

文章编号: 1674-8190(2024)06-164-10

增材制造点阵动力学性能的变截面梁修正方法

朱熙, 孟亮, 张靖, 王锦涛, 高彤, 朱继宏, 张卫红

(西北工业大学 陕西省空天结构技术重点实验室, 西安 710072)

摘要: 增材制造点阵结构在航空航天先进结构设计领域的应用日趋广泛, 对大规模点阵结构静动力学性能的高精高效仿真分析提出了迫切需求。提出增材制造点阵结构变截面梁修正的仿真分析方法, 依据 3D 打印点阵结构动力学响应, 构建并求解变截面梁单元几何参数的反问题模型, 针对不同杆径尺寸 (直径 1.00~2.00 mm) 点阵结构, 分别开展变截面梁参数的反问题标定; 建立变截面梁几何参数随杆径变化的插值模型, 并针对不同杆径尺寸点阵结构和梯度点阵开展变截面梁几何参数插值模型的有效性验证。结果表明: 本文建立的增材制造点阵结构变截面梁单元仿真分析模型与基于实体单元的模型相比, 同等精度下, 动力学性能分析效率提升显著, 有望为复杂梯度点阵结构的动力学优化设计提供高效准确的模型基础。

关键词: 增材制造; 点阵结构; 变截面梁; 反问题求解; 动力学仿真

中图分类号: V214.19; V414.19

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.06.15

Dynamic simulation of additively manufactured lattice structures based on variable cross-section beam elements

ZHU Xi, MENG Liang, ZHANG Jing, WANG Jintao, GAO Tong,

ZHU Jihong, ZHANG Weihong

(Shaanxi Key Laboratory of Aerospace Structures, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To meet the high-precision and efficient simulation needs for the static and dynamic performance of large-scale lattice structures, this paper proposes a simulation analysis method for the calibration of tapered beams in lattice structures. Based on the dynamic response of 3D printed specimen, an inverse problem model for the geometric parameters of the tapered beam element is established and solved. For lattice structures with different diameters, the inverse problem calibration of the tapered beam parameters is carried out respectively, and an interpolation model for the geometric parameters of the tapered beam as a function of rod diameter is established. Finally, the effectiveness of the interpolation model for the geometric parameters of the variable cross-section beam is verified for lattice structures with different rod diameters and gradient lattices. Results show that: compared with the solid element model-based simulation analysis model, the simulation analysis model of tapered beam element established in this study not only has comparable dynamic performance simulation accuracy but also significantly improves the efficiency of analysis.

Key words: additive manufacturing; lattice structures; variable cross-section; inverse problem solving; dynamic simulation

收稿日期: 2024-05-10; 修回日期: 2024-07-08

基金项目: 国防基础科研计划资助(JCKY2022205B020)

通信作者: 孟亮(1989年-), 男, 博士, 副教授。E-mail: liang.meng@nwpu.edu.cn

引用格式: 朱熙, 孟亮, 张靖, 等. 增材制造点阵动力学性能的变截面梁修正方法[J]. 航空工程进展, 2024, 15(6): 164-173.

ZHU Xi, MENG Liang, ZHANG Jing, et al. Dynamic simulation of additively manufactured lattice structures based on variable cross-section beam elements[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(6): 164-173. (in Chinese)

0 引言

在航空航天领域,点阵结构设计(Lattice Structures Design)和增材制造(Additive Manufacturing)因其极高的设计与制造自由度而受到广泛关注。点阵结构具有质轻、比刚度高、隔声/隔热、抗冲击等优良的力学性能,在空天结构轻量化与高性能研制中的应用日趋广泛^[1]。而增材制造这一材料逐层堆积成型工艺,特别适用于点阵等复杂中空零部件的高效制备^[2-3]。将二者有机融合,对提升空天结构性能、实现轻量化快速设计与制造等具有重要意义^[4-5]。

针对增材制造点阵结构,由于单胞尺寸和点阵结构特征尺寸的巨大差异,采用实体单元的仿真分析模型计算成本高且耗时长,严重制约了工程仿真分析和结构设计效率的提升^[6]。为此,研究人员提出了一种基于数值均匀化方法的点阵结构等效建模方法,虽然大幅提升了分析效率,但其主要适用于均匀填充的周期性点阵结构^[7-9]。然而,随着拓扑优化技术和结构仿生设计的不断发展,当前工程点阵结构呈现愈发显著的梯度特征,针对此类结构的静动力学性能高精高效分析需求日益迫切^[10-11]。为此,人们研究使用梁单元开展点阵结构的高效分析。Egan等^[12]从点阵单胞的层面,通过调整梁杆径和单胞尺寸比例,控制点阵单胞的弹性模量和剪切模量等机械性能,从而使其与实体单胞模型材料属性相匹配,修正了梁单元在静力学仿真分析中的误差;Meng L等^[13]基于点阵结构交叉节点附近材料堆积现象,提出了一种变截面梁单元模型,对点阵节点附近的梁截面尺寸进行反问题补偿修正,提升了增材制造点阵结构静强度的高效分析,并开展了静力学实验验证;Smith等^[14]通过增加梁的端部杆径来补偿节点区域的失效接触,使用梁单元对体心立方(Body-Centered Cubic,简称BCC)点阵结构进行准静力学压缩和冲击仿真,有限元仿真结果与实验测量结果吻合良好;Gümrük等^[15]针对选择性激光熔化(Selective Laser Melting,简称SLM)技术制备的点阵结构,在设置梁模型初始刚度时,考虑剪切效应、加工硬化,给出与实际刚度相对应的合理预测刚度,该方法对实验的BCC点阵结构给出了可靠预测;Luxner等^[16]针对梁单元模型在节点附近的刚度偏差,通过在节点处添加一个半径等于杆径的刚性球体进行调整,对四种不同单胞结构进行修正,并通过压缩实验验证了方法的准确性。上

述研究从不同建模角度开展了增材制造点阵结构有限元模型修正方法研究,但增材制造独特的成型工艺导致的点阵内部缺陷和节点处材料堆积现象与变截面梁单元模型高度匹配,相较于其他建模方法更具物理意义。另一方面,上述研究中均是以点阵结构静力学或准静力学性能仿真准确性开展的变截面梁模型修正,但围绕结构动力学响应,相应的梁单元修正方法还缺乏研究^[17-18]。

本文针对增材制造过程中存在点阵节点区域材料堆积现象和均匀截面梁单元模型的分析误差,基于变截面梁单元提出一种点阵结构动力学性能仿真修正方法。采用反问题求解框架,结合全局收敛移动渐近线算法(Globally Convergent Method of Moving Asymptotes,简称GCM-MA)^[19],在维持梁单元计算高效率的同时,提升基于梁单元的点阵结构有限元模型的分析精度,以期点阵结构优化设计提供更为高效和精确的结构性能分析方法^[20]。

1 BCC点阵结构建模

1.1 变截面梁单元参数化建模

本文考虑增材制造点阵结构交叉节点附近材料堆积现象(如图1所示),参考Meng L等^[13]的梁单元建模方法,将组成点阵结构的单一杆件划分为三段梁单元,如图2所示。上下两段梁单元均采用线性过度的变截面(粗端杆径为 d_1 ,细端杆径为 d_2),中间段梁单元为均匀截面。其中变截面段长度依据已有文献研究结果^[14-16],选取为节点附近10%杆长区域。在点阵结构有限元仿真模型中,为了实现对模型精度的修正, d_1 和 d_2 需基于杆径名义尺寸进行反问题标定。

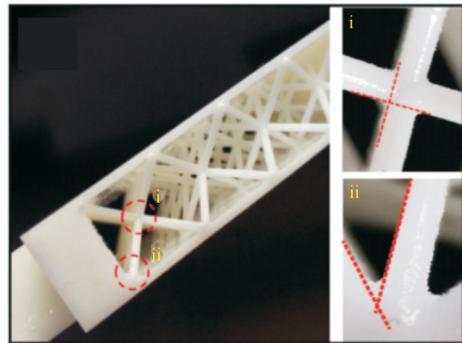


图1 增材制造试件节点处材料堆积现象^[13]

Fig. 1 Material build-up phenomena at joint of AMed specimens^[13]

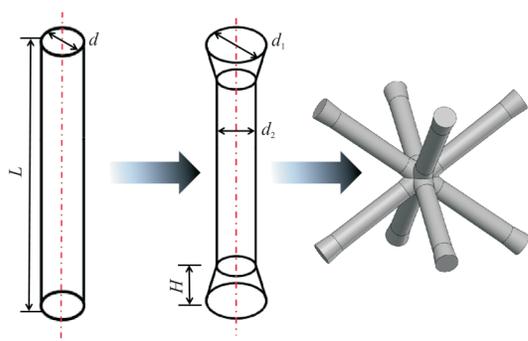
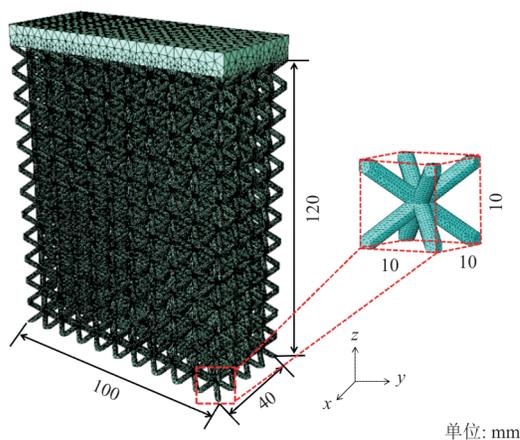


图2 变截面梁单元点阵单胞模型

Fig. 2 Variable cross-section beam element model

1.2 点阵结构有限元建模

鉴于单一点阵单胞的力学响应难以进行实验验证,本文设计带顶板的点阵结构来研究不同杆径下 BCC 点阵的表征物理特性。BCC 单胞尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 单胞沿着 x 、 y 、 z 三个方向阵列, 分别阵列 4、10、12 次。在点阵结构顶部添加顶板, 顶板厚度 8 mm, 点阵结构模型如图 3 所示。

图3 点阵结构模型示意图^[21]Fig. 3 Schematic diagram of lattice structure^[21]

根据上述点阵结构, 分别基于实体单元、均匀梁单元和变截面梁单元建立三种不同的有限元模型。

对于基于实体单元的有限元模型, 在 Solidworks 中建立点阵结构, 并导出到 Abaqus 商用有限元软件, 采用 C3D10 的实体单元对整体进行网格划分, 为消除网格尺寸的影响, 选择最小元素尺寸为梁直径的三分之一, 得到共计约 100 万网格。

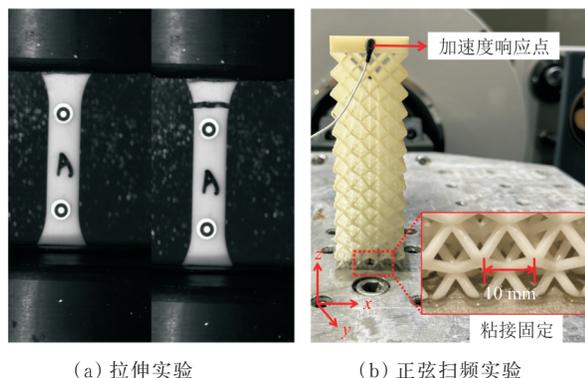
对于基于均匀截面梁单元和变截面梁单元的

有限元模型, 通过对上文建立的单胞进行与实体模型相同的方式阵列。同样地, 在点阵上方添加厚度为 8 mm 的拉伸长方体作为顶板, 并与点阵结构之间进行布尔运算合并, 采用 B31 梁单元类型对杆件进行离散, 采用 C3D8R 实体单元对顶板进行离散, 得到网格数量约为 1 万。

1.3 点阵结构材料属性与阻尼特性标定

以 BCC 点阵结构为例, 采用光敏树脂材料, 通过光固化成型技术 (SLA) 制备点阵结构, 如图 2 所示。为了对该结构开展有限元性能仿真, 在上述结构打印过程中同批次打印拉伸样件 (参考 ISO 3167—2014《塑料—多用途试样》), 通过准静态拉伸实验 (如图 4(a) 所示) 标定得到材料杨氏模量为 2 400 MPa, 选取材料泊松比 0.39^[22]。此外, 测量得到增材树脂密度为 1.3 g/cm^3 。

针对点阵结构动力学响应分析需求, 需进一步标定结构阻尼特性。本文选取直接模态阻尼模型, 通过正弦扫频实验获得该结构的模态阻尼比^[23-24]。点阵结构振动台测试如图 4(b) 所示。为了避免螺纹连接引入的非线性接触问题, 采用氰基丙烯酸酯胶实现点阵结构底面与振动台的粘接。同时, 在有限元仿真中, 对粘接面处点阵节点自由度进行全约束。实验中沿振动台系统 y 方向施加 0.1 g 加速度激励, 激励信号为正弦扫频, 范围 20~1 000 Hz, 扫描速率 1 Oct/min, 获得点阵结构绝对加速度响应的幅频曲线, 如图 5 所示。



(a) 拉伸实验

(b) 正弦扫频实验

图4 点阵结构材料属性与阻尼特性标定实验

Fig. 4 Lattice structure material property and damping characteristic calibration experiment

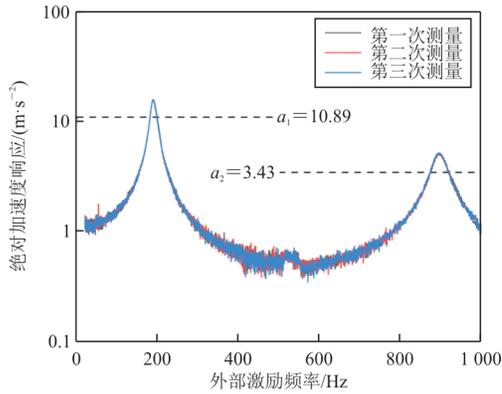


图5 实验绝对加速度测量幅频曲线

Fig. 5 Absolute acceleration amplitude-frequency response curve measured by experiment

从图5可以看出:在20~1 000 Hz频率范围内,存在两个共振峰,分别位于190和895 Hz附近。以幅频响应函数下降到共振峰值 $1/\sqrt{2}$ 时对应的两个频率点,确定半功率带宽 Δf 。其与该共振频率 f_0 的比值即为该阶模态下系统的损耗因子 γ 。模态阻尼比 ξ 和损耗因子的关系如下:

$$\gamma = 2\xi = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (1)$$

根据加速度幅频响应曲线(图5),结合式(1)计算得到结构前两阶阻尼比分别为

$$\begin{cases} \xi_1 = \frac{\Delta f_1}{2f_1} = \frac{198.633 - 181.604}{2 \times 190.256} \approx 0.0448 \\ \xi_2 = \frac{\Delta f_2}{2f_2} = \frac{921.585 - 877.124}{2 \times 895.103} \approx 0.0248 \end{cases}$$

2 变截面梁单元点阵结构反问题方法建立

2.1 反问题数学模型构造

基于变截面梁单元的点阵结构参数进行反问题识别,旨在通过实测动力学响应反求点阵结构变截面梁单元的具体尺寸参数,使得由该组尺寸参数构成的点阵结构动力学响应与真实响应误差较小^[25]。

本文中,点阵结构变截面梁单元的主要尺寸参数包括变截面梁单元粗端杆径 d_1 和细端杆径 d_2 。目标函数为 J ,定义为基于变截面梁单元仿真和动力学实验测量响应之间的误差。优化模型为

$$\text{Find: } \mathbf{d} = [d_1, d_2] \quad (2)$$

$$\text{Minimize: } J(\mathbf{d}) = \sum_{i=1}^N \frac{a_i^s}{a_j^s} \left(\frac{a_i^b - a_i^s}{a_{\max}^s} \right)^2 \quad (j = 1 \text{ 或 } 2)$$

$$\text{Subject to: } d_{1,\min} \leq d_1 \leq d_{1,\max}$$

$$d_{2,\min} \leq d_2 \leq d_{2,\max}$$

$$d_2 < d_1$$

式中: a_i^b 和 a_i^s 分别为频率 i 下变截面梁单元仿真和动力学实验测量得到的加速度响应。

考虑所建立的点阵结构特征频率,在20~1 000 Hz频率范围内以1 Hz为间隔选定共计 $N=981$ 个频率点以计算误差函数。

模型约束中,为了保证修正模型中变截面梁特征尺寸不过度偏离点阵名义杆径,设置不同位置点阵杆径变截面梁尺寸上下限分别为 d_{\min} 和 d_{\max} 。

考虑到一阶共振响应峰值远大于其他频率下加速度响应,在误差函数构建过程中引入最大加速度 a_{\max}^s 对目标函数进行归一化无量纲处理^[20]。同时,引入加权因子 a_i^s/a_j^s 以调整共振峰处响应的权重,提高算法收敛速度。值得注意的是, a_j^s 选取距离测量频率点 a_i^s 最近的共振峰值。

2.2 灵敏度推导

针对2.1节建立的反问题模型,采用梯度优化算法进行求解。首先需确定目标函数等对设计变量的灵敏度信息,采用有限差分法的灵敏度求解格式如下:

$$\frac{\partial J}{\partial d_i} = \frac{J(d_i + \Delta d_i) - J(d_i)}{\Delta d_i} \quad (3)$$

式中: d_i 为反问题优化模型中的变截面梁单元几何参数。

有限差分法求解灵敏度的过程中,差分步长的选取对于灵敏度的求解精度有很大影响,经初步试算选取相对设计变量的0.5%作为灵敏度求解的差分步长。

2.3 优化算法

本文在探索变截面梁点阵结构参数优化问题时,采用Svanberg^[26]提出的全局收敛移动渐近线算法(GCMMA)。GCMMA以其独特的全局收敛特性,利用一对动态调整的上下渐近线,保障近似函数的凸性。这种设计不仅能大幅提高算法的稳定性和效率,还保证在整个设计变量空间内,无论对于线性还是非线性系统,上下渐近线均保持严

格的正值。

3 变截面梁反问题求解及验证

3.1 基于实验测量的变截面梁反问题标定

为了验证反问题方法的可靠性,将上文杆径 2.0 mm 试件动力学实验的结果作为目标,利用变截面梁点阵结构参数反问题对其两个关键参数 d_1 和 d_2 进行识别修正。变截面梁参数优化迭代曲线和目标函数迭代曲线如图 6~图 7 所示。

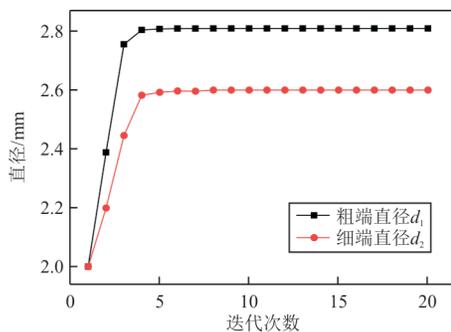


图 6 变截面梁截面直径迭代曲线

Fig. 6 Iteration curve of the diameter of variable cross-section beams

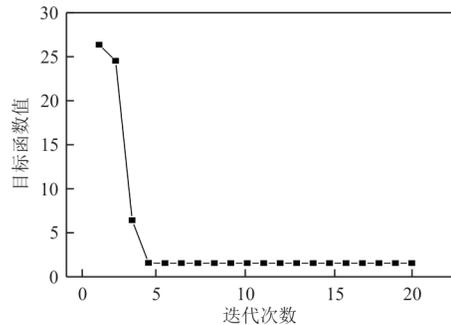


图 7 目标函数迭代曲线

Fig. 7 Iteration curve of the objective function

从图 6~图 7 可以看出:点阵结构动响应实验测量与有限元仿真结果之间的误差在迭代开始后迅速减小,并在 10 个迭代步后趋于收敛,优化过程收敛平稳。最终通过反问题求得的变截面梁粗端杆径为 2.812 mm,细端杆径为 2.602 mm,相对于名义尺寸 2.0 mm 加粗了约 30%~40%,实现了对均匀截面梁的刚度修正。

根据上述优化结果,基于反问题识别得到的梁单元参数重新建立点阵结构的有限元模型,并开展动力学仿真分析。同时基于杆径名义尺寸建立均匀截面梁单元分析模型和实体单元点阵分析模型,并开展相同边界条件结构动力学仿真。提取得到的幅频响应对比如图 8 所示,图中响应曲线的关键数据提取如表 1 所示。

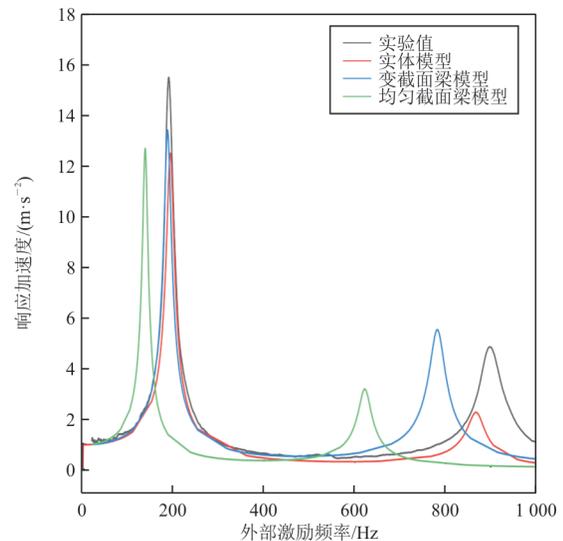


图 8 点阵结构实验和仿真绝对加速度幅频曲线

Fig. 8 Absolute acceleration response curves of lattice structure experimental and simulation results

表 1 实验和仿真响应结果对比

Table 1 Comparison of experimental and simulation results

对比项	f_1/Hz	f_2/Hz	$a_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$a_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	时间/s
实验值	190.26	895.10	15.41	4.85	—
实体模型	192.88 (1.38%)	867.68 (-3.16%)	12.52 (-18.78%)	2.63 (-45.71%)	1578
变截面梁模型	187.19 (-1.61%)	782.50 (-12.58%)	13.42 (-12.91%)	5.54 (14.10%)	50
均匀截面梁模型	137.65 (-27.65%)	622.41 (-30.46%)	12.71 (-17.56%)	3.19 (-34.23%)	49

以实验真实数据作为验证有限元模型准确性的基准。从表 1 可以看出:就前两阶共振频率而言,实体仿真的结果与实验数据吻合度最高,偏差仅为 1.38% 和 3.16%;变截面梁模型在一阶共振频率上的仿真值为 187.19 Hz,比实验值 190.26 Hz 低 1.61%,而均匀截面梁模型为 137.65 Hz,远低于实验值;对于二阶共振频率,均匀截面梁模型的预测值为 622.41 Hz,误差高达 30.46%,而变截面梁模型仿真误差可降低至 12.58%。造成上述不同误差的原因在于实体单元通过精细的网格划分可实现复杂结构不同位置应力应变的准确仿真,并捕捉应力集中等局部效应,然而基于线框模型的梁单元建模方法,在描述点阵交叉节点(梁单元节点)处力学行为时,存在较大的模型误差。

此外,针对最大加速度响应,基于实体单元和梁单元的仿真模型获得的一阶响应加速度相较实验测量值误差均在 15% 左右,而二阶响应加速度相较实验测量值误差呈现放大的趋势。上述现象表明,变截面梁单元模型对动响应幅值修正效果欠佳,其原因在于加速度响应峰值与结构阻尼密切相关;此外,加速度计装贴位置精度等对提取的响应数值也有较大影响,实验中可能引入较大的测量误差。总而言之,经过反问题求解得到的变截面梁模型,在保证可接受的误差范围内,较大程度地提升了增材制造点阵结构的动响应分析效率。针对本文中的点阵结构,分析计算时间由原来的 1 500 s 缩短至 50 s,同时相比均匀截面梁单元模型,与实验测量数据误差更小。

3.2 点阵变截面梁参数插值模型

3.1 节已基于 2.00 mm 点阵结构验证了变截面梁修正的点阵结构有限元模型的有效性。本节将针对其余 5 种不同杆径点阵结构开展同样的反问题求解,标定变截面梁模型关键几何尺寸,并建立参数化插值模型,以实现任意杆径下点阵结构高精高效分析模型的快速建立。

鉴于图 8 中基于实体单元的有限元仿真结果与实验测量结果较高的吻合度,后续研究中将采用基于实体单元的有限元仿真结果近似替代实验测量结果,并构造反问题优化目标,以避免繁琐的增材制造点阵打印和动力学实验。

本文基于杆径分别为 1.00、1.20、1.40、1.60、1.80 和 2.00 mm 的点阵结构实体仿真结果,分别

进行变截面梁参数反问题求解,得到各杆径的变截面梁参数结果如表 2 所示,可以看出:变截面梁标定尺寸均大于点阵杆件名义尺寸,且尺寸增强效果随着名义尺寸的增加而增长。

表 2 不同名义尺寸下变截面梁参数
Table 2 Parameters of variable cross-section beams under different nominal sizes

名义尺寸 d/mm	粗端杆径 d_1/mm	细端杆径 d_2/mm
1.00	1.13	1.09d
1.20	1.44	1.31
1.40	1.78	1.56
1.60	2.02	1.88
1.80	2.37	2.22
2.00	2.82	2.48

识别得到的 d_1 、 d_2 与杆件名义尺寸拟合关系如图 9 所示,采用二次多项式进行插值,拟合得到的插值关系为

$$\begin{cases} d_1 = 0.321d^2 + 0.681d + 0.144 \\ d_2 = 0.258d^2 + 0.676d + 0.146 \end{cases} \quad (4)$$

以方差和均方误差作为插值模型准确度衡量指标,其值分别为 0.001 116 和 0.000 527,表明插值模型拟合精度高。

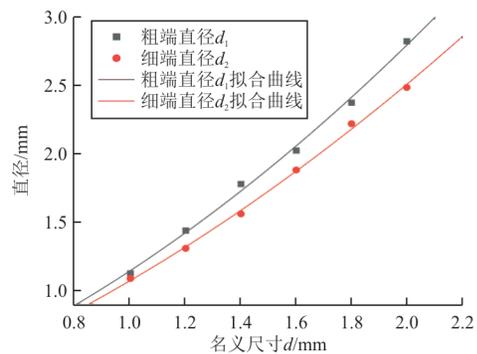


图 9 变截面梁参数插值拟合曲线
Fig. 9 Interpolation fitting curve for variable cross-section beams

值得注意的是,式(4)中的插值模型是基于本文选取的光敏树脂打印工艺和 BCC 点阵单胞构型获得的,其对金属增材制造点阵或其他单胞构型的有效性还有待进一步验证,但是本文所提方法具有普适性,并不受材料属性和单胞类型等的限制。

3.3 点阵变截面梁参数插值模型验证

为了验证变截面梁参数插值模型的修正能力

和适用性,从三个维度对模型进行系统地验证:首先,对未经反问题标定的杆径参数进行验证;其次,改变宏观点阵结构尺寸验证模型有效性;最后,将插值模型应用于复杂梯度点阵结构,以探索其在高性能梯度结构设计方面的应用潜力。

考虑到工程结构中最关注的一阶共振频率下结构动力学响应^[27],后续研究中将主要聚焦于点阵结构一阶共振响应,选取的关注频率范围为0~300 Hz。

3.3.1 不同杆径点阵验证

本文通过构造不同杆径点阵结构并采用不同有限元模型开展分析,以验证式(4)插值模型的有效性。特别地,所选取的杆径分别为1.10、1.50和1.90 mm,均未开展变截面梁单元的反问题标定,将上述杆径名义尺寸直接代入插值模型,获得不同结构对应的变截面梁参数,如表3所示。

表3 不同杆径变截面梁参数修正
Table 3 Parameter correction for variable cross-sections beams with different diameters

名义尺寸 d/mm	粗端杆径 d_1/mm	细端杆径 d_2/mm
1.10	1.28	1.19
1.50	1.89	1.73
1.90	2.60	2.34

根据插值模型修正的参数建立变截面梁单元模型,并和实体单元模型进行对比,得到3种名义尺寸下的实体单元和变截面梁单元模型仿真结果如图10所示,主要误差及对比如表4所示。

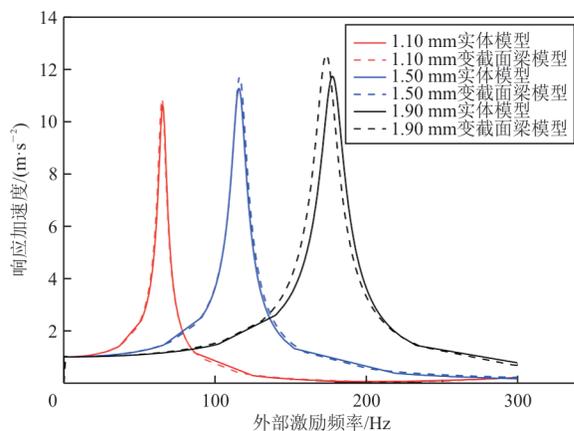


图10 不同杆径变截面梁单元和实体单元点阵结构加速度幅频曲线

Fig. 10 Acceleration amplitude-frequency response curves for lattice structures with variable cross-sections beam and solid elements of different diameters

表4 不同杆径变截面梁单元和实体单元点阵结构响应结果对比

Table 4 Comparative response results of variable cross-sections beam and solid elements of different diameters

名义尺寸/mm	对比模型	f_1/Hz	$a_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
1.10	实体模型	65.22	10.63
	变截面梁模型	64.87 (-0.54%)	10.88 (2.32%)
1.50	实体模型	115.62	11.27
	变截面梁模型	116.24 (0.53%)	11.71 (3.89%)
1.90	实体模型	177.38	11.73
	变截面梁模型	173.51 (-2.18%)	12.57 (7.15%)

从图10和表4可以看出:修正后的变截面梁点阵仿真在一阶共振频率和峰值加速度上与实体仿真结果接近,共振频率误差在3%以内,加速度误差都在8%以内,表现出良好的修正效果。

3.3.2 不同尺寸点阵结构验证

选取两种点阵结构开展方法验证。其中,点阵单胞大小10 mm、杆径1.60 mm,单胞沿 x 和 y 方向阵列10次和4次。此两种结构在竖直方向上分别阵列15次和9次,结构高度分别为150和90 mm,如图11所示。上述模型构建参数的选取可实现两种结构基频的较大区分,以充分验证方法的有效性。

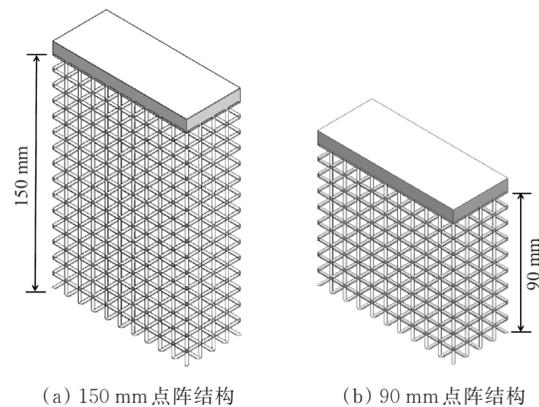


图11 不同尺寸点阵结构
Fig. 11 Schematic diagram of lattice structure in different sizes

将杆径名义尺寸为1.60 mm时标定得到的变截面梁参数用于有限元建模,开展动力学仿真分

析,得到的加速度幅频响应曲线与基于实体单元的分析结果对比如图 12 所示。

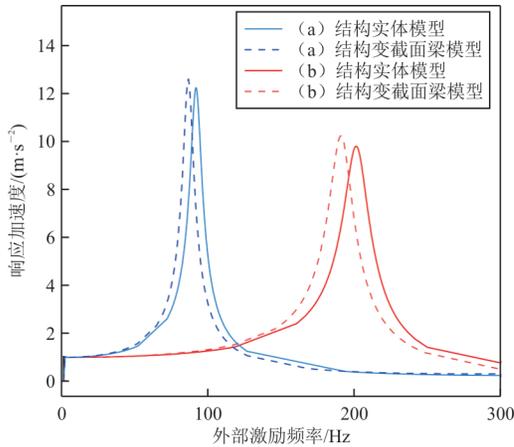


图 12 不同尺寸点阵结构变截面梁单元和实体单元加速度幅频曲线

Fig. 12 Acceleration amplitude-frequency response curves for lattice structures with variable cross-section beam and solid beam elements of different dimensions

一阶共振频率和共振峰峰值误差如表 5 所示,可以看出:不同尺寸结构的一阶共振频率分析误差均控制在 6% 以内,峰值加速度误差同样保持在 5% 以内,均具有较高的精度,表明所建立的变截面梁参数插值模型具有较强的适用性。

表 5 不同杆径变截面梁单元和实体单元点阵结构响应结果对比

Table 5 Comparative response results of variable cross-sections beam and solid elements of different dimensions

点阵结构尺寸/mm	对比模型	f_1/Hz	$a_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
150	实体模型	90.88	12.25
	变截面梁模型	85.72 (-5.69%)	12.61 (2.94%)
90	实体模型	200.67	9.81
	变截面梁模型	190.77 (-4.93%)	10.24 (4.47%)

3.3.3 梯度点阵结构验证

考虑到梯度点阵极高的设计灵活度和应用潜力^[28],继续验证所建立的变截面梁插值模型应用于功能梯度点阵结构动力学分析中的有效性。为此,将图 3 高度为 120 mm 的点阵结构分为 3 段,每段分别采用 1.2、1.6 和 2.0 mm 不同杆径点阵单胞进行填充,生成梯度点阵模型,如图 13 所示。

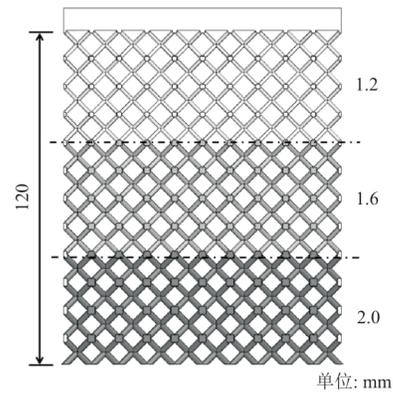


图 13 梯度点阵示意图

Fig. 13 Schematic diagram of gradient lattice structure

同样地,根据如表 3 所示的不同名义尺寸下变截面梁参数,分别构建基于变截面梁单元的点阵结构动力学仿真修正模型和名义尺寸下基于实体单元及均匀截面梁单元的分析模型。开展动力学仿真分析,提取加速度幅频响应曲线如图 14 所示,关键数据提取如表 6 所示。

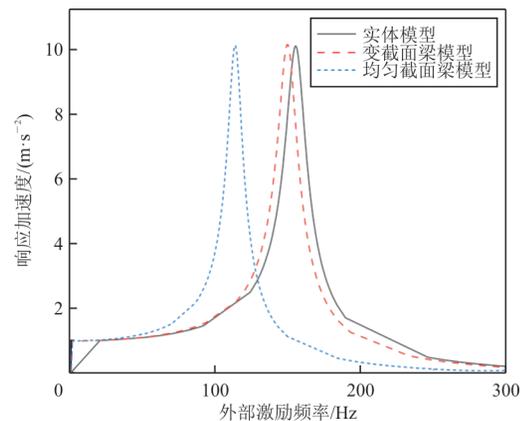


图 14 梯度点阵结构不同单元类型加速度幅频曲线

Fig. 14 Acceleration amplitude-frequency response curves for gradient lattice structures using different element types

表 6 梯度点阵不同单元类型响应结果对比

Table 6 Comparative response results of gradient lattice structures with different element types

单元类型	f_1/Hz	f_1 误差/%	$a_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	a_1 误差/%
实体模型	155.65	—	10.13	—
变截面梁模型	149.59	-3.89	10.16	0.38
均匀截面梁模型	107.91	-30.67	10.14	0.10

从图 14 和表 6 可以看出:首先,一阶共振频率下,不同分析模型得到的加速度峰值相差较小,表明变截面梁单元尺寸的改变并不能调控结构系统的阻尼特性;其次,对比一阶共振频率分析误差,

发现变截面梁模型与实体模型高度吻合,误差仅为 -3.89% ,而均匀截面梁的仿真值相较实体仿真值,误差高达 -30.67% 。总之,相比于均匀截面梁模型,变截面梁模型仿真精度显著提高,进一步证实了变截面梁模型在修正梁单元梯度点阵动力学响应方面的准确性与实用性,为未来复杂点阵结构的高效设计与分析提供了可靠的仿真工具。

4 结 论

1) 本文所建立的基于变截面梁单元的点阵结构动力学仿真模型具有较高的分析精度。通过与振动扫频实验结果对比,一阶共振频率仿真误差由均匀截面梁单元模型的 30% 降至 8% 以内。

2) 所建立的基于变截面梁单元的点阵结构动力学仿真模型仿真效率大幅提升。针对本文中的点阵结构,分析计算时间由实体单元模型的 $1\ 500\text{ s}$ 缩短至 50 s 。

3) 通过反问题求解标定得到的点阵结构变截面梁参数插值模型具有较高的适应性。应用于不同杆径和结构尺寸的周期点阵及梯度点阵,动力学性能仿真均获得了较高的计算精度,有望进一步服务于跨尺度点阵结构的功能梯度优化设计。

参 考 文 献

- [1] 杨亚政, 杨嘉陵, 曾涛, 等. 轻质多孔材料研究进展[J]. 力学季刊, 2007, 28(4): 503-516.
YANG Yazheng, YANG Jialing, ZENG Tao, et al. Progress in research work of light materials[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2007, 28(4): 503-516. (in Chinese)
- [2] 朱继宏, 何飞, 张卫红. 面向增材制造的飞行器结构优化设计关键问题[J]. 航空制造技术, 2017, 60(5): 16-21.
ZHU Jihong, HE Fei, ZHANG Weihong. Key optimization design issues for achieving additively manufactured aircraft and aerospace structures [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(5): 16-21. (in Chinese)
- [3] 尤熙雯, 高彤, 张卫红. 增材制造损坏替换件拓扑优化设计方法[J]. 航空工程进展, 2024, 15(1): 23-29, 50.
YOU Xiwen, GAO Tong, ZHANG Weihong. Topology optimization method for designing replacement of the damaged part[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(1): 23-29, 50. (in Chinese)
- [4] 邱吉宝, 张正平, 向树红, 等. 结构动力学及其在航天工程中的应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2015.
QIU Jibao, ZHANG Zhengping, XIANG Shuhong, et al. Structural dynamics and its application in aerospace engineering [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2015. (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 Jihong, 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] 陈玉丽, 马勇, 潘飞, 等. 多尺度复合材料力学研究进展[J]. 固体力学学报, 2018, 39(1): 1-68.
CHEN Yuli, MA Yong, PAN Fei, et al. Research progress in multi-scale mechanics of composite materials [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2018, 39(1): 1-68. (in Chinese)
- [7] BABUŠKA I. Homogenization approach in engineering [C]// Computing Methods in Applied Sciences and Engineering: Second International Symposium. Berlin, Heidelberg: Springer, 1976: 137-153.
- [8] BENSOUSSAN A, LIONS J L, PAPANICOLAOU G. Asymptotic analysis for periodic structures[M]. US: American Mathematical Society, 2011.
- [9] ARABNEJAD S, PASINI D. Mechanical properties of lattice materials via asymptotic homogenization and comparison with alternative homogenization methods [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 77: 249-262.
- [10] SEHARING A, AZMAN A H, ABDULLAH S. A review on integration of lightweight gradient lattice structures in additive manufacturing parts[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12(6): 1-18.
- [11] 张卫红, 周莹, 酒丽朋, 等. 特征驱动的结构拓扑优化方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(10): 1177-1185.
ZHANG Weihong, ZHOU Ying, JIU Lipeng, et al. Feature-driven method for structural topology optimization [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(10): 1177-1185. (in Chinese)
- [12] EGAN P F, GONELLA V C, ENGENSERGER M, et al. Computationally designed lattices with tuned properties for tissue engineering using 3D printing [J]. PLoS One, 2017, 12(8): e0182902.
- [13] MENG L, QIU X Y, GAO T, et al. An inverse approach to the accurate modelling of 3D-printed sandwich panels with lattice core using beams of variable cross-section [J]. Composite Structures, 2020, 247: 112363.
- [14] SMITH M, GUAN Z, CANTWELL W J. Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 67: 28-41.
- [15] GÜMRÜK R, MINES R A W. Compressive behaviour of stainless steel micro-lattice structures [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 68: 125-139.
- [16] LUXNER M H, STAMPFL J, PETTERMANN H E. Numerical simulations of 3D open cell structures-influence of structural irregularities on elasto-plasticity and deformation localization [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44(9): 2990-3003.
- [17] PTOCHOS E, LABEAS G. Elastic modulus and Poisson's ratio determination of micro-lattice cellular structures by analytical, numerical and homogenisation methods [J]. Journal

