

空间轻小型离轴三反相机桁架主支撑结构设计^{*}

DESIGN OF TRUSSED SUPPORTING STRUCTURE FOR THE LIGHT-SMALL OFF-AXIS THREE-MIRROR REFLECTIVE SPACE CAMERA

席佳利^{**1 2} 张雷^{***1} 杨林¹ 解鹏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. 中国科学院大学, 北京 100049)

XI JiaLi^{1 2} ZHANG Lei¹ YANG Lin¹ XIE Peng¹.

(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)

摘要 为了满足轻小型离轴三反相机精度高、质量小的要求,采用了一种以碳纤维桁架杆结合钛合金安装基板的空相机主支撑结构。通过分析对比各种空间相机主支撑结构的优缺点,结合本文所述光学系统的特点,确定了次镜安装基板和折叠镜安装基板分开支撑的支撑方式。对初始的主支撑结构进行以一阶频率为优化目标,质量为约束条件的动力学尺寸优化,并对最终的主支撑结构特性进行了有限元分析和试验验证。有限元分析和振动试验表明:在主支撑结构质量不大于4 kg的条件下,所研制的离轴三反相机主支撑结构力学性能指标均满足设计要求,其中一阶频率达到291.4 Hz。该离轴三反相机主支撑结构设计可以作为其它同型相机结构设计的技术参考。

关键词 主支撑结构 动力学尺寸优化 离轴三反相机 桁架结构

中图分类号 V474.2

Abstract A trussed supporting structure with carbon fiber trusses and titanium frames was designed to meet the requirements on precision and mass of a light-small off-axis three-mirror reflective space camera. After analyzing the common forms of the supporting structure for space cameras, a method of the supporting structure with the secondary mirror and the folding mirror fixed separately was determined according to the structure characteristics of this optical system. A dynamic size optimization was conducted to lighten the structure and improve the stiffness of this structure. After the size optimization the finite element analysis and vibration experiments were conducted. It shows that the supporting structure could satisfy the requirements on precision and mass of this camera, and the fundamental frequency reaches 291.4 Hz under the condition that the mass of this trussed supporting structure is not more than 4 Kg. The design scheme of this trussed supporting structure could provide some references to the other light-small space cameras with the same type.

Key words The supporting structure; The dynamic size optimization; The off-axis three-mirror reflective space camera; Truss

Corresponding author: ZHANG Lei, E-mail: zhangleisong@tom.com, Tel: +86-431-86708283, Fax: +86-431-86708897

The project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2012AA121502).

Manuscript received 20150706, in revised form 20150730.

引言

随着空间对地观测技术的不断发展,空间相机光学系统的相对孔径逐渐增大,焦距逐渐增长,导致相机

体积、质量、成本、设计和加工的难度不断增大。离轴三反光学系统通过多次转折光路,可以在保持焦距不变的条件下有效缩短相机的长度。一方面,离轴三反光学系统具有能较容易控制光学系统的杂散辐射,没

^{*} 20150706 收到初稿,20150730 收到修改稿。国家“863”计划(2012AA121502)资助。

^{**} 席佳利,男,1990年生,汉族,陕西铜川人,硕士研究生,主要从事空间相机结构设计方面的研究。

^{***} 张雷,男,1982年生,汉族,山东菏泽人,副研究员,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学仪器设计与分析方面的研究。

有中心遮拦损失,能量利用率高,不存在色差,可设计变量多等特点^[1],逐渐成为了空间相机领域内的研究热点。另一方面,离轴三反光机系统结构非轴对称,其支撑结构设计和系统装调是公认的难点。

空间相机的主支撑结构将各光学组件稳定、可靠地支撑固定起来形成整体。目前,国外的离轴三反空间相机采用的主支撑结构主要有薄壁筒式结构和桁架式结构。美国 quickbird-2 卫星所搭载的遥感器是采用薄壁筒式主支撑结构的典型代表,日本 ALOS-PRISM 测绘相机则采用了桁架式主支撑结构^[2]。国内也在积极进行离轴三反空间相机主支撑结构的研究。中国科学院长春光机所的张雷基于 Rayleigh 法研究了桁架式主支撑结构的桁架杆间夹角对结构基频的影响,在此基础上对某大型离轴三反相机桁架式主支撑结构进行了优化设计,在降低主支撑结构质量的条件下,提升了结构的基频^[3]。长春光机所的关英俊针对大型离轴三反空间相机主支撑结构的轻质、高刚度、高强度和高尺寸稳定性要求,设计了一种 18 杆空间相机桁架式主支撑结构,并已应用于某空间相机光机结构中^[4]。

相比于国内对大型离轴三反空间相机主支撑结构的研究,本文以某轻小型离轴三反空间相机的主支撑结构设计为背景,为了满足该空间相机精度高、质量小的设计要求,优选了该相机主支撑结构的材料,确定了相机主要组件的支撑方式,得到了该空间相机的主支撑结构方案。经动力学尺寸优化得到了一种满足设计指标要求的桁架式主支撑结构。通过试验验证该设计方法的正确性和该主支撑结构的合理性。

1 光学系统分析

该离轴三反空间相机光学系统如图 1 所示。

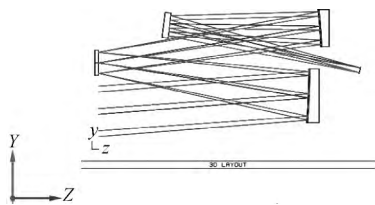


图 1 离轴三反相机光学系统

Fig.1 The optical system of the off-axis three-mirror reflective space camera

该相机采用一次成像离轴无遮挡三反射系统,主镜、次镜、三镜均为二次非球面镜。折叠镜的作用是缩短光路,调整相机焦面位置,缩小相机包络尺寸。

该离轴三反光学系统焦距为 890 mm,总体要求最前端的次镜在 X、Y、Z 向重力分别作用下的刚体位移均小于 0.005 mm;主支撑结构的一阶频率不低于 260

Hz,质量不大于 4 kg。相比于国内其他离轴三反相机,该相机对精度和质量的要求很高,设计难度较大。主支撑结构设计是该空间相机设计中难度最大的部分,合理的主支撑结构是相机满足设计要求的前提条件。

2 主支撑结构方案设计

该离轴三反空间相机选择桁架式主支撑结构,主要包括各反射镜的安装基板、桁架杆和部分连接件。理想的桁架杆材料应满足比刚度、比强度高,热膨胀系数低,尺寸稳定,工艺性能良好等要求^[5]。对比各种空间相机材料后,该相机主支撑结构的桁架杆选用碳纤维复合材料 M40。相机安装基板是各反射镜的安装基准,提供了相机的各种机械接口,体积相对较大,结构复杂。考虑到碳纤维材料机械切削加工工艺性差,成本高昂等缺点,反射镜安装基板和桁架杆接头采用金属材料制备^[6]。为了能与碳纤维材料良好配合,该相机反射镜安装基板和桁架杆接头选用 TC4。

离轴三反相机的主镜、次镜、三镜间相对位置对相机成像至关重要,其位置精度要求很高,折叠镜的位置精度要求相对较低。另外,该空间相机主镜和三镜轴向位置很接近。因而,该相机三镜组件和主镜组件安装于同一基板上,次镜组件和折叠镜组件通过桁架杆分别与主三镜安装基板相连。对轻小型、结构紧凑的离轴三反相机而言,这种支撑形式可以避免次镜和折叠镜间误差的耦合,并降低相机的装调难度。

三角形桁架具有较高的稳定性,作为大型天文望远镜的主结构已经使用多年。锯齿形四角架结构是由三角形桁架结构衍生出的性能优良的桁架结构形式^[7-9],如图 2 所示。本文根据该离轴三反光学系统的各光学元件的尺寸限制,通过改进锯齿形四角架结构来设计该相机的主支撑结构。为了避免桁架杆分布在通光口径内遮拦光线以及次镜与折叠镜支撑结构间的干涉,并尽可能简化结构,次镜组件支撑结构设计为对称的 4 杆结构,折叠镜组件桁架杆采用了 C 型布局形式。由于整体尺寸的限制,桁架杆间的角度较小。为了增大支撑结构的刚度,在不遮挡光线的条件下,尽可能增大桁架杆间的角度^[10],得到的主支撑结构初始设计方案如图 3 所示,对该初始设计方案进行以一阶频率为目标的动力学尺寸优化^[11-12]。

3 主支撑结构动力学尺寸优化

n 自由度系统在载荷 F 的作用下可以描述为

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F \quad (1)$$

式中, M 、 C 和 K 分别是系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚

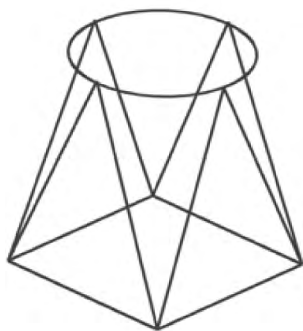


图 2 锯齿形四角架结构

Fig 2 Serrurier Truss (8 Members)

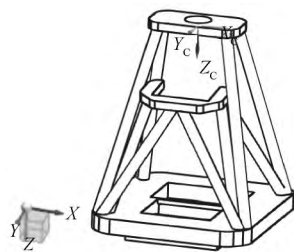


图 3 主支撑结构的初始设计方案

Fig 3 The initial trussed supporting structure

度矩阵, y, \dot{y}, \ddot{y} 为分别位移、速度和加速度向量 F 为荷向量, 刚度矩阵 K 由结构静力学的刚度定义求得。

自振频率是系统的固有特性, 不随外加载荷而改变。此外, 一般系统的阻尼对其自振频率和阵型的影响很小。为简化模型, 求解系统的自振频率和阵型过程中不考虑阻尼影响和载荷作用。简化的系统自由振动方程为

$$M\ddot{y} + Ky = 0 \quad (2)$$

设方程的解为

$$y = \varphi e^{i\omega t} \quad (3)$$

φ 为自由振动时的振幅向量。

将式(3)代入方程(2), 消去各项公因子有

$$(K - \omega^2 M)\varphi = 0 \quad (4)$$

式(4)有非零解, 则行列式 $|K - \omega^2 M| = 0$, 可以得到一个以 ω^2 为未知数, 无缺项的、系数正负相间的

n 次代数方程式, 解之可得 ω^2 的 n 个正实根, 对应于该 n 阶系统的 n 个自振频率。

对于确定了桁架杆布局和材料的桁架式主支撑结构, 基板厚度和各个桁架杆的横截面积完全决定了该系统对应动力学方程的刚度矩阵和质量矩阵, 进而决定了系统的固有频率和质量分布以及一定载荷下系统的动力学响应。主支撑结构的自振频率与基板厚度和桁架杆横截面积间的关系可以表示为

$$\omega = f(t_i, R_j, r_k) \quad (5)$$

ω 表示系统的自振频率, $t_i (i=1, 2, \dots, m)$ 表示第 i 块基板厚度, $R_j (j=1, 2, \dots, n)$ 表示第 j 根桁架杆外径, $r_k (k=1, 2, \dots, n)$ 表示第 k 根桁架杆内径。对确定了桁架杆布局和材料的相机主支撑结构, 以安装基板厚度和桁架杆内外径为变量, 可以对系统的一阶频率或动力学响应进行优化。

利用 Hyperwroks 软件对该主支撑结构的初始设计方案进行有限元建模和尺寸优化。总体要求次镜在 X, Y, Z 向重力分别作用下的位移均小于 0.005 mm; 主支撑结构一阶频率不低于 260 Hz, 质量不大于 4 kg, 该优化问题可以描述如式(6)所示。优化完成后, 对主支撑结构在 X, Y, Z 向重力分别作用下的位移进行校核。

$$\begin{cases} \max & \omega = f(t_i, R_j, r_k) \\ \text{s. t.} & \sum_{i=1}^m \rho_1 a_i b_i t_i + \sum_{j=1}^n \frac{\pi \rho_2}{4} l_j (R_j^2 - r_j^2) \leq m_{\max} \\ & t_{\min} \leq t_i \leq t_{\max} \\ & R_{j\min} \leq R_j \leq R_{j\max} \\ & r_{j\min} \leq r_j \leq r_{j\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中, ρ_1, ρ_2 分别表示安装基板和桁架杆的材料密度, a_i, b_i 表示安装基板的长和宽, l_j 表示桁架杆的长度, 均为确定值。 t_i, R_j, r_k 分别为安装基板的厚度, 桁架杆的外径和内径, 为优化变量。 ω 是主支撑结构的一阶频率, 为优化目标。 m, n 为安装基板和桁架杆的数量。

主支撑结构初始设计方案优化分析结果如表 1 所示, 表明了尺寸优化后的初始设计方案在 Y 向和 Z 向

表 1 主支撑结构初始设计方案经尺寸优化后的一阶频率和重力作用下次镜中心位置位移

Tab 1 The fundamental frequency of the initial supporting structure after optimizing and the center position's displacement of the secondary mirror effected with gravity

技术指标 Index	一阶频率 The fundamental frequency/Hz	X 向重力下次镜中心点位移 The center position's displacement of the secondary mirror effected with gravity in X direction/mm	Y 向重力下次镜中心点位移 The center position's displacement of the secondary mirror effected with gravity in Y direction/mm	Z 向重力下次镜中心点位移 The center position's displacement of the secondary mirror effected with gravity in Z direction/mm
数值 Value	150.2	0.014	0.004	0.000 5

重力分别作用下次镜中心位置的位移满足设计要求 , 一阶频率和 X 向重力作用下次镜中心位置的位移不能满足设计要求 , 次镜组件的支撑结构为整个主支撑结构的薄弱环节。需要在初始设计方案的基础上 , 改善次镜组件的支撑结构性能。继续增大桁架杆的外径可以提高该主支撑结构的刚度 , 但同时会增大系统的遮拦比以及相机的包络尺寸和质量。

在不遮挡光线 , 不增大相机包络尺寸的前提下 , 以增强次镜支撑结构的刚度为目标 , 对次镜组件的所有承力点都进行支撑 , 改进后的主支撑结构如图 4 所示。对改进后的结构按式 (6) 进行尺寸优化 , 其一阶频率迭代曲线如图 5 所示 , 优化结果如表 2 所示。

主支撑结构改进方案经尺寸优化后的质量约为 3.8 kg , 一阶频率可达到 281.8 Hz , 三个方向重力分别作用下次镜中心位置的位移均小于 0.005 mm , 完全满足相机的设计指标要求。

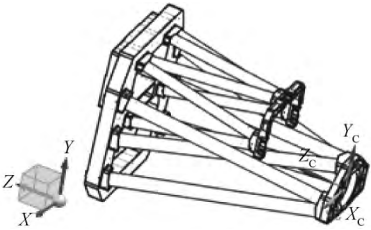


图 4 改进的主支撑结构

Fig. 4 The modified trussed supporting structure

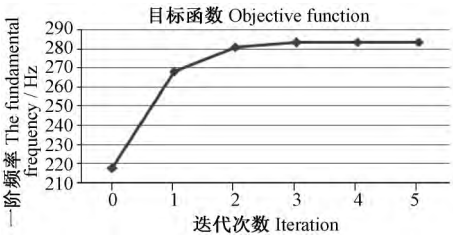


图 5 改进的主支撑结构一阶频率迭代曲线

Fig. 5 The iterative curve of the modified trussed supporting structure's the fundamental frequency

表 2 主支撑结构改进方案经尺寸优化后的一阶频率和重力作用下次镜中心位置的位移
Tab. 2 The fundamental frequency of the modified supporting structure after optimizing
and the center position's displacement of the secondary mirror effected with gravity

技术指标 Index	一阶频率 The fundamental frequency/Hz	X 向重力下次 镜中心点位移 The center position's displacement of the secondary mirror effected with gravity in X direction/mm	Y 向重力下次 镜中心点位移 The center position's displacement of the secondary mirror effected with gravity in Y direction/mm	Z 向重力下次 镜中心点位移 The center position's displacement of the secondary mirror effected with gravity in Z direction/mm
数值 Value	281.8	0.003 2	0.002 7	0.000 7

4 试验验证

为了验证设计的准确性和可靠性 , 在装调完成的主支撑结构上安装配重块 , 以相机的调焦系统安装接口为约束点 , 选取主镜、次镜、三镜和折叠镜配重块上的特征点为传感器安装点 , 对该主支撑结构进行正弦扫描试验和小量级的随机振动试验。图 6 为主支撑结构在振动台上进行振动试验的照片。

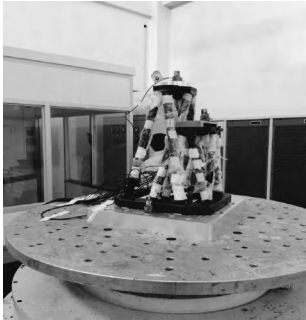


图 6 主支撑结构振动试验

Fig. 6 The testing trussed supporting structure

对该结构进行 3 个方向的正弦扫描试验 , 测得主支撑结构 X 向固有频率最低 , 约为 291.4 Hz , 与动力学优化结果相差约 3.3% , 证明了优化结果的正确性。图 7 为振动试验前后次镜特征点的 X 方向正弦扫描响应曲线叠加对比图 , 可以看出 , 随机振动试验前后该主支撑结构的一阶频率变化很小。2g RMS 的随机振

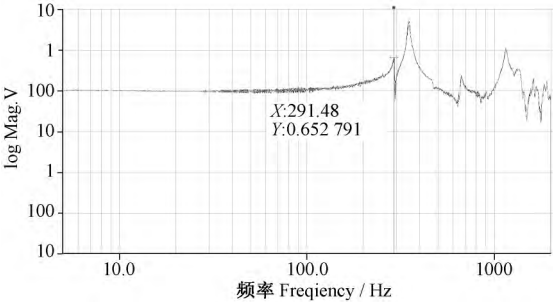


图 7 次镜特征点处振动试验前后 X 方向的正弦扫描响应曲线叠加对比图

Fig. 7 The comparison between the secondary mirror's response curve under sinusoidal scan (in X direction) before the random vibration test and that after the random vibration test.

动试验表明: 次镜特征点在 X 向随机激励下响应最大, 响应的 RMS 值为 $14.95g$ ($g=9.81\text{ m/s}^2$)。试验表明该主支撑结构满足设计指标要求。

5 结论

本文根据某轻小型离轴三反相机的光机结构特点和技术指标要求, 对该离轴三反相机主支撑结构的结构形式、材料选取、加工装调等方面综合考虑后, 通过改进锯齿形四角架结构, 并进行以一阶频率为目的, 以质量为约束条件的动力学尺寸优化, 设计出了一种碳纤维桁架杆结合钛合金安装基板的离轴三反空间相机主支撑结构, 质量仅为 3.8 kg 。对该结构进行正弦扫描试验和随机振动试验, 表明该桁架式主支撑结构一阶频率为 291.4 Hz , 随机振动试验前后结构的一阶频率变化很小。该桁架式主支撑结构已经应用于某轻小型离轴三反空间相机中。本文所采用的桁架式主支撑结构设计方法可以为其他轻小型空间相机主支撑结构设计提供借鉴。

参考文献 (References)

- [1] 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.
ZHANG Liang, AN Yuan, JIN Guang, 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 (In Chinese).
- [2] 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.
ZHANG KeKe, RUAN NingJuan, FU DanYing. Analysis and consideration of development of overseas space off-axis TMA system camera [J]. Spacecraft Recovery & Remote sensing, 2008, 29(3): 63-70 (In Chinese).
- [3] 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 Lei, JIA XueZhi. 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).
- [4] 关英俊, 徐宏, 李志来, 等. 大型离轴空间相机桁架支撑结构的设计[J]. 光电工程, 2014, 41(12): 7-13.
GUAN YingJun, XU Hong, LI ZhiLai, et al. Design of truss support structure for large off-axis space camera [J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(12): 7-13 (In Chinese).
- [5] 林再文, 刘永琪, 梁岩. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1182-1185.
LIN ZaiWen, LIU YongQi, LIANG Yan. Application of carbon fiber reinforced composite to space optical structure [J]. Opt. Precision Eng., 2007, 15(8): 1181-1185 (In Chinese).
- [6] 张雷, 姚劲松, 贾学志. 同轴空间相机碳纤维复合材料桁架结构的研制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(9): 1967-1973.
ZHANG Lei, JIA XueZhi, YAO JinSong, Development of trussed made of carbon fiber composites for coaxial space remote sensors [J]. Opt. Precision Eng., 2012, 20(9): 1967-1963 (In Chinese).
- [7] Serrurier, M., Structural features of the 200-inch telescope for Mt. Palomar Observatory [J], Civil Eng., 8, 524, 1938.
- [8] Meinel, A. and Meinel, M., Wind deflection compensated, zero-coma telescope truss geometries [J], Proc. SPIE, 628, 403, 1986.
- [9] G. I. N Rozvany, W. Collub and M. Zhou, Exact Michell layouts for various combinations of line supports [J], Structural Optimization, 14, 138-149.
- [10] 李畅, 何欣. 基于 Rayleigh 算法的空间相机桁架结构设计与优化[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2405-2409.
LI Chang, HE Xin, Design and optimization of trussed structure for space camera based on Rayleigh algorithm [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2405-2409 (In Chinese).
- [11] 顾松年, 徐斌, 荣见华, 等. 结构动力学设计优化方法的新进展[J]. 机械强度, 2005, 27(2): 156-162.
GU SongNian, XU Bin, RONG JianHua, et al. Recent progresses on structural dynamic design methods [J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(2): 156-162 (In Chinese).
- [12] 米大海, 杨睿, 周亮, 等. 以频率为目标的加筋平板结构优化设计研究[J]. 机械强度, 2013, 35(2): 179-182.
MI DaHai, YANG Rui, ZHOU Liang, et al. Structural frequency optimal design of stiffened plate [J]. Journal of Mechanical Strength, 2013, 35(2): 179-182 (In Chinese).