

文章编号: 1672-8785(2025)03-0023-06

一种考虑环境温度变化的制冷型 红外系统外场标定方法

甘世奇* 张 啸 吴统邦 马 鑫 车 勋 何明亮

(中国人民解放军 95859 部队, 甘肃 酒泉 735000)

摘 要: 红外系统标定是开展目标红外特性测量的重要工作, 其精度将直接影响最终测量结果的准确度。为了减小温度漂移对标定精度的影响, 提出了一种考虑环境温度变化的制冷型红外系统外场标定方法, 推导了考虑环境温度的像元灰度响应-目标辐射亮度关系式。通过某型国产制冷型红外系统的外场标定实验, 验证了该方法的可行性和准确性。结果表明, 与传统标定方法相比, 本文方法对参与拟合的温度点反演的平均误差降低了 0.57%、均方根误差降低了 0.03, 对延伸温度点反演的平均误差降低了 1.63%、均方根误差降低了 0.93, 对于整个画幅标定精度更高。该方法可显著提升目标特性反演准确性, 为开展红外系统标定的实际工程应用提供了有益的参考借鉴。

关键词: 环境温度; 制冷型红外系统; 红外标定; 温度漂移; 红外特性测量

中图分类号: O432.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.03.004

A Field Calibration Method for Refrigeration Infrared Systems Considering Ambient Temperature Changes

GAN Shi-qi*, ZHANG Xiao, WU Tong-bang, MA Xin, CHE Xun, HE Ming-liang

(Unit 95859 of PLA, Jiuquan 735000, China)

Abstract: Infrared system calibration is an important task in measuring the infrared characteristics of targets, and its accuracy will directly affect the accuracy of the final measurement results. In order to reduce the influence of temperature drift on calibration accuracy, a field calibration method for refrigerated infrared systems considering ambient temperature changes is proposed, and the relation formula between pixel gray response and target radiance considering ambient temperature is derived. The feasibility and accuracy of this method are verified through field calibration experiments on a domestic cooled infrared system. The results show that compared with the traditional calibration method, the proposed method reduces the mean error of the inversion of the temperature points involved in the fitting by 0.57%, and the root mean square error by 0.03. For extended temperature points, the mean error of the inversion is reduced by 1.63%, and the root mean square error is reduced by 0.93. This method offers higher calibration accuracy across the entire frame and significantly

收稿日期: 2024-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(5167506)

作者简介: 甘世奇(1991-), 男, 新疆昌吉人, 工程师, 硕士, 主要从事光学测量、红外辐射特性方面的研究。

*通讯作者: E-mail: gsq1342@163.com

improves the accuracy of target characteristic inversion, providing a useful reference for the practical engineering application of infrared system calibration.

Key words: ambient temperature; cooled infrared system; infrared calibration; temperature drift; infrared characteristic measurement

0 引言

随着红外技术的不断发展,目标红外辐射特性测量受到了越来越多的重视,广大研究人员普遍开展对空间目标与深空背景^[1-2]、空中目标与天空背景^[3-4]、海上目标与海洋背景^[5]、地面目标与地物背景^[6]的特性测量,为红外系统仿真、目标识别、制导探测、隐身设计等应用领域提供基础数据。作为目标红外辐射特性测量的首要工作,红外标定的实质是建立红外系统与标准红外辐射源之间的响应关系。标定结果的准确度直接影响后续目标特性测量的精度。当前外场开展红外标定工作普遍存在以下问题:(1)相同红外系统在不同环境温度下开展标定工作时,受温度漂移影响,其结果存在一定差异;(2)由于黑体升温 and 温度稳定速度慢,红外系统标定周期较长(通常在 1 h 以上),其间环境温度的变化导致标定系数的偏移。以上问题较大程度地影响了红外标定的准确度与工程应用。

国内外学者在红外系统标定方面开展了一系列研究^[7-12]。曹立华等^[7]以高精度面源黑体为标准辐射源,在实验室环境中对中波红外探测器进行标定,并利用线性最小二乘法对回归直线方程的参数进行预测;在 95% 置信度区间估计下剔除了局外点,提高了标定精度。但上述方法要求标定和测量过程环境温度一致,在外场复杂环境中并不适用,在温度漂移影响下得到的标定值可能会被当作局外点剔除。李满良等^[8]提出一种基于双腔室黑体的远距离实时标定方法,能够根据两个不同温度的黑体进行实时标定。但该方法在标定过程中引入了大气误差且仅能对红外焦平面小区域进行标定。李桂芝等^[9]基于中波红外探测器开展了不同红外焦平面区域选取对标定的影响分析,虽然考

虑了红外焦平面不同区域的响应误差,但未考虑环境温度变化产生的误差影响。

本文提出一种考虑环境温度变化的制冷型红外系统外场标定方法,利用最小二乘法拟合标定方程,建立像元灰度响应、目标辐射亮度和环境温度之间的变化关系。在外场环境中开展红外标定实验,对标定方法的可行性和准确度进行验证。本文方法对于减小外场标定过程中环境温度变化引起的温度漂移误差具有显著作用。

1 基本原理

外场红外标定普遍采用近距离拓展源法:将面源黑体放置于红外系统前方,完全覆盖红外系统入瞳;通过调节黑体温度,建立标准辐射源与红外系统之间的响应关系。我们通常认为红外系统灰度值 h 与输入辐射亮度 L 之间的关系是线性的,即

$$h = G \cdot L + B \quad (1)$$

式中, G 为增益系数; B 为偏置。输入辐射亮度 L 可以通过普朗克公式进行计算:

$$L = \varepsilon L(T_i) = \varepsilon \int_{f_2}^{f_1} \frac{2hf^3}{c^2 \cdot (e^{hf/kT_i} - 1)} df \quad (2)$$

式中, $L(T_i)$ 表示 $f_2 \sim f_1$ 范围内温度下的黑体辐射亮度,单位为 $W/(m^2 \cdot sr)$; ε 为黑体发射率; h 为普朗克常数; k 为玻尔兹曼常数; c 为光速; f 为频率。

对于无镜头镜筒的红外系统,若灰度值 h 与输入辐射亮度 L 满足以下关系:

$$h = G_0 \cdot L + B_0 \quad (3)$$

式中, G_0 为该系统的增益系数; B_0 为该系统的偏置。在标定过程中,该系统最终接收到的辐射能量主要包括标准黑体的辐射能量以及标准黑体反射的外部杂散辐射能量。此时,式(3)可以表示为

$$h = G_0 \cdot \epsilon L(T_i) + G_0 \cdot \frac{\pi(1-\epsilon)}{4} A_d \cdot L(T_{amb}) + h_{bi} \quad (4)$$

式中, ϵ 为黑体发射率; A_d 为红外系统探测器的单个像元面积; T_{amb} 为环境温度; h_{bi} 为制冷型红外系统探测器中暗电流等内部原因引起的偏置或固有噪声, 与环境温度变化无关。式(4)又可以表示为

$$h = G_0 \cdot L + K_0 \cdot L(T_{amb}) + D_0 \quad (5)$$

式中, K_0 为杂散辐射增益系数; D_0 为系统固有偏置。

对于有镜头镜筒的红外系统, 若灰度值 h 与输入辐射亮度 L 满足以下关系:

$$h = G_1 \cdot L + B_1 \quad (6)$$

式中, G_1 为该系统的增益系数; B_1 为该系统的偏置。在标定过程中, 该系统最终接收到的辐射能量主要包括: (1) 标准黑体的辐射能量; (2) 由标准黑体反射、经过镜组的外部杂散辐射能量 Φ_b ; (3) 光学系统镜组辐射出的能量 Φ_l ; (4) 镜筒、遮光筒与内部机械机构在 (θ, φ) 方向上多次反射的辐射能量 Φ_r 。此时, 式(6)可以表示为^[13-15]

$$h = G_1 \cdot \epsilon L(T_i) + G_1 \cdot (\Phi_b + \Phi_l + \Phi_r) + h_{bi} \quad (7)$$

在理想情况下, 由标准黑体反射、经过镜组到达单个像元的外部杂散辐射能量 Φ_b 可以通过式(8)进行计算:

$$\Phi_b = \frac{\pi(1-\epsilon)\tau_{opt}}{4} \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot A_d \cdot L(T_{amb}) \quad (8)$$

式中, τ_{opt} 为光学镜组的透过率; D 为光学镜组的口径; f 为光学镜组的焦距。同样地, 理想情况下可以将光学系统镜组近似看作发射率为 ϵ_0 、温度为 T_{amb} 的灰体, 其辐射出的能量经

$$\begin{bmatrix} G \\ K \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L(T_1)^2 + L(T_2)^2 + \dots + L(T_n)^2 & L(T_1)L(T_{b1}) + L(T_2)L(T_{b2}) + \dots + L(T_n)L(T_{bn}) & L(T_1) + L(T_2) + \dots + L(T_n) \\ L(T_1)L(T_{b1}) + L(T_2)L(T_{b2}) + \dots + L(T_n)L(T_{bn}) & L(T_{b1})^2 + L(T_{b2})^2 + \dots + L(T_{bn})^2 & L(T_{b1}) + L(T_{b2}) + \dots + L(T_{bn}) \\ L(T_1) + L(T_2) + \dots + L(T_n) & L(T_{b1}) + L(T_{b2}) + \dots + L(T_{bn}) & n \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} L(T_1)H_1 + L(T_2)H_2 + \dots + L(T_n)H_n \\ L(T_{b1})H_1 + L(T_{b2})H_2 + \dots + L(T_{bn})H_n \\ H_1 + H_2 + \dots + H_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

2 实验验证

为进一步验证式(13)作为外场红外系统标定方程的可行性和准确性, 基于某型国产制冷型红外系统开展外场红外标定实验, 利用近距

过直径为 D_0 、焦距为 f_0 的光学系统到达单个像元的能量为 Φ_l :

$$\Phi_l = \frac{\pi\epsilon_0}{4} \left(\frac{D_0}{f_0}\right)^2 \cdot A_d \cdot L(T_{amb}) \quad (9)$$

镜筒、遮光筒与内部机械机构主要采用金属结构。假设自身温度与环境温度一致, 辐射出的能量经过多次反射到达单个像元的能量 Φ_r 为

$$\Phi_r = \sum_{i=1}^M \epsilon_i(\theta, \varphi) \cdot s_i \cdot L(T_{amb}) \cdot R_i \quad (10)$$

式中, $\epsilon_i(\theta, \varphi)$ 表示不同部位的发射率; s_i 表示该区域的有效面积; R_i 表示传输路径上的反射率。将式(8)~式(10)代入式(7), 可以得到:

$$h = G_1 \epsilon L(T_i) + G_1 \cdot \left(\frac{\pi(1-\epsilon)\tau_{opt}A_dD^2}{4f^2} + \frac{\pi\epsilon_0A_dD_0^2}{4f_0^2} + \sum_{i=1}^M \epsilon_i(\theta, \varphi)s_iR_i \right) \cdot L(T_{amb}) + h_{bi} \quad (11)$$

式(11)又可以简化为

$$h = G_1 \cdot L + K_1 \cdot L(T_{amb}) + D_1 \quad (12)$$

式中, K_1 为杂散辐射增益系数; D_1 为系统固有偏置。

从式(5)与式(12)中可以看出, 红外系统像元灰度响应、目标辐射亮度和环境温度之间的关系可以表示为

$$h = G \cdot L + K \cdot L(T_{amb}) + D \quad (13)$$

因此, 式(13)能够用作一种制冷型红外系统通用标定方程。在标定过程中, 设置不同的黑体温度, 记录黑体图像灰度值 H_i 和红外系统的环境温度 T_{bi} , 通过最小二乘法最终求出标定方程系数:

离拓展源法进行低温段标定。实验采用的面源黑体尺寸为 700 mm × 700 mm, 发射率为 0.98。将其放置于某国产大口径制冷型红外系统正前方, 使辐射面覆盖视场, 并采用精度为

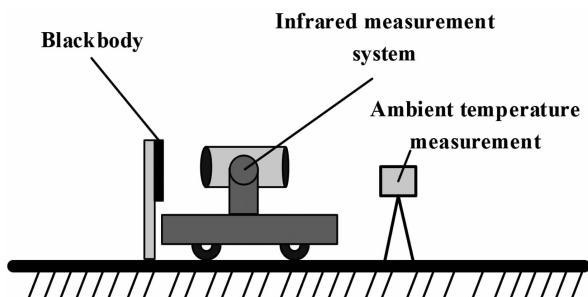


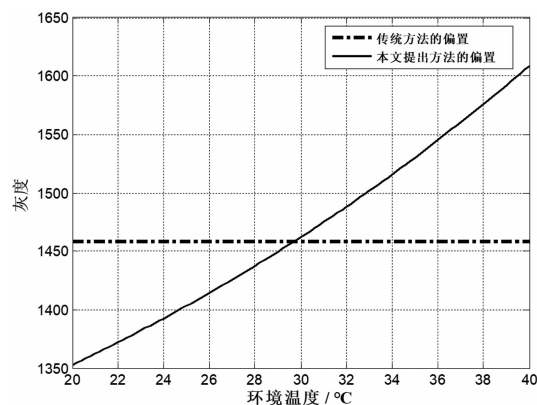
图 1 制冷型红外系统外场标定实验示意图

±0.2 °C 的地面气象站测量环境温度,如图 1 所示。

红外系统的响应波段为 3.7~4.8 μm,像元数量为 640×512,积分时间为 2000 μs,滤光片采用 36%透过率档位。分别设置黑体温度为 50 °C、80 °C、100 °C、130 °C、150 °C、200 °C(共 6 个温度点),记录黑体图像数据和环境温度(见表 1)。

对 50°C、80°C、100°C、130°C、150°C 等 5 个温度点分别采用传统方法和本文方法进行标定拟合。采用传统方法得到的整个画幅平均标定系数 $[\bar{G} \ \bar{B}]$ 为 $[210.92 \ 1458.84]$,采用本文方法得到的整个画幅平均标定系数 $[\bar{G} \ \bar{K} \ \bar{D}]$ 为 $[206.42 \ 249.99 \ 1109.27]$ 。从标定结果中可以看出,两种方法的增益系数 G 接近,但计算出的偏置 B 结果不同。利用传统方法计算出的偏置 B 在不同环境温度下均为固定值,而利用本文方法得到的偏置 B 随着环境温度的变化而变化,如图 2 所示。

分别采用传统方法和本文方法的标定结果,对整个画幅全部像元计算表 1 中 6 个温度点的黑体辐射亮度理论值与标定方程拟合值之间的残差和均方根误差。定义相对误差、平均

图 2 利用两种方法得到的偏置 B 对比

相对误差 δ_{average} 、均方根误差 γ 为

$$\delta_{(x,y)} = \left| \frac{L_{(x,y)} - L_0}{L_0} \right| \times 100\% \quad (15)$$

$$\delta_{\text{average}} = \frac{\sum \delta_{(x,y)}}{640 \times 512} \quad (16)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sum (L_{(x,y)} - L_0)^2}{640 \times 512}} \quad (17)$$

式中, L_0 为黑体辐射亮度的理论值; $L_{(x,y)}$ 为 (x,y) 处像元通过标定方程反演的辐射亮度值。结果如图 3 和表 2 所示。可以看出,对于参与标定拟合的温度点,传统方法的平均误差为 0.91%,均方根误差为 0.06;本文方法的平均误差为 0.34%,均方根误差 0.03。通过对比发现,本文方法的平均误差降低了 0.57%,均方根误差降低了 0.03,拟合效果更好。对于温度延伸至 200 °C 的黑体,传统方法对整个画幅的平均误差为 3.66%,均方根误差为 3.05;本文方法对整个画幅的平均误差为 2.03%,均方根误差为 2.12。通过对比发现,本文方法的平均误差降低了 1.63%,均方根误差降低了 0.93,反演准确度更高。

表 1 标定原始数据

黑体温度/°C	平均灰度	环境温度/°C	理论辐射亮度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$
50	2013.05	29.5	2.71
80	2828.69	32.7	6.48
100	3739.70	33.6	10.74
130	5874.23	37.4	20.88
150	7965.58	38.7	30.91
200	15982.26	34.9	71.48

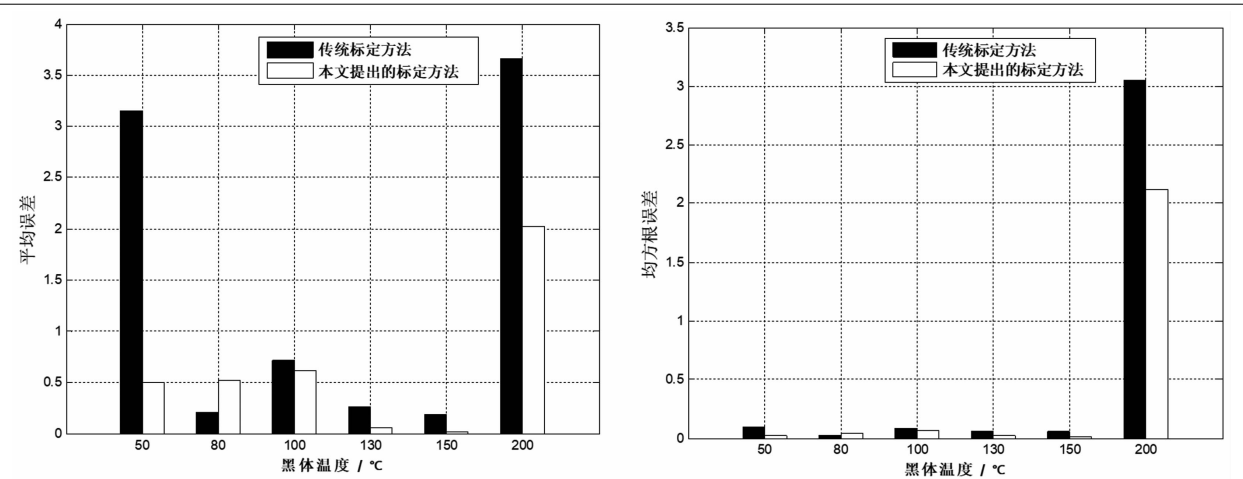


图 3 利用两种方法反演黑体辐射亮度的结果对比

表 2 两种方法的计算结果对比

黑体温度/℃	理论辐射亮度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$	传统方法		本文方法	
		平均误差 δ_{average}	均方根误差 γ	平均误差 δ_{average}	均方根误差 γ
50	2.71	3.15	0.09	0.50	0.02
80	6.48	0.21	0.02	0.52	0.04
100	10.74	0.72	0.08	0.61	0.07
130	20.88	0.26	0.06	0.06	0.02
150	30.91	0.19	0.06	0.02	0.01
200	71.48	3.66	3.05	2.03	2.12

3 结束语

本文提出了一种考虑环境温度变化的制冷型红外系统外场标定方法。基于近距离拓展源方式，在标定过程中记录了红外系统的环境温度，并建立了像元灰度响应、目标辐射亮度和环境温度之间的变化关系。针对某型国产制冷型红外系统开展了外场红外标定实验。结果表明，本文方法在外场应用中具有可行性。与传统方法相比，本文方法对标定方程拟合点的平均误差降低了 0.57%，均方根误差降低了 0.03，拟合效果更好；外推反演温度点的平均误差降低了 1.63%，均方根误差降低了 0.93，反演准确度更高。本文方法可为开展红外系统标定实际工程应用提供有益的参考借鉴。但实际精度仍需结合大量数据进行验证，后续考虑将该方法与实际目标红外特性测量环节相结合，进一步缩短外场红外标定与测量工作周期，减少环境温度变化对红外标定准确度的影响。

参考文献

[1] 陈川, 易维宁, 崔文煜. 基于参考源的空间目标红外辐射特性测量 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8): 196–203.

[2] 黄晨, 王建军, 高昕, 等. 红外星表在地基红外辐射测量系统中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 2901–2906.

[3] 甘世奇, 王伟超, 袁光福, 等. 基于制冷型红外系统逐像元标定的空中目标红外辐射亮度计算模型 [J]. 光学学报, 2024, 44(12): 233–240.

[4] 王伟超, 司文涛, 袁光福, 等. 几何成像区域红外小目标像素数测量方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(13): 87–94.

[5] 张卫国, 张则剑, 贾娜. 海上目标红外辐射特性测量数据处理系统设计 [J]. 激光与红外, 2018, 48(7): 860–866.

[6] 江岳鹏, 曹运华, 吴振森, 等. 地面目标的中波红外高光谱成像特性测量 [J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(4): 937–944.

[7] 曹立华, 李宁, 杨词银, 等. 3~5 μm 红外探测

- 器的辐射定标 [J]. **红外与激光工程**, 2012, **41**(4): 858–864.
- [8] 李满良, 胡小春, 甄小龙, 等. 外场红外辐射标定方法研究 [J]. **遥测遥控**, 2014, **35**(6): 61–66.
- [9] 李桂芝, 贾海萨, 韩璐, 等. 红外焦平面区域选取对辐射定标的影响分析 [J]. **红外**, 2021, **42**(9): 26–29.
- [10] 甘世奇, 武佩剑, 张啸, 等. 一种适用于外场条件的红外系统分区域标定方法 [J]. **红外**, 2024, **45**(1): 36–42.
- [11] 殷丽梅, 刘俊池, 王建立, 等. 基于红外标准星的红外辐射标校方法 [J]. **光子学报**, 2014, **43**(12): 98–102.
- [12] 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): 137–143.
- [13] 田棋杰, 常松涛, 何锋赞, 等. 根据环境温度测量制冷型红外成像系统内部杂散辐射 [J]. **光学学报**, 2017, **37**(7): 152–159.
- [14] 常松涛, 孙志远, 张尧禹, 等. 制冷型红外成像系统内部杂散辐射测量方法 [J]. **物理学报**, 2015, **64**(5): 103–110.
- [15] 余毅, 王旻, 常松涛, 等. 根据环境温度进行红外成像系统漂移补偿 [J]. **光学学报**, 2014, **34**(10): 34–39.