

DOI: 10.7511/jslx20230613002

# 基于改进双向渐进结构优化法的钢节点 拓扑优化研究

汤朋山<sup>1</sup>, 杜文风<sup>\*1</sup>, 李少龙<sup>1</sup>, 顾金超<sup>1</sup>, 高博青<sup>2</sup>

(1. 河南大学 钢与空间结构研究所, 开封 475004; 2. 浙江大学 空间结构研究中心, 杭州 310027)

**摘要:**为提升双向渐进结构优化法(BESO)优化钢结构节点时的计算效率,充分解决优化过程中存在的棋盘格和网格依赖现象,提出了一种改进双向渐进结构优化法 SJ-BESO。该方法引入灵敏度滤波半径,对过滤半径范围内各个单元的灵敏度值进行加权处理,并通过设置灵敏度阈值段确定元素的保留、删除或添加,同时引入收敛参数确保结构计算趋优的稳定性。通过钢牛腿节点算例将 SJ-BESO 与 BESO 进行对比分析,发现 SJ-BESO 有效提升了计算迭代效率并克服了棋盘格和网格依赖现象。再通过分叉节点算例将 SJ-BESO 与变密度法(SIMP)比较,表明 SJ-BESO 的优化方案材料利用效率更高。SJ-BESO 适用于钢节点的拓扑优化,具有良好的计算效率和优化效果。

**关键词:**双向渐进结构优化法;钢节点;灵敏度滤波;有限元分析;增材制造

**中图分类号:** O242.21

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-4708(2024)06-0991-07

## 1 引言

近几十年来,拓扑优化技术取得了显著的发展<sup>[1,2]</sup>,在建筑结构<sup>[3,4]</sup>、航空航天等<sup>[5,6]</sup>若干工程领域得到广泛应用。拓扑优化通过在指定设计域内进行材料的合理布置,可以使结构在约束体积分数内达到刚度最大化,常用拓扑优化方法有变密度法(variable density method)、水平集法(level-set method)、渐进结构优化方法 ESO(evolutionary structure optimization)及双向渐进结构优化方法 BESO(Bi-directional Evolutionary Structural Optimization)等,其中 BESO 表现出高效和稳健的性能,生成的结构颇具创意和高效,代表性工程有卡塔尔国家会议中心和上海喜马拉雅中心。

BESO 理论最早由谢亿民等<sup>[7,8]</sup>研究并提出,其在渐进结构优化法 ESO(Evolutionary Structural Optimization)去除低应力材料的基础上,增加了可同时添加材料的功能,计算效率得到了显著提升。随后,学者们针对 BESO 进行了深入研究,Huang 等<sup>[9]</sup>在刚度优化问题中将 ESO 和 BESO

进行比较分析,指出 BESO 方法在计算效率、鲁棒性以及最终生成结构的可制造性等方面具有明显优势<sup>[10]</sup>。Yang 等<sup>[11]</sup>通过模型算例分析指出 BESO 比 ESO 生成的结构优化程度更高,同时也指出 BESO 计算多网格划分时存在迭代效率低的不足。

针对迭代效率低等问题,Yang 等<sup>[12]</sup>将灵敏度再分配法以及手动控制方法同时使用,提升了设计效率,并避免了棋盘模式。Eom 等<sup>[13]</sup>利用 BESO、滤波器以及标准响应面法(SRSM)生成近似极限状态函数,并选取悬臂梁和 MBB 梁进行数值分析,生成的极限状态函数具有更高的迭代速率。Huang 等<sup>[14]</sup>利用替代材料插值方案,基于灵敏度计算,开发了一种新的 BESO 方法,提升迭代速率。Li 等<sup>[15]</sup>建立了新的多目标优化模型,通过将伴随灵敏度方法应用于运动学函数和结构函数来执行灵敏度分析,提升迭代效率,并通过算例验证了该方法的有效性。Xia 等<sup>[16]</sup>通过添加灵敏度阈值法,来去除低效材料,并通过算例验证该方法的有效性。

BESO 理论经过多年的持续研究已建立较为

收稿日期:2023-06-31;修改稿收到日期:2023-08-18.

基金项目:国家自然科学基金(52478166);河南省自然科学基金重点项目(232300421133)资助。

作者简介:杜文风\*(1981-),男,博士,教授(E-mail:dwf@henu.edu.cn).

引用本文:汤朋山,杜文风,李少龙,等.基于改进双向渐进结构优化法的钢节点拓扑优化研究[J].计算力学学报,2024,41(6):991-997.  
TANG Peng-shan, DU Wen-feng, LI Shao-long, et al. Research on topology optimization of steel joints based on improved bi-directional progressive structural optimization method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(6): 991-997.

完善的框架,为将其更加有效地应用于具体实际工程中,一些学者基于 BESO 理论针对不同工程具体特征提出了改进方案。He 等<sup>[17]</sup>提出了一种新的基于固定网格的双向进化结构优化方法 FG-BESO,应用于隧道加固拓扑优化设计,减少了不同地质荷载条件下的底板和侧壁起伏。Liu 等<sup>[18]</sup>提出一种结合极限均衡理论的 LEM-BESO,应用于倾角岩屑岩坡的优化设计,预测了边坡的破坏面并对其进行了加固设计。才琪等<sup>[19]</sup>将 BESO 与能量原理以及满应力设计准则相结合,提出了应用于桁架结构优化的 T-BESO 法,可同时进行桁架拓扑优化及尺寸优化。

本文提出一种基于灵敏度滤波过滤的 SJ-BESO 法,主要应用于钢结构节点的拓扑优化。钢结构节点具有强度高、柔韧性好、可塑性强等优点,广泛应用于各类钢结构建筑、装配式混凝土结构、既有建筑结构加固改造<sup>[20-21]</sup>。虽然 BESO 生成的结构具有良好的构型,但为提升优化质量往往需要更加细小的网格划分,这将导致更多的迭代步数和更高的算力要求,并且易出现棋盘格和网格依赖现象。本文 SJ-BESO 通过引入灵敏度滤波半径,对过滤半径范围内各个单元的灵敏度进行加权处理,并通过设置灵敏度阈值段确定元素的保留、删除或添加,同时引入收敛参数确保结构计算趋优的稳定性,提升了 BESO 计算效率,有效克服了棋盘格和网格依赖现象。

## 2 SJ-BESO 理论与计算流程

### 2.1 BESO 数学模型

结构体系中的钢节点,不仅承受和传递荷载,而且需要提供足够的刚度,保证结构的整体变形要求。具体计算时选用柔度作为结构整体刚度的度量指标,当柔度最小时,结构取得最大刚度

$$\Delta C = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \{u_i\}^T [K_i] \{\Delta u_i\} \quad (1)$$

式中  $[K_i]$  为第  $i$  个单元的刚度矩阵,  $\{u\}$  为位移矢量。

BESO 在进行去除单元的过程中采用软杀单元方法,即当单元材料定义为无效时,其设计变量赋值为定义的最小值  $x_{\min}$ ,来保证在后续优化过程中,能更好地增添材料。为了实现元素的软杀伤,引入了 SIMP 方法的材料插值方案,将元素的虚弹性模量定义为等式中设计变量的函数

$$E(x_i) = E_0 x_i^p \quad x_i = \{x_{\min}, 1\} \quad (2)$$

式中  $E(x_i)$  为元素的虚弹性模量,  $E_0$  为材料的真

实杨氏模量,  $p$  为惩罚因子。为避免设计变量下限  $x_{\min}$  过小而导致刚度矩阵奇异,取  $x_{\min} = 10^{-4}$ 。

结合以上公式,以最大刚度为优化目标,以结构体积分数为约束条件,单元密度为设计变量建立数学模型,如式(3)所示。

$$\begin{aligned} \min: C(x) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i)^p u_i^T [K_i] \{u_i\} \\ \text{s. t.} &\begin{cases} \sum_{i=1}^n v_i x_i = v_0 \\ x_i = x_{\min} \text{ or } 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $v_0$  为目标体积,  $v_i$  为第  $i$  个单元的体积。

### 2.2 灵敏度分析

假设泊松比独立于设计变量,材料插值模型的整体刚度矩阵可用等式表示为

$$[K] = \sum_i^N x_i^p [k_i^0] \quad (4)$$

式中  $[k_i^0]$  为单元刚度矩阵。设计变量  $x_i$  在  $x_{\min}$  和 1 之间连续变化,目标函数的灵敏度为

$$\frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial \{F\}^T}{\partial x_i} \{u\} + \{F\}^T \frac{\partial \{u\}}{\partial x_i} \quad (5)$$

结合公式(3~5),得到目标函数对第  $i$  个元素的敏感度为

$$\frac{\partial C}{\partial x_i} = -p x_i^{p-1} u_i^T k_i^0 u_i \quad (6)$$

迭代过程中,设计变量取  $x_{\min}$  或 1,得到软杀伤 BESO 方法元素灵敏度计算公式为

$$\alpha_i^e = -\frac{1}{p} \frac{\partial C}{\partial x_i} = \begin{cases} u_i^T k_i^0 u_i & (x_i = 1) \\ x_{\min}^{p-1} u_i^T k_i^0 u_i & (x_i = x_{\min}) \end{cases} \quad (7)$$

式中  $\alpha_i^e$  定义为第  $i$  个元素的灵敏度数。

然而在面临多网格划分的情况下,计算各个单元的灵敏度易导致计算时间过长;各个单元相关性不高会导致优化结果存在部分棋盘现象甚至网格依赖现象。

### 2.3 SJ-BESO 优化策略

为了增加计算效率,提升优化过程中相邻单元之间的相关性,消除棋盘格现象以及网格依赖现象,在优化过程中引入元素灵敏度滤波方法。

在初始条件下,灵敏度值为等式(7)中各个元素灵敏度的加权平均值,即

$$\bar{\alpha}_m = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \alpha_i^e}{N} \quad (8)$$

式中  $N$  为连接到第  $i$  个节点的元素个数,  $w_i$  为第  $i$  个元素的加权因子。

$$\omega_i = \frac{1}{N} \left( 1 - \frac{r_i}{\sum_{i=1}^N r_i} \right) \quad (9)$$

定义  $r_{im}$  为第  $m$  个元素到第  $i$  个元素之间的距离,以第  $i$  个元素为中心,以  $r_{im}$  为半径绘制一个圆表示过滤区域,  $r_{im}$  为过滤半径。第  $i$  个元素在过滤区域内的灵敏度值为

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_i &= \frac{1}{\sum_{m=1}^C \omega(r_{im})} \sum_{m=1}^C \omega(r_{im}) a_m^n \\ \omega(r_{im}) &= r_{\min} - r_{im} \{ m = 1, 2, 3, \dots, T \} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式中  $T$  为过滤区域内元素的总个数。该方法可以提高单元的相关性,在迭代过程中消除棋盘格以及网格依赖现象。

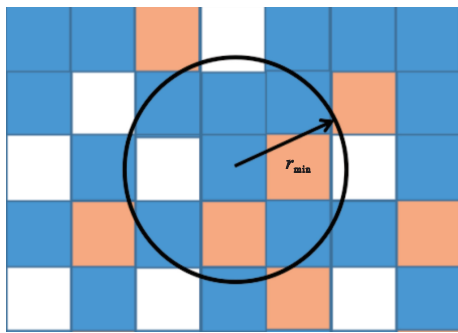


图1 元素灵敏度滤波半径  
Fig. 1 Elemental sensitivity filter radius

为提升优化迭代过程的计算效率,引入公共阈值段  $\alpha_{de}$  以及  $\alpha_{in}$ , 其中  $\alpha_{de} = \bar{\alpha}_{mk} - \Delta\alpha$ ,  $\alpha_{in} = \bar{\alpha}_{mk} + \Delta\alpha$ , 其中  $\bar{\alpha}_{mk}$  为第  $k$  次迭代单元灵敏度加权平均值,  $\Delta\alpha$  为参数,通过调整参数来改变阈值段数值。若单元灵敏度值  $\alpha_i < \alpha_{de}$ , 则该单元设计变量定义为  $x_{\min}$ , 若  $\alpha_i > \alpha_{in}$ , 则该单元设计变量定义为 1, 从而保证有效去除每次迭代过程中的低灵敏度元素以及保留或添加高灵敏度元素,简化操作提高迭代效率。

在体积达到设计分数值时,为使迭代计算结果趋优,在此设置收敛数值,从而确保每次迭代生成的结构均优于前一次优化结果。通过最后几次迭代过程中灵敏度数值变化来判断结构是否收敛,判断标准为

$$\frac{\left| \sum_{i=1}^N (\alpha_{k-i+1} - \alpha_{k-n-i+1}) \right|}{\sum_{i=1}^N \alpha_{k-i+1}} \leq \tau \quad (11)$$

式中  $\tau$  为收敛数值,  $k$  为当前迭代次数,  $n$  通常取不小于 5 的整数,这样可以保证数值在很小的范围内波动,从而避免奇异最优解的发生。

经过上述分析, SJ-BESO 整体优化流程如图 2

所示,参数设置以及材料属性数值列入表 1。

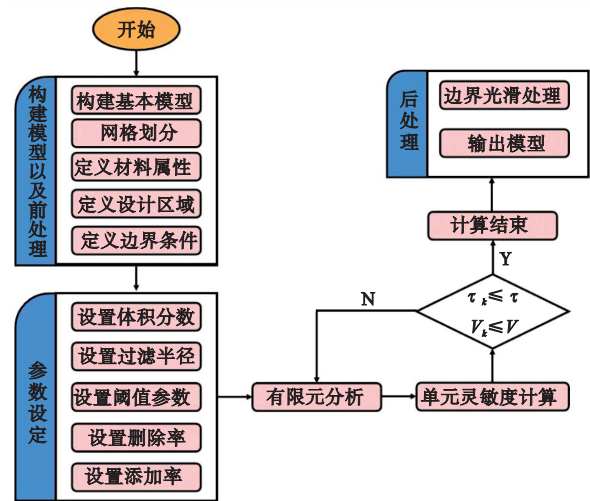


图2 SJ-BESO 方法优化流程  
Fig. 2 SJ-BESO method optimization flowchart

表1 参数设定  
Tab. 1 Parameter setting

参数	数值	材料属性	数值
滤波半径	2 d	弹性模量	$2.06 \times 10^5$ MPa
阈值段参数 $\Delta\alpha$	0.08	泊松比 $\mu$	0.3
收敛数值 $\tau$	0.006	密度 $\rho$	$7.9 \times 10^{-9}$ t/mm <sup>3</sup>
体积分数	40%		

注:  $d$  为网格划分尺寸

### 3 算例分析

**算例 1** 在河南大学金明校区锅炉厂房改造为博物馆工程中,将原厂房大跨结构改建为三层展厅,需对原有钢筋混凝土方柱增设钢牛腿节点以便于为横梁及楼板提供搁置面,构建的钢牛腿节点初始模型如图 3 所示,该节点由上部翼板(非优化区域)与下部梯形腹板(优化区域)组成。分别运用 SJ-BESO 以及 BESO 对其进行拓扑优化分析。

首先设置网格大小为 6 mm,对模型的优化区域进行网格划分,生成网格数量 16285 个,在其背部添加固定约束,添加均布荷载 500 kN/m<sup>2</sup>,并设置过滤半径为 12 mm 进行计算,迭代过程中,体积分数以及应变能随迭代次数变化如图 4 所示。其中 SJ-BESO 相对于 BESO 迭代次数降低至 56 次,生成结构总能量降低至  $2.7 \times 10^9$  J, SJ-BESO 仅需 36 步达到体积分数,并且在收敛参数的影响下,结构总能量不断降低,最终满足收敛条件结束迭代。由此可见基于灵敏度滤波法引入灵敏度阈值以及收敛参数对于提升迭代效率以及优化效果是有效的。

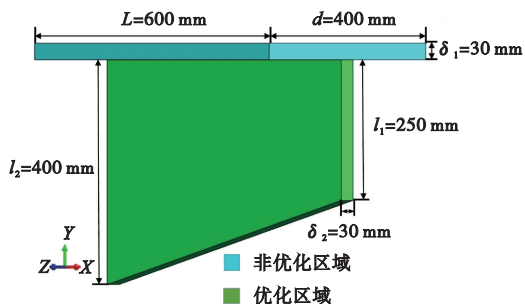


图3 节点初始模型  
Fig. 3 Joint initial model

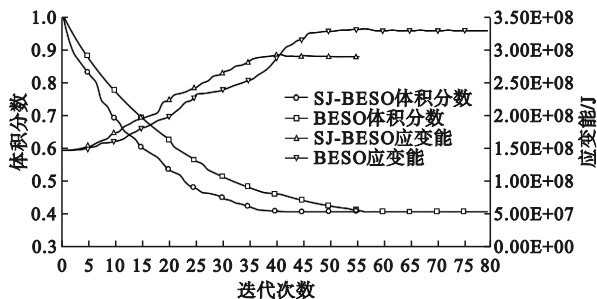


图4 迭代数据图  
Fig. 4 Iterate over the data graph

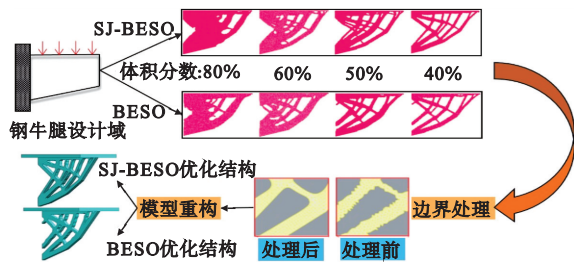


图5 优化后处理图  
Fig. 5 Optimized post-processing graphs

观察其迭代结果,发现两者均形成了桁架结构形式, SJ-BESO生成的结构可完全消除棋盘现象,内部杆件布置较多,传力路径明显。运用 NURBS 对优化结果进行边界处理,并在其上部填设翼板,对优化结果分别进行模型重构,生成结果如图 5 所示。

分别对初始节点、SJ-BESO 优化节点以及 BESO 优化节点进行有限元分析,在其左侧设置固定约束,上部设置均布荷载  $1000 \text{ kN/m}^2$ ,运用 opti-struct 求解器所得三种结构应力云图如图 6 所示,位移云图如图 7 所示。其中 SJ-BESO 优化节点在腹板质量相对于原始节点减少 60% 的情况下,其最大应力仅增加 6.1 MPa,最大位移增加  $0.0115 \text{ mm}$ ;相对于 BESO 优化节点最大应力减少了  $10.1 \text{ MPa}$ ,位移减少了  $0.064 \text{ mm}$ 。

**算例 2** 基于仿生学原理构建的树状四分叉节点设计新颖,造型独特,在诸多大型公众建筑中均得到了广泛的应用<sup>[22]</sup>。运用 Solidworks 构造原始树状分叉节点模型如图 8 所示,由于初始树状分叉节点几何形状定义的优化区域较少,为避免优化区域过小导致无法获得最佳优化结果,在其管件交接处添设  $r=500 \text{ mm}$  的球形优化区域,并设置主管以及各个分管为非优化区域,设置网格尺寸为  $10 \text{ mm}$  进行网格划分,随后在四根分管顶面设置

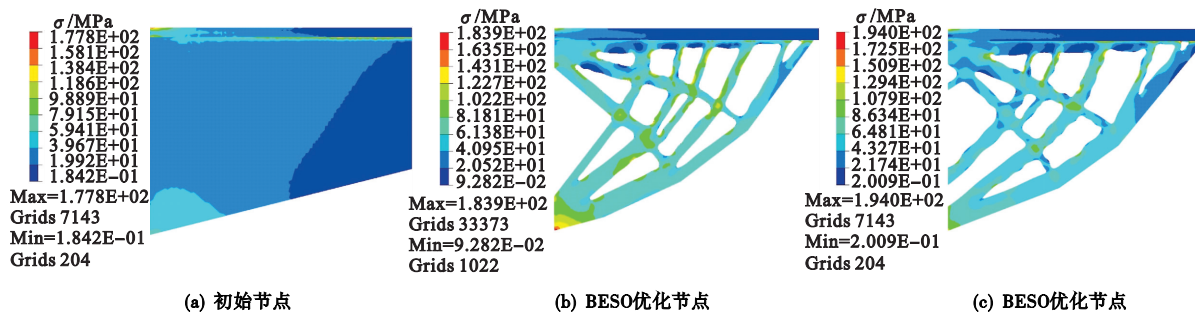


图6 应力云图  
Fig. 6 Stress cloud diagram

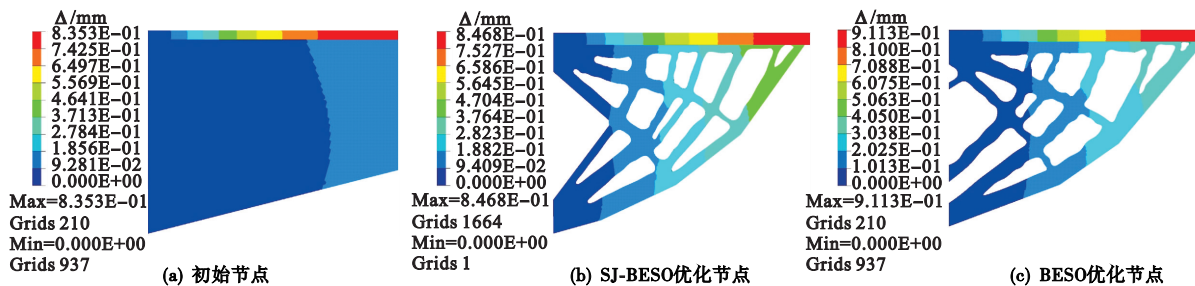


图7 位移云图  
Fig. 7 Displacement cloud diagram

沿着分管方向的轴向荷载 100 kN,方向垂直于分管截面向下,在主管下部设置固定约束,约束下表面六个方向自由度,最后设置过滤半径为 20 mm,设置各项优化参数,添加  $x$  和  $y$  两个方向对称优化约束后进行 SJ-BESO 以及 SIMP 优化,并对优化结果进行光滑处理后导出,生成模型结构如图 8 所示。

优化过程中 SJ-BESO 共迭代 43 步,生成模型 392.54 kg, SIMP 法共迭代 47 步,生成模型 400.23 kg; SJ-BESO 法生成节点下部存在 4 个对称的孔洞,而 SIMP 法生成的节点下部则为曲面薄壁,上部存在明显孔洞。

运用 Optistruct 求解器对三种节点模型进行有限元分析,分析应力云图如图 9 所示,位移云图如图 10 所示,观察结果可得,初始节点分管交界处存在大量的低应力区域,而优化后的节点模型低应力区域均大大减少并且优化后模型最大应力以及位移均小于初始节点模型。

对其数值结果进行对比分析发现, SJ-BESO 优化节点质量为初始节点的 81.26%,最大应力降低了 9.7%,最大位移降低了 9.9%; SJ-BESO 节点质量为 SIMP 节点的 98.07%,最大应力减少了

8.2 MPa,最大位移降低了 0.0304 mm,由此可得 SJ-BESO 法优化所得的结构相对于 SIMP 优化结构来说承载能力更强,优化效果更好。

SJ-BESO 优化形成的铸钢节点模型虽具有优良的性能,但其结构较为复杂,目前传统的生产工艺制造无法精确还原生成节点的优化特征。本节通过 FDM 技术来验证 SJ-BESO 生成结构的可制造性。

打印过程中,诸多工艺参数会对生成模型的质量造成一定影响,在生成 Gcode 代码前需对 FDM 打印参数进行设置,如分层厚度、边缘厚度、填充密度、打印温度、打印速度和支撑方式等,3D 各个参数的取值列入表 2<sup>[23]</sup>。打印结果如图 11 所示。

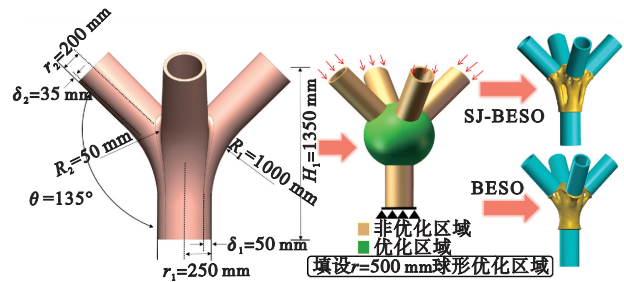


图 8 核心区域扩增和优化图  
Fig. 8 Core region amplification and optimization diagram

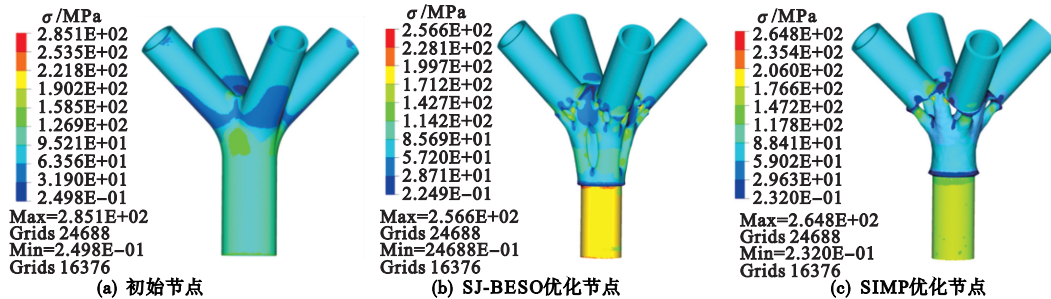


图 9 应力云图  
Fig. 9 Stress cloud diagram

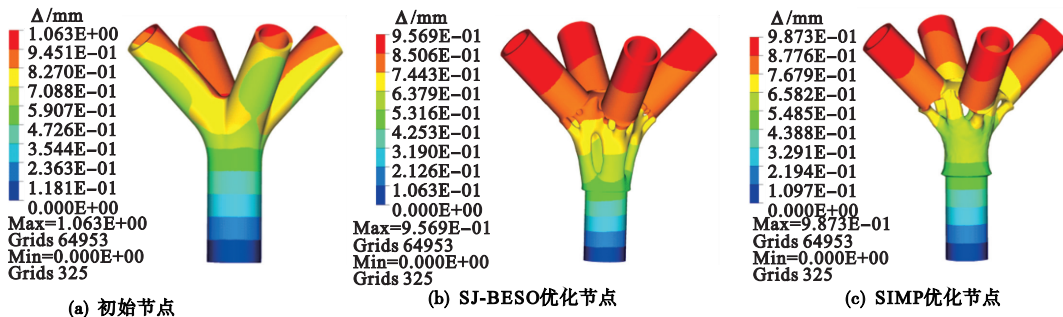


图 10 位移云图  
Fig. 10 Displacement cloud diagram

表 2 FDM 打印参数取值

Tab. 2 Parameters of FDM printing

打印材料	打印缩放比例	$\delta$ /mm	$\delta_e$ /mm	$\rho_f$ /%	$T_p$ /°C	$T_b$ /°C	$v$ /(mm·s <sup>-1</sup> )	支撑方式
PLA 塑料	1:12	0.1	0.8	20	210	50	30	全部支撑

注:  $\delta$  为分叉厚度,  $\delta_e$  为边缘厚度,  $\rho_f$  为填充密度,  $T_p$  为喷头温度,  $T_b$  为基板温度,  $v$  为打印速度

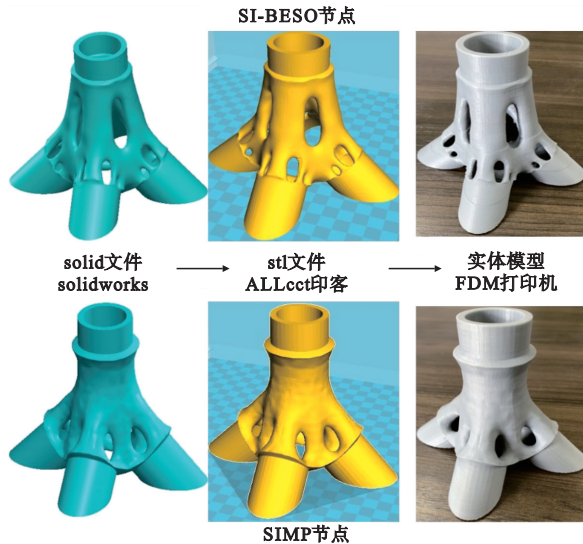


图 11 FDM 打印技术制造出的节点模型

Fig. 11 Node model produced by FDM printing technology

## 4 结 论

本文基于 BESO 思想,结合灵敏度滤波法并引入灵敏度阈值以及收敛参数提出针对钢节点的 SJ-BESO 法,并通过两个钢节点算例将其与 BESO 以及 SIMP 法进行对比分析,从而验证了该方法的计算效率及优化效果,得出以下结论。

(1)SJ-BESO 是针对钢节点拓扑优化时网格划分密集易导致运算迭代次数多、棋盘格及网格依赖现象等问题,通过设置灵敏度过滤半径、灵敏度阈值段以及优化结果收敛准则确保计算趋优的稳定性而提出的一种改进方法,具有良好的计算效率和优化效果。

(2)通过钢牛腿节点算例的结果分析,证实 SJ-BESO 可有效提升 BESO 迭代效率以及优化效果,而且有效克服了棋盘格和网格依赖现象,并且 SJ-BESO 优化所得钢牛腿具有更高的承载能力。

(3)结合四分叉节点算例将 SJ-BESO 与变密度法(SIMP)进行对比可知,SJ-BESO 节点质量为 SIMP 节点的 98.07%,最大应力减少了 8.2 MPa,最大位移降低了 0.0304 mm,SJ-BESO 的优化方案材料利用效率更高,优化效果更好。

(4)SJ-BESO 优化节点虽然构造复杂,但 3D 打印等先进制造技术发展迅速,本文运用 FDM 方法制造了优化节点的缩尺模型,可以解决传统工艺难以制造复杂几何构型的问题。

## 参考文献(References):

[1] 李佳霖,张有为,张维声,等.考虑平稳随机响应的显式结构拓扑优化[J].计算力学学报,2023,40(4):

505-513. (LI Jia-lin, ZHANG You-wei, ZHANG Wei-sheng, et al. Explicit structural topology optimization considering structural stationary random responses [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, 40(4): 505-513. (in Chinese))

[2] 刘浩,曹佳薇,高仁璟,等.基于拓扑优化的新型蜂窝结构设计[J].计算力学学报,2023,40(4):514-521. (LIU Hao, CAO Jia-wei, GAO Ren-jing, et al. Design of new honeycomb structure based on topology optimization [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, 40(4): 514-521. (in Chinese))

[3] 祁武超,申笑莲,王猛,等.基于网格退化和重组技术的类桁架拓扑优化方法[J].计算力学学报,2023,40(4):522-531. (QI Wu-chao, SHEN Xiao-lian, WANG Meng, et al. A truss-like topology optimization method based on a mesh degradation and recombination technology [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, 40(4): 522-531. (in Chinese))

[4] 董石麟.中国空间结构的发展与展望[J].建筑结构学报,2010,31(6):38-51. (DONG Shi-lin. Development and expectation of spatial structures in China [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(6): 38-51. (in Chinese))

[5] 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 Ji-hong, ZHOU Han, WANG Chuang, et al. Status and future of topology optimization for additive manufacturing [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(10): 24-38. (in Chinese))

[6] 王运宇,阎琨,蔡贤辉,等.基于COMSOL的简化对流传热结构拓扑优化方法[J].计算力学学报,2023,40(4):532-537. (WANG Yun-yu, YAN Kun, CAI Xian-hui, et al. Topology optimization of simplified convective heat transfer problem by COMSOL [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2023, 40(4): 532-537. (in Chinese))

[7] 谢亿民,黄晓东,左志豪,等.渐进结构优化法(ESO)和双向渐进结构优化法(BESO)的近期发展[J].力学进展,2011,41(4):462-471. (XIE Yi-min, HUANG Xiao-dong, ZUO Zhi-hao, et al. Recent developments of evolutionary structural optimization(ESO) and bi-directional evolutionary structural optimization(BESO) methods [J]. *Advances in Mechanics*, 2011, 41(4): 462-471. (in Chinese))

[8] Xie Y M, Huang X D, Zou Z H, et al. Recent developments of evolutionary structural optimization(ESO) and bi-directional evolutionary structural optimization(BESO) methods [J]. *Advances in Mechanics*, 2011, 41(4): 462-471.

[9] Huang X, Xie Y M, Burry M C. Advantages of bi-directional evolutionary structural optimization(BESO) over evolutionary structural optimization(ESO) [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2007, 10(6): 727-737.

[10] Huang X, Xie Y M. Numerical stability and parameters study of an improved bi-directional evolutionary structural optimization methods [J]. *Structural Engi-*

- neering and Mechanics, 2007, **27**(1):49-61.
- [11] Yang X Y, Xie Y M, Steven G P, et al. Bi-directional evolutionary method for stiffness optimization [J]. *AIAA Journal*, 1999, **37**(11):1483-1488.
- [12] Yang X Y, Yang R, Wang X L. Topology optimum design of loading plate in fuselage flutter model [A]. IEEE 10<sup>th</sup> International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design [C], 2009.
- [13] Eom Y S, Yoo K S, Park J Y, et al. Reliability-based topology optimization using a standard response surface method for three-dimensional structures [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, **43**(2):287-295.
- [14] Huang X, Xie Y M. Evolutionary topology optimization of continuum structures including design-dependent self-weight loads [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2011, **47**(8):942-948.
- [15] Li Y, Huang X D, Xie Y M, et al. Bi-directional evolutionary structural optimization for design of compliant mechanisms [J]. *Key Engineering Materials*, 2013, **535-536**:373-376.
- [16] Xia Q, Shi T L, Xia L. Stable hole nucleation in level set based topology optimization by using the material removal scheme of BESO [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, **343**:438-452.
- [17] He D, Liu S T. BESO method for topology optimization of structures with high efficiency of heat dissipation [J]. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 2008, **2**(1):43-48.
- [18] Liu T T, Ding L Y, Meng F, et al. Stability analysis of anti-dip bedding rock slopes using a limit equilibrium model combined with bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, **134**:104-116.
- [19] 才 琪, 冯若强. 基于改进双向渐进结构优化法的桁架结构拓扑优化 [J]. *建筑结构学报*, 2022, **43**(4):68-76. (CAI Qi, FENG Ruo-qiang. Topology optimization of truss structure based on improved bi-directional evolutionary structural optimization method [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, **43**(4):68-76. (in Chinese))
- [20] 卢林枫, 徐莹璐, 郑 宏, 等. 带悬臂梁段的弱轴连接组合节点循环荷载试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2018, **39**(7):66-75. (LU Lin-feng, XU Ying-lu, ZHENG Hong, et al. Experimental study of weak-axis composite connections with cantilever beam splicing under cyclic loading [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, **39**(7):66-75. (in Chinese))
- [21] Gao J D, Yuan H X, Du X X, et al. Structural behaviour of stainless steel double extended end-plate beam-to-column joints under monotonic loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, **151**:106743.
- [22] 王振喜. 树状结构四分支铸钢节点受力性能分析 [J]. *钢结构*, 2016, **31**(10):55-60. (WANG Zhen-xi. Analysis of stress performance of four-forked cast steel joints in tree structure [J]. *Steel Structure*, 2016, **31**(10):55-60. (in Chinese))
- [23] 王龙轩, 杜文凤, 张 帆, 等. 四分支铸钢节点拓扑优化及3D打印制造 [J]. *建筑结构学报*, 2021, **42**(6):37-49. (WANG Long-xuan, DU Wen-feng, ZHANG Fan, et al. Topology optimization and 3D printing manufacturing of four-branch cast steel joint [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, **42**(6):37-49. (in Chinese))

## Research on topology optimization of steel joints based on improved bi-directional progressive structural optimization method

TANG Peng-shan<sup>1</sup>, DU Wen-feng<sup>\*1</sup>, LI Shao-long<sup>1</sup>, GU Jin-chao<sup>1</sup>, GAO Bo-qing<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** In order to improve the computational efficiency of bi-directional progressive structural optimization (BESO) of steel structural joints, and fully solve the problem of checkerboard and grid dependence in the optimization process, an improved bi-directional progressive structural optimization (SJ-BESO) method is proposed. In this method, the sensitivity filtering radius is introduced, and after the sensitivity values of each element within the filtering radius are weighted, the element retention, deletion or addition is determined by setting the sensitivity threshold segment. Meanwhile, the convergence parameter is established to ensure the stability of the structural gradual optimization calculation. A comparative analysis between SJ-BESO and BESO was conducted using a corbel joint example. The results indicate that SJ-BESO significantly enhances computational iteration efficiency and overcomes issues related to checkerboard patterns and grid dependency. Then, an example with a bifurcated node is used to compare SJ-BESO with the variable density method (SIMP), and the results show that the optimized scheme of SJ-BESO has a higher material utilization efficiency. SJ-BESO is suitable for topology optimization of steel joints, and has good computational efficiency and optimization performance.

**Key words:** bi-directional progressive structure optimization method; steel structural joint; sensitivity filtering; finite element analysis; additive manufacturing