

DOI: 10.7511/jslx20240722004

连续纤维增强复合材料结构多尺度拓扑优化设计

叶红玲*, 董永佳, 肖扬, 王伟伟

(北京工业大学 数学统计学与力学学院, 北京 100124)

摘要:连续纤维增强复合材料具有重量轻、比强度和比模量高的特点,日益受到航空航天等高端装备制造领域的青睐,同时连续纤维3D打印技术的发展使具有复杂几何构型和纤维分布的复合材料结构制造成为可能。为发挥复合材料多尺度的可设计性及获得更好的结构性能,本文基于独立连续拓扑变量提出了一种连续纤维复合材料结构多尺度拓扑优化方法。该方法引入基于主应力的纤维方向插值策略,解决纤维取向优化过程中易陷入局部最优的问题,实现连续纤维复合材料结构宏观拓扑、微观纤维方向和纤维疏密的并行优化设计。采用移动渐近算法(MMA)进行优化求解,数值算例证明了提出方法的有效性和稳定性,对连续纤维复合材料结构设计和路径规划具有指导意义。

关键词:连续纤维增强复合材料;拓扑优化;多尺度优化;主应力方向

中图分类号:O34

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2024)05-0851-06

1 引言

连续纤维增强复合材料CFRC(Continuous fiber-reinforced composites)因其质量轻、比强度和比模量高、耐腐蚀性强等优异的力学性能,在航空航天、交通运输和海洋等领域得到了广泛应用^[1,2]。近年来,连续纤维3D打印技术的快速发展打破了传统制造工艺的局限,扩展了结构设计的自由度^[3-5]。连续纤维复合材料优异的力学性能和3D打印灵活的工艺特性,为制备高力学性能的复杂部件,实现先进材料结构一体化设计制造提供了一种可行的技术方案。然而,与连续纤维复合材料3D打印工艺相匹配的设计理论研究尚不成熟,存在制件性能低于传统制造工艺、原有设计理论无法满足先进结构设计需求的问题,亟需开发与先进材料和工艺相适应的结构优化设计方法。

拓扑优化方法能够在给定设计域内寻找最优的材料分布,获得满足约束条件的最佳结构设计,具有更大的设计自由度和工程应用潜力。目前已发展出一系列拓扑优化方法,包括变密度法^[6]、水平集法^[7]、渐进结构优化法^[8]、移动变形组件

(MMC)法^[9]和独立连续映射(ICM)法^[10]等。早期的研究将拓扑优化和纤维路径设计分开进行,根据有限元分析和设计人员经验,在拓扑优化的基础上进行纤维铺层的设计,未综合考虑拓扑构型和纤维分布对结构性能的影响。为发挥连续纤维复合材料宏观和微观多尺度的可设计性,研究人员采用不同的参数化策略,将表示纤维方向的设计变量引入拓扑优化框架内,构建纤维分布与材料性能之间的映射关系,提出了离散材料优化(DMO)^[11]和连续纤维角度优化(CFAO)^[12]等面向连续纤维复合材料的拓扑优化方法。

DMO方法基于离散纤维角度参数化方案,定义几个预选的纤维角度为设计变量,将其对应的材料参数作为候选材料,采用多材料插值的方式表征材料性能。为提高收敛效率,Duan等^[13]在DMO模型中引入Heaviside投影法,实现了基于刚度的连续纤维复合材料拓扑优化建模,并应用于多材料、多尺度的结构优化问题。Niu等^[14]以结构瞬态振动性能为目标,基于DMO方法对复合材料结构拓扑和纤维方向进行了优化。DMO方法的有效性和稳定性已得到充分证明,然而设计变量的数

收稿日期:2024-07-22;修改稿收到日期:2024-08-18.

基金项目:国家自然科学基金(11872080;12202008);大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室开放项目(GZ23104)资助.

作者简介:叶红玲*(1972-),女,博士,教授(E-mail: yehongl@bjut.edu.cn).

引用本文:叶红玲,董永佳,肖扬,等.连续纤维增强复合材料结构多尺度拓扑优化设计[J].计算力学学报,2024,41(5):851-856,878.

YE Hong-ling, DONG Yong-jia, XIAO Yang, et al. Multi-scale topology optimization for continuous fiber-reinforced composite structures[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(5): 851-856, 878.

量与候选材料的数量成正比,这限制了预定义纤维角度的增加。求解效率与设计自由度之间的矛盾,导致 DMO 方法难以充分发挥连续纤维复合材料的设计潜力。

为保证纤维分布的连续性,CFAO 方法直接采用连续角度变量表示纤维方向^[15]。与 DMO 方法相比,CFAO 方法显著提高了连续纤维复合材料结构的设计灵活性。Qiu 等^[16]将连续纤维复合材料拉/压模量的非对称特性考虑到基于刚度的优化模型中,探讨了双模量特性对纤维分布的影响。Dong 等^[17]在基于刚度的优化模型中考虑了增材制造工艺的影响,降低了残余应力导致局部变形和失效的风险。然而,角度变量导致优化模型具有很高的非凸性,增加了优化陷入局部最优的风险。为解决局部最优问题,Luo 等^[18]结合离散和连续纤维方向优化模型的优势,将连续纤维角度优化问题转化为离散子区间的选择和子区间内连续纤维角度的优化,提出了离散-连续纤维取向优化方法。Qiu 等^[19]基于离散-连续参数化(DCP)方法提出了一种使用多个打印平面优化材料方向的方法,构建了结构拓扑和纤维角度并行优化模型。Ye 等^[20]提出主应力修正连续纤维角度优化(PSO-CFAO)方法,实现拓扑和纤维角度的并行优化,并利用主应力方向修正纤维角度,降低优化陷入局部最优的风险。

目前,研究者已开展了一系列面向拓扑和纤维方向并行优化理论的研究,但目前仅集成了微观纤维方向的可设计性,未考虑纤维疏密对结构性能的影响,面向连续纤维复合材料结构的多尺度优化理论有待于进一步深入探究。本文将纤维含量变量引入 PSO-CFAO 模型,以最小化结构柔顺度为目标,结构体积和纤维体积为约束,构建连续纤维复合材料多尺度优化模型,进而实现宏观拓扑、微观纤维方向和纤维含量的并行优化。对目标函数进行灵敏度分析,并采用移动渐近算法(MMA)^[21]进行迭代求解。在迭代过程中,基于主应力方向对纤维角度进行修正,降低局部最优的风险。通过两个数值算例验证了提出方法实现连续纤维复合材料多尺度并行优化设计的有效性,并分析了不同优化参数对优化结果的影响,证明了优化求解的稳定性。

2 复合材料结构多尺度优化设计

2.1 连续纤维复合材料本构模型

本文假设连续纤维复合材料具有正交各向异性材料性质,以纤维角度 θ 和纤维含量 f 为设计变

量,描述纤维的方向和疏密,如图 1 所示。

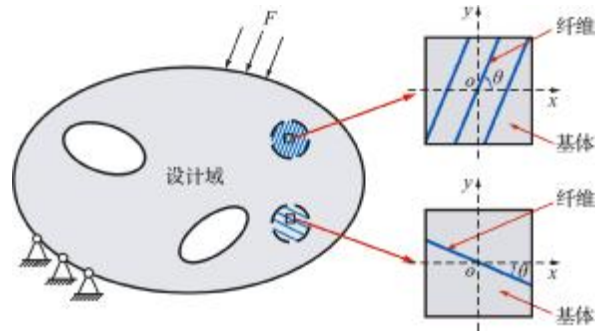


图1 边界条件和纤维设计变量

Fig. 1 Boundary condition and fiber design variables

基于复合材料混合定律建立连续纤维复合材料弹性常数与纤维含量间的映射关系为

$$\begin{cases} E_1 = E_f f + E_m(1-f) \\ E_2 = 1/[f/E_f + (1-f)/E_m] \\ G_{12} = 1/[f/G_f + (1-f)/G_m] \\ \mu_{12} = \mu_f f + \mu_m(1-f) \\ \mu_{21} = [\mu_f f + \mu_m(1-f)](E_2/E_1) \end{cases} \quad (1)$$

式中 E_f 和 E_m 分别为纤维和基体材料的弹性模量, G_f 和 G_m 分别为纤维和基体材料的剪切模量, μ_f 和 μ_m 分别为纤维和基体材料的泊松比。

根据材料坐标系和全局坐标系下的应力-应变关系,构建全局坐标系复合材料弹性矩阵关于纤维设计变量的计算公式为

$$\mathbf{D}(f_e, \theta_e) = \mathbf{Tr}(\theta_e) \cdot \mathbf{D}_0(f_e) \cdot \mathbf{Tr}^T(\theta_e) \quad (2)$$

式中 θ_e 和 f_e 分别为第 e 个单元的纤维角度和纤维含量, \mathbf{D}_0 为材料坐标系下的弹性矩阵, \mathbf{Tr} 为角度转换矩阵,可表示为

$$\mathbf{D}_0 = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} & \frac{\mu_{21}E_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} & 0 \\ \frac{\mu_{12}E_2}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{Tr}(\theta_e) = \begin{bmatrix} \cos^2\theta_e & \sin^2\theta_e & -\sin 2\theta_e \\ \sin^2\theta_e & \cos^2\theta_e & \sin 2\theta_e \\ 0.5\sin 2\theta_e & -0.5\sin 2\theta_e & \cos 2\theta_e \end{bmatrix} \quad (4)$$

推导单元刚度矩阵 \mathbf{k}_e 可表示为

$$\mathbf{k}_e(f_e, \theta_e) = \int \mathbf{B}^T \mathbf{D}(f_e, \theta_e) \mathbf{B} d\Omega \quad (5)$$

式中 \mathbf{B} 为应变-位移矩阵。

2.2 拓扑优化模型的建立

将纤维角度变量 θ 和纤维含量变量 f 引入拓扑优化模型,以结构柔顺度最小化为目标,结构体积和纤维体积为约束,建立连续纤维复合材料结构

多尺度拓扑优化模型为

$$\begin{aligned}
 & \text{find } \boldsymbol{\rho}, \mathbf{f}, \boldsymbol{\theta} \\
 & \min C(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{f}, \boldsymbol{\theta}) \\
 & \text{s.t. } \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{F} \\
 & V_m(\boldsymbol{\rho}) \leq r_m V_0 \\
 & V_f(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{f}) \leq r_f r_m V_0 \\
 & 0 < \rho_{\min} \leq \rho_e \leq 1 \quad (e=1, 2, \dots, n) \\
 & 0 \leq f_e \leq 1 \quad (e=1, 2, \dots, n) \\
 & -\pi/2 \leq \theta_e \leq \pi/2 \quad (e=1, 2, \dots, n) \quad (6)
 \end{aligned}$$

式中 $\boldsymbol{\rho}$ 为拓扑设计变量, C 为结构柔顺度, \mathbf{U} 为位移向量, \mathbf{K} 为结构总体刚度矩阵, \mathbf{F} 为施加的外部载荷, $V_m(\boldsymbol{\rho})$ 和 $V_f(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{f})$ 分别为结构和纤维的体积分数, V_0 为结构总体积, r_m 和 r_f 分别为结构体积和纤维体积约束的系数, n 表示有限单元的总数, ρ_e 为第 e 个单元的拓扑变量, ρ_{\min} 为大于 0 的极小值, 用于避免刚度矩阵的奇异。

结构柔顺度 $C(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{f}, \boldsymbol{\theta})$ 、结构体积 $V_m(\boldsymbol{\rho})$ 和纤维体积 $V_f(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{f})$ 可表示为

$$C(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{f}, \boldsymbol{\theta}) = \sum_{e=1}^n \mathbf{u}_e^T (f_k(\rho_e) \mathbf{k}_e(f_e, \theta_e)) \mathbf{u}_e \quad (7)$$

$$V_m(\boldsymbol{\rho}) = \sum_{e=1}^n f_v(\rho_e) \cdot v_0 \quad (8)$$

$$V_f(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{f}) = \sum_{e=1}^n f_v(\rho_e) \cdot f_e \cdot v_0 \quad (9)$$

式中 \mathbf{u}_e 为第 e 个单元的位移向量, \mathbf{k}_e 为单元刚度矩阵, v_0 为单元体积, $f_k(\rho_e)$ 和 $f_v(\rho_e)$ 分别为第 e 个单元刚度和体积的过滤函数, 可表示为

$$f_k(\rho_e) = (e^{\rho_e/\beta_k} - 1) / (e^{1/\beta_k} - 1) \quad (10)$$

$$f_v(\rho_e) = (e^{\rho_e/\beta_v} - 1) / (e^{1/\beta_v} - 1) \quad (11)$$

式中 β_k 和 β_v 分别为单元刚度过滤函数和体积过滤函数的系数, 根据前期研究成果, 本文数值算例选取 $\beta_k = 0.25$ 和 $\beta_v = 1$ 。

2.3 灵敏度分析

根据结构柔顺度 $C(\boldsymbol{\rho}, \mathbf{f}, \boldsymbol{\theta})$ 的计算公式, 推导目标函数关于拓扑变量、纤维含量和纤维角度的灵敏度为

$$\frac{\partial C}{\partial \rho_e} = - \frac{\partial f_k(\rho_e)}{\partial \rho_e} \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_e(f_e, \theta_e) \mathbf{u}_e \quad (12)$$

$$\frac{\partial C}{\partial f_e} = - f_k(\rho_e) \mathbf{u}_e^T \frac{\partial \mathbf{k}_e(f_e, \theta_e)}{\partial f_e} \mathbf{u}_e \quad (13)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \theta_e} = - f_k(\rho_e) \mathbf{u}_e^T \frac{\partial \mathbf{k}_e(f_e, \theta_e)}{\partial \theta_e} \mathbf{u}_e \quad (14)$$

式中 $\partial f_k(\rho_e) / \partial \rho_e$ 为单元刚度过滤函数的导数, 根据式(10)计算为

$$\frac{\partial f_k(\rho_e)}{\partial \rho_e} = \frac{e^{\rho_e/\beta_k}}{\beta_k (e^{1/\beta_k} - 1)} \quad (15)$$

根据式(5)计算单元刚度矩阵关于纤维含量和纤维角度变量的偏导为

$$\frac{\partial \mathbf{k}_e(f_e, \theta_e)}{\partial f_e} = \int \mathbf{B}^T \frac{\partial \mathbf{D}(f_e, \theta_e)}{\partial f_e} \mathbf{B} d\Omega \quad (16)$$

$$\frac{\partial \mathbf{k}_e(f_e, \theta_e)}{\partial \theta_e} = \int \mathbf{B}^T \frac{\partial \mathbf{D}(f_e, \theta_e)}{\partial \theta_e} \mathbf{B} d\Omega \quad (17)$$

式中 单元弹性矩阵关于纤维含量和纤维角度的偏导可根据式(2,3)计算。

3 基于主应力的纤维角度修正策略

以连续纤维角度为设计变量能够很好地描述纤维分布, 然而弹性矩阵的三角函数导致模型的非凸性, 存在陷入局部最优的风险, 限制了CFAO方法的应用。为此, 本文提出一种基于主应力的纤维角度修正策略, 在迭代过程中根据第一主应力方向修正纤维角度变量, 修正后纤维角度 θ_{ND} 可表示为

$$\theta_{ND} = \begin{cases} \theta_{PI} + \varphi f_{\text{sig}}(\varphi) & (\theta_{ND} \in (-\pi/2, \pi/2]) \\ g(\theta_{PI} + \varphi f_{\text{sig}}(\varphi)) & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (18)$$

式中 θ_{PI} 为当前迭代步的纤维角度变量, φ 为纤维方向与第一主应力方向的夹角, f_{sig} 为 Sigmoid 插值函数, $g(x)$ 为保证纤维角度在定义域 $(-\pi/2, \pi/2]$ 内的映射函数, 即

$$\varphi = \begin{cases} \theta_{DPS} - \theta_{PI} & (|\theta_{DPS} - \theta_{PI}| \leq \pi/2) \\ \theta_{DPS} - g(\theta_{PI}) & (|\theta_{DPS} - \theta_{PI}| > \pi/2) \end{cases} \quad (19)$$

$$f_{\text{sig}} = \frac{1}{1 + e^{-(|\varphi| \cdot (4/\pi) - 1)}} \quad (20)$$

$$g(x) = -x/|x| \cdot \pi + x \quad (21)$$

式中 θ_{DPS} 为单元第一主应力方向与 x 轴的夹角。

纤维角度修正过程如图 2 所示, 首先根据式(19)计算纤维方向与主应力方向的夹角 φ , 通过式(18,20)依次计算插值系数和新的纤维角度变量。

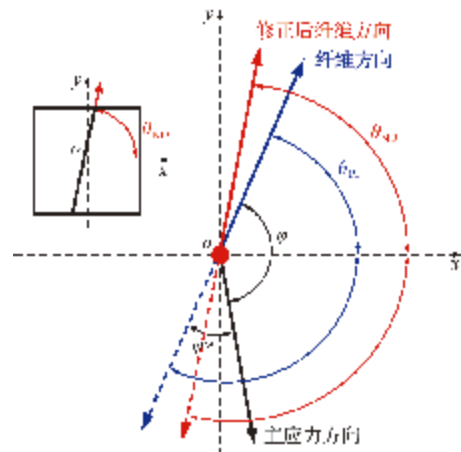


图 2 基于主应力的纤维角度修正策略
Fig. 2 Strategy of principal stress based fiber orientation correction

4 数值算例

本文选择尼龙和碳纤维作为基体和纤维材料,根据式(1)计算连续纤维增强复合材料的力学性能。基体和纤维材料的弹性模量、剪切模量和泊松比等材料参数列入表1。

表1 基体和纤维的材料参数

Tab. 1 Material parameters of fiber and matrix

	E_1/GPa	E_2/GPa	G_{12}/GPa	μ_{12}
Fiber	233.13	23.11	8.97	0.20
Matrix	4.35	4.35	1.59	0.37

4.1 MBB 梁

基于上述材料参数,以 MBB 梁为基结构进行多尺度拓扑优化,设计域和边界条件如图3所示。设计域尺寸为 $H=80\text{ mm}$ 和 $L=320\text{ mm}$,采用 320×80 的网格划分,集中载荷 $F=1000\text{ N}$ 作用于设计域上边界中点。结构体积约束参数设置为 $r_m=0.3$,纤维含量的取值范围为 $[0,1]$ 。

首先讨论最小拓扑设计变量 ρ_{\min} 的取值对优化结果的影响,优化结果拓扑构型和纤维分布列入

表2。分别设置 $\rho_{\min}=0.01, \rho_{\min}=0.001$ 和 $\rho_{\min}=0.0001$ 进行连续纤维复合材料 MBB 梁结构的拓扑优化,对应优化设计的柔顺度分别为 $1075.3\text{ N}\cdot\text{mm}, 1049.5\text{ N}\cdot\text{mm}$ 和 $1052.9\text{ N}\cdot\text{mm}$ 。优化设计中高纤维含量区域集中于宏观结构的外部区域,纤维含量的分布与结构内载荷传递路径一致,优化结果趋于向主要承力区域分配更多的纤维。优化结果表明,随着 ρ_{\min} 的减小,优化结果的柔顺度先减小后增大。在优化迭代过程中,过大的 ρ_{\min} 取值会导致过高地估计空单元的力学性能,影响优化设计的刚度性能,过小的取值则无法避免刚度矩阵的奇异性。因此,应根据数值实验结果对 ρ_{\min} 进行合理选择,本文后续算例设定 $\rho_{\min}=0.001$ 。

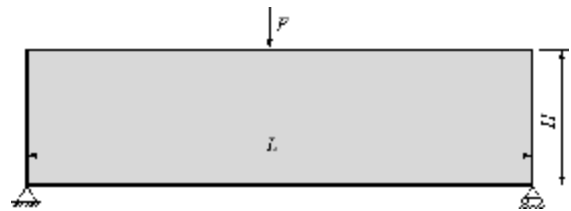


图3 MBB 梁设计域和边界条件

Fig. 3 Design domain and boundary condition of MBB beam

表2 不同拓扑设计变量最小值 ρ_{\min} 下 MBB 梁的拓扑优化设计

Tab. 2 Optimization results of MBB beams with different minimum topology variables ρ_{\min}

	拓扑构型	纤维含量	纤维方向
$\rho_{\min}=0.01$			
$\rho_{\min}=0.001$			
$\rho_{\min}=0.0001$			

表3 不同纤维体积约束下 MBB 梁的拓扑优化设计

Tab. 3 Optimization results of MBB beams with different fiber volume constraints

纤维体积	拓扑构型	纤维含量	纤维方向
$r_f=0.1$			
$r_f=0.3$			
$r_f=0.5$			

探究纤维体积约束对优化结果的影响规律,为满足3D打印工艺的可制造性要求,设置纤维含量的取值范围为 $[0, 0.6]$ 。分别设置不同的优化参数 r_f ,进行复合材料结构多尺度拓扑优化设计,优化拓扑和纤维分布列入表3。 $r_f=0.1$, $r_f=0.3$ 和 $r_f=0.5$ 优化设计的柔顺度分别为 $3718.6 \text{ N}\cdot\text{mm}$, $1425.7 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 和 $825.8 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。纤维总含量较低时,优化设计中纤维主要集中于加载点附近,随着纤维体积的不断增长,纤维沿传力路径分布,并最终趋于均匀分布。随着结构纤维含量从10%增加到50%,结构柔顺度降低约78%,表明纤维含量是优化拓扑构型和结构刚度性能的重要影响因素,同时验证了提出方法的有效性和稳定性。

4.2 悬臂梁

悬臂梁结构如图4所示,结构尺寸参数为 $L=100 \text{ mm}$ 和 $W=50 \text{ mm}$,采用 100×50 的四节点单元离散设计域。悬臂梁左端固定,右侧中点施加垂直向下的集中载荷 $F=500 \text{ N}$,定义拓扑变量下限为 $\rho_{\min}=0.001$,纤维含量的取值范围为 $[0, 0.6]$,结

构体积约束和纤维含量约束参数为 $r_m=0.4$ 和 $r_f=0.3$ 。

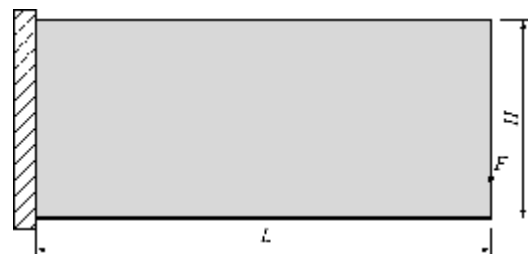


图4 悬臂梁设计域和边界条件
Fig.4 Design domain and boundary condition of cantilever beam

分别采用不同的方法进行悬臂梁结构拓扑和纤维分布的并行优化设计,根据优化结果分别进行纤维路径规划,优化结果及其连续纤维路径列入表4。PSO-CFAO方法和本文方法优化结果的柔顺度分别为 $266.4 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 和 $245.9 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 。本文未考虑材料拉压性能的非对称性,设定材料弹性性能不随载荷作用而改变,因此优化的拓扑构型和纤维方向均呈对称分布。

表4 不同优化方法的悬臂梁结构拓扑优化设计

Tab.3 Optimization designs of cantilever beams with different optimization methods

	拓扑构型	纤维含量	纤维方向	连续纤维路径
PSO-CFAO方法				
本文方法				

优化结果表明,提出的方法能够实现结构拓扑、纤维方向和疏密的并行优化,实现连续平滑的纤维方向过渡,获得非均匀的纤维分布设计。在相同的纤维体积下,非均匀的纤维分布能够获得更高的结构性能,结构刚度性能提升约8%。

5 结论

本文基于独立连续拓扑变量,提出了一种结构拓扑和纤维分布的并行优化方法。与传统拓扑优化方法相比,本文定义纤维角度和纤维含量为设计变量,建立了面向连续纤维复合材料的多尺度拓扑优化模型,并进行灵敏度分析。基于主应力方向建

立了纤维角度的迭代修正策略,降低优化陷入局部最优的风险,实现了拓扑构型、纤维方向和纤维含量的并行优化设计。

通过数值算例探究了设计变量最小值和纤维体积约束值对优化结果的影响,结果表明纤维含量是对复合材料结构性能的重要影响因素。提出的方法能够在纤维体积约束下实现非均匀的纤维分布设计和复合材料结构的多尺度并行优化,验证了提出方法的有效性和稳定性,对面向3D打印的连续纤维复合材料结构设计及其路径规划具有重要的指导意义。

参考文献(References):

- [1] 陈向明,姚辽军,果立成,等. 3D打印连续纤维增强复合材料研究现状综述[J]. 航空学报, 2021, **42**: 174-198. (CHEN Xiang-ming, YAO Liao-jun, GUO Li-cheng, et al. 3D printed continuous fiber-reinforced composites: State of the art and perspectives[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, **42**: 174-198. (in Chinese))
- [2] 叶红玲,董永佳,毛鹏琪,等. 3D打印连续纤维复合材料工艺、结构优化研究进展[J]. 力学进展, 2024, **54**(2): 391-425. (YE Hong-ling, DONG Yong-jia, MAO Peng-qi, et al. Research progress of process and structures optimization for 3D printed continuous fiber-reinforced polymers [J]. *Advances in Mechanics*, 2024, **54**(2): 391-425. (in Chinese))
- [3] He Q H, Wang H J, Fu K K, et al. 3D printed continuous CF/PA6 composites: Effect of microscopic voids on mechanical performance[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, **191**: 108077.
- [4] 李岩,龙昱,郝路岑,等. 3D打印纤维增强复合材料力学性能研究进展[J]. 力学季刊, 2022, **43**: 731-750. (LI Yan, LONG Yu, HAO Lu-cen, et al. Recent advances in the mechanical properties of 3D printed fiber-reinforced composites[J]. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2022, **43**: 731-750. (in Chinese))
- [5] 单忠德,范聪泽,孙启利,等. 纤维增强树脂基复合材料增材制造技术与装备研究[J]. 中国机械工程, 2020, **31**(2): 221-226. (SHAN Zhong-de, FAN Cong-ze, SUN Qi-li, et al. Research on additive manufacturing technology and equipment for fiber reinforced resin composites[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, **31**(2): 221-226. (in Chinese))
- [6] Sigmund O. A 99 line topology optimization code written in matlab[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2001, **21**(2): 120-127.
- [7] Allaire G, Jouve F, Toader A M. Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method [J]. *Journal of Computational Physics*, 2004, **194**(1): 363-393.
- [8] Yan X, Huang X, Zha Y, et al. Concurrent topology optimization of structures and their composite microstructures[J]. *Computers & Structures*, 2014, **133**: 103-110.
- [9] Guo X, Zhang W S, Zhong W L. Doing topology optimization explicitly and geometrically—A new moving morphable components based framework[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2014, **8**: 081009.
- [10] Sui Y K, Yang D Q. A new method for structural topological optimization based on the concept of independent continuous variables and smooth model[J]. *Mechanica Sinica*, 1998, **14**(2): 179-185.
- [11] Stegmann J, Lund E. Discrete material optimization of general composite shell structures [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2005, **62**(14): 2009-2027.
- [12] Bruyneel M, Fleury C. Composite structures optimization using sequential convex programming [J]. *Advances in Engineering Software*, 2002, **33**(7-10): 697-711.
- [13] Duan Z Y, Liu Y Q, Fan J L, et al. Concurrent multi-material and multi-scale design optimization of fiber-reinforced composite material and structures for minimum structural compliance [J]. *Composite Structures*, 2023, **311**: 116796.
- [14] Niu B, Feng N, Lund E, et al. Discrete material optimization of composite structures subjected to initial excitation for minimum residual vibration [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, **173**: 108901.
- [15] Huang Y M, Tian X Y, Li W D, et al. 3D printing of topologically optimized wing spar with continuous carbon fiber reinforced composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, **272**: 111166.
- [16] Qiu Z, Li Q H, Liu S T. Topology optimization method for continuous fiber reinforced composites with different moduli in tension and compression [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics And Engineering*, 2024, **423**: 116867.
- [17] Dong Y J, Ye H L, Yang J X, et al. Topology optimization of continuous fiber-reinforced composite (CFRC) structures considering the residual stress in additive manufacturing [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2023: 1-14.
- [18] Luo Y F, Chen W J, Liu S T, et al. A discrete-continuous parameterization (DCP) for concurrent optimization of structural topologies and continuous material orientations [J]. *Composite Structures*, 2020, **236**: 111900.
- [19] Qiu Z, Li Q H, Luo Y F, et al. Concurrent topology and fiber orientation optimization method for fiber-reinforced composites based on composite additive manufacturing [J]. *Computer Method in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, **395**: 114962.
- [20] Ye H L, Dong Y J, Yang J X, et al. Concurrent optimization method of principal stress orientation interpolated continuous fiber angle (PSO-CFAO) and structural topology [J]. *Composite Structures*, 2023, **325**: 117572.
- [21] Svanberg K. The method of moving asymptotes—A new method for structural optimization [J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1987, **24**(2): 359-373.

Lightweight underwater pressure-resistant structure design inspired by the Venus's flower basket

CHEN Wen-jiong*, MAO Jiang-yu

(School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The structure of a Venus flower basket, which lives in the deep sea, has characteristics such as light weight, high strength, good pressure resistance, making it a kind of typical lightweight and high-strength biological structure. In this paper, we propose a pressure-resistant shell structure design inspired by the structure of a Venus Flower Basket and conduct a numerical simulation study on its pressure resistance performance. Using the 240 mm compartment section as the standard, under the condition of the same volume, length, outer diameter, and external water pressure, the pressure resistant performance of conventional underwater vehicle shell structures, two diagonal reinforced shell structures, and the Venus flower basket-inspired shell structure are compared and analyzed. The results show that the Venus flower basket-inspired structure has the best strength performance, with the smallest maximum stress and principal stress. The proposed biomimetic structure is of great significance for innovative design of underwater vehicles.

Key words: underwater pressure-resistant structure; Venus basket structure; finite element numerical analysis; bionic design; light weight

(上接第 856 页)

Multi-scale topology optimization for continuous fiber-reinforced composite structures

YE Hong-ling*, DONG Yong-jia, XIAO Yang, WANG Wei-wei

(School of Mathematics, Statistics and Mechanics, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Continuous fiber-reinforced composites are increasingly favored in high-end equipment manufacturing fields such as aerospace engineering due to their lightweight, high specific strength, and high specific modulus. Meanwhile, the development of continuous fiber 3D printing technology makes it possible to fabricate structures with complex geometric configurations and fiber distribution. To sufficiently utilize the multi-scale designability of composites and obtain better structural properties, a multi-scale topology optimization method for continuous fiber-reinforced composite structures based on independent continuous topology variables is proposed in this paper. This method introduces a fiber orientation interpolation strategy based on principal stresses to determine local optima in the fiber angle optimization process, and realizes the concurrent optimization design of macro-topology, micro-fiber orientation and density of continuous fiber composite structures. Topology and fiber orientation design variables are updated through the method of moving asymptotes (MMA). Numerical examples are provided to verify the effectiveness and stability of the proposed method, which has guiding significance for the structural design and path planning of continuous fiber-reinforced composite structures.

Key words: continuous fiber-reinforced composites; topology optimization; multi-scale optimization; principal stress orientation