

文章编号 1004-924X(2007)04-0512-05

红外地平仪视场保护系统

夏项团,刘学明,王建宇,龚惠兴

(中国科学院 上海技术物理研究所,上海 200083)

摘要:为使风云一号C和风云三号气象卫星红外地平仪不受太阳辐射视场的干扰,研制了一种视场保护系统,对该系统的优缺点、视场确定方案、峰值信号的标定算法进行了研究。分析了红外地平仪在轨运行受太阳辐射干扰影响的严重性,对视场保护系统进行了比较。设计了非扫描机械式视场保护系统——太阳探头,研究了有效的测量装置,测量确定了太阳探头的视场范围,推导了太阳探头信号测量的理论公式。根据太阳穿越大气辐射的理论,给出了标定太阳探头峰值信号的方案,并进行了外场试验。风云一号C气象卫星在轨运行验证表明:太阳探头有效地保护了红外地平仪。因此,太阳探头装置成功应用在卫星姿态测量装置中,研究的太阳探头将同样运用于即将发射的风云三号气象卫星红外地平仪视场保护中。

关键词:红外地平仪;视场保护;太阳探头;信号测量;在轨验证

中图分类号:V448.22;TN216 **文献标识码:**A

Covering system for vision field of infrared earth sensor

XIA Xiang-tuan, LIU Xue-ming, Wang Jian-yu, GONG Hui-xing

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

Abstract: In order to protect the infrared earth sensor of FengYun No. 1C and No. 3 weather satellite's from sun radiation, a kind of protecting system of vision field is developed, and its merit and demerit, measuring method and calibration algorithms of peak value are studied. The disturbance to the infrared earth sensor by sun radiation is analyzed and two methods for protecting the vision field of infrared earth sensor are compared. A new covering non-scanning mechanical system, named sun sensor is developed, a kind of valid metrical device is designed to determine vision field range of sun sensor, and to deduce the academic formula of signal measurement. A calibration scheme for sun sensor's signal peak value according to theoretics of atmosphere radiation is provided. The running result of FengYun No. 1C weather satellite in orbit shows that the sun sensor can protect infrared earth sensor effectively. The conclusion is that the sun sensor can be successfully used to measure satellite gesture and also can be used in the infrared earth sensor of FengYun No. 3 weather satellite's in future.

Key words: infrared earth sensor; protection for vision field; sun sensor; signal measurement; validating in orbit

1 引言

红外地平仪是卫星等飞行器姿态控制系统的重要测量部件。其工作原理是利用红外敏感器探测太空冷背景和地球(包括大气圈)热辐射的差异来确定出卫星的姿态。它的可靠性直接关系到卫星姿态是否精确和稳定。

太空温度约为 4 K,地球表面平均温度约为 290 K。地平仪通常选择波长 14~16.25 μm 的 CO_2 吸收带为工作光谱波段,在这个波段地球辐射可看成 230 K^[1] 黑体。采用红外热敏元件的地平仪,能输出 150~200 μV ^[1] 的信号电压。在近地空间,除了作为基准源的地球外,更为明亮的天体是太阳,它的平均表面温度约为 6 000 K。卫星在轨运行中,某些情况下太阳辐射可能进入地平仪红外视场^[2]。在其敏感器工作光谱波段,太阳辐射功率约比地球辐射功率大 300 倍以上,敏感器接受到的功率将在 30 倍以上,这极大地干扰了地平仪的正常工作。因此,对地平仪来说,必须具有抗太阳干扰,保护姿态信息输出的功能。

幅值鉴别法是消除太阳干扰的方法之一。太阳信号进入红外视场后,地平仪的红外地球敏感器将输出远高于正常地球信号幅值的电压。当信号电压超过设定的阈值时,便触发太阳处理电路产生一个信号,利用该信号对红外信息处理电路进行适当控制,使卫星姿态不受干扰。这种方法不增加新的单机,由电子线路来实现,比较简单。但是,该方法只有当太阳辐射进入红外视场时才起作用。另外,由于热敏元件周围介质的热传导效应,在强辐射源下其视场将会扩展,当太阳辐射进入红外扩展视场后,在红外敏感器输出的信号电压不超过阈值情况下,该方法将无法鉴别太阳信号。因此,幅值鉴别法不可能完全消除太阳干扰的影响。

地平仪抗太阳干扰有效的方法之一是为其设立保护视场,即在地平仪上安装一个称为太阳探头的太阳辐射探测组件,其工作原理是将太阳探头的可见光视场重叠到地平仪的红外视场上去,由于太阳探头的视场包容红外视场,这样就可以在红外视场周围建立一个保护视场。卫星在轨运行时,太阳辐射进入红外视场前首先要进入预设

的保护视场,太阳探头的敏感元件探测到这个信号后,输出报警信号以防止出现错误的姿态信息,从而有效地保护红外地平仪正常工作。

风云一号 C 和风云三号气象卫星红外地平仪系统采用增加独立的可见光太阳探头预设太阳保护视场的方案。太阳探头使用非扫描的可见光探测器,其光路与地平仪的红外视场光路相互独立。

2 太阳探头的工作原理与设计

风云一号 C 和风云三号卫星太阳探头是对称局部环形狭缝直射式结构,选用对可见光敏感的硅光电池片作为探测元件。其外形为矩形结构,两个基准面成 90°,分别与光轴垂直和平行,且与红外地平仪基准面一致。图 1 是结构示意图。锥形盖板与底座间形成狭缝,起孔径光阑作用;硅光电池前的圆孔起视场光阑作用。狭缝宽度的取值保证硅光电池工作所需的入射光通量。

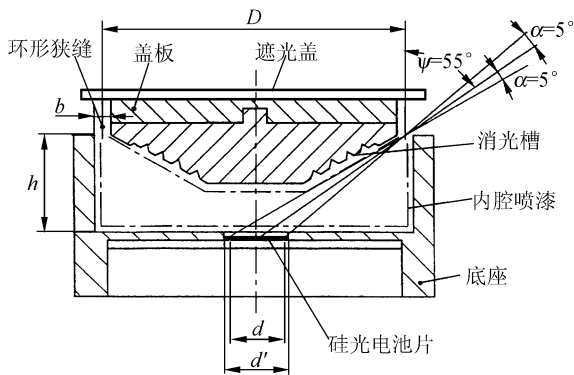


图 1 太阳探头结构示意图

Fig. 1 Sketch map of sun sensor structure

太阳探头可见光视场范围为 $55^\circ \pm 5^\circ$, 各为 40° 的两段对称圆环。可见光视场覆盖地平仪圆锥扫描红外瞬时视场(见图 2)。

当太阳辐射扫过可见光视场时,太阳探头输出图 3 所示的电压信号特性曲线,电压信号与门限电压比较后,转换成高低电平信号,高电平指示太阳辐射进入视场;反之,表明没有太阳辐射。

在参数 D 确定后,可根据可见光视场范围和圆锥扫描角求出光敏面直径 d 和高度 h ,它们之间的关系如下:

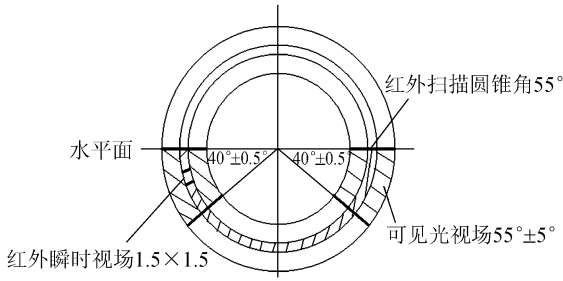


图 2 太阳探头视场

Fig. 2 Sun sensor purview

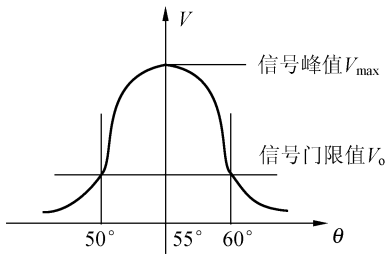


图 3 太阳探头输出信号

Fig. 3 Output signal of sun sensor

$$\begin{cases} \tan(\psi - \alpha) = \frac{D - d}{2h} \\ \tan(\psi + \alpha) = \frac{D + d}{2h} \end{cases}$$

环形狭缝宽度 b 可根据在中心视场处硅光电池片输出的峰值短路电流求取:

$$I_m = R \cdot d \cdot b \cdot (1 - \rho) \cdot \cos \psi.$$

式中: R —硅光电池短路电流灵敏度

d —光敏面直径

b —狭缝宽度

ρ —硅光电池盖板玻璃表面反射率

ψ —入射角

电路设计中,选用低漂移、高输入阻抗、高可靠性的运算放大器;当无信号或信号短路时,电路设计确保比较器的输出为低电平,以保证系统的可靠性。

3 地平仪保护视场的测定

太阳探头的视场必须包容地平仪红外敏感元件响应太阳辐射的视场。因此,首先需要测定红外地平仪响应太阳辐射的视场,作为太阳探头视场确定的依据。为此,建立了测量装置^[3,4],如图 4 所示:硅碳棒发出的辐射经反射镜聚焦到光

阑上,进入平行光管,经平行光管准直后得到模拟的太阳辐射;地平仪探头安装在二维转台上,转动转台即可获得响应信号;工作波段由地平仪探头中的 $14 \sim 16 \mu\text{m}$ 的滤光片限定。图中光阑孔直径 d 由所需模拟的太阳视直径 ω 和平行光管的焦距 F 确定: $d = \omega_{\text{sun}} \cdot F$,为提高系统的信噪比,在光阑前加 10 Hz 的调制盘。从探头输出的电信号经 10 Hz 选频放大器放大后用示波器显示。

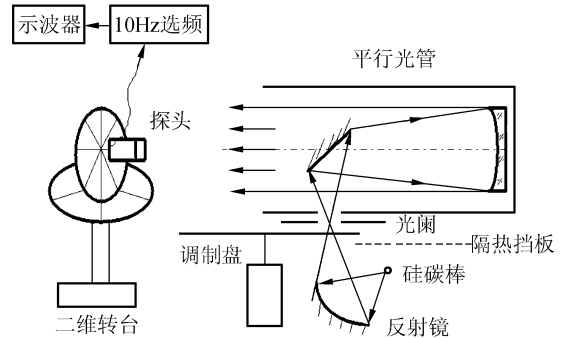


图 4 太阳探头视场测定装置

Fig. 4 Device for determine vision field range of sun sensor

测量过程如下:

(a) 测定硅探棒的等效黑体温度。在 $14 \sim 16 \mu\text{m}$ 太阳等效黑体温度约为 5 000 K,根据普朗克黑体辐射公式:

$$W_\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1},$$

其中: $c_1 = 3.74 \times 10^4 \text{ W/m}^2$

$$c_2 = 1.438 \times 10^4 \mu\text{K}$$

$$\text{则: } N_s = \frac{1}{\pi} \int_{14 \mu\text{m}}^{16 \mu\text{m}} W_\lambda(T) d\lambda$$

求得该波段的太阳辐射率:

$$N_s = 0.148 \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2).$$

地球大气的 CO_2 吸收带以 230 K 等效黑体温度计算,在 $14 \sim 16 \mu\text{m}$ 内的辐射率:

$$N_e = 4.9 \times 10^{-4} \text{ W}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2).$$

地平仪探头接收到的目标辐射功率 P 与目标辐射率 N 和目标视场 Ω 两者之积成正比,即 $P = N \cdot \Omega \cdot \eta$ 。地平仪红外探头的视场为 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$,则红外探头看到太阳与看到地球时输出的信号电压之比为:

$$\frac{V_s}{V_d} = \frac{N_s \cdot \Omega_s}{N_d \cdot \Omega_d} = \frac{0.148 \times (32')^2 \cdot \frac{\pi}{4}}{4.9 \times 10^{-4} \times (1.5^\circ)^2} = 30$$

依据实验结果,在地球模拟器辐射下,红外探头输出信号电压 $V_d = 300 \mu\text{V}$,看到太阳时,输出的信号电压应为: $V_s = 300 \mu\text{V} \times 30 = 9 \text{ mV}$ 。

图4中,平行光管焦距为 0.5 m ,选 $d = 4.65 \text{ m}$ 的光阑。这样得到的光源视直径等于太阳光源视直径 $9.3 \text{ mm} = 32'$ 。调节硅碳棒加热电压,使选频放大器输出 $V_1 = 3 \text{ V}$ 。选频放大器放大倍数 $A_\mu = 1400$,红外探头输出的电压信号:

$$V_g = V_1 / A_\mu = 2.14 \text{ mV}$$

硅探棒的辐射率 N_g :

$$N_g = \frac{V_g \cdot \Omega_s}{V_s \cdot \Omega_g} N_s = \frac{2.14}{9} \times 0.148 = 3.5 \times 10^{-2} \text{ W/sr} \cdot \text{cm}^2$$

得硅碳棒在 $14 \sim 16 \mu\text{m}$ 的等效黑体温度为 1076 K 。

(b)由于在 $14 \sim 16 \mu\text{m}$ 太阳等效黑体温度约为 5000 K ,所以选择 $d = 9.3 \text{ mm}$ 的光阑,模拟太阳辐照度。模拟太阳视直径的增加将使地平仪在模拟测试时受模拟太阳干扰的范围加大,如果在加大视场模拟太阳下的干扰范围能满足要求,那么地平仪在外层空间真实工作时受到太阳的干扰范围也应满足使用要求。

(c)使用图4的实验装置,对红外地平仪探头进行视场测量,确定了太阳探头的视场设计指标。

根据实验结果,太阳探头可见光视场选定为 $\pm 5^\circ$,以确保太阳探头可见光视场能够包容地平仪红外视场。

4 太阳探头峰值信号的标定

太阳探头采用对可见光敏感的硅光电池片做检测元件,由于生产工艺的限制,不同硅光电池片的光电流灵敏度是不一致的。同时,每个太阳探头的结构也不可能完全一样。因此,需要测定每个太阳探头响应太阳辐射的电压-视场特性曲线,根据该特性曲线以及太阳探头视场响应范围,获取信号峰值电压。地球上被厚厚的大气层所包围,太阳辐射穿过大气层时,受到大气的吸收、散射、反射等作用而会不断削减,使得到达地面的辐射小于大气外层的辐射。硅光电池响应的可见光辐射是太阳总辐射的一部分,也受到大气的影。在地面,采集太阳光照所测到的太阳探头信号值与其在轨运行时的实际值有较大差别,需要对所

测值进行修正,推算出实际信号电压^[5-11]。

设自天顶角 θ 方向到达地面与日光垂直面的单色直接辐射为 $S_{\lambda,m}$,相应的大气外层与日光垂直面的单色太阳直接辐射为 $S_{\lambda,0}$;根据比尔定律:

$$S_{\lambda,m} = S_{\lambda,0} e^{-m\tau_\lambda(0)}, \quad (1)$$

式中 $\tau_\lambda(0)$ 表示 θ 角为零(太阳在天顶)时的整个大气光学厚度,在晴空条件下,它是大气的分子散射、大颗粒散射、水汽和臭氧等气体吸收的大气光学厚度之和,在可见光波段 $\tau_\lambda(0)$ 随波长的变化不大,计算中,采用可见光波段的平均大气光学厚度 τ ;大气质量数为 m ,若假定地表为平面,大气上界平行于地面的平面,则 $m = \sec(\theta)$ 。这种估算当 $\theta < 60^\circ$ 时,相当精确^[6-8](见图5)。

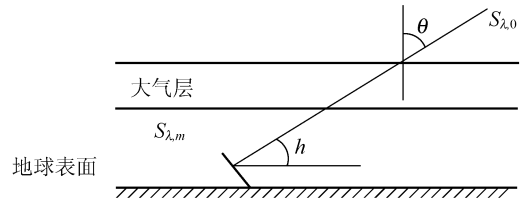


图5 太阳辐射穿越大气示意图

Fig. 5 Sketch map of sun radiation passing atmosphere

一般情况下,所测量的是太阳高度角 h ,且 $h = 90^\circ - \theta$,因此式(1)可写成:

$$S_{\lambda,m} = S_{\lambda,0} e^{-\tau \sec(90^\circ - h)} = S_{\lambda,0} e^{-\tau / \sin(h)}, \quad (2)$$

设 S_0 为外层空间可见光波段的太阳辐射, S_d 为地面可见光波段的太阳辐射。则:

$$S_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda,0} d\lambda, \quad (3)$$

$$S_d = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda,m} d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda,0} e^{-\tau / \sin(h)} d\lambda, \quad (4)$$

由图5知,地面测得的信号电压为:

$$V_d = -k S_d R_f \quad (k \text{—硅光电池电流灵敏度}), \quad (5)$$

相应大气层外的信号电压为:

$$V_0 = -k S_0 R_f, \quad (6)$$

联立式(3)、(4)、(5)、(6)得:

$$\frac{V_d}{V_0} = e^{-\tau / \sin(h)}, \quad (7)$$

取式(7)两边对数得:

$$\ln V_d = \ln V_0 - \tau / \sin(h), \quad (8)$$

式(8)相当于一次线性方程:

$$y = a + bx$$

式中, $x = 1 / \sin(h)$; $y = \ln V_d$

$$a = \ln V_0 \quad b = -\tau$$

在不同的太阳高度角下,测取 n 个 V_d ,得到 n 个 $\ln V_d$,以 $\ln V_d$ 为纵坐标, $1/\sin(h)$ 为横坐标,将 n 组 (x, y) 通过数值处理,回归出一条直线,可以从直线与 y 轴的交点得到 $\ln V_0$ 值,求出 V_0 。

5 在轨运行结果

本文的研究成果已在风云一号 C 星红外地平仪系统中采用。从 1999 年 5 月 10 日卫星发射

入轨以来,卫星姿态运行正常,红外地平仪工作正常。风云一号 C 卫星实际运行和在轨测试表明:太阳探头工作正常,有效地保护了红外地平仪视场。证明地平仪太阳探头可见光视场以及太阳探头的信号测量都是准确有效的。

太阳探头在风云一号 C 气象卫星中的成功使用,表明其研制原理和定标方案是切实可行的。太阳探头将同样运用于即将发射的风云三号气象卫星中。

参考文献:

- [1] 龚惠兴. 外层空间太阳敏感器背景干扰特性的估计[J]. 红外物理与技术, 1978, 5: 18-20.
GONG H X. An background noises characteristic estimate about outer space sun sensor [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 1978, 5: 18-20. (in Chinese)
- [2] 李春艳, 李怀锋, 孙才红. 高精度星敏感器天文标定方法及观测分析[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(4): 558-563.
LI CH Y, LI H F, SUN C H. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 558-563. (in Chinese)
- [3] 叶松, 方勇华, 洪津, 等. 空间外差光谱仪系统设计[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(6): 959-964.
YE S, FANG Y H, HONG J, et al.. System design of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 959-964. (in Chinese)
- [4] 薛沐雍. 红外地平仪受太阳干扰的弱光源模拟[J]. 控制工程, 1982, 4: 25-27.
XUE M Y. The simulation of feebleness lamp-house of being disturb about infrared earth sensor[J]. *Contr. Eng.*, 1982, 4: 25-27. (in Chinese)
- [5] 李幼平, 禹秉熙, 王玉鹏, 等. 成像光谱仪辐射定标影响的测量链与不确定性[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(5): 822-828.
LI Y P, YU B X, WANG Y P, et al.. Measurement chain of influence quantities and uncertainty of radiometric calibration for imaging spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 822-828. (in Chinese)
- [6] M. V. 宗贝克. 空间天文学和天体物理学手册[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
ZOMBECK M V. *Handbook of Space Astronomy and Astrophysics* [M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- [7] 纪红. 红外技术基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
JI H. *Foundation and Application of Infrared Technology* [M]. Beijing: Science Press, 1984. (in Chinese)
- [8] 王衍明. 大气物理学[M]. 山东: 青岛海洋大学出版社, 1993.
WANG Y M. *Atmospheric Physics* [M]. Shandong: Qingdao Ocean University Press, 1993. (in Chinese)
- [9] SHUN L L, HONG L F. An improved atmospheric correction algorithm for hyperspectral remotely sensed imagery [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2004, 1(2): 112-117.
- [10] 郝允祥, 陈遐举, 张保洲. 光度学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1988.
HAO Y X, CHEN X J, ZHANG B ZH. *Luminosity Science* [M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 1988. (in Chinese)
- [11] E. W. 伍拉德, G. M. 克莱门斯·球面天文学[M]. 北京: 测绘出版社, 1984.
WOOLARD E W, CLEMENCE G M. *Sphere Astronomy* [M]. Beijing: Topography Press, 1984. (in Chinese)

作者简介: 夏项团 (1969—), 男, 安徽人, 中国科学院上海技术物理研究所副研究员, 博士研究生, 主要从事卫星姿态测量系统、航天红外光电遥感仪器等方面的研究。E-mail: xxxt@mail. sitp. ac. cn

(本栏目编辑 严寒)