

doi:10.3788/gzxb20184707.0722003

# 空间同轴反射式次镜支撑结构优化设计与实验验证

孙奕<sup>1,2</sup>, 李福<sup>1</sup>, 杨建峰<sup>1</sup>, 钱崇森<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:**根据传统同轴反射式次镜支撑结构特点,建立了以传统次镜支撑结构外包络为基础的次镜支撑待优化模型,并采用变密度拓扑优化方法对该模型进行优化设计.根据拓扑优化结果设计了遮拦比为 0.085 的同轴反射式次镜支撑结构.有限元仿真结果表明:在结构遮拦比、质量相同的情况下,优化后同轴反射式次镜支撑结构的结构基频和结构刚度相较于传统三翼和四翼结构均有显著提高.加工了优化后的次镜支撑结构,并进行了随机振动试验.试验结果表明:优化后的次镜支撑结构基频为 470 Hz,与有限元仿真结果 477 Hz 的相对误差在 2% 以内,验证了有限元计算模型的可靠性和真实性.该次镜支撑结构适用于需要较低遮拦比和较高刚度的同轴反射式光学系统中.

**关键词:**次镜支撑;拓扑优化;变密度法;模态分析;有限元分析;随机振动

中图分类号:V476.9

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)07-0722003-9

## Optimum Design and Experiment Verification of Space Coaxial Reflective Secondary Mirror Support Structure

SUN Yi<sup>1,2</sup>, LI Fu<sup>1</sup>, YANG Jian-feng<sup>1</sup>, QIAN Chong-sen<sup>1,2</sup>

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A sub-mirror support optimization model based on the outer envelope of the traditional secondary mirror support structure was established, according to the characteristics of the traditional coaxial reflective secondary mirror support structure. The variable density topology optimization method was used to optimize the model. According to the topology optimization results, a coaxial reflective secondary mirror support structure with an occlusion ratio of 0.085 was designed. The finite element simulation results show that the basic frequency and structural stiffness of the coaxial reflective secondary mirror support structure are significantly improved compared with the traditional three-wing and four-wing structures in the case of the same structure shielding ratio and mass. The optimized secondary mirror support structure was processed and a random vibration test was conducted. The test results show that the optimized basic frequency of the secondary mirror support structure is 470 Hz, the finite element simulation result is 477 Hz, and the relative error is within 2%, which verifies the reliability and authenticity of the finite element calculation model. The secondary mirror support structure is suitable for use in a coaxial reflective optical system that requires a lower mask ratio and higher stiffness.

**Key words:** Secondary mirror support; Topology optimization; Variable density method; Modal analysis; Finite element analysis; Random vibration

**OCIS Codes:** 220.4830; 350.6090; 120.4570; 220.4840; 350.460

基金项目:国家自然科学基金(No.U1231204)资助

第一作者:孙奕(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为光机热集成分析. Email: 1432027661@qq.com

导师(通讯作者):李福(1980—),男,研究员,博士,主要研究方向为空间光学仪器结构设计、热设计. Email: lifu@opt.ac.cn

收稿日期:2018-02-11;录用日期:2018-04-12

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

空间同轴反射式次镜支撑结构被广泛用于各种空间光学载荷中.空间相机焦距越长, 遥感分辨率越高<sup>[1]</sup>.随着焦距的变长, 次镜与主镜之间距离也将变大, 次镜支撑结构的稳定性将直接影响空间相机的性能.次镜与主镜间相对位置的变动对相机的成像质量具有很大的影响, 将导致成像质量下降<sup>[2]</sup>.空间激光通信是目前很有发展前景的一项技术, 基于空间激光通信技术的空间量子通信也已经逐渐走向应用<sup>[3]</sup>.光学天线是激光通信的核心部件之一, 即使是光学天线的组成镜组在横向和纵向的微量偏差都会造成发射终端的光束发散角、远场光功率密度分布等产生较大变化, 从而导致信号光功率严重衰减、信噪比降低、误码率上升和捕获瞄准跟踪难度大幅增加<sup>[4]</sup>.所以要对次镜的支撑结构进行设计与优化.

传统的空间同轴次镜支撑结构主要有:薄壁连接筒与支撑杆组合式、支撑杆等形式.薄壁连接筒与支撑杆组合式等结构<sup>[5]</sup>, 虽然刚度较大, 但是整个结构质量较重, 不满足本文的设计需求.传统的支撑杆主要有三翼和四翼两种结构.丁福建等探讨了用反射系统焦平面的衍射效应作为次镜支撑结构设计的目标函数<sup>[6]</sup>, 该方法对于大口径反射结构的设计有一定的借鉴意义; 张林波等的研究表明四翼十字中心支撑结构中适当增加支撑筋板的厚度可以明显提高结构的固有频率<sup>[7]</sup>; 陈利荣等提出了次镜支架的鼓型偏置式四翼梁结构, 并表明该结构具有较高一阶谐振频率和良好的机械加工性能<sup>[2]</sup>; 梁文科等提出四翼偏置结构, 该结构相对于传统的三翼和四翼结构有更好的刚度和结构谐振频率<sup>[8]</sup>; 赵野等采用响应面方法对次镜支撑结构进行了优化设计<sup>[9]</sup>; 张雷等基于三角形稳定的原理设计了一种新型次镜支撑结构, 该结构基频、刚度较传统结构均有提高<sup>[10]</sup>; 曹文跃等对空间望远镜次镜支撑结构做了拓扑优化和分析<sup>[11]</sup>; VALENT T M 等对于次镜最佳支撑的结构做了讨论, 提出了三翼和四翼采用切向支撑相对于传统径向支撑增加了扭转刚度<sup>[12]</sup>; 空间 SNAP 望远镜中采用了三翼支撑结构, 其底部有强化结构<sup>[13]</sup>, 有助于部分提高刚度, 但是会增大遮拦比和重量; NASA 预计于 2019 年发射的 JWST 望远镜中采用的也是三翼支撑结构<sup>[14]</sup>, 但支撑杆底部并未有强化结构; NASA 预计将在 2020 年代发射的 Wide-Field Infrared Survey 望远镜设计中采用了 6 杆支撑结构<sup>[15]</sup>, 该结构的刚度增加带来了质量和遮拦比的增加.

提高次镜支撑结构的刚度采用的方案有两种<sup>[6-10, 15]</sup>:一种是增加支撑杆的厚度, 但是会造成光学系统的遮拦比变大, 影响光学系统的光学性能; 另一种如 Wide-Field Infrared Survey 望远镜一样, 增加支撑杆的数量, 但同时也会造成遮拦比的变大和重量的增加.采用偏置的三翼或者四翼次镜支撑结构, 会提扭转刚度, 但是对结构整体刚度的提高不明显.所以需要设计一种高刚度低遮拦比的次镜支撑结构.

拓扑优化是一种结构的概念设计, 通常根据对结构的具体性能要求来设定约束条件, 从而寻求最佳的材料分布和最优的传力路径<sup>[16]</sup>.根据拓扑优化的结果进行再次设计, 才能完成整个结构的设计, 也可以对拓扑优化的结果进行形状优化和尺寸优化, 达到最终的结构设计.本文通过拓扑优化设计了一种次镜支撑结构, 该结构相较于与传统三翼和四翼次镜支撑结构在遮拦比不增加的基础上, 提高了支撑结构的刚度, 并有更高的基频.可用于需要较高刚度、较低遮拦比的同轴反射式光学系统中.

## 1 次镜支撑结构优化

### 1.1 次镜支撑结构设计要求与设计指标

设计的光学系统的参数为:主镜口径为 155 mm, 次镜口径为 26 mm, 主次镜间间距为 166 mm, 主镜厚度为 20 mm, 主镜中心开孔直径为 26 mm.次镜支撑结构设计要求包括:1)高轻量化以降低发射成本, 要求次镜支撑结构的重量不超过 800 g; 2)高刚度以适应发射振动、重力等力学环境, 要求光轴水平方向次镜支撑结构重力变形要小于  $2 \mu\text{m}$ ; 3)小体积以满足发射包络; 4)低遮拦比以减小遮拦对成像质量和光学性能的影响, 要求遮拦比要小于 0.09; 5)高热稳定性, 以保证在轨稳定性和几何精度, 所以次镜支撑结构要选择低膨胀系数的材料, 这样在温度变化时支撑结构的热变形较小, 可以保证结构的热稳定性.卫星在发射过程中会经历振动、噪音、冲击等恶劣的环境, 其中共振效应对次镜支撑结构破坏比较大, 为了避免这一现象, 还需要尽量提高次镜支撑结构基频.

根据设计要求, 采用三翼和四翼次镜支撑结构, 并根据系统遮拦比小于 0.09 要求, 确定了三翼支撑结构梁片的厚度为 4.16 mm, 四翼结构支撑结构梁片的厚度为 3.12 mm, 采用有限元仿真计算了三翼和四翼支撑

结构自重变形,结果见表 1,其自重变形均超过  $2\ \mu\text{m}$ .表明采用传统结构,在满足低遮拦比要求的同时不能满足刚度要求,所以需要对接支撑结构进行优化设计.

表 1 两种结构的自重变形

Table1 Self-weight deformation of two kinds of structures

	Three-wing support structure	Four-wing support structure
Maximum displacement/ $\mu\text{m}$	2.70	3.04

### 1.2 优化方法

拓扑优化主要分为连续体拓扑优化和离散结构拓扑优化<sup>[17]</sup>.目前比较成熟的连续体拓扑优化方法<sup>[18]</sup>有均匀化法、变密度法、渐进结构法等.其中变密度法<sup>[19-20]</sup>较为常用,有代表性的实现软件有 Nastran、Hypermesh、Ansys 等.变密度法定义取值范围为 $[0, 1]$ 的相对密度  $\rho$ ,将优化目标用相对密度  $\rho$  的显性函数来表示,然后用数学规划法或优化准则法求解.基于变密度法的材料等效弹性模量<sup>[21]</sup>为

$$E(x_j) = E_{\min} + f(x_j, p) \Delta E \quad (1)$$

基于变密度法的系统刚度矩阵、质量矩阵和柔度函数分别表示为

$$\mathbf{K} = \sum_{j=1}^n [E_{\min} + f(x_j, p) \Delta E] \mathbf{K}_j \quad (2)$$

$$\mathbf{M} = \sum_{j=1}^n [E_{\min} + f(x_j, p) \Delta E] \mathbf{M}_j \quad (3)$$

$$C(x) = \sum_{j=1}^n [E_{\min} + f(x_j, p) \Delta E] \mathbf{U}_j^T \mathbf{K}_j \mathbf{U}_j \quad (4)$$

其中  $\Delta E = E_0 - E_{\min}$ ,  $E_0$  为实体材料弹性模量,  $E_{\min}$  为孔洞部分材料弹性模量;  $p$  为中间密度材料的惩罚因子;  $f(x_j, p)$  为密度插值函数;  $E$  为插值后的弹性模量;  $\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{M}$  和  $C(x)$  分别表示系统刚度矩阵、质量矩阵和柔度函数;  $\mathbf{K}_j$ 、 $\mathbf{M}_j$ 、 $\mathbf{U}_j$  分别为第  $j$  单元的刚度矩阵、质量矩阵和位移矢量.

### 1.3 优化模型

拓扑优化有三要素,设计变量、目标函数和约束条件,通用模型可表达为<sup>[11]</sup>

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{X}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \text{s.t. } g_j(\mathbf{X}) - g_j \leq 0 \quad (j=1, \dots, m) \\ x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \quad (i=1, \dots, n) \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  为设计变量;  $f(\mathbf{X})$  为目标函数;  $g_j(\mathbf{X})$  和  $g_j$  为第  $j$  响应及约束;  $x_{\min}$  和  $x_{\max}$  为单元变量上限和下限.对于空间同轴反射式次镜支撑结构需要足够的强度和刚度来适应静力条件和地面的装配,同时需要尽可能高的谐振频率,由于发射费用比较昂贵,需要尽可能的减轻结构重量.次镜座从垂直于地面的试验环境到空间微重力环境存在一个重力释放过程,将会引起次镜的偏差,而这种偏差会对观测的精度造成影响<sup>[11]</sup>,因此在设计时要控制这种偏差在允许范围之内.一般提高次镜支撑结构的刚度可以尽可能减小这种偏差.所以建立了以一阶频率和体积分数为约束条件,以柔度最小(刚度最大)为拓扑目标的拓扑优化模型.根据优化方法和优化模型,该拓扑优化的数学表达式为

$$\begin{cases} \min C(x) \\ \text{s.t. } \beta \geq \beta_n \\ \sum_{j=1}^n V_j x_j - V \leq 0 \\ 0 \leq x_{\min} \leq x_j \leq 1 \quad (i=1, \dots, n) \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $C(x)$  为柔度函数,  $\beta_n$  为指定的一阶频率约束,  $V$  为优化后的结构体积,  $V_j$  为优化后的单元体积,  $x_j$  对应第  $j$  单元变量,  $x_{\min}$  为单元设计变量下限.

## 2 次镜支撑结构拓扑优化过程

根据主镜和次镜外包络线建立待优化模型如图 1(a)所示,并根据待优化模型建立有限元模型.该有限元模型节点数量为 41 883,单元数量为 30 360,如图 1(b)所示.约束次镜支撑结构与主承力结构连接的 12 处螺钉孔对待优化模型进行拓扑优化.次镜支撑结构部件材料参数见表 2.

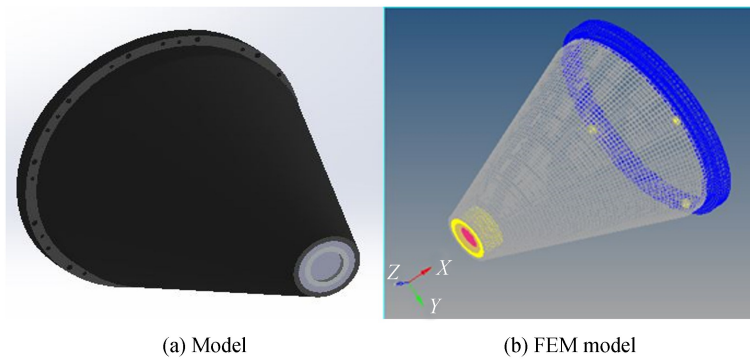


图1 待优化模型  
Fig.1 Initial model before optimization

表2 部件材料参数  
Table2 Component material parameters

Assembly	Material	Density/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Young's modulus /GPa	Poisson's ratio	Thermal conductivity /( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$ )	Thermal expansion coefficient/( $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )
Secondary mirror	Zerodur	2530	92	0.24	1.2	0.05
Seat of secondary mirror	4J32	8130	141	0.25	13.9	0.1
Support structure of Secondary mirror	4J32	8130	141	0.25	13.9	0.1

考虑到热稳定性的设计要求,次镜支撑结构和次镜座选择了低膨胀系数的殷钢(4J32),次镜的材料则选用了低膨胀系数的微晶玻璃.如表2所示,殷钢的膨胀系数为  $0.1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,微晶玻璃的膨胀系数为  $0.05 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,温度变化产生热变形时,由于两种材料的膨胀系数都比较低,而且热膨胀系数接近,因此次镜的热变形可以减小.用低热膨胀系数的殷钢制成的次镜支撑结构,在温度变化时热变形比较小,从而能够保证主次镜之间的距离变化比较小,使整个结构的温度适应性大大增强,能够很好地适应空间环境,稳定性比较好.

根据该光学系统的遮拦比要求,采用传统的三翼支撑结构,其一阶频率为 337 Hz.为了尽可能提高该支撑结构的刚度和基频,根据计算出的数据,结合拓扑优化理论,设置优化后的一阶模态不低于 400 Hz,空间体积分数不超过 30%,即优化后的次镜支撑结构体积不超过图 1(b)待优化模型体积的 30%(30%是拓扑优化的工程经验设计指标).设计区域以轴向柔度最小(刚度最大)为目标函数,建立拓扑优化模型.优化流程如图 2.

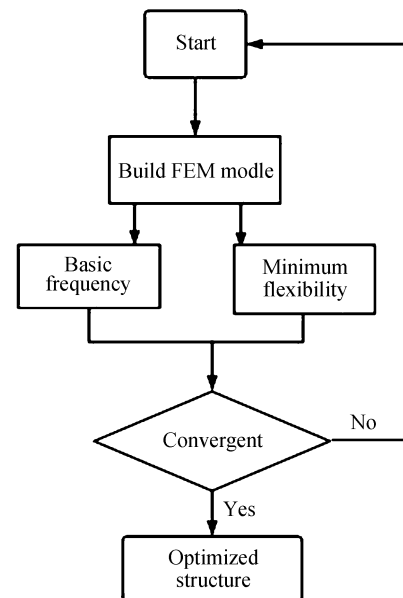


图2 优化流程  
Fig.2 Optimization flowchart

经过 54 次迭代计算得到优化后的次镜支撑结构,该结构网格单元密度分布如图 3.

图 3 中红色的区域为应该保留的结构,绿色的部分为可以去除的结构.从图 3 中可以看到支撑杆的支撑形式为倒 Y 形,支撑杆的底部中间的部分需要镂空.但是由于拓扑优化得到的优化结构无法直接进行加工,根据次镜支撑结构的遮拦比要求及拓扑优化后显示的结构样式,对该结构进行了可加工设计,如图 4.



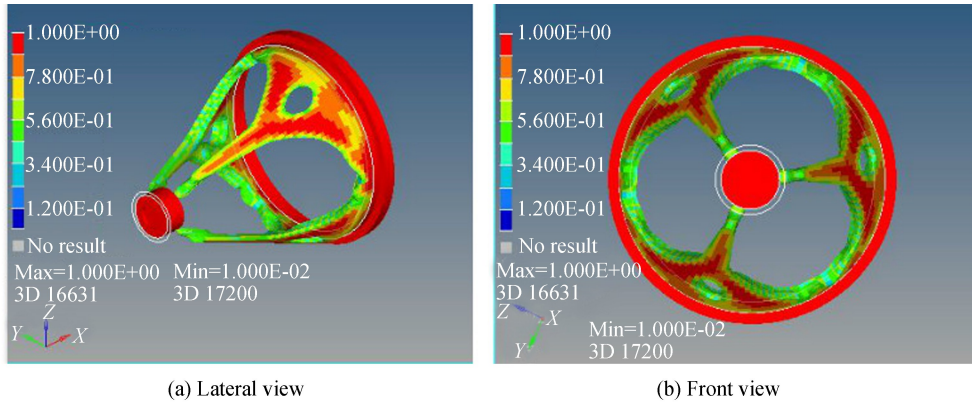


图3 优化后的次镜支撑结构网格密度分布

Fig.3 Distribution of mesh density of secondary mirror supporting structure after optimization

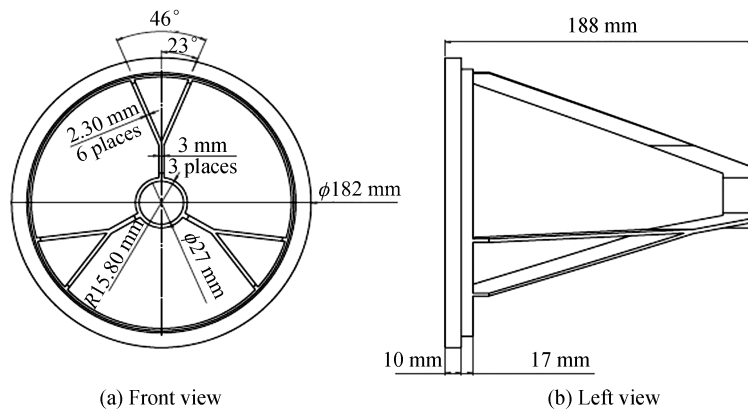


图4 优化后的次镜支撑结构 CAD 模型

Fig.4 CAD model of secondary mirror supporting structure after optimization

在拓扑优化中,根据约束条件的不同得出的优化结构也不同.大多数文献是在已经存在的结构的基础上,进行拓扑优化,以期达到减重等目的,这种方法不利于寻找更优的结构形式.本文选用主次镜之间的外包络模型作为待优化模型,这样有利于寻找新的结构形式.选取柔度最小为目标函数,以期在满足约束条件的情况下,找到刚度最大的结构.

### 3 分析讨论

次镜支撑结构中次镜框一般是通过薄梁片支撑.为了提高次镜支撑结构的稳定性,梁片数量越多、厚度越大越好,但这样会造成支撑结构的遮拦比变大、挡光变多,不利光学系统优质成像<sup>[8]</sup>.优化后的次镜支撑结

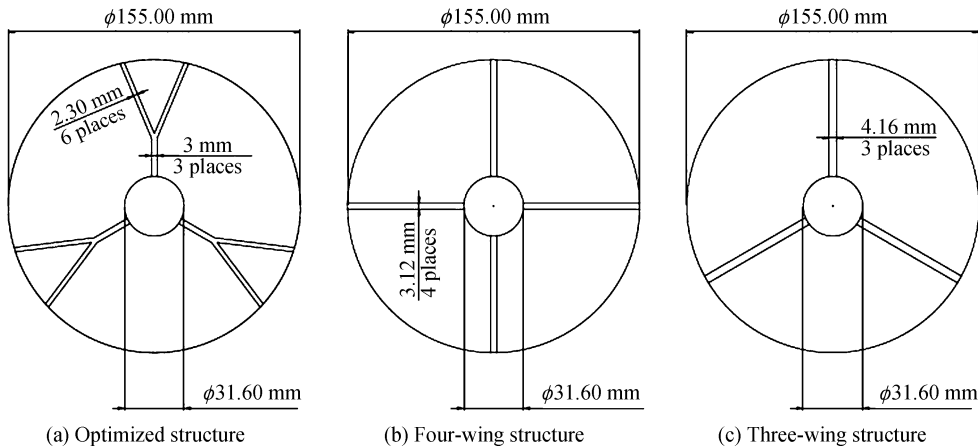


图5 三种次镜支撑结构

Fig.5 Three kinds of secondary mirror support structure

构遮拦比为 0.085,满足遮拦比的设计要求.为了比较优化后的次镜支撑结构和传统的三翼以及四翼次镜支撑结构的力学性能,以相同的遮拦比 0.085 为基准,优化后的支撑结构 3 条主梁片厚度为 3 mm,6 条次梁片的厚度为 2.3 mm.计算得知四翼梁片的厚度为 3.12 mm,三翼梁片的厚度为 4.16 mm,如图 5.

采用 Solidworks 对结构遮拦比相同的传统三翼式支撑结构、四翼式支撑结构进行了建模,并用 Hypermesh 划分了网格.在实际工况中次镜支撑结构通过螺栓固定在基座上,约束支撑结构与主承力结构连接的 12 处螺钉孔.建立有限元分析模型,三种结构的一阶模态如图 6 所示.

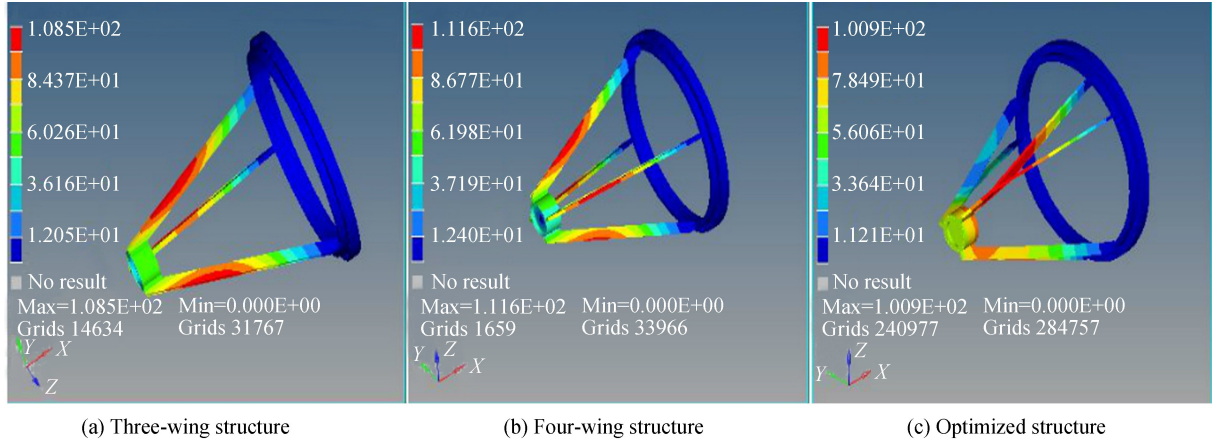


图 6 模态对比

Fig.6 Modal comparison

表 3 为三种结构的基频,在结构遮拦比和质量相同的情况下,三翼支撑结构的基频要高于四翼支撑结构.而优化后的支撑结构基频要高于传统三翼辐形和四翼支撑结构,其中比三翼支撑结构的基频提高了 40% 以上.优化后的结构其质量满足小于 800 g 的设计要求.

表 3 三种结构的基频

Table 3 Basic frequency of three different structures

	Three-wing support structure	Four-wing support structure	Supporting structure after optimization
Basic frequency/Hz	337.2	273.7	477.9
Weight/g	752	752	752

由于次镜支撑结构是悬臂梁,为了分析三种支撑结构的刚度,采用和模态分析相同的有限元模型对三种结构自重变形产生的位移进行分析,如图 7.

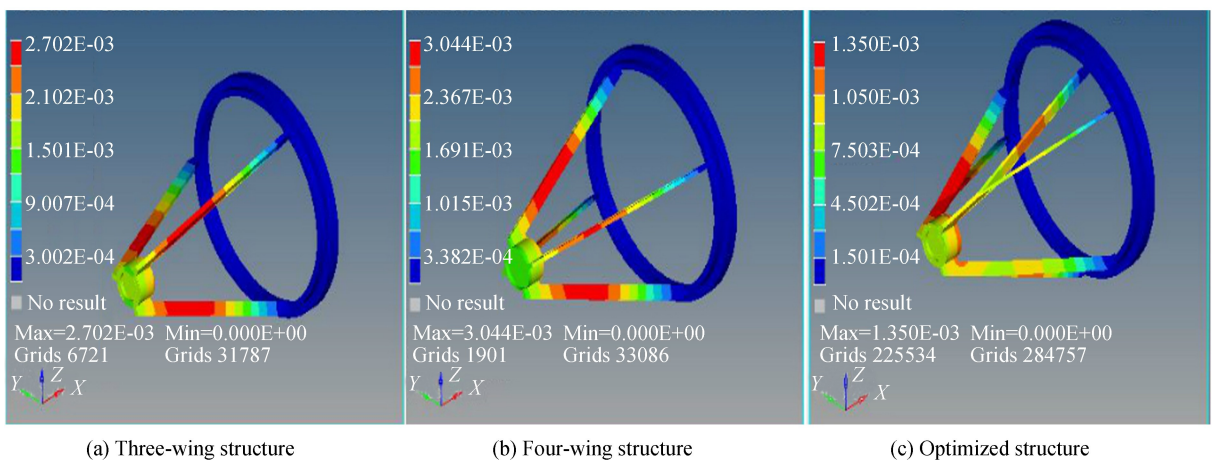


图 7 自重变形图

Fig.7 Weight deformation

根据表 4 的三种结构的自重变形对比发现,在遮拦比、质量相同的情况下三翼支撑结构刚度要优于四翼结构.而优化后的支撑结构刚度要明显优于传统的两种结构.优化后的支撑结构自重变形位移量要比三翼支

撑结构减小 50%, 为  $1.35 \mu\text{m}$ , 满足小于  $2 \mu\text{m}$  的技术要求, 证明优化后的结构刚度明显提高。

表 4 三种结构的自重变形

Table 4 Self-weight deformation of three kinds of structures

	Three-wing support structure	Four-wing support structure	Supporting structure after optimization
Maximum displacement/ $\mu\text{m}$	2.70	3.04	1.35

#### 4 试验验证

环境中的振动传导到次镜支撑结构上, 支撑结构会产生应力和变形, 对次镜的安装精度造成一定的影响. 因此需要次镜支撑结构有较好的响应特征, 即有较小的随机振动响应. 为了验证有限元模型的正确性以及优化后的次镜支撑结构的力学性能, 利用 DC-6500-65 的振动台对该支撑结构进行随机振动试验, 分别测量优化后的次镜支撑结构在 X、Y、Z 三个方向的随机振动响应值. 如图 8, 测量传感器是美国 PCB 公司生产的微型三轴加速度传感器, 型号为 356B11, 安装在次镜支撑结构顶端。

实验结果如图 9, 可知测量结果曲线的峰值处横坐标为 470 Hz, 证明在 470 Hz 时结构发生共振,

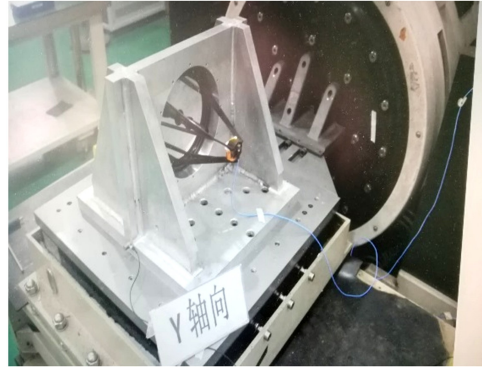


图 8 随机振动试验现场及采样点

Fig.8 Random vibration test spot and sampling point

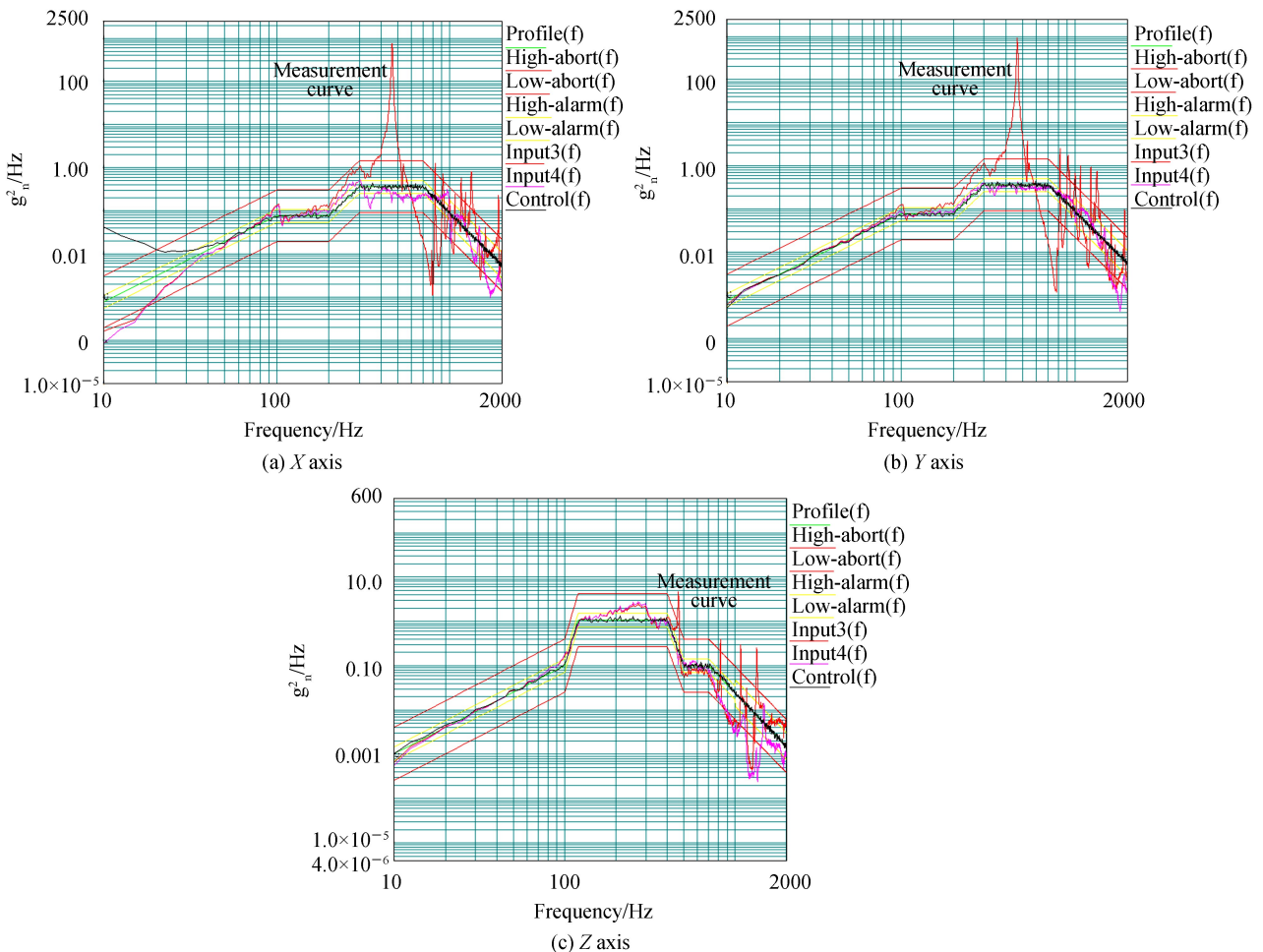


图 9 加速度功率谱密度响应曲线

Fig.9 Acceleration power spectrum density response curve



所以其基频为 470 Hz,与有限元仿真结果 477.9 Hz 基本吻合,相对误差为 2%左右,证明优化后的次镜支撑结构有比较高的基频.由于在有限元仿真计算中一般通过查阅手册得到材料参数,有时材料参数为一个区间,其选取和实际优化后的材料参数有略微差异,造成了试验结果和仿真结果的误差.

根据图 9 的数据得出安装点的加速度响应均方根(Root-Mean-Square,RMS)值和放大率,见表 5.优化后的次镜支撑结构在 X、Y、Z 三个方向 RMS 的最大放大率为 1.38、1.41、1.10.其中最大的 RMS 值为 15.98 g( $g$  为重力加速度),最大的 RMS 放大率为 1.41,满足次镜支撑结构 RMS 放大率小于 5 的随机振动技术指标.

表 5 随机振动结果  
Table 5 Random vibration Results

	X	Y	Z
RMS	15.98g	15.95g	15.92g
Amplification rate	1.38	1.41	1.10

## 5 结论

本文对空间同轴反射式次镜支撑进行了拓扑优化设计,提出一种遮拦比为 0.085 的高刚度次镜支撑结构,并采用有限元方法分析了传统的三翼、四翼次镜支撑与优化后的次镜支撑的力学性能.有限元仿真结果表明:在结构遮拦比、质量相同的情况下,优化后的次镜支撑结构相较于传统结构,基频提高了 40%以上,其光轴水平方向重力变形小于  $2\ \mu\text{m}$ .对优化后的次镜支撑结构进行的随机振动试验表明:优化后的次镜支撑结构基频为 470 Hz,与有限元分析优化后的 477 Hz 相对误差在 2%以内;质量为 752 g,在 X、Y、Z 三个方向随机振动响应的最大放大率为 1.38、1.41、1.10,其中最大的 RMS 值为 15.98 g,验证了有限元模型的正确性.相对于传统支撑结构,该结构在不增加遮拦比的情况下,能够提高支撑结构的刚度和基频,且重量较轻,适用于对遮拦比、质量和支撑结构刚度有较高要求的同轴反射式光学系统.

## 参考文献

- [1] XIN Hong-wei, DONG De-yi. Supporting structure design of long focus space remote sensor[J]. *Ome Information*, 2009, **26**(10):28-33.  
辛宏伟,董得义.长焦距空间遥感器支撑结构设计研究[J]. *光机电信息*, 2009, **26**(10):28-33.
- [2] CHEN Rong-li, ZHANG Yu-kang, FAN Xue-wu, et al. Design of bracket structure for the second mirror of space high resolution CCD camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(10):1251-1254.  
陈荣利,张禹康,樊学武,等.空间高分辨率 CCD 相机次镜支架最佳结构设计[J]. *光子学报*, 2004, **33**(10):1251-1254.
- [3] DONG Yu-hui, ZHANG Lang, LI Xiao-liang, et al. Research progress and development exploration of free space laser and quantum communication[J]. *Journal of Telemetry Tracking & Command*, 2017, **38**(5):11-18.  
董玉辉,张靓,李晓亮,等.空间激光/量子通信技术研究进展与发展探索[J]. *遥测遥控*, 2017, **38**(5):11-18.
- [4] YU Jian-wei, TAN Li-yin, LIU Jian-feng, et al. Alignment for center distance of optical telescope in satellite optical communication terminal[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2009, **17**(9):2091-2097.  
俞建杰,谭立英,刘剑峰,等.卫星光通信光学天线轴间距的精确调试[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(9):2091-2097.
- [5] LI Wei, LIU Hong-wei, GUO Quan-feng, et al. Combined supporting structure of thin wall joint cylinder and supporting bar between primary mirror and second mirror in space camera[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2010, **18**(12):2633-2641.  
李威,刘宏伟,郭权锋,王海萍.空间相机主次镜间的薄壁筒和支杆组合支撑结构[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(12):2633-2641.
- [6] DING Fu-jian, LI Yin-cai. An effective optimum design method of the structure of Cassegrain reflective system.[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(8):756-762.  
丁福建,李英才.卡塞格林反射系统结构动态优化设计[J]. *光子学报*, 1999, **28**(8):756-762.
- [7] ZHANG Lin-bo, RENG Ge, CHEN Hong-bing. Dynamic analysis for supporting structure of crossed-plate type[J]. *Optics & Precision Engineering*, 2003, **11**(5):472-476.  
张林波,任戈,陈洪斌.四翼十字形中心支撑结构的动力学分析[J]. *光学精密工程*, 2003, **11**(5):472-476.
- [8] LIANG Wen-ke, LIU Shun-fa. Mechanical analysis of secondary mirror supporting structure[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2007, **28**(5):859-864.  
梁文科,刘顺发.次镜支撑结构的力学性能分析[J]. *仪器仪表学报*, 2007, **28**(5):859-864.
- [9] ZHAO Ye, LI Lin, YANG Hua-bao. The optimal design of bracket structure for the second mirror of a large-aperture space optical remote sensor[J]. *Mechanical Science & Technology for Aerospace Engineering*, 2012, **31**(3):373-378.



- 赵野,李玲,杨华保.大口径空间光学遥感器次镜支架优化设计[J].机械科学与技术,2012,**31**(3):373-378.
- [10] ZHANG Lei, JIN Guang. New supporting structure of secondary mirror for coaxial reflective space telescope[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2012,**41**(9):2401-2404.  
张雷,金光.同轴反射式空间相机新型次镜支架结构[J].红外与激光工程,2012,**41**(9):2401-2404.
- [11] CAO Wen-yue, ZHANG Shu-jie, JIA Jian-jun. Topology optimization and analysis on secondary mirror supporting structure of space telescope[J]. *Computer Aided Engineering*, 2015, **24**(5): 42-46.  
曹文跃,张淑杰,贾建军.空间望远镜次镜支撑结构拓扑优化和分析[J].计算机辅助工程,2015,**24**(5):42-46.
- [12] VUKOBRATOVICH D, ESPLIN R W. Optimal support structures for chopping mirrors[C]. SPIE, 1992, 1690:366-375.
- [13] SHOLL M J, BESUNER R, JELINSKY P, *et al.* Point-spread function stability of the SNAP telescope[C]. UV/Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts II. International Society for Optics and Photonics, 2005:1258.
- [14] MATTHEWS G W, WHITMAN T L, WELLS C, *et al.* JWST pathfinder telescope risk reduction cryo test program [C].Optical Manufacturing and Testing XI. International Society for Optics and Photonics, 2015.
- [15] HAGOPIAN J G, BARTUSEK L, CASEY T M, *et al.* Ground to on-orbit alignment study of the WFIRST wide-field channel and resulting changes in the telescope architecture [C]. Optical System Alignment, Tolerancing, and Verification XI. 2017:25.
- [16] CHENG Long, WANG Dong, GU Song, *et al.* Multi-objective topology optimization design and test for support structure of star sensor[J].*Infrared & Laser Engineering*, 2017,**46**(5):0520001.  
程龙,王栋,谷松,等.星敏传感器支撑结构多目标拓扑优化设计与试验[J].红外与激光工程,2017,**46**(5):0520001.
- [17] ZUO Kong-tian. Research of theory and application about topology optimization of continuum structure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.  
左孔天.连续体结构拓扑优化理论与应用研究[D].武汉:华中科技大学,2004.
- [18] LUO Zheng, CHEN Li-ping, HUANG Yu-yin, *et al.* Topological optimization design for continuum structures[J]. *Advances in Mechanics*, 2004,**34**(04):463-476.  
罗震,陈立平,黄玉盈,等.连续体结构的拓扑优化设计[J].力学进展,2004,**34**(04):463-476.
- [19] LI Jun-fei. The research of structure topology optimization based on variable density method[D]. Changchun: Jilin University, 2007.  
李凌飞.基于变密度法的结构拓扑优化研究[D].长春:吉林大学,2007.
- [20] BENDSØE M P, SIGMUND O. Material interpolation schemes in topology optimization[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1999,**69**(9-10):635-654.
- [21] JIA Xue-zhi, JIN Guang, JIA Ji-qiang, *et al.* Topology optimization design for main board of lightweight space camera [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2011, **31**(3):395-400.  
贾学志,金光,贾继强,等.轻型空间相机主承力基板结构拓扑优化设计[J].空间科学学报,2011,**31**(3):395-400.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No. U1231204)

引用格式:SUN Yi, LI Fu, YANG Jian-feng, *et al.* Optimum Design and Experiment Verification of Space Coaxial Reflective Secondary Mirror Support Structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7):0722003

孙奕,李福,杨建峰,等.空间同轴反射式次镜支撑结构优化设计与实验验证[J].光子学报,2018,**47**(7):0722003