

文章编号: 0253-2239(2005)06-786-5

绝对辐射计预测辐射电补偿的快速测量方法

禹秉熙 姚海顺 方伟

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130031)

摘要: 绝对辐射计测量光辐射需要接收辐射和电定标两个阶段,这两个阶段都要使辐射计的接收腔达到热平衡才能比较它们的腔温响应,电定标其辐射量值。根据绝对辐射计接收腔在光入射(或电加热)时腔温升响应的指数变化规律,研究出在辐射入射腔之初就动态预测其功率,电加热补偿,使腔的温度在接收辐射和电定标阶段维持恒定的状态下,快速达到平衡进行测量的新方法。为世界辐射中心(PMOD/WRC)研制的两台太阳辐照绝对辐射计SIAR-2a和SIAR-2b采用了这种快速测量的方法。并在世界辐射中心进行一年半10000多次同世界标准(辐射计)组(WSG)一起同时观测太阳辐照度的比对实验,结果表明其绝对辐射精度达到了0.08%,既保持了原有测量方法(慢速热平衡、测量时间长)的精度,又缩短了秒测量时间。

关键词: 光学测量;绝对辐射计;快速测量;预测辐射;热平衡;电定标

中图分类号: O432.2 文献标识码: A

Rapid Measurement Method of Absolute Radiometer by Using Forecast Radiation in Electrically Heating Compensation

Yu Bingxi Yao Haishun Fang Wei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031)

Abstract: Two phases of radiation reception and electrical calibration are needed for absolute radiometer to measure radiation. Because absolute radiometer is thermoelectricity detector, at the two phase temperature response of the cavity could be compared after the receive cavity of the absolute radiometer reaches balance, and then the radiation value is electrically calibrated. According to the law that the temperature of the reception cavity rises up exponentially when radiated or heated up, dynamic forecast of the temperature is adopted and then it gets compensation by heating up with electricity. A new method of measurement is worked out under the state that the temperature of the cavity maintains invariable both at the phases of observation and calibration. The rapid measurement method was used on two Solar Irradiance Absolute Radiometers (SIARs) named SIAR-2a and SIAR-2b constructed for Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiometric Center (PMOD/WRC). Comparison experiments were carried at WRC for a year and a half. The sun was observed together with the instruments of WSG more than 10000 times at the same time. The data obtained from PMOD/WRC shows that its absolute precision reaches 0.08%. The precision of the new method is same with the old one (the balance is slower and the measurement time is longer) but the measurement cycle is shorter.

Key words: optical measurement; absolute radiometer; rapid measurement; forecast radiation; heat balance; electrical calibration

1 引言

绝对辐射计是黑体腔型热电探测器,一般来说响应度和精度高的绝对辐射计的时间常数 τ 都比较长(数秒至数十秒),而且测量需要待测辐射入射接

收腔使其升温达到热平衡(观测阶段)和挡住入射辐射后,在腔上电加热升温达到热平衡(电定标阶段)两个阶段,这两个阶段为一个测量周期,大约需要 20τ 左右的测量时间。

作者简介:禹秉熙(1938~),男,辽宁新宾县人,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感仪器研制工作。

E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

收稿日期:2004-05-31;收到修改稿日期:2004-10-08

本文根据绝对辐射计在辐射或电功率加热下接收腔温升的指数变化规律,研究了动态预测入射腔的辐射功率,电加热补偿,使腔体的温度在观测和电定标阶段维持恒定的状态下快速平衡进行测量的新方法。

世界气象组织(WMO)在瑞士达沃斯物理气象观测站(PMOD)设立的世界辐射中心(WRC)保存和传递世界辐射基准(WRR)量值标度的是由七个绝对辐射计组成的世界标准(辐射计)组(WSG)^[1]。这一组辐射计已经工作二十多年,仪器老化,有的出故障。世界辐射中心准备在世界标准组上增添新成员,更新充实世界标准组群组系统。为此应世界辐射中心的要求研制了两台绝对辐射计 SIAR-2a 和 SIAR-2b,并采用这种快速测量的新方法,缩短测量周期,使这两台仪器的测量周期同世界标准组一致。

在世界辐射中心把 SIAR-2a 和 SIAR-2b 安装在世界标准组的观测台架上,同世界标准组的辐射计组成员一起进行了一年半(2002 年 9 月至 2004 年 2 月)同时测量太阳辐照度的比对实验,对测得的 10000 多个数据的处理结果表明:其绝对精度达到 0.08%。既保持了原有测量方法(慢速热平衡,测量时间长)的精度,又缩短了测量周期。

2 绝对辐射计工作原理

SIARs 绝对辐射计是双锥腔补偿型电校准辐射计^[2~4]。测量是在微机控制下用电动快门使辐射入射和电定标交替的方式进行的。快门打开辐射入射腔和快门关闭电加热使腔温 $T(t)$ 升高或下降的过程中,用腔上设置的温度传感器实时采集。电加热功率是以数控方式由微机用数-模变换(DAC)和功率放大供给加在腔上电加热丝上实现的。其电压值 V 用标准电压校准,加热丝的电阻是预先精确测准的。

绝对辐射计的锥腔在入射辐射或电加热功率 P_0 时,其腔温的时间变化函数为

$$T(t) = T_0 [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (1)$$

式中 $T_0 = P_0/K$, 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。

从辐射计接收太阳辐射或电加热功率的时刻 $t = 0$ 开始,腔温逐步升高,理论上讲只有当 $t \rightarrow \infty$ 时,腔温才升到最大恒定值 T_0 , 达到热平衡。当时间经过 $t = \tau = C/K$ 时,腔温只升高到 $T(\tau) =$

$0.63T_0$, 即达到最大恒定温度的 63%。当时间经过为 $t = 10\tau$ 时, $T(10\tau) = 0.99995T_0$, 这时可以认为达到热平衡的最大升温值。

当功率为 P_0 的辐射入射(观测阶段)后,经一段时间($t > 10\tau$)腔温升响应到最大值 T_0 , 达到平衡,温度传感器输出由数据采集系统记录,然后关闭快门(电定标阶段),用微机数控,调整腔加热丝上所加电压 V , 在同观测阶段相同的时间($t > 10\tau$)内,使腔温平衡在观测阶段的最大温升值相同的温度 T_0 , 用电加热功率标定计算出光辐射功率 P_0 。

$$P_e = P_0 = V^2/R, \quad (2)$$

由于腔不是全部吸收接收到的辐射,需要进行腔有效吸收率 ϵ 修正, $p_e = p_0 \cdot \epsilon$, 即 $P_0 = V^2/(R \cdot \epsilon)$, 因此,测量需要 20τ 以上时间。

3 热平衡电定标测量的传统方法

这种方法需要观测和电定标阶段都经过较长时间($\geq 10\tau$)使腔温响应达到平衡。

第一种平衡电定标方法是:观测阶段待测辐射 P_0 入射辐射计经 10τ 以上时间腔温平衡在最高恒定温度 T_0 , 电定标阶段用微机数控逐步加高电压,使腔温逼近 T_0 , 逼近过程需要实时采集温度传感器的输出。如果采集数 $T(t) < T_0$, 就增加电压值;如果 $T(t) > T_0$, 就降低电压值,反复调整直至达到 $T(t) = T_0$ 。用这时电压值 V 的电功率 $p_e = V^2/R$ 定标辐射功率 $p_0 = V^2/R$ 。由于辐射计时间常数 τ 较长,实时数采的腔温同电加热功率的改变有迟滞时间,需要增减电压的过程多次反复才能逐渐逼近 T_0 值,所以需要很长时间,如图 1 所示。

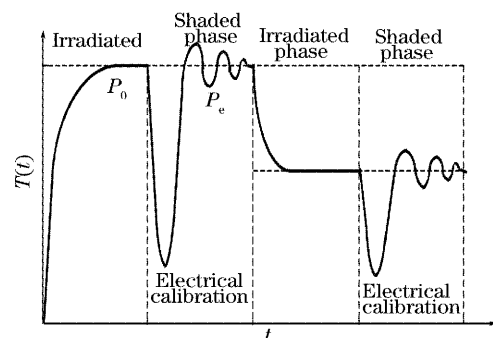


图 1 热平衡电定标方法之一

Fig. 1 One method for electrical calibration of the thermal balance

第二种方法:在测量辐射前预先依次加高、低电加热功率 $P_H = V_H^2/R$, $P_L = V_L^2/R$, 得到相应的温度 T_H 和 T_L 求出辐射计的响应度 $S = (P_H - P_L)/(T_H -$

T_L), 每次测量完成后, 也根据电定标的功率 P_e 和 T_e 求出响应度 $S = P_e / T_e$ 。然后测量辐射 P_0 时经足够时间腔温升至最大恒定值 T_0 后, 在电定标时由预先或前次测量求出的响应度 S , 计算出所需要的电定标加热功率 $P_e = S \cdot T_0$, 电校准阶段就加这个电功率 P_e , 使其腔温达到平衡温度 T_e 。由于响应度不一定精确, 所以 T_e 同 T_0 可能稍有差别, 再用响应度 S 和 $T_e - T_0 = \Delta T$ 进行功率修正 $\Delta P = S \cdot \Delta T$, 最后求出待测辐射功率 $P_e + S \cdot \Delta T = P$ 。这种方法同样也需要升温达到最大恒定值的热平衡过程。测量响应时间也较长, 如图 2 所示。

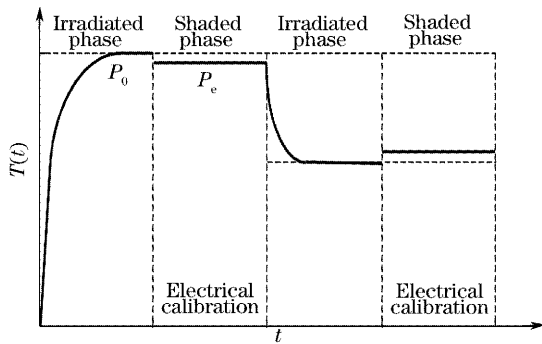


图 2 热平衡定标方法之二

Fig. 2 Another method for electrical calibration of the thermal balance

由于入射的待测辐射量是变化的, 因此辐射计腔体的平衡温度也始终变化。响应度 S 一般同腔温有关, 因此 S 也随入射光强弱的不同而变化。因此测量精度受到影响。

4 动态预测辐射、电加热补偿快速平衡的测量方法

测量原理框图如图 3 所示。

这种方法首先也要在测量待测辐射前(测量准备阶段)通过接收腔上依次加高、低电功率 $P_H = V_H^2 / R$ 和 $P_L = V_L^2 / R$ 求出响应度 $S = (P_H - P_L) / (T_H - T_L)$ 。并根据加电功率时腔温响应函数 $T(t)$ 变化的温度传感器输出信号的采集数据按(3)式求出时间常数 τ :

$$\begin{cases} T(t_1) = T_0 [1 - \exp(-t_1/\tau)], \\ T(t_2) = T_0 [1 - \exp(-t_2/\tau)], \end{cases} \quad (3)$$

式中 $T(t_1)$ 和 $T(t_2)$ 分别为加电功率 P ($\sim P_H$ 或 P_L) 后在 t_1 和 t_2 时刻数据采集的腔温信号值, 而 $T_0 = P/K$ 。

整理(3)式后求得

$$\tau = (t_2 - t_1) / \ln \left[\frac{T_0 - T(t_2)}{T_0 - T(t_1)} \right], \quad (4)$$

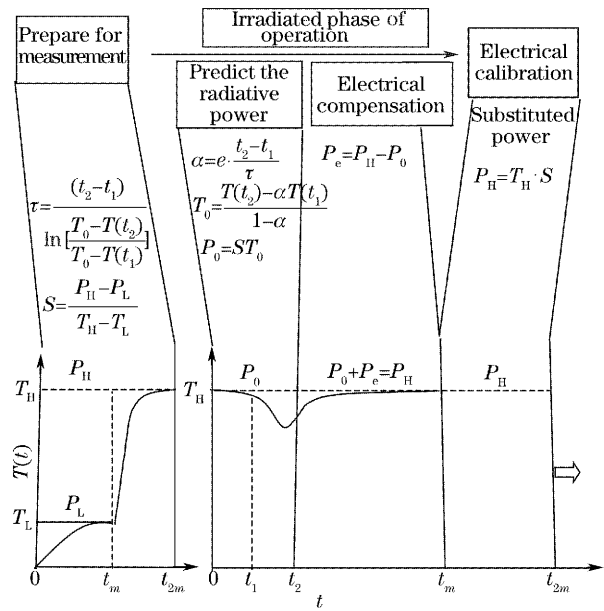


图 3 快速平衡测量方法示意图

Fig. 3 The schematic drawing of the rapid balance measurement method

然后测量辐射时在辐射计接收腔上预先加高电功率 $P_H = V_H^2 / R$ (P_H 要大于绝对辐射计测量辐射功率工作范围的最大值)。测量时, 当打开快门光开始入射的同时, 先把在腔上所加电功率 P_H 撤下来, 不加电功率, 那么腔温就从加高电功率的平衡状态的 T_H 逐步下降, 腔温最终平衡在入射光辐射功率 P_0 的平衡状态 T_0 , 这时腔温时间变化规律是可以根据腔的热力学方程求得:

$$T(t) = (T_H - T_0) \exp(-t/\tau) + T_0, \quad (5)$$

那么光辐射入射腔后, 早期 t_1 和 t_2 时刻采集的腔温分别为

$$\begin{cases} T(t_1) = (T_H - T_0) \exp(-t_1/\tau) + T_0, \\ T(t_2) = (T_H - T_0) \exp(-t_2/\tau) + T_0, \end{cases} \quad (6)$$

式中 $T(t_1)$ 和 $T(t_2)$ 为打开快门后的 t_1 和 t_2 时刻数据采集的腔温信号值。

整理(6)式后得

$$\frac{T(t_2) - T_0}{T(t_1) - T_0} = \exp\left(-\frac{t_2 - t_1}{\tau}\right) = \alpha, \quad (7)$$

由于 t_1, t_2 和 τ 是已知的, 所以可求出 T_0

$$\begin{cases} T(t_2) - T_0 = \alpha T(t_1) - \alpha T_0, \\ T_0 = \frac{T(t_2) - \alpha T(t_1)}{1 - \alpha}, \end{cases} \quad (8)$$

再用响应度 S 可预测出入射的光功率, 即

$$P'_0 = S \cdot T_0.$$

也就是测量辐射的早期就能够预测出待测辐射

功率 P'_0 , 可以知道观测阶段光入射时维持腔温不变所需要加的电加热功率 $P_e = P_H - P'_0 = V_e^2/R$, 然后 t_2 时刻开始在腔上加电功率 P_e 。那么辐射计又将在 P'_H 功率的 T'_H 腔温上达到平衡。由于预测的辐射功率 P'_0 不一定准确, 所以辐射计并不一定准确地平衡在 T_H 上, 而可能稍有偏离, 平衡在 T'_H 上, 电校准时加电功率 $P'_H = V_H^2/R$, 使腔温也在 T'_H 达到平衡。这样辐射功率可从 $P_0 = P'_H - P_e = (V_H^2 - V_e^2)/R$ 求出。

由于辐射计是在 P_H 功率上平衡的腔温 T_H , 入射辐射后很短时间在腔温波动幅度不大的情况下很快又回复到在 T_H 腔温平衡状态, 所以能够很快地达到平衡。电校准阶段是用响应度 S 求出电定标所需要加的电功率 $P_H = S \cdot T_H$, 因此腔温 T_H 就基本不变, 又很快达到平衡。

另一方面, 无论入射光辐射强弱, 辐射计在观测阶段和电定标阶段, 腔温响应 $T(t)$ 都是平衡在 T_H 上大体保持恒定(其间只有辐射入射的最初短时间内腔上输入的功率有变化, 腔温稍有波动), 辐射计的响应度变化也很小, 因而提高测量精度。

腔温热电信号采集频率高, 预测时间 t_1 和 t_2 选择的越短, 就能更早进行电加热补偿, 腔温波动幅度就小, 就更快的达到平衡, 能够进一步缩短测量时间。

4 实验结果与讨论

SIAR-2a 的实验实例:

辐射计腔温热电信号采集频率为 1 Hz, 时间常数 $\tau = 12.7$ s, 响应度 $S = 3.061 \times 10^{-3}$ mW/LBS。LBS 为腔温信号采集码值(16 bits)。

当光 $p_0 = 12.8$ mW 入射, 预测时刻为 $t_1 = 2$ s, $t_2 = 5$ s, 电加热补偿

$P_e = P_H - P_0 = 70$ mW - 12.8 mW = 67.2 mW, 腔温平衡值在 $T'_H = 23030$ LBS 上, 正确的是应该在 P_H 功率上的腔温平衡值为 $T_H = 22880$ LBS 上, 预测误差为

$$\Delta = \frac{T'_H - T_H}{T_H} = \frac{23030 - 22880}{22880} = 0.65\%$$

功率 P 同腔温响应 T 是线性关系($P = S \cdot T$)所以预测的入射功率误差也是 0.65% , 但是这一预测误差不带入测量误差之中, 因为电定标是以 T'_H 为准, 加电功率 P'_H 而求出光辐射的, 即 $P_0 = P'_H - P_e$ 。只是腔温比原来设定的 T_H 稍有偏离而已。

如果腔温信号采集频率为 10 Hz, 在 $t_1 = 0.3$ s,

$t_2 = 1.0$ s 进行预测, 那么测量周期可以进一步缩短。

2000 年 9 月~10 月, 在世界辐射中心举行的第九届国际日射强度计比对(IPC-IX)时, 我们带去进行比对的 SIAR-1 绝对辐射计采用传统的测量方法, 其测量周期为 180 s(开快门观测太阳 90 s, 关闭快门电定标 90 s)SIAR-1 的世界辐射基准定标系数为 0.99978, 误差(σ)为 0.0008。

在世界辐射中心保存和传递世界辐射基准的世界标准(辐射计)组的测量周期为 90 s, 比 SIAR-1 快一倍。因此, 为世界辐射中心的世界标准组研制的 SIAR-2a 和 SIAR-2b, 采用这种动态预测辐射、电加热补偿、快速平衡的新测量方法, 使它们的测量周期同世界标准组一致, 达到了 90 s。

2002 年 9 月, SIAR-2a 和 SIAR-2b 在世界辐射中心世界辐射中心同世界标准组辐射计一起安装在太阳跟踪台架上, 进行了长期的太阳辐照度例行观测实验, 并同世界辐射基准的辐照度标度进行比对, 确定其定标系数(它表明同世界辐射基准的偏差)和标准偏差(σ)。

世界辐射中心提供的自 2002 年 9 月 29 日至 2004 年 2 月 17 日 1 年半左右的测量数据处理结果列入表 1。

表 1 从 2002 年 9 月 29 日至 2004 年 2 月 17 日
测量数据处理结果

Table 1 The data from 29 Sept. 2002 to 17 Feb. 2004

Instrument	SIAR-2a	SIAR-2b
Days	93	103
N total	13153	14068
N used	9918	11055
WRR calibrated factor	1.00042	0.99825
Standard deviation / σ	0.00080	0.00077

SIAR-2a 和 SIAR-2b 的辐照度标度分别只相差 0.00042 和 0.00175, 标准误差(σ)为 0.00080 和 0.00077, 同用传统测量方法的 SIAR-1 的误差(σ)相差相同, 完全达到世界标准组辐射计的要求。

5 结 论

在 SIARs 绝对辐射计上采用动态预测入射功率, 电加热补偿快速平衡的新测量方法观测实验结果证明: 有效地缩短了测量时间, 又保证了测量精度。这种方法对电校准热电型探测器都适用。

致谢 SIAR-2a 和 SIAR-2b 同世界辐射基准标度比对的大量实验都是在瑞士达沃斯的世界辐射中心

进行的,在此向依沙贝拉女士及其同事表示衷心感谢!

参 考 文 献

- 1 Claus Fröhlich, Rolf Philipona, Jose Romero *et al.*. Radiometry at the Physikalisches-Meteorologisches Observatorium Davos and World Radiation Center[J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(9): 2757~2766
- 2 Fang Wei, Jin Xifeng. Development of a compensate dual-conical cavity absolute radiometer[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 1992, **13**(3): 406~411 (in Chinese)
方 伟,金锡峰. 一种双锥腔补偿型绝对辐射计的研制[J]. *太阳能学报*, 1992, **13**(3): 406~411
- 3 Fang Wei, Yu Bingxi. Absolute radiation measurement technology on space[C]. Symposium of the theses and the theses abstracts for fifty anniversary of the Institute (1952~2002) (one), 2002. 129~147 (in Chinese)
方 伟,禹秉熙. 空间绝对辐射测量技术[C] 纪念建所五十周年(1952~2002)论文及论文摘要汇编(一), 2002. 129~147
- 4 Fang Wei, Yu Bingxi, Yao Haishun *et al.*. Solar irradiance absolute radiometer and international comparison[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 112~116 (in Chinese)
方 伟,禹秉熙,姚海顺等. 太阳辐照绝对辐射计(SIAR-1)与国际比对[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 112~116
- 5 International Pyrheliometer Comparison IPC-IX. Working Report No.197[R], Daves Switzerland, 2001