cdot\|$ 为欧几里得范数; λ_i 为第 i 个基函数的权重系数。本文采用 Cubic 基函数: $\phi(r)=r^3$ 。此外, $p(x)$ 为一阶多项式: $b^T x + a$ 。为保证全局和局部近似模型建立的精确性, 对于全局近似模型, 其样本点数目与事先确定设定的粒子群数一致, 一般设置为 30; 对于局部近似模型, 其样本点数目一般设置为大于 $5D$, 其中 D 为设计变量的数目。

本文进一步提升近似模型辅助 PSO 算法的优化效率, ESPSO 方法使用了一种新的策略去更新粒子的速度^[18]。

$$\begin{aligned} v_{id}(T+1) &= \chi(v_i d(T) + c_1 r_1 (P_{Nid}^*(T) - x_i(T) + c_2 r_2 (x_i^*(T) - x_i d(T))) \\ \chi &= \frac{2\kappa}{2 - \phi - \sqrt{\phi^2 - 4\phi}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $v_i(T)=[v_{i1}(T), v_{i2}(T), \dots, v_{id}(T)]$ 和 $x_i(T)=[x_{i1}(T), x_{i2}(T), \dots, x_{id}(T)]$ 分别是第 T 次迭代的第 i 个粒子的速度和位置, d 表示问题的第 d 个维度。在 $P_{Nid}^*(T)$ 中, $p_i(T)=[p_{i1}(T), p_{i2}(T), \dots, p_{id}(T)]$ 是第 i 个粒子到达的历史最佳位置;

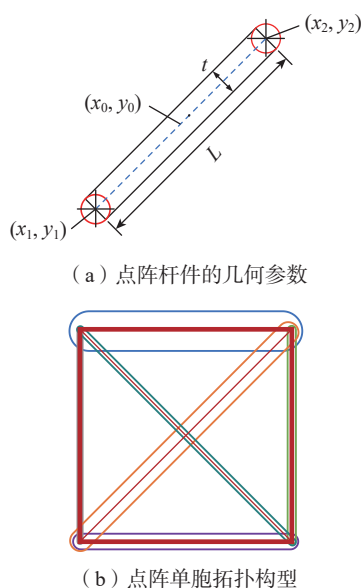


图 2 点阵单胞描述示意图

Fig.2 Schematic diagram of lattice unit cell

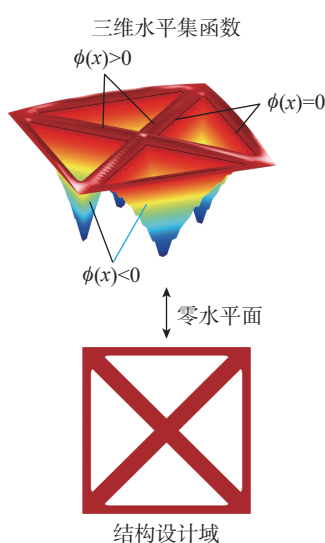


图 3 三维水平集函数及其等值面
Fig.3 Three-dimensional level set function and its isosurface

$p_g(T)=[p_{g1}(T), p_{g2}(T), \dots, p_{gn}(T)]$ 是所有粒子到达的全局最佳位置。粒子 $p_i(T)$ 位置通过跟踪历史最佳位置和全局最佳位置来更新。

3.2 宏观点阵结构拓扑的优化模型

本文采用参数化水平集拓扑优化方法开展点阵单胞在宏观尺度上的拓扑分布优化,构建的点阵结构拓扑的优化模型如下。

$$\text{Find: } \alpha_M^j (j=1,2,\dots,N_M)$$

$$\text{Minimize: } C(\mathbf{u}, \phi) = \int_{\Omega_M} \varepsilon(\mathbf{u}_M) \mathbf{E}^H(t_m) \varepsilon(\mathbf{u}_M) H(\phi_M) d\Omega_M$$

$$\text{Subject to: } a(\phi_M, \mathbf{u}_M, \mathbf{v}_M, \mathbf{E}^H) = l(\phi_M, \mathbf{v}_M), \forall \mathbf{v}_M \in \mathbf{H}_{\text{per}}(\Omega_M, \mathbb{R}^d)$$

$$G_M(\phi_M) = \int_{\Omega_M} H(\phi_M) d\Omega_M - V_M \leq 0$$

$$\alpha_M^{\min} \leq \alpha_M^j \leq \alpha_M^{\max} \quad (6)$$

式中, α_M^j 是第 j 个宏观设计变量; N_M 表示宏观设计变量的总数; $\mathbf{E}^H(t_m)$ 表示点阵单胞的宏观等效弹性张量; \mathbf{u}_M 表示宏观结构的位移场; ε 为应变场; ϕ_M 为宏观水平集函数; G_M 表示宏观结构拓扑优化的体积约束; V_M 表示宏观设计域的体积; \mathbf{v}_M 表示宏观结构内的虚拟位移场,其在宏观结构内的可允许动力学位移场内 $\mathbf{H}_{\text{per}}(\Omega_M, \mathbb{R}^d)$ 取任意值。

宏观尺度灵敏度分析针对设计变量更新时,需要求解目标函数与约束函数关于宏观设计变量的一阶灵敏度分析,再通过成熟高效的优化准则法 OC 更新宏观尺度的设计变量^[9]。其中目标函数关于宏观设计变量的灵敏度信息,具体形式如下。

$$\frac{\partial C}{\partial \alpha_M} = - \int_{\Omega_M} \varepsilon(\mathbf{u}_M) \mathbf{E}^H(t_m) \varepsilon(\mathbf{u}_M) \varphi(x) \delta(\phi_M) d\Omega_M \quad (7)$$

宏观体积约束关于设计变量的灵敏度信息如下。

$$\frac{\partial G_M}{\partial \alpha_M} = \int_{\Omega_M} \varphi(x) \delta(\phi_M) d\Omega_M \quad (8)$$

4 多尺度优化设计流程

点阵多尺度结构的优化设计流程如图 4 所示。首先,构建宏/微观水

平集函数并初始化设计变量;然后,采用均匀化方法计算点阵微结构的等效弹性张量;随后,计算宏观结构的单元刚度矩阵,再通过宏观有限元分析求解位移场,计算点阵结构优化的目标函数;对目标函数和约束函数进行灵敏度分析,基于最优法则更新宏观设计变量,ESPSO 算法更新微观设计变量;最后,判断是否收敛,是则输出最优的点阵多尺度结构设计,否则返回上述步骤进行再次求解。

5 数值算例及结果分析

为充分说明本文所提方法的有效性,本节将基于上述构建的点阵结构多尺度设计模型,以 MBB 梁和悬臂梁为例开展点阵结构的多

尺度优化设计。通过与单一参数点阵微结构和均布式点阵宏观结构进行力学性能对比,验证多尺度优化设计在力学性能上的优势。通过不同体积率组合的点阵宏/微观结构性能比较,验证体积率变化对多尺度优化的影响和结构性能差异。需要说明的是,多尺度点阵结构的体积率为点阵微结构体积率和宏观结构体积率的乘积。为不失一般性,在所有数值案例中均采用无量纲化处理,所用材料的杨氏模量和泊松比均相同: $E=1$,泊松比 $\mu=0.3$ 。当连续 5 个迭代步中目标函数的变动小于 1×10^{-3} 且满足约束条件,或者达到设定的最大迭代步数时,则默认为优化收敛,迭代过程终止,最大迭代步数设为 200。

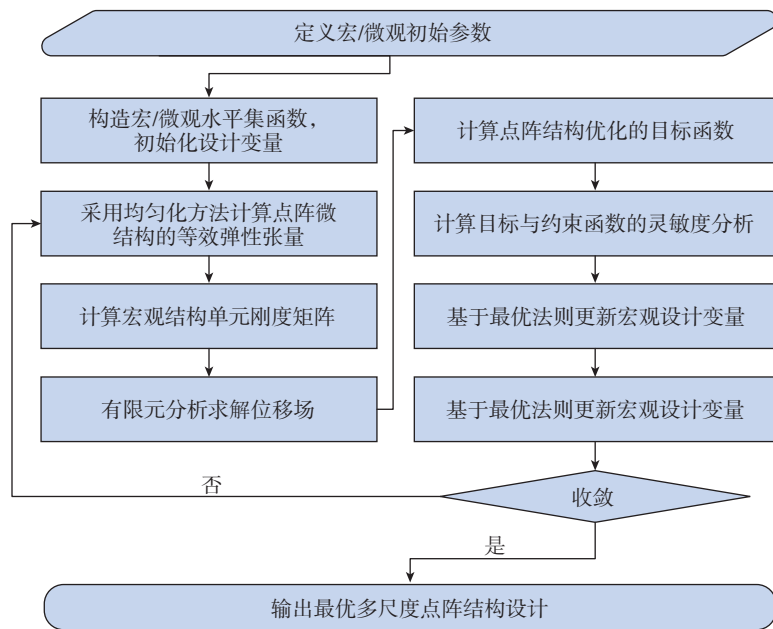


图 4 多尺度优化设计流程图

Fig.4 Flowchart of multi-scale optimization design

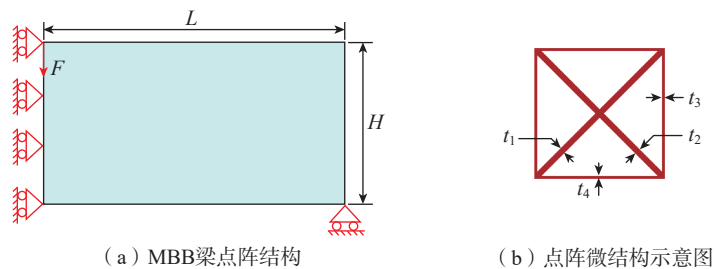


图 5 MBB 梁点阵结构设计

Fig.5 Design of MBB beam lattice structure

5.1 MBB 梁点阵结构设计

图 5 (a) 是 MBB 梁点阵结构设计示意图, 长 $L=100\text{ mm}$, 高 $H=50\text{ mm}$ 。结构上表面最左端施加竖直向下的载荷 $F=100\text{ N}$ 。MBB 梁左端面水平方向的自由度被约束, 右下角的竖直方向自由度被约束。MBB 梁设计域被离散为 $100 \times 50=5000$ 个四节点单元。图 5 (b) 为点阵微结构示意图, 其各个杆件分别标注为 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 , 体积率约束设为 0.1, 选取多尺度点阵设计的微结构体积率为 0.5, 宏观结构体积率为 0.2。

表 1 为传统单参数均布点阵结构和多尺度优化下的点阵宏/微观结

构及其目标函数。在单参数均布点阵结构中, 所有杆件直径均相等的单参数点阵, 其宏观结构为均布设计, 点阵结构柔度为 1473.4401; 而对点阵宏微观结构进行多尺度优化得到各杆件的具体参数差异明显, 且宏观结构从均布点阵优化为拓扑分布, 其点阵结构柔度为 686.3464。在材料用量相同的条件下, 相比传统单参数均布点阵结构, 多尺度点阵结构柔度降低了 53.42%, 具有更好的力学性能。

表 2 为单尺度优化、多尺度优化下的点阵宏微观结构及其目标函数。在宏观单尺度优化中, 点阵微结构为单参数点阵, 仅对其宏观结

构进行单尺度优化, 得到的点阵结构柔度为 786.1075; 在微观单尺度优化中, 仅优化点阵微结构, 其宏观结构为均布设计, 得到点阵结构柔度为 1321.8851; 而考虑点阵结构的宏/微观多尺度优化得到结构柔度为 686.3464。相比宏观单尺度优化的单参数点阵结构, 多尺度优化得到的点阵结构各杆件的尺寸参数差异明显, 点阵微结构材料分布更加合理, 结构性能提升 12.69%; 相比微观单尺度优化的均布点阵结构, 进一步优化了点阵的宏观拓扑分布, 使点阵微结构在宏观设计域内分布更加合理, 其点阵结构性能提升 48.07%。

表 1 传统单参数点阵均布结构和多尺度优化下的点阵宏微观结构及其目标函数

Table 1 Macroscopic and microscopic structures of traditional single-parameter lattice structures with uniform distribution and multi-scale optimized lattice structures, and their objective functions

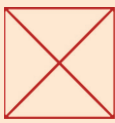
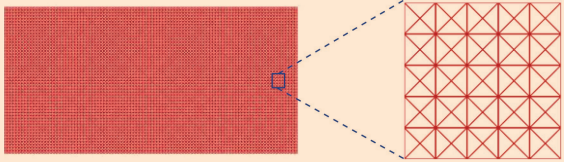

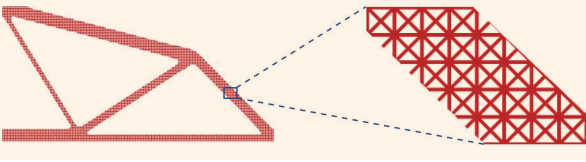
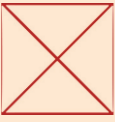


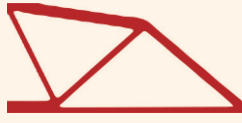


不同尺度点阵结构优化	点阵微结构	各杆件直径值	宏观点阵结构	柔度
单参数点阵均布结构		$t_{1-4}=0.0225$		1473.4401
多尺度优化		$t_1=0.0637$; $t_2=0.1075$; $t_3=0.1504$; $t_4=0.1901$		686.3464

表 2 单尺度优化和多尺度优化下的点阵宏微观结构及其目标函数

Table 2 Macroscopic-microscopic structures and objective functions of lattice structures under single-scale optimization and multi-scale optimization

不同尺度点阵结构优化	点阵微结构	各杆件直径值	宏观点阵结构	柔度
微观单尺度优化		$t_1=0.0177$; $t_2=0.0223$; $t_3=0.0153$; $t_4=0.0398$		1321.8851
宏观单尺度优化		$t_{1-4}=0.1287$		786.1075
多尺度优化		$t_1=0.0637$; $t_2=0.1075$; $t_3=0.1504$; $t_4=0.1901$		686.3464

上述算例结果与讨论分析表明,本文所提的多尺度点阵结构优化设计方法能够在优化微结构的同时,进一步优化微结构在宏观设计域内的分布。相比传统单参数点阵均布结构和仅考虑单一尺度的点阵结构优化,宏/微观结构的材料分布更加合理,力学性能上更具优势。

5.2 悬臂梁点阵结构设计

如图6所示,悬臂梁的设计域尺寸: $L=100\text{ mm}$, $H=50\text{ mm}$ 。悬臂梁左端面被完全固定,结构的右下角施加竖直向下的载荷 $F=100\text{ N}$ 。悬臂梁设计域被离散为 $100\times 50=5000$ 个四节点单元,体积率约束设为0.12。

宏/微观不同体积率组合下的点阵多尺度优化结果如表3所示,可以看到,在总体积率不变的情况下,随着点阵微结构的体积率逐渐提高,宏

观结构的体积率逐渐降低,点阵结构的柔度呈下降趋势,结果符合多尺度优化规律。其中对于悬臂梁多尺度设计,当点阵微结构体积率提高到最大,即实心微结构时,多尺度设计的点阵结构具有最好的刚度性能^[20]。本文的点阵多尺度优化方法针对宏/微观不同体积率组合的点阵结构都适用,且均能得到性能优异的结构。

进一步验证本文提出的多参数点阵结构设计方法的有效性,采用COMSOL仿真软件分别对表3中体积率组合为 0.4×0.3 , 0.6×0.2 的点阵结构进行力学仿真,以验证两者的结构性能差异。点阵结构尺寸设为 $100\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,其中每个点阵微结构的尺寸为 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,实体材料选取各向同性的碳钢,杨氏模量为 20.1 MPa ,泊松比为0.3。在COMSOL中

对模型进行有限元离散,边界条件如图6所示,载荷 $F=100\text{ N}$ 。

对点阵结构进行应力分析,图7和8为点阵结构的应力云图和位移云图。仿真结果显示,体积率组合为 0.4×0.3 的点阵结构最大应力为 30.1 MPa ,最大位移 3.15 mm ;体积率组合为 0.6×0.2 的点阵结构最大应力为 25.4 MPa ,最大位移 2.5 mm 。这表明在载荷相同的条件下,体积率组合为

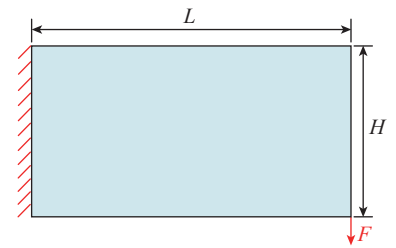


图6 悬臂梁点阵结构示意图
Fig.6 Schematic diagram of the cantilever beam lattice structure

表3 宏/微观不同体积率组合下的点阵多尺度优化结果

Table 3 Multi-scale optimization results of lattice structures under different macro-micro volume fraction combinations

结构	体积率(微观×宏观)			
	0.2×0.6	0.3×0.4	0.4×0.3	0.6×0.2
点阵微结构				
宏观结构				
柔度	680.0438	596.8713	583.7130	484.5244

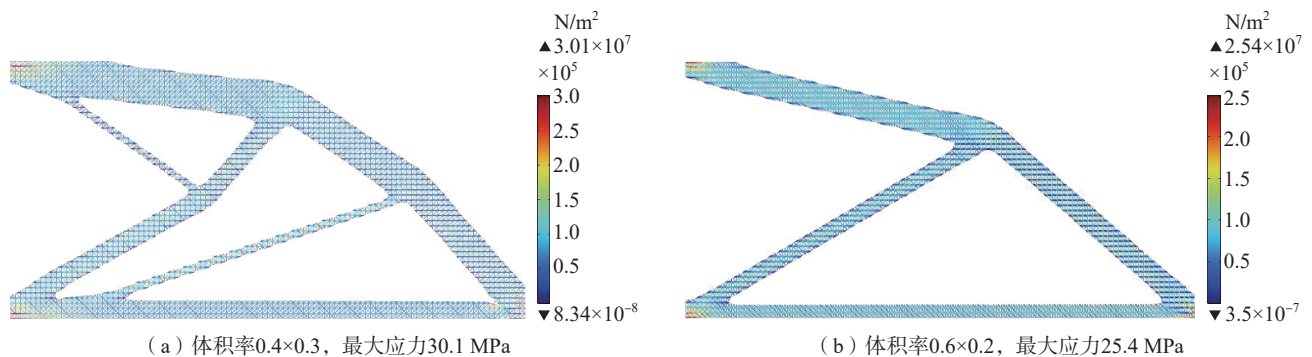


图7 仿真应力云图

Fig.7 Simulation stress contour maps

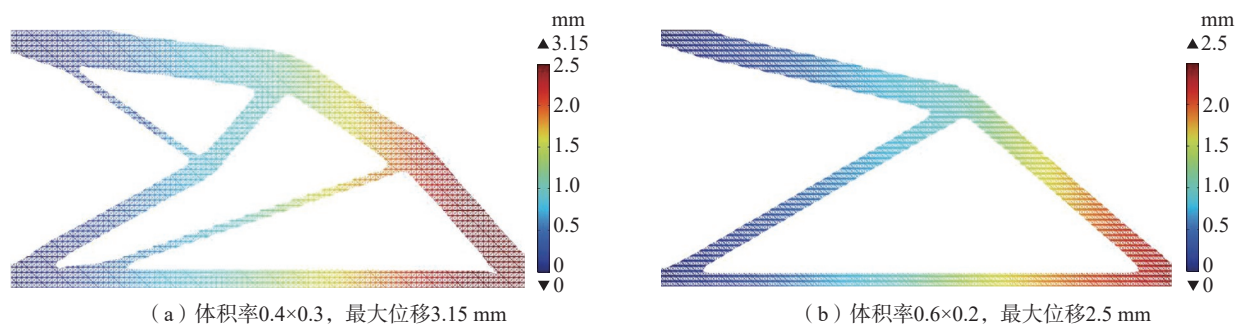


图8 仿真位移云图

Fig.8 Simulation displacement contour maps

0.6×0.2的点阵结构产生的最大应力和最大位移均小于体积率组合为0.4×0.3点阵结构,显示出更好的承载能力,整体变形程度也更小,与表3中的优化结果一致,验证了本文所提方法设计多尺度点阵结构的有效性和可靠性。

6 结论

本文提出了一种多参数点阵结构多尺度拓扑优化设计方法,微观尺度采用基于近似模型辅助的粒子群优化算法设计多参数点阵单胞拓扑构型,宏观尺度利用参数化水平集拓扑优化方法优化点阵单胞的拓扑分布,实现了微观点阵单胞拓扑构型与宏观结构拓扑分布的协同优化,最大限度地挖掘材料潜力,提升了点阵结构力学性能。数值算例结果表明,相比传统单参数点阵结构和宏/微观单尺度优化的点阵结构,本文方法优化的点阵结构具有更优异的力学性能。

同时,本文探讨了微观点阵单胞和宏观点阵结构在不同体积率组合下的多尺度优化设计,对比了不同体积率对多尺度点阵结构优化设计的影响和结构性能差异,并采用有限元仿真分析对优化结果进行了有效性验证。本文方法显著拓展了点阵结构设计空间,能够有效提升点阵结构力学性能,在航空航天等重点领域装备结构的轻量化设计方面具有重要应用前景。

参考文献

[1] 宋波,张磊,王晓波,等.面向航空航

天的增材制造超材料的研究现状及发展趋势[J].航空制造技术,2022,65(14):22-33.

SONG Bo, ZHANG Lei, WANG Xiaobo, et al. Research status and development trend of additive manufacturing metamaterials toward aerospace[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(14): 22-33.

[2] PAN C, HAN Y F, LU J P. Design and optimization of lattice structures: A review[J]. Applied Sciences, 2020, 10(18): 6374.

[3] DU PLESSIS A, RAZAVI N, BENEDETTI M, et al. Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A review[J]. Progress in Materials Science, 2022, 125: 100918.

[4] 段晟昱,王潘丁,刘畅,等.增材制造三维点阵结构设计、优化与性能表征方法研究进展[J].航空制造技术,2022,65(14):36-48,57.

DUAN Shengyu, WANG Panding, LIU Chang, et al. Research progress on design, optimization and performance characterization of additive manufactured 3D lattice structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(14): 36-48, 57.

[5] 黄安坤,温耀杰,张百成,等.增材制造金属点阵结构性能研究进展[J].航空制造技术,2023,66(11):90-101.

HUANG Ankun, WEN Yaojie, ZHANG Baicheng, et al. Research progress on properties of metal lattice structure by additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(11): 90-101.

[6] 汤洛天,刘奋成,尤启凡,等.不同杆间夹角激光选区熔化增材成形点阵结构压缩性能研究[J].中国激光,2024,51(24):3788/CJL240675.

TANG Luotian, LIU Fencheng, YOU Qifan, et al. Compression performance of selective laser melting-fabricated lattice structures with different strut angles[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(24): 3788/CJL240675.

[7] TANCOCNE-DEJEAN T, MOHR D. Stiffness and specific energy absorption of additively-manufactured metallic BCC metamaterials composed of tapered beams[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 141: 101-116.

[8] 吴佳豪,徐峰,王欢乐,等.基于SLM成形的TC4钛合金点阵结构设计及压缩行为研究[J].稀有金属材料与工程,2024,53(7):1953-1961.

WU Jiahao, XU Feng, WANG Huanle, et al. Design of lattice structures based on SLM for TC4 titanium alloy and their compression behavior[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(7): 1953-1961.

[9] 柏龙,熊飞,陈晓红,等.SLM制备的Ti6Al4V轻质点阵结构多目标结构优化设计研究[J].机械工程学报,2018,54(5):156-165.

BAI Long, XIONG Fei, CHEN Xiaohong, et al. Multi-objective structural optimization design of Ti6Al4V lattice structure formed by SLM[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(5): 156-165.

[10] 向艳,蒋国璋,张严,等.基于近似模型辅助智能算法的变截面点阵结构优化设计方法[J].振动与冲击,2023,42(16):181-188,208.

XIANG Yan, JIANG Guozhang, ZHANG Yan, et al. An optimization design method of variable cross-section lattice structures based on an approximate model-assisted intelligent algorithm[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(16): 181-188, 208.

[11] 张树佰,丁喆,黄垚轩,等.基于灰狼优化算法的变截面点阵结构设计及性能优化[J].力学学报,2024,56(6):1702-1712.

ZHANG Shubai, DING Zhe, HUANG Kaixuan, et al. Design and optimization of variable cross-section lattice structure based on grey wolf optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2024, 56(6):

1702–1712.

[12] 龙凯, 王文伟, 贾娇. 宏观结构性能约束下的材料微结构拓扑优化[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1574–1583.

LONG Kai, WANG Wenwei, JIA Jiao. Topology optimization for microstructures of materials with macro-structure property constraint[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7): 1574–1583.

[13] 王宪杰, 张洵安. 多相材料微结构布局及宏观结构拓扑并发优化[J]. 计算力学学报, 2015, 32(6): 716–721.

WANG Xianjie, ZHANG Xun'an. Concurrent optimization for structure topology and its periodic multi-phase materials micro distribution[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2015, 32(6): 716–721.

[14] GUO X, ZHAO X F, ZHANG W S,

et al. Multi-scale robust design and optimization considering load uncertainties[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 283: 994–1009.

[15] ZHAO J P, YOON H, YOUN B D. An efficient decoupled sensitivity analysis method for multiscale concurrent topology optimization problems[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58(2): 445–457.

[16] YIN H F, ZHANG W Z, ZHU L C, et al. Review on lattice structures for energy absorption properties[J]. Composite Structures, 2023, 304: 116397.

[17] ANDREASSEN E, ANDREASEN C S. How to determine composite material properties using numerical homogenization[J]. Computational Materials Science, 2014, 83: 488–495.

[18] CAI X W, QIU H B, GAO L, et al.

An efficient surrogate-assisted particle swarm optimization algorithm for high-dimensional expensive problems[J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 184: 104901.

[19] ROZVANY G I N, ZHOU M, ROTTHAUS M, et al. Continuum-type optimality criteria methods for large finite element systems with a displacement constraint. Part I[J]. Structural Optimization, 1989, 1(1): 47–72.

[20] GAO J, LUO Z, XIA L, et al. Concurrent topology optimization of multiscale composite structures in Matlab[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 60(6): 2621–2651.

通信作者: 张严, 副教授, 博士, 研究方向为先
进结构拓扑优化、点阵结构智能设计。

Multi-Scale Topological Optimization Design Method for Multi-Parameter Lattice Structures

WU Zhiqiang, JIANG Guozhang, ZHANG Yan, DUAN Xianyin, YUAN Sen
(Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education,
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

[ABSTRACT] Lattice structures, characterized by lightweight properties, high specific strength and specific stiffness, and excellent vibration-damping and energy-absorbing efficiency, have been widely applied in the design of critical load-bearing components for high-end equipment in aerospace and deep-sea fields. However, for traditional lattice structures, the unit cells can only be described by a single parameter at the microscopic scale, and their distribution is confined to the assumption of uniformity at the macroscopic scale. This leads to underutilization of the design space, which restricts the enhancement of mechanical properties and fails to meet the stringent requirements for the extreme lightweight design of critical load-bearing components. In this paper, a multi-scale topology optimization design method for multi-parameter lattice structures is proposed. At the microscopic scale, the topological configuration design of multi-parameter lattice unit cells is achieved using an approximate model-assisted particle swarm optimization (PSO) algorithm. At the macroscopic scale, the topological distribution of lattice unit cells is optimized via a parametric level set-based topology optimization method. The proposed method realizes the coupling of microscopic lattice material design and macroscopic structural optimization, maximizing material potential and enhancing the mechanical properties of lattice structures. Numerical examples show that compared with traditional single-parameter lattice structures, the mechanical properties of the structures optimized using the proposed method are enhanced by 53.42%. Compared with lattice structures optimized via single-scale optimization (either microscopic or macroscopic), the performance is improved by 48.07% and 12.69%, respectively. This indicates that lattice structures designed with multi-scale optimization exhibit significantly superior load-bearing capacity. The proposed method significantly expands the design space of lattice structures and effectively enhances their mechanical properties, thus holding significant application potential for the lightweight design of structural components in key fields like aerospace.

Keywords: Lattice structures; Parametric level set method; Particle swarm optimization (PSO) algorithm;
Multi-scale topology optimization

(责编 七七)