

文章编号 1004-924X(2003)06-0550-05

# 航空遥感相机扫描反射镜支撑技术

付 芸<sup>1</sup>, 徐长吉<sup>2</sup>, 丁亚林<sup>1</sup>

(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. 长春理工大学, 吉林 长春 130022)

**摘要:**从保证扫描反射镜成像质量及功能的角度出发,介绍了扫描反射镜及其支撑结构材料的选取原则;探讨了扫描反射镜的支撑方式,以及各种支撑方式的适用范围;针对面型精度要求较高的反射镜,提出了柔性支撑结构的设计思想。通过 CAD/CAE 工程分析软件,在各种情况下,对采用柔性支撑结构前后的反射镜组件进行分析,由有限元模型变形情况的对比分析,可以验证此种柔性支撑结构的有效性。最终通过相机的外场试验,由相机的成像质量确定了反射镜支撑结构的可靠性。

**关键词:**航空遥感相机;扫描反射镜;柔性支撑结构

中图分类号:V447.3 文献标识码:A

## Scanning mirror supporting structure of aerial remote sensing camera

FU Yun<sup>1</sup>, XU Chang-ji<sup>2</sup>, DING Ya-lin<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130021, China)

**Abstract:** From the viewpoint of ensuring the imaging quality of scanning mirror, the principles followed in selecting material for scanning mirror and its supporting structure are described. The ways of supporting scanning mirror and their applicabilities are discussed. The design concept of flexure supporting structure is proposed for mirrors with higher profile accuracy requirements. The mirror assemblies both before and after the flexure supporting structure are analyzed under different working conditions using CAD/CAE engineering analysis software. The effectiveness of this flexure supporting structure can be substantiated through comparative analysis of finite element model deformation. The reliability of the mirror supporting structure is finally determined by the imaging quality of camera tested under field conditions.

**Key words:** aerial remote sensing camera; scanning mirror; flexure support structure

## 1 引言

航空摄影是获取地面信息的重要手段之一。扫描反射镜是航空遥感相机实现光路折转、使相

机布局合理的有效方法;同时,在相机动态摄影时,它是补偿由于飞机运动(即飞机前向运动和俯仰/偏航运动)引起的像移误差的执行元件,因此扫描反射镜组件性能的好坏将直接影响相机的成像质量。由于航空遥感相机装载在机载平台上,

相机的工作环境比较复杂(如冲击、振动、温度等),在复杂的环境下要保证扫描反射镜正常工作,就要求反射镜不但具有良好的尺寸稳定性和结构稳定性,而且应具有良好的热稳定性<sup>[1]</sup>。从保证扫描反射镜的成像质量角度出发,在 CAD/CAE 工程分析的基础上,探讨了在复杂的工况下,反射镜的支撑方式及支撑结构,阐述了柔性结构的设计思想,并通过实验进行了验证。

## 2 材料的选择

不同牌号材料的线膨胀系数不同,即使是同一种材料,因材料的形成工艺不同,其线膨胀系数

亦不尽相同。当相机工作环境的温度变化时,由于光学元件与结构支撑件的线膨胀系数不一致,使二者之间发生相对位移;而装配时,二者之间的相对自由度已经完全被约束,因此二者之间产生热应力。由于热应力的存在,使光学元件的面形精度下降,影响成像质量。为了保证光学元件的精度,减小因环境条件变化,尤其是温度的影响,在选择相机材料时,应遵循材料线膨胀系数相一致的原则,使由于线膨胀系数不一致产生的影响降至最低。

航空相机扫描反射镜常用材料的性能如表 1 所示。

表 1 航空相机扫描反射镜常用材料的性能表

Tab. 1 Characteristics of materials of scanning mirrors

材料	密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	弹性模量 $E$ (Gpa)	比刚度 $E/\rho$ ( $10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}/\text{g}$ )	导热率 ( $\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ )	线膨胀系数 $\alpha$ ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )
微晶玻璃	2.53	90.3	3.6	1.46	0.1
熔石英	2.2	67	3.1	1.3	0.55
K9	2.53	81	3.2	1.207	7.5

由表 1 可知,微晶玻璃是扫描反射镜的理想材料,但其费用较高,定货周期较长(需要从国外定货)。考虑材料的综合性能、经济合理性、研制周期等因素,扫描反射镜的材料选为 K9 玻璃。

扫描反射镜支撑结构在保证力学性能的前提下,遵循材料线膨胀系数相匹配的原则,选用铁镍合金(4J45)作为扫描反射镜支撑结构件。

## 3 扫描反射镜的支撑方式

常用的反射镜支撑方式有周边支撑、侧面支撑及背部支撑等 3 种形式<sup>[2]</sup>。随着尺寸、形状、工作环境及面形精度的不同,反射镜的支撑方式有很大不同。

### 3.1 周边支撑

所谓周边支撑是以光学反射镜的底面及某一个长边的侧面为定位基准面的一种支撑方式。反射镜放置在周边相对封闭的镜座内,保证反射镜的底面及某一个长边的侧面与镜座接触良好。反射镜的三个非定位面与镜座间留有一定的间隙;反射镜的工作面一端采用压板方式固定,修研压板,保证压板与反射镜接合面间为零间隙。为提高反射镜可靠性,在反射镜与镜座间的间隙处灌

注硅橡胶。结构简图如图 1。

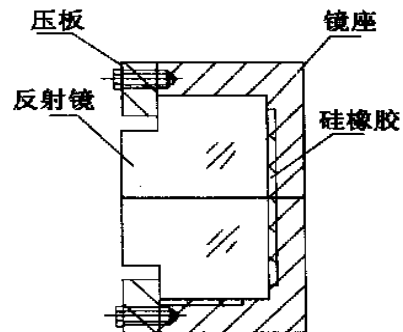


图 1 周边支撑结构简图

Fig. 1 Edge support structure figure

周边支撑结构简单,镜座外形尺寸大、质量大、无装配应力,但因无柔性支撑,当工作环境温度有变化时,即使采用材料匹配措施,仍可能存在热应力。因此周边支撑适用于小尺寸的反射镜,温度相对稳定的工作环境。

### 3.2 侧面支撑

侧面支撑是以光学反射镜的两个侧面为定位基准的一种支撑方式。在反射镜对称的两个侧面上加工有一定数量和深度的盲孔,采用胶接方式在盲孔处放置有与光学反射镜线膨胀系数相匹配

的柔性支撑结构,借助柔性支撑结构将反射镜和镜座连接在一起。通过镜座将反射镜固定在光学仪器的合适位置,结构简图如图 2 所示。

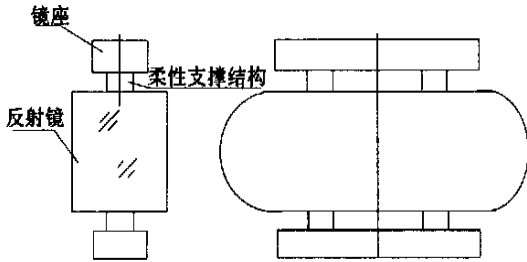


图 2 侧面支撑结构简图

Fig.2 Side support structure figure

侧面支撑由于采用柔性支撑结构,可消除因装配和环境温度变化产生的应力,反射镜的质量通过侧面支撑结构卸荷到镜座上。因此,侧面支撑适用于长宽比大于 2,外形尺寸大(大于 300 mm),面型精度要求高,质量轻的反射镜。

### 3.3 背部支撑

背部支撑是以光学反射镜的背部为定位基准的一种支撑方式。在反射镜背部合适的位置加工有一定数量和孔深的盲孔,采用胶结的方式,在盲孔处放置与光学反射镜线膨胀系数相匹配的柔性支撑结构,借助柔性支撑结构按一定的组合方式将反射镜和镜座连接在一起。通过镜座将反射镜固定在光学仪器的合适位置上,结构简图如图 3 所示。

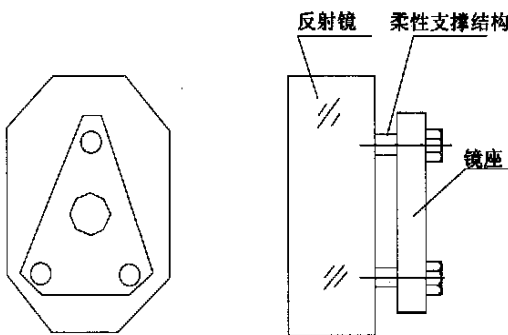


图 3 背部支撑结构简图

Fig.3 Back support structure figure

背部支撑由于采用多点柔性支撑结构,可消除因装配和环境温度变化产生的应力。反射镜的质量通过背部柔性支撑结构卸荷到镜座上。背部柔性支撑的位置和数量由反射镜形状和尺寸来确定。由于背部支撑点数为 3 点或多于 3 点的组

合,支撑点间的连线形成的角度应为锐角,因此背部柔性支撑适用于反射镜的长宽比小于 2,长边尺寸大于 300 mm,面形精度要求高,质量轻的反射镜支撑结构。

某航空相机扫描反射镜的长和宽的外形尺寸为 310 mm × 210 mm,面型精度要求为  $[P-V] = \lambda/10$ ,其中  $\lambda = 632.8$ ,工作时的环境条件较复杂,为保证反射镜的成像质量选用背部支撑方式。

## 4 扫描反射镜支撑结构

扫描反射镜采用背部 3 点支撑结构。通过拓扑优化 3 个支撑点的位置<sup>[3]</sup>。扫描反射镜组件主要由反射镜、镜座和柔性支撑结构组成。结构简图如图 3 所示。

反射镜借助于固定在反射镜背部的 3 个心轴固定在镜座上,心轴选用线膨胀系数与反射镜线膨胀系数相匹配的铁镍合金(4J45),二者间采用胶结的方式结合在一起。心轴与镜座间采用柔性连接方式,做到精确可靠地限制反射镜的 6 个自由度,同时又实现无应力或微应力装配,保证扫描反射镜组件在较严酷的力学环境和热环境条件下,仍满足反射镜的光学面形精度要求。

为了保证扫描反射镜质量轻和面型精度要求,对反射镜进行了轻量化设计。采用六边形孔的轻量化方式,轻量化率为 49%。

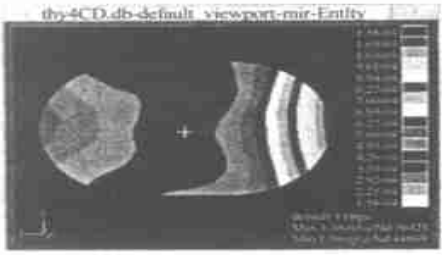
## 5 扫描反射镜工程分析

在空间微重力和工作温度载荷的作用下,反射镜及其支撑结构的结构变形将导致光学元件的波前畸变,这将会影响或破坏光学系统的成像质量<sup>[4]</sup>。因此,对反射镜组件进行了工程分析。

反射镜组件工作在 1 g 的重力场作用下,相机的工作温度水平为 18℃(相机内装有温控器)。利用 CAD/CAE 工程分析软件,按照如下工况:

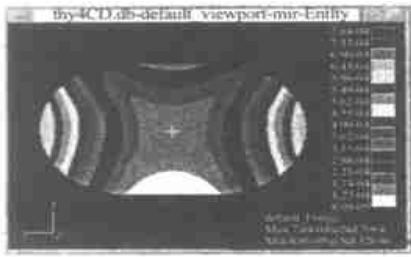
- (1) 将反射镜光轴分别水平及垂直放置,施加 1 g 的重力载荷;
- (2) 温度在 ±4℃ 之间波动。

在以上两种条件的共同影响下,对采用柔性支撑结构前后的反射镜组件进行分析。通过移动约束点,以调整结构在某个方向上的刚度,使反射镜的面型误差小于其相应允差<sup>[5]</sup>。分析结果见表 2,反射镜的有限元模型变形情况如图 4。



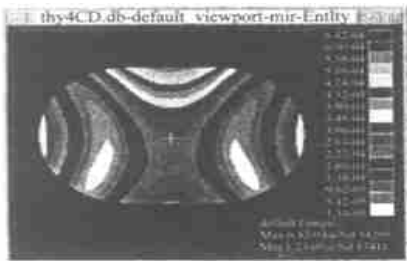
(a) 在 X 方向重力作用下的镜面变形图(刚性)

(a) Under 1 g gravity at X direction (by rigid supporting)



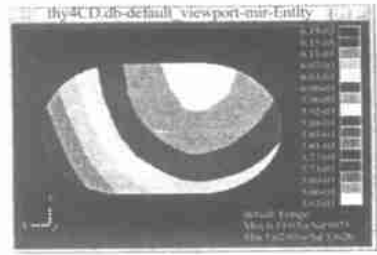
(b) 在 Y 方向重力作用下的镜面变形图(刚性)

(b) Under 1 g gravity at Y direction (by rigid supporting)



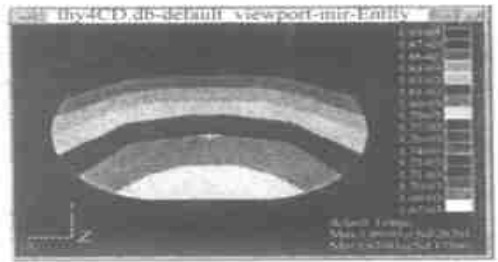
(c) 在 Z 方向重力作用下的镜面变形图(刚性)

(c) Under 1 g gravity at Z direction (by rigid supporting)



(d) 在 X 方向重力作用下的镜面变形图(柔性)

(d) Under 1 g gravity at X direction (by flexure supporting)



(e) (a) 在 Y 方向重力作用下的镜面变形图(柔性)

(e) Under 1 g gravity at X direction (by flexure supporting)



(f) 在 Z 方向重力作用下的镜面变形图(柔性)

(f) Under 1 g gravity at X direction (by flexure supporting)

图 4 刚性与柔性支撑的反射镜镜面变形对比

Fig. 4 Contrast to contour figure of the mirror

表 2 反射镜组件采用柔性支撑结构前后面形误差分析结果

Tab. 2 Mirror figures when mirror set is supported by different patterns

支撑结构类型	重力作用方向	镜面面形 P-V (nm)	镜面变形图	备注
刚性支撑结构	X	206	Fig.4(a)	1 g 重力 温度波动范围: ± 4°C
	Y	164	Fig.4(b)	
	Z	161	Fig.4(c)	
柔性支撑结构	X	62	Fig.4(d)	
	Y	41	Fig.4(e)	
	Z	56	Fig.4(f)	

由表 2 可知,当环境温度在  $\pm 4$  之间变化时,施加 1 g 的重力载荷,未采用柔性支撑结构时, X、Y、Z 三个方向的面形误差远远超出镜面面形的许用误差  $[P-V] = \lambda/10$ , 因此无法满足成像要求。在同样的工况下,采用柔性支撑结构后, X、Y、Z 三个方向的面形误差小于镜面面形的许用误差  $[P-V] = \lambda/10$ , 从而满足成像要求。

## 6 成像试验验证

扫描反射镜组件安装在某航空相机上,该航空相机顺利通过外场试验。试验时靶标放置在距相机 30 km 以外,相机对目标进行扫描成像试

验,从获得的图像分析可知,该相机满足成像质量要求,由此也验证了扫描反射镜支撑结构设计的有效性。

## 7 结束语

扫描反射镜是航空遥感相机实现光路折转和像移补偿的执行部件。本文结合工程应用,给出了一种大尺寸、高面形精度要求的反射镜柔性支撑结构的有效方法。该方法的应用对于在复杂的工作环境下,提高相机的成像质量,使航空相机向着高性能、多样化的方向发展具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 丁亚林. 空间遥感相机光学镜头尺寸稳定性设计[J]. 光学 精密工程, 1998, 6(6) 增刊: 51-56.  
DING YL. Design on stabilization of dimension for optical lens in aerial remote sensing camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(6): 51-56. (in Chinese)
- [2] YODER Jr P R. *Opto mechanical systems design*, marcel deller, Inc. [M]. Optical Group Perkin-Elmer Corporation Dan-burg. Comecticut, 1986.
- [3] NELSON J E, LUBLINER J, MAST T S. Telescope mirror supports: plate deflections on point supports[J]. *SPIE*, 1982, 332: 212-228.
- [4] 宋朝晖. 非球面长圆状反射镜支撑结构的工程分析[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(6): 56-60.  
SONG CH H. Analysis on the support structure of non-sphere mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(6): 56-60. (in Chinese)
- [5] 吴清文. 高精度轻型长条形反射镜多点支撑方案[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(6): 61-65.  
WU Q W. Project to support the high-precision, light and long mirror by several points[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(6): 61-65. (in Chinese)

作者简介:付 芸(1971-),女,吉林长春人,1993年毕业于吉林工学院机械系机械制造专业获学士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读博士研究生,主要研究方向为光学仪器的工程设计。E-mail: fuyun@cax.com.cn