

# 电定标气动式绝对辐射计的研制

冯晓帆\* 王模昌

(中国科学院上海技术物理研究所)

**摘要**——本文提出了一种电定标气动式绝对辐射计,并设计制作了一台原理样机。实验结果表明:该仪器适用于辐射的绝对测量,它使腔形绝对辐射计的测量范围延伸了一个数量级,其测量精度可达到0.7%。

## 一、引 言

绝对辐射计是用来测量光辐射绝对功率的仪器,它是标定遥感仪器、测量太阳辐射功率和激光功率的一种重要仪器。

绝对辐射计都是电替代式量热计,即通过对未知辐射在探测器上产生的热效应与一个已知电功率在探测器上产生的热效应相比较来测量未知的辐射功率。为了减少探测器表面吸收率受表面涂黑材料发射率的影响,采用锥形腔结构的探测器代替了原来的平面型探测器<sup>[1]</sup>,但由于受到感温元件温度灵敏度的限制,腔形绝对辐射计的灵敏度较低。

本文提出的电定标气动式绝对辐射计采用了气动方式感温,使温度分辨力大为提高。另外气体层作为温度传感器,响应率的均匀性好。在设计上用微处理机实现数字控温,既提高了控温精度,又使整个测量过程自动化。

## 二、工作 原 理

图1为气动式绝对辐射计的结构示意图。锥形腔由绝热支撑架固定,与热沉形成测量气室。腔体用电铸方法制成,内侧是纯银,具有良好的导热性,外侧是一层高强度合金,保证腔体不变形,腔体壁厚约0.2mm。腔内侧喷涂3M黑漆,表面贴有薄膜加热器。镀金薄膜是气动感温的敏感元件,厚约3 $\mu\text{m}$ ,因而对压力很敏感。补偿气室的作用是补偿外界环境温度的影响。

仪器工作时分自校和测量两个状态;仪器测量前先自校标定,自校时给腔体加上一个恒定的电加热功率,使腔体达到某一温度 $T_0$ ;测量时,开启挡光片,让辐射照到腔体上,此时,

本文1987年10月10日收到。

\* 现在武汉市邮电科学研究院。

腔体温度将升高,温升由气动探测器检测,然后,即通过电子线路反馈,使电加热功率减小,从而使腔体温度恢复到  $T_0$ ,这样,自校和测量两种状态下的电功率之差即等于辐射功率,其工作方程式推导如下:

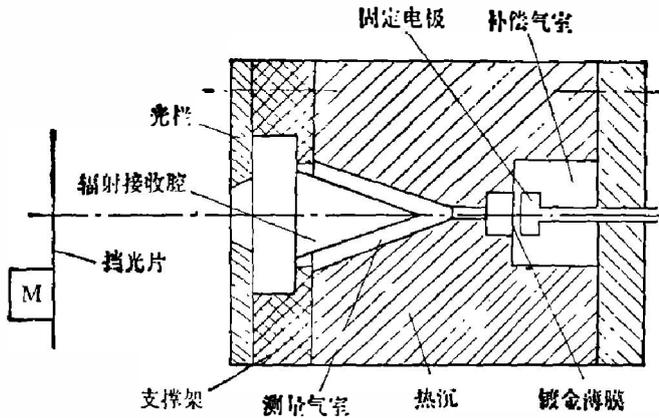


图1 绝对辐射计气动探测器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pneumatic detector in the absolute radiometer.

在自校时,给腔体加上的电加热功率为  $P_{e0}$ ,腔体的热平衡方程为

$$P_{e0} + \Sigma P_{r1} = \Sigma P_A + \Sigma P_{r0} + C \frac{\partial T}{\partial t}; \quad (1)$$

式中,  $\Sigma P_{r1}$  为外界物体辐射到腔上的功率;  $\Sigma P_A$  为腔体通过传导、对流与外界热交换的功率;  $\Sigma P_{r0}$  为腔体辐射到外界功率;  $C$  为腔体的热容量;  $\frac{\partial T}{\partial t}$  为腔体温度变化率。

在测量时,光辐射通过光栏照射到腔体上,腔体的热平衡方程为

$$A_0 \alpha_0 E + P_{er} + \Sigma P'_{r1} = \Sigma P'_A + \Sigma P'_{r0} + C \frac{\partial T'}{\partial t}; \quad (2)$$

式中,  $A_0$  为光栏面积;  $\alpha_0$  为腔体有效吸收率;  $E$  为辐照度;  $P_{er}$  为测量状态的电加热功率;  $\Sigma P'_{r1}$ 、 $\Sigma P'_A$ 、 $\Sigma P'_{r0}$  和  $C \frac{\partial T'}{\partial t}$  的定义与自校状态一样,加角标以示测量状态。解这两个方程,并简化得

$$E = K (P_{e0} - P_{er}) + E'; \quad (3)$$

式中,  $K = \frac{1}{\alpha_0 A_0}$  为仪器常数;  $E'$  为误差因子;可由台劳级数展开求得。

若认为除腔体以外物体在测量、自校二状态温度不变,且达到热平衡,则  $E'$  可展开为腔体温度变化  $(T - T')$  的函数,可表示为

$$E' = E_0 + \sum_j K_{1j} (T - T') + \sum_j K_{2j} (T - T')^2 + \dots + \sum_j K_{nj} (T - T')^n + \dots \quad (4)$$

式中,  $K_{nj}$  为  $j$  物体与腔体热交换功率对腔体温度的  $n$  阶台劳展开系数。

由式(4)可以看出,测量误差主要由测量、自校二状态的温差  $(T - T')$  引起,所以减小温差  $(T - T')$  是提高仪器精度的关键。

一般测温方法采用铂电阻或温差电堆,其温度灵敏度较低,因此在小功率测量时误差很大。本仪器中采用了气动方式感温,当腔体温度变化时,测量气室的气体体积发生变化,从而使镀金薄膜变形,引起薄膜与固定电极间的电容变化,电容改变量为<sup>[4]</sup>

$$\Delta C = \frac{a^2 P}{8d_0 \left( S + \frac{\pi a^2 P}{8V} \right)} \cdot \frac{\Delta T}{T} C_0; \quad (5)$$

式中,  $a$  为薄膜半径;  $P$  为压强;  $d_0$  为薄膜与固定电极的初始间隙;  $S$  为薄膜的表面张力;  $V$  为气体体积;  $C_0$  为初始电容。

$\Delta C$  通过交流电桥变成电压信号经锁定放大,和  $A/D$  变换后送入单板机,单板机对此进行数字 PID 运算,控制电加热功率,使腔体温度保持恒定。图2为相应于  $6 \text{ mW}$  光辐射阶

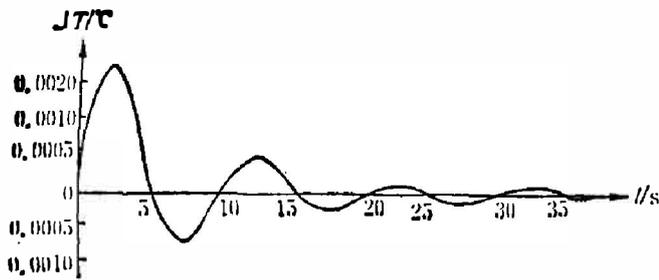


图2 输入腔体温度变化的时间对 6 mW 光辐射阶跃的响应曲线

Fig.2 Time dependence of the cavity temperature variation corresponding to 6mW step-input of the optical radiation.

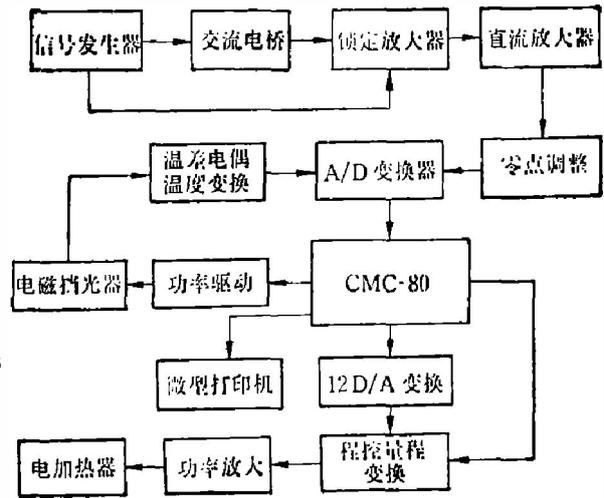


图3 气动式绝对辐射计的电路框图

Fig.3 Block diagram of the electric circuit of the radiometer.

跃输入的腔体温度变化的时间响应。由图可见,控温性能很好,控温灵敏度达到  $0.0001^{\circ}\text{C}$ , 比常规方法提高一个数量级。整个系统的电路框图如图3所示。

### 三、电定标气动式绝对辐射计的实测

#### 1. 与 Eppley-Ångström 日射仪的比测

为了验证气动式绝对辐射计的精度,将这台原理性样机与美国制 Eppley-Ångström 日射仪对太阳进行了实时比测,该仪器在 1984 年初经 Eppley 实验室的工作标准标定,对太阳常数的测量精度为 0.5%,在五月下旬的晴朗天气对太阳作了三次实时比测,结果见表1。

表1 ECPR 与 Ångström 的比测

Table 1 The comparison between measurements by ECPR and Ångström

测量时间	ECPR (mW/cm <sup>2</sup> )	Ångström (mW/cm <sup>2</sup> )	偏差 (mW/cm <sup>2</sup> )	百分比 (%)
5月23日 9:30	68.4	69.3	-0.9	-1.4
5月23日 10:00	71.0	71.0	0.0	0.0
5月24日 9:30	65.8	66.2	-0.4	-0.6
5月24日 10:00	69.0	69.2	-0.2	-0.3
5月31日 9:40	55.0	55.6	-0.6	-1.1
5月31日 10:00	57.3	58.0	-0.7	-1.2

由表1结果可知,气动式绝对辐射计(ECPR)的测量结果比日射仪(Ångström)小,平均小 0.8%,均方根偏差为 0.5%。

#### 2. 电定标气动式绝对辐射计的重复性测量

用气动式绝对辐射计对稳定度为千分之一的钨卤灯进行多次重复测量,测得的结果见表2。

由表2可以算出气动式绝对辐射计的重复性为 0.25%,说明重复性是很好的。

表2 重复性测量结果  
Table 2 The results of repeatability measurement

测量序数	1	2	3	4	5	6	7
功率(mW/cm <sup>2</sup> )	6.22	6.17	6.19	6.21	6.20	6.19	6.21

上述两个试验结果表明,气动式绝对辐射计可适用于辐射的绝对测量。

## 四、误差分析

影响气动式绝对辐射计测量精度的主要误差源有:

### 1. 光电不等效性误差

由于光加热发生在3M黑漆表面,而电加热则在腔的外侧,两种加热发生在不同位置上引起误差,用热传导理论计算<sup>[3]</sup>,可知这项误差为0.6%。

### 2. 腔体吸收率误差

锥形腔喷涂3M黑漆,黑漆的吸收率为 $0.95 \pm 0.02$ ,根据腔体理论计算<sup>[3]</sup>,腔体吸收率为 $0.995 \pm 0.002$ 。

### 3. 电功率测量误差

在本仪器中这项误差为0.3%。

### 4. 光栏面积误差

本仪器中这项误差为0.17%。

### 5. 温度调节余差引起的误差

由于温度分辨力的限制,测量、自校两状态腔体温度不同,对应的功率为

$$\Delta P = K \delta T = 8 \times 10^{-6} (\text{W})$$

上述前四项为相对误差,最后一项为绝对误差,转变成相对误差为 $\Delta P/P$ ,其中 $P$ 为光功率。因这五项误差互不相关,因而可作均方根处理,对总误差 $E$ 的综合影响为

$$E = \sqrt{(0.6\%)^2 + (0.3\%)^2 + (0.17\%)^2 + (0.002)^2 + \left(\frac{8 \times 10^{-6}}{P}\right)^2}$$

$$= \sqrt{0.000049 + \left(\frac{8 \times 10^{-6}}{P}\right)^2};$$

当 $P > 2 \text{ mW}$ 时,上式中第二项可以忽略,因而 $E = 0.007 = 0.7\%$ 。因此,仪器对光辐射的测量误差为0.7%。

## 五、结 论

1. 用气动方式测温,可以使温度分辨力提高一个数量级以上,因而使绝对辐射计的测量功率下限向下延伸一个数量级。

2. 由误差分析可知,影响精度的主要原因是光、电加热位置不同引起的不等效性误差,因此,改进腔体制作工艺,把薄膜加热器与光吸收层做在同侧,这样可以进一步提高气动式绝对辐射计的精度。

致谢——匡定波研究员指导了本项研究,并审阅了论文稿,在研制过程中还得到了本所许多同志的帮助,在此特向他们表示诚挚的谢意!

### 参 考 文 献

- [1] Richard C. Willson, *Appl. Opt.*, **18**(1979), 2:179.
- [2] Daniel P. Lucero., *Journal of Physics E*, **6**(1973), 3:281.
- [3] 冯晓帆,中国科学院上海技术物理研究所硕士论文,1986.
- [4] 郭振芹,非电量电测量,计算出版社,1984.

## DEVELOPMENT OF ELECTRICALLY CALIBRATED PNEUMATIC RADIOMETER

FENG XIAOFAN WANG MOCHANG

(*Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

This paper presents a new type of absolute radiometer—Electrically Calibrated Pneumatic Radiometer (ECPR). A prototype has been manufactured and experiments have been performed, showing that this radiometer has the ability of doing absolute measurement on radiation from far-infrared to ultraviolet. This instrument has enlarged the measuring range of the cavity radiometer by an order of magnitude. The measuring accuracy is estimated to be 0.7%.