

一种新型轻量化扫描反射镜设计

王 诚, 韩建忠, 李江勇
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要:根据反射镜轻量化的要求,从材料的选择、轻量化结构形式的确定以及支撑结构的设计三个方面对某机载IRST系统椭圆形扫描反射镜进行轻量化设计。经有限元分析表明,所设计的扫描反射镜在谐振频率、旋转变形、热变形等方面均能满足使用要求,结构设计合理可行。

关键词:轻量化;机载IRST;扫描反射镜;有限元分析

中图分类号:TN214 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.015

Design of a new type lightweight scanning mirror

WANG Cheng, HAN Jian-zhong, LI Jiang-yong
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: According to the miniature requirement of an infrared search and track system (IRST), a scanning mirror for the airborne system was designed. The design effort includes material selection, lightweight structure and optimal support. By adopting finite element analysis technique, it shows that all the performance of the scanning mirror such as the eigen-frequency, the rotation stability and the thermal deformation meet the application requirement. It has been used in the airborne IRST.

Key words: lightweight; airborne IRST; scanning mirror; finite element analysis

1 引言

扫描反射镜是机载IRST系统中光学部分的关键部件之一,其性能直接影响着整个IRST系统的成像质量。随着对图像分辨率的要求不断提高,焦距和通光口径越来越大,反射镜的尺寸和质量也随之加大,而反射镜质量的增加不仅容易产生镜面变形,还加大了旋转扫描组件的转动惯量,影响机载IRST系统的响应速度和搜索跟踪精度。为了更好地满足高性能扫描反射镜的要求,采用新型轻质材料、设计合理轻量化的镜体结构和支撑结构形式是当前反射镜设计的有效途径^[1]。

本文以某机载IRST系统中扫描反射镜为研究对象,从材料选择、结构设计、支撑形式等方面对反射镜进行详细设计,并利用有限元方法对反射镜进行分析,验证了设计的合理性。

2 扫描反射镜的轻量化

扫描反射镜为椭圆形,长轴 150 mm,短轴

100 mm,厚度 15 mm;需进行轻量化设计,质量不超过 300 g。

2.1 反射镜材料选择

2.1.1 力学性能的要求

扫描反射镜在高空运行工作时将由于重力场的变化产生变形。以圆形反射镜为例,由重力引起的镜面变形量 δ_c 可近似由式(1)^[2]表示:

$$\delta_c = k \left(\frac{\rho}{E} \right) \left(\frac{D^4}{h^2} \right) \cos z \quad (1)$$

式中, ρ 为材料密度; E 为材料的弹性模量; D 为反射镜直径; h 为反射镜厚度; z 为镜面与水平方向夹角; k 为系数,与固定方式有关。由式(1)可知,在反射镜面积和厚度一定的情况下,反射镜的镜面自重变形量由反射镜材料的比刚度(定义材料的弹性模量

作者简介:王 诚(1986-)男,硕士研究生,从事光电系统设备研究工作。E-mail:kim2005wang@yahoo.com.cn

收稿日期:2012-03-01

与密度的比值,即 E/ρ 决定,即要求反射镜材料要有高的弹性模量和低的密度。

2.1.2 热性能的要求

机载 IRST 系统工作环境恶劣、温度变化大,由温度梯度引起的镜面变形将导致扫描反射镜系统的“近视”,造成成像质量降低。由温度引起的镜面变形量 δ_T 可近似由式(2)表示:

$$\delta_T = -\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right) \cdot \varphi(x_0) dx \quad (2)$$

式中, α 为材料的热膨胀系数; λ 为材料的导热系数; $\varphi(x_0)$ 表示镜面 x_0 处的热流通量。由式(2)可知,由温度变化引起的镜面变形量与反射镜材料的热膨胀系数成正比,与导热系数成反比。因此,为减小由温度引起的反射镜镜面形变,应采用热变形系数 α/λ 较小的反射镜材料,即要求反射镜材料要有高的导热系数和低的热膨胀系数。

2.1.3 光学性能的要求

分辨率是机载 IRST 系统最为关键的技术指标,主要受反射镜表面粗糙度和面形精度的影响。一般来说,反射镜的粗糙度与材质的孔隙率和孔隙大小有直接联系,而镜面面形精度与材质的结构与组成相关。因此,要求反射镜材料孔隙率低、孔隙尺寸小、微观结构均匀致密。另外,反射镜一般都需要镀制光学反射膜,反射镜材料还应能经受光学镀膜的工艺条件且易与反射膜结合^[3]。

除此之外,选择反射镜材料时还应考虑材料的化学稳定性和加工安全性等。表1为目前常用反射镜材料的属性。

表1 常用反射镜材料属性

材料	密度 ρ /($g \cdot cm^{-3}$)	弹性模 量 E/GPa	导热系数 λ /($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	热胀系数 α /($10^{-6} K^{-1}$)	泊松 比 μ
Zerodur	2.53	91	1.64	0.05	0.24
ULE	2.21	67	1.31	0.03	0.17
铍(Be)	1.85	287	216	11.4	0.043
铝(Al)	2.70	68	167	22.5	0.33
碳化硅 (SiC)	3.20	400	180	2.4	0.18

Zerodur, ULE 的密度适中,可抛光性强,可制成良好的镜面材料,但玻璃弹性模量低,比刚度小,导热性能差,容易变形。Be 有较高的弹性模量、优异的力学性能,但有剧毒,机械加工性能差,制造价格较为昂贵。Al 有较高的导热系数、较低的密度,但热膨胀系数较大,容易变形。SiC 热变形系数小、比

刚度高,轻量化效果明显,同时其光学性能可与光学玻璃媲美,可达到很高的抛光精度,目前已成为空间光学系统轻量化反射镜的优选材料。

综合比较分析,本文选择 SiC 作为轻量化反射镜材料。

2.2 轻量化反射镜结构设计

2.2.1 轻量化反射镜的结构形式选择

轻量化反射镜的结构形式决定了反射镜最终的使用性能,包括抗变形能力、热性能、减重比以及表面的光学质量等^[4]。目前,轻量化反射镜的常用镜体结构形式为背部封闭式、背部开放式和泡沫夹层式等,其结构形式如图1所示。

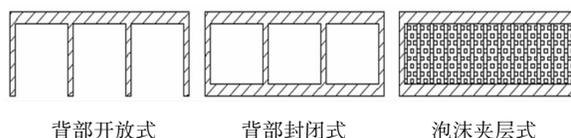


图1 常用镜体结构形式

背部开放式结构是在反射镜背部排布一定几何分布的轻量化孔来达到轻量化的目的,轻量化孔既可以与基体一次成型,也可以在基体成型后采用机械加工的方法成型,其工艺性最好。背部封闭式结构一般采用一次成型的方法成型,也可以在实心基体上通过切削加工形成轻量化结构。泡沫夹层式结构是将反射工作面、蜂窝夹层结构、刚性骨架和刚性底板三部分通过高温熔和或者胶合组成。从力学性能来看,当反射镜厚度相同时,蜂窝夹层结构产生的机械变形最小,但后面板需进行粘接工艺,制造成本和工艺难度相比于前两者都要高很多;背部开口结构反射镜的镜面变形相比要大一些,但是其工艺性最好^[5]。

总之,结构形式的选择要受加工材料、工艺条件、制造周期和成本等多方面的因素决定。本文所设计的反射镜尺寸较小,综合考虑,采用背部开放式的轻量化结构形式。

2.2.2 轻量化反射镜的减重孔形状分析

反射镜轻量化孔的结构形式一般有扇形、三角形、四边形、六边形和圆形等形状。近些年来,国内外相当多的专家对反射镜的轻量化孔结构形式做了大量的研究,得出了一些结论。关英俊^[3]认为三角形和六边形轻量化孔刚度最大,圆形轻量化孔工艺性最好,四边形轻量化孔一般应用于矩形或长圆状反射镜,扇形轻量化应用于中心带圆孔的反射镜。Yoder Paul R Jr^[5]认为圆形轻量化相当于六边形轻

量化孔的简化,与六边形相比具有一定的质量不均匀性。就工艺性而言,三角形、四边形和扇形的工艺性差不多;就结构而言,三角形的刚度最好,其中三角形孔更佳,但是三角形孔的热特性最差。叶虎勇^[6]、刘云猛^[7]认为三角形的固有频率最高,“各向同性”性能较好;四边形孔在重力作用下变形最小,在两个对称轴方向上力学特性较好,对角线方向上力学特性较差;六边形孔虽有三个对称轴,但是筋相互连接,没有构成一条直线,传力路径最长,结构刚度最差,但是其“各向同性”性能很好。

目前比较倾向的观点是轻量化孔的几何形状对主镜结构的刚度没有直接影响,而在工程实践中,三角形,正方形和六边形的蜂窝单元都得了应用。本文选用四边形的减重孔形式。

2.2.3 轻量化反射镜的轮廓形式选择

为了减轻反射镜的质量,通常将反射镜的后表面设计成平背形、锥形、球形、双凹形、单拱形、双拱形等特定的轮廓曲线。本文选用背面锥形结构,如图2所示。这种结构形式可方便地通过改变锥形尺寸来调整反射镜重心,同时也便于后期的机械加工。



图2 锥形平面反射镜结构示意图

2.2.4 轻量化反射镜的结构参数确定

轻量化反射镜的结构参数包括:轻量化减重孔的尺寸、加强筋厚度面板的厚度。四边形轻量化孔的形状尺寸如图3所示,其中, a 为内切圆尺寸, b 为筋的厚度,根据反射镜的尺寸设计 $a = 20 \text{ mm}$, $b = 3 \text{ mm}$ 。

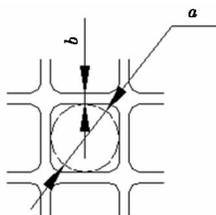


图3 四边形轻量化孔简图

图4为反射镜的结构剖视图,其中, t_f 为镜面厚度, h 为反射镜的总厚度。

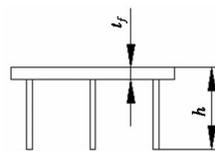


图4 反射镜二维模型剖视图

对于镜面厚度 t_f ,由Vukobratovich的推论得^[8]:

$$\delta = \varphi \left[\frac{Et^3}{12(1-\mu^3)} \right]^{-1} Pa^4 \quad (3)$$

式中, δ 为反射镜每个轻量化孔的最大变形允许变形量; P 为加工镜面时平均分布于一个轻量化孔单元的压力值; a 为轻量化孔的内接圆直径; φ 是与轻量化孔单元形状有关的形状因子,其中, $\varphi_{\text{square}} = 0.00126$; E 与 μ 分别为反射镜材料的弹性模量和泊松比。

轻量化孔内接圆直径为20 mm,假设镜面加工时施加的压力为100 kPa,要使 $\delta < \lambda/10$,则反射镜所需最小面板厚度为2.15 mm。在本文中取面板厚度 t_f 为3 mm。

3 轻量化反射镜的支撑方式分析设计

反射镜按照支撑装置和反射镜接触部位不同可以分为中心支撑、周边支撑和背部支撑三种形式^[9]。具体支撑方式是分别在反射镜中心孔内侧、侧面和背部打一定数量的盲孔,再将支撑组件胶结于盲孔内。

这三种支撑方式能够有效地简化系统结构、节约空间,但是反射镜的装调较为麻烦。本文设计了轴镜一体化的连接方式,即在反射镜的背部直接设计出一个短轴,通过短轴与底座相连,结构示意图如图5所示。

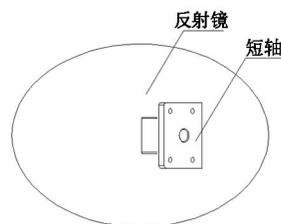


图5 轴镜一体化支撑结构示意图

这种结构可使反射镜本身没有力的传递,避免了因支撑结构的变形而产生的反射镜变形,保证了系统的精度,同时也避免了装调的麻烦。

图6为所设计的轻量化反射镜三维结构图,该反射镜质量为280 g,只是原来采用周边支撑形式的K9玻璃反射镜质量的三分之一,满足设计要求。



图6 轻量化反射镜三维结构图

4 有限元分析

4.1 模态分析

图7为扫描反射镜模型在前四阶振型下的位移矢量变形图。其中一阶谐振频率为2609.1 Hz,此

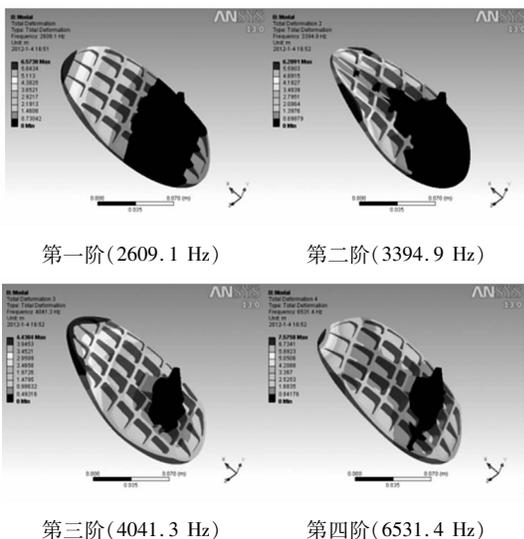


图7 扫描反射镜前四阶模态振型图

频率已远远大于所要求的机械振动频率,满足刚度要求。

4.2 反射镜旋转变形分析

扫描反射镜在工作时,最大旋转角速度为360°/s。图8和图9分别为此条件下的镜体和镜面变形图,表2为反射镜分析结果。

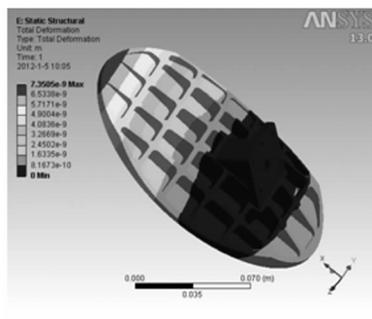


图8 以360°/s旋转时镜体变形图

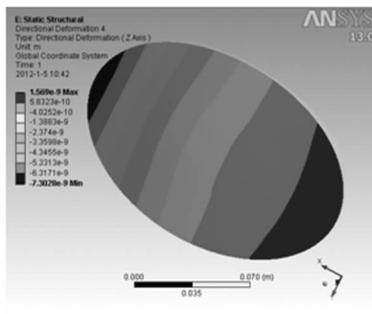


图9 以360°/s旋转时镜面变形图

表2 旋转速度为360°/s时的反射镜分析结果

旋转速度	镜体 X 方向/m		镜体 Y 方向/m		镜体 Z 方向/m		镜面 Z 方向/m	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
360°/s	8.36×10^{-6}	-1.15×10^{-6}	9.22×10^{-7}	-9.10×10^{-7}	1.57×10^{-9}	-7.30×10^{-9}	1.57×10^{-9}	-7.30×10^{-9}

由表2及变形图可知,扫描反射镜以360°/s旋转时,PV值为0.014λ,且反射镜最大变形部位在反射镜的边缘,远远满足指标PV≤0.5λ的要求。

4.3 反射镜热变形分析

根据反射镜在工作时可能遇到的热环境,施加

(20±4)°C的温度载荷。以温度为22°C为例,反射镜镜体和镜面变形情况如图10和图11所示。表3为反射镜16~24°C温度区间内的镜体和镜面变形量。

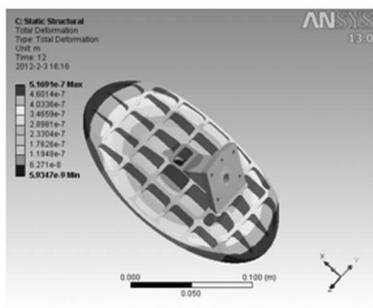


图10 镜体温度为22°C时镜体变形图

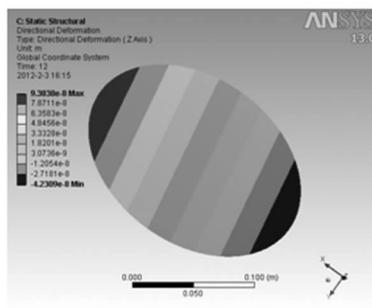


图11 镜体温度为22°C时镜面变形图

表3 扫描反射镜镜体温度分别为16~24℃时的分析结果

镜体温度/℃	镜体 X 方向/m		镜体 Y 方向/m		镜体 Z 方向/m		镜面 Z 方向/m	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小
16	1.03×10^{-6}	-1.02×10^{-6}	7.24×10^{-7}	-7.22×10^{-7}	5.04×10^{-7}	-1.88×10^{-7}	8.46×10^{-8}	-1.88×10^{-7}
17	7.70×10^{-7}	-7.65×10^{-7}	5.43×10^{-7}	-5.42×10^{-7}	3.78×10^{-7}	-1.41×10^{-7}	6.35×10^{-8}	-1.41×10^{-7}
18	5.13×10^{-7}	-5.10×10^{-7}	3.62×10^{-7}	-3.61×10^{-7}	2.52×10^{-7}	-9.38×10^{-8}	4.23×10^{-8}	-9.38×10^{-8}
19	2.56×10^{-7}	-2.55×10^{-7}	1.81×10^{-7}	-1.80×10^{-7}	1.26×10^{-7}	-4.69×10^{-8}	2.12×10^{-8}	-4.69×10^{-8}
20	0	0	0	0	0	0	0	
21	2.55×10^{-7}	-2.56×10^{-7}	1.80×10^{-7}	-1.81×10^{-7}	4.69×10^{-8}	-1.26×10^{-7}	4.69×10^{-8}	-2.12×10^{-8}
22	5.10×10^{-7}	-5.13×10^{-7}	3.61×10^{-7}	-3.62×10^{-7}	9.38×10^{-8}	-2.52×10^{-7}	9.38×10^{-8}	-4.23×10^{-8}
23	7.65×10^{-7}	-7.70×10^{-7}	5.42×10^{-7}	-5.43×10^{-7}	1.41×10^{-7}	-3.78×10^{-7}	1.41×10^{-7}	-6.35×10^{-8}
24	1.02×10^{-6}	-1.03×10^{-6}	7.22×10^{-7}	-7.24×10^{-7}	1.88×10^{-7}	-5.04×10^{-7}	1.88×10^{-7}	-8.46×10^{-8}

由表3及变形图可知,当镜体温度在 (20 ± 4) ℃时,反射镜镜体与镜面的变形量与温度变化量成线性关系,反射镜长轴边缘的镜面变形较大,中心部位变形较小。当镜体温度为16℃和24℃时,反射镜PV值最大,为 0.38λ ,满足指标要求。

5 结论

本文以碳化硅为反射镜材料,设计了以轴镜一体化为支撑形式的轻量化扫描反射镜。经有限元分析,扫描反射镜基频为2609.1 Hz,在以 $360^\circ/\text{s}$ 旋转及镜体温度为 (20 ± 4) ℃两种状态下,镜面PV值分别为 0.014λ 和 0.38λ ,各项性能均满足要求。

参考文献:

- [1] Yan Yong, Jia Jiqiang, Jin Guang. Design of new type spaceborne lightweighted primary mirror support[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(8): 1533 - 1539. (in Chinese)
闫勇,贾继强,金光. 新型轻质大口径空间反射镜支撑设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(8): 1533 - 1539.
- [2] Cui Yongpeng, He Xin, Zhang Kai. Characteristic analysis of reflector's material used by space camera[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(4): 418 - 421. (in Chinese)
崔永鹏,何欣,张凯. 某空间用主反射镜的设计[J]. 激光与红外, 2010, 40(4): 418 - 421.
- [3] Guan Yingjun, Xin Hongwei. Design of lightweight sic space mirror and the support[C]// 2010 3rd International Conference on Computational Intelligence and Industri-

al Application(PAC II A), 2010: 112 - 115.

- [4] Zhang Xuejun, Li Zhilai, Zhang Zhongyu. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(5): 577 - 580. (in Chinese)
张学军,李志来,张忠玉. 基于SiC材料的空间相机非球面反射镜结构设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 577 - 580.
- [5] Paul R Yoder, Jr. Opto-mechanical systems design[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [6] Ye Huyong, Chen Guilin. Scanning mirror design considerations of 3-axis stability satellite[J]. Infrared Technology, 2003, 25(6): 1 - 5. (in Chinese)
叶虎勇,陈桂林. 地球同步轨道三轴稳定卫星的扫描镜设计及考虑. 红外技术, 2003, 25(6): 1 - 5.
- [7] Liu Yunmeng, Zhang Baolong. Light-weight design and application of two-dimensional scan pointer mirror in space remote sensor[J]. Infrared Technology, 2007, 29(12): 688 - 691. (in Chinese)
刘云猛,张宝龙. 空间遥感器二维扫描指向镜的轻量化设计及应用. 红外技术, 2007, 29(12): 688 - 691.
- [8] Vukobratovich D. Flexure mounts for high-resolution optical elements[J]. SPIE, 1988, 959: 18 - 33.
- [9] Liu Yang, Yang Hongbo, Liu Shaobin, et al. Lightweight primary reflector and design of supporting structure for space imaging system[J]. Computer Simulation, 2008, 25(7): 314 - 316. (in Chinese)
刘洋,杨洪波,刘勺斌,等. 空间主反射镜轻量化及柔性支撑设计与分析[J]. 计算机仿真, 2008, 25(7): 314 - 316.