

星载高精度扫描器

张宝龙 郭惠林

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要——描述了星载高精度扫描器的工作原理、设计、基本结构以及空间飞行实验结果。

关键词——转速稳定度, 轴承润滑, 铍扫描镜。

1. 引 言

扫描器是遥感系统的重要组成部分。扫描器的质量和运行可靠性将直接影响遥感系统的寿命与图片质量, 以致关系到遥感系统的成败。为了使风云一号气象卫星遥感系统能正常运行, 我们研制了一种光机扫描式星载高精度扫描器。

在扫描器的研制过程中, 我们解决了超高真空环境下长寿命工作的轴承润滑; 大口径铍基金属扫描反射镜的制作; 复杂形状大口径扫描反射镜的动平衡; 高精度转速稳定度的控制等关键技术, 并成功地进行了轨道飞行试验。

2. 工作原理与工作环境

扫描器安装在卫星遥感系统中, 45° 扫描镜转轴与卫星的飞行方向一致。当扫描镜旋转时, 遥感仪器即以固定的光学瞬时视场, 在垂直于卫星的飞行方向扫描, 接受地球、大气等发射或反射的辐射, 借助于卫星绕地球的前进运行获取大气、陆地、海洋的二维景象。同时扫描器通过磁头向遥感系统电子学部分提供一个一定幅值的基准脉冲信号, 做为电子学部分控制逻辑和时序电路的起始基准脉冲。

扫描器运行轨道环境是超高真空、失重和空间粒子辐射以及温度在 4 K 左右的空间冷背景。卫星发射时扫描器要受到振动、冲击、离心的考验。恶劣的环境条件, 高可靠、高精度、长寿命的运转要求, 以及低功耗, 轻量化等指标要求, 给研制工作增加了很大的难度。

3. 结构与技术性能

扫描器结构主要由高精度驱动装置、驱动电源、轴承及润滑部件、扫描反射镜及动平衡

表 1 扫描器的主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of the scanner.

参 数	参 数 值
电源电压(V)	$27 \pm 10\%$
输入功率(W)	≤ 10
同步转矩(g·cm)	> 350
转速 (rpm)	360
转动惯量(g·cm ²)	55000~63000
转速稳定度	1×10^{-4}
基准脉冲输出幅度(V)	2 ± 0.3
工作温度(°C)	-5~+45
寿命(h)	> 8760

机构、基准脉冲信号发生器等部分组成。扫描器外形图见本期彩色插页图 g。

扫描器主要技术参数见表 1。

3.1 高精度驱动装置和驱动电源

卫星遥感系统获取的地球景象信号,通过地面接收站得到图象。为使地面接收的图象不产生歪斜与抖动,必须严格控制驱动装置转速的长期和瞬时稳定度。

(1) 驱动电机

在转速低,转速稳定度要求高的场合 为提高寿命和可靠性,简化传动机构和因齿轮带来的加工、装配、润滑问题,采用低速磁滞同步电机直接驱动扫描镜。

驱动电机转速由下式确定。

$$n = \frac{60f}{P}; \quad (1)$$

式(1)中, f 为频率, P 为极对数。

驱动电机采用 30 对极的磁滞同步电机。当驱动电机通以两相相位差为 90° , 频率为 180 Hz 的交流电后,产生一旋转磁场,驱动转子以 360 rpm 的转速转动。同步电机的长期稳定度取决于电源频率,由于使用石英晶体振荡分频电源,能达到 1×10^{-6} 的频率稳定度。磁滞同步电机在同步运行时,具有一般同步电机的角特性。极对数 P 越大,电机转速的瞬时稳定度也越高。扫描器采用 30 对极的电机,只要在装配工艺上严格要求,电机瞬时稳定度也能满足要求。

磁滞同步电机具有异步启动、同步工作的特性,启动时的转矩大于同步工作转矩,从而保证了扫描器的启动可靠性与功耗的要求。电机特性曲线见图 2。

(2) 驱动电路

电路方框图见图 2。

电机驱动信号频率由石英晶体振荡器发出。信号经分频与数字分相器产生两路相位差为 90° , 频率为 180 Hz 的电信号输入前置级,再由前置级输入推动级。推动级经变压器耦合,供给功放级,驱动电机以稳定的速率运转。由于驱动电源采用变压器耦合方式,不仅避免了共地干扰,还使电机转速不受电源电压波动的影响。为避免电机电源通过星上公用电源时,呈现在供电端上电压起伏,供电端加 LC 抑制滤波电路。为监视电源电压的供给情况,在电路中增设了遥测电路。

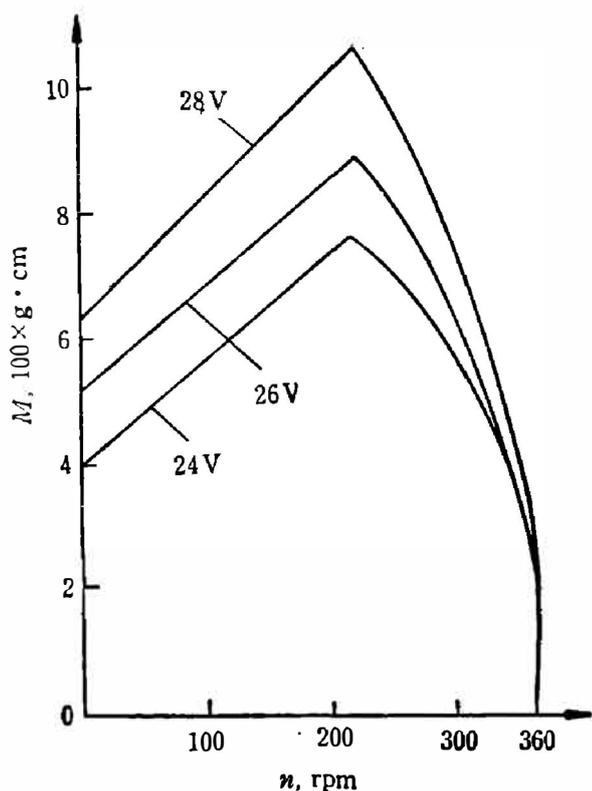


图 1 电机特性曲线

Fig. 1 Typical performance curves for the scanner motors.

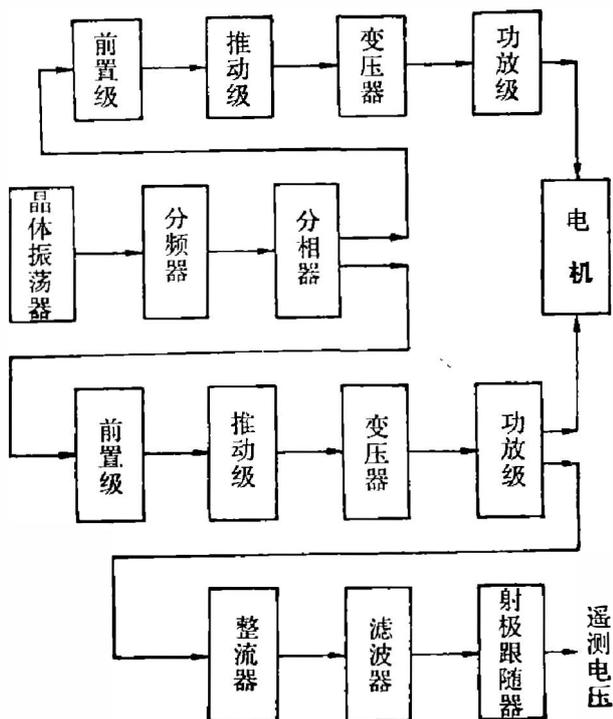


图 2 电路方框图

Fig. 2 Block diagram of circuits.

3.2 轴承及超高真空下的轴承润滑

轴承是驱动装置中的重要零件,电机轴由一对 DB 安装的轴承支承。从扫描器长寿命、高精度、低摩擦力矩等方面考虑,采用高质量的滚珠轴承,以确定的预载装配成同等质量的轴承部件。

(1) 轴承预载

为了消除滚珠轴承可能出现的轴向间隙,在装配时采用预加载荷的方法,将一个选定的轴向载荷施加在轴承上,如图 3 所示。在加载前,内圈与衬套之间有一间隙;加载后,间隙消失。给轴承预加载荷,可提供更加精确的径向定位和轴向定位,提高组件刚度。

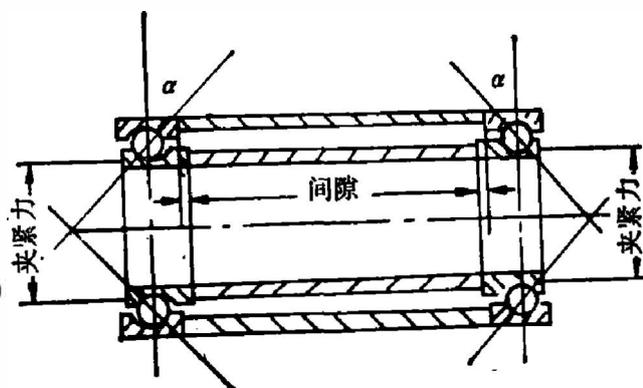


图 3 预加载荷轴承

Fig. 3 The bearings of preload.

加载值必须选择在合适的范围内。加载过低,钢球会产生滑动,影响转速稳定度;加载过高将降低轴承的寿命。为使加载值在工作温度内基本保持不变,提高转速稳定度,轴承、衬套、主轴、及基座套材料需选用线胀系数相近的材料。

(2) 超高真空下的轴承润滑

扫描器工作在 900 km 高度的地球轨道,空间环境是超高真空($1.33 \times 10^{-8} \sim 10^{-9}$ Pa)。

超高真空对润滑、摩擦有着很大的影响,一般地面上轴承用的普通润滑油或润滑脂在超高真空环境下会很快挥发掉。由于扫描器暴露在宇宙空间,宇宙的辐射会使某些润滑材料变质、失效。已研究了几种形式,并进行了对照(见表2)。

表2 几种润滑方式性能对照表

Table 2 The comparison of different lubricant process

润滑方式	摩擦力矩	寿命	运转精度
固体膜润滑	大而波动	短	差
油脂膜润滑	较大	不稳定	中等
油膜润滑	小	长	高

我们采用在真空中低挥发、做过辐照试验的特种润滑油来润滑扫描器轴承。轴承保持架用多孔材料制成,在真空中把润滑油浸渍到保持架中,并在两轴承间装储油器。当轴承滚道中的油量随时间逐渐损失时,保持架与储油器会不断地向轴承滚道补充油量。采用这种方式,能够保证扫描器在宇宙空间长时间稳定工作。

(a) 轴承的润滑状态

轴承的润滑状态取决于轴承内的油膜形式,油膜对延长轴承寿命有着重要作用。

油膜能否形成,与油的粘度、油量、转速、温度、油膜表面张力、负荷、轴承滚道表面光洁度等因素有关。在球轴承中,钢球与套圈是点接触,油膜厚度 h 由下式来确定:

$$h = 2.04 \phi^{0.74} (\alpha \eta_0 u)^{0.74} R^{0.407} \left(\frac{E'}{Q} \right)^{0.074} \quad (2)$$

式(2)中, ϕ 为修正系数; α 为粘压系数; η_0 为粘度; u 为平均速度; R 为当量曲率半径; E' 为当量弹性模量; Q 为滚动体负荷。

根据 EHD 理论,当 $\lambda > 4$ 时,轴承可得到良好润滑。

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (3)$$

式(3)中, h 为油膜厚度; σ_1 、 σ_2 为两表面的粗糙度。

计算结果表明:扫描器轴承工作在良好的润滑状态下。

(b) 润滑油在空间逸出量计算

扫描器在空间运行时,油气会不断地向空间逸出。为限制油气逸出,扫描器主轴出口处设计成迷宫结构,使油气不易逸出。

润滑油在空间的逸出量计算式为:

圆形圆环管道流导 u_1

$$u_1 = 3.81 \sqrt{\frac{T}{\mu}} \frac{(d_1 - d_2)^2 (d_1 + d_2)}{l} K_h \quad (4)$$

矩形短管道流导 u_2

$$u_2 = 3.628 ab \sqrt{\frac{T}{\mu}} K_h \quad (5)$$

串联后的总流导 u

$$\frac{1}{u} = \frac{1}{u_1} + \frac{1}{u_2} + \cdots + \frac{1}{u_n}, \quad (6)$$

单位时间内通过给定截面的气体量 Q

$$Q = u(P_1 - P_2), \quad (7)$$

寿命期内流过截面的气体量 G

$$G = Qt, \quad (8)$$

寿命期内主轴端逸出的气体质量 M

$$M = \frac{\mu G}{RT}. \quad (9)$$

式(4~9)中, T 为温度; μ 为气体克分子量; R 为气体常数; P_1 、 P_2 为管道两边的压差。根据上述公式, 代入有关参数计算结果为:

从迷宫出口处, 一年时间向外层空间逸出的润滑油总量为 0.48 mg。因此润滑油蒸汽从迷宫口逸出, 不会影响扫描器轴承的运转寿命。

(c) 轴承润滑的工艺考虑

轴承的装配环境的清洁度是值得重视的一个重要问题。扫描器轴承装配是在超净环境下进行的。

为获得适当的转速稳定度性能, 每只轴承内的初始润滑油油量必须严格控制在一定范围内。

要使扫描器轴承获得足够的运转寿命, 轴承滚道表面的润湿性是必须考虑的, 因为新轴承的滚道表面, 不易被润滑油润湿, 油膜不易生成, 采用适当措施后这种现象即可消失。

扫描器的零部件都是在地面大气中组装的, 在宇宙空间, 扫描器内部的混杂气体会向空间排放。为防止混杂气体排放时对轴承润滑的冲击, 在扫描器基体后端开一个放气孔, 供扫描器内部的混杂气体逸出。

3.3 扫描反射镜及动平衡机构

风云一号气象卫星遥感系统的有效通光口径为 200 mm, 相应的 45° 椭圆扫描镜的短轴为 205 mm, 长轴为 290 mm。

(1) 扫描镜基体结构与材料

指标要求扫描器驱动功耗小于 10 W, 由扫描镜、电机转子及动平衡机构组成的转动体的转动惯量在 55000~63000 gcm² 范围内, 这要求镜体质量必须轻。扫描镜是光学部件, 参与光学成像, 它的平面度与光洁度要求都是很高的。同时要求扫描镜在经受卫星发射时的力学环境后, 在长期的空间运行中, 保持光学质量基本不变。

根据上述要求, 扫描镜正面设计成光学面, 为减轻质量, 保持刚度, 扫描镜背面设计成方格蜂窝结构。考虑扫描镜在空间冷背景中转动时的温控, 扫描镜背面镀金。考虑航天产品的环模条件, 功耗以及光学要求, 选用金属铍做扫描镜的基体。铍具有密度小、弹性模量高、比刚度大、热畸变小、热尺寸稳定性好等优点, 是制作航天扫描镜的理想材料。

虽然铍具有其它金属材料不能比拟的特性, 但铍有毒且不易加工, 铍的延伸率较低, 加工过程中产生的加工应力很容易在铍表面产生裂痕。由于采用了一套合理的加工工艺, 保证了铍镜的尺寸稳定性。

镜扫描镜外形见本期彩色插页图 *g*。

(2) 扫描镜动平衡

扫描镜是一形状复杂的镜体,尺寸较大,且 45° 倾斜安装在主轴上。转动时产生的不平衡力偶很大,不行动平衡设计,扫描镜无法正常工作;不行动平衡校正,无法使转速达到高稳定度。

要使零件平衡,必须满足以下条件:

$$\begin{cases} x_c = 0, z_c = 0; & (10) \\ \sum_{i=1}^n M_i = 0; & (11) \end{cases}$$

$x_c = 0, z_c = 0$ 为静平衡条件。

在 $OXYZ$ 坐标系中, 45° 扫描镜相对于 YOZ 平面对称,所以 x 方向的质心坐标等于零,于是静平衡要求: 45° 扫描镜在 z 方向的质心坐标也等于零。即

$$z_c = \frac{1}{m_s} \sum_{i=1}^n m_i z_i. \quad (12)$$

由于扫描镜是不规则的形体,为计算方便,把扫描镜分成 38 个小块,然后用积分方法分别计算每小块的质量与质心,最后求和计算出静平衡配重块的质量与质心积,从而设计出静平衡配重块。

动平衡除了满足静平衡要求之外,还应在旋转时,使绕参考点 A 的力矩之和为零。即

$$\sum_{i=1}^n M_i = 0; \quad (13)$$

式(13)中, $M_i = F_i Y_i$ 为绕支点 A 的力矩; $F_i = m_i z_i \omega^2$ 为 z 方向的离心力; ω 为角速度; Y_i 为相对于支点 A , Y 方向的质心坐标。

由于 x 方向是对称结构,因此 x 方向的离心力相互抵消。

45° 扫描镜虽已静平衡,但由于 $Y_{\perp} \neq Y_{\parallel}$, 因此并不是动平衡,为此,需加上一对反力偶。扫描镜动平衡图如图 4 所示。

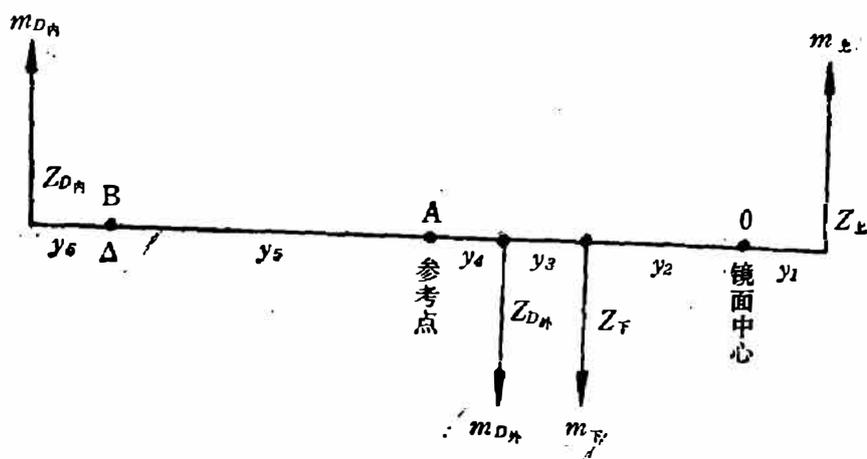


图 4 扫描镜动平衡示意图

Fig. 4 Schematic diagram of dynamically balanced scan mirror.

设轴为刚体,对于支点 A ,有

$$\sum_{i=1}^n m_{\perp i} Z_{\perp i} Y_{\perp i} + \sum_{i=1}^n m_{\parallel i} Z_{\parallel i} Y_{\parallel i} + \sum_{i=1}^n m_{DN i} Z_{DN i} Y_{DN i} + \sum_{i=1}^n m_{DF i} Z_{DF i} Y_{DF i} = 0. \quad (14)$$

按上述公式的计算结果,设计内、外动平衡块,从而实现了 45° 扫描镜的动平衡。

由于加工误差,材料密度的不均匀性,组装后的扫描器还需进行动平衡校正。

3.4 基准脉冲信号发生器

基准脉冲信号发生器是给遥感系统提供一个控制逻辑和时序电路起始基准脉冲的装置。它由磁头与触发片组成。磁头安装在扫描器基座上,触发片安装在转动的动平衡块上。

当转动的触发片通过磁头时,由于触发片切割磁力线,在磁头引出线端产生一个脉冲电压信号。脉冲电压幅值的大小由下式确定:

$$V = -\frac{d\phi}{dt}; \quad (15)$$

式(15)中, V 为感应电动势; ϕ 为磁通; t 为时间。

当磁通随时间变化时,感应电动势与变化速度成正比。在转速恒定的情况下,脉冲电压幅值的大小取决于触发片与磁头间的间隙。

4. 试验与结果

扫描器先后按航天产品要求,通过了各种环境模拟试验,并在超高真空环境下进行了连续一年的长寿命试验。扫描器装置还通过了其它一系列整星试验。试验表明:扫描器性能稳定,运行可靠,使风云一号气象卫星获取了清晰的云图照片。

参 考 文 献

- [1] NASA-CR-156682.
 [2] 真空设计手册编写组编写,真空设计手册(上册),北京:国防工业出版社,1979, p54~72.

SATELLITE-BORNE HIGH ACCURACY SCANNER

ZHANG BAOLONG, GUO HUILIN

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia sinica, 200083, Shanghai, China)

ABSTRACT

The design principle of operation and basic structure of the satellite-borne high accuracy scanner as well as its result of space flight are described in this paper.