

# 国外空间光学扫描机构现状

汪逸群, 齐心达

(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:** 空间光学扫描机构是光机扫描型相机的关键部件之一, 其性能直接影响到相机的成像质量。本文对高性能光学扫描机构的基础关键技术进行了阐述, 并对国外先进光学扫描机构进行了调研。根据扫描维数各选取了三种典型的扫描机构, 对它们的性能指标和整体方案进行了介绍, 对提高我国相关扫描机构的技术水平具有借鉴意义。

**关键词:** 扫描镜; 光机扫描仪; SiC 镜; 铍镜

**中图分类号:** V245.6      **文献标识码:** A

**DOI:** 10.3788/OMEI 20102712.0015

## Survey on Foreign Space Optical Scanning Mechanism

WANG Yi-qun, QI Xin-da

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

**Abstract:** Space optical scanning mechanism is the key component of opto-mechanical scanning imager. Its performance decides the imaging performance of space camera. Basic key technologies of high precision optical scanning mechanism have been introduced in this paper. Foreign advanced scanning mechanisms have also been presented. According to two-axis or one-axis, three typical scanning mechanisms have been chosen to introduce their performances and design concepts. These are beneficial for our countries scanning mechanisms design process.

**Keywords:** scanning mirror; opto-mechanical scanning imager; SiC mirror; beryllium mirror.

## 1 引言

采用了光学扫描机构的光机扫描仪广泛应用到了气象、海洋、陆地和环境观测等各类遥感卫星中,在轨运行的光机扫描仪已有几十台套。随着光电子技术的发展,逐渐成熟的较短的红外线阵探测器和面阵探测器技术与光机扫描仪相结合,使光机扫描仪的性能不断得到改善。结合面阵成像技术发展起来的成像光谱仪技术成为光机扫描仪的重要发展方向之一,而光机式多光谱扫描仪在今后相当一段时间仍然保留着广阔的发展空间,因此,对扫描机构仍有较多的需求和更高的技术要求。

扫描机构是光机扫描型相机接收地物光学信息通道的第一个环节,它通常起到反射地物光学信号、扩大视场范围和对遥感目标的垂直飞行方向上进行扫描的作用,它的性能直接影响到相机的成像质量,是遥感相机重要的组成部分。扫描机构从技术上追求高线性度、高效率。高线性度可以减小图像的畸变;而由于卫星平台体积的限制,在光学系统的潜力发挥到一定程度时,提高扫描系统的扫描效率可以增加探测器的驻留时间,从而提高系统的辐射灵敏度。因此,光机扫描型相机要想获得较高的成像质量,必须研制高性能的光学扫描机构<sup>[1]</sup>。

对一般的遥感卫星而言,可以通过卫星推扫来实现连续成像,此时一维光学扫描机构即可满足成像需求。而搭载于新一代的三轴稳定地球同步卫星上的相机则必须有二维扫描机构才可以获得地球的全圆盘图。本文将对这两种扫描机构分别进行介绍。

## 2 空间光学扫描机构关键技术

一般而言,空间光学扫描机构的关键技术主要有高精度电机驱动装置、扫描镜材料及轻量化技术、空间润滑技术等。

对于成像仪器的扫描机构,必须严格控制驱动装置转速的瞬时稳定度(每转内任意位置处的角速度变化量)和长期稳定性(一定时间内平均角速度

每转变化量),使获得的地球景物信号图像不产生歪斜与抖动;对于有指向功能的扫描机构来说,其定位精度和抖动误差则是关键的技术指标;而对保持视轴稳定的扫描机构,其跟踪带宽则是重要的特性;这些都要通过高精度的驱动装置来保证。驱动电机设计和传动机构的加工、装配、润滑问题是保证驱动装置瞬时和长期稳定度、提高电机寿命和可靠性的关键。在扫描机构中,大多采用低速同步电机或步进电机驱动反射镜。在要求转矩大而瞬时转速稳定性不高的扫描仪器中,也有用减速机构的。直流无刷电机是另一种选择,它必须采用闭环控制,利用高精度的传感器(光电编码器、感应同步器等)作为转速和位置反馈元件,调整和控制电机的输入电压,达到稳速、定位和跟踪的目的<sup>[2]</sup>。

扫描镜采用的材料由早期的K9、微晶玻璃等材料发展到近期主要采用金属铍、SiC等材料。其中金属铍密度小、比刚度大、比热容高,但是铍粉有毒,且价格昂贵,在国内资源、风云系列卫星上应用了一些工作在红外波段的铍扫描镜,国外主要用于大口径的天文仪器反射镜上。而SiC密度小、硬度大、无毒,尤其是抗热冲击性极佳,随着制备设备和工艺的发展,逐渐成为扫描镜的首选材料。美国Dallas公司、POCO石墨公司及SSG精密光电器件公司在SiC研究领域处于领先地位,而国内主要有上海硅酸盐所、长春光机所和哈工大等单位研制轻型SiC扫描镜。SiC材料的精密铸造成型、轻量化、光学精加工和抛光技术是各国科研人员研究的重点<sup>[3-4]</sup>。

空间润滑技术主要包括固体润滑和液体润滑,其中固体润滑具有适应温度范围广、无污染等优点,但是目前只适用于 $10^8$ 转量级以下的工况<sup>[5]</sup>。对要求长寿命和低噪音的扫描机构,必须采用在真空中低挥发、耐辐照的特种润滑油。轴承保持架用多孔材料制成,在真空中浸油,并安装储油器补充随时间损失的润滑油。为限制润滑油向空间逸出,扫描机构主轴出口处须设计成迷宫结构,根据计算得到通过迷宫向空间逸出的润滑油总量来设计扫描机构的储油量。

### 3 一维光学扫描机构

#### 3.1 法国 SPOT5 中 HRG 的扫描机构 (五号)

图 1 为 SPOT5 卫星内 HRG 相机的结构图, 其扫描机构处于整个相机的顶部, 即由锥形架支撑的部分, 它是一个典型的一维扫描机构, 包括扫描镜、步进电机、角度传感器、轴承和锥形支架。步进电机直接驱动扫描镜, 其型号为 SAGEM 57PPP60, 该电机一周走 1 200 步, 静力矩为  $4.7 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 采用电子细分驱动技术, 为此由 CRISA 公司专门开发了线性电流放大器。角度传感器是一台由 CODECHAMP 公司与 CNES 共同开发的 21 位光电编码器, 精度达到  $\pm 15 \mu\text{rad}$ , 带宽达到几百赫兹。轴承由 ADR 公司生产制造, 直径为 120 mm。整个扫描机构质量为  $25 \text{ kg}$ 。

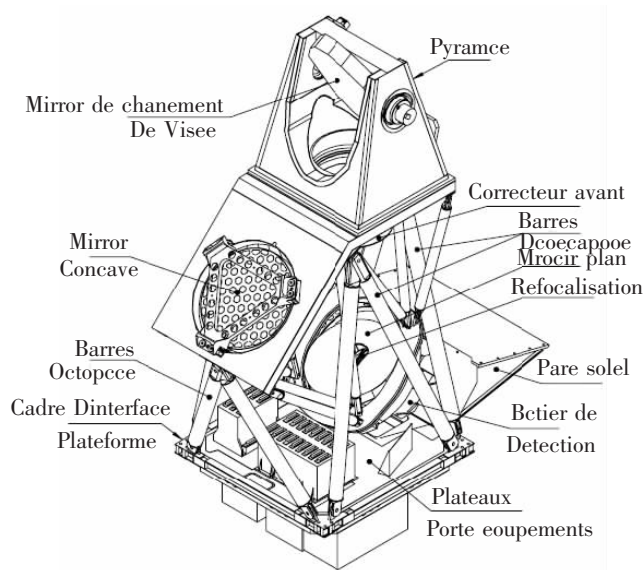


图 1 HRG 相机结构图

#### 3.2 WISE 探测器的扫描机构

宽视场红外普查探测器 (WISE) 的扫描机构成像扫描时间为 9.9 s, 返程时间为 1.1 s, 扫描范围为  $2.5^\circ$ , 工作温度为  $4\sim 17 \text{ K}$ , 设计寿命为  $3.5\times 10^6$  转, 扫描线性度优于  $5''$ , 镜面抖动误差  $< 1.5''$ 。该扫描机构采用了挠性枢轴技术, 并装备了冗余有限转角力矩电机和冗余感应同步器。扫描镜是铝镜, 金刚石超精车后抛光来获得光学镜面, 铝镜与基座之间通过柔节联接, 以尽量减小降温过程中对镜子面形的影

响。除冗余的电机及感应同步器外, 驱动控制电路也是完全冗余设计的, 且可以相互切换。机械和电子学设计都将功耗降至最低, 并将它们放置在低温保持器内, 以延长制冷机的寿命。其外观如图 2 所示<sup>[7]</sup>。

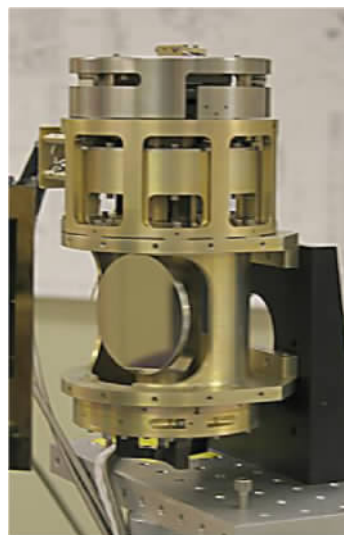


图 2 WISE 探测器的光学扫描机构

#### 3.3 MODIS 成像光谱仪的扫描机构

如图 3 所示, MODIS 扫描镜组件质量为 4.3 kg, 它主要由扫描镜、驱动电机和光电轴角编码器组成。经过比较低膨胀钛硅玻璃 (ULE)、Zerodur (Schott 公司生产)、SiC、金属铝、发泡钎材、热等压钎材及多种金属合金材料后, 鉴于热等压钎材具有最大的比刚度、温度适应范围宽、而且与无电镀镍的线胀系数匹配性极好, 决定选用热等压钎材作为扫描镜基底材料。镜子通过线切割的方法实现了轻量化,



图 3 MODIS 扫描镜

然后在镜面镀镍、镀银膜及保护膜,形成最终光学镜面。除了研制出近乎完美的双面镀扫描镜外,科研人员还专门设计了16极两相直流无刷电机对扫描镜进行恒速驱动,转速为20.3 r/min,电机力矩波动 $<10\%$ ,最大功耗仅为1 W。采用一台14位增量式光电编码器作为反馈元件,编码器精度达到了11 mrad,功耗为1.9 W。转动部件的动平衡调整到0.3 kg/mm以内,满足飞行器平台的要求<sup>[8]</sup>。

## 4 二维光学扫描机构

### 4.1 傅立叶变换成像光谱仪 (GIFTS) 指向镜

傅立叶变换成像光谱仪在地球同步轨道工作,用于气象预报。其指向镜组件实现空间目标位置指向和稳定视轴的功能。如图4所示,指向镜组件是二维扫描镜,尺寸为280 mm×450 mm,能实现 $25^\circ \times 25^\circ$ 视场范围内扫描,通过一维步进和一维连续扫描即可获得地球的全圆盘图像。组件整机质量为14.8 kg,指向精度优于 $4''$ ,功耗12.2 W,工作温度范围为250~310 K,面形精度优于 $1/25 \lambda$ 。



图4 GIFTS指向镜组件

材料选用SiC,原因是相对其他材料而言, SiC镜承受不均匀热载荷时面形变化最小。镜子质量为2.8 kg,背部开口式轻量化结构,镜面厚度仅为3.2 mm,加强筋厚度为2 mm,筋高最大值为63.5 mm,在镜子长度方向都是高而长的筋,保证镜子在长度方向的刚度,防止镜子转动过程中扭矩对镜面面形造成影响。而在镜子宽度方向上是较矮的筋,仅用来维

持镜面减薄后的镜面刚度,保证能够加工出所需的镜面面形。该SiC镜直接铸造成型,轻量化结构无需机械加工,只在光学面和周边平面进行精密加工。镜面镀银膜以提高反射率,而侧面及背面也镀银膜,以减小阳光直射镜子时镜子吸收的热量。镜子的支撑方式采用过渡件与镜体粘接,然后再与轴联接<sup>[9]</sup>。

### 4.2 宽视场成像仪指向镜组件

如图5所示<sup>[10]</sup>,指向镜组件的方位轴及高低轴均采用定制的Kaydon公司的轴承进行支撑,直流无刷电机驱动,位置反馈元件采用感应同步器。镜子材料为SiC,由于成本原因,框架材料采用了钛合金而不是密度更小的铍。组件质量为23 kg,功耗为15 W,组件外包络尺寸为505 mm×513 mm×348 mm,镜子长短轴尺寸分别为514 mm和358 mm,扫描范围为 $20^\circ$ ,带宽优于30 Hz,指向精度优于 $10''$ 。



图5 宽视场成像仪指向镜组件

### 4.3 全球成像仪 (GLI) 万向扫描镜

全球成像仪 (GLI) 随ADEOS-II卫星发射升空,它被设计用来测量地球表面(包括陆地、海洋和云)所反射的太阳辐射,其中的红外辐射用于测量地表温度、植被分布、植被密度以及冰雪分布等。专门为GLI研制的万向扫描镜是一个典型的俯仰角-方位角构造,并配以具有完整备份的电控单元。外观如图6所示,其中方位轴采用步进电机驱动,其输出轴承经加大并预载以增加刚性。方位轴由三相步进电机驱动,21位旋转变压器作为位置反馈。而俯仰轴上



表1 国外空间光学扫描机构指标

	HRG扫描机构	WISE扫描机构	MODIS扫描机构	GIFTS指向镜	指向镜	GLI扫描镜
扫描镜尺寸	未知	未知	未知	280 mm×450 mm	358 mm×514 mm	未知
驱动方案	步进电机直驱	未知	直流无刷电机	未知	直流无刷电机	步进电机/直流无刷电机
润滑方式	固体润滑	固体润滑	固体润滑	固体润滑	固体润滑	固体润滑
镜体材料	未知	铝	铍	SiC	SiC	铍
质量	25 kg	未知	4.3 kg	14.8 kg	23 kg	42.5 kg
功耗	未知	未知	2.9 W	12.2 W	15 W	35 W
精度	未知	扫描线性度5"	11 mrad	4"	10"	±0.08°



图6 GLI 万向扫描镜

配置的则是一个直流无刷电机和 20 位增量式光电编码器。基座材料为铍，叉轴材料为铝，扫描镜的基体材料也为铍<sup>[11]</sup>。扫描镜整机质量为 42.5 kg，工作额定功耗为 35 W，温度适应范围为-10~+40 ℃。方位轴运动范围为±20°，精度为±0.08°，最大速度为 1.3 °/s。俯仰轴工作转速为 16.716 r/min，转速精度为±0.015 %/s，旋转线性度为±0.003°，重复性为±34 ms。

5 结 论

本文在阐述空间光学扫描机构关键技术的基础上，介绍了国外先进光学扫描机构的研究进展，各

扫描机构的主要技术指标如表 1 所示。根据国外的发展情况和国内实际条件，总结出以下几个发展方向：

结合尺寸小、重量轻、精度高的位置传感器形成闭环控制，如何提高这种控制系统在恶劣空间环境下的可靠性则是重要课题。

在扫描镜材料及轻量化技术方面，SiC 和铍都是优秀的扫描镜材料，但铍由于其昂贵的价格及毒性会限制其应用范围，而 SiC 将逐渐成为扫描镜材料的首选。对于 SiC 材料，应提高大尺寸复杂结构的铸造成型精度，减少后续轻量化时间及成本，此外，对 SiC 材料的性能持续改善后可以将 SiC 作为整个空间相机的材料，这对提高相机性能并降低发射成本无疑是有裨益的。

在空间润滑技术方面，对光学扫描机构来说，固体润滑的优势在于对光学件无污染，但工作寿命相对较短；而液体润滑则恰恰相反，工作寿命长，机械噪音低，但润滑剂挥发泄漏问题一直是光机工程师使用液体润滑时必须面对的问题。具体采用何种润滑方式应根据工作环境、工作模式（间歇工作还是连续工作）、使用寿命等情况综合考虑后作出决定。

参考文献

[1] 杨磊. 高精度摆动扫描技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学硕士学位论文, 2005.  
[2] 徐博明. 气象卫星有效载荷技术[M]. 北京: 宇航出版社, 2005: 77-80.  
[3] 高明辉, 刘磊, 任建岳. 空间相机反射镜碳化硅材料性能测试[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8):1170-1174.

- [4] 宋立强, 杨世模, 陈志远. 空间太阳望远镜中的轻量化镀膜研究[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(1): 58-64.
- [5] 刘维民, 翁立军, 孙嘉奕. 空间润滑材料与技术手册[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 126.
- [6] Hermier J P. SPOT'S pointing mechanisms experience feedback[C]. *8th European Space Mechanisms and Tribology Symposium, Toulouse*, 1999.
- [7] Schwalm M, Barry M, Perron G, *et al.* Cryogenic telescope, scanner, and imaging optics for the wide-field infrared survey explorer(WISE)[J]. *SPIE*, 2005, 5904: 59040K-1-59040K-7.
- [8] NASA. The Information about MODIS[EB/OL]. [2002-05-04]. <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/scanmirror.php>.
- [9] Schwalm M, Dibiase D, Landry D, *et al.* Silicon carbide pointing mirror and telescope for the geostationary imaging fourier transform spectrometer(GIFTS)[J]. *SPIE*, 2005, 5868: 586803-1-586803-8.
- [10] Robichaud J, Akerstrom A, Frey S, *et al.* Reaction bonded silicon carbide gimbaled pointing mirror[J]. *SPIE*, 2007, 6666: 666600-1-666600-9.
- [11] MOOG Schaeffer Magnetics Division. *Spacecraft Mechanisms Product Catalog*[G]. MOOG Schaeffer Magnetics Division, 2005: 74-75.

作者简介: 汪逸群 (1983-), 男, 汉族, 湖北鄂州人, 硕士, 助理研究员, 2007年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 主要从事空间精密扫描机构的研究。E-mail: hitwyq@yahoo.com.cn

## 非线性光学晶体材料研究获进展

硼酸盐体系长期以来都是无机非线性光学晶体材料的研究热点, 其中BBO ( $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) 和LBO (LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>) 晶体材料得到了商业化生产及应用。

该类材料具有较大的倍频效应源自于其扭曲的平面环状硼氧阴离子基团所具有的非对称性的电子分布特征。在对硼氧框架中引入其他非对称性基团以提高其性能的设计思想指导下, 中科院福建物质结构研究所陈玲研究员领导的课题组近期于《美国化学会志》(J. Am. Chem. Soc. 2010, 132, 12788-12789) 上报到了一例相位匹配的碘硼酸铅化合物Pb<sub>2</sub>B<sub>5</sub>O<sub>9</sub>I, 其粉末倍频效应达到了KDP (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) 的13.5倍, 远远优于同构的氯硼酸铅及溴硼酸铅, 其倍频系数是目前所报道的硼酸盐材料体系中的最大值。结合理论计算研究表明, 该材料具有强的非线性性能指标来源于Pb<sup>2+</sup>的孤对电子效应、碘阴离子的弱电负性及多种硼氧基团的协同作用。

这一研究为提高硼酸盐体系材料二倍频效应的设计开辟了新的途径。