

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.01.011

多层复合材料构件的快速拓扑及取向优化

李文政^{1,2}, 梁建国^{1,2}

(1. 太原理工大学机械工程学院, 太原 030024; 2. 太原理工大学先进金属复合材料成形技术与装备教育部工程研究中心, 太原 030024)

摘要: 为提高多层纤维复合材料构件的拓扑及取向优化效率, 解决优化过程中“底切”结构及纤维取向局部最优等数值问题, 提出了一种基于敏感度惩罚和聚类算法的快速拓扑及取向优化方法。首先, 依据双向渐进优化方法的单元更新特性, 对各层单元敏感度数值进行基于层数的惩罚, 实现上层材料的优先去除, 避免了“底切”结构。其次, 利用有限元理论及本构矩阵特性, 简化了单元敏感度计算公式, 实现优化效率的大幅提升, 并以此为基础精简取向优化模型。随后, 利用一维聚类算法和过滤算法规避局部最优问题, 并获得各单元最优角度, 分层应用多维聚类算法得到各层纤维取向分布结果。最后, 根据各层纤维取向分布推导出各层铺放路径, 通过纤维铺放设备实现优化结果的铺放成型。对比结果表明, 所提方法有效解决了优化过程中的数值问题, 结构体积率可降至40%, 优化效率提高了35.9%, 结构刚度提升了17%, 推导出的铺放轨迹具有良好的制造可行性。

关键词: 拓扑优化; 纤维增强复合材料; 敏感度惩罚; 取向优化; 层合板; 有限元

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)01-0074-09

Fast topology and orientation optimization for multilayer composite components

LI Wenzheng^{1,2}, LIANG Jianguo^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Engineering Research Center of Advanced Metal Composites Forming Technology and Equipment, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract : To improve the efficiency of topology and orientation optimization for multilayer fiber-reinforced composite components, and to address numerical issues such as “undercut” structures and local optima in fiber orientation during the optimization process, a rapid optimization method based on sensitivity penalties and clustering algorithms was proposed. Firstly, based on the unit update characteristics of the bi-directional evolutionary structural optimization method, a layer-based penalty was applied to the sensitivity values of each layer's elements, which enabled the preferential removal of upper-layer materials and prevented the occurrence of “undercut” structures. Secondly, the finite element theory and constitutive matrix properties were utilized to simplify the sensitivity calculation formula, significantly enhancing optimization efficiency and further streamlining the orientation optimization model. Subsequently, a one-dimensional clustering algorithm and filtering algorithm were employed to avoid local optima and obtained the optimal angle for each element. A multi-dimensional clustering algorithm was then applied to derive the fiber orientation distribution for each layer, leading to the determination of the laying paths for each layer. Finally, the results of the optimization were realized through an automated fiber placement system. Comparative results indicate that the proposed method effectively addresses numerical issues in the optimization process, reducing the structural volume fraction to 40%, improving optimization efficiency by 35.9%, enhancing structural stiffness by 17%, and producing laying trajectories with good manufacturability.

Keywords : topology optimization ; fiber reinforced composites ; sensitivity penalty ; orientation optimization ; laminated plate ; finite element

纤维增强复合材料凭借高比强度、高比刚度、轻质等优异特点, 被广泛应用于航空航天^[1]、汽车制造、机械工程^[2]等领域。作为重要的成型方法之一, 纤维自动铺放技术^[3]可发挥复合材料可设计度高的

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075361), 山西省重大科技专项(20201102003)

通信作者: 梁建国, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为碳纤维多基体复合材料的开发及其应用

收稿日期: 2024-11-29

引用格式: 李文政, 梁建国. 多层复合材料构件的快速拓扑及取向优化[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(1): 74-82.

LI Wenzheng, LIANG Jianguo. Fast topology and orientation optimization for multilayer composite components[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1): 74-82.

特点,优化材料堆叠和纤维取向分布实现复合材料构件轻量化设计及性能提升^[4]。因此,多层复合材料构件的优化设计问题分为拓扑优化及纤维取向优化两部分。

拓扑优化方法最初用于各向同性材料构件的轻量化设计,经拓展后可实现各向异性材料构件的优化。常用方法可分为:基于密度的方法,如固体各向同性惩罚材料方法^[5];结构渐进法,如进化结构优化方法^[6]、允许添加和删除材料的双向渐进结构优化方法^[7];边界变分方法,如水平集法^[8]。以往研究对象多侧重于平面问题,缺乏对多层纤维复合材料构件的优化研究,直接套用传统拓扑优化方法易导致数值问题,即底层材料被去除而上层材料依旧存在的“底切”结构^[9],不符合实际自动铺放情况。

纤维增强复合材料具有很强的各向异性,其取向分布会直接影响结构件的力学性能,同时受到成型工艺的制造约束,在设计上存在一定的限制条件。诸如基于应力^[10]的方法、基于应变^[11]的方法以结构总柔度为目标进行取向优化,但在面对复杂载荷情况时通用性较差。一些启发式搜索算法和基于梯度的方法也用于求解纤维的最优分布,Montemurro等^[12]在B样条曲面框架下将约束优化问题制定为多尺度两级(MS2L)优化策略,使用极坐标表示法以规避纤维角度变量直接相关的强非凸性;Tong等^[13]采用基于梯度的求解器,利用扩展的移动等值面阈值算法进行优化求解,但这些方法大多面临计算成本大、评价函数多等问题。离散角度优化和连续角度优化被用于解决上述问题,马志坤等^[14]通过候选弹性张量(与候选角度对应)的加权计算等效弹性张量,但角度选择具有较大的不连续性;Ye等^[15]使用连续纤维角度优化方法,将纤维角度直接作为设计变量进行优化,由于三角函数的周期特性,优化结果容易陷入局部最优^[16],且对初始角度设置较为敏感。

此外,将拓扑优化集成到ANSYS,ABAQUS等商业有限元软件的二次开发功能中可以降低数值分析开发的编程工作^[17],利用商业软件成熟的求解器完成有限元计算,配合Python等编程语言可以进一步扩展出更多功能,进而完成更多目标的优化计算,降低优化工作难度。

笔者提出一种快速实现多层纤维复合材料构件的拓扑及取向优化方法。该方法考虑材料逐层

铺放成型的特点,依据各层材料所在层数对层内单元敏感度进行惩罚,利用双向渐进优化(BESO)方法特性优先去除上层单元,进而避免“底切”现象。将与正交各向异性材料本构相关的敏感度计算公式进行简化并集成到ANSYS APDL中,实现拓扑优化和取向优化计算成本的大幅下降。进一步地,以纤维角度为设计变量,对拓扑优化后保留下的单元敏感度数值进行计算,利用聚类算法特性筛选出较优角度,经过滤后分层进行多维聚类操作以实现纤维取向最优分布。最终通过六层复合材料数值算例所提方法的有效性,为多层平板类构件拓扑及取向优化提供支撑。

1 多层复合材料拓扑优化方法

1.1 BESO拓扑优化模型

拓扑优化可被认为是受体积约束限制的结构柔度最小化问题。同时将位移约束、频率约束^[18]等添加到优化过程中。笔者对位移进行限制约束,以保证加载点变形在可接受范围内,故问题可被描述为式(1)。

$$\begin{cases} \min C = C(x) = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^n x_i v_i - V^* = 0 \\ d_j(x) - d^* < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: C 为结构的柔度; $\mathbf{u}$ 表示位移向量; $\mathbf{K}$ 为整体的刚度矩阵; V^* 为结构最低体积约束,同时也是优化过程中的目标体积率; x_i 为第 i 个单元的设计变量,在BESO方法中, x_i 可以取值0或1,分别表示单元状态为空或实; v_i 为第 i 个单元的体积; d_j 为第 j 个节点的位移幅值大小; d^* 为预先设定的位移约束。

经拉格朗日变化可将上述带约束优化问题转换为无约束优化问题,可以写为式(2)。

$$L(x, \lambda, \mathbf{u}, s^2) = C(x) + \lambda \left(\sum_{i=1}^n x_i v_i - V^* \right) + \mu (d_j - d^* + s^2) \quad (2)$$

式中: λ 和 μ 为拉格朗日乘子,分别对应体积和位移约束; s^2 为松弛变量。

对式(2)求导得单元敏感度,如式(3)所示。

$$\dot{\alpha}_i = \alpha_i - \lambda v_i = \frac{\partial C}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial d_j}{\partial x_i} = \alpha_i^{\text{sf}} + \mu \alpha_i^{\text{dis}} \quad (3)$$

式中: α^{sf} 和 α^{dis} 分别为单元柔度敏感度、单元位移敏感度; α_i 和 $\dot{\alpha}_i$ 分别为第 i 个单元的拉格朗日函数敏感度和等效敏感度。

柔度敏感度 α_i^{sf} 可表述为式(4)。

$$\alpha_i^{\text{sf}} = \Delta C = \frac{1}{2} \mathbf{u}_i^T \mathbf{K}_i \mathbf{u}_i \quad (4)$$

式中: $\mathbf{u}_i$ 为第 i 个单元的位移向量; $\mathbf{K}_i$ 表示有限元中第 i 个单元的刚度矩阵。对于要优化的整体结构, 当某个单元被删除时, 总的结构刚度会减小, C 的数值也会对应着增加, 即 ΔC 。

单元位移敏感度 α_i^{dis} 可表示为式(5)。

$$\alpha_i^{\text{dis}} = \frac{\partial d_j}{\partial x_i} = \mathbf{u}_{ij}^T \mathbf{K}_i \mathbf{u}_i \quad (5)$$

为避免数值结果不稳定, 出现诸如棋盘格^[19]等问题, 使用滤波对单元敏感度进行处理, 滤波器方案为式(6)。

$$\hat{\alpha}_i = \sum_j \left(\frac{w_{ij}}{\sum_j w_{ij}} \right) \alpha_j \quad (6)$$

式中: $\hat{\alpha}_i$ 为过滤后第 i 个单元的敏感度; α_j 为第 j 个单元过滤前的敏感度, 即初始敏感度; w_{ij} 为与第 i 个单元到第 j 个节点距离线性相关的权值, 表示为式(7)。

$$w_{ij} = \begin{cases} r_{\min} - r_{ij}, & r_{ij} < r_{\min} \\ 0, & r_{ij} \geq r_{\min} \end{cases} \quad (7)$$

式中: r_{ij} 为第 i 个单元与第 j 个单元的中心距离; $r_{\min}$ 为预先设定的过滤半径。该过滤方案用于敏感度的加权平均处理, 还将用于后续纤维取向过程中最优角度的筛选。

一般材料需要 9 个物理参数以实现材料的完全描述。包括主方向拉伸弹性模量 E_1, E_2, E_3 , 剪切模量 G_{12}, G_{13}, G_{23} 以及泊松比 ν_{12}, ν_{13} 和 ν_{23} , 其余所需常数可由以上 9 个物理参数推导得出。

定义了表 1 所示两组物理常数, 其中 Mat1 代表各向同性材料, 用以验证所编写程序的正确性; Mat2 代表正交各向异性材料, 以代替自动铺放所使用的复合材料预浸带。

表 1 不同材料的物理参数

Tab. 1 Physical parameters of different materials

Material	E_1	E_2	E_3	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
Mat1	18E9	18E9	18E9	0.25	0.25	0.25	7.2E9	7.2E9	7.2E9
Mat2	50E9	10E9	10E9	0.05	0.05	0.25	6E9	6E9	4E9

Note: E9 means 10^9 .

使用 ANSYS APDL 参数化建模语言将建模、材料参数指定、网格划分、有限元分析及简单的逻辑和数学运算集成到 ANSYS 中。图 1 为悬臂梁测试

基准, 左侧施加固定约束, 右侧中部施加向下的集中载荷。将整个结构被划分为 80×40 个单元, 集中载荷 F 设为 2 000 N, 施加载荷节点处的限制节点位移 d_j 为 0.45 mm。

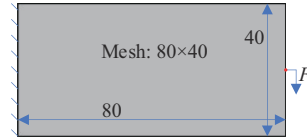
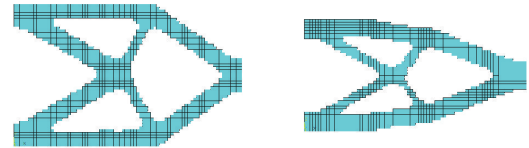


图 1 悬臂梁测试基准

Fig. 1 Cantilever beam test benchmark

在较大程度实现结构轻量化效果及保证收敛的情况下, 参考于海等^[20]在悬臂梁测试中体积比设置, 将单层材料情况下拓扑优化的目标体积率设置为 50%; 单元敏感度惩罚可进一步去除上层材料, 提升结构的轻量化程度, 因此将本研究中多层材料情况下拓扑优化目标的体积率进一步降至 40%。

为验证所采用 BESO 算法及 APDL 代码的有效性, 分别将表 1 中的 Mat1 和 Mat2 两种材料用于图 1 的测试基准中, 所得拓扑优化结果如图 2 所示。



(a) Topology optimization result for Mat1 (b) Topology optimization result for Mat2

图 2 不同材料下单层拓扑优化结果

Fig. 2 Single-layer topology optimization results under different materials

图 2a 与参考文献[21]的各向同性材料悬臂梁测试结果基本一致, 证明了所编写 BESO 程序的正确性, 且可见, 不同类型的材料属性对优化结果的影响较大, 但同类材料的优化结果具有相似性。为保证一致性, 后续示例均采用 Mat2 进行有限元分析。

1.2 多层材料情况下的敏感度惩罚

自动铺放过程中, 碳纤维预浸带首先被铺放到模具上, 然后逐层堆叠起来, 形成复合材料层合板。这一过程也成为了多层材料构件拓扑优化的一个约束, 即需要考虑材料逐层放置的加工特点, 避免如图 3 所示的“底切”结构, 造成不可制造限制。为

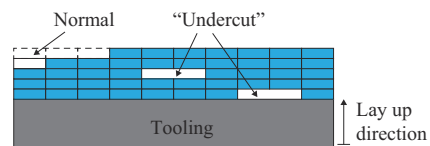


图 3 “底切”结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of "undercut" structure

满足轻量化应用的目的,需要选择更优异的材料分布,将材料放置到真正需要的地方,最大限度地提高材料效率。

为避免该问题,进一步降低结构的体积率,提出一种新的单元敏感度更新策略来实现多层复合材料结构的拓扑优化。一般的BESO算法在迭代过程中旨在去除当前敏感度低的单元,从而在对结构刚度影响较小的前提下降低整体体积。依据该特性在迭代过程中对单元敏感度进行式(8)的惩罚。

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha}_i^n &= p \cdot \hat{\alpha}_i^n \\ p &= (1 - \gamma)^n\end{aligned}\quad (8)$$

式中: $\tilde{\alpha}_i^n$ 表示经过惩罚后的第 n 层第 i 个单元的敏感度; γ 为缩减因子,且 $\gamma \in (0,1)$; p 为惩罚因子。

在这一过程中,使用Python控制迭代进程,并读取ANSYS有限元结果数据,对单元敏感度进行计算及惩罚后传送给ANSYS。结构的拓扑依旧是整体进行的,但分层对单元敏感度进行惩罚,经过滤与排序后,底层单元敏感度自然大于上层,也更倾向于被保留,从而避免“底切”结构。

采用图1所示的测试基准进行优化,将层数设置为6层,目标体积率为40%,单层材料厚度设置为0.2 mm,与实际制造所用预浸带厚度相近,缩减因子 γ 设为0.2,所得结果如图4所示。

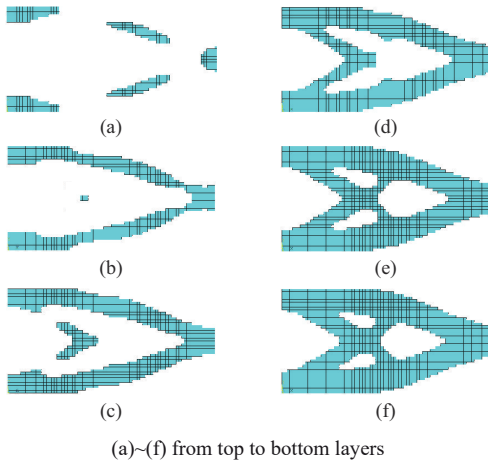


图4 多层结构拓扑优化结果

Fig. 4 Multilayer structure topology optimization results

由图4可以看出,各层覆盖区域由顶至底增加,整体结构依旧与单层优化结果具有相似性,但是在较上层的材料分布中,中间区域更易被删除。此外,可以发现下层材料覆盖区域较单层结果有所增加,这是因为采用了双向渐进优化方法,该方法具有允许材料被删除及添加的特性。在迭代过程中随

着判断单元是否被删除的敏感度阈值变化,下层某些被删除单元的敏感度数值因为重新大于阈值而被添加到下一次迭代中,最终形成了当前优化结果。

2 敏感度计算简化公式

2.1 正交各向异性材料本构方程

由式(4)可以看出,计算单元敏感度最重要的是获取单元刚度矩阵 K_i ,表示第 i 个单元在所定义材料下的等效单元刚度矩阵,可用式(9)表示。

$$K_i = \iiint_V B^T D_i B \, dx dy dz \quad (9)$$

(24 × 24) (24 × 6) (6 × 6) (6 × 24)

式中: D_i 为第 i 个单元的等效弹性矩阵;矩阵 B 为有限元单元对应的单元应变矩阵。

本研究中各单元均具有厚度,考虑到优化对象为低曲率平板类构件,故采用8节点6面体单元进行有限元计算。对于考虑单元纤维取向的情况, D_i 可用式(10)表示。

$$D_i = T(\theta_i)^T D^0 T(\theta_i) \quad (10)$$

式中: $T(\theta_i)$ 为铺层平面内纤维角度旋转变换矩阵; D^0 是纤维角度与选定的 x 轴夹角为 0° 时材料本构矩阵的逆。二者分别表示为式(11)和式(12)。

$$T(\theta_i) = \begin{bmatrix} c_{\theta_i}^2 & s_{\theta_i}^2 & 0 & c_{\theta_i}s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i}^2 & c_{\theta_i}^2 & 0 & -c_{\theta_i}s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -s_{2\theta_i} & s_{2\theta_i} & 0 & c_{\theta_i}^2 - s_{\theta_i}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{\theta_i} & c_{\theta_i} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{with } \begin{cases} c_{\theta_i} = \cos(\theta_i) \\ s_{\theta_i} = \sin(\theta_i) \end{cases}$$

$$D^0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

综上,将式(8)~式(12)带入式(4)中,可以得到柔度敏感度计算的详细表达式,见式(13)。

$$\begin{aligned}\alpha_i^{sf} &= \Delta C = \frac{1}{2} \mathbf{u}_i^T \mathbf{K}_i \mathbf{u}_i \\ &= \frac{1}{2} \iiint_V \mathbf{u}_i^T \mathbf{B}^T \mathbf{T}(\theta_i)^T \mathbf{D}^0 \mathbf{T}(\theta_i) \mathbf{B} \mathbf{u}_i dx dy dz\end{aligned}\quad (13)$$

至此,可根据各单元尺寸参数、材料特性及各节点位移计算敏感度数值,根据BESO敏感度规则进行结构拓扑优化。

2.2 简化结果

式(12)可用于处理各向同性材料、固定角度铺设的正交各向异性材料的敏感度计算,但在面临多角度、有限单元尺寸不均匀以及后续的单元最优角度搜索等计算量极大情况时,整体优化效率也随之大幅下降。

为降低计算成本,对三维正交各向异性材料的本构矩阵 $\mathbf{D}^0$ 进行简化,根据其材料特性,得到式(14)。

$$\mathbf{D}^0 = \begin{bmatrix} Q_1 & Q_2 & Q_2 & & & \\ Q_2 & Q_3 & Q_4 & & & \\ Q_2 & Q_4 & Q_3 & & & \\ & & & Q_5 & & \\ & & & & Q_6 & \\ & & & & & Q_5 \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据有限元理论及图5中8节点6面体单元几何参数,可以计算出单元应变矩阵。通过对 $\mathbf{u}_i \mathbf{B}$ 进行简化处理并带入上述旋转变换矩阵及简化后的材料本构矩阵,可以得到敏感度计算的简化公式(15)。

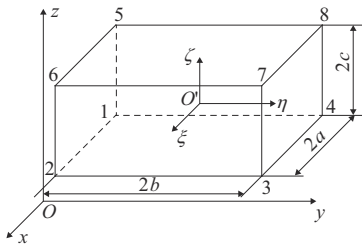


图5 8节点6面体单元

Fig. 5 8 Node hexahedral unit

$$\begin{aligned}\alpha_i^{sf} &= f(\theta_i) \\ &= \frac{1}{2} (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5) \cdot (s_{2\theta_i}, c_{2\theta_i}, s_{4\theta_i}, c_{4\theta_i}, 1)^T \\ \theta_i &\in [-90^\circ, 90^\circ]\end{aligned}\quad (15)$$

这一形式可以在Python中得以快速执行,其余简单计算集成在ANSYS APDL中高效执行。为验证该方法的有效性,对表1中Mat2分别采用式(13)和式(15)进行图1测试基准,两种方法计算结果及迭

代消耗时间如图6所示。

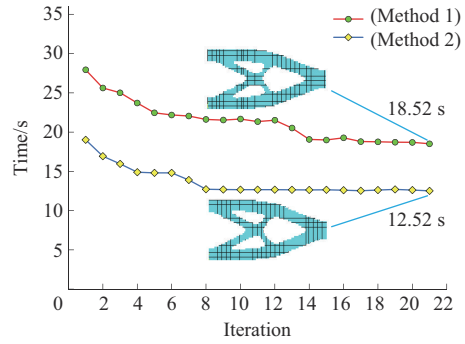


图6 时间消耗对比图

Fig. 6 Time consumption comparison chart

从图6可以看出,两种方法在相同条件下所得结果基本一致,采用式(13)的方法1消耗总时间约为448 s,采用式(15)的方法2消耗总时间约为287 s,计算效率提升达35.9%。这一敏感度计算简化形式为后续纤维取向优化提供了更简单的实现方法,并可以扩展到各种有限单元。

3 纤维取向优化

3.1 取向优化模型及局部最优值

在拓扑过程中,BESO方法旨在删除敏感度低(即对整体结构刚度影响小)的单元,以实现结构轻量化的目标;对纤维取向进行优化可进一步提高复合材料制品的力学性能,进而实现整体性能的提升。此外,还需要关注纤维分布的连续性、可行性等方面。

因此,以单层预浸料优化模型为例,可将已有结构分布的取向优化描述为式(16)。

$$\begin{aligned}\text{find } & \theta_i (i = 1, 2, \dots, N) \\ \max \quad & \Pi = \sum_{i=1}^N f(\theta_i)\end{aligned}\quad (16)$$

式中: θ_i 为各个单元所代表的局部纤维角度; N 表示一层内的单元总数; $f(\theta_i)$ 为各单元敏感度; Π 表示一整层内所有单元的应变能总和。

此时将单元位移参数[即式(15)中参数 $A_1 \sim A_5$]作为已知,寻找一组单元角度使总体应变能之和达到最大值,即结构刚度的最大,因此只需要在保证局部纤维取向连续性的前提下最大化每一个单元的敏感度即可,取向优化问题也变得更简单、更易实施。

式(15)中 $f(\theta_i)$ 的各个子项是分布在 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 上的连续周期函数,这会导致局部最优问题。得益于敏感度计算成本的大幅下降,且现有自动铺放技术的角度精度为有限值,因此将角度取向范围进行

均匀离散,并计算各个离散值在当前位移下敏感度数值。

为求解单元最优角度,将敏感度数值结果从大到小排序,以最大值为基准,预先设置的误差系数 β 计算单元敏感度阈值 α_i^{th} ,如式(17)所示。

$$\alpha_i^{\text{th}} = (1 - \beta) \alpha_i^{\text{max}} \quad (17)$$

式中: α_i^{max} 为第 i 个单元的最大敏感度。

筛选出所有大于敏感度阈值 α_i^{th} 的结果及其对应角度,应用一维聚类算法对角度进行聚类。在所得簇中,以角度对应的敏感度数值大小为评价准则,选出簇中敏感度数值最大的角度作为单元的最终候选角度,聚类示意图如图7所示,其中绿色表示部分具有接近的敏感度数,但在角度数值方面存在较大差异,即上述局部最优问题。

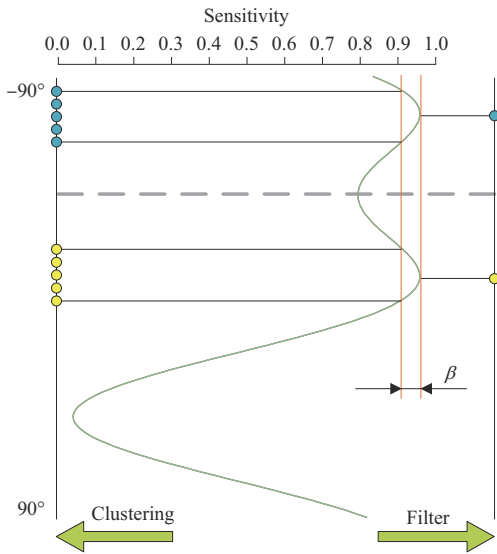


图7 一维聚类及过滤示意图

Fig. 7 Schematic diagram of one-dimensional clustering and filtering

通过误差系数 β 的设置可以筛选出敏感度接近的不同角度,通过应用简单的一维聚类获得两个簇,再将各角度的敏感度数值为评价函数,经过筛选即可得到单元候选角度。

对预设初始角度为 0° 的单层基准进行上述流程,得到各单元的取向分布如图8a所示,可以看到部分单元会对应多个候选角度。采用敏感度滤波相似原理对具有多个优选角度的单元进行处理,依据周围已确定角度单元的情况自动过滤筛选出与周围情况差异值小的最优角度,以保证取向分布的连续性,其结果如图8b所示。

3.2 二次聚类获取纤维铺放路径

单元最优角度的求解实现了构件性能的提升,

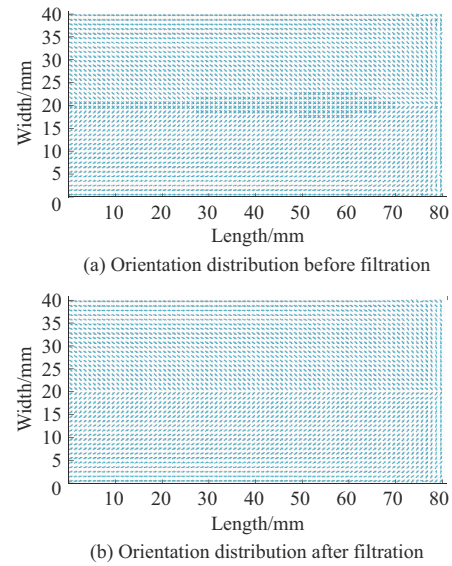


图8 过滤前后单元取向分布

Fig. 8 Element orientation distribution before and after filtration

但所获得的初始分布不适合规划合理的预浸丝束铺放轨迹。基于此,将各单元经初始聚类及过滤后的最优角度与单元中心在平面内的坐标组合,采用多维聚类算法对整层单元角度分布进行二次聚类。为避免单个簇内角度覆盖范围过大,将角度差值 θ^{diff} 作为设计变量,对簇内最大角度差进行限制。

在完成二次聚类后,对各簇内单元角度数值进行加权平均以改善纤维角度分布的局部一致性。对图2b所得拓扑结构进行取向优化,将初始纤维角度定义为 0° ,簇内最大角度差值 θ^{diff} 为 14° 。经二次聚类处理得到的单层角度取向优化结果如图9a所示,不同颜色代表不同的角度数值;以12.7 mm的预

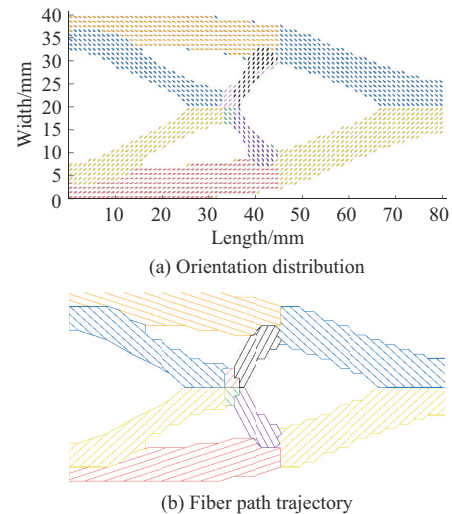


图9 单层结构二次聚类后取向分布及铺放轨迹

Fig. 9 Orientation distribution and placement trajectory after single layer second cluster

浸带宽为基准,对其进行铺放轨迹的规划,得到图9b。图9b所示铺放轨迹简单高效,各条轨迹宽度与实际铺放制造所用纤维预浸带规格相同,各条轨迹首尾两端裁剪角度可经双刀裁剪实现,对于低曲率平板类复合材料构件的铺放成型制造具有较大的可行性。

4 多层数值算例

4.1 整体优化流程

基于以上对多层结构BESO优化方法改进及通过多次聚类实现取向优化,提出多层复合材料构件优化流程如图10所示。整个优化方法采用ANSYS APDL 和 Python 联合仿真的方式实现,其中Python负责整个迭代流程的控制,包括ANSYS的调用、材料层数的设置、层数相关的敏感度惩罚、收敛条件判断以及一维及多维聚类算法的实现;其余部分由预先部分设置的APDL宏文件执行。最后获取各层取向分布后,即可规划铺放路径。

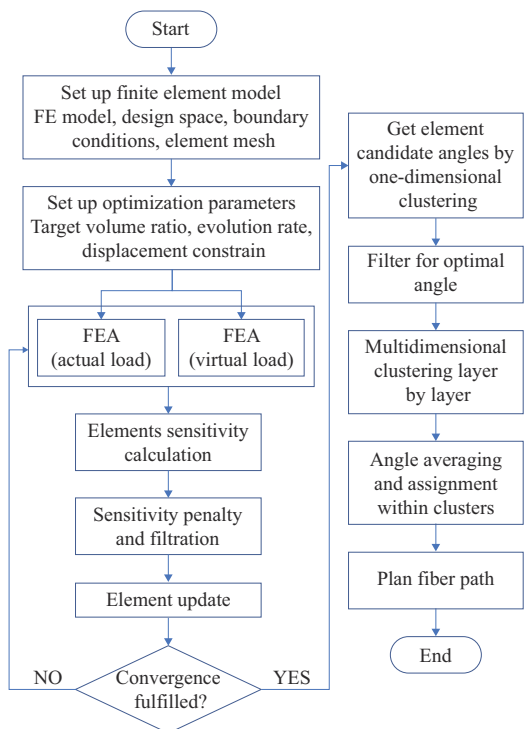


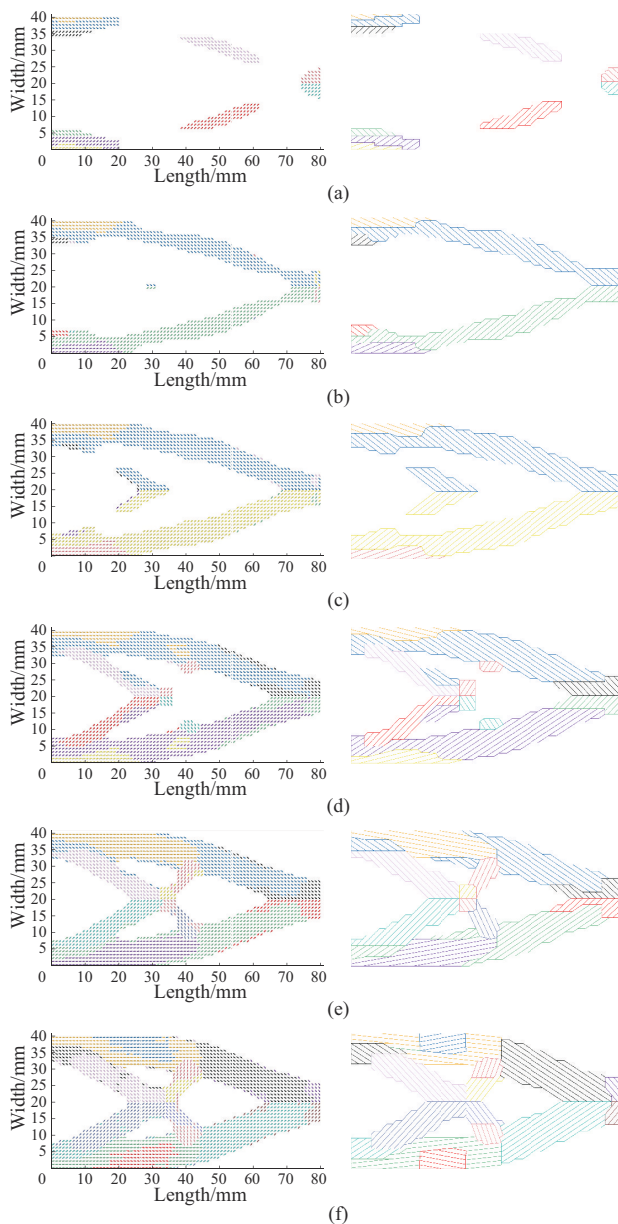
图10 优化流程图

Fig. 10 Optimization flow chart

4.2 多层结构最终优化结果

在图4所示的6层悬臂梁拓扑优化结果的基础上,分层对其进行取向优化。其中一维聚类中的误差系数 β 设为5%;二次聚类中选定邻域半径 ε 为13,最小邻域内包含的点的个数 $\min Pts$ 为25,簇内最大角度差值 $\theta^{\max}$ 为 14° ,预浸带宽度为12.7 mm,所

得取向优化后各层角度分布及纤维铺放路径如图11所示。



(a)~(f) from top to bottom layers

图11 各层纤维取向分布(左)及铺放轨迹(右)

Fig. 11 Distribution of fiber orientation (left) and placement trajectory (right) of each layer

图11中不同颜色表示不同纤维方向,铺放轨迹方向与纤维方向一致。为探究构件取向优化前后的性能提升情况,在保证结构分布、边界条件、载荷情况相同的情况下,分别采用全部单元角度为 0° 和采用图11中各层单元角度数据这两种情况进行有限元分析,得到的结构应变能密度云图如图12所示。

由图12可见,经取向优化之后,结构的应变能

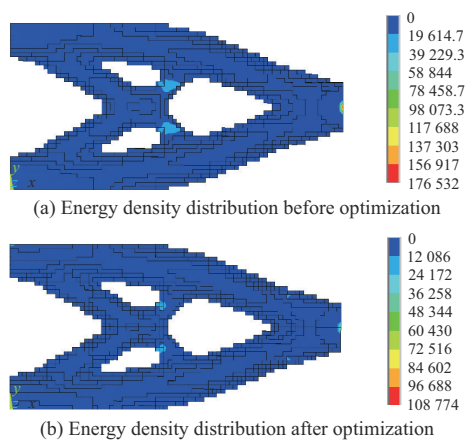


图12 取向优化前后结构应变能分布云图

Fig. 12 Cloud diagram of strain energy distribution before and after orientation optimization

密度最大值由 176 532 降为 108 774,且突变区域面积也有降低,整体性能得到提升。通过导出 ANSYS APDL 模块中关于两种情况单元应变能之和数据,可以得到未经取向优化结构的应变能之和为 $0.552\ 732\ \text{N}\cdot\text{m}$,而采用优化所得角度进行仿真的为 $0.470\ 994\ \text{N}\cdot\text{m}$,因为二者除单元材料外其余边界条件相同,这也意味着后者获得了 17% 的刚度提升,也进一步证明了取向优化的有效性。

4.3 铺放实验

将图 11 的铺放轨迹在雕刻软件中绘制出来,对轨迹的正确性及平行度进行检查。通过 NC Converter 软件转换为坐标相关的相关信息,再通过所编写脚本对该信息进行处理以获得可供铺放设备执行的 G 代码。同时设置铺放速度为 $20\ \text{mm/s}$,压辊压力 $20\ \text{N}$ 。图 13 为铺放过程。



图13 纤维铺放过程

Fig. 13 Fiber placement process

在铺放过程中,为减少额外操作步骤,提高铺放效率,优先铺放具有相同角度的丝束。此外,由于设备本身设计限制,预浸带存在剩余长度,在铺放完成后对边缘进行裁切处理。图 14 为铺放完成后的结果。由图 14 可见,同簇内的丝束具有较好的

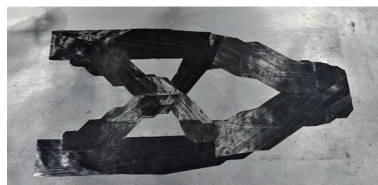


图14 纤维铺放结果

Fig. 14 Result of fiber placement

一致性,所制备成品与优化结果符合。

5 结论

复合材料构件拓扑优化及取向优化计算成本大,传统方法所处理的对象为平面问题,对多层结构的拓扑优化缺少研究且可能导致“底切”等数值问题;取向优化过程中易陷入局部最优问题,导致优化结果不稳定。为避免以上现象,笔者提出了一种用于多层纤维复合材料构件的快速拓扑及取向优化方法。

(1)该方法在多层结构拓扑过程中对不同层单元的敏感度进行基于层数的惩罚,利用 BESO 优化方法单元更新特性优先去除较上层单元,在将结构整体体积率进一步降低至 40% 的同时避免“底切”这一不可制造缺陷。

(2)推导出敏感度计算简化公式,通过参数化设计语言 APDL 将其集成到 ANSYS 计算过程中,使整体计算效率提升 35.9%。

(3)利用低计算成本优势离散计算单元敏感度数值,通过一维聚类算法及过滤求出单元最佳取向角度,简单有效地规避局部最优问题;整层单元进行二次多维聚类,对簇内单元角度加权平均后规划出合理铺放路径。在多层的基本测试中,实现取向后结构刚度提升 17%。

所提方法考虑了自动铺放技术加工特点,在低成本优化的同时规避拓扑及取向优化的潜在问题,实现了结构轻量化设计及构件力学性能的提升;所规划铺放路径简单可行,可扩展至任意形状的多层复合材料构件,具有较大应用价值。

参考文献

- [1] 张涵其,谭指,彭飞,等.耐高温树脂基复合材料研究进展及其在航空航天领域的应用[J].宇航材料工艺,2024,54(2):18-28.
ZHANG Hanqi, TAN Zhi, PENG Fei, et al. The research progress of high-temperature polymer composites and its application in the field of aerospace[J]. Aerospace Material & Technology, 2024, 54(2):18-28.
- [2] 杨刚,沈剑,周正扬,等.“Double-Double”铺层热塑性层合板及其在汽车结构中的应用潜力[J].复合材料学报,2024,41(9):4 919-

- 4 931.
- YANG Gang, SHEN Jian, ZHOU Zhengyang, et al. "Double-double" layup thermoplastic laminates and their application potential in automotive structures[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(9):4 919–4 931.
- [3] JANET W, ABDULMAJEED A, DAVID W R. Additive manufacturing of fiber-reinforced polymer composites: A technical review and status of design methodologies[J]. *Composites Part B*, 2023, 255. DOI:10.1016/j.compositesb.2023.110603.
- [4] 李恒, 严文凯, 陈逸豪, 等. 基于拓扑优化的四旋翼无人机机身轻量化设计[J]. *工程塑料应用*, 2023, 51(2):60–66.
- LI Heng, YAN Wenkai, CHEN Yihao, et al. Lightweight design of four-rotor UAV fuselage based on topology optimization[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(2):60–66.
- [5] WANG Q L, HAN H T, WANG C, et al. Topological control for 2D minimum compliance topology optimization using SIMP method [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2022, 65(1). DOI:10.1007/s00158-021-03124-6.
- [6] 罗静, 张大可, 李海军, 等. 基于一种动态删除率的ESO方法[J]. *计算力学学报*, 2015, 32(2):274–279.
- LUO Jing, ZHANG Dake, LI Haijun, et al. ESO method based on a kind of dynamic deletion rate[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2015, 32(2):274–279.
- [7] 匡兵, 李应弟, 刘夫云, 等. 基于单元密度进化步长控制的双向渐进结构优化方法[J]. *计算力学学报*, 2016, 33(1):15–21.
- KUANG Bing, LI Yingdi, LIU Fuyun, et al. Bidirectionalevolutionary structural optimization method based on control for evolutionary step length of element density[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, 33(1):15–21.
- [8] JIA H P, BEOM H G, WANG Y X, et al. Evolutionary level set method for structural topology optimization[J]. *Computers and Structures*, 2010, 89(5):445–454.
- [9] MAXIMILIAN E, PETER A A, ANNA M D, et al. Structural topology optimization and path planning for composites manufactured by fiber placement technologies[J]. *Composite Structures*, 2022, 289. DOI:10.1016/j.compstruct.2022.115488.
- [10] 占金青, 龙良明, 刘敏, 等. 基于最大应力约束的柔顺机构拓扑优化设计[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(23):32–38.
- ZHAN Jinqing, LONG Liangming, LIU Min, et al. Topological design of compliant mechanisms with maximum stress constraint [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(23): 32–38.
- [11] 孙楷, 薄瑞峰, 路建鹏, 等. 基于整体应变的柔顺机构多目标拓扑优化设计[J]. *工程设计学报*, 2015, 22(6):575–580.
- SUN Kai, BO Ruifeng, LU Jianpeng, et al. Multi-objective topology optimization of design compliant mechanisms based on the global strain[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2015, 22 (6):575–580.
- [12] MONTEMURRO M, CATAPANO A. A general B-Spline surfaces theoretical framework for optimization of variable angle-tow laminates[J]. *Composite Structures*, 2019, 209:561–578.
- [13] TONG L Y, LIN J Z. Structural topology optimization with implicit design variable-optimality and algorithm[J]. *Finite Elements in Analysis & Design*, 2011, 47(8):922–932.
- [14] 马志坤, 孙鹏文, 张兰挺, 等. 基于DMO的风力机叶片细观纤维铺角优化设计[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(4):440–445.
- MA Zhikun, SUN Pengwen, ZHANG Lanting, et al. Optimization design of micro ply angle for wind turbines blade based on DMO [J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2022, 43(4):440–445.
- [15] 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. DOI:10.1016/j.compstruct.2023.117572.
- [16] GEA H C, LUO J H. On the stress-based and strain-based methods for predicting optimal orientation of orthotropic materials [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2004, 26(3–4): 229–234.
- [17] 唐玉峰, 施胤成, 李文利, 等. 应用于反射镜支撑结构拓扑优化的共形正交基底[J]. *光学学报*, 2023, 43(13):232–242.
- TANG Yufeng, SHI Yincheng, LI Wenli, et al. Conformal orthogonal basis for topology optimization of mirror support structures[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(13):232–242.
- [18] 赵强威, 王冲, 王强龙, 等. 基于动态设计域的结构基频拓扑优化方法[J]. *机械设计与研究*, 2024, 40(4):1–6.
- ZHAO Qiangwei, WANG Chong, WANG Qianglong, et al. Topology optimization for structural fundamental frequency based on the dynamic design domain[J]. *Machin Design & Research*, 2024, 40(4):1–6.
- [19] LI Q, Steven G P, Xie Y M. A simple checkerboard suppression algorithm for evolutionary structural optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2001, 22(3):230–239.
- [20] 于海, 杨慧斌, 茅健, 等. 基于SIMP变密度法的结构拓扑优化及应用[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(10):91–99.
- YU Hai, YANG Huibin, MAO Jian, et al. Structural topology optimization based on SIMP variable density method and its application[J]. *Engineering Plastic Application*, 2024, 52(10):91–99.
- [21] LIN H, XU A, MISRA A, et al. An ANSYS APDL code for topology optimization of structures with multi-constraints using the BESO method with dynamic evolution rate (DER-BESO) [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 62(4):1–26.