

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006177

# 高精度红外热成像测温技术研究\*

张志强<sup>1,2</sup>, 王萍<sup>1</sup>, 于旭东<sup>2</sup>, 张剑<sup>2</sup>, 李婷<sup>2</sup>

(1. 天津大学 电气自动化与信息工程学院 天津 300072; 2. 中科和光(天津)应用  
激光技术研究所有限公司 天津 300304)

**摘要:** 红外热成像测温系统由于其远距离、非接触、多目标、高精度的特点,发展非常迅速。在当前新型冠状病毒流行的时期,为快速、高效地筛查出高温人群,及时防控、隔离疫情,红外热成像测温技术凸显了其重要性。测量过程中被测物体温度、环境温度、大气温度、镜头温度、探测器温度等因素,对测温精度都有一定影响,尤其是测温曲线的高精度标定对于红外热像仪测温精度影响最为关键。对红外测温原理进行了研究,建立了红外测温系统输出灰度值与被测物体测量温度的匹配模型,找到一种精确标定测温曲线的方法,提出了应用于高精度测温的  $V - T_r^d$  曲线,以及应用于温漂补偿的  $V - T_{FPA}$ 、 $V - T_{\text{镜筒}}$  和  $V - T_{\text{快门}}$  曲线。经过实验验证,达到了理想的效果,使得测温精度显著提升,测温精度可以达到 0.15 K 以内。

**关键词:** 红外热像仪;测温;温度曲线;标定;误差

**中图分类号:** TN21 TH811 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Study on high accuracy temperature measurement technology of infrared thermal imager

Zhang Zhiqiang<sup>1,2</sup>, Wang Ping<sup>1</sup>, Yu Xudong<sup>2</sup>, Zhang Jian<sup>2</sup>, Li Ting<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;  
2. Harglo Institute of Applied Laser Technology, Tianjin 300304, China)

**Abstract:** Infrared thermal imaging temperature measurement system has developed rapidly due to its characteristics of long distance, non-contact, multi-target and high accuracy. In current epidemic period of 2019-novel coronavirus (COVID-19), infrared thermal imaging temperature measurement technology highlights its importance in order to quickly and efficiently screen out high-temperature population, prevent and control epidemic situation in time. During the measurement process, the temperature of the measured object, ambient temperature, atmospheric temperature, lens temperature, detector temperature and other factors have certain influence on the temperature measurement accuracy, especially the high-accuracy calibration of the temperature measurement curve has the most critical influence on the temperature measurement accuracy of the infrared thermal imager. In this paper, the principle of infrared temperature measurement is studied, a matching model between the output gray value of the infrared temperature measurement system and the measured temperature of the measured object is established, and a method for accurately calibrating temperature measurement curves is found. The  $V - T_r^d$  curves applied to high-accuracy temperature measurement and the  $V - T_{FPA}$ ,  $V - T_{\text{lens}}$  and  $V - T_{\text{shutter}}$  curves applied to temperature drift compensation are proposed. Through experiment verification, the ideal effects were achieved, and the temperature measurement accuracy is significantly improved, which can reach within 0.15 K.

**Keywords:** infrared thermal imager; temperature measurement; temperature curve; calibration; error

## 0 引言

红外热成像技术广泛应用于冶金、石化、安防、消防、医疗、电力等领域<sup>[1]</sup>。近几十年来,比色测温仪、光纤测温仪、扫描测温仪等满足各种需要的红外测温仪相继出现和不断改进,使红外技术的研究与应用有了新的飞跃。红外测温技术由于安全、可靠、非接触、快速、准确、方便、寿命长等不可替代的优势,已被越来越多的企业与厂家所认识和接受。

由于红外热成像测温受到大气温度、大气透射率、气流稳定性、环境温度辐射、被测物体辐射、环境温度反射、热成像系统镜头透射率、镜头温度、系统电路温度变化等诸多因素的影响,致使测量结果构成比较复杂。红外热成像测温属于标定测温,测温精度取决于标定过程中的理论、模型、方法以及修正措施。目前,许多人在高精度测温领域都做出了很多贡献,如李云红等<sup>[2]</sup>研究了物体发射率和大气温度对测温的影响,杜玉玺等<sup>[3]</sup>研究了距离对红外测温的影响和补偿,张艳超等<sup>[4]</sup>研究了热像仪内部温升对测温精度的影响,孙志远等<sup>[5]</sup>研究了双波段比色测温法提升测温精度。红外热成像精确测温技术影响因素多,修正、补偿工作量大,一直是国内外学者研究的热点。上述文献中尚没有从理论分析,建立模型,产生方案到验证方法,系统、完整地做到精确测温的研究。本文对上述内容进行了研究与探索,提出了一套解决高精度测温的标定方法,经过验证,达到了设计目标。

## 1 红外热成像测温原理

红外热像仪是靠接收来自被测物体表面温度辐射来测量温度。而到达红外热像仪探测器上的辐射包括目标自身辐射、环境反射辐射和大气辐射3部分<sup>[6]</sup>。

红外热成像仪接收到的表面辐射照度为:

$$E_{\lambda} = A_0 d^{-2} [\tau_{a\lambda} \varepsilon_{\lambda} L_{b\lambda}(T_0) + \tau_{a\lambda} (1 - \alpha_{\lambda}) L_{b\lambda}(T_u) + \varepsilon_{a\lambda} L_{b\lambda}(T_a)] \quad (1)$$

式中:  $A_0$  为热像仪最小空间张角对应目标的可视面积;  $d$  为该目标到测量仪器的距离; 通常在一定条件下,  $A_0 d^{-2}$  为一个常值;  $\tau_{a\lambda}$  为大气透射率;  $\varepsilon_{a\lambda}$  为大气发射率;  $L_{b\lambda}(T)$  为辐射亮度;  $T_0$ 、 $T_u$ 、 $T_a$  分别为被测物体温度、背景环境温度、大气温度。

入射在红外热像仪镜头上的某一波长的辐射功率为:

$$P_{i\lambda} = E_{\lambda} A_r \quad (2)$$

式中:  $A_r$  为红外热像仪的镜头面积。

通过红外热像仪,光学系统的辐射通量为:

$$P_{d\lambda} = \tau_{op} P_{i\lambda} \quad (3)$$

式中:  $\tau_{op}$  为红外镜头光学系统的透过率。光学系统产生的杂散辐射  $P_c$  与红外热像仪的平均温度  $T_c$  有关,它还包括由光阑和系统的机械元件产生的辐射散射到探测器的部分。这部分辐射可在设计阶段采用高投射材料和冷光阑使其最小化。

探测器敏感元件接收到的辐射为:

$$P_d = P_{i\lambda} + P_{c\lambda} \quad (4)$$

热像仪通常工作在  $3 \sim 5 \mu\text{m}$  或者  $8 \sim 13 \mu\text{m}$  两个波段,探测器将工作波段上的入射辐射积分,并把它转化为一个与能量成正比的电压信号。

热像仪与辐射功率相应的响应电压为:

$$V_d = R_{\lambda} P_d \quad (5)$$

式中:  $R_{\lambda}$  为探测器的光谱响应度,对某台确定的红外热像仪为常值。

在热成像仪中,输出电压信号一般要达到输出电压范围的中值位置,才有利于系统的动态范围调整。因此系统输出增加一个直流偏置电压  $V_0$ , 这样可保证显示单元具有不同的灰度等级。

$$V_{pa} = V_d + V_0 \quad (6)$$

信号可放大到不同的倍数,这通常对应热像系统的不同量程,与系统的灵敏度和动态测量范围有关,最终的信号电压为:

$$V_s = g V_{pa} \quad (7)$$

将式(7)代入式(1)有:

$$V_s = A_r A_0 d^{-2} \tau_{op} g \left\{ \tau_a \left[ \varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{b\lambda}(T_0) d\lambda + 1 - \alpha \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{b\lambda}(T_u) d\lambda \right] + \varepsilon_a \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{b\lambda}(T_a) d\lambda \right\} + g \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} P_{c\lambda} d\lambda + g V_0 \quad (8)$$

式中:  $g$  为系统增益。

$$\text{令 } K = A_r A_0 d^{-2} \tau_{op} g, \text{ 取 } \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{b\lambda}(T) d\lambda = I_R(T),$$

则有:

$$V_s = K \left\{ \tau_a [\varepsilon I_R(T_0) + (1 - \alpha) I_R(T_u)] + \varepsilon_a I_R(T_a) \right\} + V'_0 \quad (9)$$

其中,

$$V'_0 = g \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} P_{c\lambda} d\lambda + g V_0 \quad (10)$$

由于红外热像仪接收的是目标的自身辐射、环境的反射辐射和大气辐射的总和,无法确定各自的份额。通常假定其接收的辐射为某一黑体发射的辐射,因此将红外热成像指示的温度称为辐射温度或表观温度。

$$\frac{V_s - V'_0}{K} = I_R(T_r) \quad (11)$$

式中:  $I_R(T_r)$  为红外热像仪刻度函数。通常是通过标定得到  $I_R(T_r)$  与黑体温度的关系,则上式变为:

$$I_R(T_r) = \tau_a [\varepsilon I_R(T_0) + (1 - \alpha) I_R(T_u)] + \varepsilon_a I_R(T_a) \quad (12)$$

当被测表面为黑体,且大气透过率  $\tau_a = 1, \varepsilon_a = 0$  时,  $I_R(T_r) = I_R(T_0)$ , 热像仪测量的辐射温度就是物体表面的真实温度。当  $\varepsilon < 1$  时,热像仪的辐射温度不等于物体表面的真实温度。如果被测物体为灰体,则  $\alpha = \varepsilon$ ,且  $\varepsilon_a = 1 - \tau_a$ ,则热像仪灰体测温修正计算的常用基本公式为:

$$I_R(T_r) = \tau_a [\varepsilon I_R(T_0) + (1 - \varepsilon) I_R(T_u)] + (1 - \tau_a) I_R(T_a) \quad (13)$$

当近距离测温时  $\tau_a = 1$ ,有:

$$I_R(T_r) = \varepsilon I_R(T_0) + (1 - \varepsilon) I_R(T_u) \quad (14)$$

由普朗克辐射定律可知,

$$I_R(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda L_{b\lambda}(T) d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_\lambda \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} \times \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} d\lambda \quad (15)$$

式中:  $C_1 = 3.7418 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{cm}^2$ ,  $C_2 = 1.4388 \text{ cm} \cdot \text{K}$  分别为第1,第2辐射常数。

对于长波红外热探测器,当不考虑  $R_\lambda$  随波长的变化时,在近环境温度条件下,对上式在  $8 \sim 13 \mu\text{m}$  积分,得到  $I(T)$  随温度变化的关系为:

$$I_R(T) = I(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b d\lambda \approx CT^n \quad (16)$$

其中,在  $8 \sim 13 \mu\text{m}$  时,  $n = 3.9889^{[7]}$ 。在实际应用中  $n = 4$ ,对测量结果影响不大。

将上式代入式(13)得:

$$T_r^n = \tau_a [\varepsilon T_0^n + (1 - \alpha) T_u^n] + \varepsilon_a T_a^n \quad (17)$$

则被测表面真实温度的计算公式为:

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} \left[ \frac{1}{\tau_a} T_r^n - (1 - \alpha) T_u^n - \frac{\varepsilon_a}{\tau_a} T_a^n \right] \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (18)$$

当被测表面满足灰体近似时,  $\varepsilon = \alpha$ ,而且大气发射率  $\varepsilon_a = 1 - \tau_a$ ,则上式(17)可变为:

$$T_r^n = \tau_a [\varepsilon T_0^n + (1 - \varepsilon) T_u^n] + (1 - \tau_a) T_a^n \quad (19)$$

式(19)计算灰体表面真实温度的基本公式,在近距离测量时,可认为大气透过率  $\tau_a = 1$ ,则上式可变为:

$$T_r^n = \varepsilon T_0^n + (1 - \varepsilon) T_u^n \quad (20)$$

当物体温度等于环境温度时,测量温度等于物体表面真实温度。

当物体表面温度很高时,即  $T_0 \gg T_u$ ,此时环境因素的影响可忽略不计,即:

$$T_r^n = \varepsilon T_0^n \quad (21)$$

$$T_0 = \frac{T_r}{\sqrt[n]{\varepsilon}} \quad (22)$$

## 2 高精度红外热成像测温曲线标定

### 2.1 定标温度的获取

红外热成像仪在盲元检测、与非均匀性校正之后,开始做温度标定工作,保证焦平面上每一个像元测量温度值一致。常用的非均匀性校正的方法分为基于标定的非均匀性校正和基于场景的非均匀性校正两种<sup>[8-11]</sup>。采集定标温度设备应有红外热成像仪、高精度黑体、高精度环境温度测量温度计。定标试验需要有稳定的环境温度和高质量的黑体辐射源。

根据式(20)测温公式可知,定标试验最好采用发射率无限接近于1的腔式高精度黑体源,此时可忽略发射率及环境温度对测量数据的影响,认为测量温度即黑体实际设定温度。而当采用发射率稍低的面源黑体辐射源时,应考虑发射率及环境温度引入的测量误差影响。

当采用面源黑体做数据采集时,由于黑体源发射率对采集数据的准确性影响较大,应先用一台高精度红外热像仪测量出黑体的发射率,以保证数据采集的准确性。测量前,可先将黑体温度设置成环境温度,即  $T_0 = T_u$ 。根据式(20)可知,此时测量温度等于黑体设定温度,即  $T_r = T_0$ 。可用此方法验证红外热成像仪的准确性,有两种测量黑体发射率的方法。

1) 在实验室环境下,保持环境温度稳定,背景单一,将黑体温度设置成温度  $T_0$ ,打开热像仪,待热像仪热平衡充分稳定后。用红外热像仪测量温度  $T_r$ ,多次测量取平均值。再用高精度温度计记录下环境温度  $T_u$ 。根据测温公式可知:

$$\varepsilon = \frac{T_r^n - T_u^n}{T_0^n - T_u^n} \quad (23)$$

当采用响应波长为  $8 \sim 13 \mu\text{m}$  的长波红外热像仪时,取  $n = 4$ ,求出  $\varepsilon$  即可。

2) 如果没有高精度温度计测量环境温度,也可以采用双温度法测量发射率。将黑体温度设定为  $T_{01}$ ,用热像仪测量出此时的温度  $T_{r1}$ ;再将黑体温度设定为  $T_{02}$ ,用热像仪测量出此时的温度  $T_{r2}$ ,则可根据式(24)计算黑体发射率  $\varepsilon$ 。

$$\varepsilon = \frac{T_{r1}^n - T_{r2}^n}{T_{01}^n - T_{02}^n} \quad (24)$$

定标温度获取时,在面源黑体的中心位置,划定一块区域,记录该区域内各点对应像元的输出灰度值,多次测量求取平均值。如果有个别像元输出灰度值明显偏离平均值,应利用粗差去除方法予以剔除,将剩下的有效数据继续求取平均值作为定标数据。

记录下黑体设定温度、黑体发射率、环境温度、及对应热像仪输出灰度值。实验中,本文采取黑体  $20^\circ\text{C} \sim$

50°C (293 K~323 K) 区间的 31 个温度值  $T_0$  及得到的热像仪输出灰度值  $V$  作为测温定标曲线的基础数据, 如表 1 所示。

表 1 定标温度修正

Table 1 Calibration temperature correction table

灰度值 $V$	黑体设定温度值 $T_0/K$	黑体发射率 $\varepsilon$	环境温度 $T_u/K$	转换测量温度值 $T_r/K$
6 562	293	0.97	296.40	293.10
6 567	294	0.97	296.40	294.07
6 572	295	0.97	296.40	295.04
6 578	296	0.97	296.40	296.01
6 580	297	0.97	296.40	296.98
6 585	298	0.97	296.40	297.95
6 589	299	0.97	296.40	298.92
6 595	300	0.97	296.40	299.89
6 598	301	0.97	296.40	300.87
6 604	302	0.97	296.40	301.84
6 608	303	0.97	296.40	302.81
6 612	304	0.97	296.40	303.78
6 618	305	0.97	296.40	304.75
6 623	306	0.97	296.40	305.72
6 630	307	0.97	296.40	306.70
6 635	308	0.97	296.40	307.67
6 640	309	0.97	296.40	308.64
6 646	310	0.97	296.40	309.62
6 650	311	0.97	296.40	310.59
6 655	312	0.97	296.40	311.57
6 661	313	0.97	296.40	312.54
6 665	314	0.97	296.40	313.51
6 672	315	0.97	296.40	314.49
6 677	316	0.97	296.40	315.46
6 682	317	0.97	296.40	316.44
6 689	318	0.97	296.40	317.41
6 696	319	0.97	296.40	318.39
6 702	320	0.97	296.40	319.36
6 708	321	0.97	296.40	320.34
6 713	322	0.97	296.40	321.32
6 719	323	0.97	296.4	322.29

2.2 定标温度的修正

目前的研究中, 在获取定标数据以后, 习惯直接寻找热像仪输出的灰度值  $V$  与黑体设定温度  $T_0$  的对应关系

$V-T_0$  曲线<sup>[12]</sup>。事实上, 黑体设定温度与热像仪输出灰度值是两个设备的数据并非直接相关。在获取数据的过程中, 又引入了黑体发射率和环境温度等中间因素, 造成黑体设定温度与热像仪测量温度存在较大偏差。图 1 所示为黑体设定温度从 293 K 逐渐升温至 323 K 时, 黑体温度与热像仪测量温度的比较结果。

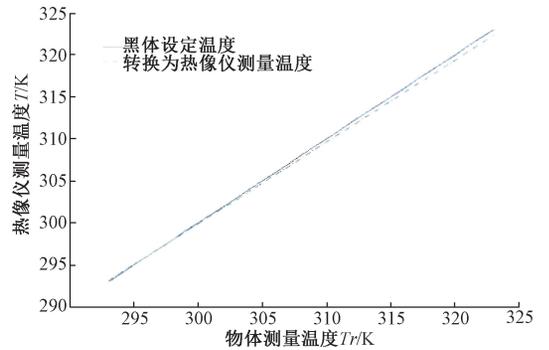


图 1 黑体设定温度与热像仪测量温度比较

Fig.1 Comparison between blackbody setting temperature and the temperature measured with thermal imager

由图 1 可以看出, 只有当黑体设定温度与环境温度相同时, 黑体设定温度  $T_0$  才等于热像仪的测量温度  $T_r$ , 当黑体设定温度向低温和高温两个方向设置时, 温度偏差逐渐放大, 此时显然求取黑体设定温度与热像仪输出灰度值之间的关系是不恰当的, 这是造成热像仪测温曲线不准的主要因素之一。应该有一个去除黑体发射率和环境温度等中间因素影响的过程, 将两个设备的参数转换成一个设备的参数, 再求相互对应关系, 才是正确的方法。

利用实验时的黑体发射率  $\varepsilon$  和环境温度  $T_u$ , 依据式(20), 将黑体设定温度  $T_0$  转换成理论测量温度  $T_r$ , 再将热像仪输出灰度值  $V$  与测量温度  $T_r$  对应起来寻找  $V-T_r$  定标曲线。定标温度修正的实验记录如表 1 所示。

2.3 测温曲线的拟合

在获取到热像仪灰度值  $V$  与热像仪测量温度  $T_r$  以后, 需要求得他们之间的关系, 得到高精度的测温曲线。在许多文献里, 都是直接将  $V-T_r$  曲线绘制出来进行拟合<sup>[13]</sup>, 用线性、二次项、三次项、指数函数、幂函数, 或者样条差值等方式。热像仪输出灰度值  $V$  与测量温度  $T_r$  曲线如图 2 所示, 并利用线性函数进行了拟合, 得到的结果并不理想。显然热像仪输出灰度值  $V$  与测量温度  $T_r$  不是线性关系。

事实上, 通过测温原理分析公式:

$$\frac{V_s - V'_0}{K} = I_r(T_r)$$

$$I_r(T) = I(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_b d\lambda \approx CT^m$$

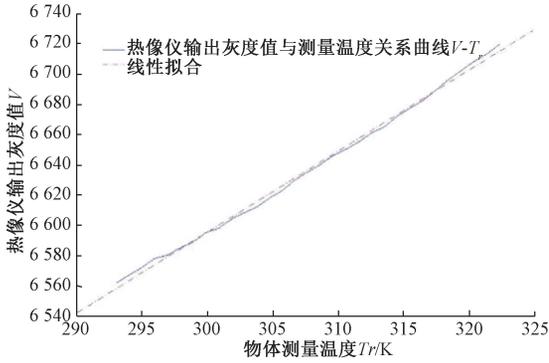


图2 热像仪输出灰度值  $V$  与测量温度  $T_r$  拟合曲线

Fig.2 Fitting curve between output gray value  $V$  of thermal imager and measured temperature  $T_r$

进一步得:

$$\frac{V_s - V'_0}{K} = CT_r^n \quad (25)$$

$$V_s = K'T_r^n + V'_0 \quad (26)$$

可知,热像仪输出灰度值  $V$  (等同于热像仪输出电压值变化)与热像仪测量温度  $T_r$  的  $n$  次方成线性变化关系。单纯对  $V - T_r$  进行拟合是不恰当的。应该求出  $V - T_r^n$  的对应关系并进行拟合得到测温曲线。根据上一节分析,当采用  $8 \sim 13 \mu\text{m}$  长波红外热像仪时,  $n = 4$ 。图3是将热像仪输出灰度值与测量温度4次方 ( $V - T_r^4$ ) 进行拟合的曲线图。

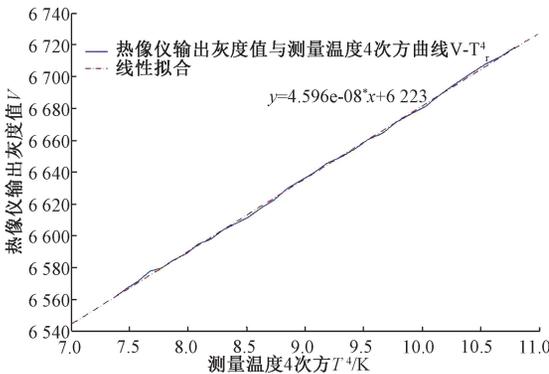


图3 热像仪输出灰度值  $V$  与测量温度4次方  $T_r^4$  线性拟合曲线 ( $V - T_r^4$ )

Fig.3 Linear fitting curve between output gray value  $V$  of thermal imager and fourth power of measured temperature  $T_r^4$  ( $V - T_r^4$ )

由图3可知  $V_s = 4.596e^{-8}T_r^4 + 6223$  是很好的线性关系,符合理论推导关系。采用  $V - T_r$  直接拟合测温曲线也是造成热像仪测温曲线不准的主要因素之一。下面采用二次线性函数、指数函数、幂函数、样条差值继续对  $V - T_r^n$  曲线进行拟合,以获取更高精度的测温曲线。指数函数、幂函数在拟合过程中误差较大,不再加以讨论。

图4列出来线性拟合、二次方拟合、样条差值拟合的对比。虽然在  $293 \sim 323 \text{ K}$  区间,二次方拟合和样条差值拟合可以获得更好的拟合结果,但是系统运算量和复杂度将大大增加,对热像仪的硬件配置造成很大挑战。而且在  $293 \sim 323 \text{ K}$  区间以外,测温结果将严重偏离物体真实温度,尤其是样条差值拟合差距太大,不可取。实际应用中综合考虑拟合精度与运算能力,应采用线性拟合或者二次方拟合。事实上,由于定标采集也存在测量及采集误差,采用二次方拟合的结果过度依赖现有数据,并不一定代表真实曲线。而线性拟合在测量中精度已经足够。

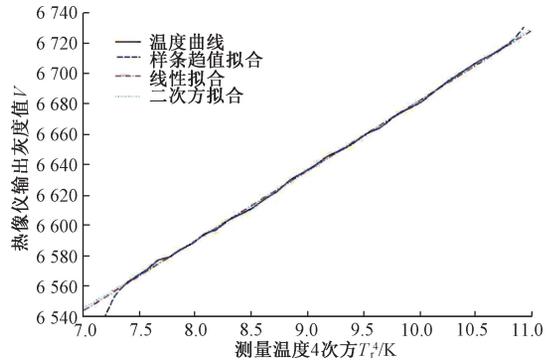


图4 红外热像仪  $V - T_r^4$  曲线多种函数拟合

Fig.4 Multiple function fitting of  $V - T_r^4$  curve of infrared thermal imager

## 2.4 测量结果的修正与补偿

经过上面的精确标校,红外热像仪的测温精度可以达到  $2^\circ\text{C}$  以内,对于工业级测温应用已经足够,但是对于人体测温或更高测温需求,这样的精度显然不能满足要求,还需要对环境温度、快门温度、探测器温度等变化引起的温度漂移做进一步的修正和补偿<sup>[14-16]</sup>。

### 1) FPA 温度变化的影响

探测器阵列 FPA 在刚开机时温度跳动较大,使得热像仪输出灰度值跟随波动<sup>[17-18]</sup>,测量温度值会发生跳跃,随着 FPA 温度逐渐升高,热像仪输出灰度值逐渐变低,测量温度值也相应变低,必须加以补偿,FPA 温度对测量结果的影响如图5所示。

如图5所示,只要求出  $V - T_{FPA}$  曲线加以补偿即可,实际上当热像仪热平衡以后,FPA 温度变化波动较小,经过补偿以后 FPA 温度变化对测温结果影响较小。

### 2) 零位漂移的影响

由于系统噪声、环境温度变化等影响,每次开机热像仪输出灰度值不能保证和上次绝对一致,导致测量出现偏差。如果将红外热像仪从绝对测温变成相对测温,将很大程度上解决这种噪声漂移造成的影响。相对测温原理是用一个参考体,通过测量参考体的温度,将温差补偿到被测目标上。由式(20)可知:

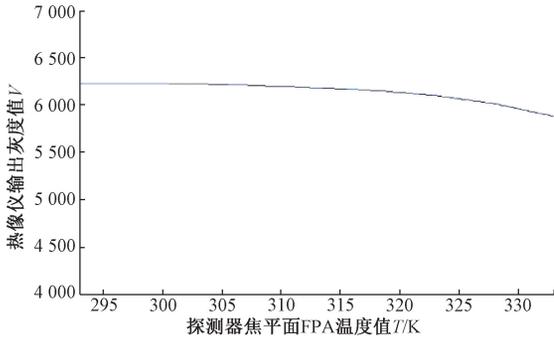


图5 探测器焦平面 FPA 温度变化对热像仪输出灰度值的影响

Fig.5 Influence of temperature change of detector focal plane FPA on output gray value of thermal imager

$$T_{r0}^n = \varepsilon_0 T_{00}^n + (1 - \varepsilon_0) T_{uo}^n \quad (27)$$

$$T_{rr}^n = \varepsilon_r T_{0r}^n + (1 - \varepsilon_r) T_{ur}^n \quad (28)$$

式中:  $T_{r0}$ 、 $T_{rr}$ 、 $T_{00}$ 、 $T_{0r}$ 、 $\varepsilon_0$ 、 $\varepsilon_r$  分别为目标和参考体的测量温度、真实温度和发射率。假定目标和参考体相邻较近或者温度相当,即  $T_{uo} = T_{ur} = T_u$ ,则:

$$T_{r0}^n - T_{rr}^n = \varepsilon_0 T_{00}^n - \varepsilon_r T_{0r}^n + (\varepsilon_r - \varepsilon_0) T_u^n \quad (29)$$

$$T_{00} = \left\{ \frac{T_{r0}^n - T_{rr}^n}{\varepsilon_0} + \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0} T_{0r}^n + \left( 1 - \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0} \right) T_u^n \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (30)$$

现实中采用热像仪快门做参考体,快门发射率一般可认为是黑体,  $\varepsilon_r = 1$ , 在快门处安装温度传感器实时测量快门温度,对测量结果进行修正,可大大提升测量精度。

$$T_{00} = \left\{ \frac{T_{r0}^n - T_{rr}^n}{\varepsilon_0} + \frac{1}{\varepsilon_0} T_{0r}^n + \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon_0} \right) T_u^n \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (31)$$

当被测目标发射率为 1 时,有:

$$T_{00} = \{ T_{r0}^n - T_{rr}^n + T_{0r}^n \}^{\frac{1}{n}} \quad (32)$$

经过实验验证,当系统热平衡达到稳定状态时,快门温度基本等于 FPA 温度,如图 6 所示。因此在要求不高的情况下,可以用 FPA 温度代替快门传感器测量温度,从而可以降低系统复杂度,提升系统可靠性。

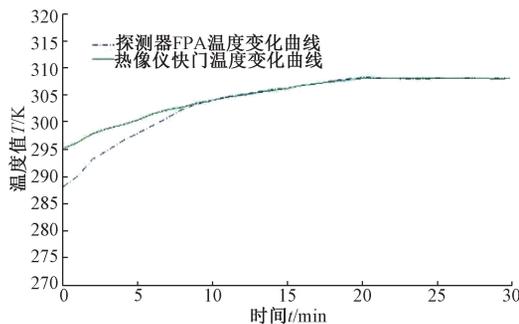


图6 快门温度与 FPA 温度变化曲线

Fig.6 Shutter temperature versus FPA temperature curve

### 3) 镜筒温度和快门温度造成的温漂影响

除上述影响以外,还有两种情况使得测量过程中出现温度漂移。一种是由于在快门修正完测量温度的一段时间内,由于使用的一直是上一阶段快门温度数据,而在此时间内镜筒内部温度会继续变化,从而造成不能及时更新快门温度数据造成的温度漂移,即镜筒温度变化造成的温度漂移。此时可根据测量精度要求,加快速门校正频次,或算出  $V - T_{\text{镜筒}}$  曲线,加以补偿。方法为使热像仪正对一恒定温度黑体,保持快门打开不动,记录快门温度和热像仪输出灰度值,从而汇出  $V - T_{\text{镜筒}}$  曲线,如图 7 所示。测量时,实时用曲线上的点(镜筒温度即为快门传感器的实时测量温度)代替上一阶段快门温度数据进行修正。

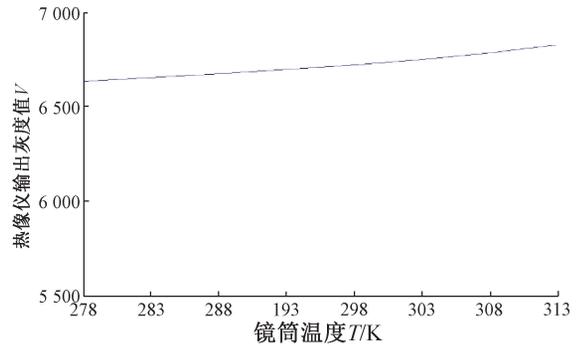


图7 热像仪镜筒温度变化对输出灰度值影响曲线  $V - T_{\text{镜筒}}$

Fig.7 Influence curve of lens barrel temperature change of thermal imager on output gray value ( $V - T_{\text{lens}}$ )

另一种是随着热像仪镜头内部温度升高,被测目标和快门的测量值都将升高,但由于快门在镜头内部,而被测目标在镜头外部,镜头的透过率一般为 90% 左右,造成快门和目标测量温度升高幅度不同,造成测温结果反而偏低。此种温漂记为快门温度变化造成的温度漂移。此时可以利用场景校正代替快门校正,即选取一块均匀的环境温度的物体挡在镜头前进行校正,这不仅消除了温漂,同时也解决了因为镜头光学设计、加工误差引入的非均匀性,在高精度测温场景中,经常采用场景校正方法消除镜头的影响。另外也可以同样求出  $V - T_{\text{快门}}$  曲线,加以修正和补偿。方法为使热像仪正对一恒定温度黑体,保持快门每分钟校正一次,校正时记录下快门温度  $T_{\text{快门}}$  和热像仪输出灰度值  $V$ ,拟合出曲线,如图 8 所示。测量时,实时用曲线上的点进行测量结果的补偿。

这两种温漂相互作用,会使热像仪系统从刚开机到热平衡稳定之前的测温结果出现上下跳动,但最终将趋于稳定。温漂补偿前后测量结果对比如图 9 所示。所以在高精度测温时,一般要开机 0.5 h 以上,当这些温漂因

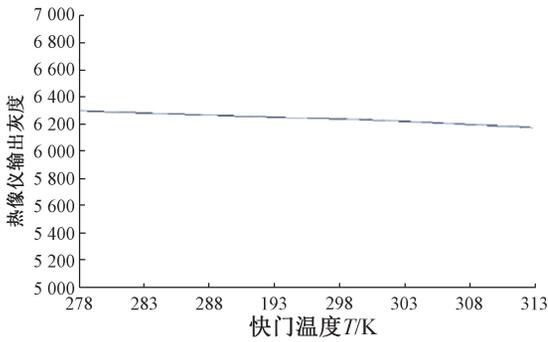


图 8 热像仪快门温度变化对输出灰度值影响  
曲线  $V-T_{\text{快门}}$

Fig.8 Influence curve of thermal imager shutter temperature change on output gray value ( $V-T_{\text{shutter}}$ )

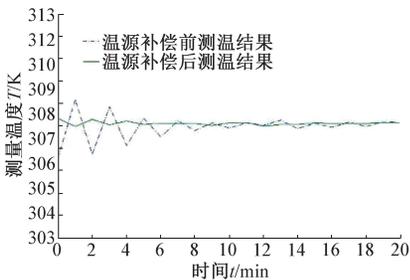


图 9 温漂补偿前后测量结果对比

Fig.9 Comparison of measurement results before and after temperature drift compensation

素影响消失以后,再进行测量工作。

### 3 红外热成像实验结果验证

采用自研的红外热成像仪进行了实验测试与验证。探测器选用韩国 I3 探测器,响应波长  $8 \sim 13 \mu\text{m}$ ,像元尺寸  $17 \mu\text{m}$ ,阵列规格  $384 \times 288$ ,NETD 小于  $50 \text{ mK}$ ,帧率  $30 \text{ Hz}$ ,镜头焦距  $19 \text{ mm}$ ,网口输出。黑体采用以色列 CI 公司的 SR800R-12 A-ET 扩展面黑体,发射面尺寸  $12'' \times 12''$ ,绝对温度范围  $5^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$ ,温度精度:  $0.007^\circ\text{C} @ T_{\text{abs}} < 50^\circ\text{C}$ ,  $0.015^\circ\text{C} @ T_{\text{abs}} > 50^\circ\text{C}$ ,温度稳定性:  $\pm 0.002^\circ\text{C} @ dt < \pm 10^\circ\text{C}$ ,分辨率:  $0.001^\circ\text{C}$ ,发射率:  $0.97 \pm 0.02$ ,均匀性:  $\pm 0.03^\circ\text{C}$ ,控制方式:以太网。实验用红外热成像仪及黑体目标源如图 10 所示。

将设计好的红外热像仪进行测温准确度和测温重复性两项指标进行测试。经过实验验证,测温精度可达  $0.15 \text{ K}$ 。

#### 1) 测温准确度

标准黑体源温度分别设置在测量范围内 ( $303 \text{ K}$  和  $315 \text{ K}$ ) 的温度  $T_b$ ,热像仪在有效工作距离内对黑体源成



图 10 实验用红外热成像仪和黑体目标源

Fig.10 The infrared thermal imager and blackbody target source used in the experiment

像,调至图像最佳,工作稳定  $30 \text{ min}$  后开始测量。重复测量黑体温度 5 次,记下每次温度测量值  $T_i$ ,按式(1)计算测温准确度  $a$ 。

$$a = \frac{\sum_{i=1}^5 |T_b - T_i|}{5} \quad (33)$$

式中: $a$  为测温准确度; $T_b$  为黑体源的温度; $T_i$  为每次测量的温度值。测量结果如表 2 所示。

表 2 测温准确度 (环境温度  $286.5 \text{ K}$ )

Table 2 Temperature measurement accuracy (ambient temperature  $286.5 \text{ K}$ )

测量次数	黑体源的温度 ( $T_b$ )	测量值 ( $T_i$ )	偏差 $ T_b - T_i $	测温准确度 ( $a$ )
1	303	303.11	0.11	0.094
2		302.90	0.1	
3		302.88	0.12	
4		303.01	0.01	
5		302.87	0.13	
6	315	314.85	0.15	0.120
7		314.83	0.17	
8		314.93	0.07	
9		314.80	0.2	
10		314.99	0.01	

#### 2) 测温重复性

标准黑体源温度设置在测温范围内任选一个温度  $T$ ,热像仪在有效工作距离对黑体成像调至图像最佳,待稳定工作  $30 \text{ min}$  后开始测量。重复测量温度 5 次,记下每次的测量值  $T_i$ ,按式(34)、(35)计算温度测量重复性

b. 测量结果如表3所示。

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^5 T_i}{5} \quad (34)$$

$$b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\bar{T} - T_i)^2}{5}} \quad (35)$$

式中:  $\bar{T}$  为平均温度;  $T_i$  为每次测量的温度值;  $n$  为测量次数;  $b$  为测量重复性。

表3 温度测温重复性(环境温度 286.5 K)

Table 3 Temperature measurement repeatability (ambient temperature 286.5 K)

测量次数	黑体温度 $T$	测量值 $T_i$	五次均值 $\bar{T}$	测量重复性 $b$
1		309.86		
2		309.85		
3	310	309.97	309.90	0.05
4		309.98		
5		309.86		

## 4 结 论

本文通过分析理论,建立合适的测温模型并进行仿真、拟合,得到了理想的测温标定曲线,并对整个测温标定进行了详细设计及分析,对温度标定数据进行了反向推导与匹配,提出了应用于高精度测温的  $V - T_{\text{镜筒}}^d$  曲线,以及应用于温漂补偿的  $V - T_{\text{FPA}}$ 、 $V - T_{\text{镜筒}}$  和  $V - T_{\text{快门}}$  曲线。经过实验验证,方法有效,到达了理想的测温精度。实验中,采用自研的红外热成像仪进行测试。事实上,该方法从红外测温技术原理进行研究,具有普遍适用性,同样适合其他厂家红外热像仪的测温应用。

## 参考文献

- [1] 张志强,王萍,于旭东,等.红外热像仪成像评估系统设计[J].红外,2020,41(6):17-24.  
ZHANG ZH Q, WANG P, YU X D, et al. Design of imaging evaluation system for infrared thermal imager[J]. Infrared, 2020,41(6):17-24.
- [2] 李云红,孙晓刚,原桂彬.红外热像仪精确测温技术[J].光学精密工程,2007,15(3):1336-1341.  
LI Y H, SUN X G, YUAN G B. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(3):1336-1341.
- [3] 杜玉玺,胡振琪,葛运航,等.距离对不同强度热源红外测温影响及补偿[J].红外技术,2019,41(10):

976-981.

DU Y X, HU ZH Q, GE Y H, et al. Distance influence and compensation of infrared temperature measurement with different intensity heat sources [J]. Infrared Technology, 2019,41(10):976-981.

- [4] 张艳超,高策,刘建卓,等.非制冷热像仪内部温升对测温精度的影响修正[J].中国光学,2018,11(4):669-676.

ZHANG Y CH, GAO C, LIU J ZH, et al. Correction of temperature measurement accuracy affected by internal temperature rise in uncooled thermal imager[J]. Chinese Optics, 2018,11(4):669-676.

- [5] 孙志远,李清安,乔彦峰,等.提高红外测温系统测温精度的研究[J].仪器仪表学报,2006,27(6):67-69.

SUN ZH Y, LI Q AN, QIAO Y F, et al. Study on raising the precision of infrared temperature measurement system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006,27(6):67-69.

- [6] 杨立.红外热像仪测温计算与误差分析[J].红外技术,1999,21(4):20-24.

YANG L. Calculation and error analysis of temperature measurement using thermal imager [J]. Infrared Technology, 1999, 21(4):20-24.

- [7] 杨立.红外热成像测温原理与技术[M].北京:科学出版社,2015.

YANG L. Principle and technology of infrared thermography temperature measurement [M]. Beijing: Science Press, 2015.

- [8] 刘慧,朱明超,吴泽鹏,等.红外焦平面阵列非均匀性自适应校正方法[J].红外与激光工程,2014,43(5):1364-1369.

LIU H, ZHU M CH, WU Z P, et al. Adaptive nonuniformity correction method for infrared focal plane arrays [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5):1364-1369.

- [9] 朱瑞飞,王超,魏群,等.红外探测器非均匀性校正系统研制[J].红外与激光工程,2013,42(7):1669-1673.

ZHU R F, WANG CH, WEI Q. Manufacture of nonuniformity correction system for infrared detector[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(7):1669-1673.

- [10] REN J L, CHEN Q, QIAN W X, et al. Multiframe registration based adaptive nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays[J]. J. Infrared Millim Waves, 2014,33(2):122-128.

- [11] 钱润达,赵东,周慧鑫,等.基于加权引导滤波与时域高通滤波的非均匀性校正算法[J].红外与激光工程,2018,47(12):1-6.

QIAN R D, ZHAO D, ZHOU H X, et al. Non-uniformity

- correction algorithm based on weighted guided filter and temporal high-pass filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018,47(12):1-6.
- [12] 张晓晔,徐超,何利民,等.非制冷红外热像仪人体表面温度场测量及误差修正[J].*红外与激光工程*,2016,45(10):1004003:1-7.  
ZHANG X Y, XU CH, HE L M, et al. Temperature field of body surface measurement by uncooled infrared thermal imager and error correction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016,45(10):1004003:1-7.
- [13] 官上洪,杨海波,邵铭,等.基于曲线拟合的红外成像测温定标方法研究[J].*光电技术应用*,2018,33(5):49-54.  
GUAN SH H, YANG H B, SHAO M, et al. Research on calibration method of infrared imaging temperature measurement based on curve fitting [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2018,33(5):49-54.
- [14] 徐坤,赵麟,袁圆,等.医用红外测温仪测量误差分析及补偿试验研究[J].*电子测量技术*,2014,37(10):104-108.  
XU K, ZHAO L, YUAN Y, et al. Measurement error analysis and compensation experiment research for medicinal infrared thermometer [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014,37(10):104-108.
- [15] 孙志远,乔彦峰,朱玮.红外探测器的漂移特性对测温精度的影响[J].*激光与红外*,2008.3,38(3):238-241  
SUN ZH Y, QIAO Y F, ZHU W. Influence of IRFPA drifting characteristic on measurement precision [J]. *Laser & Infrared*, 2008,38(3):238-241.
- [16] 李野.红外热像仪精准测温技术模型研究[D].长春:长春理工大学,2016.  
LI Y. Study on precise temperature measurement technology model of infrared thermal imager [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
- [17] 范春利,杨立,华顺芳.热探测器温度对非制冷红外热

- 像仪测温的影响[J].*红外技术*,2002,24(5):22-24.  
FAN CH L, YANG L, HUA SH F. Effect of the temperature of thermal detector on temperature measurement of uncooled infrared imager [J]. *Infrared Technology*, 2002. 9,24(5):22-24.
- [18] 姚婷,梁成文,李凯扬.探测器温度对非制冷红外热像仪人体体温的影响与修正[J].*红外技术*,2016,38(11):984-989.  
YAO T, LIANG CH W, LI K Y. Effect of detector temperature on the human body temperature measurement of uncooled infrared thermal imager and its correction [J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(11):984-989.

### 作者简介



**张志强**,2004年于天津理工大学获得学士学位,2007年于天津大学获得硕士学位,现为天津大学博士生,中国科学院空天信息创新研究院高级工程师,主要研究方向为红外热成像、激光应用技术、机器视觉检测。  
E-mail:zqz411@163.com

**Zhang Zhiqiang** received bachelor degree from Tianjin University of Technology in 2004 and master degree in 2007 from Tianjin University. He is now a doctoral student in Tianjin University. He is a senior engineer in Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences. His research interest includes infrared thermal imaging technology, laser application technology and machine vision detection.



**王萍**,1981年,1991年,2005年于天津大学分别获得学士、硕士和博士学位,现为天津大学教授,主要研究方向为智能检测与控制、电力电子变换技术。  
E-mail: pingw@tju.edu.cn

**Wang Ping** received her B. Sc. M. Sc. and Ph. D. degrees all from Tianjin University in 1981, 1991 and 2005, respectively. She is now a professor in Tianjin University. Her main research direction is intelligent detection and control, power electronic conversion technology.