

琼斯法定标用双波段红外辐射计的研制和校准

张 钊^{1,2} 万 志¹ 孙景旭¹ 刘则洵¹ 任建伟¹ 任建岳¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 目前野外工作大口径双波段红外经纬仪的外场辐射定标装置普遍采用大面积均匀扩展辐射源,该方法需要两套定标设备,功耗高、便携性能差、研制难度大。为解决这一问题,分析比较了不同定标方法的原理、过程及技术性能,得出琼斯法是对野外环境下工作的大口径红外经纬仪进行辐射定标最佳方案的结论。为此研制了双波段红外辐射计,该辐射计由黑体照明光管和参考辐射计两部分组成,采用牛顿式望远系统及中继光路系统,选用InGaAs和PbSe两款红外探测器分别接收短波红外和中波红外辐射信号,可对短波和中波双波段进行辐射定标。讨论了校准参考辐射计对保证红外经纬仪最终测量精度的必要性,并给出参考辐射计在短波和中波不同的校准方法和校准结果。对校准该辐射计的不确定度进行了分析,短波和中波校准不确定度分别为4.12%和2.35%。

关键词 光学器件; 辐射定标; 琼斯法; 红外经纬仪; 红外辐射计

中图分类号 O432 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.0623002

Development and Calibration of Dual-Waveband Infrared Radiometer for Jones Calibration Method

Zhang Zhao^{1,2} Wan Zhi¹ Sun Jingxu¹ Liu Zexun¹ Ren Jianwei¹ Ren Jianyue¹

¹Chuangchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract At present, we typically use large extended radiation source as radiometric calibration device for the out-field work of large aperture dual-waveband infrared theodolite system. This method needs two sets of equipments, which exists the disadvantages of high power consume, inconvenient portable performance and difficult to develop. To solve this problem, the principles, processes and technical performances of different calibration methods are analyzed. Then the Jones method is selected as large aperture infrared theodolite out-field work environment radiometric calibration method. The dual-band infrared radiometer is developed, which consists of two parts, blackbody lighting tube and reference radiometer. The radiometer uses Newton structure as telescopic system and relay optical path system, and selects InGaAs and PbSe as double-band infrared detectors to calibrate short wave infrared radiation (SWIR) and radiation middle wave infrared (MWIR) respectively. Then the necessity of the reference radiometer calibration to ensure the infrared theodolite final measuring precision is discussed, and different calibration methods and results for calibrating reference radiometer in SWIR and MWIR are presented. Finally, the calibration uncertainty of the radiometer is analyzed, the SWIR and MWIR calibration uncertainties are 4.12% and 2.35% respectively.

Key words optical devices; radiometric calibration; Jones method; infrared theodolite system; infrared radiometer

OCIS codes 230.1980; 150.1488; 110.3080

1 引 言

随着红外探测技术迅速发展,红外成像系统在军事上得到广泛应用。目标辐射特性测量是信息化装备体系建设中的重要研究内容。目前美国和以色列在辐射特性测量技术的研究方面最为领先。建立目标红外

收稿日期: 2015-12-28; **收到修改稿日期:** 2016-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(61405191)

作者简介: 张 钊(1989—),男,博士研究生,主要从事红外辐射定标方面的研究。E-mail: 250627410@qq.com

导师简介: 任建岳(1952—),研究员,博士生导师,主要从事光学仪器设计方面的研究。E-mail: Renjw@ciomp.ac.cn

辐射特性测量模型,并通过现场辐射测量实验对模型进行实验及修正,这是获得目标真实辐射特性最直接的手段,也是目前唯一可用手段。20世纪60年代,美国开始进行飞机在短波(1~3 μm)和中波(3~5 μm)红外波段的辐射特性测量研究^[1]。与国外相比,由于红外器件技术限制,我国目标红外辐射特性测量技术在理论和实验基础方面都相对薄弱,红外辐射特性测量的现场实验在近些年才广泛开展。目前已研制多台地基红外辐射特性测量设备(即红外经纬仪),获取包括可见到长波红外的宽波段飞行目标图像。但国内红外辐射特性测量技术研究起步较晚,在红外系统可靠性、目标辐射测量精度、测量结果一致性以及红外辐射反演精度验证等方面与国外还有较大差距。利用红外成像系统进行目标辐射特性测量前必须对其进行绝对辐射定标。辐射定标精度直接决定最终目标辐射特性的测量精度,因此研究红外经纬仪的辐射定标具有非常重要的意义,而且大口径红外经纬仪的辐射定标工作更为艰巨^[2-6]。

基于上述分析,针对大口径红外经纬仪的辐射定标方法研究和装置研制显得尤为关键,红外定标装置可以对红外经纬仪进行现场辐射定标任务,建立红外经纬仪输出与目标辐射亮度之间的关系,保证红外辐射定标准确性,从而保证红外经纬仪图像数据反演辐射和目标辐射特性的准确度^[7]。同时,随着工作时间的增长,红外经纬仪会受空间环境影响,经纬仪响应度会发生变化,红外辐射定标装置可以对红外经纬仪进行辐射定标保证测量精度。

现有工作环境为野外,口径680 mm,工作谱段1.315 μm (短波红外)及3.6~4.2 μm (中波红外),遮拦比为1:10的双波段大口径红外经纬仪,由于受工作环境(野外)、空间、功耗及研制成本等诸多条件的限制,研制难度增大。据此,本文首先讨论了两种现场辐射定标方法,针对不同方法对定标装置的工作原理、定标过程以及主要技术性能进行了研究与讨论,根据现场实际情况结合定标方法分析讨论得到琼斯法为适用于本红外经纬仪的定标方法,然后介绍了新设计的双波段红外辐射计的光机结构,接着分析了红外辐射计定标对于保证最终红外经纬仪测量精度的必要性,并介绍了辐射计的辐射定标方法、过程及结果,最后分析讨论辐射定标的测量精度。

2 辐射定标原理与方法

红外经纬仪系统辐射定标是光学定量辐射测量研制计划中的一项重要内容。由于受到现场定标环境、气象条件等因素的影响,红外经纬仪的响应特性也要相应地发生变化,因此除了开展经纬仪使用前测量仪器的精细实验室辐射定标之外,还必须为其配备现场辐射定标设备。由于大口径(680 mm)红外经纬仪主系统工作波段为短波红外和中波红外波段,双工作波段范围和大口径均为辐射定标带来较大难度,为此需要专门研制双波段红外辐射计对大口径红外经纬仪进行现场辐射定标任务。

2.1 现场辐射定标原理

红外辐射计定标的首要任务是在进入辐射计的辐射通量和辐射计输出值(电压或数字化信号)之间建立定量关系。辐射传输物理模型见图1。

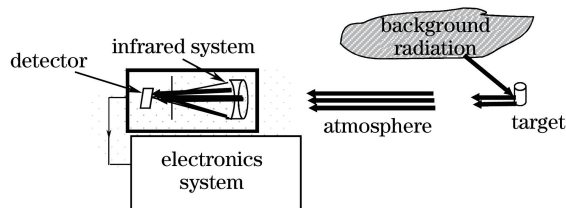


图1 目标和背景辐射模型

Fig. 1 Target and background radiation model

现场辐射定标任务为:

- 1) 扣除现场环境,如温度、大气等因素对仪器输出的影响;
- 2) 标定出红外经纬仪系统总响应特性随时间变化量。

2.2 辐射定标方法讨论

目前大口径红外经纬仪系统的现场辐射定标主要有两种方法,分别为扩展辐射源法和琼斯法,辐射测量

模型分别如下。

2.2.1 扩展辐射源法

扩展辐射源法(ENS)也称近距离大面源法,采用的辐射源辐射亮度 L 为已知量,表面出射辐射具有良好的余弦特性和均匀性,同时要求扩展辐射源充满红外经纬仪孔径和视场,实现全孔径全视场定标^[8],扩展辐射源法模型原理见图 2。

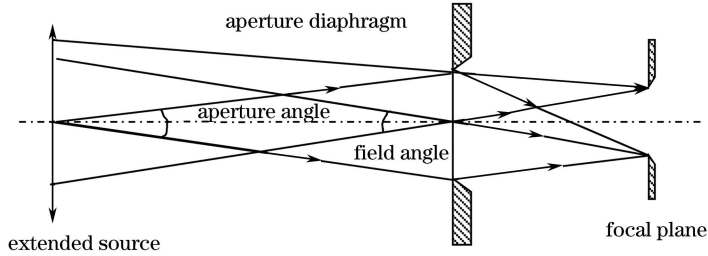


图 2 扩展辐射源定标原理图

Fig. 2 Principle diagram of ENS calibration

当经纬仪作为辐射亮度测量系统时,入射辐射亮度 L 与信号输出 V 之间的关系可表示为

$$L(\lambda) = a + bV(\lambda) + cV^2(\lambda) + \dots + xV^n(\lambda), \quad (1)$$

式中 λ 表示定标波长, a, b, c, \dots, x 是与暗信号、光学系统透射比、系统响应度相关的系数。

当经纬仪作为点源的辐射通量测量系统时,入瞳处辐射照度 E 与辐射源辐射亮度 L 之间的变换关系为

$$E = \frac{A_D}{f^2} \times L, \quad (2)$$

式中, f 为光学系统的焦距, A_D 为像面的有效面积,对于红外探测器该数值等于单个探测器像元面积。该方法缺点在于大面积黑体辐射源体积大、均匀性较差,功耗高导致其在野外工作时供电(柴油发电)难度较大,同时该辐射源工作温度范围窄(常温到 350 °C)并具有一定的研制风险。在短波红外谱段的辐射出射度低,若采用该方法则需要配备另一套短波红外扩展辐射源。

2.2.2 琼斯法

琼斯法(Jones method)也称近距离小光源法,是将标定光源放在红外经纬仪光学系统的入瞳附近,而标定光源的尺寸要比红外经纬仪的入瞳口径小得多。为在经纬仪最终探测器上得到均匀的辐射照度,需要将标定光源放在如图 3 所示的阴影线区域之内^[9-10]。

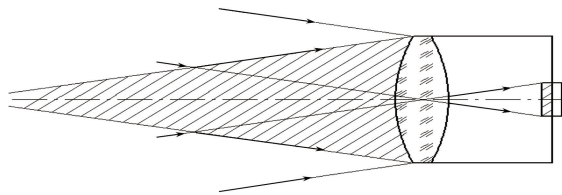


图 3 琼斯法照明原理图

Fig. 3 Jones method lighting principle diagram

如果标定光源从对应红外经纬仪半视场角为 θ 的立体角内发出的辐射能恰都被探测器接收,则进入红外经纬仪的辐射通量为

$$\varphi = LA_c \Omega = LA_c \frac{A_s}{f^2}, \quad (3)$$

式中, L 和 A_c 分别是标定光源的辐射亮度和有效发光面积; $\Omega = A_s / f^2$ (A_s 是探测器的面积; f 是红外经纬仪的焦距)。如果将标定光源等效为一个辐射亮度为 L_s 扩展面光源,使红外经纬仪同样接收辐射通量为 φ 的光能,则

$$\varphi = L_s A_p \Omega = L_s A_p \frac{A_s}{f^2}, \quad (4)$$

式中, A_p 是红外经纬仪的入瞳面积。将辐射亮度为 L 的近距离小光源看成辐射亮度为 L_s 的近距离面光源, 则对应的辐射亮度由(3)式和(4)式得到

$$L_s = L \frac{A_c}{A_p}. \quad (5)$$

由于 $A_c < A_p$, 故 $L > L_s$ 。即小光源被看作是辐射亮度减弱了 A_p/A_c 倍的面光源。大面积黑体辐射源虽然可以充满经纬仪口径和视场, 但其工作温度相对较低, 而琼斯法可以利用温度高的腔型黑体作为光源, 根据(5)式可知在光源面积减小, 而光源的辐射亮度与之成反比时, 琼斯法和扩展辐射源法在探测器接收均匀且辐照度相等的情况下是等效的。在现场若用扩展辐射源法, 照度响应度 R_E 为

$$R_E = \frac{D - D_B}{L_1} \times \frac{f^2}{A_D}, \quad (6)$$

式中, f 为系统的焦距; A_D 为红外探测器元的有效面积; D_B 为现场测量得到的经纬仪的暗场数码输出。由于经纬仪入瞳直径大于琼斯法光源出瞳直径且考虑经纬仪遮拦比的影响, 主系统实际照度响应度 R_{SYS} 为

$$R_{SYS} = R_E \times \frac{A_O}{A_S} (1 - M^2) = \frac{D - D_B}{B_\lambda} \times \frac{f^2}{A_D} \times \frac{A_O}{A_S} (1 - M^2), \quad (7)$$

式中, A_O 为主光学系统的口径面积(直径 0.678 m); A_S 为琼斯法光源有效出射面积; M 为大口径红外经纬仪光学系统的遮拦比。(7)式表明, 只要标定出琼斯法照明光源的辐射亮度和主系统的数码输出则可标定出经纬仪主系统响应度。

综合外场实际条件, 经纬仪工作波段要求同时覆盖短波红外和中波红外, 若利用扩展辐射源法必须配备大面积黑体和大口径短波定标光源, 即两套辐射源才能满足辐射源充满大口径双波段经纬仪入瞳的要求, 短波和中波扩展辐射源体积大、对均匀性要求高、研制成本高, 同时野外工作(柴油发电)需要考虑设备功耗, 根据上述分析本课题组选用琼斯法定标大口径红外经纬仪。

3 双波段红外辐射计研制

大口径红外经纬仪系统的辐射定标工作直接决定主系统测量精度与使用效果^[11]。由于经纬仪工作波段覆盖短波红外与中波红外的宽谱段范围, 而工作环境为野外需要考虑便携性, 为此新研制了一种琼斯法定标用双波段红外辐射计, 该辐射计采用牛顿式结构望远系统及中继光路系统, 探测器采用 InGaAs(1.315 μm 波段)和 PbSe(3.6~4.2 μm 波段), 两款分为别为短波红外和中波红外探测器, 红外辐射计是由“黑体照明管”和“参考标准辐射计”两个组件构成(见图 4)。在现场定标红外经纬仪时, 将黑体照明管和参考标准辐射计组合在一起, 根据参考标准辐射计的输出可以定标出黑体照明管的辐射亮度。当标定红外经纬仪主系统时, 将黑体照明管对准光路, 可对红外经纬仪主系统定标。

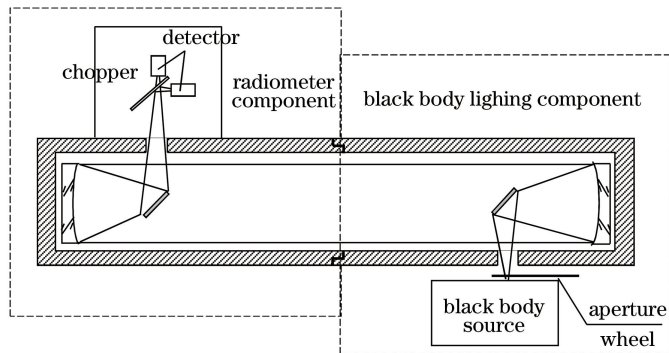


图 4 辐射定标装置结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of radiation calibration device

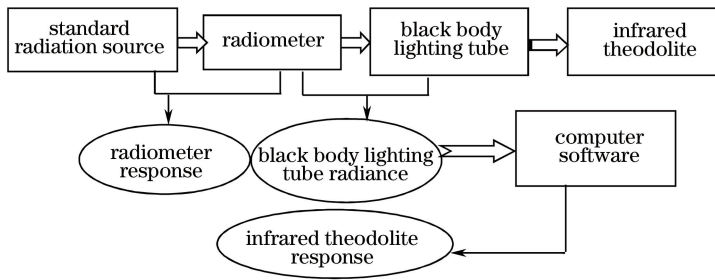


图 5 琼斯法现场辐射定标流程图

Fig. 5 Flow chart of Jones method on-site radiation calibration

采用琼斯法为现场辐射定标全过程流程图见图 5。辐射定标时,首先由“参考标准辐射计”定标“黑体照明管”的出射辐射亮度(L),然后将黑体照明管对准大口径红外经纬仪主系统主镜,标定主系统对黑体照明管下图像的数码输出,由(7)式分析可知,只要标定出琼斯法照明光源的辐射亮度和主系统的数码输出则可标定经纬仪主系统响应度。

3.1 黑体照明管设计

在辐射定标过程中,定标辐射源设计对最终定标结果的可靠性起至关重要的作用。黑体照明光管部件的作用是将黑体辐射光源出射的辐射进行准直和扩束,该光束经过红外经纬仪光学系统成像后,在红外经纬仪探测器上形成照度均匀的光斑。因此在光管光学结构设计上采用牛顿式光学系统,构成物方远距离扩展源照明模式的辐射照明光源,为主系统提供一个低空间频率且具有一定发散角的照明光束。黑体照明管主要是由腔型黑体辐射源和照明光管两个部件构成(黑体照明管实物见图 6),其主要技术指标为:出瞳直径 100 mm;焦距 400 mm;遮拦比 1/3。在现场对红外经纬仪进行辐射定标时,黑体照明管作为辐射定标琼斯法中定标光源,放置在经纬仪主系统入瞳附近。



图 6 黑体照明光管实物图

Fig. 6 Picture of black body lighting tube

黑体照明光管的稳定性检测:在中波,温度 $T = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ 时,4 h 内黑体照明管的稳定性检测曲线中信号抖动量的均方根值为 1.2%,没有明显的变化趋势。黑体照明光管的均匀性测试结果见图 7,曲线中,+为实

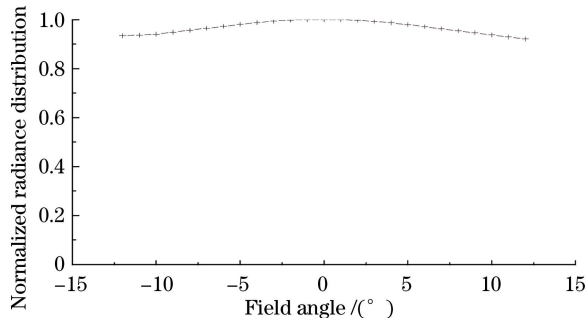


图 7 黑体照明管光斑均匀性实测曲线

Fig. 7 Uniformity test curve of black body lighting tube

际测量数据,连接线为拟合结果。实测曲线可分析出:在任意的一个 $\pm 10^\circ$ 视场内,光斑最大非均匀性小于4.2%,取中间视场非均匀性小于2%。

3.2 参考标准辐射计设计

根据(7)式分析可知对辐射源亮度的测量决定整个红外经纬仪辐射定标测量精度,为此设计参考辐射计测量定标光源辐射亮度,该辐射计包括与黑体照明管共轭的反射式光学系统、精密调制扇和双通道红外探测器等(图8)。其主要技术指标为:有效入瞳直径100 mm;相对口径1/4;焦距400 mm;遮拦比1/4;前置成像系统为反射式牛顿系统,其将黑体照明管发出的光束经二次成像系统收集到红外探测器上,该系统是一个辐射亮度测量系统。在结构上,将精密调制扇置于牛顿式光学系统主镜反射后焦平面位置可获得最佳调制效果。将InGaAs探测器和PbSe探测器双向摆放,通过平面反射的摆动镜实现短波、中波红外波段辐射测量。调制后的输出信号经前置放大器和锁相放大器解调,得到高信噪比输出信号。当参考辐射计与黑体照明管组合在一起时则可以标定出黑体辐射源的辐射亮度值,提供利用琼斯法辐射定标的光源辐射亮度值。

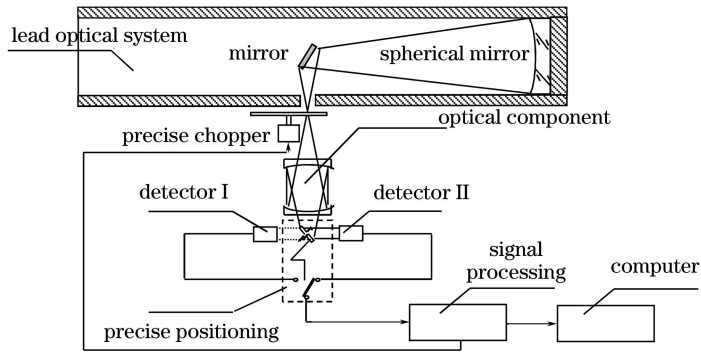


图8 参考标准辐射计构成示意图

Fig. 8 Structure diagram of reference radiometer

3.3 电子学系统设计

电子学系统包括黑体照明光管的温度控制、驱动等电路和参考辐射计探测器信号处理电路以及数据采集电路。辐射计电子学信号处理电路具有80 dB动态范围,同时要有抑制噪声的能力。为此设计中除了在中波红外波段采用探测器制冷措施外,在处理电路中还采用低噪声前置放大器和具有同步积分环节的锁定放大器,被调制($f_s=600$ Hz)的辐射通过探测器转换为电信号,经前置放大、带通滤波(品质因数 $Q=50$)、同步积分器、交流放大器、同步检波积分器解调后,可获得高信噪比的输出模拟信号,该信号经过模/数转换成为数字信号,在单片机的控制下,通过422串行口向主机传送数据,可以有效地抑制噪声。由于采用同步积分的锁定放大器,因此增加了动态储备、降低了直流漂移、提高了信噪比。

4 双波段红外辐射计校准

根据上文分析,在琼斯法定标经纬仪过程中,黑体照明管起到辐射定标光源作用,在现场利用双波段参考辐射计测量黑体照明管辐射亮度,最后传递到红外经纬仪主系统,因此定标光源的辐射亮度测量精度直接决定最终辐射定标精度,进而决定红外经纬仪主系统测量精度。因此研制阶段需要对参考辐射计进行绝对辐射校准以保证辐射计在现场对红外经纬仪的定标精度。由于辐射计具有双波段探测器,因此需要分别进行短波红外和中波红外绝对辐射校准工作,保证最终的定标精度^[12-13]。

4.1 短波红外波段校准方法

积分球作为辐射光源在短波红外($\lambda=1.315 \mu\text{m}$)处具有较高的辐射通量,大口径积分球在开口中心处相比于小口径积分球具有更高的均匀性和余弦辐射特性。同时由于积分球直径越大,可配置越多的亮度等级,校准工作越精确,因此利用大口径积分球结合HR-1024地物光谱辐射亮度计对短波红外波段探测器进行绝对辐射校准。定标积分球输出辐照亮度的测量精度直接决定辐射计的校准精度,为了降低标准传递的不确定度,可应用美国国家标准协会(NIST)标准辐照度灯和Labsphere公司生产的标准白板。传递过程为

先将标准灯和标准白板放置在光学导轨上,调节两者中心等高。将光谱辐射亮度计侧向对准白板中心放置,保证漫反射光能够充满光谱辐射亮度计的视场。依次改变标准灯和白板之间的距离,根据白板上的光谱辐射亮度以及对应的光谱辐射亮度计的输出即可标定出光谱辐射亮度计在不同波长位置的光谱响应度。然后将定标好的 HR-1024 光谱辐射计与新设计的辐射计同时对准大口径积分球同一位置(开口直径 1 m)。短波红外校准传递过程见图 9。打开积分球电源,在每一个亮度等级下同时采集辐射计短波红外探测器输出数值和 HR-1024 光谱数据,获得校准亮度数据,数据见表 1。

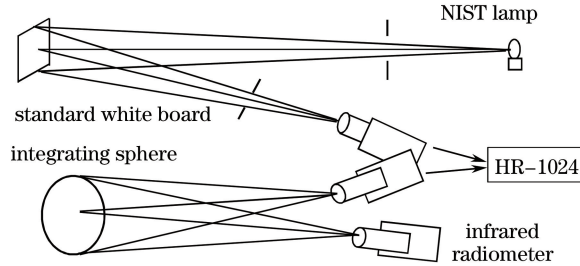


图 9 短波红外校准传递示意图

Fig. 9 Short wave infrared calibration transfer diagram

表 1 校准参考辐射计的光谱辐射亮度响应度的数据

Table 1 Spectral radiance intensity response data of reference radiometer

Radiance points	Output of reference radiometer	Spectral radiance of integrating sphere source	
		$L_{1.315}/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	
L1	1883.2	525.78	
L2	1713.7	465.70	
L3	1410.3	343.67	
L4	1255.9	283.61	
L5	1105.3	223.89	
L6	965.5	169.41	
L7	814.7	109.87	
L8	710	68.48	
L9	588.7	21.39	
L10	533.2	0.00	

根据表 1,将 HR-1024 地物光谱辐射计获得的光谱数据与参考辐射计短波数据在所有有效亮度点下进行拟合计算,最后得到线性回归方程(曲线见图 10)。

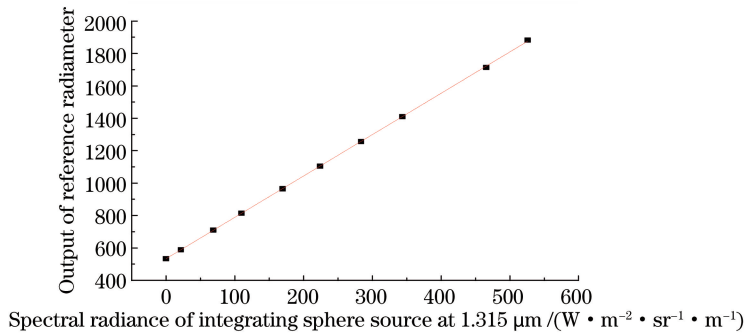


图 10 参考辐射计短波红外响应关系曲线

Fig.10 Short wave infrared response curve of reference radiometer

根据该回归方程表示的数码输出值与对应的光谱辐射亮度 $L_{1.315}$ 的关系为

$$D = 533.69 + 2.55159 \times L \tag{8}$$

从而,得到参考辐射计短波红外探测器光谱辐射亮度响应度为

$$R_{B-1.315} = \frac{\Delta D}{\Delta L_{1.315}} = 2.55159 / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}). \quad (9)$$

4.2 中波红外波段校准方法

由于积分球在中波红外谱段辐射能量较低,而黑体在中波红外谱段具有较高的辐射出射度,满足辐射校准要求,但是大面源黑体无法进行高温段标定(常温~350 °C),使得校准光源能量输出不能满足新设计辐射计的动态范围要求,腔型黑体可以作为高温段辐射定标源,但腔型黑体面源面积相对较小不能充满辐射计孔径,因此利用进口大面源黑体辐射源和高温腔型黑体进行中波红外辐射校准,本文选用美国 ISDC 公司的 IR-160 的大面积黑体辐射源和该公司的 IR-563 腔型黑体。首先由腔型高温黑体辐射源定标出高温段相对响应数据,再根据大面积黑体进行低温段辐射校准时获得的几何响应因子对其进行绝对值的修正,进而获得高温黑体辐射源照明下的数据,中波校准传递过程见图 11。

- 1) 首先将 IR-160 置于参考辐射计前,根据普朗克黑体辐射公式计算得到的辐射源的光谱辐射亮度和参考辐射计的输出,得到参考辐射计低温段绝对响应度。
- 2) 将 IR-563 放置在参考辐射计前,根据普朗克黑体辐射公式计算得到的辐射源的光谱辐射亮度和参考辐射计的输出,得出参考辐射计高温段的响应度。
- 3) 利用 IR-160 标定出的低温段几何响应因子对 IR-563 定标得到的高温段响应度校正,最终得到参考辐射计高温段的绝对响应度。

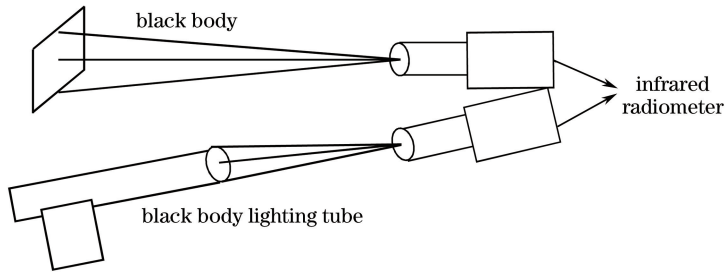


图 11 中波红外校准传递示意图

Fig. 11 Middle wave infrared calibration transfer diagram

表 2 校准参考辐射计积分辐射亮度响应度数据

Table 2 Middle wave infrared spectral radiance intensity response data of reference radiometer

Black body temperature / °C	Output of reference radiometer	Integral radiance $L / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$
335	480	133.57
350	549	154.63
400	912	240.45
450	1398	352.09
500	2023	491.23
550	2854	658.78
600	3816	855.09
650	5031	1079.98
700	6396	1332.90
750	7868	1613.04
800	9573	1919.39
850	11440	2250.80
900	13361	2606.07
950	15149	2983.97
1000	17569	3383.24
1030	18799	3632.57
1040	19138	3717.25

根据过程 1)~3),将表 2 中的校准数据计算得到线性回归方程(曲线见图 12)。

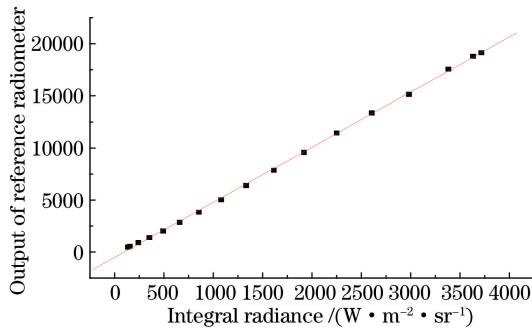


图 12 参考辐射计中波红外响应关系曲线

Fig. 12 Middle wave infrared response curve of reference radiometer

根据表 2 通过线性拟合(见图 12),得到参考辐射计在 $3.6\sim 4.2\ \mu\text{m}$ 积分辐射亮度响应度关系

$$D = -496.2143 + 5.28339 \times L, \quad (10)$$

式中,响应度为

$$R_B = \frac{\Delta D}{\Delta B} \approx 5.28\ (\text{W}/\text{m}^2)^{-1}, \quad (11)$$

5 校准精度分析

5.1 短波红外定标误差

短波校准方法是一种成熟的传递过程,其不确定度主要来源及相对不确定度如表 3 所示。

表 3 辐射量值标准传递过程不确定度来源与相对不确定度

Table 3 Source of uncertainty and relative uncertainty in radiation quantity delivery

Source of uncertainty	Relative uncertainty /%
Uncertainty of NIST standard lamp at 350~2500 nm (contains power stability)	1.22
Uncertainty of standard whiteboard bidirectional reflectance	2.00
Stray light	0.30
Uncertainty of the distance between whiteboard and standard lamp	1.00
Uncertainty of spectral radiometer output	2.16
Uncertainty of integrating sphere	2.18
Combined uncertainty	4.00

标准灯不确定度由 NIST 开具的标定证书给出,使用标准灯进行标定时需对实验室的温度和湿度进行调节,并采用高稳定度直流电源供电和高位数字电压表监控标准灯的状态,在 $350\sim 2100\ \text{nm}$ 光谱范围内相对不确定度小于 1.22%。

标准传递所采用的聚四氟乙烯漫反射板(即标准白板)具有良好的余弦特性,反射率接近于 1,其 $0.4\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 光谱区域内的光谱反射率由 Labsphere 公司提供,相对不确定度约为 2.0%。

经验表明,杂散光是不可忽略的定标误差来源。为了尽可能地减小杂散光干扰,在测试系统周围铺置黑绒布以减小反射,光学平台上的所有仪器进行表面染黑处理,将杂散光影响减小到约 0.3%。

光学导轨采用同步带传动,并通过磁栅进行位置反馈,其定位精度优于 $0.5\ \text{mm}$,将标准灯和白板之间距离不准产生的不确定度控制在 1.0% 以内。

采用美国 SVC-HR-1024 地物光谱辐射计,标定记录溯源 NIST 辐射校准,在 $350\sim 2500\ \text{nm}$ 范围内光谱辐射亮度计量不确定度优于 2.56%。在进行标准传递和监视之前,采用 NIST 标准灯和标准白板再次进行标定。

定标积分球的不确定度主要包括积分球光源辐射输出不稳定度(0.5%)、非均匀性(1.5%)以及非余弦误差(1.5%)引入的不确定度,标定实验前对积分球的稳定性以及非均匀性进行了测试,总的不确定度为 2.18%。

短波红外波段标准传递过程的合成不确定度为 4.00%。此外探测器噪声影响探测器输出不确定度。实

验中采用多帧(至少 100 frame)数据并取平均的方法降低随机噪声影响,前期测试表明,辐射校准过程中探测器输出信噪比约为 80~400(具体信噪比与入瞳辐射亮度成正比),平均信噪比大于 100,因此取不确定度为 1%。探测器响应线性度也影响辐射校准精确度,前期测试表明短波红外探测器响应非线性度约为 0.1%。综合上述因素,短波红外绝对辐射校准不确定度为 4.12%。如表 4 所示。

表 4 绝对辐射校准不确定度来源与不确定度

Table 4 Source of uncertainty and that in absolute radiation calibration

Source of uncertainty	Relative uncertainty / %
Radiation standard uncertainty	4.00
Uncertainty of detector response	1.00
Nonlinearity of detector	0.10
Combined uncertainty	4.12

5.2 中波红外定标误差

中波红外定标($\lambda=3.6\sim 4.2\ \mu\text{m}$)采用美国进口大面积黑体辐射源 IR-160 和高温腔型黑体 IR-563,该黑体标定记录都溯源于国防科工一级计量站校准,且开具标定证书。中波辐射校准不确定度如表 5 所示。

表 5 中波红外校准不确定度来源与不确定度

Table 5 Source of uncertainty and that in middlewave infrared calibration

Source of uncertainty	Relative uncertainty / %
Temperature stability of IR-160	0.05 (4 h)
Non-uniformity of IR-160	1.12
Non lambert of IR-160	1.16
Temperature uncertainty of IR-160	1.20
Emissivity deviation of IR-160	1.1
Uncertainty of detector response	0.5
Nonlinearity of detector	0.10
Combined uncertainty	2.35

IR-160 黑体的不确定度主要来源于黑体温度的不稳定性,黑体的非均匀性和非余弦特性。黑体辐射源的光谱辐射出射度误差,根据实际测试,IR-160 的黑体的温度不稳定性为 0.05%,非均匀性为 1.12%,非余弦特性 1.16%。IR-160 的温度不确定性和发射率偏差均由国防科工一级计量站给出,分别为 1.2%和 1.1%。由于高温段响应是从 IR-160 在低温段得到的几何因子校正得出,因此不影响中波校准不确定度。

探测器噪声影响探测器输出不确定度,测试方法与短波测试方法相同,不确定度为 0.5%。探测器响应线性度也影响辐射校准精确度,前期测试表明中波红外探测器响应非线性度约为 0.1%。综合上述因素,中波红外绝对辐射校准不确定度为 2.35%。

6 结 论

为对大口径双波段红外经纬仪进行外场辐射定标任务,结合现场定标实验条件利用琼斯法建立辐射定标模型,根据琼斯法定标模型专门设计了双波段红外辐射计,介绍该辐射计的结构设计和电子学设计。讨论了校准辐射计对最终经纬仪测量精度的重要意义,给出短波红外辐射量值标准传递方法和中波红外波段大面积黑体结合腔型黑体的校准方法,并给出校准结果,最后分别对短波红外和中波红外进行辐射校准不确定度分析,短波谱段校准不确定度为 4.12%,中波谱段校准不确定度为 2.35%。目前该辐射计已投入实际使用,用一套琼斯法定标设备替代了两套扩展辐射源法定标设备,减小了现场定标设备的复杂程度,定标后的红外经纬仪在红外辐射特性测量任务中取得良好的应用效果,保证了经纬仪的测量效果。

参 考 文 献

- 1 Chang Songtao. Research on Infrared theodolite design and key technologies to improve the radiometry precision [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
常松涛. 红外经纬仪结构设计及提高其辐射测量精度的关键技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理

研究所, 2015.

- 2 Liu Junchi, Li Hongwen, Wang Jianli, *et al.*. Fastradiance calibration for ground-based large-aperture infrared opto-electric equipment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0301003.
刘俊池, 李洪文, 王建立, 等. 地基大口径红外光电设备快速辐射定标[J]. *光学学报*, 2015, 35(3): 0301003.
- 3 Li Ning, Yang Ciyin, Cao Lihua, *et al.*. Radiance calibration for 3~5 μm infrared focal plane array[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2319-2325.
李 宁, 杨词银, 曹立华, 等. 3~5 μm 红外焦平面阵列的辐射定标[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(10): 2319-2325.
- 4 Li Ning, Zhang Yunfeng, Liu Chunxiang, *et al.*. Calibration of 1 m aperture infrared theodolite[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2054-2060.
李 宁, 张云峰, 刘春香, 等. 1 m 口径红外测量系统的辐射定标[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(8): 2054-2060.
- 5 Liu Yingqi, Liu Xiangyi. Research on technology of ground-based infrared radiation feature measurement for space target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0512003.
刘莹奇, 刘祥意. 空间目标的地基红外辐射特性测量技术研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0512003.
- 6 Zhang Yanna, Zheng Xiaobing, Li Jianjun, *et al.*. Research on system level calibration method of muliti-band filter radiometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0812004.
张艳娜, 郑小兵, 李建军, 等. 多波段滤光片辐亮度计的系统级定标方法研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0812004.
- 7 Yang Ciyin, Cao Lihua, Zhang Jianping, *et al.*. Measurement of infrared radiation for target airplane based on real-timeatmospheric correction[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1751-1759.
杨词银, 曹立华, 张建萍, 等. 基于大气实时修正的飞机辐射特性测量[J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(7): 1751-1759.
- 8 Sun Zhiyuan, Chang Songtao, Zhu Wei. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0712006.
孙志远, 常松涛, 朱 玮. 大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0712006.
- 9 Sun Jingxu, Ren Jianwei, Wan Zhi, *et al.*. Calibration source of high luminance with integrating sphere based on Jones method[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(10): 1228-1233.
孙景旭, 任建伟, 万 志, 等. 基于琼斯法的高亮度积分球定标光源[J]. *发光学报*, 2014, 35(10): 1228-1233.
- 10 Barbara G Grant. Field guide to radiometry[M]. Washington SPIE, 2011: 79-81.
- 11 Li Xiansheng, Ren Jianwei, Zhang Liguu, *et al.*. Research on a radiometric calibration device for a large aperture infrared opto-electric system on spot[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2006, 17(2): 175-178.
李宪圣, 任建伟, 张立国, 等. 大口径红外光电系统现场辐射定标装置的研制[J]. *光电子·激光*, 2006, 17(2): 175-178.
- 12 Ye Zhao, Wan Zhi, Li Xiansheng, *et al.*. Spectral calibration for the large aperture infrared radiometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 1994-1998.
叶 钊, 万 志, 李宪圣, 等. 大口径红外辐射计的光谱定标[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(7): 1994-1998.
- 13 Zhai Wenchao, Li Jianjun, Zheng Xiaobing, *et al.*. Research on method of calibration sun channels of sun radiometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412004.
翟文超, 李健军, 郑小兵, 等. 太阳辐射计直射通道实验室定标方法研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412004.