

文章编号:1002-2082(2007)01-0043-04

空间光学遥感器主反射镜轻量化及支撑设计

续强^{1,2}, 王延风¹, 周虎^{1,2}, 董吉洪¹, 李威¹, 徐抒岩¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了得到某空间光学遥感器主反射镜合理的结构及支撑方式, 检验新型光学材料SiC的光学性能, 尤其是应用于空间光学系统的可行性, 通过建立该空间光学遥感器主反射镜组件的虚拟样机, 采用有限元仿真的方法, 分析主反射镜在背部采取不同形式轻量化情况下的质量及质心位置。建立几种主反射镜的有限元模型, 采用合理的MPC约束边界条件, 用有限元方法分析主反射镜在加工、测试状态下自身重力作用对反射面面形精度的影响。经过仿真比较及轻量化优化设计, 得到一种主反射镜及支撑的合理化结构, 轻量化率达到75.6%, 反射镜面RMS值为12.53 nm, Pv 值为54.52 nm。最后的分析结果表明: 质量、刚度及反射镜面精度均满足工程要求。

关键词: 主反射镜; 轻量化; 有限元法; MPC

中图分类号: TN203

文献标志码: A

Design and analysis of lightweight structure and support for primary mirror of space optic remote sensor

XU Qiang^{1,2}, WANG Yan-feng¹, ZHOU Hu^{1,2}, DONG Ji-hong¹, LI Wei¹, XU Shu-yan¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China; 2. Graduate School, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to achieve a proper structure and support for the primary mirror used in the space optic remote sensor and test the optical performance of a new optic material (SiC), 3D solid models were built for the primary mirror subassemblies. The mass and the center-of-mass of the primary mirror are analyzed for the different lightweight structures used on the backside of the mirror with the finite-element simulation method. Several finite-element models of the primary mirror were built with appropriate MPC boundary constraint. The effect of the mirror weight on its surface form accuracy during the fabrication and testing process is analyzed with finite-element method. The optimal structure for the mirror and its support were achieved through the comparison of simulation results and optimized lightweight design. The optimized weight reaches 75.6% of the original value, the RMS of the mirror surface is 12.53 nm and the Pv value is 54.52 nm. The result shows that the weight, stiffness and surface accuracy of the primary mirror meet the engineering requirement.

Key words: primary mirror; lightweight; finite-element method; MPC

引言

在空间相机中, 主反射镜是光学系统的主要光

学元件, 具有口径、质量大, 面形精度要求高, 加工困难, 造价高等特点。主反射镜的轻量化设计可以

收稿日期: 2006-06-26; 修回日期: 2006-10-08

作者简介: 续强(1980—), 男, 河南南阳人, 中国科学院研究生院硕士研究生, 主要从事空间光学仪器结构设计与工程分析工作。E-mail: xu_q2000@163.com

减轻主镜质量,提高支撑刚度和动态刚度,提升固有频率,提高镜体的导热性能。我们主要从材料选择、结构形式、轻量化方式等方面来实现质量最轻量化目的;从材料的性能、支撑形式、支撑连接方法来实现支撑刚度和反射面面形精度的目的;同时兼顾加工工艺简单可行。通过建立有限元模型,采用有限的迭代方法,根据分析结果数据进行方案优化改进,最终综合实现本工程最优的质量面形精度设计要求。

1 材料选择

主反射镜材料的选择要综合考虑密度、刚度、导热、线膨胀系数和稳定性、工艺加工性等因素,以保证反射面的面形精度达到要求且持久稳定。主反射镜的材料要求拥有较小的密度、较大的弹性模量、较小的热膨胀系数、较大的导热系数和热扩散率。目前国内外常用的材料有 SiC, Be, Zerodur, ULE、熔石英(FS)、微晶玻璃等,常用的几种材料参数见表1。经比较, SiC 拥有比刚度较高,导热性能良好,线膨胀系数较低等优点,并且在国际上 SiC 加工工艺已经趋于成熟,因此,笔者选用 SiC 作为主反射镜的材料进行设计。

表1 常用主镜材料参数对比

Table 1 Compare of common material parameters for primary mirror

参数	SiC	Be	Zerodur	ULE	熔石英	微晶玻璃
密度/(g/cm ³)	3.05	1.85	2.5	2.2	2.2	2.53
杨氏模量/(GPa)	400	280	92	67	67	90.3
比刚度/(10 ⁶ m)	12.6	15.1	3.7	3.1	3.1	3.6
热传导率/(W/mK)	185	160	1.46	1.3	1.3	1.46
线膨胀系数/(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	2.5	11.4	0.05	0.03	0.03	0.1
线胀系数/热传导率/(10 ⁻⁸ m/W)	1.3	7.2	3.4	2.3	2.3	6.8
热扩散率/(10 ⁻⁴ m ² /s)	0.86	0.5	0.007	0.008		

2 结构形式设计

2.1 支撑点选择

主镜支撑方式主要有背部3点、6点、9点、多点和辅助面支撑等方式。本工程主镜口径较大($\phi > 500$ mm),仍选择主镜背后3点支撑。在径向不同半径上相隔120°取3点支撑,通过有限元预分析显示,随着支撑点半径的变化,镜面变形量中各参

数变化情况如图1所示。从图可以看出,RMS值先减小后增大,变化平缓;P_v值先减小后增大;反射面曲率半径先减小后增大,变化明显。确定支撑点位置在镜面变形量RMS最小处。

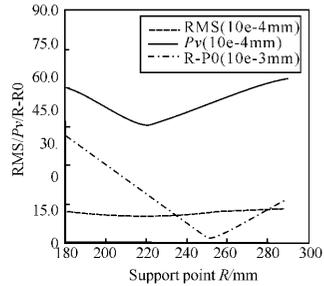


图1 面形参数随支撑点变化曲线

Fig. 1 Variation of plane shape parameters with support point

2.2 轻量化孔设计

轻量化孔多以三角形、四边形、六边形形式出现,少数采用特殊形状。在相同的边长及筋板厚度条件下,3种常用轻量化结构相比,三角形结构刚度最好,但轻量化率最低;四边形的刚度和轻量化率居中,六边形的轻量化率最高,但刚度最差。另外,背部封闭式结构刚度高于背部开放式。本主镜设计综合考虑刚度和轻量化率,并借鉴国内外同类口径空间主镜,采用背部3点支撑,轻量化孔采用四边形为主、三角形为辅的轻量化方式,背部封闭并增加轻量化孔的设计方案,结构形式如图2所示。优化后的结构主镜单件的质量为22.628 kg,质心位于距背平面52.23 mm处。3支撑点处孔深度达到70 mm左右,设计支撑时易于使质心位置处于支撑面内。开放式主反射镜在光轴水平状态工作时,由于其质心过于靠近反射镜面,导致支撑面设计时不能通过质心产生主镜内部的自重弯矩,从而增加主镜应力变形,降低面形精度。

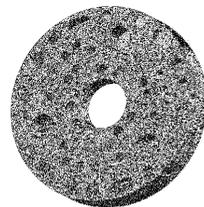


图2 主反射镜结构示意图

Fig. 2 Structure of primary mirror

2.3 支撑连接选择

主反射镜与背部固定件间的连接设计,考虑了主反射镜定位准确,连接刚度可靠,能够释放镜子

在热作用下的应力变形,以及缓冲运输发射过程中振动对镜子的破坏。与主镜粘接部分的材料选用线膨胀系数比SiC低一些的殷钢,以减小主镜与支撑连接部分的热应力扭曲,其他部分选用刚度比较大的合金钢。支撑结构采用图3所示结构,以满足装调方便要求。

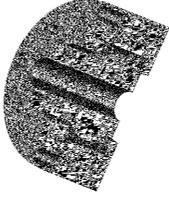


图3 支撑结构示意图

Fig. 3 Structure of support

3 有限元模型建立与分析

3.1 主镜的有限元模型

把建立的主镜几何模型导入建立主镜的有限元实体模型(如图4),根据有限元单元的计算精度,单元形式采用六面体和五面体实体单元。筋板连接处必须保证单元形状合理,并要考虑倒角处理和可能的应力集中问题。

3.2 背部支撑的有限元实体模型

支撑体间的滚珠采用相对于面滑动的MPC多点约束来实现彼此间的位移及力传递关系,既可解决约束不够的问题,又基本符合实际约束情况。

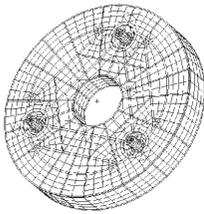


图4 主镜组件有限元模型

Fig. 4 Finite-element model of primary mirror subassembly

3.3 结构静力分析

主要分析在支撑端部全约束,光轴竖直和水平2种工况下,重力对镜面的面形影响。影响主反射镜面形精度的主要因素是工作状态下的重力释放。背部轻量化孔分布及厚度不同时的镜面数据参数见表2和3。表2为方案1与方案2的结果比较,表3为筋板采用一致厚度与方案3的结果比较。其中方案1为轻量化孔均布方案;方案2为根据方案1的变形应力云图,调整轻量化孔布局的优化方案;方案3为根据方案2及不同筋板厚度(4~7mm)方

案的应力云图,调整不同位置筋板厚度,得到的最终优化方案。

表2 轻量化孔位置有限元分析比较

Table 2 Finite-element analysis of hole position for light weight structure

位置	M/kg	Pv/nm	RMS/nm	f/Hz
方案1	22.64	55.65	12.78	204.6
方案2	22.2	55.2	12.66	202.5

表3 轻量化孔筋板不同厚度分析比较

Table 3 Compare for different thickness of honeycomb for light weight structure

筋板厚度	M/kg	Pv/nm	RMS/nm	f/Hz
4 mm	22.52	55.63	12.67	209.6
5 mm	23.18	55.03	12.56	203.1
6 mm	24.01	54.42	12.02	196.4
7 mm	24.75	53.96	11.84	190.3
方案3	22.63	54.52	12.53	203.5

方案3在光轴竖直放置(加工状态)时的变形如图5所示。光轴水平放置(工作及检测状态)时的变形如图6所示。

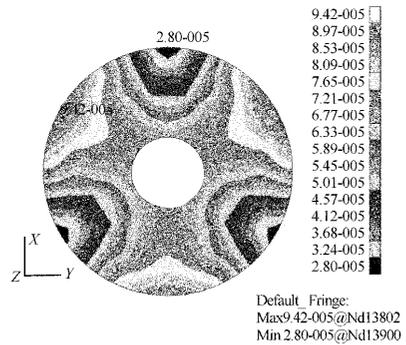


图5 光轴竖直时自重变形位移图

Fig. 5 Weight deformation when optics axis is vertical

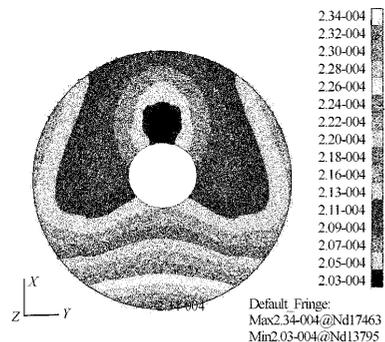


图6 光轴水平时自重变形位移图

Fig. 6 Weight deformation when optics axis is horizontal

3.4 模态分析

在运输、发射、工作过程中,主镜要经受振动环境,所以固有频率也是主镜的一项重要指标。轻量化的结构要有较高的固有频率,本方案在支撑端部全约束的情况下,主反射镜部分的一阶固有频率达到 203.53 Hz,满足工程要求。

4 分析结果

4.1 结果处理

经过比较各种设计结构,该结构在光轴水平(即检测、工作位置)的镜面自重变形位移的变化如图 6 所示。经过数据处理 P_v 值达到 54.52 nm, RMS 达到 12.53 nm,均满足工程需要。由于镜面本身的相对变形量比较小,主要的面形位移变化是由于背后支撑杆的悬臂下垂引起的。因此,在允许情况下,应加大支撑杆的支撑刚度;并在实际装调中,将整个主反射镜组件与主镜室连接时,采用预调整措施来补偿整个主反射镜面的同方向位移变形量,可提高反射镜面的工作精度。

4.2 结构优化

通过建立优化分析模型,以及对主反射镜结构轻量化优化分析,背后隔板可以在允许情况下减小厚度,主镜面可以适当的减小厚度。这样,主镜质量会更轻,也更有利于散热。但考虑到实际加工工艺问题及实际材料的不理想性,优化后的主镜镜面厚度及轻量化筋板厚度仍不应该过小。

5 结论

本文根据工程要求设计了一种较大口径($\phi > 500$ mm)的空间相机的轻量化主反射镜及支撑结构。该结构质量相对较轻,轻量化率达到 75.6%,在重力作用影响下,主反射镜反射面面形精度达到工程要求。本文没有考虑相机工作状态下热环境变化、温度梯度及其他光机热工况对主镜镜面面形精

度的影响,实际设计中应综合考虑这些因素。

参考文献:

- [1] 吴清文,杨洪波,杨近松.空间相机中主镜及其支撑方案设计与分析方法[J].光学技术,2004,30(2):153-156.
WU Qing-wen, YANG Hong-bo, YANG Jin-song. Design and analysis for primary mirror and its support of space camera [J]. Optical Technology, 2004,30(2):153-156. (in Chinese)
- [2] MALAMED E R, SOKOLSKY M N, PETERSBURG R S. Primary mirror assemblies of the large space telescopes[J]. SPIE, 1995,2536:386-396.
- [3] PETROVSKY G T, TOLSTOY M N, LJUBARSKY S V, et al. A 2.7-meter-diameter silicon carbide primary mirror for the SOFIA telescope[J]. SPIE,1994,2199:263-270.
- [4] YODER P R, Jr. Opto-mechanical systems design [M]. New York:Academic Press,1992.
- [5] 冯树龙,张新,翁志成,等.大口径平背形主镜支撑方式选择[J].光学技术,2004,30(6):679-681.
FENG Shu-long, ZHANG Xin, WENG Zhi-cheng, et al. Study on support way of large-aperture mirror with flat rear surface[J]. Optical Technology,2004,30(6):679-681. (in Chinese)
- [6] 张卫国,冯卓祥,陶忠.扫描镜动态面形变化和模态分析[J].应用光学,2006,27(1):58-61.
ZHANG Wei-guo, FENG Zhuo-xiang, TAO Zhong. Modal analysis and dynamic deformation of scanning mirror [J]. Journal of Applied Optics, 2006,27(1), 58-61. (in Chinese)
- [7] 纪明.反射镜稳定系统的仿真与误差分析[J].应用光学,2000,21(5):19-22.
JI Ming, Simulation and error analysis of mirror stabilized system [J]. Journal of Applied Optics, 2000,21(5):19-22. (in Chinese)