

基于环境辐射的现场目标发射率测量方法研究

李园园, 屈惠明, 刘文俊

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 目标发射率测量是目标红外辐射特性测量的基础。介绍了一种基于环境辐射改变的目标发射率的测量方法。分析及推导了到达探测器上的辐射量, 通过改变环境辐射的方法测定目标的反射率, 进而得到物体的发射率。在实验室内采用黑体作为主动辐射源改变环境辐射, 对三种物质分别进行发射率测量, 与直接测量的发射率进行比较, 结果最大误差为 0.017, 达到了实际需要, 验证了该测量方法的可行性和准确性。该方法为红外辐射非接触精确测量物体温度提供了必要参量。

关键词: 发射率; 红外热像仪; 环境辐射; 红外辐射

中图分类号: TN219 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.03.010

Field target emissivity measurement based on the environmental radiation

LI Yuan-yuan, QU Hui-ming, LIU Wen-jun

(School of Electronic Engineering and Optoelectronics Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Target emissivity measurement is the foundation of target infrared radiation characteristic measurement. The radiation of target and surroundings is analyzed. The amount of radiation reaching the detector is derived theoretically. A method of emissivity measurement based on the change of the environmental radiation is proposed. Object emissivity is obtained indirectly by measuring the reflectivity through changing the environmental radiation. The environmental radiation is changed by an extend blackbody chosen as initiative radiation source. Experimental study has been performed with various materials. The results are compared with the direct emissivity measurement. The maximum error is 0.017. The feasibility and accuracy of the proposal approach are verified. This study provides a reference for accurate non-contacting infrared thermometer.

Key words: emissivity; thermal infrared imager; environmental radiation; infrared radiation

1 引言

红外热成像测温技术具有非接触、直观、灵敏度高(可分辨 0.01 °C 的温度差)、快速(几毫秒内测出目标温度)、测温范围广(从 -170 ~ 3200 °C 以上)、检测距离可近可远、可实现夜视、安全等优点^[1], 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。红外热像仪测温主要受被测物体表面发射率的影响, 但反射率、环境温度、

大气温度、测量距离和大气衰减等因素的影响也不容忽视。尤其是对物体表面发射率估计的不准确, 更影响温度测量的精确性^[2]。又因为发射率是辐射波长、温度、方向以及表面状态的函数, 并在很大程度上取决于物体的表面状态, 因此在现场测量目

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 61171164)资助。

作者简介: 李园园(1988 -), 硕士在读, 研究方向为光电探测与成像。E-mail: liyuan060135@163.com

收稿日期: 2012-08-20; **修订日期:** 2012-08-30

标的红外辐射特性中,手册中的数据就不可靠了。这就需要在现场对发射率进行实际测量。本文提出一种现场测量常温物体(8~14 μm)波段发射率的方法,进行了理论分析和实验测量,给出了实验结果。

2 理论模型

在实际测量时,热像仪接收到的有效辐射包括三个部分:目标自身辐射、目标对周围环境反射辐射和大气辐射,如下式所示^[3-6]:

$$L = L_0 + \rho L_s + L_p \quad (1)$$

其中, L 为到达探测器表面的辐射亮度; L_0 为目标自身辐射亮度; ρ 为目标反射率; L_s 为环境辐射; L_p 为大气辐射;大气透过率为1。

红外热像仪的标定模型为^[6]:

$$V = \alpha L + L_f \quad (2)$$

式中, V 为红外热像仪输出值; L_f 仪器本身杂散能量; α 为红外热像仪亮度响应度。由式(1)和式(2)可得:

$$V = V_0 + \rho V_s - \rho L_f + \alpha L_p \quad (3)$$

其中, $V_0 = \alpha L_0 + L_f$ 为只有目标的辐射作用到探测器上时,红外热像仪输出值;式 $V_s = \alpha L_s + L_f$ 为单独环境辐射作用到探测器上时,红外热像仪的输出值。通过改变环境辐射得到两组输出:

$$\begin{cases} V = V_0 + \rho V_s - \rho L_f + \alpha L_p \\ V' = V_0 + \rho V'_s - \rho L_f + \alpha L_p \end{cases} \quad (4)$$

式中, V' 为改变后热像仪输出; V'_s 为改变后环境辐射,其中环境辐射即为黑体辐射,通过改变黑体温度达到改变环境辐射的目的。

由上组方程可得发射率 ε :

$$\varepsilon = 1 - \rho = 1 - \frac{V' - V}{V'_s - V_s} \quad (5)$$

以上从理论上证明了用改变环境辐射的办法可测定目标的反射率,进而得到物体的发射率。

理论分析:在此我们认为大气辐射均匀分布且不随时间改变,近距离大气透过率为1,研究一段时间内环境辐射改变情况下测量不透明目标(近似灰体)的发射率。物体发射率被定义为真实物体的辐射能量与同条件同温度下的黑体的辐射能量之比。由基尔霍夫定律,当辐射能入射到物体表面时,包括三个过程:吸收、反射、透射。对于不透明表面,只包括吸收、反射两个过程,其发射率等于热吸收率,又有吸收率+反射率=1,可以得到,发射率=1-反射率。因此我们可以得到物质的两种测量目标发射率的方法:直接测量和间接测量。

(1)将目标与黑体置于同一条件同一温度下,目标输出值与黑体输出值之比即为目标发射率。

(2)通过测量目标反射率,间接地测量目标发射率。

下面通过实验来验证无需测量目标温度的,基于人造环境影响的间接发射率测量方法的可行性及准确性。

3 实验装置

3.1 实验装置

该实验采用320×240 LWIR 非制冷红外热像仪(8~14 μm),测量目标辐射量;HFY-300A 面源黑体,有效发射率0.95,用于标定输出响应关系及提供人造环境热源;分光镜,在红外波段具有半透半反效果;聚光镜,把光束汇聚成小光斑。实验装置示意图如图1所示。

黑体的辐射光经聚光镜汇聚于分光镜上,由分光镜反射到达目标,通过与目标作用然后反射到达探测器,聚光镜的作用是为了使到达目标的辐射强烈而均匀。

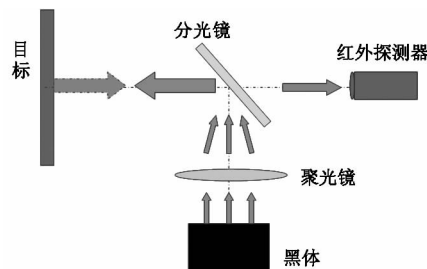


图1 实验装置示意图

3.2 辐射标定

红外热像仪测量是建立在黑体辐射理论基础上的定量测量,是以黑体辐射源为基准辐射量进行的对比测量。因此,红外热像仪在测试之前首先要以黑体辐射为基准建立系统响应函数。系统响应函数是反映测量所得输出信号与输入辐射之间函数关系的,它由光学系统、电子线路和探测器的响应率等因素决定。

在利用红外热像仪测量目标的辐射特性前,应首先对其进行辐射定标,确定热像仪的响应度,红外热像仪的标定模型如式(2)所示。黑体在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内的辐射亮度,由普朗克公式可得^[7]:

$$L = \frac{\varepsilon}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} d\lambda \quad (6)$$

实验环境:实验室中利用黑体,在不同温度下测量,给出一系列的输出值,画出目标亮度与输出值得输出关系,通过最小二乘法对输出值进行线性拟合,

得出红外热像仪的辐射亮度响应关系。

针对 $Y=kX+b$ 形式的最小二乘法拟合公式如下:

$$k = (\overline{xy} - \overline{x} \times \overline{y}) \div (\overline{x^2} - \overline{x}^2)$$
 (7)

$$b = \overline{y} - k \overline{x}$$
 (8)

其中, $\overline{x} = \frac{1}{n} \sum x_i; \overline{xy} = \frac{1}{n} \sum x_i y_i$ 。

黑体温度对应的灰度与辐射亮度数据如表 1 所示。

表 1 黑体温度对应的灰度和辐射亮度数据

温度/℃	28.4	28.8	29.2	29.6	30.00	30.40	30.8
输出值 (灰度)	133.7190	141.6942	152.3967	158.1240	166.0661	171.0496	173.3967
黑体亮度/ (cd·m ⁻²)	53.3011	53.6241	53.9482	54.2735	54.6000	54.9276	55.2564

辐射标定曲线如图 2 所示。

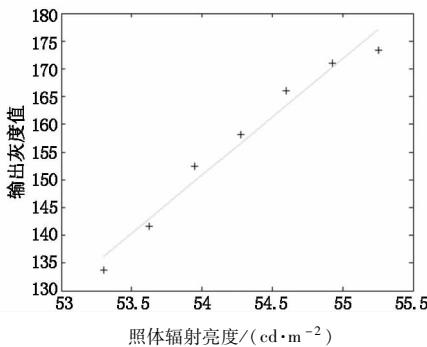


图 2 黑体辐射亮度与输出值之间的关系

通过实验测量由最小二乘法得到该热像仪的辐射亮度响应关系为: $y = 20.9672x - 981.3774$ 。

4 实验结果分析

实验中选取了三种物质分别是陶瓷、白纸和塑料板作为测量目标。从发射率测量原理我们知道,发射率测量是以标准黑体为基准,通过与被测样品的比较求出材料的发射率。直接测量值是将目标与黑体置于同一条件同一温度下,黑体和目标与探测器的距离 0.5 m,目标输出值与黑体输出值之比即为目标发射率。实验采用的红外热像仪的波段为

8~14 μm,因此测量的发射率即为波段发射率。每种材料重复测量 5 次,发射率取平均值。材料发射率测量值如表 2 所示。

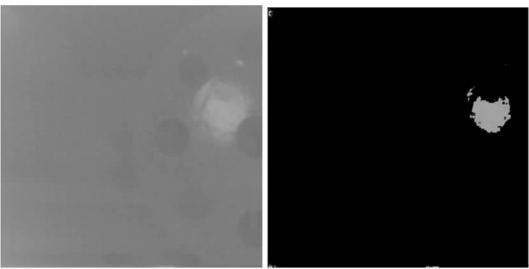
表 2 材料发射率测量值

	1	2	3	4	5	平均 发射率	不确定 度/%
瓷板	0.9618	0.9563	0.9479	0.9635	0.9457	0.9550	0.8
白纸	0.9423	0.9706	0.9527	0.9479	0.9519	0.9530	1.06
塑料	0.9329	0.941	0.9134	0.9232	0.9185	0.9258	1.11

表 2 列出分别对三种材料五次测量的发射率值,为了更能准确地表示该测量方法测量结果的不确定程度,分别计算三组测量值的标准不确定度,利用公式(9),它反映了数值相对于平均值的离散程度。不确定度小于 2%,由此可以说明该方法测量的稳定性较好。

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \overline{x})^2}{N - 1}}$$
 (9)

图 3(a)为瓷板测量图,图中较亮部分为瓷板表面反射黑体所辐射的(8~14 μm)红外波段,提取图像中该部分的灰度值,该值即为黑体辐射到瓷板上并通过瓷板表面反射到达探测器,探测器输出值,改变黑体温度,获取不同环境辐射的灰度图像,得到另一输出值,并通过式(6)计算两次环境辐射值,最后通过式(5)计算目标发射率。表 3 是三组材料经过多次测量得到的发射率值。



(a)黑体辐射到瓷板的图像 (b)瓷板上黑体辐射部分的图像

图 3 黑体辐射到瓷板的图像及瓷板上黑体辐射部分的图像

表 3 目标发射率测量数据

材料	黑体温度/℃	环境辐射(灰度)	目标(灰度)	直接测量值	测量平均值	最大误差值
陶瓷	29.6	$V_s = 156.5568$	$V = 131.1983$	0.9412	0.9550	0.0138
	31	$V'_s = 180.0965$	$V' = 133.0083$			
白纸	36.6	$V_s = 274.2555$	$V = 118.2562$	0.9361	0.9530	0.0169
	38.6	$V'_s = 307.8837$	$V' = 119.9752$			
塑料板	42.6	$V_s = 375.1401$	$V = 102.4463$	0.9084	0.9258	0.0174
	44.5	$V'_s = 407.0868$	$V' = 105.1570$			

由表3观察可知,物体的发射率实验结果的最大误差为0.017(1.9%),小于文献[4]中的三种方法测量发射率的误差 ± 0.02 和文献[8]中多波长测量发射率的误差5%;同时可以看出,材料的发射率越大,测量的误差越小。与表2比较,利用该方法测量的值比直接测量值偏大。产生该情况的原因,由于测量距离较近,使探测器表面升温,灵敏度下降,造成输出延缓。测量误差原因:①目标表面平整度的不均匀性分布;②黑体表面辐射的不均匀性。

根据文献[6],对于目标辐射特性的测量最重要的一个环节是大气透过率测量,在文献中给出了测量大气透过率的方法,大气透过率测量不确定度约为6%~10.5%,目标辐射反演精度为0.1%~3.4%。但存在的问题是,在反演目标温度时,需要已知目标发射率,而在伪装目标特性测量中,发射率的测量也是首要和重要的一个环节,因此提高目标发射率的测量,对提高目标辐射反演精度有重要意义。通过上面的实验分析,该方法可以实现发射率的精确测量。

5 结 论

本文通过理论推导,得出测量物体发射率的公式,首先在推导过程中并没有忽略或改变公式中的原有的表达式,保持了原公式的应用条件和范围,同时利用做差值得到所求量,避免了单次直接测量辐射量所产生的绝对误差;其次本文在测量过程中不需要接触被测目标,可以实现非接触测量;最后,对伪装目标的探测及目标红外特性的测量,利用本文方法不需要已知被测目标温度,因为发射率的精确测量意味着温度的精确测量。因此该方法具有良好的应用前景。例如,伪装目标探测,利用主动式辐射源测定目标的发射率,进而得到目标与背景温差,达到探测目的;在工业上,对于未知材料的非接触测温,实现设备故障检测。

参考文献:

- [1] Su Junhong, Zheng Weijian. Infrared ray two hundred years — from scientific exploration to technical innovation [J]. Infrared Technology, 2001, 23(1): 1-2. (in Chinese)
苏君红,郑为健. 红外线的二百年——从科学探索到技术创新[J]. 红外技术, 2001, 23(1): 1-2.
- [2] Hu Jianhong, Ning Fei. Influence of surface emissivity of objects on measuring accuracy of infrared thermal imagers [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optic, 2010, 3(2): 153-155. (in Chinese)
胡剑虹,宁飞. 目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 153-155.
- [3] Huang Longxiang, Sheng Xiangheng, et al. Measure target wideband emissivity with thermal imager [J]. Laser & Infrared, 2009, 39(2): 159-161. (in Chinese)
黄龙祥,沈湘衡,等. 基于热像仪的物体波段发射率的测量[J]. 激光与红外, 2009, 39(2): 159-161.
- [4] Yang Li, Kou Wei, Liu Kaihui, et al. Surface emissivity measurement and error analysis using infrared thermography [J]. Laser & Infrared, 2002, 32(1): 43-45. (in Chinese)
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.
- [5] Li Yunhong, Sun Xiaogang, Yuan Guilin. Accurate measuring temperature with infrared thermal imager [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(9): 1336-1341. (in Chinese)
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.
- [6] Yang Ciyin, Zhang Jianping, Cao Lihua. Infrared radiation measurement based on real-time correction [J]. Infrared Millim. Waves, 2011, 30(3): 285-288. (in Chinese)
杨词银,张建萍,曹立华. 基于实时标校的目标红外辐射测量新方法[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(3): 285-288.
- [7] Siegel R, Howell J R. Thermal radiation heat transfer [J]. 2nd ed. Washington, Hemisphere Publishing Corp, 1981.
- [8] Dai Jingmin, Yang Maohua, Chu Zaixiang. Multi-wavelength pyrometer and its applications [J]. Infrared Millim. Waves, 1995, 14(6): 461-466. (in Chinese)
戴景民,杨茂华,褚载祥. 多波长辐射测温仪及其应用[J]. 红外与毫米波学报, 1995, 14(6): 461-466.