

星图仪的总体设计

施树怀

(中国科学院上海技术物理研究所)

摘要——本文简述了星图仪的工作模式和设计特点。并对视场和探测星等、信噪比、仪器精度等三个方面的总体参数设计进行了探讨。

一、引言

星图仪是星敏感器的一种形式。它利用卫星的自旋,在空间扫出一条环带;探测环带内超过一定星等的恒星,测定探到的时间,把它换算成恒星的位置坐标,并与标准星表对照,从而确定卫星的姿态,这便是星图仪的任务。

星图仪有较高的仪器精度,而且没有运动部件,因此功耗小、可靠性好、寿命长,最适宜应用于自旋卫星上。

二、工作模式和设计特点

我们根据实际需要研制一台精度为 0.03° 、用于自旋卫星的姿态敏感器。由于这个精度正好落在星图仪的典型精度范围以内,并且仪器是用于自旋卫星上的,因此,我们选用了图1所示的星图仪型式作为工作模式。星图仪的光机轴与卫星的自旋轴成 Φ 角。由于卫星的自旋,星图仪的瞬时视场在天球上扫描成一条环带(此即星图仪的探测区域,或称扫描视场),同时,这条环带随卫星一起绕地球运动。 Φ 角的选取原则是,使假目标和杂散光的影响最小。在本文实例中,自旋轴指向太阳,为了避免太阳光的直接照射,选取 $\Phi=90^\circ$ 。

星图仪的原理框图如图2所示。环带内恒星的辐射通过光学系统,由光电转换器转换为电信号,经线性放大和数字处理后输出。具体实现方法如下:选用折、反射系统作为光学系统;用光电倍增管实现光电转换;由(集成块)分差放大器进行线性放大。在分差放大器中设置一门限电平,用于控制目标星的探测星等。其中数字电路都采用CMOS电路。除此之外,本设计具有下列三个特点。

1. 仿眼滤光片

恒星的目视星等是按人眼光谱响应来定义的。但目视星等相同的两颗恒星,由于光谱

本文1982年2月13日收到。修改稿1982年8月16日收到。

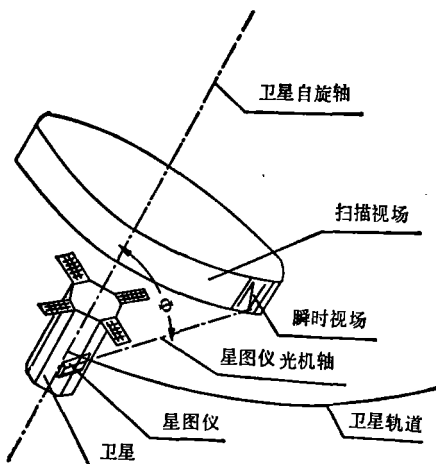


图1 星图仪空间探测示意图

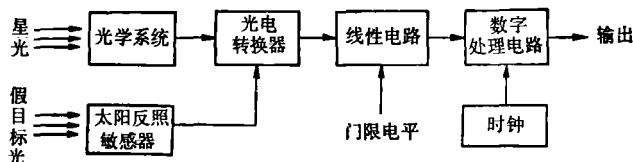


图2 星图仪结构框图

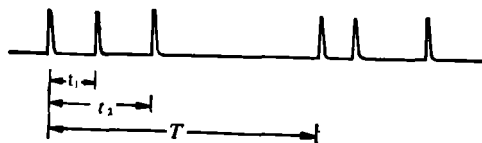


图3 星信号波形示意图

特性不同, 星图仪光电倍增管输出的电信号幅度亦可不同。由于光谱特性不同产生的影响可用下式表示:

$$\omega = \frac{\int_0^{\infty} W_j(\lambda) R_s(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} W_i(\lambda) R_s(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{\int_0^{\infty} W_i(\lambda) R_o(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} W_j(\lambda) R_o(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

其中, $W_j(\lambda)$ 为 j 星体的光谱发射功率, $W_i(\lambda)$ 为 i 星体的光谱发射功率, $R_s(\lambda)$ 为星图仪的光谱响应, $R_o(\lambda)$ 为人眼的光谱响应, ω 为由于光谱特性不同所引起的 i 星体与 j 星体的等效目视星等之比。当 i 星为 A_0 星, j 星为 k_0 星时, 计算得 $\omega=1.3$, 即产生 0.3 目视星等的误差。

由式(1)得, 当 $R_s(\lambda) = R_o(\lambda)$ 时, $\omega=1$, 即星图仪的光谱响应与人眼光谱响应一致时, 就能消除这种误差。因此, 我们在星图仪中加入一个滤光片, 使(归一化后)满足:

$$R_s(\lambda) = R_o(\lambda) R_f(\lambda) R_{pm}(\lambda) = R_o(\lambda),$$

即
$$R_f(\lambda) = \frac{R_o(\lambda)}{R_o(\lambda) R_{pm}(\lambda)}, \quad (2)$$

其中, $R_o(\lambda)$ 为星图仪的光学系统的光谱响应, $R_f(\lambda)$ 为星图仪的滤光片的光谱响应, $R_{pm}(\lambda)$ 为星图仪的光电倍增管的光谱响应, $R_o(\lambda)$ 为人眼的光谱响应。我们在系统中加入一块滤光片, 使其光谱响应符合式(2)的要求, 这样就消除了不同光谱型恒星所产生的误差, 此滤光片我们称之为仿眼滤光片。

2. N形狭缝

为了调制象点, 在光学系统的焦平面上装有狭缝形的调制器。狭缝形状有 V、N、X、 \boxtimes 等几种。采用 N 形狭缝除能获得星经、星纬值外, 还能获得卫星角速度。而 V、X 形狭缝只能获得星纬值。 \boxtimes 形狭缝虽对称较好, 但不能获得更多参数, 图案又比较复杂。因此, 我们采用 N 形狭缝调制象点。

采用 N 形狭缝后, 一颗恒星扫过视场, 输出三个星信号脉冲(形成一组), 如图 3 所示。通过数字处理电路后, 输出对应于三个脉冲的时刻(即时间码信号), 因此可以测到三个时差。即 t_1 (第一个脉冲与第二个脉冲之间的时差)、 t_2 (第一个脉冲与第三个脉冲之间的时差) 和 T (第一个脉冲与下一周期第一个脉冲之间的时差)。

利用 t_1 、 t_2 和 T 可计算得到下列参数:

(1) 卫星在瞬时视场内的平均角速度 ω ,

$$\omega = 2\pi \cdot \frac{\alpha}{360} \cdot \frac{1}{t_2}。$$

(2) 两颗目标星之间的星经差 $\Delta\phi$, $\Delta\phi = \omega T$ 。

(3) 目标星的星纬 R , $R = \eta \left(\frac{t_1}{t_2} - \frac{1}{2} \right)$ 。其中, η 为直缝视场, α 为两直缝间的视场(星经、星纬定义及公式来源参见附录)。

3. 假目标消除

由于 $\Phi = 90^\circ$, 所以一般情况下, 太阳光不能直接进入星图仪系统, 但可通过空间星体(主要是地球、月球等)的反射进入系统。星光本身相当微弱, 强的假目标光有可能烧毁光电倍增管, 因此, 必须采取保护措施才能付之实用。保护措施一般有挡光罩和保护敏感器两种。一方面为了减少仪器线度, 另一方面正好可以利用光学系统中心部分的挡光区域, 因此, 我们增加了一个太阳反照敏感器, 以此为主来消除假目标, 同时适当地增加一些其他保护措施。太阳反照敏感器的视场比星图仪光学系统的视场宽, 遇到强光, 它先出信号, 关断光电倍增管的高压, 从而达到消除假目标的目的。

三、总体参数设计中若干问题的讨论

1. 视场及探测星等

扫描视场所张的立体角 A 可用图 4 中圆 AB 及圆 CD 所围成的环带的立体角来计算。显然,

$$A = \int_{\varphi - \frac{\eta}{2}}^{\varphi + \frac{\eta}{2}} ds = \int_{\varphi - \frac{\eta}{2}}^{\varphi + \frac{\eta}{2}} \frac{2\pi R^2 \sin \theta d\theta}{R^2} = 4\pi \sin \Phi \sin \frac{\eta}{2},$$

本例中已选取 $\Phi = 90^\circ$,

$$\therefore A = 4\pi \sin \frac{\eta}{2}。 \quad (3)$$

设 m_v 为门限星等, m 为超过 m_v 的全球恒星数, n 为一圈内平均扫到的超过 m_v 的恒星数, 则:

$$n = \frac{A m}{4\pi}。 \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)得:

$$n = m \sin \frac{\eta}{2}。 \quad (5)$$

一般讲, 取 $n = 3$, 即每圈得到五个参数: θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 $\Delta\phi_{12}$ 、 $\Delta\phi_{23}$ 就可确定卫星的姿态。但由于 (i) 地球要遮住相当一部分空间, (ii) 有时需要人为地剔除一些容易混淆的星信号, (iii) 恒星在空间分布不均匀, 因此, 计算时必须增加二至四倍。

m 与 m_v 的函数关系可从亮星星表中直接查得, 列成图表综合考虑后可选出合适的 m_v

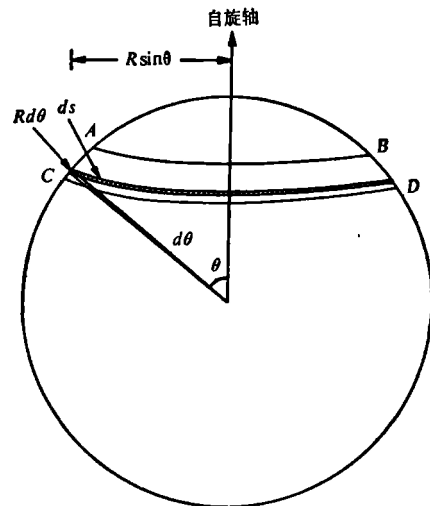


图 4 扫描视场计算图

及 η 。

用上述方法粗略估算,基本符合要求后,再用计算机模拟验证。最后结果是: $\Phi = 90^\circ$, N形狭缝的直缝视场角 $\eta = 6^\circ$, 两直缝间视场角 $\alpha = 3^\circ$, 即瞬时视场为 $6^\circ \times 3^\circ$ 。目标星为目视 3.5 等以上恒星,每圈最少扫到 9 颗星,最多扫到 24 颗星,平均为 13 颗星。

2. 信噪比

光电倍增管输出的信号电流为:

$$I = \frac{\pi D^2 \beta I_{m_v} \cdot K_{5550 \text{ \AA}} \int \phi^2(\lambda) d\lambda \cdot \rho}{4 \int \phi(\lambda) d\lambda} = E \cdot F \cdot \rho, \quad (6)$$

其中, E 为接收到的光能量, F 为有效光功当量, ρ 为光电倍增管的灵敏度。

$$E = \frac{\pi D^2}{4} \beta I_{m_v}, \quad F = K_{5550 \text{ \AA}} \int \phi^2(\lambda) d\lambda / \int \phi(\lambda) d\lambda.$$

D 为光学口径, β 为光学效率, I_{m_v} 为 m_v 等星的有效辐照, $K_{5550 \text{ \AA}} = 680 \text{ lm/w}$ 为人眼最灵敏处的光功当量, $\phi(\lambda)$ 为归一化后的人眼光谱分布曲线。

星图仪的噪声主要包括空间背景噪声 i_1 , 光电倍增管的暗电流噪声 i_2 和星光起伏噪声 i_3 。总的噪声电流为:

$$\begin{aligned} i &= \sqrt{i_1^2 + i_2^2 + i_3^2}, \quad (7) \\ i_1 &= \sqrt{2e \times 200 I_{10} B \Delta f}, \\ i_2 &= \sqrt{2e I_t \Delta f}, \\ i_3 &= \sqrt{2e I \Delta f}. \end{aligned}$$

其中 I_{10} 为 10 等星的有效辐照, $200 I_{10}$ 表示一般情况下 i_1 等效于每平方度内有 200 颗 10 等星所引起的噪声, B 为 N 形狭缝透光部分在天球上所张的立体角, I_t 为光电倍增管的阴极暗电流, I 为星光信号电流, e 为电子电荷, Δf 为系统带宽。

由式(6)及式(7)得信噪比 S/N 为:

$$\frac{S}{N} = \frac{\pi D^2 \beta I_{m_v} K_{5550 \text{ \AA}} \int \phi^2(\lambda) d\lambda \cdot \rho}{4 \int \phi(\lambda) d\lambda \sqrt{2e \Delta f \left[200 I_{10} B + I_t + \frac{\pi D^2 \beta I_{m_v} K_{5550 \text{ \AA}} \int \phi^2(\lambda) d\lambda \cdot \rho}{4 \int \phi(\lambda) d\lambda} \right]}}. \quad (8)$$

经综合平衡后,取 $D = 56 \text{ mm}$, $\beta = 0.34$, $m_v = 3.5$, $I_{3.5} = 1.25 \times 10^{-14} \text{ W/cm}^2$, $\rho = 116 \mu\text{A/lm}$, $\Delta f = 10 \text{ Hz}$, $I_{10} = 3.22 \times 10^{-17} \text{ W/cm}^2$, $B = 0.54 \text{ 度}^2$, $I_t = 1.28 \times 10^{-14} \text{ A}$, 算得

$$\int \phi^2(\lambda) d\lambda / \int \phi(\lambda) d\lambda = 0.7175,$$

最后得到信噪比 $\frac{S}{N} \doteq 17$ 。

3. 精度

仪器的设计精度往往是根据实际需要的精度、仪器能达到的精度和要达到这个精度所必须的其他条件是否具备这三个因素综合平衡得到的。精度确定以后,对有关部分提出如下要求。

(1) 对时间码的要求

由附录式(A-3)可得:

$$\text{星纬 } R = \text{tg}^{-1}[c_1 \cos(\omega t_1) + c_2 \sin(\omega t_1)],$$

其中,
$$c_1 = -\sin \frac{\eta}{2} / \cos \frac{\eta}{2}; \quad c_2 = \text{ctg} \xi / \cos \frac{\eta}{2}.$$

则
$$dR = \frac{[-c_1 \sin(\omega t_1) + c_2 \cos(\omega t_1)] [t_1 d\omega + \omega dt_1]}{1 + [c_1 \cos(\omega t_1) + c_2 \sin(\omega t_1)]^2}.$$

实际上常成立下列近似条件: $1 \gg c_1 \cos(\omega t_1) + c_2 \sin(\omega t_1)$, $c_2 \cos(\omega t_1) \gg c_1 \sin(\omega t_1)$, $\cos(\omega t_1) \doteq 1$, $c_2 \doteq 2$,

$$\therefore dR \doteq 2[t_1 d\omega + \omega dt_1].$$

假定卫星自旋角速度是稳定的, $d\omega = 0$,

则
$$dR \doteq 2\omega dt_1. \quad (9)$$

上式的物理意义是: 星纬的测量精度越高, 要求时间码的精度也越高。卫星自旋越快, 欲保持一定的星纬测量精度, 要求时间码的精度也越高。

(2) 对光学系统成象质量的要求

假定光学系统的象点是半径为 r 的圆(图 5), 象点通过狭缝的输出波形如图 6 所示(即图 3 的实际波形)。假设输出波形幅度为 A , 门限电平选在 PA 处(P 为门限电平占输出幅度的百分数)。从图 6 中看出, t_1 应为波形中心 $00'$ 之间的时间, 而实际测到的是 t_1' , 两者之差为: $\Delta t_1 = t_1' - t_1 = t_{e0} - t_{e'0'}$ 。

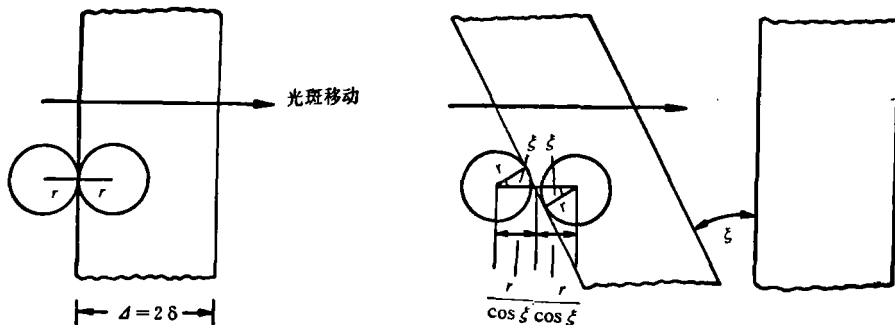


图 5 象点在 N 形狭缝内的移动情况

把图 5 和图 6 结合起来, 利用几何学的比例关系, 可得到 $e0$ 对应于第一条直缝内光斑中心移动距离, 即等于 $\delta + r - 2rp$ (其中 δ 为狭缝宽度 Δ 的一半)。因为 Δ 对应于仪器精度 S , 所以

$$t_{e0} = \frac{S(\delta + r - 2rp)}{\Delta \omega},$$

其中, ω 为卫星自旋角速度。同理,

$$t_{e'0'} = \frac{S\left(\delta + \frac{r}{\cos \xi} - \frac{2rp}{\cos \xi}\right)}{\Delta \omega},$$

其中, 因子 $\cos \xi$ 可以从图 5 中直接看出。

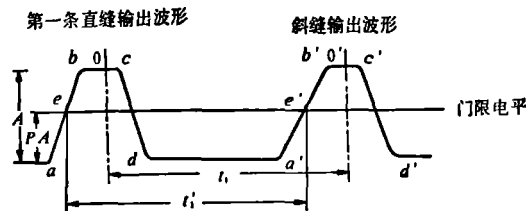


图 6 星信号的实际波形图

$$\therefore \Delta t_1 = \frac{S(\delta + r - 2rp)}{\Delta \omega} - \frac{S\left(\delta + \frac{r}{\cos \xi} - \frac{2rp}{\cos \xi}\right)}{\omega \Delta} = \frac{Sr}{\Delta \omega} \left[\frac{1}{\cos \xi} - 1 \right] [2p - 1].$$

将上式代入式(9)得:

$$\Delta R = \frac{2Sr}{\Delta} \left[\frac{1}{\cos \xi} - 1 \right] [2p - 1]. \quad (10)$$

当 $p = \frac{1}{2}$ 时, $\Delta R = 0$ 。即门限电平选在输出幅度一半时, 由光斑大小引起星纬的误差可以不计。当 $p = 1$ 时, $\Delta R = \Delta R_{\max} = \frac{2Sr}{\Delta} (\cos \xi - 1)$, 即:

$$\frac{r}{\Delta} = \frac{\Delta R_{\max}}{2S} \frac{1}{\frac{1}{\cos \xi} - 1}.$$

上式的物理意义是: 允许的光斑线度与狭缝宽度的比值取决于光学系统分配到的精度比值 $\Delta R_{\max}/S$ 。

必须指出, 光学系统的成象质量不仅受精度的限制, 还受狭缝宽度等因素的限制。

(3) 不同星等引起的误差

不同星等输出幅度相差比较大(如零等星输出幅度可为 3.5 等星的 25 倍), 门限确定以后, 实际上是在前沿的不同部分触发。与上述分析相同, 引起星纬的误差为:

$$\Delta R = \frac{2Sr}{\Delta} \left[\frac{1}{\cos \xi} - 1 \right] [2p - 1],$$

其中, p 是星等的函数。如果采用对数放大形式控制 $p = \frac{1}{2}$, 则不同星等引起的误差几乎为零。但即使采用一般的线性放大电路, 星纬的测量误差也在允许的范围之内, 因此不同星等引起的误差可忽略。

本例设计精度是 0.03° , 实际证明, 研制成的仪器精度可优于设计精度。

致谢——作者感谢匡定波同志的指导和帮助。并感谢一起共同研制仪器的赵菁、郑丽华、栾炳辉、裴云天、谈湘英、陆新民等同志的帮助。

参 考 文 献

- [1] Schenkel F. W. *NASA-CR-129192*, (1972).
- [2] Hammerschlag A., *ESRO-CR-162*, (1972).
- [3] Coldrick J. R., *Optics and Laser Technology*, 4(1972), 3, 129~141.

附 录

星体坐标系的定义及与其他坐标系的关系

星图仪安装在自旋卫星上, 它所测量到的姿态数据与卫星本身的状态有关。为简化起见, 建立一个固定于卫星的坐标系(称为星体坐标系), 如图 A-1 所示。以卫星的自旋轴为极, 垂直于自旋轴的平面为坐标系的基本平面, 此平面与黄道面交于 BB' , 包含自旋轴和 BB' 点的经圈作为星体坐标系的零经圈。本坐标系的经度称为星经, 用 φ 表示。原点和目标星 Σ 之连线 $O\Sigma$ 与自旋轴之间的夹角 θ 称为星极距, $O\Sigma$ 与基本平面的夹角 R 称为星纬, 显见, 当 $\theta < 90^\circ$ 时, $R = \frac{\pi}{2} - \theta$ 。

目标星的黄经为 λ , 黄纬为 β , 利用球面三角学的公式可推得下列关系式:

$$\begin{cases} \cos \theta = \cos(\lambda_0 - \lambda) \cos \beta, \\ \operatorname{ctg} \varphi = \sin(\lambda_0 - \lambda) / \operatorname{tg} \beta, \end{cases} \quad (\text{A-1})$$

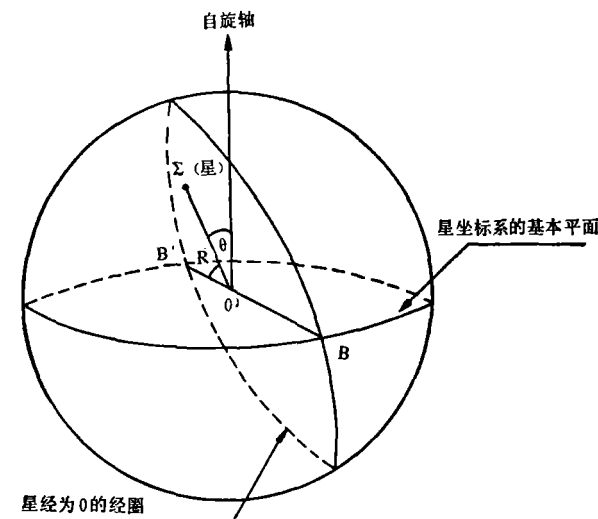


图 A-1 星体坐标系

其中参变量 λ_0 为太阳的黄经。

目标星的赤经为 α , 赤纬为 δ , 利用天文学之公式有:

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \lambda = \frac{\cos(M - \varepsilon)}{\cos M} \operatorname{tg} \alpha, \\ \operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg}(M - \varepsilon) \sin \lambda, \end{cases} \quad (\text{A-2})$$

其中, 黄赤交角 $\varepsilon = 23^\circ 26' 31'' 25$, $\operatorname{tg} M = \operatorname{tg} \delta / \sin \alpha$ 。从而建立了函数关系 $\theta = f(\alpha, \delta)$, $\varphi = g(\alpha, \delta)$ 。

利用球面三角学的公式可推导出:

$$\operatorname{tg} R = \frac{-\sin \frac{\eta}{2} \cos(\omega t_1) + \sin(\omega t_1) \operatorname{ctg} \xi}{\cos \frac{\eta}{2}}, \quad (\text{A-3})$$

其中, η 为视场角, ω 为卫星角速度, t_1 是图 3 中所示的实测值, ξ 是 N 形狭缝的夹角, N 形狭缝直缝长度通常取为两条直缝之间距离的两倍, 即 $\xi = 26^\circ 34'$ 。

把三角函数用级数展开, 取一级近似, 即得:

$$R = \eta \left(\frac{t_1}{t_2} - \frac{1}{2} \right). \quad (\text{A-4})$$

OVERALL DESIGN OF A STARMAPPER

SHI SHUHUAI

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The working mode and the special features in design of a starmapper are described briefly. Some problems connected with overall design of the instrument, namely the field of view, the detected magnitude, the signal-to-noise ratio, and the instrument accuracy are investigated.