

文章编号: 1672-8785(2013)10-0016-04

遥感仪器光学系统用非球面反射镜 的支撑结构设计

崔永鹏 何 欣

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间光学二部, 吉林长春 130033)

摘 要: 目前空间遥感仪器的非球面反射镜一般都是用支撑柔性结构加背板的支撑结构支撑的。由于支撑结构的质量占有较大比重, 需要简化支撑结构的形式, 降低支撑结构的质量。依据三点定位原理和双脚架挠性结构, 设计了 3 个用于简化反射镜支撑结构形式的柔性铰链结构, 并采用有限元软件对设计结果进行了分析。结果表明, 这种支撑结构形式可以适应空间力热环境并能达到精度要求, 实现了对大口径非球面反射镜的支撑。该支撑结构去除了传统结构中的反射镜背板, 简化了支撑结构的形式, 减小了支撑结构的质量, 降低了组件加工和装配工艺的难度。

关键词: 反射镜; 柔性结构; 双脚架结构; 三点定位

中图分类号: TH745; V19 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.10.004

Design of Support for Aspheric Mirror Used in Remote Sensor

CUI Yong-peng, HE Xin

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

Abstract: Currently, the aspheric mirrors used in space remote sensors are generally supported with a supporting structure containing a flexible link and a backboard. Because the supporting structure accounts for a large proportion in weight, its configuration and weight should be simplified and reduced respectively. According to the principle of three-point orientation and bipod flexure, three flexible link structures for simplifying the configuration of the support are designed. The design result is analyzed by using a finite element software. The result shows that this support configuration is able to adapt the mechanical and thermal environment in space. It can meet the required precision and can be used to support large diameter aspheric mirrors. Because the mirror backboard commonly used in the traditional configuration is removed, this support configuration is simplified. Its weight is reduced and its machining and assembling difficulties are also reduced.

Key words: reflected mirror; flexible link; bipod flexure; three-points orientation

收稿日期: 2013-09-05

作者简介: 崔永鹏 (1981-), 男, 河北迁安人, 硕士研究生, 主要从事机械设计和机械制造等方面的研究。

E-mail: cyp19810512@yahoo.com.cn

0 引言

随着空间光学技术的快速发展,人们对空间遥感器地面分辨率的要求越来越高。目前人们主要是通过焦距长和相对孔径大的离轴三反射系统来实现高地面分辨率的。其缺点是会导致遥感器的整体规模和质量变得越来越大,并需要采用尺寸较大的非球面反射镜。在空间遥感器中,光机结构部分的重量占到 70% 以上。因此,机身组件和反射镜组件应在满足要求的前提下尽可能采用轻量化和简化设计,以减小遥感器的质量。

作为遥感器光学系统的关键部件之一,反射镜对整个光学系统的成像质量起着至关重要的作用。因此,必须保证主反射镜在空间力学和热环境下保持良好的稳定性。在满足该前提的

条件下,我们需要考虑如何通过方案进行优化设计、简化设计以及零件轻量化设计,控制反射镜支撑部件在整个组件中所占的比重,从而降低组件的质量。

1 支撑结构原理

1.1 三点定位原理

图 1 所示为三点定位原理。被固定件的 3 个球点放置在固定底座的 3 个定位点上。通过力封闭使 3 个球点与 3 个定位点紧密接触,从而实现被固定件的 6 自由度定位。其中,3 个定位点为 V 形槽,每个 V 型槽限制 2 个自由度。3 点组合在一起便可实现被固定件的平移以及旋转的 6 自由度定位,且无过约束。

1.2 双脚架的结构原理

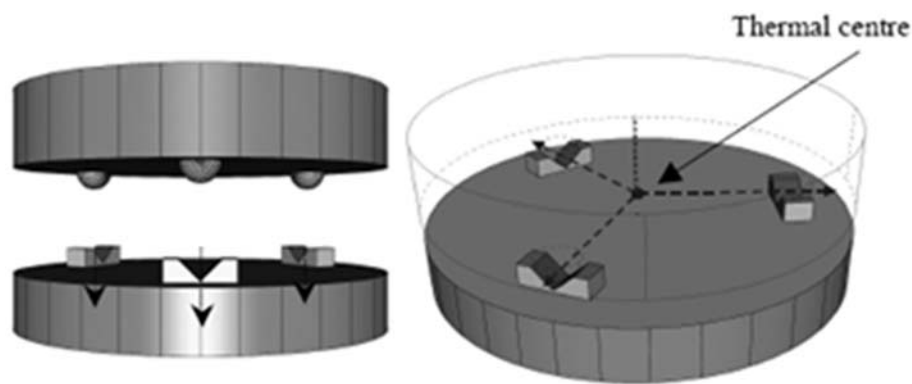


图 1 三点定位原理

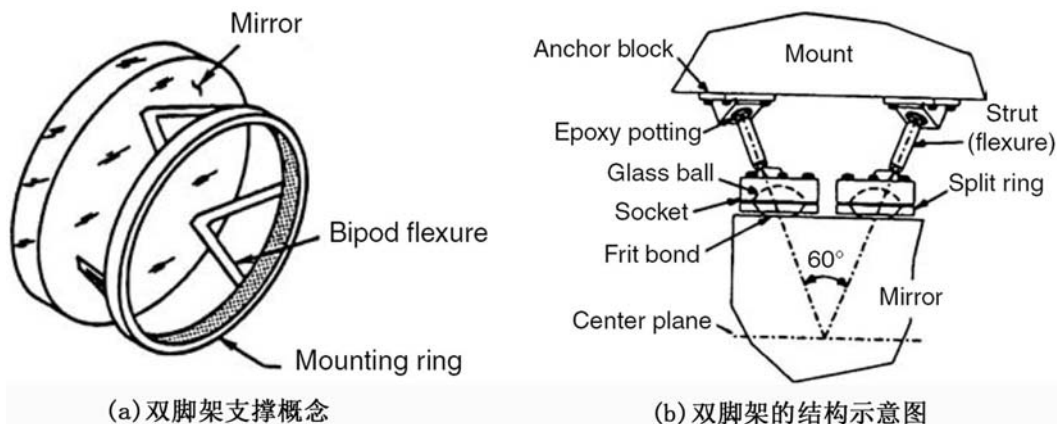


图 2 双脚架支撑技术

双脚架挠性结构通常用于许多高精度反射镜支撑结构。图 2(a) 所示为一种典型的双脚架支撑概念。每个双脚架由 2 根互成 60° 的支腿组成。支腿只具有轴向刚度，弯曲刚度较弱，可实现类似 V 型块的 2 个自由度约束。3 个双脚架按圆周均布在反射镜的背面上，以实现反射镜的 6 自由度约束。图 2(b) 中，用一个挠性铰链替代图 2(a) 中的支腿。在支腿的两端采用柔性结构，使之具有双轴挠性的特征，只具有轴向刚度，以避免外力耦合到反射镜上引起反射镜变形；当温度改变时，具有挠性支腿的双脚架结构的尺寸会随之变化，可减小对反射镜的影响。

2 反射镜的支撑结构设计

2.1 反射镜的支撑结构布局

依据三点定位原理中的半运动学定位方式，设计 3 个具有相同结构形式的双脚架，使其均匀分布在反射镜的圆周方向上。图 3 所示为反射镜的支撑结构布局。其中，每个双脚架均可实现箭头方向上的微小位移，其他 5 个自由度约束，3 个双脚架的位移方向的延长线在反射镜的中心点处相交。反射镜组件通过双脚架与遥感器机身连接，中间加入修调垫作为修整环节。

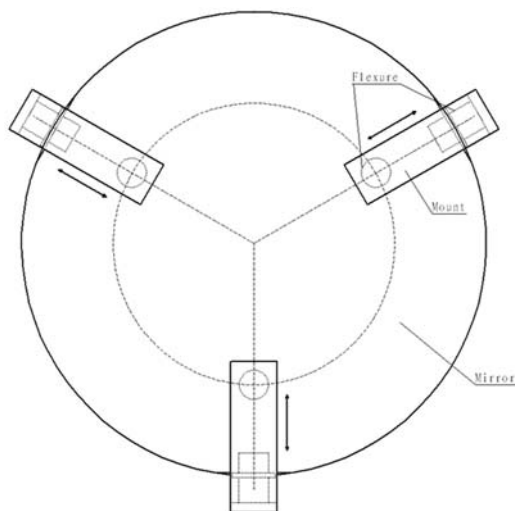


图 3 反射镜的支撑结构布局

2.2 反射镜结构

反射镜采用质轻、强度高的 SiC 材料，并实现了高度轻量化。结构为敞开式三角形轻量化

孔形式，其轻量化筋的布局方向与支撑点之间的连线方向相同。图 4 所示为 SiC 反射镜的结构。

由于采用 3 个双脚架进行支撑，支撑点数相对较少，所以对反射镜自身的刚度要求较高。通过仿真对反射镜轻量化筋的走向、轻量化筋的厚度和间隔以及镜体厚度等参数进行计算和优化，可以保证反射镜在重力和温度的影响下产生较小变形，从而较好地满足支撑需要。合理的轻量化结构可在保证反射镜刚度的基础上减少反射镜的重量。

2.3 双脚架结构

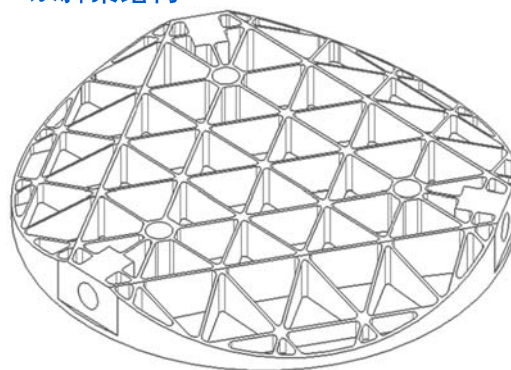


图 4 SiC 反射镜

双脚架结构由连接板、反射镜背部柔头和反射镜侧面柔头组成，如图 5 所示。它具有一个平移自由度微量释放功能。其中，每个柔头通过柔性结构进行自由度释放，反射镜背部柔头可限制垂直反射镜背部方向上的位移自由度；反射镜侧面柔头可限制反射镜的侧向位移，并可通过柔性环节释放两个旋转自由度，其他自由度则可以保证具有一定的刚度。

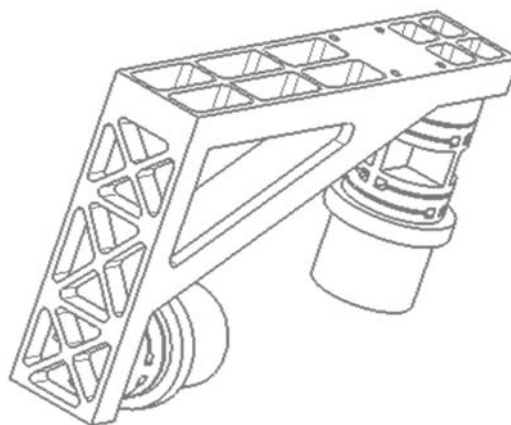


图 5 双脚架结构

柔头的柔性铰链结构是通过释放自由度避免装配应力和温度应力对反射镜面形产生较大影响的重要环节,也是反射镜满足空间环境需要的重要保障。柔性铰链的基本性能主要包括刚度、精度以及应力特性等方面。刚度太小,不仅会使反射镜受重力影响而产生较大的镜体位移,而且还会使整个反射镜组件的基频变得过低,抵抗振动的能力变弱,即在受到振动时具有较大的响应,受力状态变得恶劣;刚度较大,则会降低反射镜对外部温度环境的适应能力,使其在温度变化时容易产生镜面变形。

柔性铰链的参数主要有宽度、最小厚度、切割圆半径、高度以及圆心角等几何尺寸。这些参数都需要仔细分析并由计算确定。通过计算机的仿真分析,得到了不同参数对反射镜的影响大小,从而确定了结构参数的最优值。计算中,主要考虑了含柔性结构的外界支撑对反射镜镜面刚体位移、镜面转角以及镜面面形的影响,并将其控制在了光学设计所允许的公差范围之内。

此外,由于柔头与反射镜直接胶接,应选择与反射镜材料具有相同或相近线胀系数的材料。本文采用线胀系数为 2.5×10^{-6} 的钢材材料,这样可以在温度发生变化时避免因反射镜材料与支撑结构的金属材料在线膨胀系数上不一致而产生镜面变形。连接板选用了比刚度大、线膨胀系数较小的钛合金材料。

3 反射镜的分析计算

工程分析采用 PATRAN 建模和 NASTRAN 求解。模型构造按以下原则进行:

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了验证、修改和优化,并合理分配了主反射镜系统中各个零件的精度。主反射镜系统的网格划分较密,全结构采用四面体单元划分;对于非关键部位,则要本着能量等效原则,准确描述其等效单元体的质量、质心位置以及连接刚度。

3.1 动力学频率特性与响应特性分析

按照反射镜组件的实际安装状态约束组件,计算了组件的前三阶模态(计算结果见表 1)。

表 1 反射镜组件的模态分析

阶数	频率 (Hz)	振型
1	198.9	反射镜绕光轴转动
2	215.7	反射镜沿水平轴平动
3	270.1	反射镜绕垂直轴平动

3.2 反射镜的面形误差计算

表 2 由重力引起的反射镜面形误差

		重力方向		
		X 向	Y 向	Z 向
镜面最大刚体位移 (μm)	ΔX	12.7	1.5	2.4
	ΔY	3.6	8.7	2.2
	ΔZ	3.3	1.7	4.5
镜面最大倾斜角 ($''$)	θ_x	6.7	0.51	1.3
	θ_y	0.3	5.43	0.9
PV (nm)		22.1	24.3	33.6
RMS (nm)		4.5	5.4	8.9

表 3 由 5 $^{\circ}\text{C}$ 温升和重力引起的反射镜面形误差

		重力方向		
		X 向	Y 向	Z 向
镜面最大刚体位移 (μm)	ΔX	13.5	4.8	3.94
	ΔY	8.9	13.1	5.7
	ΔZ	6.8	7.1	9.7
镜面最大倾斜角 ($''$)	θ_x	6.9	0.47	1.2
	θ_y	0.3	4.8	1.1
PV (nm)		54.6	66.1	72.9
RMS (nm)		9.1	9.6	12.6

组件约束与组件的实际安装状态一致。在双脚架与机身连接的安装孔位处,各节点 6 自由度全约束。

工况载荷条件如下:

[工况 1] 在 X、Y、Z 方向上分别施加 1 g 惯性载荷;

(下转第 43 页)