

辐射测量设备响应率和线性率标定方法研究

周亚凡, 刘 颖, 杜翠兰
(解放军91404部队93分队, 河北秦皇岛066001)

摘 要:将目标特性测量简化为点目标辐射强度和面目标辐射亮度测量。根据标定与测量一致性要求,将设备响应率和线性率标定分为点目标辐射强度和面目标辐射亮度的标定,对标定方法、条件、注意事项和标定不确定度进行了分析,并对设备噪声等效辐射量的含意及标定方法进行了论述。

关键词:辐射测量;设备标定;响应率;噪声等效辐射;标定不确定度

中图分类号:TN206 **文献标识码:**A

Investigation on Methods of Calibration Responsibility and Linear Rate with Radiation Measurement Equipment

ZHOU Ya-fan, LIU Ying, DU Cui-lan
(Navy Unit 91404, Qinhuangdao 066001, China)

Abstract: Measurement of target characteristics is predigested to point target radiation intensity and area target thermal radiation in this paper. Based on the consistency of calibration and measurement, the calibration of responsibility and linear rate with radiation measurement equipment is predigested to point target radiation intensity and area target thermal radiation. Then, methods of calibration, advertent proceedings, uncertainty of calibration, and so on are analyzed. Finally, the implication of equivalent noise radiation and methods of calibration are described.

Key words: radiation measurement; equipment calibration; responsibility; equivalent noise radiation; uncertainty of calibration

1 概 述

辐射测量设备的标定及标定不确定度评估是定量辐射测量的前提,是数据分析和测量不确定度评估的基础,是测量数据可信性、可用性和交换性的基础。辐射测量的最高境界是不同的测量者和不同的测量设备对于同一目标的辐射量测量结果是一致的。然而由于设备响应的不完全标定,标定不规范问题,标定时设备配置与试验测量时的配置不同,以及未充分理解测量时外部大气、背景、设备周边环境等影响,致使实际测量结果常常不一致,从而引入了测量不确定度问题。规范的测量方法、设备标定方法和不确定度评估方法,对红外辐射特性的测量与研究具有重要的意义。用于辐射测量的设备有辐射计、光谱仪和热像仪。辐射测量设备的标定分为试

验前室内的初始标定、试验中的现场标定和试验后验证和修订标定,涉及光、机、电、算等多种技术。影响辐射测量结果的标定项目有辐射幅值响应、光谱响应、频率响应、时间基准和视场响应多种。本文就设备辐射幅值的响应率、线性率和噪声等效辐射的标定方法进行研究。

2 辐射测量的基本概念

2.1 测量原理

辐射量定量测量采用的是与可溯黑体标准源对比测量的方法。辐射测量设备响应的是探测器光学

作者简介:周亚凡(1960-),女,高级工程师,工程硕士,长期从事目标特性测量与研究工作。E-mail: dcl_725@yahoo.com.cn

收稿日期:2008-03-27

系统入射孔径处的辐射照度信号 E_λ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), 此值的大小可对比设备响应输出信号与设备响应率标定曲线来获得。

根据测量得到的设备响应曲线 $V \sim t$, 对比设备黑体标准源标定的响应曲线 $E_0 \sim V$, 可获得测量结果曲线 $E \sim t$ 。再依据辐射传输原理、测量设备布站、设备技术参数、试验环境参数等进行计算获得所要的目标辐射特性值。

2.2 点目标与面目标

辐射测量设备响应的是光学系统入射孔径处的辐射通量值。为简化测量与计算的过程, 一般将辐射测量分为点目标辐射强度与面目标辐射照度测量。点目标和面目标的概念是一个相对的概念, 是由目标尺寸大小、探测系统视场、焦距和孔径、探测器面积、探测距离等因素决定的。设目标面积为 A_s , 目标像的面积为 A_i , 探测器张角在目标处的投影面积为 A_{DAS} , 探测器的面积为 A_d 。理想情况下, $A_s < A_{\text{DAS}}$ 即为点源目标, 而 $A_s > A_{\text{DAS}}$ 则为面源目标。然而, 由于光学系统像差和衍射光斑的影响, 光学系统多为非理想状态。通常考虑如下两种极限情况: 当 $A_s \ll A_{\text{DAS}}$ 时, 且 A_i 与 A_s 无关, 仅由系统产生的弥散斑决定, 且 $A_i \ll A_d$, 为点目标; 当 $A_s \gg A_{\text{DAS}}$ 时, $A_i \gg A_d$, 为面目标。而当 $A_s \approx A_{\text{DAS}}$, 且 $A_i \approx A_d$ 或 $A_i \geq A_d$ 时, 需要考虑系统传递函数的影响, 计算比较复杂。

2.3 标定标准

标定的基本要求是怎么测就怎么标。这包括两个方面的意思, 一是指标定设备与黑体标准源间的相互关系和测量目标间的相互关系的一致性; 一是指标定的环境与试验测量环境的一致性。

根据测量点目标与面目标的不同, 标定分为辐射强度/照度标定和辐射亮度标定。

a) 辐射强度/照度标定

红外辐射强度/照度标准是点源黑体。首先使设备与点源黑体间满足点目标测量要求。其次要求黑体与测量设备间距离满足远场标定条件:

$$R_{\text{响应率标定}} \geq \frac{2D}{\tan(\text{FOV})}$$

式中, $R_{\text{响应率标定}}$ 为标定距离, 单位 m; D 为探测光学系统孔径, 单位 m; FOV 为半峰全宽 (FWHM) 视场, 单位为 ($^\circ$)。

注: 设备的指向不确定度应不大于 15%。

在室内标定距离不能满足条件时, 可采用大孔径平行光管的方法实现将目标置于无穷远处进行标定。光管口径应大于设备探测口径。

b) 辐射亮度标定

在仅需要测量目标某一部分的辐射亮度而不是辐射照度时, 或者没有办法测量目标的辐射照度, 只能测量目标某一部分的辐射亮度时, 就需要进行辐射亮度的标定。红外辐射亮度标准是大面积黑体。红外辐射亮度标定时设备视场必须完全放置在同样的辐射面上, 可采用大孔径平行光管实现。紫外与可见光辐射亮度标准通过使用已标定的辐射照度源照亮一个朗伯发散体反射来实现。

2.4 标定要求

标定要求在模拟实际的或预期的试验环境条件下进行, 包括周围温度和背景辐射的影响。因室内环境可控、测量路程很短、大气衰减可最小化以及使用的黑体标准源通常是高水准的, 因而最精准的标定通常在试验室条件下进行。由于外场环境是不可控的, 加上外场用黑体源精度远小于室内用辐射源精度, 以及测量中大气的影响, 外场标定精度小于试验室标定精度。因此, 在开展外场标定时首先验证与试验室标定的一致性, 只有当设备性能发生了变化或改变时才替换试验室标定。如果已知设备每天每小时都发生变化, 这些设备需要在外场进行原始标定。

2.5 不确定度概念

精确性、误差和不确定度是三个不同的概念。精确性是一个定性的概念, 不适合用于定量的分析; 误差用来表示定量测量时测量值和实际值的差别, 具有少量的定量性; 不确定度是指定一个实际测量置信度的上限和下限范围。当不能量化与测量相关的定量误差时, 对测量不确定度进行定量描述是可能的。不确定度给出一个范围的上限和下限, 数据只有 95% 置信度落在该范围内。其意义在于可以为数据提供信任等级评估依据、可以为试验前制定试验实施计划和试验后数据分析提供误差分析依据、可以为设备状态评估与分析提供依据。对于任何测量, 只有提供测量的不确定估计和估计准则, 标定测量才是定量化的和完备的。

3 响应率和线性率的标定

3.1 标定方法

响应率和线性率的标定是定量辐射测量的基础, 其目的是将设备的响应 (输出值) 转换成辐射测量单位值, 进行这一转换的参数是响应率。对于辐射计、光谱仪和热像仪来讲, 响应率和线性率的标定原理是相同的, 只是其过程略有差异。由单个探测器扫描视场的热像仪, 其响应率与线性率的标定同

辐射计和光谱仪相同;由 FPA 焦平面探测器组成的热像仪,热像仪响应率和线性率标定之前需要进行响应的非均匀性标定。非均匀性标定采用大面元、满视场的标定源或采用平行光管与标准源进行非均匀性标定。

辐射测量设备标定时,将设备看作一个黑匣子,用黑体标准源产生的一系列已知辐射幅值信号对测量设备进行响应率标定。将设备的响应作为已知辐射幅值信号的函数,可得到一条曲线。通常情况下设备响应是线性的,设备响应的变化与辐射幅值的变化成比例。在线性区域内数据可以拟合成一条给定斜率和截距的直线,用于将设备的响应转换成辐射幅值,直线的斜率就是设备的光谱响应率 $R_{0\lambda}$:

$$R_{0\lambda} = \Delta V / \Delta E_{0\lambda} \quad (1)$$

当辐射幅值增加到一定时,设备的响应增加到一定程度就不再与辐射幅值成比例。当响应率随辐射幅值的增加而下降时,设备工作在非线性区域,当设备响应不再随辐射幅值增加而变化时,设备处于饱和状态。响应率和线性率的标定就是要将设备线性区、非线性区和饱和区标定出来。对于黑体标准源,可采用改变黑体温度来改变辐射量;对于可见和紫外辐射源,可改变标定距离和用中性滤光片改变辐射量。

对于光谱辐射强度为 $J_{0\lambda}$ ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$),与测量系统距离为 R 的点源黑体,在测量系统入射孔径处的光谱辐射照度为:

$$E_{0\lambda} = \frac{J_{0\lambda} \cdot T_{\lambda, \text{ATM}}}{R^2} \quad (\text{单位 } \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}) \quad (2)$$

对于红外辐射计和红外热像仪这样的带通测量系统来讲,其入射孔径处的带通辐射照度为:

$$E_{0\Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{J_{0\lambda} \cdot T_{\lambda, \text{ATM}}}{R^2} d\lambda \quad (\text{单位 } \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}) \quad (3)$$

对于光谱辐射亮度为 $L_{0\lambda}$ ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$) 辐射面积为 A_s ,与测量系统距离为 R 的面源黑体,在测量系统入射孔径处的光谱辐射照度为:

$$E_{0\lambda} = \int_{S_{\text{DAS}}} \frac{L_{0\lambda} \cdot A_s \cdot T_{\lambda, \text{ATM}}}{R^2} dA_s \quad (\text{单位 } \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}) \quad (4)$$

对于红外辐射计和红外热像仪这样的带通测量系统来讲,其入射孔径处的带通辐射照度为:

$$E_{0\Delta\lambda} = \iint_{\Delta\lambda \cdot S_{\text{DAS}}} \frac{L_{0\lambda} \cdot A_s \cdot T_{\lambda, \text{ATM}}}{R^2} dA_s d\lambda$$

$$(\text{单位 } \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}) \quad (5)$$

式(2)~式(5)中, $T_{\lambda, \text{ATM}}$ 为黑体标准源到探测系统的大气光谱透过率。

如果采用平行光管进行标定,则式中的 R 为光管的焦距,即 $R = f_{\text{COL}}$ 。

3.2 标定注意事项

响应率和线性率的标定需要注意如下问题:

a) 了解设备的视场、孔径和辐射源的空间特性,正确设置设备与标定源之间的距离,满足点源标定和远场标定条件。

b) 了解设备的调制频率和辐射源的时间特性,正确设置标准辐射源的调制频率,确保辐射源的调制频率在设备电子带宽内。如果辐射源调制频率超过设备调制频率,就会产生不正确的测量结果。

c) 了解设备的光谱波段与标准源的光谱特性,辐射源与设备光谱要匹配。

d) 在借助平行光管进行标定时,为了使设备与标准辐射源间没有遮挡,应当采用离轴式平行光管来实现。

e) 设备视轴应当与辐射源法线平行,使设备入射孔径处辐射幅值均匀。

4 响应率标定不确定度

由于响应率是用来将测量的电压值直接转换成辐射照度,因此响应率的任何误差都直接影响着测量不确定度。响应率不确定度 ΔR_0 由辐射照度变化量 $\Delta E_{0\Delta\lambda}$ 引起的设备输出电压变化量 ΔV 决定:

$$\Delta R_0 = \frac{\Delta V}{\Delta E_{0\Delta\lambda}} \quad (6)$$

决定响应率要求测量设备响应的变化 ΔV 和计算传输光谱权重辐射照度的变化 $\Delta E_{0\Delta\lambda}$:

$$\Delta E_{\Delta\lambda} = E_{\Delta\lambda}^{T_2} - E_{\Delta\lambda}^{T_1} \quad (7)$$

式中, T_1 和 T_2 为黑体辐射源的温度。

可将式(2)~式(5)代入式(7)计算。

设备标定时,将设备看作一个黑匣子进行处理。而在分析设备标定不确定度时,需要真正理解设备测量原理。通过分析可知,影响响应率组合标准不确定度的因素有:源幅度不确定度的百分比 $\text{Lamp Bias}(\%)$;源到传感器距离和不确定度 R, dR ;标定源面积和不确定度 A_s, dA_s ;设备系统光谱响应和不确定度 S, dS ;中性滤光片传输和不确定度 $f_{\text{ND}}, df_{\text{ND}}$;大气传输和不确定度 Tr, dTr ;电压测量和不确定度 $\Delta V, d\Delta V$;与图像像素效果相关的部分不确定度 dP 。则响应率组合标准不确定度为:

$$\frac{dR_0}{R_0} = \sqrt{\left(\frac{\text{lambd bias } 0}{100}\right)^2 + \left(\frac{2dR}{R}\right)^2 + \left(\frac{2A_s}{A_s}\right)^2 + \left(\frac{dS}{S}\right)^2 + \left(\frac{df_{ND}}{f_{ND}}\right)^2 + \left(\frac{dT_r}{T_r}\right)^2 + \left(\frac{d\Delta V}{\Delta V}\right)^2 + (dP)^2} \quad (8)$$

通过上述分析可见,要提高设备响应率标定不确定度,可采用如下措施:

a) 提高黑体辐射源的温度稳定度和读出值的不确定度。

b) 延长设备与黑体辐射源间的标定距离。

c) 提高设备输出值的量化标准(分辨率)。

d) 控制室内标定环境,提高透过率计算的不确定性。

e) 提高设备中性滤光片的标定不确定度。在光强的影响、入射角的影响和光强测量分辨率的影响上提高滤光片传输率标定不确定度。另外,滤光片加装在光学系统入射孔径处时,接收的是法线方向的入射光;而滤光片加装在光学系统内部光锥上时,接收的是偏离法线方向的有一定入射角的光线,其光谱传输率是不同的,因而影响系统的光谱响应函数 $S(\lambda)$ 。

f) 在辐射强度/照度标定前,要进行设备的指向不确定度标定、设备视场响应标定和频率响应与带宽标定,并将设备视轴与黑体辐射轴重合,确保点源黑体在探测器适当位置处成像。

5 噪声等效辐射量标定

5.1 噪声等效辐射量含意

对于辐射计来讲,设备的噪声等效辐射照度(NEI,单位 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)是设备灵敏度的测量标志;对于光谱仪来讲,灵敏度是波长的函数,用设备的噪声等效光谱辐射照度(NESI,单位 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)表示;对于热像仪来讲,习惯于使用噪声等效温差(NETD,单位 mK)来评价灵敏度,其值最好在 $20 \sim 50\text{mK}$ 之间,意思是表面温度变化在 $20 \sim 50\text{mK}$ 内就可探测,而不关心特性测量的绝对辐射值。为了与辐射计和光谱仪的测量数据进行对比,需要对热像仪灵敏度参数 NEI 进行标定,NEI 必须在与源响应相同的像素上计算。需要注意的是热像仪灵敏度计算的特有方面是未经修正的空间非均匀性比单独像素的时间(逐帧的)变化更决定噪声。

设备噪声等效辐射量与设备调制频率、带宽、视场、光谱响应、测量环境等诸多因素相关。因此,标定时获得的 NEI 值并不代表设备试验时真实的灵敏度值。对于辐射特性的定量测量,要求数据必须有良好的可信度和保真度,测量必须在系统线性范

围内、信噪比大于 20 的条件下进行。

5.2 噪声等效辐射量标定方法

噪声等效辐射量的测量方法如下:

a) 正确设置设备参数值和标定环境参数值。标定设备噪声等效辐射量时,首先要注明标定条件,最好的方法也是测量时如何设置设备参数,标定时也同样设置;测量时环境条件如何,标定时也要在模拟预期的环境条件下进行。

b) 测量设备噪声均方根值。将设备镜头盖盖上以阻止背景辐射,测量设备噪声曲线,并用下式计算设备噪声均方根值 RMS:

$$V_{\text{RMS}}(\text{noise}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2} \quad (9)$$

式中, S_i , $\bar{S}$ 分别是测量噪声信号采样值和平均值; N 为采样次数。

c) 测量并计算 NEI 值。在设备线性范围内选择两个辐射强度/照度点 I_1 和 I_2 或 E_1 和 E_2 , 测量设备输出响应 V_1 和 V_2 。用下式计算噪声等效辐射强度 NEI:

$$\text{MEI} = \frac{I_1 - I_2}{V_1 - V_2} \cdot V_{\text{RMS}}(\text{noise}) / \sqrt{\text{Hz}} \quad (10)$$

式中, Hz 是设备带宽。

6 结束语

辐射测量设备响应率、线性率和噪声等效辐射量的标定是辐射特性定量测量的前提。规范的测量方法、设备标定方法是测量数据可信性、交换性的基础。本文将目标特性测量简化为点目标辐射强度和面目标辐射量度测量。根据标定与测量一致性要求,将设备响应率和线性率标定分为点目标辐射强度和面目标辐射亮度的标定,对标定方法、条件、注意事项和标定不确定度进行了分析,并对设备噪声等效辐射量的含意及标定方法进行了论述。本文对辐射特性的测量与研究具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 吴宗凡,等. 红外与微光技术[M]. 北京:国防工业出版社,1998,6.
- [2] Gerald C Holst. 红外成像系统测试和评价[M]. 刘兴运,译. 北京:中国电子科技集团公司第十一研究所,2006.
- [3] 石顺祥,张海兴. 物理光学与应用光学[M]. 西安:西安电子科技大学,1998,5.