

文章编号 1004-924X(2010)12-2633-09

空间相机主次镜间的薄壁筒和支杆组合支撑结构

李 威, 刘宏伟, 郭权锋, 王海萍

(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)

摘要: 为了满足大口径、长焦距空间相机中次镜相对于主镜的位置精度要求, 设计并研制了主次镜间的支撑结构, 分析和试验验证了组合支撑结构的稳定性。首先, 根据给定的光学系统, 确定了主次镜之间采用薄壁筒和支杆组合的支撑结构形式, 对比了支撑杆和薄壁筒的结构形式以及二者之间的连接方式, 通过优化, 完成了组合支撑结构的设计。然后, 讨论了重力对支撑结构的影响, 并进行了固有频率和正弦振动响应分析。最后, 通过量级逐增力学试验, 采用光学方法测量了主、次镜间的角度变化量, 验证了支撑结构的结构稳定性。试验结果表明: 主、次镜间的角度变化量 $< 10''$, 组合支撑结构的一阶基频 > 75 Hz。这些结果满足主、次镜间角度变化量要求, 具有较好的结构稳定性。

关键词: 空间相机; 组合支撑结构; 结构稳定性; 光学测量

中图分类号: V475.3; TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101812.2633

Combined supporting structure of thin wall joint cylinder and supporting bar between primary mirror and second mirror in space camera

LI Wei, LIU Hong-wei, GUO QUAN-feng, WANG HAI-ping

(*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract: To meet the relative position request of the second mirror and the primary mirror in a large-aperture and long-focal-length space camera, a combined supporting structure between the primary mirror and the second mirror was designed and manufactured, and the stability of the combined supporting structure was confirmed through the analysis and tests. Firstly, according to the optical system, the combined supporting structure which combined a thin wall joint cylinder and a supporting bar was designed. The structure forms of supporting bar and joint cylinder were compared and their connection modes were discussed. Then, the gravity response, characteristic frequency and sinusoidal vibration responses of the supporting structure were analyzed. Finally, the supporting structure stability was validated by the mechanical tests and optical measurement. The results indicate that the angle displacement between the primary mirror and the second mirror is less than $10''$ and the first-order natural frequency of supporting structure is greater than 75 Hz, which shows that the supporting struc-

收稿日期: 2010-03-04; 修订日期: 2010-05-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60507003)

ture has a better structure stability, and can satisfy the usage requirements of space cameras.

Key words: space camera; combined supporting structure; structure stability; optical measurement

1 引言

空间相机在对地观察、太空探测等领域具有重要的科学和军事意义^[1],经过多年的发展,比较成熟并实现工程应用的光学系统主要有同轴三反和离轴三反系统^[2-3]。随着人类对空间相机分辨率的要求越来越高,空间相机逐步向长焦距、大口径的方向发展,从而对主反射镜口径和主次镜放大比要求越来越高。无论是何种型式的三反系统,次镜与主镜间相对位置的变动对相机的成像质量都有很大的影响。对于大口径空间相机来说,次镜与主镜之间距离较远,因此次镜连接结构刚性较差,而且次镜是非常敏感的光学元件,一旦次镜与主镜的相对位置发生变化就会导致成像质量下降。因此,合理地设计主次镜间的支撑结构,使其既能够满足光学设计的要求又能够适应空间相机严酷的力学环境是一个值得深入研究的问题^[4]。

目前,空间相机常采用的主次镜间支撑结构有薄壁连接筒式、桁架式、薄壁连接筒与支撑杆组合式等。薄壁连接筒式结构具有易加工、易装调等特点,在小型空间相机中得到广泛应用。桁架式结构^[5-6]的设计思想基于变构件受弯曲载荷为拉压载荷的结构优化设计原则,具有比刚度高、质量轻、适于长焦距光学系统布局等优点,国外的大中型空间光学相机主次镜间的支撑结构多采用桁架式结构^[7],如美国的 EO-1 卫星上的先进陆地成像仪(ALI)^[8]、哈勃望远镜、我国的空间太阳望远镜^[9](SST)等。薄壁连接筒与支撑杆组合式结构不但具有易加工、易装调等特点,而且具有较好的动态刚度和结构稳定性,在相同通光口径的前提下,采用此种结构要比桁架式的支撑结构在结构尺寸和质量上略占有优势,因此应用也比较广泛,如我国载人航天工程中的某高分辨率空间相机等。

本文从实际应用角度出发,对主次镜间薄壁连接筒和支杆组合的支撑结构进行了设计和工程分

析,通过力学环境试验,验证了工程分析结果的正确性,利用光学测量方法,定量地验证了该支撑结构具有较好的结构稳定性。

2 设计

2.1 主次镜间支撑结构方案的选择

图 1 为某同轴空间相机主、次镜位置关系示意图。主、次镜间间距为 760 mm,光学设计要求次镜相对主镜的角度变化量为 $T_x \leq 10''$, $T_y \leq 10''$,这是保证相机成像质量的关键技术指标,也是主次镜间支撑结构稳定性的重要体现。

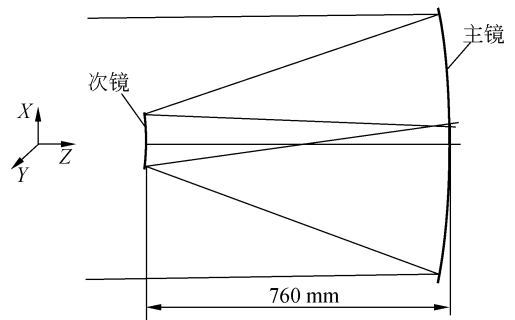


图 1 主、次镜间位置关系示意图

Fig. 1 Position relation between primary mirror and second mirror

同轴相机主次镜间支撑结构主要有连接筒和支撑杆的组合结构及桁架式支撑结构两种型式。桁架式的支撑结构通常包括三杆式和多杆式(通常在 6 杆以上)。

多杆式结构采用了三角形稳定性的原理,使相邻两杆与主镜支撑环和次镜支撑环构成三角形,有利于整体结构的稳定性。但由于承载主镜组件的主镜室的外法兰尺寸的限制,如果采用 6 杆桁架结构,则桁架对称分布在通光口径之内,造成较大遮拦,若使桁架没有遮拦,则需要增加主镜室外法兰的尺寸,这样会造成整机质量有较大增加;如果维持主镜室的外法兰尺寸不变,同时使桁架没有遮拦,则需要设计成 12 杆的桁架结构,同样会造成整机质量的增加。本设计从整机外形尺

寸和质量上考虑,没有采取桁架式的支撑结构,而是选择了可以最大限度地减轻支撑结构质量的薄壁连接筒和支撑杆的组合方式作为相机主次镜间的支撑结构。

2.2 结构材料的选择

空间相机中适合于主次镜间支撑结构的材料主要有殷钢、碳纤维复合材料和钛合金等。钛合金工艺稳定,是最早应用于航天的材料之一。碳纤维复合材料比刚度大,线膨胀系数可以设计,热畸变小^[10],其综合性能在可用的空间机械材料中较佳,是较好的空间相机结构件支撑材料。殷钢材料弹性模量较大、线膨胀系数较低,从适应环境变化的角度来说,殷钢作为支撑结构材料较为理想,但需要对其进行最大限度地轻量化。在国际

上,美国的 EO-1 相机采用了全殷钢的结构材料,使整个相机对环境的适应性大大加强,据悉该相机所采用的殷钢结构支撑件多数壁厚仅为 0.76 mm。

由于殷钢材料的上述特点和对环境温度变化不敏感的优点,本设计选择殷钢作为主次镜间支撑结构的材料。

2.3 支撑杆的分析与对比

常用的次镜支撑杆主要有三杆辐形和四杆辐形两种结构,为提高支撑杆沿光轴方向的刚度,通常使支撑杆与光轴呈一定角度。表 1 给出了两种支撑杆在一阶固有频率、重力作用下的刚体位移、扭转角度、轴向刚度以及中心遮拦几方面的对比分析结果,两种支撑杆的一阶振型如图 2 所示。

表 1 三杆辐形和四杆辐形对比分析

Tab.1 Analysis of tri-plate type and crossed-plate type structures

| 结构形式 | 一阶频率 /Hz | 次镜刚体位移 / μm | 次镜扭转角度 /(") | 光轴方向施加 100 N 力次镜座位移 / μm | 遮拦面积(支杆厚度为 8 mm)/ mm^2 |
|------|----------|------------------------|-------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| 三杆辐形 | 170 | 1.78 | 5.74 | 2.31 | 17 573 |
| 四杆辐形 | 174 | 1.74 | 5.69 | 2.21 | 19 761 |

从表 1 可知,三杆辐形结构的一阶频率较四杆辐形结构低 2.35%,在重力方向上次镜刚体位移较四杆辐形结构大 2.3%,在次镜扭转角度上较四杆辐形结构大 0.88%,在次镜座沿光轴方向的位移上较四杆辐形结构大 4.5%,而在中心遮拦面积上较四杆辐形结构少 12.5%,利用 Code V 软件进行计算,遮拦面积减少 12.5%,系统的光学传递函数将增加 0.02 左右。以上分析结果表明,影响主次镜间位置关系的次镜刚体位移、扭转角及轴向位移在三杆和四杆结构上基本没有区别,而四杆辐形结构在系统的遮拦面积上较大,直接影响系统的传递函数和成像质量,因此选取了遮拦面积较小的三杆辐形结构的支撑杆形式。

2.4 薄壁连接筒的分析与对比

对于连接筒结构形式的选取,主要进行一阶频率以及刚体位移的分析。为此重点考察了 3 种连接筒的结构形式,即有 15 条纵筋和 4 条环筋的连接筒(结构形式 1)、有 3 条纵筋和 2 条环筋的连接筒(结构形式 2)和无纵筋和环筋的连接筒(结构形式 3),材料为殷钢(4J32),为最大限度减轻连接筒的质量,取连接筒的壁厚为 0.8 mm。

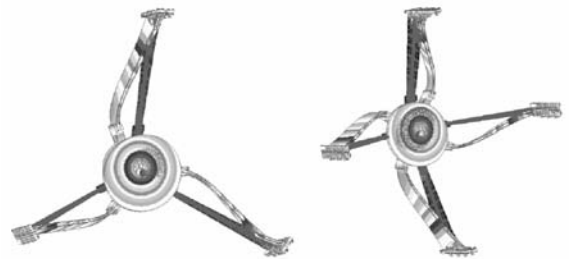


图 2 两种支撑杆一阶振型

Fig. 2 The first order resonant models for two types of support bars

表 2 给出了 3 种连接筒的一阶频率和最大刚体位移的分析对比结果。3 种连接筒的一阶振型如图 3 所示。

表 2 薄壁连接筒的分析与对比

Tab.2 Analysis and contrast of thin walled connecting cylinder

| 结构形式 | 最大刚体位移 / μm | 一阶频率 /Hz |
|--------|------------------------|----------|
| 结构形式 1 | 2.28 | 249 |
| 结构形式 2 | 3.60 | 232 |
| 结构形式 3 | 6.42 | 159 |



图 3 3 种连接筒的一阶振型

Fig. 3 The first order resonant models for three types of cylinders

从表 2 可知,结构形式 1 的连接筒动力学和静力学性能最好,结构形式 3 的连接筒动力学和静力学性能最差,不能选择。结构形式 1 与结构形式 2 的连接筒差别不大,考虑到连接筒的壁厚非常薄,为了减小加工过程中连接筒的变形,增强连接筒的尺寸稳定性,最终选择 15 条纵筋和 4 条环筋做为薄壁连接筒的最佳结构形式。

2.5 支撑结构的设计

在主次镜间支撑结构的初步设计时考虑了两种方案,一种是支撑杆与连接筒采用外连接的方式,另一种是支撑杆与连接筒采用内连接的方式。对连接筒的后端面进行全约束,采用工程分析软件分析了这两种连接方式的模态,固有频率分析结果见表 3,外连接和内连接方式的振型分别如图 4 和图 5 所示。

表 3 两种连接方式的一阶频率对比

Tab.3 The first order frequencies for two types of connecting modes

| 支撑结构方式 | 材料 | 一阶频率/Hz |
|------------|----------|---------|
| 支撑杆与连接筒外连接 | 殷钢(4J32) | 75.6 |
| 支撑杆与连接筒内连接 | | 86 |

由表 3 可知,支撑杆与连接筒采用内连接的方式较外连接方式在固有频率上提高了 10 Hz,内连接的方式具有较好的结构刚度,因此,最终确定支撑杆与连接筒之间采取导向内嵌式连接结构。

支撑杆与连接筒组合结构优化设计的核心任务是在保证刚度的前提下,尽量减小质量。经过进一步设计,确定连接筒的长度为 645 mm,壁厚为 0.8 mm,支撑杆与光轴的夹角为 67° ,主次镜间支撑结构如图 6 所示。该支撑结构主要由连接筒、支撑杆、导向块及次镜座组成。

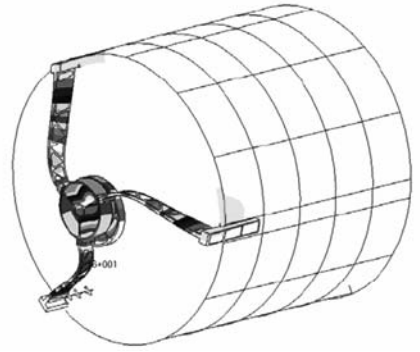


图 4 支撑杆与连接筒外连接方式的一阶振型

Fig. 4 The first order resonant model for outer-connection between supporting bar and connecting cylinder

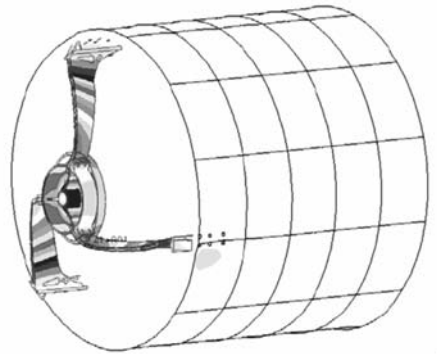


图 5 支撑杆与连接筒内连接方式的一阶振型

Fig. 5 The first order resonant model for inner-connection between supporting bar and connecting cylinder

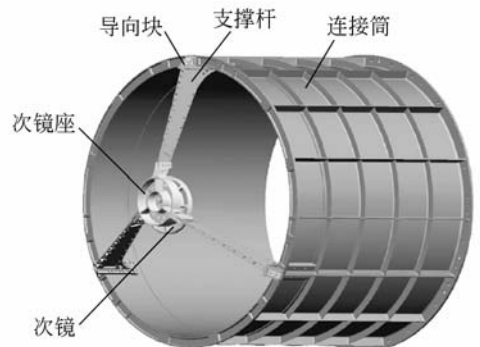


图 6 相机主次镜间支撑结构

Fig. 6 Supporting structure between primary mirror and second mirror

3 分 析

3.1 有限元模型的构造

为了使工程分析更加接近实际,有限元分析模型的构造主要遵循尺寸一致、能量和载荷合理等效等原则进行^[11-12]。有限元模型由屏幕样机生成,以保证几何数据与真实结构一致;有限元模型的能量等效体现在质量、刚度等效上,在关键的力或热传递路径上网格划分要密些,以便准确反映受力及热载荷作用,确保结构刚度等效;无论是静载荷还是动载荷,都应对矢量载荷的作用点、载荷的大小和载荷的方向,标量载荷的大小和作用位置做到准确等效,力求与工程实际一致。根据以上原则,建立的有限元模型如图 7 所示。在该模型中,连接筒的壳单元、支撑杆、次镜座、次镜等采用六面体单元,共计 27 216 个节点和 16 353 个实体单元。

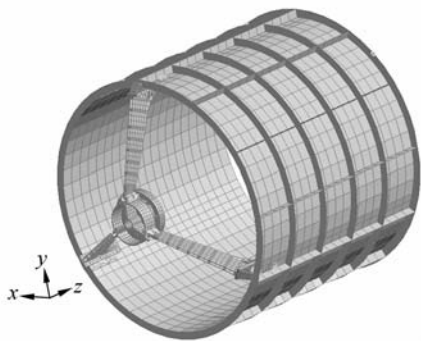


图 7 支撑结构的有限元模型

Fig.7 FEM model of supporting structure

3.2 工程分析

(1)重力作用影响的分析

对支撑结构受重力作用的影响分析见表 4,在重力作用的工况下,次镜相对于主镜的角度变化量均小于 10",满足次镜的指标要求。

表 4 支撑结构受重力作用的影响

Tab.4 Gravity influence on supporting structure

| 重力方向 | 镜面 rms 值 /nm | 镜面旋转/(") | | |
|------|-----------------|----------|-------|-------|
| | | R_x | R_y | R_z |
| X | 0.4 | — | 4.3 | — |
| Y | 0.4 | 4.3 | — | — |
| Z | 1.0 | 0.06 | — | — |

(2)固有模态分析

进行主次镜间支撑结构固有模态分析时,约束连接筒后端面的 18 个连接孔,支撑结构的前四阶模态见表 5。

表 5 支撑结构的前四阶频率

Tab.5 The first four-order frequencies of supporting structure

| 阶数 | 频率 f_n /Hz | 振型描述 |
|----|--------------|-------------|
| 1 | 86 | 在 XOY 平面内转动 |
| 2 | 114 | 绕 X 轴转动 |
| 3 | 122 | 绕 Y 轴转动 |
| 4 | 143 | 沿 Z 轴方向平动 |

(3)正弦振动分析

主次镜间支撑结构的正弦振动分析主要分析支撑结构在 X,Y,Z 3 个方向的一阶频率以及特征部位的放大倍率,为此选取次镜前端作为研究对象。为了模拟支撑结构在相机上的安装方式,将其固定在力学试验工装上,支撑结构在力学工装的示意图及其有限元模型如图 8 所示。正弦振动的输入条件见表 6,支撑结构在正弦振动作用下的加速度响应见表 7,分析结果为该支撑结构在 3 个方向的一阶频率均为 84 Hz,满足空间遥感器的一阶频率 >70 Hz 的要求,加速度响应在 Z 向的放大倍率最大,为 16.5 倍。

表 6 正弦振动分析输入条件

Tab.6 Input conditions of sinusoidal vibration

| 频率/Hz | 幅值 |
|--------|-------|
| 4—10 | 11 mm |
| 10—17 | 2.7g |
| 17—60 | 6.0g |
| 60—100 | 2.8g |

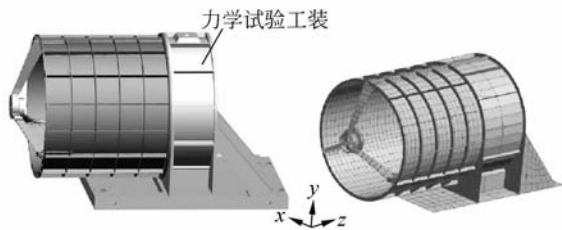


图 8 安装在力学试验工装上的支撑结构及其有限元模型
Fig.8 Supporting structure fixed on mechanical test equipment and its FEM model

表 7 支撑结构在正弦振动作用下的加速度响应

Tab. 7 Acceleration responses of supporting structure under sinusoidal vibration

| | X 向加载 | | Y 向加载 | | Z 向加载 | |
|------|--------|------|--------|------|--------|------|
| | 频率点/Hz | 放大倍数 | 频率点/Hz | 放大倍数 | 频率点/Hz | 放大倍数 |
| 次镜前端 | 84 | 2.1 | 84 | 11.2 | 84 | 16.5 |

4 试验

为了验证工程分析的准确性,将载有支撑结构的力学试验工装放置在振动台上,按照表 6 的力学试验条件进行了正弦振动试验,图 9 为支撑结构在振动台上进行 3 个方向正弦振动试验的照片,图 10 为支撑结构在 Z 方向振动时次镜前方特征点的正弦特征扫描曲线,支撑结构在 Z 向的固有频率为 79.7 Hz,工程分析的结果为 84 Hz,误差 $<5.2\%$ 。表 8 为支撑结构在进行 3 个方向正弦振动试验时测得的次镜前端特征点的频率和加速度响应,支撑结构在 3 个方向固有频率均 ≥ 79 Hz,满足空间遥感器的一阶频率 >70 Hz 的要求,加速度响应在 Z 向的放大倍率最大,为 15.34 倍,与工程分析结果相比误差为 7%,工程分析结果正确。



图 9 支撑结构在 3 个方向的正弦振动试验

Fig. 9 Sinusoidal vibration testing of supporting structure in tri-directions

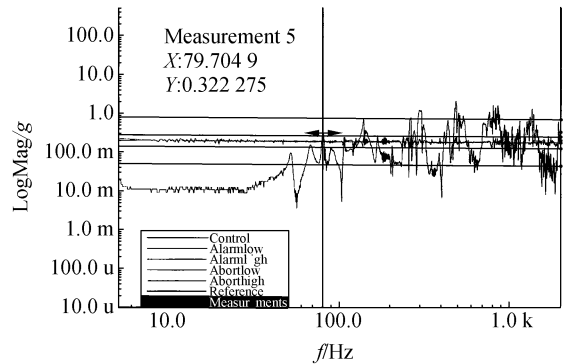


图 10 支撑结构 Z 向正弦特征扫描曲线

Fig. 10 Sinusoidal scan curve of supporting structure in Z direction

表 8 支撑结构在正弦振动时测得的加速度响应

Tab. 8 Acceleration responses of supporting structure under sinusoidal vibration

| | X 向加载 | | Y 向加载 | | Z 向加载 | |
|------|--------|------|--------|------|--------|-------|
| | 频率点/Hz | 放大倍数 | 频率点/Hz | 放大倍数 | 频率点/Hz | 放大倍数 |
| 次镜前端 | 79 | 1.2 | 79 | 9.75 | 79.7 | 15.34 |

5 支撑结构的稳定性检测

为了定量地验证主次镜间薄壁筒和支杆组合支撑结构的结构稳定性,通过量级逐增的力学环境试验(3 个方向的正弦振动,频谱为 5~100 Hz,幅值分别为 1.5g,3.0g,6g;3 个方向的随机振动,频谱为 10~2 000 Hz,均方根加速度值分别

为 2.6g rms、7.8g rms、9.68g rms),采用光学的测量方法测定力学振动前后次镜相对于主镜的角度变化量是否满足光学设计的要求是较好地判定支撑结构稳定性的有效方法^[13]。具体操作为:振动前将图 8 中的装置放置在一个稳定的平台上,在平台上架设 0.5"徕卡经纬仪(如图 11 所示),在次镜座后端面和力学工装件的后端面上分别粘贴面形精度很高的平面反射镜(一)(简称次镜)和

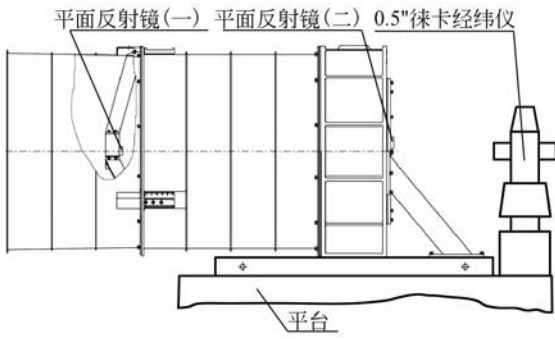


图 11 支撑结构稳定性检测装置

Fig. 11 Structure stability measurement setting of supporting structure

平面反射镜(二)(简称主镜),并使二者同时进入经纬仪视场,通过徕卡经纬仪分别测出次镜和主

镜的方位角和俯仰角,次镜和主镜的方位角差值即为次镜相对于主镜的方位角变化量,次镜和主镜的俯仰角差值即为次镜相对于主镜的俯仰角变化量。每次力学振动试验后均用这种方法测量主、次镜间的方位角变化量和俯仰角变化量,将测量值和振前测量值求差,并同光学设计给出的次镜相对于主镜的角度变化量相比较,即可判定支撑结构的稳定性。

考虑到重力变形的影响,支撑结构在振动前后均在支撑结构力学试验件在水平直立(0°),+90°和-90°3种状态下进行测量。每种状态下次镜和主镜均测量10组数据,然后取算术平均值。表9、表10和表11为支撑结构在振动量级逐增的力学试验振动前后的检测数据。

表 9 支撑结构振动量级 I 前后的检测数据

Tab. 9 Measurement data of test I

| 状态 | 振前 | | 振级 I (1.5g, 2.6g rms)后 | | 振前、振后比较/(") | |
|--------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------|
| | 方位偏角 $\Delta_1/(")$ | 俯仰偏角 $\Psi_1/(")$ | 方位偏角 $\Delta_2/(")$ | 俯仰偏角 $\Psi_2/(")$ | $ \Delta_1 - \Delta_2 $ | $ \Psi_1 - \Psi_2 $ |
| 水平(0°) | 423.5 | 621.3 | 420.3 | 617.8 | 3.2 | 3.5 |
| +90° | 421.4 | 623.8 | 418 | 619.3 | 3.4 | 4.5 |
| -90° | 424.6 | 620.5 | 421.5 | 615.8 | 3.1 | 4.7 |
| 重力变化影响 | 3.2 | 3.3 | 3.5 | 3.5 | | |

表 10 支撑结构振动量级 II 前后的检测数据

Tab. 10 Measurement data of test II

| 状态 | 振前 | | 振级 II (3g, 7.8g rms)后 | | 振前、振后比较/(") | |
|--------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------|
| | 方位偏角 $\Delta_2/(")$ | 俯仰偏角 $\Psi_2/(")$ | 方位偏角 $\Delta_3/(")$ | 俯仰偏角 $\Psi_3/(")$ | $ \Delta_2 - \Delta_3 $ | $ \Psi_2 - \Psi_3 $ |
| 水平(0°) | 420.3 | 617.8 | 424.6 | 621.1 | 4.3 | 4.3 |
| +90° | 418 | 619.3 | 422.5 | 625.1 | 4.5 | 5.8 |
| -90° | 421.5 | 615.8 | 427.1 | 620.6 | 5.6 | 4.8 |
| 重力变化影响 | | | 4.6 | 4.5 | | |

表 11 支撑结构振动量级 III 前后的检测数据

Tab. 11 Measurement data of test III

| 状态 | 振前 | | 振级 III (6g, 6.68g rms)后 | | 振前、振后比较/(") | |
|--------|------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|---------------------|
| | 方位偏角 $\Delta_3/(")$ | 俯仰偏角 $\Psi_3/(")$ | 方位偏角 $\Delta_4/(")$ | 俯仰偏角 $\Psi_4/(")$ | $ \Delta_3 - \Delta_4 $ | $ \Psi_3 - \Psi_4 $ |
| 水平(0°) | 424.6 | 621.1 | 418.1 | 614.5 | 6.5 | 6.6 |
| +90° | 422.5 | 625.1 | 415.2 | 618.3 | 7.3 | 6.8 |
| -90° | 427.1 | 620.6 | 420.4 | 613.3 | 6.7 | 7.3 |
| 重力变化影响 | | | 5.2 | 5 | | |

从表 9~11 可知,随着振动量级的不断增大,次镜相对于主镜的角度变化量逐渐增大,最大为 $7.3''$,小于 $10''$ 的指标要求;同时支撑结构在 3 种不同状态下,由于重力影响所造成的次镜相对于主镜的角度变化量最大为 $5.2''$,表明重力对于主次镜间的角度变化量较小。通过试验和检测表明支撑结构在经受大量级振动试验后具有较好的结构稳定性。

5 结 论

大口径、长焦距空间相机中,次镜相对主镜的位置变化是保证成像质量的主要环节,主次镜间

支撑结构是保证这一环节的重要组成部分。本文从实际应用的角度出发,设计并研制了满足光学系统要求的空间相机主次镜间支撑结构的形式。根据给定的光学系统,确定了主次镜之间采用薄壁筒和支杆组合支撑的结构形式,在对支撑结构进行分析和优化的基础上完成了结构设计。讨论了重力对支撑结构的影响,对支撑结构进行了固有频率和正弦振动响应分析。通过量级逐增的力学试验和光学检测方法验证了支撑结构的结构稳定性。试验结果表明:主次镜间的角度变化量 $> 10''$,组合支撑结构一阶基频 > 75 Hz,具有较好的结构稳定性。

参考文献:

- [1] 刘磊,高明辉. 空间大口径望远镜可展开式反射镜单元镜支撑技术[J]. 光学 精密工程,2005,13(3): 127-134.
LIU L,GAO M H. Support technique of deployable unit mirror in space large aperture telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*,2005,13(3):127-134. (in Chinese)
- [2] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. 光学 精密工程,2008,16(11):2164-2172.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2164-2172. (in Chinese)
- [3] 常军,翁志成. 宽覆盖、离轴空间相机光学系统的设计[J]. 光学 精密工程,2003,11(1):55-57.
CHANG J,WENG ZH CH. Design of optical system in wide cover、abaxial space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*,2003,11(1):55-57. (in Chinese)
- [4] 张雷,金光. 同轴轻型空间遥感器支撑桁架的设计与试验[J]. 光学 精密工程,2010,18(5):1099-1104.
ZHANG L,JIN G. Design and test of supporting truss for light space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*,2010,18(5):1099-1104. (in Chinese)
- [5] DENNIS G,JIM B,JOE D,*et al.*. Overview of the optical design and performance of the high resolution science imaging experiment (HIRISE) [J]. *SPIE*,2005,5874:58740K-1-58740K-10.
- [6] PEARLMAN J,SEGAL C,LIAO L,*et al.*. Development and operations of the EO-1 hyperion imaging spectrometer[J]. *SPIE*,2004,4135:243-252.
- [7] 张雷,贾学志. 大型离轴三反相机桁架式主支撑结构的设计与优化[J]. 光学 精密工程,2009,17(3): 603-608.
ZHANG L, JIA X Z. Design and optimization of trussed supporting structure for off axis three mirror reflective space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*,2009,17(3):603-608. (in Chinese)
- [8] FORMAN S E. EO-1 advanced land imager(ALI) technology transfer forum[R]. 2001,9.
- [9] 陈志平,陈志远,杨世模. 空间太阳望远镜主桁架的模态分析与试验[J]. 光电工程,2004,31(12):1-3.
CHEN ZH P,CHEN ZH Y,YANG SH M. Modal analysis and experiment on the main truss of Space Solar Telescope [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004,31(12):1-3. (in Chinese)
- [10] 李志来,薛栋林,张学军. 长焦距大视场光学系统的光机结构设计[J]. 光学 精密工程,2008,16(12):2485-2490.
LI ZH L,XUE D L,ZHANG X J. Optical and mechanical design for long focal length and wide-filed optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*,2008,16(12):2485-2490. (in Chinese)
- [11] 吴清文,卢泽生. 空间光学遥感器热分析[J]. 光学 精密工程,2002,4(2):205-208.
WU Q W,LU Z SH. Thermal analysis for a space optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,4(2):205-208. (in Chinese)
- [12] WADE R,FELL B. Structural analysis and active flexure compensation of the high resolution optical spectrograph for the gemini south telescope [J]. *SPIE*,1998,3355:307-314.
- [13] 李威,刘宏伟. 空间光学遥感器中碳纤维复合材料

精密支承构件的结构稳定性[J]. 光学精密工程, 2008,16(11):2173-2179.

LI W, LIU H W. Structure stability of precision

component made of carbon fiber composite in space optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2173-2179. (in Chinese)

作者简介:



李 威(1970—),男,吉林长春人,工学博士,研究员,1994 年于吉林工业大学获得学士学位,2001 年、2010 年分别于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士和博士学位,主要从事空间光学遥感的总体设计、结构设计及分析等方面的研究。E-mail: leew2006@ciomp. ac. cn



刘宏伟(1971—),男,辽宁锦州人,硕士,副研究员,1994 年于武汉工学院获得学士学位,2003 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光学精密仪器设计、有限元分析和力学试验等方面的工作。E-mail: liuhw@ciomp. ac. cn



郭权锋(1979—),男,河南禹州人,博士研究生,助理研究员,2003 年于吉林大学获得学士学位,2006 年于大连理工大学获得硕士学位,主要从事空间相机光机结构方面的研究。E-mail: vi-king2000@sohu. com



王海萍(1964—),女,吉林长春人,工程师,1987 年于中央广播电视大学获得学士学位,主要从事空间相机机械结构设计等方面的工作。E-mail: wang-haiping@sohu. com

(本栏目编辑:李树军)

● 下期预告

制作平面全息光栅的离轴抛物镜/洛埃镜干涉系统

巴音贺希格¹,邵先秀^{1,2},崔继承^{1,2},李文昊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 研究生院,北京 100039)

设计和制作具有较高波前平面度和结构稳定性的干涉曝光系统是研制高质量平面全息光栅的首要条件。对离轴抛物镜/洛埃镜系统、准直透镜/洛埃镜系统、球面反射镜/洛埃镜系统和双分离透镜/洛埃镜系统等 4 种单反射镜干涉曝光系统产生的干涉条纹直线度进行了光线追迹。在干涉场中放置标准光栅,使用于曝光的两束平行光入射到光栅上,使衍射光相干叠加产生莫尔条纹,并对上述 4 个系统下产生的莫尔条纹做了模拟。利用 Zernike 多项式对莫尔条纹进行拟合得到干涉曝光系统的波前像差,比较了 4 个系统的差异。结果表明,制作中、小口径平面全息光栅采用离轴抛物镜/洛埃镜系统是最为合适的。在此基础上,研制了用于制作最大尺寸为 110 mm×110 mm,刻线密度>1 200 l/mm 的平面全息光栅离轴抛物镜/洛埃镜干涉曝光系统,在洛埃镜和离轴抛物镜面形精度为 $\lambda/8$ ($\lambda=632.8$ nm) 的前提下,试制的 110 mm×110 mm、1200 l/mm 平面全息光栅的衍射波前像差为 $0.239\ 6\lambda$ ($\lambda=550$ nm)。此系统经过克服外界扰动和精细装调后,可用于制作衍射波前像差达 $\lambda/6\sim\lambda/7$ ($\lambda=550$ nm) 以上的平面全息光栅。