

双面共体反射镜结构优化设计与分析

马霖 谭双龙 闫磊 马思宇 吴洪波 张新

Optimization design and analysis of double-sided integrated mirror structure

MA Lin, TAN Shuanglong, YAN Lei, MA Siyu, WU Hongbo, ZHANG Xin

引用本文:

马霖, 谭双龙, 闫磊, 等. 双面共体反射镜结构优化设计与分析[J]. 应用光学, 2024, 45(1): 45–53. DOI: 10.5768/JAO202445.0101007

MA Lin, TAN Shuanglong, YAN Lei, et al. Optimization design and analysis of double-sided integrated mirror structure[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(1): 45–53. DOI: 10.5768/JAO202445.0101007

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0101007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大尺寸矩形准直镜轻量化结构多学科优化设计

Multidisciplinary design optimization of large rectangle collimating mirror lightweight structure

应用光学. 2019, 40(1): 45–50 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101008>

快速反射镜挠性支承运动学设计

Design of flexible support for fast steering mirror via kinematic principles

应用光学. 2021, 42(3): 413–417 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301006>

大型矩形准直镜柔性支撑系统的多目标优化设计和稳定性分析

Multi-objective optimization design and stability analysis of flexible support system for large rectangular collimator mirror

应用光学. 2021, 42(2): 215–222 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0201002>

主三镜一体化离轴三反光学天线设计

Design of off-axis three-mirror optical antenna based on integration of primary-tertiary mirror

应用光学. 2021, 42(1): 23–29 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0101004>

一种轻质薄型反射镜的挠性支撑结构设计

Flexible support structure design of lightweight thin reflector

应用光学. 2017, 38(5): 815–819 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0505002>

基于有限元分析的小口径离轴抛物面反射镜支撑结构设计

Design of support structure for small caliber off-axis parabolic reflector based on finite element analysis

应用光学. 2019, 40(6): 1160–1166 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0605004>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 01-0045-09

双面共体反射镜结构优化设计与分析

马 霖^{1,2}, 谭双龙^{1,2}, 闫 磊^{1,2}, 马思宇^{1,2}, 吴洪波^{1,2}, 张 新^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 应用光学国家重点实验室, 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘 要: 为了满足某同轴四反红外光学系统中主四双面共体反射镜的性能要求, 需要镜体在高轻量化率的同时具有更高的刚度, 保持两个镜面面形稳定。该文采用拓扑优化的方法, 以刚度最大为优化目标, 约束设计域体积分数的方式对双面共体反射镜初始模型进行优化。优化结果表明, 主镜面与四镜面通过以光轴为中心呈辐射形排列的筋板连接时刚度较高; 通过自由尺寸优化获得主、四镜面和筋板的最佳尺寸参数; 参考优化结果设计主、四共体反射镜, 最终方案轻量化率达到 82.4%。对主四反射镜模态及 1g 重力对面形 RMS 的影响进行分析, 求得一阶频率达到 417 Hz; 1g 重力作用下反射镜面形变化最大为 $\lambda/22$ ($\lambda=632.8$ nm)。分析结果表明, 优化后的镜体刚度足够, 且具有较好的抵抗重力变形能力。按照优化后的设计方案进行反射镜的加工和测试, 主、四镜面形 RMS 实测结果均约 $\lambda/7$, 满足红外光学系统的性能要求, 证明了本文优化设计方法的有效性, 为双面共体反射镜的设计提供一定的借鉴作用。

关键词: 双面共体反射镜; 拓扑优化; 自由尺寸优化; 高轻量化

中图分类号: TN202; TH703

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0101007

Optimization design and analysis of double-sided integrated mirror structure

MA Lin^{1,2}, TAN Shuanglong^{1,2}, YAN Lei^{1,2}, MA Siyu^{1,2}, WU Hongbo^{1,2}, ZHANG Xin^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to meet the needs for the performance of the primary-fourth double-sided integrated mirror in a certain on-axis four-mirror infrared optical system, the mirror body needs to have higher stiffness with high lightweight rate to keep the two mirror face shapes stable. The topology optimization method was used to optimize the initial model of double-sided integrated mirror with the maximum stiffness was set as the optimization objective, and the volume fraction of the design domain was constrained. The optimization results show that the stiffness is higher while the primary mirror and the fourth mirror are connected through ribbed plate arranged radially around the optical axis. The optimal size parameters for the primary-fourth and ribbed plate were obtained by free size optimization. Based on the optimization results, the primary-fourth double-sided integrated mirror was designed, and the lightweight rate achieved 82.4% by using the final solution. The mode of the primary-fourth double-sided integrated mirror and the influence of 1 g gravity on the root-mean-square (RMS) of the surface shape were analyzed, a first-order mode frequency achieved 417 Hz, and the maximum change of surface shape under gravity was $1/22 \lambda$ ($\lambda=632.8$ nm). The analysis results show that the

收稿日期: 2023-09-04; 修回日期: 2023-09-18

基金项目: 国家自然科学基金 (62005271)

作者简介: 马霖 (1991—), 男, 硕士, 主要从事光机结构与仿真研究。E-mail: 236323460@qq.com

通信作者: 谭双龙 (1988—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事金属基光学反射镜研究。E-mail: tanshuanglong109@126.com

optimized mirror body has sufficient stiffness and good resistance to the deformation under gravity. The mirror was processed and tested according to the final design, and the measured results show that the RMS of primary-fourth mirror surface shapes are both about $\lambda/7$, which meets the needs for the performance of infrared optical systems, proves the effectiveness of this topology optimization design method, and provides some references for the optimization design of double-sided integrated mirrors.

Key words: double-sided integrated mirror; topology optimization; free size optimization; high lightweight

引言

红外成像具有全天候工作、穿透力强、抗干扰能力强、受天气影响小、制导精度高等优点,在侦察探测、导引等领域发挥了重要作用^[1-2]。反射镜作为红外光学系统中的重要部件,面形稳定性、轻量化率是衡量其性能的关键指标。通过拓扑优化技术可以在保证刚度最大化的同时,提高反射镜的轻量化率,国内外学者也对此做出了诸多研究。在较早的时候,国外 Park 等以自重、抛光压力作为载荷条件,获得高轻量化的镜体为目标,利用拓扑优化技术优化单面反射镜背部的材料分布形式,并加工制造反射镜体进行验证^[3]。David K 通过尺寸优化的方式以最大刚度为目标,优化镜面厚度、筋板厚度等参数,得到了一种背板开放的高轻量化铍反射镜^[4]。韩国 LEE 等人通过尺寸优化的方式,对某大口径镜体背部肋的厚度和安装位置进行优化,使其应力应变分布更加均匀^[5]。如图 1 所示,从左到右分别为 Park, David, LEE 优化所获的单面反射镜。

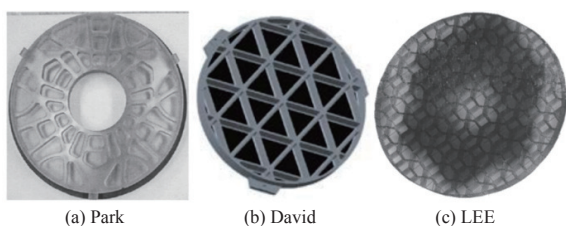


图 1 国外反射镜优化示例

Fig. 1 Examples of mirror optimization overseas

国内方面,大连理工大学 Liu Shutian 等人通过拓扑优化技术,以最大刚度为目标,对大型空间反射镜背部的结构形式进行尺寸参数优化和形状优化,完成高刚度高轻量化反射镜的优化设计^[6]。长春光机所 Liu Guang 等人将拓扑优化结合尺寸优化,利用连续体拓扑优化技术获得了材料的最优分布,根据拓扑结果对轻质肋分组进行尺寸优化,得到最优解^[7]。如图 2 所示,从左到右依次为 Liu Shutian, Liu Guang 优化的单面反射镜。

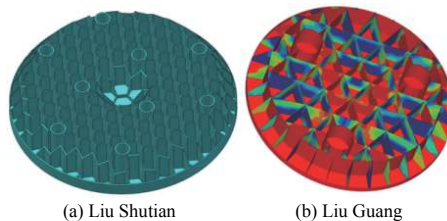


图 2 国内反射镜优化示例

Fig. 2 Examples of mirror optimization in domestic

此外,西安光机所、安徽光机所的研究人员也基于拓扑优化方法对反射镜展开很多研究^[8-10]。但上述研究均为针对单面反射镜的优化工作。随着光学系统产品高集成化、轻量化的发展,多镜面共体化、集成化方案的紧凑优势逐渐凸显出来,受到了越来越多研究人员的关注^[11-13]。相比于单面反射镜,双面共体反射镜集成度更高,更适合应用在对重量要求苛刻的轻巧红外光学系统中。但双镜面对支撑刚度要求更高,如果刚度不足,2个反射镜面变形相互耦合,对整个光学系统的像质影响会叠加放大,故设计难度更高。需确保2个反射镜面自身刚度足够大且相互之间影响最小,同时为了满足使用需求,还需要有足够的轻量化率,这就极大地增加了设计难度。基于上文所述国内外研究人员对单面反射镜的优化方法,将其应用在双面共体反射镜的设计中是否可行,目前此方面的研究甚少。在此基础上,本文结合拓扑优化和尺寸优化方法,对某同轴四反红外光学系统中主四镜共体结构展开优化设计,并对最终设计方案进行分析和测试,验证优化设计方法的有效性。

1 优化方法

1.1 拓扑优化

由于结构的多样性,传统设计优化时需要大量的迭代,而拓扑优化可以设定载荷和约束条件,给出既定目标和优化变量,通过算法计算出设计域中相对最优布局,给设计提供参考和支撑,极大地提高了设计效率。拓扑优化流程如图 3 所示。

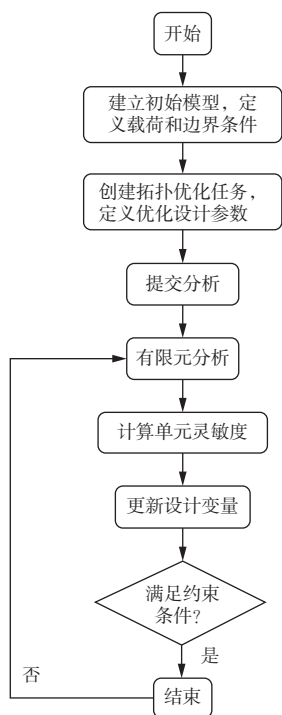


图3 拓扑优化设计流程

Fig. 3 Flow chart of topology optimization design

拓扑优化中常用变密度法,它源于微观结构等效的思路,以元素的相对密度为设计变量,通过密度从0到1的空间配置变化来实现拓扑结构。0表示该区域无密度,存在的必要性低,应尽量优化掉该部分;1表示该区域存在的必要性大,需要保留^[14]。反射镜结构拓扑优化过程中,通常关注反射镜的面形精度变化RMS最小,而现有的拓扑优化商业软件不能直接使用RMS作为优化目标^[15]。为了最小化RMS,需要保证整个反射镜镜体具有足够大的结构刚度来抵抗变形,避免外载荷影响下面形精度变化过大,故本文以刚度最大即柔度最小作为目标函数,约束整体镜体体积分数,保证轻量化设计条件下,设计刚度最大的双面共体反射镜镜体。数学模型如下:

$$\text{Find } X = (\rho_1, \rho_2, \rho_3 \cdots \rho_N)$$

$$\text{优化目标: Minimize } C(x) = U^T K U$$

$$\text{约束条件: } K U = F V_{\min}(x) = \sum_{i=1}^n \rho_i v_i$$

$$(i = 1, 2, \cdots, N) \quad 0 \leq \rho_i \leq 1$$

式中: ρ_i 为相对密度; U 为全局位移矢量; K 为全局刚度矩阵; F 为全局负载向量; V 为结构的总体积; v_i 为单位体积; N 为变量数^[16]。

1.2 尺寸优化

通过拓扑优化可以确定材料的合理分布形式,但最优分布形势下的最佳尺寸还需要进一步确

认,这就用到尺寸优化^[17]。尺寸优化是在形状不变的基础上,对参数进行优化,其设计变量可以定义为壳单元厚度、梁单元截面积等。本文以最小柔度为目标,一阶频率和筋板质量为约束条件,寻找最佳尺寸参数。数学模型如下:

$$\text{Find } t = (t_1, t_2, t_3 \cdots t_N)$$

$$\text{优化目标: Minimize } C(x) = U^T K U$$

$$\text{约束条件: } K U = F$$

$$f_1 \geq \underline{f}$$

$$\text{Mass} \leq \underline{\text{Mass}}$$

式中: t_i 为筋板厚度; f_1 为一阶频率; $\underline{f}$ 为设定的约束频率; Mass 为求解域质量; $\underline{\text{Mass}}$ 为设定的约束质量。

2 优化设计

2.1 光学系统参数

传统同轴四反光学系统设有四块反射镜,本文采用主、四共体的思路,使布局更加紧凑,但对主、四共体反射镜镜体的设计提出了更高的要求。系统光路如图4所示。红外系统方案中,反射镜口径为186 mm,工作波段 $8 \mu\text{m} \sim 12 \mu\text{m}$,设计要求总质量低于1 kg,主、四镜面形RMS要求低于 $\lambda/5$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),自重对主、四镜面形RMS影响要求低于 $\lambda/20$,一阶频率要求大于400 Hz。

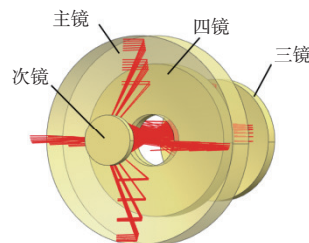


图4 同轴四反光路图

Fig. 4 Optical path diagram of coaxial four-mirror system

2.2 材料选择

随着超精密加工技术的突飞猛进^[18],铝合金材料因重量较轻、加工性能优良,广泛应用在光学领域。铝合金既可以做结构件,也可以做光学件,可以设计成光、机同种材料,更好地实现整机被动无热化,且制造成本相对玻璃陶瓷更低^[19-21]。本文主四镜材料选择铝合金6061-T6,材料属性见表1所示。

表1 铝合金6061-T6属性

Table 1 Properties of aluminum alloy 6061-T6

密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	弹性模量/GPa	泊松比
2.8	71	0.33

2.3 初始模型设计

首先需要确定支撑形式,反射镜支撑种类一般包括中心支撑、背部支撑、侧面支撑、周边支撑四种方式。根据平板理论^[22],反射镜的支撑点数目可由下式计算:

$$N = \left(\frac{1.5R^2}{t} \right) \left(\frac{\rho}{E\delta} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中: R 为反射镜半口径,单位为in; E 为材料的弹性模量,单位为lb/in²; δ 为允许的PV值,单位为in,为保证裕度充足取 $\delta=\lambda/20$ ($\lambda=632.8$ nm); t 为反射镜厚度,单位为in; ρ 为材料密度,单位kg/m³。主镜口径大于四镜,将表2所示主镜各参数代入公式(1)进行计算。

表2 反射镜结构参数

Table 2 Structural parameters of mirror mm			
外径	内径	曲率半径	高度
186	35	230	60

计算得到 $N=1.54$,表明采用3点支撑形式已足够保证镜体的面形不受支撑点数量多少的影响。为了避免过约束带来的非必要的镜面变形,不再引入过多支撑,最终采用3点支撑的形式。

本文拓扑优化设计的双面共体反射镜有限元模型如图5所示。其中蓝色部分为非设计区域,分别包括3个支撑耳,主镜面和四镜面;黄色区域代表设计区域,F1、F4分别代表主、四镜上模拟加工抛光压力设置的负载。优化目标时,选择主、四镜面柔度最小为优化目标。柔度是变形与负载的比值,反射镜柔度最小可以等效负载条件下的面形变化最小^[23]。约束设计区域时优化体积分数在0.3以内,确保足够的轻量化率。固定安装耳的圆孔,按水平放置的自重载荷和加工抛光压力设置负载。本文双面共体反射镜无表面改性及镀膜工序,可以被动消热且无需考虑双金属效应等影响,设置去除材料的方向关于光轴对称。

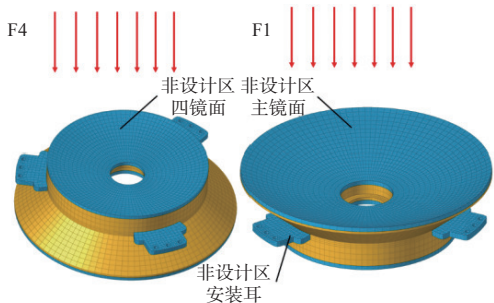


图5 拓扑优化有限元初始模型

Fig. 5 Initial finite element model of topology optimization

2.4 拓扑优化

经过51轮迭代,计算结果逐渐收敛到一个较稳定的状态。拓扑优化后隐去主镜面非设计区域及隐去四镜面非设计区域的材料密度分布图如图6所示。图6中红色表示材料密度为1,即对刚度贡献最大的地方(主、四镜镜面区域为非设计区域,也显示为红色);蓝色表示材料密度为0,为可以去除的材料。

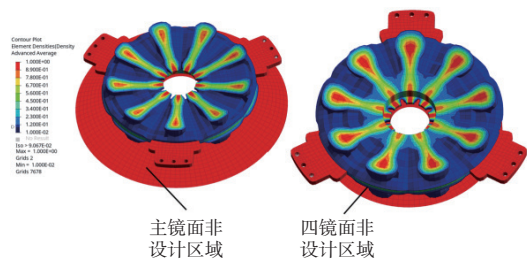


图6 拓扑材料密度分布图

Fig. 6 Density distribution diagram of materials by topology

为了便于观察,隐掉材料密度小于0.6 kg/m²的部分,如图7所示。拓扑优化结果表明,在上述设置条件下,主镜面与四镜面通过以光轴方向为中心呈辐射形排列的筋板固定时刚度最高。

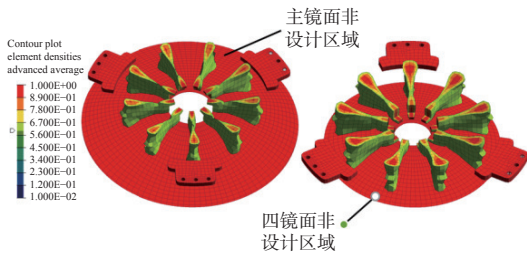


图7 材料密度大于0.6 kg/m²分布结果

Fig. 7 Distribution results of density greater than 0.6 kg/m²

2.5 尺寸优化

根据最佳材料分布密度,考虑实际加工情况,对筋板分布进行微调,建立主、四镜及筋板面网格模型,如图8所示,镜面和筋板均赋予为壳单元属性。尺寸优化方式上,有尺寸参数化优化和自由尺寸优化供选择。参数优化结果为等厚结果,本文中需要对2个镜面厚度尺寸优化,参数化优化对镜面尺寸限制较大,采用自由尺寸优化可以获得镜面不同半径位置处的厚度,故采用自由尺寸优化,将筋板、主镜面、四镜面设为3个独立的设计域。在分析软件中将主镜面柔度变量和四镜面柔度变量通过光学分配的权重系数整合成一个变量,以加权后的变量柔度最小为优化目标,负载

设置同上述 2.3 节, 约束整体一阶频率及筋板的总质量。

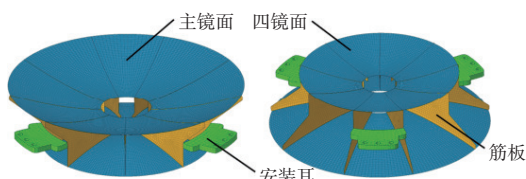


图 8 尺寸优化网格模型

Fig. 8 Mesh model for size optimization

两镜面和筋板自由尺寸优化后的结果如图 9 所示。为确保足够的刚度, 在镜面内孔与筋板交界处, 9 根筋板中, 与安装耳(绿色)连接的尺寸值较大, 为 4.5 mm, 其余筋板为 1.5 mm, 2 个镜面靠近内径部分厚度为 7.5 mm, 边缘为 4 mm。

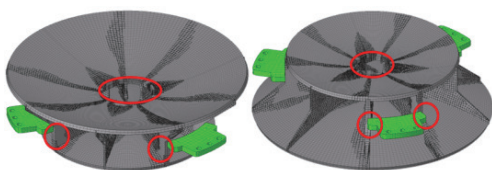


图 9 自由尺寸优化结果

Fig. 9 Results of free size optimization

参考优化结果, 综合考虑镜体刚度、轻量化率、安装适应性、传统加工铣削进给刀方向、抛光镀膜等加工工艺制造过程, 对部分结构进行细化, 最终设计的主四镜模型如图 10 所示。

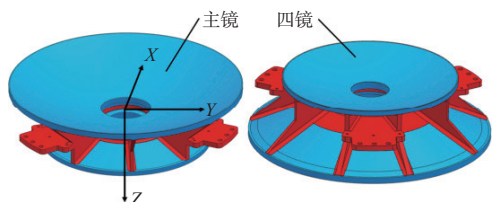


图 10 最终设计的主四镜模型

Fig. 10 Final design of primary-fourth mirror model

最终模型 3 个支撑耳分别连接 2 个筋板, 每 2 个支撑耳中间再设置 1 个筋板, 共 9 个筋板。该模型原始镜坯质量为 4.53 kg, 轻量化后为 0.8 kg, 符合质量低于 1 kg 的要求, 且双面反射镜的轻量化率达到 82.4%。

3 设计结果分析

3.1 模态分析

对最终设计的主四镜模态进行分析, 考量所设计反射镜的刚度特性, 模态分析结果如表 3 所示,

对应的前三阶振型如图 11~图 13 所示。X 轴、Y 轴、Z 轴方向见图 11 所示。

表 3 主四反射镜前 3 阶模态

Table 3 The first three modes of primary-fourth mirror

阶次	频率 /Hz	振型
1	417.7	沿 Z 轴平动
2	537.1	绕 X 轴旋转
3	537.1	绕 Y 轴旋转

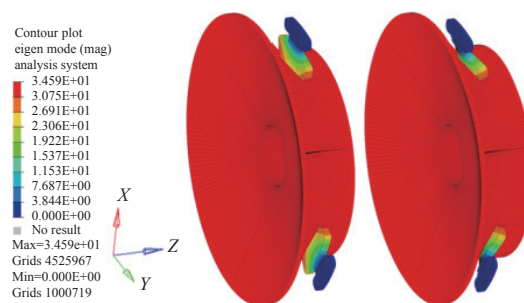


图 11 第一阶振型

Fig. 11 The first-order vibration mode

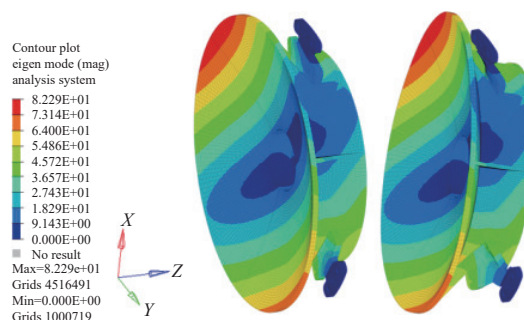


图 12 第二阶振型

Fig. 12 The second-order vibration mode

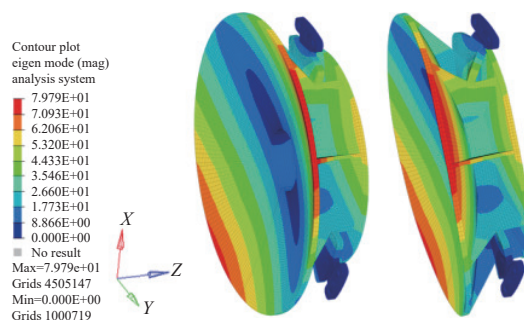


图 13 第三阶振型

Fig. 13 The third-order vibration mode

模态分析结果表明, 镜体一阶频率已达到 417 Hz, 具有足够高的刚度, 符合大于 400 Hz 的要求。振型主要以安装耳的变形为主, 主四镜镜面及筋板

构成的整体刚度更高,更加稳定,可以更好地保证面形精度要求。

3.2 自重变形分析

为了进一步验证反射镜的刚度,分析径向 1g

重力、轴向 1g 重力做用下反射镜的面形变化。在有限元分析结果中导出反射镜面形变化前后的各节点坐标进行面形拟合,主、四镜面形云图如图 14 所示。

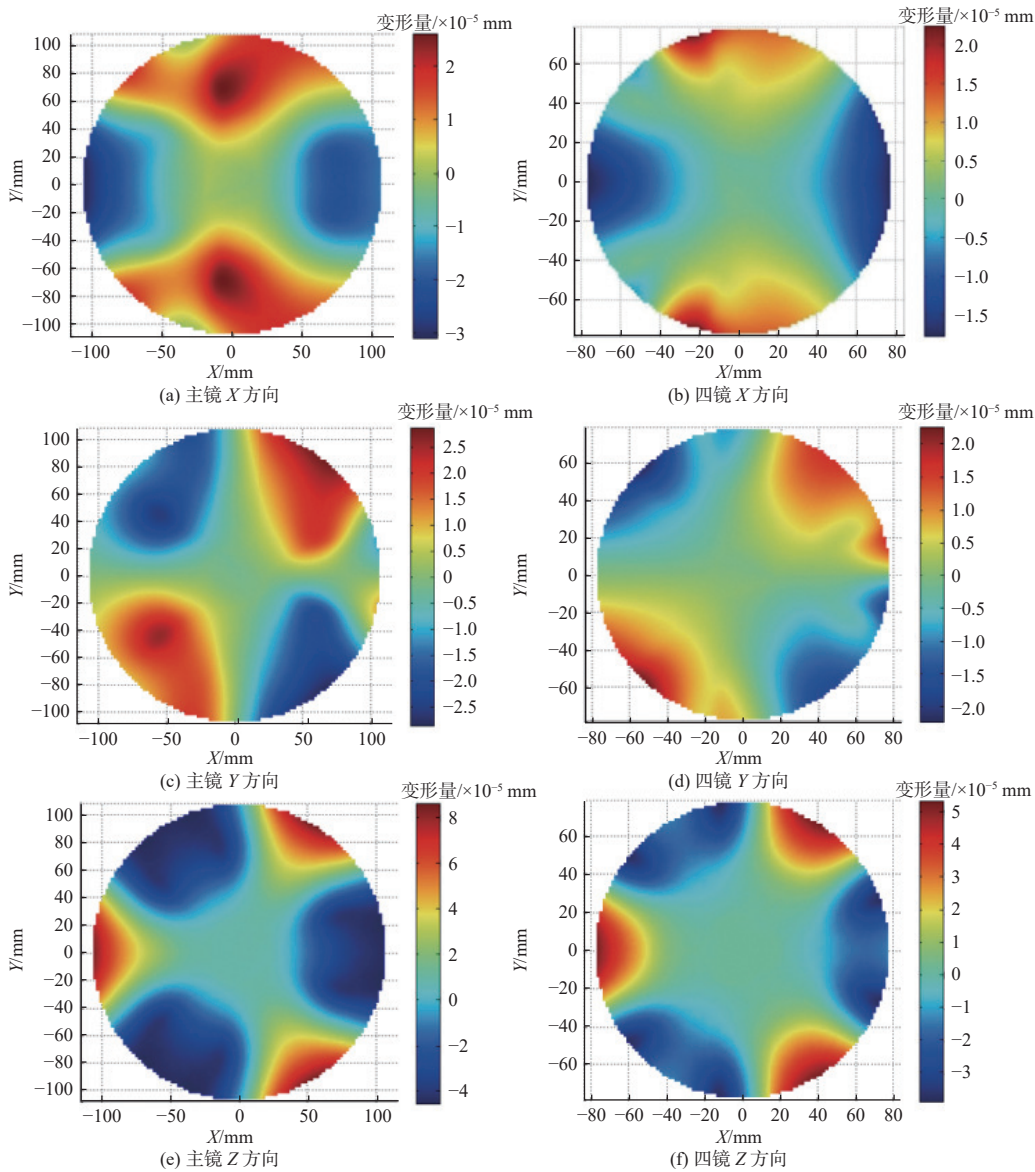


图 14 主、四镜面形云图
Fig. 14 Cloud atlas of surface shape for primary-fourth mirror

主、四镜在 X, Y, Z 3 个方向 1g 重力下的 RMS 值和 PV 值结果如表 4 所示。从表 4 可以看出,面形 RMS 变化最大发生在主镜 Z 方向上,换算成波长约为 $\lambda/22$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$),符合低于 $\lambda/20$ 的要求,其余方向自重对主、四镜面形 RMS 的影响均低于 $\lambda/37$,说明其抵抗重力变形的能力出色,侧面证明其刚度充足。

表 4 主、四镜 1g 重力变形			
Table 4 Primary-fourth mirror deformation under 1 g gravity			nm
测试项目	X	Y	Z
主镜 RMS	12.5	12.5	28.5
主镜 PV	57.8	57.5	116.9
四镜 RMS	7.0	7.0	17.1
四镜 PV	41.3	45.8	92.8

4 面形测试

在完成优化设计与分析验证后,采用最终设计方案对镜体进行加工,在粗加工、半精加工、精加工后对镜体进行时效处理,消除镜面的残余应力,以确保面形的稳定。采用干涉法中的零位检测法测试主四镜面形 RMS 是否满足要求。零位检测法通过计算机生成的全息图(computer-generated holograms, CGH),将干涉仪发出的球面波转化为主四镜面形所对应的非球面波,从而消除非球面的法线像差,可将测试精度提高至 nm 级^[24]。面形测试过程如图 15 所示。

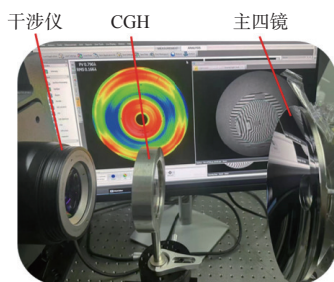


图 15 干涉仪检测面形测试过程

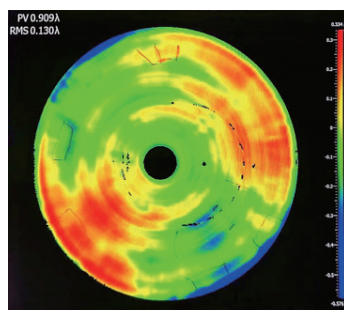
Fig. 15 Testing process of surface shape by interferometer detection

测试结果如表 5 和图 16 所示。这里需要指出,综合考虑项目周期的需求和红外光学系统对反射镜的指标要求,最终面形 RMS 均控制在 $\lambda/7$ ($\lambda=632.8$ nm) 以内,符合低于 $\lambda/5$ 的要求,镜体在红外光学系统中工作正常,证明了本次拓扑优化设计的有效性。

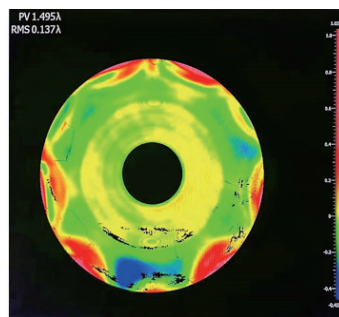
表 5 面形测试结果

Table 5 Test results of surface shape

测试项目	主镜	四镜
面形RMS值	0.13 λ	0.137 λ
面形PV值	0.909 λ	1.495 λ



(a) 主镜面形测试结果



(b) 四镜面形测试结果

图 16 主、四镜面形测试结果

Fig. 16 Test results of surface shape for primary-fourth mirror

5 结论

本文提出一种双面共体反射镜的设计优化方法。通过拓扑优化结合尺寸优化的方法,完成了双面共体反射镜的优化设计,并对最终方案进行了分析及测试,得到如下结论:

1) 通过拓扑优化的方法获得材料在约束下的最佳分布形式,结果表明,以光轴为中心呈辐射型排列布置筋板支撑主、四镜面体时刚度最高。

2) 通过自由尺寸优化,获得主、四镜面和筋板的最佳尺寸参数,参考优化结果,设计的镜体轻量化率达到 82.4%。

3) 分析了镜体的模态及 1g 重力对面形 RMS 的影响,求得一阶频率为 417 Hz; 1g 重力对面形 RMS 的影响最大为 $\lambda/22$ ($\lambda=632.8$ nm), 分析结果表明镜体具有较高的刚度和较好的抵抗自重变形能力。

4) 完成实物加工及测试,实测主、四镜面形 RMS 均约为 $\lambda/7$, 满足红外光学系统的性能要求。

综上所述,本文优化方法的有效性得到了验证,为双面共体反射镜的优化设计提供了一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 周晓斌, 孙浩, 原琦, 等. 一种折反式红外/激光复合导引头光学系统设计[J]. 应用光学, 2019, 40(6): 987-992.
ZHOU Xiaobin, SUN Hao, YUAN Qi, et al. Design of catadioptric infrared/laser compound seeker optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(6): 987-992.
- [2] 张旗. 红外成像制导技术的应用研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
ZHANG Qi. Application and research of infrared ima-

- ging guidance technology[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [3] PARK K S, LEE J H, YOUN S K. Lightweight mirror design method using topology optimization[J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(5): 053002.
- [4] MUTTERS D K. Mirror topology optimization[J]. *SPIE*, 2019, 11100: 1110009-1-13.
- [5] LEE D C, LEE J I. Structural optimization design for large mirror[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2004, 42(1): 109-117.
- [6] LIU S, HU R, LI Q, et al. Topology optimization-based lightweight primary mirror design of a large-aperture space telescope[J]. *Appl. Opt.*, 2014, 53(35): 8318-8325.
- [7] LIU G, GUO L, WANG X, et al. Topology and parametric optimization based lightweight design of a space reflective mirror[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(7): 1.
- [8] WANG X, WANG W, OHTA J, et al. A new primary mirror based on topology optimization [J]. *SPIE*, 2013, 8908: 89080D: 1-8.
- [9] QU Y, JIANG Y, FENG L, et al. Lightweight design of multi-objective topology for a large-aperture space mirror[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(11): 2259.
- [10] 邢明慧, 李健军, 翟文超, 等. 基于有限元分析的小口径离轴抛物面反射镜支撑结构设计[J]. *应用光学*, 2019, 40(6): 1160-1166.
- XING Minghui, LI Jianjun, ZHAI Wenchao, et al. Design of support structure for small caliber off-axis parabolic reflector based on finite element analysis[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(6): 1160-1166.
- [11] 汪逸群, 王龙, 郭万存, 等. 空间多用途双面反射镜的设计与制备[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 366-374.
- WANG Yiqun, WANG Long, GUO Wancun, et al. Design and manufacture of space all-purpose double-faced reflective mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 366-374.
- [12] 李正达, 孙胜利, 饶鹏, 等. 一体式双面镜: CN213903925U[P]. 2021-08-06.
- LI Zhengda, SUN Shengli, RAO Peng, et al. Integrated double-sided reflector: CN213903925U[P]. 2021-08-06.
- [13] 王子武. 轻量化大口径双面非球面反射镜结构一体件的制造关键研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2017.
- WANG Ziwu. Research on the key manufacturing of light-weighted structural part for double-faced aspheric mirror with large aperture[D]. Suzhou: Suzhou University, 2017.
- [14] 李蕾, 张葆, 李全超. 机载红外系统主反射镜的拓扑优化设计[J]. *红外技术*, 2016, 38(8): 648-652.
- LI Lei, ZHANG Bao, LI Quanchao. Topology optimization of primary mirror in airborne infrared system[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(8): 648-652.
- [15] ZHANG J, ZHANG X, TAN S, et al. Design and manufacture of an off-axis aluminum mirror for visible-light imaging[J]. *Current Optics and Photonics*, 2017, 1(4): 364-371.
- [16] ZHANG K, XIE X, WANG C, et al. Optomechanical performances of advanced lightweight mirrors based on additive manufacturing[J]. *Micromachines*, 2022, 13: 1334.
- [17] 宋伟阳, 解鹏, 王循. 大型空间离轴三反相机分体支撑结构设计[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(3): 571-581.
- SONG Weiyang, XIE Peng, WANG Xun. Design of lightweight split support structure for large space off-axis three mirror camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(3): 571-581.
- [18] 陈达任, 李占杰, 靳刚, 等. 金属反射镜超精密加工研究进展[J]. *机械研究与应用*, 2018, 31(1): 159-163.
- CHEN Daren, LI Zhanjie, JIN Gang, et al. Review on ultra-precision machining of metal reflector[J]. *Mechanical Research & Application*, 2018, 31(1): 159-163.
- [19] 张东阁, 傅雨田. 铝合金反射镜的发展与应用[J]. *红外技术*, 2015, 37(10): 814-823.
- ZHANG Dongge, FU Yutian. Development and application of aluminum mirrors in optical system[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(10): 814-823.
- [20] VUKOBRATOVICH D, HATHEWAY A E, SCHAEFER J P. Large stable aluminum optics for aerospace applications[J]. *SPIE*, 2011, 8125: 81250T.
- [21] 张继真. 铍铝合金反射镜设计和制造技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- ZHANG Jizhen. Study on the design and manufacturing technologies of Beryllium-Aluminium mirror[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [22] 谭双龙, 王灵杰, 张新, 等. 可见光级铝合金反射镜一体化设计与分析[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 40(3): 5-8.
- TAN Shuanglong, WANG Lingjie, ZHANG Xin, et al. Snap together design and analysis of visible quality Aluminum mirror[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2017, 40(3): 5-8.
- [23] 刘多, 江昱含, 董得义, 等. 基于增材制造的空间反射镜

- 拓扑优化设计[J]. 机电工程, 2022, 39(7): 1010-1016.
- LIU Duo, JIANG Yuhan, DONG Deyi, et al. Topological optimization design of space mirror based on additive manufacturing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(7): 1010-1016.
- [24] 梁子健, 杨甬英, 赵宏洋, 等. 非球面光学元件面型检测技术研究进展与最新应用[J]. 中国光学, 2022, 15(2): 161-186.
- LIANG Zijian, YANG Yongying, ZHAO Hongyang, et al. Advances in research and applications of optical aspheric surface metrology[J]. Chinese Optics, 2022, 15(2): 161-186.