



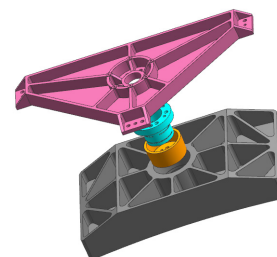
DOI: 10.12086/oe.2020.200109

轻质长条形反射镜结构优化设计

王朋朋^{1,2}, 辛宏伟^{1*}, 朱俊青¹, 王永宪¹,
许艳军¹, 陈长征¹

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中国科学院大学, 北京 100049



摘要:为解决空间反射镜镜体质量和面形精度在轻量化设计过程中会引起相互冲突的问题,针对某型离轴三反光学系统的长条形主反射镜进行了结构优化设计研究,提出了一种基于 SiC 材料的中心支撑的轻量化结构,同时引入了多目标集成优化方法,以镜体质量(Mass)和面形(RMS)同时作为优化目标,得到一个反射镜最佳结构模型,其质量为 2.32 kg,轻量化率达到了 73.8%;然后,对反射镜支撑结构进行了结构设计和说明,并对该组件进行了仿真分析,在 X、Y、Z 三轴方向 1 g 重力工况下的 RMS 值分别达到 2.5 nm、2.2 nm、7.3 nm,4 °C 均匀温升载荷工况下的 RMS 值为 3.2 nm,远小于设计要求的 $RMS \leq \lambda/50 (\lambda=632.8 \text{ nm})$,满足设计要求。

关键词:长条形反射镜;中心支撑;轻量化;多目标集成优化;有限元分析

中图分类号: TH751

文献标志码: A

引用格式: 王朋朋, 辛宏伟, 朱俊青, 等. 轻质长条形反射镜结构优化设计[J]. 光电工程, 2020, 47(8): 200109

Structural optimization design of lightweight rectangular reflective mirror

Wang Pengpeng^{1,2}, Xin Hongwei^{1*}, Zhu Junqing¹, Wang Yongxian¹,
Xu Yanjun¹, Chen Changzheng¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

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

Abstract: In order to solve the problem that the mass and the surface figure accuracy of the space reflective mirror are often contradictory in the lightweight design process, a structural optimization design of a lightweight rectangular reflective mirror of an off-axis three-reflection optical system is performed. In this study, a lightweight structure based on the center support of SiC materials is proposed. At the same time, a multi-objective optimization method is introduced. With the RMS value and Mass as the optimization targets at the same time, a mirror optimal structure model is obtained with a mass of 2.32 kg. Compared with the solid mirror, the lightweight ratio is 73.8%. Then the mirror subassembly is designed and the integrated performance of it is simulated. It shows that the RMS value of the mirror reaches respectively 2.5 nm, 2.2 nm and 7.3 nm when gravity load is applied in the directions of X, Y and Z axes. Furthermore, the RMS value is 3.2 nm when the mirror subassembly is under the load condition of uniform

收稿日期: 2020-03-31; 收到修改稿日期: 2020-06-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(11803036)

作者简介: 王朋朋(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事空间光学遥感器光机结构设计及 CAD/CAE 工程分析。

E-mail: 1413439235@qq.com

通信作者: 辛宏伟(1970-), 男, 博士, 研究员, 主要从事空间相机光机结构的研究。E-mail: xinhwciomp@sina.com

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

temperature rise of 4 °C, which is far less than the requirement of $RMS \leq \lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm). Therefore the data meets the design requirements.

Keywords: rectangular reflective mirror; support in center; lightweight; multi-objective optimization; finite element analysis

Citation: Wang P P, Xin H W, Zhu J Q, et al. Structural optimization design of lightweight rectangular reflective mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(8): 200109

1 引言

离轴三反(Three mirror anastigmat, TMA)光学系统具有无色差、无中心遮拦、大视场等特点,它已被广泛使用在空间光学遥感器中^[1]。其中,长条形反射镜作为该系统核心元件,其镜体的轻量化设计可以减小热惯性,降低动载荷,极大地降低其支撑难度,提高动态特性。然而,轻量化程度增大的同时也带来了新问题,反射镜虽然比刚度呈上升趋势,但其结构的绝对刚度会呈现出一定程度的下降趋势,这种性能间的冲突问题使反射镜的结构设计成为研究热点^[2-4]。

目前, Park 等在反射镜研制过程中使用变密度法,设计出了第一块轻型反射镜^[5]。辛宏伟对具有大长宽比的小型轻质长条形反射镜进行了研究,提出了单点挠性的支撑方式,从而减轻镜体质量,并兼顾成像质量^[6]。朱俊青等主要针对规则模型,提出了一种集成参数优化设计方法,在某长条形反射镜实例中,以自动参数化建模为核心,集成参数优化后,确定了该镜三点支撑的分布位置和相应的模型参数^[3]。包奇红等对长条形反射镜中心支撑与多点支撑两种支撑方式进行了详细研究,并依据仿真分析数据对比,发现中小型长条形反射镜的中心支撑优于多点支撑^[7]。汪荃等对大口径圆形反射镜中心支撑和三点支撑两种支撑方式进行了详细研究,并根据相机在实际工况下的仿真分析结果,对两种支撑方式进行了对比择优^[8]。

本文对空间某型 TMA 光学系统的主反射镜进行

了结构优化设计研究,其口径为 275 mm×147.6 mm。首先,使用经验公式指导初始结构设计,然后,结合集成优化设计方法,通过对镜坯参数进行 Z 向重力工况下的面形(root mean square, RMS)和镜体质量(mass)共同设为优化设计目标,充分考虑反射镜轻量化率的增加会引起其结构的绝对刚度一定程度下降的问题,即 Mass 减小而引起 RMS 增大的问题,来进行结构优化设计。最后,对其支撑结构进行了详细阐述和分析。

2 反射镜结构设计

2.1 材料的选择

对比表 1 的几种常用材料,碳化硅(SiC)材料具有较高的比刚度和尺寸稳定性等重要的物理性质,综合品质远超其他材料^[9],同时,还综合考虑到反射镜组件材料间的热特性匹配的问题,镜体采用反应烧结法,该加工工艺较成熟。因此,使用 SiC 作为镜体材料。

2.2 支撑方式选择

空间反射镜的支撑结构将应对复杂力、热、振动、冲击环境变化,因此支撑方式的选择对保证反射镜面形精度有着至关重要的作用。

根据支撑位置的不同,支撑形式主要有周边支撑和背部支撑。周边支撑的支撑位置主要是镜体侧边,为了不过大增加结构尺寸,应用范围受限,口径较小的反射镜中应用较多。背部支撑有中心和多点支撑, Hall^[10]总结了确定支撑点数量的经验公式,随着中国

表 1 常用反射镜材料的性能

Table 1 Performance of rational materials for mirror

材料	密度 ρ /(g/cm ³)	弹性模量 E /(GPa)	比刚度 E/ρ /(GN·(m/g))	线胀系数 α /(10 ⁻⁶ /K)	导热系数 λ /(W/(m·K))	比热容 c /(J/(kg·K))	热稳定性 λ/α	综合品质 (λ/α)·(E/ρ)
FS	2.19	72.00	32.88	0.50	1.40	750.00	2.80	92.05
Zerodur	2.53	91.00	35.97	0.05	1.64	821.00	32.80	1179.76
Al	2.70	68.00	25.19	22.50	167.00	896.00	7.42	186.93
Be	1.85	287.00	155.14	11.40	216.00	1925.00	18.95	2962.53
Si	2.33	131.00	56.22	2.60	137.00	710.00	52.69	2962.53
SiC	3.20	400.00	125.00	2.40	155.00	650.00	64.58	8072.92

科学院长春光学精密机械与物理研究所包奇红等^[8]的研究发现,采用中心支撑的中小型反射镜性能优于多点支撑的同种反射镜,中心支撑利于减重,且降低整体设计难度,通过合理设计可保证 RMS,故选用中心支撑的形式。

Hindle^[11]给出了分布位置所在半径范围的经验式:

$$R = (\sqrt{3}/6)D_m = 0.28868D_m, \quad (1)$$

式中: R 为支撑孔所在的圆周半径, D_m 为反射镜最大口径。此处取 D_m 为 147.6 mm, 由式(1)得 $R \approx 42$ mm。所以,单点中心孔直径最大极限应在 $\Phi 84$ mm 以内,根据本文反射镜的口径尺寸参数特点,确定中心支撑孔直径为 $\Phi 50$ mm。

2.3 轻量化结构形式

Roberts^[10,12-13]等人对圆形反射镜的径厚比 $D_t(D/t)$ 与自重变化的关系进行了研究,并总结了经验式:

$$\delta = \frac{3\rho g D_t^2 D^2}{256E}, \quad (2)$$

式中: δ 为最大自重变形,单位为 μm ; ρ 为材料的密度,单位为 kg/m^3 ; g 为重力加速度,单位为 m/s^2 ; D 为圆盘直径,单位为 m ; E 为材料弹性模量,单位为 GPa ; D_t 为径厚比。长条形反射镜同样可以参考此公式,可以看出,自重变形与材料的比刚度成反比,与径厚比的平方成正比。因而,重力作用下镜面的最大刚体位移取允许较大安全值,初步选定反射镜的径厚比为 8:1。

反射镜轻量化孔的形状包括三角形孔、四边形孔、六边形孔、蜂窝孔、扇形孔和圆形孔等,但是需要注意的是,轻量化孔的设计可能在光学表面形成“网格效应”,该问题会给系统的成像质量带来影响。“网格效应”与轻量化孔形式、材料、加工等因素密切相关,Vukobratovich^[14]提出了相关经验式:

$$\delta_{\max} = \frac{PB^4}{\psi(Et_f^3/12(1-\nu^2))}, \quad (3)$$

式中: $\delta_{\max}$ 为最大网格变形量; ν 为材料泊松比; P 为抛光压力; B 为轻量化孔内接圆直径; t_f (face thickness) 为镜面厚度; ψ 为网格效应常数,网格效应常数与轻量化孔的形式有关,具体为:三角形孔 $\psi=0.00151$, 正方形孔 $\psi=0.00126$, 六角形孔 $\psi=0.00111$ 。可以看出,当其他条件相同时,三角形孔的“网格效应”要低于其他几种形式,故本文选用三角形形状的轻量化孔。

反射镜背部结构形式包括倒角式、双折式、圆角

式、浴盆式等。针对本文支撑方式,采用倒角式不仅可以便于加工、定位和装夹,而且在轻量化上也起到一定促进作用。

综上所述,可得到图 1 所示反射镜初步设计几何结构模型,需要说明的是图 1 中模型的结构参数仅为初始值,后续将进行合理优化。

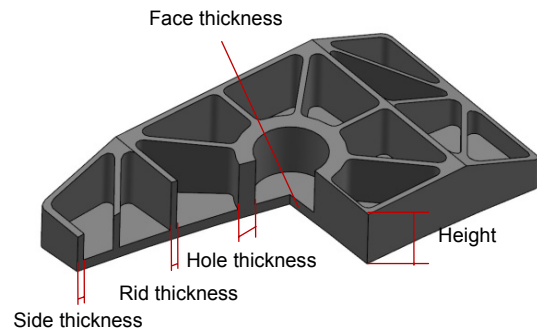


图 1 反射镜的初步设计几何结构模型
Fig. 1 Original geometry structure of reflective mirror

3 反射镜参数优化

3.1 镜体结构参数

结合图 1,对反射镜进行结构参数设置,本文以镜体结构参数镜体高度(height)、镜面厚度(face thickness)、中心连接孔壁厚(hole thickness)、外沿壁厚(side thickness)、加强筋厚(rib thickness)和背部倒角(chamfer)作为设计变量,并结合当前工艺水平,对各设计变量进行优化范围限定,分别给予最大极限和最小极限,整理为表 2。

在对倒角式的反射镜背部结构形式进行参数优化过程中,进行了变量转化,从而减小计算难度,提高参数优化速度。方法是将 UG 几何模型导入 HyperMesh 建立反射镜的壳单元网格模型,如图 2 所示,用三个有限元网格单元节点 129388、29390 和 29389 确定一个倒角平面,通过改变单元节点 129388 的 Z 向坐标来改变 θ 的大小。本文借助 HyperMorph 软件创建能够用于优化的形状变量,即利用图 2 中三个点定义倒角平面,通过节点 129388 的 Z 向单方向位移来转化高度的做法,被 HyperMorph 成功定义为可用于多目标优化软件 HyperStudy 直接识别的形状设计变量。

3.2 多目标集成优化

目前,在反射镜的结构设计过程中,单目标集成优化方法已较为成熟,例如以镜体结构参数为设计变量,以反射镜柔性变形为设计约束,并以镜体质量或

表 2 设计变量和优化结果

Table 2 Design variables and optimization results

Name	Height	Face thickness	Hole thickness	Side thickness	θ (Chamfer)	Rib thickness	Mass	RMS_X	RMS_Y	RMS_Z
Ranges	[30,60]	[5,30]	[5,20]	[1.5,10]	[0,60]	[1.5,10]	(0,5]	[0,12]	[0,12]	[0,12]
Value	42 mm	8 mm	9.4 mm	4 mm	23°	4 mm	2.32 kg	3.0 nm	1.8 nm	4.5 nm

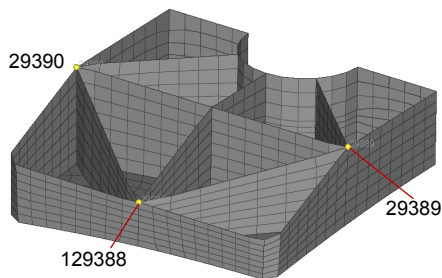


图 2 角度变量转化成坐标变量示意图
Fig. 2 Schematic of changing angle variable to coordinate variable

体积为设计目标(或优化目标),可得到较优结构模型,但往往得不到发展全局最优解,造成系统设计研究空间的极大浪费。为了解决该问题,应考虑兼顾 Mass 和 RMS 的最小化两个方面,充分利用设计空间,找到全局最优解,获得更好的设计综合指标的结果。文中反射镜 Z 向(轴向)自重变形相比 X 向和 Y 向更显著,其 RMS 值也较难满足设计要求。因此,将 Z 向重力工况下的 RMS 值和 Mass 同时作为优化目标,而将 X 向和 Y 向重力工况下的 RMS 值作为约束条件,结合表 2 的设计变量,进行优化设计。

$$\begin{aligned} & \text{Min } \{ \text{Mass} \& \text{RMS}_Z \} \\ & \text{S.t. } \text{RMS}_X \leq \lambda / 50; \\ & \quad \text{RMS}_Y \leq \lambda / 50 (\lambda = 632.8 \text{ nm}) \end{aligned} \quad (4)$$

本文选用 HyperStudy 软件进行多目标优化,优化算法采用软件推介的全局响应面算法(global response surface method, GRSM),该算法默认是处理多目标优化问题的,原理是内部建立响应面,每次迭代都会生

成新的全局搜索而得到的设计点,利用新的设计点来更新此响应面,在最佳响应面上搜索出最优点,因而可获得很好的模型拟合,具有高效和实用特点。图 3 为多目标集成优化流程图。

3.3 优化结果

多目标优化数据结果通常需进行数值圆整,以便加工等。优化后取整结果见表 2。

轻量化率计算公式:

$$\eta = \frac{M_0 - M_e}{M_0} \times 100\% \quad (5)$$

其中: η 为轻量化率, M_0 为原始实体模型质量, M_e 为最终优化模型质量。优化后的模型质量为 2.32 kg,与原始反射镜实体模型相比,轻量化率达到 73.8%。X、Y 和 Z 向重力工况下的 RMS 值分别为 3.0 nm、1.8 nm、4.5 nm。满足 $\text{RMS} \leq \lambda / 50 (\lambda = 632.8 \text{ nm})$ 和 $\text{Mass} \leq 5 \text{ kg}$ 两个设计指标要求。

4 支撑结构设计

反射镜柔性支撑结构包括锥套、柔性元件、背板、过渡角板等。如图 4 所示,锥套是有一定锥度的套筒,具有一定的中心对称的径向尺寸变形,与反射镜胶接,并将反射镜与支撑结构连接起来,其材料必须采用与反射镜线胀系数相匹配的殷钢(Invar);如图 5 所示,柔性元件采用一种双轴圆弧柔性铰链结构,具有体积小、无机械摩擦、无间隙和高灵敏度传动的特点,可通过自身的变形来改善镜面由于热应力所造成的面形

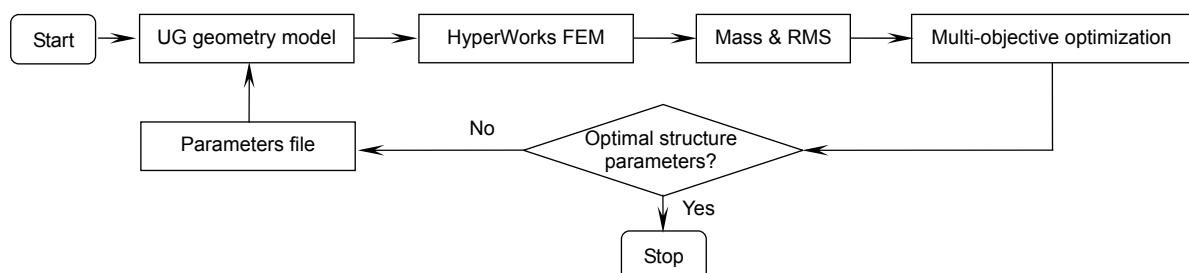


图 3 多目标集成优化流程图

Fig. 3 Flow chart of multi-objective optimization

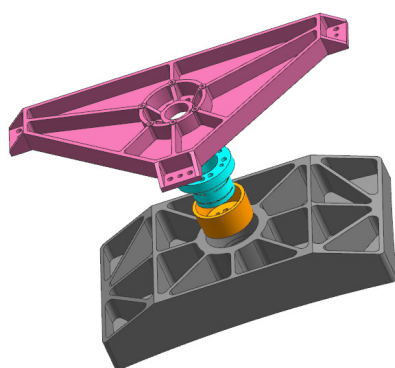


图4 体支撑结构爆炸图

Fig. 4 Explosion chart of mirror support structure

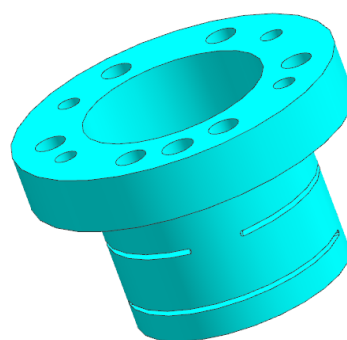


图5 柔性元件

Fig. 5 Flexible component

误差^[15]。该柔性元件分别连接锥套和背板,起到过渡作用,其材料则可以选用强度较高的钛合金(TC4);背板选用高体份材料(SiC/Al),进行轻量化后,再通过过渡角板与相机整体固定连接。过渡角板仅起连接作用,图4未给出具体结构形式。

在UG中建立三维模型(如图4)后,结合表3所列的材料密度属性,对反射镜组件进行测量,其质量为3.39 kg。

5 有限元分析

如图6所示,使用HyperWorks软件,将反射镜组件模型划分为有限元网格模型,然后使用Ansys和MSC_Nastran对反射镜组件进行仿真分析。

首先,进行模态分析,考察一阶固有模态是否会

与空间相机的一阶固有模态重合或相近,图7为组件的一阶固有模态分析,其一阶频率为140 Hz $\geq$ 100 Hz,满足动态刚度要求。

然后,进行静态分析,模拟两种工况:地面装调状态轴向1 g重力和温度载荷4 $^{\circ}$ C。图8为轴向重力作用时反射镜的变形结果;X、Y和Z向在1 g重力工况下的RMS值分别为2.5 nm、2.2 nm、7.3 nm;4 $^{\circ}$ C均匀温升载荷工况下的RMS值为3.2 nm,满足成像光学系统的反射镜RMS $\leq \lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm)的要求。

最后,进行结构强度分析,通过在背板与过渡角板连接的螺栓孔处分别沿各轴向输入频率为10 Hz~200 Hz的单位加速度激励的方法,输出反射镜镜体的加速度-频率曲线。由图9可知,X向、Y向和Z向加速度响应曲线的谐振峰均出现在140 Hz附近,在

表3 空间主要应用的结构材料列表

Table 3 Main structural materials in space

材料	密度 ρ /(g/cm ³)	弹性模量 E /(GPa)	比刚度 E/ρ /(GN·(m/g))	线胀系数 α /(10 ⁻⁶ /K)	导热系数 λ /(W/(m·K))	比热容 c /(J/(kg·K))	热稳定性 λ/α	综合品质 ($\lambda/\alpha \cdot (E/\rho)$)
TC4	4.40	114.00	25.91	9.10	7.40	611.00	0.81	21.07
Invar	8.90	141.00	15.84	0.65	13.70	460.00	21.08	333.92
高体份 SiC/Al	3.00	180.00	60.00	8.00	225.00	7115.00	28.13	1687.50

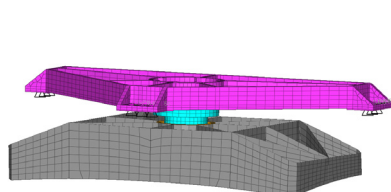
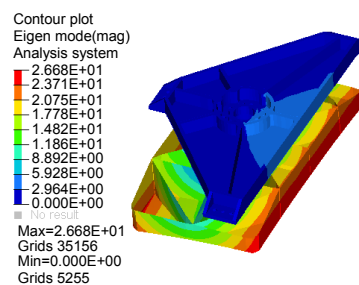
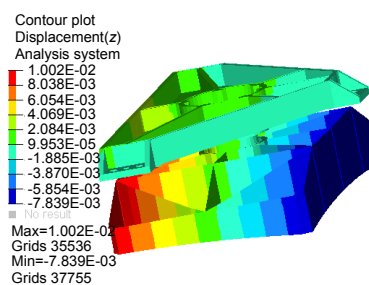


图6 反射镜组件有限元模型

Fig. 6 FEM model of reflective mirror subassembly

图7 组件一阶固有模态分析
Fig. 7 First constraint eigenfrequency of reflective mirror subassembly图8 轴向重力作用时反射镜的变形结果
Fig. 8 Displacement of reflective mirror subassembly under axial gravity

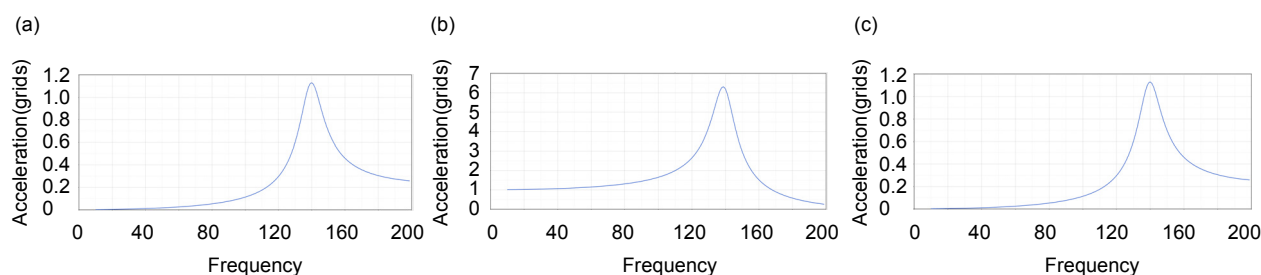


图9 加速度频率响应曲线。(a) X向; (b) Y向; (c) Z向

Fig. 9 Frequency response curves of acceleration. (a) X dimension; (b) Y dimension; (c) Z dimension

100 Hz 内的频段没有出现谐振峰, 满足设计要求。

6 结 论

本文针对所述长条形反射镜基于 SiC 材料的中心支撑的形式进行结构优化设计, 通过引入多目标集成优化的方法, 在减小镜体质量的同时, 尽可能保证了镜面的面形精度。仿真分析的结果显示, 镜体质量仅为 2.32 kg, 轻量化率达到了 73.8%; X、Y 和 Z 向在 1 g 重力工况下的 RMS 值分别为 2.5 nm、2.2 nm、7.3 nm; 4 °C 均匀温升载荷工况下的 RMS 值为 3.2 nm, 组件的一阶固有频率为 140 Hz。该设计保证了成像质量和轻量化率, 并且结构具有高静态刚度、高动态强度, 满足设计要求。该方法为同类型轻质长条形反射镜的结构优化设计提供了参考经验, 在采用中心支撑的形式下, 获得了较优的面形精度。

参考文献

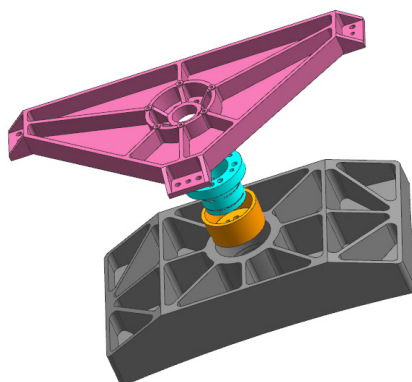
- [1] Zhang K K, Ruan N J, Fu D Y. Analysis and consideration of development of overseas space off-axis TMA system camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, **29**(3): 63–70.
张科科, 阮宁娟, 傅丹鹰. 国外空间用三反离轴相机发展分析与思考[J]. *航天返回与遥感*, 2008, **29**(3): 63–70.
- [2] Zhang L, An Y, Jin G. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(2): 278–280.
张亮, 安源, 金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(2): 278–280.
- [3] Zhu J Q, Sha W, Chen C Z, et al. Position layout of rear three point mounting for space rectangular mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(9): 2562–2569.
朱俊青, 沙巍, 陈长征, 等. 空间长条形反射镜背部三支撑点的设置[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(9): 2562–2569.
- [4] Xin H W, Guan Y J, Li J L, et al. Design of support for large aperture rectangular mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1560–1568.
辛宏伟, 关英俊, 李景林, 等. 大孔径长条形反射镜支撑结构的设
- 计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(7): 1560–1568.
- [5] Park K S, Lee J H, Youn S K. Lightweight mirror design method using topology optimization[J]. *Optical Engineering*, 2005, **44**(5): 053002.
- [6] Xin H W. Design and analysis on the flexible structure of the optical reflector[J]. *OME Information*, 2010, **27**(7): 51–55.
辛宏伟. 小型轻质长条反射镜挠性支撑方案研究[J]. *光机电信息*, 2010, **27**(7): 51–55.
- [7] Bao Q H, Sha W, Chen C Z, et al. Lightweight and optimization design of rectangular reflective mirror supported in centre[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(7): 157–163.
包奇红, 沙巍, 陈长征, 等. 中心支撑长条形反射镜轻型优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(7): 157–163.
- [8] Wang K, Xin H W, Xu H, et al. Lightweight design of fast steering mirror for space cameras[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(4): 0418001.
汪奎, 辛宏伟, 徐宏, 等. 空间相机快速反射镜的结构轻量化设计[J]. *红外与激光工程*, 2019, **48**(4): 0418001.
- [9] Zhang X J, Li Z L, Zhang Z Y. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(5): 577–582.
张学军, 李志来, 张忠玉. 基于 SiC 材料的空间相机非球面反射镜结构设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(5): 577–582.
- [10] Friedman E. *Photonics Rules of Thumb*[M]. New York: McGraw Hill, 2003.
- [11] Wang K J, Dong J H. Structural design of $\Phi 2\text{m}$ -level large-diameter SiC reflector used in space remote sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(7): 0718005.
王克军, 董吉洪. 空间遥感器 $\Phi 2\text{m}$ 量级大口徑 SiC 反射镜镜坯结构设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(7): 0718005.
- [12] Parks R E, Wortley R W, Cannon J E. Engineering with lightweight mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, **1236**: 735–743.
- [13] Anderson D, Parks R E, Hansen Q M, et al. Gravity deflections of lightweighted mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 1982, **0332**: 424–435.
- [14] Vukobratovich D, Iraninejad B, Richard R M, et al. Optimum Shapes for Lightweighted Mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 1982, **0332**: 419–423.
- [15] Wang X Y, Zhou P W. Design of rectangular space mirror and its support structure[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, **40**(2): 6–9, 13.
王晓宇, 周平伟. 长条形空间反射镜镜体及其支撑结构设计[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2017, **40**(2): 6–9, 13.

Structural optimization design of lightweight rectangular reflective mirror

Wang Pengpeng^{1,2}, Xin Hongwei^{1*}, Zhu Junqing¹,
Wang Yongxian¹, Xu Yanjun¹, Chen Changzheng¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

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



Explosion chart of mirror support structure

Overview: The research area of this paper is the field of off-axis three-reflective space optical remote sensor. As a core element of the system, the rectangular reflective mirror has been the focus. Increasing the degree of lightweight will also bring new problems, which cause a certain degree of structural strength reduction. Obviously, RMS (root mean square) will get worse. The purpose of this paper is to propose a feasible solution to this conflict of performance. First of all, select SiC as the mirror body material. Secondly, a flexible structure is based on the center support, which facilitates lightweight and reduces the overall design difficulty. Next, use the classical theoretical formula to create the initial structure of the mirror. The most important step is to introduce a multi-objective optimization method. The structural parameters of the lens body are used as design variables, and then the surface RMS values under X and Y gravity conditions are used as constraints. It is the mass of the mirror and the RMS values under the most sensitive Z-direction gravity conditions that are commonly set as the optimization goal. Furthermore, using GRSM (global response surface method) algorithm for optimization iterations. A mirror optimal structure model is obtained with a mass of 2.32 kg. Compared with the solid mirror, the lightweight ratio is 73.8%. Besides, the mirror subassembly is designed. It includes a cone sleeve, a flexible component, and a backplane. The main considerations of the assembly are the stiffness of the materials and the thermal compatibility between each other. The specific explanation is as follows. Thermal expansion coefficient of the cone sleeve and the mirror need to be the same, and these are connected by glue. The flexible component adopts a flexible hinge structure so as to improve RMS of the mirror due to thermal stress. The backplane connects the mirror assembly to one space remote sensor. Therefore, the rigidity of the backplane must be qualified. Finally, the integrated performance of the assembly is simulated. It shows that the RMS value of the mirror reaches respectively 2.5 nm, 2.2 nm and 7.3 nm when gravity load is applied in the directions of X, Y and Z axes. Furthermore, the RMS value is 3.2 nm when the mirror subassembly is under the load condition of uniform temperature rise of 4 °C, which is far less than the requirement of $RMS \leq \lambda/50$ ($\lambda=632.8$ nm). As a result, the data meets the design requirements. To sum up, the method provides reference experience for structural optimization design of the same type of lightweight rectangular reflective mirror.

Citation: Wang P P, Xin H W, Zhu J Q, *et al.* Structural optimization design of lightweight rectangular reflective mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(8): 200109

Supported by the Youth Program of National Nature Science Foundation of China (11803036)

* E-mail: xinhwciomp@sina.com