

文章编号: 1672-8785(2021)10-0028-05

# 便携式红外热像仪外场测温 误差分析及修正

王吉军 周 校\* 李 岩 李芳媛 余松林

(军事科学院国防工程研究院, 北京 100039)

**摘 要:** 红外测温成像技术精度的影响因素较多。尤其在实验外场的复杂环境下, 有时难以达到预期指标。为了有效提高便携式红外热像仪的外场测温精度, 利用红外测温理论模型梳理和总结了外场测温的主要影响因子, 然后利用外场实测数据对其进行了统计分析, 并提出了相应的修正方法。结果表明, 修正后的数据标准差由 0.89 K 降至 0.3 K, 有效提高了测温精度。

**关键词:** 红外成像; 非接触式; 误差影响; 测量精度

**中图分类号:** TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.10.005

## Error Analysis and Correction of Field Temperature Measurement for Portable Infrared Thermal Imager

WANG Ji-jun, ZHOU Xiao\*, LI Yan, LI Fang-yuan, YU Song-lin

(Institute of National Defense Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** There are many factors affecting the accuracy of infrared temperature imaging technology. Especially in the complex environment of the experimental field, sometimes it is difficult to reach the expected index. In order to effectively improve the measurement accuracy of portable infrared thermal imager in the field, the main influencing factors of the field temperature measurement are sorted and summarized by the infrared temperature measurement theoretical model, and the influence factors are statistically analyzed by using the measured data in the field in the paper. In addition, the corresponding correction method is proposed. The results show that the standard deviation is reduced from 0.89 K to 0.3 K after the correction, which effectively improves the temperature measurement accuracy.

**Key words:** infrared imaging; non-contact; error influence; measurement accuracy

### 0 引言

红外成像测温技术利用物体自身的红外辐射来获取目标影像, 具有非接触、测温速度

快、测量范围广、灵敏度高、抗干扰能力强以及可全天候作业等优势。该技术在冶金、消防、生物医学、遥感等领域应用广泛<sup>[1-4]</sup>, 具

收稿日期: 2021-05-27

基金项目: 装备发展部装备试验鉴定技术研究项目(2000070059)

作者简介: 王吉军(1977-), 男, 山东烟台人, 高级工程师, 主要研究方向为复杂环境感知技术。

\*通讯作者: E-mail: 38597960@qq.com

有巨大的应用市场。

影响红外热像仪测温的因素较多, 主要包括目标发射率、背景噪声、仪器稳定性及自身发射辐射、大气透射率和观测距离等<sup>[5-7]</sup>。尤其在环境复杂的实验外场, 环境背景噪声和大气透射率对它的影响较大。因此, 在进行高精度测温时, 需要有效修正这些因素的影响<sup>[8-9]</sup>。

本文将面源黑体数据作为基准, 利用外场实测数据分析了便携式热像仪外场测温的各类因素所致误差的分布特点, 并提出了一种便于提高外场测温精度的简易修正方法。

## 1 误差模型

所有温度高于绝对零度的物体都会以辐射电磁波的方式向周围辐射能量。物体辐射能量与物体温度正相关。红外测温成像技术利用红外探测器和光学系统对目标进行探测, 将仪器接收到的目标辐射能量聚集在探测器上, 并将其转换为电信号。该信号被放大后形成数字格式的红外热像数据<sup>[10]</sup>。辐射照度模型可表示为

$$E = A_0 d^{-2} [\tau_{\omega\lambda} \epsilon_{\lambda} L_{\lambda}(T_0) + \tau_{\omega\lambda} (1 - \alpha_{\lambda}) L_{\lambda}(T_u) + \epsilon_{\omega\lambda} L_{\lambda}(T_a)] \quad (1)$$

式中,  $E$  为热像仪的辐射照度,  $A_0$  为热像仪最小空间张角所对应的目标可视面积,  $\epsilon_{\lambda}$  为目标表面发射率,  $L_{\lambda}$  为被测表面的辐射亮度,  $\alpha_{\lambda}$  为表面吸收率,  $\tau_{\omega\lambda}$  为大气光谱透射率,  $\epsilon_{\omega\lambda}$  为大气发射率,  $T_0$  为被测目标的表面温度,  $T_u$  为环境温度,  $T_a$  为大气温度,  $d$  为测量距离。

热像仪的工作波段都很窄, 通常在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  或  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  之间, 因此  $\epsilon_{\lambda}$ 、 $\alpha_{\lambda}$ 、 $\tau_{\omega\lambda}$  通常可近似认为与波长无关<sup>[11-12]</sup>。根据普朗克辐射定律, 被测表面真实温度的计算公式为

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\epsilon} \left[ \frac{1}{T_r^n} - (1 - \alpha) T_u^n - \frac{\epsilon_a}{\tau_a} T_a^n \right] \right\}^{1/n} \quad (2)$$

式中,  $T_r$  为热像仪的探测温度。对于不同波段的热像仪,  $n$  的取值不同<sup>[11]</sup>: 对于  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  波段,  $n$  取 8.68; 对于  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  波段,  $n$  取 4.09。对式(2)进行微分:

$$\begin{aligned} \frac{dT_0}{T_0} = & \frac{1}{n\epsilon T_0^n} \left\{ - \left[ \frac{1}{\tau_a} T_r^n - (1 - \alpha) T_u^n - \frac{\epsilon_a}{\tau_a} T_a^n \right] \frac{d\epsilon}{\epsilon} \right. \\ & + T_u^n d\alpha + (\epsilon_a T_a^n - T_r^n) \frac{d\tau_a}{\tau_a} - \frac{T_a^n}{\tau_a} d\epsilon_a + \frac{n}{\tau_a} T_r^n \frac{dT_r}{T_r} \\ & \left. - (1 - \alpha) n T_u^n - \frac{n\epsilon_a}{\tau_a} T_a^n \frac{dT_a}{T_a} \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

由式(3)可知, 目标真实温度的误差主要受  $\epsilon$ 、 $\tau_a$ 、 $\epsilon_a$ 、 $\alpha$ 、 $T_r$ 、 $T_u$ 、 $T_a$  的测量误差影响。结合外场实验的特点, 红外成像测温精度主要受目标特性、观测环境、系统噪声等因素影响。其中, 目标特性产生的影响主要是由目标的发射率造成的; 观测环境因素主要包括环境噪声、测量距离以及大气透射率; 系统噪声因素主要包括仪器稳定性及自身辐射。

## 2 外场实验及误差分析

为了分析外场环境下不同因素对测温精度的影响特征, 在野外实验场地利用便携式长波红外热像仪和 2 个面源黑体进行了测温实验。表 1 和表 2 分别列出了面源黑体和红外热像仪的主要参数。将 2 个黑体的温度分别设定相差 2 K、4 K 和 10 K。先后将面源黑体移至距热像仪 5 m、10 m、20 m、30 m、40 m 和 50 m 处, 再利用红外热像仪采集 2 个面源黑体在不同温差、不同距离下的红外影像, 并进行温度测量分析。为了减少系统噪声和人为操作等影响, 每次仪器测量取两个数据的平均值作为该次测量值。将面源黑体的设定温度作为已知信息, 并通过获取的黑体实测结果来统计分析不同因素对精度的影响规律。

表 1 面源黑体的主要参数

参数	数值
辐射口径	100 mm × 100 mm
温度范围	-15℃ ~ 120℃
发射率	0.97(±0.03)
温度分辨率	0.01℃
均匀性	±0.03℃

### 2.1 目标特性分析

表 3 列出了温差测量实验结果。不同温差下的黑体测温误差分布图、线性拟合图以及残差图如图 1 所示。

表 2 红外热像仪的主要参数

参数	数值
探测器规格	1024×768 元
热灵敏度	<20 mK@30℃
最小焦距	0.4 m
波长范围	7.5~14 μm
像元间距	17 μm
测温范围	-40℃~150℃
测温精度	1%

表 3 不同温差下的黑体测温误差

距离/m	不同温差下的误差/K		
	2 K	4 K	10 K
5	0.15	-0.1	-0.05
10	0.25	0	0.05
20	0.15	0.15	-0.05
30	0.1	0.05	0.3
40	0.1	0.25	0.4
50	0.15	0.3	0.5

由表 3 可知, 30 m 以内黑体的实测温差结果与设计值相差较小(均小于 0.3 K)。误差总体呈正态分布, 与距离的线性相关系数为 0.0016。可以认为, 两个黑体之间的温差结果与距离无关。当黑体温差为 4 K 和 10 K 时, 平均误差小于 0.05 K。当测试距离为 40 m 和 50 m 时, 平均误差分别为 0.12 K、0.27 K、0.45 K。在相对较远的距离上, 温差较大的两

个目标的测量误差也相对较大, 且温差误差随距离的增加而增大。除了个别情况达到 0.5 K, 温差误差通常都小于 0.3 K。

## 2.2 环境温度影响分析

在实验外场选取环境温度变化幅度不同的三个时间段。将黑体温度设定成与环境温度一致, 分别为 293 K、289 K 和 288 K。表 4 列出了不同距离下黑体的实测温度与设定温度之间的差值。测温误差趋势如图 2 所示。

表 4 不同环境温度下的黑体测温误差

距离/m	不同环境温度下的误差/K		
	293 K	289 K	288 K
5	-0.6	-1.8	-1.3
10	-0.95	-2.15	-1.5
20	-2.05	-2.65	-2.7
30	-2.55	-2.65	-2.8
40	-3.35	-3.3	-3.7
50	-3.65	-3.55	-4.5

由图 2 可知, 环境温度较低时黑体测温误差较大(约有 1 K 左右的差值)。在不同距离下, 测温误差随距离的增加而增大, 两者之间存在线性关系(线性系数为 0.07)。利用该系数将黑体温度归算至 0 m 距离时, 所得黑体温度与设定温度相同。因此, 测温误差与距离之间

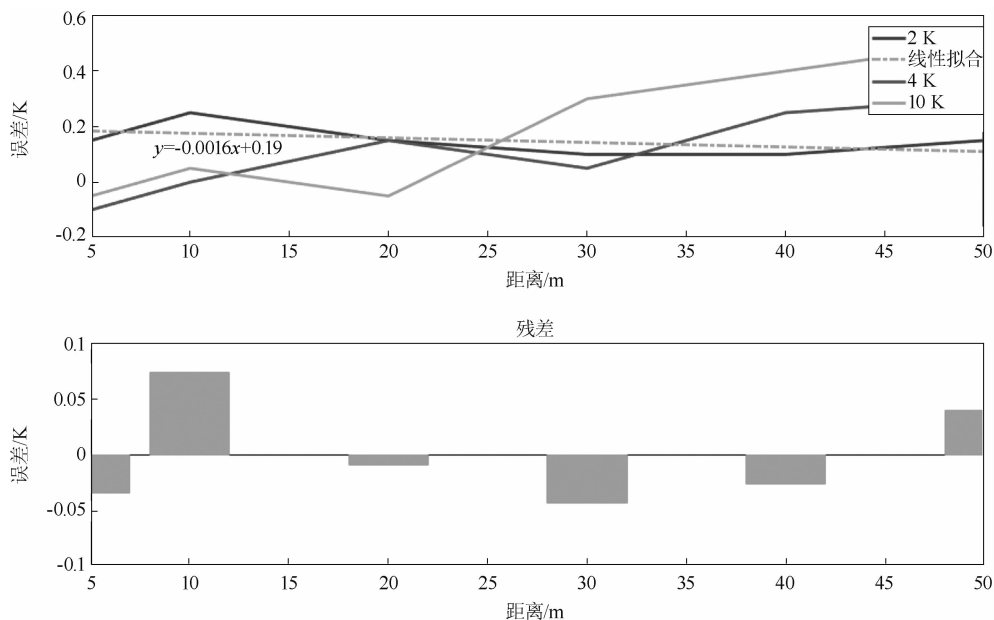


图 1 不同温差下的黑体测温误差趋势图

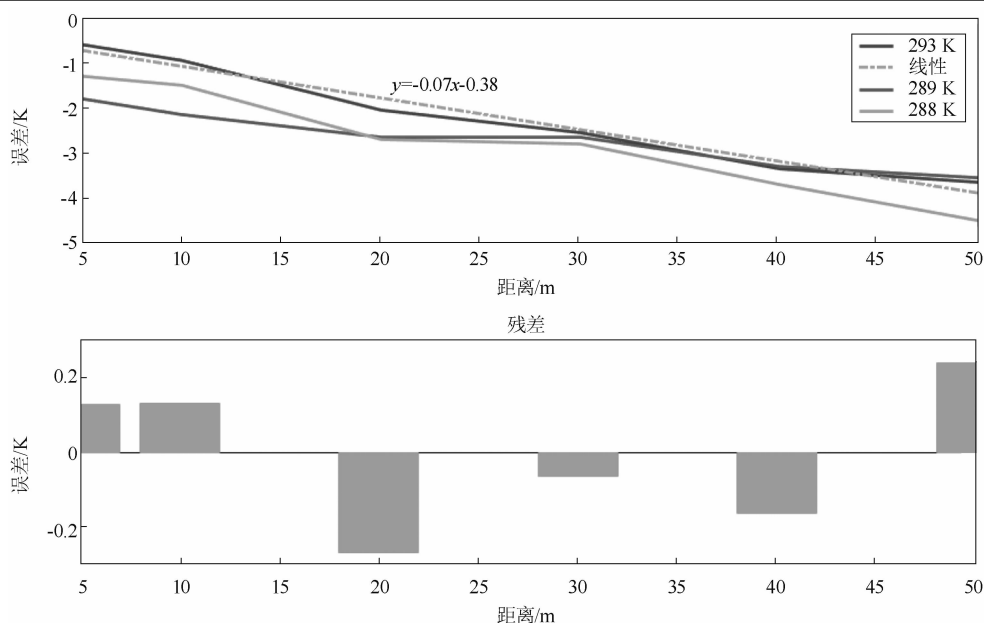


图 2 不同环境温度下的测温误差趋势图

存在较明显的线性关系, 测温结果应进行距离修正。在不同的环境温度下, 仪器本身的噪声会对测温结果产生一定的影响。相对距离产生的影响相对较小, 不同环境温度引起的测温误差没有明显的统计规律。

### 2.3 误差修正

由外场黑体实测温度误差分布可知, 测温误差与距离之间存在一定的线性关系。此外, 仪器本身的噪声及辐射也会产生一定的误差。考虑到外场测温工作的实际情况, 提出了一种基于面源黑体的三点测温修正法。在外场测温中, 同时测量目标温度以及不同距离处的面源黑体温度。基于已知面源黑体的温度, 采用最小二乘拟合方法求解修正系数  $a$ 、 $b$ , 然后求得修正后的目标温度值。建立的修正公式为

$$T' = T + aR + b \quad (4)$$

式中,  $T'$  为修正后的温度,  $T$  为原始测量温度,  $R$  为目标与热像仪之间的距离,  $a$ 、 $b$  为修正系数。

为了检验上述方法的有效性, 在外场试验时将一个面源黑体的温度设定为 293.15 K, 分别采集该黑体在距离仪器 5 m、20 m、50 m 处的温度, 并利用式(4)计算修正系数。将另一个黑体的温度分别设定为 293.15 K、296.15 K 和

299.15 K, 并采用便携式红外热像仪来测量该黑体在不同位置处的温度值。表 5 和表 6 分别列出了修正前后的测温结果。经对比可知, 修正后的测温绝对误差分别由 2.79 K、2.34 K、2.94 K 降至 0.98 K、0.53 K、1.13 K, 标准偏差由 0.61 K、0.96 K、1.13 K 降至 0.42 K、0.13 K、0.28 K, 平均标准偏差由 0.9 K 降至 0.3 K, 精度得到了有效提高。

表 5 修正前的测温结果

距离/m	黑体设定为不同温度时的测试温度/K		
	293.15 K	296.15 K	299.15 K
5	291.45	295.4	297.9
10	291	294.95	297.6
20	290.35	293.95	296.5
30	290.45	293.5	296.05
40	289.6	292.7	295.05
50	289.3	292.35	294.15
平均温度	290.36	293.81	296.21
误差	2.79	2.34	2.94
标准偏差	0.61	0.96	1.13

### 3 小结

本文在实验外场用便携式红外热像仪对不同环境温度 and 不同观测距离下的面源黑体进行了测温实验, 并分析了热像仪外场应用时的主要误差源以及测温误差在距离上的分布特征。

表 6 修正后的测温结果

距离/m	黑体设定为不同温度时的测试温度/K		
	293.15 K	296.15 K	299.15 K
5	291.8	295.75	298.25
10	291.7	295.65	298.3
20	291.75	295.35	297.9
30	292.55	295.6	298.15
40	292.4	295.5	297.85
50	292.8	295.85	297.65
平均温度	292.17	295.62	298.02
误差	-0.98	-0.53	-1.13
标准偏差	0.42	0.13	0.28

结合外场测量的实际情况,提出了一种基于面源黑体的三点温差修正方法。对不同设定温度的面源黑体进行了实测检验,并对比了修正前后的数据。结果表明,本文提出的模型修正方法便于外场操作,修改后的结果与真实值之间的误差控制在 1 K 左右,标准偏差从 0.9 K 降到 0.3 K,大幅提高了外场测温精度。

此外,由于外场实验环境相对复杂,影响测温精度的因素较多,特别是系统噪声容易使结果产生较大偏差。下一步将重点对外场环境下系统噪声的影响特点及削弱方法进行研究。

### 参考文献

- [1] 莫朝霞,陈沅江.我国红外热像检测技术的研究及发展展望[J].*激光与红外*,2014,**44**(12):1300-1305.
- [2] 赵晨阳,冯浩,黄晓敏,等.红外测温监视在爆炸场温度测试中的精度研究[J].*红外技术*,2014,**36**(8):676-679.
- [3] 刘新业,常大定,欧阳伦多.红外热成像在电气设备维护中的应用[J].*红外与激光工程*,2002,**31**(3):220-224.
- [4] 化亚魏,白莉,李杨,等.红外热像仪在建筑节能上的应用研究[J].*吉林建筑大学学报*,2016,**33**(1):63-65.
- [5] 李东,吴航,白玫,等.红外测温仪测温影响因素分析[J].*中国医学装备*,2021,**18**(3):59-62.
- [6] 崔双龙,孙博君,孙晓刚.黑体红外波段辐射亮度响应的通用公式[J].*光谱学与光谱分析*,2020,**40**(5):1329-1333.
- [7] Mushkin A A, Balick L K, Gillespie A R. Extending surface temperature and emissivity retrieval to the mid-infrared (3-5  $\mu\text{m}$ ) using the multispectral thermal imager (MTI) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **98**(2): 141-151.
- [8] 胡剑虹,宁飞,沈湘衡,等.目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响[J].*中国光学与应用光学*,2010,**3**(2):152-156.
- [9] 苏佳伟,石俊生,汪炜稽.距离对红外热像仪测温精度的影响及提高精度的实验研究[J].*红外技术*,2013,**35**(9):587-590.
- [10] Wang J H, Sridhar K, Srinivasan C. Measurement of Temperature Field in Surface Grinding Using Infra-Red (IR) Imaging System [J]. *European Journal of Integrative Medicine*, 2003, **125**(2): 77-81.
- [11] 张勇,王新塞,贺明.距离对红外热像仪测温精度的影响及误差修正[J].*红外*,2011,**32**(2):24-27.
- [12] Yang C L, Dai J M, Liu C. A New Method for Constructing Spectral Emissivity Models for Measuring the Real Temperature of Targets [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2005, **54**(6): 2549-2553.