

大视场 ERB-NS 全波探测通道的高精度辐射定标*

黄永年 王模昌 王培纲 严义坝
(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

摘要 基于腔体辐射计的基本原理, 提出一种地球辐射收支仪全波探测通道的高精度辐射定标系统, 并给出了定标实验结果.

关键词 地球辐射收支非扫描仪, 辐射定标, 全波通道.

引言

地球辐射收支仪(ERB)是观测地气系统辐射收支状况的专用空间遥感仪器. 最新一代 ERB 探测仪(ERBE)已装载在美国 1984~1986 年间发射的 NOAA-9、NOAA-10 卫星及地球辐射收支专用卫星(ERBS)上^[1]. 我们研制的地球辐射收支非扫描仪(ERB-NS)的探测视场角为 $\pm 45^\circ$; 具有全波(0.2~50 μm)和短波(0.2~3.5 μm)两个探测通道, 精度为 $\pm 1.0\%$ (全波), $\pm 1.5\%$ (短波), 其技术水平与美国最新一代星载非扫描地球辐射收支仪相当. 建立高精度地面辐射定标系统, 对于高精度、大视场、宽波段的 ERB-NS 来说是十分必要的. 目前遥感领域用的面源黑体通常为蜂窝胶接形式^[2]. 它的最大问题在于温度均匀性较差, 顶底温差可达 1~2 K, 于此相伴的黑体辐射输出偏差大, 稳定性差, 难以满足 ERB 全波探测器高精度的定标要求. 而新型的同心槽面源黑体的精度比蜂窝式面源黑体有较大的提高^[3]. 本文提出用高精度低温同心槽面源黑体定标 ERB-NS 的全波探测通道, 建立了定标系统, 并进行了全波通道黑体定标实验. 对实验结果分析表明, 本文提出的定标系统能满足地球辐射收支仪高精度、大视场、宽波段的定标要求.

1 ERB-NS 工作原理

ERB-NS 包括全波(0.2~50 μm)和短波(0.2~3.5 μm)两个探测通道. 短波通道用来测量地球对太阳辐射的反射量, 全波通道测量地球自身的长波辐射(3.5~50 μm)及其对太阳辐射的反射. 由于 ERB-NS 宽波段的要求, 所用的探测器是双腔热阻型的辐射探测器. 全波和短波探测器的结构基本相同, 只是短波探测器加了一半球形熔融石英滤光片, 保证它只响应短波辐射. 如图 1 所示其主腔和参考腔是涂有黑漆的“圆柱+圆锥”形腔体. 在腔体外壁绕有加热丝和铂电阻, 主腔和参考腔分别通过热阻和热沉相连. 通过温度控制电路将热沉温度维持在某一设定值不变. 参考腔温度与热沉温度接近, 并基本保持不变, 参考腔主要与热沉

有热交换,与主腔的热交换要少一个数量级.参考腔和热沉温度是探测器的温度基准点,其温控精度对探测器的精度起着重要的作用.

主腔有两个主要的能量源:通过腔体口进来的外部辐射和主腔加热丝产生的焦耳热.另外,主腔与视场光阑、热沉及其它所见表面间也有热传导或辐射交换.当周围热环境稳定时,这部分辐射交换是不变的.ERB-NS探测器的能量平衡方程为

$$P_e + (\alpha + \rho_c \rho_r F_{c-r} F_{r-c}) A_c m(t) = K \Delta T + c \frac{dT}{dt} + \sum P_r + \sum K_i \Delta T_i + P_{c-c} \quad (1)$$

式(1)中 P_e 为电加热功率, $(\alpha + \rho_c \rho_r F_{c-r} F_{r-c}) A_c m(t)$ 为入射辐射功率, α 为腔体吸收率, A_c 为主光阑面积, ρ_c 为腔体反射率, ρ_r 为视场光阑反射率, $m(t)$ 为入射辐射照度, $\sum P_r$ 为主腔和其

所见表面间的净辐射交换, $K \Delta T$ 为主腔通过热阻扩散的热能, K 为热阻传热系数, ΔT 为热阻两端温差, $c \frac{dT}{dt}$ 为腔体温升储热, c 为腔体热容, $\frac{dT}{dt}$ 为腔体温度变化速率, $\sum K_i \Delta T_i$ 为通过引线扩散的热能, P_{c-c} 为主腔向视场外辐射的功率.方程(1)左边为腔体接收到的功率,右边为腔体传导或辐射输出的功率.

另一方面,主腔测温铂电阻和参考腔铂电阻构成平衡电桥的二臂,通过反馈控制电路,保持主腔温度比参考腔温度高 0.5°C .因为参考腔温度保持不变,所以主腔温度也保持不变.当主腔接收到的外部辐射增加时,则腔体电加热功率减小相同的量,以保持主腔温度不变.因此,主腔电加热功率随着外界辐射源能量的变化而变化,测得主腔电加热功率就可推算出所接收的外部辐射量.

2 ERB-NS全波通道高精度低温面源黑体辐射定标

2.1 定标源——高精度同心槽低温面源黑体

ERB-NS全波探测器的视场和结构决定了黑体的基本尺寸,应该采用面源黑体,而不采用圆锥腔或圆柱腔黑体;其次,全波探测所要探测的景物是地球自身辐射及其所反射的太阳辐射之和.黑体定标源要模拟该景物,这决定了黑体的工作温度范围大致为 $200 \sim 350\text{K}$,ERB仪器的精度为 $\pm 1.0\%$,要求黑体的不确定度 $< \pm 1.0\%$.

专为ERB-NS定标研制的同心槽面源黑体辐射体是一块阳极发黑处理的圆铝板,在铝板上切割同心槽,形成腔体效应,使黑体辐射率提高.该高精度低温面源黑体的有效口径为 250mm ,工作温度 $150 \sim 350\text{K}$,法向有效率 0.995 ,温控精度为 0.02K (半小时内,直流加热方式),面源腔底均匀性 $< 0.1\text{K}$,同心槽温度梯度优于 0.2K ,测温不确定度 $< 0.05\text{K}$,总的面源不确定度 $\pm 0.5\%$ (300K).

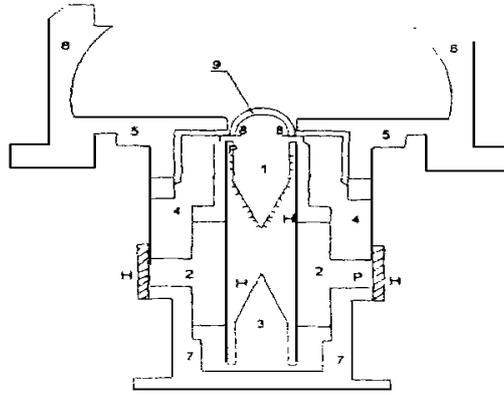


图1 ERB-NS探测器原理图

- 1 主腔, 2 铜热沉, 3 参考腔, 4 铝热沉,
5 基板, 6 视场光阑, 7 铝热沉, 8 口径,
9 短波半球形滤光片, H 加热器,
P 温度传感器

Fig. 1 Schematic diagram of ERB-NS sensor

2.2 ERB-NS 全波探测器定标实验

全波探测器黑体定标实验装置如图 2 所示, 主要由高精度同心槽低温面源黑体和信号处理部分组成. 定标时, 先向黑体温控系统传送一个所需的温度值 T_i , 温度控制稳定之后, 黑体的测温仪测出黑体的温度 T_i , 并通过 RS-232 串行口通信方式传送给微机. 然后, ERB-NS 对准面源黑体, 进行辐射测量, 主腔加热电压的数字化输出值 N_i 通过专门的 I/O 接口传送给微机. 改变黑体的设定温度, 重复上述过程, 可获得一组黑体温度及其相应的 ERB-NS 腔体加热电压数字化值, 即一组 $\{T_i, N_i\}$.

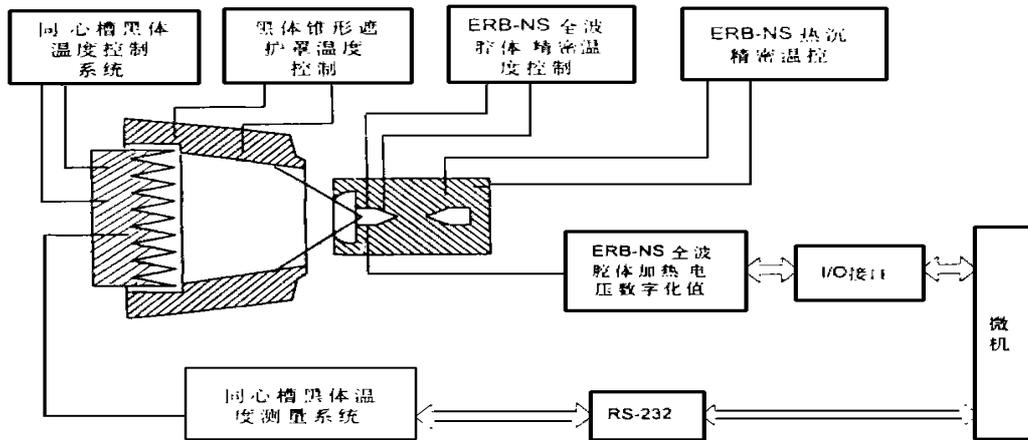


图 2 ERB-NS 全波探测通道的黑体辐射定标系统

Fig. 2 The blackbody radiometric calibration system for ERB-NS total wavelength channel

假定腔体吸收率为 $\alpha = 1$, 则腔体接收黑体的辐射功率为

$$P_r = A_0 \cdot \Omega \cdot \frac{M_b}{\pi}, \quad (2)$$

其中 $A_0 = 0.2826 \text{cm}^2$ 为腔体口面积, $\Omega = \pi \cdot \sin^2 \theta$ 为探测器等效立体角, M_b 为黑体辐射出射度 ($M_b = \epsilon \sigma T^4$). 因此, 测出面源黑体的温度 T , 由式(2)可计算出腔体接收的辐射功率 P_r .

腔体加热电压由 8031 控制的双积分 A/D 转换为数字化值 N , 数字化位数是 12. 数字化值 N 与腔体加热电压 V 之间有如下关系:

$$V = A + B \cdot N \quad (3)$$

其中 A 、 B 为常量. 实际测量得 $A = -4.972 \text{V}$, $B = 0.00268 \text{V/字}$, 则腔体加热功率为

$$P_e = V^2/r = (A + B \cdot N)^2/r, \quad (4)$$

其中 $r = 302.5 \Omega$ 为主腔加热丝电阻值.

测得黑体温度 T 和加热电压数字化值 N , 利用式(2)和(4)可以计算出腔体接收的辐射功率 P_r 和腔体电加热功率 P_e . 表 1 是一组实验数据, 图 3 是 P_r 和 P_e 的实验曲线及其线性回归的结果. 根据 ERB-NS 探测器电功率补偿的工作原理, 接收的辐射功率改变量与腔体加热功率的改变量是相等的, 即 P_r 和 P_e 直线斜率理论上应该为 -1.0, 实验测出的斜率为

- 0.953. 理论与实验结果之间有一定的误差, 主要是因为本次定标实验是在空气对流变化比较严重的环境下进行的, 环境温度变化比较大. 若在真空中进行定标实验, 上述误差是可以消除的.

表 1 ERB-NS 全波通道定标实验数据

Table 1 Radiometric calibration data of ERB-NS total wavelength channel

$T()$	16.06	22.08	32.18	42.43	52.27	62.86
N	3192.00	3181.85	3167.20	3149.20	3126.60	3101.75
$P_r(\text{mW})$	6.388	6.936	7.935	9.056	10.239	11.638
$P_e(\text{mW})$	42.427	41.785	40.867	39.753	38.377	36.891

ERB-NS 的灵敏度为

$$\Delta m = \frac{\Delta P_r}{\Omega \cdot A_0} \quad (5)$$

由图 3 可以看出, 当 $\Delta P_r = 0.07358 \text{ mW}$ 时, 则 $\Delta m = 0.145 \text{ mW/cm}^2$. Δm 比准确度所要求的 0.39 mW/cm^2 (全波) 小得多, 说明整机灵敏度性能满足要求.

3 结论

本文提出并建立了 ERB-NS 全波通道的高精度黑体辐射定标系统, 并进行了定标实验. 由于本次定标实验是在具有丰富热交换的室温下进行的, 而 ERB-NS 的灵敏度又非常高, 所以引起一定的误差. 上述定标实验基本上验证了 ERB-NS 的电功率补偿工作原理, 并测出了它的灵敏度. 为了得到更准确的定标精度, 必须在真空环境下进行定标试验. 只要同心槽面源黑体的不确定度 $\pm 0.5\%$, 用本文提出的定标系统标定 ERB-NS 全波通道, 达到 $\pm 1.0\%$ 精度是完全可能的.

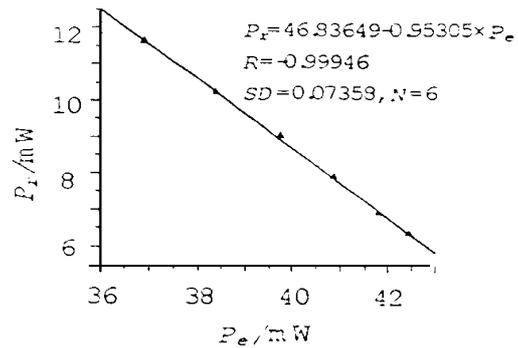


图 3 ERB-NS 全波探测通道的黑体辐射定标结果

Fig. 3 Blackbody radiometric calibration result of ERB-NS total wavelength channel

只要同心槽面源黑体的不确定度 $\pm 0.5\%$, 用本文提出的定标系统标定 ERB-NS 全波通道, 达到 $\pm 1.0\%$ 精度是完全可能的.

REFERENCES

- 1 Luther M R, et al. *Reviews of Geophysics*, 1986, **24**(2): 391 ~ 399
- 2 Gong H X, Zheng Q B, Zhang G X. *Chinese Journal of Infrared Research* (龚惠兴, 郑新波, 张建新. 红外研究), 1990, **9**(2): 140 ~ 143
- 3 Stephen L Carman. *SPIE*, 1983, **416**: 178 ~ 186

*

HIGHLY ACCURATE RADIOMETRIC CALIBRATION FOR ERB-NS TOTAL WAVELENGTH CHANNEL WITH A WIDE FIELD-OF-VIEW*

HUANG Yong-Nian WANG Mo-Chang WANG Pei-Gang YAN Yi-Xun
(*Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China*)

Abstract The basic principle of the cavity radiometer was described. Based on this, a highly accurate radiometric calibration system for the total wavelength channel of the earth radiation budget instrument was presented. The experimental result was given.

Key words earth radiation budget nonscanner, ERB-NS radiometric calibration, total wavelength channel.