第6卷 第2期 空间科学学报 Vol. 6, No. 2
1986 年 4 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 1986

棱镜式太阳敏感器研制

肖功翀 徐德延
（中国科学院自动化研究所）

摘 要

本文提出了研制棱镜式太阳敏感器的“太阳方位检测原理”，并采用能量平衡测量方法及补偿辐照度变化等措施，实现太阳方位精确测量．根据这一原理设计的太阳敏感器具有在小视场范围内分辨率和精度高、体积小、重量轻、寿命长等优点．经鉴定，样机在 ±70′ 视场内分辨率为 1″，精度为 ±3″．全套重 2.5 公斤，耗电小于 1 瓦．

一、概 述

太阳是近地空间中最重要、最显著的恒星．太阳方位自然被用作卫星天文导航的基准方位之一．许多卫星都使用太阳敏感器．在天文仪器及高空气球科学观测中也广泛用它作为基本的姿态敏感器．目前国外高精度太阳敏感器大多数为几十角秒精度[1,2]，个别已达到角秒级精度[3]，亚角秒级精度太阳敏感器也正在研制中[4]．

在研制角分级精度太阳敏感器时，可把太阳看作是具有 32′ 视角、亮度均匀的圆盘．但研制角秒级精度太阳敏感器时，必须考虑日地距离变化及太阳圆面上亮度分布．太阳由中心到边缘光谱能量分布可用下式表达[5]：

$$\frac{I_\lambda(\rho)}{I_\lambda(0)} \doteq 1 - u_1 + u_1 \frac{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \rho^2}}{\frac{d}{2}}. \tag{1}$$

式中 $I_\lambda(0)$ 为太阳中心光谱辐射强度；$I_\lambda(\rho)$ 为太阳距其中心 ρ 处光谱辐射强度；d 为太阳直径；u_1 为波长的函数，有实测数值表，详见文献[5]．

太阳黑子爆发及其运动对大多数太阳敏感器可产生 1″ 左右误差． 太阳其它活动及卫星轨道对太阳视角影响，只有在研制亚角秒级精度太阳敏感器时才需考虑．

二、棱镜式太阳方位检测原理

现有绝大多数太阳敏感器是通过检测太阳光在检测器上相对位移来决定太阳方位．棱镜式太阳方位检测原理是：当太阳方位变化时，透过棱镜系统的太阳光能量发生急剧

本文于 1985 年 1 月 23 日收到．

变化，通过测量能量变化来决定太阳方位．这一原理充分利用了太阳的辐射，又避免了运动部件；因而具有分辨率高、体积小、寿命长等优点．在设计中采用消色散技术消除棱镜色差的影响；采用实时测太阳辐照度用以补偿太阳辐照度变化等影响，实现太阳方位精确测定．

棱镜式太阳方位检测原理的理论基础，是光在两透明介质分界面上的反射率方程[6]：

$$R(\theta)=\frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(\theta-\theta')}{\sin^2(\theta+\theta')}+\frac{\mathrm{tg}^2(\theta-\theta')}{\mathrm{tg}^2(\theta+\theta')}\right]. \tag{2}$$

式中 R 为反射率；θ 为入射角；θ' 为折射角．根据折射定律 $n\sin\theta=n'\sin\theta'$（$n$、$n'$ 为两介质折射率）．

在理想的光学分界面上，没有光的吸收损失．根据能量守恒原理，透射率 $T(\theta)$ 为：

$$T(\theta)=1-R(\theta). \tag{3}$$

当光由玻璃射入真空时，$R(\theta)$曲线如图 1 所示：在 $\theta<25°$ 时 R 基本不变(约 4%)．在接近全反射临界角 θ_t 约 2° 范围内，R 变化 80%（0.2—1）；根据 (3) 式 $T(\theta)$ 也变化 80%．这就是我们要利用的区域．具体实现方法如图 2 所示：将接近垂直入射棱镜的太阳光引向棱镜出射面，造成接近全反射射出棱镜情况．设棱镜第一面法线为光轴方向，即卫星对准太阳中心的方向．棱镜角 α 的设计使得出射太阳光接近临界角．透过棱镜的太阳光被硅太阳电池 S 接收．太阳圆面上各点入射角变化范围为 32′，这将引起 R 值很大的变化．设所讨论的敏感器是测 X 轴太阳偏离角 X_0（为确定太阳方位，还需测 Y 轴敏感器）．选用以太阳中心 0 为原点的动坐标系 θ_x、θ_y，其中 θ_x 平行 X 轴，θ_y 平行 Y 轴，如图 3 所示．将太阳圆面平行于 θ_y 分割成无数小条，小条上各点的辐射强度按 (1) 式计算．先积分算出小条的平均辐射强度 $I_\lambda(\theta_x)$ 为：

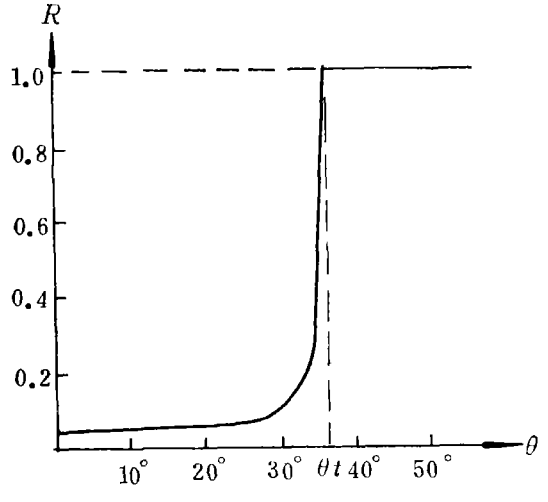


图 1
Fig. 1

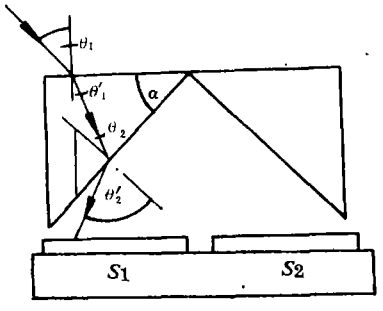


图 2
Fig. 2

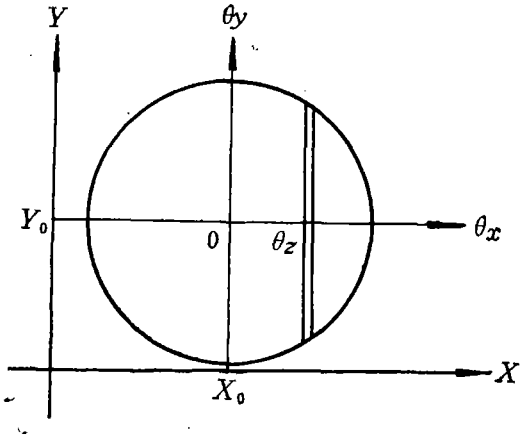


图 3

Fig. 3

$$I_\lambda(\theta_x)=\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2-\theta_x^2}}\int_0^{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2-\theta_x^2}} I_\lambda(\rho)d\theta_y$$

$$=\left[1-u_1+\frac{\pi}{2}u_1\frac{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2-\theta_x^2}}{d}\right]I_\lambda(0). \tag{4}$$

第二步计算小条辐射透过棱镜的光能. 注意因太阳光在棱镜第一面接近垂直入射，此时反射损失可认为与入射角无关 (约 4%). 透过棱镜太阳光能量的剧烈变化发生在第二界面上，此时反射率损失按 (2) 式计算. 小条光线在第二面的入射角 θ_2 可由下式求出:

$$\theta_2=\alpha-\theta_1'=\alpha-\sin^{-1}\left[\frac{1}{n}\sin\theta_1\right]. \tag{5}$$

式中 α 为棱镜角; n 为棱镜折射率; $\theta_1=X_0+\theta_x$, 即小条光线在第一面的入射角.

第三步是对太阳圆面积分. 最后求出太阳全部辐射透过棱镜的光能 E 为:

$$E(X_0)=K\int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}}\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2-\theta_x^2}\,I_\lambda(\theta_x)[1-R(\theta_x)]d\theta_x. \tag{6}$$

式中 K 是与棱镜通光面积、日地距离等有关的常数. 式中 $I_\lambda(\theta_x)$、$R(\theta_x)$ 可分别由 (2)、(4)、(5)式求出. 计算上述积分后，E 仅是太阳中心偏离角 X_0 的函数. 为了提高精度，采用"平衡对称"检测方法. 即采用二块相同棱镜对称于光轴放置 (如图 2). 当太阳中心偏离光轴时，对一块棱镜偏离 X_0，则对另一块偏离 $-X_0$. 透过二块棱镜的太阳光能分别用 $E_1(X_0)$、$E_2(-X_0)$ 表示.

为了补偿日地距离变化引起太阳辐照度及太阳视角变化，再用一块硅光电池垂直于光轴放置(不用棱镜)，实时测定太阳辐射强度 E_0. 显然 E_0 正比于太阳中心辐射强度:

$$E_0=K_0I_\lambda(0) \tag{7}$$

式中 K_0 是与日地距离、通光面积等有关的常数．当太阳在小角度范围偏离光轴时，E_0 与 X_0 无关．将上述 E_0、$E_1(X_0)$、$E_2(-X_0)$ 分别乘对应光电池灵敏系数 P_0、P_1、P_2，即为各光电池输出光电流 I_0 I_1、I_2．用电子线路测量下列 B 值，

$$B(X_0)=\frac{I_1-I_2}{I_0}=\frac{P_1E_1(X_0)-P_2E_2(-X_0)}{P_0E_0}. \tag{8}$$

(8) 式给出了实测值 B 和太阳中心偏离角 X_0 之间关系式 $B=f(X_0)$．此关系式较复杂，很难求得显反函数关系式 $X_0=f(B)$．但通过近似数值计算分析，(8) 式可用下式近似：

$$B(X_0)\doteq A_1X_0+A_3X_0^3+\cdots+A_{n-1}X_0^{n-1}. \tag{8}'$$

在小角度范围内，取 $n=6$ 已达到足够精度．我们利用 (8)′ 式，在 $\pm 70'$ 视场范围内将 B 与 X_0 校正成线性输出．

在上述推导中为了简化分析，只讨论了简单棱镜情况，并没有考虑棱镜色散的影响．实际设计中是采用消色散复合棱镜并配合宽带滤光玻璃，消除色散的影响．每个光学探测头体积为 $50\times55\times67\ mm^2$，重 0.4kg，实测 1″ 太阳方位变化约有 30μW 出射光能变化(对应光电流变化约 30μA)．电子线路采用双积分运算检测，一次完成 $B=\frac{I_1-I_2}{I_0}$ 的测量运算和模数转换．从精度和自摆率要求，需在一秒内测数次．因此计数主频为 1M，每次检测需 64ms．电子线路为国产 CMOS 元件，功耗 <1W．

三、精度分析和标定结果

本节重点讨论在使用过程中，环境条件偏离标定条件，所引起的测量误差．

1．折射率的变化影响．在原理推导中把折射率 n 看作常数．实际上 n 随波长和环境温度变化；由后面分析可知，太阳垂直于检测方向的偏移也可等效于 n 的变化．因此首先讨论 n 变化对测量结果的影响，再讨论波长、温度和垂直偏移影响．根据 (2) 式(图 1)在 $R=0.2$—1 范围内，$\Delta R/\Delta\theta\doteq 10^{-4}/1''$．将 $\Delta\theta$ 折算到太阳中心偏离角 $\Delta X_0\doteq n\Delta\theta$，再由(2)式求出在 R 变化剧烈区有 $dR/dn\doteq 20$；则可求得此时 $\Delta X_0/\Delta n\doteq 1''/(7\times10^{-6})$．即折射率变化 7×10^{-6}，相当于太阳方位变化 1″．

(1) 温度对 n 的影响．我们选用 QK_1 和 F_6 二种玻璃组成复合棱镜，它们的折射率温度系数为 $3\times10^{-7}/℃$ 及 $10^{-6}/℃$．要满足 1″ 精度，要求温度变化小于 7℃．

(2) 波长的影响．通过消色散棱镜设计，已在光谱通带内消除色散．若太阳敏感器在大气层外标定，太阳光谱分布是固定的，则波长的影响可以忽视．我们是在地面标定．大气层对阳光的吸收和散射使地面太阳光光谱分布变化，使得上午八时前、下午四时后的标定数据有较大变化(大于 3″)．晴天上午九时至下午三时之间的标定数据，看不出太阳光谱变化的影响 (小于标定装置精度 3″)．

(3) 垂直偏移影响．太阳在垂直于检测方向有偏移时，光线将不在棱镜主截面内折射．根据光学仪器理论[7]，光在非主截面折射与主截面折射公式相同，只是棱镜等效折射率 $\bar{n}$ 为：

$$\bar{n} = \sqrt{1 + (n^2 - 1)/\sin^2\beta}. \tag{9}$$

式中 β 为折射面与棱边夹角，即 90° 减太阳在垂直检测方向偏离角。多数光学玻璃 n 在 1.5—1.7 之间。下表是 $n = 1.6$，$\bar{n}$ 随 β 变化情况，以及由此引起的太阳方位角误差 ΔX_0。表中最下一行是实测结果(根据 12 次测量取平均值)。可以看出理论计算和实测结果符合。因此，若要在较大视场内达到角秒级精度，必须按 (9) 式校正垂直偏移影响。

在非检测方向偏离 $\Delta Y_0 = 90° - \beta$	13′	15′	30′	50′	70′	90′	2°	3°	5°
等效折射率变化 $\Delta n = \bar{n} - n$	5×10^{-6}	9.3×10^{-6}	3.7×10^{-5}	1.03×10^{-4}	2.02×10^{-4}	3.3×10^{-4}	5.9×10^{-4}	1.3×10^{-3}	3×10^{-3}
由于 Δn 计算出偏差 ΔX_0	0.7″	1″.4	5″.3	14″.7	28″.8	47″	84″	3′6″	7′8″
实际测出由于 β 引起 ΔX_0	/	1″.4	5″.2	14″	26″	48″	/	/	/

2.季节的影响。一年中日地距离变化引起太阳常数变化约 7%，太阳视角变化约 3%。本仪器使太阳光强度变化得到了无差的补偿；太阳视角变化在零点附近也得到无差补偿，在偏离零点时也大部份补偿。具体计算了在最坏情况下(近日点标定，在远日点测量，且太阳偏离 70′)，由于太阳视角变化将产生 2″ 误差。选在平均日地距离季节标定，季节影响在 1″ 内。

3.温度对硅光电池灵敏系数影响。由 (8) 式看出，若三块光电池 P_0、P_1、P_2 变化率相同，则不影响精度。选用同一硅片制成一组合光电池，使 P 值温度系数差异在 5×10^{-5}/℃是可以作到的。前已讨论 $\Delta R/\Delta X_0 \doteq 1.5\times10^{-4}/1''$，由此可算出若要求 1″ 精度，三块光电池温差应在 3℃ 内。为了使光电池之间温差小，将光电池焊在纯铜等温块上，使用效果很好。

我们在南京大学太阳塔进行标定。又在所内定天镜等设备上进行了八个月一百次复测。试验数据重复性好、可信度高。又经鉴定委员会测试组复测，确认在 ±70′ 视场内分辨率 1″，精度 ±3″。全套(一对探头及电子线路盒)重 2.5 公斤，耗电小于 1 瓦，64 毫秒测一次。

致谢：参加本项工作的还有张雪贞、李长山等同志。南京大学方成副教授等在标定方面给予很多帮助。

参 考 文 献

[1] Janes, R. W., Spacecraft Attitude Determination and Control, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Chap. 6—7, 1978.
[2] Smets, A. J., *Philips. Tech. Rev.*, Vol. **34**, p.210, 1974.
[3] Kollodge, J. C., *Applied Optics*, Vol. **11**, p. 2172, 1972.
[4] Bokhove, H., Automation Control in Space (Ed. by Vanwoerkom), IFAC, p. 265, 1982.
[5] 艾伦，C. W.，物理量和天体物理量，上海人民出版社，第 204 页，1977.
[6] Born, M., Principles of Optics, Pergamon Press, p. 68, 1975.
[7] 杜德罗夫斯基，A. E.，光学仪器理论(王文江译)，科学出版社，第 104 页，1958.

Design and Construction of High Precision Prism Sun Sensor

Xiao Gong-bi　Xu De-yang
(Institute of Automation, Academia Sinica)

Abstract

In carrying out a project of developing an astronomical satellite, a prototype of high precision prism sun sensor was designed and constructed. The principle of prism solar positoin measurement is proposed. By this principle and some methods such as energy balance measurement, compensation of the variation of irradiance etc., a high precision measurement of solar position is realizable. A sun sensor designed on this principle has a high resolution and precision in small view fields, a small size, a light weight and a long service life. According to the conclusion of a formal evaluation, such an instrument has a resolution of 1″ and a precision of ±3″ in a view field of ±70′. The entire system weighs 2.5 kg, requires 1 watt of power consumption.