

基于热像仪的物体波段发射率的测量

黄龙祥^{1,2}, 沈湘衡¹, 宋江涛^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种新的测量发射率的方法。该方法利用黑体作为已知发射率的参考物体,使用热像仪测量物体的波段发射率。分析了影响波段发射率测量精度的因素,介绍了使用热像仪、黑体测量物体波段发射率的试验装置及测试方法。实际测试待测物体的波段发射率,验证发射率测量结果的准确性,发射率设定为该测定值时,热像仪测量温度与精密测温仪测量温度差值小于0.5℃。

关键词:波段发射率;热像仪测温;辐射亮度;黑体

中图分类号:TN219

文献标识码:A

Measure Target Wideband Emissivity with Thermal Imager

HUANG Long-xiang^{1,2}, SHEN Xiang-heng¹, SONG Jiang-tao^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, the Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A new method of measuring target wideband emissivity is presented. It's using blackbody as a known emissivity material, measuring blackbody and target total radiation temperature with thermal imager, measuring target's surface temperature measured with thermoscope, and then working out the target wideband emissivity with the three measurements. Then analyzing the influence of target wideband emissivity's accuracy. In order to verify the result's veracity, set the value of thermal imager's emissivity as the value, which was got from the last step. It could be directly concluded by comparing the thermal imager's temperature with the one that was got by thermoscope, and the difference is smaller than 0.5 °C.

Key words: wideband emissivity; temperature measurement with thermal imager; radiance luminance; blackbody

1 引言

波段发射率是实际物体与理想黑体在某一波段的自身辐射能量之比。精确测量物体的波段发射率是热像仪精确测温的基础^[1], 红外热成像测温技术具有非接触、直观、灵敏度高、快速、安全等优点, 不但在高压电线巡检、工业生产等民用领域得到广泛的应用; 而且在侦察与制导、伪装设计与检测等军用领域中也得到了广泛应用。

目前, 测量物体波段发射率主要有以下几种方法: ①使用红外光谱仪测试光谱发射率^[2-4], 再求出波段发射率; ②使用热像仪测量物体的波段发射

率^[5-9], 有直接测量法、参考物体法、双温度测量法、环境辐射温度计算测量法, 其中直接测量法和参考物体法直接使用环境温度代替环境辐射温度进行测量计算, 双温度测量法在相同环境下测量不同温度的辐射温度进行测量计算, 环境温度计算测量法根据传热学辐射换热的相关原理计算出环境辐射温度进行测量计算。

本文提出一种实用的测量物体波段发射率的方

作者简介:黄龙祥, 男, 硕士研究生, 主要从事红外目标模拟研究。E-mail: hlongxiang@126.com

收稿日期:2008-08-18

法。首先,使用大面源黑体作为已知发射率的参考物体,间接计算出环境辐射温度;然后,根据热像仪测量待测物体的表面总辐射亮度和测温仪测出的物体表面真实温度计算出待测物体的波段发射率。在这种方法中,黑体不仅作为已知发射率的参考物体,而且是热像仪测量总辐射亮度的校正装置,对提高测量波段发射率的精度具有重要意义。

2 波段发射率测量原理

2.1 辐射亮度^[10]

辐射源在某一方向上的辐射亮度是指在该方向上的单位投影面积向单位立体角中发射的辐射通量,用 L 表示。对表面温度为 T 的理想黑体,根据普朗克黑体辐射公式,垂直于黑体表面的辐射亮度为:

$$L = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} d\lambda \quad (1)$$

式中, $[\lambda_1, \lambda_2]$ 为光谱范围; λ 为波长; c_1, c_2 为辐射常数。

2.2 热像仪测温原理

对于表面温度为 T_t ,波段发射率为 ε_t 的灰体置于环境辐射温度为 T_b 的环境中,在近距离、不考虑大气衰减的情况下,热像仪测得的灰体表面的总辐射亮度 L_m 为^[11]:

$$L_m = \varepsilon_t L(T_t) + (1 - \varepsilon_t) L(T_b) \quad (2)$$

式中, $\varepsilon_t L(T_t)$ 是物体自身辐射部分,当物体为灰体时,与物体自身温度和物体表面的发射率有关,当波段发射率 ε_t 已知时,通过公式(1)可以计算出来; $(1 - \varepsilon_t) L(T_b)$ 是物体反射的环境辐射部分,这部分不仅与环境温度有关,而且与物体所处的环境、物体的方位、环境的复杂程度等因素有关,是一个复杂的量,很难直接通过计算或测量得出。在一般的热像仪测温中,环境辐射温度使用环境温度进行代替。

2.3 波段发射率测量原理

要想精确测定物体的波段发射率,必须通过某种方法测出环境辐射对被测物体的影响,也就是得出环境辐射亮度 $L(T_b)$ 。通过公式(2)可以发现,如果已知某物体的表面温度 T_t 、波段发射率 ε_t 、表面总辐射亮度 L_m ,即可以根据公式(2)计算得出环境辐射亮度 $L(T_b)$ 。选用高精度大面源黑体作为已知发射率的参考物体,这是由于高精度大面源黑体的表面发射率已知,黑体表面温度可以精确控制,使用热像仪直接测量黑体表面总辐射亮度,根据公式(2)可以精确计算出环境辐射亮度 L_b 为:

$$L_b = \frac{L(T_{mh}) - \varepsilon_h L(T_h)}{1 - \varepsilon_h} \quad (3)$$

其中, ε_h 为黑体发射率; T_b 为黑体表面温度; T_{mh} 为热像仪测量黑体的辐射温度。

如果待测物体和黑体置于相同的环境中,置于相邻的位置,环境中没有明显的镜面反射体,待测物体是灰体,那么相对于黑体表面的环境辐射亮度与相对于待测物体表面的环境辐射亮度就是相等的。把环境的辐射亮度 L_b 、热像仪测量待测物体的辐射温度 T_{mt} 、接触式测温仪测得待测物体的表面温度 T_t 代入式(2)得物体的波段发射率 ε_t 为:

$$\varepsilon_t = \frac{L(T_{mt}) - [L(T_{mh}) - \varepsilon_h L(T_h)] / (1 - \varepsilon_h)}{L(T_t) - [L(T_{mh}) - \varepsilon_h L(T_h)] / (1 - \varepsilon_h)} \quad (4)$$

2.4 测定波段发射率的误差分析

通过式(4)可以看到,物体的发射率与热像仪测量黑体的辐射温度、黑体的设置温度、黑体的发射率、热像仪测量待测物体的辐射温度、接触式测温仪测量物体表面温度有关。由于黑体的精度很高,黑体的设置温度与表面真实温度的误差和黑体表面的发射率误差忽略不计。最后,测量物体波段发射率的误差只与热像仪测量黑体的辐射温度、热像测量待测物体的辐射温度、测温仪测量的物体表面温度有关。

基于微分的思想,由式(4)可得实际所测定的物体波段发射率误差为:

$$\Delta \varepsilon_t = \frac{\partial \varepsilon_t}{\partial L_{mh}} \cdot \Delta L_{mh} + \frac{\partial \varepsilon_t}{\partial L_{mt}} \cdot \Delta L_{mt} + \frac{\partial \varepsilon_t}{\partial L_t} \cdot \Delta L_t \quad (5)$$

则 $\Delta \varepsilon$ 就是由热像仪测量黑体的辐射温度、热像测量待测物体的辐射温度、接触式测温仪测量物体的表面温度不准确带来的误差,其中:

$$\Delta L_{mh} = L_{mh}(T + \Delta T) - L_{mh}(T) \quad (6)$$

$$\Delta L_{mt} = L_{mt}(T + \Delta T) - L_{mt}(T) \quad (7)$$

$$\Delta L_t = L_t(T + \Delta T) - L_t(T) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_t}{\partial L_{mh}} = - \frac{(1 - \varepsilon_h) [L(T_{mt}) - L(T_t)]}{[(1 - \varepsilon_h) L(T_t) - L(T_{mh}) + \varepsilon_h L(T_h)]^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_t}{\partial L_{mt}} = \frac{(1 - \varepsilon_h)}{(1 - \varepsilon_h) L(T_t) - L(T_{mh}) + \varepsilon_h L(T_h)} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_t}{\partial L_t} = \frac{(1 - \varepsilon_h) [(1 - \varepsilon_h) L(T_{mt}) - L(T_{mt}) - L(T_{mh}) + \varepsilon_h L(T_h)]}{[(1 - \varepsilon_h) L(T_t) - L(T_{mh}) + \varepsilon_h L(T_h)]^2} \quad (11)$$

测量的物体波段发射率的相对误差为:

$$\gamma = \frac{\Delta \varepsilon_t}{\varepsilon_t} \quad (12)$$

3 实验过程

3.1 整体试验装置结构图

该测量装置使用 TP8 热像仪和 SR-800 高精度大面源黑体。热像仪波段响应范围 $8 \sim 14 \mu\text{m}$, 热像仪温度显示分辨率 0.1°C , 热像仪发射率的设置分辨率为 0.01 ; SR-800 的控制分辨率为 0.001°C , 控温精度小于 0.01°C , 发射率为 0.97 , 黑体内置高精度测温传感器温度分辨率为 0.001°C , 精度小于 0.01°C 。相对于热像仪测温精度可以认为黑体设置温度即为黑体表面真实温度。待测物体为碳纤维布, 碳纤维布可以通过电加热的方式改变表面温度, 广泛用于电热取暖、保温等民用领域以及红外目标伪装、模拟等军用领域。验证该测量方法可靠性使用的接触式测温仪为德国生产的数字温度测温仪 945, 测温精度为 0.4°C 。

3.2 试验过程及步骤

1) 如图 1 所示, 把黑体辐射面与碳纤维布表面置于相邻位置, 把热像仪置于距离黑体、碳纤维布 1m 的位置;



图 1 发射率测量装置实物图

2) 设置黑体温度, 待黑体表面温度稳定后, 分别记录热像仪波段发射率设置为 1 时的黑体表面温度值和碳纤维布表面的温度值, 同时记录热像仪波段发射率设置为 0.97 时的黑体表面温度值, 均多次测量取均值;

3) 黑体设置不同温度, 重复 2) 操作并实时记录黑体内置温度传感器测得的环境温度值。

4) 根据热像仪测量黑体的温度值得出热像仪测温的校正曲线, 根据校正曲线校正热像仪测量的黑体和碳纤维布的辐射温度;

5) 根据公式(4)计算物体在不同黑体设置温度时的波段发射率, 取均值得物体的波段发射率;

6) 验证发射率的准确性, 通过调节电压改变碳纤维布的表面温度, 把热像仪的发射率置为测量值, 比较用热像仪测量物体的表面温度与接触式测温仪

测量物体的表面温度。

3.3 试验结果及分析

热像仪测温精度不仅与热像仪自身特性有关还与所处的环境有关, 为了提高测温精度, 在测温过程中使用黑体进行实时校正。发射率设置为 0.97 时, 通过热像仪测量的黑体表面温度, 得出热像仪测量黑体温度校正曲线如图 2 所示, 利用热像仪校正曲线可以提高热像仪的测温精度。

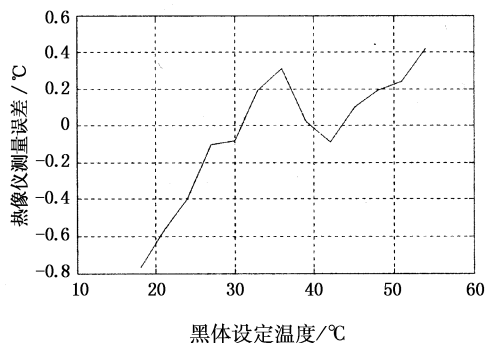


图 2 热像仪测温校正曲线

表 1 所示为黑体表面的辐射温度和物体表面的辐射温度是经过校正后的测量结果。环境温度使用黑体内置温度传感器进行测量, 在试验室环境温度不变的情况下, 物体表面的真实温度可以用环境温度代替。在实验的这段时间内, 环境温度变化极小, 而热像仪测量的物体表面辐射温度略有变化, 这是由热像仪的自身缺陷造成的。通过实际测量计算, 碳纤维布的发射率在不同测量中的值差别很小, 发射率取均值为 0.940 , 最大偏差为 0.011 。

表 1 试验数据记录及结果

黑体辐射温度/ $^\circ\text{C}$	物体表面辐射温度/ $^\circ\text{C}$	环境温度/ $^\circ\text{C}$	测定的波段发射率
18.55	22.99	22.111	0.935
21.44	23.03	22.118	0.932
24.34	22.99	22.115	0.934
27.24	23.04	22.115	0.929
30.14	22.86	22.117	0.944
33.04	22.98	22.114	0.933
35.95	22.87	22.113	0.941
38.88	22.82	22.118	0.947
41.80	22.86	22.111	0.946
44.71	22.81	22.116	0.949

表 2 是热像仪发射率设定为 0.94 时测量碳纤维布的表面温度与接触式测温仪测量结果的比较, 可以看出, 热像仪测量值与测温仪测量值的差值很

(下转第 177 页)

- [2] Chatard, J P. Sofradir MCT IRFPA new developments[J]. Proc. SPIE, 1995, 2552: 767 – 777.
- [3] Baker I M, Crimes G J, Parsons J E, et al. CdHgTe-CMOS hybrid focal plane arrays-a flexible solution for advanced infrared systems[J]. Proc. SPIE, 1994, 2269: 636 – 647.
- [4] Scribner D A. Infrared focal plane array technology[J]. Proc. IEEE, 1991, 79(1): 66 – 85.
- [5] Sizov F F, Derkach Y P, Korinets S V, et al. 576×6 RO-IC for MCT LWIR Arrays[J]. Proc. SPIE, 2005, 5726: 140 – 145.
- [6] Felix P, Moulin M, Munier B, et al. CCD readout of infrared hybrid focal-plane arrays[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1980, ED-27: 175 – 188.
- [7] Tobin S P, Iwasa S, Tredwell T. 1/f noise in (HgCdTe) photodiodes[J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1980, ED-27(Jan): 43 – 48.
- [8] Chung H K, Rosenberg M A, Zimmerman P H. Origin of 1/f noise observed in HgCdTe variable area photodiode arrays[J]. J. Vac. Sci. Techn., 1985, A3 (Jan): 189 – 191.
- [9] Su Y K, Juang Fuh-Shyang, Chang Shing-Ming, et al. 1/f noise and specific detectivity of HgCdTe photodiodes passivated with ZnS – CdS films[J]. IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, 1999, 35(5): 751 – 756.
- [10] Sizov F F, Golenkov A G, Zabudsky V V, et al. Noise measurements of HgCdTe LWIR arrays with CCD readouts[J]. Proc. SPIE, Materials for Infrared Detectors II, 2002, 4795: 136 – 146.
- [11] Lopez J M, J Alda. Bad pixel identification by means of principal components analysis[J]. Opt. Eng., 2002, 41: 2152 – 2157.
- [12] Kobayashi M, Wada H, Okamura T, et al. 480×8 hybrid HgCdTe infrared focal plane arrays for high-definition television format[J]. Opt. Eng., 2002, 41(8): 1876 – 1885.

(上接第 161 页)

小,根据测温仪的测温精度可以认为热像仪测量碳纤维布表面的温度满足要求,即设置的波段发射率是准确的,验证该方法测定波段发射率是可靠的。接触式测温仪在测温中存在无法克服的缺点,当被测物体温度高于环境温度较多时,测温结果比物体实际温度偏低,具体偏低多少与物体表面特性有关。所以在验证试验中,加热布的温度只是比环境温度高十几度,没有高很多。

表 2 两种方法测量温度比较

热像仪测量温度/℃	测温仪测量温度/℃	差值/℃
22.2	22.0	0.2
27.5	27.1	0.4
30.0	29.5	0.5
35.5	35.0	0.5

4 结 论

首先从理论上介绍了该方法的可行性,然后通过试验实际测量物体的发射率,最后比较了热像仪的测量值与接触式测温仪的测量值验证了该方法测量的发射率是准确的。该方法的优点是排除了环境复杂性的影响,只要环境中没有强镜面反射体的影响,无论室内室外该方法均可使用;装置简单,可行性强。缺点是能从理论上分析影响发射率测量的因素,但是很难精确计算出发射率误差的大小。

参考文献:

- [1] 孙晓刚,李云红. 红外热像仪测温技术发展综述[J]. 激光与红外, 2008, 38(2): 101 – 104.
- [2] 王文革. 红外光谱发射率测试方法的研究[J]. 宇航计测技术, 2002, 22(2): 36 – 39.
- [3] 王海燕, 吴坚业, 朱圆荣. 红外发射材料光谱发射率的测量法[J]. 红外技术, 2003, 25(6): 61 – 63.
- [4] 李艳红, 陈宏书, 郑建龙, 等. 红外发射材料光谱发射率的测量法[J]. 红外技术, 2008, 30(2): 114 – 117.
- [5] 罗晓春, 孙继银. 物体表面发射率的测量方法[J]. 自动测量与控制, 2007, 26(8): 72 – 74.
- [6] 侯成刚, 张广明, 赵明涛, 等. 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): 195 – 198.
- [7] Robert P Madding. Emissivity measurement and temperature correction accuracy[J]. Part of the SPIE Conference on Thermosense XXI, Oriando, Florida, April, SPIE, 1999, 3700: 393 – 401.
- [8] 曹义, 程海峰, 郑文伟, 等. 基于红外热像仪的涂层波段发射率测量[J]. 红外技术, 2007, 29(6): 316 – 319.
- [9] 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(9): 1336 – 1341.
- [10] 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: 213.
- [11] 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.