

基于单元过滤的自支撑结构拓扑优化方法

王雷^{1,2}, 闫素娜³, 赵强强^{1,2}, 洪军^{1,2}

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 710049, 西安; 3. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 450047, 郑州)

摘要: 为了避免零部件在增材制造过程中使用支撑结构, 基于单元过滤提出一种面向增材制造的自支撑结构拓扑优化方法。采用四节点矩形单元离散设计域建立悬垂特征有限元模型。模拟增材制造逐层堆积材料的成型过程, 构建一种基于 Heaviside 函数的自支撑单元过滤法则, 采用此法则逐层保留自支撑单元并删除非自支撑单元。基于固体各向同性材料惩罚模型 (SIMP) 变密度法, 建立面向增材制造的自支撑结构拓扑优化模型, 并采用移动渐近线法 (MMA) 求解此模型。将自支撑结构拓扑优化方法应用到三点弯曲简支梁 (MBB) 拓扑优化中。数值案例结果表明: 与传统拓扑优化方法相比, 自支撑结构拓扑优化方法能够在 4 个打印方向上对 MBB 梁进行优化设计, 实现打印过程自支撑, 并节省打印材料最多达 20.6%, 缩短打印时间最多达 16.6%, 解决了传统拓扑优化结构在增材制造过程中需要使用支撑的问题。

关键词: 增材制造; 自支撑单元过滤; 结构拓扑优化; 变密度法; 自支撑结构

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202105006 **文章编号:** 0253-987X(2021)05-0045-11



OSID 码

A Topology Optimization Method for Self-supporting Structures
Based on Element Filtering

WANG Lei^{1,2}, YAN Suna³, ZHAO Qiangqiang^{1,2}, HONG Jun^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design and Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China)

Abstract: To avoid the use of support structures in the additive manufacturing process of components, this paper proposes an additive manufacturing oriented topology optimization method for self-supporting structures based on element filtering. By using 4-node rectangular element to discretize the design domain, a finite element model of overhang is established. A filtering rule of the self-supporting element based on Heaviside function is constructed by simulating the layer-by-layer forming process of additive manufacturing. The self-supporting elements are retained, and the non-self-supporting elements are deleted by this rule layer-by-layer. Based on the solid isotropic material with penalization (SIMP) model, the additive manufacturing oriented self-supporting structure topology optimization model is formulated, and the method of moving asymptotes is used to solve this optimization problem. The topology optimization method of self-supporting structures is applied to the topology optimization for the Messerschmidt-Bölkow-Blohm (MBB) beam. The results of case studies show that compared with the traditional topology optimization method, this method can achieve optimal design of self-

supporting structure for the MBB beams along four printing directions, and moreover, the material and printing time can be saved up to 20.6% and 16.6% at most, respectively. It can solve the problem that traditional topology optimization structures need supports in additive manufacturing process.

Keywords: additive manufacturing; self-supporting element filtering; topology optimization; density-based method; self-supporting structure

拓扑优化受到传统制造技术的限制,实际工程应用的拓扑优化结构仍然有一定的局限性,没有充分发挥拓扑优化的优势。近年来,增材制造技术得到了快速发展,与传统制造技术相比,它具有能够实现高效率、低成本、制造复杂结构的突出优势^[1],为拓扑优化结构的制备提供了强大的工具,极大地拓宽了结构设计的空间。因此,将拓扑优化与增材制造结合,研究面向增材制造的创新设计方法具有广阔前景^[2]。然而,增材制造技术存在一些工艺约束,制约着优化结构的制备,例如悬垂特征,打印时需要在其下方添加支撑防止坍塌,打印完成后再通过人工去除,不仅浪费打印材料和打印时间,而且去除支撑会对零件性能和表面质量造成损坏^[3]。

为了减少使用支撑,一些学者从工艺参数方向入手,利用优化算法寻找能够使支撑体积最小的最佳成型方向。其中,Das等提出了一种利用多目标优化方法,在满足零件GD&T标准的同时,寻找能够使支撑体积最小的成型方向^[4];Morgan等提出了一种利用优化算法寻找使支撑体积最小的成型方向的方法^[5];Strano等提出了一种两步优化设计结构的方法,第一步寻找结构最优打印方向,第二步基于此方向优化设计多孔支撑结构,使支撑体积最小^[6]。上述通过优化算法寻找最佳成型方向的方法只能使支撑体积达到最小,不能完全避免使用支撑。

另一些学者从结构设计方向入手,研究面向增材制造的自支撑结构设计方法。其中,Laery等提出了一种基于熔融沉积成型(FDM)工艺的自支撑条件,通过修改结构构型,使结构打印时无需支撑^[7];Li等提出了一种面向激光选区熔化(SLM)工艺的零件轻量化/无支撑优化设计方法,第一步获得拓扑优化结构,第二步使用自支撑结构元素修改结构构型^[8];桂馨提出了一种基于固体各向同性材料惩罚模型(SIMP)法和能量均匀化法的自支撑结构多尺度拓扑优化,在宏观结构优化阶段,利用SIMP法获取自由分布的宏观材料空间,从而划分微结构类型区域,在微结构设计阶段,进行自支撑微结构设计,最终获得自支撑结构^[9]。上述通过修改结构构

型来获得自支撑结构的方法会造成结构体积的增加,而且添加的材料会影响结构性能。

Garaigordobil等提出了一种使用轮廓检测算法提取结构边界,通过显示不等式约束条件控制边界法向量的倾斜角,从而获得自支撑结构的方法^[10];Qian提出了一种基于密度梯度信息确定结构边界,通过显示约束条件控制边界倾斜角的方法^[11];Zhang等提出了一种利用局部单元密度确定边界法向量的方法,通过控制法向量倾斜角来控制边界倾斜角和悬吊特征尺寸^[12]。上述通过边界法向量控制边界倾斜角的方法需要通过密度梯度信息提取结构边界法向量信息,增加了优化时间。Zhao等提出了一种通过卷积算子判断单元的支撑性,通过显示约束条件控制非自支撑单元数量,最终获得自支撑结构的方法^[13],此方法需要在传统拓扑优化的基础上确定成型方向,再进行自支撑结构优化设计;Kuo等提出了一种使用连续逻辑聚合函数评估单元支撑状态的方法,以显示约束形式加入到结构拓扑优化方法中,优化设计自支撑结构^[14];邹君等提出了一种使用显示约束函数表征结构自支撑约束违反程度,并控制此函数值的方法优化设计自支撑结构^[15]。上述通过显示约束条件控制非自支撑单元的数量会增加优化问题求解难度。

Gaynor等提出了一种通过映射单元设计变量的方法实现结构最小特征尺寸和最大悬垂角度的控制^[16],但其扇形支撑区域包含太多单元,计算复杂。Langelaar提出了一种过滤方法,模拟增材制造成型过程逐层过滤单元进行自支撑结构的优化设计,并将结构优化、支撑结构布局和成型方向3个目标结合,寻求最优结构设计和成型方向^[17-18];Pellens等提出了4种不同形式的过滤器,以不同顺序组合进行过滤,将特征尺寸和悬垂角度约束合并到结构拓扑优化问题中进行结构优化设计^[19];Wang等提出了一种基于分层过滤策略的SIMP改进方法和一种基于悬垂灵敏度分析的双向渐进结构拓扑优化(BESO)改进方法以减少优化设计中悬垂结构的产生^[20];杜义贤等通过建立每个单元的可打印密度与

相应支撑区域内单元的可打印密度之间的关系来过滤掉不符合约束条件的结构,优化设计自支撑结构^[21];Zou 等提出了一种基于 max/min 函数识别非自支撑单元,通过不等式约束控制非自支撑单元数量,得到自支撑结构的方法^[22]。上述过滤方法中采用近似 max/min 函数通过判断上下相邻单元的密度关系,确定单元的自支撑性,此判断条件不符合实际逐层堆积成型原理,会出现自下向上密度逐渐增加的现象。

Luo 等提出了一种自支撑封闭空腔结构拓扑优化方法,其采用非线性虚拟温度法(N-VTM)识别封闭空腔,通过多重过滤识别悬垂面,基于对数函数的约束控制封闭空腔的最小悬垂角^[23];Guo 等提出了一种基于移动可变形组件的自支撑结构设计方法,通过控制组件的倾斜角度保证组件自支撑,最终获得自支撑结构^[24];Emiel 等将设计域分层,以设计域内每个点材料到达时间为判断依据判断支撑性,优化设计自支撑结构^[25];王亚光等提出了一种基于参数化水平集法的悬垂约束处理方法^[26];韩永生等提出了一种基于 BESO 法的无需支撑(自支撑)拓扑优化方法^[27]。

本文模拟增材制造逐层堆积材料的成型过程,提出一种基于 Heaviside 函数的自支撑单元过滤法则,并基于此构建面向增材制造的自支撑结构拓扑优化方法,旨在解决传统拓扑优化结构在增材制造过程中需要使用支撑的问题。最终,通过数值案例验证本文所提方法的有效性,结果表明本文所提方法能够在 4 个方向上对二维结构进行优化设计,实现打印过程自支撑,并且在保证结构刚度的前提下,节省打印材料和打印时间。

1 自支撑单元过滤法则

1.1 增材制造悬垂特征

图 1 给出了增材制造悬垂特征模型示意图,悬垂特征模型主要包括倾斜角 α 小于自支撑临界角的

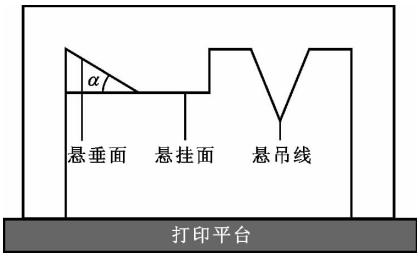


图 1 增材制造悬垂特征模型示意图

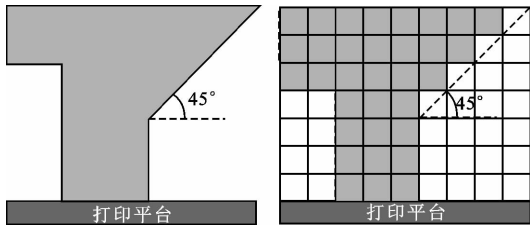
Fig. 1 Schematic diagram of overhang features in additive manufacturing

悬垂面、悬吊面和悬吊线。

为了避免使用支撑,对于悬吊面和悬吊线特征,设计阶段可以在其下方添加特征连接至打印平台;对于悬垂面特征,Thomas 研究了 SLM 工艺自支撑临界角为 45° ^[28],则可以在设计阶段使倾斜角 α 大于 45° ,从而无需添加支撑。

1.2 自支撑单元过滤法则

图 2 给出了悬垂面特征模型及其有限元模型,倾斜角为 45° ,采用长宽比为 1:1 的四节点矩形单元离散此模型,构建如图 2b 所示悬垂面特征有限元模型。



(a)悬垂面特征模型 (b)悬垂面特征有限元模型

图 2 悬垂面特征模型及其有限元模型

Fig. 2 Overhang model and its finite element model in additive manufacturing

取单个单元作为研究对象,图 3 给出了自支撑单元过滤法则示意图,成型方向为竖直向上,目标单元 x_{ij} 与其支撑单元集 3 个单元形成最小倾斜角为 45° 的倾斜面,其中 i 和 j 分别表示单元水平和垂直方向的位置。

目标单元是否自支撑与支撑单元集中 3 个单元密度有关,若支撑单元集中至少有一个单元密度大于 0,则目标单元为自支撑单元。基于上述条件可得自支撑单元判断法则为:若支撑单元集中单元平均密度大于 0,则目标单元为自支撑单元,反之目标单元为非自支撑单元。对于设计域全局单元,将逐

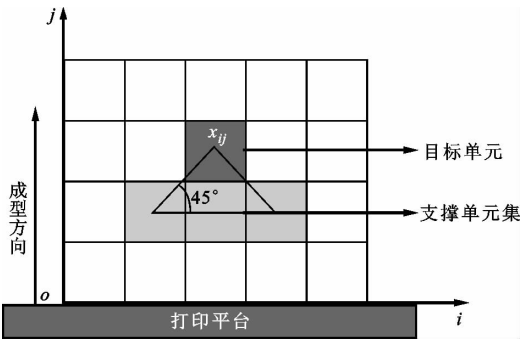


图 3 自支撑单元过滤法则示意图

Fig. 3 Schematic diagram of filtering rule of self-supporting element

层判断是否自支撑。

1.3 自支撑过滤特殊单元

设计域中存在一些特殊单元在优化算法中要特殊处理,包括边界单元和底层单元,自支撑过滤特殊单元如图4所示。

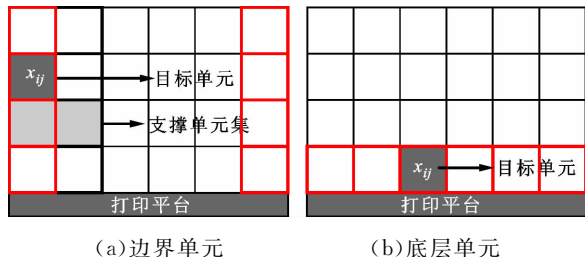


图4 自支撑过滤特殊单元

Fig. 4 Special element of self-supporting filtering

边界单元是指处于设计域两侧边界的单元,如图4a所示,它的特殊性在于支撑单元集中只包含2个单元。底层单元是指处于设计域底部的单元,如图4b所示,与成型方向有关,它的特殊性在于直接与打印平台连接,无论如何都是自支撑单元。

2 自支撑结构拓扑优化模型

2.1 自支撑单元过滤

采用自支撑单元过滤的方法判断单元是否自支撑,保留自支撑单元,删除非自支撑单元,自支撑单元过滤表达式如下

$$x_i^e = x^e H_T^e \quad (1)$$

式中: x^e 为单元 e 的设计变量; x_i^e 为单元 e 的自支撑密度; H_T^e 为单元 e 的自支撑判断因子,是Heaviside阈值函数,表达式如下

$$H_T^e = \frac{\tanh(\beta T) + \tanh(\beta(M^e - T))}{\tanh(\beta T) + \tanh(\beta(1 - T))} \quad (2)$$

其中 β 为近似参数, T 为阈值, M^e 为单元 e 支撑单元集中的单元平均自支撑密度,表达式如下

$$M^e = \frac{\sum_{i \in N_s^e} x_i^i}{Q^e} \quad (3)$$

其中 N_s^e 为单元 e 的支撑单元集, x_i^i 为单元 i 的自支撑密度, Q^e 为单元 e 的支撑单元集的单元数量。

图5给出了Heaviside阈值函数曲线,不同曲线 β 不同, β 决定函数的光滑近似程度, β 越大,函数越近似于0-1阶跃函数, β 一般随迭代步数逐渐增加到最大值。如图5所示,当阈值 T 为0.1、 β 为128时,若 M^e 大于0.1,则 H_T^e 趋于1;若 M^e 小于0.1,则 H_T^e 趋于0。

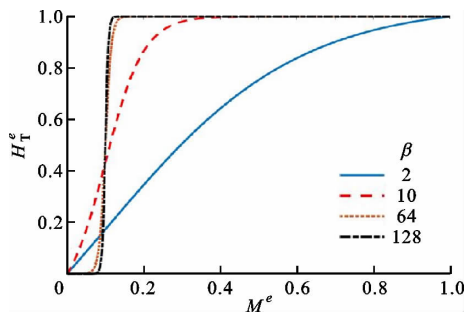


图5 Heaviside 阈值函数曲线

Fig. 5 Curve of Heaviside threshold function

2.2 单元密度过滤

棋盘格式解是指结构中出现实体单元与空白单元交替的现象,形成一种棋盘状的构型,棋盘格式解如图6所示,此结构在实际工程中无法应用。

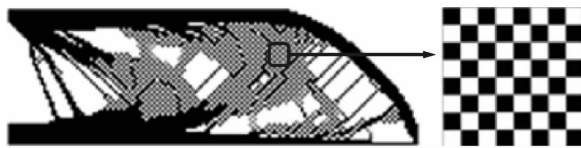


图6 棋盘格式解

Fig. 6 Checkerboard solution

为了消除棋盘格式解现象,本文采用单元密度过滤法,其核心思想是利用过滤后的单元密度替代单元实际密度^[29],单元物理密度表达式如下

$$x_p^e = \frac{1}{\sum_{i \in N^e} H_{ei}} \left(\sum_{i \in N^e} H_{ei} x_i^i \right) \quad (4)$$

式中: x_p^e 为单元 e 物理密度; H_{ei} 是权重系数; N^e 为过滤区域单元集,表达式如下

$$N^e = \{i \mid \|X^i - X^e\| \leq r_{\min}\} \quad (5)$$

其中 X^i 为单元 i 的坐标, X^e 为单元 e 的坐标, $r_{\min}$ 为过滤半径。

H_{ei} 表达式如下

$$H_{ei} = \max(0, r_{\min} - \Delta(e, i)) \quad (6)$$

式中: $\Delta(e, i)$ 为单元 i 和 e 中心距。密度过滤区域如图7所示,是以目标单元 e 为圆心、过滤半径 $r_{\min}$ 为半径形成的圆形区域。

2.3 自支撑结构拓扑优化模型

基于SIMP变密度法,以最小化柔度(最大化刚度)为目标函数,以结构体积分数为约束条件,构建自支撑结构拓扑优化模型,数学模型如下

$$\begin{aligned} & \min c(x) \\ & \text{s. t.} \begin{cases} v = \frac{V(x)}{fV_0} - 1 \leq 0 \\ 0 \leq x \leq 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

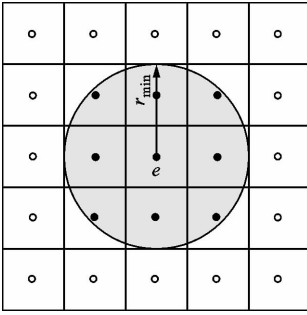


图 7 密度过滤区域
Fig. 7 Density filtering area

式中: $c(x)$ 为结构柔度; v 为约束条件; x 为单元设计变量; $V(x)$ 为结构体积; V_0 为设计域总体积; f 为结构体积分数。

3 基于 MMA 的拓扑优化模型求解

本文所提的自支撑结构拓扑优化模型采用 MMA 法求解^[30],更新单元设计变量 x 。

3.1 有限元分析

采用长宽比为 1:1 的四节点矩形单元离散设计域,初始单元刚度矩阵为 k_0 ,基于 SIMP 模型计算单元 e 的单元刚度矩阵 k_e ,表达式如下

$$k_e = E_e(x_p^e)k_0 \quad (8)$$

式中 $E_e(x_p^e)$ 为单元 e 的弹性模量。

SIMP 模型单元密度与弹性模量之间的关系可表示为

$$E_e(x_p^e) = E_{\min} + (x_p^e)^P (E_0 - E_{\min}), \quad x_p^e \in [0, 1] \quad (9)$$

式中: E_0 为实体单元的弹性模量; $E_{\min}$ 为空白单元的弹性模量; P 为惩罚因子; x_p^e 为单元 e 的物理密度。

惩罚因子 P 是为了惩罚灰色单元密度,使其趋向 0 或 1^[31]。图 8 给出了 SIMP 模型指数函数曲线,不同曲线代表不同 P 值, P 值越大函数值越趋近于 0 或 1。

通过组装单元刚度矩阵求得整体刚度矩阵 K ,

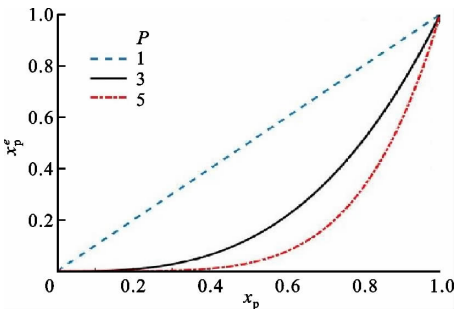


图 8 SIMP 模型指数函数曲线

Fig. 8 Exponential function curve of SIMP model

建立刚度方程求解整体位移矩阵 U ,刚度方程表达式如下

$$KU = F \quad (10)$$

式中: K 为整体刚度矩阵; U 为整体位移矩阵; F 为已知载荷矩阵。

最终,通过 U 和 K 计算目标函数,结构柔度表达式如下

$$c = U^T KU = \sum_{e=1}^n u_e^T k_e u_e \quad (11)$$

式中: n 为离散化设计域单元的数量; u_e 为单元位移矩阵。

3.2 灵敏度分析

MMA 求解需要分析目标函数和约束条件对设计变量的灵敏度,灵敏度信息决定设计变量的更新。其中,目标函数对设计变量的灵敏度表达式如下

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial x_p} \frac{\partial x_p}{\partial x_f} \frac{\partial x_f}{\partial x} \quad (12)$$

式中: c 为目标函数。

约束条件对设计变量的灵敏度表达式如下

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x_p} \frac{\partial x_p}{\partial x_f} \frac{\partial x_f}{\partial x} \quad (13)$$

式中: x_f 为单元自支撑密度。

3.3 自支撑结构拓扑优化流程

本文首先采用自支撑单元过滤,从更新的单元中过滤得到自支撑单元,保证设计域内只留下自支撑单元,再采用密度过滤消除棋盘格式现象,并且可以通过密度过滤避免结构中出现细小特征。然而,对于相反的过滤顺序,通过试验可知同样可以得到最优的自支撑结构,但是优化结构中会出现细小特征,优化结构中的细小特征如图 9 所示。

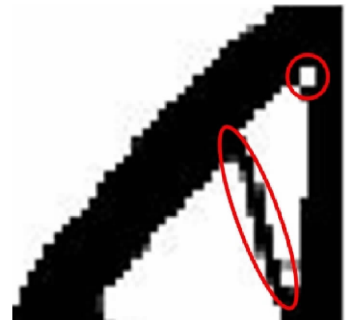


图 9 优化结构中的细小特征

Fig. 9 Small features in optimal structures

图 10 给出了自支撑结构拓扑优化流程图,具体步骤如下:

(1)前处理,定义结构几何模型,添加边界条件,施加载荷,设置优化参数;

- (2)采用四节点矩形单元离散设计域;
- (3)初始化单元设计变量 x ;
- (4)自支撑单元过滤,单元密度由单元设计变量 x 转换到单元自支撑密度 x_f ;
- (5)密度过滤,单元密度由单元自支撑密度 x_f 转换到单元物理密度 x_p ;
- (6)有限元分析,基于单元物理密度 x_p 和初始单元刚度矩阵 k_0 计算整体刚度矩阵 K ,求解整体位移矩阵 U ,计算目标函数和约束条件;
- (7)灵敏度分析;
- (8)采用 MMA 法求解优化模型,更新单元设计变量 x ;
- (9)根据收敛条件判断结果,如果不收敛则从步骤 4 继续循环,直至收敛;如果收敛则输出优化结果,并结束计算。

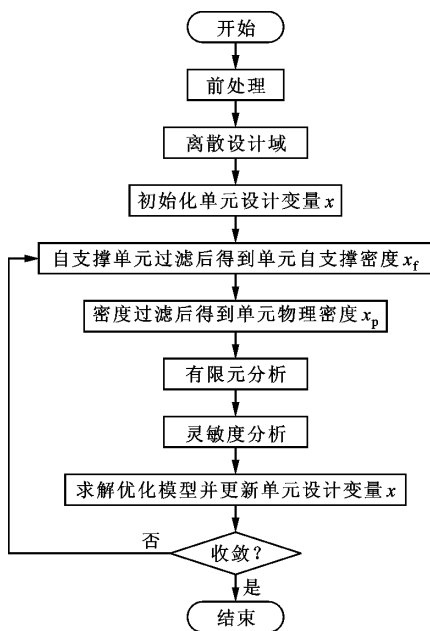


图 10 自支撑结构拓扑优化流程图

Fig. 10 Flow chart of self-supporting structures topology optimization

4 自支撑结构拓扑优化

应用本文所提的自支撑结构拓扑优化方法解决 MBB 梁拓扑优化问题。图 11 给出了 MBB 梁对称设计域,长宽比为 3:1,设计域左侧添加滚动支撑,右下角添加滚动支撑,左上角施加沿 $-Y$ 方向的单位集中载荷 F 。将设计域离散为 180×60 个单元,并初始化单元设计变量 x 为 0.5。

4.1 优化参数确定

在本文所提出的自支撑结构拓扑优化方法中,

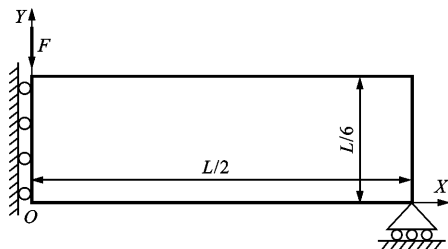


图 11 MBB 梁对称设计域

Fig. 11 Symmetric design domain of MBB beam

惩罚因子 P 决定着对灰色单元密度的惩罚程度, P 值越大,单元密度越趋近 0 或 1,但是会导致函数非线性程度增加;阈值 T 决定单元自支撑条件, T 值越大,要求支撑集单元密度越大,单元自支撑条件越严苛。因此为了确定一组合适的 P 值和 T 值,本文以 Y 方向的 MBB 梁优化设计为例,选择不同的参数 P 和 T 进行优化结果对比,最终根据优化结构的迭代步数和性能确定优化参数。

不同参数 P 和 T 优化结果对比如表 1 所示,可知惩罚因子 P 和阈值 T 对自支撑结构优化有重要的影响。 T 对结构优化的影响从 T 为 0.1~0.4 可知,迭代步数增大,结构柔度增大,特别在 T 为 0.4 时出现优化失败的结果,所以 T 越大,会导致结构性性能下降,迭代收敛难度增加,甚至出现优化失败; P 对结构优化的影响从 P 为 2~5 可知,结构中灰色单元明显减少,结构边界逐渐清晰,但是迭代步数增大,所以 P 越大,结果中灰色单元越少,但是会导致迭代收敛难度增加。

综合分析,本文旨在保证结构中不存在大量灰色单元的前提下,使迭代步数减小,结构性性能增加,得到最优的自支撑结构。从表 1 可知,在参数 P 为 3、 T 为 0.1 的组合下,得到的结构柔度最小,迭代步数最小,并且没有大量灰色单元存在。所以本文选择 P 为 3、 T 为 0.1 作为算例的优化参数组合,最终 MBB 梁拓扑优化参数取值如表 2 所示。

本数值案例由 Matlab R2020b(64 位)、Windows 10、Intel(R)Core(TM)i5-8400cpu@2.8GHz CPU、8GB RAM 实现。

4.2 MBB 梁拓扑优化设计

分别应用传统拓扑优化方法和本文所提的面向增材制造的自支撑结构拓扑优化方法优化设计 MBB 梁。图 12 给出了传统拓扑优化 MBB 梁,迭代步数为 565,柔度为 194.8。

利用 Autodesk Inventor Professional 2020 提取优化结果数据,建立 MBB 梁三维模型,厚度设置

表 1 不同参数 P 和 T 优化结果对比

Table 1 Comparison of optimization results with different parameters P and T

参数	优化结果			
	$P=2$	$P=3$	$P=4$	$P=5$
$T=0.1$	 步数=142 $C=236.349\ 9$	 步数=616 $C=364.483\ 7$	 步数=1 301 $C=271.580\ 1$	 步数=1 231 $C=257.801\ 4$
$T=0.2$	 步数=391 $C=231.290\ 6$	 步数=2 732 $C=264.483\ 7$	 步数=1 301 $C=271.580\ 1$	 步数=2 126 $C=16\ 207.336$
$T=0.3$	 步数=1 824 $C=275.141\ 1$	 步数=1 881 $C=261.844\ 6$	 步数=2 089 $C=16\ 217.88$	 步数=918 $C=251.730$
$T=0.4$	$\vdots$	 步数=3 428 $C=422.961\ 7$	$\vdots$	 步数=590 $C=2\ 509.435\ 6$

表 2 MBB 梁拓扑优化参数

Table 2 Parameters of MBB beam topology optimization

参数	数值
惩罚因子 P	3
阈值 T	0.1
E_0	1
$E_{\min}$	1×10^{-9}
泊松比	0.3
过滤半径 $r_{\min}$	1.5
结构体积约束 f	0.5
ρ	初始值为 2,每隔 50 步加 10 至 128
收敛条件	相邻两次迭代设计变量 x 最大变化量小于 0.01



图 12 传统拓扑优化 MBB 梁

Fig. 12 MBB beams with traditional topology optimization

为 5 mm。利用 Autodesk 公司开发的 3D 打印辅助分析软件 Autodesk Netfabb Ultimate 2020 沿 Y 、 $-Y$ 、 X 、 $-X$ 4 个方向进行成型仿真分析,成型仿真

分析参数如表 3 所示。

表 3 成型仿真分析参数

Table 3 Parameters of molding simulation analysis

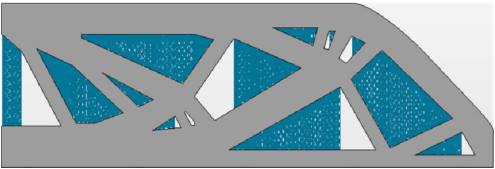
参数	数值
成型设备	SLM 250 HL
材料	316L 不锈钢
临界角/($^{\circ}$)	45
层厚/ μm	50
成型速率/($\text{mm}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	12 150
铺粉时间/s	2
支撑类型	SLM 结构化体积支撑

图 13 给出了传统拓扑优化 MBB 梁分析结果,蓝色部分为支撑。表 4 给出了传统拓扑优化 MBB 梁成型数据统计。

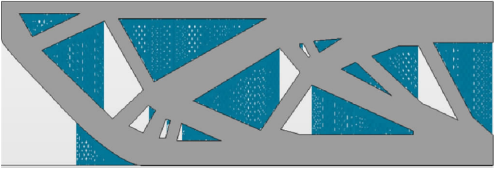
表 4 传统拓扑优化 MBB 梁成型数据统计

Table 4 Forming statistics of MBB beam with traditional topology optimization

成型方向	Y	$-Y$	X	$-X$
结构体积/ cm^3	32.10	32.10	32.10	32.10
支撑体积/ cm^3	2.15	2.24	1.23	1.38
成型高度/mm	60	60	180	180
成型时间/s	12 549	12 577	17 078	17 122



(a)Y 方向分析结果



(b)-Y 方向分析结果



(c)X 方向分析结果



(d)-X 方向分析结果

图 13 传统拓扑优化 MBB 梁分析结果
Fig. 13 Analysis results of MBB beam with traditional topology optimization

图 14~17 给出了 Y、-Y、X、-X 4 个方向优化自支撑 MBB 梁及分析结果。图 14a 给出了最终的优化结果,迭代步数为 616,柔度为 233. 6;图 14b~17b 给出了分析结果,无需支撑结构。



(a)Y 方向优化结果



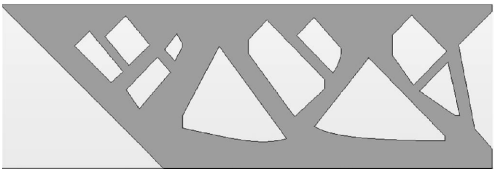
(b)Y 方向分析结果

图 14 Y 方向优化自支撑 MBB 梁及分析结果
Fig. 14 Optimized self-supporting MBB beam in Y direction and analysis results

图 15a 给出了最终的优化结果,此结果出现振荡。



(a)-Y 方向优化结果



(b)-Y 方向分析结果

图 15 -Y 方向优化自支撑 MBB 梁及分析结果
Fig. 15 Optimized self-supporting MBB beam in -Y direction and analysis results

图 16a 给出了最终的优化结果,迭代步数为 1 297,柔度为 194. 4。



(a)X 方向优化结果

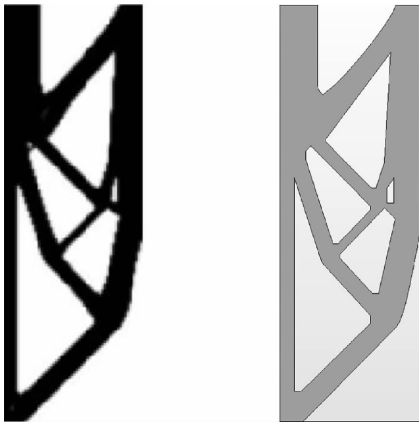


(b)X 方向分析结果

图 16 X 方向优化自支撑 MBB 梁及分析结果
Fig. 16 Optimized self-supporting MBB beam in X direction and analysis results

图 17a 给出了最终的优化结果,迭代步数为 1 487,柔度为 194. 5。表 5 给出了自支撑 MBB 梁成型数据统计。

表 5 自支撑 MBB 梁成型数据统计				
Table 5 Forming statistics of self-supporting MBB beam				
成型方向	Y	-Y	X	-X
结构体积/cm ³	27. 21	28. 17	27. 30	26. 81
支撑体积/cm ³	0	0	0	0
成型高度/mm	60	60	180	180
成型时间/s	10 466	10 751	15 288	15 145



(a) -X 方向优化结果 (b) -X 方向分析结果
图 17 -X 方向优化自支撑 MBB 梁及分析结果
Fig. 17 Optimized self-supporting MBB beam in -X direction and analysis results

4.3 对比分析

Langelaar 模拟增材制造逐层堆积的成型过程,采用过滤方法优化设计自支撑结构的方法^[18]受到了广泛的认可,将本文所提方法与 Langelaar 方法和传统拓扑优化方法进行对比分析,总结本文所提方法的优点和不足。

Langelaar 方法在文章中从北、东、南、西 4 个方向优化设计同样的 MBB 梁,将设计域离散为 180×60 个单元。表 6 汇总了应用 3 种方法的优化结果, c_{MBB} 为 MBB 梁柔度, c_{ref} 为传统 MBB 梁柔度。对比可得基于本文所提方法得到的优化结构:

(1)在结构柔度方面,与传统拓扑优化方法相比,Y 方向增大了 19.9%,X 方向减小了 0.2%, -X 方向减小了 0.2%,与 Langelaar 优化方法相比,Y 方向增大了 13.1%,X 方向减小了 0.2%, -X

方向减小了 1.1%;
(2)在所需材料方面,与传统拓扑优化方法相比,Y 方向体积减小了 20.6%, -Y 方向体积减小了 18.0%,X 方向体积减小了 18.1%, -X 方向体积减小了 20.0%;
(3)在打印时间方面,与传统拓扑优化方法相比,Y 方向减小了 16.6%, -Y 方向减小了 14.5%, X 方向减小了 10.5%, -X 方向减小了 11.5%;
(4)在迭代步数方面,与传统拓扑优化方法相比,Y 方向增大了 9%,X 方向增大了 129.6%, -X 方向增大了 163.2%。

通过对比分析,可知本文所提方法能够沿 4 个方向对 MBB 梁进行优化设计,其中在 X 和 -X 两个方向上的结构柔度均优于传统拓扑优化方法和 Langelaar 提出的拓扑优化方法,虽然在某些方向上优化效率有所损失,但是能够在保证结构刚度的前提下,无需使用支撑,减少打印材料和打印时间的浪费。

本文针对 45°临界角,基于 SIMP 变密度法,构建了面向增材制造的平面自支撑结构拓扑优化方法。基于本文所提方法未来可向:①采用可变长宽比四节点矩形单元构建临界角可变的自支撑单元过滤方法,研究适应于临界角可变的自支撑结构拓扑优化方法;②采用三维自支撑单元过滤方法判断单元自支撑性,此时目标单元为 1 个,支撑单元为 5 个,将本文所提方法拓展至三维自支撑结构优化设计;③采用基于 Heaviside 函数的自支撑单元过滤方法,基于变密度法多材料插值模型或非均质材料插值模型,构建面向增材制造的多材料或非均质材料自支撑结构拓扑优化方法。

表 6 MBB 梁优化结果对比

Table 6 Comparison of optimization results of MBB beam

参数	优化方法	优化结果			
		Y 方向	-Y 方向	X 方向	-X 方向
c_{MBB}	传统拓扑优化方法	194.8	194.8	194.8	194.8
	本文所提方法	233.6	振荡	194.4	194.5
	Langelaar 方法	206.5	216.2	194.8	196.7
总体积/cm ³	传统拓扑优化方法	34.25	34.34	33.33	33.48
	本文所提方法	27.21	28.17	27.30	26.81
打印时间/s	传统拓扑优化方法	12 549	12 577	17 078	17 122
	本文所提方法	10 466	10 751	15 288	15 145
迭代步数/次	传统拓扑优化方法	565	565	565	565
	本文所提方法	616	振荡	1 297	1 487

5 结 论

本文模拟增材制造逐层堆积材料的成型过程,提出了一种基于 Heaviside 函数的自支撑单元过滤法则。基于 SIMP 变密度法构建了面向增材制造的自支撑结构拓扑优化方法,并将本文所提方法应用到 MBB 梁拓扑优化中。通过数值案例可得出如下结论:

(1)本文所提出的一种基于 Heaviside 函数的自支撑过滤法则能够有效判断单元自支撑性,并逐层保留自支撑单元,删除非自支撑单元;

(2)本文所提的面向增材制造的自支撑结构拓扑优化方法能够有效解决传统拓扑优化结构在增材制造过程中使用支撑的问题,并且在不损失结构刚度的前提下,节省打印材料和打印时间;

(3)本文所提的面向增材制造的自支撑结构拓扑优化方法能够在4个方向上对平面结构进行优化设计,并且可得成型方向对结构构型、刚度和优化效率有很大的影响,可依据结构使用要求选择最优设计方案。

参考文献:

- [1] 卢秉恒,李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.
LU Bingheng, LI Dichen. Additive manufacturing (3D printing) technology development [J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2013, 42(4): 1-4.
- [2] 刘书田,李取浩,陈文炯,等. 拓扑优化与增材制造结合:一种设计与制造一体化方法[J]. 航空制造技术, 2017, 60(10): 26-31.
LIU Shutian, LI Quhao, CHEN Wenjiong, et al. The combination of topology optimization and additive manufacturing: an integrated method of design and manufacturing [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2017, 60(10): 26-31.
- [3] 朱继宏,周涵,王创,等. 面向增材制造的拓扑优化技术发展现状与未来[J]. 航空制造技术, 2020, 63(10): 24-38.
ZHU Jihong, ZHOU Han, WANG Chuang, et al. Development status and future of topology optimization technology for additive manufacturing [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2020, 63(10): 24-38.
- [4] DAS P, CHANDRAN R, SAMANT R, et al. Optimum part build orientation in additive manufacturing for minimizing part errors and support structures [J]. Procedia Manufacturing, 2015, 1: 343-354.
- [5] MORGAN H D, CHERRY J A, JONNALAGADDA S, et al. Part orientation optimization for the additive layer manufacture of metal components [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86(5/6/7/8): 1679-1687.
- [6] STRANO G, HAO L, EVERSON R M, et al. A new approach to the design and optimization of support structures in additive manufacturing [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(9/10/11/12): 1247-1254.
- [7] LEARY M, MERLI L, TORTI F, et al. Optimal topology for additive manufacture: a method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures [J]. Materials and Design, 2014, 63: 678-690.
- [8] LI Z, ZHANG D Z, DONG P, et al. A lightweight and support-free design method for selective laser melting [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 90(9/10/11/12): 2943-2953.
- [9] 桂馨. 考虑悬挑角度和最小尺寸约束的自支撑结构拓扑优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018: 41-55.
- [10] GARAIGORDOBIL A, ANSOLA R, SANTAMARIA J, et al. A new overhang constraint for topology optimization of self-supporting structures in additive manufacturing [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58(5): 2003-2017.
- [11] QIAN Xiaoping. Undercut and overhang angle control in topology optimization: a density gradient based integral approach [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2017, 111(3): 247-272.
- [12] ZHANG K, CHENG G, XU L. Topology optimization considering overhang constraint in additive manufacturing [J]. Computers and Structures, 2019, 212: 86-100.
- [13] ZHAO D, LI M, LIU Y. A novel application framework for self-supporting topology optimization [J/OL]. The Visual Computer [2021-01-04]. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00371-020-01860-2#citeas>.
- [14] KUO Y H, CHENG C C. Self-supporting structure design for additive manufacturing by using a logistic aggregate function [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 60(3): 1109-1121.
- [15] 邹君,姚卫星,张悦超,等. 基于渐进演化策略的增材制造自支撑结构拓扑优化算法[J/OL]. 计算力学学报[2021-01-04]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=JSJG2020121800X&DbName=CAPJ2020>.

- ZOU Jun, YAO Weixing, ZHANG Yuechao, et al. Topology optimization algorithm of additive manufacturing self-supporting structure based on progressive evolution strategy [J/OL]. Chinese Journal of Computational Mechanics [2021-02-04]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=JSJG2020121800X&DbName=CAPJ2020>.
- [16] GAYNOR A T, GUEST J K. Topology optimization considering overhang constraints: eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016, 54(5): 1157-1172.
- [17] LANGEAAR M. An additive manufacturing filter for topology optimization of print-ready designs [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016, 55(3): 871-883.
- [18] LANGEAAR M. Combined optimization of part topology, support structure layout and build orientation for additive manufacturing [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 57(5): 1985-2004.
- [19] PELLENS J, LOMBAERT G, LAZAROY B S, et al. Combined length scale and overhang angle control in minimum compliance topology optimization for additive manufacturing [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 59(6): 2005-2022.
- [20] WANG X, ZHANG C, LIU T. A topology optimization algorithm based on the overhang sensitivity analysis for additive manufacturing [J]. Proceedings of the IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2018, 382(3): 032036.
- [21] 杜义贤, 徐明, 周鹏, 等. 适应增材制造构件倾角约束的拓扑优化方法 [J]. 机械设计与制造, 2020(11): 191-194.
- DU Yixian, XU Ming, ZHOU Peng, et al. Topology optimization method to adapt to the inclination angle constraints of additive manufacturing components [J]. Machinery Design and Manufacturing, 2020(11): 191-194.
- [22] ZOU Jun, ZHANG Yuechao, FENG Zhenyu. Topology optimization for additive manufacturing with self-supporting constraint [J/OL]. Structural and Multidisciplinary Optimization [2021-01-04]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00158-020-02815-w>.
- [23] LUO Y, SIGMUND O, LI Q, et al. Additive manufacturing oriented topology optimization of structures with self-supported enclosed voids [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2020, 372: 113385.
- [24] GUO Xu, ZHOU Jianhua, ZHANG Weisheng, et al. Self-supporting structure design in additive manufacturing through explicit topology optimization [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2017, 323: 27-63.
- [25] EMIEL V D V, MAAS R, AVAS C, et al. Continuous front propagation-based overhang control for topology optimization with additive manufacturing [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 57(5): 2075-2091.
- [26] 王亚光, 高进城, 亢战. 考虑增材制造中悬空角约束的水平集拓扑优化设计 [C]//2018年全国固体力学学术会议摘要集: 上. 北京: 中国力学学会, 2018: 581.
- [27] 韩永生, 徐斌, 赵磊. 面向增材制造考虑自支撑约束的连续体结构拓扑优化方法研究 [C]//2018年全国固体力学学术会议摘要集: 下. 北京: 中国力学学会, 2018: 328.
- [28] THOMAS D. The development of design rules for selective laser melting [D]. Wales, UK: University of Wales, 2009: 87-88.
- [29] ANDREASSEN E, CLAUSEN A, SCHEVENELS M, et al. Efficient topology optimization in MATLAB using 88 lines of code [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2011, 43(1): 1-16.
- [30] SVANBERG K. The method of moving asymptotes: a new method for structural optimization [J]. International Journal for Numerical Method Engineering, 1987, 24(2): 359-373.
- [31] SIGMUND O. A 99 line topology optimization code written in Matlab [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 21(2): 120-127.

(编辑 武红江)