

# 双腔日射仪的研制

张智敏

(中国科学院上海技术物理研究所)

**摘要**——本文阐明太阳常数测量仪器——双腔日射仪的工作原理, 推导了工作方程, 测量及计算了工作方程中的各参量。实验表明, 由此研制成的原理性样机可对太阳常数作绝对测量。误差分析表明, 其精度达  $\pm 0.6\%$ 。通过误差分析, 提出了改进措施。

## 一、前言

太阳常数是指在地球大气外, 平均日地距离上, 在单位时间内从垂直于太阳光线的单位面积上通过的太阳的总辐射能。太阳常数是天文物理和太阳物理的一个基本物理量。在地球物理、大气物理以及气象学中, 许多重要的课题与太阳常数及其光谱辐照度有关。太阳常数与气候的关系长期以来一直是人们关心的课题<sup>[1]</sup>。研制太阳常数测量仪器对于辐射度量仪器的标定也有着重要的作用<sup>[2]</sup>。因此研制一个绝对辐射计型的日射仪是有意义的。

太阳常数的测量通常是把太阳辐射能转变为其它可以测量的物理量——如探测器温度<sup>[3]</sup>、温差电偶电动势、电阻值、双金属弯曲程度<sup>[4, 5, 6]</sup>等来进行的。较常用的方法是测量温差电偶电势。但由于温差电偶的非线性, 测量需要定标, 仅作为二级标准, 其测量精度不高于1%。为获得高精度, 目前多使用电功率法。最早利用该方法制成的仪器是 Ångström 补偿日射仪<sup>[6]</sup>。它的时间常数较短, 稳定性好, 使用方便, 至今仍广泛使用。但由于“边际效应”的影响<sup>[7]</sup>, 以及探测器的吸收率受表面涂黑材料的发射率影响较大, 它的绝对误差较大。

目前所采用的提高日射仪精度的主要方法是减小探测器材料发射率和环境温度对仪器精度的影响。一般采用腔体形探测器, 它可以通过腔体效应使材料发射率对探测器吸收率的影响大大减小, 从而提高仪器精度。环境温度的变化会引起腔体与环境之间热交换的波动和温度参照点的漂移, 产生误差。一般可采取控制或稳定腔体周围环境温度的方法。如对散热片实行温控<sup>[8]</sup>、采用大的散热片<sup>[10]</sup>、用液氮<sup>[11]</sup>或杜瓦瓶<sup>[9]</sup>等恒温。或采用差值测量方法<sup>[10]</sup>, 以及双腔结构<sup>[12]</sup>、用补偿腔补偿环境温度的漂移。也可在腔体周围抽真空<sup>[13]</sup>, 或用低热阻构通腔体与散热片<sup>[2]</sup>以减小腔体与环境的温差, 从而减小腔体与环境间的杂散热交换。

本文 1982 年 5 月 21 日收到。

\* 本文是作者的研究生硕士学位论文。

基于上述日射仪的发展动向,并参考了 ACR III<sup>[10]</sup> 及 ACR IV<sup>[12]</sup> 日射仪的结构特点,我们采用了双腔(其精度比单腔高)、锥形腔带盖板(其吸收率高、结构优良)、大散热片延伸至视场光栏(其结构简单)、腔体温度自动控制(其两腔温度差异小)、低热阻及差值测量结构。我们的工作确定双腔日射仪的工作模式,推导工作方程,并对工作方程中各参数进行测量及理论计算。根据工作原理及计算结果设计双腔日射仪原理性样机。这一工作为卫星载太阳常数测量仪器的研制打下了基础。

## 二、工作原理及工作方程

仪器的结构示意图于图 1。给补偿腔加一恒定电加热功率,此热流经低热阻传递至散热片,在热阻上产生温差(约 0.8°C)。通过绕在两热阻上的铂丝电桥感温,由

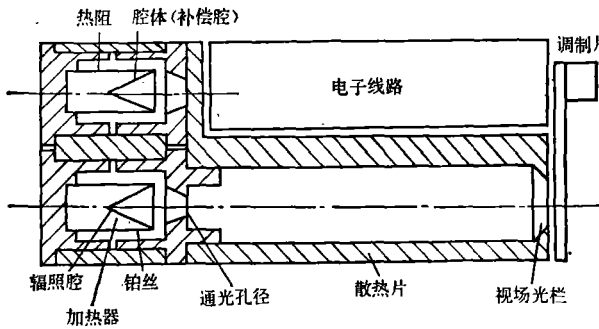


图 1 双腔日射仪结构示意图

电路自动控制辐射腔的电加热功率,使结构相同的两腔温度达一致。在自校状态,辐射腔无外界辐射加热,为保持辐射腔与补偿腔的温度一致,控制电路给辐射腔提供的电加热功率应与补偿腔的恒定电加热相同。在测量状态,由于辐射腔吸收太阳辐射,为保持两腔温度一致,控制电路减小了对辐射腔提供的电加热功率,使辐射腔的电加热功率与吸收的太阳辐射功率之和等于补偿腔的恒定电加热功率。因此两状态下控制电路提供给辐射腔的电加热功率之差,即为腔体吸收的辐射功率。

双腔日射仪是一种绝对辐射计,因此仪器常数和仪器误差须根据仪器的工作方程求得。其工作方程推导如下。在调制片截断太阳辐射时,辐射腔热平衡方程为:

$$\sum_j P_{rj1} + P_{er1} = P_{e1} + C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} + \sum_j (P_{rcj1} + P_{acj1}) + P_{ec1}, \quad (1)$$

其中  $\sum_j P_{rj1}$  为腔体吸收的周围各部分辐射功率,  $P_{er1}$  为腔体的电加热功率。  $P_{e1}$  是腔体通过热阻传递给散热片的热流量。  $C_1$  为腔体的热容,  $C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t}$  为腔体温度变化时腔体的储热。  $\sum_j P_{rcj1}$  与  $\sum_j P_{acj1}$  分别为腔体通过辐射和空气热传导传递给周围各部分的热功率。  $P_{ec1}$  为腔体通过导线传导的热功率。式(1)左边为腔体吸收的功率,右边为释放的功率,平衡时两者相等。下标 1 表示辐射腔各参量。

对于补偿腔同样有:

$$\sum_j P_{rj2} + P_{er2} = P_{e2} + C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} + \sum_j (P_{rcj2} + P_{acj2}) + P_{ec2}, \quad (2)$$

下标 2 表示补偿腔各参量。

当调制片打开时,辐射腔吸收太阳入射辐射,在达到平衡时有:

$$\sum_j P'_{rj1} + P'_{er1} + A_c I (\alpha_c + \rho \rho_0) = P'_{e1} + C_1 \frac{\partial T'_1}{\partial t} + \sum_j (P'_{rcj1} + P'_{acj1}) + P'_{ec1}, \quad (3)$$

对于补偿腔有:

$$\sum_j P'_{rj2} + P'_{er2} = P'_{c2} + C_2 \frac{\partial T'_2}{\partial t} + \sum_j (P'_{rcj2} + P'_{acj2}) + P'_{ec2} \quad (4)$$

其中  $A_c$  为仪器通光孔径面积,  $I$  为太阳的辐照度,  $\alpha_c$  为腔体的有效吸收率,  $\rho_c$  为腔体的反射率,  $\rho$  为通光孔径与视场光栏间散热片内壁涂复材料的反射率。上角带撇的量表示测量状态(调制片打开时)相应的各参量。

由式[(1) - (3)] - [(2) - (4)]得:

$$I = (P_{er1} - P'_{er1} + E) / A_c (\alpha_c + \rho_c \rho), \quad (5)$$

其中  $E$  为  $\sum_j [(P_{j1} - P'_{j1}) - (P_{j2} - P'_{j2})]$  形式的量, 由于单腔日射仪中只包含  $\sum_j (P_{j1} - P'_{j1})$  项, 因此双腔日射仪误差项  $E$  比单腔小。由电加热功率  $P_{er1} = V_1^2 / R_1$  (其中  $V_1$  是辐照腔加热电压,  $R_1$  为加热器电阻), 得太阳常数工作方程为:

$$I = D(V_1^2 - V_1'^2) + E / A_c (\alpha_c + \rho_c \rho) \quad (6)$$

其中  $D$  为仪器常数,  $D = [R_1 A_c (\alpha_c + \rho_c \rho)]^{-1}$ 。  $E$  值由泰勒展开法求得(见附录), 作为误差项处理。

双腔日射仪的均方根绝对误差由定义  $\pm \left\{ \sum_i \left[ \frac{\partial I}{\partial \xi_i} S(\xi_i) \right]^2 \right\}^{1/2}$  求得。其中  $\xi_i$  为工作方程中各参量,  $S(\xi_i)$  为参量  $\xi_i$  的绝对误差。

### 三、结构设计

本仪器腔体采用图 2 所示结构。锥形腔用铸银制成, 通光孔径板作锥形腔盖板, 使腔体能吸收经盖板反射的能量, 以增大腔体的有效吸收率。

锥角  $\theta$  的选择。计算表明, 各腔长孔径比不变, 腔体的有效吸收率与  $\theta$  的关系如图 3 所示。由于盖板内侧反射给腔体的辐射随  $\theta$  减小而减小, 但腔体内壁经开口第一次反射的辐射随  $\theta$  增大而增大, 因此  $\theta$  有最佳值。由图可见  $\theta$  为  $14^\circ$  时有效吸收率最大。本仪器取  $15^\circ$ 。腔体内壁喷复 3M Velvet 无光泽黑漆。其材料发射率为 0.95, 误差小于  $\pm 0.02^{[10]}$ 。由腔体理论计算表明, 本仪器的有效吸收率为  $0.997 \pm 0.002$ 。

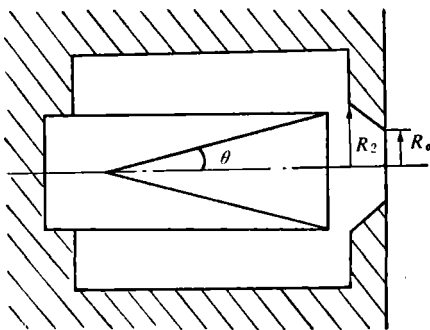


图 2 腔体结构图

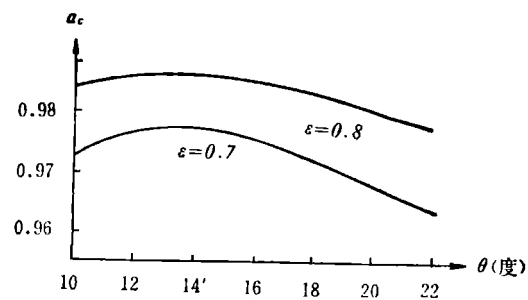


图 3 有效吸收率与锥角的关系

加热电阻  $R_1$ 。我们使用薄膜加热器作为  $R_1$ 。锥形腔由低热阻的薄壁圆筒结构支撑, 保证腔体与通光孔径同轴, 以减小入射辐射偏轴引入的仪器误差。感温铂丝绕在热阻近腔

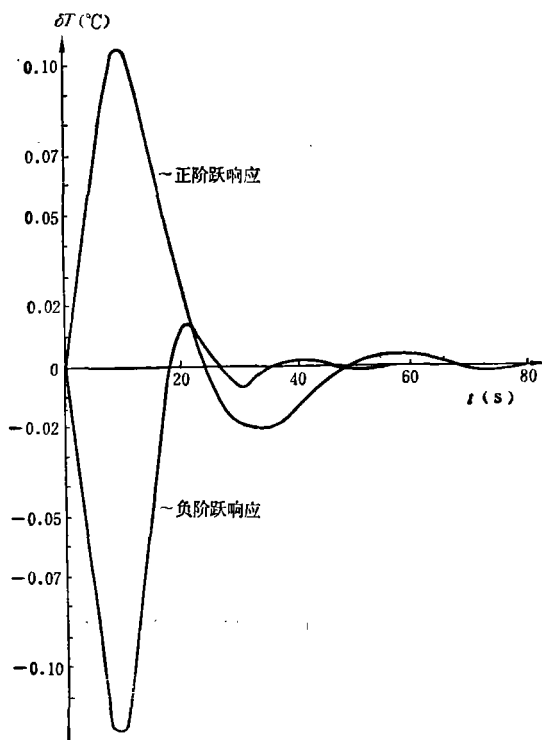


图4 温控对阶跃的响应曲线

体端的螺纹槽内。铂丝感温电桥近平衡时的输出电压的一级近似为:

$$\Delta V = V\beta\Delta T/4, \quad (7)$$

式中  $V$  为电桥外加电压,  $\beta$  为铂丝电阻温度系数,  $\Delta T$  为两热阻感温点温差。当  $V=6V$ ,  $\Delta T$  为  $0.001^{\circ}\text{C}$  时, 输出电压  $\Delta V$  为  $5.6\mu\text{V}$ 。这对前置放大器来说没有提出过高的要求。

工作方程 (5) 中的误差项  $E$ , 受辐照腔的温度调节性能影响较大。为减小误差, 要求自校与测量两状态双腔温度尽可能一致。因此双腔日射仪的整机电路主要是对阶跃响应的比例-积分-微分调节电路。电路各参量由动态响应曲线选定<sup>[4]</sup>。实测整机电路对  $150\text{ mW}$  辐照腔阶跃加热功率的温度调节响应曲线如图4所示。在70秒后温度调节余差  $\delta T$  小于  $0.001^{\circ}\text{C}$ 。

#### 四、某些参数的理论计算

由于目前测量上的困难, 除  $A_c$ 、 $R_1$ 、 $\delta T$  等参量可采用实测值外, 有效吸收率、空气热传导等参量均直接使用理论计算值。为准确计算有效吸收率, 我们提出了一种便于检验误差的计算方法<sup>[15]</sup>。以下的计算即基于此计算方法。

腔体对轴向入射辐射的吸收率不同于通常用腔体的半球发射率来表示的腔体吸收率。为了表明这一点, 我们计算了腔体的半球发射率, 法向发射率以及轴向入射辐射的腔体吸收率(这里腔体是指锥形腔与盖板的组合)。腔体吸收率的计算式推导结果为:

$$\alpha = 1 - \frac{\sin \theta}{A_c} \rho \left\{ \int_0^{\infty} F_{x-D} da(x) + \int_L [\rho\phi_1(x) + \rho^2\phi_2(x) + \dots + \rho^n\phi_n(x) + \dots] F_{x-D} da(x) \right\}, \quad (8)$$

其中 
$$\phi_1(x) = \int_0^x K(x, y) dy,$$

$$\phi_n(x) = \int_L \phi_{n-1}(y) K(x, y) dy, \quad (n=2, 3, 4, \dots)$$

$L$  表示积分限从锥形腔顶到通光孔径,  $F_{x-D}$  为腔内  $x$  处对开口的视因子,  $K(x, y)dy$  为  $x$  对  $y$  的视因子。其它符号意义如图5所示。

式(8)表示, 腔体的吸收率等于轴向入射为1的辐射减去轴向入射由腔壁经开口各次反射出去的辐射总和。腔体的法向发射率为:

$$\varepsilon_o = \frac{\int_0^{x_o} \varepsilon(x) dF_{P-X}}{\int_0^{x_o} dF_{P-X}}, \quad (9)$$

其中  $dF_{P-X}$  为轴上距腔体无穷远处的探测器对腔内  $x$  部分的视因子。式 (9) 的含义是对轴上无穷远处腔体的实际辐照度与腔内壁为绝对黑体时的辐照度之比。

腔体的半球发射率  $\varepsilon_o$  可由下式计算:

$$\varepsilon_o = \frac{1}{A_o} \int_L \varepsilon(x) F_{X-D} da(x), \quad (10)$$

式 (10) 表示腔体经开口辐射出去的功率与腔壁为黑体时辐射出去的功率之比。计算结果列于表 1。它表明腔体的吸收率与法向发射率相一致(将光线逆转即可理解这一点)。

表 1 不同材料发射率下的各计算结果

材料发射率	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
腔体吸收率	0.9942	0.9958	0.9971	0.9983	0.9992
腔体法向发射率	0.9942	0.9958	0.9971	0.9983	0.9992
半球发射率	0.9728	0.9792	0.9851	0.9905	0.9954
腔体有效吸收率	0.9804	0.9852	0.9895	0.9933	0.9968

实际上,双腔日射仪探测器仅是锥形腔体,故需要计算锥形腔体的有效吸收率。其方法是将锥形腔吸收到的轴向入射辐射和在整个腔内多次反射辐射迭加起来,与入射辐射相比,此即腔体有效吸收率。推导得到的计算式如下:

$$\alpha_o = \frac{1}{A_o} \varepsilon \sin \theta \left\{ \int_0^{x_o} da(x) + \int_0^{x_o} [\rho_1 \phi_1(x) + \rho_2 \phi_2(x) + \dots + \rho_n \phi_n(x) + \dots] da(x) \right\}, \quad (11)$$

其中各符号意义同前述。计算结果列于表 1 中。

由双腔日射仪腔体结构(图 2)可以看到,锥形腔与盖板间为一缝隙(约 2 mm)。在以上的计算中我们将缝隙看作由同样发射率材料涂复的圆筒。由于空腔效应,缝隙的半球发射率大于材料发射率。我们计算了缝隙发射率分别是 0.95~1 时的腔体的有效吸收率,结果列于表 2。计算表明,误差小于  $2 \times 10^{-5}$ 。

表 2 缝隙部分用不同材料发射率计算时腔体的有效吸收率

缝隙部分的材料发射率	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
腔体有效吸收率	0.996807	0.996805	0.996802	0.996800	0.996798	0.996795

双腔日射仪是不等温腔,其温度分布如图 6 所示。其半球发射率可由下式计算:

$$\varepsilon_o = \frac{\int T^4(x) \varepsilon(x) F_{X-D} da(x)}{\int T^4(x) F_{X-D} da(x)}, \quad (12)$$

其中  $T(x)$  为腔内壁的温度分布。腔体的等效温度由下式计算:

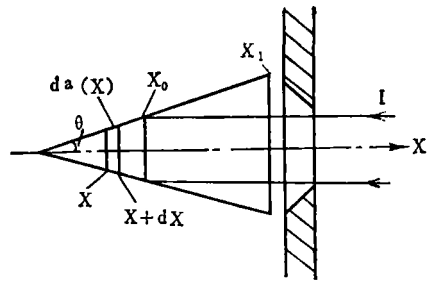


图 5 腔体理论计算的结构

$$T_{e1} = \left[ \frac{1}{A_c} \int T^4(x) F_{x-D} da(x) \right]^{1/4} \quad (13)$$

计算结果(见表 3)表明, 由于腔内温差较小, 等温腔与不等温腔的半球发射率相差甚微, 可近似作等温腔处理。

表 3 等温腔与不等温腔的半球发射率的计算结果

材料发射率	0.70	0.75	0.80	0.88	0.92	0.99
不等温腔的半球发射率	0.96535	0.97262	0.97912	0.98832	0.99246	0.999106
等温腔的半球发射率	0.96558	0.97276	0.97922	0.98838	0.99250	0.999108

腔体与环境之间通过空气介质传导的热功率, 在稳态无内热源时的热分布可由拉普拉斯方程  $\nabla T = 0$  求解。由边界条件解出温度分布后, 由温度梯度可求得腔体通过空气介质传递给环境的热功率。我们使用有限差分方法求解方程<sup>[16]</sup>。计算结果列于表 5。其等温线如图 7 所示。腔体与热阻结构的时间常数计算结果为 16.8 秒, 与实测值相近。

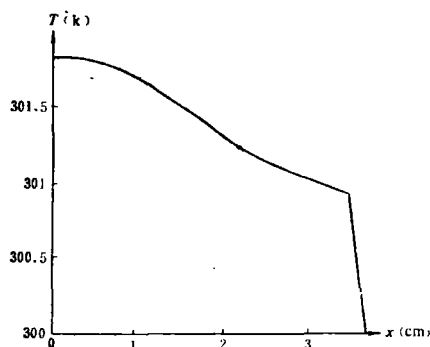


图 6 不等温腔温度分布

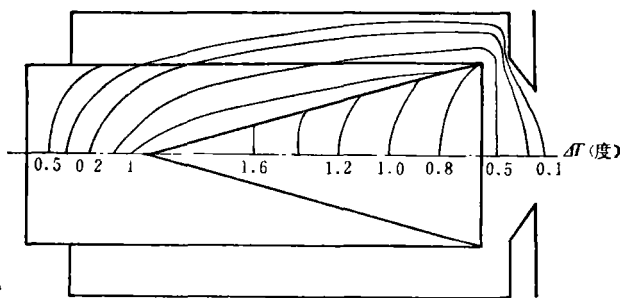


图 7 腔体的等温曲线

## 五、测量结果和误差分析

### 1. 比测实验

为了解仪器的实际工作性能, 我们将双腔日射仪与北京天文台 Ångström 补偿日射仪作了实时地面比测实验。测量结果列于表 4, 平均偏差为 0.6%。

Ångström 日射仪使用 IPS56 标尺, 双腔日射仪为国际绝对标尺(即 WRR 标尺, 它比 IPS56 标尺高 2.2%)。因此双腔日射仪实际比天文台 Ångström 日射仪低 1.6%。而天文台的 Ångström 日射仪与中央气象局的 Ångström 日射仪系统差达 3.3%, 双腔日射仪正好介于两者中间。因此比测标准是决定误差的重要因素。实验表明, 双腔日射仪可对太阳常数作绝对测量。因为双腔日射仪的仪器常数是由理论计算获得, 不同于 Ångström 日射仪由国际标准标定。

### 2. 整机误差分析

双腔日射仪各参量的测量值与理论计算值列于表 5。对于太阳常数为  $136.7 \text{ mw/cm}^2$  的辐照度, 双腔日射仪的绝对误差计算结果为  $\pm 0.6\%$ 。主要误差项列于表 6。

表5 各参量之计算或测量值及其误差

符 号	意 义	单 位	数 值	误 差
$A_c$	透光孔径面积	cm <sup>2</sup>	0.9800	0.0009
$\alpha_c$	腔体有效吸收率	—	0.997	0.002
$\rho_c$	腔体反射率	—	0.002	0.002
$\rho$	散热片涂复材料反射率	—	0.05	0.02
$V_1$	自校状态辐照腔加热电压	V	6.70	0.01
$V'_1$	测量状态辐照腔加热电压	V	3.70	0.01
$R_1$	辐照腔加热器电阻	$\Omega$	228.2	0.2
$\sigma$	斯蒂藩-玻尔兹曼常数	mw/cm <sup>2</sup> K <sup>4</sup>	$5.6697 \times 10^{-9}$	$7 \times 10^{-13}$
$\epsilon_1$	视场 1 区域的发射率	—	0.05	0.05
$\epsilon_2, \epsilon_3$	视场 2、3 区域的发射率	—	0.95	0.05
$\epsilon_4, \epsilon_5$	视场 4、5 区域的发射率	—	0.2	0.1
$\epsilon_{c1}, \epsilon_{c2}, \epsilon_{c3}$	腔体对视场 1、2、3 区域的发射率	—	0.98	0.02
$\epsilon_{c4}, \epsilon_{c5}$	腔体对视场 4、5 区域的发射率	—	0.3	0.2
$A_{c1}, A_{c2}$	腔体对视场 1、2 区域的面积	cm <sup>2</sup>	0.980	0.001
$A_{c3}$	腔体对视场 3 区域的面积	cm <sup>2</sup>	3.1	0.1
$A_{c4}, A_{c5}$	腔体对视场 4、5 区域的面积	cm <sup>2</sup>	10.3	1.0
$F_{c1}$	腔体对视场 1 区域的视因子	—	0.002	0.0002
$F_{c2}$	腔体对视场 2 区域的视因子	—	0.99	0.01
$F_{c3}$	腔体对视场 3 区域的视因子	—	0.76	0.06
$F_{c4}$	腔体对视场 4 区域的视因子	—	0.89	0.09
$F_{c5}$	腔体对视场 5 区域的视因子	—	0.11	0.01
$T_{c1}, T_{c2}$	腔体对视场 1、2 区域的等效温度	K	300.9	10
$T_{c3}, T_{c4}, T_{c5}$	腔体对视场 3、4、5 区域的等效温度	K	301.6	10
$T_1, T_2, T_3, T_5$	视场 1、2、3、5 区域的等效温度	K	300	10
$T_4$	视场 4 区域的等效温度	K	300.4	10
$T_c$	腔体的平均温度	K	301.6	10
$\Delta T_s$	散热片在两状态的温漂	K	0.02	—
$\Delta T_1$	视场 1 在两状态的温漂	K	10	—
$K$	热阻的热导	mw/K	250	3
$C$	腔体的热容量	w·sec/K	1.1	0.3
$V_2$	补偿腔加热电压	V	6.700	0.001
$K_2$	补偿腔加热电阻	$\Omega$	228.5	0.2
$K_{ac1}$	腔体外侧与散热片及热阻间的空气热导	mw/K	7.8	0.2
$K_{ac2}$	腔体内侧与散热片间的空气热导	mw/K	0.77	0.07
$\delta \Delta T_2$	两状态补偿腔热阻上的温差变化	K	0.001	—
$K_{ec}$	引出导线的热导	mw/K	1.8	0.2
$\delta \frac{\partial T}{\partial t}$	两状态腔体温度随时间的变化率差	K/S	$1 \times 10^{-4}$	—
$\delta \frac{\partial T_s}{\partial t}$	两状态散热片温度随时间的变化率差	K/S	$1 \times 10^{-4}$	—
$\delta T$	温度调节余差	K	0.001	—

表 4 双腔日射仪与 Ångström 日射仪比测结果

测量日期与时间	太阳辐照度 (mw/cm <sup>2</sup> )		差值(mw/cm <sup>2</sup> )	相对误差 (%)
	Ångström 日射仪	双腔日射仪		
1981年6月2日9:10	57.12	57.66	0.54	0.9
1981年6月2日9:30	58.53	58.74	0.31	0.5
1981年6月4日9:06	63.24	63.69	0.45	0.7
1981年6月4日9:35	67.25	67.37	0.12	0.2
1981年6月5日8:55	62.47	63.11	0.64	1.0
1981年6月5日9:34	68.31	68.43	0.12	0.2
1981年6月5日10:01	70.07	70.29	0.22	0.3
1981年6月5日11:24	69.33	69.79	0.46	0.7

表 6 双腔日射仪主要误差项的误差值(%)

误差项	$K\delta T$	$C\delta \frac{\partial T}{\partial t}$	$\frac{\partial I}{\partial \alpha_c} \Delta \alpha_c$	$\frac{\partial I}{\partial A_c} \Delta A_c$	$\frac{\partial I}{\partial V_1} \Delta V_1$	$\frac{\partial I}{\partial V'_1} \Delta V'_1$	$\frac{\partial I}{\partial R_1} \Delta R_1$	整机
绝对误差	0.19	0.10	0.21	0.09	0.44	0.24	0.09	0.6

表 6 中  $K$  是热阻结构的热导。要减小此项误差, 可减小  $K$ , 但会增大仪器时间常数。从式 (7) 可见, 通过对前置放大器的精选及对整机电路的精细设计, 有可能使温度调节余差  $\delta T$  达到  $0.0005^\circ\text{C}$  以下, 使此项误差小于  $0.1\%$ 。

误差项  $\frac{\partial I}{\partial \alpha_c} \Delta \alpha_c$  中,  $3M$  黑漆的材料发射率的不确定值  $\Delta \alpha_c$  较大。若材料发射率测量误差小于  $1\%$ , 可使此项误差小于  $0.1\%$ 。

误差项  $\frac{\partial I}{\partial V_1} \Delta V_1$  及  $\frac{\partial I}{\partial V'_1} \Delta V'_1$  中, 由于仪器时间常数较大, 前置放大器的  $1/f$  噪声引起的  $\Delta V_1$  及  $\Delta V'_1$  较大。当前置放大器的噪声降低, 腔体与热阻的时间常数的减小以及整机电路的进一步改进后, 估计  $V_1, V'_1$  的误差可减小到  $0.1\%$ 。

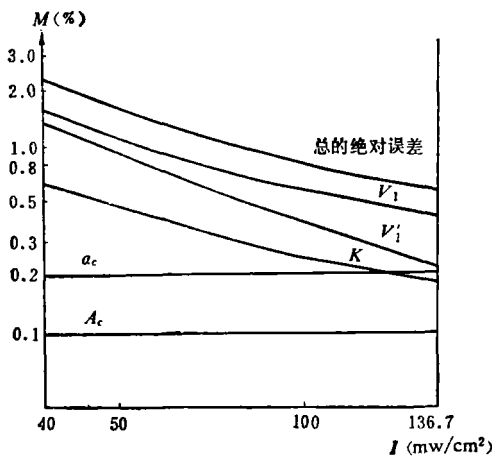


图 8 不同辐照度下双腔日射仪的绝对误差

上述几项误差减小后, 双腔日射仪的总的绝对误差有可能达  $\pm 0.3\%$ 。此外, 据文献 [2] 报道, 由黑漆热阻引起的不等价误差为  $0.07\%$ , 相对于以上几项为次要误差。

图 8 表示在不同入射辐射下, 双腔日射仪总的绝对误差以及  $V_1, V'_1$  等项的绝对误差曲线。从图可见, 双腔日射仪对于低于  $70 \text{ mw/cm}^2$  的辐照度, 其总的绝对误差大于  $1\%$ 。图 8 还给出了引起此误差增大的主要参量。图 9 表示, 两状态下由于散热片不同的温度漂移引起的、在一个太阳常数入射下各参量对仪器绝对误差



的影响。曲线表明,在两状态下,视场4(FOV<sub>4</sub>)的热交换对仪器精度影响较大。对锥形腔外壁及热阻内壁作抛光处理,可减小  $\varepsilon_4$  及  $\varepsilon_{c4}$ , 使热交换量减小。双腔日射仪的外形照片示于图 10。

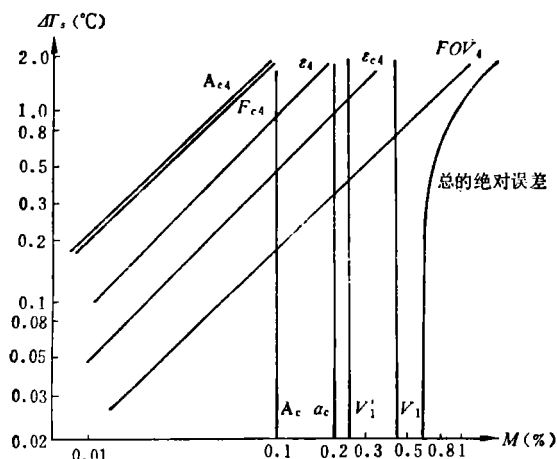


图 9 散热片两状态温漂、与误差的关系

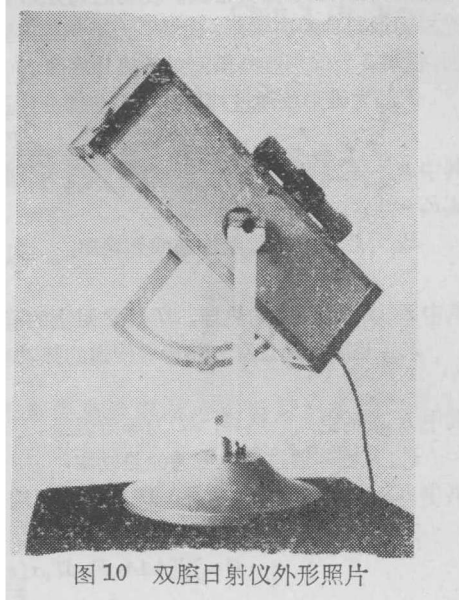


图 10 双腔日射仪外形照片

**致谢**——双腔日射仪的研制工作是在导师小组匡定波、薛永琪、龚惠兴、徐尧洲老师的指导下进行的,工作过程中得到中国科学院上海技术物理研究所各部门的大力帮助,在北京实验期间得到中国科学院北京天文台的支持,特此致谢。

### 参 考 文 献

- [1] Fröhlich C. et al., *PB-271771*.
- [2] Kendall J. M., *Appl. Opt.*, **9**(1970), 1082.
- [3] Henel R. A., *NASA-TN-D-674*.
- [4] Drummond A. J. et al., *J. Spacecraft and Rockets*, **14**(1967), 1200.
- [5] Thekeakara M. P., *Appl. Opt.*, **8**(1969), 1713.
- [6] Murcray D. G., *AD-691061*.
- [7] *Annals of the IGY*, (General Editor: Sir Harold Spencer Jones), Pergamon Press, Vol. 5, 1958, 388.
- [8] 康德拉捷夫, 太阳辐射能(李怀瑾等译), 科学出版社, 1962, 28.
- [9] *USP No. 3461290*.
- [10] Willson R. C., *Appl. Opt.*, **12**(1973), 810.
- [11] Thekeakara M. P. et al., *NASA-TR-R351*.
- [12] Willson R. C., *Appl. Opt.*, **18**(1979), 179.
- [13] Willson R. C., *Solar Energy*, **14**(1973), 203.
- [14] 化工自动化, 燃料化学工业出版社, 1973, 445.
- [15] 张智敏, 红外物理与技术, (1981), 4: 48.
- [16] Croft David R., *Heat Transfer Calculation Using Finite Difference Equations*, Applied Science Publishers Ltd., England, 1977.

### 附录 (误差项 $E$ 的展开式)

$P_{rj}$  为腔体周围各部分通过辐射传递给腔体的热功率:

$$P_{rj} = \varepsilon_j A_j F_j \sigma T_j^4,$$

其中  $\varepsilon_j$ 、 $A_j$ 、 $F_j$ 、 $T_j$  分别是第  $j$  个视场部分的材料发射率、面积、对腔体的视因子以及该部位的等效温度。 $\sigma$  为斯蒂藩-玻尔兹曼常数。视场的划分如下: 视场 1 为腔体对视场光栏, 视场 2 为腔体对通光孔径与视场光栏间散热片的内侧面, 视场 3 为锥形腔内壁对通光孔径盖板内侧面, 视场 4 为锥形腔外侧面对热阻内侧面, 视场 5 为锥形腔外侧面对散热片底面。

$P_{rcj}$  为锥形腔通过辐射向周围各部分传递的热功率:

$$P_{rcj} = \varepsilon_{cj} A_{cj} F_{cj} \sigma T_{cj}^4,$$

其中  $\varepsilon_{cj}$ 、 $A_{cj}$ 、 $F_{cj}$ 、 $T_{cj}$  分别为腔体对第  $j$  个视场的发射率、面积、视因子以及等效温度。由视因子概念,  $A_j F_j = A_{cj} F_{cj}$ 。

$P_c$  为腔体通过热阻传递的热功率:

$$P_c = K \Delta T,$$

其中  $K$  为热阻结构的热导,  $\Delta T$  为热阻上的温差。

$P_{acj}$  是腔体通过空气热传导传递的热功率:

$$P_{acj} = K_{acj} \Delta T,$$

其中  $K_{acj}$  是空气之热导,  $\Delta T$  为等效温差。

$P_{ec}$  是腔体通过导线传递的热功率:  $P_{ec} = K_{ec} \Delta T,$

其中  $K_{ec}$  为引出导线之热导,  $\Delta T$  为导线两端之温差。

方程(5)中  $E$  经泰勒展开, 可得:

$$\begin{aligned} E = & \sum_j [4A_{cj} F_{cj} \Delta T_e \sigma (\varepsilon_j T_j^3 - \varepsilon_{cj} T_{cj}^3) + 4A_{cj} \Delta F_{cj} \Delta T_e \sigma (\varepsilon_j T_j^3 - \varepsilon_{cj} T_{cj}^3) \\ & + 4A_{cj} F_{cj} \Delta T_e \sigma (\Delta \varepsilon_j T_j^3 - \Delta \varepsilon_{cj} T_{cj}^3) + 12A_{cj} F_{cj} \Delta T_e^2 \sigma (\varepsilon_j T_j^2 - \varepsilon_{cj} T_{cj}^2) \\ & + K \delta T + \Delta K \delta (\Delta T_2) + C \delta \frac{\partial T}{\partial t} + \Delta C \delta \frac{\partial T_e}{\partial t} + \sum_j K_{acj} \delta T + K_{ec} \delta T + 2V_2 \Delta V_2 / R_2, \end{aligned}$$

其中各符号意义列于表 5。

## DEVELOPMENT OF DUAL CAVITY PYRHELIOMETER

Zhang Ziming

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica)

### ABSTRACT

The operational principle of the dual cavity pyrhelimeter, an instrument for measuring solar constant, is expounded. The work equation is derived. The parameters in it are measured and calculated. The experiments show that the solar constant can be absolutely measured with the prototypic pyrhelimeter developed by us. It is shown from the error analysis that the accuracy of this instrument is  $\pm 0.6\%$ . Based on this analysis, some measures to be taken to improve the accuracy are presented in this paper.