

射频离子推力器壳体结构点阵材料拓扑优化

杨立博, 石 波, 鲁海峰, 李济源, 谭 畅

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘要 针对射频离子推力器的壳体结构轻量化要求, 研究了点阵材料拓扑优化设计思路和方法。首先, 通过静力学仿真和动力学仿真对原结构进行了分析, 获得了结构改进基础; 其次, 应用结构拓扑优化方法获得了结构的传力路径; 再次, 结合传力路径和壳体结构的安装使用要求, 获得了最佳的点阵材料优化设计域; 最后, 通过点阵材料优化设计, 获得了最佳的点阵拓扑优化结构方案。与原结构进行对比, 优化方案质量减小 31.5%; 动力学方面, 结构模态整体提升, 较好避开了推力器工作时的振动频率范围; 受载条件下结构最大应力降低达 59%~67%, 应力分布更加均匀, 结构变形也相应减小, 结构刚度有所提升。优化后结构的轻量化和性能改善验证了设计方法的有效性。

关键词 射频离子推力器; 壳体; 轻量化; 点阵材料拓扑优化

中图分类号 V439⁺.4 **文献标识码** A **文章编号** 1672-9374(2023)04-0051-09

Topological optimization of lattice material for shell structure of RF ion thruster

YANG Libo, SHI Bo, LU Haifeng, LI Jiyuan, TAN Chang

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract Aiming at the light weight requirement of the shell structure of RF ion thruster, the idea and method of topology optimization design of lattice material were studied. Firstly, the original structure was analyzed by statics simulation and dynamics simulation to obtain the improved foundation of the structure. Secondly, the force transfer path of the structure was obtained by using the topology optimization method of the structure. Thirdly, the optimum design domain of lattice material was obtained by combining the load transfer path and the installation and use requirements of shell structure. Finally, the optimal scheme of lattice topology optimization was obtained through the optimal design of lattice materials. Compared with the original structure, the mass of the optimized scheme was reduced by 31.5%. In terms of dynamics, the modals of the structure was improved, which is better to avoid the vibration frequency range of the thruster when working. Under load, the maximum stress of the structure was reduced by 59%-67%. The stress distribution of the structure is more uniform, the deformation of the structure is reduced correspondingly, and the stiffness of the structure is improved. The light weight and performance improvement of the optimized structure verify the effectiveness of the design method.

Key words RF ion thruster; shell; light weight; topology optimization of lattice materials

收稿日期:2022-10-12;修回日期:2022-10-31

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC1907000)

作者简介:杨立博(1989—),男,硕士,高级工程师,研究领域为等离子体应用总体设计。

0 引言

电推进具有高比冲、长寿命、小推力及长时间连续工作的优势,可显著提升航天器的有效载荷质量比,国内外航天发展都对电推进提出了大量需求^[1]。射频离子推力器作为一种电推进发动机,主要由壳体、射频天线、放电室、屏栅、加速栅、气体分配器等构成,结构原理图见图1^[2]。其中,壳体是推力器中质量占比最大的零件之一,轻量化对降低发射成本、提高星上有效载重具有重大意义。

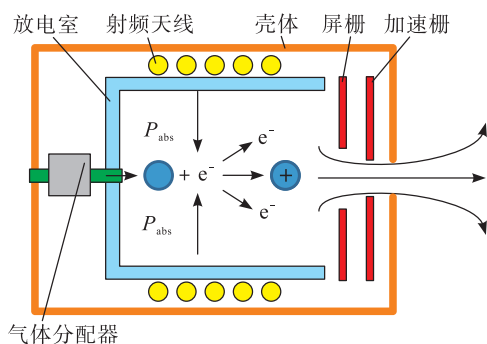


图1 射频离子推力器结构原理图

Fig.1 Structure schematic diagram of RF ion thruster

某型射频离子推力器壳体具有以下功能:①壳体是射频离子推力器安装的基础,推力器的主要零件都是依靠壳体支撑固定,在承受静载荷时,壳体的刚度和强度应满足连接需要;②壳体整个服役周期内需承受振动冲击等动载荷,壳体结构的刚度和强度满足设计要求;③壳体有屏蔽外部电磁辐射的功能。该射频离子推力器的推力为毫牛级,工作过程中承受的极限载荷是卫星发射时运载火箭产生的加速度载荷和振动冲击动载荷,因此推力器壳体的结构设计以提高结构刚度为主要目标,通过结构优化调整结构的自然频率来减轻与振动源的动力耦合,降低结构在动态载荷下的应力^[3]。

拓扑优化作为常见的轻量化设计方法的一种,其可获得结构设计域内的最佳传力路径,通过对所得路径上材料的保留或削减进行设计,实现材料的优化分配^[4]。拓扑优化形成的结构一般为框架结构,无法满足电磁屏蔽对结构连续性的要求。因此可以在拓扑优化的基础上开展点阵材料结构优化,

实现射频离子推力器的轻量化。

点阵材料作为一种桁架单胞结构周期排布的功能材料,具有优异的比强度、比刚度、流体渗透性、传热性和减振吸能性等多种连续材料所不具备的特性,并且电磁波在点阵材料的孔隙界面处能够发生反射和散射,可以达到良好的电磁屏蔽效果^[5-8]。随着增材制造技术的发展成熟,点阵材料与拓扑优化相结合的优化方法得以实现应用,目前已在汽车吸能结构^[9]、建筑隔热^[10]、航天航空轻量化^[11-12]以及生物医疗^[13]领域有成熟应用案例。

对于点阵材料拓扑优化方法的研究,国内外开展了理论研究。Coelho等提出了采用外回路和内回路方法的拓扑优化方法,外回路优化材料宏观设计,内回路采用均匀化法对点阵单元进行拓扑优化^[14]。廖中源等为实现变密度点阵结构体的优化设计,提出了一种基于均匀化方法的多尺度拓扑优化方法^[15]。Wang等将渐进均匀化方法用于点阵材料多尺度等几何拓扑优化,证明了单胞拓扑结构在点阵结构最优分布密度中的作用^[16]。冯佳宾开展了变密度法在连续体与点阵材料拓扑优化中的应用研究,提出了在宏观和微观量尺度上使用变密度法优化的点阵材料多尺度优化方法^[17]。

本文参考上述点阵拓扑优化方法思想,针对某型射频离子推力器壳体,基于变密度法,开展最大刚度目标下点阵拓扑轻量化设计。首先获得原结构的力学性能指标,作为设计基础;然后对结构进行最大刚度拓扑优化获得最优点阵材料设计域;最后进行点阵材料的优化填充,获得点阵材料拓扑优化结果。

1 射频推力器壳体原结构分析

1.1 射频推力器壳体原结构

某射频离子推力器总体结构见图2(a),推力器内部设备连接固定于推力器壳体上,其中 x 向位于推力器圆柱壳体的轴向方向, y 向、 z 向位于推力器圆柱壳体的径向方向。因机加工工艺限制,推力器壳体采用了框梁式薄壁加筋结构,分割透视图见图2(b)。

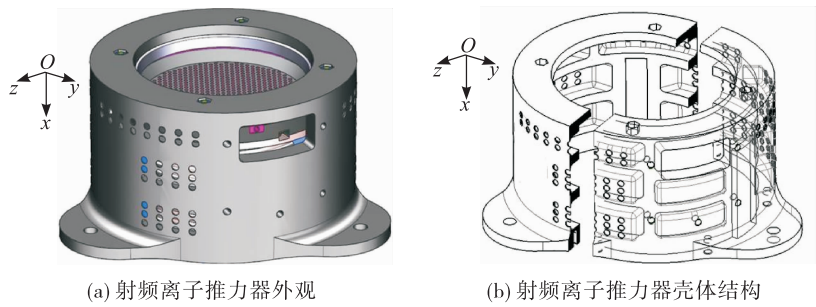


图 2 射频离子推力器壳体
Fig.2 RF ion thruster shell

1.2 载荷分析

在射频离子推力器随火箭发射阶段,需承受较大的加速度和振动载荷,具体见表 1 和表 2。最大加速度载荷为 z 向 12 g ,随机振动频率分布在 $20\text{ Hz} \sim 2\text{ kHz}$ 范围内,因此本文后续动力学分析主要分析 2 kHz 以内的模态。

表 1 加速度载荷
Tab.1 Acceleration load

z 方向 加速度/ g	x,y 方向 加速度/ g	保持时间/ min	加载速率/ ($g \cdot \text{min}^{-1}$)
12	9	5	<5

表 2 随机振动条件
Tab.2 Random vibration condition

频率范围/Hz	功率谱密度
20 ~100	+3 dB/oct
100 ~600	$0.25\text{ g}^2/\text{Hz}$
600 ~2 000	-9 dB/oct
总均方根值	14.33

1.3 结构承载能力分析及试验验证情况

将壳体内与壳体相连的各零部件简化定义为集中质量点,布置在实际结构的质心位置,并赋予质量惯量特性,通过静力学仿真和动力学仿真,可以获得推力器壳体在加速度载荷和随机振动条件下的响应特性。推力器壳体在加速度载荷下的应力分布和变形情况见表 3 和图 3,推力器壳体 2 kHz 以内的模态计算结果见表 4,对应模态振型变化趋势见图 4。

表 3 推力器壳体加速度载荷响应结果
Tab.3 Results of acceleration load response of
the thruster shell

加速度 方向	加速度 量级/ g	结构最大 应力/MPa	结构最大 变形/ μm
x 向	9	2.70	0.79
y 向	9	4.20	1.70
z 向	12	5.59	2.30

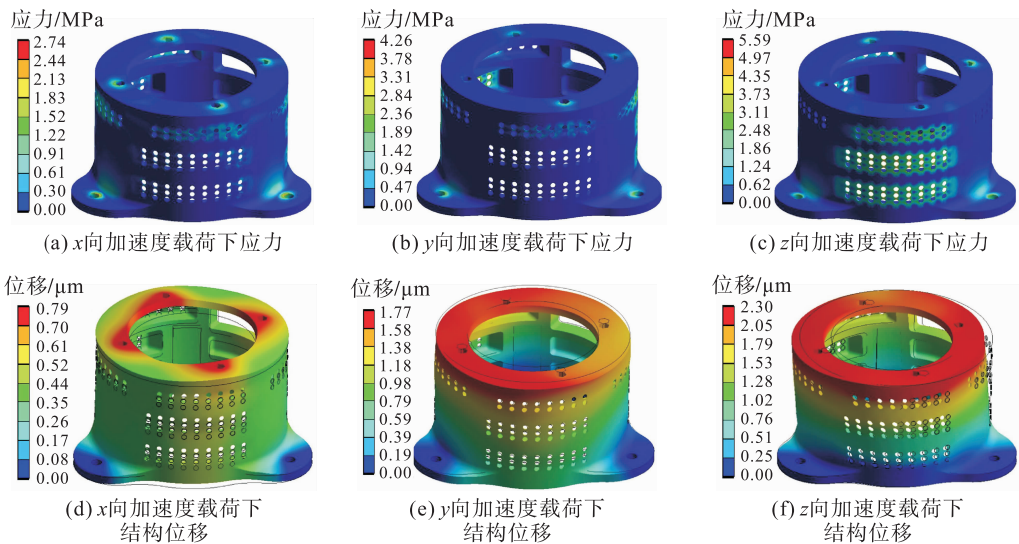


图 3 推力器壳体在加速度载荷下的应力和位移云图
Fig.3 Displacement and stress distribution nephogram of thruster shell under acceleration load

表 4 推力器壳体模态分析结果

Tab. 4 Modal analysis results of the thruster shell

阶数	1	2	3	4	5
固有频率/Hz	1 198	1 256	1 817	1 953	2 010

通过仿真结果分析可得出如下结果。

1) 加速度载荷下结构最大应力为 5.59 MPa, 远小于材料的许用强度。

2) 加速度载荷下结构最大变形 2.3 μm , 远小于结构的最大变形要求。

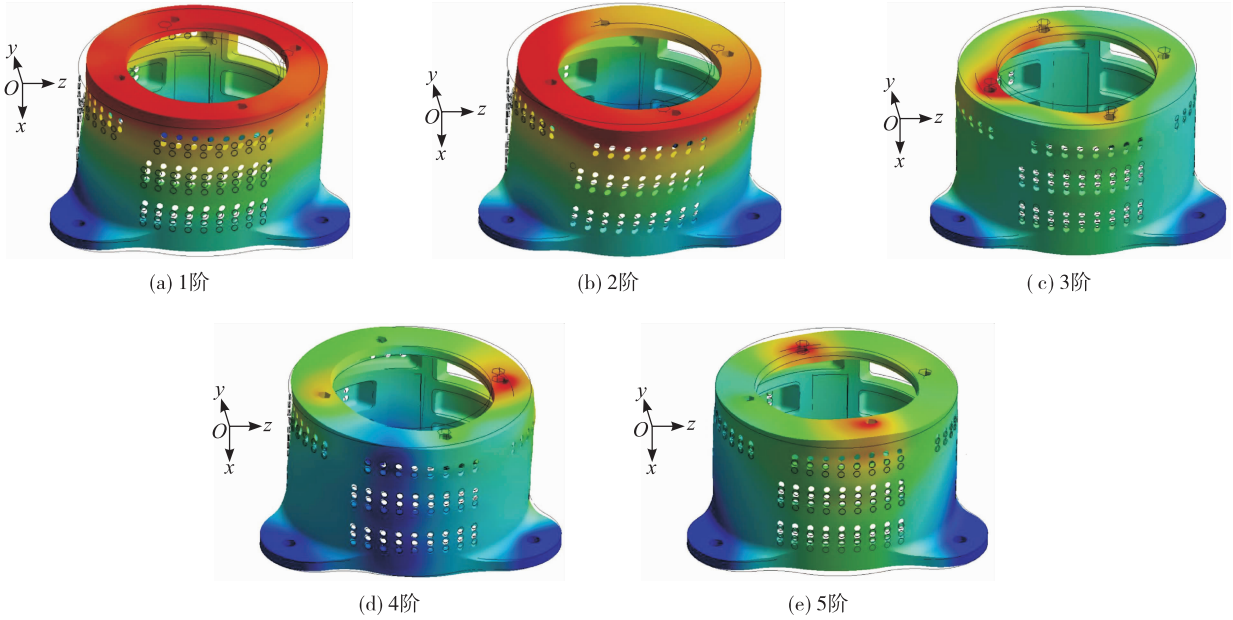


图 4 推力器壳体模态振型

Fig. 4 Mode shapes of the thruster shell

3) 结构的动力学性能前 5 阶模态均处于 2 kHz 以内或附近, 低阶模态有待提升。

射频离子推力器产品结构原方案通过加速度载荷试验和振动试验, 加载试验过程中结构无明显变形, 试后结构完好, 说明原结构受载时应力较小; 试验获得模态数据与仿真模态数据偏差在 5% 以内, 验证了仿真的准确性。因此可以将推力器原结构通过仿真分析方法获得的性能数据作为设计基准进行优化设计。

综上, 原结构很多区域强度和刚度余量过大, 但动力学性能有待提升, 可进一步开展结构轻量化设计, 提升材料利用率。因原结构采用机加工工艺, 受零件整体尺寸和安装要求限制, 结构上可尺寸优化空间少, 且采用电火花加工导致产品的制造周期长和成本高。因此采用基于 3D 打印增材制造的点阵材料拓扑优化技术, 可以针对上述问题提供更优的解决方案。

2 点阵拓扑优化技术

2.1 优化数学模型

本文拓扑优化和点阵填充优化均采用最小柔度变密度算法: 以结构的最小柔度 (反比于结构的刚度) 为目标, 以限定材料体积约束、结构在载荷下的变形和结构的频率为约束下, 寻找材料在设计域内的最佳拓扑构型, 具体可表述为^[18]

$$\text{find } \boldsymbol{\rho} = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n)$$

$$\min C = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{e=1}^N (\rho_e)^p \mathbf{u}_e^T \mathbf{k}_e \mathbf{u}_e$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{U} \\ f_i \geq f_{\min} \\ u_e \leq u_{\max} & i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{e=1}^n \rho_e V_e \leq V_{\max} & e = 1, 2, \dots, n \\ 0 \leq \rho_{\min} \leq \rho_e \leq 1 \end{cases}$$

(1)

式中: ρ, ρ_e 均为单元的相对密度,取值范围(0,1); n 为单元的数量; C 为结构柔度; U 为总体位移矩阵; F 为总体受力矩阵; K 为总体刚度矩阵; p 为惩罚系数; u_e 为单元位移; k_e 为单元刚度矩阵; f_i 为结构第 i 阶模态的频率; f_{\min} 为结构第 i 阶模态频率的下限; m 为频率约束的数量; u_{\max} 为最大位移约束; V_e 为单元体积; V_{\max} 为结构体积约束上限; ρ_{\min} 为最小相对密度(避免结构不连续)。

2.2 拓扑点阵胞元结构选型

在点阵拓扑优化设计中常采用的三维点阵胞元结构有面心立方、体心立方、八面体结构、金刚石结构、四面体型、三维 Kagome 结构等^[19]。对于点阵胞元结构的力学性能研究,可采用理论分析法、数值仿真法和实验法。理论分析法一般通过均匀化方法获得点阵结构的等效力学性能^[20]。数值仿真法是通过有限元建模仿真分析得到点阵胞元结构的等效弹性模量、等效剪切模量等力学性能^[21]。实验法对3D打印的点阵承力部件采用准静态单向力学实验来获得点阵结构的静力学性能^[22]。经过研究对比,金字塔型和四面体型点阵胞元结构材料密度低、抗压强度高、抗冲击防护能力强、缓冲吸能特性好,因此采用此种点阵胞元结构进行点阵优化设计。

2.3 点阵填充设计技术

在进行点阵填充设计时,为实现点阵晶格的随型高效填充设计,充分考虑以下核心要点^[23]。

1) 点阵胞元结构晶格设计,构建结构参数与力学性能的数学及几何模型。

2) 设计域内的网格框架划分,尤其是复杂的贴合曲面曲率的随型框架生成。

3) 镂空结构体填充,尤其是实体与点阵结构过渡和局部镂空结构的拓扑优化设计。

3 点阵拓扑优化设计流程

参考文献[24],点阵拓扑优化设计主要工作为:①通过拓扑优化设计确定点阵填充空间;②开展点阵填充优化设计。设计流程图见图5。

在设计过程中,需要关注的要点如下。

1) 同等质量的点阵结构与固体结构对比,点阵结构刚性更大但承载能力相对削弱。因此,在第一轮拓扑优化确定点阵填充空间的过程中,应力约束

需要适当放宽。

2) 在点阵优化设计过程中,点阵的尺寸参数(点阵单元尺度、杆的直径等)和点阵填充率为设计变量,需要按照3D增材制造点阵工艺要求和性能约束要求开展多轮参数优化迭代。

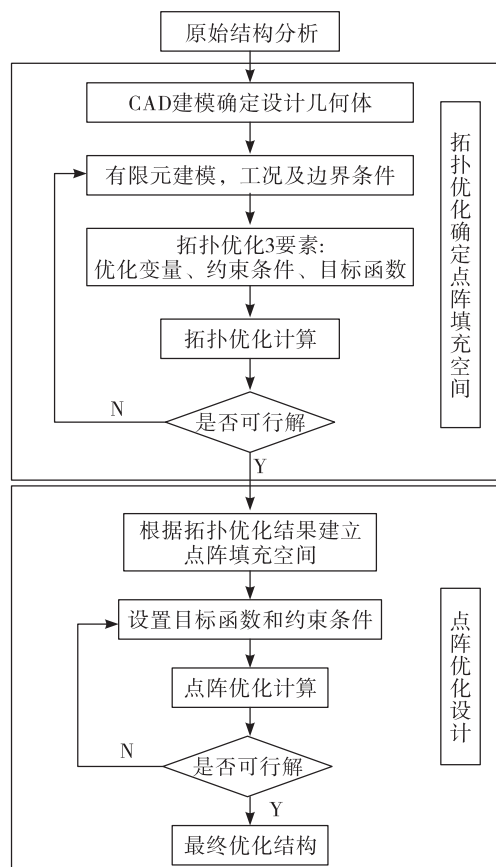


图5 点阵优化设计流程图

Fig. 5 Flow chart of lattice optimization design

4 射频推力器壳体结构优化

4.1 结构拓扑优化设计

以全壳体为设计域,壳体结构的支撑刚度最大化为设计目标,优化后结构的体积比、最大应力和振动模态对应频率限制(以前5阶固有频率大于原结构各阶固有频率为约束)为设计约束,开展拓扑优化设计,得到全壳体设计域拓扑优化结果,可以获得结构的主要传力路径及承力框架的结构布局,具体见图6(a)。

以优化后拓扑结构为基础,结合推力器壳体的安装要求,在3处固定耳处增加安装槽道,并再次开

展拓扑优化,获得体积比、最大应力和振动模态对应频率限制约束下带有安装槽道的结构传力路径,见图 6(b)。

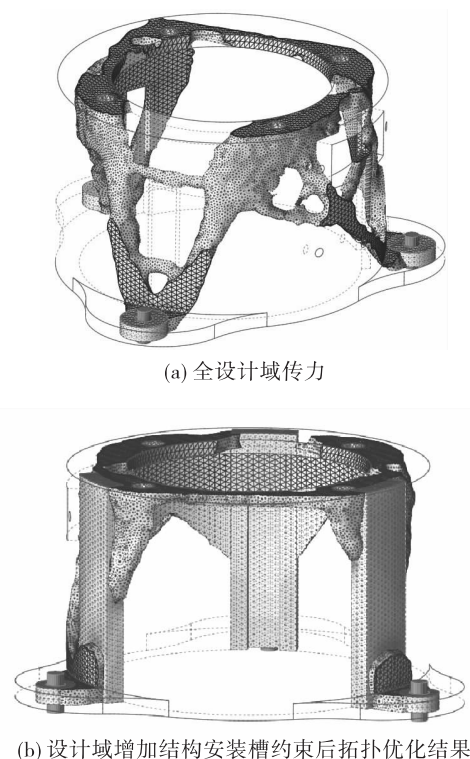


图 6 拓扑优化计算结果

Fig. 6 Topology optimization calculation results

4.2 点阵优化设计

在 4.1 节结构拓扑优化结果基础上,开展点阵填充空间的设计。考虑结构的空间包络约束要求以及电磁屏蔽对结构的连续包覆性要求,将 4.1 节主传力路径上结构进行材料保留加厚,空缺部分填充满足电磁屏蔽要求的点阵结构。经过设计估算,确定了点阵结构的设计域(见图 7)。

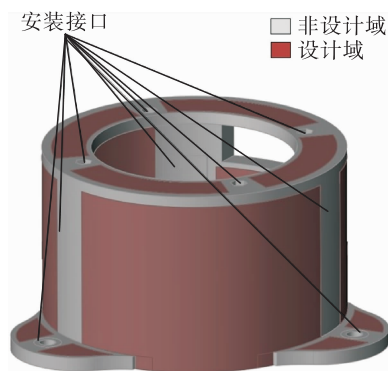


图 7 点阵优化结构设计域

Fig. 7 Design domain of lattice optimization structure

在点阵优化设计阶段,与原安装结构对比,提出以下设计目标。

- 1) 结构质量降低 30 %。
- 2) 安装结构的最大变形和最大应力均不增大。
- 3) 安装结构 1 阶振动频率大于 1.2 kHz,其他各阶振动频率均不降低。
- 4) 结构连续,点阵结构最稀处满足电磁屏蔽要求。

通过调整点阵微结构的尺寸包络、点阵微小杆系的最大最小直径、点阵层数、点阵对实体的填充比等参数,获得可满足电磁屏蔽的多个点阵拓扑优化结构,其中力学性能最佳的点阵拓扑优化推力器壳体结构见图 8。

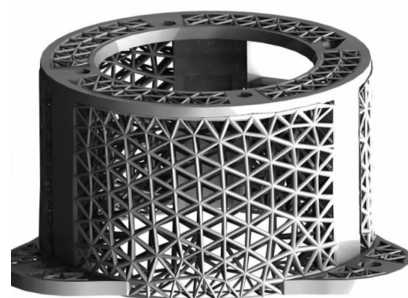


图 8 点阵优化结果

Fig. 8 Lattice optimization results

加速度载荷下的推力器壳体点阵优化结构的应力分布和变形情况见图 9。点阵优化结构的前 5 阶模态振型变化趋势见图 10。优化设计结果与原方案对比见表 5。

通过点阵优化结构与原方案的计算结果对比可见,点阵优化结构前 5 阶模态对应的频率均有提升,第 1、3、4、5 阶模态对应的频率分别提高 4.11 %、14.46 %、18.08 %、33.11 %。而且点阵优化结构的模态从第 3 阶开始已经大于 2 kHz,较好地避开了推力器工作时的振动频率范围,动力学性能优于原结构方案。

在加速度载荷下,对比点阵优化结构与原方案的应力和变形情况可知,点阵优化结构较原方案的 x 、 y 、 z 方向上的应力分别降低 63 %、67 %、59 %,充分反映了点阵结构在传力过程中应力分布得更加均匀,同等加速度载荷下应力更低。点阵优化结构变形与原方案基本相当, x 向上的变形减少 27 %,即点

阵优化结构的刚度较原方案有所增强。

点阵优化结构与原方案对比可得:结构连续孔径满足电磁屏蔽要求,在加速度载荷下的刚度指标

基本保持不变,强度指标优于原方案,动力学性能显著提升,结构质量减小 31.5 %,结构轻量化效果显著。

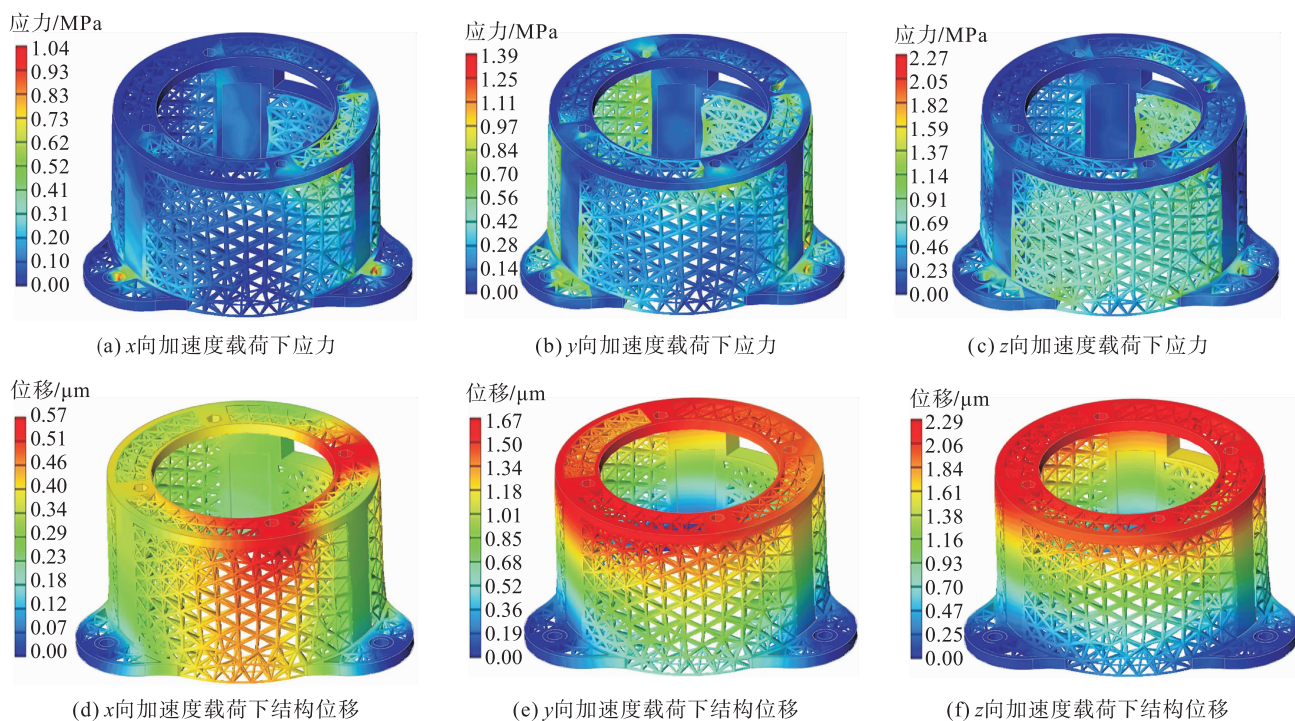


图 9 点阵优化结构在加速度载荷下的应力和位移云图

Fig. 9 Displacement and stress distribution nephogram of optimized structure under acceleration load

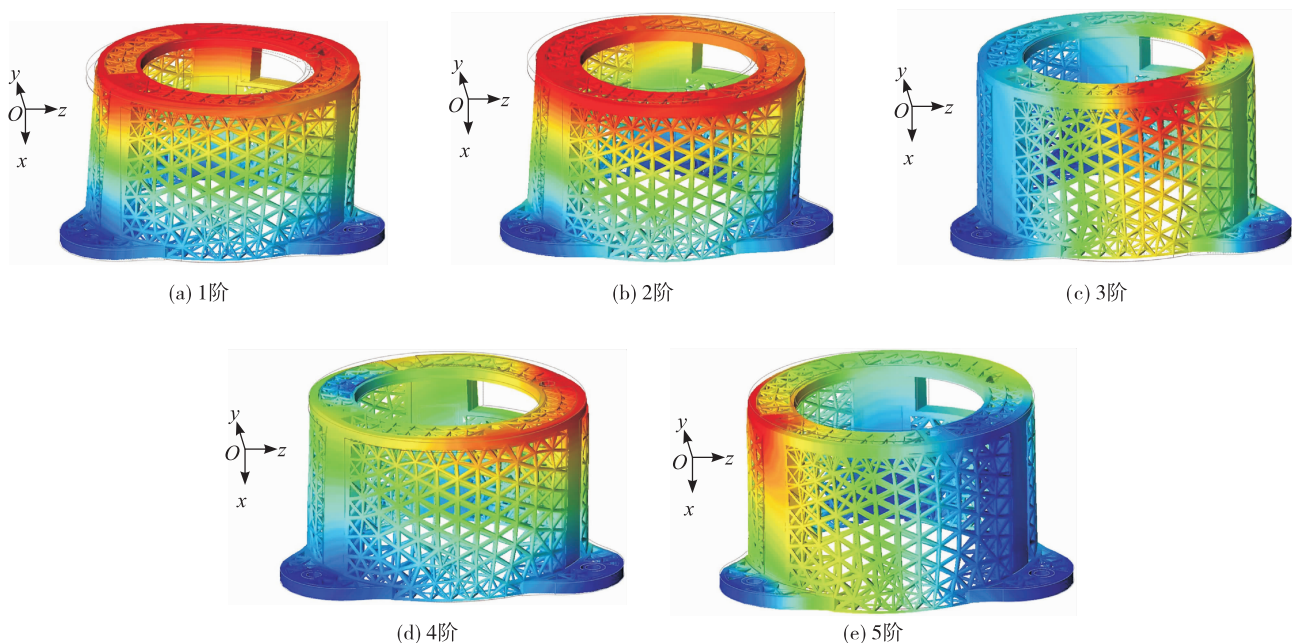


图 10 点阵优化结构模态振型

Fig. 10 Modal shapes of optimized structure

表 5 方案对比
Tab.5 Scheme performance comparison

参数		原方案	点阵优化	对比/%
动力学响应/Hz	1 阶	1 198.4	1 247.6	4.11
	2 阶	1 255.6	1 250.3	0.00
	3 阶	1 817.1	2 079.9	14.46
	4 阶	1 953.2	2 306.4	18.08
	5 阶	2 010.3	2 676.0	33.11
加速度载荷下最大应力/MPa	x 向	2.70	1.00	-63
	y 向	4.20	1.39	-67
	z 向	5.59	2.27	-59
加速度载荷下最大变形/ μm	x 向	0.79	0.57	-27
	y 向	1.70	1.70	0
	z 向	2.30	2.30	0
质量/g		344.7	236.2	-31.5

5 结论

1)应用点阵结构进行优化时,定义设计域可以充分利用拓扑结构优化方法,并结合安装要求、使用要求等,以获得最佳的设计域。

2)在静力学和动力学条件约束下开展点阵拓扑优化,得到了质量减轻 31.5 %,受载下应力降低 59 % ~ 67 %, x 向刚度提升 27 %,动力学性能大幅提升的结构方案,验证了设计方法的有效性,为工程上同类型结构的拓扑优化提供了设计思路。

参考文献

[1] 赵杨,邓永锋,魏建国,等. 真空微弧推进系统试验及在轨测试[J]. 火箭推进,2022,48(4):88-96.
ZHAO Y,DENG Y F,WEI J G,et al. Experimental study on vacuum micro-arc thruster and on-orbit test[J]. Journal of Rocket Propulsion,2022,48(4):88-96.

[2] 杨振宇,赵杨,李光熙,等. 1 mN 射频离子推力器参数与性能分析[J]. 火箭推进,2020,46(3):75-82.
YANG Z Y,ZHAO Y,LI G X,et al. Parameters and performance analysis of 1 mN RF ion thruster[J]. Journal of Rocket Propulsion,2020,46(3):75-82.

[3] 袁家军,于登云,陈烈民,等. 卫星结构设计与分析[M]. 北京:中国宇航出版社,2004.

[4] 周克民,李俊峰,李霞. 结构拓扑优化研究方法综述[J].

力学进展,2005,35(1):69-76.

[5] 卢天健,何德坪,陈常青,等. 超轻多孔金属材料的多功能特性及应用[J]. 力学进展,2006,36(4):517-535.

[6] LIU T,DENG Z C,LU T J. Bi-functional optimization of actively cooled, pressurized hollow sandwich cylinders with prismatic cores[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,2007,55(12):2565-2602.

[7] WANG J,LU T J,WOODHOUSE J,et al. Sound transmission through lightweight double-leaf partitions: Theoretical modelling [J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 286(4/5):817-847.

[8] 杜义贤,李涵钊,田启华,等. 基于能量均匀化的高剪切强度周期性点阵结构拓扑优化[J]. 机械工程学报, 2017,53(18):152-160.

[9] ZHOU Q,MAYER R R. Characterization of aluminum honeycomb material failure in large deformation compression, shear, and tearing[J]. Journal of Engineering Materials and Technology,2002,124(4):412-420.

[10] AL-HOMOUD D M S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials [J]. Building and Environment, 2005, 40 (3): 353-366.

[11] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007,24(1):1-12.

[12] 左蔚,赵剑,白静,等. 激光选区熔化菱形正十二面体点阵材料的承载与失效特性[J]. 火箭推进, 2020, 46(5):87-93.

- ZUO W, ZHAO J, BAI J, et al. Research on bearing and disassemble properties of laser selective melting rhombohedral dodecahedral lattice materials[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2020, 46(5): 87-93.
- [13] ARABNEJAD KHANOKI S, PASINI D. Fatigue design of a mechanically biocompatible lattice for a proof-of-concept femoral stem[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2013, 22: 65-83.
- [14] COELHO P G, FERNANDES P R, GUEDES J M, et al. A hierarchical model for concurrent material and topology optimisation of three-dimensional structures[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2008, 35(2): 107-115.
- [15] 廖中源, 王英俊, 王书亭. 基于拓扑优化的变密度点阵结构体优化设计方法[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(8): 65-72.
- [16] WANG Y J, XU H, PASINI D. Multiscale isogeometric topology optimization for lattice materials[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2017, 316: 568-585.
- [17] 冯佳宾. 变密度法在连续体与点阵材料拓扑优化中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [18] SIGMUND O. A 99 line topology optimization code written in Matlab[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2001, 21(2): 120-127.
- [19] OGUMA M, JINGUJI K, KITO T, et al. Flat-passband interleave filter with 200 GHz channel spacing based on planar lightwave circuit-type lattice structure[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(15): 1299.
- [20] 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.
- [21] HYUN S, KARLSSON A M, TORQUATO S, et al. Simulated properties of Kagomé and tetragonal truss core panels[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40(25): 6989-6998.
- [22] 朱健峰, 戴宁, 刘乐乐. 功能性点阵结构设计优化技术研究[J]. *机械设计与制造工程*, 2020, 49(7): 1-6.
- [23] 梁雄, 杜平, 朱丽君, 等. 面向增材制造的镂空点阵结构设计模块分析[J]. *制造技术与机床*, 2021(3): 44-48.
- [24] 洪清泉. *OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.