

# 红外目标模拟器校准系统的研制与应用

梁培<sup>1)</sup> 朱明义<sup>2)</sup>

(<sup>1)</sup>苏州大学现代光学技术研究所,江苏,苏州,215006;

<sup>2)</sup>西安应用光学研究所,陕西,西安,710065)

**摘要** 采用标准辐射和红外目标模拟器的辐射交替折转进入红外光谱辐射计的方法,研制的红外目标模拟器校准系统可以对红外目标模拟器进行直接校准.该系统由标准准直辐射源,光束偏转装置和红外光谱辐射计组成.标准准直辐射源由工作温度为 50℃~1050℃ 的标准黑体和口径 300mm 的离轴抛物面作主镜的准直光管组成.光束偏转装置由口径 465mm 的反射镜和定位精度 5" 的转台组成.红外光谱辐射计采用圆形渐变滤光片 CVF 对入射的辐射分光,3 个光谱工作区间为 1μm~3μm,3μm~5μm 和 8μm~14μm.3 个区间的测试数据显示了最小可校准的光谱辐照度低于 10<sup>-11</sup> W/cm<sup>2</sup>,系统的相对标准不确定度为 2%.

**关键词** 红外,目标模拟器,光谱辐照度,校准.

## DEVELOPMENT AND APPLICATION OF INFRARED TARGET SIMULATOR CALIBRATION SYSTEM

LIANG Pei<sup>1)</sup> ZHU Ming-Yi<sup>2)</sup>

(<sup>1)</sup>Modern Optical Technology Institute of Suzhou, Suzhou, Jiangsu 215006, China;

<sup>2)</sup>Xi'an Institute of Applied Optics, Xian, Shaanxi 710065, China)

**Abstract** By using the method of deflecting the standard radiation and the IRTS (IR Target Simulator) radiation into IR spectroradiometer alternatively, the developed IRTSCS (IR Target Simulator Calibration System) can calibrate IRTS directly. IRTSCS is consists of a standard collimating unit, a radiation-deflecting device and an IR spectroradiometer. The standard collimating unit contains a standard blackbody working in temperature of 50℃~1050℃ and a collimator which main mirror is an off-axis paraboloid of aperture 300mm. The radiation-deflecting device is composed of a 465mm aperture of reflecting mirror and a rotating platform with locating precision of 5". IR spectroradiometer adopts CVF (Circular Variable Filter) to disperse the incident radiation. It has three working spectral in the ranges of 1μm~3μm, 3μm~5μm and 8μm~14μm respectively. Testing datum of the three ranges show that the minimum spectral irradiance of calibration is lower than 10<sup>-11</sup> W/cm<sup>2</sup>. The relative standard uncertainty of IRTSCS is 2%.

**Key words** IR, target stimulator, spectral irradiance, calibration.

### 引言

红外传感接收设备,如红外遥感、遥测,红外导引、跟踪,和热像仪等,在研制、储存和使用过程中需要红外目标模拟器提供已知的辐照度进行验证与标定.关键的产品甚至专门研制了一整套大型的模拟测试设备,用以保障产品的质量<sup>[1]</sup>.红外目标模拟器由辐射源、光阑和准直光管组成,能够在实验室内模拟远处目标的辐射.图 1 为一种反射式红外目标模拟器的示意图,黑体的辐射经光阑和平面反射镜后由离轴抛物面反射镜准直出射.

能量标定牵扯到多个参数,难以达到较高的准确度.现场使用的红外目标模拟器,由于多种因素的制约,不利于长期保持辐射量值的稳定性,所以必须定期地对其进行辐射度的校准以便保证辐射量值传递的可靠性.为了能够有效地对现场使用的红外目标模拟器进行辐射量校准,一些国家投入力量研制出各自的红外目标模拟器校准装置.美国军方于 80 年代研制的一种红外目标模拟器校准设备<sup>[2]</sup>,待校准的红外目标模拟器和标准辐射源置于平移台上,交替对准接收用的红外光谱辐射计.光学部分全部采用球面反射镜,结构显得复杂,成像质量较差.

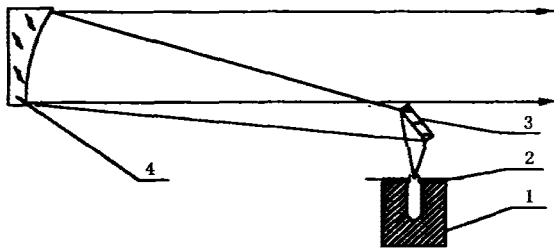


图1 红外目标模拟器示意图

1—黑体 2—光阑 3—平面反射镜 4—抛物反射镜

Fig.1 Schematic diagram of IR target simulator

1—black body 2—aperture 3—plane mirror 4—parabolic mirror

光谱辐射计内采用了3块窄带滤光片,波长在 $1\mu\text{m}$ ~ $4\mu\text{m}$ 的中波区间。

90年代初,国内研制成功的红外目标模拟器检定装置,采用了抛物反射镜,结构简单像质好.光谱辐射计采用多块窄带滤光片覆盖波长 $1\mu\text{m}$ ~ $5\mu\text{m}$ ,但仍然基于积分测量的原理.由于缺乏 $8\mu\text{m}$ ~ $14\mu\text{m}$ 波段的测量能力,无法对红外目标模拟器进行长波红外的校准,而该区间的性能是遥感和红外热像最为关心的。

## 1 系统研制

### 1.1 研制任务

采用分光谱进行辐射量校准.红外测量存在诸多干扰因素,而且具有不同辐射特性的辐射目标可以有着相同或相近的波段内积分能量值.尽管只需要红外目标模拟器提供某一波段区间的积分能量值用于特定设备的标定,但只有通过严格意义上的光谱测量手段才能够有效地实施辐射校准.研制任务要求系统的光谱范围能够覆盖 $1\mu\text{m}$ ~ $3\mu\text{m}$ , $3\mu\text{m}$ ~ $5\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m}$ ~ $14\mu\text{m}$ 3个大气窗口,具体的技术指标为:

$1\mu\text{m}$ ~ $3\mu\text{m}$ 的光谱区间,辐照度测量范围 $\geq 4.0 \times 10^{-10} \text{W}/\text{cm}^2$ ;

$3\mu\text{m}$ ~ $5\mu\text{m}$ 的光谱区间,辐照度测量范围 $\geq 1.0 \times 10^{-10} \text{W}/\text{cm}^2$ ;

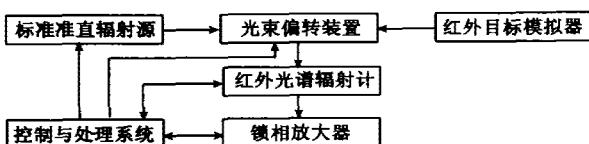


图2 红外目标模拟器校准系统的原理框图

Fig.2 Principle scheme of IR target simulator calibration system

$8\mu\text{m}$ ~ $14\mu\text{m}$ 的光谱区间,辐照度测量范围 $\geq 3.0 \times 10^{-10} \text{W}/\text{cm}^2$ ;

光谱辐照度校准的不确定度 $\leq 5\%$ 。

### 1.2 系统原理

为了减少测量环节,在整个工作波段和测量值范围内达到校准不确定度的要求,采用标准辐射和待校准红外目标模拟器直接对比定标的原理.图2所示为红外目标模拟器校准系统的原理框图.标准直辐射源和待校红外目标模拟器的出射辐射经过光束偏转装置交替投射到红外光谱辐射计中,红外光谱辐射计的输出信号经过锁相放大器处理后送到控制处理系统中储存和作进一步的处理与输出.控制与处理系统完成整个校准系统的全自动控制 and 数据采集。

采用直接比较的原理,标准辐射源经由红外光谱辐射计对待校红外目标模拟器实施最短环节的校准.红外光谱辐射计由于只在短时间内对辐射进行采样比较,合理选择设计参数时,其本身的一些因素对校准不确定度的影响可以忽略不计.现场应用的红外目标模拟器多为便携式的,适合于这种原理的校准.一些大型的室内使用的辐射测量装置的校准,可以采用经过标准直辐射源标定过的红外光谱辐射计进行传递标定。

### 1.3 结构组成

红外目标模拟器校准系统由标准直辐射源、光束偏转装置和红外光谱辐射计组成,图3为光学原理图。

#### 1.3.1 标准直辐射源

标准黑体、HeNe激光器和白炽光源同置于精密数显平移滑台上,可以方便地分别对准准直光管的人射光阑. HeNe激光器对系统的光轴进行准直,白炽光源模拟黑体辐射作进一步的光路调整及成像质量检查.标准黑体的发射率0.999,温度范围 $50^\circ\text{C}$ ~ $1050^\circ\text{C}$ , $2/3$ 腔长范围内的温场非均匀性小于 $0.2^\circ\text{C}$ ,控温 $0.1^\circ\text{C}$ ,出射口径 $25.4\text{mm}$ 。

离轴抛物面镜的口径 $300\text{mm}$ ,焦距 $2\text{m}$ ,系用零膨胀的微晶玻璃磨制而成,最小像斑小于 $0.03\text{mm}$ 。

#### 1.3.2 光束偏转装置

光束偏转装置主要由转台平面反射镜、精密数显转台及其控制系统组成.直接对比的原理对光束偏转角的准确性要求较高,数显转台的重定位可以达到 $5''$ 以下,满足系统总体性能的要求。

转台平面反射镜同样由微晶玻璃制成,口径 $465\text{mm}$ ,面型误差 $< \lambda / 4$  ( $633\text{nm}$ ),反射率均匀性

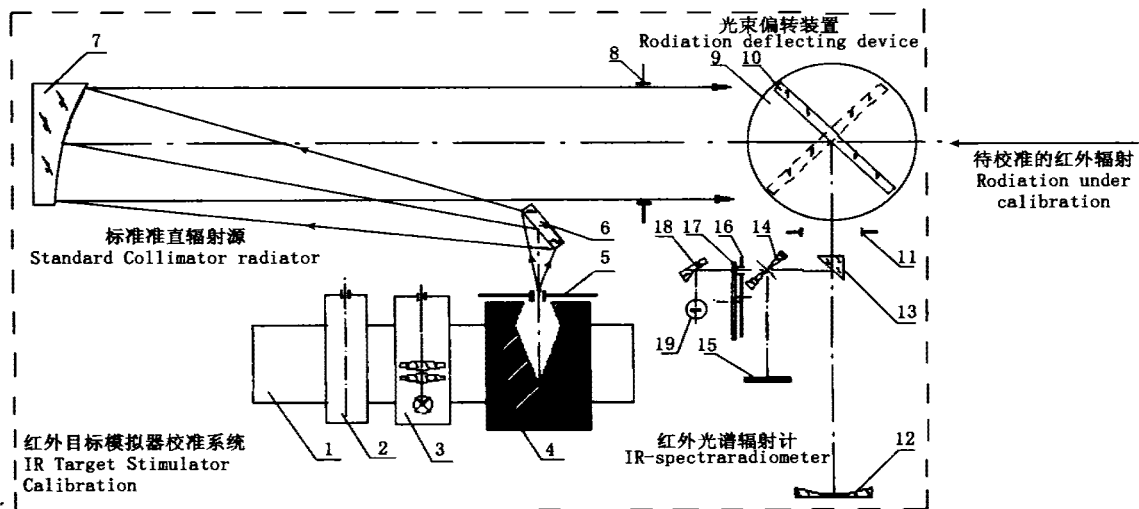


图3 红外目标模拟器校准系统的光学原理图

1—平移滑台 2—氦氖激光 3—白炽光源 4—标准黑体 5—准直光管入射光阑 6—平面反射镜 7—离轴抛物面反射镜 8—准直光管出射光阑 9—转台 10—转台反射镜 11—红外光谱辐射计入射光阑 12—同轴抛物反射镜 13—楔型反射镜 14—透、反斩波器 15—内部黑体 16—视场光阑转盘 17—圆形渐变滤光片 18—椭球反射镜 19—红外探测器

Fig. 3 Optical scheme of IR target stimulator calibration system

1—slide carriage 2—HeNe laser 3—illuminant 4—standard blackbody 5—entrance of collimator 6—plane mirror 7—collimator parabolic mirror 8—out aperture of collimator 9—turnplate 10—deflecting mirror 11—entrance aperture of IR spectroradiometer 12—coaxial parabolic mirror 13—cuneate mirror 14—chopper mirror 15—internal blackbody 16—field aperture disc 17—circular variable filter (CVF) 18—ellipsoid mirror 19—IR detector

优于 2%。

### 1.3.3 红外光谱辐射计

红外光谱辐射计的特性关系到校准系统的总体性能指标,是整个系统研制的重点。出于能量、像质和宽波段使用的考虑,红外光谱辐射计的光学系统采用非球面反射元件组成。

分光元件采用圆形渐变滤光片(CVF)。CVF具有中等的分光能力,结构简单,能量利用率高,易于和微机连接完成自动控制。配合红外探测器的使用,换用不同波段的 CVF 覆盖 3 个红外大气窗口。波长分辨率视波段不同稍有差异,一般为 2% 左右。

分光测量要求系统有高的探测能力。采用 Pbs、InSb 和 HgCdTe 3 种光电型探测器分别应用于 3 个波段的测量。

为了适应不同的红外目标模拟器,红外光谱辐射计的入射光阑可以换用不同的口径。视场光阑转盘的变化范围 0 ~ 6mrad,根据入射辐射特性进行调整。

内部黑体是红外光谱辐射计的参考辐射源,控制系统通过埋设的四引线铂电阻随时检测其温度变化,温度分辨小于 0.1℃。

## 2 辐射关系

辐射计响应于入射的辐射和参考辐射的差值。入射辐射包括目标源的辐射和背景的辐射,参考辐射是经调制叶片投射到探测器上的辐射<sup>[3]</sup>。对于使用了内部黑体的情形,可以认为内部黑体就是辐射计源。由于测量的是准直辐照度,红外光谱辐射计的输出信号  $s$  可以表示为

$$s = K \int R(\lambda) \tau(\lambda) [E(\lambda) + E_B(\lambda)] d\lambda - K \int R(\lambda) \tau'(\lambda) E_C(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中  $K$ —辐射转换系数;  $R(\lambda)$ —光谱响应度;  $\tau(\lambda)$ —目标和背景辐射的光谱透过率;  $\tau'(\lambda)$ —参考辐射的光谱透过率;  $E(\lambda)$ —目标辐射源的光谱辐照度;  $E_B(\lambda)$ —背景辐射的光谱辐照度;  $E_C(\lambda)$ —参考辐射的光谱辐照度。

对于连续分光的光谱辐射计,采样半宽度  $\Delta\lambda$  相比光谱工作区间很窄时,去掉积分号后,式(1)可写为

$$s = KR(\lambda) \tau(\lambda) [E(\lambda) + E_B(\lambda)] \Delta\lambda - KR(\lambda) \tau'(\lambda) E_C(\lambda) \Delta\lambda. \quad (2)$$

待校准的红外目标模拟器的辐射和校准系统的

标准辐射交替进入红外光谱辐射计中,标准辐射的输出  $s_b$  和红外目标模拟器的输出  $s_h$  之比为

$$\frac{S_b}{S_h} = \frac{\tau(\lambda)[E_b(\lambda) + E_{Bb}(\lambda)] - \tau'(\lambda)E_C(\lambda)}{\tau(\lambda)[E_h(\lambda) + E_{Bh}(\lambda)] - \tau'(\lambda)E_C(\lambda)}, \quad (3)$$

式中  $E_b(\lambda)$ —标准辐射照度;  $E_{Bb}(\lambda)$ —测量标准辐射时的背景辐射照度;  $E_h(\lambda)$ —待校的辐射照度;  $E_{Bh}(\lambda)$ —测量待校准辐射时的背景辐射照度. 实验室内如认为标准的和待校的目标具有相同的背景辐射照度,则从式(3)中可以得出待校准的光谱辐照度  $E_b(\lambda)$ :

$$E_h(\lambda) = \frac{S_h}{S_b}E_b(\lambda) + (1 - \frac{S_h}{S_b}) [E_C(\lambda) \frac{\tau'(\lambda)}{\tau(\lambda)} - E_B(\lambda)], \quad (4)$$

式(4)中第一项是辐照度与输出信号成比例的部分,第二项是参考辐射和背景辐射的差值被  $(1 - s_h/s_b)$  因子调制. 除了实测值  $s_h$  和  $s_b$  外,第二项中的其余各量影响因素太多,计算值难以满足辐照度校准的要求. 根据其特征,采用匹配的方法,使标准辐射和被校辐射二者的输出信号在一定的程度上相吻合后,第二项可以忽略. 标准辐照度  $E_b(\lambda)$  用标准黑体和准直光管的参数表示为

$$E_b(\lambda) = \varepsilon_b M_b(\lambda, T) (r_b/f_b)^2 \rho(\lambda)^m \Delta\lambda, \quad (5)$$

式(5)中  $\varepsilon_b$ —标准黑体发射率;  $M_b(\lambda, T)$ —标准黑体辐射出射度;  $r_b$ —准直光管入射光阑孔半径;  $f_b$ —准直光管焦距;  $\rho(\lambda)$ —反射镜的反射率;  $m$ —反射镜面数;  $\Delta\lambda$ —CVF 的半带宽.

### 3 系统性能和不确定度分析

校准系统基于高性能的标准黑体和精心设计、研制的准直光管,经过直接比对后给出红外目标模拟器的辐照度校准值. 虽然红外光谱辐射计的特性决定了系统的校准量限和光谱范围,但在直接比对的测量原理中对校准结果的影响很小. 因此,在考虑系统可能的一系列误差源<sup>[4]</sup>时,将辐射计的校准误差作为 A 类不确定度,和电路、环境、旋转定位等一起在系统的多次重复测量中分析. 标准辐射源中的黑体和光学、机械、调校等的误差作为 B 类分析,然后将二类不确定度分量合成后得出系统的合成标准不确定度.

为了验证系统的总体性能并得出 A 类不确定度,对 3 个波段的光谱辐射照度进行了多次的重复测量研究. 操作时,对每一个波段,换用相应的 CVF 和红外探测器,设置标准黑体到需要的温度上. 启动

系统,使之完全如校准红外目标模拟器时动作,只是将标准辐射源既当标准又当待测的辐射. 重复运转 6 次以上,将采集的辐射信号按照统计方法处理得出辐照度测量的 A 类不确定度. 以下是鉴定测试报告中的一些考核结果:

光谱区间  $1\mu\text{m} \sim 3\mu\text{m}$ : PbS 探测器,标准黑体温度设置 1000K,准直光管入射光阑孔径 3.0mm. 测得的光谱辐照度  $\geq 1.7 \times 10^{-10} \text{W}/\text{cm}^2$ , A 类相对不确定度在 1% ~ 0.15% 之间,小的光谱辐照度相对于较大的不确定度.

光谱区间  $3\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ : InSb 探测器,标准黑体温度设置 500K,准直光管入射光阑孔径 0.5mm. 测得的光谱辐照度  $\geq 7.7 \times 10^{-12} \text{W}/\text{cm}^2$ , A 类相对不确定度 0.6% ~ 0.1%.

光谱区间  $8\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$ : HgCdTe 探测器,标准黑体温度设置 400K,准直光管入射光阑孔径 0.6mm. 测得的光谱辐照度  $\geq 3.0 \times 10^{-10} \text{W}/\text{cm}^2$ , A 类相对不确定度 1% ~ 0.2%.

将以上重复测量不确定度中的最大值作为 A 类分量和系统其它不确定度合成后得出系统总的不确定度. 表 1 列出了系统一些主要的不确定度成分.

表 1 标准偏差分量

Table 1 The components of standard deviation

标准偏差内容	符号	标准偏差值
标准黑体腔温	$u_b(T)$	0.14K
标准黑体发射率	$u_b(\varepsilon)$	0.001
准直光管光阑孔径	$u_b(D)$	0.01mm
准直光管焦距	$u_b(f)$	0.40mm
镜面反射率	$u_b(\rho)$	0.3%
CVF 波长定位	$u_A(\lambda)$	0.016 $\mu\text{m}$
系统重复测量	$u_A(R)$	0.01

各分量相对独立,按正态合成后相对不确定度  $\leq 2\%$ , 优于研制任务的要求.

### 4 红外目标模拟器校准实例

一种产品上用的红外目标模拟器,和图 1 给出的结构不同,光学系统由两片平面反射镜和离轴抛物面组成. 口径 100mm,焦距 650mm. 根据使用要求,需要检测  $3.6\mu\text{m} \sim 4.8\mu\text{m}$  光谱区间的积分辐照度值,温度设置 190 $^{\circ}\text{C}$ ,光阑口径 0.65mm. 为保持光谱分布的一致,标准黑体同样设置为 190 $^{\circ}\text{C}$ ,然后根据信号匹配选取最佳的准直光管入射光阑进行测量. 表 2 给出了光谱辐照度的实测结果.

表 2 校准结果  
Table 2 Calibration results

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$E$ ( $10^{-9}\text{Wcm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ )
3.60	2.10
3.74	2.47
3.87	2.83
4.01	3.16
4.14	3.46
4.27	3.71
4.41	3.97
4.55	4.19
4.67	4.36
4.81	4.53

表 2 列出的是 10 个光谱采样点的结果. 采样点的增多可以使光谱曲线更加细致, 但测量时间也是一个考虑的因素. 校准系统采用了高稳定性的实验室标准黑体, 整个系统的重复性也经过了考核. 而红外目标模拟器由于要考虑便携、现场使用和其他一些特殊的应用要求, 往往牺牲了部分的稳定性能.

数值积分后,  $3.6\mu\text{m} \sim 4.8\mu\text{m}$  之间的辐照度为  $4.2 \times 10^{-9}\text{W}/\text{cm}^2$ . 该红外目标模拟器给出的黑体发射率为 0.99, 综合其它的参数后, 该光谱区间的计算值约为  $4.7 \times 10^{-9}\text{W}/\text{cm}^2$ . 校准值和计算值之间的差别是明显的, 超过了 10%, 有些红外目标模拟器的偏差甚至会更大. 计算值是从给定的各组件的参数, 如反射率、温度和准直光管性能得出的, 未及考虑调校的影响. 有些量会随时间发生变化, 一经装

配起来后难以再对单个的参数进行测量. 所以计算的辐照度只是参考, 实际应用中应当根据整体测量后的辐照度进行工作.

## 5 结语

红外目标模拟器校准系统的研制提供了低辐照度值高准确度的测量手段, 在红外 3 个大气窗口内可以进行光谱和积分的能量测量. 对于一线应用的红外目标模拟器和各基地红外辐射测量实验室中的辐射测试装置均可起到辐射量值传递的作用, 同时可以为提高我国的红外产品性能做出贡献.

## REFERENCES

- [1] Martin Wolk, Edward P Armstrong, Edward L Mann. TOW optical and infrared test and alignment calibration capability. *SPIE*, 1996, **2775**: 74—93
- [2] John L Grangaard. Calibration of a system of portable infrared collimator test sources. *SPIE*, 1983, **416**: 187—196
- [3] CHEN Heng. *Infrared Physics*. Beijing: Defence Industry Press (陈衡. 红外物理学. 北京: 国防工业出版社), 1985, 28
- [4] John L Grangaard. Field Level calibration of a system of low level infrared target simulators. *SPIE*, 1989, **1109**: 160—168