1(1982), 2, 135~140

红外研究
Chin.J.IR Res.

单波段辐射温度计的误差表现形式

姜 世 昌

(国家仪器仪表总局上海工业自动化仪表研究所)

摘要——本文用部分辐射的概念论述单波段辐射温度计产生测量误差的因素及误差的表现形式。着重讨论由综合性原因、物体的热辐射效率以及中间介质吸收所引起的误差。引用极限有效波长对以单色波长表示的误差公式进行修正。最后,对这类仪表的允许误差的表达形式提出建议。

常有人把中、高温部分辐射温度计近似地看成为单色辐射温度计来进行分析。实际上,严格的单色温度计是不存在的,而且,大多数部分辐射温度计在它的工作波段内,对辐射功率的响应是随波长而变的。因而用单色辐射的概念来分析部分辐射温度计是不够准确的。本文则用“部分辐射”的概念来论述这类温度计的误差及其表现形式。

一、产生误差的因素

单波段辐射温度计按照结构可分成两类:直接接收辐射式和辐射平衡式。前者是指温度计接收来自目标的辐射功率,在探测器上产生输出信号,并以此作为温度指示;后者是指温度计接收目标辐射功率,然后和内设参比辐射源的辐射功率在探测器上进行比较,而用平衡时与参比辐射源有关的参量信号作温度指示,这个参量信号与探测器输出信号之间有一定的联系。两者结构虽然不同,但它们的输出信号 V 与被测目标温度的关系可以用同样的形式表示,当被测目标为黑体时,

$$V=A_1A_2\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,\ T)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda, \tag{1}$$

其中,A_1 是与仪表的机械结构(如光学透镜的孔径,光阑孔的大小)有关的常数;A_2 为处理电路的输入参数(如输入阻抗等),τ_λ 为光学系统的分谱透过率;τ'_λ 为滤光片的分谱透过率;$\mathscr{R}_\lambda$ 为探测器的分谱响应率;$N(\lambda,\ T)$ 为:

$$N(\lambda,\ T)=C_1\lambda^{-5}e^{-\frac{C_2}{\lambda T}},$$

其中,C_1, C_2 分别为第一和第二辐射常数,λ 为波长,T 为用绝对温标表示的黑体温度。式(1)中的积分区间为温度计的响应波长范围。

产生测试误差的因素可以从三个方面来考虑:

1. 温度计本身参数的变化引起测量误差 光学系统透过率 τ_λ 的变化、滤光片透过率

本文 1981 年 7 月 14 日收到。

τ'_λ 的变化、探测器响应率 $\mathscr{R}_\lambda$ 的变化都会引起温度计输出信号改变，从而产生测量误差。这些变化又可分为数值上的和光谱(透过光谱或响应光谱)上的变化，后者与器件的材料组成有关，一般变化很小。

2. 现场测试条件和实验室定标条件不同而引起测量误差　在实验室定标时，辐射源和温度计之间，一般是没有什么遮挡物的，即使有一些设备上的遮挡物，其影响也可在数据处理时去除。而在温度计的应用现场，在目标辐射功率传递到温度计的通路中，往往有一些灰尘、烟汽、水滴、固体微粒等不固定的遮挡物，它们吸收或反射一部分目标辐射功率，引起温度计输出信号的改变。它们的吸收或反射，有些是对波长无选择性的，有些则对波长有选择性。

另一方面，实验室定标都是以黑体作辐射源的，而实际被测物体往往不是黑体，其热辐射效率小于1，即被测物体的辐射功率比同温下的黑体小，致使温度计的输出信号偏小。

3. 实验室定标误差　测温仪表的定标是由较高一级精度的标准系统向较低精度的仪表传递的。标准系统包括标准器、辐射源及相应的辅助测试设备，如黑体炉和标准光电高温计等。由于标准系统本身与国际实用温标(IPTS-68)有偏离，因而也给温度计带来误差。这类误差是固定的，一般由标准系统给出。误差的数值取决于所选用的标准系统。

二、误差表现的形式

在上述因素中，任何一种因素都会使温度计的输出 V 发生一个变化 ΔV。ΔV 的产生是温度计误差的综合表现，在详细分析以前，往往分不清这是哪一种因素所造成的。但只要输出变化不是严重到温度计不可使用的地步，一般可以对误差进行综合分析。我们首先对 ΔV 进行这样的分析，然后再对热辐射效率和介质吸收引起的影响进行分析。

1. 由综合因素造成之 ΔV 所引起的温度计测量误差 ΔT 之表现形式

由式 (1) 得：

$$\frac{dV}{dT}=\frac{d\left[A_1A_2\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,T)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda\right]}{dT}=\frac{d\left[A_1A_2\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}C_1\lambda^{-5}\cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda\right]}{dT}$$

$$=\frac{A_1A_2C_2}{T^2}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}C_1\lambda^{-5}\cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}\cdot\frac{1}{\lambda}\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda=\frac{A_1A_2C_2}{T^2}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,T)\cdot\frac{1}{\lambda}\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda,$$

$$\therefore\quad\frac{dT}{dV}=\frac{1}{\frac{A_1A_2C_2}{T^2}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,T)\cdot\frac{1}{\lambda}\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda},$$

$$\frac{dT}{dV/V}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,T)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}{\frac{C_2}{T^2}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,T)\cdot\frac{1}{\lambda}\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}。$$

令
$$\lambda_e(T)=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,T)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,T)\cdot\frac{1}{\lambda}\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda},$$

$\lambda_e(T)$ 是温度计在测量温度趋近于 T 时的极限有效波长，对于一台确定的温度计来说，$\lambda_e(T)$ 是已知的。因而有：

$$\frac{dT}{dV/V}=\frac{\lambda_e(T)T^2}{C_2},$$

$$\therefore\quad \frac{\Delta T}{T}=\frac{1}{C_2}\lambda_e(T)T\frac{\Delta V}{V},\tag{2}$$

或
$$\Delta T=\frac{1}{C_2}\lambda_e(T)T^2\frac{\Delta V}{V}。$$

由式 (2) 可见，由于温度计输出信号变化$\frac{\Delta V}{V}$，而引起的温度计示值的变化$\frac{\Delta T}{T}$，除了与$\frac{\Delta V}{V}$成正比之外，还与所测温度 T 以及温度计在温度 T 时的极限有效波长 $\lambda_e(T)$ 成正比。温度计示值的绝对变化 ΔT 则正比于 T^2、$\lambda_e(T)$ 和 $\frac{\Delta V}{V}$，若 $\frac{\Delta V}{V}$ 系非主观意愿产生的，$\frac{\Delta T}{T}$ 就是温度计的误差。

由式(2)也可知，$\lambda_e(T)$ 越小，同样的 $\frac{\Delta V}{V}$ 所产生的温度计误差也就越小。式 (2) 就是由于综合原因产生的 ΔV 所引起温度计误差的表现形式。

2．被测物体热辐射效率 $\varepsilon(\lambda, T)$ 所引起的温度计测量误差 ΔT 的表现形式

由黑体定标的温度计在测量温度为 T 的非黑体时所输出的信号为：

$$V'=A_1A_2\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\varepsilon(\lambda,T)\cdot N(\lambda,T)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda,\tag{3}$$

物体的热辐射效率 $\varepsilon(\lambda, T)$ 是波长 λ 和所处温度 T 的函数。

令物体在温度计工作波段$[\lambda_1\sim\lambda_2]$上的等效热辐射效率为 $\varepsilon(T)_{[\lambda_1\sim\lambda_2]}$：

$$\varepsilon(T)_{[\lambda_1\sim\lambda_2]}=\frac{A_1A_2\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\varepsilon(\lambda,T)\cdot N(\lambda,T)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}{A_1A_2\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,T)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\varepsilon(\lambda,T)\cdot N(\lambda,T)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,T)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}\tag{4}$$

由公式 (3)，(4) 得：

$$V'=A_1A_2\varepsilon(T)_{[\lambda_1\sim\lambda_2]}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,T)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda,$$

V' 和黑体温度为 $T_b(T_b<T)$ 时的温度计输出信号 V 相等，即 $V'=V$，而

$$V=A_1A_2\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,T_b)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda,$$

$$\therefore\quad \varepsilon(T)_{[\lambda_1\sim\lambda_2]}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,T_b)\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,T)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}。\tag{5}$$

式 (5) 的等号右边可以写成在物体温度为 T 和 T_b 之间的平均有效波长 $\lambda_e(T\sim T_b)$ 上辐射功率之比[2]：

于是
$$\varepsilon(T)_{[\lambda_1\sim\lambda_2]}=e^{\frac{C_2}{\lambda_e(T\sim T_b)}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_b}\right)}。$$

当 $\varepsilon(T)_{[\lambda_1\sim\lambda_2]}$ 所造成的误差 $\Delta T=T-T_b$ 与仪表的量程相比是较小时，$\lambda_e(T\sim T_b)$ 又可用测量温度为 T_b 时的极限有效波长 $\lambda_e(T_b)$ 代替，因而，

$$\varepsilon(T)_{[\lambda_1\sim\lambda_2]}=e^{\frac{C_2}{\lambda_e(T_b)}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_b}\right)}。\tag{6}$$

由式 (6) 可得:

$$T=\frac{T_b}{1+\frac{\lambda_e(T_b)T_b}{C_2}\ln\varepsilon(T)_{[\lambda_1\sim\lambda_2]}}。\tag{7}$$

由式 (7) 可见，当 $\varepsilon=1$(以下将 $\varepsilon(T)_{[\lambda_1\sim\lambda_2]}$ 简写成 ε)时，$T=T_b$，温度计不产生误差；当 $\varepsilon<1$ 时，$T>T_b$，温度计产生一个误差 ΔT，ΔT 将随 ε 而变化。

$$\frac{\partial T}{\partial\varepsilon}=\frac{-T_b\frac{\lambda_e(T_b)}{C_2}\frac{T_b}{\varepsilon}}{\left[1+\frac{\lambda_e(T_b)T_b}{C_2}\ln\varepsilon\right]^2}=-T^2\frac{\lambda_e(T_b)}{C_2}\frac{1}{\varepsilon}。\tag{8}$$

记 ε 之变化为 $\Delta\varepsilon$，由式 (8) 得:

$$\frac{\Delta T}{T}=-\frac{1}{C_2}\lambda_e(T_b)\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}T。\tag{9}$$

由式 (9) 可见，由于 ε 的变化 $\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon}$ 而引起的测量误差同温度 T 以及极限有效波长 $\lambda_e(T_b)$ 成正比。并且也可知，$\lambda_e(T)$ 越小，引起的 $\frac{\Delta T}{T}$ 也越小。式 (7) 和式 (9) 是 $\varepsilon_{(\lambda,T)}$ 引起仪表误差的表现形式。

$\varepsilon(T)_{[\lambda_1\sim\lambda_2]}$ 误差的分析也适用于温度计在实验室里定标时由于辐射源不是完全黑体所引起的定标误差。

3．辐射传输过程中介质透过率 $\rho_{(\lambda)}<1$ 所引起的温度计测量误差 ΔT 的表现形式

辐射在传输过程中可能受到中间介质的吸收，此时，温度计的输出信号变成 V'':

$$V''=A_1A_2\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\rho_{(\lambda)}\cdot N(\lambda,\ T_1)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda。$$

式中 $\rho_{(\lambda)}$ 为透过率，它是波长的函数。令 $\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}$ 为中间介质在温度计工作波段上的有效透过率，则:

$$\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}=\frac{A_1A_2\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\rho_{(\lambda)}\cdot N(\lambda,\ T_1)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}{A_1A_2\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,\ T_1)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}\rho_{(\lambda)}\cdot N(\lambda,\ T_1)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,\ T_1)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}。\tag{10}$$

于是

$$V''=A_1A_2\cdot\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,\ T_1)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\mathscr{R}_\lambda d_\lambda。$$

其中，T_1 为被测物体的温度。V'' 和物体温度为 T_0 而中间介质不吸收时的温度计输出信号 V_0 相等，即 $V''=V_0$。

而

$$V_0=A_1A_2\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,\ T_0)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda,$$

$$\therefore\quad \rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}=\frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,\ T_0)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2}N(\lambda,\ T_1)\cdot\tau_\lambda\cdot\tau'_\lambda\cdot\mathscr{R}_\lambda d_\lambda}。\tag{11}$$

式 (11) 的等号右边也可以写成在 T_0 和 T_1 之间的平均有效波长上辐射功率之比。当 $\Delta T=T_1-T_0$ 与温度计量程范围相比是较小时，平均有效波长可用温度 T_0 时的极限有效波长 $\lambda_e(T_0)$ 代替。

$$\therefore\quad \rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}=e^{\frac{C_2}{\lambda_e(T_0\sim T_1)}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_0}\right)},$$

或

$$\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}=e^{\frac{C_2}{\lambda_e(T_0)}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_0}\right)}。\tag{12}$$

由式 (12) 可得:

$$T_1=\frac{T_0}{1+\frac{\lambda_e(T_0)T_0}{C_2}\ln\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}}。\tag{13}$$

当 $\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}=1$ 时, $T_1=T_0$, 温度计没有误差。当中间介质的 $\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}<1$, 而有 $\Delta\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}$ 之变化时. 则将产生一个误差 ΔT_1。

$$\frac{\partial T_1}{\partial\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}}=-T_1^2\frac{\lambda_e(T_0)}{C_2}\frac{1}{\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}},$$

于是

$$\frac{\Delta T_1}{T_1}=-\frac{1}{C_2}\lambda_e(T_0)\frac{\Delta\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}}{\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}}T_1。\tag{14}$$

由式 (14) 可见, $\frac{\Delta\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}}{\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}}$ 引起的误差 $\frac{\Delta T_1}{T_1}$ 与 $\lambda_e(T_0)$ 和 T_1 成正比。式 (13) 和 (14) 是 $\rho_{(\lambda)}$ 引起误差的表现形式。

$\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}$ 引起误差的分析也适用于 τ_λ, τ'_λ, $\mathscr{R}_\lambda$ 偏离原来数值而引起的误差。但是, 当 τ_λ, τ'_λ, $\mathscr{R}_\lambda$ 不但在数值上有变化, 而且在光谱方面也有变化时, 则要引起极限有效波长 $\lambda_{e(T)}$ 的变化, 上述公式须另加修正。

应当说明, 由式 (6) 和 (12) 引出式 (9) 和 (14) 时是采用一阶偏导数求得的, $\varepsilon(T)_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}$ 和 $\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}$ 在它的初始值附近变化时, 式(9)和(14)是没有误差的。但当 $\varepsilon(T)_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}$ 和 $\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}$ 变化很大时, 式(9)和(14)将很不准确。不过在误差分析中, 总是考虑 ε 和 $\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}$ 的微量变化, 故式(9)和式(14)是足够准确的。如果遇到 ε 和 $\rho_{(\lambda_1\sim\lambda_2)}$ 有特大变化时, 应该使用式 (7) 和 (13)。

三、温度计允许误差的表示方法

目前, 单波段辐射温度计的允许误差表示方法很多, 有的以量程上限的百分数表示, 如西德西门子公司 ADOFOT 型仪表和国产 WDH-I 型光电高温计; 有的以测量温度点摄氏温标的百分数表示, 如日本千野制作所 IRP 系列和 IRS 系列以及国产 WDH-II 光电高温计; 也有在某一测量范围内, 以某一固定温度数表示误差, 温度高的量程范围, 允许误差大一些, 如国产 WFT-202 型仪表。近年来, 出现了另一种允差表示方法, 它以测量温度的绝对温标的百分数表示, 如英国兰德公司 OQO 系列仪表。作者认为最后一种表示方法比较适宜。

仪表产生误差, 其表现是它的输出信号 V 偏离标准值一个 ΔV。但是不论由于什么原因, ΔV 所引起的仪表值误差总可由式(2)表示。由于 $\frac{\Delta V}{V}$ 引起的温度示值相对变化 $\frac{\Delta T}{T}$ 与温度 T 成正比, 同样的信号变化 $\frac{\Delta V}{V}$ 对不同的温度 T 来说所引起误差是不同的。因此, 仪表的允许误差以相对误差 $\frac{\Delta T}{T}$ 表示为宜。$\frac{\Delta T}{T}$ 的百分数的数值大小由仪表本身的精密程度确定。又因式 (2) 中的 T 是用绝对温标表示的, 避免了用摄氏温标百分数表示仪表误差时在 0°C 时遇到的麻烦。

用测温范围上限的百分数表示仪表误差和在一个量程范围内用固定温度数表示误差在实质上是一样的，都是不允许仪表在这个范围内超过某一固定偏差。但是，用固定值表示仪表的误差，在量程上限时对仪表的质量要求高，而在量程下限时对仪表的要求就过分低了。在实验室里对仪表进行定标时，大多数温度标准器的传递误差也是随温度升高而变大，这和把被检仪表的误差表示成相对值吻合。

综上所述，单波段辐射温度计的允差以测量温度的绝对温标百分数来表示为宜。这样做从测量系统的整体误差分析来说也是合理的。

参 考 文 献

[1] 姜世昌等，工业自动化仪表，1975, 3.

[2] Kostkowski H. J. and Lee, R. D. "Theory and Methods of Optical Pyrometry", *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, **3** (1962), Part 1, 449.

THE REPRESENTATION OF ERROR FOR SINGLE-BAND TEMPERATURE TRANSMITTER

JIANG SHICHANG

(Shanghai Institute of Process Automation Instrumentation)

ABSTRACT

This paper describes, by utilizing the partial radiation concept, the factors that cause the measuring errors for a single-band temperature transmitter, and the representation of errors as well. Special stress has been laid on the discussion about the errors caused by combined effects, by the emissivity of the body and by the absorption of the medium between the object measured and the temperature transmitter. The error formula expressed in mono-chromatic wavelength has been corrected by means of limited effective wavelength. The allowable error and its representation of this type of transmitter have also been suggested.