

## Compensation Method and Circuit for the Non-linear Property of Thermistor Pt100

ZHANG Zhi-yong, XIN Chang-yu, ZHU Yu-long, JI Xiao-jun  
(The Department of Instrument Science And Engineering, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Aiming at a solution to the non-linear property of Pt100, with its characteristics and the actual use requirements of ships equipment, a new method was brought for to compensate the non-linear property caused by the decrease of the increase rate of resistance as the increase of temperature. A non-linear compensation circuit is designed for the purpose of dynamic adjusting prompting current flowing in the Pt100. This circuit was designed based on both theoretical analysis of principle and effect of circuit compensation and simulation in computer. The on-the-spot test of this circuit suggests that between the temperature range of 0~650, the non-linear inaccuracy of circuit output can be controlled within no more than 0.12%. At present, the circuit as the core temperature measurement and control system has been used in a naval ship equipment.

**Key words:** non-linear circuit; compensation circuit; platinum resistance; Pt100  
**EEACC:** 7230; 7320 R

## Pt100 温度传感器非线性的补偿方法与电路实现

张志勇, 辛长宇, 朱玉龙, 吉小军

(上海交通大学仪器科学与工程系, 上海 200240)

**摘要:** 针对铂电阻(Pt100)温度传感器输出的非线性问题, 结合其非线性的具体特点和船舶装备的实际使用要求, 提出了一种补偿其非线性的方法, 即通过动态调整流过铂电阻的激励电流, 来补偿由于铂电阻随温度升高阻值增加率减小而引起的非线性, 并设计了专用的非线性补偿电路. 在对电路补偿原理及效果进行理论分析和计算机模拟仿真的基础上, 实际制作了该非线性补偿电路, 并进行了现场测试, 结果表明在 0~650 的温度范围内, 电路输出的非线性误差不超过 0.12%. 目前以本电路为核心的温度测量与控制系统已实际应用于某海军船舶装备.

**关键词:** 非线性电路; 补偿电路; 铂电阻; Pt100

**中图分类号:** TP212.11

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-9490(2007)06-2189-03

温度是过程检测与控制中的重要参量, 在要求对温度进行精确测量和控制的条件下, 铂热电阻是一种应用广泛的温度传感器, 它具有体积小、准确度高、测温范围宽、稳定性好、正的温度系数等特点, 但它同时也存在非线性的缺点<sup>[1]</sup>, 因此在利用铂热电阻进行精确温度测量时, 除要克服测量电路自身的噪声干扰外, 还要对铂热电阻的非线性进行矫正. 本文结合船舶装备的实际使用要求, 根据铂电阻(Pt100)国际分度表函数的非线性特点<sup>[2]</sup>, 提出了一种在 0~650 范围内补偿其非线性的方法, 设计了专用的非线性补偿电路, 在对电路补偿原理及效果进行理论分析和计算机模拟仿真的基础上, 实际制

作了该非线性补偿电路, 并进行了现场测试.

### 1 铂电阻 Pt100 的非线性特点及补偿思路

按照国际电工委员会的铂热电阻技术标准, 铂电阻 Pt100 在 0~650 范围内的符合 ITS-90 的国际分度表函数  $R_t$  可用下式表示<sup>[3]</sup>:

$$R_t = R_0 (1 + At - Bt^2) \quad (1)$$

其中:  $R_t, R_0$  分别是  $t$  和 0 时的铂电阻阻值,  $R_0 = 100 \Omega$ ,  $A = 3.908\ 02 \times 10^{-3} \text{ } ^{-1}$ ,  $B = 5.801\ 95 \times 10^{-7} \text{ } ^{-2}$ .

该分度函数的特点是覆盖温度范围宽、精度高. 以广泛使用的分度值(以 10 为间隔)来作比较, 可

收稿日期: 2006-10-20

作者简介: 张志勇(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为测试计量技术与仪器, jeff335@163.com.

以看出,在 0~650 范围内二阶拟合值与实际标称阻值的最大绝对误差为 0.004 9,平均绝对误差为 0.002 6,这时的最大相对误差仅为  $1.487 \times 10^{-5}$ ,因此该二阶拟合函数完全可以满足高精度测量的要求<sup>[4]</sup>.但由于函数中存在非线性项  $Bt^2$ ,因此随着温度的升高,铂电阻的非线性越来越严重<sup>[5]</sup>,如图 1 所示.非线性项系数小于零,说明电阻的变化率随着温度的升高而下降,要消除铂电阻非线性对测量输出的影响,就需要设法补偿在不同温度点时由于电阻的变化率下降而导致测量输出信号减小或增加的部分.下面以恒流源激励,电压信号输出测量为例,来说明本文的补偿思想.

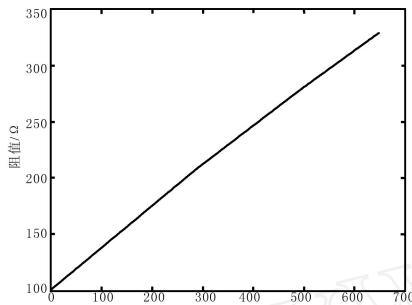


图 1 铂电阻 (Pt100) 阻值与温度关系曲线

设用恒流源  $I_0$  来激励铂电阻,通过测量铂电阻两端的电压来实现温度测量,则在  $t$  时铂电阻两端的输出电压为:

$$V_t = I_0 R_t = I_0 R_0 (1 + At - Bt^2) \quad (2)$$

如果没有非线性项  $Bt^2$  存在,输出的电压应为:

$$V'_t = I_0 R_t = I_0 R_0 (1 + At) \quad (3)$$

可见由于非线性项  $Bt^2$  存在,使得实际的输出与线性输出相比小了  $I_0 R_0 Bt^2$ ,这时我们自然想到可以通过增加激励电流来增加电压输出以抵消它.假定在  $t$  时让激励电流增加  $I_t$ ,这样输出电压将增加:

$$V_t = I_t R_t = I_t R_0 (1 + At - Bt^2) \quad (4)$$

令  $V_t = I_0 R_0 Bt^2$  得到:

$$I_t = \frac{I_0 Bt^2}{1 + At - Bt^2} \quad (5)$$

因此,从理论上讲,只要使通过热电阻的激励电流按

$$I_t = I_0 \left(1 + \frac{Bt^2}{1 + At - Bt^2}\right) = I_0 \frac{1 + At}{1 + At - Bt^2} \quad (6)$$

取值,则可以消除输出电压与温度之间的非线性,但由于  $t$  是未知的待测参量,所以电路实现时只能通过动态反馈的方式来实时调整通过热电阻的激励电流.

## 2 Pt100 的非线性补偿电路的设计与分析

根据上述补偿思想,设计的补偿电路如图 2 所示,通过动态调整流过 Pt100 的电流来实现电压输出非线性的补偿,同时考虑到热电阻的安装需要较长的导线,因此设计的电路也兼顾引线补偿功能.下面对本电路的工作原理给以分析说明.

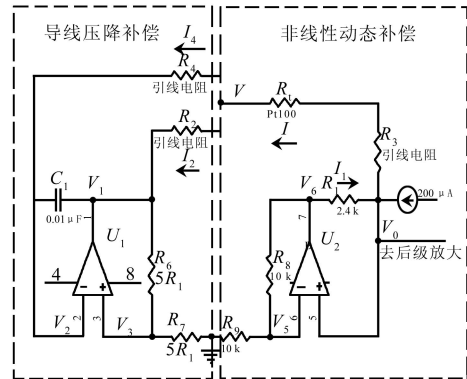


图 2 Pt100 的非线性补偿电路

设电路中各节点与支路上的电学参量如图 2 所示,对运算放大器  $U_1$  有:

$$V_1 = V - I_2 R_2, V_2 = V - I_4 R_4, V_3 = \frac{1}{2} V_1, V_2 = V_3$$

由此得到:

$$V = 2 I_4 R_4 - I_2 R_2 \quad (7)$$

根据电流关系和虚短原理<sup>[6]</sup>有:

$$I = I_2 + I_4, I_4 = 0 \quad (8)$$

对于热电阻的三线制连接引线电阻<sup>[7]</sup>有

$$R_2 = R_3 = R_4 = r \quad (9)$$

将式(8)、(9)代入式(7)得:

$$V = - I r \quad (10)$$

即图 2 中左边电路的等效电路为:  $-r$ ,对输出电压有

$$V_0 = V + I(R_3 + R_t) \quad (11)$$

将式(9)、(10)代入式(11)得:

$$V_0 = I R_t \quad (12)$$

从而补偿了导线上的压降<sup>[8]</sup>.对于运放  $U_2$  有:

$$V_0 = V_5 = V_6 - I_1 R_1, V_5 = \frac{1}{2} V_6$$

由此得到:

$$I_1 = \frac{V_0}{R_1} \quad (13)$$

将式(12)代入上式得:

$$I_1 = I R_t / R_1 \quad (14)$$

设外部激励电流  $I_j$  为(电路中取  $I_j = 200 \mu A$ ).将上式和支路电流关系  $I = I_1 + I_j$  代入式(12)得

$$V_0 = I R_t = (I_1 + I_j) R_t = I R_t^2 / R_1 + I_j R_t \quad (15)$$

由此得到:

$$I = I_j R_t / (R_1 - R_t) \quad (16)$$

电路中就是通过该式来近似实现式(6)的要求,需要特别说明的,本式中的  $I_j$  与式(6)中  $I_0$  的意义是不同的,式(6)中  $I_0$  代表参考温度下流过热电阻的电流;而式(16)中的  $I_j$  是恒流源的输出电流,在图 2 所示电路中,任何温度下流过热电阻的电流都不等同于  $I_j$ ,因此并不能简单地将式(6)和式(16)作相等比较.这时热电阻输出电压为:

$$V_0 = I_j R_t R_t / (R_1 - R_t) \quad (17)$$

定性分析此式可以看出,温度升高时,  $R_t$  增加率

减小,但此时  $R_1 / (R_1 - R_t)$  增加率随之增大,通过选择合适的  $R_1, R_t$  使增加率减小的效果与  $R_1 / (R_1 - R_t)$  增加率随之增大的效果刚好相抵消,则可以实现线性输出的目的.从电路上看,随着温度的升高,  $R_t$  单位温度的阻值变化量减少,但同时  $R_t$  的增大使得  $I_1$  增大,  $I$  也随之增大,即流过  $R_t$  的电流增大,这样单位阻值的输出电压变化量增大,当两个相反的作用刚好抵消时,输出电压与温度就成了线性关系.

### 3 $R_1$ 阻值的确定与补偿效果的仿真

从上面分析可以看出,本电路能否实现预期非线性补偿功能的关键在于  $R_1$  阻值的选择.从理论上讲可以通过将式(17)展开,并令其二阶以上项的系数为零来求  $R_1$ ,但由于式(17)为无理分式,所以无法通过此方法求出.这里采用数值解法<sup>[9]</sup>来优化  $R_1$  的取值.目标函数定为  $V_0$  与  $t$  的最大非线性误差小于某个给定的值.优化时任意给定一个  $R_1$  值,取温度  $t = 0 \sim 650$ ,按式(17)计算输出,再通过线性回归方法求出  $V_0$  与  $t$  的拟合直线及回归误差(也就是最大非线性误差).若回归误差不满足要求则按一定的搜寻规则改变  $R_1$  的取值,并重新计算  $V_0$  及  $V_0$  与  $t$  的拟合直线及回归误差.反复进行上述过程直到回归误差满足要求为止.这里我们取目标函数( $V_0$  与  $t$  的最大非线性误差)为  $10^{-5}$ ,按上述方法进行优化得到  $R_1$  为  $2\ 364.6$ ,结合电阻系列标准,最后选取  $R_1 = 2.4\ k$ ,图 3 所示为补偿前后的输出曲线.这时  $V_0$  与  $t$  的拟合直线为:

$$V_0 = 0.085\ 509\ t + 20.856\ (mV) \quad (18)$$

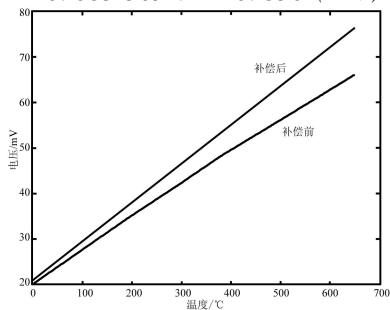


图 3 补偿前后的输出曲线

图 4 所示为补偿电路理论输出与上式线性拟合输出之间的误差曲线,可以看出在  $t = 0 \sim 650$  内补偿电路实际输出的最大非线性误差为不超过  $0.05\ %$ .

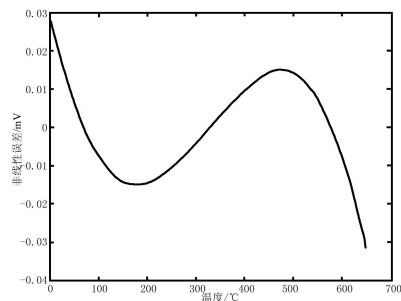


图 4 补偿电路理论输出的非线性误差

## 4 实验测试与结论

为了进一步验证本文提出的 Pt100 非线性补偿方法的实际效果,我们按图 2 设计制作了相应的非线性补偿电路并进行了实际测试.测试时利用精密电阻箱代替 Pt100,并按 Pt100 的分度表来设置不同温度时的阻值,测试结果如表 1 所示.由电路实际输出值拟合得到的直线为:  $V_0 = 0.092\ 061\ t + 21.272\ (mV)$ ,由表中实验数据可以看出,实际制作电路的非线性误差不超过  $0.12\ %$ ,且与理论仿真结果吻合很好.

表 1 0 ~ 200 测量范围测试结果

$t/$	阻值/ $\Omega$	$V_0/mV$		相对非线性误差/ $\%$
		实际输出值	线性拟合值	
0	100	21.3	21.272	0.034 5
50	119.40	25.9	25.875	0.030 8
100	138.50	30.5	30.478 1	0.027 0
150	157.31	35.1	35.081 2	0.023 2
200	175.84	39.6	39.684 2	0.103 8
300	212.02	48.9	48.890 3	0.012 0
400	247.04	58.0	58.096 4	0.118 8
500	280.90	67.3	67.302 5	0.003 1
600	313.59	76.6	76.508 6	0.112 7
650	329.51	81.1	81.111 6	0.014 4

通过理论分析、计算机模拟仿真和实际电路制作与测试,表明本文所提方法可以对铂电阻(Pt100)在较宽的温度范围内实现高质量的非线性补偿,同时还可以通过调节激励电流对输出电压进行适当的放大,因此该补偿电路有望在高精度的铂热电阻温度测量场合发挥重要作用.目前以本电路为核心的温度测量与控制系统已实际应用于某海军船舶装备.

### 参考文献:

- [1] 周胜海. 传感器非线性的硬件校正方法[J]. 传感器技术, 2002, 21(05), 1-4.
- [2] 王勇, 王晓东. 高精度铂电阻测温非线性校正方法[J]. 测控技术, 2004, 23(07), 75-76.
- [3] 赵耿, 高恩来. 一种铂电阻测温仪用双补偿电路及其设计[J]. 仪表技术, 1999, 4, 29-31.
- [4] 赵岚, 齐德荣. 热电阻测温电路非线性补偿[J]. 传感器技术, 2002, 21(5), 48-50.
- [5] 李挺, 朱金刚, 赵良煦. 一种热电阻测温仪导线电阻补偿新方法[J]. 计量技术, 2001, 04, 7-8.
- [6] 童诗白. 模拟电子技术[M]. 高等教育出版社, 第二版, 1996.
- [7] 陶红. 一种热电阻温度测量的全补偿方法[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2004, 4(1), 70-72.
- [8] 张萱, 闻建静, 楼建明. 铂电阻测温非线性校正方案[J]. 南昌大学学报(工科版), 2003, 25(3), 53-56.
- [9] 李书泽, 张武高, 张荣荣, 黄震. 高精度铂电阻测温电路优化设计[J], 工业仪表与自动化装置, 2005, 1, 26-28.