

红外比色温度计的发射率修正

姜 世 昌

(上海工业自动化仪表研究所, 上海)

摘要——分析了红外比色温度计在测量非灰体表面温度时引入的测量误差, 导出了相应的误差方程, 提出了修正环节方案; 分析了在比色温度计的两个工作波段上被测物体的发射率随温度变化的速率不一致所造成的测温误差, 并导出相应的误差方程。

关键词——红外比色温度计, 发射率。

1. 引 言

比色温度计的测温精度受被测物体的表面发射率的影响虽然很小, 但是, 事实上只有在测量灰体或黑体温度时才不受被测物体表面发射率的影响。客观上, 可以认为比色温度计包括两个单波段辐射测量系统, 通过处理电路将被测物体在两个波段上的辐射功率进行比值运算, 建立起输出信号与被测物体表面温度的关系。对于非灰体的温度测量, 比值运算不能消除两个工作波段上发射率对仪表输出信号的影响。因此, 需要在温度计上附加发射率校正装置。

2. 测量非灰体时, 比色温度计的指示温度和真实温度的关系

令 $\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)$ 和 $\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)$ 为被测物体在仪表的两个工作波段上的等效发射率, 即

$$\varepsilon(T, \Delta\lambda_1) = \frac{A \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{12}} \varepsilon(T, \lambda) L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot R_{\lambda 1} d\lambda}{A \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{12}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot R_{\lambda 1} d\lambda};$$

$$\varepsilon(T, \Delta\lambda_2) = \frac{A \int_{\lambda_{21}}^{\lambda_{22}} \varepsilon(T, \lambda) \cdot L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot R_{\lambda 2} d\lambda}{A \int_{\lambda_{21}}^{\lambda_{22}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot R_{\lambda 2} d\lambda};$$

式中, A 为比色温度计的机械因子, 与波长无关; $\lambda_{11} \sim \lambda_{12}$, $\lambda_{21} \sim \lambda_{22}$ 为比色温度计的工作波

段; $\varepsilon(T, \lambda)$ 为被测物体表面温度为 $T(K)$ 时, 在波长 λ 上的发射率; $L(\lambda, T)$ 为黑体在温度为 T 时的普朗克函数. 由于一般比色温度计的 $\lambda \cdot T$ 不是太大, 故用维思函数表示 $L(\lambda, T)$. $\tau_{\lambda 1}$ 和 $\tau_{\lambda 2}$ 为滤光片在工作波段 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 中的单色透过率. $R_{\lambda 1}$ 和 $R_{\lambda 2}$ 为探测器在工作波段 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 中的单色响应率.

当被测物体为灰体或黑体时, 比色温度计的探测器在两个工作波段 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 上产生的信号分别为

$$V_1 = A \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{12}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot R_{\lambda 1} d\lambda \quad (1)$$

和

$$V_2 = A \int_{\lambda_{21}}^{\lambda_{22}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot R_{\lambda 2} d\lambda \quad (2)$$

当被测物体为非灰体时, 比色温度计的探测器在两个工作波段上产生的信号分别为

$$V'_1 = A \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{12}} \varepsilon(\lambda, T) \cdot L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot R_{\lambda 1} d\lambda = A \varepsilon(T, \Delta\lambda_1) \cdot \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{12}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot R_{\lambda 1} d\lambda \quad (3)$$

和

$$V'_2 = A \int_{\lambda_{21}}^{\lambda_{22}} \varepsilon(\lambda, T) \cdot L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot R_{\lambda 2} d\lambda = A \varepsilon(T, \Delta\lambda_2) \int_{\lambda_{21}}^{\lambda_{22}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot R_{\lambda 2} d\lambda \quad (4)$$

对于非灰体, $\varepsilon(T, \Delta\lambda_1) \neq \varepsilon(T, \Delta\lambda_2)$. 因而, 两个工作波段上的信号比值 $\frac{V'_1}{V'_2}$ 不等于被测物体为灰体或黑体而温度为 T 时的比值 $\frac{V_1}{V_2}$. 这就导致了比色温度计的测温误差.

但可以认为, $\frac{V'_1}{V'_2}$ 等于当被测物体为黑体而温度为 T_b 时在比色温度计的两个工作波段上的信号比值, 即

$$\frac{V'_1}{V'_2} = \frac{\varepsilon(T, \Delta\lambda_1) \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{12}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot R_{\lambda 1} d\lambda}{\varepsilon(T, \Delta\lambda_2) \int_{\lambda_{21}}^{\lambda_{22}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot R_{\lambda 2} d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{12}} L(\lambda, T_b) \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot R_{\lambda 1} d\lambda}{\int_{\lambda_{21}}^{\lambda_{22}} L(\lambda, T_b) \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot R_{\lambda 2} d\lambda} \quad (5)$$

在 T 和 T_b 之间, 温度计的探测器接收到的辐射功率之比值, 可用在 T 和 T_b 之间的平均有效波长上的辐射功率之比值表示^[1]. 又由于 T 和 T_b 之差值与 T 或者 T_b 相比甚小, 故 T 和 T_b 之间的平均有效波长可用在 T_b 上的极限有效波长 $\lambda_{e1}(T_b)$ 和 $\lambda_{e2}(T_b)$ 代替^[2,3]. 因而, 由式(5)可得

$$\frac{\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)}{\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)} \cdot \exp\left[-\frac{C_2}{\lambda_{e1}(T_b)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_b}\right)\right] = \exp\left[-\frac{C_2}{\lambda_{e2}(T_b)} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_b}\right)\right] \quad (6)$$

式(6)中,

$$\lambda_{e1}(T_b) = \frac{\int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{12}} L(\lambda, T_b) \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot R_{\lambda 1} d\lambda}{\int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{12}} \frac{1}{\lambda} \cdot L(\lambda, T_b) \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot R_{\lambda 1} d\lambda},$$

$$\lambda_{e2}(T_b) = \frac{\int_{\lambda_{21}}^{\lambda_{22}} L(\lambda, T_b) \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot R_{\lambda 2} d\lambda}{\int_{\lambda_{21}}^{\lambda_{22}} \frac{1}{\lambda} \cdot L(\lambda, T_b) \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot R_{\lambda 2} d\lambda},$$

C_2 为第二辐射常数.

将式(6)化简可得

$$T = \frac{T_b}{1 + \frac{T_b}{C_2} \cdot \frac{\lambda_{e1}(T_b) \cdot \lambda_{e2}(T_b)}{\lambda_{e2}(T_b) - \lambda_{e1}(T_b)} \cdot \ln \frac{\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)}{\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)}} \quad (7)$$

式(7)即是比色温度计的指示温度 T_b 与被测物体真实温度 T 之间的关系式, 当被测物体为灰体或黑体时, $\varepsilon(T, \Delta\lambda_1) = \varepsilon(T, \Delta\lambda_2)$, 温度计的指示温度 T_b 等于被测物体的真实温度 T , 当被测物体为非灰体时, $\varepsilon(T, \Delta\lambda_1) \neq \varepsilon(T, \Delta\lambda_2)$, 温度计的指示温度 T_b 不等于物体的真实温度 T . 这种误差通常是很大的. 因此有必要进行发射率误差校正.

3. 比色温度计的发射率修正方案

比色温度计的发射率修正方案有三种, 分别对应于三种比值运算方法, 即单值恒定法、对数相减法和零值平衡法.

3.1 单值恒定法发射率修正

单值恒定法是将探测器在两个工作波段上的输出信号同时等比例衰减 β 倍, 使其中一个信号与固定信号 C 相等, 以另一个信号作为仪表的输出信号, 如图 1 所示, 其中校正环节也可以加在衰减器的后面.

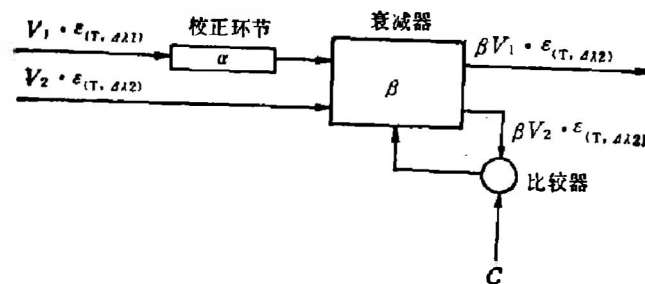


图 1 单值恒定法的发射率校正方案

Fig. 1 The project for correcting emissivity corresponding to the method of stabilized single value.

对于图 1, 令校正环节 $\alpha = \frac{\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)}{\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)}$, 并使比较器的恒定信号 $C = \beta \cdot V_2 \cdot \varepsilon(T, \Delta\lambda_2)$ 为常数, 则有

$$\beta = \frac{C}{V_2 \cdot \varepsilon(T, \Delta\lambda_2)} \quad (8)$$

以 $\beta \cdot V_1 \cdot \varepsilon(T, \Delta\lambda_2)$ 作为输出信号, 则

$$\beta \cdot V_1 \cdot \varepsilon(T, \Delta\lambda_2) = C \frac{V_1}{V_2} = C \frac{\int_{\lambda_{21}}^{\lambda_{12}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot R_{\lambda 1} \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_{21}}^{\lambda_{22}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot R_{\lambda 2} \cdot d\lambda} \quad (9)$$

3.2 对数相减法发射率修正

对数相减法是将对数相减法是将探测器在两个工作波段上的输出信号通过对数转换, 把比值运算转换成差值运算, 如图 2 所示.

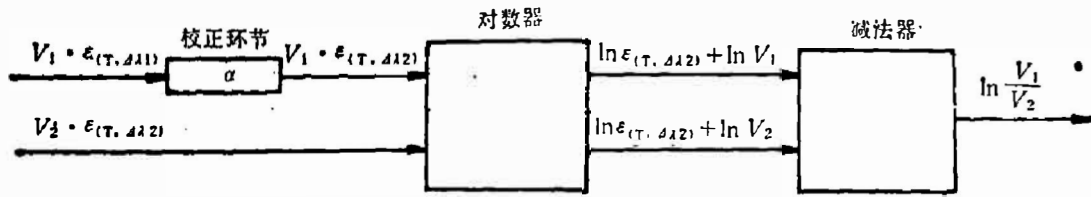


图 2 对数相减法的发射率校正方案

Fig. 2 The project for correcting emissivity corresponding to the logarithm method.

令校正环节 $\alpha = \frac{\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)}{\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)}$, 由图中所示, 仪表的输出信号为

$$\ln \frac{V_1}{V_2} = \ln \frac{\int_{\lambda_{21}}^{\lambda_{12}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot R_{\lambda 1} d\lambda}{\int_{\lambda_{21}}^{\lambda_{22}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot R_{\lambda 2} d\lambda} \quad (10)$$

若将校正环节加在对数器后面或减法器后面, 则需要引进对数形式的校正量, 技术较复杂。

3.3 零平衡法发射率修正

零平衡法的工作原理是使一个工作波段上的信号衰减 β 倍以后, 与另一工作波段上的信号相等, 而以衰减系数 β 作为仪表的输出量, 如图 3 所示; 其中, 校正环节也可加在输出端。此时所得输出信号 α, β 与式(11)相同。

对于图 3, 令 $\alpha = \frac{\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)}{\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)}$, 则 $\beta \cdot V_1 \cdot \varepsilon_1(T, \Delta\lambda_1) = V_2 \cdot \varepsilon(T, \Delta\lambda_1)$, 因而仪表的输出量 β 可表示成

$$\beta = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{22}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 2} \cdot R_{\lambda 2} d\lambda}{\int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{12}} L(\lambda, T) \cdot \tau_{\lambda 1} \cdot R_{\lambda 1} d\lambda} \quad (11)$$

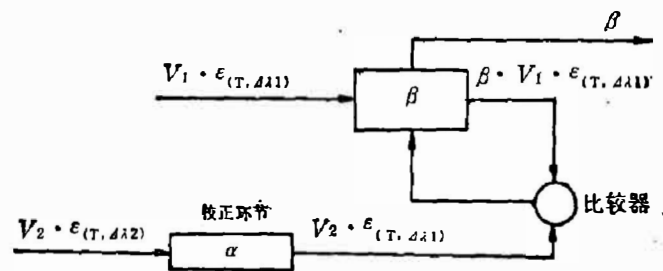


图 3 零平衡法的发射率修正方案

Fig. 3 The project for correcting emissivity corresponding to the zero-balance method.

4. $\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)$ 和 $\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)$ 随温度变化的速率不一致所造成的误差

$\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)$ 和 $\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)$ 随物体本身温度的变化速率不一致所造成的测温误差, 是无法用校正环节来消除的, 除非已知 $\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)$ 和 $\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)$ 随物体本身温度变化的规律。误差有时比较明显, 必须予以充分注意。

由式(7), 我们有

$$\frac{dT}{d\left[\frac{\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)}{\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)}\right]} = T^2 \cdot \frac{1}{C_2} \cdot \frac{\lambda_{e1}(T_b) \cdot \lambda_{e2}(T_b)}{\lambda_{e2}(T_b) - \lambda_{e1}(T_b)} \cdot \frac{1}{\frac{\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)}{\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)}}$$

即

$$\frac{\Delta T}{T} = T \cdot \frac{1}{C_2} \cdot \frac{\lambda_{e1}(T_b) \cdot \lambda_{e2}(T_b)}{\lambda_{e2}(T_b) - \lambda_{e1}(T_b)} \cdot \frac{\Delta\left[\frac{\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)}{\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)}\right]}{\frac{\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)}{\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)}} \quad (12)$$

式(12)即是 $\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)$ 和 $\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)$ 随被测温度本身的变化速率不一致所引起的误差的方程。这种误差通常应计入总的测温误差。

这种误差可用曲线表示, 如图 4 所示。

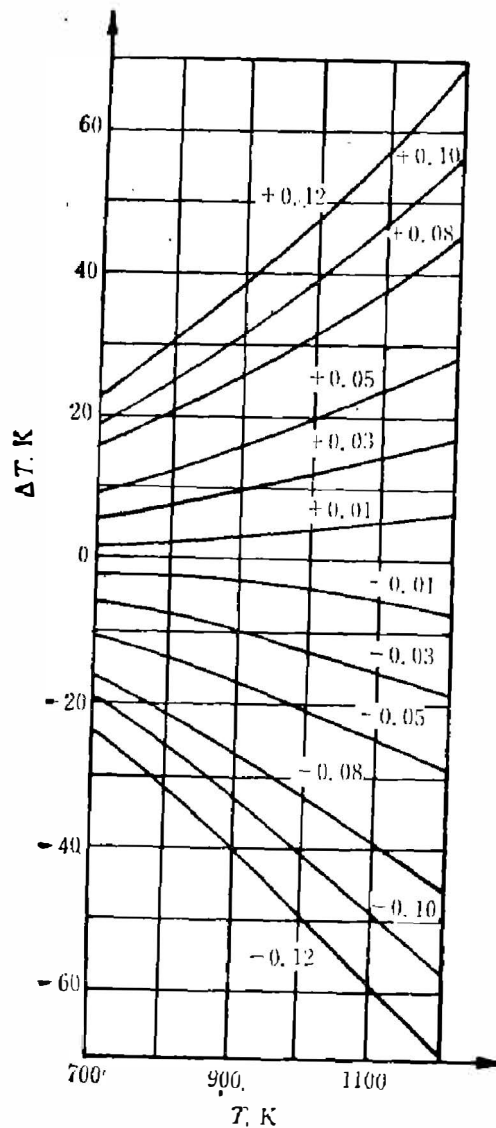


图 4 $\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)$ 和 $\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)$ 随物体本身温度变化速率不一致所造成的测温误差

Fig. 4 The errors in temperature measurement due to different ratio of variation of $\varepsilon(T, \Delta\lambda_1)$ and $\varepsilon(T, \Delta\lambda_2)$ with the temperature of the object to be measured.

参 考 文 献

- [1] Iovery D. R., *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, 3(1962), 1: 502.
- [2] 姜世昌, *红外研究*, 1(1982), 135~140.
- [3] 姜世昌等, in *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 5, 1982, part 1, pp. 413~420.
- [4] Thoon R. J. and Winslow G. H., in *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 3, 1962, part 1, pp. 439~441.

THE EMISSIVITY CORRECTION FOR IR RATIO THERMOMETERS

JIANG SHICHANG

(*Shanghai Institute of Process Automation Instrumentation, Shanghai, China*)

ABSTRACT

The measurement errors of IR ratio thermometers for non-greybody temperature have been analyzed, especially when the temperature dependences of emissivity of non-greybody measured on the two operating wavebands of ratio thermometer are different, and the corresponding error equations have been derived. The correction projects are presented and proved.