

高精度非致冷长波红外热像仪的辐射标定

张晓龙^{1,2}, 刘英¹, 孙强^{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 研究生院, 北京 100039)

摘要:为使非致冷长波红外热像仪在不同温度下保持较高的测温精度,建立了考虑探测器工作温度效应的非致冷长波红外热像仪的辐射标定模型。对非致冷长波红外热像仪进行辐射标定实验,在不同黑体温度和不同亮度增益值条件下,获得了16组图像灰度与探测器工作温度之间的函数关系,建立了目标温度的数学计算模型,并对定标结果进行了实验验证。结果表明:在25~40℃,探测器的工作温度效应可做线性化处理,且与目标温度无关。通过设定合适的亮度增益值可使红外热像仪的测温误差 <0.5 ℃,极大地提高了非致冷长波红外热像仪在不同温度环境下的测温精度。

关键词:红外热像仪;辐射标定;温度测量;非致冷

中图分类号:TN216; P407.6 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20120503.0235

Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision

ZHANG Xiao-long^{1,2}, LIU Ying¹, SUN Qiang^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

** Corresponding author, E-mail: sunq@ciomp. an. cn*

Abstract: In order to achieve the high accuracy temperature measurement for a uncooled long-wave infrared thermal imager under different ambient temperatures, the radiometric calibration model of the infrared thermal imager is established in consideration of the effect of detector operation temperature. The radiometric calibration experiment is then conducted, and sixteen functional relations between image gray levels and detector operation temperatures at different blackbody temperatures and different brightness gain values are obtained. The mathematical calculation model of target temperature is established and the calibration result is verified by experiments. The results show that the detector operation temperature effect can be treated linearly in the range from 25 °C to 40 °C, and it is independent on the target temperature. By setting an appropriate brightness

gain, the temperature measurement error of the infrared thermal imager is less than $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, which is a great improvement of the measurement accuracy of the uncooled long-wave infrared thermal imager under different ambient temperatures.

Key words: infrared thermal imager; radiometric calibration; temperature measurement; uncooling

1 引言

近年来,红外技术在军事领域和民用工程中都得到了广泛应用。非致冷红外焦平面阵列的成像系统具有体积小、重量轻、功耗低、可靠性高、成本低等优点,这极大地拓宽了它的应用范围^[1]。非致冷长波红外热像仪是一种成像装置,其利用目标与周围环境之间由于温度与发射率的差异所产生的热对比度不同来显示红外辐射能量的密度分布,所成的像被称为“热像”。非致冷凝视红外焦平面阵列(USIFPA)接收的是热辐射能量,1 000 $^{\circ}\text{C}$ 以下的物体发射的辐射能量主要集中在这一波段,因此由背景、大气和仪器本身等发射的辐射将给系统带来附加的噪声能量,从而严重影响红外成像系统的性能。另外,探测器的噪声等效温差和探测率受探测器的工作温度影响很大^[2],探测器工作温度的变化会造成很大的测温误差。为了消除这些因素的影响,使红外成像系统能精确地描绘出被观测景物的温度分布,即精确提供被观测物体的温度信息,需要对红外成像系统进行辐射定标。

随着红外热成像系统应用的迅速发展和性能的不断提高,各国在红外热成像系统辐射定标方面做了大量工作。英国国家物理实验室(NPL)是国际上最早开展低温辐射计红外辐射定标系统的研究机构之一。在国内,从 20 世纪 50 年代初开始,中国科学院仪器馆(中科院长春光学精密机械与物理研究所前身)、中科院上海技术物理研究所、中科院安徽光学精密机械研究所等单位在辐射定标上就有突出贡献。前人的工作主要集中在非致冷红外焦平面阵列(UIRFPA)的非均匀性校正^[3,4]和致冷红外焦平面阵列的定标研究上^[5],对 UIRFPA 的绝对定标以及对探测器的工作温度效应研究较少。

红外热像仪定标的任务是获得热像仪的数字

化输出和热像仪接收到的辐亮度(或者目标温度)之间的关系。若热像仪有较高的温度分辨率,则在某一增益下的量程就会较小,因此需要对不同增益下的热像仪响应进行标定。由于非致冷型红外探测器受环境温度影响严重,因此必须考虑探测器的工作温度效应。本文在热像仪探测器工作温度为 25 ~ 40 $^{\circ}\text{C}$,黑体温度分别为 31、35、40、45 $^{\circ}\text{C}$,亮度增益分别为 9 900、10 000、10 100、10 200 的情况下对非致冷型长波红外热像仪进行了标定。在不同环境温度及目标温度下通过选择不同的亮度增益,使热像仪有较高的温度分辨率,通过数据处理得到了目标温度计算公式,测温误差可控制在 0.5 $^{\circ}\text{C}$ 以内。

2 热像仪入瞳辐亮度的计算

黑体是一种理想化的辐射体,其表面的发射率为 1。黑体辐射的光谱分布由普朗克公式确定,即:

$$M_{\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}, \quad (1)$$

式中: $c_1 = 3.7415 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$, $c_2 = 1.4382 \text{ K} \cdot \text{cm}^{[6]}$, T 为黑体绝对温度。

实验中使用的红外热像仪探测器为面阵探测器,光谱响应为 8 ~ 12 μm 。采用辐亮度定标方法,在实验室内用黑体辐射源模拟热像仪工作时目标的辐亮度值 $L(\lambda)$,在红外热像仪光谱响应范围内对热像仪进行定标。首先需要计算出热像仪光学系统入瞳上的光谱辐亮度积分。

在 $\lambda_1 - \lambda_2$ 光谱区,绝对黑体的积分辐射出射度的表达式为:

$$M(\lambda_1 - \lambda_2, T) = \sigma T^4 [Z(x_2) - Z(x_1)], \quad (2)$$

式中: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$, $x_1 = \lambda_1/\lambda_m$, $x_2 = \lambda_2/\lambda_m$, $\lambda_m = (2897.8/T) \mu\text{m}$ 为辐射强度的峰值波长^[7]。黑体是朗伯辐射源,因此可以利用

如下关系获得对应温度下的光谱辐亮度:

$$L(\lambda_1 - \lambda_2) = \frac{M(\lambda_1 - \lambda_2)}{\pi}. \quad (3)$$

3 非致冷长波红外热像仪的标定

在红外热像仪辐射定标的实验过程中,有以下几方面需要注意:黑体能够提供的温度范围为环境温度到 500 °C,考虑到实验室环境温度在 30 °C 左右,选择的黑体温度的起始值略高于环境温度,最高温度为使热像仪图像饱和的温度。实验采用远距离小源法(目标未充满热像仪视场),将热像仪置于距离黑体源 2.5 m 处,调焦后,热像仪能得到黑体清晰的像,并且这个距离能确保忽略热像仪和黑体间的空气辐射影响。热像仪一般用于测量温度高于常温的目标,且环境温度通常在(23 ± 5) °C^[8];又由于探测器工作温度通常高于环境温度 3.5 ~ 5.5 °C,所以选定探测器的工作温度为 25 ~ 40 °C,目标温度为 31 ~ 45 °C。

3.1 定标模型

探测器的理想辐射定标模型为^[9]:

$$N_{AD} = K_1 L_S(T) + C_1, \quad (4)$$

式中: $L_S(T)$ 为标准黑体源辐射亮度, K_1 为探测器的固定参数, C_1 为常数项。

在实际应用中,暗电流噪声、探测器的自热效应等因素会对探测器输出信号造成很大影响,以上两个因素均与探测器工作温度密切相关,导致探测器输出的 N_{AD} 计数值不仅与目标辐射有关,而且与探测器工作温度有关,本文将这种效应称为探测器工作温度效应。高精度恒温设备主要用于改变探测器工作温度,但是探测器工作温度通常高于其所处的环境温度且有微小波动,可以通过探头温度传感器实时观测其温度变化。

假设探测器工作温度效应叠加在探测器对目标辐射的响应之上,得到非致冷红外焦平面阵列辐射的线性定标模型^[10]:

$$N_{AD} = K_1 L_S(T) + f(T_d) + C_1, \quad (5)$$

式中, $f(T_d)$ 为探测器工作温度效应函数。

3.2 实验原理及仪器

第2节计算得到了在某黑体温度 T 下,热像仪入瞳处的光谱辐亮度积分 $L(\lambda_1, \lambda_2)$ 与 T 的关

系。在实际应用中,热像仪输出的是红外场景的热图像,简单处理后可以得到目标区域的灰度值,与图像的灰度值直接相关的是某探测器像元或阵列产生的电子数。对于面阵探测器阵列,在某光谱范围内探测器的一个像元产生的电子数可按下式表示^[7]:

$$S_e(\lambda) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\pi A_d}{4F^2} \frac{\lambda}{hc} \eta(\lambda) \tau_0(\lambda) T_{int} L(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

式中: A_d 为探测器像元面积, $F = f/D$ 为光学系统的 F 数, $\tau_0(\lambda)$ 为光学系统的透射率(包括滤光片的透射率), T_{int} 为探测器的积分时间, $\eta(\lambda)$ 为阵列器件的量子效率, λ 为窄带中心波长, $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 为带宽, λ/hc 为波长为 λ 的窄带内单位能量中的光子数, $L(\lambda)$ 为光学系统入瞳处的光谱辐亮度。为了实际应用方便,可直接标定图像灰度与黑体温度的响应关系。

主要实验仪器有:(1)面源黑体,用作标准辐射源;(2)高精度恒温设备,用于控制热像仪所处的环境温度;(3)台式电脑、图像采集卡、数据传输设备。

实验中采用的面源黑体是 Infrared System Development Inc. 生产的 IR-160/301 型黑体源,图1为面源黑体的外观,其性能指标如下:

分辨率:0.1 °C
 波长:1 ~ 99 μm
 稳定性:±0.1 °C
 响应时间:<50 min
 发射率:0.97 ± 0.02



图1 面源黑体

Fig. 1 Surface blackbody

源发射面尺寸:304 mm × 304 mm

图2为高精度恒温设备,其主要性能指标为:

温控区: -40 ~ +500 °C

温度分辨率:0.01 °C

温控精度:0.05 °C



图2 高精度恒温设备

Fig.2 High-precision constant temperature equipment

3.3 实验步骤

选择了4个黑体温度点,分别为31、35、40、45 °C,对应的开氏温度分别为304.15、308.15、313.15、318.15 K。用高精度恒温设备控制探测器所处的环境温度,考虑到所拍摄图像的灰度上下限,在实验过程中可探测温度约为25~40 °C。操作流程如下:

(1) 设定黑体温度,并等待至工作稳定;

(2) 打开探测器的电源,至少预热1 h,使其达到平衡状态;

(3) 将探测器对比度设为19;

(4) 将亮度值依次设为9 900、10 000、10 100、10 200;

(5) 利用高精度恒温设备改变探测器工作温度,测量不同亮度增益下探测器工作温度与灰度之间的关系。探测器工作温度每变化0.1 °C记录一次数据。先将恒温设备设定在较高温度,待探测器温度上升至40 °C后,关闭恒温设备,使探测器工作温度逐渐降至室温,这个过程是为了避免刚关闭恒温设备时探测器未达到平衡状态。探测器工作温度降至室温左右时变化很慢,此时可用冰块加速降温。分别在4个不同亮度值下重复上述操作4次。

做完上述一组后,依次改变黑体温度,重复上述实验,分别得到4组不同黑体温度下的热图像。

用图像处理软件Photoshop处理所得图像后,即得到图像的灰度值。分别对相同黑体温度、相同亮度增益下的实验数据(共16组)进行线性拟合,可以得到灰度随工作温度的变化关系(见表1)。黑体温度分别为304.15、308.15、313.15、318.15 K时,拟合函数的最大均方根误差分别为1.756、2.421、2.256、2.466灰度值,相对于热图像灰度值较小,拟合函数在有效环境温度范围内线性度很好,因此探测器工作温度效应可做线性化处理。亮度增益及黑体温度不相同,所得的拟合曲线斜率变化较小,在误差范围内,认为探测器工作温度效应与入射能量无关,即与目标温度无关,符合上述辐射定标模型。

表1 不同黑体温度下灰度-工作温度关系

Tab.1 Relationship between gray and operating temperature under different blackbody temperatures

黑体温度 T/K	亮度 $b = 9\ 900$	亮度 $b = 10\ 000$	亮度 $b = 10\ 100$	亮度 $b = 10\ 200$
304.15	$G = -13.02t + 468.3$ (26.3, 29.1)	$G = -14.22t + 520.8$ (26.7, 30.5)	$G = -15.68t + 590.8$ (24.9, 32.1)	$G = -15.73t + 607.6$ (25.5, 33.3)
308.15	$G = -15.07t + 560.2$ (23.8, 31.4)	$G = -15.73t + 604.9$ (24, 32.9)	$G = -15.38t + 620.4$ (24, 34.3)	$G = -14.93t + 627.6$ (25.2, 36.4)
313.15	$G = -16t + 637.8$ (24.2, 34)	$G = -15.33t + 632.2$ (25.1, 35.4)	$G = -16.48t + 699$ (27, 37.3)	$G = -15.82t + 700.1$ (28.4, 38.9)
318.15	$G = -16.22t + 692.4$ (27.2, 37.6)	$G = -16.13t + 709$ (28.4, 39)	$G = -15.4t + 709.8$ (29.8, 40.7)	$G = -15.56t + 735.5$ (31.4, 40.5)

将对比度设为19并保持不变,环境温度尽量不变化,黑体温度从304.15 K逐渐增至317.15 K,每隔1 K记录4个不同亮度增益下的数据。

3.4 实验数据分析

通过数据记录和处理,得到了不同黑体温度下的线性方程及拟合曲线。表1给出了黑体温度为304.15、308.15、313.15、318.15 K时的线性方程,图3为黑体温度为318.15 K的拟合曲线。

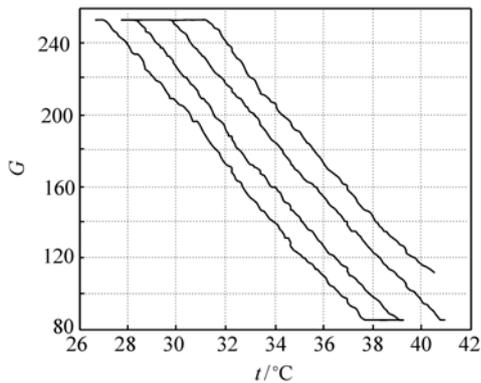


图3 黑体温度为318.15 K时的响应曲线

Fig. 3 Response curves at blackbody temperature of 318.15 K

表1中, G 表示灰度值, T 表示黑体绝对温度, t 表示探测器工作温度, b 表示亮度增益。(t_1, t_2) 表示拟合方程的线性区间或者实验条件能够达到的极限温度。图3中从左到右4条曲线对应的亮度增益分别为9 900、10 000、10 100、10 200。

根据上面所得的拟合方程可以看出,除黑体温度为304.15 K时拟合曲线斜率变化较大外,其余斜率变化均较小。 $T = 304.15$ K时斜率变化较大是由于实验数据太少引起的。

为了得到在相同黑体温度、不同亮度增益下的拟合线性方程,对相同黑体温度的4个关系式中 t 的系数取平均,而对亮度增益的斜率进行4点拟合,可推出下面的关系式:

$$G_{308.15} = -15.2775(t - 0.01649b + 126.2), \quad (7)$$

$$G_{313.15} = -15.9075(t - 0.01435b + 102.3). \quad (8)$$

灰度 G 的下标表示黑体温度,只需拟合两组不同黑体温度的灰度表达式即可推出目标温度计

算公式。

由式(5)可知,探测器输出计数值与标准黑体源出射辐射 $L_s(T)$ 呈线性关系。由第2节的计算可以看出,在选定的波段内,当黑体绝对温度 T 变化范围很小时,黑体辐射出射度 $M(\lambda_1 - \lambda_2, T)$ 与 T^4 成正比。因此,图像灰度与黑体绝对温度的四次方呈线性关系:

$$(G_{T_1} - G_{T_2}) \propto (T_1^4 - T_2^4) = (T_1 - T_2)(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2). \quad (9)$$

当黑体温度 T 变化范围较小时,式(9)中的 $(T_1 + T_2)$ 和 $(T_1^2 + T_2^2)$ 相对变化很小, $(G_{T_1} - G_{T_2})$ 可认为只是 $(T_1 - T_2)$ 的函数。综上所述,可以得到:

$$\frac{G_{T_1} - G_{T_2}}{T_1 - T_2} = \frac{G_{T_1} - G_T}{T_1 - T}. \quad (10)$$

取 $T_1 = 308.15$ K, $T_2 = 313.15$ K,在某探测器工作温度 t 下根据拍得的图像,处理后可得到其灰度值 G_T ,再由式(7)、(8)计算出 $G_{308.15}$ 、 $G_{313.15}$,由式(10)便可计算出目标温度 T 。

3.5 实验数据的验证

将验证实验所得的数据代入式(10)可得到黑体的计算温度。图4为热像仪在不同亮度增益下的测温误差,发现在不同的亮度增益下测温误差最大值 < 1.2 °C,选择合适的亮度增益,例如亮

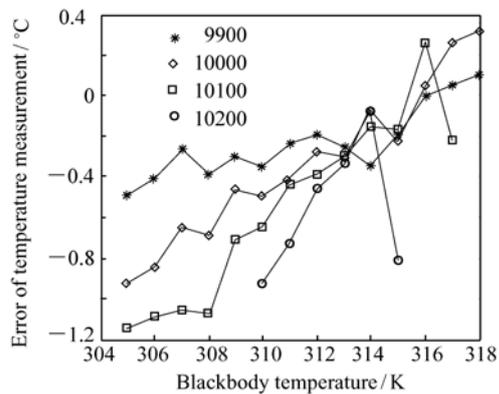


图4 热像仪在不同亮度增益下的测温误差

Fig. 4 Temperature measurement error of IR thermal imager under different brightness gains

度增益为9 900,测量误差可控制在0.5 °C以内。此外,通过实验数据可以发现:探测器工作温度变

化 1 °C 引起的图像灰度变化等同于目标温度变化约 1.4 °C 引起的图像灰度变化,探测器的的工作温度对其响应有较大的影响。

4 误差分析

主要误差来源包括以下 4 个方面:

(1) 实验使用的面源黑体的测温精度为 ± 0.1 °C,发射率的误差范围为 ± 0.02 ,因黑体引起的测量误差约为 2.24%;

(2) 仪器的输出信号误差约为 1%;

(3) 红外焦平面阵列非均匀性误差和噪声误差为 4%;

(4) 采用拟和算法对定标数据的处理产生的误差为 4%。

其中,采取拟合算法引起的误差较大,主要是进行线性拟合式(7)、(8)时,斜率取平均和 4 点拟合引起的误差较大,做线性近似时式(10)引起的误差也较大。

为了减小拟合误差,可以通过以下方法来实现:

(1) 通过改善实验条件能更有效地控制探测器环境温度,增大可调范围,使热图像能分别达到高低饱和。

参考文献:

- [1] 李琼花,杨家德.非致冷凝视红外焦平面阵列的特点及应用[J].重庆工学院学报,2003,17(1):48-50.
LI Q H, YANG J D. The characteristics and applications of uncooled staring infrared focal plain array[J]. *J. Chongqing Institute Technol.*, 2003, 17(1):48-50. (in Chinese)
- [2] 孙恋君,张俊举,王世允,等.非致冷微测辐射热计探测器工作温度特性研究[J].红外与毫米波学报,2007,26(3):232-236.
SUN L J, ZHANG J J, WANG SH Y, *et al.*. Research on operating temperature characteristic of uncooled microbolometer detector[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2007, 26(3):232-236. (in Chinese)
- [3] 黄英东,安建波.基于改进多项式拟合的红外焦平面非均匀性校正方法[J].红外,2011,32(3):29-33.
HUANG Y D, AN J B. A nonuniformity correction algorithm for IRFPA based on improved polynomial fitting[J]. *Infrared*, 2011, 32(3):29-33. (in Chinese)
- [4] DONG L Q, LIU X H, ZHAO Y J, *et al.*. Scene-based nonuniformity correction algorithm for MEMS-based un-cooled IR image system[J]. *SPIE*, 2009, 7419:74190Y.
- [5] ROBERT M P, DANIEL T P. Radiometric calibration of a longwave FPA camera for IR scene[J]. *SPIE*, 2006, 6208:680818.
- [6] WILLIAMS G M, BARTER A. Dual-band MWIR/LWIR radiometer for absolute temperature measurements[J]. *SPIE*, 2006, 6205:62050M.
- [7] 陆子凤.红外热像仪的辐射定标和测温误差分析[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2010.

(2) 增加实验次数,黑体温度不只分为 4 组,间隔可以改为 2 °C,甚至为 1 °C。这样就可以建立数据库而不必进行线性拟合,根据目标图像灰度就能够直接推出目标温度,缺点是需要进行大量的实验。

5 结论

为了减小在不同环境温度下非致冷长波红外热像仪的测温误差,在考虑探测器温度效应的基础上建立了非致冷红外焦平面阵列的辐射定标模型。通过标定实验得到了不同黑体温度下的图像灰度与探测器工作温度及亮度增益值之间的关系。当被测目标温度变化范围较小时,对图像灰度变化进行了线性近似,进而得到了目标温度的数学计算模型,最后通过实验对标定结果进行了验证。结果表明,探测器温度效应可做线性化处理且与黑体温度变化的相关性很小。对实验数据进行了拟合分析,探测器工作温度为 25 ~ 40 °C、环境温度为 20 ~ 35 °C 时,对常温目标的最大测温误差 < 1.2 °C。通过设置合适的亮度增益值,测温误差可控制在 0.5 °C 以内,大大提高了非致冷长波红外热像仪在不同温度环境下的测温精度。

- LU Z F. Calibration and measurement error analysis of infrared imaging system for temperature measurement[D]. Changchun:Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010. (in Chinese)
- [8] 乐逢宁,蔡静,马兰,等. 使用红外热像仪应注意的问题[J]. 计测技术, 2010, 30(增): 100-101.
- YUE F N, CAI J, MA L, *et al.*. The problem should be attended when using IR thermal imager[J]. *Calculate, Measure Technology*, 2010, 30(s): 100-101. (in Chinese)
- [9] 孙学金,刘剑,赵世军,等. 非致冷红外焦平面阵列的辐射定标模型[J]. 解放军理工大学学报, 2008, 9(4): 399-403.
- SUN X J, LIU J, ZHAO SH J, *et al.*. Radiometric calibration model of uncooled infrared focal plane array[J]. *J. PLA University of Science and Technology*, 2008, 9(4): 399-403. (in Chinese)
- [10] 张云涛,李涛,高太长. 基于人工神经网络的红外焦平面阵列定标方法[J]. 气象水文海洋仪器, 2009(4): 19-22.
- ZHANG Y T, LI T, GAO T CH. Calibration method of infrared focal plane arrays based on neural network[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2009(4): 19-22. (in Chinese)

作者简介: 张晓龙(1986—), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, 主要从事红外辐射定标等方面的研究。

E-mail: long1986lucky@163.com

刘英(1980—), 女, 山东滨州人, 博士, 助理研究员, 主要从事红外光学等方面的研究。

E-mail: liuy613@163.com

孙强(1971—), 男, 黑龙江海伦人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事现代红外光学仪器、二元光学、红外系统仿真等方面的研究。E-mail: sunq@ciomp.an.cn