

文章编号 1004-924X(2003)06-0576-05

低背景辐射校准装置的光机特性

梁培

(苏州大学 现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

摘要: 低背景辐射校准装置由多个舱室和黑体组成, 其突出特点是模块式的结构和辐射的光学偏转。模块式结构使得校准装置可以工作于多种方式, 如辐射源的校准、辐射探测设备的校准和辐射度的溯源。校准装置内的标准辐射, 参考辐射和待测辐射由光学偏转方式进行同轴, 使装置避免了大型导轨平台的使用。工作时, 校准装置可以抽真空到 1.33×10^{-2} Pa。充液氮后, 校准装置的背景温度低于 80 K。这些特点使校准装置具有足够的能力进行 $-60 \sim +80$ °C 温度区间目标的光谱辐射度校准。

关键词: 辐射校准装置; 光谱辐射度; 低背景; 抽真空; 模式结构; 校准

中图分类号: O432.1 文献标识码: A

Optical and structural characteristics of low background radiometric calibration facility

LIANG Pei

(Modern Optical Technology Institute, Suzhou University, Suzhou 215006, China)

Abstract: A low background radiometric calibration facility (LBRCF) consists of chambers and blackbodies, and it features modular structure and optical deflection. The modular structure enables LBRCF to perform several functions, such as radiator calibration, radiometer calibration and radiometric tracing to the source. In LBRCF, standard radiation, reference radiation and the radiation under calibration are coaxial by optical deflection, and the use of large scale sliding tables is therefore avoided. During operation, LBRCF can be pumped to a vacuum level of 1.33×10^{-2} Pa (10^{-4} mmHg). With liquid nitrogen filled, the background temperature of LBRCF is below 80K. All these characteristics enables LBRCF to do spectroradiometry calibration in the target temperature range -60 °C to 80 °C.

Key words: radiometric calibration facility; spectroradiometry; low background; vacuum; module structure; calibration

1 引言

常温区间(0 °C附近)的辐射探测技术与空间光学和红外光学的发展相辅相成, 在当今的国民经济和军事领域中发挥着愈来愈重要的作用。红

外热像仪和其他的一些遥感遥测设备主要工作在常温的辐射区间, 他们的输出信号都需要相应的辐射测量装置校准定标后才能给出有用的数据资料。随着高新技术的采用, 这些仪器的探测能力和准确度都得到了大幅度的提高, 热像仪的温度分辨已趋近 0.01 °C, 空间遥感设备对地测温的准

准确度高达 $0.5 \text{ K}^{[1]}$, 这些指标相应地要求辐射校准装置具有更为准确的标定能力。长期以来, 一些国家投入了大量的人力研制建立低背景辐射的校准装置以满足高灵敏探测系统的定标需要。在不同的发展阶段和根据不同的使用目的, 美国国家标准技术局(NIST) 研制出了多种辐射校准装置^[2-3]。为了支持庞大的空间事业, 俄罗斯对辐射校准一直非常重视, 建有从 $0.04 \sim 25 \mu\text{m}$ 光谱区间一系列完整的检定装置^[4]。我国于 20 世纪 80 年代曾建有常温黑体辐射标准装置^[5], 限于当时的技术条件限制, 实用性能上和需求尚有一定的差距。20 世纪 90 年代末, 为了满足国防上常温辐射检定的需要, 在国防光学计量部门建立了一套 $-60 \sim +80 \text{ }^\circ\text{C}$ 辐射校准装置, 其设计严谨, 性能指标先进。本文简要介绍该辐射校准装置光学和机械方面的一些特性。

2 光机特性

图 1 是辐射校准装置的平面结构图, 由多个舱室和设备通过法兰盘连接为一体。工作时, 通过涡轮真空泵和分子泵抽真空, 用液氮制冷。为了使结构紧凑合理, 便于整体抽真空和制冷, 摒弃了以往一些辐射装置使用大型导轨移动比较的做

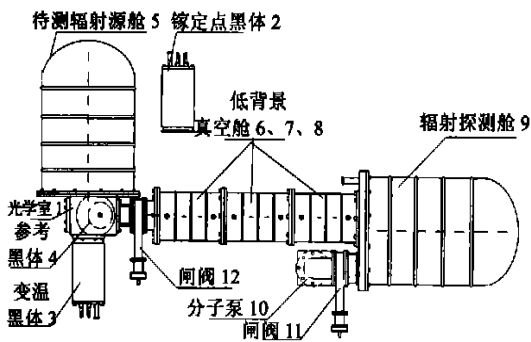


图 1 $-60 \sim +80 \text{ }^\circ\text{C}$ 低背景辐射校准装置的结构简图
Fig. 1 Structure sketch of the low background radiometric calibration facility

法, 采用光学转换和调制的方法进行辐射比对。校准装置的中心是光学室, 内装有转折镜、调制器和冷屏等光学部件。标准黑体、待测黑体和参考黑体的辐射都通过光学室经由低温真空舱到达辐射探测舱, 待测的辐射与标准辐射被辐射探测舱中的辐射计接收, 处理后给出校准的数据。研制任务要求校准装置能够对 $-60 \sim +80 \text{ }^\circ\text{C}$ 的辐射源和辐射接收设备进行光谱辐射的标定, 校准装置具有以下一些主要的光机特性。

2.1 低背景辐射

辐射探测系统接收到的是目标辐射和背景辐射的差值, 要在目标为 $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ 的低温端进行有效的光谱辐射标定, 辐射差值必须远大于接收系统的等效噪声值。仅仅将辐射通道屏蔽致冷是远远不够的, 调制叶片、转折镜和黑体面板的辐射都会影响测值。校准装置的光学室内各个光学部件通过传递致冷, 工作时都处于低温状态。可以估算一下辐射目标为 $-60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时辐射探测舱接收面上的辐射能量差值。探测系统, 如红外光谱辐射计的输出信号 S 正比于入射的辐射差值:

$$S = K \times \Delta E, \tag{1}$$

式中 K 是探测系统的转换因子; ΔE 是接收面上的辐照度差值。当辐射源的尺寸和接收的距离比较起来很小时, ΔE 可用下式表示:

$$\Delta E = \Delta A / (\pi L^2) \times [M_1(\lambda, T_1) - M_2(\lambda, T_2)], \tag{2}$$

ΔA 是辐射源的面积, L 是源和接收面的距离, $M_1(\lambda, T_1)$ 是温度为 T_1 的辐射源出射度, $M_2(\lambda, T_2)$ 是温度为 T_2 的背景辐射出射度, λ 是考察的波长。

设辐射源的开口直径为 20 mm , 源和接收面的距离为 2000 mm , $T_1 = 213 \text{ K} (-60 \text{ }^\circ\text{C})$, $T_2 = 80 \text{ K} (353 \text{ }^\circ\text{C})$, 使用碲镉汞探测器, 响应的波长范围 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 。表 1 给出了 $8 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ 和 $14 \mu\text{m}$ 3 个波长下辐射源、背景的辐射出射度, 以及接收面上的辐射照度差值。

表 1 目标温度 213 K , 背景温度 80 K 时的 $M_1(\lambda, T_1)$, $M_2(\lambda, T_2)$ 和 $\Delta E(\lambda)$

Tab. 1 $M_1(\lambda, T_1)$, $M_2(\lambda, T_2)$ and $\Delta E(\lambda)$, for $T_1 = 213 \text{ K}$ and $T_2 = 80 \text{ K}$

$\lambda (\mu\text{m})$	8	10	14
$M_1 (W \text{ cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1})$	2.459E-4	4.365E-4	5.630E-4
$M_2 (W \text{ cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1})$	1.969E-10	5.785E-9	1.834E-7
$\Delta E (W \text{ cm}^{-2} \mu\text{m}^{-1})$	6.146E-9	1.091E-8	1.407E-8

从表 1 中看出, 在最低的辐射目标温度点 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上, 波长 $8\text{ }\mu\text{m}$ 处具有最小的光谱辐射差值 $6.146 \times 10^{-9}\text{ Wcm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ 。事实上, 80 K 的辐射背景可以忽略不计。目前的技术水平, 红外光谱辐射计的等效噪声值可达 $10^{-13}\text{ Wcm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ 左右, 具有足够的信噪比以进行高准确度的光谱辐射度校准工作。

2.2 完整的辐射校准体系

为了使校准装置的辐射量值具有直接溯源的能力, 装置配备了定点标准黑体。采用的是镓定点标准黑体, 镓的纯度为 $0.999\ 999$, 90 温标给出的定点温度值是 $29.7646\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。定点黑体用于对工作黑体的标定, 起着辐射基准的作用。为了覆盖 $-60\sim +80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度区间, 实际校准工作采用变温标准黑体。变温黑体采用液浴法恒温, 具有变温快、温场均匀性好和温度定位准确度高的特点。变温标准黑体的温度变化范围满足 $-60\sim +80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的要求, 出射口径 30 mm , 长期稳定性 0.02 K/h , $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的温度均匀性 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在 $1\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 的光谱区间, 按照 Monte Carlo 法计算的黑体光谱发射率^[6] 为 $0.999\ 9$ 。

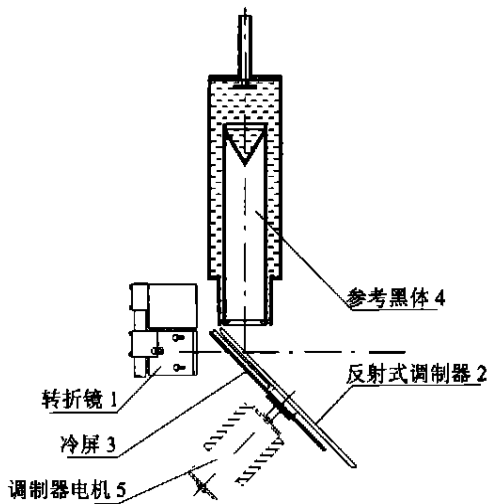


图 2 光学室的示意图

Fig. 2 Scheme of optical vacuum chamber

固定点和变温标准黑体的组合是基于辐射源的溯源体系, 如果在校准装置的辐射探测舱中放置标准探测器, 则装置工作在以辐射接收为基准的方式中。

2.3 参考黑体和辐射冷屏的设置

虽然已经将辐射通道和光学室的有关器件致

冷到 80 K 以下, 但为了使校准装置的辐射参考置于更加稳定和可信的基础上, 装置专门设置了参考标准黑体和辐射冷屏。图 2 为图 1 中光学室的侧面示意图, 图中的上部为参考黑体。工作时, 通过灌注液氮, 参考黑体的辐射腔体完全置于液氮的包围中, 符合黑体的等温腔要求。待测黑体和标准黑体的辐射经转折镜后进入调制器。调制器的一个面为反射镜面, 可以将位于上方的参考黑体辐射反射进入主光路, 与待测黑体或标准黑体的辐射形成对照。尽管调制叶片是高反的, 其本身和周围的辐射影响已经很小, 但为了进一步避免旋转叶片微小的温差对测量的不良影响, 设置了冷屏。冷屏是可控的, 当其进入光路遮断辐射后, 利用双相位的测量方法可以对调制器的影响进行检测和修正。

2.4 多功能的积木式结构

积木式的结构使校准装置具有多种测量模式, 既增加了测量的灵活性, 又扩大了应用范围。除了顶部为液氮参考黑体外, 光学室的周边 4 个侧面设计为统一规格的法兰盘, 可以方便地与各个黑体或舱室连接。当装置需要进行溯源标定时, 卸去图 1 中的待测辐射源舱 5, 将定点黑体 2 置于待测辐射源舱 5 的位置, 由定点黑体对变温黑体 3 进行标定。当装置对待测的辐射源校准时, 恢复成图 1 中的布局。要对位于辐射探测舱 9 中的辐射探测系统进行标定时, 虽然可以采用图 1 的安排, 但为了减少无关测量部件的影响, 可以将变温标准黑体 3 安装在光学室左面的法兰上, 面对辐射探测舱, 这样标准源直接校准探测器。这种配置也适用于探测器标定辐射源的工作模式。

2.5 整体抽真空

为了解决接近摄氏零度时的霜露, 曾在有些辐射测量装置中采用了局部的低温陷阱和充氮技术, 但这并不能完全解决问题。校准装置采用整体抽真空的方法, 既彻底解决了霜冻问题, 又避免了大气对红外辐射的吸收。常温附近的辐射测量, 由于辐射信号比较微弱, 只有排除大气透过率的不利影响才能进行有效的校准, 所以式(2)中不出现透过率的因子。

装置采用了三个涡轮真空泵和一个分子泵实现工作时的真空状态, 设计值为 $1.33 \times 10^{-2}\text{ Pa}$ (10^{-4} mm 汞柱)。

2.6 闸阀的应用

由于校准装置具有多个舱室和黑体, 且能够

进行多种功能的转换,除了在各个舱室上都备有真空阀门外,校准装置上还安装了两只闸阀以减少抽真空的时间。图1中,右边的闸阀11位于分子泵和辐射探测舱之间。先对管道抽真空,达到一定的真空度后,打开右边的闸阀11对整个装置抽真空。真空度达到测量要求或测量结束后,可以关闭该闸阀12以利于装置保持真空。不同的工作模式需要在光学室的侧面换用不同的黑体或舱室,替换时,关闭左边的闸阀以避免整个装置的真空泄漏。替换工作结束后,先开启黑体上配置的涡轮泵(未标出),等到真空度达到额定的要求后才打开左边的闸阀12。

3 性能测试结果

3.1 真空度

在常温下对装置抽真空,可以达到 $1.3 \times$

10^{-2} Pa。当注入液氮对装置冷却时,真空度立即低于 10^{-3} Pa。

3.2 致冷液消耗量

常温下,初始冷却装置时需要灌注40 L液氮,以后继续工作只需添加一些即可。

3.3 变温需时

变温标准黑体是校准装置主要的工作黑体,温度变化的快慢和能够达到的均匀性、稳定性指标对实际的校准工作意义重大。表2和表3给出从设置温度变化值开始,两个主要的温度区间变温黑体的均匀性、稳定性和需时的关系,同时也给出了参考黑体的温度稳定性。

从表2和表3中可以看出,距开始的时间越长,黑体的均匀性和稳定性越好。实际工作中应该根据需要校准设备的要求,按照校准装置的温

表2 校准装置从20℃降到-60℃的温度特性

Tab.2 Temperature feature of LBRCF from 20℃ to -60℃

开始时间(h)	1	2	3
变温黑体腔温均匀性(℃/全腔长)	0.13	0.101	0.097
变温黑体温度稳定性(℃/15 min)	0.04	0.01	0.003
参考黑体温度稳定性(℃/15 min)	0.05	0.02	0.005

表3 校准装置从-60℃升到50℃的温度特性

Tab.3 Temperature feature of LBRCF from -60℃ to 50℃

开始时间(h)	1.5	2	2.5
变温黑体腔温均匀性(℃/全腔长)	0.073	0.060	0.057
变温黑体温度稳定性(℃/10 min)	0.011	0.002	0.001
参考黑体温度稳定性(℃/10 min)	0.011	0.009	0.004

度特性制订出能够满足指标的变温时间,这样既可以节省时间又可以降低测试费用。

4 结束语

-60~+80℃辐射校准装置备有辐射基准的

镓定点标准黑体,变温标准黑体和77 K参考标准黑体,光学结构使得三者的辐射同轴。抽真空和低背景可以进行常温区间辐射源和接收设备的光谱辐射校准,模块式的结构允许在一套装置上实现多种校准工作方式。性能测试数据显示出装置的升降温速度快,均匀性和稳定性高。

参考文献:

- [1] WICKMAN H A. Development status of the cryocooler and thermal management system for the atmospheric infrared sounder[J]. *SPIE*, 1998, 3437: 261-272.
- [2] EBNER S C, PARR A C. Update on the low background IR calibration facility at the National Institute of Standards and Technology[J]. *SPIE*, 1989, 1110: 49-60.
- [3] RICE J P, JOHNSON B C. NIST activities in support of space based radiometric remote sensing[J]. *SPIE*, 2001, 4450:

108-126.

- [4] SAPRISKY V I. Radiometric standards in the USSR[J]. *SPIE*, 1991, 1493: 58-65.
- [5] ZHANG J Y. Standard of blackbody radiation in normal temperature[J]. *Journal of Metrology*, 1989, 10(1): 1-6. (in Chinese)
- [6] SAPRISKY V I, PROKHOROV A V. Spectral effective emissivities of nonisothermal cavities calculated by the Monte Carlo method[J]. *Appl Opt*, 1995, 34(25): 5645-5652.

作者简介: 梁 培(1949-), 上海人, 研究员, 主要研究方向为光学测量。

欢迎订阅《中国光学与应用光学文摘》

《中国光学与应用光学文摘》是经国家科委批准, 由中科院文献情报中心、中科院光学情报网和中科院长春光学精密机械与物理研究所联合主办的国家级检索刊物, 该刊主要收录我国科研人员在国内外期刊和有关会议上发表的科技论文和会议论文, 年收录量 5 000 篇左右。《中国光学与应用光学文摘》以文摘形式报道国内光学、光电子学领域的理论研究动态、最新科研成果和相关创新技术, 是国内该领域唯一的检索刊物, 是了解光电子行业相关科技信息的最新窗口, 以报道时差短、检索途径多、信息量充实为特色。

《中国光学与应用光学文摘》为双月刊, 大 16 开本, 110 页, 国内公开发行。邮发代号: 12-140, 定价: 15 元/期。为满足不同订户的要求, 编辑部亦随时办理破年、破季订阅。

单 位: 中科院长春光学精密机械与物理研究所《中国光学与应用光学文摘》编辑部

联系人: 杨妹清

地 址: 长春市东南湖大路 16 号

邮 编: 130033

电 话: (0431) 6176853

账 户: 中科院长春光学精密机械与物理研究所

[http: // www . ciom . ac . cn](http://www.ciom.ac.cn)

账 号: 01471908091001

E-mail: yanh@ciomp.ac.cn

银 行: 中行吉林省分行营业部