

文章编号:1002-2082(2018)04-0518-04

## 红外目标等立体角标定和测量方法研究

王学新<sup>1</sup>,杨鸿儒<sup>1</sup>,俞 兵<sup>1</sup>,闫晓宇<sup>1</sup>,郝淑杰<sup>2</sup>,谢 毅<sup>1</sup>,李四维<sup>1</sup>,汪建纲<sup>1</sup>

(1. 西安应用光学研究所,陕西 西安 710065;2. 中国兵器工业标准化研究所,北京 100089)

**摘要:**为解决红外目标隐身效果评估过程中辐射计视场响应不均匀对测量结果的影响,提出一种等立体角标定和测量的方法。采用同光路原理消除光学系统轴外像差造成的视场响应非均匀对测量结果的影响,实现红外隐身目标辐射强度等参数的标定和测量。以标准黑体为测量对象,采用本文提出的测量方法对其在(3~5) $\mu\text{m}$ 的积分辐射强度进行实验验证,结果表明其测量值与标准值相对误差小于2%,测量相对不确定度优于3.7%( $k=2$ )。

**关键词:**红外隐身;辐射测量;辐射亮度;辐射强度

中图分类号:TN206

文献标志码:A

DOI:10.5768/JAO201839.0403001

### Calibration and measurement method for IR target under the same solid angle

Wang Xuexin<sup>1</sup>, Yang hongru<sup>1</sup>, Yu bing<sup>1</sup>, Yan Xiaoyu<sup>1</sup>, Hao Shujie<sup>2</sup>, Xie Yi<sup>1</sup>, Li Siwei<sup>1</sup>, Wang Jiangang<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. China Institute of Weaponry Industry Standardization, Beijing 100089, China)

**Abstract:** In order to solve the problem about the influence of non-uniform field-of-view(FOV) response of radiometer on the measurement results during the assessment of infrared target stealth effect, a method of calibration and measurement under the same solid angle was put forward. The influence of the FOV response non-uniformity on the measurement results caused by off-axis aberrations was eliminated by adopting the principle of the same optical path. The calibration and measurement of the IR target radiation intensity and other parameters was realized. Finally, we adopted standard blackbody as the measuring object, and the 3 $\mu\text{m}$ ~5 $\mu\text{m}$  integral radiation intensity was verified by using the proposed method. The result shows that the difference between the measured and standard values is less than 2%, and the measurement uncertainty is better than 3.7%( $k=2$ ).

**Key words:** infrared stealth; radiation measurement; radiance; radiation intensity

### 引言

红外隐身技术是一种红外抑制技术,通过降低或改变目标自身的红外辐射特征,实现目标的低可探测性,降低被对方红外光电武器系统探测的概率,达到自我保护的目的。为评估目标的红外隐身效果,需测量其隐身措施前后的红外辐射亮度和辐射强度等参数的变化。测量仪器大都采用红外辐射计,红外辐射计的探测器输出是电信

号,为得到目标的辐射量,需对辐射计进行标定,建立光谱辐射亮度-电信号的对应关系。辐射标定是一个比较复杂的过程,需考虑测量目标、标定源、标定方法和测量环境等因素,目前辐射标定大都采用实验室一次性标定,每次测量调用该标定曲线,实际测量中发现,采用该方法测量未充满视场的目标时误差很大,本文针对该问题开展研究,提出一种等立体角标定和测量的方法。

收稿日期:2018-02-26; 修回日期:2018-04-26

基金项目:国防基础科研项目

作者简介:王学新(1972—),男,陕西大荔人,博士,高级工程师,主要从事光学设计和光学计量工作。

E-mail: Wxx205@163.com

## 1 辐射计视场非均匀性对测量结果的影响

国内目前用于红外目标隐身效果评估的辐射测量仪器主要有以色列 CI 公司的 SR5000 和加拿大 BOMEN 公司的 MR254 红外光谱辐射计, 这些仪器镜头基本采用卡塞格林形式设计, 离轴反射式设计减少了遮挡, 增加了入射光通量, 并且轴上无像差, 近轴点像差小。随着视场角增加轴外像差越来越大, 结果造成同一目标在红外辐射计视场内不同位置时输出信号不同, 给测量带来很大的误差和测量不确定度。

为评估视场非均匀性对测量结果影响, 我们对红外辐射计 MR254 视场非均匀性进行测试, 测量原理如图 1。测试时将黑体放置在辐射计视场内, 设置黑体为 500°C, 确保辐射计接收信号足够强, 沿垂直于辐射计光轴方向移动黑体, 记录辐射计输出随视场的变化, 就可得到辐射计的视场响应的情况。图 2 为安装有 75 mrad 镜头的 MR254 辐射计视场非均匀性的归一化测量结果。从图中可以看出, 随着视场角增大输出电压在减小, 视场中心和边缘输出电压相差约 50%。

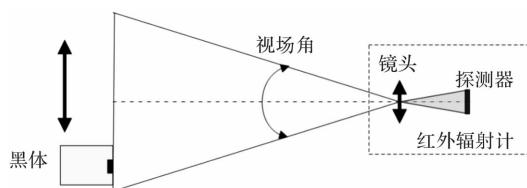


图 1 视场非均匀性测试原理图

Fig. 1 Schematic diagram of FOV non-uniformity measurement

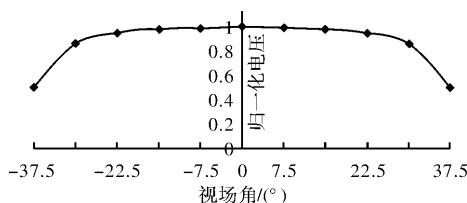


图 2 视场非均匀性归一化测量结果

Fig. 2 Measurement result of FOV non-uniformity

视场非均匀性主要影响未充满视场的目标测量, 由于标定和测量目标对辐射计所张立体角不同, 目标经过光学系统光路不完全相同, 像差造成的视场光线弥散, 则探测器接收的能量不同。立体角差别越大误差越大, 由此引入的测量不确定度分量也会使测量结果的测量不确定度

变大。

## 2 等立体角标定测量方法

等立体角标定和测量方法如图 3 所示。目标和背景的辐射一起经过光学镜头进入红外辐射计, 辐射计探测器将接收到辐射通过光电转换将光信号转化为电信号, 通过 A/D 转换将模拟电信号变为数字信号后, 通过数据采集卡被计算机接收。

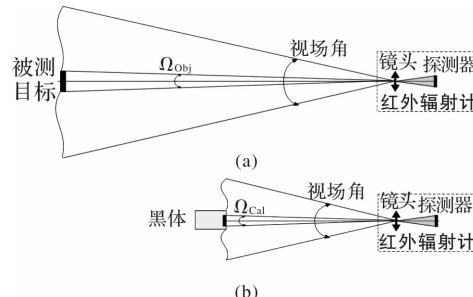


图 3 等立体角标定和测量方法原理图

Fig. 3 Schematic of the same solid angle calibration and measurement

对于光谱辐射亮度  $L_{Obj}(\lambda)$  的目标, 假定辐射计输出电压为  $V_{Obj}(\lambda)$ , 根据辐射测量原理:

$$L_{Obj}(\lambda) = R(\lambda) \cdot (V_{Obj}(\lambda) - V_0(\lambda)) \quad (1)$$

式中:  $R(\lambda)$  为辐射计光谱辐射亮度响应度, 单位 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}/\text{V}^{-1}$ );  $L_{Obj}$  为辐射计测量被测目标时的电压信号, 单位 V;  $V_0(\lambda)$  为背景电压信号, 单位 V。

为得到目标的辐射亮度, 需要采用黑体进行标定, 标定时将黑体设置为合适的温度, 放置在辐射计视场中心, 前后移动位置使得黑体的立体角与测量目标时相等, 即  $\Omega_{Cal} = \Omega_{Obj}$ , 如图 3(a) 和图 3(b) 所示, 此时目标和黑体通过辐射计光路完全相同, 测量条件也相同, 则辐射计输出电压  $V_{BB}(\lambda)$  与辐射亮度  $L_{BB}(\lambda)$  的关系:

$$L_{BB}(\lambda) = R(\lambda) \cdot (V_{BB}(\lambda) - V_0(\lambda)) \quad (2)$$

式中:  $L_{BB}(\lambda)$  为黑体的光谱辐射亮度, 单位为  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ ;  $V_{BB}(\lambda)$  为辐射计测量标定用黑体时的电压信号, 单位 V;  $V_0(\lambda)$  为背景电压信号, 单位 V。

将公式(2)代入公式(1), 可得到:

$$L_{Obj}(\lambda) = \frac{V_{Obj}(\lambda) - V_0(\lambda)}{V_{BB}(\lambda) - V_0(\lambda)} L_{BB}(\lambda) \quad (3)$$

在公式(3)中, 黑体通过校准后其发射率和温度已知, 根据 PLANK 公式就可得到  $L_{BB}(\lambda)$ ,  $V_{BB}(\lambda)$  可通过辐射计直接测量。 $V_0(\lambda)$  为遮挡住目标的辐射计电压, 由此可以得到目标的辐射亮度  $L_{Obj}(\lambda)$ 。

被测目标确定后, 其尺寸和距离确定, 假定目

标的面积为  $A_{\text{Obj}}$ , 目标的测试距离为  $l_{\text{Obj}}$ , 用于标定黑体面积为  $A_{\text{Cal}}$ , 根据等立体角测量和标定的方法, 需要保证  $\Omega_{\text{Cal}} = \Omega_{\text{Obj}}$ , 亦即:

$$l_{\text{Cal}} = \sqrt{\frac{l_{\text{Obj}}^2}{A_{\text{Obj}}}} \cdot A_{\text{Cal}} \quad (4)$$

从公式(4)可以看出, 在标定源和测量目标确定的情况下, 通过调节标定距离  $l_{\text{Cal}}$ , 可使得测量和标定立体角相等。其中目标面积为  $A_{\text{Obj}}$  可采用卡尺、米尺等长度测量工具得到, 对于无法直接测量的目标, 如远距离未知目标, 需采用合适镜头的红外热像同步辅助测量。

则根据定义, 目标的辐射强度为

$$I_{\text{Obj}}(\lambda) = L_{\text{Obj}}(\lambda) \cdot A_{\text{Obj}} \quad (5)$$

式中  $A_{\text{Obj}}$  为标的面积。

### 3 测量验证及测量不确定度评估

测量结果的验证需采用光谱辐射强度已知的标准黑体, 在该黑体未充满辐射计视场的情况下, 采用等立体角标定和测量的方法, 测量该标准黑体在(3~5)  $\mu\text{m}$  内的积分辐射强度, 通过比较测量值与标准值之差即测量误差来评定测量准确性。

标准黑体选用美国 SBIR 公司 11304 面黑体, 辐射面为 50.8 mm  $\times$  50.8 mm, 通过校准该黑体在 50℃ 时发射率为 0.94, 利用 PLANK 公式计算在(3~5)  $\mu\text{m}$  内的积分辐射强度为 4.08 W/( $\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ ), 根据公式(5)得到辐射强度标准值为  $1.05 \times 10^{-2}$  W/sr; 定标选用环境温度范围为(5~1 000)℃、发射率为 0.99 的 HYF 型黑体; 辐射计采用光谱范围为(2~12.5)  $\mu\text{m}$  的 MR254 红外光谱辐射计。

测量验证时, 11304 设置为 50℃, 测量距离为 30 m, 定标黑体辐射面为  $\Phi 15$  mm 时, 根公式(4)计算得到标定距离应为  $l_{\text{Cal}} = 7.8$  m。测量结果如图 4 所示。共测量了 10 次, 测量结果取平均值为  $1.03 \times 10^{-2}$  W/sr; 与标准光谱辐射强度  $1.05 \times 10^{-2}$  W/sr 相比, 其测量相对误差小于 2.0%。

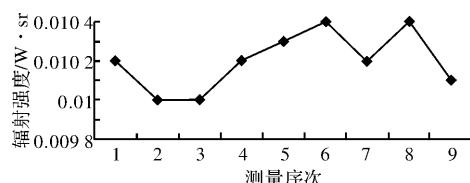


图 4 黑体目标(3~5)  $\mu\text{m}$  积分辐射亮度测量结果

Fig. 4 Result of (3~5)  $\mu\text{m}$  integral radiance of blackbody target

测量结果的不确定度评估主要来源于以下几个方面:

1) 红外辐射计测量不准引入的测量不确定度  $u_1 = 0.3\%$ 。

2) 定标黑体辐射亮度测量不准引入的测量不确定度包括温度和发射率两个方面, 温度变化引起的测量不确定度 0.06 K, 在 50℃ 时相对不确定度为  $u_{21} = 0.2\%$ , 由黑体的发射率变化引起, 采用“中温黑体标准装置”进行校准  $u_{22} = 0.6\%$  ( $k=2$ )。定标黑体辐射亮度测量测量不准引入的不确定度为  $u_2 = \sqrt{16u_{21}^2 + u_{22}^2} = 1.0\%$ 。

3) 红外辐射计探测器非线性引入的不确定度  $u_3 \leqslant 1.0\%$ 。

4) 标准黑体面积测量不准引入的标准不确定度, 采用游标卡尺测量, 按最小刻度 0.1 mm 分析可知标准黑体目标面积测量引入的测量不确定度为  $u_4 = 2 \times 0.1 / 50.8 = 0.4\%$ 。

5) 环境变化引入的测量不确定度  $u_5 = 0.8\%$ 。

6) 测量重复性引入的标准不确定度, 根据 10 次测量结果, 取标准偏差除以平均值, 得到重复性引入的标准不确定度  $u_6 = 0.7\%$ 。

各分量独立, 则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} = 1.85\% \quad (6)$$

则扩展不确定度为

$$U = ku_c = 3.7\% \quad (k=2) \quad (7)$$

### 4 结论

测量红外目标辐射强度等参数时, 目标未充满辐射及视场测量误差很大, 文章分析了造成测量误差是由于辐射计不同视场轴外像差不同引起的视场响应非均匀。针对该问题提出了红外目标等立体角标定和测量方法, 采用同光路原理, 消除测量过程中视场非均匀性的影响, 文章最后提出测量结果的验证方法, 并对标准黑体(3~5)  $\mu\text{m}$  的积分辐射强度进行了测量验证, 结果表明测量相对误差小于 2%, 测量不确定度优于 3.7% ( $k=2$ )。本文提出的方法每次测量都需要同步标定, 影响了测量的连续性, 但测量误差和不确定度得到提高, 因此适合于高精度测量。

### 参考文献:

- [1] WANG Xuexin, YAN Xiaoyu, YUE Wenlong, et al.

- Technology of infrared radiation measurement in national defense metrology[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(1):27-31.
- 王学新,闫晓宇,岳文龙,等.国防红外辐射计量技术[J].应用光学,2016,37(1):27-31.
- [2] SONG Xinbo, LYU Xueyan, ZHANG Jianjun. Study on the infrared stealth of plane[J]. Infrared Technology, 2012, 42(1):3-7.
- 宋新波,吕雪艳,章建军.飞机红外隐身技术研究[J].激光与红外,2012,42(1):3-7.
- [3] CUI Xuan, XIN Yunhong. An effective method in the detection of infrared dim target[J]. Acta Photonica Inica, 2014, 43(2):210003-210007.
- 崔璇,辛云宏.一种有效的红外小目标检测方法[J].光子学报,2014,43(2):210003-210007.
- [4] XIE Minyong, SHEN Weidong, SONG Shihong, et al. Effectiveness evaluation of infrared stealth based on the contrast of target and background infrared radiation [J]. Infrared Technology, 2011, 33 (2): 113-116.
- 谢民勇,沈卫东,宋斯洪,等.基于目标与背景红外辐射对比度的红外隐身效能研究[J].红外技术,2011, 33(2):113-116.
- [5] LIANG Pei, ZHU Mingyi. Development and application of infrared target simulator calibration system [J]. Infrared Millim. Waves, 2003, 20(4):251-255.
- 梁培,朱明义.红外目标模拟器校准系统的研制与应用[J].红外与毫米波学报,2003,20(4):251-255.
- [6] ZHANG B, REDGROVE J, CLARK J. A transient method for total emissivity determination[J]. International Journal of Thermophysics, 2004, 25 (2): 423-438.
- [7] PAN Junhua. Handbook of measurement technology, Vol. 10: optics[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1995.
- 潘君骅.计量测试技术手册,第10卷:光学[M].北京:中国计量出版社,1995.
- [8] LAI Dexiong, ZHANG Yunfei. Evaluation method research for aircraft infrared stealth performance[J]. Infrared Technology, 2014, 36(5):389-403.
- 赖德雄,张云飞.飞行器红外隐身性能评估方法研究[J].红外技术,2014,36(5):389-403.
- [9] THEOCHAROUS E. Absolute linearity measurements on a PbSe detector in the infrared[J]. Infrared Physics and Technology, 2007, 50(1):63-69.
- [10] ZHANG Jianqi, FANG Xiaoping. Infrared physics [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004.
- 张建奇,方小平.红外物理[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.