

一个高精度的测温方法

李兴生 杨宝忠

(中国科学院大气物理研究所) (北京大学地球物理系)

提 要

本文介绍一种经补偿的不平衡电桥测温方法,电桥输出和测量温度成直线性关系,温度测量范围为 -20°C — $+45^{\circ}\text{C}$,测量精度好于 0.1°C 。

一、引 言

大气边界层物理的研究以及近几年来国内外日益重视的大气污染观测,对2公里内大气温度的观测以及梯度观测的精度提出了较高的要求。目前,以不平衡式惠斯登电桥作为电阻温度表的感温线路是用得比较广泛而精度较高的一种方法,但是,该方法在量程较宽的情况下,电桥输出和测量温度成非线性相关,这种非线性是感应元件的电阻温度特性以及电桥自身的特性造成的,它给纪录造成了一定的麻烦。为此,人们力求用改造电桥结构的办法使电桥输出与测量温度成直线性关系^[1-3]。本文在测量桥路中串接一个热敏电阻,利用热敏电阻的负温度系数特性来改善电桥的非线性输出,使测温电桥的输出和测量温度成直线性相关。

二、测量原理

电阻温度表是根据导体和半导体的电阻随温度变化而变化这一物理属性制成的,金属的电阻随温度增加而阻值变大,电阻与温度的关系式可以用下面的方程式来表示

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (1)$$

其中 R_0 表示金属在 0°C 时的电阻, t 是摄氏温度, α 、 β 是电阻温度系数,和金属的纯度有关,基本上是个常数, R_t 是金属在温度 t 时的电阻。

用电阻温度表测定气温,归根结蒂在于测定温度表的电阻,所以温度测量的精确度重要的一方面是决定于电阻测量的精确度,利用电桥测量系统可以达到此目的,目前用得较普通的是惠斯登桥式电路。为了提高电桥输出的灵敏度,我们在桥路中采用两个感应元件作为电桥对角端的两个臂(见图1),因为在同样的外加电压和电流情况下,有两个感应桥臂的灵敏度是只有一个感应桥臂电桥灵敏度的两倍。其余二个桥臂用温度系数很小的

固定电阻组成,桥臂间引线要短,以免导线电阻的影响。

由于金属铂的稳定性、重复性、互换性较佳,因此在工业上和大气温度测量中已为人们广泛采用,这里用铂作为测温桥路中的两个感应桥臂。电桥的输出电压可以写成

$$e = E_0(R_1 - R)(2R_s + 2R_s + R_1 + R)^{-1} \quad (2)$$

其中 E_0 是电源电压, R_1 是感应元件—铂的电阻, R 是固定电阻, R_s 是限流电阻, R_t 是热敏电阻,在 0°C 时假定 $R_t = R$ 。

由(2)式可以清楚地看出: 铂电阻随温度的变化率(1)式在量程较宽的情况下呈非线性;更重要的是,输出电压 e 和 R_1 随温度变化的改变量呈非线性相关,这种非线性给纪录带来了很大麻烦。为了改善这种非线性影响,我们在桥路中引入热敏电阻 R_t , 它一方面有利于 R_s 所起的限流作用;另一方面由于热敏电阻的负温度系数特性: 电阻随温度增加而阻值减小,因此可以使电桥的非线性输出得到补偿而变为线性输出。

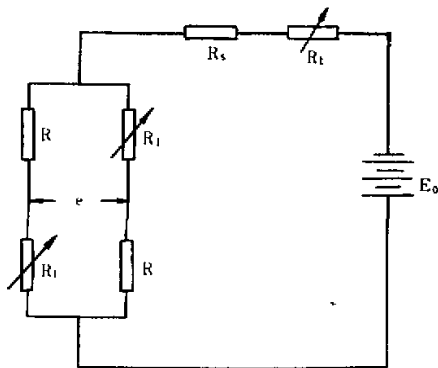


图1 测温电桥线路图

为简化起见, (2) 式中的 R_t 假定成立: $R_t = (R_s - \kappa t)$, 这里的 R_t 是热敏电阻在温度 t 时的阻值, R_s 是 0°C 时的阻值, κ 是热敏电阻随温度的变化率。则(2)式可以改写成:

$$e = E_0 \frac{\alpha R_0 t}{2(R_s + R_0)} \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} t\right) \left[1 + \frac{R_s}{R_s + R_0} + \frac{\alpha R_0 t}{2(R_s + R_0)} \left(1 + \frac{\beta}{\alpha} t - \frac{2\kappa}{\alpha R_0}\right)\right]^{-1} \quad (3)$$

其中的符号说明同前。

为简化起见, (3) 式可以用牛顿二项式展开, 并略去 t 的高次项后变为

$$e \approx E_0 \frac{\alpha R_0 t}{2(R_s + R_0)} \left[\left(1 - \frac{R_s}{R_s + R_0}\right) + t \left(\frac{\beta}{\alpha} + \frac{\kappa}{R_s + R_0} - \frac{\beta R_s}{\alpha(R_s + R_0)} - \frac{\alpha R_0}{2(R_s + R_0)}\right)\right] \quad (4)$$

如果希望电桥的输出电压和温度的变化成线性关系, 那么(4)式必须满足

$$\left(\frac{\beta}{\alpha} + \frac{\kappa}{R_s + R_0} - \frac{\beta R_s}{\alpha(R_s + R_0)} - \frac{\alpha R_0}{2(R_s + R_0)}\right) = 0 \quad (5)$$

所以

$$\kappa = \frac{1}{2} \alpha R_0 + \frac{\beta}{\alpha} R_s - \frac{\beta}{\alpha} (R_s + R_0) \quad (6)$$

因此, 当热敏电阻的温度系数满足(6)式时, 电桥的输出电压和温度变化即呈线性关系。由(4)式也可以清楚地看出, 热敏电阻在桥路中只起补偿作用。

如果取: $\alpha = 4 \times 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1}$, $\beta = -6 \times 10^{-7}^\circ\text{C}^{-2}$, $R_0 = 100\Omega$, $R_s = 50\Omega$, $R_t = 2.247 \times 10^3\Omega$, 则 $\kappa = 0.55\Omega/^\circ\text{C}$ 。

电桥的灵敏度可以用下式表示

$$S = \frac{dc}{dt} = E_0 \frac{\alpha R_0}{2(R_i + R_0)} \left(1 - \frac{R_x}{R_i + R_0} \right) \quad (7)$$

如果取: $E_0 = 6$ 伏, $\alpha = 4 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $R_0 = 100 \Omega$, $R_i = 2247 \Omega$, $R_x = 50 \Omega$, 则

$$S = 0.5 \text{ 毫伏/}^\circ\text{C} \quad (8)$$

三、误差分析

如果我们考虑的测量范围在 -20°C — $+45^\circ\text{C}$ 内, 根据(8)式估计的灵敏度, 电桥输出的最大量程 $|T| \leq 2.25 \times 10^{-2}$ 伏。倘使纪录方式用 DS-13 积分式数字电压表显示, 该仪表为 5 位显示位, 最低位显示为 5 微伏, 因此, 测量温度的分辨率可以在 0.01°C 以内。

提高了电桥输出的灵敏度和分辨率后并不等于提高了电桥的测量精确度, 电桥的测量精度完全决定于各种因素带来的累计误差, 我们在下面将逐项分析可能出现的主要误差原因:

1) 方程(4)式的精度 方程(4)式是由方程(3)式经过牛顿二项式展开后略去了和温度有关的 t 的高次项后得来的, 如果选取和前面相同的参数, 即: $\alpha = 4 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\beta = -6 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$, $R_0 = 100 \Omega$, $R_x = 50 \Omega$, $R_i = 2247 \Omega$, $t = 45^\circ\text{C}$, $\kappa = 0.55 \Omega/^\circ\text{C}$, 那么经过简化后的(4)式和未经简化的方程(3)式相比, 二式的绝对误差将小于 $\delta_1 = 7 \times 10^{-6}$ 。因此, 方程(4)的精确度在我们测量的气温范围内还是相当高的。

2) 电源稳定性影响 电源的稳定性在不平衡电桥中直接影响桥路的输出, 由(4)式可以清楚地看出, 由此造成的误差和输出电压的稳定性成正比关系, 也就是说, 误差的大小直接决定于电源的稳定性指标, 在(4)式中由电源稳定性引进的相对误差可以表示成

$$\delta_2 = \frac{\Delta E_0}{E_0 + \Delta E_0} \quad (9)$$

其中 E_0 表示电源电压, ΔE_0 表示电源不稳定距标准值的偏差。

设 $\Delta E_0 = \mathcal{E} E_0$, 这里的 $\mathcal{E} \ll 1$, 代入(9)式得

$$\delta_2 = \frac{\mathcal{E}}{1 + \mathcal{E}} \approx \mathcal{E} \quad (10)$$

为了不使电源稳定性产生的误差太大, 在我们选取电源时, 要求电源稳定性在 $\pm 0.02\%$ 以内, 这时的 $\delta_2 = \mathcal{E} = 0.02\%$ 。

3) 引线电阻的影响 测温电桥至纪录或显示系统的引线电阻随温度的变化也是形成误差的因素之一, 引线电阻愈小, 由此造成的误差愈小, 反之则愈大。如果我们采用 $0.016 \Omega/\text{米}$ 的导线, 设引线长为 300 米, 其电阻为 4.8 欧姆, 如果测量的温度偏离 0°C 为 45°C , 那么引线电阻因温度变化而改变的阻值有 $\Delta R_i = 0.90 \Omega$ (这里铜的温度系数取 $4.2 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), 所以, (4)式中引线电阻因温度引起的相对误差可以表示成

$$\delta_3 \approx \frac{\Delta R_i}{R_i + R_0 - R_x} \quad (11)$$

其中 ΔR_i 表示引线电阻因温度变化而引起的改变量, 其他符号同前。取 $R_i = 2247 \Omega$,

$R_1 = 100\Omega$, $R_2 = 50\Omega$, $\Delta R_1 = 0.90\Omega$, 则 $\delta_3 = 0.039\%$ 。

4) 感应元件不一致的影响 测温电桥的表达式(2)是在假定两个传感器阻值完全一致的情况下求得的, 但实际生产的感应元件不易满足这个条件, 我们选用的感温元件是北京玻璃研究所试验厂生产的玻璃铂电阻温度元件, 型号 BA₂ 型, 零度时的阻值为 100 ± 0.1 欧姆。这种元件阻值在出厂时的不一致, 一般可以通过对输出值的订正或对感应元件进行较严格挑选来克服。

为了在测温线路中, 使感应元件的不一致性所造成的误差最小, 我们对感应元件进行了精确的测定和挑选, 在 $-20^\circ\text{C} \sim +45^\circ\text{C}$ 范围内, 将感应元件置于恒温槽内, 每隔 10°C 测定一点, 测量精度为 0.001 欧姆。选取电阻温度曲线趋势一致的元件配对。这基本保证了在测量范围内, 每个感应元件的电阻随温度的变化率一致。

5) 测量误差 这里选用 DS-13 型积分式数字电压表作为测量的记录仪表, 该仪器最低挡的满量程为 ± 20 毫伏, 五位显示位, 误差 5 微伏, 而测温电桥的灵敏度为 0.5 毫伏/ $^\circ\text{C}$, 因此数字电压表的测量误差相当于 0.01°C 。

6) 元件增热影响 电流流过测量电桥的感应元件时, 铂丝产生焦耳热, 电阻丝的温度随之增高, 因此传感器要求在较低的负载电流下工作, 使电流所产生的热量远小于从空气中所获得的热量。上述测温电桥中流经每个感应元件的电流大约为 1.25 毫安, 因此焦耳热引起的误差是较小的。

除了上面分析的几种主要误差以外, 其它因素对测温桥路的影响都较小, 这里不再一一进行讨论。

四、试验结果

热敏电阻是一种半导体器件, 在通常情况下, 其阻值随温度增加而减小, 呈对数关系, 电阻温度系数不是常量, 而是温度的函数。这里采用的热敏电阻的型号是 RRBI-100 Ω 其电阻温度特性曲线如图 2。但是, 公式(3)是在假定热敏电阻的阻值与温度呈线性关系的条件下, 即 $R_t = (R_0 - \alpha t)$ 得出的。为了满足此式的假设条件, 我们用一固定电阻和热敏电阻相并联, 并联后的热敏电阻的温度特性曲线基本呈线性相关。这里采用的固定电阻为 77 欧姆, 在 -20°C 时热敏电阻与固定电阻并联后为 66.3 欧姆; 在 $+45^\circ\text{C}$ 时为 25.5 欧姆。所以, 在 $-20^\circ\text{C} \sim +45^\circ\text{C}$ 内, 热敏电阻的平均温度变化率 $\bar{\alpha} = 0.54\Omega/^\circ\text{C}$, 这和(6)式中要求的 α 值是非常接近的。

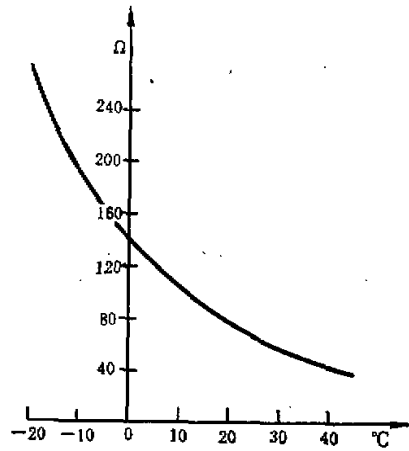


图2 热敏电阻的温度特性曲线图

为了进一步从理论上和实验中证明热敏电阻在测温线路中所起的补偿非线性的重要作用, 这里分别对未经热敏电阻补偿和经过

补偿后的(3)式进行了计算和实验,结果见下表:

表 1 经过热敏电阻补偿和未经补偿的电桥输出电压

温 度	补偿前输出电压(mv)	补偿后输出电压(mv)
-20°C	-10.06	-10.00
-10°C	-5.02	-5.00
+10°C	+4.99	+5.00
+20°C	+9.97	+10.00
+30°C	+14.91	+15.00
+40°C	+19.84	+20.01
+45°C	+22.29	+22.52

由表清楚地看出,经过热敏电阻补偿后的输出电压 e 随温度基本呈线性变化;而未经过补偿的输出电压 e 随温度呈非线性变化,这种非线性影响偏离 0°C 平衡点愈来愈显著. 另外,通过比较可以看出,电桥输出电压的非线性程度愈大则热敏电阻所起的补偿作用就愈明显,在上述测温范围内,热敏电阻补偿的最大非线性为 0.4°C. 同时可以看出,测温电桥在 -20°C—+45°C 内的测量精度高于 0.1°C.

参 考 资 料

- [1] D. W. Stevens, *J. Appl. Meteor.*, 1967, 6(1).
- [2] R. J. Polavarapu and R. E. Munn, *J. Appl. Meteor.*, 1967, 6(4).
- [3] F. J. Goldwater, *J. Sci. Instr.*, 1964, 41(1).

A METHOD OF PRECISE MEASUREMENT OF TEMPERATURE

Li Xing-sheng

(*Institute of Atmospheric Physics Academia Sinica*)

Yang Bao-zhong

(*Department of Geophysics, Peking University*)

ABSTRACT

A method of effective compensation of the non-linear unbalanced resistance thermometer bridge for temperature measurement is investigated. It is shown that the error is less than 0.1°C over a temperature range from -20°C to +45°C.