

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.011

铂电阻高精度温度测量系统设计

郑泽祥, 姜周曙*, 黄国辉, 王 剑

(杭州电子科技大学 能源利用系统与自动化研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了满足工业生产对温度测量的高精度要求,研制了一种恒流源微电流驱动四线制铂电阻 Pt100 的高精度温度测量系统。分析了引起系统测量误差的原因,给出了减少误差的方法;阐述了恒流源、仪用放大、抗混叠滤波、采样保持、A/D 采样等主要电路的设计原理和参数选择准则;说明了测量系统的标定方法。该系统采用四线制铂电阻 Pt100 作为温度传感器,由恒流源微电流驱动产生电压,可以完全去除铂电阻自身的引线电阻、有效减少自热效应;通过仪用放大电路、抗混叠滤波电路和采集保持电路可以有效滤除采集信号中的干扰信号,降低外界干扰对测量系统的影响,增强测量系统稳定性、可靠性和准确性。测试结果表明,该系统性能稳定可靠,标定后测量误差小于 $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

关键词: 温度测量; 高精度; 铂电阻; 恒流源; 抗干扰

中图分类号: TH811; TP212 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)12-1494-05

Design of platinum resistance high-precision temperature measurement system

ZHENG Ze-xiang, JIANG Zhou-shu, HUANG Guo-hui, WANG Jian

(Energy Utilization System and Automation Institute, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at meeting the precision requirement of temperature measurement in industrial process, a high-precision temperature measurement system based on four-wired platinum resistance Pt100, driven by a constant current, was proposed. The measurement errors and the methods to reduce the errors were analyzed; the designed circuits of constant current source, instrumentation amplifier, anti-aliasing filter sampling holder and A/D sampling, and the principle of parameters selection were presented; the calibration method of the measurement system was accounted. As four-wired platinum resistance Pt100 used as the temperature sensor, driven by a constant micro-current to generate measure voltage, the effect of lead resistance was completely eliminated and self-heating was efficiently decreased. After acquisition signal through instrumentation amplifier, anti-aliasing filter and sampling holder, interfering signals were effectively filtered out, interference of the measurement system was reduced, the stability, reliability and accuracy of measurement system were enhanced. The results indicate that, the system is stable and reliable, and the temperature measurement error is less than $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ after calibration.

Key words: temperature measurement; high-precision; platinum resistance; constant-current; anti-jamming

0 引 言

温度是工业生产过程中非常重要的测量参数,温度测量和控制的准确性直接影响产品生产和产品质量。随着测量技术的发展,对温度测量精度的要求也

越来越高,譬如,化工行业联合制碱中要求温差控制在 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,在色谱仪的工作范围内要求温度测量优于 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。铂电阻温度传感器因具有精度高、线性度好、响应速度快等诸多优点,被作为工业精密测量系统中广泛使用的理想测温元件。采用铂电阻进行高精度温度测量需要克服几个技术难点:引线电阻、自

收稿日期: 2013-07-22

作者简介: 郑泽祥(1989-),男,浙江温州人,主要从事检测技术与自动化装置方面的研究。E-mail: styeven@163.com

通信联系人: 姜周曙,男,教授,硕士生导师。E-mail: jiangzhou_shu@163.com

热效应、元器件漂移以及噪声干扰等。

易先军等^[2]提出了以铂电阻为测温元件的高精度温度测量方案,解决了铂电阻温度测量对硬件电路的一些基本要求,但是测量精度不佳;方益喜等^[3]设计了恒流源驱动三线制铂电阻的高精度温度测量系统,较好地提供了测量误差和温度漂移的校准方法,但是没有很好地解决引线电阻对温度测量的影响;汪国定等^[4]提出了恒流源驱动四线制铂电阻测量方法,有效解决了铂电阻的引线电阻和自热效应,但是没有详细分析实际应用过程中外界干扰对系统测量的影响,也未给出相应的抑制措施。

本研究采用微电流驱动四线制铂电阻 Pt100 的测温方案,可以完全去除引线电阻引起的误差,有效减少自热效应,通过使用软、硬件抗干扰滤波技术降低噪声、抑制干扰、减少系统误差,提高系统的测量精度和稳定性。

1 铂电阻高精度温度测量系统

铂电阻 Pt100 是利用金属铂(Pt)的电阻值随温度变化而变化的物理特性而制成的温度传感器^[5]。用 Pt100 作为测温元件进行温度测量的关键是要准确测量出 Pt100 的电阻值。

按照 IEC751 国际标准^[6],现在常用的 Pt100 ($R_0 = 100 \Omega$) 是以温度系数 $TCR = 0.003851$ 为标准统一设计的铂电阻。它的温度电阻特性是:

当 $-200 \text{ }^\circ\text{C} < t < 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3] \quad (1)$$

当 $0 \text{ }^\circ\text{C} < t < 850 \text{ }^\circ\text{C}$ 时:

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

式中: R_t — Pt100 在温度 t ($^\circ\text{C}$) 时的电阻值, R_0 — Pt100 在 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的电阻值。

当 $TCR = 0.003851$ 时的系数值为:

$$A = 3.9083 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}, B = -5.775 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}, C = -4.183 \times 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}.$$

可见, Pt100 的非线性度小,实际计算一般采用线性化处理:

$$R_t = R_0(1 + 0.003851 \times t) \quad (3)$$

其中 $R_0 = 100$, 温度计算公式如下:

$$t = (R_t - 100) / 0.3851 \quad (4)$$

根据 Pt100 的温度特性,本研究设计的四线制铂电阻 Pt100 高精度测温系统如图 1 所示。系统主要由恒流源驱动电路、四线制铂电阻接口电路、仪用放大电路、抗混叠滤波电路、采样保持电路以及 A/D 采样电

路构成。系统正常测温时,恒定电流通过 Pt100 产生相应的电压信号,先进入仪用放大电路,去除共模干扰并进行适当放大,再通过抗混叠滤波电路和采样保持电路去除高频谐波,然后输入高精度 A/D 转换器。A/D 转换后的数字信号进入单片机系统进行数字滤波,最终通过公式计算得出真实温度。

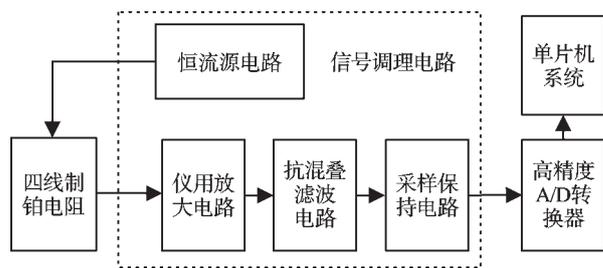


图1 四线制铂电阻高精度测温系统结构图

2 电路设计与参数选择

2.1 恒流源电路

恒流源是铂电阻测温电路中的关键模块,其功能是将铂电阻温度传感器感知的随温度变化的电阻信号转换成可测量的电压信号。根据元器件发热公式 ($P = I^2 \times R$) 可知,铂电阻上流过的电流 I 不宜过大,影响系统测量精度。

恒流源电路如图 2 所示,其中,运算放大器 U1 构成加法器, U2 构成电压跟随器。U1、U2 选用低噪声、低失调、高开环增益的双极性运算放大器 OP07CD。 V_{ref} 为恒流源参考电压,由超低噪声 LDOXFET 基准电压源 A/DR441B 提供稳定电压,温度系数为 $3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$,实际输出为 2.485 V 。 R_{ref} 为参考电阻, R_5 、 R_6 、 R_7 、 R_8 为分压电阻,均选用精度 0.1% 的精密电阻且 $R_5 = R_6 = R_7 = R_8$ 。

该恒流源电路具有输出电流恒定、输出阻抗大、温度稳定性好、负载一端可接地、输出电流大小极性可改变等特点。电流大小 I_{out} 可以通过 R_{ref} 和 V_{ref} 调节,计算公式如下:

$$I_{out} = V_{ref} / R_{ref} \quad (5)$$

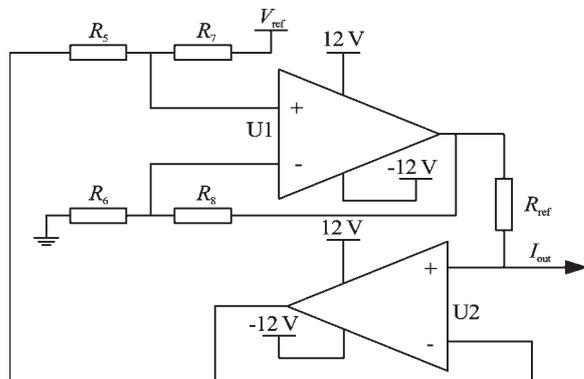


图2 恒流源驱动电路

2.2 四线制铂电阻接口电路

在铂电阻高精度温度测量系统中,引线电阻一定不能忽略。常规的二线制、三线制铂电阻测温方法是忽略其引线电阻或者近似引线电阻值相等。这两种方法的测量值和真实值存在一定的偏差。

假设两线制 Pt100 引线采用长度为 1 m, 直径为 1 mm 的铜线, 铜线的电阻率约为 0.020 1, 则四线制 Pt100 的引线电阻阻值约为: $2 \times 1 \text{ m} \times 0.020 \text{ 1} / (3.141 \text{ 5} \times 0.5^2) = 0.051 \text{ 2 } \Omega$ 。

铂电阻传感器 Pt100 按照升降率 $0.385 \text{ 1 } \Omega / ^\circ\text{C}$ 变化, 由此产生的引线误差为 $0.051 \text{ 2 } \Omega / 0.385 \text{ 1} (\Omega / ^\circ\text{C}) = 0.132 \text{ 9 } ^\circ\text{C}$, 且引线越长, 误差越大。

为消除铂电阻引线电阻对测量精度造成的影响, Pt100 采用四线制接法。四线制接口电路如图 3 所示, 分为恒流源动力引线和电压驱动引线两部分。其中, R_1 、 R_2 两条引线属于恒流源动力引线, 将铂电阻传感器连接到恒流源; R_3 、 R_4 两条电压驱动引线将铂电阻的电压信号连接到仪用放大电路。由此本研究将驱动 Pt100 的恒流源与温度检测电路分开, 保证即使 R_1 和 R_2 两条引线电阻出现变化产生压降也不会影响温度测量的准确性。

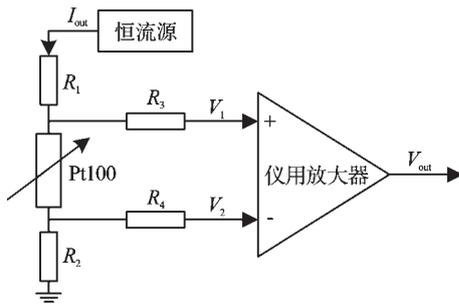


图3 铂电阻四线制接口电路

2.3 仪用放大电路

共模干扰是采集系统中常见的一种干扰, 主要由外界功率器件感应耦合、辐射耦合以及电路不平衡性产生^[7]。恒流源通过四线制铂电阻产生的差分信号通过仪用放大电路输出一个单端对地的信号, 能够有效减少系统中共模干扰对其影响。

仪用放大电路设计如图 4 所示。由运算放大器 U3、U4 按同相输入接法组成第一级差分放大电路, 运算放大器 U5 组成第二级差分放大电路, 将 U3、U4 的输出作为 U5 的输入。电压增益由电阻调节, 其中 $R_{11} = R_{12}$, $R_{13} = R_{14}$ 。该仪用放大器具有增益可调节、高输入阻抗、低输出阻抗、高共模抑制比等特点。

该仪用放大电路电压增益 A_v 计算公式如下:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_1 - V_2} = \frac{R_{13}}{R_{11}} \times \left(1 + \frac{R_9 + R_{10}}{R_g} \right) \quad (6)$$

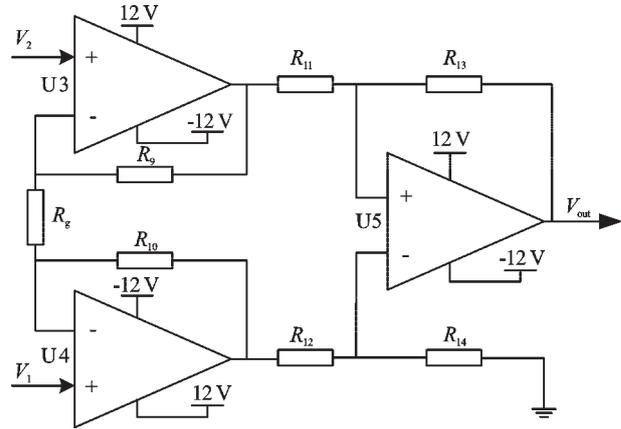


图4 仪用放大电路

2.4 抗混叠滤波与采样保持电路

在测温系统的数据采集过程中, 不可避免地会混入干扰信号。常见的干扰信号有电力线频率在 50 Hz 或 60 Hz 的工频噪声以及其他高频设备产生的噪声等。当这些信号的频率超过奈奎斯特采样定理所规定的范围时, 就会采集到一些混叠信号并对有用信号造成干扰, 即频率混叠^[8]。这种频率混叠信号即使后续电路中有数字滤波也不能完全消除干扰。为了最大程度地抑制混叠现象, 需要采用抗混叠滤波和采样保持电路将混叠信号进行衰减和滤除。

抗混叠滤波电路设计如图 5 所示。虚线部分(1)是由电阻 R_{15} 和电容 C_1 组成的 RC 低通滤波电路, 能够滤除高频信号中大于低通滤波电路截止频率 $1/2\pi RC$ 的干扰信号^[9]。虚线部分(2)为采样保持电路, 能够减小孔径误差充分发挥 A/D 转换器的性能, 同时滤除高频谐波。在这个电路中, 采样保持电路在采样阶段与低通滤波电路直接相连, 电容 C_1 与 C_2 会形成一个充放电回路, 在采样时间很短的情况下, C_1 和 C_2 上的电压都达不到稳定, 增加系统干扰, 影响采集精度, 因此必须增大电容 C_1 的容值。假设使用 24 位 A/D 转换器, 当 $C_1/C_2 > 2^{24}$ 时, 就可以大幅度减小由电容充、放电带来的干扰^[10-11]。

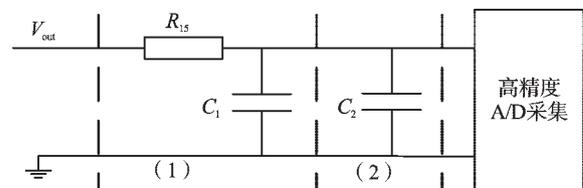


图5 抗混叠滤波和采样保持电路

2.5 A/D 转换器

A/D 转换器是数据采集器的核心器件, 决定了系统的测量精度。本研究选用 24 位高分辨率 A/D 转换器 CS5550, 电压增益 10 倍、50 倍可选, 增益后电压输入范围 $-2.5 \text{ V} \sim 2.5 \text{ V}$, 最高转换速度为 4 000 sps, 自

带数字滤波器,通过配置寄存器的转换次数进行均值滤波,24 bit 双极性输出,最高位表示符号位。单片机通过SPI总线和CS5550连接。

2.6 电路参数选择

系统实际测量过程中必须综合考虑温度测量范围、恒流源的大小、仪表放大电路的放大增益、抗混叠滤波电路的截止频率以及A/D转换器的放大增益,选择合适的电路参数。

设实际温度为 T ,测量电压为 V_{out} 。当实测温度 $T=0\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,铂电阻传感器Pt100的电阻值范围是 $100\ \Omega\sim 138.51\ \Omega$ 。本研究选择 R_{ref} 电阻为 $10\ \text{k}\Omega$,根据公式(5)得出输出恒定电流为 $248.5\ \mu\text{A}$,Pt100输出的电压值范围 V_{out} 为 $25\ \text{mV}\sim 34.627\ \text{mV}$ 。选用仪用放大器的电阻 $R_9=R_{10}=R_{11}=R_{13}=22\ \text{k}\Omega$, R_g 断开即电阻趋于无穷大,根据式(3)计算输出增益 A_v 为1。抗混叠滤波电路选用电阻 $R_{15}=100\ \Omega$,电容 $C_1=47\ \mu\text{F}$, $C_2=2\ \text{pF}$ 。保证 C_1/C_2 大于 2^{24} ,截止频率 $1/(2\pi\times R_{15}\times C_1)$ 小于 $30\ \text{Hz}$,滤除高频信号,通过低频信号。设置A/D转换器电压增益为50,使其输入电压在 $1.250\ \text{V}\sim 1.731\ \text{V}$ 之间,维持在其满量程的 $1/2\sim 2/3$,充分发挥A/D转换性能。

根据上述参数设置和公式(4)可以得出实际温度 T 和测量电压为 V_{out} 的理论关系为:

$$T=(V_{out}/I_{out}-100)/0.385\ 1=10.449\times V_{out}-259.673\quad (7)$$

3 系统标定和误差分析

由于铂电阻Pt100的自身精度以及电路中元器件的漂移,根据理论公式计算得出的温度会和真实温度会存在一定偏差。系统选用不同铂电阻进行测温时,必须先进行温度标定,求得电压和温度的实际对应关系。

本研究采用RTS-35A制冷恒温槽与精度 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高精度温度计进行温度标定,该恒温槽稳定后温度波动度为 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}/30\ \text{min}$ 。在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,铂电阻测温系统每隔 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行一次温度测量。测量时A/D采样速率选用 $500\ \text{sps}$,待恒温槽温度稳定后,本研究对每组温度进行 $100\ \text{s}$ 的采集,进而对所求的 $50\ 000$ 个测量电压求平均,测量温度由理论公式(7)计算得出,实际温度由高精度温度计测量得出。标定前测量数据如表1所示。

表1 标定前测量数据

实际温度/ $^{\circ}\text{C}$	测量电压/ mV	测量温度/ $^{\circ}\text{C}$	误差/ $^{\circ}\text{C}$
10.01	25.841	10.340	0.330
20.00	26.798	20.339	0.339
30.01	27.756	30.349	0.339
39.99	28.714	40.360	0.370
50.00	29.671	50.359	0.359
60.00	30.629	60.369	0.369
70.01	31.585	70.359	0.349
80.00	32.542	80.358	0.358

由表1可知,标定前测量温度和实际温度误差超过 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,说明根据理论公式计算的温度和实际真实温度存在较大误差,必须进行温度标定。根据这8组不同温度下恒温槽的实际温度和系统实际测得电压值采用最小二乘法进行线性拟合,得出实际温度 T 和实际测量电压 V_{out} 的实际关系为:

$$T=10.445\times V_{out}-259.923\quad (8)$$

根据线性拟合公式(8)再次测量恒温槽的温度,测量数据如表2所示。

表2 标定后测量数据

实际温度/ $^{\circ}\text{C}$	测量电压/ mV	测量温度/ $^{\circ}\text{C}$	误差/ $^{\circ}\text{C}$
10.00	25.842	9.997	-0.003
20.01	26.798	19.982	-0.028
29.99	27.757	29.999	0.009
40.02	28.714	39.995	-0.025
50.01	29.672	50.001	-0.009
60.00	30.630	60.007	0.007
69.99	31.585	69.982	-0.008
80.01	32.543	79.989	-0.021

通过测量结果分析,系统根据拟合公式测得的温度和实际温度的误差不超过 $\pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。通过表1和表2测量误差数据对比分析可知,系统通过温度标定之后测量误差有了明显降低。

4 结束语

本研究设计了一种高精度温度测量系统:由恒流源微电流驱动四线制铂电阻Pt100,产生的电压信号先经过仪用放大电路进行放大,然后通过抗混叠滤波

(下转第1502页)

本文引用格式:

郑泽祥,姜周曙,黄国辉,等.铂电阻高精度温度测量系统设计[J].机电工程,2013,30(12):1494-1497,1502.

ZHENG Ze-xiang, JIANG Zhou-shu, HUANG Guo-hui, et al. Design of platinum resistance high-precision temperature measurement system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(12): 1494-1497, 1502.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(2) 长期以来研究的重点都放在设计净化输入电源质量和加严对电机的品质管控方面。在认清了 200 Hz 振动频率发生作用的机理后,本研究通过创新的解决思维,将抑制异常声音的解决重点放在对特定振动频率的衰减、吸收的改善方面并获得成功,为今后解决类似问题拓展了空间。

(3) 吸油烟机产品除了降低噪声分贝值外,其声音品质的好坏也应该是考核、评价其产品性能的一个重要维度,应该得到行业生产厂家的重视。

参考文献(References):

[1] 中国轻工业联合会. GB/T 17713-2011 吸油烟机[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
 [2] 侯 宏,滕月慧,田 宏,等. 油烟机电机异音分析与故障诊断[J]. 测控技术,2008,27(3):85-87.
 [3] 田 宏,侯 宏,杨建华,等. 来自油烟机叶轮的异音分析及其故障诊断[J]. 测控技术,2008,27(5):87-89.
 [4] 杨承上,陈辉明,王正仕. 电网电压存在谐波情况下静止同

步补偿器的前馈控制[J]. 机电工程,2013,30(5):610-613.
 [5] 中国科学院. GB/T 4214. 1-2000 家用电器及类似用途器具噪声测试方法[S]. 北京:中国标准出版社,2000.
 [6] 刘晋平. 电网谐波对电动机运行的影响分析[J]. 科技情报开发与经济,2006,16(23):193-194.
 [7] 智乃刚,萧滨诗. 风机噪声控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,1985.
 [8] 俱利锋,席德科. 离心式通风机噪声机理及设计与改造中的降噪方法综述[J]. 机械科学与技术,2002(3):465-467.
 [9] 李春曦,郭 宁,叶学民. 带进气箱的离心风机导流器调节时性能与噪声特性试验研究[J]. 流体机械,2013,41(1):1-5.
 [10] 阮秀菊. 机械式轮胎硫化机脱模机构优化设计[J]. 机电技术,2013(2):22-24.
 [11] 沈阳鼓风机研究所. 离心式通风机[M]. 北京:机械工业出版社,1984.
 [12] 潘仲麟,翟国庆. 噪声控制技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

李 斌. 吸油烟机异音诊断及声音品质优化设计[J]. 机电工程,2013,30(12):1498-1502.

LI Bin. Diagnostic analysis of electromagnetic noise and optimal design to improve the sound quality of range hood[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2013,30(12):1498-1502.
 《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>

(上接第 1497 页)

电路和采样保持电路滤波,进入高精度 A/D 转换器进行信号采集,最后单片机根据特定公式计算出真实的温度值。该系统能够有效克服铂电阻自身的引线电阻,减小自热效应,降低外界干扰对测量系统的影响。

通过恒温槽测温实验和误差分析可知,该测温系统达到了测量精度高、误差小的设计要求,具有良好的可靠性、稳定性和实用性,标定后温度测量误差小于±0.03 ℃,可以满足工业生产中对温度测量的高精度要求。

参考文献(References):

[1] 薛清华. 高精度多通道温度测量技术研究[D]. 武汉:华中科技大学机械工程学院,2007.
 [2] 易先军,文小玲,刘翠梅. 一种高精度温度测量电路设计[J]. 仪器仪表用户,2008(6):72-73.
 [3] 方益喜,雷开卓,张群飞,等. 基于三线制恒流源驱动的高精度温度测量系统[J]. 计算机工程与应用,2012,48

(S2):531-532.
 [4] 汪定国,王怡苹. 一种高精度铂电阻温度测量方法[J]. 电子测量技术,2012(11):104-107.
 [5] 朱育红. 工业铂电阻精确测温的方法[J]. 中国测试技术,2007(4):50-52.
 [6] 北京赛亿凌科技有限公司. 铂电阻温度传感器 Datasheet [EB/OL]. [2010-04-10]. <http://www.bjsailing.com.cn/product/images/wendu2.pdf>.
 [7] 赵金奎. 共模干扰和差模干扰及其抑制技术[J]. 电子质量,2006(5):72-76.
 [8] 刘洪涛,吴云洁. 高品质抗混叠滤波器设计[J]. 仪器仪表用户,2006(1):97-98.
 [9] 桂静宜. 二阶有源低通滤波电路的设计与分析[J]. 电子科技,2010(10):15-17,21.
 [10] 杨国强. 基于模糊自适应控制的锅炉温度控制[J]. 轻工机械,2013,31(2):52-55.
 [11] 李 刚,程立君,林 凌. 高精度数据采集中抗混叠滤波器的设计[J]. 国外电子元器件,2007(8):30-33,38.

[编辑:张 翔]