

太阳辐射监测仪观测角度变化的修正

张佳琦^{1,3} 齐瑾² 方伟³ 邱红² 陆景彬¹

¹吉林大学物理学院, 吉林长春 130061

²国家卫星气象中心, 北京 100081

³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130031

摘要 研究了在卫星上太阳光扫过太阳辐射监测仪视场期间, 太阳入射角的时间变化函数和在这种变角入射情况下辐射计接收腔的温度响应情况以及测量太阳辐照度的观测角变化修正问题。太阳辐射监测仪上的绝对辐射计是在腔上接收辐射功率发生微小变化的情况下, 关闭快门进行电功率定标获得太阳辐射照度的, 将腔接收辐射功率的这种微小变化作为角度修正因子对太阳辐照值进行了修正。风云三号卫星上两年来测得的 2×10^4 多组数据进行这种观测角变化修正后, 获得的太阳常数值为 $1368 \pm 4 \text{ W/m}^2$ 。其不确定度为 0.3%, 同世界气象组织推荐的公认值 $1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$ 及欧美国家至今在各类卫星上测量值相一致。

关键词 测量; 太阳辐射监测仪; 观测角度修正; 腔温响应函数; 太阳常数; 风云三号气象卫星

中图分类号 O432 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0212003

Correction of Observation Angle in Solar Radiation Monitor

Zhang Jiaqi^{1,3} Qi Jin² Fang Wei³ Qiu Hong² Lu Jingbin¹

¹College of Physics, Jilin University, Changchun, Jilin 130061, China

²National Satellite Meteorological Center, Beijing, 100081

³Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130031, China

Abstract During the sun's sweep of the field of view of solar radiation monitor, varying function of incident angle and temperature response of radiometer receiver cavity is studied. Calibration of time-varying incident angle for solar radiation monitor is also discussed. The absolute radiometer of solar radiation monitor detects small changes of the radiation through electrical calibration. We take radiation power of these small changes as a factor to revise solar radiation. FY-3 satellite has measured more than 2×10^4 sets of data in the past two years. The data is amended through the changes of observation angle and the obtained value of solar constant is $1368 \pm 4 \text{ W/m}^2$, and the uncertainty is 0.3%. This result is in agreement well with the value of $1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$ which is recommended by World Meteorological Organization and data measured on other satellites in the same period.

Key words measurement; solar radiation monitor; incident angle correction; cavity-temperature response function; solar constant; FY-3 meteorological satellite

OCIS codes 120.0120; 120.6650; 120.6085; 120.6780

1 引言

总的太阳辐射照度定义为: 地球大气层外表面所接收的太阳能量的平均值(单位: W/m^2)。当总

的太阳辐射照度为一天文单位的地球-太阳距离(AU)时, 这个值被称为太阳常数。太阳常数反映太阳本身的辐射能量特性, 它随时间而发生变化。

收稿日期: 2010-05-21; 收到修改稿日期: 2010-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(40675083)资助课题。

作者简介: 张佳琦(1985), 女, 硕士研究生, 主要从事风云三号卫星太阳辐照数据处理方面的研究。

E-mail: zhangjiaqi321@yahoo.cn

导师简介: 方伟(1965), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间遥感仪器的研制方面的研究。

E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

监测太阳常数对了解全球环境和气候变化具有重要意义。

对太阳总辐射照度(TSI)的监测开始于1978年11月Nimbus7^[1]发射升空所携带的电力校准辐射计。从1980年早期SMM的发射升空到最近的30年里,欧美国家发射了一系列的卫星平台携带各种不同的仪器^[2~7],对太阳辐射进行了不间断、重叠的测量,期间至少有两个太阳辐射监测仪器在太空中同时工作。

因为测量采用了不同类型的仪器、操作模式和数据处理方法,为了便于数据比对,在1970~1975年世界辐射中心(WRC)用9种类型15台绝对辐射计进行比对,取其加权平均值建立了世界辐射基准(WRR)^[8]。为了传播WRR,以确保世界范围的辐射测量值的一致性,WRC每5年举办一次国际日射强度计比对,通过比对实验校正或标定各国的辐射测量仪器。由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的太阳辐照绝对辐射计SIAR^[9],参加了2000年和2005年的国际日射强度计比对,与同期国外卫星上测量数据在0.2%以内吻合。2008年6月,采用3台SIAR构成的风云三号卫星太阳辐射监测仪开始了长期的在轨测量。从仪器开机至今已经获得2×10⁴多组有效数据。

2 太阳辐射监测仪测量原理

风云三号气象卫星上的太阳辐射监测仪上采用指向太阳安装的宽视场绝对辐射计,在飞行中太阳越过辐射计视场期间测量太阳辐照度。太阳辐射监测仪由3个相同的、同卫星X轴(卫星轨道面)分别成AR₁22,AR₂27,AR₃32的绝对辐射计构成。卫星工作寿命期间太阳光矢量同卫星轨道面的夹角在15~38°之间变化。而3个绝对辐射计测量太阳辐照度的视场均为9.2°,这样能够保证太阳辐射监测仪在轨工作期间任何时候3台辐射计中必有一台能够测得太阳辐照度。

2.1 绝对辐射计工作原理

绝对辐射计的工作原理是利用光电等效性,用可精确测量的电功率来标定未知的入射的光辐射功率。通过太阳光辐射和电功率加热交替的方式标定太阳光辐照度的绝对量值^[9]。电定标公式为

$$E = \frac{P_H - P_L}{A} = \frac{V_e^2 - V_L^2}{RA}, \quad (1)$$

式中E为太阳光在辐射计主光栏上的辐照度(W/cm²),A为主光栏的面积(cm²),V_e为主腔的有效

吸收系数,P_H为电标定阶段的腔上所加功率(W),P_L为光照阶段腔上所加低电压偏置功率(W)。

如果设V_L=0,那么当快门打开,绝对辐射计接收太阳光(或加热电功率为P_H)以后主腔就升温,其温度T(t)随时间的变化可根据绝对辐射计的热力学微分方程的求解获得

$$\begin{cases} C[dT(t)/dt] + KT(t) = P_H \\ T_H = \frac{P_H}{K}, \quad t = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

$$T(t) = \frac{P_H}{K} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] = T_H \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (3)$$

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

辐射计接收太阳光辐射功率P₀的时刻t=0开始,其主腔的温度逐步升高,当t=τ时,腔温升至最大恒定值T_H。当t=10τ时,T(10τ)=0.99995T_H,因此,当t=10τ以上即可认为达到热平衡的最大恒定值,可进行电定标测量E值。

2.2 太阳常数计算方法

由(1)式计算得到的E值是太阳辐照数据原始值。需经过冷空间补偿修正和角度修正后方可得到太阳辐射照度值,即

$$E = (E_0 + E_L), \quad (4)$$

式中E是太阳辐射照度,E₀是太阳辐照原始值,E_L是冷空间值,α是角度修正系数。

当宽视场绝对辐射计测量太阳辐射时,在其视场上还有太空冷背景(4 K)辐射同绝对辐射计常温(约290 K)辐射的能量交换,表现为负辐射。所以在测量值上还要加冷空间辐射值^[10]。

当太阳光入射辐射计主光栏进入锥腔的辐射通量为P₀时,如果太阳光是沿辐射计光轴即垂直主光栏面方向n入射时,太阳辐照度E=P₀/A,对应图1(a)。当太阳光同主光栏面垂直方向n成θ角入射时,太阳辐照度E=

$$\frac{P_0}{A \cos \theta}, \quad \text{对应图1(b)。}$$

如果太阳光相对于n以恒定的θ角入射时,测得的辐照度值上除以cosθ就可以了。但当θ角随时间变化时,角度修正就较为复杂。由于太阳光矢量在辐射计视场内扫过的角度随时间变化,所以要通过腔温随时间变化函数求解角度修正系数。

在地球绕太阳运动的椭圆轨道上,由于日地距离的改变,太阳辐照度是变化的。在地球和太阳平均距离(R_{AU}=1.496×10⁸km)上的太阳辐照度就

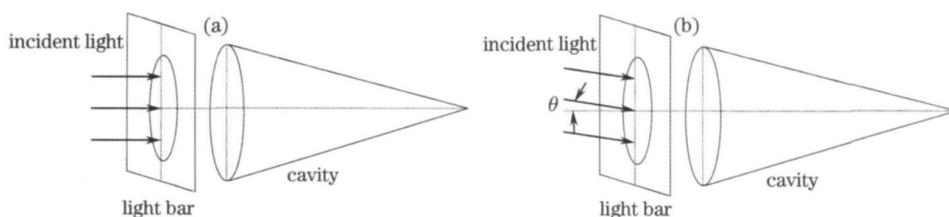


图1 太阳入射角示意图

Fig. 1 Schematic diagram of solar incidence angle

称为太阳常数,在日地距离上太阳可被视为点光源,其辐射照度同被照面距离平方成反比:

$$\frac{E(j)}{E} = \left(\frac{R_{AU}}{R_j} \right)^2, \quad (5)$$

式中 R_j 是第 j 天, 地球和太阳的实际距离; j 在 1 月 1 日为 $j = 1$, 连续排号, 12 月 31 日为 $j = 365$, $E(j)$ 是第 j 天, 地球大气层外的太阳总辐照度, E 是日地距离为一个天文单位距离时的太阳辐照度。

根据地球绕太阳运动的椭圆方程, 设日地距离校正系数为 F_{AU} , 则有

$$F_{AU} = \frac{E_i}{E} = \left(\frac{R_{AU}}{R_j} \right)^2 = 1 + 0.0334 \cos(0.9856j - 2.7206), \quad (6)$$

太阳辐照度在太阳常数的 3.34% 范围内随日期(天)变化。数据处理时可根据天文年历日期的日地距离, 把这一距离上测量的太阳辐照度换算成 1 AU 上的太阳辐照度。即

$$E_{AU} = E F_{AU}, \quad (7)$$

式中 E_{AU} 是太阳常数, E 是太阳辐射照度, F_{AU} 是日地距离校正系数。

3 测量数据

太阳辐射监测仪通过数传系统下传得到的数据包有 3 种: 自测试数据源包, 太阳测量数据源包, 冷空间测量数据源包。

1) 自测试数据源包

上电自测试后产生 3 个自测试包(每个通道各

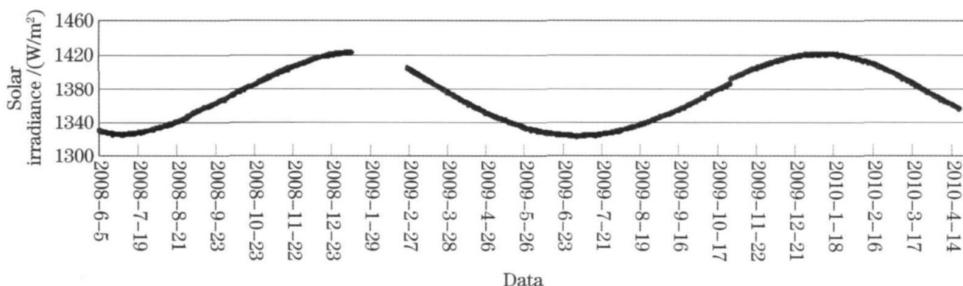


图2 太阳辐射照度原始值

Fig. 2 Original values of solar irradiance

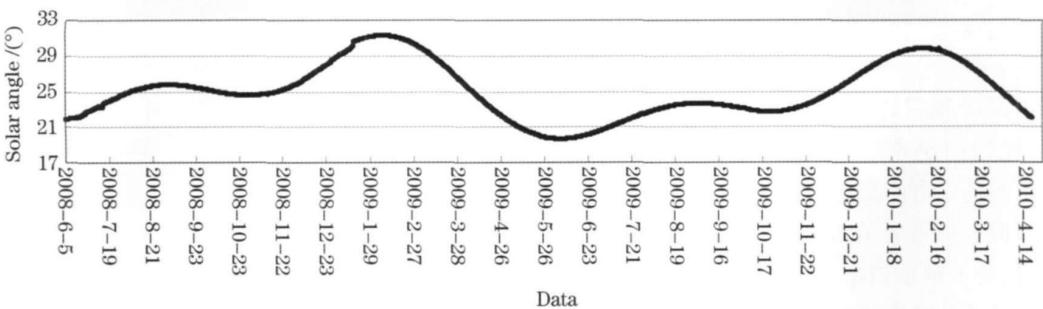


图3 太阳入射角数据

Fig. 3 Solar angle of incidence data

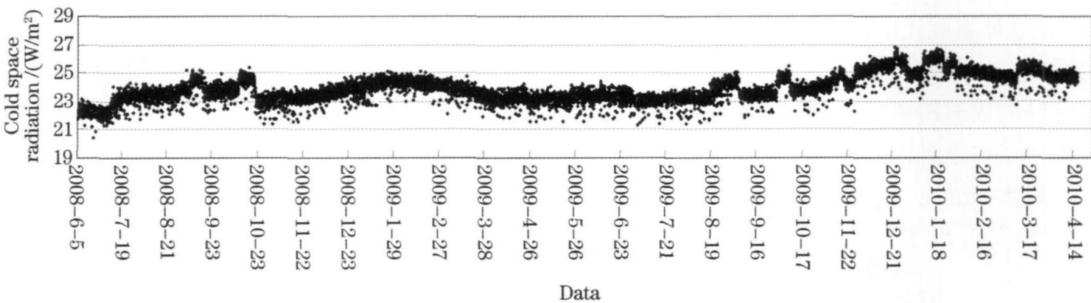


图4 冷空间辐射照度值

Fig. 4 Values of the cold-space irradiance

4 太阳入射角度变化及其修正

卫星上太阳入射角随时间变化,在这种变角入射情况下绝对辐射计温度也随时间变化。参考文献[11],用太阳光在视场内所走的轨迹线段长度表示太阳入射光与辐射计光轴夹角。当太阳光矢量同卫星轨道面成 α 角入射时,入射太阳光与辐射计光轴的夹角随时间变化的情况如图5所示。

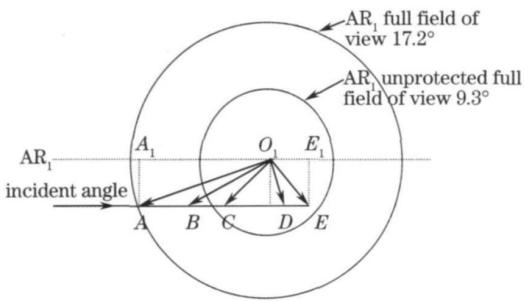


图5 辐射计视场内入射光与辐射计光轴的夹角示意图

Fig. 5 Angle between radiometer's optical axis and incident light in radiometer's field of view

3个绝对辐射计的全视场为 17.2° ,这一视场是辐射计刚捕获太阳光时所对应的视场。无遮拦视场(slope angle)为 9.3° ,这时太阳光斑全部进入辐射计。图5中矢量 AE 表示了辐射计 AR_1 刚捕获太阳光(A 点)到辐射计采样时刻,此时关闭快门开始电定标(E 点),太阳光在辐射计视场内所走的

轨迹。太阳光刚进入辐射计(A 点),入射光与辐射计光轴夹角为 O_1A ,当太阳入射光矢量经过时间 t 到 C 点时,入射光与辐射计光轴夹角为 O_1C ,当经过 360 s 时,即采样时刻(关闭快门),入射光与辐射计光轴夹角为 O_1E 。

卫星的运行周期为 101.6 min ,卫星角速度 $\omega = 360/101.6 = 3.543 [(\text{deg})/\text{min}]$ 。

根据卫星的角速度可以求出自辐射计捕捉到太阳时刻起到辐射计采样时刻,太阳光在辐射计视场中扫过的角度,即 $\theta = AE = \omega t$ 。现在求入射光与辐射计光轴夹角 O_1E 。

设 AR_1 的指向角为 $\alpha = 22^{\circ}$ 。入射角为 β 。在 O_1 圆上有

$$AO_1 = \sqrt{AO_1^2 - AA_1^2} = \sqrt{17.2^2 - (\alpha - \beta)^2}, \quad (9)$$

$$O_1E_1 = AE - A_1O_1 = (\omega t) - \sqrt{17.2^2 - (\alpha - \beta)^2}, \quad (10)$$

$$O_1E = \sqrt{O_1E_1^2 + E_1E^2} = \left\{ \left[(\omega t) - \sqrt{17.2^2 - (\alpha - \beta)^2} \right]^2 + (\beta - \alpha)^2 \right\}^{1/2}, \quad (11)$$

一般的对 AR_1 3个辐射计,太阳光从刚进入辐射计经过 t 时间后,太阳入射光与辐射计光轴夹角 θ 可表示为

$$= \left\{ \left[-_1 t - \sqrt{17.2^2 - (-_j)^2} \right]^2 + (-_i)^2 \right\}^{1/2}, \quad (12)$$

式中 i 为 1, 2, 3 辐射计, j 为 $(-j)$ 最小的辐射计。

太阳光辐射越顶扫过太阳辐射监测仪的视场时, 辐射功率随 角的变化函数 $P(\alpha)$ 的严密表达式是复杂的, 但近似可表示为梯形^[11]。太阳在太阳辐射监测仪视场上越顶扫描过程中接收的辐射功率是变化的, 梯形函数就变成图 6 所示的弧梯形。

太阳在辐射计视场越顶扫描时, 绝对辐射计的快门未打开, 电加热功率为 P_H , 腔温处在 $T_H = P_H/K$ 的状态; 绝对辐射计接收腔上入射 $P(t)$ 的太阳光功率的同时, 加电功率 P_L ($P_L = P_H - P_0$, P_0 为太阳光全照射时的辐射功率)。

把太阳越过绝对辐射计视场角的 坐标换成时间坐标 t , 以太阳光刚入射辐射计的 $-_1$ 为时间坐标的零点, 依次求出太阳越过 $-_2, -_3, 0, +_3$,

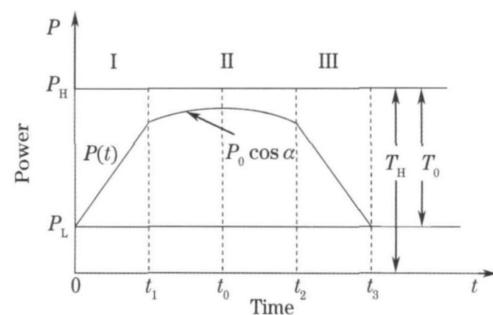


图 6 绝对辐射计接收的辐射功率示意图

Fig. 6 Sketch map of radiation power on the cavity of the absolute radiometer

$+_2, +_1$ 的时间为 $t_1/2, t_1, t_0, t_2, t_3$ 。把太阳光功率的变化函数变换为时间的函数 $P(t)$ 。

当太阳越顶角分别为 $\alpha = 0$ 和 $\alpha = 5^\circ$ 时, 太阳越过其视场的时间分别列入表 1。

表 1 太阳越过视场的角度及时间表

Table 1 Angle of the sun across the view field and the timetable

	$-_1$	$-_2$	$-_3$	0	$_3$	$_2$	$_1$
t	0	$t_1/2$	t_1	t_0	t_2	t_3	
$= 0$	-17.2	-13.3	-9.3	0	+9.3	+13.3	+17.2
	66	133.8	292.3	448.8	516.5	582.5	
$= 5$	-16.45	-12.3	-7.84	0	+7.84	+12.3	+16.45
	70.0	145.0	277	409	484	554	

当太阳是以越顶角 扫过辐射计视场时, 对辐射计接收的辐射功率 $P(t)$ 函数, 分 , , 3 时段描述^[11]。

把 $P(t)$ 整理后得。在 区 $(0 - t_1)$,

$$P(t) = \frac{P_0 t}{t_1} (2 \cos \beta - \cos \alpha), \quad (13)$$

在 区 $(t_1 - t_2)$,

$$P(t) = P_0 \cos \beta, \quad (14)$$

在 区 $[t_2 - (t_2 + t_1)]$,

$$P(t) = P_0 \cos \beta - \frac{P_0}{t_1} (2 \cos \beta - \cos \alpha) (t - t_2). \quad (15)$$

未接收太阳光功率时, 初始条件 $T_H = P_H/K$ ($t = 0$ 时) 情况下, 腔温随时间变化的函数 $T(t)$ 可通过解绝对辐射计热力学微分方程获得:

$$C \frac{dT(t)}{dt} + KT(t) = P_L + P(t), \quad (16)$$

式中 C 是腔的热容, K 是腔的热导率, $\tau = C/K$ 是时间常数。

当 $t = 0$ 时 $T_H = T(t = 0) = P_H/K$, 方程(16)式的通解为

$$T(t) = \exp(-\tau t) \left\{ \frac{1}{C} [P_L + P(t)] \exp(\tau t) dt + b \right\}. \quad (17)$$

当入射太阳光与辐射计光轴的夹角为 时, 将功率函数 $P(t)$ 和(13)~(15) 式代入代入(17)式后得到的腔温随时间的变化函数 $T(t)$, 如图 7 所示。

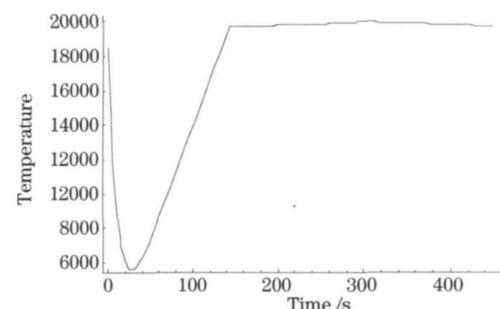


图 7 腔温随时间变化的曲线

Fig. 7 Curve of temperature response function $T(t)$ of cavity

在辐射计定标时刻($t = 360$ s), $T(360)$ 值可由腔温随时间变化函数计算得出, 如图 8 所示。

图 7, 8 中纵坐标是腔温热电偶测量的电压值经 A/D 转换后的码值。太阳越过辐射计视场时辐射

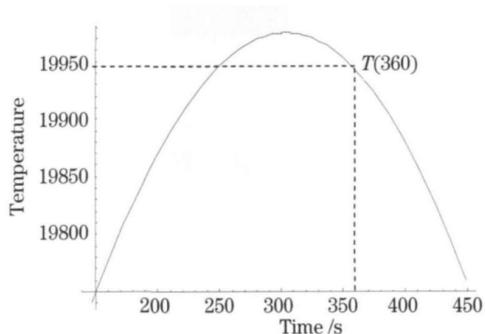


图 8 腔温随时间变化曲线的局部放大图

Fig. 8 Partial enlargement of the temperature response function $T(t)$

计腔温响应是时间的变化函数,通过求解 $T(t)$ 的微分方程,可以计算出太阳光以不同角度入射辐射计无遮拦视场时的腔温值。在辐射计电定标时刻($t=360$ s)的腔温值 T 与预设腔温值[$T(0)=2 \times 10^4$]有一定偏差。这种偏差产生的根本原因是由于太阳光线不总是垂直入射辐射计视场,电定标时刻的 T 值随太阳入射角不同而变化。

所以将

$$= \frac{T(t=0)}{T(t=360)} \quad (18)$$

定义为太阳辐射监测仪的角度修正系数。其中 $T(0)=2 \times 10^4$ 。

表 2 是太阳光以不同角度入射辐射计无遮拦视场时的角度修正系数。将表 2 中不同入射角的角度修正系数拟合成曲线,如图 9 所示。

应用角度修正系数对太阳辐照原始值进行修正,得到的太阳辐射照度值如图 10 所示。

表 2 不同入射角的偏差系数

Table 2 Deviation coefficients of different incident angles

Angle of incidence / ()	$T(t)$	
17	19867.6	1.006664116
17.5	19884.4	1.005813603

Angle of incidence / ()	$T(t)$	
18	19899.3	1.00506048
18.5	19912.4	1.004399269
19	19923.7	1.00382961
19.5	19933.2	1.003351193
20	19941.0	1.002958728
20.5	19946.9	1.002662068
21	19951.2	1.002445968
21.5	19953.7	1.002320372
22	19954.6	1.002275165
22.5	19953.7	1.002320372
23	19951.2	1.002445968
23.5	19946.9	1.002662068
24	19941.0	1.002958728
24.5	19933.2	1.003351193
25	19923.7	1.00382961
25.5	19912.4	1.004399269
26	19899.3	1.00506048
26.5	19884.4	1.005813603
27	19867.6	1.006664116

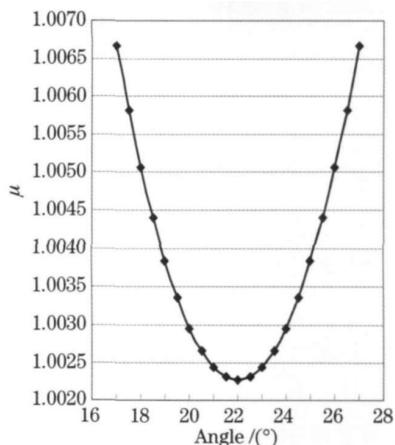


图 9 角度修正系数的拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve deviation coefficient in different incidence angles

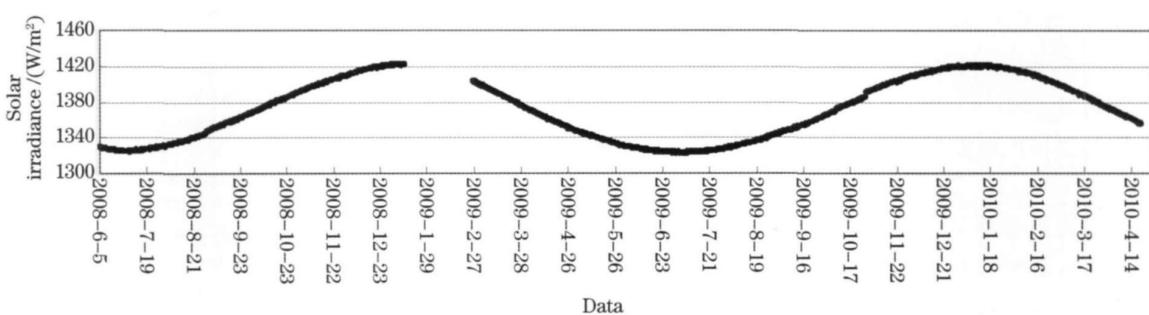


图 10 太阳辐射照度值

Fig. 10 Value of solar irradiance

5 数据结果及比对

将角度修正系数应用于(7)式,计算得到的太阳常数为 $1368 \pm 4 \text{ W/m}^2$ 。如图11(图中不同颜色代表不同通道数据计算得到的太阳常数)所示。

2009年6月1日~2009年10月20日,风云三

号卫星太阳辐射监测仪测得的太阳常数同国外同期测量的数据比对如图12所示。其中SIAR是本文研究的太阳辐射监测仪,VIRGO是美国SOHO卫星上的研究仪器,TIM是SORCE卫星仪器上的测量太阳常数的仪器。

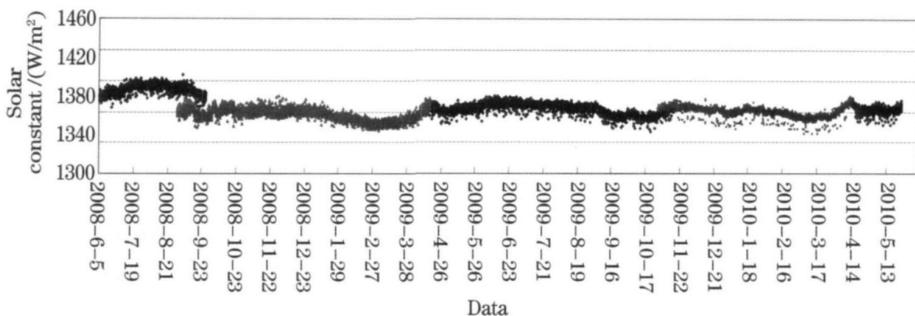


图 11 太阳常数值

Fig. 11 Values of solar constant

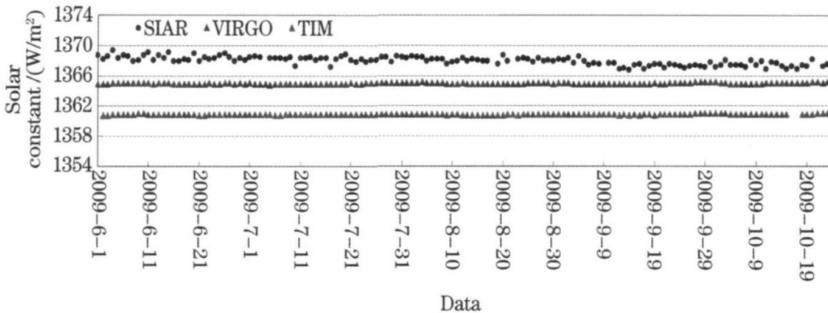


图 12 FY-3 测得的太阳常数同国外同期数据比对

Fig. 12 FY-3 measured solar constant data, compared with the data, by foreign authors in the same period

6 结 论

在研究卫星上太阳入射角随时间变化的基础上,通过求解腔温响应函数,将这种变角入射情况下绝对辐射计腔温响应值同预设值作比较,求出当太阳以不同角度入射光栏时的角度修正系数。风云三号气象卫星上的太阳辐射监测仪测量的太阳辐照值应用此角度系数修正后,得到的太阳常数值为 $1368 \pm 4 \text{ W/m}^2$ 。和世界气象组织(WMO)推荐的太阳常数值 $1367 \pm 7 \text{ W/m}^2$ 是吻合的,与美、欧等国卫星同期测得的数据也是一致的。

致谢 感谢中国科学院长春光学精密机械与物理研究所禹秉熙老师的指导及太阳辐射监测仪研制组所有成员在工作中给予的支持和帮助。

参 考 文 献

1 J. R. Hickey, B. M. Alton, H. L. Kyle et al.. Total solar irradiance measurements by ERB/Nimbus 7, a review of nine

- years[J]. *Space Sci. Rev.*, 1988, **48**(3-4): 321~ 342
- 2 C. W. Richard. Solar total irradiance observations by active cavity radiometers[J]. *Sol. Phys.*, 1981, **74**: 217~ 229
- 3 B. Robert, LeeIII, R. B. Bruce et al.. Characteristics of the earth radiation budget experiment solar monitors[J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(15): 3090~ 3096
- 4 A. Mecherikunnel. A comparative study of solar total irradiance measured by active cavity radiometers[J]. *Metrologia*, 1993, **30**(4): 271~ 273
- 5 Clause Frohlich, A. C. Dominique, W. Christoph et al.. In-flight performance of the virgo solar irradiance instruments on Soho[J]. *Solar Physics*, 1997, **175**(2): 267~ 286
- 6 R. C. Willson. The ACRIMSAT/ACRIM3 experiment extending the precision, long-term total solar irradiance climate database[J]. *The Earth Observer*, 2001, **13**(2): 14~ 17
- 7 G. M. Lawrence, G. Rottman, J. Harder. Solar total irradiance monitor (TIM)[J]. *Metrologia*, 2000, **37**(5): 407~ 410
- 8 Claus Frohlich, R. Philipona, J. Romero et al.. Radiometry at the physikalisch-meteorologisches observatorium davos and world radiation[J]. *Opt. Enging*, 1995, **34**(9): 2757~ 2766
- 9 Wang Yupeng, Fang Wei, Gong Chenghu et al.. Dual cavity inter-compensating absolute radiometer[J]. *Optica and Precision Engineering*, 2007, **15**(11): 1662~ 1667
王玉鹏, 方伟, 弓成虎等. 双锥腔互补偿型绝对辐射计[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(11): 1662~ 1667

10 Yu Bingxi, Fang Wei, Wang Yupeng. Radiation exchange and temperature response function of the absolute radiometer with wide field of view mounted on the satellite[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1048~ 1052

禹秉熙, 方伟, 王玉鹏. 卫星上绝对辐射计观测太阳时同太空背景的辐射交换[J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1048~ 1052

11 Yu Bingxi, Fang Wei, Wang Yupeng. The radiation exchange

and temperature response function of the absolute radiometer with wide field of view mounted on the satellite[J]. *Optica and Precision Engineering*, 2004, **12**(4): 354~ 358

禹秉熙, 方伟, 王玉鹏. 卫星宽视场绝对辐射计太阳越过视场时入射光变化与腔温响应函数[J]. 光学精密工程, 2004, **12**(4): 354~ 358