

193-198

⑦

用红外热成像技术精确测定物体发射率*

侯成刚 张广明 赵明涛 屈梁生

(西安交通大学机械工程学院诊断与控制学研究所, 陕西, 西安, 710049)

TK311
~~FN211~~
TN21

A 摘要 根据红外探测器对物体辐射的输出响应, 从实际测量的角度提出了物体发射率的一般性定义, 分析了红外热成像技术进行精确测量的条件, 导出了物体温度 T_{ob} 、环境温度 T_{amb} 、物体发射率 η_0 和测量精度 e 之间的关系, 并建立了一套用红外热成像技术精确测定 η_0 的方法, 实验表明该方法可获得满意的测量结果。

关键词 红外辐射, 红外热成像, 发射率, 测量精度, 温度测量

引言

物体发射率是利用红外辐射进行非接触温度测量的关键参数, 没有准确的物体发射率, 就不可能利用红外热成像仪获得真实可靠的测量结果。在红外物理中, 物体的发射率被定义为该物体在指定温度时的辐射能与同温度黑体辐射能的比值^[1](本文称为发射率的经典定义), 它是一个与测量手段无关的物性参数。长期以来, 人们就是利用物体发射率的这一经典概念来进行红外测温的, 然而在一个实际的测量过程中, 测量数据的获取总是离不开具体的测量仪器。对于红外探测器而言, 其光谱响应的波长范围有限, 并且探测器的光谱响应率也不是一个常数, 这就使得探测器输出响应与物体辐射能之间没有简单的对应关系。因此, 在要求精确测温的场合下, 难以应用经典意义上的物体发射率; 为此本文在分析探测器输出响应的基础上, 结合实际测量, 提出了物体发射率的一般性定义, 并强调了它对测量仪器的依赖性。

另外, 根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律^[2], 任何温度高于绝对零度的物体都会向周围空间发射红外辐射, 即周围环境的辐射干扰不可避免地影响测量结果, 这就构成了红外热成像技术所固有的复杂性。本文通过对红外热成像技术测量原理的分析指出了消除环境干扰的条件, 并建立了一种精确测定物体发射率的方法。

1 物体发射率的一般性定义

红外热成像技术的理论基础是黑体辐射定律。半球空间上黑体辐射能的光谱分布由普朗克辐射定律给出^[2]:

$$W_b(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/\lambda kT) - 1]} \times 10^{-6}, \quad (1)$$

* 国家自然科学基金资助项目, 编号 59335033
本文 1996 年 6 月 24 日收到, 修改稿 1996 年 11 月 3 日收到

式(1)中 $W_b(\lambda, T)$ 为黑体的光谱辐射能 ($W/m^2 \cdot \mu m$), c 为光速, h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数, λ 为波长, T 为黑体的绝对温度.

实际的红外探测器仅能在一定的波长范围 (λ_1, λ_2) 对物体的热辐射产生响应, 如 InSb (3-5 μm) 和 HgCdTe (8-12 μm). 如果假设其光谱响应为 $r(\lambda)$, 则红外探测器的输出信号 I_b 为

$$I_b(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) \cdot W_b(\lambda, T) \cdot d\lambda, \quad (2)$$

式(2)表明了黑体的绝对温度 T 与红外探测器输出信号 I_b 之间的关系, 但在实际中难以直接应用式(2)作定量计算, 因此总是通过红外热像仪的标定曲线 $I_b(T)$ 来表示二者之间的定量关系. 瑞典 AGEMA 公司生产的红外热像仪的标定曲线可以用以下的数学模型精确描述^[3]:

$$I_b(T) = \frac{A}{e^{B/T} - F}, \quad (3)$$

式(3)中 $I_b(T)$ 为红外探测器接收到的绝对温度 T 的黑体辐射能量, A, B, F 为标定常数, A 为探测器的响应因子, B 为光谱因子, F 为探测器的形状因子. 式(3)是基于理想的黑体导出的结果, 理想黑体的发射率 $\epsilon_b = 1$, 是一个常数. 然而对于一个实际物体, 发射率通常是波长 λ 和温度 T 的函数 $\epsilon_o(\lambda, T)$, 由物体光谱发射率的定义 $\epsilon_o(\lambda, T) = \frac{W_o(\lambda, T)}{W_b(\lambda, T)}$, 实际物体的红外辐射能在探测器上引起的响应 I_o 为

$$I_o(T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) \cdot W_o(\lambda, T) \cdot d\lambda = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) \cdot \epsilon_o(\lambda, T) \cdot r(\lambda) \cdot W_b(\lambda, T) \cdot d\lambda \quad (4)$$

如果令

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_o(\lambda, T) \cdot r(\lambda) \cdot W_b(\lambda, T) \cdot d\lambda = \eta_o(T) \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) \cdot W_o(\lambda, T) \cdot d\lambda,$$

则

$$\eta_o(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_o(\lambda, T) \cdot r(\lambda) \cdot W_b(\lambda, T) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} r(\lambda) \cdot W_b(\lambda, T) \cdot d\lambda} = \frac{I_o(T)}{I_b(T)}. \quad (5)$$

式(5)为物体发射率的一般性定义, 记为 $\eta_o(T)$ (以便与其经典定义^[1]相区别), 即: 物体的发射率是物体辐射能在红外探测器上产生的输出信号与同温度黑体辐射能在该探测器上产生的输出信号之比, 式(5)表明了 $\eta_o(T), I_o(T), I_b(T)$ 之间的对应关系, $\eta_o(T)$ 与经典定义具有不同的物理含义, 它从探测器响应的角度对物体的红外辐射能力进行了评价.

由于式(5)的两个积分项中包含了探测器的光谱响应函数, $\eta_o(T)$ 还揭示了探测器的输出信号与物体辐射能和探测器光谱响应之间的内在联系. 当物体的光谱发射率 $\epsilon_o(\lambda, T)$ 不是一个常数时, 如果不进行适当的简化(如: 假定被测物体为灰体), 在实际的测量过程中就不可能应用物体发射率的经典定义, 但是这些假设本身未必正确, 这就不可避免的引入了理论误差. 与发射率的经典定义相比, 发射率的一般性定义 $\eta_o(T)$ 在本质上反映了测量数据对

探测器的依存关系,更符合实际情况,从而能够更客观、更准确地解释测量结果。

灰体的光谱发射率是一个小于 1 的常数. 根据式(5)和发射率的经典定义 $\epsilon_o(T)$, 不难证明: $\eta_o(T) = \epsilon_o(T)$, 即只有当物体为灰体时, 才能获得经典意义下的物体发射率 $\epsilon_o(T)$ 的数值, 这个数值与所使用的测量仪器无关. 在现实世界, 严格意义上的灰体几乎是不存在的. 在实际测量中, 人们常常将被测物体视作灰体, 这在测量要求不高的情况下是可行的, 但对于精确测温, 这个假设本身就不正确. 对于黑体, 显然有 $\eta_o = 1$ 成立. 式(5)关于物体发射率的一般性定义具有普适性, 从理论上讲, 它可以适用于一切物体(黑体、灰体或选择性辐射体).

式(5)还说明: 使用光谱响应函数不同的红外探测器测定同一物体的发射率, 测量数据可能不同, 但是如果用它们各自测定的发射率分别去算该物体的温度, 则结果应该是相同的, 这正如每台红外热成像仪在出厂前都要进行精确的标定一样, 尽管它们的标定常数不尽相同, 但是它们都能获得正确的测量结果. 红外数据手册上给出的物体发射率, 通常只能对物体温度作大致的估算, 而不能用作精确测温的依据. 当需要精确测温时, 应该使用红外热像仪测定的物体发射率; 另外在某类探测器下测定的物体发射率, 不能不加分析地在另一类探测器上使用, 否则将导致较大的测量误差, 甚至错误的结果.

当探测器选定后, $\eta_o(T)$ 与波长 λ 无关, 它是温度 T 的函数, 因此在某一温度下测定的物体发射率, 只能在一定的温度范围内使用, 以免产生较大的测量误差.

2 红外热成像技术精确测量的条件

图 1 中 T_{obj} 、 T_{sur} 、 T_{atm} 分别为物体、环境和大气绝对温度; i_{obj} 、 i_{sur} 、 i_{atm} 、 i_{img} 分别为红外探测器接收到的物体、环境、大气和扫描器内部的热辐射; I_{obj} 、 I_{sur} 分别为温度等于 T_{obj} 和 T_{sur} 的黑体辐射; I_{atm} 为大气热辐射; τ_o 为大气透射率.

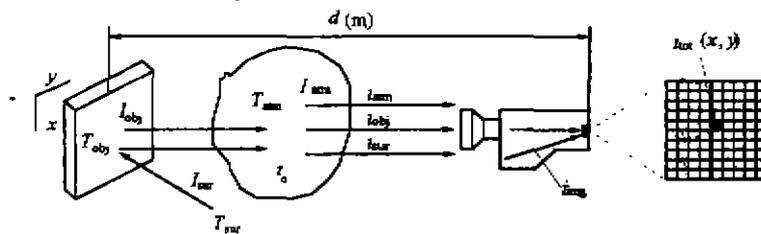


图 1 红外热像仪的一般测量环境

Fig. 1 The general measurement surroundings of infrared imaging system

实际上, 红外探测器接收到的热辐射不能用式(5)简单表示, 因为红外探测器所接收的热辐射能量 i_{tot} 不仅包括来自物体的红外辐射, 而且还包括物体对环境的反射辐射、大气的透射辐射以及扫描器内部的热辐射等(见图 1), 即:

$$\begin{aligned}
 i_{tot} &= i_{obj} + i_{sur} + i_{atm} + i_{img} \\
 &= \tau_o \cdot \eta_o \cdot I_b(T_{obj}) + \tau_o \cdot (1 - \eta_o) \cdot \eta_n \cdot I_b(T_{sur}) + (1 - \tau_o) \cdot I_{atm} + i_{img}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

式(6)中 η_o 、 η_e 分别为物体和环境的发射率. 当物体的温度较低时, 为了达到准确测量的目的, 必须从 i_{tot} 中扣除环境、大气和扫描器的热辐射, 而扫描器的热辐射 i_{img} 在其内部已被补偿^[4], 因此在式(6)中可以略去 i_{img} 项. 而均匀环境辐射, 可以等效为 $\eta_e=1$ 、温度为 T_{sur} 的黑体辐射^[3], 记 $I_{\text{obj}}=I_b(T_{\text{obj}})$ 、 $I_{\text{sur}}=I_b(T_{\text{sur}})$, 并将 η_o 作为待求参数, 由式(6)可得:

$$\eta_o = \frac{i_{\text{tot}} - \tau_o \cdot I_{\text{sur}} - (1 - \tau_o) \cdot I_{\text{atm}}}{\tau_o \cdot (I_{\text{obj}} - I_{\text{sur}})} \quad (7)$$

由于影响大气透射辐射 i_{atm} 的因素很多(如大气的温度、气压、相对湿度和大气的组份等), 很难准确计算 i_{atm} 的值, 但是当红外热像仪的工作距离 $d \leq 1.0\text{m}$ 时, τ_o 十分接近 1, 忽略 i_{atm} 几乎不引入理论误差, 于是物体的发射率为

$$\eta_o = \frac{i_{\text{tot}} - I_{\text{sur}}}{I_{\text{obj}} - I_{\text{sur}}} \quad (8)$$

式(8)中 I_{obj} 和 I_{sur} 可分别将 T_{obj} 和 T_{sur} 代入式(3)算得:

$$I_{\text{obj}} = \frac{A}{e^{B/T_{\text{obj}}} - F}, \quad I_{\text{sur}} = \frac{A}{e^{B/T_{\text{sur}}} - F} \quad (9)$$

在实际应用中, 物体的发射率有时是其位置的函数 $\eta_o(x, y)$, 此时用红外热像仪只需获取物体表面的一幅热像, 就可以方便地算出物体表面不同位置的发射率

$$\eta_o(x, y) = \frac{i_{\text{tot}}(x, y) - I_{\text{sur}}}{I_{\text{obj}} - I_{\text{sur}}} \quad (10)$$

3 η_o 、 T_{obj} 、 T_{sur} 和测量精度 e 之间的关系

测量误差主要有系统误差和随机误差^[6]. 红外热像仪系统误差可用其标定曲线 $I_b(T)$ 的准确度来衡量. 由于红外热像仪的标定曲线可以在严格的测量环境下精确标定, 具有很高的准确性, 通常不会成为测量误差的主要来源, 因此, 在实际应用中, 可以忽略系统误差, 认为随机误差是测量精度的决定因素. 假设红外热像仪测量数据 i_{tot} 的误差为 $\pm C$ (C 是大于零的常数)、环境温度为 T_{sur} 、红外热像仪的标定曲线为 $I_b(T) = f(T; A, B, F)$ 、物体真实的发射率为 η_o , 其测量值为 η'_o , 如果要求发射率 η_o 的测量误差不大于 e , 则

$$\frac{|\eta_o - \eta'_o|}{\eta_o} = \frac{\left| \frac{i_{\text{tot}} - I_{\text{sur}}}{I_{\text{obj}} - I_{\text{sur}}} - \frac{i'_{\text{tot}} - I_{\text{sur}}}{I_{\text{obj}} - I_{\text{sur}}} \right|}{\frac{i_{\text{tot}} - I_{\text{sur}}}{I_{\text{obj}} - I_{\text{sur}}}} = \frac{|i_{\text{tot}} - i'_{\text{tot}}|}{i_{\text{tot}} - I_{\text{sur}}} = \frac{|\pm C|}{i_{\text{tot}} - I_{\text{sur}}} \leq e,$$

由式(8)可以求得

$$I_{\text{obj}} \geq \frac{C}{\eta_o \cdot e} + I_{\text{sur}} \quad (11)$$

将式(11)代入式(3)得

$$T_{\text{obj}} = \frac{B}{\ln\left(\frac{A}{I_{\text{obj}}} + F\right)} \geq \frac{B}{\ln\left(\frac{A}{C/\eta_o/e + I_{\text{sur}}} + F\right)} \quad (12)$$

式(12)中 $I_{sur} = \frac{A}{e^{B/T_{sur}} - F}$.

根据式(12)可以把 η_0 、 T_{sur} 、 T_{obj} 和测量精度 e 之间的关系绘成图 2. 从图 2 可以看出: 当 $\eta_0 \leq 0.20$ 时, 为了满足测量要求, 物体的设定温度 T_{obj} 会急剧增加, 这说明 η_0 越小, 准确测量就越困难. 对于一个确定的物体而言, 增加物体的设定温度 T_{obj} , 就可以减小随机误差, 提高 η_0 的测量精度.

需要指出的是: 在实际测量过程中, 确定测量要求为 $e=0.02 \sim 0.05$ 是一个现实而合理的指标, 当期望更好的测量精度时, 就应该把系统误差的制约考虑进去.

4 η_0 的测量步骤

根据上述分析, 可以把利用红外热成像仪精确测定物体发射率 η_0 的步骤归纳如下:

- (1) 确定测量环境 T_{sur} 、所使用的红外热像仪的标定曲线 $I_b(T) = f(T; A, B, F)$ 以及红外热像仪的误差常数 C ;
- (2) 确定测量要求 e ;
- (3) 估计物体的发射率值 $\eta_0' (\leq \eta_0)$;
- (4) 根据 η_0' 的值由图(2)或式(12)计算物体的设定温度 T_{obj}' ;
- (5) 考虑到环境温度的波动 ΔT_{sur} , 最后取物体的设定温度 $T_{obj} = T_{obj}' + \Delta T_{sur}$, ($\Delta T_{sur} \geq 0$);
- (6) 将物体放入专用测定箱(或黑体炉), 并将测定箱的温度设定为 T_{obj} ;
- (7) 在测定箱的温度稳定后, 用精密温度计或热电偶读取此时的环境温度 T_{sur} 和测定箱内的温度 T_{obj} ;
- (8) 迅速打开测定箱的箱盖, 用红外热像仪捕获物体的热像 $i_{tot}(x, y)$;
- (9) 由式(10)算得物体的发射率 η_0 ;

如果事先无法对物体发射率的数值作出估计时, 可先令 $\eta_0' = 0.50$, 把用上述方法测得的 η_0 与 η_0' 比较, 如果 $\eta_0 < \eta_0'$, 则不能满足测量要求, 于是令 $\eta_0' \leq \eta_0$, 再次执行测量步骤(4)~(9), 便可以获得精确的 η_0 值.

5 测量结果

5.1 精密温度参考源发射率 η_0 的测定

AGEMA 公司提供的 1010 型精密温度参考源的发射率 $\eta_0^* = 0.97^{[3]}$, 如果取发射率的估计值 $\eta_0' = 0.950$ 、测量要求 $e = 0.01$ 、环境温度 $T_{sur} = 23.2^\circ\text{C}$, 则由式(12)计算出的物体设定温度 $T_{obj} = 36.0^\circ\text{C}$, 1010 型精密温度参考源发射率的测量结果为 $\eta_0' = 0.975$.

5.2 印刷电路板发射率 $\eta_0(x, y)$ 的测定

选择并测量某一印刷电路板上三个元件 A、B 和 C 的发射率, 它们发射率的预估值均为

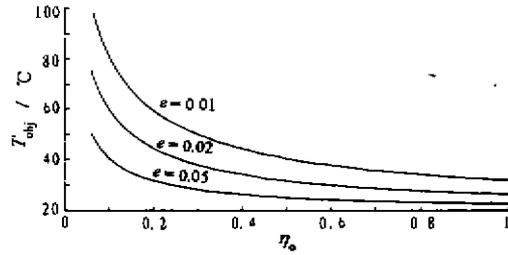


图 2 η_0 、 T_{sur} 、 T_{obj} 和 e 之间的关系
Fig. 2 The correlation among η_0 、 T_{sur} 、 T_{obj} and the measurement accuracy e

$\eta_0' = 0.500$, 当 $e = 0.01$, $T_{sur} = 23.4^\circ\text{C}$, 由式(12)计算出的印刷电路板的设定温度为 $T_{obj} = 45.0^\circ\text{C}$, 三个元件发射率 η_0 的测量值分别为 0.858(A)、0.214(B)、0.922(C). 由于元件 B 的测量值 $\eta_0 < \eta_0'$, 不能满足测量要求, 因此对它进行了第二次测定, 取其发射率的估计值 $\eta_0' = 0.210$, $e = 0.01$, $T_{sur} = 23.5^\circ\text{C}$, 则设定温度 $T_{obj} = 60.0^\circ\text{C}$, 此时测得的元件 B 的发射率为 0.241. 为了验证元件发射率测量结果的准确性, 在环境温度 $T_{sur} = 23.2^\circ\text{C}$ 和另一已知的设定温度 $T_{obj}^* = 40.0^\circ\text{C}$ 下, 根据前面所测定的元件发射率 0.858(A)、0.241(B)、0.922(C), 算出的元件温度分别为 40.4°C (A)、 40.7°C (B)、 40.2°C (C).

6 结语

物体发射率的一般性定义揭示了红外探测器的输出信号与物体辐射能和探测器光谱响应之间的内在联系, 更符合实际的测量情况, 从而能够更客观、更准确地解释测量结果; 在环境辐射均匀, 并且红外热像仪的工作距离 $d \leq 1.0\text{m}$ 的条件下, 根据物体发射率 η_0 、环境温度 T_{sur} 、物体温度 T_{obj} 和测量精度 e 之间的关系, 在测量中设定合适的物体温度 T_{obj} , 就可以利用红外热成像仪技术准确测定物体发射率 η_0 .

参考文献

- 1 白长城, 张海兴, 方潮宝. 红外物理, 北京: 电子工业出版社, 1989, 33~55
- 2 Siegel R, Howell J R. *Thermal Radiation Heat Transfer (2nd ed.)*, Washington, Hemisphere Publishing Corp., 1981
- 3 AGA Thermovision 780 Operating Manual, AGA Infrared System AB, 1980
- 4 Hamrelius T. *SPIE Thermosense X #*, 1991, 1469: 448~457
- 5 Dong-Ho L. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, 1994, 43(6): 824~829
- 6 Taylor J K. *Statistical Techniques for Data Analysis*, Michigan, Lewis Publishers, Inc., 1990

ACCURATE MEASUREMENT OF OBJECT EMISSIVITY USING INFRARED IMAGING TECHNIQUE*

Hou Chenggang Zhang Guangming Zhao Mingtao Qu Liangsheng
(Research Institute of Diagnostics and Cybernetics, School of Mechanical Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract A general definition of object emissivity (η_0) which is related with the spectral response of detector was put forward for actual measurement. The physical significance of η_0 was also stated. Its determination using infrared imaging technique was described in detail. According to the analysis of the correlation among object surface temperature (T_{obj}), surrounding temperature (T_{sur}), object emissivity (η_0) and measurement accuracy (e), a measuring method to obtain accurate object emissivity η_0 was presented. Applications show that the measurement results are satisfactory.

Key words infrared radiation, infrared imaging, emissivity, measurement accuracy.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China