

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.019

高精度土壤温度原位测量系统*

王福顺^{1,2} 刘永福¹ 孙小华³ 蔡振江² 王树涛¹

(1. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071000; 2. 河北农业大学机电工程学院, 保定 071000;

3. 河北软件职业技术学院数字传媒系, 保定 071000)

【摘要】 为分析土壤温度对地层水热参数的影响,以热电偶为测温传感器,设计了单片机控制的高精度土温测量系统。从硬件、软件曲线拟合算法等方面进行了研究,温度采集采用电桥法,并用最小二乘法对采样值与温度进行分段拟合,描绘出采样值与温度关系曲线,对测量误差进行了修正和补偿。结果表明:系统的实验测量绝对误差低于 0.02°C 。

关键词: 土壤温度 高精度 测量系统 最小二乘法 分段拟合

中图分类号: TP274⁺.5; S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)11-0102-05

High-accuracy Soil Temperatures in Situ Measurement System

Wang Fushun^{1,2} Liu Yongfu¹ Sun Xiaohua³ Cai Zhenjiang² Wang Shutao¹

(1. College of Information Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, China

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China

3. Department of Digital Transmit, Hebei Software Institute, Baoding 071000, China)

Abstract

High-accuracy measuring system of soil temperatures was designed. Thermocouple was used as temperature sensors. Under the control of the micro-controller, high-accuracy and automatic detection was achieved to analyze the impact of soil temperature on water and heat of soil. The system was studied from three aspects, such as hardware circuit, software and curve fitting. By using the electric bridge method for temperature acquisition, least squares method was used to piecewise fit samples values and temperature. Their relationship curve was described. The measurement error was compensated and corrected to ensure the measurement precision. The result showed that the experimental absolute error was less than 0.02°C .

Key words Soil temperature, High-accuracy, Measurement system, Least squares method, Piecewise fit

引言

在地温资源开发过程中,掌握地层的水热参数是十分重要的,地层热参数包括地层的热导率、比热容、热扩散率等参数,地层水参数包括含水率、渗透速率等,而这些参数获取,都与土壤温度的精密测量有关。特别是测量土壤中的微流速时,对温度测量精度的要求更高^[1]。

土壤温度的传统测量方法是温度表法,采用温度表法测量土壤温度,由于要人工进行操作,测量时不但需要温度表的校正,难以进行连续的监测,且在测量精度上也难以保证;现在常用方法是采用专用的热敏电阻、热电偶或其他温度传感器进行温度测量,它的优点在于可提供温度数据显示、记录、存储等的信号输出,便于设计便携式温度测量仪器,测量精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,目前国内外大多数土壤参数测量设

收稿日期:2012-03-20 修回日期:2012-04-06

* 河北省自然科学基金资助项目(D2010000795)、河北省农村信息化工程中心资助项目和保定市科学技术研究与发展计划支持项目

作者简介:王福顺,讲师,博士生,主要从事计算机智能检测与控制研究,E-mail: wangfushun@yahoo.cn

通讯作者:蔡振江,教授,博士生导师,主要从事智能检测与控制 and 图像处理研究,E-mail: caj65@163.com

备都采用这种方法^[2]。

本文设计高精度土温测量系统,以单片机为主控器件实现温度自动检测,从硬件、软件和曲线拟合算法方面进行研究,以实现土壤温度的高精度测量。

1 系统设计方案

在以铂电阻为检测元件的测温系统中,若要进一步提高其测量精度,应注意两个方面:一是在硬件电路方面,对铂电阻后级的信号调理电路应有很高的要求;另一方面,在测温系统的设计中,由于忽略了同一规格各检测元件的个体差异,从而限制了测量精度的提高^[3]。本系统以铂热电阻 Pt100A 为测温对象,首先给出一种能够满足高精度测量需要的信号检测电路,然后,针对某一具体的铂电阻,利用曲线拟合分析方法,得到适用于各温度段的 $D-t$ 测温多项式(D 为 A/D 采样值, t 为温度)。这种以 D 、 t 为参数的拟合方法,补偿了信号从铂电阻到 A/D 转换过程中各个中间环节所产生的偏差,使得测温更加精确^[4]。

图 1 为本系统测温方案,电桥在工作电源的激励下,由传感器将被测温度转换为电阻变化量 ΔR_0 ,电桥的输出量为两桥臂的电压差 $\Delta U'$,经过信号放大电路后获得合适的电信号,再经有源滤波滤除干扰信号后,通过 A/D 转换电路将模拟信号 ΔU 转换成数字信号 D ,送显示器显示,并将数据传送至上位机进行分析。为提高系统稳定性及减小测量误差,要使通过电桥各臂的电流保持恒定,驱动电源采用恒流源。

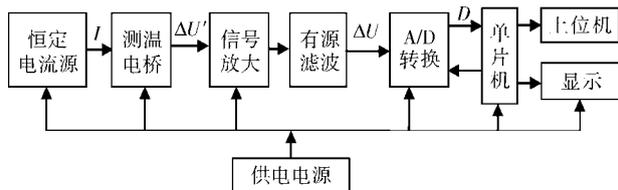


图 1 恒流源驱动电桥高精度测温方案

Fig.1 High precision temperature measurement of constant current source drive electric bridge

2 硬件电路设计

铂热电阻的测量范围大,稳定性和复显性好,一次标定,长期使用^[5]。恒流源法测量特性严格地依据铂电阻本身的特性,数学模型清晰。只要软件修正得当,可以获得较高的测量精度,恒流源法存在的引线电阻可采用三线制将其抵消^[6]。系统硬件电路如图 2 所示。

硬件电路主要由恒流源驱动电桥、放大电路、有源滤波器、16 位低功耗 A/D 转换器、低功耗控制器

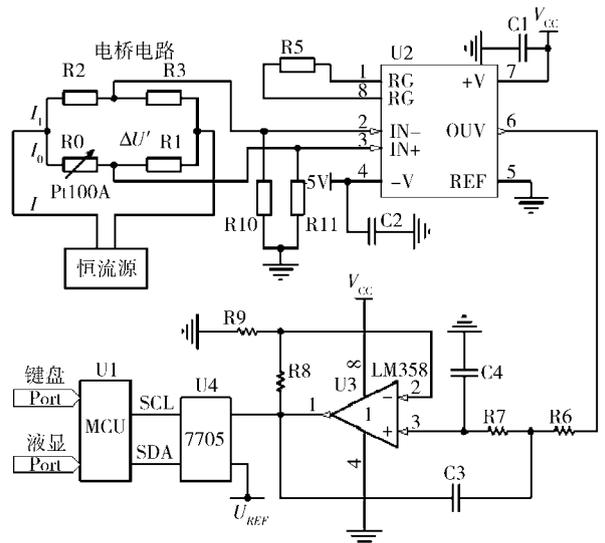


图 2 系统硬件电路图

Fig.2 Hardware circuit diagram

MSP430F4X、液晶显示器、矩阵键盘等组成,低功耗元件更适合野外长时间测量。

传感器选用的是符合 IEC751 标准的电阻温度系数为 $0.003851/^\circ\text{C}$ 的 Pt100A (0°C 时电阻值为 $100\ \Omega$,尺寸 $1.6\ \text{mm} \times 3.2\ \text{mm} \times 1.0\ \text{mm}$) 铂电阻温度传感器,此种传感器体积小、精度高、稳定好、响应速度快、性能稳定可靠。测量范围为 $-50 \sim 80^\circ\text{C}$,电阻变化率为 $(0.003851 \pm 0.000004)\ \Omega/^\circ\text{C}$ 。

元件的温度-电阻特性表示为

$$R_t = R_0 [1 + at - bt^2 - ct^3(t - 100)] \quad (1)$$

式中 R_t ——在温度 t 时的电阻

R_0 ——在 0°C 时的电阻 t ——温度, $^\circ\text{C}$

a 、 b 、 c 为系数,取值如表 1 所示,传感器的部分温度时电阻如表 2 所示。

表 1 Pt100A 的 $t-R$ 特性方程系数

Tab.1 $t-R$ characteristic equation coefficient of type Pt100A

温度条件	a	b	c
$t < 0^\circ\text{C}$	3.90802×10^{-3}	5.80195×10^{-7}	4.27351×10^{-12}
$t \geq 0^\circ\text{C}$	3.90802×10^{-3}	5.80195×10^{-7}	0

表 2 常用部分温度时电阻

Tab.2 Temperature-resistance commonly used

温度/ $^\circ\text{C}$	50	40	30	20	10	0	-10
电阻/ Ω	119.295	115.539	111.672	107.793	103.902	100.000	98.003

恒流源的选择要求输出稳定,漂移要小,这是保证测量精度的最关键因素。恒流源电流过大铂电阻本身要发热,影响测量精度,过小则电压信号较弱,易受干扰^[7]。实验室采用 Agilent E3631A 作为实验用恒流源,选 $5\ \text{mA}$ 。

R1 ~ R5 选用高精金属膜电阻器 UPSC 系列。标称电阻误差范围 $\pm 0.01\%$, 电阻温度系数 $\pm 2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 工作温度范围 $-10 \sim 70^{\circ}\text{C}$; 额定功率 0.2 W 。具备高稳定、高精度、低温度系数的技术特性, 适用于精密电子仪器仪表的模拟电子线路。

U2 为单芯片集成精密测量放大器 INA114, INA114 只需一个外部电阻 R5 就可以设置 1 至 10 000 之间的任意增益值, 公式为: $K = 1 + 50/R_5$ 。公式中的“50”是两个内部反馈电阻的和^[8], R_5 表示 R5 的阻值。这两个金属膜的电阻已经用激光调整到精确的值。

U3 为高阶低通滤波器, 通频带内的信号增益为 0 dB, 对高于截止频率的信号增益呈 -80 dB 衰减, 由于系统所测温度为变化较缓慢的信号, 将滤波器的截止频率设置在 40 Hz 左右, 可有效滤除系统供电电源的工频干扰。

美国 AD 公司的 AD7705 是高分辨率 A/D 转换器, 可实现 16 位无丢失代码性能, 0.003% 的非线性度; 双通道全差分模拟输入, 可接受直接来自传感器的低电平输入信号; 包括自校准和系统校准选项, 以消除器件本身或系统的增益和偏移误差^[9]。

3 硬件电路的测量精度分析

硬件电路的精度是整个系统精度的基础和保证, 它将铂电阻的变化近似线性地转换为电压, 再经过 A/D 转换为数字量进行采集。这样, 对于每一个温度 t 都会对应于一个数字电压信号 D 。然后寻求温度和该温度点所对应的经 A/D 转换后的电压信号之间的关系。

3.1 测试系统的热-电转换

桥臂输出电压计算公式为

$$\Delta U' = I_1 R_3 - I_0 R_1 = \frac{R_0 R_3 - R_1 R_2}{R_0 + R_1 + R_2 + R_3} I \quad (2)$$

式中 $\Delta U'$ ——桥臂输出电压

I ——恒流源输出电流

R_1, R_2, R_3 ——桥臂电阻

若 $R_0 R_3 = R_1 R_2$, 则 $\Delta U' = 0$, 电桥达到平衡。

在系统工作时, 传感器阻值发生变化。在初始为平衡的条件下, 假设温度升高 Δt , 此时电阻为 $R_0 + \Delta R_0$, 则

$$\Delta U' = \frac{(R_0 + \Delta R_0) R_3 - R_1 R_2}{R_0 + \Delta R_0 + R_1 + R_2 + R_3} I = \frac{\frac{\Delta R_0 R_3}{R_0 R_3}}{\frac{R_0}{R_0 R_3} + \frac{\Delta R_0}{R_0 R_3} + \frac{R_1}{R_1 R_2} + \frac{R_2}{R_1 R_2} + \frac{R_3}{R_0 R_3}} I =$$

$$\frac{\frac{\Delta R_0}{R_0}}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{\Delta R_0}{R_0}} I \quad (3)$$

测试系统中, 放大器输出电压计算公式为

$$\Delta U = K \Delta U' \quad (4)$$

设 A/D 转换后的数字量 D 为 n 位精度, 采用的精密电压源电压值为 U_{REF} , 则

$$D = \frac{\Delta U}{U_{REF}} = \frac{\Delta U}{\Delta U_{REF}} = \frac{KI \Delta R_0}{4 \Delta U_{REF}} \quad (5)$$

式中 ΔU_{REF} ——A/D 转换器的电压精度

由式(5)可看出提高 I 、选择高阻桥臂电阻、增大 K , 减小 U_{REF} (选择精密低参考电压和高位 A/D), 可提高转换灵敏度。

3.2 系统关键量的选取

根据一般土壤温度检测需要, 本系统拟精确测量的土壤温度范围为 $0 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 。参考表 2 可知 ΔR_0 最大约 20Ω , 恒流源 $I = 5 \times 10^{-3} \text{ A}$, 采样信号标定区间 $[0 \text{ V}, 5 \text{ V}]$, 结合式(3)、(4), 取 $K = 1 + 50/R_5 = 201$, 即 $R_5 = 0.25 \text{ k}\Omega$; $U_{REF} = 5 \text{ V}$, $n = 16$, 则由式(5)可推出

$$D = 2^{16} \times \frac{KI \Delta U'}{U_{REF}} = 2^{16} \times 50.25 \times 10^{-3} \Delta R_0 \quad (6)$$

3.3 硬件误差分析

测量结果的误差主要来源于恒流源的精度误差、参考电阻 R1 ~ R5 的精度、放大器和 A/D 转换器的输出误差。为了达到要求的测量精度 ($\pm 0.01^{\circ}\text{C}$), 实验中采用 Agilent E3631A 三路输出可编程 DC 电源作为供电电源(恒流/恒压源), 其可靠性能符合最严格的工程要求, 从源头上为高精度的测量提供基础。参考电阻 R1 ~ R5 都是采用定制的高精度电阻, 这种电阻具有 $\pm 0.01\%$ 的初始精度, 其电阻温漂优于 $2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。放大器增益 $K = 200$ 左右时, 其增益误差 $\pm 0.01\%$, 增益温漂 $\pm 2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, 非线性度在 $\pm 0.0001\%$ 范围内。16 位无丢失代码性能的 AD7705, 其非线性度优于 0.003% , 适用于本系统的宽范围、低频率信号转换, 并且还可以通过单片机对其进行校准, 从而减小非线性误差。实际使用中铂电阻 0°C 值标定并存储于单片机控制器中, 计算时便于修正以提高整个系统的精度。从以上分析可知, 整个硬件电路各环节的精度误差之和在测量误差范围内, 为下一步的软件拟合提供了保障。

4 数据采集与处理

由于要求系统的测温精度高(拟达到 0.01°C),

所以必须有更高精度的标定设备和严格的实验环境,以保证实验的可行性、可信性。

4.1 实验环境

系统的测试是在 0 ~ 50℃ 恒温槽内进行的,采用 GT-11 高精密度数字测量仪为标定设备。GT-11 高精密度测量仪是一款高精度数字显示仪表,可用于测量多种类型的铂电阻温度传感器的指标,温度的显示是以电阻值经由 Alpha 参数的演算得来的,也可由使用者输入特定的线性表来演算。双铂电阻温度计探头的 GT-11 用于现场温度的校验,可用来计量检定水槽的温场误差测量,准确度可达 0.003℃ 以内,分辨能力 0.001℃,并具有 USB 计算机连接接口,可提供通讯协议,方便参与计算机计算。

4.2 数据采集

由于传感器的电阻、温度并非一次线性关系,再加上运放电路、滤波电路、温漂以及 A/D 的非线性

等,使得理论式不能得到足够的精度。为了弥补铂电阻传感器到 A/D 转换各个环节的误差,采用采样值-温度曲线拟合,即求 A/D 转换得到的采样值 D 与温度 t 之间的关系式,以对铂电阻、信号调理及 A/D 转换电路进行整体补偿。得到 $D-t$ 关系曲线后,只要读取结果 D ,就可得到相应的温度。

考虑到本系统侧重精度而对速度的要求不是很严格,所以采样的周期取最大值以保证所采信号的稳定性,同一温度采集 18 个点,然后再进行数字滤波处理(A/D 转换,取得的数据排序后去掉一个最大值和一个最小值,然后将剩余的数据求平均值),由此基本上可以剔除测量过程中由于干扰等因素引起的误差。

以恒温槽作为温度场,在高精密测温仪辅助下,可测得 0 ~ 50℃ 温度数据,由于篇幅有限只取 20 ~ 30℃ 的部分数据,如表 3 所示。

表 3 20 ~ 30℃ 温度段部分数据

Tab. 3 Part data in temperature period of 20 ~ 30℃

实际温度/℃	同一点 18 次采样值($D_1 \sim D_{18}$)	数字滤波后 D 值	式(6)理论 D 值	温度测量值 /℃	系统误差 /℃
20.0	25 688 25 671 25 634 25 671 25 658 25 666 25 679 25 646 25 671 25 686 25 636 25 661 25 680 25 657 25 634 25 639 25 687 25 636 26 440 26 435 26 408 26 453 26 430 26 438 26 435 26 405 26 435	25 661.13	25 663.23	19.992	-0.008 03
20.6	26 431 26 425 26 403 26 460 26 410 26 428 26 408 26 452 26 403 26 958 26 957 26 941 26 962 26 936 26 959 26 949 26 916 26 965	26 427.25	26 430.77	20.587	-0.013 41
21.0	26 970 26 933 26 942 26 964 26 940 26 919 26 925 26 972 26 941 27 202 27 215 27 188 27 222 27 181 27 201 27 220 27 177 27 205	26 947.56	26 942.38	21.020	0.019 77
21.2	27 217 27 189 27 176 27 208 27 184 27 168 27 177 27 225 27 172	27 195.88	27 198.16	21.191	-0.008 73
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
29.8	38 198 38 196 38 175 38 201 38 171 38 189 38 202 38 179 38 212 38 208 38 171 38 169 38 207 38 174 38 158 38 158 38 206 38 165 38 462 38 446 38 409 38 438 38 420 38 463 38 458 38 408 38 447	38 185.56	38 182.41	29.812	0.012 01
30.0	38 449 38 424 38 410 38 450 38 409 38 410 38 425 38 454 38 434	38 434.06	38 437.52	29.987	-0.013 21

4.3 数据仿真分析

采用多项式拟合,使用最小二乘法,其原理是:利用一组实测数据(x_i, y_i) ($i = 1, 2, \dots, N$),构造一个近似的函数 $y = f(x)$ 。由 $f(x)$ 可以计算非实测点的 y 值或确定实测点(x, y) 之间的趋势,其函数符合以下条件:选择拟合曲线 $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n$,待求参数 $n+1$ 个;拟合曲线不一定通过所有的点,但它与实测点的误差为最小。符合以上两个条件的函数就能最好地拟合原数据组^[10]。

由于本系统实验数据的采集密度很大,如果直接对所有数据进行拟合,不仅计算量大,而且还会降低曲线在每一个温度段的精度。所以,可以通过采取每 10℃ 左右用一个多项式进行分段拟合,以此来保证拟合曲线更逼近实际温度曲线。

拟合函数形式为

$$t = a_0 + a_1D + a_2D^2 + \dots + a_mD^m \quad (7)$$

式中 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_m$ ——待求系数

本系统中选取的铂热电阻(Pt100A),其电阻随温度变化的规律满足式(1)。由式(1)可以看出, R_t 函数是三次多项式,为了求得更高精度的表达式,数据处理中采用三次多项式来拟合 $D-t$ 关系曲线。将同一温度段中测得的(D_i, t_i) ($i = 1, 2, \dots, n$, n 为采样数据个数)代入式(7)中,取 $m = 3$,则有

$$\begin{bmatrix} 1 & D_1 & D_1^2 & D_1^3 \\ 1 & D_2 & D_2^2 & D_2^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & D_n & D_n^2 & D_n^3 \end{bmatrix} [a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3]^T = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_n]^T \quad (8)$$

即: $\mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{t}$ 。用最小二乘法求解以上矛盾方程, 即求取一组 $\boldsymbol{\alpha}$, 使得总平方误差取 S 平方和作为目标函数, 并对 $\boldsymbol{\alpha}$ 求偏导数, 可得到最小误差, 即 $S^2 = \|\mathbf{t} - \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha}\|^2$ 的值最小。故有

$$\frac{\partial S^2}{\partial \boldsymbol{\alpha}} = -2\mathbf{A}^T \mathbf{t} + 2\mathbf{A}^T \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha} = 0 \quad (9)$$

\mathbf{A} 、 \mathbf{t} 已知, 由式(9)求解出向量 $\boldsymbol{\alpha}$, 也就确定了拟合曲线的多项式系数 a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 。

Matlab 中提供了基本的曲线拟合函数, 多项式函数拟合形式为 $\mathbf{P} = \text{polyfit}(\mathbf{xdata}, \mathbf{ydata}, n)$ 。式中 n 表示多项式的最高阶数; \mathbf{xdata} 、 \mathbf{ydata} 为将要拟合的数据, 表示已知的输入、输出矢量, 它们是用数组的方式输入的; 输出 \mathbf{P} 是一个多项式系数的行向量。

曲线拟合出来以后, 又用多项测试函数 polyval 进行测试, 其格式为 $\mathbf{y} = \text{polyval}(\mathbf{P}, \mathbf{x})$ 。式中 \mathbf{P} 为多项式, \mathbf{x} 为向量或矩阵。 polyval 函数分别把矩阵的每一元素代入多项式求值。为了直观反映曲线函数, 用函数 $\text{plot}(x, y)$ 把曲线呈现出来^[11]。取 $n = 3$ 来对 20 ~ 30℃ 的曲线进行拟合, 运行后结果如图 3 所示。得到 $D - t$ 的拟合曲线表达式为

$$t(D_i) = 1.9511 \times 10^{-15} D_i^3 - 1.0186 \times 10^{-10} D_i^2 + 0.000783 D_i - 0.0657 \quad (10)$$

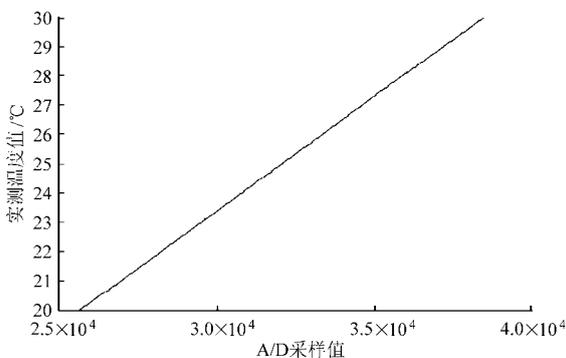


图 3 20 ~ 30℃ 区间温度拟合曲线

Fig. 3 Temperature fitting curve in temperature period of 20 ~ 30℃

4.4 系统误差分析

为了更直观地观察误差情况, 将拟合前的误差

数据进行可视化处理, 得到温度误差分布图, 如图 4 所示。再将数据采集阶段采样点的 A/D 转换值 D_i 代入所求得的式(10)中, 计算出对应的拟合温度, 求与实际温度之差, 得到对应温度点的偏差。图 5 为拟合后 20 ~ 30℃ 区间段的误差分布图。

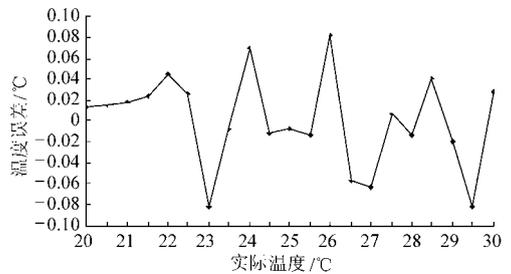


图 4 拟合前 20 ~ 30℃ 误差分布曲线

Fig. 4 Error distribution curve before fitting

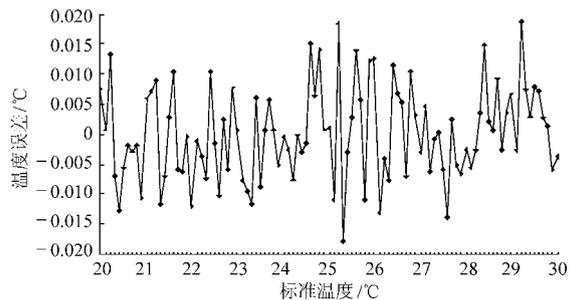


图 5 拟合后 20 ~ 30℃ 误差分布曲线

Fig. 5 Error distribution curve in temperature period of 20 ~ 30℃ after fitting

由图 4、图 5 可知, 拟合后比拟合前的精度明显提高。从图 5 上可以看出, 最大绝对误差出现在 25.2℃ 和 25.4℃ 左右, 但不超过 0.02℃。

5 结束语

通过采用高精度电流源驱动测温电桥, 并为放大、滤波和 A/D 提供电压, 有效消除了参考基准不稳定产生的误差, 从硬件上保证了温度检测的高精密性。利用最小二乘法对 $D - t$ 关系进行分段曲线拟合, 在一定程度上降低了由于铂电阻的非线性、信号调理环节及 A/D 转换失调与漂移等中间环节的误差, 大大提高了温度测量的稳定性和精度, 使得系统最大测量绝对误差低于 0.02℃。

参 考 文 献

- 张旭升, 赵百通, 李英. 土壤温度测试仪的研究[J]. 农业装备技术, 2003(6): 32 ~ 36.
- 杨永军. 温度测量计算现状和发展概述[J]. 计测技术, 2009, 29(4): 62 ~ 65.
- 梁瑞林. 传感器实用电路设计与制作[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- 杨永竹. 铂电阻高精度非线性校正及其在智能仪表中的实现[J]. 仪表技术与传感器, 2000(8): 44 ~ 46.
Yang Yongzhu. Linear compensation for platinum resistance thermometers with high accuracy and its realization in intelligent instruments[J]. Instrument Technique and Sensor, 2008(8): 44 ~ 46. (in Chinese)
- 陈振林, 孙中泉. 高精度温度测量电路非线性补偿研究[J]. 计量技术, 2006(6): 17 ~ 19.

- 11 Lindstrom M J, Nelson W W, Schumacher T E. Quantifying tillage erosion rates due to moldboard plowing [J]. *Soil Tillage Research*, 1992, 24(3):243 ~ 255.
- 12 Pierson F B, Mulla D J. Aggregate stability in the Palouse region of Washington: effect of landscape position [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(5):1 407 ~ 1 412.
- 13 Malo D D, Worcester B K, Cassel D K, et al. Soil-landscape relationships in a closed drainage system [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1974, 38(5): 813 ~ 818.
- 14 Chi B L, Bing C S, Walley F, et al. Topographic indices and yield variability in a rolling landscape of western Canada [J]. *Pedosphere*, 2009, 19(3):362 ~ 370.
- 15 余玲, 王彦荣, 毛玉林, 等. 黄土高原地形对苜蓿种子产量和质量的影响 [J]. *草业学报*, 2002, 11(4):62 ~ 67.
Yu Ling, Wang Yanrong, Mao Yulin, et al. Effect of topography on seed yield and quality of alfalfa grown in the Loess Plateau [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2002, 11(4):62 ~ 67. (in Chinese)
- 16 Gee G W, Bauder J W. Particle-size analysis [M] // Klute A. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods (SSSA. book series No. 5.)*. Madison, W I: ASA and SSSA, 1986: 383 ~ 411.
- 17 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- 18 汤国安, 杨昕. Arc GIS 地理信息系统空间分析实验教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- 19 陈树人, 肖伟中, 朱云开, 等. 土壤养分和小麦产量空间变异性与相关性分析 [J]. *农业机械学报*, 2008, 39(10): 140 ~ 143.
Chen Shuren, Xiao Weizhong, Zhu Yunkai, et al. Spatial variability and correlation of soil nutrient and wheat yield [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(10):140 ~ 143. (in Chinese)
- 20 刘继龙, 马孝义, 付强, 等. 不同土层土壤特性空间变异性关系的联合多重分形研究 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(5):37 ~ 42.
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Fu Qiang, et al. Joint multiracial of relationship between spatial variability of soil properties in different soil layers [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(5):37 ~ 42. (in Chinese)
- 21 任鑫, 李毅, 李敏, 等. 次生盐渍土垂向剖面斥水性及其与理化性质关系 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(3):58 ~ 64, 79.
Ren Xin, Li Yi, Li Min, et al. Relationship between soil water repellency and soil physical chemical properties for vertical profiles in secondary saline field [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(3):58 ~ 64, 79. (in Chinese)
- 22 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- 23 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 中国灌溉水粮食生产率及其时空变异 [J]. *排灌机械工程学报*, 2012, 30(3):356 ~ 361.
Cao Xinchun, Wu Pute, Wang Yubao, et al. Spatial and temporal variation of crop water productivity in China [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(3):356 ~ 361. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 106 页)

- 6 乔晓军, 何秀红. 多点土壤温度测量系统的设计与实现 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2006, 37(3):278 ~ 281.  
Qiao Xiaojun, He Xiuhong. Design and implement of multi-point soil temperature measurement system [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2006, 37(3): 278 ~ 281. (in Chinese)
- 7 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, 2007.  
Xue Qinghua. Research on high-accuracy multi-channel temperature measurement technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- 8 刘利锋. 单片精密仪器仪表放大器应用电路 [J]. *国外电子测量技术*, 2003, 22(1):29 ~ 30.  
Liu Lifeng. Application of the precise instrument amplifier IC [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2003, 22(1): 29 ~ 30. (in Chinese)
- 9 陈勇钢, 吴伯农. AD7705 高精度数据采集的实现 [J]. *国外电子测量技术*, 2006, 25(1):38 ~ 40.  
Chen Yonggang, Wu Bainong. Implementation of high precision data acquisition based on AD7705 [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2006, 25(1): 38 ~ 40. (in Chinese)
- 10 尚玉沛, 石林锁, 张振仁. 最小二乘法在高精度温度测量中的应用 [J]. *传感器技术*, 2000, 19(1):47 ~ 48.  
Shang Yupei, Shi Linsuo, Zhang Zhenren. Application of least square method in temperature measurement with high accuracy [J]. *Sensor Technology*, 2000, 19(1): 47 ~ 48. (in Chinese)
- 11 姜健飞, 胡良剑, 唐俭. 数值分析及其 MATLAB 实验 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.