

红外标准辐亮度计的研制及定标

徐 骏, 孟炳寰, 郑小兵, 翟文超, 李健军

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室,
安徽 合肥 230031)

摘 要: 黑体参考光源辐亮度精度是决定红外传感器绝对辐射定标精度的关键因素。为了提高黑体辐亮度测量精度, 设计了一种直接测量黑体辐亮度的红外标准辐亮度计。描述了整个系统的光机设计方案和工作原理, 利用高精度水浴黑体对辐亮度计进行定标。实验结果表明: 辐亮度计的 1 h 非稳定性优于 0.03%; 测量黑体辐亮度不确定度达 0.22%, 相当于 308 K 时辐亮度温度不确定度 73 mK。该标准辐亮度计具有系统级测量、高精度溯源等优点, 可实现黑体辐亮度与实验室辐射标准之间的溯源。

关键词: 红外辐亮度计; 高精度水浴黑体; 光机设计; 定标; 遥感

中图分类号: O432.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-0863-06

Development and calibration of infrared standard radiometer

Xu Jun, Meng Binghuan, Zheng Xiaobing, Zhai Wenchao, Li Jianjun

(Key laboratory of optical Calibration and characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanical,
CAS, Hefei 230031, China)

Abstract: Accuracy of blackbodies' reference source radiance is one of the crucial factors that determine the accuracy of infrared sensor's absolute radiometric calibration. To improve the measurement accuracy of blackbodies' radiance, a infrared standard radiometer was developed to calibrate blackbodies' radiance directly. The principle and the opto-mechanical design of the instrument were described in detail, and the radiometer was calibrated against a high accuracy water-bath blackbody. The experimental results demonstrate that radiometer's instability is less than 0.03% with in one hour and the uncertainty is less than 0.22%. This corresponds to a brightness temperature uncertainty of 73 mK at 308 K. The radiometer possesses the advantages of system-level measurement and high-precision tracing standard, and by which the blackbodies' radiance can be traced to the radiant standard in lab.

Key words: infrared radiometer; high accuracy water-bath blackbody; opto-mechanical design; calibration; remote sensing

收稿日期: 2012-09-05; 修订日期: 2012-10-09

基金项目: 安徽省自然科学基金(090412042); 中科院安徽光学精密机械研究所所长基金(Y03AG31145)

作者简介: 徐骏(1986-), 男, 博士生, 主要从事光辐射定标、精密仪器与机械方面的研究。Email: xujun@aiofm.ac.cn

导师简介: 郑小兵(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光辐射精密测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学等方面的研究。Email: xbzheng@aiofm.ac.cn

0 引言

近年来随着红外技术的发展,红外波段探测器已经被广泛应用于军事^[1]、工业、农业、航天^[2]等领域。特别是在航天领域,越来越多的红外通道传感器被送入太空。红外传感器能否获取有价值的数据与其精确的红外辐射测量能力有关,这就需要对红外传感器进行发射前绝对定标。红外辐射定标是客观评价红外光谱测量仪器及有关器件的重要途径,是红外遥感信息定量化的关键技术之一。目前,中远红外波段(2~20 μm)的红外传感器定标通常采用一系列腔体温度为 200~400 K 的各种类型的常温黑体作为标准辐亮度源来实现^[3]。

常温黑体辐射源辐亮度值的精度是制约红外定标精度的关键因素。传统黑体的辐亮度度量是利用黑体绝对温度和发射率代入 Planck 公式计算,黑体辐亮度的精度取决于黑体绝对温度和黑体发射率的测量精度。黑体绝对温度测量是采用多个接触式温度计测量黑体腔的温度,将其作为黑体的绝对温度,然而由于黑体腔实际发射率、温度梯度、温度分布均匀性以及接触式测温的缺陷等因素导致黑体腔测量温度与黑体绝对温度之间存在一定的误差。NIST(美国国家标准与技术研究所)研究表明黑体绝对温度与用接触式温度计测量的设置温度之间存在明显差异,误差基本都在 0.2 K 以上,有的达到 6 K 以上甚至更大^[4-5]。因此,用传统方法计算的黑体辐亮度值与黑体实际辐亮度值之间存在较大的误差。

研制红外标准辐亮度计对黑体源的辐亮度直接定标是目前热红外定标发展的趋势。国外 NIST 研制出的红外辐射计(TXR)^[6]用于地球观测卫星的热红外通道定标,不确定度达到 0.16%,相当于 300 K 时 5 μm 波段的辐亮度温度不确定度 50 mK^[7],其定标不确定度低且使用便捷。英国国家物理实验室(NPL)研制的黑体辐射绝对测量装置(AMBER)^[8],计划溯源于低温辐射计,设计不确定度为 0.1%,但其采用透射式光路,且探测器系统与光学系统分离,体积大不便于外出使用。国内中国科学院西安光学精密机械研究所研制的面源黑体辐射校准系统的不确定度为 0.9%^[9],但系统必须在实验室低温真空仓中使用,

且不确定度较高。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的双通道(1.4±0.02 μm , 4.5±0.03 μm)红外光谱辐射计不确定度为 5%^[10],精度较低,不能满足高精度红外辐射定标的要求。

为了提高红外遥感定量化研究水平,需要进一步提高黑体辐亮度的测量精度。文中研制了一种可进行系统级定标的通道式红外标准辐亮度计。辐亮度计将光学系统和探测器系统集成在一个小型的低温真空杜瓦中,不仅使用便捷、不受外界环境限制,而且具有较高的辐亮度测量精度。该设备用于直接定标黑体辐射源(300~400 K)的辐亮度,检测和修正黑体设置温度与辐亮度温度之间的偏差。文中详细介绍了红外标准辐亮度计的系统组成、辐射测量原理、性能测试与分析等内容。

1 红外辐亮度计系统组成

1.1 光学系统设计

红外辐亮度计中所有光学元器件都安装在一个圆形紫铜板热沉光学平台上,光路布局如图 1 所示。ZnSe 窗口的有效通光口径为 $\Phi 54 \text{ mm}$,管状光阑组

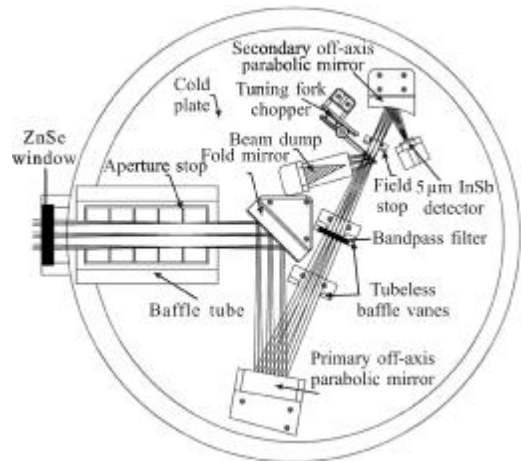


图 1 辐亮度计光学结构图

Fig.1 Optical layout of radiometer

最大入射孔径为 $\Phi 23 \text{ mm}$ 。测量光束透过 ZnSe 窗口进入辐亮度计,经过由一片 $\Phi 20 \text{ mm}$ 的孔径光阑和四片消杂光光阑组成的管状光阑组后到达镀金平面镜,经平面镜反射后的光束再由镀金主离轴抛物镜反射会聚,光束在到达镀金次离轴抛物镜之前经过两片消杂光光阑和一个通光波段为 4.7~5.6 μm 的

滤色片并会聚在一个孔径为 $\Phi 7.5\text{ mm}$ 的视场光阑处,从而形成一个孔径 $\Phi 20\text{ mm}$ 发散角 2° 的测量光束。在视场光阑前有一音叉式斩波器,当斩波器叶片张开时,光束到达次离轴抛物镜,反射会聚后被 InSb 探测器接收。按照光路分析,用 Zemax 模拟的光束到达 InSb 探测器光敏面的光斑尺寸为 $\Phi 3\text{ mm}$,小于 InSb 探测器光敏面尺寸 $\Phi 4\text{ mm}$ 。当斩波器叶片闭合时,叶片截断测量光束并将其反射到杂散光收集器中。杂散光收集器有一个正锥形设计的腔,能吸收斩波器叶片反射进来的光,然后将能量传递给热沉光学平台,从而消除此部分杂散光对探测器的影响。

音叉式斩波器在振荡器顶端有两片镀金的小叶片,在交流电驱动下叶片能实现固定频率的张开、闭合动作。斩波器将 InSb 探测器输出信号调制成特定频率的交流信号,再用数字锁相放大器将该频率的信号放大并采集,以降低背景噪声,提高信噪比。音叉式斩波器具有体积小、频率稳定性高、能在低温真空环境下工作等优点,辐亮度计使用的音叉式斩波器工作频率为 46.40 Hz ,稳定性为 $\pm 0.003\text{ Hz}$ 。

辐亮度计的关键元器件上都贴有温度传感器,用于实时监测各器件的低温制冷效果。

1.2 低温真空结构设计

在热红外波段,常温背景辐射对探测器响应及信噪比是有影响的,这就有必要对关键器件制冷。低温真空杜瓦是为光学元件提供低温真空环境的关键设备,在满足强度、精度要求的同时应尽量做到小巧轻便。辐亮度计低温真空结构分解示意图如图 2 所示。液氮通过进口注入容积为 15 升的液氮存储腔中。液氮直接与主制冷面板接触,主制冷面板与紫铜板光学平台之间垫有导热钢片并通过 8 个螺栓联

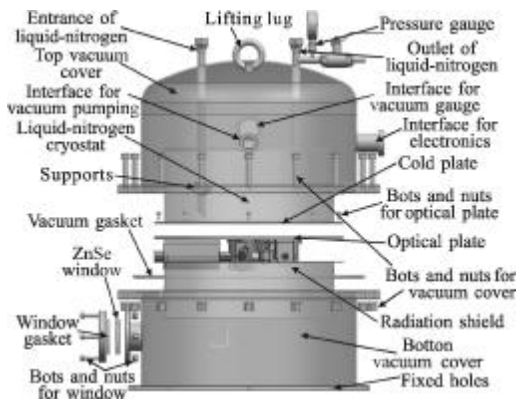


图 2 辐亮度计低温真空结构分解示意图

Fig.2 Structure of cryogenic vacuum chamber

接,从而能有效传递热量冷却光学组件。上下真空罩之间通过机械泵和分子泵抽成真空,真空度保持在 $8.0 \times 10^{-4}\text{ Pa}$,有效阻止外部热量通过空气传递给光学平台组件,提高液氮制冷效果,增加制冷保持时间。

液氮腔压力表组件对液氮存储腔的压力进行监测,防止腔压过大。高、低真空规管与真空计连接实时监测真空仓内的真空度。音叉式斩波器、InSb 探测器及贴片温度传感器的供电和信号传输都是通过一个 55 头的芯座与外部设备连接。所有光学组件安装在一屏蔽罩内,屏蔽罩内表面发黑处理,用于吸收内部杂散光和阻止外部辐射对光学系统的干扰。辐亮度计底部边缘开有 8 个 $\Phi 12\text{ mm}$ 的固定孔,用于测量时与其他平台等外部设备的固定与连接。

2 黑体辐射测量原理分析

2.1 黑体辐射测量原理

黑体的光谱辐射出射度 Planck 表示为:

$$B(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \{ \exp[c_2/(\lambda T)] - 1 \}} \quad (1)$$

式中: c_1 为第一辐射常数 $(3.7415 \pm 0.0003) \times 10^8\text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$, c_2 为第二辐射常数 $(1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4\text{ }\mu\text{mK}$ 。

红外测量系统对黑体辐射进行测量时,在系统线性响应范围内红外探测器的输出信号值 $S(T)$ 可以由公式(2)的模型表示:

$$S(T) = aB(\lambda, T) + b = a \frac{c_1}{\lambda_0^5 \{ \exp[c_2/(\lambda T)] - 1 \}} + b \quad (2)$$

式中:系数 a 为红外测量系统的辐射响应度,反应测量系统固有特性; b 为由红外测量系统自身光机结构热辐射、散射背景辐射引起的偏移量,系统在低温真空下使用时 b 值应近似为 0。

2.2 辐亮度计定标原理

利用已知温度和发射率的高精度标准黑体对辐亮度计定标是一种端到端的系统级定标方法,由以上分析可知辐亮度计探测器输出信号值 $S(T)$ 和黑体的绝对温度 T 之间有公式(2)所示关系。用辐亮度计观测高精度标准黑体,得到多组 $S(T)$ 与 T 值,代入公式(2)进行最小二乘法拟合。拟合的插值函数公式(2)有 a, b, λ , 三个变量,为简化拟合,取 $\lambda = 5\text{ }\mu\text{m}$ 为等效拟合波长,拟合所得 a, b 值即为辐亮度计的定标系数。

利用辐亮度计测量其他待测黑体的辐亮度温度 T_f 可以用公式(3)来估算,公式(3)是公式(2)反求 T 而得。

$$T_f(S) = \frac{c_2}{\lambda \ln \left[\frac{ac_1}{\lambda^5(S-b)} + 1 \right]} \quad (3)$$

式中：定标系数 a 和 b 是用高精度标准黑体定标而得，因此利用公式(3)反演其他黑体辐亮度温度时要综合考虑仪器本身的不确定度、拟合不确定度和水浴黑体的不确定度。

3 辐亮度计性能测试与分析

为了得到探测器响应与黑体温度 T 之间的关系，利用辐亮度计测量安光所自主研制的高精度水浴黑体，高精度水浴黑体的性能指标^[11]：工作温度为环境温度 $\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ ；腔口直径为 $\Phi 108\text{ mm}$ ；有效发射率大于 0.998 ；温控精度优于 0.01 K ；测温联合不确定度优于 0.015 K 。搭建如图 3 所示的实验系统。

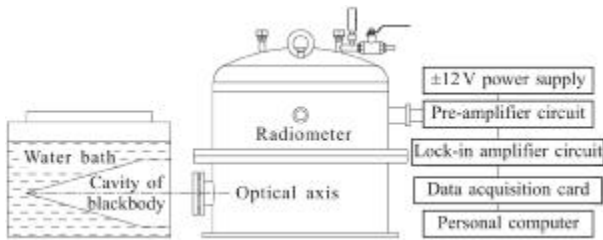


图 3 辐亮度计观测水浴黑体系统示意图

Fig.3 Schematic of radiometer viewing a water-bath black body

水浴黑体的开口距离辐亮度计窗口 170 mm ，在此几何条件下，测量光束将充满辐亮度计的孔径和视场。斩波器将信号调制成交流信号后被探测器接收并由前放电路放大，锁相放大器将斩波器工作频率处的信号放大，最后由数据采集器记录多组水浴黑体的温度值和对应的辐亮度计探测器响应值。

3.1 稳定性测量与分析

为了得到辐亮度计的长时间稳定性，设定水浴黑体温度 313.15 K 和 353.15 K 2 个温度点，在实验室环境下用辐亮度计观测这两个温度点水浴黑体各 1 h ，每个温度点测 400 个数据如表 1 所示。

表 1 辐亮度计观测不同温度点的长时间稳定性

Tab.1 Stability of radiometer when measuring at different temperature

Temperature/K	Signal(V)	Standard deviation	Relative standard deviation/%
313.15	1.4058	2.16×10^{-4}	0.015 3
353.15	3.6581	7.56×10^{-4}	0.020 6

通过对 2 个温度点水浴黑体的长时间观测，可见辐亮度计的长时间非稳定性优于 0.03% 。

3.2 定标系数拟合与分析

水浴黑体从 $300\sim 400\text{ K}$ 设定 13 个温度点，用辐亮度计观测，每个温度点探测器采集 200 个数据，取平均值作为该温度点的测量结果如表 2 所示。

表 2 各温度点辐亮度计观测水浴黑体的信号值

Tab.2 Signals of radiometer at different temperatures of water-bath blackbody

Number	Temperature/K	Signal(V)
1	308.15	1.2344
2	313.15	1.4060
3	318.15	1.5973
4	323.15	1.8116
5	328.15	2.0486
6	333.15	2.3131
7	338.15	2.6039
8	343.15	2.9241
9	348.15	3.2746
10	353.15	3.6585
11	358.15	4.0762
12	363.15	4.5313
13	368.15	5.0250

将表 2 中的 13 组数据代入公式 (2)，用 Matlab 最小二乘法拟合，得到定标系数 $a=0.098\ 9, b=0.176\ 5$ 。拟合所得曲线如图 4 所示。

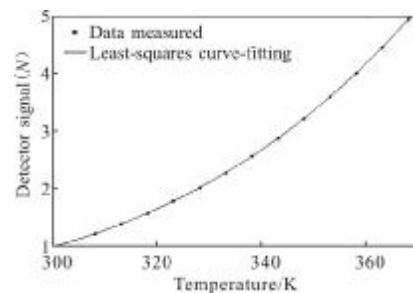


图 4 用最小二乘法拟合的黑体温度和信号关系曲线

Fig.4 Least-square fitting of radiometer signals versus black-body temperature

将拟合所得的 a, b 值代入公式 (3) 得到黑体辐亮度温度 $T_f(S)$ 与探测器响应值 S 的关系式可表示为：

$$T_f(S) = \frac{C_2}{\lambda \ln \left[\frac{0.0989 C_1}{\lambda^5 (S - 0.1765)} + 1 \right]} \quad (4)$$

由于拟合和测量本身都存在误差, 需要评定拟合偏差 ΔS 和测量标准偏差 δS 造成的辐亮度温度偏差, 计算公式如下:

$$\Delta T_f = \Delta S \times [dT_f(S)/dS] \quad \delta T_f = \delta S \times [dT_f(S)/dS] \quad (5)$$

式中: dT_f/dS 为公式(4)对 S 求导; ΔT_f 为拟合偏差 ΔS 造成的辐亮度温度偏差; δT_f 为测量标准偏差 δS 造成的辐亮度温度偏差。

将 13 个温度点的拟合偏差 ΔS 和测量标准偏差 δS 代入公式(5)中得到各个温度点的拟合误差和测量误差造成的辐亮度温度偏差, 绘制如图 5 所示的曲线, 图中实心点是各点拟合误差 ΔS 造成的辐亮度温度偏差, 误差棒表示各点测量标准偏差 δS 造成的辐亮度温度偏差。

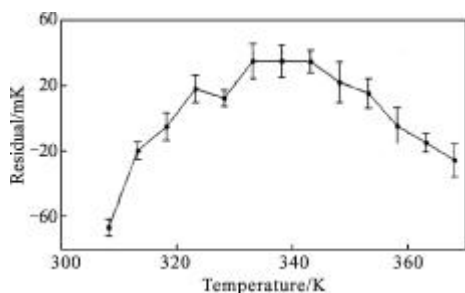


图 5 最小二乘法拟合的残差和信号测量标准偏差的误差棒
Fig.5 Residuals of Least-square fitting of radiometer's signals versus black-body temperature and the error bars of the standard deviation of the radiometer's signals

图 5 表明 308 K 时辐亮度计的 1σ 等效噪声温度为 7 mK (308 K 点的误差棒), 相对测量偏差为 0.002 3%, 最大 1σ 等效噪声温度为 13 mK (348 K 点的误差棒) 相对测量偏差为 0.003 8%。

3.3 辐亮度计不确定度分析

红外标准辐亮度计的不确定来源及不确定度贡献见表 3。其中辐亮度计器噪声 u_n 可以由公式(6)表示, $\sigma_n(T)$ 为水浴黑体设置温度为 T 时数据采集器采集的 200 组数据的标准偏差, $r(T)$ 是 200 组数据的平均值可表示为:

$$u_n = \frac{\sigma_n(T)}{r(T)} \quad (6)$$

利用公式(2)最小二乘法拟合的不确定度 u_f 可以用公式(7)来估算, 其中 σ_a 为拟合中系数 a 的标准

偏差^[7]。

$$u_f = \frac{\sigma_a}{a} \quad (7)$$

用于辐亮度计定标的高精度水浴黑体本身存在误差。水浴黑体有效发射率大于 0.998, 水浴黑体的联合测温不确定度为 15 mK, 通过 Planck 公式可以估算水浴黑体绝对辐亮度的不确定 u_w 约为 0.210%。

表 3 辐亮度计测量黑体辐亮度联合不确定度
Tab.3 Combined uncertainty of blackbody's radiance measured by radiometer

Source of uncertainty	Symbol	Value	Corresponding to brightness temperature uncertainty at 308 K/mK
Noise during calibration (308 K)	u_n	0.013%	-
Fitting to interpolation function	u_f	0.040%	-
Water-bath blackbody uncertainty	u_w	0.210%	-
Combined uncertainty	u_c	0.220%	73

从表 3 中可以看出热红外标准辐亮度计测量黑体辐亮度总不确定为 0.22%, 相当于 308 K 时辐亮度温度不确定度 73 mK。

4 结 论

红外定标精度主要受常温黑体辐射源辐亮度精度的影响, 文中设计的红外标准辐亮度计采用直接测量黑体辐亮度的方法, 避免了传统方法计算辐亮度不确定度来源多的缺陷。用辐亮度计观测高精度水浴黑体, 对辐亮度计进行检测定标, 得到水浴黑体温度与探测器响应值的拟合关系式, 并对辐亮度计的不确定度进行了分析。结果表明: 辐亮度计的稳定性优于 0.03%; 测量黑体辐亮度定标总不确定度达 0.22%, 相当于 308 K 时辐亮度温度不确定度 73 mK, 能够满足黑体辐亮度的高精度测量要求。热红外标准辐亮度计的不确定度主要受水浴黑体不确定度的影响, 下一步工作将使用更高精度的黑体标准源定标辐亮度计, 可通过改进现有高精度水浴黑体实现, 目前此项工作正在开展。

参考文献:

- [1] Liu Juan, Gong Guanghong, Han Liang, et al. Modeling and simulation of airplane infrared characteristic [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1209-1213. (in Chinese)
刘娟, 龚光红, 韩亮, 等. 飞机红外辐射特性建模与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(7): 1209-1213.
- [2] Sun Chengming, Yuan Yan, Huang Fengzhen, et al. Modeling and simulation on infrared imaging characteristics of space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 563-568. (in Chinese)
孙成明, 袁艳, 黄锋振, 等. 空间目标红外成像特性建模与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 563-568.
- [3] Cao Lihua, Li Ning, Yang Ciyin, et al. Radiance calibration for 3-5 μm infrared detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 859-864. (in Chinese)
曹立华, 李宁, 杨词银, 等. 3-5 μm 红外探测器的辐射定标[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 859-864.
- [4] Adriaan C C, Raju U D, Timothy M J, et al. Low-background temperature calibration of infrared blackbodies[J]. *Metrologia*, 2006, 43: 46-50.
- [5] Sapritsky V I. Black-body radiometry [J]. *Metrologia*, 1995, 32(6): 411.
- [6] Rice J P, Johnson B C. The NIST EOS thermal-infrared transfer radiometer[J]. *Metrologia*, 1998, 35(4): 505-509.
- [7] Rice J P, Bender S C, Atkins W H, et al. Deployment test of the NIST EOS thermal-infrared transfer radiometer [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24 (2): 367-388.
- [8] Theocharous E, Fox N P, Sapritsky V I, et al. Absolute measurements of black-body emitted radiance[J]. *Metrologia*, 1998, 35(4): 549-554.
- [9] Hu Tiel, Zhu Mingyi, Zhu Minggui, et al. Calibration for radiation characteristic of extend blackbody [J]. *Journal of Applied Optics*, 2002, 23(3): 1-4. (in Chinese)
胡铁力, 朱明义, 朱铭桂, 等. -60-80 $^{\circ}\text{C}$ 面源黑体辐射特性校准系统[J]. *应用光学*, 2002, 23(3): 1-4.
- [10] Li Xiansheng, Ren Jiansuo, Zhang Ligu, et al. Research on radiometric calibration device for a large aperture infrared opto-electric system on spot [J]. *Journal of optoelectronics · Laser*, 2006, 17(2): 175-179. (in Chinese)
李宪圣, 任建国, 张立国, 等. 大口径红外光电子系统现场辐射定标装置的研制[J]. *光电子·激光*, 2006, 17(2): 175-179.
- [11] Zhang Lei, Zheng Xiaobing, Zhang Liming, et al. High accuracy water bath blackbody based on the information quantification of infrared remote sensing[J]. *Optical technique*, 2007, 33(02): 245-251. (in Chinese)
张磊, 郑小兵, 张黎明, 等. 量化红外遥感应用的高精度水浴黑体[J]. *光学技术*, 2007, 33(02): 245-251.