

# 基于 Cu50 的精确温度测量系统

张志坚, 杨雷

(东莞理工学院 电子工程学院, 广东 东莞 523808)

**摘要:** 在基于热电阻的温度测量过程中, 由于元器件差异和漂移的影响, 会大大降低温度测量准确度; 针对这一问题, 提出了一种自校正技术的 4 电阻测量法, 通过比较 4 组测量信号的相对大小来求得被测热电阻的电阻值, 进而计算出温度值; 该方法的优点是可以抵消测量电路中漂移和元器件差异的影响, 从而实现在不同的温度环境下的高精度的温度测量; 通过计量炉的实测的数据比较, 测量误差小于  $0.063^{\circ}\text{C}$ , 表明了该方法的有效性和正确性。

**关键词:** Cu50; 温度测量; 温漂; 自校正

## System of Precision Temperature Measurement Based on Cu50

Zhang Zhijian, Yang Lei

(School of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

**Abstract:** In the thermal resistance based temperature measurement, the measure accuracy will greatly decreased due to component difference and drift. To solve this problem, a four resistances self calibration technique is proposed. The resistance value of the thermal resistance is obtained by comparing the relative amplitude of the four gauged signals, and then the temperature is calculated. The advantage of the proposed method lies in the drift in the circuit and the component difference will be offset, thereby realizing high-precision temperature measurement in different temperature environment. By comparing the measured data Metrology, measurement error is less than  $0.063^{\circ}\text{C}$ , demonstrate the effectiveness and accuracy of the method.

**Key words:** Cu50; temperature measurement; temperature drift; self-correcting

## 0 引言

Cu50 是铜热电阻, 它的阻值会随着温度的变化而改变。当 Cu50 在  $0^{\circ}\text{C}$  的时候它的阻值为  $50\ \Omega$ , 它的阻值会随着温度上升而成匀速增长的。因其生产方便, 价格低廉, 采集电路简单等特点而广泛应用了各类温度测量场合<sup>[1-2]</sup>。一般此类热电阻常使用惠斯通电桥或开尔文电桥来进行测量<sup>[3-5]</sup>, 该方法虽然能保证一定成测量精度, 但对温漂的抑制能力较差, 不适合于温差较大的场合使用。因此为了抑制漂移, 实现高精度的稳定测量, 例如需要实现准确度为  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ , 分辨率为  $0.05^{\circ}\text{C}$  温度精确测量通常有如下 3 种方式:

- (1) 通过检测测量电路的自身工作环境来进行温度补偿<sup>[6-8]</sup>;
- (2) 通过采集大量的数据进行分析并使用复杂的算法来拟合修正<sup>[9-11]</sup>;
- (3) 将热电阻的电阻值测量转换为频率或其它参量进行测量<sup>[12-13]</sup>。

这 3 种方式虽然最终都能实现温度的高精度测量, 但都会增加电路设计的复杂性或是软件处理的繁杂性, 特别是不利用大规模的生产使用。文中提出了一种采用新技术的测温方法, 配合简化了的数据处理, 能有效地克服温漂的影响, 取得了较好的测温效果。

## 1 方案设计

### 1.1 测量原理

由国际电工委员会标准 IEC584/751/1515 可知, Cu50 的阻值与温度的函数关系式为:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3)$$

式中,

$$A = 4.288\ 99 \times 10^{-3}$$

$$B = -2.130\ 0 \times 10^{-7}$$

$$C = 1.223\ 00 \times 10^{-9}$$

即如果能精确测量 Cu50 的电阻值, 那么就能根据 Cu50 的阻值与温度的函数关系式计算此热电阻相应的温度, 实现温度的精确测量。

### 1.2 测量方案

图 1 所示, 测温电阻  $R_t$  与另 3 个已知的标准电阻串联在恒流源中, 4 个电阻的电压通过相同参数的差分放大模块电路后, 送入四通道的高精 ADC 中, 由微控制器来进行数据采集并计算出温度值。

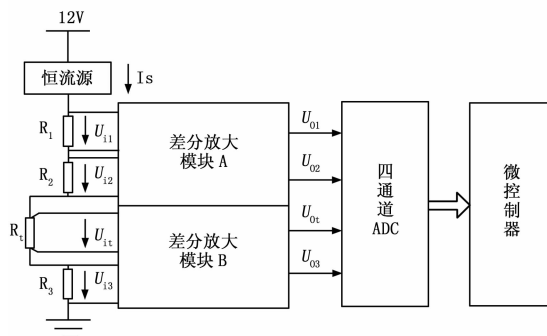


图 1 系统方案

收稿日期: 2014-01-21; 修回日期: 2014-03-01。

基金项目: 广东省自然科学基金(S2012010010306); 973 计划项目(2013CB834305)。

作者简介: 张志坚(1982-), 男, 广东河源人, 硕士, 主要从事通信、电子测控方向的研究。

设恒流源产生的电流为  $I_s$ ，4 个电阻分别为  $R_1, R_2, R_3$  和  $R_t$ ，则他们的电压为： $u_{i1} = I_s R_1, u_{i2} = I_s R_2, u_{i3} = I_s R_3, u_{it} = I_s R_t$ 。差分放大模块电路的放大倍数分别为  $K_{v1}, K_{v2}, K_{v3}, K_{vt}$ ，放大电路的零漂分别为： $V_{of1}, V_{of2}, V_{of3}, V_{oft}$ 。

则四路电压信号经放大调理电路放大后，其输出分别为：

$$\begin{aligned} V_{o1} &= K_{V1} \times V_{i1} + V_{of1} = K_{V1} \times I_s \times R_1 + V_{of1} \\ V_{o2} &= K_{V2} \times V_{i2} + V_{of2} = K_{V2} \times I_s \times R_2 + V_{of2} \\ V_{o3} &= K_{V3} \times V_{i3} + V_{of3} = K_{V3} \times I_s \times R_3 + V_{of3} \\ V_{ot} &= K_{Vt} \times V_{it} + V_{oft} = K_{Vt} \times I_s \times R_t + V_{oft} \end{aligned}$$

如果使用参数高度相同的差分放大电路（如同一芯片内集成的双通道或 4 通道差分放大芯片），则芯片内的多路放大电路放大倍数和零漂都相同，即：

$$\begin{aligned} K_{v1} &= K_{v2} = K_{v3} = K_{vt} \\ V_{of1} &= V_{of2} = V_{of3} = V_{oft} \end{aligned}$$

由测得的 4 组电压值  $V_{o1}, V_{o2}, V_{o3}$  和  $V_{ot}$  可解出：

$$R_t = \left[ \frac{\frac{V_{ot} - V_{o1}}{V_{o2} - V_{o1}}(R_2 - R_1) + R_1 + \frac{V_{ot} - V_{o2}}{V_{o3} - V_{o2}}(R_3 - R_2) + R_2}{2} \right]$$

以上的结论同样可以适用于 AD 转换后处理的数据。因为使用了 4 通道的 ADC，在内部转换电路一样的情况下，AD 的线性度和零漂都变为不是影响因素，转换后的结果不会改变 4 者的关系。设 AD 转换输 4 个电压信号的输入为  $D_{o1}, D_{o2}, D_{o3}$  和  $D_{ot}$  则有：

$$\frac{V_{ot} - V_{o1}}{V_{o2} - V_{o1}} + \frac{V_{ot} - V_{o2}}{V_{o3} - V_{o2}} = \frac{D_{ot} - D_{o1}}{D_{o2} - D_{o1}} + \frac{D_{ot} - D_{o2}}{D_{o3} - D_{o2}}$$

从而有：

$$R_t = \left[ \frac{\frac{D_{ot} - D_{o1}}{D_{o2} - D_{o1}}(R_2 - R_1) + R_1 + \frac{D_{ot} - D_{o2}}{D_{o3} - D_{o2}}(R_3 - R_2) + R_2}{2} \right]$$

显然因为 4 个电阻串使用了同样的恒流源，并且使用了同样参数的放大电路，在同一时刻  $D_{o1}, D_{o2}, D_{o3}, D_{ot}$  四者之间的比例仅取决于电阻大小之比，与电路放大倍数无关，与电流大小无关。 $R_1, R_2$  和  $R_3$  采用温度系数为 1 ppm，精度为 0.01% 的标准电阻，即使工作环境温度有  $\pm 50^\circ\text{C}$  的变化，相应阻值变化也仅有 0.005%，完全可忽略不计或把他作为已知的常数。可见，此方法对整个电路的漂移都具有实时的自校正功能。与其它具有温度补偿功能的测量方案相比，它不需要额外测量自身的环境温度，更无需进行复杂的算法，且电路简单、无需调试，规模化生产方便，因而具有较强的实用性。

## 2 系统实现

### 2.1 电路设计

根据图 1 所示的系统方案进行系统实现，采用 TL431 设计 50 mA 的恒流源，标准电阻  $R_1$  为 50  $\Omega$ ， $R_2$  为 60  $\Omega$ ， $R_3$  为 70  $\Omega$ ，精度为  $\pm 0.01\%$ ，温度系数为  $\pm 1$  ppm。采用四线法的 Cu50 铜电阻。差分放大电路使用 2 片集成双通道仪用放大器的 AD8222，该器件具有 20  $\mu\text{V}$  的超零漂和 0.02% 的芯片差异性能保证 4 路差分放大电路的一致性。使用 4 通道的 AD7606-4 为 AD 转换芯片，该芯片为 16 位 4 通道同步采样的双极性 ADC，根据  $-40 \sim +80^\circ\text{C}$  测温范围设计，并考虑一定的余量设计时，对应的电阻为：41.401~67.119  $\Omega$ 。此时 AD 转换对于电阻的分辨率为：

$$\frac{67.119 - 41.401}{65\ 536} = 0.000\ 39\ \Omega$$

按照 Cu50 基本灵敏度  $S=0.428\ 899\ \Omega/^\circ\text{C}$  估算，对温度的分辨率为 0.000 9  $^\circ\text{C}$ ，完全可以满足系统 0.05  $^\circ\text{C}$  的分辨率要求。

### 2.2 数据处理

由因为 Cu50 的阻值与温度的关系式是非线性全函数关系复杂的函数式，直接编程处理将十分麻烦且计算费时，因此采用了分段线性拟合进行非线性校正。

为了减少拟合误差，将整个测温度区分为 2 段分别进行拟合。

当  $0^\circ\text{C} \leq t \leq 80^\circ\text{C}$  时，用端基线性拟合法求得线形方程为： $R = 0.213\ 991\ 25t + 50$

线性拟合后的误差为：

$$\Delta R = R_t - (K_1 t + P_1) = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^3) - (0.213\ 991\ 25t + 50)$$

易求出：当  $0^\circ\text{C} \leq t \leq 80^\circ\text{C}$  时，总有  $\Delta R \geq 0$ ，且当  $t = 28.55^\circ\text{C}$  时， $\Delta R_{\max} = 0.005\ 824\ 637\ \Omega$ 。

为减小误差，作端基线的平移，即令

$$R = K_1 t + P_1 + \frac{\Delta R_{\max} + \Delta R_{\min}}{2} = 0.213\ 991\ 25t + 50.002\ 912$$

即当  $0^\circ\text{C} \leq t \leq 80^\circ\text{C}$  时，有

$$R_t = 0.213\ 991\ 25t + 50.002\ 912,$$

$$\text{且 } |\Delta R_{\max}| \leq 0.002\ 912\ \Omega$$

对应引起的最大测温偏差为 0.013 6  $^\circ\text{C}$ ，可以满足系统 0.05  $^\circ\text{C}$  的分辨率要求。

在  $-40^\circ\text{C} \leq t < 0^\circ\text{C}$  的区间，用同样的方法可得拟合方程：

$$R_t = 0.214\ 975t + 50.002\ 882,$$

$$\text{且 } |\Delta R_{\max}| \leq 0.002\ 882\ \Omega$$

对应引起的最大测温偏差为 0.013 4  $^\circ\text{C}$ ，亦可以满足系统 0.05  $^\circ\text{C}$  的分辨率要求。

取  $R_1 = 50\ \Omega, R_2 = 60\ \Omega, R_3 = 70\ \Omega$

则自校正后  $R_t$  的测量值为：

$$R_t = \left[ \frac{\frac{D_{ot} - D_{o1}}{D_{o2} - D_{o1}}(R_2 - R_1) + R_1 + \frac{D_{ot} - D_{o2}}{D_{o3} - D_{o2}}(R_3 - R_2) + R_2}{2} \right] = \left( \frac{D_{ot} - D_{o1}}{D_{o2} - D_{o1}} + \frac{D_{ot} - D_{o2}}{D_{o3} - D_{o2}} \right) \times 5 + 10$$

而当  $0^\circ\text{C} \leq t \leq 80^\circ\text{C}$  时，应有：

$$R_t = 0.213\ 991\ 25t + 50.002\ 912$$

联立式可①②解出：

$$t = \left( \frac{D_{ot} - D_{o1}}{D_{o2} - D_{o1}} + \frac{D_{ot} - D_{o2}}{D_{o3} - D_{o2}} \right) \times 23.365\ 44 - 40.002\ 912 \quad (\text{当 } 0^\circ\text{C} \leq t \leq 80^\circ\text{C})$$

同理，当  $-40^\circ\text{C} \leq t < 0^\circ\text{C}$  时，应有：

$$R_t = 0.214\ 975t + 50.002\ 882$$

联立式可①③解出

$$t = \left( \frac{D_{ot} - D_{o1}}{D_{o2} - D_{o1}} + \frac{D_{ot} - D_{o2}}{D_{o3} - D_{o2}} \right) \times 23.258\ 518 - 40.288\ 2 \quad (\text{当 } -40^\circ\text{C} \leq t < 0^\circ\text{C})$$

## 4 系统测试与分析

为了验证系统的温度测量效果，采用福禄克的 Fluke9170 高精度计量炉来进行校验，Fluke9170 是测温范围  $-45 \sim 140^\circ\text{C}$ ，稳定性为  $\pm 0.005^\circ\text{C}$ ，分辨率为 0.001  $^\circ\text{C}$  的高精度计

(下转第 1367 页)

表 7 基于 3 条预测路径的目标路径 2 的参数

路径	$\sigma_D$	$R_{OP,ABC}$	$\sigma_e$	$\Delta D_{min}$
路径 A	17.14ps	0.777 7	29.87ps	89.63ps
路径 B	20.51ps			
路径 C	27.71ps			
目标路径 2	47.53ps			

表 8 目标路径 2 的 SDD 扫描方差

目标路径 2 的 SSV(%)	1 条路径	2 条路径	3 条路径
		23.67	32.7

### 5 结论

本文提出一种基于电路路径延时相关性信息的 SDD 缺陷检测方法, 即使存在工艺变化, 也可以检测出 SDD 缺陷。该算法利用了如下原理: 对两个高度相关的路径, 一条路径的延时方差的重

要部分可以用另一条路径的延时方差进行描述。我们还将本文算法拓展到多路径相关性情况, 使得我们可以检测出更微小的 SDD 缺陷。我们同时提出并部署了一种统计学计时分析框架, 以计算计时信息和跨径相关性。基于 74LS85 和 ISCAS85 基准电路的仿真结果证明了本文算法的可行性。仿真结果表明, 本文算法可以检测出落入被测试路径工艺变化范围内的 SDD 缺陷。我们下一步研究工作的重点是在本文提出的小延时缺陷检测方案的基础上, 基于隐马尔科夫模型进行电路故障诊断。

(上接第 1356 页)

量炉, 常用于温度测量仪的校正。验证时分两种情况来进行, 一种是使温度测量系统的处理电路和传感器都处于计量炉内, 其测量结果如表 1 所示。另一种是只是传感器处于计量炉内, 其它的处理电路都处于炉外的常温环境中, 其测量结果如表 2 所示。

表 1 测量系统处理电路处于记录炉内的测量数据

序号	记录炉温度(°C)	系统测量温度(°C)	误差(°C)
1	-25.851	-25.874	-0.023
2	-10.225	-10.241	-0.016
3	-5.082	-5.093	-0.011
4	-0.221	-0.222	-0.001
5	5.126	5.113	-0.013
6	14.985	14.976	-0.009
7	30.253	30.286	0.033
8	40.224	40.247	0.023
9	60.263	60.281	0.018
10	70.352	70.364	0.012

表 2 测量系统处理电路处于记录炉外的测量数据

序号	记录炉温度(°C)	系统测量温度(°C)	误差(°C)
1	-25.553	-25.587	-0.034
2	-10.264	-10.289	-0.025
3	-5.01	-5.022	-0.012
4	-0.211	-0.232	-0.021
5	5.014	4.995	-0.019
6	14.959	14.936	-0.023
7	30.051	30.069	0.018
8	40.127	40.153	0.026
9	60.282	60.321	0.039
10	70.228	70.291	0.063

从以上 2 表数据对比发现当温度测量系统的处理电路放置在计量炉外时, 测量效果非常好, 与计量炉的最大误差为 0.033 °C。但当整个温度测量系统都处于计量炉内的测量准确度较差, 与计量炉的最大误差为 0.063 °C, 这是因为温漂的原因。温度测量电路中的标准电阻和其它放大电路的温漂所致。

要部分可以用另一条路径的延时方差进行描述。我们还将本文算法拓展到多路径相关性情况, 使得我们可以检测出更微小的 SDD 缺陷。我们同时提出并部署了一种统计学计时分析框架, 以计算计时信息和跨径相关性。基于 74LS85 和 ISCAS85 基准电路的仿真结果证明了本文算法的可行性。仿真结果表明, 本文算法可以检测出落入被测试路径工艺变化范围内的 SDD 缺陷。我们下一步研究工作的重点是在本文提出的小延时缺陷检测方案的基础上, 基于隐马尔科夫模型进行电路故障诊断。

### 参考文献:

[1] Zhang W, Balakrishnan K, Li X, et al. Efficient Spatial Pattern Analysis for Variation Decomposition via Robust Sparse Regression [J]. IEEE Transactions on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2013, 32 (7): 1788-1799.  
 [2] 龙志和, 陈青青, 林光平. 面板数据空间误差分量模型的空间相关性检验 [J]. 系统工程理论实践, 2013, 33 (1): 72-81.

但不管是哪种验证方式, 测量系统的总体温度测量效果良好, 测量误差都小于 0.2 °C 设计目标。

### 4 结束语

通过采用自校正技术的测量电路, 实现了温度测量系统设计, 同时采用分段线性拟化方法解决了 Cu50 的非线性问题, 使整个温度测量系统实现准确度为 ±0.2 °C, 分辨率为 0.05 °C 的设计需求。通过福禄克的 Fluke9170 高精度计量炉来计量表示, 该系统工作稳定可靠, 测量准确度高, 满足设计要求。

### 参考文献:

[1] 杨雷, 张建奇. 电子测量与传感技术 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2008.  
 [2] 吴建平. 传感器原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.  
 [3] 吕方瑶, 张池军, 闫勇, 等. 一类高精度温度测量技术研究 [J]. 电子测量技术, 2011, 34 (8): 88-90.  
 [4] 张瑜, 张升伟. 基于铂电阻传感器的高精度温度检测系统设计 [J]. 传感技术学报, 2010, (4): 311-314.  
 [5] 张修太, 胡雪惠, 翟亚芳, 等. 基于 PT100 的高精度温度采集系统设计与实验研究 [J]. 传感技术学报, 2010, 23 (6): 812-815.  
 [6] 陆阳, 韩江洪, 魏臻, 等. 铂电阻测温系统温度补偿方法 [J]. 仪器仪表学报, 2000, (6): 255-262.  
 [7] 程建华, 罗立成, 王鑫哲, 等. 高精度温度测量系统的测温补偿算法研究\_程建华 [J]. 传感器与微系统, 2012, 29 (11): 36-39.  
 [8] 许卓, 杨雷, 何志伟. 多通道热电阻精密测量中温度漂移的补偿法 [J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38 (10): 926-929.  
 [9] 刘天建, 王劭伯, 朱善安. 基于神经网络的铂电阻温度传感器非线性校正方法 [J]. 仪器仪表学报, 2002, (5): 518-520.  
 [10] 杨延西, 刘丁. 基于 ANFIS 的温度传感器非线性校正方法 [J]. 仪器仪表学报, 2005, (5): 511-527.  
 [11] 朱杰, 郭涛. 一种 Pt100 温度传感器的动态热响应模型 [J]. 传感技术学报, 2013, (1): 73-77.  
 [12] 沈岷, 李舜韶, 周华鹏, 等. 高精度铂电阻温度测量新方法 [J]. 压电与声光, 2010, 32 (5): 889-893.  
 [13] 苏振中, 王东, 陈俊全. 基于 XTR105 的多通道温度测量系统 [J]. 仪表技术与传感器, 2012, (8): 59-62.