

文章编号 1004-924X(2008)09-1642-06

大口径空间遥感相机主反射镜支撑设计

郭 疆,何 欣

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130031)

摘要:为降低外界载荷对空间遥感相机主反射镜面形精度的影响,提出了采用不同的柔性环节独立约束主反射镜自由度的设计思想。运用 CAD 工程分析软件进行主反射镜系统动、静态特性及热特性的仿真分析,并在此基础上对主反射镜系统中柔性环节的结构参数进行修正,在保证支撑刚度的前提下降低了重力、装配应力及温度应力对面形精度的影响。经检测,主反射镜面形精度 PV 值为 $\lambda/4$,RMS 值为 $\lambda/50$,能够满足空间遥感相机对主反射镜的特殊要求。

关 键 词:空间遥感相机;主反射镜;柔性支撑;轻量化

中图分类号:V475.3;P231 **文献标识码:**A

Design of support for primary mirror of space remote sensing camera

GUO Jiang, HE Xin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China)

Abstract: In order to reduce the influence of outside load on the surface precision of primary mirror in a space remote sensing camera, a design idea of adopting diverse flexible support structures to restrict motion freedom of the primary mirror independently was investigated. By adopting CAD engineering analytical software, the dynamic and static rigidities as well as thermal characteristics of a primary mirror system were analyzed. Based on this foundation, the structural parameters of flexible support in the primary mirror system were amended, so that the influence of gravity, assemblage stress and temperature diversification on the surface precision of the primary mirror was reduced under precondition of ensuring support rigidity, and endurance of impact and libration was ensured during the launch. Detecting results show that the surface precision of primary mirror reaches PV: $\lambda/4$ and RMS: $\lambda/50$, which can meet the special requirements for the primary mirror of space remote sensing camera.

Key words: space remote sensing camera; primary mirror; flexible support; lightweight

1 引 言

现代空间遥感相机的地面覆盖面积越来越

大,地面分辨力越来越高,这些都需要空间遥感相机实现长焦距、大视场和大的通光口径。然而,随着遥感相机口径的增大,一系列的技术问题接踵而来,最突出的一点就是由于光学系统的扩大,随

收稿日期:2007-09-24;修订日期:2008-03-13.

基金项目:中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项基金”资助项目

之产生了空间遥感相机的精度、稳定性及质量等与其应用需求之间的矛盾。

在空间遥感相机的光学系统中主反射镜的尺寸和质量最大,面形精度要求最高,对整个光学系统的成像质量起着至关重要的作用,是空间遥感相机的关键部分。所以,相机主反射镜系统设计质量的好坏关系到整个相机设计的成败。

2 主反射镜系统设计应考虑的问题及解决方法

主反射镜系统应具有较强的刚度和良好的动态特性,做到体积小、重量轻且对温度不敏感,在重力、微重力及空间热环境影响下的面形精度应满足光学设计对镜面面形的要求^[1],并保证主发射镜系统在严酷的空间力学环境下仍具有好的尺寸稳定性和可靠性。这些特性要求主反射镜系统具有很高的刚度,而航天仪器又必须减轻质量以减少发射成本,但刚度与轻质是矛盾的。使系统具有足够的刚度以保证相应的公差和面型误差在允许的范围内,同时又有最小的质量,必须对其结构系统进行充分的优化设计。为降低研制成本,缩短设计周期,通常的做法是利用工程分析软件进行力学和热学分析,为结构参数预估、选择以及优化等提供依据,最终设计出两者兼顾的主反射镜系统。本文提出了采用不同的柔性环节独立约束反射镜自由度的设计思想,经工程分析优化设计参数降低了反射镜面形变化,设计加工出了主反射镜实验件,测试结果表明其符合设计期望。

3 主反射镜系统设计

3.1 主反射镜材料的选择和轻量化形式的确定

微晶玻璃具有弹性模量高、线胀系数极小、易于光学加工且加工工艺成熟等优点,在国内外有广泛的应用,适合作为主反射镜材料。

为了减轻主反射镜裸镜的质量而不剧烈影响其自身的刚度,必须在其背面合理的排布轻量化的结构形式以达到最佳的质刚比,这是较为常规的,研制水平较为成熟的技术。经计算分析,背部三角形轻量化结构形式具有较高的轻量化刚度和轻量化率。

3.2 主反射镜支撑点数量和位置的确定

主反射镜支撑点的数量和位置的选取可根据一个确定反射镜最少支撑点个数的经验公式^[2](Hall,1970),该公式是在反射镜测试过程中防止自重变形大于规定的PV值给出的,公式为:

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

式中: r ——反射镜半径;

t ——反射镜厚度;

ρ ——反射镜的材料密度;

E ——弹性模量;

δ ——允许的PV值。

由此经验公式和初步确定的镜厚可以计算出该主反射镜的支撑点个数不应小于8个。考虑到结构的均匀及加工的可行性,实际的设计和分析工作采用了9个支撑点。支撑点的位置是根据轻质镜坯结构的特点,以及其对镜面的影响情况,通过CAD工程分析来确定的。经工程分析对镜坯厚度、前镜面厚度、筋的宽度以及边缘厚度等一系列结构参数进行优化,得到一个最佳质刚比的轻量化镜坯。图1所示为根据国内现有加工水平实现的轻量化加工工艺流程制造的壁厚最小的裸镜。

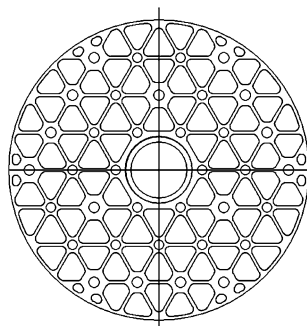


图1 反射镜轻量化图

Fig. 1 Lightweight of mirror

3.3 主反射镜柔性支撑部件的设计

空间遥感相机在加工、装配、检测、运输、发射及入轨这一系列过程中受各种大小和方向力的影响,同时系统还要受温度变化的影响,这些影响将降低光学系统的成像质量。因此,在设计阶段必须充分考虑各种影响因素对主反射镜系统的作用,减小或消除各种因素对主反射镜面形不利的影响。

主反射镜系统应在各种受力状况下与整个光学系统中其他光学元器件保持一定的空间位置关系,否则将产生离轴、离焦,这就要求主反射镜系统具有良好的强度、刚度及可靠性;但是由于材料的不匹配,在温度变化的影响下,会将应变传到镜面,从而引起光学系统的同心度(LOS)变化及波前畸变(WFE)^[3],导致整个系统的成像质量下降。因此,支撑系统必须具有一定的柔性,以减小温度变化的影响。此外,由于空间遥感相机对降低质量也很有要求,显然,这是极其对立的。为了解决这种矛盾,设计时应该充分兼顾支撑系统的刚度和柔性,通过柔性支撑结构独立约束自由度的设计原则来实现这一目的。

3.4 柔性结构的设计

当温度产生变化时,由于主反射镜材料与支撑的金属材料线膨胀系数的不一致,会造成温度应力对镜面面形精度的影响非常大,为此背部支撑材料与所选反射镜材料的线胀系数应相等或相差较小,这里选择比刚度较大,线膨胀系数较小的钛合金作为间接支撑结构的材料;与主反射镜背面直接粘接的柔性支撑则选择机械特性较好、线胀系数与主反射镜非常接近的殷钢作为柔性结构的材料(现在的殷钢和微晶玻璃的线胀系数已经可以做成一致的)。然而,仅从材料的线膨胀系数匹配这一点着手来消除由于温度变化而造成面形精度下降的影响是远远不够的,要想更好地消除影响,还必须从支撑结构上下功夫。弹性铰链结构具有体积小、无机械摩擦、无空回及运动灵敏度高等优点^[4]。弹性铰链在主反射镜支撑中的工作原理是:具有两处弹性铰链点,可以释放两个转动自由度,用以消除装配应力及温度对主反射镜面型的影响,轴向可以认为具有很大轴向刚度的二力杆结构,以支撑主反射镜的轴向载荷。由于弹性铰链存在一定沿主反射镜径向的弹性作用力,人们曾一度认为可以通过这种弹性来作为主反射镜径向自由度的约束,但从原理上讲,它没有对主反射镜径向的自由度进行完全约束,所以这里采用中心片式弹性支撑结构来约束主反射镜径向自由度。中心支撑结构不会与弹性铰链二力杆结构产生轴向的支撑干涉,并消除了由于轴向结构材料的不匹配而产生的温度应力,还可以消除由于

加工误差在装配时产生的装配应力,同时中心弹性支撑结构具有很大的扭转刚度,约束了主反射镜绕光轴旋转的自由度。

通过弹性铰链二力杆和中心片式弹性支撑达到单自由度独立约束的效果,消除了为避免温度应力和装配应力产生的过约束和弹性不定位的矛盾。但是弹性铰链的刚度分析和参数设计较为复杂,还需运用理论计算和实验检测的方法调整弹性结构的工作截面,从而改变弹性和刚度达到最优值^[5],将由外界和支撑系统自身造成的镜面刚体位移和镜面转角控制在光学设计允许的公差范围之内。

3.5 主反射镜支撑系统结构

主反射镜两层 9 点、3 点支撑结构如图 2 所示,该结构在主反射镜上粘接 9 个殷钢弹性铰链支撑件,通过柔性输出杆过渡到 3 个小三角板上,各小三角板又通过一个弹性铰链联接到大三角板上,主反射镜和大三角板直接分别与中心支撑结构相连接构成主反射镜组件。

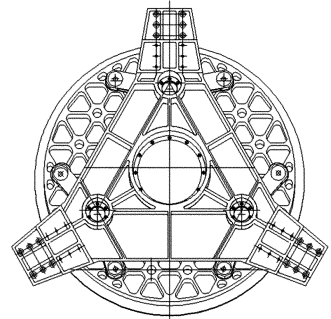


图 2 主反射镜组件结构图

Fig. 2 Structure of subassembly of primary mirror

小三角板和大三角板采用钛合金制造,在保证足够的支撑刚度的同时对其结构进行轻量化设计,以减小整体的重量。

4 有限元分析

4.1 有限元模型

根据实际要求设计出支撑系统的具体结构后,建立了三维实体模型,利用工程分析软件对结构设计进行验证、修改及优化,合理分配主反射镜系统中各个零件的精度。主反射镜系统网格划分

较密,全结构采用四面体单元划分,其中单元数为 78 583,节点数为 116 732,光轴方向为 z 向,有限元模型如图 3 所示。



图 3 主反射镜组件的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the subassembly of primary mirror

4.2 载荷与边界条件

4.2.1 边界约束

组件的约束与组件实际安装状态一致,在大三角板与机身连接的安装孔位处各节点六自由度全约束。

4.2.2 工况载荷

[工况 1]在 x 、 y 、 z 方向上分别施加 1g 惯性载荷。

[工况 2]在 x 、 y 、 z 方向上分别施加 1g 惯性载荷和 5 ℃温升。

4.3 计算结果

4.3.1 主反射镜面形误差

主反射镜系统在自重及温度载荷作用下的主反射镜面形变化如表 1 和表 2 所示。

表 1 自重变形引起的镜面面形误差

Tab.1 Errors of mirror surface under gravitational distortion

		重力方向		
		x 向	y 向	z 向
镜面最大	Δx	5.0	≈ 0.0	≈ 0.0
刚体位移	Δy	≈ 0.0	4.6	≈ 0.0
(μm)	Δz	≈ 0.0	≈ 0.0	5.3
镜面最大	θ_x	≈ 0.0	1.0	≈ 0.0
倾斜角($''$)	θ_y	1.4	≈ 0.0	≈ 0.0
	PV(nm)	20.8	21.1	33.0
	RMS(nm)	3.7	3.7	7.9

表 2 均匀温升和自重变形引起的镜面面形误差

Tab.2 Errors of mirror surface under even raise in temperature and gravitational distortion

		重力方向		
		x 向	y 向	z 向
镜面最大	Δx	5.0	≈ 0.0	≈ 0.0
刚体位移	Δy	1.9	6.5	1.15
(μm)	Δz	1.28	0.85	6.5
镜面最大	θ_x	≈ 0.0	1.25	≈ 0.0
倾斜角($''$)	θ_y	1.35	≈ 0.0	≈ 0.0
	PV(nm)	55	61.6	75.9
	RMS(nm)	8.37	9.6	13.1

4.3.2 动态刚度

在上述给定的边界条件下,计算主反射镜系统前三阶谐振频率及振型如表 3 所示。

表 3 主反射镜系统前三阶谐振频率及振型

Tab.3 Frequencies and types of the first three order resonances of primary mirror system

阶数	频率	振型
1	203.0	主反射镜绕光轴旋转
2	214.7	主反射镜绕水平轴(x 轴)摆转
3	267.6	主反射镜绕垂直轴(y 轴)摆转

5 实验验证

5.1 反射镜动力学性能测试

为确定反射镜组件的最终结构参数及力学特性,提前检验反射镜支撑结构在振动实验条件下的耐受能力,在研制初期采用铝制镜坯代替玻璃镜坯,制作了 1:1 的实验模型,其关键结构的材料、结构、精度及装调工艺与正式结构完全相同。在反射镜正式的支撑结构装配前,对摸底实验件进行了力学性能测试,实验过程为:针对一个方向首先进行 0.2g 的力学特性扫描,测定 0~2 000 Hz 内的响应频率;然后进行正弦振动和随机振动实验;振动后再进行 0.2g 的力学特性扫描,对振动前后的结构力学特性进行对比。在一个方向的实验完成后,再进行其他两个方向的振动测试。

经振动测试,反射镜的一阶谐振频率为 244.534 Hz,在 0~100 Hz 内正弦振动无谐振响应,实验结果与设计分析结果基本吻合。在随机

振动实验前后,反射镜组件的动态响应与实验前的数据对比未发生变化。图 4~图 6 所示为反射镜力学振动实验的响应曲线。

试。在选定测试的两个方向上,其中一个为抛光检测的方向,具备理想的面形精度,而与抛光检测和光轴正交方向是计算分析和使用经验确定的变形较大的方向。图 7 所示为反射镜在抛光方向上的干涉检测结果。

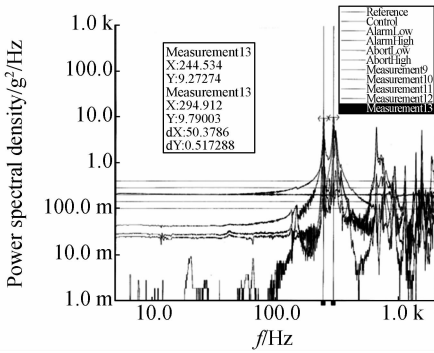


图 4 随机振动前正弦扫描响应曲线

Fig. 4 Response curves of sine scan before random libration

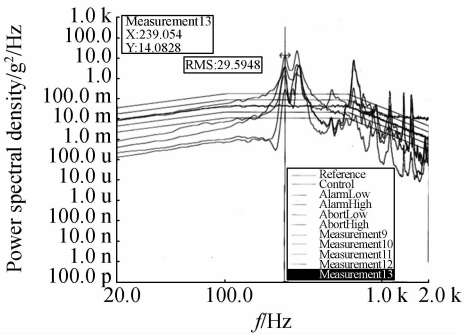


图 5 随机振动响应曲线

Fig. 5 Response curves of random libration

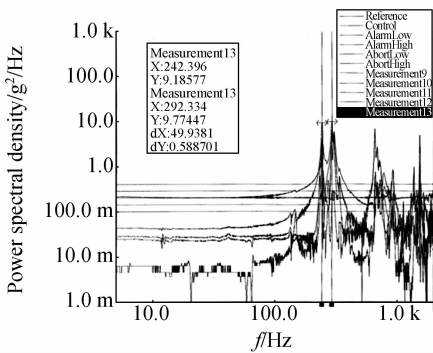


图 6 随机振动后正弦扫描响应曲线

Fig. 6 Response curves of sine scan after random libration

5.2 静力学面形精度受重力影响测试

在反射镜面形抛光后,对重力分别作用于垂直光轴的两个正交方向的面形精度进行了对比测

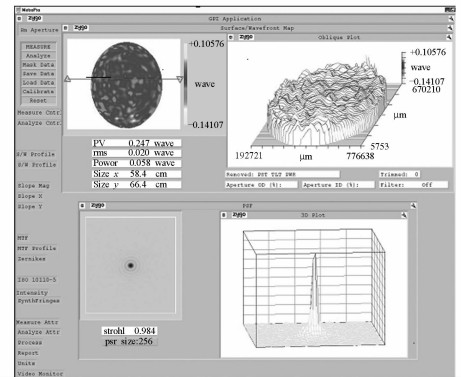


图 7 反射镜组件在抛光方向的面形精度

Fig. 7 Surface precision of mirror subassembly in the polishing direction

从测试结果上看,面形精度为:

PV: $\lambda/4$

RMS: $\lambda/50$

其中, $\lambda = 632.8 \mu\text{m}$

将反射镜组件绕光轴旋转 90° ,其面形测试结构见图 8。测试结果表明,面形精度为:

PV: $\lambda/4$

RMS: $\lambda/40$

其中, $\lambda = 632.8 \mu\text{m}$

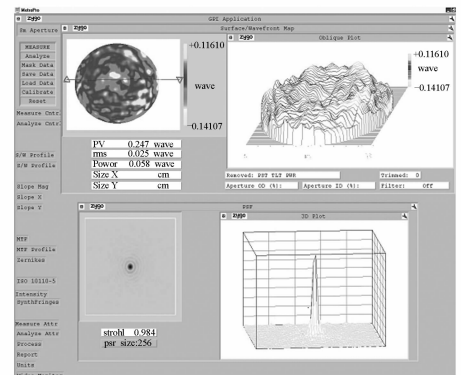


图 8 反射镜组件绕光轴旋转 90° 方向的面形精度

Fig. 8 Surface precision of mirror subassembly in the 90° circumrotation direction around axis

反射镜组件面形的 PV 值未发生变化,RMS 值由 $\lambda/50$ 降低到 $\lambda/40$,变化值为 $\lambda/200$ 。

6 结 论

空间遥感相机的主反射镜支撑技术是遥感相机的关键技术之一,在主反射镜设计阶段应充分考虑到影响主反射镜面形精度的各个因素,找到问题的解决方法。本文基于柔性支撑结构独立约束自由度的设计原则,在满足对主反射镜的支撑刚度前提下,通过柔性结构的设计解决了由于温度变化及装配应力而引起的反射镜镜面形精度下降的矛盾,同时背部采用柔性支撑结构,使由

于基座刚度不好造成的变形不至于传到主反射镜上,从而降低了主反射镜对支撑结构的刚度要求,有利于工程上的实现。在解决对立矛盾时(实际上是优化问题),运用 CAD 技术为结构参数预估、选择及其优化等提供依据,根据计算出了结果判断修正量的方向、大小进行再设计。

根据 CAD 分析计算得到的最优结果,按一定经验公式将最优结果进行一定修正,设计加工出了主反射镜实验件,经力学检验及对刚体位移的测量,其结果符合预期的设计期望。

参考文献:

- [1] 丁延卫,刘剑,卢锴.空间环境对光学成像传感器尺寸稳定性的影响[J].光学精密工程,2002,10(1):106-109.
DING Y W,LIU J,LU E. Effect of space environment on the dimension stability of optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*,2002,10(1):106-109. (in Chinese)
- [2] YODER P. *Opto-Mechanical System Design*[M]. Cooperate Marcel Dekker Inc,1993.
- [3] 单宝忠,王淑岩,牛慈笨,等. Zernike 多项式拟合方法及应用[J].光学精密工程,2002,10(3):318-323.
SHAN B ZH,WANG SH Y,NIU H B,*et al.*. Zernike polynomial fitting method and its application[J]. *Opt. Precision Eng.*,2002,10(3):318-323. (in Chinese)
- [4] 刘品宽,孙立宁,曲东升,等.新型二维纳米级微动工作台的动力学分析[J].光学精密工程,2002,10(2):143-147.
LIU P K,SUN L N,QU D S,*et al.*. Dynamic analysis on a novel nanopositioning stage driven by PZT[J]. *Opt. Precision Eng.*,2002,10(2):143-147. (in Chinese)
- [5] 辛洪兵,郑伟智,赵果.弹性铰链研究[J].光学精密工程,2003,11(1):89-93.
XIN H B,ZHENG W ZH,ZHAO F. Research on flexible hinges[J]. *Opt. Precision Eng.*,2003,11(1):89-93. (in Chinese)

作者简介:郭 疆(1976—),男,新疆石河子人,主要从事空间光学仪器的设计和研究。E-mail: guojiang001@yahoo.com.cn