

# 极轨道卫星上测量太阳常数的新方法

方 伟 禹秉熙

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

**摘 要** 该文提出了一种在极轨道太阳同步卫星上,利用指向太阳矢量方向安装的绝对辐射计,以非跟踪方式测量太阳常数的方法。非跟踪模式下简化模型热力学微分方程解与跟踪模式的解形式相似,微机模拟画出二模式下的能量响应曲线,二曲线在最高点基本重合,表明这种方法同样能够达到跟踪太阳进行测量的精度,且结构简单,测量方便。

**关键词** 太阳常数,绝对辐射计,极轨道卫星,测量

## 1 引 言

太阳常数指的是地球与太阳之间平均距离(AU——一个天文单位距  $1.496 \times 10^8 \text{km}$ )上地球大气层外太阳光辐射的全(电磁波)辐射照度,单位用  $\text{Wm}^{-2}$ 表示。由于地球以椭圆轨道绕太阳运动,地球与太阳之间的距离是变化的,卫星上测量的是太阳光全辐射照度,根据测量日期(年、月、日)的实际距离可换算出太阳常数。太阳常数表示太阳本身的辐射能量特性。

地球上的能源除了核能、地热和火山等之外都直接或间接地来自太阳辐射。做为地球系统的主要外部能源,太阳光辐射对地球的大气、气候与气象的变化、生态环境影响巨大。太阳常数在短时间尺度上的变化及其对地球环境的影响尚不清楚,精确地测量和长期监测太阳常数已成为研究全球环境变化的重要课题。太阳常数监测器就是精确测量太阳常数及其变化的仪器。由于大气对太阳光辐射的吸收及其它原因,在地面上或大气中精确地测量太阳常数是困难的,最有效的办法是利用航天器在大气层外测量。美国在70年代后期曾在 Nimbus-6卫星上首次进行过太阳常数的测量<sup>[1]</sup>,此后1978年到1993年间在 Nimbus-7、SMM(太阳活动年任务卫星)、ERBS(地球辐射收支卫星)、NOAA-9和 NOAA-10五颗卫星上进行了太阳常数的测量<sup>[2-6]</sup>。美国在EOS计划中1999年要发射 ACRIMSAT卫星,利用有源腔型辐射计辐照监测器(ACRIM-Active Cavity

Radiometer Irradiance Monitor)将进行15年的太阳常数监测<sup>[7]</sup>。

太阳常数监测器都是腔型绝对辐射计,利用快门使太阳光入射和电功率加热交替定标的方式测量太阳光辐照度的绝对量值。携带仪器的卫星在轨道上运动过程中,太阳矢量相对卫星是变化的,为了使太阳光辐射始终沿仪器的光轴方向入射,太阳常数监测器需要跟踪太阳的平台和驱动装置。

我们提出了在极轨道太阳同步卫星上,利用指向太阳矢量方向安装的太阳常数监测器,于太阳越顶时刻,在太阳光入射角变化的过程中,不跟踪太阳测量的新方法,经理论分析和模拟计算表明能够达到同样的测量精度。

## 2 测量原理

### 2.1 一般的测量方法

测量太阳常数用的绝对辐射计的原理、结构和测量方式基本上相同或类似。利用双腔补偿型电校准辐射计,带快门太阳光入射辐射加热和电加热交替校准的方式进行测量<sup>[8-10]</sup>。绝对辐射计的结构如图1。

在卫星上仪器跟踪太阳,光线始终是沿绝对辐射计光轴(即垂直主光栏面)入射的情况下,主腔接收到的辐射功率  $P_0$ 为:

$$P_0 = E \cdot A \cdot \alpha \quad (1)$$

式中  $E$ 为太阳光在辐射计主光栏上的辐照度( $\text{Wcm}^{-2}$ );  $A$ 为主光栏的面积( $\text{cm}^2$ );  $\alpha$ 为主腔的有效

收稿日期: 1997年3月31日

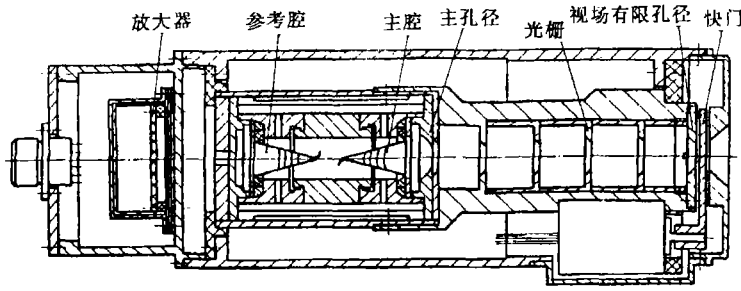


图1 绝对辐射计结构简图

Fig.1 Diagram of the absolute radiometer

吸收率。

当快门打开,绝对辐射计接收太阳光  $P_0$  以后主腔就升温,其升温 ( $\Delta T$ ) 的时间变化可根据绝对辐射计的热力学微分方程的求解获得:

$$\begin{cases} C(d\Delta T / dt) + K\Delta T = P_0 \\ \Delta T = 0, t = 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta T = \frac{P_0}{K}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3)$$

其中  $C$  为主腔的热容量,  $K$  为主腔同热沉及环境的热传导系数,  $\tau = C / K$  定义为辐射计的时间常数。

辐射计接收太阳辐射功率  $P_0$  的时刻  $t = 0$  开始,其主腔的温度逐步升高,当  $t \rightarrow \infty$  时,腔温升至最大恒定值  $\Delta T_0 = P_0 / K$ 。当时间经过  $t = \tau = C / K$  时,达到  $\Delta T(\tau) = 0.63\Delta T_0$ ,即最大恒定温度的 63%。当  $t = 10\tau$  时,  $\Delta T(10\tau) = 0.99995\Delta T_0$ ,因此,当  $t = 10\tau$  或  $t = 15\tau$  以上即可认为达到热平衡的最大恒定值。我们研制的绝对辐射计的时间常数  $\tau = 8$  秒,所以打开快门观测太阳辐射的时间  $t = 120s$  就足够了。

测量方法:太阳光入射绝对辐射计的内在主腔电加热丝上同时还加了较低电压  $V_0$ ,主腔电加热丝的电阻  $R$ (已知),那么电加热的功率为  $\frac{V_0^2}{R}$ ,因此观测太阳的时间内主腔接收的总功率为  $P_0 + \frac{V_0^2}{R}$ 。观测阶段(时间大于  $t = 15\tau$ )以后关闭快门,主腔电加热丝上加较高电压  $V$ (电校准阶段),这时加热主腔的功率只有  $\frac{V^2}{R}$ ,也经过同样时间  $t = 15\tau$ ,使主腔上的温度传感器监测的温度同观测阶段相同,即

$$P_0 + \frac{V_0^2}{R} = \frac{V^2}{R} \quad (4)$$

解(1)和(4)联立方程即可求得太阳光的辐照度

$$E = \frac{V^2 - V_0^2}{R \cdot A \cdot \alpha} \quad (5)$$

### 2.2 太阳入射变化的情况下测量方法

极轨道太阳同步卫星的轨道平面和太阳时圈平面之间的夹角是固定不变的。在太阳同步卫星上把观测太阳的绝对辐射计指向太阳方向倾斜安装(图

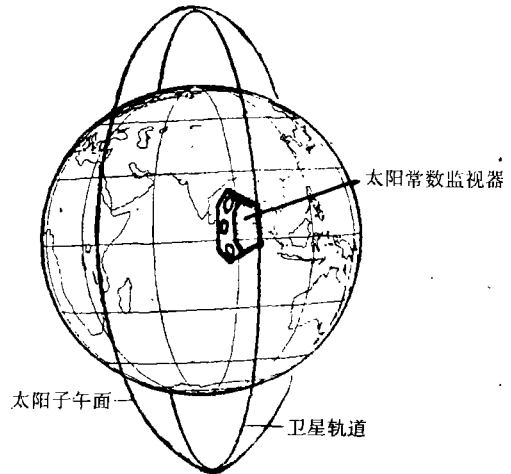


图2 太阳常数监视器在轨运行示意图

Fig.2 Diagram of solar constant monitor moving in orbit

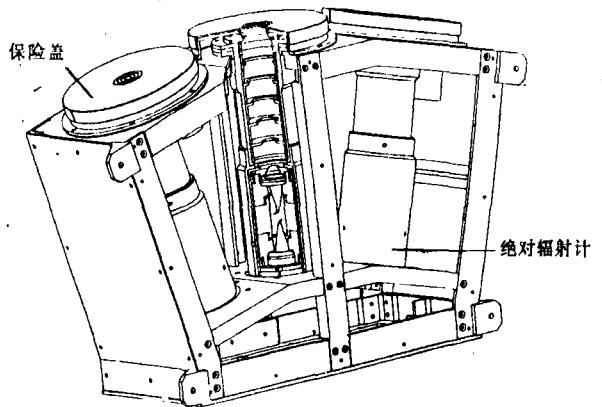


图3 太阳常数监视器结构简图

Fig.3 Diagram of the solar constant monitor

2)。那么卫星在轨道上运动时总有时刻太阳光是按其角速度越过绝对辐射计的视场,如果太阳在绝对辐射计的视场角内越过的时间大于观测太阳所需要的时间(大于  $15\tau$ )就可以测量太阳常数。但是,这时辐射计接收的太阳光辐射是按卫星的角速度变化的,需要重新建立绝对辐射计的热力学微分方程,求解  $\Delta T$ 。

假设:极轨道太阳同步卫星,轨道高度为  $H = 900\text{km}$ ,周期  $T = 102\text{min}$ (风云-1号),卫星发射窗口为 10:30AM,太阳时圈平面和轨道平面的夹角为  $22.5^\circ$ ,卫星的角速度为

$$\omega = \frac{360^\circ}{102\text{min}} = 3.5^\circ / \text{min} = 0.0652^\circ / \text{s}.$$

观测仪器为半视场角  $\theta = 7.5^\circ$  的绝对辐射计,3 个绝对辐射计线列排布,中间辐射计轴线同另两个辐射计的轴线成  $\pm 15^\circ$ (图 3)。在卫星上把 3 个绝对辐射计轴线平面同轨道平面成  $22.5^\circ$  倾斜朝向太阳方向安装(图 2)。这样 3 个辐射计轴线平面同太阳时圈平面平行,卫星飞行过程中总有时刻太阳分时越过 3 个辐射计视场,越过照射的时间为  $15^\circ / (3.5^\circ / \text{min}) = 4.29\text{min} = 257\text{s}$ 。3 个绝对辐射计也间隔 257s 分时观测太阳。这 3 个绝对辐射计是独立的,分别在各自视场上太阳越顶时刻观测,测量的情况是相同的,所以每一圈轨道可测量 3 次。3 个绝对辐射计测量的数据可互相验证,提高太阳常数测量的精度和准确度。也可作为冗余设计,保存一个绝对辐射计备用,如若其中一个或两个出现故障,还可利用备用辐射计观测太阳获取数据。

### 3 太阳光变角入射时辐射计热力学微分方程

#### 3.1 绝对辐射计上太阳光辐射功率的变化

绝对辐射计的视场半角是  $7.5^\circ$  时,太阳光越过其视场过程中辐射照射的变化情况如图 4。当太阳入射角(主光栏法线即辐射计轴线与太阳矢量夹角)大于  $|\pm 9.65^\circ|$  时,太阳光未照射到主光栏。当太阳入射角  $|\pm 9.65^\circ| \leq \theta < |\pm 5.14^\circ|$  时,太阳光部分地照射主光栏,因而辐射计主腔开始接收太阳光辐射。通过主光栏后辐射计主腔上接收的辐射功率为主光栏平面和视场光栏平面在垂直轴线平面上投影,主光栏和视

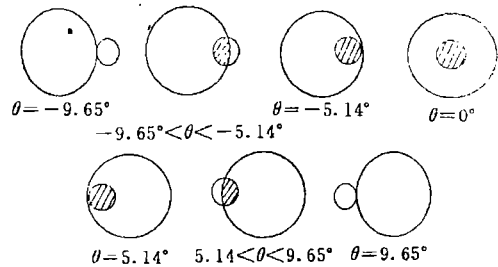
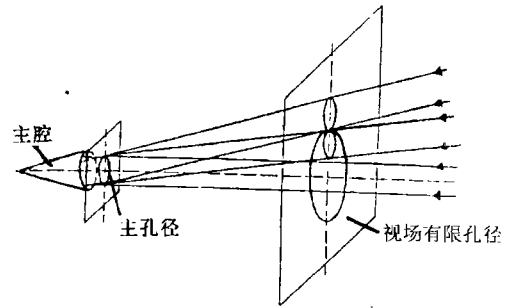


图4 辐射照射示意图

Fig.4 Diagram of irradiance incidence

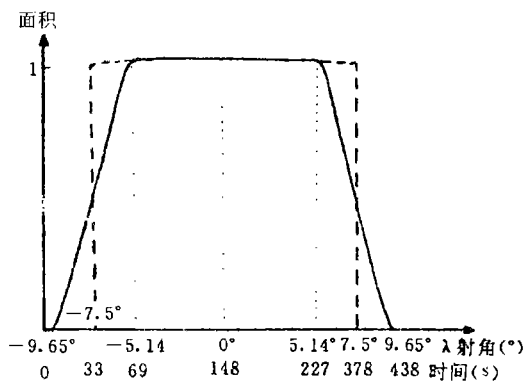


图5 主光栏接收面积随角度变化关系图

Fig.5 The relationship between received area of primary aperture and incident angle

场光栏圆盘形成的两个椭圆盘的相交部分的面积乘上太阳辐照度,其函数关系比较复杂,见文献<sup>1)</sup>。

当太阳光入射角  $\leq |5.14^\circ|$  时,太阳光全照满主光栏。但主光栏圆盘在垂直轴线平面上的投影为椭圆。通过主光栏后主腔接收的太阳光辐射功率为

$$P(\theta) = E \cdot A \cdot \alpha \cos \theta = P_0 \cos \theta \quad (6)$$

只有  $\theta = 0$  时太阳光沿轴线即垂直于主光栏面入射  $P(0) = P_0$ 。

在辐射计主光栏上太阳光随入射角的变化情况如图 5(令最大面积为 1)。把  $\theta = -9.65^\circ$  取入射辐射的起始时间  $t = 0$ ,以角速度  $\omega = 0.0652^\circ / \text{s}$  运动时,入射角相应的时间表示在横坐标下方。在  $-5^\circ \leq \theta \leq 5^\circ$  角度范围内入射辐射同  $\theta = 0^\circ$  恒定辐射最大

1) 石磊, 太阳常数的变角测量方法的初步研究. 中国科学院长春光学精密机械研究所硕士学位论文, 1996.

相差  $\cos 5^\circ = 0.996$ .

### 3.2 太阳光变角入射的辐射热力学微分方程

绝对辐射计上入射的辐射功率是随时间变化的,其热力学微分方程为

$$\begin{cases} C(d\Delta T / dt) + K\Delta T = P(t) \\ \Delta T = 0, t = 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (7)$$

求解得

$$\Delta T(t) = \frac{1}{C} e^{-t/\tau} \left[ \int P(t) e^{t/\tau} dt + \text{const} \right] \quad (8)$$

$P(t)$ 是比较复杂的函数,很难求出  $\int P(t) e^{t/\tau} dt$  的解析式,只能利用近似的数值积分法求解。由图 5 可看出在  $\theta = \pm 7.5^\circ$  做垂线,所围成的准矩形与实际的准梯形面积近似相等,所以我们可以把入射光辐射函数简化为  $P(t) = P_0 \cos \theta$ ,

$$\theta = (\omega t - 7.5^\circ) \begin{cases} t = 257 \text{ 秒} \\ t = 0 \end{cases}$$

式中  $\omega = 3.5^\circ / \text{min} = 0.0652^\circ / \text{s}$ ,这样方程(2)应为

$$\begin{cases} C(d\Delta T / dt) + K\Delta T = P_0 \cos(\omega t - 7.5^\circ) \\ \Delta T = 0, t = 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (9)$$

求解得:

$$\Delta T = \frac{P_0}{K} \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega C}{K}\right)^2} \left[ \cos(\omega t - 7.5^\circ) + \frac{\omega C}{K} \sin(\omega t - 7.5^\circ) \right]$$

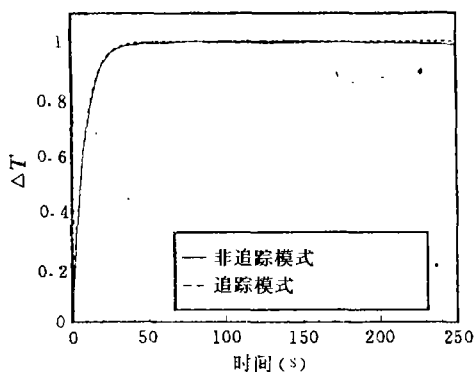


图6 主腔光功率响应图

Fig.6 The relationship of light power response received by primary cavity

$$- \left[ \cos 7.5^\circ - \frac{\omega C}{K} \sin 7.5^\circ \right] e^{-t/\tau} \quad (10)$$

公式(10)既是非跟踪测量方法的热力学微分方程简化模型的解。由于  $\frac{\omega C}{K}$  为  $10^{-2}$ 量级,所以  $\frac{\omega C}{K} \sin(\omega t - 7.5^\circ)$ 以及  $\frac{\omega C}{K} \sin 7.5^\circ$ 很小,可近似看作 0,

(10)式可写成

$$\Delta T \approx \frac{P_0}{K} \left[ \cos(\omega t - 7.5^\circ) - \cos 7.5^\circ e^{-t/\tau} \right] \quad (11)$$

当  $\theta = 0$  时,  $\cos(\omega t - 7.5^\circ) = 1$ ,则(7)式为

$$\Delta T \approx \frac{P_0}{K} \left[ 1 - \cos 7.5^\circ e^{-t/\tau} \right] \quad (12)$$

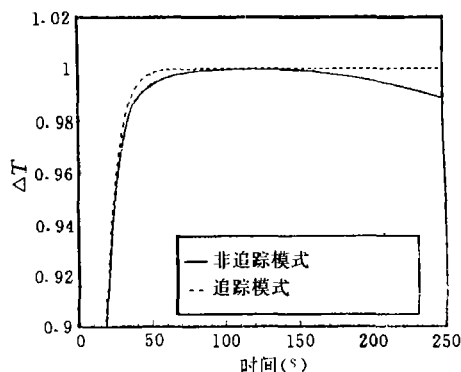


图7 光功率响应局部放大图

Fig.7 Amplified drawing in part of light power response received by primary cavity

(12)与(3)表达形式类似,只是 e 指数前差一个系数。这说明非跟踪与跟踪能量响应是类似的。

令  $\frac{P_0}{K} = 1$ ,用微机模拟画出(10)与(3)公式的曲线(图6)。可以看出二曲线基本重合,为清楚起见,局部放大图形,见图7。由图7可看出二曲线最高点基本重合,然后又逐渐分开。二曲线的最高点只相差 0.04%,而太阳常数监测器的测量精度为 0.1%,这个很小的偏差在测量数据上很难反映出来。实际测量时只需记录下测得曲线的最大值,然后跟踪这个数值。测得的数据再用这个偏差量进行修正。之所以可采用这种简化模型,其主要原因是我们电跟踪的是光入射响应的最大值,与光入射响应过程关系不大。

## 4 结 论

太阳常数非跟踪测量方法不需要跟踪装置,使仪器结构简单、可靠性高、重量轻、功耗低、测量方

便,更适合于在宇宙空间环境进行长期测量。非跟踪模式简化模型热力学微分方程的解与跟踪模式的解形式类似,微机画出的模拟曲线在最高点只相差 0.04%,也证明了这种非跟踪测量方法的可行性。

### 参 考 文 献

- [1] W. L. Smith. Nimbus-6 earth radiation budget experiment. *Appl. Opt.* 1977, **16**(2): 306—318.
- [2] A. Mecherikunnel. A comparative Study of Solar Total Irradiance Measured by Active-Cavity Radiometers. *Metrologia*, 1993, **30**(4): 271—273.
- [3] R. B. Lee III. Solar Irradiance Measurement: Minimum through Maximum Solar Activity. *Metrologia*, 1991, **28**(3): 265—268.
- [4] Ann Mecherikunnel. Calibration of Eos Multispectral imaging sensors and solar irradiance variability. *SPIE*, 1991, **1493**: 292—299.
- [5] R. B. Lee III. Long-term total solar irradiance variability during sunpot sytle 22. *J. Geophys Res*, 1995, **100**(2):

1667—1675.

- [6] Richard K. King. Analyses of long-term solar irradiance data with wavelet transforms. *SPIE*, 1994, **2242**: 454—462.
- [7] NASA-Goddard Space Flight Center. MTPE / EOS Reference Handbook, 1995, 102—103
- [8] Richard C. Willson. Active Cavity Radiometer Type IV. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(2): 179—188.
- [9] Richard C. Willson. Active Cavity Radiometer Type V. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(19): 3256—3257.
- [10] 方伟, 金锡峰. 一种双锥腔补偿型绝对辐射计的研制. *太阳能学报*, 1992, **13**(4): 406—411.

### 作 者 简 介

方伟,女,1965年1月生。1987年毕业于山东大学光学系技术光学专业,获理学学士学位。现为助研,1995年8月攻读在职硕士学位。主要从事光辐射测量及遥感工作。参加了几项重大攻关课题的研究工作,撰写20余篇论证报告和工作报告。

## A New Method of Measuring Solar Constant on Polar-Orbit Satellites

Fang Wei Yu Bingxi

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanic, Chinese Academy of Sciences Changchun 130022)

**Abstract** This Paper introduces a new method of measuring solar constant on sun-synchronous polar orbit satellites. The method is different from the traditional tracing mode which is usually used to measure solar constant while satellite moving relative to the sun. The solar constant monitor is made up of three same absolute radiometers with  $15^\circ$  field-of-view which are mounted on one plane. The middle one makes  $15^\circ$  angle with respect to the other two. Because the angle between the orbit plane and solar meridian plane is stationary for sun-synchronous polar orbit satellites, We mount the plane with three absolute radiometers which parallel the solar meridian plane. Sometimes the sunlight overpass the field-of-view of three absolute radiometers respectively with its angle velocity when satellite moving in its orbit. Since in non-tracing mode the change of primary aperture area with angle is different from that of tracing mode. We use a simplified model in which the area variation with angle is expressed by cosine function in the range of  $-7.5^\circ$  to  $+7.5^\circ$ . Formula obtained by differential equation of thermodynamics of simplified model in nontracing mode is similar with that in tracing mode. The highest value which is only needed to record and trace when electric power replace light power is only 0.04% lower than that of tracing mode. The precision of our method could reach the same order as the tracing mode, but much simpler in structure and facility for measurement.

**Key words** Solar constant, Absolute radiometer, Polar orbit satellite, Measure