

文章编号: 1002-1582(2007)02-0245-04

# 定量化红外遥感应用的高精度水浴黑体\*

张磊<sup>1,2,3</sup>, 郑小兵<sup>1,2</sup>, 张黎明<sup>1,2</sup>, 沈政国<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所遥感研究室, 合肥 230031)

(2. 中国科学院通用光学辐射定标和表征技术国防科技创新实验室, 合肥 230031)

(3. 解放军炮兵学院信息工程系, 合肥 230031)

**摘要:** 辐射定标是红外遥感信息量化的关键技术之一。根据定量化红外遥感应用的需求, 研制了高精度水浴黑体辐射源, 并应用均匀镜-漫反射模型法对其发射率进行了计算。提出了基于绝对低温辐射计的常温黑体定标方法。性能测试结果表明, 该黑体辐射源可用于遥感探测器中的红外辐射定标。

**关键词:** 红外遥感; 水浴黑体; 辐射定标; 绝对低温辐射计

**中图分类号:** TN219; TN215 **文献标识码:** A

## High accuracy water bath blackbody based on the information quantification of infrared remote sensing

ZHANG Lei, ZHENG Xiao-bing, ZHANG Li-ming, SHENG Zheng-guo

(Remote Sensing Department, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Radiometric calibration is of critical importance for information quantification of infrared remote sensing. According to the need of infrared remote sensing, a high accuracy water bath based blackbody is developed, and the effective emissivities of blackbody are calculated using uniform specular-diffuse cavities model. The technical proposals of realizing high accurate calibration of blackbody are discussed. The experimental results show that this blackbody source can be used in the radiometric calibration of remote sensing detectors.

**Key words:** infrared remote sensing; water bath blackbody; radiometric calibration; cryogenic absolute radiometer

## 1 引言

工作在环境温度至+90℃的高精度水浴黑体辐射源主要用于星载红外扫描辐射计、红外分光计、各种分辨率成像光谱仪、海水色扫描仪等航天红外遥感器的辐射标定。为了完成地球资源勘测、海洋观测、气象观测、大气研究、环境污染监视、战略预警、军事侦察等多项任务, 在星载红外遥感器的研制过程中及发射升空之前, 必须放置在具有模拟空间冷背景和红外辐射源的低温真空容器中进行性能检验和红外辐射定标。高精度水浴黑体可用于模拟地面不同温度的目标, 是星载红外辐射器定标系统的关键设备之一, 它的光谱辐射量值的准确性将直接影响到星载红外遥感仪器获得信息的准确性和可靠性。其技术指标是: 工作温度为环境温度~90℃; 腔口直径为108mm; 有效发射率大于0.998; 温控精度优于0.01℃; 测温联合不确定度 优于0.015K。

本文首先介绍了高精度水浴黑体辐射源的设计方法和研制过程, 然后应用均匀镜-漫反射模型法计算了其发射率, 并通过实验对其综合性能进行了检测, 结果表明该辐射源可满足现代定量化红外遥感的需求; 最后提出了一种利用绝对低温辐射计对其进行标定的技术方案。

## 2 高精度水浴黑体辐射源的设计

高精度水浴黑体辐射源是一种用于红外辐射定标的常温黑体。目前, 常温黑体在国外已形成定型产品被推广使用, 在国内也有少数几家科研院所研制过, 但由于加热元件的温控精度和温场均匀性以及空腔有效发射率的限制, 在定量化红外遥感应用中存在着一定的局限性。因此, 借鉴国内外常温黑体的设计经验及不足, 开发研制了高精度、大口径、使用方便的新型高精度水浴黑体辐射源。

高精度水浴黑体辐射源主要是由 E225 型高精

\* 收稿日期: 2006-01-06; 收到修改稿日期: 2006-04-10

E-mail: leizhang@aiofm.ac.cn

作者简介: 张磊(1978-), 男, 安徽省人, 安徽光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事红外遥感及光电检测方面的研究。

度加热恒温浴槽、圆柱 + 锥形黑体腔、温控软件、测温元件、保温层组成的。E225 型加热恒温浴槽已经通过了国家技术监督局计量司的进口计量器型式鉴定,其温控精度优于 0.01K,温控范围为室温 ~ 100℃。根据维恩位移定律和普朗克公式,在此温度下的黑体可对响应波段在 8~14μm 之间的红外光谱计量仪器进行标定。整个黑体腔是由铝合金材料(LY12)制造的,厚度为 2mm。腔体的外表面镀上了防氧化层,内表面涂上了自主研发的厚度为 0.05cm 的红外黑体消光涂料。通过这些技术手段,提高了腔体的热均匀性,降低了腔壁上的热阻,并且有效地迟滞了腔体表面的氧化。图 1 为高精度水浴黑体辐射源实物图。

黑体腔在与恒温浴槽进行装配的过程中,需要对浴槽的内外壁进行开孔。由于浴槽的外壁采用的是喷塑钢板材料,无法使用电切割方法,因此在开孔的过程中,首先用钻床采用钻小孔的切割方法进行粗加工,然后再利用锉刀进行精细加工。另外,黑体腔与水浴槽之间是利用聚四氟乙烯密封垫片进行密封的,它与其它密封材料相比具有耐化学腐蚀和耐高温的优良特性。



图 1 高精度水浴黑体辐射源

### 3 高精度水浴黑体辐射源腔体发射率的计算

#### 3.1 红外黑体消光涂料反射率的测量

高精度水浴黑体辐射源消光涂料反射率的测量是通过测量其发射率而间接测量出来的。消光涂料发射率的测量采用了样品/背景温差法,是以 BRUKER 公司 OPAG22 型 FTIR 光谱仪作为主要测量工具来进行辐射量测量的。首先使用变温黑体对光谱仪进行实时定标,然后使用常温黑体辐射源测量光谱仪的自身辐射,并利用漫反射镀金参考板测量环境辐射,最后利用天地背景温差法对涂层红外发射率进行野外测量,根据  $\rho = 1 - \epsilon$  并通过计算得到消光涂料的反射率。表 1 所示为消光涂料反射率的测量结果。

涂层发射率的测量步骤为:

- (1) 定标,求出红外傅里叶光谱仪辐射亮度响应系数 A 和偏置 B;
- (2) 依次测量金板、黑体、样件、仪器腔体涂层;
- (3) 重复(1)测量四轮,并通过读温湿度计记录测量时的时间、温度和湿度。

表 1 红外黑体消光涂料反射率

样品名称	下午(1)测值	晚上(1)测值	晚上(2)测值	晚上(3)测值	均值	标准偏差
消光涂料	92.2%	94.3%	93.6%	94.3%	93.6%	1%

注:测试条件为 10.6μm 波段发射率(晴天,下午温度为 23.3~24.4℃;晚上温度为 19.3~20.2℃)

#### 3.2 均匀镜-漫反射模型法对腔体发射率的计算

腔体的发射率  $\epsilon$  为 1 减去腔体的反射率。在这种条件下,可根据假定腔体内壁的反射率为理想的镜面反射率  $\rho_s$  和理想的散射率  $\rho_d$  之和来计算腔体发射率的近似值  $\epsilon^{[1]}$ 。镜面反射率可分为两个部分:一部分为正常入射角条件下的镜面反射率;另一部分为在较小入射角条件下的镜面反射率。当进入腔体的辐射入射角为正常条件下的入射角时,发射率  $\epsilon$  的表示方法可由下式表示<sup>[2]</sup>:

$$\epsilon = 1 - (\rho_{ss}^2 \rho_{sh}^2) - dF\rho_d \quad (1)$$

式中: dF 是描述从腔体内壁积分面积 dA 上出射到腔体开口以外的漫射角微分系数;  $\rho_{sh}$  为在前两次反射为大人射角条件下的腔体表面的镜面反射率;  $\rho_{ss}$  为最后两次在小入射角时的腔体表面的镜面反射率。dF 的计算方法如下:

$$F(\xi) = \frac{1}{\pi} \int_{\Omega} \cos\theta_{\xi} d\Omega \quad (2)$$

式中:  $\Omega$  为从点  $\xi$  到腔孔的立体角;  $\theta_{\xi}$  为常规入射角与在坐标  $\xi$  下的腔壁构成的角度;这个单元与轴线所成的立体角为  $d\Omega$ 。

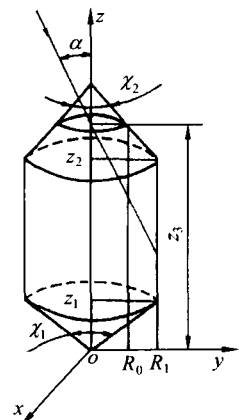


图 2 锥形体+圆柱体的腔体坐标系

图 2 中的  $z_1$  和  $z_3$  给出了由锥形体和圆柱体组成的腔体结构坐标系。对于组成腔体的各个表面来说,漫反射角系数是通过腔体孔径以及腔壁壁面之间的角度系数采用叠加原理表示出来的,它们分别平行或垂直于孔径平面。

$$F_1(z) = \cos(\chi_1/2)F_{\perp} [z \tan(\chi_1/2), z_3 - z] + \sin(\chi_1/2)F_{//} [z \tan(\chi_1/2), z_3 - z] \quad (3)$$

$$F_2(z) = F_{\perp} (R_1, z_3 - z) \quad (4)$$

此处

$$F_{//} (r, h) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1 + \left(\frac{r}{h}\right)^2 - \left(\frac{R_0}{h}\right)^2}{P} \right] \quad (5)$$

$$F_{\perp} (r, h) = \frac{h}{2r} \left[ 1 - \frac{1 + \left(\frac{r}{h}\right)^2 + \left(\frac{R_0}{h}\right)^2}{P - 1} \right] \quad (6)$$

式中,  $r$  和  $h$  分别表示面积单元到轴线和圆盘(腔体孔径) 的距离;  $P$  为

$$P = \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{r}{h} \right)^2 + \left( \frac{R_0}{h} \right)^2 \right]^2 - 4 \left( \frac{R_0 r}{h^2} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

根据最后的计算结果,取其最大值作为式(1)中的漫射角微分系数。

由所设计的锥形腔结构尺寸将表 1 中的发射率均值 93.6% 带入均匀镜-漫反射模型来计算腔体发射率。计算所得的发射率为 0.998。由于在 10.6 $\mu\text{m}$  波段下测量黑体消光涂料发射率的标准偏差为 1%,因此使用均匀镜-漫反射模型计算黑体发射率的不确定度约为 2%。

### 4 综合性能检测

根据红外遥感传感器定标对黑体性能的要求,对高精度水浴黑体辐射源发射率、腔壁的温度均匀性和腔体的开口温度偏差进行了检测,并对其联合不确定度进行了评估。

#### 4.1 腔体发射率的检测

在四个温度点(333K, 343K, 353K, 363K)上使用 OPAG22 型傅里叶红外光谱仪对黑体发射率进行了检测。由维恩位移定理可知,对温度在 333~363K 的黑体来说,光谱输出度的峰值波长范围为 7.9~8.7 $\mu\text{m}$ 。图 3 所示为由傅里叶红外光谱仪测得的在各个温度点下高精度水浴黑体与发射率为 0.95 的商用面源黑体在其峰值波长附近的光谱能量输出曲线。

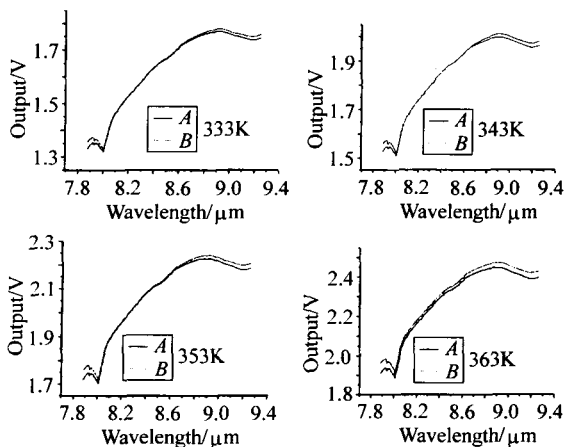


图 3 高精度水浴黑体与商用面源黑体的比对曲线 (A 为商用面源黑体, B 为高精度水浴黑体)

图 3 表明,在相同辐射温度下,高精度水浴黑体在其峰值波长附近的能量输出明显高于商用面源黑体。这样,由全辐射亮度比较法原理便可得出水浴黑体的发射率明显优于 0.95。

#### 4.2 腔壁温度均匀性

使用精度为 0.01K 的电子温度计在腔壁五个温度点上进行了腔壁温度非均匀性的检测,检测结果如表 2 所示。

表 2 黑体辐射源腔壁温度均匀性

序号	水温设置/K	非均匀性/K	标准不确定度/K
1	323	0~0.01	0.01
2	333	0	0
3	343	0	0
4	353	-0.01~0.01	0.01
5	363	-0.01~0.01	0.01

结果显示,在 0.01K 的精度下,在水温设置为 333K 和 343K 时,非均匀性为 0K,故在此温度范围为黑体源的最佳工作温度点。由于腔壁温度均匀性联合不确定度是对水温的非均匀性、浴槽温度设置误差、温度计的沉浸误差以及温度计的温度测量误差的不确定度值进行相加并求积分而得出的,故温度计的测温精度直接影响到温度均匀性的不确定度评估。

#### 4.3 腔壁开口温度偏差

由于空气对流和腔体金属材料热传导等因素的影响,仪器沉浸在水中的腔体部分和腔体开口部分的温度之间存在着差异,这种差异的大小直接影响到黑体辐射源对红外遥感传感器辐射定标的精度。腔壁开口温度偏差的测量结果如表 3 所示。

表 3 黑体辐射源腔壁开口温度偏差

序号	水温设置/K	开口温度/K	偏差/K
1	323	318.7	4.3
2	333	328.9	4.1
3	343	338.4	4.6
4	353	347.8	5.2
5	363	358.2	4.8

开口温度偏差的测量结果与美国 NIST 研制的新型常温黑体的测量结果相当,可用于高精度红外遥感辐射定标<sup>[2]</sup>。

#### 4.4 腔壁和消光涂料之间的温度落差

黑体腔中的锥形部分的腔壁微分热导以及出腔体的辐射可用下式表示:

$$dP = (T_0 - T_1) / (d_{Al} / K_{Al} + d_{bp} / K_{bp}) \quad (8)$$

式中:  $d_{Al}$  为腔壁的厚度;  $K_{Al}$  为腔体腔壁上的热导;  $d_{bp}$  为涂层的厚度;  $K_{bp}$  为消光涂层的热导。根据假定的热等效,上述的量必须平衡在锥形腔壁内涂层的任意表面上发出的辐射功率微分值。 $dP$  的量可用下式表示:

$$dP = dF_{13}\sigma(T_1^4 - T_3^4) + (dF_{12} - dF_{13})\sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad (9)$$

式(9)中,设区域 0 为腔体内壁的消光涂层,区域 1 为浸入水体的腔壁,区域 2 为未浸入水体腔壁,区域 3 为黑体腔开口区域, $\sigma$  表示 Stefan-Boltzmann 常数, $dF_{ij}$ 表示从区域  $i$  到所有区域  $j$  上重要点的微分结

$$\Delta T = \frac{-\beta T_0 \{dF_{13}[1 - (T_3/T_0)^4] + [dF_{12} - dF_{13}][1 - (T_2/T_0)^4]\}}{1 + 4dF_{12}\beta} \quad (11)$$

式中,  $\beta = \sigma T_0^3(d_{cu}/K_{cu} + d_{bq}/K_{bq})$ 。

涂层厚度可通过对作为消光涂层反射比测量的金属检验样品在涂敷涂料前后的厚度差进行测量得出。根据腔壁厚度及热导、涂层厚度及热导、腔体锥形角角度、腔体内径长度等参数计算出的温度落差如表 4 所示。

表 4 腔壁与消光涂料之间的温度落差

序号	水温设置/K	温度落差/mK	标准不确定度/mK
1	323	-4.2	-4.2
2	333	-4.8	-4.8
3	343	-5.6	-5.6
4	353	-6.8	-6.8
5	363	-9.2	-9.2

在使用水浴黑体标定红外传感器时,应根据表 4 中的各个设置温度点对应的温度落差采用插值法决定腔体发射材料的真实温度。

#### 4.4 不确定度分析

依据国际通行的规范<sup>[6]</sup>考察了测量中不确定度因素的来源,得到了如表 5 所示的水浴黑体探测器绝对光谱响应率的不确定度分析结果。

表 5 水浴黑体的不确定度

不确定度来源	温度误差范围/K	不确定度/K
测温电子温度计	±0.01	0.01
浴槽内部测温计	±0.001	0.001
浴槽水温稳定性	±0.002	0.002
浴槽温度设置	±0.01	0.01
沉浸损失	±0.002	0.002
联合不确定度		0.015

从表 5 可以看出,影响水浴黑体联合不确定度结果的因素包括高精度加热恒温浴槽本身的不确定度、测温元件不确定度以及沉浸效应所引起的不确定度。为了提高水浴黑体光谱辐射定标的精度,在设计高发射率黑体腔的基础上,选择高精度的水浴槽和测温元件也是关键。

### 5 基于绝对低温辐射计的定标技术

为了满足高精度量化红外遥感的需求,可利用溯源于绝对低温辐射计的红外辐亮度标准探测器来标定高精度水浴黑体源,其装置如图 4 和图 5 所

示。由于  $T_0$  与  $T_1$  之间的温差小,因此  $T_1^4$  近似引入的误差为

$$T_1^4 = T_0^4 + T_0^3\Delta T \quad (10)$$

它可以被忽略,在这里,  $\Delta T = T_1 - T_0$ ,它表示腔壁与涂料之间的温度落差。式(9)和式(10)可以同时求解。 $\Delta T$  可以表示为

示。

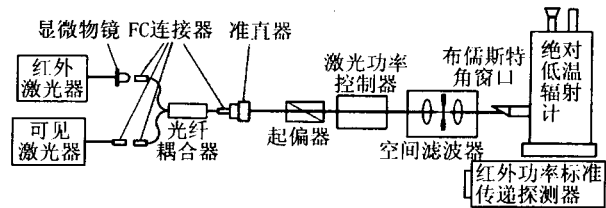


图 4 8~12 $\mu\text{m}$  红外标准传递探测器的标定装置示意图

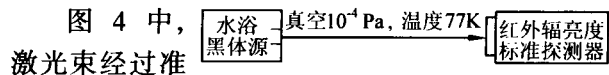


图 5 红外辐亮度标准探测器标定高精度水浴黑体源原理示意图

的和平行的光束。激光功率控制器可以调节定标时的人射激光功率,并将功率起伏稳定在允许的范围。激光功率控制器工作时要求入射激光为垂直偏振的线偏振光,因此其前方必须加上起偏器。为了消除激光束高阶模式对测量精度的影响,采用空间滤波器来保证只有良好的基模光束进入低温辐射计的高吸收率( $>0.9999$ )接收腔。在低温辐射计测量激光的绝对功率后,将红外功率标准传递探测器切入光路,测量其输出电压,每个波长的激光功率均在低温辐射计所允许的 25~250 $\mu\text{W}$  范围内,并以 25 $\mu\text{W}$  为间隔进行测量。由于红外光为不可见光,故将可见光波段和红外波段的两束激光通过  $2 \times 1$  光纤耦合器来实现共轴输出。在光路调整中,先用可见光对光路进行调整,光路调整达到要求后,关掉可见光开启红外光就可以进行红外光谱响应率的绝对测量。基于绝对低温辐射计的功率标准相对于基于辐射源的功率标准来说具有国际公认的最高精度<sup>[3~5]</sup>。通过这个装置,红外功率标准传递探测器便可以完成基于绝对低温辐射计的红外功率标准传递。

如图 5 所示,为了消除背景环境对水浴黑体标定精度的影响,高精度水浴黑体源辐亮度应当在真空度为  $10^{-4}\text{Pa}$ 、温度为 77K 的背景下使用基于功率标准传递探测器的红外辐亮度标准探测器来进行标定,这就提供了同遥感飞行器上相似的低温真空背景。

(下转第 251 页)

哑铃球系统的转动灵敏度,还要考虑到系统的质心调节方便。图4所示为固定支架示意图。图中1为粘接铂丝哑铃球系统的支柱,2为透光孔(作为调节哑铃球系统的平衡),3为支架固定螺孔,4为铂丝哑铃球反射镜系统。

#### 4 铂丝哑铃球系统的平衡调节

所谓平衡就是粘接在支架上的哑铃球系统不因支架的倾斜而绕铂丝转动。铂丝哑铃球反射镜系统能否平衡取决于铂丝是否严格通过哑铃球反射镜系统的质心。为此,首先铂丝、反射镜和哑铃球在粘接时应采用准确定位好的模具,以保证铂丝基本通过系统的质心,然后再用光学方法进行细调。

##### 4.1 哑铃球系统在竖直状态下观察并调节反射光点

如图5所示,将哑铃球系统与一平面反射镜安装在同一支架上,图中1为已安装好铂丝哑铃球的支架系统,2为用来调节质心的平面反射镜,其方位可调节。当一束激光垂直照射时,将有三个反射光点,其中的一个光点 $a$ 是由哑铃球系统上的小反射镜反射产生的,此光点会随哑铃球系统的转动而摆动,称为活动光点;另两个反射光点 $b$ 是激光经哑铃球支座上的二透光孔后,由反射镜2反射产生的,称为不动光点。让哑铃球系统的铂丝处于竖直状态(自然状态),调节反射镜2的方位,使活动光点 $a$ 处于两个不动光点 $b$ 的中间,此时反射镜2与哑铃球系统上的小反射镜平行,反射镜2也处于竖直状态。

##### 4.2 哑铃球系统平放和侧放时观察反射光点并进行配重

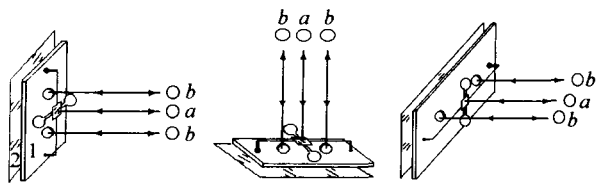


图5 哑铃球系统竖直状态图

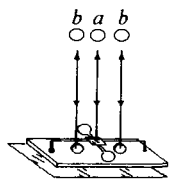


图6 哑铃球系统平放

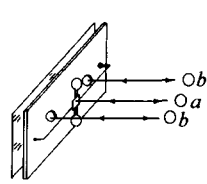


图7 哑铃球系统侧放

如图6所示,将哑铃球系统平放,用激光束从上方竖直照射,观察活动光点 $a$ 和不动光点 $b$ 的位置,可判断两球的轻重情况。



图8 球体倾斜情况

如图7所示,将哑铃球系统侧放,用激光束垂直照射,观察活动光点 $a$ 和不动光点 $b$ 位置的高低,可判断铂丝是否通过哑铃球系统的质心。若观察到活动光点 $a$ 的位置在不动光点 $b$ 的上方,则球体的倾斜情况如图8所示。当下球体较轻时,表示哑铃球系统质心在左上方,应在下球的右方通过补胶等措施配重;当下球体较重时,表示哑铃球系统质心在左下方,应在上球的右方通过补胶等措施配重;若观察到活动光点 $a$ 的位置与不动光点 $b$ 等高,则应在较轻的球体正前方补胶配重。

以上方法在哑铃球系统平放和侧放过程中经几次反复观察配重,可很容易地调到哑铃球系统完全平衡。

#### 5 结论

综上所述,用铂丝哑铃球反射镜系统作为测量气体中氧含量的传感部件,对系统的设计充分考虑了仪器的灵敏度、精度和工作的稳定性等问题,并设计了调节铂丝哑铃球反射镜系统平衡的有效装置和方法。经实验测量,当氧气含量在0%~21%范围内变化时,哑铃球系统所产生的反射光点旋转角 $\alpha \approx 3^\circ$ ;反射光点的偏转角度基本不因工作平台的倾斜而变化;哑铃球系统转动阻尼良好,在2~3s内反射光点即可稳定。说明了本文所设计的哑铃球系统具有较高的灵敏度、工作稳定可靠、性能良好。

#### 参考文献:

- [1] 王仁旺. 在线氧含量分析仪选型与使用[J]. 化工自动化及仪表, 2004, 31(2).
- [2] xilu222 氧量分析仪[EB/OL]. <http://www.cngspw.com>, 2004-12-04.
- [3] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学(第二版)[M]. 北京:高等教育出版社, 1985.
- [4] 漆安慎. 普通物理学教程——力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1997.

(上接第248页)

#### 6 结论

实验和理论计算结果表明,高精度水浴黑体辐射源的研制满足了量化红外遥感传感器光谱定标的需求,具有广泛的应用前景。为了提高黑体辐射定标的精度,在低温背景下基于绝对低温辐射计的黑体定标技术将是未来的发展趋势。

#### 参考文献:

- [1] Sapritsky V I, Prokhorov A V. Calculation of the Effective Emissivities of Specular-diffuse Cavities by the Monte Carlo Method[J]. Metrologia, 1992, 29: 9—14.
- [2] A Third Generation Water Bath Based Blackbody Source[J]. J Res Natl Inst Stand Technol, 1995, 100: 591.
- [3] 郑小兵, 吴浩宇, 章骏平, 等. 高精度光辐射定标和标准传递方法研究[J]. 科学通报, 2000, 45(12): 1341—1344.
- [4] Alan L Migdall, George P Eppeldauer. NIST MEASUREMENT SERVICES: Spectroradiometric Detector Measurements: Part III—Infrared Detectors[Z]. 1998.
- [5] 李双, 吴浩宇, 李照洲, 等. 近红外高精度光辐射标准探测器的实验研究[J]. 光学技术, 2004, 30(4): 498—501.
- [6] Barry N Taylor, Chris E Kuyatt. Guidelines for evaluating and expressing the uncertainty of [R]. NIST measurement results. NIST Technical Note 1297, 1994.