

红外测温仪仅作比辐射率校正时的 误差分析和实验研究*

张才根

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海)

刘 健** 包学诚

(上海交通大学, 上海)

摘要——对红外测温仪仅作目标比辐射率校正时产生的测温误差进行理论分析及实验测试, 实验结果与理论分析基本上相吻合。

关键词——比辐射率, 测温误差, 环境辐射温度。

1. 引 言

红外测温时, 目标自身的热辐射特性及环境辐射都将对仪器的测量精度产生影响, 尤其是当目标反射的环境辐射能量与目标自身的辐射能量相比不能忽略时, 环境辐射的影响更为突出。

目前使用的大多数红外测温仪仅对比辐射率 ε 进行修正, 而对环境辐射没有进行修正, 因而产生测量误差。本文从等效黑体辐射理论出发, 用一个比辐射率为 ε_0 , 温度为 T_0 的园面状辐射源作为环境辐射, 通过改变源温度 T_0 实现环境辐射温度的变化, 对红外测温仪仅作比辐射率修正时引起的测温误差, 进行理论分析和实验研究, 进而获得影响测温精度的定量结果及消除误差的方法, 这也是对等效黑体辐射理论的推广和验证。

2. 理 论 分 析

我们以往的研究表明^[1~3], 用红外测温仪测量目标的温度时, 它接收的总能量包括目标自身发射的辐射能量及目标反射的环境辐射能量。设目标是温度为 T , 比辐射率为 ε (反射

本文 1989 年 3 月 21 日收到。

* 国家自然科学基金资助课题。

** 现在山东纺织工学院。

率 $\rho = 1 - \varepsilon$ 的灰体, ε 与波长 λ 无关; 测温仪斩波器的温度为 T_0 , 比辐射率 $\varepsilon_0 = 1$; 并设环境物体有 N 个, 它们在被测目标上的光谱辐照度分别为 $E_{1\lambda}, E_{2\lambda}, \dots \dots E_{N\lambda}$. 红外测温仪中的红外探测器接受到的净能量为来自目标方向的总辐射能量与斩波器辐射能量之差. 此时, 在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 光谱区内, 探测器的输出信号经信号处理后输出的直流信号 \bar{V}_s 为

$$\bar{V}_s = \varepsilon V(T) + (1 - \varepsilon) V(T_b) - V(T_0); \quad (1)$$

式(1)中,

$$V(T) = A_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{W}(\lambda, T) d\lambda; \quad (2)$$

$$V(T_b) = A_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sum_{i=1}^N E_{i\lambda} d\lambda; \quad (3)$$

$$V(T_0) = A_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{W}(\lambda, T_0) d\lambda; \quad (4)$$

式(2~4)中, A_0 与仪器光学系统的入瞳及透射率、视场角、斩波因子、大气透射率、探测器的响应率及电子学处理系统的信号增益等有关; 但是, 对于一个确定的系统, 它是个常量. $\bar{W}(\lambda, T)$ 、 $\bar{W}(\lambda, T_b)$ 及 $\bar{W}(\lambda, T_0)$ 分别是温度为 T 、 T_b 及 T_0 的黑体光谱辐射出射度 ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); T_b 是环境辐射等效黑体温度, 简称为环境辐射温度.

由式(1)可知

$$V = \frac{\bar{V}_s + V(T_0)}{\varepsilon} - \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} V(T_b); \quad (5)$$

式(5)说明, 用部分能量法红外测温仪来测定目标的表面真温 T 时, 不仅应作目标比辐射率校正, 而且还要作环境辐射温度 T_b 的校正. 当红外测温仪仅作比辐射率校正, 而不作环境辐射校正时, 它所测得的温度一般不是目标的真温 T , 而是偏离真温 T 的另一个温度 T' , 即

$$V(T') = \frac{\bar{V}_s + V(T_0)}{\varepsilon}; \quad (6)$$

将式(6)减去式(5); 得

$$V(T') - V(T) = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} V(T_b); \quad (7)$$

式(7)是在通常情况下红外测温仪仅作比辐射率校正时的测温误差表达式, 显然, 它与目标自身的温度 T 及比辐射率 ε , 以及环境辐射温度 T_b 有关.

为给出测温误差 $\Delta T = T' - T$ 的定量表达式, 必须求出 $V(T_b)$. 在以下特定的情况下, 应用能量迭加原理, 我们把环境辐射分成温度为 T_0 的环境空气辐射, 以及外加园面形热源在目标面上产生的辐照度 E .

设热源是半径为 r_0 (cm), 比辐射率为 ε_s , 温度为 T_s 的朗伯源, 它正对目标, 与目标相距为 h (cm); 目标面元 (即目标上充满红外测温仪视场的部分) 对热源的半视场角为 θ_0 ; 测温仪与目标法线夹角为 θ_r ; 如图 1(a) 所示.

从图 1(b) 可见, 由热源圆环状面元 $dA_s = r dr d\varphi$ 上发出的辐射, 在目标面元上产生的光谱辐照度 dE_λ 为

$$dE_\lambda = L_\lambda \frac{\cos^2 \theta}{x^2} r dr d\varphi; \quad (8)$$

式(8)中 L_λ 为热源的光谱辐亮度, 且

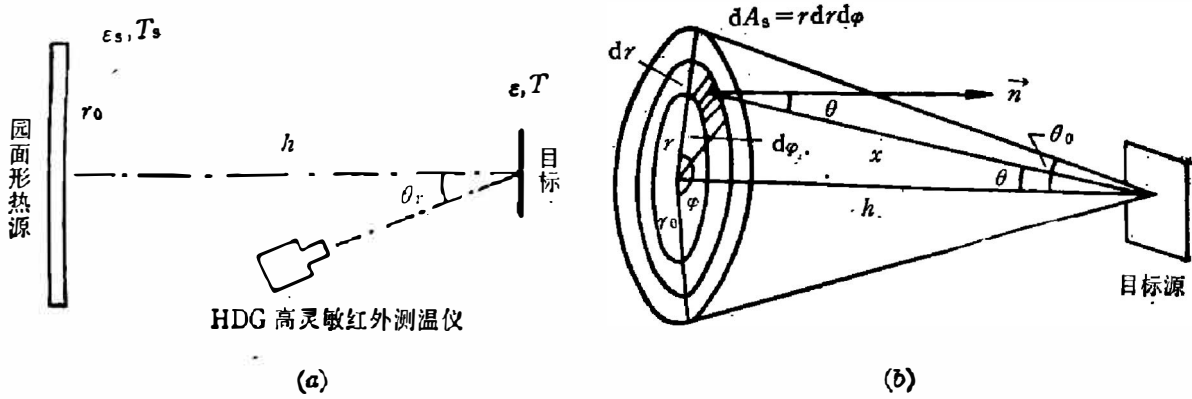


图 1 测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the measurement.

(a) 原理示意图 (b) 几何图形

$$L_\lambda = \frac{\varepsilon_s \bar{W}(\lambda, T_s)}{\pi}; \tag{9}$$

由图 1(b) 中可见, 式(8)中

$$\begin{aligned} x &= \frac{h}{\cos \theta}; \\ r &= h \tan \theta; \\ dr &= \frac{h}{\cos^2 \theta} d\theta; \end{aligned}$$

则, 式(8)可变为

$$dE_\lambda = \frac{1}{\pi} \varepsilon_s \bar{W}(\lambda, T_s) \sin \theta \cos \theta d\theta d\varphi; \tag{10}$$

于是热源在目标面积元上产生的光谱辐照度为

$$\begin{aligned} E_\lambda &= \int_0^{\theta_0} \int_0^{2\pi} \frac{1}{\pi} \varepsilon_s \bar{W}(\lambda, T_s) \sin \theta \cos \theta d\theta d\varphi \\ &= \varepsilon_s \bar{W}(\lambda, T_s) \sin^2 \theta_0; \end{aligned} \tag{11}$$

由图 1(b) 可知,

$$\sin^2 \theta_0 = \frac{r_0^2}{r_0^2 + h^2}; \tag{12}$$

因此, E_λ 为

$$E_\lambda = \frac{r_0^2}{r_0^2 + h^2} \varepsilon_s \bar{W}(\lambda, T_s); \tag{13}$$

这样, 式(3)可写成

$$V(T_b) = A_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[\frac{r_0^2}{r_0^2 + h^2} \varepsilon_s \bar{W}(\lambda, T_s) + \bar{W}(\lambda, T_a) \right] d\lambda \tag{14}$$

令

$$V(T_s) = A_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{W}(\lambda, T_s) d\lambda; \tag{15}$$

$$V(T_a) = A_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \bar{W}(\lambda, T_a) d\lambda; \tag{16}$$

则

$$V(T_b) = \frac{r_0^2}{r_0^2 + h^2} \varepsilon_s V(T_s) + V(T_a); \quad (17)$$

对常温的目标, 这里只讨论式(17)右边第一项对测温精度的影响, 则式(7)变为

$$V(T') - V(T) = \frac{r_0^2}{r_0^2 + h^2} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \varepsilon_s V(T_s); \quad (18)$$

为讨论方便起见, 将光谱区 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 取作 $0 \sim \infty$, 可得

$$(T')^4 - T^4 = \frac{r_0^2}{r_0^2 + h^2} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \varepsilon_s T_s^4; \quad (19)$$

令 $T' = T + \Delta T$, 并取 ΔT 的一次项, 忽略 ΔT 的高次项, 则有 $(T')^4 = T^4 + 4T^3 \Delta T$, 代入式(19)得

$$\Delta T = \frac{\varepsilon_s}{4} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \frac{r_0^2}{r_0^2 + h^2} \frac{T_s^4(K)}{T^3(K)}; \quad (20)$$

式(20)给出了绝对误差 ΔT 的表示形式. 相对误差的表达式为

$$e = \frac{\Delta T(K)}{T(K)} = \frac{\varepsilon_s}{4} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \frac{r_0^2}{r_0^2 + h^2} \frac{T_s^4(K)}{T^4(K)}; \quad (21)$$

实际上, 由于红外测温仪均采用摄氏温标分度, 并取一级近似, 因此, 则有

$$T_s^4(K) = [273 + T_s(^{\circ}\text{C})]^4 \approx 273^4 + 4 \times 273^3 \times T_s(^{\circ}\text{C});$$

同理, $T^4(K) \approx 273^4 + 4 \times 273^3 \times T(^{\circ}\text{C})$.

这时, 相对误差的表达式近似为

$$e = \frac{\Delta T(^{\circ}\text{C})}{T(^{\circ}\text{C})} \approx \frac{\varepsilon_s}{4} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \frac{r_0^2}{r_0^2 + h^2} \frac{1 + 0.0146T_s(^{\circ}\text{C})}{1 + 0.0146T(^{\circ}\text{C})}. \quad (22)$$

3. 实 验 研 究

为验证上述的分析, 我们采用图 1 所示的测试系统进行了实验研究. 热源 $r_0 = 23 \text{ cm}$, $\varepsilon_s = 0.96$, 温度 T_s 能在室温至 100°C 内调控. 测温仪采用自行研制的 HDG 高灵敏红外测温仪, 该仪表的主要技术性能: 测温范围为 $-50 \sim 200^{\circ}\text{C}$; 响应光谱为 $8 \sim 14 \mu\text{m}$; 视场角为 4.7° ; 响应时间为 $1/4 \text{ s}$; 温度分辨率(NETD)为 0.01°C ; 测温精度为 $1^{\circ}\text{C} \pm 1\%$ 温度读数. 被测目标与热源平行, 相距 h 为 60 cm . 对木板、黄纸板、白纸板三种物体进行了测试, 它们的比辐射率用圆筒法^[5]测量, 在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 光谱区内, 测得的比辐射率各为 ε_1 (木板) = 0.904 ; ε_2 (黄纸板) = 0.856 ; ε_3 (白纸板) = 0.823 . 它们的漫射特性均比较好.

测量时, 将热源温度分别控制在不同的温度 T_s , 用红外测温仪分别测出目标的亮温 T_b 和对 ε 校正后的温度 T' , 并用文献[1]的方法求出 T_b , 再对 T_b , ε 同时进行修正, 测出目标的真温 T ; 这样就可由 $\Delta T = T' - T$ 求得 ΔT , 以及相对误差

$\Delta T/T$, 并与由式(20)计算的理论值比较. 实验测量结果见表 1 及图 2.

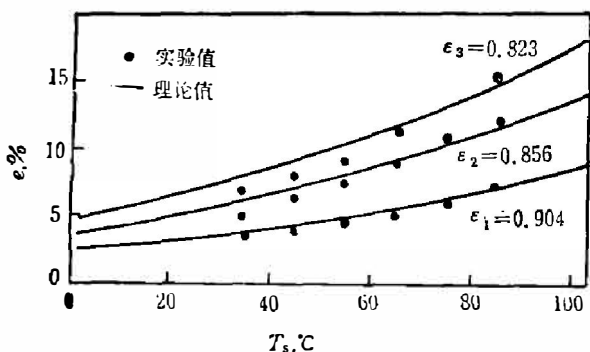


图 2 测温误差的理论分析和实验结果

Fig. 2 Theoretical analysis and experimental results of the temperature measurement errors.

表 1 不同的比辐射率下温度测量结果(表中 T_0 为空气温度)
 Table 1 The experimental results of the temperature measurement
 for different emissivity (T_0 —ambient temperature)

$\epsilon_1=0.904$ (木板)

$T_0(^{\circ}\text{C})$	$T_s(^{\circ}\text{C})$	$T_e(^{\circ}\text{C})$	$T'(^{\circ}\text{C})$	$T_b(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	$e(\%)$
26	35	26.60	27.01	28.47	26.07	0.94	3.61
26	45	26.53	27.18	30.76	26.09	1.09	4.18
25.5	55	26.53	27.24	32.92	26.01	1.23	4.71
26.5	65	27.25	28.34	35.16	26.93	1.41	5.25
26.9	75	27.89	29.05	37.22	27.37	1.68	6.14
26.2	85	27.48	28.39	38.39	26.40	1.99	7.54

$\epsilon_2=0.856$ (黄纸板)

$T_0(^{\circ}\text{C})$	$T_s(^{\circ}\text{C})$	$T_e(^{\circ}\text{C})$	$T'(^{\circ}\text{C})$	$T_b(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	$e(\%)$
26	35	26.73	27.44	28.47	26.11	1.33	5.09
26	45	26.97	27.84	30.76	26.14	1.70	6.50
25.5	55	27.00	28.05	32.92	26.05	2.00	7.68
26.5	65	27.99	29.42	35.16	27.01	2.40	8.95
26.9	75	28.76	30.41	37.22	27.44	2.97	10.82
26.2	85	28.58	29.76	38.39	26.53	3.23	12.17

$\epsilon_3=0.823$ (白纸板)

$T_0(^{\circ}\text{C})$	$T_s(^{\circ}\text{C})$	$T_e(^{\circ}\text{C})$	$T'(^{\circ}\text{C})$	$T_b(^{\circ}\text{C})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	$e(\%)$
26	35	26.91	27.33	28.47	26.00	1.73	6.65
26	45	26.88	28.13	30.76	26.00	2.13	8.19
25.5	55	27.10	28.42	32.92	26.04	2.38	9.14
26.5	65	28.15	30.05	35.16	27.01	3.04	11.26
26.9	75	29.01	31.18	37.22	27.55	3.63	13.18
26.2	85	28.82	30.67	38.39	26.63	4.04	15.17

4. 结 论

由表 1 和图 2, 我们可得到以下结论:

(1) 用红外测温仪来测定目标温度时, 仅作目标辐射率校正而不作环境辐射温度校正时, 将产生测温误差, 目标的比辐射率越小, 产生的测温误差越大; 对同一目标而言, 环境辐射温度 T_b 越大, 产生的测温误差亦越大. 在本实验研究中, 当热源温度 $T_s=35^{\circ}\text{C}$ 时(此时 $T_b=28.5^{\circ}\text{C}$), 理论分析和实验结果表明, 相对误差在 3.5~7%; 而当 $T_s=85^{\circ}\text{C}$ 时(此时 $T_b=38.4^{\circ}\text{C}$), 相对误差在 7.5~15%.

(2) 对三个比辐射率不同的目标, 在不同的环境辐射温度下, 只要同时进行比辐射率校正及环境辐射温度校正, 就能测出目标的真温, 这与文献^[2]的结论是一致的.

(3) 由图 2 可见, 实验点与理论曲线拟合较好, 说明本文的理论分析是正确的, 实验方法是可行的.

参 考 文 献

- [1] 张才根、张幼文, 物理学报, **31**(1981), 7: 953~961.
[2] 张才根, 物理学报, **32**(1982), 11: 1191~1197.
[3] Zhang You-Wen, Zhang Cai-Gen, et al., *Appl. Opt.*, **25**(1986), 20: 3683~3689-
[4] 陈衡编著, 红外物理学, 北京: 国防工业出版社, 1985, P14~16.
[5] 张才根等, 管道保温技术文集, 北京: 能源出版社, 1984, P217~222.

ERROR ANALYSIS AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THERMOMETER ONLY CORRECTED FOR EMISSIVITY

ZHANG CAIGEN

(Shanghai Institute of Technical Physics, Academia Sinica, Shanghai, China)

LIU JIAN, BAO XUECHENG

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China)

ABSTRACT

The temperature measurement errors of the IR thermometer, in which only the correction for emissivity is made, have been analyzed theoretically and measured experimentally. The experimental results agree well with the theoretical analysis.