

一种热电阻温度测量的全补偿方法

陶红

(南京师范大学物理科学与技术学院, 210097, 南京)

[摘要] 热电阻温度测量中, 热电阻的非线性、不平衡电桥的非线性及引线电阻都会给测量带来误差. 本文采用铂电阻改进型实用有源线性化桥路克服了上述误差, 实现了高精度的温度测量.  
[关键词] 热电阻, 温度测量, 有源电桥, 误差  
[中图分类号] TM934. 1, [文献标识码] B, [文章编号] 1672- 1292- (2004) 01- 0070- 03

0 引言

温度的高精度测量是工业生产领域的一个重要问题. 目前使用比较广泛的温度传感器有 4 类: 热电阻、热电偶、热敏电阻及集成温度传感器.

热电阻温度传感器中的铂热电阻以其精度高、性能稳定、互换性好、耐腐蚀及使用方便等优点, 成为工业测控系统中广泛使用的一种比较理想的测温元件. 热电阻测温的常规方法是将热电阻接到电桥的一个桥臂上, 通过测量不平衡电桥的输出得到温度值. 在这种方法中, 铂电阻的非线性和不平衡电桥的非线性, 会给测量带来误差. 而且, 铂电阻作为温度传感器使用时, 必须把它放在测温现场, 从测温点到测量变换电路之间的布线长度少则几米, 多则几十米甚至上百米, 这样长的连接导线, 即使不计热噪电阻, 它自身的引线电阻也是相当可观的. 如 50~ 100 m 长的连接导线, 引线电阻一般为 4~ 10 Ω. 而对常用的 Pt 100 铂电阻来说, 温度的变化率约为 0. 391 Ω/℃, 与该变化率相比, 引线电阻对测量精度的影响也很大.

本文针对传统的热电阻测量中引起误差的主要原因, 提出一种铂电阻有源电桥加入正反馈的非线性校正方法, 且给出了改进的实用有源电桥, 使“三线制测量”在理论上可以完全消除引线电阻的影响.

1 热电阻测温的误差来源

1.1 热电阻的非线性

温度为 0~ 850℃ 的条件下, 铂电阻的电阻值  $R_t$  与被测温度  $t$  之间的关系为:

$$R_t = R_0(1 + A t + B t^2)$$

式中:  $R_0$  为被测温度为 0℃ 时热电阻的阻值. 对 Pt 100 铂电阻,  $A = 3. 908 02 \times 10^{-3}$ ,  $B = - 5. 80 195 \times 10^{-7}$ . 由于二次项的存在, 随着温度的升高, 铂电阻的非线性越来越严重.

1.2 不平衡电桥的非线性

不平衡电桥测量电路(如图 1 所示). 在不考虑引线电阻  $R_L$  的情况下( $R_L = 0$ ), 电桥输出

$$U_0 = \frac{R_b U_{REF} R_{\Delta t}}{(R_0 + R_b)(R_0 + R_b + R_{\Delta t})}$$

式中:  $R_{\Delta t} = R_0(A t + B t^2)$ , 一般情况下,  $(R_0 + R_b) \gg R_{\Delta t}$ , 因此

$$U_0 = \frac{R_0 U_{REF} R_{\Delta t}}{(R_0 + R_b)^2}$$

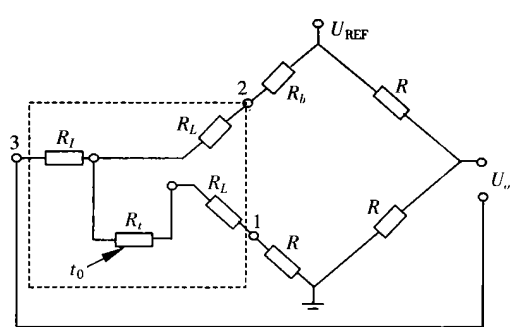


图 1 不平衡电桥测量桥路

但当热电阻的阻值变化幅度较大时,  $R_{\Delta t}$  与  $(R_0 + R_b)$  相比不能忽略, 它将造成不平衡电桥的非线性.

1.3 引线电阻的影响

一般热电阻的阻值在几十至几百欧范围内变化. 热电阻的引线常处于被测温度环境, 温度波动较大, 其阻值随温度的变化难以估计和修正. 为了消除导线电阻的影响, 引线常采用三线制, 使测量

误差得到了一定的补偿, 但导线的影响依然存在. 如图 1 采用三线制测量时, 若考虑到引线电阻  $R_L$ , 则电桥输出

$$U_0 = \frac{R_t - R_b}{R_t + R_b + 2R_L} \times \frac{1}{2} U_{REF}$$

从上式可见,  $R_L$  仍然对输出产生影响, 并产生非线性. 由此产生的误差为

$$e_r = \frac{2R_L}{2R_L + R_b + R_t} \times 100\%$$

对  $Pt100$ ,  $R_b = 100 \Omega$ , 假如  $R_L = 1 \Omega$ , 则引起的最大误差为 1%, 当引线电阻达 4~10  $\Omega$  时, 误差可高达 10%. 而且  $R_L$  的大小随现场施工条件而变化, 测量和补偿都比较困难.

2 高精度温度测量的方法

2.1 铂电阻有源电桥电路

铂电阻有源电桥电路原理(如图 2 所示).

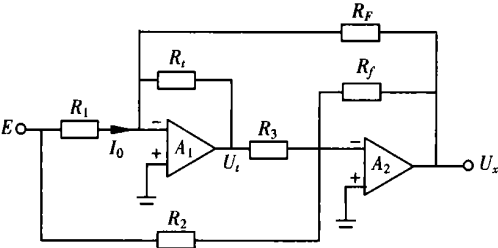


图 2 铂电阻有源电桥电路原理

由图 2 得:

$$\frac{E}{R_1} = -\frac{U_i}{R_t} - \frac{U_x}{R_f} \tag{1}$$

$$\frac{U_i}{R_3} + \frac{E}{R_2} = -\frac{U_x}{R_f} \tag{2}$$

式(1)、式(2) 消去  $U_i$  得:

$$U_x = \frac{E}{R_1} \left( R_t - \frac{R_1 R_3}{R_2} \right) \frac{R_f}{R_3} \left( 1 - \frac{R_t}{R_f} \times \frac{R_f}{R_3} \right)$$

令  $I_0 = E/R_1$ ,  $K = R_f/R_3$ , 并调整有源电桥, 使  $t = 0$  时,  $U_x = 0$ , 则  $R_0 = R_1 R_3/R_2$ , 由此得:

$$U_x = \frac{I_0 K (R_t - R_0)}{1 - K R_t / R_f} \tag{3}$$

对于铂电阻,  $R_t = R_0 (1 + A t + B t^2)$

故得:  $U_x = \frac{I_0 R_0 (A + B t) t}{\frac{1}{K} - \frac{R_0}{R_f} (1 + A t + B t^2)}$  (4)

设加入正反馈电阻  $R_f$  后的校正系数为  $H$

$$H = \frac{1}{K} - \frac{R_0}{R_f} (1 + A t + B t^2) \tag{5}$$

由式(5) 知,  $H$  与  $t$  为二次抛物线方程, 可用一次直

线方程  $H_0 = M I_0 R_0 (A + B t)$  进行逼近(式中  $M$  为常数), 此时  $U_x$  和  $t$  成正比,  $H_0$  就是理想无误差时所需的校正系数. 根据数值逼近理论中的切比雪夫定理, 用一个  $t$  的一次多项式(直线方程) 逼近式(5), 从而求得:

$$R_f = -\frac{A + B t_{max}}{100 I_0 B} \tag{6}$$

$$K = 10 \times \left[ \frac{R_0}{R_f} \left( 1 - \frac{B}{8} t_{max}^2 \right) + 1000 I_0 R_0 A \right] \tag{7}$$

测温范围为 0~500  $^{\circ}C$ ,  $t_{max} = 500^{\circ}C$ , 对于  $Pt100$  铂电阻,  $R_0 = 100 \Omega$ ,  $A = 3.90802 \times 10^{-3}$ ,  $B = -5.80195 \times 10^{-7}$ . 取  $E = 5 V$ ,  $I_0 = 1 mA$ , 则  $R_f = 62357.009 \Omega$ ,  $K = 24.562$ .

由  $I_0 = E/R_1$ , 得  $R_1 = 5 k\Omega$ , 设  $R_2 = R_1 = 5 k\Omega$

由  $R_0 = R_1 R_3/R_2$ , 得  $R_3 = 100 \Omega$

由  $K = R_f/R_3$ , 得  $R_f = 2456.2 \Omega$ .

选  $R_f$  为 68 k $\Omega$  线绕电位器调至 62357  $\Omega$ ,  $R_f$  为 5 k $\Omega$  线绕电位器调至 2456.2  $\Omega$ , 实验表明, 本校正电路可把非线性误差改善到 0.08% 以下.

2.2 可完全消除三线制测量时引线电阻影响的改进型实用有源电桥

本系统若直接使用图 2 电路, 因引线存在电阻, 而且引线的电阻温度系数较大, 当环境温度发生变化时, 其阻值也随之发生变化, 因而环境温度变化时会造成较大的测量误差. 可完全消除三线制测量时引线电阻影响的改进型实用有源电桥(如图 3 所示).

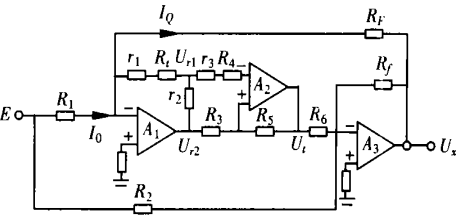


图 3 可完全消除三线制测量时引线电阻影响的改进型实用有源电桥

设  $R_6/R_5 = m$ ,  $I_Q = U_x/R_f$

则有  $U_{r1} = - (I_0 + I_Q) (R + r_1)$

$U_{r2} = - (I_0 + I_Q) (R + r_1 + r_2)$

$U_t = (1 + m) U_{r1} - m U_{r2} = - (I_0 + I_Q) (R_t + r_1 - m r_2)$

$U_x = - K U_t - E R_f / R_2$

整理得:

$$U_x = \frac{I_0 K (R_t - R_0 + r_1 - m r_2)}{1 - \frac{K}{R_f} (R_t + r_1 - m r_2)}$$

(8)

使  $r_1 - m r_2 = 0$ , 则有

$$U_x = \frac{I_0 K (R_t - R_0)}{1 - K R_t / R_f}$$

(9)

比较式(3)和式(9), 它们完全相同, 从理论上完全消除了引线电阻的影响. 因为引线电阻通常采用的是同种材料、同等长度, 故有  $r_1 = r_2$ , 这样, 只需保证  $m = 1$ , 即  $R_5 = R_6$ , 就可完全消除引线电阻的影响, 而且无任何限制条件, 不影响原电路参数的设计.

3 结论

用热电阻作为温度传感器进行温度测量时, 常

采用三线制接法的桥式测量电路, 热电阻和电桥的非线性及引线电阻都会给测量带来误差, 为此, 采用铂电阻改进型实用有源线性化桥路, 可消除上述各种因素对测量的影响, 提高了整个测量系统的精度, 满足了工程应用的需要.

[参考文献]

[1] 吴永生, 方可人. 热工测量及仪表[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

[2] 周培森. 自动检测与仪表[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.

[3] 常键生. 检测与转换技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.

[4] 吴道梯. 非电量电测技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.

A Method for the Automatic Compensation to Thermal Resistor  
in Temperature Measurement

Tao Hong

(College of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, PRC)

**Abstract:** In temperature measurement of the thermal resistor, the nonlinearity of thermal resistor, lead resistor and unbalanced bridge may produce errors. In this paper, a kind of improved practical active linear bridge circuit with platinum resistor is used to eliminate the error mentioned above, and the precise temperature measurement can be made.

**Key words:** thermal resistor, temperature measurement, active bridge circuit, error

[责任编辑: 刘健]