

一种高精度测温方法的误差分析

逢 勇

提 要

本文对南京气象学院50米气象塔观测系统的测温精度进行了仔细分析,指出测温精度优于 0.1°C ,分析结果与国家气象局的鉴定结果相当吻合。

一、测温基本原理

1. 铂电阻是气象塔测量中采用比较广泛的一种温度感应元件,这是因为铂的电阻温度系数较大,而且稳定性、重复性和互换性较好。为了能既方便又较精确地测定铂电阻的阻值,在气象塔测量中,通常采用不平衡电桥作为测量电路。

本系统的温度感应元件选用北京玻璃仪器研究所试验厂生产的WZB型铂电阻,阻值在 0°C 时为 100 ± 0.1 欧,随温度变化有如下关系: $R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$, R_t 为 $t^{\circ}\text{C}$ 时铂电阻的阻值(欧); R_0 为 0°C 时铂电阻的阻值(欧); t 为被测空气的温度($^{\circ}\text{C}$); α 、 β 为铂电阻温度系数($\alpha = 4 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$, $\beta = 6 \times 10^{-7}^{\circ}\text{C}^{-2}$)。

在恒温水浴中对任意抽取的4支铂电阻进行鉴定,分析阻值随温度变化的规律(如表1)。可以看出,铂电阻的阻值和温度间的线性特征相当好,用最小二乘法对表1中的数据进行线性拟合得到的相关系数都在0.99999以上,又因为采用分段线性处理的方法(约每隔 10°C 分为一段),故认为此温度测量系统中,铂电阻与温度的关系为 $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ 。

表1 铂电阻感应元件阻值 R_t 与温度 t 的关系

R_t (欧) 元件号 \ $t^{\circ}\text{C}$	4.45	7.35	11.10	13.85	17.40	19.40
I	102.10	103.24	104.74	105.83	107.23	108.02
II	102.12	103.28	104.77	105.85	107.26	108.05
III	102.02	103.16	104.65	105.73	107.14	107.93
IV	102.11	103.25	104.74	105.83	107.23	108.02

续表 1

R_t (欧) 元件号	t (°C)	24.85	27.60	29.80	33.20	36.80	40.55
I		110.18	111.28	112.18	113.47	114.90	116.38
II		110.22	111.31	112.21	113.50	114.93	116.42
III		110.09	111.18	112.08	113.36	114.78	116.27
IV		110.18	111.27	112.18	113.46	114.88	116.37

另外,从表1中可以看出,元件I、II、IV之间的一致性相当好,元件III的阻值大约有0.1欧的系统偏低。由于数据处理时每个温度感应元件都有独立的传递函数,故感应元件不一致的影响可以不考虑。经实测得,元件的滞后系数在静风时为1分23秒,在风速2.5米/秒时为18秒,所以,在数据处理中最短的平均时间取为30秒。

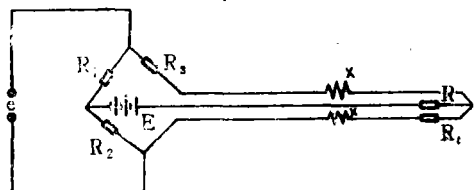


图1 $R_1=R_2=10k\Omega$ $R_0=R_3=100\Omega$
 $R_t=R_0(1+\alpha t)$

2.测温线路如图1所示。为了减少桥臂引线电阻的影响,线路中采用三导线补偿法。图1中 R_t 是铂电阻, R_1 、 R_2 、 R_3 是锰铜电阻; R 是电源引线电阻,电源引线长为56米,为了降低其阻值,引线采用五股胶合线,实测得 $R=1$ 欧; x 是桥臂上的引线电阻,桥臂引线长也为56米,实测得 $x=3.5$ 欧; $E=10$ 伏为电桥电源。

据克希霍夫定律,可推导出桥路输出量 e 的表达式为

$$e = E \frac{R_t(R_2+R_3)}{A} - E \frac{R_3}{R+R_2+R_3} \left(1 - \frac{R(R_2+R_3)}{A} \right) \quad (1)$$

其中 $A = (R+R_1+R_t)(R+R_2+R_3) - R^2$ 。

3.在公式(1)中, R 的阻值很小,计算电桥灵敏度时可以略去,于是公式(1)简化为

$$e = E \frac{R_t}{R_1+R_t} - E \frac{R_3}{R_2+R_3}$$

此时,测温电桥的灵敏度可用下式表示

$$S = \frac{de}{dt} = E \frac{\alpha R_0 R_1}{(R_1+R_t)^2}$$

代入 $R_t=112$ 欧得

$$S = 4 \times 10^{-4} \text{ 伏/度} \quad (2)$$

二、误差量计算

电桥的测量误差完全取决于各种因素带来的累积误差, 测温电桥线路的可能误差见文献[1].

1. 电源引线电阻随温度变化的影响

选用低阻引线且不很长时, 该项误差较小, 该因子形成的绝对误差为 $\Delta e_1 = \left| \frac{\partial e}{\partial R} \right| \Delta R$,

据(1)式得

$$\Delta e_1 = \left[-E \frac{R_t(R_2+R_3)A'}{A^2} + E \frac{R_3}{(R+R_2+R_3)^2} + E \frac{R_3(R_2+R_3)}{A(R+R_2+R_3)} \right] \Delta R \quad (3)$$

其中 $A' = R_1 + R_t + R_2 + R_3$, ΔR 表示电源引线电阻随温度的改变量, 如果考虑温度偏离检定环境最大为 30°C , 则 $\Delta R = 0.12$ 欧。取 R_t 为 $t = 35^\circ\text{C}$ 时的值, 则 $R_t = 114$ 欧, 代入(3)式得 $\Delta e_1 = 3.3 \times 10^{-7}$ 伏, 据(2)得测温误差为 $\Delta t_1 = 0.0008^\circ\text{C}$ 。

2. 桥臂上引线电阻随温度变化的影响

当采用三导线补偿后, 可大大减小该项误差。该因子形成的绝对误差为 $\Delta e_2 =$

$\left| \frac{\partial e}{\partial x} \right| \Delta x$ 。据(1)式得

$$\Delta e_2 = \left[E \frac{(R_2+R_3+R_t+2x)A - A'(x)(R_t+x)(R_2+R_3+x)}{A^2} - E \frac{R+R_2}{(R+R_2+R_3+x)^2} \right] \Delta x \quad (4)$$

其中 $A'(x) = (R+R_1+R_t+x) + (R+R_2+R_3+x)$, Δx 表示桥臂引线电阻随温度的改变量, 如果考虑温度偏离检定环境最大为 30°C , 则 $\Delta x = 0.42$ 欧。取 R_t 为 $t = 35^\circ\text{C}$ 时的值, 则 $R_t = 114$ 欧, 代入(4)式得 $\Delta e_2 = 1.26 \times 10^{-6}$ 伏, 相应的测温误差为 $\Delta t_2 = 0.0032^\circ\text{C}$ 。

3. 电源稳定性的影响

不平衡电桥的精度与电源稳定性有着直接的关系, 由(1)式知, 电桥输出值和电源电压成正比, 因此, 该项误差的大小直接决定于电源的稳定性指标。该系统使用的电压源由总参防化院研制, 从研制报告及使用情况来看, 电源稳定性 $\leq 0.03\%$, 即电压漂移

量的绝对值在 3 毫伏之内, 该因子形成的绝对误差为 $\Delta e_3 = \left| \frac{\partial e}{\partial E} \right| \Delta E$ 。据(1)式得

$$\Delta e_3 = \left[\frac{R_t(R_2+R_3)}{A} - \frac{R}{R+R_2+R_3} \left(1 - \frac{R(R_2+R_3)}{A} \right) \right] \Delta E \quad (5)$$

取 R_t 为 $t = 35^\circ\text{C}$ 时的值, $\Delta E = 3$ 毫伏, 代入(5)式得 $\Delta e_3 = 4.2 \times 10^{-6}$ 伏, 相应的测温误差为 $\Delta t_3 = 0.0105^\circ\text{C}$ 。

4. 电桥的非线性影响

测温不平衡电桥的输出电压与温度变化是非线性关系,从方程(1)可以看出,这种非线性完全是由于因子A造成的。已知 $A = (R + R_1 + R_t)(R + R_2 + R_3) - R^2$, 故

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_0} \frac{1}{1 + \frac{R_0 \alpha t (R + R_2 + R_3)}{A_0}}, \text{ 其中 } A_0 = (R + R_1 + R_0)(R + R_2 + R_3) - R^2. \text{ 因为}$$

$\frac{R_0 \alpha t (R + R_2 + R_3)}{A_0} \ll 1$, 所以, 将 $\frac{1}{A}$ 用泰勒级数展开得

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_0} \left[1 - \frac{R_0 \alpha t (R + R_2 + R_3)}{A_0} + \left(\frac{R_0 \alpha t (R + R_2 + R_3)}{A_0} \right)^2 + \dots \right]$$

取一阶近似得

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_0} \left(1 - \frac{R_0 \alpha t (R + R_2 + R_3)}{A_0} \right) \quad (6)$$

将(6)式代入(1)得

$$e = E \frac{R_0(1 + \alpha t)(R_2 + R_3)}{A_0} \left[1 - \frac{R_0 \alpha t (R + R_2 + R_3)}{A_0} \right] - E \frac{R_3}{R + R_2 + R_3} + E \frac{R_3 R (R_2 + R_3)}{(R + R_2 + R_3)} \cdot \frac{1}{A_0} \left[1 - \frac{R_0 \alpha t (R + R_2 + R_3)}{A_0} \right] \quad (7)$$

由(7)式可知, 电桥的非线性误差为

$$\Delta e_4 = \frac{E(R_0 \alpha t)^2 (R_2 + R_3)(R + R_2 + R_3)}{A_0^2} \quad (8)$$

因在数据处理时每隔 10°C 分为一段, 故取 $t = 10^\circ\text{C}$, 代入(8)得 $\Delta e_4 = 1.57 \times 10^{-6}$ 伏, 相应的测温误差为 $\Delta t_4 = 0.0039^\circ\text{C}$ 。

5. 电流热效应的误差

当铂电阻接通电流后, 一方面获得电能而增热, 另一方面通过元件表面向外散热, 最后, 在稳定情况下, 电阻温度总比空气温度高, 这一误差被称为电流热效应误差。我们在对铂电阻进行温度检定时, 铂电阻处于静风环境, 而在实际观测时铂电阻处于 2.5 米/秒以上的通风气流。所以, 两者电流增温值不同, 下面求算这一电流增温值的差值。

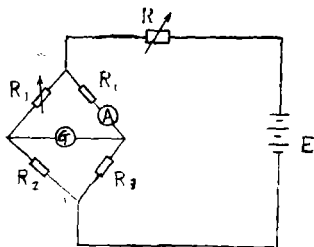


图 2

表 2

	静 风	2.5m/s
I(mA)	$R_t(\Omega)$	$R_t(\Omega)$
2.7	110.88	110.71
5.4	111.06	110.805

测试电路如图 2。调整 R 的阻值即可改变流过 R_t 的电流值 I, R_t 的阻值用平衡电桥法测得, 测试结果如表 2。计算公式^[2]如下

$$I = \sqrt{\frac{hS}{0.24R_0}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta T}{1 + \Delta T}} \quad (9)$$

式中 I 为流过铂电阻的电流值, h 为热交换系数, S 为测温元件的散热面积, R_0 为无电流热效应时 R_t 的阻值, ΔT 为铂电阻与周围环境的温差。 R_0 的计算公式为

$$R_0 = \frac{4R_t' - R_t''}{3} \quad (10)$$

R_t' 为起始电流情况下 R_t 的阻值, R_t'' 为电流增倍后 R_t 的阻值, hS 的计算公式为

$$hS = \frac{0.24I^2 R_t' \alpha R_0}{R_t' - R_0} \quad (11)$$

据公式(9)可求得当 $I = 1$ 毫安时元件处于静风条件下电流升温值 ΔT_0 和元件处于 2.5 米/秒通风条件下的电流升温值 $\Delta T_{2.5}$: $\Delta T_0 = 0.022^\circ\text{C}$, $\Delta T_{2.5} = 0.01^\circ\text{C}$ 。所以, 电流热效应的误差为 $\Delta t_s = 0.012^\circ\text{C}$ 。

6. 放大器的非线性误差

在温度放大电路中, 使用的主要部件是数据放大器。该系统使用的数据放大器为北京半导体研究所生产(型号为 BG004), 对此放大器的输入输出关系利用图 3 的电路测出, 测试结果如表 3。已知非线性误差的计算公式^[3]为

$$e_f = \pm \frac{\Delta_{\max}}{\Delta_{F.S}} \cdot 100\% \quad (12)$$

其中 e_f 为非线性误差, $\Delta_{\max}$ 为输出平均值与理论值的最大偏差, $\Delta_{F.S}$ 为传感器满量程输出平均值。

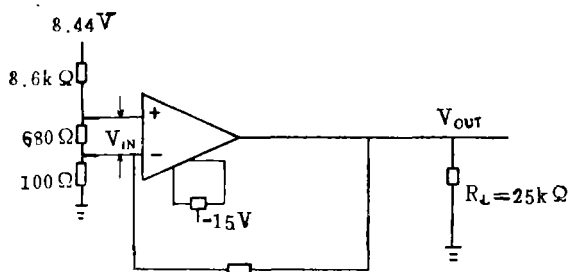


图 3

表 3

$V_{IN}(\text{mV})$	1.72	4.23	6.99	9.68	12.43	15.18	18.00	20.72	23.57	26.52
$V_{OUT}(\text{V})$	0.428	1.059	1.750	2.427	3.113	3.801	4.506	5.190	5.898	6.573

用最小二乘法线性度的计算方法求得 $e_f = \pm 0.046$, $\Delta_{\max} = 3$ 毫伏。在数据处理时是每隔 10°C 作一个温度检定点, 当温度变化 10°C 时, 温度放大器的输出量大约变化 1 伏, 所以在 10°C 范围里输出平均值与理论值的最大偏差为

$$\Delta_{\max} = \frac{3 \text{ 毫伏}}{6.573} = 0.456 \text{ 毫伏}$$

该值相应的测温误差约为

$$\Delta t_6 = \frac{0.456 \text{ 毫伏}}{4 \times 10^{-4} \text{ 伏/}^\circ\text{C} \times 250} = 0.0046^\circ\text{C}$$

7. 压频转换器的非线性误差

该系统使用的压频转换器由青岛晶体管实验所研制(型号为QD452), 对此压频转换器的输入输出关系利用图4电路测出, 测试结果如表4。据公式(12)用最小二乘法线性

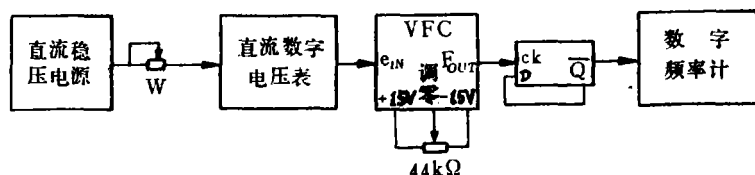


图 4

表 4

$e_{IN}(V)$	0.044	0.4688	1.0077	2.0325	3.0626	4.0951	5.0082	5.9739
$f(kC)$	0.22	2.348	5.044	10.166	15.315	20.476	25.039	29.865

度的计算方法, 求得 $e_f = \pm 0.013$, $\Delta_{max} = 4$ 周。因在数据处理时是每隔 10°C 作一个温度检定点, 所以, 在 10°C 范围里输出平均值与理论值的最大偏差为

$$\Delta_{max} = \frac{4 \text{ 周}}{5.9739} = 0.67 \text{ 周}$$

该值相应的测温误差约为

$$\Delta t_7 = \frac{0.67 \text{ 周}}{5 \text{ 千周/1伏} \cdot 1 \text{ 伏/} 10^\circ\text{C}} = 0.0013^\circ\text{C}$$

综上所述, 这套仪器总的测温误差为

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4 + \Delta t_5 + \Delta t_6 + \Delta t_7 = 0.036^\circ\text{C}$$

其中电源稳定性产生的误差 Δt_3 和电流热效应的误差 Δt_5 是产生误差的主项。

三、对比分析

1987年11月25日国家气象局气象科学研究院计量所对这套测温仪器进行了鉴定, 结果见表5。从鉴定结果来看, 这套测温仪器的标准差 $\sigma = 0.028^\circ\text{C}$, 而理论分析误差为 $\Delta t - \Delta t_2 = 0.033^\circ\text{C}$, 两个值相当吻合。故这套仪器的测温精度优于 0.1°C 。

表 5 南京气象学院梯度测试仪温度标定结果报告

梯 度 温 度 层 次	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-7.15℃	-7.12	-7.12	-7.15	-7.16	-7.16	-7.16	-7.16	-7.16	-7.11	-7.12
-3.10℃	-3.08	-3.12	-3.11	-3.11	-3.08	-3.12	-3.07	-3.07	-3.07	-3.08
0.02℃	0.06	0.02	0.04	0.00	0.02	0.02	0.00	0.04	0.04	0.04
3.00℃	2.96	2.96	2.99	2.95	2.96	2.96	2.99	3.03	3.03	3.00
7.00℃	7.00	7.00	6.98	7.00	6.97	6.97	7.04	6.98	7.00	7.02
12.93℃	12.93	12.93	12.92	12.92	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93	12.93
17.99℃	17.99	17.99	17.95	17.99	17.95	17.99	17.99	17.99	17.99	17.99
28.07℃	28.08	28.08	28.06	28.06	28.10	28.10	28.11	28.11	28.07	28.07
37.10℃	37.08	37.08	37.13	37.13	37.08	37.08	37.13	37.13	37.13	37.13

本工作得到韩志敏、刘德云同志的热情帮助, 谨致谢忱。

参 考 文 献

- [1] Stevens, D.W., High-resolution measurement of air temperature difference, Jour. Appl. Meteo., 6(1), 179—185, 1967.
- [2] 赵柏林、张鹤琛, 大气探测原理, 17—22, 气象出版社, 1985.
- [3] 南京航空学院、北京航空学院, 传感器原理, 4—7, 国防工业出版社, 1980.

AN ANALYSIS OF THE ERRORS FROM THE HIGH PRECISION MEASUREMENT OF AIR TEMPERATURE

Pang Yong

ABSTRACT

In this paper errors from the temperature measurement on the 50m meteorological tower in the Nanjing Institute of Meteorology are analysed. It is pointed out that the error is less than 0.1°C , quite coincident with the appraisal granted by the state Meteorological Administration.