

391-396

有关地球同步气象卫星成像仪 两维扫描系统的几个问题

谢颂强 陈桂林^N 史美耀

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

0474.24

摘要 本文对地球同步三轴稳定气象卫星成像仪的关键部件即两维扫描系统的有关扫描镜的材料和结构、驱动方式、控制系统等几个问题进行了研究和分析。
关键词 地球同步 三轴稳定气象卫星 成像仪, 两维扫描系统.

引言

自从 1994 年美国 NOAA 气象卫星 GOES-8 发射成功以来, 地球同步三轴稳定气象卫星再次成为世界航天领域关注的热点. 同自旋地球同步气象卫星相比, 三轴稳定卫星具有扫描效率高、可对地进行近似连续观测、分辨率高、扫描仪和辐射探测仪可分别单独工作等优点. 所以, 近期世界各国, 特别是美国, 正致力于发展新一代地球同步气象卫星, 即三轴稳定的高分辨率、高效率的地球同步气象卫星. 而这些卫星必须使用两维扫描系统, 它是这类卫星对地观测的基础和关键部件.

1 两维扫描系统的工作原理

两维扫描系统的必要性是由地球同步三轴稳定卫星成像仪的成像原理决定的. 成像仪安装在卫星上, 其瞬时视场是一个“点”, 只有使成像仪沿某个方向扫描, 才可以观测一条线, 即在地球上得一条扫描线, 把这些扫描线一条一条地“拼”起来, 就可以对地球上的一个区域进行扫描观测. 对于极轨卫星, 扫描镜旋转可以在地球上得到一条扫描线, 形成一维扫描; 而卫星的对地飞行把这些扫描线“拼”成一个面, 形成另一维扫描. 故这种卫星不需要两维扫描系统. 对于地球同步自旋卫星, 卫星自旋形成一维扫描, 扫描镜或镜头的步进形成另一维扫描(世界上第一代静止气象卫星基本上这类卫星), 但对于地球同步三轴稳定气象卫星, 只有使其扫描镜既旋转(或摆动), 又沿另一方向步进扫描, 即实现两维扫描, 才可以完成对地球的扫描观测.

扫描机构的工作原理如图 1 所示. 线性摆动 ω_1 使扫描镜进行一维扫描, 获得一条扫描线; 间歇步进 ω_2 使扫描镜从一条扫描线“跳”到另一条扫描线扫描, 从而完成对地面区域的扫描.

从扫描过程可以给出扫描镜两维运动关系曲线: 一维是线性往复运动(可认为是东西运动); 另一维为间歇步进运动(可认为是南北运动)(见图 2).

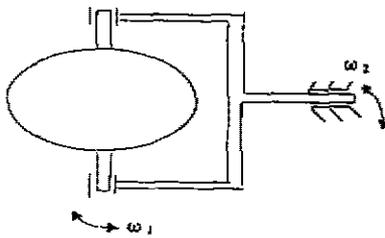


图1 扫描机构工作原理示意图
Fig. 1 Schematic diagram of scanning parts

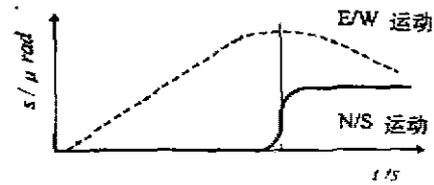


图2 运动关系曲线
Fig. 2 Motion relation curve

2 两维扫描系统技术关键问题的研究与分析

世界上现有四颗新一代地球同步三轴稳定的气象卫星,它们分别属于印度(INSAT-1D)、INSAT-1)和美国(GOES-8、GOES-9)。表1列出了GOES-8成像仪和辐射探测仪的性能指标。

作为关键部件的扫描系统,必须满足镜面变形小,运动控制精度高,运动灵活、可靠和响应快、延迟时间短的要求,才可能使成像仪达到高精度、高灵活性、高可靠性和快响应的性能。

表1 GOES-8成像仪的性能指标
Table 1 Performances of GOES-8 imager

项目	性能指标	项目	性能指标
光学类型	卡塞格林	光学口径(mm)	311
扫描方式	双轴,E/W连续 $10^\circ/s$ N/S步进, $224\mu rad/step$	空间分辨率(通道) (μrad)	可见 2,3,5 3 28 112 224
采样(通道) ($1/fov$)	可见,2,4,5 3 1.75 3.75	采样速率 ($\mu s/pixel$)	可见 红外 45.8 188.3
地球定位($\mu rad-\sigma$)	± 42	通道配准(μrad)	± 28
像素配准($\mu rad-3\sigma$)	± 29.7	输出量化精度(bit)	10
数据速率(MB/s)	10	空间定标间隔(min)	2
黑体定标间隔(min)	10~30		

为达到上述要求,扫描系统在设计、加工、装配、调试等方面都必须达到很高的要求。图3是美国GOES-8成像仪的装配示意图。

从图3中我们可以看到该系统是个两轴系统,它具有两个自由度,有两个直流无刷力矩电机分别驱动两个方向的运动,在另一面与电机同轴安装有感应同步器,作为位置敏感元件,利用闭环系统达到 $3\sim 5\mu rad$ 的位置精度,图4是两维运动关系框图。

在设计成像仪和辐射探测仪的扫描系统时,必须注意以下几个技术关键问题:

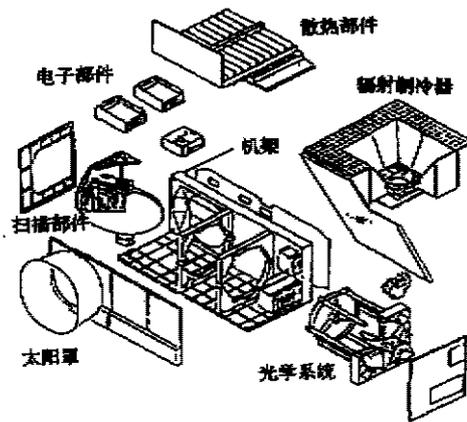


图 3 成像仪总装部件示意图

Fig. 3 Assembly parts of imager sensor

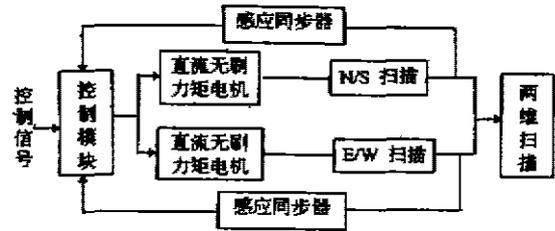


图 4 运动关系框图

Fig. 4 Block diagram of motion relation

2.1 扫描镜的选材和结构

由 GOES-8 可知,成像仪的口径达 311mm(它由地面分辨率决定),如此大的口径在航天仪器上是少见的,初步估算扫描镜的尺寸为:

$$\text{长轴: } 2a = D / \cos(45^\circ + \alpha) = 311 / \cos(45^\circ + 5.75^\circ) = 491.54 \text{mm}$$

其中: a 是长半轴; D 是仪器口径 311mm; α 是扫描镜东西方向最大摆角的一半,为 5.75° 。

$$\text{短轴: } 2b = D / \cos\beta = 311 / \cos 5^\circ = 312.18 \text{mm}$$

其中: b 是扫描镜短轴; β 是南北方向最大摆角的一半,为 5° 。

设长轴取 502mm,短轴取 322mm,厚度取 50mm. 这样的一块金属“薄板”,其加工变形和安装后的问题是很大的. 扫描镜随卫星一起发射升空后,由于重力消失,由重力引起的静变形也随之消失,但接踵而来的其他问题成了主要矛盾,引起镜面变形的因素主要有内应力,动变形,加工因素,受热变形等几个方面.

在地球上,由于重力的影响,重力变形掩盖掉了内应力引起的变形,但卫星升空后,内应力引起的扫描镜面变形便显露出来. 所谓动变形是指扫描镜运动时由离心力引起的镜面弹性变形. 由于扫描镜的运动速度很低,镜面弹性变形较小. 加工因素引起的镜面变形主要是加工公差和残余应力引起的变形,一般镜面表面粗糙度 R_a 约为 $0.012 \sim 0.025 \mu\text{m}$,微观不平度十点高 R_z 约为 $0.05 \sim 0.10 \mu\text{m}$. 上述三点虽然是引起扫描镜面变形的因素,但非主要因素,促使扫描镜变形的最主要的因素是受热变形. 当卫星被定点在赤道上空 36000km 高空时,由于地球的自转,使其受热很不均匀. 扫描镜处于不均匀的热场中,温度梯度使扫描镜各部分产生不均匀的变形. 这种变形虽然不很大,但却足以影响到像质. 据认为,扫描镜的热变形是 INSAT-ID 失效和 GOES-8 推迟发射的重要原因之一.

理论上分析,平面镜不影响成像,其变形必须小于 $\lambda/8$,考虑到加工公差,镜面变形须小于 $\lambda/20^{[8]}$.

美国 GOES-8 成像仪共 5 个波段,分别为 $0.52 \sim 0.72 \mu\text{m}$, $3.78 \sim 4.03 \mu\text{m}$, $6.47 \sim 7.02$

μm , $10.2\sim 11.2\mu\text{m}$, $11.5\sim 12.5\mu\text{m}$. 则镜面变形必须小于 $\lambda/20=0.024\mu\text{m}$, 要达到如此小的变形, 无论选材、设计、还是加工、装配, 要求都必须非常严格. 表 2 列出了常用结构材料的机械性能.

表 2 常用结构材料的机械性能
Table 2 Mechanical features of commonly-used materials

材料	密度 (g/cm^3)	弹性模量 (kg/mm^2)	屈服强度 (kg/mm^2)	抗拉强度 (kg/mm^2)	延伸率 (%)	相对比强度 (钢=1)	相对比刚度 (钢=1)
铍	1.85	31200	31	66.9	2	4.1	6.3
铝	2.77	7330	32.4	47.9	23	2	0.98
钛	4.59	11800	102.2	109.2	13.5	2.7	0.93
镁	1.82	4580	15.5	28.8	3	1.8	0.94
钢	7.82	21100	49.3	70.5	16	1	1

从表 2 可见, 相对比强度和相对刚度最大的材料是铍, 该材料性能优越, 是常用的航天材料. 但是氧化铍有毒, 加工有一定的困难, 需要专门的设备. 需要指出的是, 铍虽然微屈服强度大, 但是其导热性差 (0°C 时纯铍的导热系数为 $0.35\text{kcal}/\text{h}\cdot\text{m}\cdot^\circ\text{C}$), 在热场中易出现各部分变形不均, 扫描镜热变形较大, 由于一天不同时间入射到镜面的阳光强弱不同, 镜面受热不均, 而使该问题更加突出. 美国 GOES-Next 卫星在扫描镜设计上采取了两种措施. 其一是镜面镀铝, 尽量反射掉可见光; 其二是扫描镜用一个“带子”围起来, 以减小温度梯度.

镜的结构好坏直接影响镜的质量和工作时镜面的变形, 故扫描镜结构的选择是设计中一件非常重要的工作, 常见的扫描镜结构有单面开口蜂巢结构(蛋筐结构)、双单面开口蜂巢口对口钎焊整体结构(空心墙结构)和双面整体中间三角筋支撑结构(空间桁架结构)等几种. 图 5 和图 6 分别是上述结构的计算机模拟图. 根据计算结果和使用经验, 空间桁架结构比其他两种结构优越. 在相同质量条件下, 它的抗扭强度比蜂巢结构提高 10 倍左右, 抗弯强度提高 2 倍多^[1].

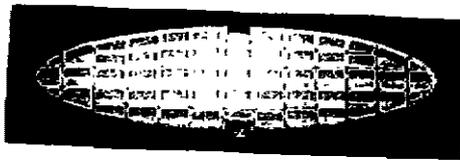


图 5 双单面开口蜂巢口对口
钎焊整体结构(已从中间剖开)

Fig. 5 Dual-eggcrate face-to-face welded structure



图 6 双面整体中间三角筋支撑结构
Fig. 6 Truss-like structure

2.2 驱动方案的选择

扫描镜的运动是东西方向的摆动和南北方向的步进交替进行, 故扫描驱动系统必须能实现该运动. 对于东西方向的摆动, 其实现方法有共轭凸轮驱动扫描镜、直流无刷电机直接驱动扫描镜和电磁碰撞驱动扫描镜等几种, 而最常用的方法是前两种. 它们各有优缺点. 共轭凸轮驱动实际上是由凸轮轮廓线的形状来决定摆镜运动的轨迹. 电机驱动凸轮轴使之做

连续、单向转动,摆镜换向力由凸轮缘产生和承受,所以电机本身无需提供很大的驱动力矩,不需正反转,但是共轭凸轮机构增加了系统的质量和体积,其运动精度和可靠性也由凸轮本身决定,故对凸轮的设计、加工要求较高,另外需要考虑对凸轮进行平衡配重,减摩润滑,这些问题都增加了系统设计、加工、装配的难度和复杂性,采用直流力矩电机直接驱动方案,运动链降到了最短,故系统重量轻,体积小,运动灵活性提高,系统响应时间较短,中间环节减少使系统更加可靠,系统的设计被简化,但是频繁的正反转,巨大的驱动力矩对电机提出了很高的要求。

美国 GOES-8 成像仪扫描驱动系统采用了直流无刷力矩电机直接驱动扫描镜的方案,其电机是按要求专门设计、制造的,该电机的特点是寿命长、精度高、力矩大和体积小。

南北方向的步进运动可选用步进电机驱动或直流无刷力矩电机驱动闭环控制实现,由于每步的步距角为 $224\mu\text{rad}$,而一般步进电机的步距角都远大于此,故必须对步进电机的输出减速或对电机的运动进行细分,其运动精度由电机、减速器或细分电路等来保证,故一般运动精度较差,比较而言,直流力矩电机驱动闭环控制方案,由于其运动精度在理论上与电机和减速器无关,完全由测控系统决定,而测控系统的精度达到几秒比较容易,故闭环方法较步进电机减速开环精度高,可靠性好,但测控系统复杂,系统设计不好时,可能出现振动、响应速度慢等问题。

2.3 控制系统的设计

扫描系统应具有很高的灵活性和可靠性,GOES-Next 系统的扫描系统可迅速按要求改变扫描区域,可根据地面指令中断正常扫描,按要求移到正确的位置对该区域以“高效方式”(time-efficient manner)扫描,任务结束后再回到断点处继续正常扫描,其扫描区域有 $23^\circ \times 21^\circ$ (东西 \times 南北,下同)的星感; $17.4^\circ \times 17.4^\circ$ 全球成像(扫描周期为 26.5min); $3000 \times 3000\text{km}^2$ (扫描周期为 3min)和 $1000 \times 1000\text{km}^2$ (扫描周期为 40sec)的区域成像等几种。

影响系统灵活性的主要因素是系统的转动惯量,初步保守估算,GOES-8 扫描镜的转动惯量,对摆动轴(J_1)和步进轴(J_2)分别为:

$$\begin{aligned}
 J_1 &= \rho \iiint_V \gamma^2 dv \\
 &= \rho \frac{\pi}{4} ab^3 h + \rho \frac{\pi}{3} abh^3 \\
 &= 0.1873 + 0.0100 \\
 &= 0.1973\text{kgm}^2, \\
 J_2 &= J_x \cos\alpha + J_y \cos\beta + J_z \cos\gamma \\
 &= 0.620\text{kgm}^2.
 \end{aligned}$$

其中: J_x, J_y, J_z 分别是扫描镜对三轴的转动惯量; α, β, γ 是步进轴与扫描镜三轴的夹角,扫描往复的换向时间为正常扫描的 20%,摆动角速度 $\omega_1 =$

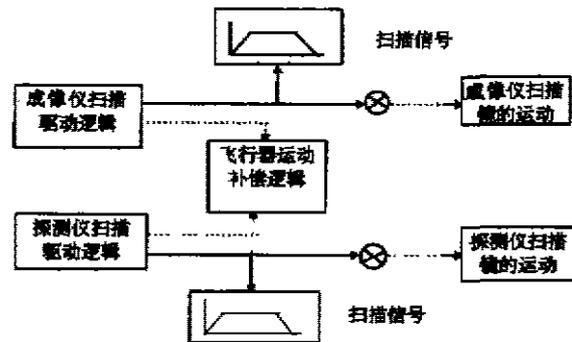


图 7 控制系统框图
Fig. 7 Block diagram of control system

0.175rad/s. 力矩 $T_1 > 0.35\text{Nm}$. 考虑十倍余度, $T_1 = 3.5\text{Nm}$. 大惯量, 快过渡, 大力矩, 高精度便构成了控制系统的特点. 所以控制系统设计相当困难, 采用反馈控制系统, 其框图如图7所示.

3 结论

通过上面的分析, 我们对地球同步三轴稳定气象卫星两维扫描系统有以下几点认识:

- (1) 两维扫描系统是三轴稳定地球同步气象卫星的关键部件之一.
- (2) 系统的运动有两维组成, 一维是扫描镜的摆动, 另一维是镜的步进. 两维交替进行.
- (3) 两维驱动分别采用直流无刷力矩电机直接驱动、闭环控制, 用感应同步器作角度敏感元件.
- (4) 扫描镜的变形不能超过 $\lambda/20$, 为减小热变形, 镜表面要镀铝, 周围用特殊的“带子”围起来; 扫描镜采用空间桁架结构.
- (5) 控制部分可灵活地控制镜的运动, 灵活地选择扫描区域, 精确定位.

参考文献

- 1 Menzel W P, Pudom James F W. *Introducing GOES-I: The First of A New Generation of Geostationary Operational Environmental Satellites*, ISSN 0003~000, 1994, 5
- 2 Edward W K, Fort W. *Characteristics of The GOES-M Imager And Sounder*, PB92~147123, 1992: 168~175
- 3 Edward W K, Fort W. *On-board Calibration Of The GOES-I Imager And Sounder*, PB92~147123, 1992: 176~184
- 4 *Design Review Report*, Volume 2-Section 4 Through 9; Part 1; NAS5~21139, 1972, 6
- 5 阳 春. *国外空间动态*, 1995(3): 14~16
- 6 郭陆军. *国外空间动态*, 1995, (3): 17~19
- 7 小 乐. *国外空间动态*, 1995, (8): 15
- 8 何 鑫. *光学机械*, 1991, (4): 14

SEVERAL PROBLEMS IN DEVELOPING TWO-AXIS GIMBALED MIRROR SYSTEM OF GEOSTATIONARY THREE-AXIS BODY-STABILIZED METEOROLOGICAL SATELLITE IMAGER

Xie Songqiang Chen Guilin Shi Meiyao

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

Abstract Several problems in developing two-axis gimbaled mirror system of geostationary, three-axis body-stabilized meteorological satellite imager were studied and analyzed such as material and structure of the scanning mirror, driving manner choice system design and control.

Key words geostationary three-axis body-stabilized meteorological satellite, imager, two-axis gimbaled mirror system