

# 空间遥感器二维扫描指向镜的轻量化设计及应用

刘云猛，张宝龙

(中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083)

**摘要：**论述了空间遥感器中二维扫描指向镜的轻量化设计应注意的主要问题，并给出了扫描指向镜的轻量化设计的应用实例，利用有限元软件，结合设计指标，对其进行了光、机、热综合分析。

**关键词：**指向镜；轻量化；有限元分析

中图分类号：TP73 文献标识码：A 文章编号：1001-8891(2007)12-0688-04

## Light-weight Design and Application of Two-dimensional Scan Pointer Mirror in Space Remote Sensor

LIU Yun-meng, ZHANG Bao-long

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, shanghai 200083, China)

**Abstract:** The key elements of light-weight design of two-dimensional scan pointing mirror in the space remote sensor are discussed in this paper. Then an application example of light-weight design is given. according to its design parameters, optical, mechanical and thermal comprehensive analysis is carried out through CAE software.

**Key words:** pointer mirror; light-weight; finite element analysis

### 引言

卫星对地面或空间目标图像的获取是通过扫描驱动机构进行一维或二维扫描来实现的。一维扫描视场角度较小，扫描范围不能任意调节，为了实现大范围扫描，并能够快速获取特定区域的目标图像，常采用二维扫描方式（如图1所示），通过指向镜的二维摆动来实现对地面或目标的观测获取。

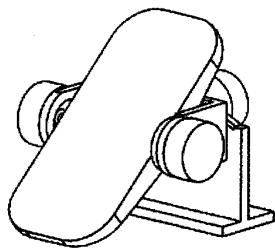


图1 两维指向机构示意图

Fig.1 The two-dimensional pointer structure

在二维扫瞄系统中，指向镜的轻量化设计是一个核心技术，涉及到很多环节，除了考虑指向镜的力学性能和热稳定性外，还要考虑到所选材料的加工性能，以及现有的加工工艺水平。大口径的指向镜还要

重点考虑支撑问题，而且转动惯量越小越好。本文以某空间二维扫描指向镜的设计为例，论述了轻量化过程应注意的关键问题。

### 1 轻量化设计要求

#### 1.1 轻量化材料的选择

二维指向镜基底材料的选择同45°扫描镜、反射镜、主镜一样，首先要考虑在受力及受热后结构和面型精度的稳定性，其次要考虑材料的加工性能以及现有的加工技术水平，有时价格因素也是考虑的一个因素。比刚度（弹性模量与密度之比）和导温系数（导热率与热膨胀系数之比）是选择材料时重点考察的两个物理量，比刚度高则其机械性能好，导温系数大则材料热惯性小，导热率高，热稳定性好，有利于散热<sup>[1-2]</sup>。

目前国内外常用的指向镜基底材料有：ULE、铍(Be)、碳化硅(SiC)、钛(Ti)、铝(Al)等。碳化硅材料以其优良的结构强度和热性能成为目前大口径扫描指向镜材料的发展趋势，由于碳化硅属于陶瓷材料，强度高脆性大，在镜子的支撑和固定方面会有一定的难度。随着国内碳化硅加工技术的逐渐成熟，不久的将来碳化硅将成为国内扫描指向镜的首选材

收稿日期：2007-09-18

作者简介：刘云猛（1978—），男，硕士，主要从事空间光学遥感仪器的CAD/CAE技术研究。

基金项目：国家863计划资助项目（2006AA704205）

料。铍材料比刚度大,导热系数大,能够实现很高的轻量化率,作为扫描镜的材料在国内外都已大量应用了,但由于其剧毒性受到一定的限制。风云三号卫星的扫描镜都采用铍镜,铍镜的基底在俄罗斯加工。

### 1.2 轻量化孔结构形式的确定

轻量化孔的结构形式主要有:三角形孔、正方形孔、六边形孔、圆形孔和扇形孔。就加工性和结构刚度而言,圆形孔的工艺性最好,三角形孔、正方形孔、六边形孔和扇形孔的工艺差不多,其中三角形孔的热特性最差。扇形孔通常用于带有中心孔的圆形反射镜的轻量化。

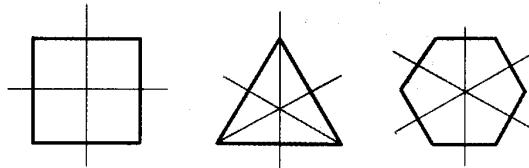


图2 轻量化孔的结构形式

Fig.2 The structure type of lightweight holes

从力学的角度上分析,如图2,正方形孔的结构有两个垂直的对称轴,在这两个轴的方向上,力学特性好,在沿着对角线方向上,其力学特性较差,因此选用方孔的轻量化结构必须注意方孔的排列方向。三角形孔有三个对称轴,从材料特性上讲其“各向同性”性能好得多。其力学特性比方孔好,结构强度也比方孔高。六边形孔虽也具有三个对称轴,但是其肋板相互连接,没有构成一条直线,传力路径最长,相比较而言结构强度最差,但是其“各向同性”性能很好,加工性能最好<sup>[3]</sup>。

假定三角形孔、正方形孔、六边形孔具有相同的内接圆和相同的面密度,可以通过有限元软件比较一下扫描镜的固有频率,避开卫星结构的低频共振频率。三种轻量化方式在实际的结构形式中均有应用。具体使用时候还必须考虑镜子的支撑、加工等实际情况。三角形孔可以增加结构的刚度,国外对于大口径的反射镜大多采用三角形孔的轻量化结构。国内的“风云四号”卫星扫描镜采用了三角形孔结构,“风云三号”卫星扫描辐射计和中分辨率光谱成像仪扫描镜的轻量化均采用了正方形孔结构。

### 1.3 支撑方式的选择

扫描指向镜的变形主要是由支撑结构的变形引起,指向镜支撑结构的设计采用如下原则:

- 1) 指向镜不参与传力;
- 2) 支撑结构的变形不会引起指向镜的变形;
- 3) 支撑结构采用一体化设计,保证加工的精度。

扫描镜的支撑方式有多种多样,典型的支撑方式

主要有:

- 1) 两端支撑:一般适合于尺寸小,力矩不大,变形要求低的镜子。
- 2) 背部中间轴支撑:如图3,指向镜的固定通过背面中心平面与压块进行连接,指向镜的所有受力都集中在镜子背面中心部位。指向轴与压块依靠平面进行连接,避免与指向镜直接接触。我国在研制的“风云四号”卫星有效载荷就是采用这种连接方式。对于大尺寸的镜子,有时需用两个压块进行连接。

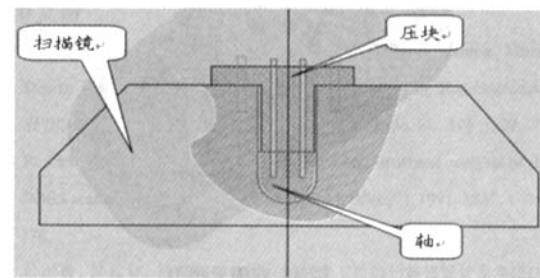


图3 背部中间支撑原理图

Fig.3 Diagram of back central strutting

- 3) 三点支撑和多点支撑:一般适合于支撑大尺寸的指向镜结构。

### 1.4 力学分析

扫描指向镜在轨工作时,本身不受任何重力的影响,但在地面上制造、检验和光校的过程中,受到重力和支撑力的作用。因此,必须分析指向镜在地面上受到重力的影响,以此确定指向镜的装校、加工状态,保证其在同步轨道上重力释放后镜面符合要求。利用有限元软件还可以对指向镜进行冲击振动、正弦振动或随机振动试验的动力学仿真分析,可以预测指向镜在振动过程中的受力情况,帮助优化设计。

### 1.5 热设计

为减少热对镜面型和结构性能的影响,设计时主要考虑以下几点:

- 1) 选择热膨胀系数较小的材料,而且加工时尽可能消除内部的残余应力;
- 2) 采用合理的支撑结构,允许指向镜有自由膨胀的空间;
- 3) 采用有效的热控措施,尽可能的降低温度梯度范围;
- 4) 合理地选择镜子表面镀层的材料,镜面材料的吸收率直接影响镜子的温度变化范围。

## 2 计算分析及其结果

所设计的空间两维扫描指向机构的外形如图1所示,其光学主镜口径为137 mm,扫描视场范围:俯

仰±12.5°，方位±25°，由此确定扫描指向镜本体尺寸为300 mm×140 mm×28 mm。为了保证镜面的面型精度，最大限度地减轻指向镜的重量，提高指向镜的力学性能和热稳定性，借助有限元软件进行设计分析，计算分析过程如下。

## 2.1 轻量化模型



图4 有限元模型

Fig.4 Finite element model

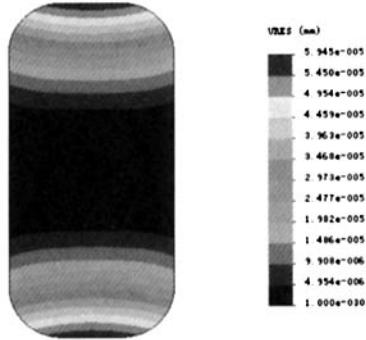


图6 水平放置时重力变形图

Fig.6 Gravitation distortion at horizontal placement

## 2.2 静力学分析

指向镜的光学性能指标要求：重力作用下指向镜的镜面变形应小于检测波段的1/10，检验波段为0.6328 μm。

指向镜放置不同位置时，重力作用对镜面变形的影响，如图5、图6、图7所示，表1列出不同放置位置时，指向镜的镜面最大变形比较。

表1 不同位置时重力变形比较

Table 1 Gravitation distortion at different placement

放置位置	重力变形/μm
45°方向安装	0.0458
水平放置	0.0594
竖直放置	0.0179

所要求的指向镜尺寸较小，对比铍和碳化硅的材料性能，考虑到指标要求和加工的周期性，选用成熟的铍材料作为指向镜的材料，镜面经过镀镍抛光处理。指向镜采用正方形轻量化孔结构，背部中间轴支撑方式进行设计，建立的有限元模型如图4所示。

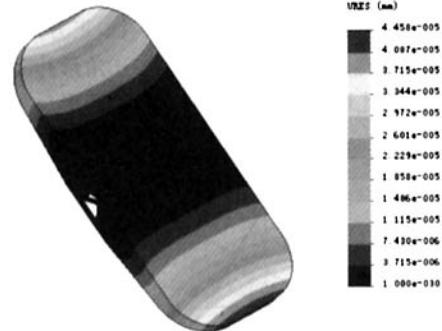


图5 45°方向安装时重力变形图

Fig.5 Gravitation distortion at 45° placement

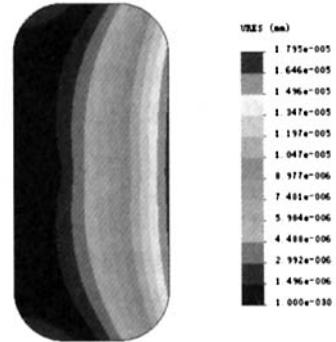


图7 竖直放置时重力变形图

Fig.7 Gravitation distortion at perpendicular placement

从表1中的数据可以看出，Be镜最大重力变形为0.0594 μm，小于检验波长的1/10，满足指向镜的光学性能指标。当指向镜竖直放置时，镜面受到重力的影响最小，因此，镜子在加工过程中进行检验时，指向镜最好垂直放置，在进行仪器的光校和装配时，考虑指向镜所处的实际状态，尽量采用重力影响最小的位置进行。对指向镜在无支撑时进行模态分析，求出一阶固有频率为2473 Hz，远大于设计指标要求。

## 2.3 热特性分析

空间遥感器在轨运行过程中，两维扫描指向镜要受到空间冷背景、太阳辐射、内部热源等热因素的作用。随着卫星姿态的变化，空间遥感器在太阳光照区与阴影区时会有很大的温差，这样指向镜上下部分所受辐射热量的不均匀性和温度变化直接影响着成像

的质量。

进行热分析知道, 扫描指向镜在运动过程中只要保证扫描镜温度分布均匀, 即使扫描镜的温度有较大的波动范围, 对镜面型的影响也非常小。首先在镜子背面涂高发射、低吸收材料, 以加快镜面热量的散发。通过适当的主动加热措施, 使得表面的温度分布比较均匀, 同时在扫描指向镜的驱动电机上添加了加热措施。确定温控措施后, 进行有限元模拟, 可以控制镜子表面上下边界的温差在2℃左右。由于目前没有在轨工作时指向镜温度分布的准确的数据, 我们假设指向镜上下边界有2℃的温差, 对其进行热应力分析, 分析结果: 镜面变形满足设计要求。

#### 2.4 设计结果

在以上基础上完成指向镜的设计, 其结果如下:

轻量化后指向镜质量为575 g, 轻量化率78%;

肋板厚度为2 mm, 镜面厚度为3.2 mm;

转动惯量: 0.004 kg·m<sup>2</sup> (包括中间支撑轴);

一阶固有频率: 2473 Hz;

最大重力变形: 0.059 μm (水平放置)。

### 3 结论

二维扫描系统中指向镜的轻量化设计是一个不断进行力学分析和结构优化的复杂过程。实例中的二维指向镜已成功用在研制的样机中, 文中总结的二维指向镜的轻量化设计应考虑的因素, 同样对空间遥感仪器中其他主镜、反射镜的轻量化设计有参考价值。

#### 参考文献:

- [1] R.A.Hookman, G.E.Zurmehly, and N.S.Hodgman. Scanning Mirror Design Considerations for a Geostationary Spaceborne Radiometer[A]. SPIE[C]. 1992, Surveillance Technologies II, Orlando, FL: 318~329.
- [2] Zurmehly, G. E.; Hookman, R. A. Thermal and structural analysis of the GOES scan mirror's on orbit performance[A]. SPIE[C]. 1991, 1532: 170~176.
- [3] 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[J]. 红外技术, 2003, 25(6): 1~5.