

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.01.015

面向 Pt100 铂电阻的高精度多路测温系统*

徐莉振, 鲍 敏*

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对 Pt100 铂电阻多路测温系统存在精度低、硬件电路设计重复等问题,设计了一种面向 Pt100 铂电阻的高精度多路测温系统。以 Pt100 为温度传感器、Atmega16L 为控制核心,通过模拟开关 CD4052 组合进行了多路测量控制,运用滤波、放大等信号调理电路以及 16 位高采样精度的 A/D 转换器 ADS8320,以查表结合软件补偿的方法进行了非线性补偿,从而实现了高精度测温;同时,对各组成部分的误差来源进行了分析,计算出了测温系统的综合误差。研究表明,该系统具有测量精度高、稳定性好、可扩展性强等特点。

关键词: Pt100; 高精度; 多路测温系统; Atmega16L

中图分类号: TH811 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)01-0065-04

Multichannel high-precision temperature measurement system based on Pt100 platinum resistance

XV Li-zhen, BAO Min

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems of low-precision measurement and repeating hardware circuit design in the Pt100 platinum resistance measurement of temperature, a design of multichannel high-precision temperature measurement system based on Pt100 platinum resistance has been introduced. The platinum resistance Pt100 was used as temperature sensor and the Atmega16L was chosen as the controlling core, the control of multichannel measurement has been realized by a group of analog switch CD4052. In order to realize high precision temperature measurement, the signal processing circuit of filtering, amplification, 16-bit high-speed analog-to-digital converter ADS8320 was used. The method combining with look-up table and software compensation was used to make nonlinearity compensation. At the same time, on the part of the error source had been analyzed, then the system synthesis error was calculated. The results indicate that the measurement system has the advantages of high precision, good stability and strong scalability.

Key words: Pt100; high-precision; multi-channel temperature measurement system; Atmega16L

0 引 言

Pt100 温度传感器由于具有精度高、稳定性好、可靠性强等优点,被广泛应用于工业自动化测量和各种实验仪器仪表领域中^[1]。Pt100 温度传感器测温方法主要有 3 种:两线制、三线制和四线制,由于 PCB 布线繁琐程度以及价格等方面原因,在工业上研究者一般采用二线制或三线制铂电阻测温方案。常用的采样

电路有两种:①桥式测温电路;②恒流源式测温电路。两线制测量方法由于导线电阻带来的附加误差使得实际测量值偏高,一般使用于测量精度要求不高的场合^[2]。一般的桥式测温电路的优点就是用 3 根导线将 Pt 传感器和测量电路连接起来, Pt 传感器两侧相等的导线长度分别加在两侧的桥臂上,这样做可以显著减少导线电阻所引起的测量误差^[3-4],但不能消除测量误差。在 Pt100 多路测温系统中,通常以增加模拟

收稿日期: 2012-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106141)

作者简介: 徐莉振(1988-),男,浙江永康人,主要从事机电控制及其自动化方面的研究。E-mail:b06350222@163.com

通信联系人: 鲍 敏,男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail:mbao@zstu.edu.cn

开关芯片来实现多路测温:一种是在 Pt100 接入口处增加模拟开关,但同时也引进了模拟开关导通内阻的误差^[5];一种是在信号调理完成后加入模拟开关,模拟开关导通内阻可忽略不计,但是信号调理电路重复,设计成本增加^[6]。

本研究提出三线制双恒流源式多路测温方法,在未引进模拟开关内阻误差、克服常用测温电路设计中铂电阻 Pt100 引线导致的测量误差以及未重复信号调理电路前提下,可保证系统在 0~100 ℃ 的测温范围内,测量误差小于 ±0.1 ℃,为 Pt100 多路高精度测量提供很好的解决方案。

1 系统组成及测温原理

多路温度传感器测温系统主要由恒流源电路、模拟电子开关组、差分放大电路、A/D 转换电路组成,系统组成框图如图 1 所示。

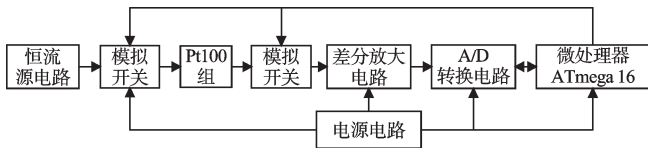


图 1 温度采集系统电路框图

当 Atmega16 选通一组模拟开关时,恒流源产生一个 1 mA 的电流,作用在 Pt100 铂电阻温度传感器和 100 Ω 标准电阻(千分之一精度)上,使温度信号转换成压差信号。产生的压差信号为毫伏级的小信号,因此本研究通过差分放大电路对输入的小信号进行 100 倍放大,最后通过 16 位 A/D 转换器把模拟信号转换成数字信号传输给微处理器进行处理。

双恒流源测温原理图如图 2 所示。输出电压计算公式为:

$$U_o = \beta(U_2 - U_1) = \beta[I_1(r_1 + R_x) - I_2(r_2 + R)] \quad (1)$$

式中: β —差分放大倍数。

当 $I_1 = I_2 = I$, 且 $r_1 = r_2 = r_3$ 时, $U_o = \beta[I(R_x - 100)]$, 消除了引线电阻的影响。

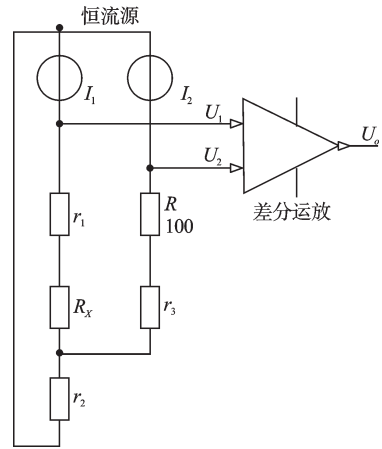


图 2 双恒流源测温原理

r_1, r_2, r_3 —引线电阻,当引线长短一致时,引线电阻大小相等; R_x —Pt100 电阻; R —100 Ω 标准电阻

2 硬件电路设计

2.1 恒流源电路设计

恒流源电路是该系统测温电路的关键部分,其恒流的稳定性以及输出电流的大小对温度检测系统的准确度有很大的影响。对 Pt100 传感器来说,为了减少铂热电阻自热影响带来的误差,当水的温度保持 0 ℃ 时,其激励电流应保证耗散功率不大于 0.1 mW^[7],即在 Pt100 传感器电阻值为 100 Ω 时,流过 Pt100 的电流信号不大于 1 mA,因此该系统中设计了一个能产生稳定 1 mA 电流的恒流源。

双恒流源电路如图 3 左边部分所示,其为实用的电压-电流转换电路^[8]。

其中,输出电压为:

$$U_{out} = \left(1 + \frac{R_{14}}{R_{13}}\right) \left(\frac{R_8}{R_8 + R_{10}} U_{in} + \frac{R_{10}}{R_8 + R_{10}} U_x\right) \quad (2)$$

设 $R_8 = R_{10} = R_{13} = R_{14} = 100 \text{ k}\Omega$, 则:

$$U_{out} = U_{in} + U_x \quad (3)$$

输出电流为:

$$I_x = \frac{U_x - U_{out}}{R_9} = \frac{U_{in}}{R_9} \quad (4)$$

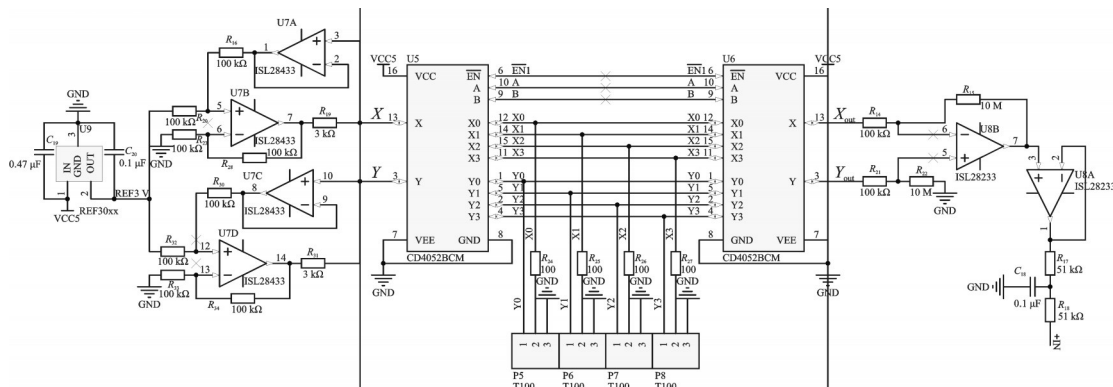


图 3 温度采集调理电路

因此,只要 U_{in} 和 R_0 确定,就可以得到稳定的小电流。

在该系统中,电压基准采用低功率、低漂移的 3 V 精密电压基准芯片 REF3030。双恒流源放大器采用 Intersil 公司的微功耗、零漂移、超低失调电压、低噪的轨对轨 4 通道放大器 ISL28433,且选 R_0 为 1% 精度的 3 k Ω 欧精密电阻,其余 8 个电阻为大量同一批次的精密电阻中选出的阻值接近的 8 个电阻。在 X, Y 端可稳定输出 1 mA 的稳定电流。本研究通过实测得到双恒流源之间的一致性保持在千分之一以内。

2.2 模拟电子开关组电路设计

考虑到信号调理电路的复杂程度,以及多通道一致性,不宜采用多个信号调理电路,该系统采用了模拟电子开关组共用同一恒流源及放大电路的思路。模拟电子开关与 4 路 Pt100 的连接电路如图 3 中间部分所示。

该系统采用 CD4052 作为模拟电子开关,有较小的导通电阻(约为几百欧),对恒流源以及后级放大电路影响可忽略不计。如图 3 所示, A、B、EN 口分别接到 Atmega16 单片机的 3 个 I/O 口。

当 X_0 、 Y_0 通道导通时,双恒流源电流分别通过 100 Ω 标准电阻流入地以及 Pt100 流入地。从而产生 Pt100 温度传感器和标准电阻之间的压差,再通过后级差分放大电路进行信号处理。

2.3 差分放大电路设计

该系统的运算放大器为 ISL28233,其采用斩波稳定的结构技术,实现了非常低的输入偏置电压(8 μ V)、温度漂移电压(0.05 μ V/ $^{\circ}$ C)和噪声电压,其静态电流为 17 μ A,共模抑制比为 125 dB,是一款高稳定性、高可靠性的轨对轨运算放大器。差分放大电路如图 3 右边部分所示。

X_{out} 、 Y_{out} 端在 Pt100 测温范围 0~100 $^{\circ}$ C 内,最大输入压差为 0~38.51 mV。差分放大电路可以对微弱的电压信号进行调理放大 100 倍后得到 0~3.851 V 的电压,再通过后半部起缓冲作用的电压跟随器^[9],经阻容低通滤波器,作为反映当前温度的电压值,传输给后续的 A/D 转换器进行处理。

2.4 A/D 模数转换电路设计

A/D 模数转换电路采用 ADS8320 模数转换器,这是一款 16 位采样模数转换器采用串行 SPI 接口方式,其 SINAD(信号-噪声和失真比)为 84 dB,则:

$$\text{ENOB(有效位数)} = (\text{SINAD} - 1.76) / 6.02$$

可以得出 ENOB 约等于 14 位,与数据手册相符,可以满足该系统精度要求。

A/D 转换电路的电压基准采用 REF3030 同系列的

低功率、低漂移的 4.096 V 精密电压基准芯片 REF3040。

A/D 转换电路如图 4 所示。

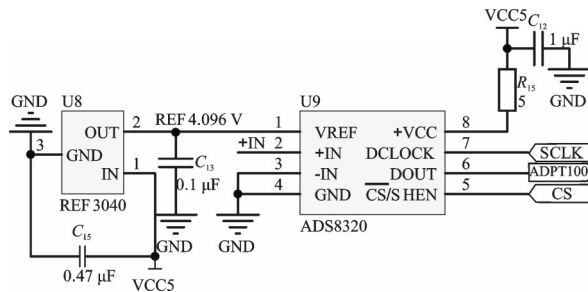


图 4 A/D 转换电路

其中,ADS8320 的 567 引脚接 ATmega16 的 3 个 I/O 口,通过 I/O 口模拟 SPI 时钟信号,实现 A/D 转换器与主控芯片之间的 SPI 通信,完成压差值的采集。

3 软件系统设计

软件系统设计中的主要程序流程图如图 5 所示。

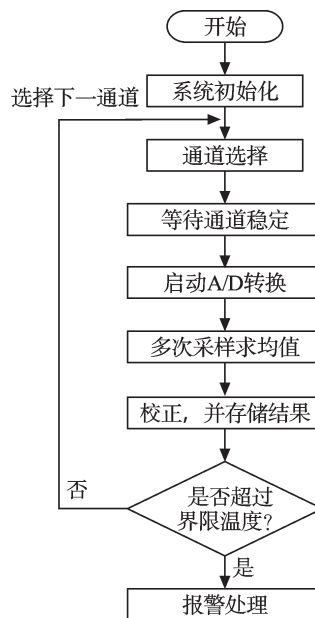


图 5 程序流程图

在该系统中进行的采集数值算法主要采用折半插入排序法^[10]。

插入排序的基本设计思想是:在一个已经排好序的记录子集的基础上,每一步都将下一个待排序的记录有序插入已经排好序的记录子集的合适位置上,直到将所有待排序记录全部插入为止。折半插入排序法对一般排序进行了优化,可以减少一般插入排序过程中比较的次数,对于实时性要求较高的嵌入式系统,可以减少很长的程序运行时间。笔者在本研究中把总排序时间分散(分散到每一次循环中)为对某一个元素的插入排序,这样处理后,在最后一次 A/D 转换结束后的极短时间内,就可以得到排序集合。再对序列中部的

记录集合求平均值,即可得到较准确的A/D转换值。

4 误差分析及实验测试结果

4.1 测试系统精度要求

铂电阻在0~100℃范围测温时,电阻-温度关系式满足下式:

$$R_t = R_0 \times (1 + At + Bt^2) \tag{5}$$

式中: R_t , R_0 —Pt100铂电阻在温度为 t (°C)和0 °C时的电阻值。

$$A = 3.908 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, B = -5.775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}.$$

由式(5)可以推出:

$$\Delta R \approx R_0 \times (A\Delta t + B\Delta t^2) \tag{6}$$

要想使被测的Pt100铂电阻的测量精度达到0.1 °C,即取 $\Delta t = 0.1$ 代入式(6),可求得: $\Delta R \approx 0.039 \text{ } \Omega$ 。

即该系统测得的Pt100铂电阻的阻值精度为0.039 1。则系统的最大相对误差为 $\gamma = 0.039 \text{ } \Omega / 100 = 3.91 \times 10^{-4}$ 。

4.2 误差来源及理论误差计算

整个系统的误差来源包括:恒流源模块误差 γ_1 , Pt100铂电阻引线误差 γ_2 , 模拟电子开关组导通电阻误差 γ_3 , 差分放大电路误差 γ_4 。

4.2.1 恒流源模块误差

恒流源模块误差主要来源于精密电压基准芯片REF3030的误差 γ_{11} 、4通道放大器ISL28433的误差 γ_{12} 和精密电阻 R_9 的误差 γ_{13} 。假设系统工作环境温度变化 $\Delta T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$, REF3030的温漂为 $20 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, 可以算出 $\gamma_{11} = 20 \times 10^{-6} \times 20 / 3.0 = 1.33 \times 10^{-4}$ 。

由于ISL28433输入偏置电流为 180 pA (最大值)、输入失调电流为 10 pA , 则:

$$\gamma_{12} = (180 \times 10^{-12} + 10 \times 10^{-12}) / 1 \times 10^{-3} = 1.9 \times 10^{-7}$$

恒流源电路中的电阻 R_9 为低温漂精密电阻,其温漂值为 $10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$, 可以计算得:

$$\gamma_{13} = 10 \times 10^{-6} \times 20 / 3 \times 10^3 = 6.67 \times 10^{-7}$$

综上,恒流源的误差为:

$$\gamma_1 = \sqrt{\gamma_{11}^2 + \gamma_{12}^2 + \gamma_{13}^2} \approx 1.33 \times 10^{-4}$$

4.2.2 Pt100铂电阻引线误差

该设计中的Pt100铂电阻测温采用双恒流源三线制测量,其内阻及接线情况如图3右下角所示。其中 R_n 为引线线电阻, R_x 为Pt100电阻。因为本研究采用差分放大电路,只要引线长度一致时,引入的引线误差基本可以忽略不计,即 $\gamma_2 \approx 0$ 。

4.2.3 模拟电子开关组导通电阻误差

该系统中的模拟电子开关为CD4052,其导通时的电阻约为几百欧,研究者可以把前级电子开关的导

通电阻看作恒流源电路的负载电阻一部分,对恒流源电流大小无影响。而后级电子开关的导通电阻可以看作放大电路中运放的输入阻抗的一部分,对于高输入阻抗的运放芯片来说可忽略不计,因此两部分的影响都很小,即 $\gamma_3 \approx 0$ 。

4.2.4 差分放大电路误差

差分放大电路的误差主要决定因素来源为ISL28233的输入失调电压 $11 \text{ } \mu\text{V}$ (最大值)和失调电压漂移 $0.05 \text{ } \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (最大值)。假设系统工作环境温度变化 $\Delta T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。可计算出:

$$\gamma_4 = (11 \times 10^{-6} + 0.05 \times 10^{-6} \times 20) / 100 \times 10^{-3} = 1.2 \times 10^{-4}$$

4.2.5 系统采集综合误差

由上述分析结合各部分误差,则可计算出温度采集系统的综合误差为:

$$\gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2 + \gamma_4^2} \approx 1.79 \times 10^{-4}$$

由于计算出的系统误差小于Pt100铂电阻的最大相对误差,该系统的测量精度在理论计算上满足要求。

4.3 实验测试结果

电路板实物如图6所示。

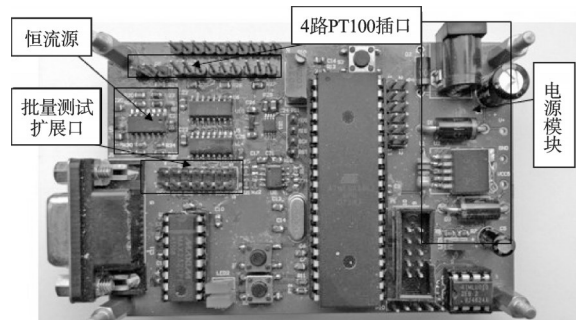


图6 电路板实物图

实验测试恒温槽是宁波东南仪器有限公司生产的热量计检定专用恒温槽,其温度波动度为 $\pm 0.01 \text{ } ^\circ\text{C}/30 \text{ min}$, 温度均匀度为 $0.01 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

温度实测结果如表2所示。

表2 温度实测值

标准温度值 /°C	对应阻值 /Ω	A/D转换电压值 /V	实测温度 /°C	测量误差 /°C
15	105.85	0.588 01	15.078	0.078
25	109.73	0.976 64	25.095	0.095
35	113.61	1.363 94	35.076	0.076
55	121.32	2.129 87	54.946	-0.054
65	125.16	2.513 79	64.943	-0.067
75	128.99	2.900 69	75.044	0.044
85	132.80	3.278 14	84.952	0.048

由表2可知,测试温度值与实际值之间的误差值小于 $\pm 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$, 满足系统精度要求。

(下转第72页)

4 结束语

(1) 本研究采用正交试验设计采集数据,通过响应面法获取设计目标的响应面模型,该方法可以用来准确描述设计变量与设计目标之间的关系。

(2) 本研究以响应面模型替代有限元模型,应用遗传算法进行优化设计,其优化结果与有限元模型结果基本一致。

(3) 在实际应用中,该方法中的边界条件参数尚需实验测定。对于复杂耦合场的多学科优化设计,研究者可以用该方法取代有限元模型进行求解,避免了对有限元软件的二次开发,提高了求解效率。

参考文献(References):

- [1] YANG R J, GU L, THO C H. Multidisciplinary Design Optimization of a Full Vehicle with High Performance Computing [C]//The 42nd AIAA/ASME. ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conference and Exhibit. Seattle: [s.n.], 2001.
- [2] KODIYALAM S, YANG R J, GU L, et al. Multidisciplinary design optimization of a vehicle system in a scalable, high performance computing environment [J]. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 2004, 26 (3-4): 256-263.
- [3] 张 勇, 李光耀, 孙光永, 等. 多学科设计优化在整车轻量化设计中的应用研究[J]. 中国机械工程, 2008, 6(7): 877-881.
- [4] KODIYALAMS, YANG R J, GU L, et al. Multidisciplinary design optimization of a vehicle system in a scalable, high performance computing environment [J]. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 2004, 26(4): 256-263.
- [5] 胡朝辉, 成艾国, 王国春, 等. 多学科优化设计在拼焊板车门轻量化中的应用[J]. 中国机械工程, 2010, 21(4): 495-499.
- [6] 魏璐璐, 左正兴, 向建华. 基于ISIGHT的曲柄连杆机构多学科优化[J]. 机电工程, 2011, 28(12): 1436-1439.
- [7] 许 志, 李 芳. 基于灵敏度分析的发动机连杆优化设计[J]. 机电工程, 2011, 28(9): 1052-1056.
- [8] 宁晓斌, 姜 健, 谢伟东. 基于汽车悬架的多目标优化方法的研究[J]. 机电工程, 2011, 28(2): 165-171.
- [9] 程雪涛, 徐向华, 梁新刚. 温度场与温度梯度场的均匀化[J]. 中国科学(E辑: 技术科学), 2009, 39(10): 1730-1735.
- [10] 乔赫廷, 张永存, 刘书田. 散热结构拓扑优化目标函数的讨论 [J]. 中国机械工程, 2011, 9(22): 1112-1117.
- [11] LIU Hai-lin, WANG Yu-ping, CHENG Yiu-ming. A multi-objective evolutionary algorithm using min-max strategy and sphere coordinate transformation [J]. **Intelligent Automation and Soft Computing**, 2009, 15 (3) : 361-384.
- [12] 王永泉, 陈花玲, 贺学明. 基于遗传算法的静电反馈式微传感器多目标优化[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(11): 1305-1309.
- [13] 饶 江, 胡树根, 宋小文, 等. 汽车悬架优化过程的Pareto最优解[J]. 机电工程, 2010, 27(6): 28-31.

[编辑: 李 辉]

(上接第68页)

5 结束语

本研究设计的多路温度采集系统在未引进模拟开关内阻误差以及无需增加多个调理电路的基础上,实现了在0~100℃范围内的高精度测量,测量误差小于±0.1℃。

另外,该系统在PCB板中间设有扩展插口,研究者可以在扩充CD4052模拟开关组前提下,实现Pt100铂电阻的批量测温,且可应用于铂电阻的配对系统中。

参考文献(References):

- [1] 刘海成. AVR单片机原理及测控工程应用 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2008.
- [2] 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]. 传感器技术学报, 2010, 23(3): 311-314.
- [3] 龚瑞昆, 李静源, 张 冰. 高精度铂电阻测温系统的实现[J]. 仪表技术, 2008(7): 9-10.
- [4] 李素英, 窦真兰, 曾 严. 温度传感器三线制接法的测量误差分析[J]. 电工技术, 2011(7): 52-53.
- [5] 王春霞, 李桂华. 基于MAX1402高精度多路温度测量系统设计[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2009, 3(8): 36-38.
- [6] 高 岩. 基于ARM与CAN总线的多路温度采集系统设计[J]. 西安文理学院学报: 自然科学版, 2009, 12(4): 59-61.
- [7] 中华人民共和国机械工业部. JB/T 8622-1997工业铂热电阻条件及分度表[S]. 中华人民共和国机械工业部, 1997.
- [8] 方益喜, 雷开卓, 屈健康, 等. 基于PT1000的高精度温度测量系统[J]. 电子设计工程, 2010, 18(10): 79-82.
- [9] 华成英. 模拟电子技术基础教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [10] 魏振钢. 数据结构 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.

[编辑: 李 辉]