

测温仪表电路分析与优化设计

许大字

(盐城工学院电气工程系, 盐城, 224003)

摘 要 对配用铂电阻 Pt100 的数字式测温仪表采用正反馈法非线性修正放大电路进行了优化设计。方法是通过对该电路的工作基理, 建立数学模型, 首先消除模型中二次方项非线性误差, 再进行直线拟合, 减小三次方项及高次方项非线性误差, 能明显提高仪表的精度, 可供生产厂家直接采用。

关键词 正反馈 直线拟合 闭环增益 BASIC 语言

分类号 TM13

配铂电阻 Pt100 数字式测温仪表, 应用广泛, 由于铂电阻的电阻 R_t 与温度 T 之间呈非线性关系, 通常采用反馈法非线性修正放大电路予以解决(图1)。这种电路结构简单, 在放大电路中只增加一只正反馈电阻, 就能使输出电压与温度呈线性关系, 为一般仪表厂所乐意采用。但是, 因各电阻参数之间相互牵连, 定量计算十分复杂, 生产厂目前仍采用近似估算加试验修正的方法, 确定有关参数, 因而仪表精度不高, 一般为1级或0.5级, 在 $0\sim 200^\circ\text{C}$ 量程范围内最多只能达到0.2级。其实, 采用这种电路, 如果电阻参数配置合理, 可使仪表精度大大提高。笔者在详尽分析其工作原理的基础上, 通过建立数学模型, 采用微机独特的数值运算方法, 精确算出各电阻参数, 因而使仪表精度明显提高。在 $0\sim 200^\circ\text{C}$ 量程范围内, 非线性误差在 0.1°C 以下, 在 $0\sim 500^\circ\text{C}$ 量程范围内, 非线性误差在 1°C 以下。

一、工作原理

图1为反馈式非线性修正放大电路, 主要元件为一运算放大器, 它将输入信号进行非线性修正及放大, 由 $R_1-R_2-R_3-R_4$ 构成的桥式线路, 一端接电源 E 正极, 一端接地, 铂电阻 R_t 接在桥路的一个臂上。通过电阻 R_4 与运放正相输入端连接, 以实现将电阻变化量转换为电压变化量, 输入到运放中去。正反馈电阻 R_6 是实现非线性修正的关键元件。若没有它, 则将由于以下两个原因使运放输出电压为非线性。

(1) 铂电阻 R_t-T 特性为非线性

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

式中, $R_0=100\Omega$, $\alpha=3.90802\times 10^{-3}/^\circ\text{C}$, $\beta=5.802\times 10^{-7}/^\circ\text{C}^2$ 。

(2) 电桥的非线性, 即通过铂电阻 R_t 支路上的电流随 R_t 阻值的增加而减少。

如果接了正反馈电阻 R_6 , 将使运放正相输入端电压 V_{++} 提高, 只要电阻 R_6 与其它参数匹配得当, 将能有效地消除输出电压的非线性, 而接近线性, 为便于定量分析, 作等效电路如图2

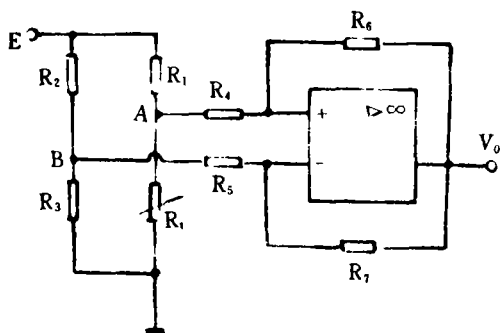


图1

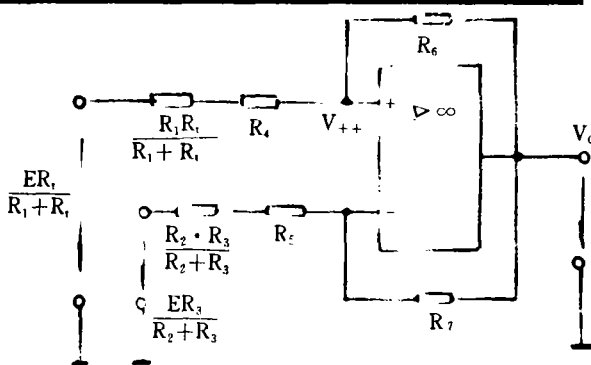


图2

所示。

图中: $\frac{ER_1}{R_1+R_1}$ 和 $\frac{R_1R_1}{R_1+R_1}$ 为从图 1A 点看进去等效电压及等效内阻, 随 R_1 阻值变化而变化。

$\frac{ER_3}{R_2+R_3}$ 和 $\frac{R_2R_3}{R_2+R_3}$ 为从图 1B 点看进去的等效电压及等效内阻, 为常值, 而运放输出电压与正反相端输入电压的关系式为

$$V_0(T) = (K + 1)V_{++}(T) - K \frac{ER_3}{R_2 + R_3} \quad (2)$$

式中 K 为闭环增益

$$K = \frac{R_7}{\frac{R_2R_3}{R_2 + R_3} + R_5} \quad (3)$$

如果没有加正反馈电阻 R_6 , 则 $V_{++}(T)$ 与 $\frac{ER_1}{R_1+R_1}$ 相等, 现在增加了一个 R_6 电阻, 由于运放输出电压 $V_0(T)$ 的正反馈, 使正相端 $V_{++}(T)$ 增加, 其表达式为:

$$V_{++}(T) = \frac{\frac{ER_1}{R_1 + R_1} \cdot R_6 + V_0(T) \cdot (\frac{R_1R_1}{R_1 + R_1} + R_4)}{\frac{R_1R_1}{R_1 + R_1} + R_4 + R_6} \quad (4)$$

当温度 $T=0$ 即铂电阻 $R_1=R_0=100\Omega$, 则运放输出电压 $V_0(T)=V_0(0)=0$ 获得运放正相输入端电压 $V_{++}(0)$ 为

$$V_{++}(0) = \frac{E \cdot \frac{R_0}{R_1 + R_0} \cdot R_6}{\frac{R_1R_0}{R_1 + R_0} + R_4 + R_6} = \frac{K}{K + 1} \cdot \frac{ER_3}{R_2 + R_3} \quad (5)$$

将方程(4)(5)代入方程(2), 得运放输出电压为

$$V_0(T) = r \cdot \frac{R_1 - R_0}{[R_6 - K(R_4 + R_1)] \cdot R_1 \cdot (1 + \alpha T - \beta T^2) + R_1(R_6 - KR_4)} \quad (6)$$

式中 $r = \frac{(K + 1)(R_4 + R_6)R_6R_1E}{(R_1 + R_0)(R_4 + R_6) + R_1R_0}$ 为系数项。

方程(6)中的 $V_0(T)$ 具有非线性, 利用麦克劳林定理将其分解为多项式

$$V_0(T) = V_0(0) + V'_0(0) \cdot T + \frac{1}{2} V''_0(0) \cdot T^2 + \frac{1}{6} V'''_0(0) \cdot T^3 + \dots \quad (7)$$

式中 $V_0(0)$ 为常数项, $V'_0(0) \cdot T$ 为线性项, 其它二次方项、三次方项等均为非线性误差项。经推导得

$$V_0(0) = 0 \quad (8)$$

$$V'_0(0) \cdot T = r \cdot \frac{\alpha}{(R_1 + R_0)(R_0 - KR_1) - R_1R_0} \cdot T \quad (9)$$

$$V''_0(0) \cdot T^2 = 2r \cdot \frac{KR_1R_0(\alpha^2 + \beta) + [R_1\beta + R_0(\alpha^2 + \beta)](KR_1 - R_0)}{[(R_1 + R_0)(R_0 - KR_1) - R_1R_0]^2} \cdot T^2 \quad (10)$$

$$V'''_0(0) \cdot T^3 = 6rR_0\alpha[R_0 - K(R_1 + R_0)] \cdot T^3 \quad (11)$$

若能将二次方项消除, 便能获得与温度 T 成近似线性关系的运放输出电压, 由方程(10)使 $V''_0(0) = 0$, 则可算出正反馈电阻 R_0 阻值为

$$R_0 = \frac{KR_1R_0(\alpha^2 + \beta)}{R_1\beta + R_0(\alpha^2 + \beta)} + KR_1$$

$$\text{令} \quad M = \frac{R_1R_0(\alpha^2 + \beta)}{R_1\beta + R_0(\alpha^2 + \beta)} \quad (12)$$

$$\text{则} \quad R_0 = K(M + R_1) \quad (13)$$

将方程(13)代入方程(6), 获得运放输出电压为

$$V_0(T) = r_1 \cdot \frac{R_1 - R_0}{R_1(M - R_1) + MR_1} \quad (14)$$

$$\text{式中, } r_1 = \frac{(K + 1)[K(M + R_1) + R_1](M + R_1)R_1R_0E}{(R_1 + R_0)[K(M + R_1) + R_1] + R_1R_0}$$

由此可知, 由方程(13)确定的正反馈电阻 R_0 , 消除了运放输出电压中温度 T 的二次方误差项, 使非线性误差大为减小, 但是 T 的三次方误差项并未消除, 至于 T 的高次方误差项(包括四次及四次以上项)这里虽未作数学描述, 但也客观存在, 所以由方程(14)表述的运放输出电压存在着温度 T 的三次方及高次方误差, 如图 3 示。

图 3 中 $V_0(T)$ 为运放输出电压, $V'_0(0) \cdot T$ 为其线性项, 为进一步减小误差, 可用一直线 $V_k = hT$ 对曲线 $V_0(T)$ 进行拟合, 使两线相交于 T_j , 那么 $V_0(T)$ 相对直线 $V_k = hT$ 来说, 其误差值获得进一步减小, 表达式为

$$\delta V(T) = V_0(T) - hT \quad (15)$$

由图 3 可看出, 在高于温点 T_j 的温区内, $V_0(T)$ 呈现负误差, 且在满程温度 T_M 处, 误差最大, 表达式为

$$\delta V(T_M) = |V_0(T_M) - hT_M| \quad (16)$$

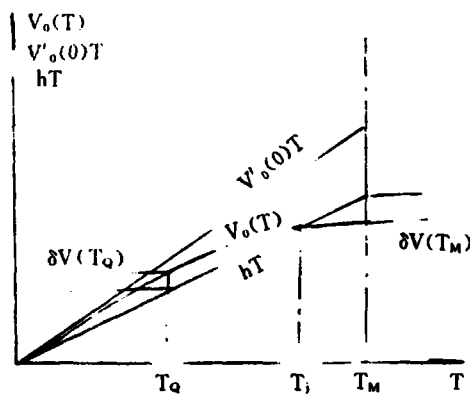


图 3

在低于温点 T_j 的温区内, $V_0(T)$ 呈现正误差, 且在某一温点 T_Q 处误差 $\delta V(T_Q)$ 最大, 表达式为

$$\delta V(T_Q) = V_0(T_Q) - hT_Q \quad (17)$$

$$\text{若使 } \delta V(T_M) = \delta V(T_Q) \quad (18)$$

表明直线 hT 对曲线 $V_0(T)$ 拟合最佳, 误差降到最小。为此目的, 需建立如下联立方程, 求解运放闭环增益 K , 温点 T_j 及 T_Q 值

(1) $V_0(T)$ 曲线与 hT 直线相交于 T_j 点即

$$V_0(T_j) = hT_j \quad (19)$$

(2) 在 $0 \sim T_j$ 温区内, 应用求极值公式寻找某一温点 T_Q , 使 $\delta V(T_Q)$ 为最大

$$[V_0(T_Q) - hT_Q]' = 0 \quad (20)$$

(3) 由方程(18)获得

$$V_0(T_Q) - hT_Q = hT_M - V_0(T_M) \quad (21)$$

鉴于求解该方程组比较复杂, 故借助微机采用 BASIC 语言解算, 可以十分方便地完成这一复杂的计算。

具体方法是, 首先将方程(19)变换为

$$K^2 + K \left\{ 1 + \frac{R_4}{M + R_4} - \frac{R_1 + R_0}{M + R_4} \cdot \frac{[(M - R_1)R_i + MR_1]hT_j}{R_1(R_i - R_0)E} \right\} + \frac{R_4}{M + R_4} - \frac{R_4(R_1 + R_0) + R_1R_0}{(M + R_4)^2} \cdot \frac{[(M - R_1)R_i + MR_1]hT_j}{R_1(R_i - R_0)E} = 0 \quad (22)$$

按上式, 先设定一个 T_j 值, 求出闭环增益 k 值, 代入方程(14)求出 $V_0(T_M)$ 按方程(16)求出 $\delta V(T_M)$, 然后在 $0 \sim T_j$ 温区内, 逐一寻找温点 T_Q , 使 $\delta V(T_Q)$ 为最大, 再验证 $\delta V(T_Q)$ 是否与 $\delta V(T_M)$ 相等, 若二者不等, 再重新设定 T_j 值, 依上述方法重新运算, 直至 $\delta V(T_Q) = \delta V(T_M)$ 为止(在一定允许误差条件下)。从而把闭环增益 k 值最终确定下来, 按照这个 k 值计算电路各参数, 可以达到进一步减少非线性误差的目的。

二、有关参数设计

前述电路设计原理, 为有关参数设定和数学模型的建立提供了理论依据, 现论述如下:

(1) 电阻 R_1 与 R_2 的设定

通过铂电阻的电流大约为 $0.5 \sim 1 \text{ mA}$ 范围内, 当取桥路电压 $E = 5 \text{ V}$ 时, 可确定 $R_1 = R_2 = 5.11 \text{ K}\Omega \sim 10 \text{ K}\Omega$ 范围。

(2) 电阻 R_4 和 R_5 的确定

由于铂电阻的阻值 R_i 随温度升降而变化, 影响了运放两个输入端等效电阻平衡对称, 加入电阻 R_4 、 R_5 以后, 提高了运放两个输入端总有效电阻值, 这时, 虽有铂电阻 R_i 阻值的变化, 但较前相对变化量减少, 设计时可按下式

$$\left(\frac{R_1 R_i}{R_1 + R_i} + R_4 \right) // R_6 \approx \left(\frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_5 \right) // R_7 \quad (23)$$

先设定 R_4 获得

$$R_5 = \frac{K+1}{K} \cdot \frac{\left(\frac{R_1 R_7}{R_1 + R_7} + R_4\right) R_6}{\frac{R_1 R_7}{R_1 + R_7} + R_4 + R_6} - \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \quad (24)$$

式中 R_7 按 $\frac{1}{2}T_M$ 满量程温度值确定。

三、采用微机设计电路参数(流程图略)

四、举例

按图 1 基本原理电路要求运算放大器输出电压灵敏度 $h=10\text{mV}/^\circ\text{C}$, 试分别设计二种量程, 即 $0\sim 200^\circ\text{C}$ 、 $0\sim 500^\circ\text{C}$ 的电路参数, 并解算出每一温度量程范围内各有关温点 T_i 上的电压输出值及其误差, 首先确定电路参数 $R_1=R_2=5.11\Omega$, $R_4=511\Omega$, 其它参数按有关数学模型求解, 经微机运算获得表 1、表 2 数据。

表 1 量程 $0\sim 200^\circ\text{C}$, 灵敏度 $h=10\text{mV}/^\circ\text{C}$

$T(^{\circ}\text{C})$	20	40	60	80	100	120	140	160	173	180	200
$V_o(T)(\text{mV})$	200.134	400.257	600.358	800.427	1000.453	1200.425	1400.330	1600.158	1730	1799.898	1999.537
$hT(\text{mV})$	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1730	1800	2000
$\delta V(T)(\text{mV})$	0.134	0.257	0.358	0.427	0.453	0.425	0.330	0.158	0	-0.102	-0.463

$K=19.017, M=1780.35\Omega, T_0=100^\circ\text{C}, T_1=173^\circ\text{C}$

$R_3=103.9\Omega, R_5=669.9\Omega, R_6=43573.8\Omega, R_7=12378.8\Omega$

表 2 量程 $0\sim 500^\circ\text{C}$, 灵敏度 $h=10\text{mV}/^\circ\text{C}$

$T(^{\circ}\text{C})$	50	100	150	200	250	252	300	350	400	450	500
$V_o(T)(\text{mV})$	502.191	1004.213	1505.893	2007.051	2507.506	2527.507	3007.069	3505.547	4002.743	4498.453	4992.472
$hT(\text{mV})$	500	1000	1500	2000	2500	2520	3000	3500	4000	4500	5000
$\delta V(T)(\text{mV})$	2.191	4.213	5.893	7.051	7.056	7.507	7.069	5.547	2.743	-1.547	-7.528

$K=19.092, M=1780.353\Omega, T_0=252^\circ\text{C}, T_1=434^\circ\text{C}$

$R_3=103.9\Omega, R_5=723.0\Omega, R_6=43745.8\Omega, R_7=13803.2\Omega$

测温仪表电路中电阻值参数配置对仪表的精度起着十分重要的作用, 经试验证明, 依本文所述方法设计的仪表精度较高, 可靠性好。

参考文献

- 1 夏士智, 叶林著. 铂热电阻温度计的温度—频率转换. 计量技术. 1989

(上接第 13 页)

三、结束语

通过多次实验证实, 简易顺序控制器具有使用方便、结构简单、通用性强、进行可靠等特点, 可广泛用于自动化生产过程中。与可编程控制器相比具有造价低, 没有抗干扰问题, 不需编程, 输出接点容量大, 可直接驱动较大的负荷, 有一定的实用价值。

参考文献

- 1 王维俭编. 电力系统继电保护原理. 清华大学出版社. 1988
- 2 刘顺禧, 吴中俊编著. 工厂电气控制技术. 同济大学出版社. 1989