

红外热像仪测温技术发展综述

孙晓刚¹, 李云红^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 西安工程大学, 陕西 西安 710048)

摘要:综述了红外热像仪测温技术的发展,从技术层面剖析了红外热像仪测温存在的问题,介绍了国内外在红外热像测温技术方面的研究热点,同时展望了未来的发展方向。针对红外测温领域中的理论、仪器、标定及应用四大方向进行了较为详细的分析和总结。

关键词:红外热像仪;温度测量;发射率;热像测温

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Review of the Development of Temperature Measurement Technology with Infrared Thermal Imager

SUN Xiao-gang¹, LI Yun-hong^{1,2}

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: The article reviews the history and present status of infrared temperature measurement technology, analyzes the existing problems of temperature measurement with infrared thermal imager from technical perspectives, introduces domestic and international researching focuses of infrared thermal imaging temperature measurement technology, and prospects its future trends. At the end, the analysis and summary of the theory, instrument, calibration and applications for infrared temperature measurement have been made in detail.

Key words: infrared thermal imager; temperature measurement; emissivity; thermal imaging temperature measurement

1 引言

温度是确定物质状态最重要的参数之一,它的测量与控制在国防、军事、科学实验及工农业生产中具有十分重要的作用。特别是高温测量在航天、材料、能源、冶金等领域中占有极重要地位。

文章综述了红外热像仪测温技术的发展,剖析了红外热像测温存在的问题,针对红外测温领域中的理论、仪器、标定及应用四大方向进行了较为详细的分析和总结。

2 红外热像仪测温原理及存在的问题

一切温度高于热力学零度的物体都在以电磁波的形式向外辐射能量,其辐射能包括各种波长,其中波长范围在 0.76 ~ 1000 μm 之间的称为红外光波。红外光具有很强的温度效应,这正是辐射测温技术所感兴趣的。红外测温技术的理论基础是普朗克分

布定律,该定律揭示了黑体辐射能量在不同温度下按波长的分布规律,其数学表达式为:

$$E_{b\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1)$$

式中, $E_{b\lambda}$ 为黑体光谱辐射通量密度, $W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1}$; c_1 称为第一辐射常数, $c_1 = 3.7415 \times 10^{-12} W \cdot cm^2$; c_2 称为第二辐射常数, $c_2 = 1.43879 cm \cdot K$; λ 为光谱辐射的波长, μm ; T 为黑体的绝对温度, K 。

目前人们经常使用的红外热像仪等,测得的不是物体的真实温度,只是分别为亮度温度、颜色温度和辐射温度等。辐射温度、颜色温度和亮度温度都

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60377037)。

作者简介:孙晓刚(1967-),男,博士后,教授,博士生导师。主要研究方向为辐射测温,热物性测试,智能仪表。

收稿日期:2007-08-30;修订日期:2007-09-12

不是物体表面的真实温度(T),即使经过了大气传输因子等的修正之后,它们与物体表面的真实温度之间仍存在一定的差异。必须知道物体的另一参数——材料发射率(黑度系数),才可求得物体真实温度。众所周知,物体的材料发射率不仅与物体的组分、表面状态及考察波长有关,还与它所处的温度有关。一般不易在线测量,且易随表面状态改变而改变,所以围绕着如何测准来自被测物体的能量和如何将测得的能量转换成被测物体的真实温度这两项技术进行的研究和发展一直在不断深入。与这两项技术有关,涉及仪器的测量范围、精度、距离和目标大小、响应时间和稳定性。在实际应用中,还涉及被测物体的光谱发射的研究和辐射传递通路中的介质对辐射传递的影响的研究。

红外热像仪可以将接收到的红外波段的热辐射能量转换为电信号,经过放大、整形,数/模转换后成为数字信号,在显示器上通过图像显示出来。图像中的每一个点的灰度值与被测物体上该点发出并到达光电转换器件的辐射能量相对应。经过运算,就可以从红外热像仪的图像上读出被测物体表面的每一个点的辐射温度值。

作用于热像仪的辐射照度为:

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

其中, $L_{b\lambda}(T)$ 为温度为 T 物体的辐射功率; T_0 为被测物体表面温度; T_u 为环境温度; T_a 为大气温度; ε_{λ} 为表面发射率; α_{λ} 为表面吸收率; $\tau_{a\lambda}$ 为大气光谱透射率; $\varepsilon_{a\lambda}$ 为大气发射率; A_0 为热像仪最小空间张角所对应的目标的可视面积; d 为该目标到测量仪器之间的距离。通常一定条件下, $A_0 d^{-2}$ 为一常值。

热像仪通常工作在某一个很窄的波段,3~5 μm 或8~14 μm 之间, ε_{λ} , α_{λ} , $\tau_{a\lambda}$ 通常可认为与 λ 无关。得到热像仪的响应电压为:

$$V_s = A_R A_0 d^{-2} \left\{ \tau_a \left[\varepsilon \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{b\lambda}(T_0) d\lambda + (1 - \alpha) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{b\lambda}(T_u) d\lambda \right] + \varepsilon_a \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{b\lambda}(T_a) d\lambda \right\} \quad (3)$$

其中, A_R 为热像仪透镜的面积; R_{λ} 为探测器的响应率,令 $K = A_R A_0 d^{-2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} L_{b\lambda}(T) d\lambda = f(T)$,则式(3)变为:

$$V_s = K \{ \tau_a [\varepsilon f(T_0) + (1 - \alpha) f(T_u)] + \varepsilon_a f(T_a) \} \quad (4)$$

当被测表面满足灰体时,即 $\varepsilon = \alpha$,对大气认为

$\varepsilon_a = \alpha_a = 1 - \tau_a$,则:

$$V_s = K \{ \tau_a [\varepsilon f(T_0) + (1 - \varepsilon) f(T_u)] + (1 - \tau_a) f(T_a) \} \quad (5)$$

依据普朗克辐射定律,得到:

$$T_r^n = \tau_a [\varepsilon T_0^n + (1 - \alpha) T_u^n] + \varepsilon_a T_a^n \quad (6)$$

被测表面真实温度的计算公式为:

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{1}{\tau_a} T_r^n - (1 - \alpha) T_u^n - \frac{\varepsilon_a}{\tau_a} T_a^n \right] \right\}^{1/n} \quad (7)$$

当使用不同波段的热像仪时, n 的取值不同,对HgCdTe(8~13 μm)探测器, n 值为4.09;对HgCdTe(6~9 μm)探测器, n 值为5.33;对InSb(2~5 μm)探测器, n 值为8.68。

红外热像仪测温除受到被测表面发射率的影响外,还受到反射率、环境温度、大气温度、测量距离和大气衰减等因素的影响,直接影响了红外热像仪测温的准确性,也影响了热像仪在一些领域中的应用,特别是对表面发射率估计不准,对测温准确性的影响更大。所以,当需要对设备温度状态作热力学温度测量时,必须认真解决温度测量结果的标定问题。

3 红外热像仪测温技术研究现状

过去所发展的红外热像仪测温技术仅限于常规风洞实验中的中、低温度(1000K以下)测量^[1-3],邓建平等为了满足电弧风洞等高焓设备实验测量的需要,研制了一套测温范围在1000~3500K的红外热像仪及图像处理系统,该系统已完成标定并在高频等离子体风洞中进行了实验^[4]。在磨削温度测量中,美国学者Mayer采用硫化铅(PbS)制成的光电导探测器测量工件磨削表面的温度,日本学者Ueda用光纤和砷化铟(InAs)红外光子探测器测量了研磨砂轮表面磨粒的温度。高航^[5]等采用带有扫描成像系统的AGA782热像仪,测量工件表面的二维温度场。Hwang Jihong^[6]采用红外成像的电荷耦合装置(CCD)测量平面磨削中工件的温度场分布。

在红外热像测温理论上,杨立等考虑了被测物体表面的发射率、反射率(或吸收率)、环境温度、大气温度、大气衰减等因素,总结了大气吸收、大气温度、被测物体发射率、被测物体本身温度、环境温度和测量仪器指示温度的测量误差对红外测温误差的影响^[7-10]。张健等着重分析环境高温物体对红外测温误差的影响^[11]。

在科学实验研究方面,红外热像仪亦显示出其在测试物体温度场方面的优势。王喜世等利用红外热像仪测量火焰温度^[12-14],侯成刚等利用其精确测试物体的发射率^[15],都取得了较好的效果。许永华

等针对高炉炉内温度场的分布及高炉布料的情况提出了一种基于红外图像处理的高炉温度场检测方法。通过红外图像处理来建立温度场分布模型,结合十字测温进行温度定标,实现了高炉温度场分布在线监视,为指导高炉布料提供了一种有效的途径^[16]。傅莉等采用红外热成像技术实时检测了惯性摩擦焊接工件表面的温度分布图像及其随时间的历程。通过采用计算机红外热成像图像处理技术,获得了惯性摩擦接头表面外圆周以及焊接热影响区表面温度分布场的图像综合信息,从中解算出摩擦焊接表面外圆中心点的焊接热循环以及焊接热影响区表面的面温场及等温线动态变化的某些规律;为了较准确地设定发射率,减少测温误差,还采用SR-5000型智能化红外光谱辐射计,标准黑体及AGEMA900型图示测温热像仪等装置对被焊材料的积分辐射率进行标定。通过试验测定了不同发射率下焊接试样表面的最高温度值,初步探讨了发射率标定值对测温结果的影响^[17]。

4 红外热像仪的标定及应用

标定技术^[18]是红外测温领域中关键技术之一,在某些情况下,已严重的影响和限制了红外热像仪的测量精度和应用范围。热像仪的标定一般采用标准黑体源作为辐射源,然后用红外热像仪测量其辐射转换的辐射温度或亮度输出。传统定标方式如图1所示。在定标过程中,红外热像仪与黑体光阑的距离根据红外热像仪镜头的焦距不同而不同,为了得到清晰的图像,定标距离要大于镜头的焦距。

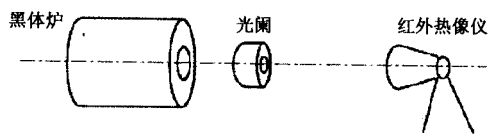


图1 传统标定法

Fig.1 a traditional method of calibration

传统标定方法在选择不同的标定距离时得到的红外热像仪温度读数值略有不同,距离越远,温度值越偏低,在像素数足够多的情况下,主要是受空气中水汽和二氧化碳的影响,因此在实验室中最好采用尽可能近的定标距离。

现在利用大面源黑体采用尽量近的口对口标定方式,让辐射面完全充满红外热像仪视场,并将红外热像仪镜头的焦距调到无穷远,红外热像仪读取均值。这样定标的结果消除了距离因子引入的误差,同时有效地降低了空气中水汽和二氧化碳的影响,标定的精度得到提高,标定的数据与距离无关。

我国引入红外热成像测温技术在工艺及生产方

面最初只有电力、冶金和石化等行业的部分单位应用,在科研方面也只限于尖端技术的研究领域。作为一种通用技术,红外热成像测温技术的应用将深入各个领域。

自1957年第一次使用热成像技术探测乳腺癌以来,其在医学领域的应用已经有50多年的历史。如对乳腺癌及恶性肿瘤的早期诊断、伤口愈合的红外观察、风湿性关节炎和发病状况的诊断、牙科治疗初步研究、耳鼻喉疾病的诊断、胸部肿块的红诊断等^[19-20],可以说远红外成像技术在医学中的应用已经成为一种新的诊断手段。在发现表浅肿瘤如乳腺癌、甲状腺癌、皮肤癌等,对脉管炎以及其他炎症,对骨折、骨髓炎、挫伤、关节炎,对确定烧伤和冻伤边缘,对合理的选择截断部位,对植皮、脏器、移植后排异反应的观察,对妇产科临床如胎盘的定位、针灸的经络穴温度反应等,都表现出了日益强大的应用能力,必将促进医疗卫生事业的快速发展。

自1980年早期以来,远红外成像技术首先被大量地应用于农业和环境检测。他们主要是通过空中摄像技术来对所探测的目标进行宽范围的检测和分析。直到敏感摄像技术得到了发展,才开始了对植物进行单株(single plant)水平上的研究。其具有的多功能性,准确性和较高的分辨率(可达0.01)使得对单株植物叶片和幼苗的实时观测成为了可能。也因此植物研究中的应用掀起了热潮。如在重力作用下,对植物叶片表面与周围环境之间热交换的影响的研究、通过对植物如拟南芥,大麦突变体的筛选、对植物气孔导度的研究、植物在胁迫环境中的研究、在寒冷环境中植物体内的冰核形成过程的观测研究、谷类作物由于疾病和阵风而造成的旗叶温度的差异测量、叶片蒸腾速率研究、单细胞的研究等^[21-23]研究成果十分显著,研究的对象也大幅度的拓宽。

红外成像技术应用于农业生产方面已有很多,刚开始用于园艺产品的分析和苹果损伤的发现和植物健康状况的评估。目前,已被广泛应用于农业和园艺中的贮藏室的设计和控制在以及蔬菜的保鲜贮藏、对一些敏感的生物产品进行质量评估和控制、对农作物的生理衰变的检测。在水果和蔬菜成熟时期,通过热成像对其进行热温的测定往往可以评估气候对其的胁迫,还有水果和蔬菜新鲜程度的评估、植物不同部分受虫害的影响、苹果成熟程度,糖分及种间的差异的鉴定、空气对流量的测定等。

红外热像技术还应用于材料和构件的红外热像无损检测与评价、电力和石化设备状态的红外热像诊断、构(建)物的红外热像检测与节能评价、自动测试、

灾害防治、地表/海洋热分布研究^[24-27]等方面。

5 结束语

发展到目前的热成像系统已是现代半导体技术、精密光学机械、微电子学、特殊红外工艺、新型红外光学材料与系统工程的产物。近年来,红外热像仪的生产每年都有相当比例的增加,已经形成了较大的产业群,应用也涵盖了几乎所有的领域。但是值得注意的是,目前市场上售出的热像仪并没有解决目标发射率影响问题,针对不同的对象,还要对不同对象特性、环境特性进行研究,设计适合环境接口和发射率补偿方案,以进行精确测温。未来人们要致力解决的问题总结一下有如下几个方面:①红外热像仪测温技术,包含了理论、仪器和应用研究,在不久的将来,会有新一代的热像仪的出现;②高精度标定设备(含凝固点黑体、热管黑体、大面源黑体等)及标定方法;③特殊对象的温度(场)测量;④新原理热像仪的研制,等等。

参考文献:

- [1] Boydls. Analysis of infrared thermography data for icing applications. AIAA91-0666.
- [2] Robat Chenry. Infrared technique to measure the skin temperatures on an electrothermal DC-Icer comparison with numerical simulations. AIAA89-0760.
- [3] Kamran Daryabeigi. Global surface temperature/heat transfer measurements using infrared imaging. AIAA92-3959.
- [4] 邓建平,王国林,黄沛然.用于高温测量的红外热成像技术[J].流体力学实验与测量,2001,15(1):43-47.
- [5] 高航,宋利明,郑焕文,等.应用红外热像仪测量磨削温度场的探讨[J].红外技术,1991,13(1):21-24.
- [6] Hwang Jihong, Kompella Sridhar, Chandrasekar Srinivasan. Measurement of temperature field in surface grinding using infrared (IR) imaging system[J]. ASME Transactions, Journal of Tribology, 2003, 125: 377-383.
- [7] 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.
- [8] 杨立,寇蔚,刘慧开,等.热像仪测量物体表面辐射率及误差分析[J].激光与红外,2002,32(1):43-45.
- [9] 寇蔚,杨立.热测量中误差的影响因素分析[J].红外技术,2001,23(3):32-34.
- [10] 刘慧开,杨立.太阳辐射对红外热像仪测温误差的影响[J].红外技术,2002,24(1):34-37.
- [11] 张健,杨立,刘慧开.环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J].红外技术,2005,27(5):419-422.
- [12] 王喜世,伍小平.用红外热成像方法测量火焰温度的实验研究[J].激光与红外,2001,31(3):169-173.
- [13] 秦俊,廖光焯,王喜世,等.红外热成像方法测量火焰旋风温度的实验研究[J].激光与红外,2002,32(1):33-36.
- [14] 陈晓军,周晓冬,廖光焯.火焰温度场红外热像动态测试的试验研究[J].火灾科学.2000,9(1):58-62.
- [15] 侯成刚,张广明.用红外热成像技术精确测定物体发射率[J].红外与毫米波学报,1997,16(3):193-198.
- [16] 许永华,吴敏,曹卫华,等.高炉温度场的红外图像识别检测方法及应用[J].控制工程,2005,12(4):354-356.
- [17] 傅莉,王忠平,刘小文,等.惯性摩擦焊接区表面温度分布的红外热成像检测[J].焊接学报,1999,12:44-49.
- [18] 戴映红.红外热像仪校准方法探讨[J].计量技术,2004,12:32-33.
- [19] Wright T, McGechan A. Breast cancer; new technologies for risk assessment and diagnosis [J]. Mol Diagn, 2003, 7: 49-55.
- [20] Parisky Y R, Sardi A, Havivi R, et al. Efficacy of computerized infrared imaging analysis to evaluate mammographically suspicious lesions [J]. AJR Am J Roentgenol, 2003, 180: 263-269.
- [21] Kitaya Y, Kawaim, Tsuruyama J, et al. The effect of gravity on surface temperatures of plant leaves [J]. Plant Cell Environ, 2003, 26: 497-503.
- [22] Mustilli A C, Merlot S, Vavasseur A, et al. Arabidopsis OSTI protein kinase mediates the regulation of stomatal aperture by abscisic acid and acts upstream of reactive oxygen species production [J]. Plant Cell, 2002, 14: 3089-3099.
- [23] Merlot S, Mustilli A C, Centyb, et al. Use of infrared thermal imaging to isolate Arabidopsis mutants defective in stomatal regulation [J]. Plant, 2002, 30: 601-609.
- [24] Ruiliang Pu, Peng Gong, Ryo Michishita, et al. Assessment of multi-resolution and multi-sensor data for urban surface temperature retrieval [J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 104: 211-225.
- [25] Amit Mushkin, Lee K Balick, Alan R Gillespie. Extending surface temperature and emissivity retrieval to the mid-infrared (3-5 μm) using the Multispectral Thermal Imager [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 98: 141-151.
- [26] J A Sobrino, M Romaguera. Land surface temperature retrieval from MSG1-SEVIRI data [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92: 247-254.
- [27] Lee K Balick, Andrew P Rodger, William B Clodius. Multispectral thermal imager land surface temperature retrieval framework [J]. Proc. of SPIE, 2004, 5232: 409-509.