

长条反射镜及柔节的参数优化设计

王朋朋^{1,2}, 辛宏伟^{1*}, 朱俊青¹, 王永宪¹, 沙巍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: 为了提高空间离轴相机反射镜组件的设计效率,以某长条反射镜组件为例,提出了一种参数优化设计方法,以反射镜及柔节为研究重点,详细阐述其结构参数优化设计过程。对优化后的反射镜组件进行仿真分析,该组件在 1 g 轴向重力工况下,镜面面形 RMS 值为 $1.60 \text{ nm} \leq \lambda/50$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$);在 5 °C 均匀温升载荷作用下,镜面面形 RMS 值为 $6.70 \text{ nm} \leq \lambda/50$;质量为 2.58 kg,基频为 274 Hz,数据均满足设计要求。表明对反射镜组件结构进行参数优化可较好地满足指标,并由计算机进行结构参数优化迭代,显著提高了设计效率。

关键词: 长条反射镜; 柔节; 参数优化; 仿真分析

中图分类号: V443.5 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200493

Parametric optimization design of rectangular reflective mirror and flexible component

Wang Pengpeng^{1,2}, Xin Hongwei^{1*}, Zhu Junqing¹, Wang Yongxian¹, Sha Wei¹, Chen Changzheng¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to improve the design efficiency of the space camera reflective mirror subassembly, a parameter optimization design method was proposed taking a rectangular reflective mirror subassembly as an example. Focusing on the research of the mirror and the flexible component, the optimization design process of its structural parameters was explained in detail. Finally, the optimized subassembly was simulated and analyzed. The results show that the RMS value reaches respectively 1.60 nm when gravity load is applied in the directions of Z axes, and the RMS value is 6.70 nm when the mirror subassembly is under the load condition of uniform temperature rise of 5 °C, which are far less than the requirement of $RMS \leq \lambda/50$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$). In addition, the mass is 2.58 kg and the fundamental frequency is 274 Hz, which meets the dynamic stiffness requirement. To sum up, the parameter optimization design of the mirror subassembly structure can better meet the index, and the structure parameter optimization iteration by the computer can significantly improve the design efficiency.

Key words: rectangular reflective mirror; flexible component; parameter optimization; finite element analysis

收稿日期:2020-12-14; 修订日期:2021-01-04

基金项目:国家自然科学基金(11803036)

作者简介:王朋朋,男,硕士生,主要从事光机结构优化设计及 CAE 有限元仿真方面研究。

导师(通讯作者)简介:辛宏伟,男,研究员,博士,主要从事空间相机光机结构方面的研究。

0 引言

空间离轴相机具有体积小、质量轻等特性,符合空间遥感器系统的低质量指标要求,同时其光学系统具有大视场、宽波段等优点,顺应了光学遥感器的发展趋势,因而成为空间相机发展的重要方向^[1]。其中,长条反射镜组件作为相机的核心组件之一,需同时满足反射镜质量和镜面面形精度两个指标,然而反射镜轻量化率越高,镜面面形越易受结构的刚度不足和组件间材料属性差异引起的热应力影响,从而变差。柔节可以释放热应力,保持反射镜成像的面形精度要求。因此,反射镜和柔节是文中研究的重点。

发展至今,航天材料和工艺制备已有一定经验积累,在此基础上进行合理的结构设计及优化将产生更直接的影响,最终达到减重和高面形的目的是文中的研究重点。德国的 Gaia 相机将反射镜和结构件统一采用 SiC 材料制造,减小了材料间性能不匹配带来的应力问题,增大反射镜面形优势,但成本较高,技术难度大^[2]。Herschel 全 SiC 望远镜均采用了典型的 Bipod 柔性支撑结构,通过增加结构柔性设计来减小应力对镜面面形的影响^[3]。包齐红等通过详细定义长条反射镜的结构参数,并将反射镜质量和镜面面形 RMS 同时作为优化目标,获得了性能更优的镜体结构^[4]。汪奎等针对快速反射镜进行结构轻量化设计时,引入性能指标 QI(Quality Index) 作为优化目标,来平衡镜体质量和镜面面形两个指标冲突问题,优化后的结构综合性能得到了很大提升^[5]。张雷等设计了一种直接与反射镜胶接的串联双轴片式柔性支撑结构,运用多约束多目标的尺寸参数优化,最终获得理想的柔性支撑结构^[6]。胡洋等应用集成优化方法对反射镜镶嵌件(消热芯轴)的柔性部分进行了详细的优化设计说明,最终设计出的反射镜组件在稳定性方面表现优异^[7]。

文中以某型空间离轴相机的长条反射镜组件为研究对象,并对反射镜及柔节进行了参数优化设计研究,设计指标为反射镜及组件在自重及 5℃ 均匀温升环境温度时,镜面面形 $RMS \leq \lambda/50 (\lambda=632.8 \text{ nm})$, 组件的基频大于 200 Hz, 同时在设计过程中尽可能追求更高的轻量化程度,以降低发射成本。

1 反射镜组件

文中所设计的反射镜组件由反射镜、镶嵌件、柔节和背部支撑板构成,如图 1 所示。反射镜的材料选择依据是空间相机主要受发射振动、空间微重力及外热流的影响,碳化硅(SiC)的力学和热稳定性等综合性能较好^[8],因此镜体选用 SiC。镶嵌件为锥形,与反射镜的背部支撑孔通过光学环氧胶粘接,为了减小材料属性不匹配带来的热应力影响,通常选用线膨胀系数可调的殷钢(4J32)材料制造;柔节与镶嵌件和背部支撑板都通过螺钉连接,为保证支撑刚度,选用高强度、低密度的钛合金(TC4)材料;背部支撑板需与相机框架连接,相机主结构应力和热量由此传递给组件,因此,背部支撑板采用高比刚度、低线胀系数的高体份 SiC/Al 材料。材料属性见表 1。

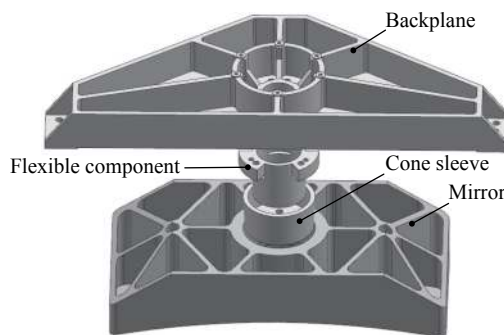


图 1 反射镜组件爆炸图

Fig.1 Explosion chart of reflective mirror subassembly

表 1 反射镜组件材料属性

Tab.1 Material properties of reflective mirror subassembly

Part	Mirror	Cone sleeve	Flexible component	Backplane
Material	SiC	4J32	TC4	SiC/Al
Density $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	3200	8100	4440	2940
Young's modulus E/GPa	400	141	109	213
$E/\rho/\text{m}$	125×10^{-6}	17.4×10^{-6}	24.5×10^{-6}	72.4×10^{-6}
Thermal expansivity α/K^{-1}	2.51×10^{-6}	2.41×10^{-6}	9.21×10^{-6}	8.01×10^{-6}
Poisson's ratio	0.14	0.25	0.34	0.18

2 反射镜参数优化设计

2.1 镜体轻量化初始结构

文中所述镜体轻量化初始结构并非归属概念设计,是基于相关经验基础上,利用详细设计手段进行优化设计,从而提高设计效率,因此对初始结构仅做外形相关内容说明。

首先选取支撑方式。辛宏伟^[1]对大长宽比的长条反射镜的支撑方式进行了研究,并提出了单点挠性支撑方案;包齐红等^[4]分别对中小型长条反射镜进行了单点支撑和多点支撑两种方案的对比分析,发现单点支撑在轻量化和面形性能上表现更好。长条反射镜口径为 246 mm×122 mm,因此根据其尺寸特点选用背部单点支撑方式。背部支撑孔口径大小采用有限元试算的手段,最终确定该口径为 $\Phi 50$ mm。

其次选取轻量化孔结构形式。在相同几何尺寸条件下,三角形轻量化孔在保持面形上要优于四边形及六边形等轻量化孔,且具有较好的各向同性,但其质量相比其他形式有所增加^[9]。同时考虑到加工难度,选取开式三角形轻量化孔布局。

最后,镜体结构参数包括镜体高度 (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)。该结构参数具体值通过后续参数优化确定,因此,先试取表 1 中初值作为参考,得到反射镜的轻量化初始结构如图 2 所示。

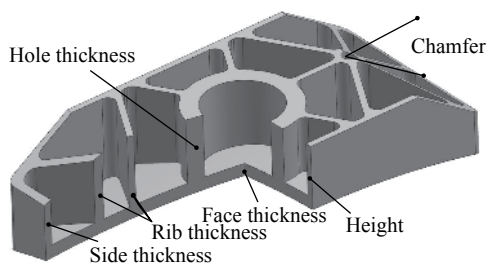


图 2 反射镜的初步设计几何结构模型

Fig.2 Original geometry structure of reflective mirror

2.2 镜体结构参数的多目标优化

图 3 为多目标优化流程。在 UG 软件中建立如图 2 所示的反射镜模型后,将该模型在 HyperMesh 软件中划分为 2D 网格有限元模型,并建立镜体轴向 1 g 重力工况。然后进行模型参数化定义,将图 2 所示的镜

体结构参数作为设计变量,按照定义方式,该参数分为两类。第一类为尺寸参数,该类参数可在 HyperStudy 软件中直接定义,具体包括镜面厚度、中心连接孔壁厚、外沿壁厚和加强筋厚,其中在加强筋参数化的研究上,袁健等提出了变筋厚的设计方案^[10],不仅证明了加强筋在增强镜体刚度上的贡献量不同,而且依据该方案改善了镜体边缘的面形。文中所设计的反射镜为轴对称结构,按照加强筋与支撑孔圆心的距离将加强筋划分为 5 组 (R1~R5),如图 4 所示。第二类为形状参数,该类参数采用在 HyperMorph 软件中预定义,然后在 HyperStudy 软件中被识别再次定义,具体包括镜体高度和背部倒角。原理是基于有限元网格的位置和几何形状改变,如图 4 所示,利用镜体共面的节点 3 111、3 140、3 372 和 3 343 的轴向坐标同时平移来改变镜体高度,利用共面的节点 3 109、3 131、3 363 和 3 490 的 Z 向坐标同时平移来改变背部倒角大小。

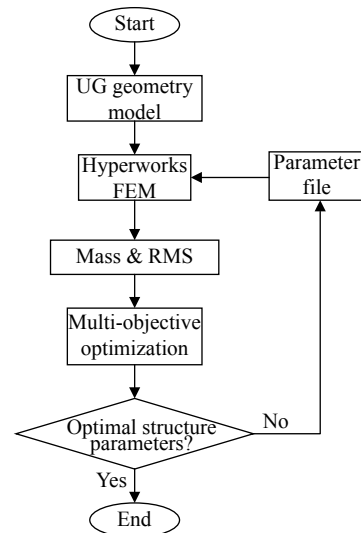


图 3 多目标集成优化流程图

Fig.3 Flow chart of multi-objective optimization

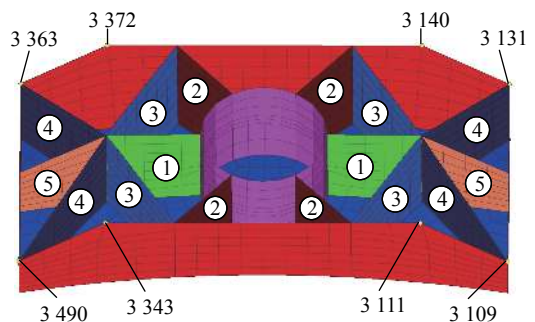


图 4 加强筋分组示意图

Fig.4 Schematic of distribution of ribs

借助 HyperMorph 软件预定义可减小参数定义难度, 并且被成功定义的参数可被 HyperStudy 软件直接识别。

接下来, 对优化目标和约束条件进行说明。

通常以最小镜体质量为优化目标的单目标优化, 会因为过于追求轻量化而使镜体抗弯刚度不足, 导致镜面面形的变差。为寻找反射镜组件总质量和镜面面形 RMS 在一定平衡下的最优值, 汪奎等引进 QI 定量评价优化方案, 进行多目标优化^[3]。在此基础上进行研究延伸, 文中所述反射镜的设计指标为反射镜质量在 5kg 以内、镜面面形 RMS 在 $\lambda/50$ 以内, 因此, 将 QI 以设计指标为依据进行重新定义, 如公式 (1) 所示:

$$QI = \frac{1}{2} \times \left(\frac{Mass}{5} + \frac{RMS}{12} \right) \times 100\% \quad (1)$$

当反射镜质量 $Mass_{max}=5$, $RMS_{max}=12$ 时, QI 为 100%。QI 作为优化目标缓解了以 Mass 和 RMS 同时作为优化目标而导致计算量较大的问题, 提高了计算

效率, 也更容易实现全局寻优。

同时, 为了保证 QI 的合理性, 以 Mass 和 RMS 的设计指标值作为约束条件。

$$\begin{aligned} & \text{Min } QI \\ & \text{S.t. } Mass \leq 5 \\ & \quad RMS \leq \lambda/50 (\lambda = 632.5 \text{ nm}) \end{aligned} \quad (2)$$

根据实际制造加工水平对镜体结构参数进行范围限定, 见表 2, 并考察各结构参数对 QI 的影响, 采用哈默斯雷算法进行该灵敏度分析, 结果如表 2 所示, 对 QI 超过 15% 灵敏度的结构参数为六个, 数量较少, 因此将全部参数作为设计变量, 并加以边界条件限制, 保证足够设计空间的全局寻优。

利用 HyperStudy 软件进行结构参数优化, 采用该软件推介的全局响应面算法 (Global Response Surface Method, GRSM), 该算法利用响应面生成新设计点, 进行评估、自适应更新, 从而获得更好的模型拟合, 高效地全局寻优。

表 2 设计变量和优化结果

Tab.2 Design variables and optimization results

Name	Height	Face thickness	Hole thickness	Side thickness	Chamfer	R1	R2	R3	R4	R5
Ranges	[30, 60]	[5, 12]	[5, 20]	[2, 8]	[0, 60]	[2, 8]	[2, 8]	[2, 8]	[2, 8]	[2, 8]
Initialization	42 mm	10 mm	11 mm	4 mm	33°	4 mm	4 mm	4 mm	4 mm	4 mm
Effects	-47.6%	36.3%	7.2%	47.5%	-23.7%	5.1%	11.6%	19.2%	18.5%	5.6%
Optimization	38.093	8	6	2	36.398	8	6.731	2	2	2
Rounding value	38 mm	8 mm	6 mm	2 mm	36°	8 mm	6.5 mm	2 mm	2 mm	2 mm

2.3 优化结果

结构参数迭代结果如图 5 所示, 优化后, QI 值为 34%, 对应的镜体结构参数数据结果需进一步圆整, 以便加工, 整理最终结果见表 2, 重新建立反射镜模型, 质量为 1.53 kg, 轻量化率达到 68.5%, 面形 RMS

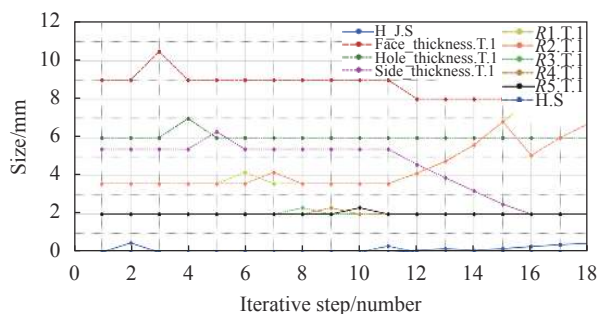


图 5 镜体结构参数迭代曲线

Fig.5 Iteration curve of structural parameters of reflective mirror

需进一步验证, 仿真结果如图 6 所示, 其值为 5.91 nm, 符合设计要求。

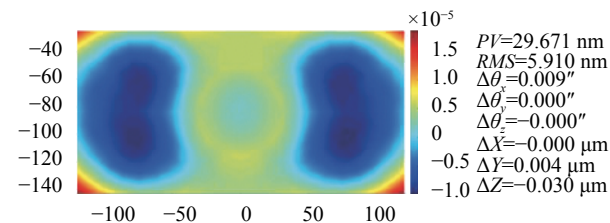


图 6 反射镜面形 PV 和 RMS 值

Fig.6 PV and RMS value of mirror surface

3 柔节参数优化设计

3.1 柔性支撑方案

柔性支撑结构用于支撑反射镜, 并通过柔节的设

计来减小结构间材料不匹配产生的热量和应力传递,从而保证成像系统的稳定性,因此柔节的设计至关重要。柔节颈口侧壁开槽式支撑方案相比底面直线开槽式和颈口环形深切槽式效果更佳,既保证了线性静力下的面形精度,又使得组件具有较高的动态刚度^[11]。因此,文中采用颈口侧壁开槽式的柔节方案,如图 7(a) 所示。

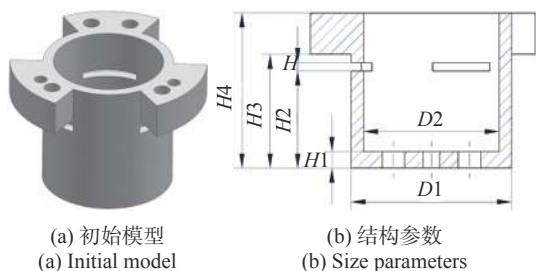


图 7 柔节结构初始模型

Fig.7 Initial model of flexible component

3.2 柔节结构的参数优化

根据图 7(b) 对柔节结构参数进行说明,该结构参数均以形状参数进行定义。设计变量 $H1$ 的下表面与镶嵌件接触,并通过螺钉孔连接, $H1$ 用来调节连接面厚度; H 为柔性槽的槽宽,为固定值 2 mm;设计变量 $H2$ 为柔性槽的位置; $H4$ 为柔节整体的高度,为固定值 37.5 mm,柔节上表面与背部支撑板接触,通过螺钉孔将两者连接;设计变量 $H3$ 用于调节与背部支撑板的连接面厚度;另一方面, $D1$ 为固定值 $\Phi 39$ mm,是柔节颈部外径;设计变量 $D2$ 为柔节颈部内径,用于调节颈部壁厚;各设计变量初始值见表 3。在 HyperMesh 软件中将图 7 模型划分为 3D 网格有限元模型,在 HyperMorph 软件中进行形状变量定义,其中 $D2$ 以柔节轴线为基准进行缩放来定义,其余三个结构参数均以共面点轴向坐标移动进行改变控制,由于可设计变量仅为四个,此处不再做灵敏度分析,全部作为设计变量,在 HyperStudy 软件中将被识别的该处四个设计变量进行参数优化范围限制,见表 3。

将图 1 反射镜组件中反射镜更新为图 6 对应的反射镜,建立组件的有限元模型,约束背部支撑板与相机框架连接的 12 个螺钉孔,以反射镜分别在轴向 1 g 重力和 5 °C 温升工况下的面形 RMS 值最小化为优化目标,该组件的基频 $frequency_1 \geq 200$ Hz 为约束条件,对柔节结构进行参数优化。

表 3 设计变量和优化结果

Tab.3 Design variables and optimization results

Name	$H1$	$H2$	$H3$	$(D1-D2)/2$
Ranges	[2, 0]	[15, 5]	[20, 5]	[2, 8]
Initialization/mm	4	23.5	27.5	4.5
Optimization	4.152	21.625	31.775	2.621
Rounding value	4.2	21.5	31.5	3

3.3 优化结果

采用与反射镜相同的优化流程,柔节结构参数优化数据迭代过程如图 8 所示,根据表 3 圆整后的柔节结构参数,在该组件中重新建立柔节模型,仿真验证该组件分别在轴向 1 g 重力下和 5 °C 温升工况下的面形 RMS 为 1.60 nm 和 6.70 nm。

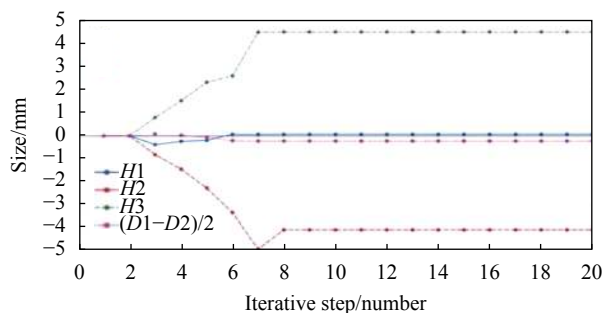


图 8 柔节结构参数迭代曲线

Fig.8 Iteration curve of structural parameters of flexible component

4 动力学特性分析及外场试验

首先将优化圆整后的反射镜、镶嵌件、优化圆整后的柔节和背部支撑板依次连接,形成完整的反射镜组件,在 HyperMesh 软件中将该组件模型划分为有限元网格模型,并约束背部支撑板与相机框架连接的 12 个螺钉孔。然后进行模态分析,组件基频为 274 Hz,振型为绕 X 轴转动,满足动态刚度要求,如图 9 所示。最后进行结构强度分析,在上述 12 个螺钉孔处沿轴向输入频率为 10~2 000 Hz 的单位加速度激励,从而获得反射镜组件的加速度-频率曲线。由图 10 可知,频率响应分析结果对模态分析进行了验证,该组件最大响应点在频率 283 Hz 处共振,振幅最大,与模态分析的基频结果相对误差为 3.28%。

图 11(a) 为加工完装调好的空间相机,进行外场成像试验,图 11(b) 为拍摄的照片,图片效果很清晰。

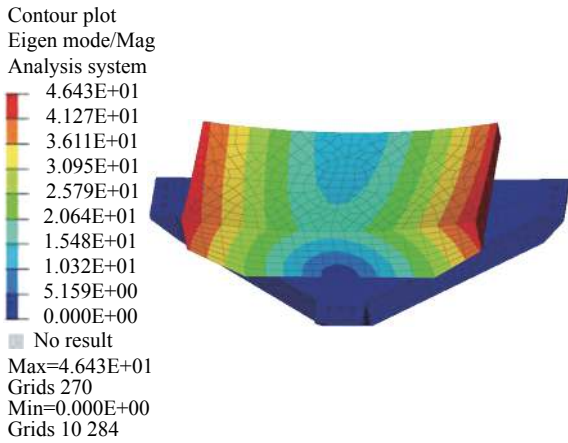


图 9 组件一阶固有模态分析

Fig.9 First constraint eigen frequency of reflective mirror subassembly

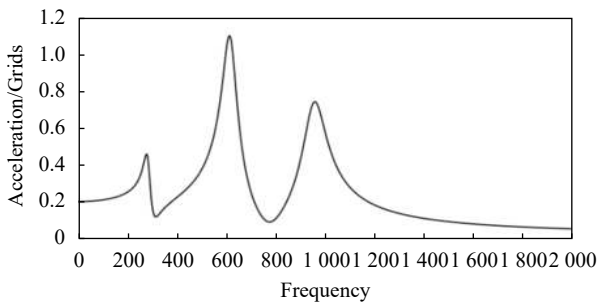


图 10 加速度频率响应曲线

Fig.10 Frequency response curves of acceleration



(a) 空间相机
(a) Space camera
(b) 试验图像
(b) Image of a test

图 11 外场成像试验

Fig.11 Image of out field test

5 结 论

文中针对典型的长条形反射镜组件结构进行了设计难点分析,为了实现高轻量化率和高面形质量的目标,引入性能指标 QI 将质量和面形 RMS 两个设计指标结合为单目标进行参数优化,从而加快优化迭代速率。最终,反射镜的质量为 1.53 kg,相比设计指标,轻量化率达到 68.5%,在轴向 1 g 重力工况下面形 RMS 值为 5.91 nm,远小于 $\lambda/50(\lambda=632.8 \text{ nm})$ 的设计指

标。为了追求更好的性能,继续进行了柔节的参数优化,优化后的反射镜组件在轴向 1 g 重力工况下及 5 °C 均匀温度载荷环境下的面形 RMS 值分别为 1.60 nm 和 6.70 nm,基频为 274 Hz,均满足设计要求。加工装调完的空间相机外场成像测试效果良好,表明该方案具有合理性和可行性,借用计算机进行参数优化迭代计算,可降低人工时间成本,QI 的引入较好地满足设计要求的同时提高了设计效率。因此,文中为同类型反射镜组件级别的参数优化设计提供了新方案、较完整的设计思路与详细过程阐述具有较大参考价值。

参考文献:

- [1] Xin Hongwei. Design and analysis on the flexible structure of the optical reflector [J]. *OME Information*, 2010, 27(7): 51-55. (in Chinese)
- [2] Bougoin M. SiC challenging parts for GAIA[C]//Proceedings of SPIE, 2017, 10565: 105652C.
- [3] Dobos L, Varga-Verebélyi E, Verdugo E, et al. The footprint database and web services of the herschel space observatory [J]. *Experimental Astronomy*, 2006, 42(2): 883701.
- [4] Bao Qihong, Sha Wei, Chen Changzheng, et al. Lightweight and optimization design of rectangular reflective mirror supported in centre [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0718003. (in Chinese)
- [5] Wang Kui, Xin Hongwei, Xu Hong, et al. Lightweight design of fast steering mirror for space cameras [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(4): 0418001. (in Chinese)
- [6] Zhang Lei, Ke Shanling, Li Lin, et al. Optimum design of ultra-light mirror series flexible support structure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(1): 0122001. (in Chinese)
- [7] Hu Yang, Li Ji, Jia Xuezhi, et al. Optimal design of lightweight off-axis mirror and flexible support [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(19): 1923002. (in Chinese)
- [8] Castel D, Sein E, Lopez S, et al. The 3.2 m all SiC telescope for SPICA[C]//International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2012, 8450: 84502P.
- [9] Guo Xiqing, Wang Yueyong. Analysis of structural forms of lightweight hole for heavy-caliber mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(6): 518-521. (in Chinese)
- [10] Yuan Jian, Ren Jianyue. Improvement and optimization of lightweight structure for SiC reflective mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(8): 40-45. (in Chinese)
- [11] Liu Ming, Zhang Lizhong, Li Xiang, et al. Design of flexure support of space compact reflector subassembly and dynamic analysis [J]. *Opti-Electronic Engineering*, 2018, 45(5): 47-56. (in Chinese)