

文章编号: 1672-8785(2011)06-0023-05

一种可提高红外热像仪测温精度的算法

谭 锋 傅 强

(中国移动集团设计院有限公司重庆分公司, 重庆 400042)

摘 要: 传统的红外热像仪测温算法具有测温精度低, 测得的温度值不是目标物体的真实温度等缺点。从红外热像仪的测温原理入手, 重点介绍了产生上述缺点的原因, 并分析了黑体标定测温算法的不足之处。在此基础上提出了一种红外热像仪精确测温算法。通过在传统的黑体标定测温算法中引入差值查表标定、测温预处理和真实温度换算等环节, 提高了热像仪的测温精度。

关键词: 红外测温; 红外热像仪; 精确测温; 测温算法

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.06.006

An Algorithm for Accurate Temperature Measurement of Infrared Thermal Imager

TAN Feng, FU Qiang

(Chongqing Branch of China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400042, China)

Abstract: Traditional temperature measurement algorithms for infrared thermal imagers have a common shortcoming of low measurement accuracy. The temperature values provided by them can not represent the real temperature of an object. In this paper, the temperature measurement principle of an infrared thermal imager is presented. The cause of the above shortcoming is given and the deficiency of the traditional temperature measurement algorithm using blackbody calibration is analyzed. Finally, an accurate temperature measurement algorithm for infrared thermal imagers is proposed. By incorporating the temperature difference look-up table calibration, temperature pretreatment and real temperature conversion into the traditional blackbody calibration algorithm, the new algorithm improves the temperature measurement accuracy of the infrared thermal imager.

Key words: infrared temperature measurement; infrared thermal imager; accurate temperature measurement; algorithm for temperature measurement

0 引言

红外热像仪是利用红外图像进行温度测量的, 属于非接触式辐射测温^[1]。它能够实时获取被测物体的温度场信息, 具有直观、安全、反应时间快和测温范围广等特点, 已经广泛应用于国防、军事、科学实验以及工农业生产等领域。红外测温算法是利用红外热像仪进行温度测量的关键, 它可直接影响红外热像仪的测温精度。由

于传统的黑体标定测温算法存在温度测量值并不是目标物体的真实温度的缺点, 热像仪在精确测温领域中的应用受到了很大限制。

本文从热像仪的测温原理入手, 分析了导致热像仪测温精度低的原因, 对传统的测温算法进行了改进, 并在此基础上提出了一种红外热像仪精确测温算法。

1 红外热像仪测温的基本原理

收稿日期: 2011-04-18

作者简介: 谭锋(1982-), 男, 助工, 主要从事光网络方面的研究。E-mail: xidu1025@yahoo.com.cn

红外热像仪是现代光电成像技术、计算机技术和图像处理技术相结合的产物,其系统组成如图 1 所示。在使用红外热像仪测量物体温度时,前端光学系统用于接收物体发出的红外光,并将其成像在红外探测器上。红外探测器负

责完成光电转换,输出物体的电子视频信号。信号处理系统负责完成消噪、校正、增强、伪彩等图像处理和红外测温处理,形成被测目标的红外热图像和温度场分布图像。最终显示器将它们显示出来^[1]。

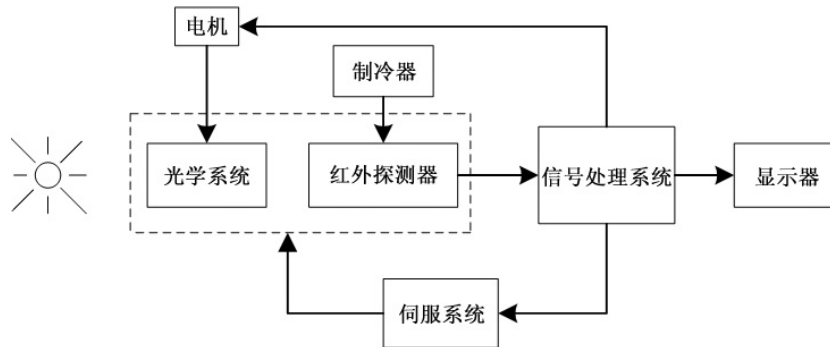


图 1 红外热像仪的系统组成

在图 1 中,红外探测器是热像仪的核心器件。它是一个探测器阵列,其每个探测元可将光学系统投射在其上面的红外辐射能转换为电信号。该电信号经过 A/D 转换后表现为图像的灰度值,因此整个红外探测器阵列的输出就构成了一幅完整的红外图像。另外,光学系统投射在某个探测元上的红外辐射能与目标物体在该点的表面温度也是一一对应的。这样便可以建立目标点温度(T_{obj})、电信号(V_s)和红外图像灰度值(G)之间一一对应的关系,为通过红外图像的灰度值来计算目标物体的温度提供了可能。这就是利用红外热像仪进行温度测量的基本思路。黑体标定测温算法也是根据温度与灰度的这种对应关系来进行温度测量的。

1.1 黑体标定测温算法的理论分析

在实际测温时,红外探测器接收的辐射包括目标自身的辐射、目标对周围环境的反射辐射和大气的固有辐射,其测温模型如图 2 所示。其中, ε 为物体的发射率, α 为物体的辐射吸收率, $1-\alpha$ 为反射率, τ 为大气的透射率, $1-\tau$ 为大气发射率, T_{obj} 为被测物体的温度, T_{sur} 为环境温度, T_{atm} 为大气温度的。被测物体的辐射能为 εW_{obj} ,周围环境的反射辐射能为 $(1-\alpha)W_{sur}$ 。两者通过大气时会受到大气吸收和散射的影响

而被衰减为 $\varepsilon\tau W_{obj}$ 和 $\tau(1-\alpha)W_{sur}$ 。大气固有辐射能为 $(1-\tau)W_{atm}$ 。红外热像仪接收到的辐射照度^[3](单位面积上接收到的辐射功率)可表示为

$$E = A_{obj} d^{-2} \left[\tau \varepsilon L(T_{obj}) + \tau(1-\alpha)L(T_{sur}) + (1-\tau)L(T_{atm}) \right] \quad (1)$$

式中, A_{obj} 为热像仪的最小空间张角所对应的目标可视面积, d 为辐射源到热像仪的距离, $L(T)$ 表示温度为 T 的物体的辐射亮度^[2]。

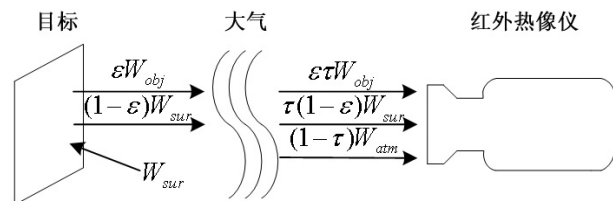


图 2 热像仪的测温模型

式(1)表示的是接收到的全波段辐射照度,而热像仪一般只是工作在一个很窄的波段($3 \sim 5 \mu\text{m}$ 或 $8 \sim 14 \mu\text{m}$)。因此,红外探测器实际接收到的红外辐射能是在其工作波段内对式(1)进行积分得到的,而且该热辐射能量可被转换为电信号:

$$V_s = A_R A_{obj} d^{-2} \int_{\Delta\lambda} \left[\tau \varepsilon L(T_{obj}) + \tau(1-\alpha)L(T_{sur}) \right]$$

$$+(1-\tau)L(T_{atm})]R_{\lambda}d\lambda \quad (2)$$

式中, A_R 为热像仪透镜的面积, R_{λ} 为探测器的光谱响应率。令 $K = A_R A_{obj} d^{-2}$, $f(T) = \int_{\Delta\lambda} L(T)R_{\lambda}d\lambda$, 则式(2)变为

$$V_s = K \left[\tau \varepsilon f(T_{obj}) + \tau(1-\alpha)f(T_{sur}) + (1-\tau)f(T_{atm}) \right] \quad (3)$$

经过 A/D 转换后, 电信号 V_s 表现为图像的灰度值。式(3)表明了目标温度与图像灰度的对应关系。但在实际应用中, 直接利用式(3)由图像灰度计算物体温度是不现实的。如果想要根据热图像获得物体的绝对温度值, 那么必须采用与基准物体的热像相比较的方式来标定绝对温度值。传统的黑体标定测温算法是利用高精度黑体来进行温度标定的。黑体是在任何温度下均能全部吸收入射到其表面上的任意波长的辐射能的物体, 是一种理想化的物体。当用红外测温系统对黑体进行观测时, 设黑体温度为 T_r , 即 $T_{obj} = T_r$, 且黑体满足 $\varepsilon = \alpha = 1$ [3]; 大气辐射和大气衰减的影响很小, 可以忽略不计, 即满足 $\tau = 1$ 。因此, 由式(3)可得

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

式(4)表明了黑体温度值与红外图像灰度值的对应关系。利用式(4)生成温度值与灰度值的相互对应表格, 并将其存储在红外热像仪中。在实际测温时, 根据目标物体的图像灰度值进行查表, 便可得到物体的温度值。

1.2 黑体标定测温算法的问题分析

采用黑体标定测温算法进行温度测量, 具有操作简单、反应时间快和实现容易等优点, 但其测温精度较低, 使红外热像仪在许多精确测温领域的应用受到限制。下面介绍导致黑体标定测温算法测温精度低的主要因素。

(1) 在实际测温时, 通过查表得到的温度值并不是目标物体的真实温度, 而是辐射能与目标物体相同的黑体的温度, 称为该目标物体的

辐射温度 [3]。黑体标定测温算法是利用目标物体的辐射温度来代替其真实温度的。

(2) 在实际应用中, 被测目标物体一般不是黑体, $\varepsilon \neq 1$, 且 $\tau \neq 1$ 。由式(3)可知, 此时受到大气辐射和反射辐射的影响较大。

另外, 使用热像仪进行测温将会受到各种噪声的干扰, 主要表现为红外图像灰度值的偏移。这将会导致灰度值不能真实反映物体的辐射能, 破坏物体温度与图像灰度的对应关系, 严重影响热像仪的测温精度。

2 红外热像仪精确测温算法

根据前面对影响测温精度的各个因素进行的分析可知, 要提高热像仪测温的精确度, 应从以下几个方面入手:

- (1) 消除红外图像中的噪声;
- (2) 对由标定公式计算得到的辐射温度进行换算, 得到目标物体的真实温度值;
- (3) 减小反射辐射和大气辐射对测温的影响。

因此, 在对黑体标定测温算法进行改进后, 得到适合红外热像仪的精确测温算法, 其测温流程如图3所示。下面将详细讨论精确测温流程中的每一个步骤。

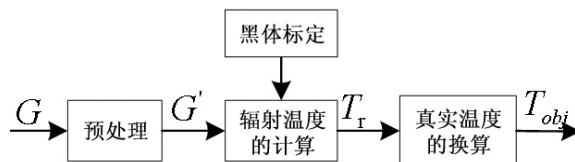


图3 红外热像仪的精确测温流程

2.1 黑体标定

在热像仪出厂前, 利用高精度黑体对其进行标定。标定的目的是对整个系统进行测试, 找出黑体温度与图像灰度值之间的关系, 并将这个关系用一个公式或查找表来描述 [4]。具体标定方法有拟合曲线法和查找表法两种。拟合曲线法只需采集部分灰度与温度数据。它采用曲线拟合方法获得温度的近似计算公式, 由此完成黑体标定。这种标定方法比较简单易行, 但是其测量精度略低, 不能满足精确测温的要求。因

此,我们选用差值查找表法进行黑体标定,其标定步骤如下:

(1) 将黑体温度源的温度设置为基准温度 T_0 , 并记录下此时的基准灰度值 G_0 ;

(2) 将黑体的温度调为 $T_n = T_0 + \Delta T_n (n = 1, 2, 3, \dots)$, 并记录下该温度值对应的灰度值 G_n , 然后将温度差 ΔT_n 与对应的灰度差值 ΔG_n 填入查找表;

(3) 重复步骤 2, 直至查找表填满为止。

经过黑体标定后, 热像仪中存入了表 1。

表 1 存入的表格

G_0	ΔG_1	ΔG_2	ΔG_3	ΔG_4	$\dots$
T_0	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_4	$\dots$

2.2 预处理

在进行温度计算之前, 首先对红外图像灰度值进行预处理, 以消除红外图像中的噪声, 从而使图像的灰度值和物体的温度值满足标定公式的对应关系。这里采用比较成熟的中值滤波

法进行处理, 其基本思路如下: 将一个含有奇数量像素的窗口 A 在图像上依次移动, 并在每一个位置上对窗口内像素的灰度值从小到大进行排列, 然后将位于中间的灰度值作为窗口中心像素的输出值, 即

$$g(i, j) = \text{median}_A[f_A(i, j)] \quad (5)$$

式中, $\text{median}_A[\]$ 表示在 A 窗口中取其灰度的中间值; $f_A(i, j)$ 表示以像素 (i, j) 为中心的 A 窗口下的各个灰度值 [5]。

2.3 辐射温度计算

经过预处理后, 利用图像的灰度值计算物体的辐射温度, 其计算流程如图 4 所示。首先选取目标物体的图像灰度值 G 并将其与基准灰度值 G_0 相比较, 得到灰度差值 $\Delta G = G - G_0$ 。然后将 ΔG 代入查找表, 得到对应的温度差 ΔT , 则物体的辐射温度为基准温度与温度差之和, 即 $T_r = T_0 + \Delta T$ 。

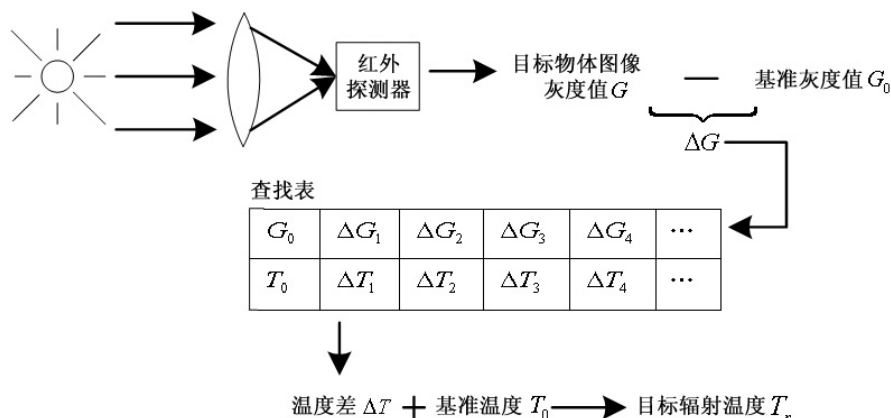


图 4 辐射温度计算的流程图

2.4 真实温度换算

此时, 物体的辐射温度 T_r 满足式 (4), 而目标物体的真实温度 T_{obj} 满足式 (3), 且式 (3) 与式 (4) 中的 V_s 对应于同一辐射能, 是相等的。因此由式 (3) 和式 (4) 可得:

$$f(T_r) = \tau \varepsilon f(T_{obj}) + \tau(1 - \alpha)f(T_{sur}) + (1 - \tau)f(T_{atm}) \quad (6)$$

根据普朗克公式 $M(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1}$, 且黑体满足 $M = \pi L$ [3], 则

$$f(T) = \int_{\Delta\lambda} L(T) R_\lambda d\lambda = \frac{1}{\pi} \int_{\Delta\lambda} M(\lambda, T) R_\lambda d\lambda \approx CT^n \quad (7)$$

当使用不同波段的热像仪时, n 的取值不

同。对于 HgCdTe ($8 \sim 13 \mu\text{m}$) 探测器, n 值为 4.09; 对于 HgCdTe ($6 \sim 9 \mu\text{m}$) 探测器, n 值为 5.33; 对于 InSb ($2 \sim 5 \mu\text{m}$) 探测器, n 值为 8.68。将式 (7) 代入式 (6) 后, 可得:

$$T_r^n = \tau \varepsilon T_{obj}^n + \tau(1 - \alpha)T_{sur}^n + (1 - \tau)T_{atm}^n \quad (8)$$

则被测目标物体的真实温度的换算公式为

$$T_{obj} = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{1}{\tau} T_r^n - (1 - \alpha)T_{sur}^n - \frac{1 - \tau}{\tau} T_{atm}^n \right] \right\}^{1/n} \quad (9)$$

在实际测温中, 利用式 (9) 进行换算具有较高的精确度, 但其计算复杂, 反应时间较长, 因此应对式 (9) 进行简化。一般默认目标物体为灰体, 即 $\varepsilon = \alpha$ [3], 并默认环境温度与大气温度相同, 即 $T_{sur} = T_{atm}$, 则式 (9) 可变为

$$T_{obj} = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{1}{\tau} T_r^n - \left(\frac{1}{\tau} - \varepsilon \right) T_{atm}^n \right] \right\}^{1/n} \quad (10)$$

式 (10) 即为灰体表面真实温度的计算公式。

3 总结

本文分析了黑体标定测温算法的基本原理和不足之处, 并从三个方面对黑体标定测温算法进行了改进。

(上接第 17 页)

(a) 是未经过非均匀性校正的原始图像, 图 2(b) 是校正后的图像。可以看出, 校正后的图像的非均匀性大大减小。本文设计的系统经过实际应用测试, 在 128×128 红外焦平面实时信号处理系统中取得了不错的处理效果。

4 结束语

非均匀性校正是红外图像处理中的关键技术。两点法虽然计算简单, 但不能克服焦平面阵列偏移的漂移。自适应非均匀性校正方法不但计算简单, 而且能有效地校正焦平面阵列偏移的漂移。通过加入修正选择判断, 可对逐渐模糊的不足作出很大的改善。硬件实现的存储器设计充分利用了 Flash 的不挥发性和 SDRAM 的挥

(1) 采用差值查表标定法。与拟合曲线标定法相比, 差值查表法具有更高的测温精度。

(2) 增加中值滤波处理, 有效消除了红外图像中的随机噪声, 并与非均匀性校正共同修正了灰度与温度的对应关系, 使其满足标定公式。

(3) 加入真实温度的换算, 使测量值可以真正反映出目标物体的温度, 提高了测温精度。

因此, 该测温算法具有更高的测温精度。

参考文献

- [1] 曾强, 舒芳誉, 李清华. 红外测温仪 —— 工作原理及误差分析 [J]. 传感器世界, 2007, 19(2): 16-18.
- [2] Kate McGuire. The Basics of Infrared Thermometry [EB/OL]. <http://ecmweb.com>, 2000.
- [3] 张建奇, 方小平. 红外物理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [4] 郝继平, 杜成功, 黄平华. 红外标定理论计算与应用 [J]. 应用光学, 2004, 25(2): 36-39.
- [5] 李明喜, 毛罕平. 近红外图像消噪方法的对比实验研究 [J]. 红外技术, 2007, 11(4): 21-23.

发性。该系统仅采用一片 FPGA, 校正系数计算、非均匀性校正、校正系数修正和图像增强等均在此 FPGA 内完成。这种体积小特点有利于系统的小型化。实际应用结果表明, 该系统能很好地降低焦平面器件的非均匀性。

参考文献

- [1] 王炳健, 刘上乾, 李庆. 基于 FPGA 的红外焦平面阵列实时非均匀性校正 [J]. 半导体光电, 2006, 27(1): 79-82.
- [2] 黄本雄, 陶伟, 胡海. 红外图像自适应的非均匀校正算法 [J]. 华中科技大学学报, 2007, 35(3): 19-21.
- [3] 代少升, 袁祥辉. 红外图像非均匀性实时校正新技术的研究 [J]. 光学精密工程, 2004, 12(2): 201-204.
- [4] 侯和坤, 张新. 红外焦平面阵列非均匀性校正技术的最新发展 [J]. 红外与激光, 2004, 33(1): 81-84.