

文章编号: 1672-8785(2011)02-0001-04

# 非致冷红外焦平面成像系统辐射 测温技术研究

张艳超 赵 建 孙 强 刘建卓 曲 锋

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033)

**摘要:** 为了消除由非致冷红外焦平面自身温度变化造成的辐射测温偏差, 提出了一种基于 G-t(黑体辐射灰度 - 探测器工作温度) 标准曲线进行辐射测温的新方法。该方法从热辐射理论和热像仪测温原理出发, 利用实验测得的 G-t 标准温度关系曲线, 并结合灰体表面真实温度的计算公式, 最终实现了非致冷红外焦平面成像系统的高精度辐射测温。实验结果表明, 当探测器的工作温度在 26 ℃ ~ 35 ℃、黑体温度在 35 ℃ (308K) ~ 45 ℃ (318K) 时, 绝对温度偏差低于 1K, 有效地消除了非致冷红外焦平面自身的温度变化对辐射测温精度的影响。

**关键词:** 红外热像仪; 非致冷红外焦平面成像系统; 辐射测温; 探测器温度效应

中图分类号: P407.6 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.02.001

## Research on Radiation Thermometry Using Uncooled Infrared Focal Plane Imaging System

ZHANG Yan-chao, ZHAO Jian, SUN Qiang, LIU Jian-zhuo, Qu Feng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese  
Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to eliminate the measurement deviation caused by the temperature variation of an uncooled infrared focal plane array, a new radiation temperature measurement method based on the standard G-t (Gray level detected from a blackbody-Temperature of an infrared detector) curves is proposed. According to the thermal radiation theory and the temperature measurement principle of a thermal imager, the standard G-t curves measured in the experiment are combined with the real temperature formula for a graybody. Finally, the radiation thermometry with high precision is realized by using an uncooled infrared focal plane imaging system. The experimental result shows that when the detector is operating in the temperature range from 26 ℃ to 35 ℃ and the blackbody is in the temperature range from 35 ℃ (308K) to 45 ℃ (318K), the uncooled infrared focal plane imaging system has its absolute temperature measurement deviation less than 1 K and the influence of the temperature variation of the uncooled infrared focal plane array itself on the radiation thermometry precision is eliminated effectively.

**Key words:** thermal imager; uncooled infrared focal plane imaging system; radiation thermometry; temperature effect of detector

收稿日期: 2010-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60977001)

作者简介: 张艳超 (1984-), 女, 吉林长春人, 硕士, 研究实习员, 主要从事红外成像系统方面的研究。E-mail:  
zhangyanchaomn@126.com

## 1 引言

随着近年来非致冷红外焦平面成像技术的不断突破和实用化<sup>[1]</sup>，非致冷红外焦平面成像系统以其小型化、寿命长、成本低、功耗低和可靠性强<sup>[2]</sup>等优点在红外成像及测温领域越来越发挥出无可比拟的优越性。

将非致冷红外焦平面成像组件应用在红外热像仪系统中，可以检测目标伪装效果和测量辐射温度。目前采用非致冷红外焦平面的成像系统较为成熟，然而能准确测量目标辐射温度的产品并不多。其主要原因是存在较多影响辐射测温准确性的因素。以前的研究工作主要集中在致冷型红外焦平面阵列的定标研究<sup>[3,4]</sup>以及非致冷红外焦平面成像系统的非均匀矫正<sup>[5,6]</sup>上，而有关非致冷红外焦平面成像系统绝对定标的研究成果却很少。虽然文献[7]研究了探测器工作温度效应对辐射定标的影响，但未给出探测器在不同工作环境温度下应用于红外测温的具体方法。本文针对电阻微测辐射热计型非致冷红外焦平面成像系统，从热辐射理论和红外热像仪的测温原理出发，结合实验数据结果，分析目标辐射温度 $T_0$ 、目标检测灰度 $G$ 以及探测器工作温度 $t$ 三者之间的关系模型，以实现探测器在不同工作温度下的高精度辐射测温。

## 2 红外测温原理

### 2.1 黑体检测灰度 $G$ 与表面辐射温度 $T_0$ 的关系模型

根据热辐射理论和红外测温原理，文献[8]推导出了热像仪测温通用的基本公式：

$$V_s = K\{\tau_a[\varepsilon f(T_0) + (1 - \alpha)f(T_u)] + \varepsilon_a f(T_a)\} \quad (1)$$

式中， $V_s$ 为与辐射功率相对应的信号电压； $\tau_a$ 为大气光谱透射率； $\varepsilon$ 为目标表面发射率； $\alpha$ 为目标光谱吸收率； $T_0$ 为目标表面温度； $T_u$ 为目标环境温度； $T_a$ 为大气温度； $\varepsilon_a$ 为大气发射率； $K = A_R A_0 d^{-2}$ ， $A_R$ 为热像仪最小空间张角所对应的目标可视面积， $d$ 为该目标到测量仪的距离（通常在一定条件下， $A_0 d^{-2}$ 为常值）， $A_0$ 为热像

仪的透镜面积，也为定值，因此 $K$ 在此式中可被认为是一个参数常量； $f(T) = \int_{\Delta\lambda} R_\lambda L_{b\lambda}(T) d\lambda$ ， $R_\lambda$ 为探测器的光谱响应度<sup>[9]</sup>， $L_{b\lambda}(T)$ 为物体表面的光谱辐射亮度。

对于一些非金属表面，若满足灰体近似，则 $\varepsilon = \alpha$ 。对于大气，认为 $\varepsilon_a = \alpha_a = 1 - \tau_a$ ，则

$$V_s = K\{\tau_a[\varepsilon f(T_0) + (1 - \varepsilon)f(T_u)] + (1 - \tau_a)f(T_a)\} \quad (2)$$

在近距离进行测量时，可以忽略大气吸收，即 $\tau_a = 1$ ，则

$$V_s = K[\varepsilon f(T_0) + (1 - \varepsilon)f(T_u)] \quad (3)$$

当被测表面为标准辐射源黑体时，发射率 $\varepsilon = 1$ ，则由式(3)可进一步得到：

$$V_s = Kf(T_0) \quad (4)$$

由普朗克辐射定律<sup>[10]</sup>可知

$$\begin{aligned} f(T) &= \int_{\Delta\lambda} R_\lambda L_{b\lambda}(T) d\lambda \\ &= \int_{\Delta\lambda} R_\lambda \frac{c_1}{\pi} \lambda^{-5} [\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1]^{-1} d\lambda \end{aligned} \quad (5)$$

式中， $c_1 = 3.7418 \times 10^{-4} \text{W} \cdot \text{cm}^2$  为第一辐射常数， $c_2 = 1.4388 \text{cm} \cdot \text{K}$  为第二辐射常数。

对于响应波段为 $8\mu\text{m} \sim 13\mu\text{m}$  的 HgCdTe 探测器，由式(5)积分可得<sup>[11]</sup>：

$$f(T) \approx CT^4 \quad (6)$$

式中， $C$ 为比例常数。

将式(6)代入式(4)，得到：

$$V_s = K\varepsilon f(T_0) = KCT_0^4 \quad (7)$$

对于本文使用的探测器，辐射功率相对应的信号电压 $V_s$ 与检测灰度 $G$ 成线性关系，则根据式(7)得到的检测灰度 $G$ 与黑体辐射温度 $T_0$ 的关系式，可进一步得出：

$$G = aT_0^4 + b \quad (8)$$

也就是说，对于 $8\mu\text{m} \sim 13\mu\text{m}$  的 HgCdTe 探测器，黑体检测灰度与黑体辐射温度的四次方

成线性关系。实验表明, 在不同环境温度下, 参数  $a$  和  $b$  的值不相同。若要使探测器在不同的工作环境温度下准确地测量温度, 首先需要确定不同环境温度下相应的参数  $a$  和  $b$  的值。

## 2.2 红外测温算法

为了计算不同工作温度下相应的参数  $a$  和  $b$  的值, 本文采取如下方法:

(1) 将黑体温度分别设为  $T_1 = 35^\circ\text{C}$  (308K) 和  $T_2 = 45^\circ\text{C}$  (318K)。在每个设定温度下, 利用高低温实验箱连续改变探测器的工作温度  $t$ , 并记录下每个温度  $t$  所对应的黑体检测灰度  $G$ 。如此分别在每个设定黑体温度下将探测器温度  $t$  的变化过程重复五次, 并对测得的数据求平均值, 再利用最小二乘法对其进行拟合, 最终得到以下一组关系式:

$$G_1 = m_1 t + n_1 \quad (9)$$

$$G_2 = m_2 t + n_2 \quad (10)$$

其中, 式(9)为黑体温度  $T_1 = 35^\circ\text{C}$  (308K) 时的  $G-t$  关系式, 式(10)为  $T_2 = 45^\circ\text{C}$  (318K) 时的  $G-t$  关系式,  $m_1$ 、 $n_1$ 、 $m_2$ 、 $n_2$  分别为拟合参数。

(2) 将探测器工作温度的实时检测值  $t_0$  代入式(9)和式(10), 求得该温度下的两个标准点  $(T_1, G_1)$  和  $(T_2, G_2)$ 。将此两点代入式(8), 进而求出探测器工作温度  $t = t_0$  时参数  $a$  和  $b$  的值。

(3) 将  $t = t_0$  时的检测目标灰度值  $G_0$  代入式(8), 求出此时所对应的黑体辐射温度值  $T_0$ 。

(4) 对于非黑体检测目标, 由于其发射率  $\varepsilon$  不等于 1, 可将上一步计算得到的温度值  $T_0$  代入式(11), 即可进一步求得检测目标的表面真实温度<sup>[8]</sup>。

$$T = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} \left[ T_0^n - (1 - \varepsilon) T_u^n \right] \right\}^{1/n} \quad (11)$$

## 3 红外测温的实现步骤

- (1) 设定探测器的增益;
- (2) 读取测温时探测器的工作温度  $t_0$  及测试目标灰度  $G_0$ ;

<http://journal.sitp.ac.cn/hw>

(3) 将  $t_0$  代入  $T_1$ 、 $T_2$  标准  $G-t$  曲线, 得到两个标准点  $(T_1, G_1)$  和  $(T_2, G_2)$ ;

(4) 将步骤(3)中的两个标准点代入式(8), 计算出此探测温度下的参数  $a$  和  $b$ , 进而求解出此探测器温度下的  $G-T_0$  表达式;

(5) 将步骤(2)中测得的灰度  $G_0$  代入上式, 计算出此时的标准黑体温度  $T_0$ ;

(6) 将  $T_0$ 、环境温度  $T_u$  以及检测目标的发射率  $\varepsilon$  代入式(11), 最终计算出待检测目标的真实表面辐射温度  $T$ 。

## 4 数据分析

图 1 为黑体温度设为  $T_1 = 35^\circ\text{C}$  (308K) 时的  $G-t$  数据点阵及其一次拟合曲线图, 此时  $m_1 = -15.73$ ,  $n_1 = 604.9$ 。图 2 为黑体温度设为  $T_2 = 45^\circ\text{C}$  (318K) 时的  $G-t$  数据点阵及其一次拟合曲线图, 此时  $m_2 = -16.13$ ,  $n_2 = 709$ 。

我们用红外成像测温系统分别对不同探测器温度及不同黑体温度下的 20 组数据进行了采样测量。表 1 列出了在不同黑体温度  $T_s$  和不同探测器工作温度  $t$  下得到的温度计算值  $T_c$  和温度偏差值  $T_\Delta$ 。

从表 1 中可以看出, 当探测器工作温度在  $26^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 、黑体温度在  $35^\circ\text{C}$  (308K)  $\sim 45^\circ\text{C}$  (318K) 时, 绝对温度偏差低于 0.7K。

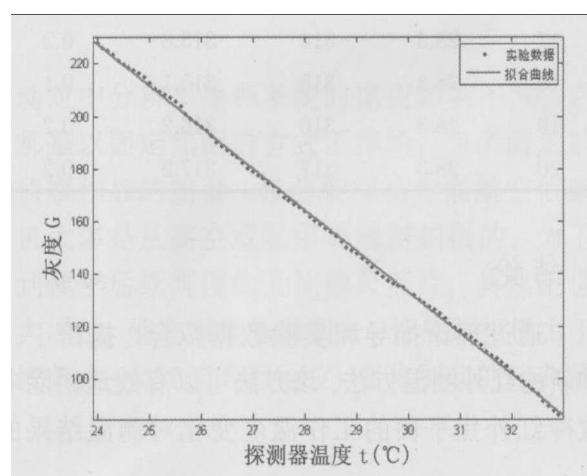
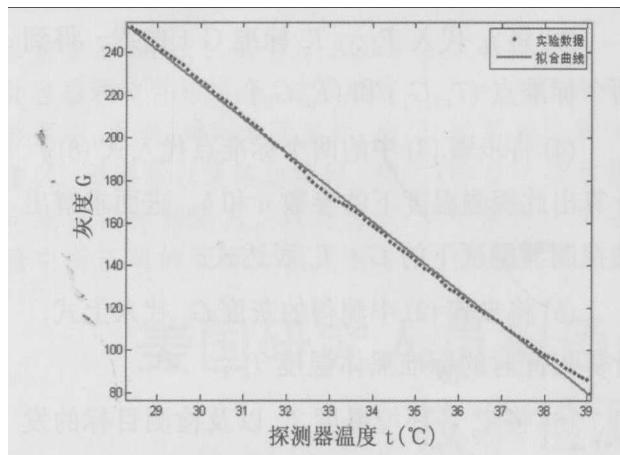


图 1  $T_1 = 35^\circ\text{C}$  (308K) 时的  $G-t$  一次拟合曲线图

图2  $T_2 = 45$  °C (318K) 时的 G-t 一次拟合曲线图表1 在不同  $T_s$  和不同  $t$  情况下得到的  $T_c$  和  $T_\Delta$  值

序号	$t$ (°C)	$T_s$ (K)	$T_c$ (K)	$T_\Delta$ (K)
1	26	312.9	312.3	0.6
2	27	312.9	312.3	0.6
3	28	312.9	312.3	0.6
4	29	312.9	312.4	0.5
5	30	312.9	312.5	0.4
6	31	312.9	312.5	0.4
7	32	312.9	312.5	0.4
8	33	312.9	312.5	0.4
9	34	312.9	312.7	0.2
10	35	312.9	312.8	0.1
11	28	308	307.4	0.6
12	28.1	309	308.4	0.6
13	28.2	310	309.6	0.4
14	28.3	311	310.6	0.4
15	28.3	312	311.7	0.3
16	28.3	313	312.9	0.1
17	28.3	314	313.8	0.2
18	28.3	315	315.1	0.1
19	28.3	316	316.2	0.2
20	28.3	317	317.2	0.2

## 5 结论

通过理论推导和实验数据拟合, 提出了一种新的红外测温方法。该方法可以有效地消除非致冷红外焦平面的工作温度变化对测温结果的

影响, 并最终实现对检测目标的高精度测温。它对于进一步提高红外测温用非致冷红外焦平面成像系统对工作环境的适应性, 具有一定的指导意义。

## 参考文献

- [1] 隋修宝. 非制冷凝视热像仪成像理论以及关键技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [2] 李国华, 吴立新, 吴森, 等. 红外热像技术及其应用的研究进展 [C]. 红外与激光工程, 2004, 33(3): 227-230.
- [3] Robert M P, Dan Ieltp. Radiometric Calibration of a Longwave FPA Camera for IR Scene [C]. SPIE, 2006, 6208: 1-12.
- [4] P Deliot, J Duffaut, A Lacan. Characterization and Calibration of a High-resolution Multispectral Airborne Digital Camera [C]. SPIE, 2006, 6031: 1-10.
- [5] 张天序, 石岩, 曹治国. 红外焦平面非均匀性噪声的空间频率特性及空间自适应非均匀性校正方法改进 [J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(4): 255-260.
- [6] A Averbuch, G Liron, B Z Bobrovsky. Scene Based Non-uniformity Correction in Thermal Images Using Kalman Filter [J]. Image and Vision Computing, 2007(25): 833-851.
- [7] 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(自然科学版), 2008, 9(4): 399-403.
- [8] 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.
- [9] 刘景生. 红外物理 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [10] E M 斯·帕罗, R D 塞斯. 辐射传热 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- [11] Inagaki T, Okamoto Y. Surface Temperature Measurement near Ambient Conditions Using Infrared Radiometer with Different Wavelength Bands by Applying a Gray-body Approximation-Estimation of Radiative Property for Nonmetal Surface [J]. J. of NDT&E International, 1996, 29(6): 363-369.