

## 长条形扫描反射镜的柔性支撑

张 雷,丁亚林,徐正平,张洪文,张 健,郭万存

(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:** 为适应复杂的工作环境,提高反射镜的面形精度,设计了基于柔性支撑的 RB-SiC 材料长条形扫描反射镜。采用三角形单元和四边形单元相结合的背部开放式结构,对扫描反射镜进行了轻量化设计;通过分析支撑点跨距对反射镜变形的影响,对支撑点位置进行了优化设计;设计了万向柔性支撑的结构形式,消除装调和环境变化产生的残余应力;利用有限单元法建立了扫描反射镜组件的模型,计算后面形精度可达到  $0.023\lambda$ ;采用自准直法,利用 ZyGo 干涉仪对反射镜的面形精度进行了测量,测量结果显示扫描反射镜的面形 RMS 值达到  $0.029\lambda$ 。通过模拟无穷远处动静态目标进行了静动态成像试验,成像质量一致,通过飞行试验对地面目标进行了拍摄,扫描反射镜动态成像稳定,所获得的图像质量良好。

**关键词:** 扫描反射镜; 轻量化; 柔性支撑; RB-SiC; 面形精度

**中图分类号:** V19      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3678-06

## Long type scanning mirror with flexible supporting

Zhang Lei, Ding Yalin, Xu Zhengping, Zhang Hongwen, Zhang Jian, Guo Wancun

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

**Abstract:** A scanning mirror with the material RB-SiC was designed based on the flexible support, which could operate in complex environment and the reflection mirror's surface precision was enhanced. A lightweight design was conducted on the scanning mirror in the way of combining the triangular elements and quadrilateral elements on the back-open-architecture; The locations of supporting were optimized by analyzing the impaction of supporting span on the deformation of mirror. Meanwhile, the universal-flexible support structure was designed to eliminate stress during alignment process and alteration of environment. The finite element model of the scanning mirror component was established, and the surface precision could be  $0.023\lambda$  according to the calculation; The mirror's surface precision was measured by the ZyGo interferometer with the method of autocollimation after calculation, and the RMS was  $0.029\lambda$ . The static and dynamic imaging tests were compared through the simulation of the infinite distance target, and the results show the image quality meets well. The imaging stability of the scanning mirror performs well after flight test of imaging the target on ground, the result shows that the photograph performs well.

**Key words:** scanning mirror; lightweight; flexible support; RB-SiC; surface precision

收稿日期:2015-04-20; 修订日期:2015-05-16

基金项目:国家高技术研究发展计划(2010AA010102)

作者简介:张雷(1982-),男,博士生,主要研究方向为航空相机反射镜支撑化技术研究。Email:zhangl\_1982@163.com

导师简介:丁亚林(1964-),男,研究员,博士生导师,主要从事航空遥感相机稳定成像技术的研究。Email:dingyl1964@sohu.com

## 0 引言

航空摄影是获取地面信息的重要方式,为了增大观测范围,通常采用扫描机构对景物进行扫描。现有的扫描方式主要有单面镜扫描、双面镜扫描和多面体扫描。其中,单面镜扫描由于其重量轻,结构简单被广泛应用,美国的 KS-146 和 KA-112 相机以及国产画幅相机都采用这种扫描方式。在单面镜扫描中,扫描反射镜是扫描机构上的能量接收元件,其性能决定整台相机系统的成像质量。由于扫描反射镜是运动部件,为了在成像时达到光学指标要求,反射镜需要具有良好的刚度、合理的支撑方式以抵抗运动对其造成的影响。随着大视场的逐渐扩大,扫描反射镜的质量也随之增大,这就不可避免地增加扫描反射镜的体积和重量,采用比刚度大的材料对扫描反射镜进行轻量化设计,同时采用合理的支撑形式,使其具有足够支撑刚度的同时适应多变的环境,对于降低载机的飞行成本、提高系统稳定性具有重要意义。KS-146 和 KA-112 相机的扫描反射镜以及画幅相机的扫描反射镜均采用了玻璃材料的实体反射镜,文中通过材料的选取,应用多种轻量化单元进行扫描反射镜的轻量化设计,对支撑点位置进行了优化,并采用扫描反射镜背部柔性支撑,用有限元的方法对扫描反射镜进行了轻量化设计和支撑刚度的仿真分析,使其在载机力学环境下满足系统的成像质量要求<sup>[1-4]</sup>。

## 1 材料的选择

航空遥感器环境较为恶劣,主要原因是力学环境和温度环境波动较大。力学环境波动范围大主要指由于载机升降起降过程中的加速载荷,在运行过程中载机姿态不稳造成的加速载荷波动以及在扫描过程中扫描反射镜本身的加速载荷<sup>[5-8]</sup>。为保证较高的面形精度,扫描反射镜的制备材料需要具有高的比刚度以降低恶劣的力学环境变化。温度环境变化主要是由于大气层的温度环境较为恶劣,载机在大气层不同高度工作造成了航空遥感器工作的环境温度变化范围大。

为保证航空摄影的成像质量,扫描反射镜需要具有优良的面形精度,为抵抗力学环境造成的影响,

扫描反射镜需要具有较高的结构刚度抵御升降过程中的加速载荷,保证镜面不发生微屈服,同时在波动的微加速载荷下保证光学设计规定的面型精度。为抵抗温度环境造成的影响,扫描反射镜要具有高的热稳定性,同时保证支撑组件的线胀系数的匹配。

反射镜材料通常选用 K9 玻璃或 SiC。K9 玻璃成本较低,加工工艺性较好,被广泛采用于相机的扫描机构。相比 K9 玻璃, SiC 具有高的比刚度且具有良好的热稳定性,在近几年广泛得到应用。在 SiC 的成型工艺中,反应烧结的 RB-SiC 成型工艺性较好<sup>[9-10]</sup>,且可制备形状复杂的反射镜,文中采用 RB-SiC 作为扫描反射镜的光学材料。钢材和钛合金作为反射镜的支撑结构材料。表 1 所示为常用材料的光机特性。

表 1 常用材料的光机特性

Tab.1 Optical-mechanical characteristic of material

Material	Thermal expansion / $^{\circ}\text{C}$	Young's modal/GPa	Poisson's ratio	Density / $\text{kg}\cdot\text{mm}^{-2}$
RB-SiC	$2.5\times 10^{-6}$	330	0.18	$3.05\times 10^{-6}$
K9	$7.8\times 10^{-6}$	8.13	0.25	$2.53\times 10^{-6}$
4J36	$2.5\times 10^{-6}$	141	0.25	$8.1\times 10^{-6}$
TC4	$7.8\times 10^{-6}$	109	0.34	$4.44\times 10^{-6}$

## 2 反射镜结构形式的确定

文中的扫描反射镜为体育场形,为保证成像质量,需要扫描反射镜加工后达到面形满足  $PV \leq \lambda/10$ ,  $RMS \leq \lambda/40$ 。由于要采用轻量化设计,需要合理选择轻量化单元的尺寸和形式。考虑到光学加工时施加在镜面的切削压力会导致镜面产生变形,需要对如图 1 所示的轻量化孔内切圆尺寸进行计算。由 Vukobratovich 的推论<sup>[11]</sup>知,镜面受加工压力时的变形如公式(1)所示。

$$\delta = \frac{12\psi p B^4(1+\mu^2)}{Et_f^3} \quad (1)$$

式中: $\delta$ 为镜面变形的 PV 值; $p$ 为加工反射镜镜面时的加工压力; $B$ 为轻量化孔形状的内接圆直径; $\psi$ 为与轻量化孔形状有关的形状因子; $t_f$ 为镜面厚度。镜面面形要求  $PV \leq \lambda/10$ ,  $\lambda$  为工作段波长均值,取 500 nm。若满足光学指标要求,需要  $\delta \leq \lambda/10$ 。假设加

工时的加工压力为 70 kPa, 取 RB-SiC 的材料参数, 见表 2, 计算三角形轻量化孔的内切圆直径如下。

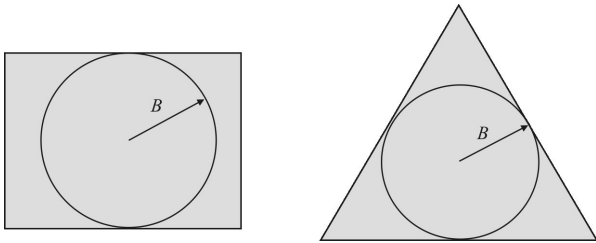


图 1 轻量化单元内切圆

Fig.1 Incircle of light weight unit

表 2 内切圆计算参数

Tab.2 Parameter of incircle calculation

$\psi_{tri}$	$\psi_{squa}$	$P$	$\mu$	$E$
0.001 51	0.001 26	60 000	0.35	400 000
$t_f$	$\delta$	$B_{tri}$	$B_{squa}$	
5	$\lambda/10$	29.2	39.6	

为保证反射镜的整体刚度, 需要对轻量化单元进行合理的布局和优化, 由于三角形单元的刚度较好, 四边形单元的轻量化程度较高<sup>[2]</sup>, 在反射镜中心范围内采用三角形单元, 周边采用四边形的形式, 根据计算结果确定三角形和四边形减重单元的内切圆半径分别为 28 mm 和 21 mm, 设计后的反射镜模型如图 2 所示。

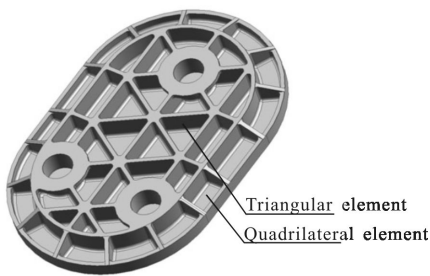


图 2 扫描反射镜模型

Fig.2 Modal of scanning mirror

### 3 支撑方案确定

反射镜对于支撑应力较为敏感, 常用的支撑方式主要有三种形式, 分别为周边支撑、侧面支撑及背部支撑。周边支撑的热应力较大, 适用于小尺寸的反

射镜支撑; 侧面支撑适用于长宽比大于 2 且外型尺寸较大的长条形反射镜; 背部支撑是以背部为定位基准的支撑方式, 通过多点柔性环节可有效消除装调应力和热应力。扫描反射镜为光学元件, 工况为运动状态, 因此力学环境变化引起的残余支撑应力较为敏感, 为保证成像质量, 既要最大限度消除使用过程中的支撑应力和热应力, 又要保证运动过程中的支撑稳定性, 因此文中采用背部三点支撑的结构形式。

#### 3.1 柔性支撑形式的设计

反射镜选用 3 个心轴与柔性支撑相联结, 再通过柔性支撑与背板固定。心轴选用与反射镜线胀系数相匹配的钢材材料, 通过胶接的方式固定在反射镜上。为保证反射镜的面形精度, 消除支撑背板带来的应力, 心轴和支撑背板之间采用万向柔性支撑, 即柔性支撑在连续的旋转方向可实现柔性。扫描反射镜采用背部三点支撑, 顶点支撑的反射镜连接端为柔性端和背板连接端为固定端; 两点支撑两端均为柔性端, 如图 3 所示。当温度变化时, 扫描反射镜尺寸发生微小变化, 由于背板变形和扫描反射镜变形不一致, 柔性端发生相应的微角度旋转补偿反射镜和背板带来的变形不均, 在严酷的温度环境下有效消除热应力, 保证扫描反射镜的面形精度。

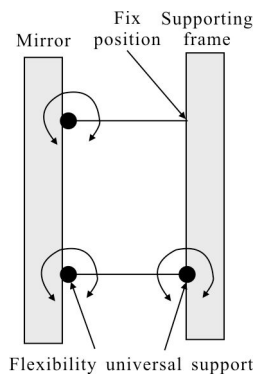


图 3 柔性支撑原理

Fig.3 Principle of flexible support

#### 3.2 支撑点的选取

反射镜支撑点位置的选取直接影响反射镜的面形精度。和外轮廓为圆形的反射镜不同, 外形轮廓为体育场形的反射镜, 需要两个优化参数, 如图 4 所示的  $a$  和  $b$ , 支撑点 1 选择圆心处, 优化支撑点位置就是优化跨度  $a$  和跨度  $b$ 。通过有限元方法对反射镜

进行仿真建模,在模型中对支撑点的位置进行反复迭代计算,优化最终结果,模型优化流程如图 5 所示,迭代后确定的计算结果为跨度  $a$  为 160 mm,  $b$  为 110 mm。

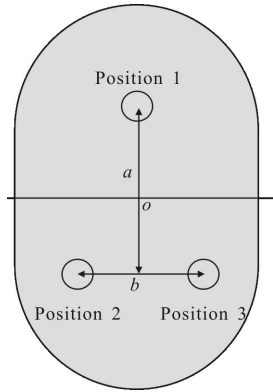


图 4 支撑点位置

Fig.4 Position of support

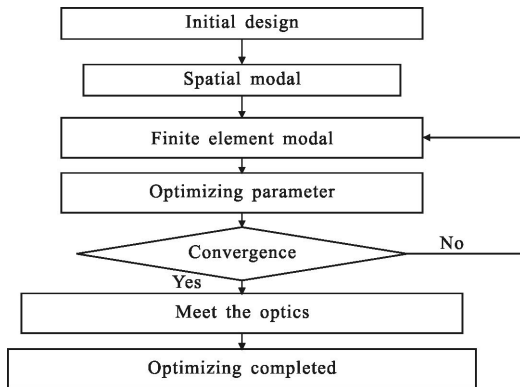


图 5 支撑点位置优化流程图

Fig.5 Optimum flow chart of supporting position

### 3.3 扫描反射镜的工程分析

为分析反射镜的面形精度,建立了扫描反射镜组件的三维实体模型,用有限元法采用实体单元对扫描反射镜组件进行了网格划分。为模拟柔性铰链,在连接单元中释放了柔性支撑点旋转方向的自由度,能够真实地模拟扫描反射镜的支撑状态。为更准确地模拟扫描反射镜的受力状态,对扫描镜施加的重力载荷方向与镜面法向成  $45^\circ$ ,固定端选择背板两侧与轴向连接的法兰的螺钉处,仿真模型如图 6 所示。由仿真模型得出分析结果如图 7 所示,计算结果如表 3 所示。

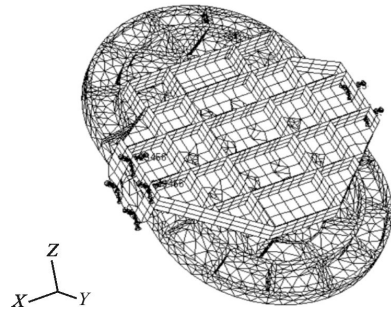


图 6 扫描反射镜有限元模型

Fig.6 Modal of scanning mirror finite element

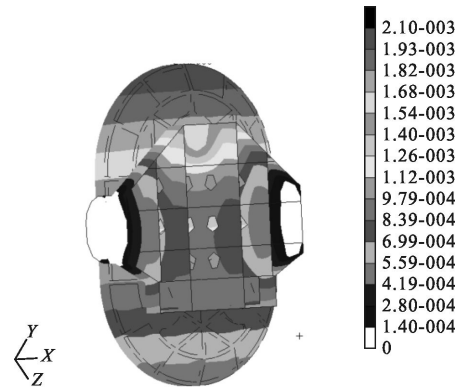


图 7 重力变形仿真结果

Fig.7 Simulation of gravity deforming

表 3 仿真计算结果

Tab.3 Result of simulation

Gravity direction		Y direction
Maximum displacement / $\mu\text{m}$	$\Delta x$	0.08
	$\Delta y$	1.86
	$\Delta z$	0.97
Maximum angle of inclination /( $^\circ$ )	$\theta_x$	9.6
	$\theta_y$	0.7
	PV/nm	49.5
	RMS/nm	12.65

通过对反射镜的计算分析知,其面形 PV 值和 RMS 值均满足成像要求。

## 4 试 验

### 4.1 扫描反射镜面形检测

为验证扫描反射镜的面形精度,模拟扫描反射

镜的工作状态，利用 ZyGo 干涉仪对反射镜的面形进行了测量。为模拟扫描反射镜的实际使用工况，将扫描反射镜与平台基面成 45° 倾斜放置，利用标准反射镜形成相干波源检测扫描反射镜面形，原理如图 8 所示，测得反射镜面形如图 9 所示。

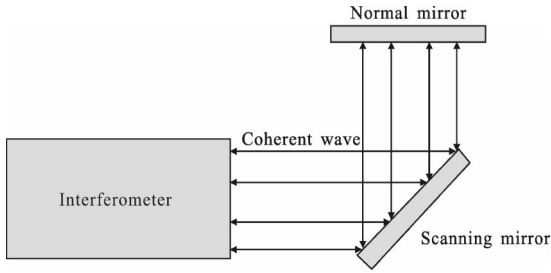


图 8 面形检验试验原理

Fig.8 Principle of surface profile verification

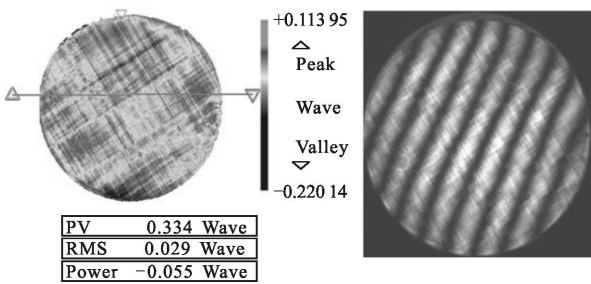


图 9 面形检验结果

Fig.9 Result of surface profile verification

测得反射镜的面形精度为 0.029 RMS，由于测量方法会引入标准镜的面形误差，因此面形实测值会低于理论分析值。

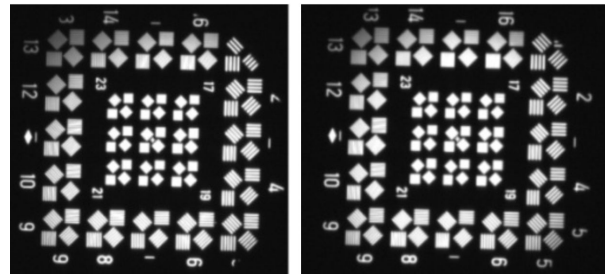
### 4.2 成像试验

为验证扫描镜在动态环境下的成像质量，以分辨率靶标为动态目标，利用光管对其进行了动态环境的成像试验如图 10 所示，扫描镜在摆扫状态下对移动目标进行成像，如图 11 所示。



图 10 成像试验

Fig.10 Imaging test



(a) 静态成像结果

(b) 动态成像结果

(a) Result of static imaging (b) Result of dynamic imaging

图 11 成像试验对比图

Fig.11 Comparison of imaging test

进行实验室静态和动态成像试验，结果表明，系统的成像质量无明显下降，证明扫描反射镜在摆扫成像时，不影响成像质量，满足系统要求。

通过航空遥感相机进行了飞行试验，在距离 5 km 以外对目标进行了扫描成像试验，成像质量良好，验证了扫描反射镜的支撑结构可以适应复杂的工作环境。

## 5 结论

扫描反射镜支撑技术是遥感相机扫描系统的关键技术，文中对长条形 SiC 扫描反射镜的支撑形式和支撑位置进行了设计优化。优化后的面形精度可达到 0.023λ，装调后的精度达到 0.029λ，有效控制了装调应力对扫描反射镜面形的影响。通过静态成像试验，对反射镜的成像质量进行了验证，实验显示成像质量一致。通过飞行试验对地面目标进行了扫描成像，成像质量良好。综上，优化设计后的 RB-SiC 扫描反射镜能够有效提高结构刚度，适应复杂的工作环境，提高相机的成像质量。

### 参考文献：

[1] Liu Jian, Li Shumin, Zhao Jie, et al. Combined influence of mirror thermal deformation and blowing on beam propagation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22 (8): 2032–2038. (in Chinese)  
柳建, 李树民, 赵杰, 等. 镜面热变形及吹气流场对光束的联合影响 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2032–2038.

[2] Xu Zhengping, Kuang Haipeng, Xu Yongsen. Multi-model control of dynamic scanning assembly imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1282–1290. (in Chinese)

- 徐正平, 匡海鹏, 许永森. 动态扫描拼接成像系统的多模控制[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(5): 1282-1290.
- [3] Wang Yueming, Wang Jianyu. Image motion model and compensation methods of spaceborne opto-mechanical scanner [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 952-957. (in Chinese)  
王跃明, 王健宇. 星载光机扫描仪像移模型及补偿方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 0952-0957.
- [4] Yang Liang, Li Chaohui, Qiao Ke. Support structure and assembling technique of a space mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3277-3283. (in Chinese)  
杨亮, 李朝辉, 乔克. 某空间反射镜支撑装调技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3277-3283.
- [5] Li Haixing, Yao Yuan, Shi Lei. Scan-retrace scanner model with single-direction rotational motor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2097-2103. (in Chinese)  
李海星, 姚园, 史磊. 单向驱动往复式扫描反射镜模型[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2097-2103.
- [6] Huang Jing, Liu Zhaohui, Xie Jinyou, et al. Design of 2-D reflection mirror gimbal for lunar based astronomy optical telescope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2173-2179. (in Chinese)  
黄静, 刘朝晖, 谢金友, 等. 月基光学天文望远镜反射镜转台的设计[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(8): 2173-2179.
- [7] Hei Mo, Lu Yafei, Zhang Zhiyong, et al. Design of fast steering mirror based on dynamic model [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 53-61. (in Chinese)  
黑沫, 鲁亚飞, 张智永, 等. 基于动力学模型快速反射镜设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(1): 53-61.
- [8] Zhou Ziyun, Gao Yunguo, Shao Shuai, et al. Design of fast steering mirror using flexible hinge [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1547-1554. (in Chinese)  
周子云, 高云国, 少帅, 等. 快速反射镜两轴柔性支承设计[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(6): 1547-1554.
- [9] Yan Yong, Jin Guang. Material preparation, surface modification and aspheric processing of RB-SiC mirrors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1750-1756. (in Chinese)  
闫勇, 金光. RB-SiC 反射镜的材料制备、表面改性及非球面加工[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(8): 1750-1756.
- [10] Zhao Wenxing, Zhang Ge, Zhao Rucheng, et al. Fabrication of silicon carbide light-weight mirror blank [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2609-2617. (in Chinese)  
赵文兴, 张舸, 赵汝成, 等. 轻型碳化硅质反射镜坯体的制造工艺[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(11): 2609-2617.
- [11] Valentem, Vukobratovich D. A comparison of the merits of open-back, symmetric sandwich and contoured back mirrors as light-weighted optics [C]//Precision Engineering and Optomechanics, Proceedings of SPIE, 1989: 20-36.
- [12] Xu Hong, Guan Yingjun. Structural design of 1 m diameter space mirror component of space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1488-1495. (in Chinese)  
徐宏, 关英俊. 空间相机 1 m 口径反射镜组件结构设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6): 1488-1495.