

空间结构节点的拓扑优化与增材制造

陈敏超¹ 赵 阳¹ 谢亿民²

(1. 浙江大学, 浙江杭州 310058; 2. 皇家墨尔本理工大学, 澳大利亚维多利亚 3001)

摘要: 在简要介绍连续体结构拓扑优化的数学描述和数值算法的基础上, 建立一空间结构节点模型, 利用优化软件 OptiStruct 对节点进行单工况和多工况下的拓扑优化设计。详细讨论了棋盘格控制、SIMP 法密度插值惩罚系数等参数设置以及对称约束、成员尺寸约束等工艺制造约束对优化结果的影响。经多次尝试比较得到受力合理、外观简洁且具有设计美感的优化节点模型, 并利用熔融沉积制造技术完成采用聚乳酸材料的节点打印。文中进一步讨论了实际工程中利用增材制造(3D 打印)技术对优化模型进行制造成型的可行性。目前易于实现的途径是将增材制造和传统制造工艺结合起来, 如利用 3D 打印制作复杂铸钢节点的模具、3D 打印蜡模进行失蜡铸造等。

关键词: 空间结构; 节点; 拓扑优化; 增材制造; 变密度法

中图分类号: TU393.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2019)02-0001-10

Topology optimization and additive manufacturing of nodes in spatial structures

Chen Minchao¹ Zhao Yang¹ Xie Yimin²

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. RMIT University, Victoria 3001, Australia)

Abstract: Based on the brief introduction to the mathematical description and numerical algorithms of continuum structural topology optimization, a node model in spatial structure is built and topology optimization design under single and multiple load cases is carried out by using the optimization software OptiStruct. The influences of the checkerboard control and the penalty factor of SIMP density interpolation, as well as the manufacturing constraints including the symmetry constraint and the member size constraints on the optimization results are discussed in detail. After several trials and adjustments, an optimized node with reasonable load-bearing behavior, concise appearance and design aesthetics is obtained. The optimized node is then printed with the polylactic acid (PLA) material by the fused deposition modeling (FDM) technology. The feasibility of prototyping and manufacturing of optimized nodes with additive manufacturing (3D printing) technology is further discussed. At present, a realizable approach is to combine the additive manufacturing with the traditional manufacturing techniques to produce moulds of complex cast-steel nodes with 3D printing or to print wax models followed by dewaxing casting.

Keywords: spatial structures; structural nodes; topology optimization; additive manufacturing; variable density method

E-mail: ceyzhao@zju.edu.cn

引 言

工程结构的优化设计过程一般分为拓扑优化、

形状优化和尺寸优化等阶段。其中拓扑优化是最高等的结构优化阶段, 对结构初期选型意义重大, 因此越来越多地引起研究者的兴趣^[1-2]。

空间结构是一种形式多变、功能多样、受力合理的建筑结构形式。空间结构中, 节点起着连接交汇杆件、传递荷载的作用, 对于结构的整体力学性能、制作安装和材料用量等都有着直接影响^[3-4]。将连续体拓扑优化的思想引入复杂多样的空间结构节

基金项目: 国家自然科学基金(51778567)

作者简介: 陈敏超, 硕士研究生

通讯作者: 赵阳, 博士, 教授

收稿日期: 2017-11-15

点设计之中, 可使其既满足受力需求又最大化减轻自重。澳大利亚皇家墨尔本理工大学的研究团队利用双向渐进结构优化法 (BESO) 对某大跨度顶棚结构的节点进行了拓扑优化设计的探索^[5]。

3D 打印技术是近年来最为热门的先进技术之一, 已在诸多领域得到了广泛的研究应用。由于通过拓扑优化得到的节点通常具有不规则且十分复杂的几何形状, 采用传统制造工艺往往很难实现, 引入 3D 打印技术可望为这类节点的成型制造提供一条新的可行途径。

综合上述认识, 本文围绕连续体结构拓扑优化问题, 针对一个空间结构节点算例进行了细致的优化方法探讨和结果对比, 实现了给定工况下的拓扑优化全过程。对于优化结果, 经后处理利用 3D 打印技术进行实际制造, 验证了面向 3D 打印的空间结构节点拓扑优化设计及制造一体化技术的可行性。

1 连续体结构的拓扑优化技术

拓扑优化是在给定的设计空间中, 寻求满足一定约束条件的最优构件或材料分布形式, 优化的三要素包括设计变量、目标函数和约束条件。根据不同的问题建立相应的数学模型, 然后寻找求解设计变量的合适方法, 是工程结构优化设计的一般过程。

1.1 结构静力拓扑优化问题数学描述

空间结构节点主要承受静力荷载, 本文仅讨论结构的静力拓扑优化问题。该问题最常见的优化目标是结构的静力刚度最大 (柔度最小), 以结构体积分数为约束条件的拓扑优化问题用数学语言描述可表示为^[6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min C(x) = \frac{1}{2} U^T K U \\ \text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^N V(x_i) \leq V^* \\ \mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{U} \\ 0 < x_{\min} \leq x_i < x_{\max} \leq 1 \quad (i=1, \dots, N) \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: x 为所选取的优化设计变量形式; C 为关于 x 的函数, 代表结构的柔度; \mathbf{K} 、 \mathbf{U} 和 \mathbf{F} 分别为结构的整体刚度、位移和外荷载矩阵; $V(x_i)$ 和 V^* 分别为结构的实际体积关于变量 x 的函数和整个优化问题所要求的约束体积分数值, i 为单元数目。

式 (1) 是单一工况下的最优化问题, 而作用在实际结构上的工况并不止一个。对于多工况下的静

刚度拓扑优化问题, 往往采用线性加权法和平方和加权法等方法将其转化为单一目标问题求解。但对于非凸优化问题, 上述方法不能确保得到所有的 Pareto 最优解。通过折衷规划法定义多工况下静力优化的目标函数为^[7]:

$$\min C(x) = \left\{ \sum_{k=1}^M w_k^q \left[\frac{C_k(x) - C_k^{\min}}{C_k^{\max} - C_k^{\min}} \right]^q \right\}^{\frac{1}{q}} \quad (2)$$

式中: $C_k(x)$ 为第 k 个工况的柔度目标函数; C_k^{\max} 、 C_k^{\min} 分别为第 k 个工况柔度目标函数的最大值和最小值, 也即优化过程中结构的初始和最终柔度值; w_k 为第 k 个工况的加权系数; q 为折衷规划惩罚系数, $q \geq 2$ 。

式 (2) 的意义在于将不同工况下的绝对柔度目标转化成各自的相对目标, 从而解决了不同工况下结构柔度不在同一个量度时综合优化目标的权衡问题。

1.2 SIMP 插值方法和优化算法

1.2.1 SIMP 密度-刚度插值方法

针对连续体结构拓扑优化问题, 数学模型的建立主要有均匀化法、变密度法、独立连续映射法 (ICM)、水平集法以及渐进结构优化法 (ESO) 等。其中变密度法是较为成熟且适用范围最为广泛的优化算法之一, 其基本思想是将人为假设结构材料密度在 0~1 范围内进行的连续插值作为设计变量, 并假定材料的刚度与该相对密度值对应, 通过密度值的变化进行材料在设计区域内的重分布, 进而实现结构的拓扑优化。变密度法的插值方法主要包括固体各向同性惩罚法 (SIMP) 以及材料属性的有理近似法 (RAMP) 两种, 前者因插值公式相对简单而更为常用。SIMP 法的插值模型形式为:

$$E(x_i) = E_{\min} + x_i^p (E_0 - E_{\min}) \quad (3)$$

式中: x_i 为表征单元刚度大小的相对密度 (伪密度); p 为惩罚系数, 目的是减少插值中间变量的存在; E_{\min} 和 E_0 为设计区域相对密度近似为 0 和 1 部分材料的弹性模量, 为防止刚度矩阵奇异, 常取 $E_{\min} = E_0 / 1000$ 。

图 1 是不同惩罚系数下的 SIMP 法插值模型结果, 纵坐标相对弹性模量 E_i 为相对密度 x_i 单元的弹性模量和 E_0 的比值。可见随着 p 的增大, E_i 在中间范围内的插值明显减少而趋向 0 值增多, 从而减少了优化过程中“半有半无”单元的存在。

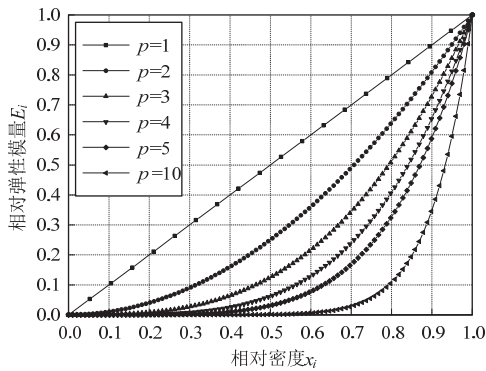


图 1 SIMP 法密度-刚度插值模型

Fig.1 SIMP density-stiffness interpolation scheme

1.2.2 拓扑优化数值算法

复杂的连续体拓扑优化求解需要利用有限元离散设计域变量后利用计算机数值算法进行。目前常用的数值算法包括优化准则法 (Optimality Criteria, OC) 和数学规划法 (Mathematical Programming Schemes, MP)。本文采用数学规划法, 其本质上是一种变化算法, 即把原始的优化问题转变为一系列线性规划的子问题进行求解。该方法全局收敛性较好, 不易出现局部最优解, 适用于多目标、多约束的优化问题, 但求解计算量较大, 迭代过程缓慢。

2 分析模型

节点是空间结构中连接杆件、拉索等相对独立单元的连续体部件, 可将其作为单独的“零部件”从结构整体中独立出来进行拓扑优化设计。本文以一个四面带耳板的空间结构节点为对象, 综合考虑节点受轴力、弯矩和剪力等工况进行拓扑优化设计。

2.1.1 结构拓扑优化设计软件

目前较为成熟可靠的结构优化软件主要有美国 Altair 公司的 HyperWorks OptiStruct、德国 Fe-design 公司的 Tosca Structure 以及法国的 Simulia Abaqus 等^[8]。其中拓扑优化功能较为先进的当属 OptiStruct, 许多工程实际案例已证明其在结构拓扑优化领域内的良好求解能力。除了作为通用有限元求解器的 OptiStruct, HyperWorks 软件包中还包括强大的前处理平台 HyperMesh 以及后处理环境 HyperView 等。

OptiStruct 适合求解一般静态和动态优化问题, 涵盖从拓扑优化到尺寸优化的几乎所有工程优化类型。OptiStruct 所使用的优化插值方法为 SIMP 法,

而内部求解方法为数学规划方法, 通过求解灵敏度构造近似显式模型, 采用小步长迭代对应的设计变量以找到最优解^[9]。

2.1.2 模型建立

利用三维设计软件犀牛 (Rhino) 建立节点初始模型, 如图 2 所示。节点中心的设计区域为一足够大的多面体对称棱柱, 两对角耳板间距为 200mm, 整体高度为 160mm。作为非设计区域, 四组完全相同的耳板通过螺栓与厚度 10mm 的连接板相连, 耳板高 90mm, 厚 8mm, 螺栓直径 12mm。节点材料密度为 7850kg/m^3 , 弹性模量为 210GPa, 泊松比为 0.3。对拓扑优化问题不考虑材料或几何非线性的影响, 即假设材料始终处于弹性阶段且结构小变形。

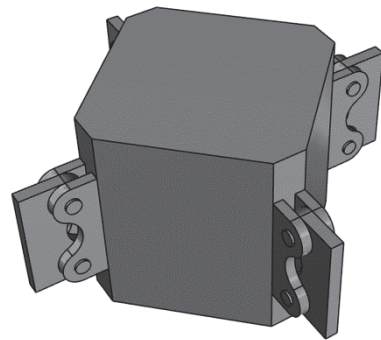


图 2 犀牛建立的初始模型

Fig.2 Initial model built in Rhinocero

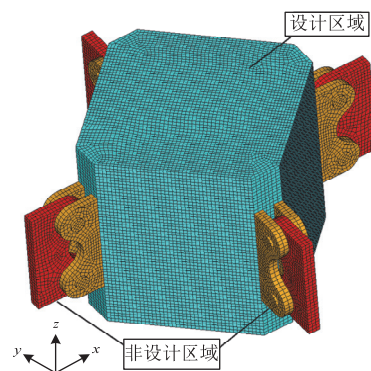


图 3 有限元模型

Fig.3 Finite element model

2.1.3 网格划分

将上述初始模型转化为 iges 格式导入 HyperWorks 的前处理平台 HyperMesh 并进行网格划分。导入模型后进行几何清理、材料建立以及不同属性部件的划分, 其中蓝色部分定义为拓扑优化设计区域, 黄色和红色部分分别为四组耳板以及连接板, 均定义为非设计区域。采用平均尺寸 3mm 的六面体八节

点单元 Hex8 和五面体六节点单元 Penta6 进行网格划分,单元总数 185688 个,节点整体有限元模型如图 3 所示。

2.1.4 荷载与约束条件

在模型其中一块连接板的端面上施加六个方向的自由度约束作为完全固支,另外三块连接板端面上则施加不同工况下的荷载。单一工况的荷载分为轴力、纯弯曲和剪力三种,其中轴力和剪力以节点荷载的形式直接加在三块受荷板端部,而纯弯曲则以一对力偶的形式施加在节点板端上下各自 10mm × 10mm 的区域。图 4 分别为该三种工况的示意图,其中黄色为板端约束而蓝色则为板端荷载。研究多工况优化问题时同时施加该三种荷载。

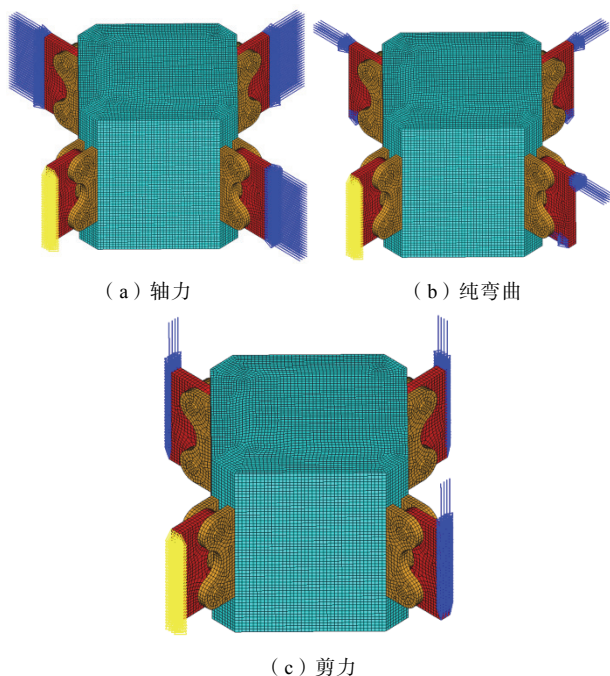


图 4 荷载和边界条件示意图

Fig.4 Load cases and boundary conditions

3 单工况优化分析

3.1 优化求解参数设置

OptiStruct 具有大量的求解参数可供使用者设置,本文主要考虑 SIMP 法计算过程中易产生的棋盘格问题以及式 (3) 中 SIMP 法密度插值惩罚系数对拓扑结果的影响。为了寻找拓扑优化过程中的最优结构形式,设置模型的约束体积分数足够小,为原始设计区域的 10%,而优化目标则为结构整体柔度最小(刚度最大)。

OptiStruct 的优化结果可以在 HyperView 中进行后处理。一项必要的工作是确定优化结果的显示

阈值,相对密度低于该值的单元将不予显示。理论上,过高的阈值会过滤掉部分低密度单元而减少结构的细节特征,而过低的阈值则会显示大量低密度单元,影响拓扑结果的表达。阈值一般根据结果的保留需要进行取值,如无特殊说明,本文显示阈值取为 0.3。

3.1.1 棋盘格控制

“棋盘格”现象 (checkerboard pattern) 是拓扑优化尤其是变密度法优化过程中一种常见的数值不稳定现象^[10],指优化过程中不同密度单元呈现周期性排列的现象,本质是由低阶单元计算的数值误差引起的^[11]。OptiStruct 允许在求解前设置棋盘格控制,利用灵敏度过滤方法减少其对结果的影响。

以板端受剪力的单一工况为例,惩罚系数 $p=2.0$,保持其余求解参数为默认,仅做棋盘格控制影响分析,在相同显示条件下得到如图 5 所示结果。无棋盘格控制时,优化结果整体显得十分粗糙(图 5 (a)),这是因为结构的细部单元密度在实体(密度插值接近 1)和孔洞(密度插值接近 0)之间呈周期性变化分布,进而显示出表面凹凸不平的粗糙状态。此外节点某些位置还有一部分细小的冗余结构出现,这也是过多半稠密单元存在的结果。而整体控制棋盘格后,优化结果表面的光顺化程度大幅提高,且多余结构消失(图 5 (b)),棋盘格问题得到了有效解决。

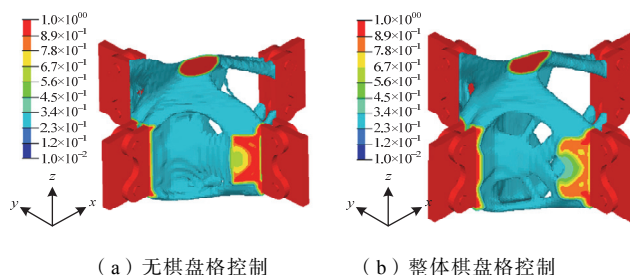


图 5 棋盘格控制的影响

Fig.5 Influence of checkerboard control

3.1.2 惩罚系数

变密度法中变量单元密度值的最后离散程度和式 (3) 中惩罚系数 p 的取值有着直接关联。同样以只受剪力的单一工况为例,设置整体棋盘格控制,分别取惩罚系数 $p=1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0$,得到如图 6 所示结果。 $p=1.0$ 时式 (3) 失去惩罚意义故不作考虑。

从图 6 可以看出, $p=1.5$ 时,迭代结束时优化尚不完全;当 $p=2.0\sim 4.0$ 时,优化得到的最终结构

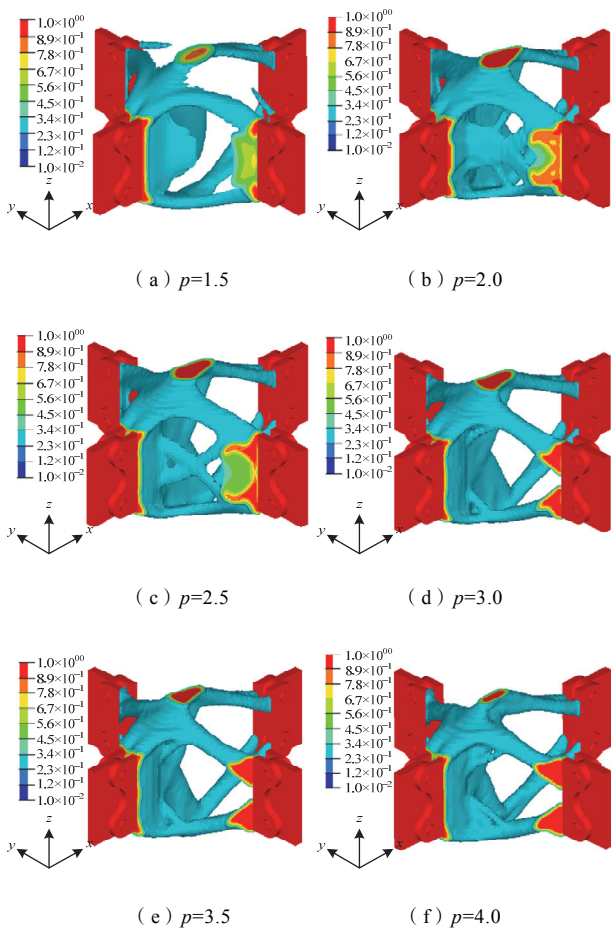


图 6 惩罚系数的影响
Fig.6 Influence of penalty factor

具有一定的相似性，只是在一些细处出现了不同形式的结构特征。尽管从理论上说， p 取值增大时中间密度的单元会显著减少，使得最后的拓扑结构更清晰，但过少的中间密度单元有时可能因为减少了次要的传力途径反而降低了整体性能，所以仅从结果形式难以判断哪个更佳。

表 1 给出了 p 不同取值时的柔度变化和迭代步数对比。初始柔度值随惩罚系数 p 的增加呈指数增大，这是因为 p 值的增大使得结构大量单元的初始相对弹性模量接近 0，刚度减小而柔度增大。但随着迭代的进行，最终柔度值仅随 p 值的增大而略有增加。就迭代步数而言， $p=1.5\sim 3.5$ 时迭代步数相差不大，而当 $p=4.0$ 时稍有增加。过高的惩罚系数可能会导致全局刚度矩阵奇异化，使得迭代步数增加，目标柔度值也增加过多，故并不可取。对本案例，理论上 $p=2.0\sim 3.5$ 均是较为合理的取值。为了保证优化开始时结构柔度处于一个相对合理的区间，即保证初始单元密度分布较均匀，并综合考虑计算成本和结果形式，下文计算中惩罚系数均取为 $p=2.0$ ，

即合理范围内的相对较低值。设置当相邻两个迭代步中目标函数的相对变化小于 0.005 时，迭代终止。

表 1 不同惩罚系数下的柔度变化和迭代步数

惩罚系数 p	初始柔度 C_k^{\max} (N·mm)	最终柔度 C_k^{\min} (N·mm)	迭代步数
1.5	10038	3303	22
2.0	26953	3392	21
2.5	80378	3505	22
3.0	249298	3666	20
3.5	784363	3799	20
4.0	2472639	3959	25

3.2 单工况优化分析结果

优化的最终目标是得到多工况下节点的拓扑优化形式，但式 (2) 中第 k 个工况柔度目标函数的最大值和最小值 C_k^{\max} 、 C_k^{\min} 均未知，故首先需进行单一工况的逐项分析，将不同工况下节点柔度的最大和最小值作为多工况优化的求解参数输入。图 7~图 9 分别给出了轴力、纯弯曲和剪力三种单一工况下的优化结果和各自的目标函数迭代收敛曲线。可以看出，三种工况下的优化结果形式和荷载分布形式密切相关，迭代曲线都经历了初始的快速下降和随后的趋向平缓两个主要过程。表 2 给出了三种工况下结构的初始和最终柔度，将作为下文多工况拓扑优化的输入参数。

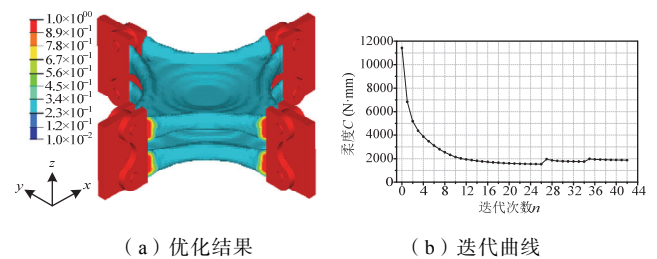


图 7 轴力工况
Fig.7 Case of axial force

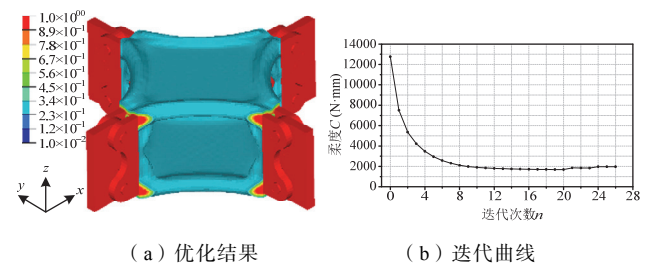
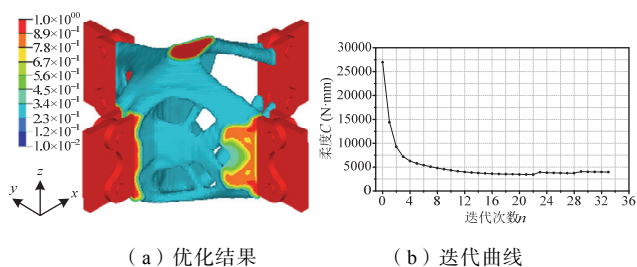


图 8 纯弯曲工况
Fig.8 Case of pure bending



(a) 优化结果 (b) 迭代曲线

图 9 剪力工况

Fig.9 Case of shear force

表 2 单一工况柔度优化结果

Table 2 Optimization results of compliance in different cases

工况	初始柔度 C_k^{\max} (N·mm)	最终柔度 C_k^{\min} (N·mm)
轴力	11425	1869
纯弯曲	12770	1963
剪力	26953	3392

4 多工况优化分析

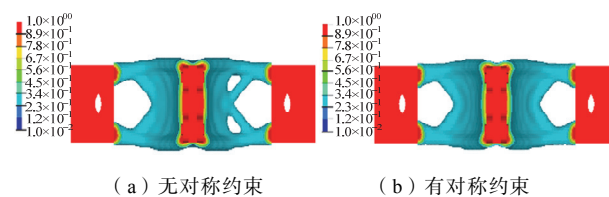
根据式 (2), 利用 OptiStruct 中的 dequations 卡片建立多工况下的加权柔度目标函数, 将多工况下的优化问题转化为单一目标优化问题求解。同时考虑连接板端面受轴力、纯弯曲和剪力的工况, 并将这三种工况视作同等重要, 取加权系数相同, 即式 (2) 中取 $w_k=0.33$ ($k=1,2,3$), 折衷规划惩罚系数 $q=2.0$ 。设置整体棋盘格控制, 并取 SIMP 法密度插值惩罚系数 $p=2.0$ 。

4.1 工艺制造约束分析

设置工艺制造约束的目的是增加拓扑优化结果的可制造性。常见的制造工艺约束包括对称约束、成员尺寸约束以及拔模、挤压约束等。由于本文旨在面向 3D 打印技术进行节点的生产制造, 故传统工艺下的拔模、挤压约束并不需要在设计中考虑。本节主要讨论对称约束和成员尺寸约束对优化结果的影响。

4.1.1 对称约束的影响

由于原模型和荷载均关于 xz 平面对称, 故设置该平面为对称面。设置与不设置对称约束的多工况静力优化结果如图 10 所示。可见, 无对称约束时, 由于计算过程对网格存在一定的依赖性, 对称面两侧部分单元的相对密度没有同步变化而最终形成了不对称的结果, 这也是拓扑优化中数值不稳定的主要表现之一。而加入强制性对称约束后的结果则关于 xz 平面完全对称, 是有利于实际制造的结果。



(a) 无对称约束 (b) 有对称约束

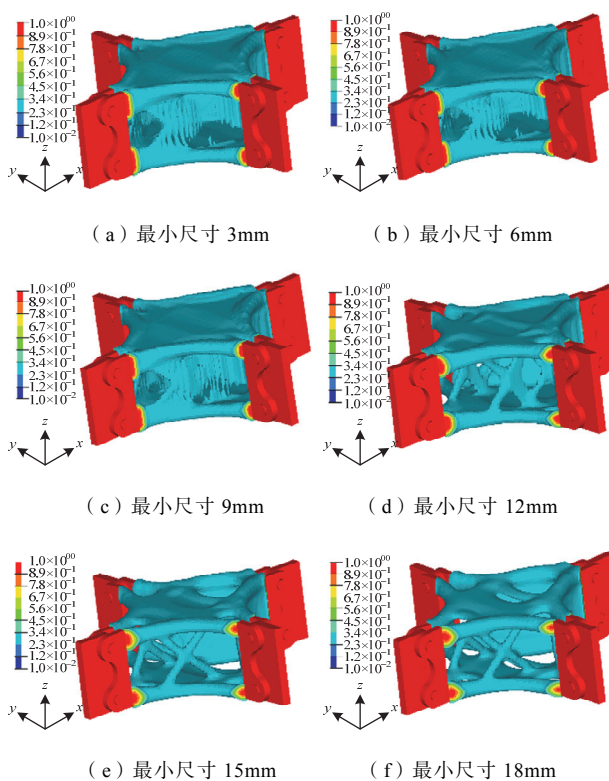
图 10 对称约束的影响

Fig.10 Influence of symmetry constraint

4.1.2 成员尺寸约束的影响

成员尺寸约束是 OptiStruct 拓扑优化过程中的重要工艺约束, 分为最小和最大成员尺寸约束。最小成员尺寸约束通过强制材料在分布稀疏区域进行一定程度的堆积而保证所得结果不会出现很多细小的枝桠状结构; 而最大成员尺寸约束则相反, 限制材料的过度堆积现象, 使得拓扑结果更加清晰。经验建议最小成员尺寸约束应在单元尺寸的 2~3 倍以上, 而最大成员尺寸则为最小成员尺寸的 2 倍以上。对模型施加对称约束, 设置最小成员尺寸分别为 3mm、6mm、9mm、12mm、15mm、18mm, 并取最大成员尺寸为相应最小尺寸的 2 倍, 得到的不同优化结果如图 11 所示。

从图 11 不难看出, 拓扑优化设置的成员尺寸直接影响了最终结果的形状。当成员尺寸较小时, 节



(a) 最小尺寸 3mm (b) 最小尺寸 6mm
(c) 最小尺寸 9mm (d) 最小尺寸 12mm
(e) 最小尺寸 15mm (f) 最小尺寸 18mm

图 11 成员尺寸约束的影响

Fig.11 Influence of member size constraint

点内部的传力路径中出现了大量半稠密单元，形成模糊不可制造的部分，这本身是病态的优化结果。而随着成员尺寸的增大，节点内部出现了若干“X”状的支撑结构，形成了较为清晰的传力路径。

表 3 给出了不同成员尺寸控制下的最终目标函数柔度值以及迭代步数。随着单元尺寸的增大，迭代步数先有所增加，随后又减少，结构的最终柔度值则始终有所上升。最小成员尺寸增大到 9mm、18mm 时，柔度值呈现出明显的跳跃式增大，这说明在最小成员尺寸的增加过程中形成了传力路径不尽相同的优化结构。可以认为过高或者过低的柔度值都是不理想的，因为最终柔度值过低可能意味优化不完全，过高则很可能是因为消除了过多应有的中间密度单元，剩余材料的过度堆积使得优化结果仅体现了结构最主要的传力部分，一些尽管相对次要但也必要的辅助传力路径并没有在拓扑结构中得以体现。

表 3 不同成员尺寸约束下的最小柔度值和迭代步数

Table 3 Minimum compliance and iterations with different member size constraints

最小成员尺寸(mm)	最大成员尺寸(mm)	最终柔度 C_k^{min} (N·mm)	迭代次数
3.0	6.0	7790	72
6.0	12.0	7792	73
9.0	18.0	12224	77
12.0	24.0	14060	81
15.0	30.0	16680	79
18.0	36.0	21067	75

根据图 11 和表 3 的结果，综合考虑优化的最终柔度值、结果形式以及计算成本，本文认为最小成员尺寸为 15mm 时的优化结果是相对合理的。当然，实际设计中对于成员尺寸约束的取值并没有统一的定量标准，必须经过反复试算和比较才能得到较为理想的结果。

4.2 多工况优化分析结果

在给定整体棋盘格控制、惩罚系数 $p=2.0$ 、最小成员尺寸 15mm 并施加对称约束的情况下对原始节点进行拓扑优化。图 12 显示了若干代表性迭代步时的结构拓扑形状（图 12 (a) 显示阈值为 0.05，其余均为 0.3），可见节点设计区域经历了单元相对密度初始重分配、主传力路径生成、辅助支撑结构生成、局部调整的优化过程。

图 13 所示为上述多工况优化过程中，将轴力、纯弯曲和剪力三种工况各自对应的柔度值单独提取出来的迭代曲线。值得注意的是，在迭代到 44 和 56

步时各工况对应的柔度值曲线均有跳跃性的上升，其中以剪力工况的曲线最为明显。这两个迭代步分别对应了节点中部“X”状支撑结构开始生成和基本形成阶段，说明支撑结构的产生会对优化结构的刚度产生较大影响。由此也可推断，“X”状支撑结构的生成对剪力荷载最为敏感，这和已知的经典短悬臂梁一端受剪切荷载时的拓扑优化结果^[12]相一致。

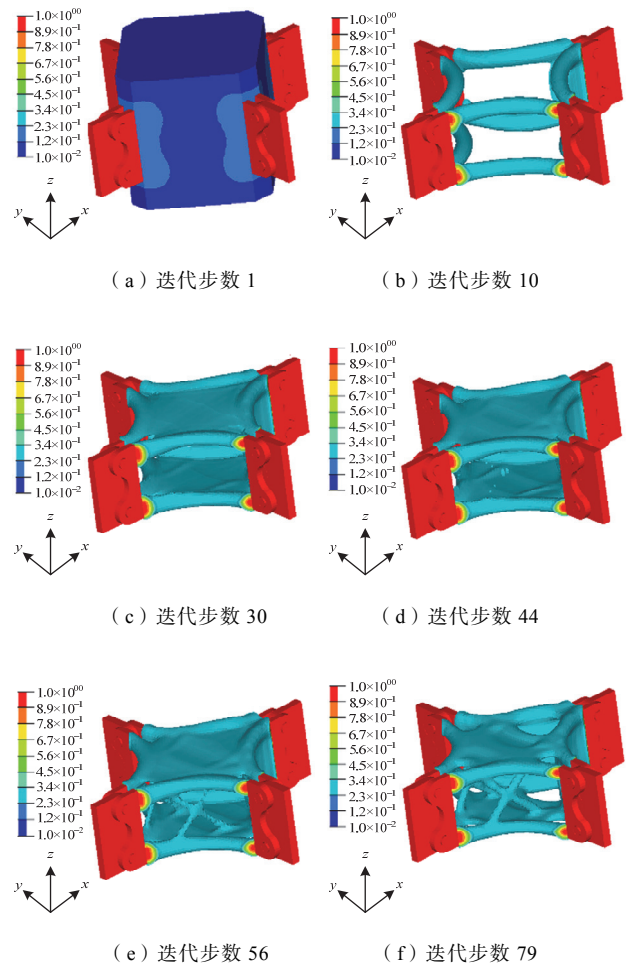


图 12 不同迭代步时的拓扑形状
Fig.12 Topology shapes in different iterations

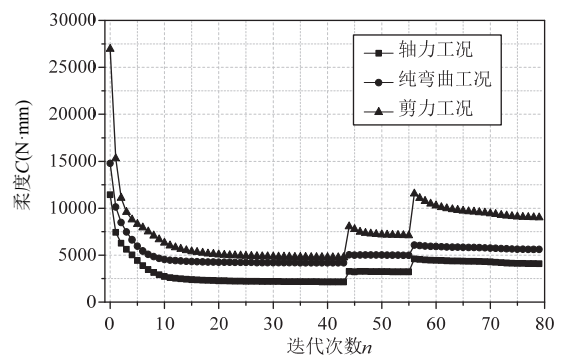


图 13 优化设计的迭代曲线
Fig.13 Iteration history of the optimization design

4.3 优化结果的调整和分析

利用 OptiStruct 中的优化结果转化模块 Ossmooth, OptiStruct 支持将拓扑优化结果进行光滑处理并得到一个仅包含壳单元外形的新网格模型。将优化结果进行表面几何重生成、网格重划分并在原荷载条件下进行静力重分析,得到的 von Mises 应力云图如图 14 (a) 所示。可以看出,节点核心区域应力水平不高且分布较为均匀,在主传力路径上有部分应力集中现象的产生,说明这些位置的材料是必须保留的。

一般而言,对于结构在实际工作时各部位应力的控制在低层次细节优化过程中加以考虑,而在拓扑优化时不予以关注。但对于模型重分析所反映的应力明显集中的位置,可以利用 OptiStruct 中的自由形状优化功能进行结构的二次调整优化。该技术通过网格节点移动或变形到临近的新位置来改善结构的某些局部几何特征,可有效减少应力集中现象。选择节点核心区域表面所有网格节点的坐标作为变量进行位置的调整进而对优化结果实施几何局部微调,节点位置的移动量云图如图 14 (b) 所示。图 14 (c) 则是调整后节点的整体 von Mises 应力云图,可以看到几处原有的应力集中区域的应力分布得到了一定的改善。

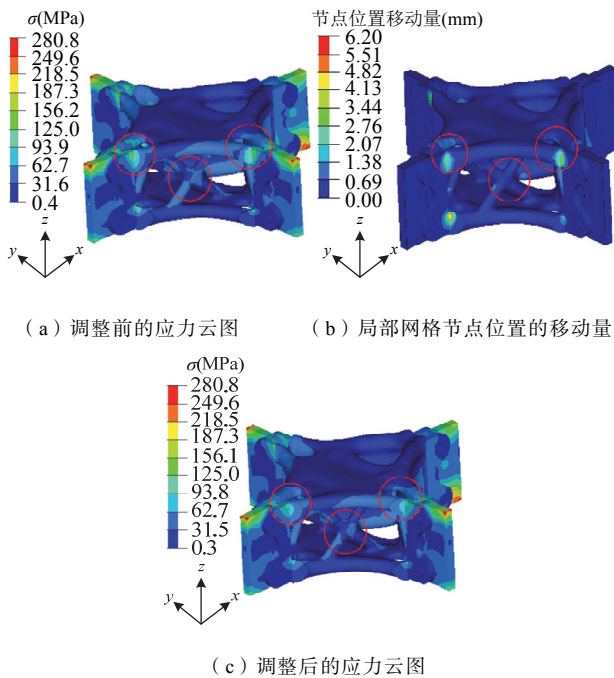


图 14 利用自由形状优化进行局部调整

Fig.14 Local adjustment using free shape optimization

图 15 所示为自由形状优化调整过程中节点核心区域的最大应力变化图。在总计 14 步的迭代过程中,

通过网格节点位置的微调,优化后节点的最大应力从 243MPa 下降到了 173MPa,可见在保持原拓扑形状的基础上对模型引进局部调整优化是有效的。

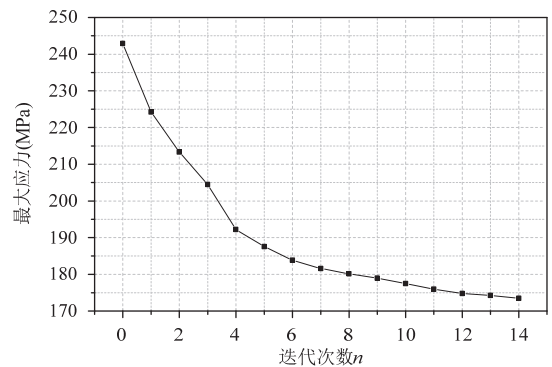


图 15 最大应力变化曲线

Fig.15 Variation of maximum stress

5 基于增材制造技术的节点制造成型

增材制造 (Additive Manufacturing) 技术在国内习惯上被称为 3D 打印技术,是近年来全球新兴的工业制造技术。它有别于传统的制造方式,将“减去”材料的概念转变为“添加”材料,以数字模型文件为基础,运用粉末状黏合材料,通过逐层堆叠的方式来构造物件^[13]。目前主要的 3D 打印方法有熔融沉积制造 (FDM)、选择性激光熔化技术 (SLM)、分层实体制造 (LOM) 以及光固化成型技术 (SLA) 等。为了区别一般工业生产流水线中的 3D 打印技术,有文献将应用于建筑领域的 3D 打印技术称为 3D 打印建造^[14]。针对空间结构节点的 3D 打印建造技术国外近来已有若干尝试^[15-16]。

上文所得到的节点拓扑优化模型,通过 HyperWorks 的优化结果处理模块 Ossmooth 能够直接生成可供处理切片和 3D 打印的 STL 格式文件。同时可利用 3D 打印前处理软件 Magics 对生成的 STL 格式文件进行进一步处理加工。

限于实验设备和成本,目前利用选择性激光熔融技术 (SLM) 直接进行金属打印尚存在一定难度。本文利用浙江省三维打印重点实验室的 Delta 型熔融沉积 3D 打印机进行优化模型的成型制造,所使用的材料为聚乳酸 (PLA) 塑料。

图 16 展示了实际的打印过程和拆除支撑后的成品。打印的节点模型表面较为光滑,整体效果良好。

尽管以 PLA 塑料为打印材料的节点并不能直接用于实际工程,但为今后复杂形状空间结构节点的制造提供了新的思路,即将 3D 打印技术和传统

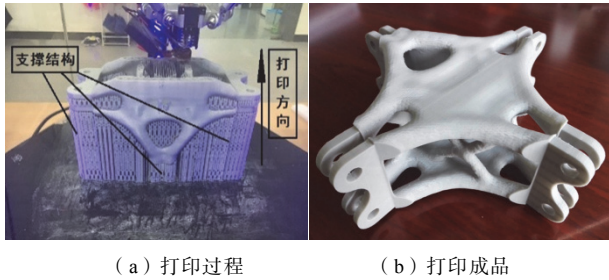


图 16 打印过程和成品

Fig.16 Print process and the finished node

工艺制造技术相结合进行金属节点的加工制造。一种可行的方法是利用 3D 打印制造复杂铸钢节点的模具，数字化的处理可以使模具精度得以保证，减少浇铸成型时的局部缺陷。相比传统的木模，该方法还可以降低单个模具的制造成本。另一种可行方法是利用 3D 打印制作节点蜡模然后进行失蜡铸造，可以实现精密的节点铸造。而随着 3D 打印技术、材料、设备等的发展，相信不久的将来直接金属打印也不再会成为技术、成本上难以跨越的鸿沟，从而真正实现节点乃至其他建筑构件工业生产的数字化、快速化和低成本化。此外，通过 3D 打印技术可以减少建筑构件制作中资源和能源的消耗，甚至将打印过程中产生的废弃材料进行回收利用，有助于建筑业真正走向绿色低碳的生态时代。

6 结论

本文基于连续体结构拓扑优化的一般方法，利用优化软件 OptiStruct 对空间结构节点进行了拓扑优化分析，并采用 3D 打印技术完成了优化结果的成型制造。主要结论如下：

(1) 利用 OptiStruct 软件可以实现空间结构节点的拓扑优化分析，该程序基于 SIMP 法建立优化对象的材料密度-刚度插值模型，利用数学规划法进行优化求解计算。

(2) 节点拓扑优化设计的过程应综合考虑棋盘格控制、惩罚系数等求解参数的设置以及对称约束、成员尺寸约束等工艺制造约束的选择，需要通过多次试算、调整才能得到较为满意的优化结果。由于结合了拓扑优化技术，工程师对节点将拥有更广阔的设计空间，所得到的节点受力合理、外观简洁且具有设计美感。

(3) 现阶段完全基于 3D 金属打印的节点制造过程尚存在一定难度且综合成本较高，结合 3D 打

印和传统工艺制造技术，如利用 3D 打印制作复杂铸钢节点的模具、3D 打印蜡模进行失蜡铸造等，是目前可行、且具发展前景的实现途径。

(4) 利用拓扑优化技术和 3D 打印建造技术可以将建筑的外观和结构设计相结合，是实现复杂建筑构件的设计和制造一体化的高效方式，对未来建筑行业的数字化发展具有重要意义。

参考文献

- [1] Bendsoe M P, Sigmund O. Topology optimization: theory, methods, and applications [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2003
- [2] Hassani B, Hinton E. Homogenization and structural topology optimization: theory, practice, and software [M]. London: Springer, 1999
- [3] 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 Shilin. Development and expectation of spatial structures in China [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(6): 38-51 (in Chinese))
- [4] 范重, 杨苏, 栾海强. 空间结构节点设计研究进展与实践[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(12): 1-15 (Fan Zhong, Yang Su, Luan Haiqiang. Research progress and practice of design of spatial structure joints [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(12): 1-15 (in Chinese))
- [5] Donnellan J, Seifi H, Sitler B, et al. Smart nodes pavilion: Bi-directional evolutionary structural optimization and additive manufacturing [C]//Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2015. Amsterdam, 2015: 1-12
- [6] Sigmund O. A 99 line topology optimization code written in Matlab [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2001, 21(2): 120-127
- [7] 范文杰, 范子杰, 苏瑞意. 汽车车架结构多目标拓扑优化方法研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(12): 1505-1508 (Fan Wenjie, Fan Zijie, Su Ruiyi. Research on multi-objective topology optimization on bus chassis frame [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(12): 1505-1508 (in Chinese))
- [8] Ferguson I, Frecker M, Simpson TW, et al. Topology optimization software for additive manufacturing: a review of current capabilities and a real-world example [C]//ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Charlotte, USA, 2016: V02AT03A029
- [9] 洪清泉, 赵康, 张攀, 等. OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 4-6 (Hong Qingquan, Zhao Kang, Zhang Pan, et al. OptiStruct & HyperStudy theoretical basis and engineering applications[M]. Beijing: China Machine Press, 2012: 4-6 (in Chinese))
- [10] Sigmund O, Petersson J. Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima [J]. Structural Optimization, 1998, 16(1): 68-75

[11] Jog C S, Haber R B. Stability of finite element models for distributed-parameter optimization and topology design [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1996, 130(3-4): 203-226

[12] Huang Xiaodong, Xie Yimin. A further review of ESO type methods for topology optimization [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, 41(5): 671-683

[13] 陶雨濛, 张云峰, 陈以一, 等. 3D 打印技术在土木工程中的应用展望[J]. *钢结构*, 2014, 29(8): 1-8 (Tao Yumeng, Zhang Yunfeng, Chen Yiyi, et al. Prospective application of 3D printing technology in civil engineering [J]. *Steel Construction*, 2014, 29(8): 1-8 (in Chinese))

[14] 肖绪文, 马荣全, 田伟. 3D 打印建造研发现状及发展战略[J]. *施工技术*, 2017, 46(1): 5-8 (Xiao Xuwen, Ma Rongquan, Tian Wei. State and development strategy for 3D printing construction technology [J]. *Construction Technology*, 2017, 46(1): 5-8 (in Chinese))

[15] Galjaard S, Hofman S, Perry N, et al. Optimizing structural building elements in metal by using additive manufacturing [C]//*Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2015*. Amsterdam, Netherlands, 2015

[16] Williams N, Prohasky D, Burry J, et al. Challenges of scale modelling material behavior of additive-manufactured nodes [C]//*Modeling Behavior: Design Modelling Symposium 2015*. Cham, Switzerland: Springer, 2015: 45-51

陈敏超 (1992—), 男, 硕士研究生。主要从事大跨空间结构、结构拓扑优化设计方面的研究。
 赵 阳 (1970—), 男, 博士, 教授。主要从事大跨空间结构、钢结构和薄壳结构方面的研究。
 谢亿民 (1963—), 男, 博士, 教授。主要从事工程结构优化和创新设计方面的研究。

勘 误

作者订正:

(1) 2018 年第 8 期《工程结构整体可靠性分析研究进展》第 6 页末段:

对于给定失效界限 $[Z]$, 当满足 $Z_{\text{ext}} > [Z]$ (此处原为 $Z_{\text{ext}} \leq [Z]$) 时, 代表点 u_p 的概率密度函数:

$$p_{U_p, \theta}(u_p, \theta, \tau) = 0 \tag{21}$$

(2) 相应地, 第 7 页式 (24) 应改为:

$$\mathcal{H}[Z(t)] = \begin{cases} 0, & Z_{\text{ext}} \leq [Z] \\ 1, & Z_{\text{ext}} > [Z] \end{cases} \tag{24}$$