

文章编号:1005-0523(2014)01-0083-06

基于AD5933的32通道岩土水分测量仪的研制

刘 亮,伍群芳,赖建英,刁心宏,彭 皓

(华东交通大学电气工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:基于将岩土水分转化成电信号测量的原理,研制出了一种以STM32为控制核心,以阻抗转换芯片AD5933为测量核心的32通道岩土介质水分测试仪系统。系统具有自动测量,自动校准,支持USB通讯等功能。测量实验表明,系统具有稳定可靠,测量精度高,体积小、低成本、操作简单等优点,具有很好的工程应用价值。

关键词:岩土水分;阻抗测量仪;STM32;AD5933

中图分类号:TM464

文献标志码:A

水分(含水率)是影响岩土类介质的力学性质的最重要因素之一,也是土工试验、工程实践和科学研究中的重要测试指标^[1-2]。目前对于水分测量的方法主要有烘干法、中子衰减法、张力计法、近红外线法以及介电常数法等等^[3-4]。但是烘干法用时长,中子衰减法潜在危害大,张力计法对测试环境要求高,近红外反射法受土壤表面水分孔隙情况的影响等。而岩体介质一般水分含量分布不均匀,处于非饱和状态,会形成一个湿度场,对其测量要求要具有响应速度快,线性好,环境适用性好,测试操作简单,成本低等特点。介电常数法具有快速便捷,准确可靠,测量简单等优点,因此该方法十分适合用于岩土介质水分的测量。文献^[5]研制了一种土壤含水率测量仪,但是由于测量传感器主要表现为电容效应,采用分压法测量交流阻抗时,恒压激励源对电容有充电作用且会改变其本身的电容值,从而影响了测量含水率的精度,另外其测量通道单一,可选频率少,结构比较复杂,这远远不能满足实际工程中对岩土水分测量的要求。

本文研制出了一种基于STM32为控制核心,以阻抗转换芯片AD5933为测量核心岩土介质水分测试仪系统,如图1所示。该测试仪具有32同时测量通道,自动测量与校准,支持USB通讯与计算机数据存储功能,另外,其具有测量精度高,结构简单,体积小,成本低等特点。

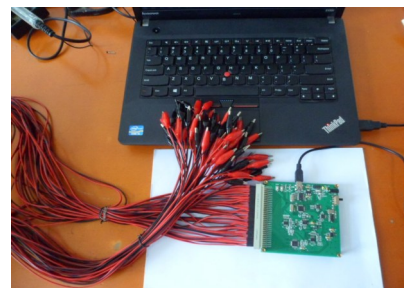


图1 岩土水分测量仪

Fig.1 Soil moisture meter

1 测量原理与系统结构

介电常数法测量岩土含水量的基本原理是采用外部交流激励源激励水分测量传感器从而得到传感

收稿日期:2013-10-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51168014);江西省研究生创新资金项目(YC2012-S077)

作者简介:刘亮(1989—),男,硕士研究生,研究方向为行波故障测距。

器的交流阻抗值,再利用文献^[6]的方法找出交流阻抗值与含水量的一一对应关系从而得到岩土含水量。本文采用AD5933阻抗转换芯片来测量水分测量传感器的交流阻抗值,其基本测量原理图如图2所示,图中 V_{IN} 为AD5933内部DDS所产生的幅值频率均可调的正弦波; R_{FB} 为外接反馈电阻; Z_X 为被测未知阻抗; V_{OUT} 为AD5933内部ADC的输入端。其结构为利用一个运算放大器接成电压并联负反馈结构。通过推导可得

$$Z_X = -\frac{V_{IN}}{V_{OUT}} R_{FB} \quad (1)$$

在以上测量原理的基础上设计了系统的整体结构,整个系统的结构如图3所示。系统由阻抗转换芯片AD5933、微控制器STM32、外围电路、系统电源等组成。反馈电阻网络选择电路、标定电阻网络选择电路、USB通信电路、时钟分频电路等组成外围电路,辅助系统实现阻抗自动测量功能。系统由上位机PC通过USB总线发送相应控制命令。通过PC应用软件将扫描频率起点、扫描点数和频率增量步长设置好,经USB总线传输至下位机(STM32),下位机解析相应的命令后转换成对AD5933的控制指令,完成AD5933的相应配置操作。另外,STM32经I²C接口与AD5933芯片通信,AD5933阻抗转换完成后通过I²C接口向微控制器STM32传送测量到的阻抗实部 R 和虚部 I 数据,数据经微控制器的处理和计算,得到的阻抗通过USB传输至上位机存储和图形显示。其中AD5933的时钟由具有高稳定度、低漂移的外部有源晶振分频提供,分频电路参考文献^[7-8]的设计。

2 硬件设计

测量仪硬件电路如图4所示。在 $Z_1 \sim Z_{32}$ 端子接入待测阻抗,32路模拟开关ADG732(U4)经微控制器控制 $A_4 A_3 A_2 A_1 A_0$ 选择待测阻抗通道。在 $R_{F1} \sim R_{F8}$ 端子接入电流电压转换电阻,微控制器控制8路模拟开关ADG849(U5)的 $F_2 F_1 F_0$ 经行反馈电阻的选择。在 $R_{C1} \sim R_{C8}$ 端子接入标定电阻,微控制器控制8路模拟开关ADG849(U3)的 $B_2 B_1 B_0$ 进行标定电阻的选择。系统处于标定状态时,微控制器使ADG849(U2)单刀双掷开关切换至 S_1 ,正常测量时开关切换至 S_2 。通过对微控制器编程实现系统自动标定、档位的自动切换及通道阻抗扫描。

反馈电阻网络、标定电阻网络及待测电阻网络都是通过使用多路模拟开关进行自动切换接入系统的。由于模拟开关将引入导通电阻(R_{on})以及寄生电容(C_p),为了提高测量精度,减少模拟开关导通电阻以及寄生电容的影响,系统采用的都是具有超低导通电阻、高带宽、开关速度快的模拟开关,其中导通电阻

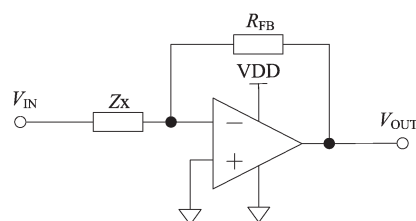


图2 阻抗测量原理图

Fig.2 Schematic diagram of impedance measurement

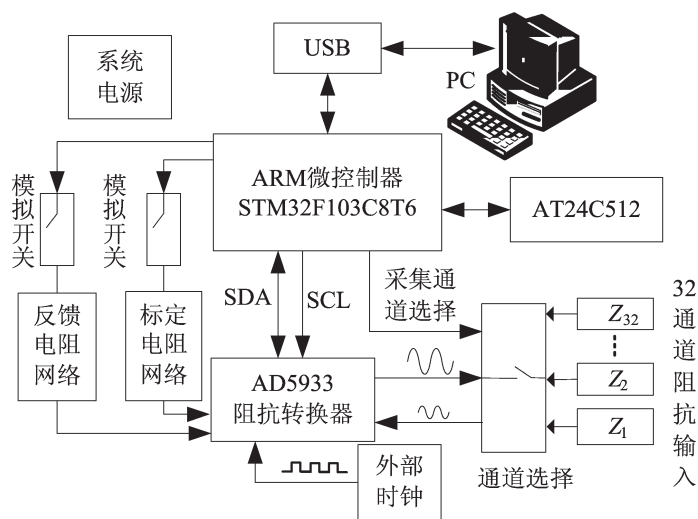


图3 系统结构框图

Fig.3 System structure diagram

都小于 $4\ \Omega$ 。

图4中AD5933 V_{OUT} 引脚输出激励信号先通过高通滤波器并重新偏压至 $VDD/2$ (R_1, R_2 分压, 其中 $R_1=R_2$), 之后利用一个超低输出阻抗放大器(U1)进行缓冲。在外部使用U6完成I-V转换后信号返回至AD5933接收引脚 V_{IN} 。外围电路不仅消除了AD5933芯片自身的一些限制, 而且提高了阻抗测量结果的精度和准确度。

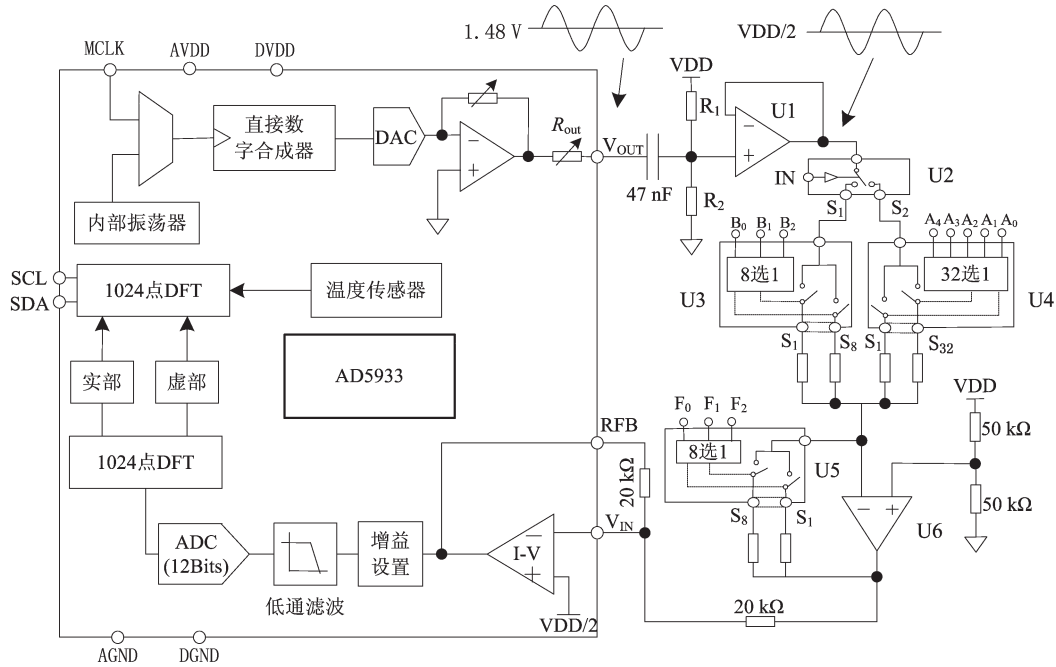


图4 硬件电路

Fig.4 Hardware circuit diagram

3 软件设计

3.1 测量软件设计

由于AD5933内部DFT返回在每个特定频率下得到的实部数据 R 和虚部数据 I 。根据公式(2)和(3)可计算出阻抗的模值 A 和相位 φ 。

$$A = \sqrt{R^2 + I^2} \quad (2)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I}{R}\right) \quad (3)$$

式(2)得到的模值 A 并非阻抗值, 要获得实际阻抗值还需要乘以一个校准系数, 称之为增益系数 G , 增益系数由已知的标定电阻得到。如图4, 通过微控制器 I/O 口控制 U2 的 IN 引脚, 使其切换至 S_1 标定状态, 同时控制模拟开关 U3 选择某一标定电阻 R_c , 使其等于模拟开关 U5 上的电流电压反馈电阻 R_f , 在频率 f 下得其幅值为 A_c , 那么该频率下的增益因子为:

$$G = \frac{1}{R_c A_c} \quad (4)$$

增益系数与标定电阻、反馈电阻、激励电压、激励频率及 PGA 增益有关, 改变任意参数, 增益系数都会不同, 需要重新标定。微控制器使 U2 切换至标定状态, 控制 AD5933 输出频率 10 kHz、幅值 2 V_{pp} 的激励, 自动切换标定电阻网络与反馈电阻网络实现系统的自动标定, 得到的增益系数如表1所示。

阻抗测量时, U2 切换至 S_2 阻抗测量状态, U4 切换至待测阻抗通道。被测阻抗 Z_x 是一未知值, 可由式

(5)进行反馈电阻 R_F 的选择, $A_{\min}$ 和 $A_{\max}$ 为事先设置好的最小和最大模值。 $A_{\min}$ 和 $A_{\max}$ 根据表1中的阻抗测量范围以及增益系数得到。在测量过程中,首先选择 $100\ \Omega$ 的反馈电阻进行多次测量,然后利用去极值滤波法计算模值 A_x ,若 A_x 满足式(5)要求,则获得阻抗值经USB传送至上位机存储和显示,若 A_x 不满足式(5)条件,自动选择下一反馈电阻 $1\ \text{k}\Omega$,重复前面测量过程,直到 A_x 满足条件。已知该频率下增益因子 G 和待测阻抗的模值 A_x 由式(6)求实际阻抗 Z_x 。

表1 反馈电阻及增益系数

Tab.1 Feedback resistor and gain coefficient			
测量阻抗范围	反馈电阻	标定电阻	增益系数
0~1 k Ω	100 Ω	100 Ω	$1.033\ 365\times 10^{-6}$
1~10 k Ω	1 k Ω	1 k Ω	$1.025\ 876\times 10^{-7}$
10~33 k Ω	10 k Ω	10 k Ω	$1.031\ 739\times 10^{-8}$
33~100 k Ω	33 k Ω	33 k Ω	$3.239\ 207\times 10^{-9}$
100~330 k Ω	100 k Ω	100 k Ω	$1.004\ 376\times 10^{-9}$
300K Ω 到1M Ω	300K Ω	300K Ω	$2.990355\text{E}-10$
1M Ω 到9.1M Ω	1M Ω	1M Ω	$9.779599\text{E}-10$
9.1M Ω 到10M Ω	9.1M Ω	9.1M Ω	$1.864883\text{E}-11$

$$A_{\min} \leq A_x \leq A_{\max} \quad (5)$$

$$Z_x = \frac{1}{GA_x} \quad (6)$$

3.2 系统软件设计

系统软件流程如图5所示。上位机主要完成测量参数的配置及测量结果存储和图形化显示等功能,下位机主要任务是根据上位机配置的参数控制AD5933进行阻抗测量,测量结果通过USB总线传输至上位机。

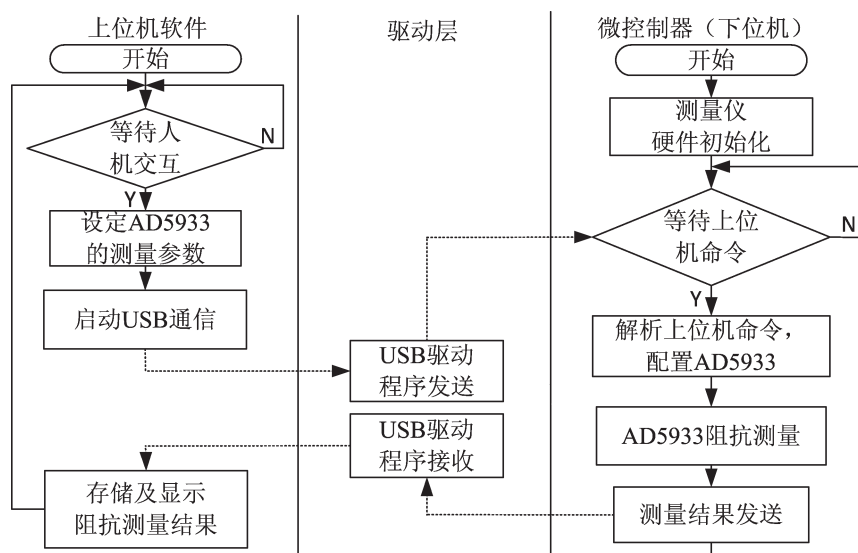


图5 系统软件流程图

Fig.5 Software system flow chart

4 实验及应用

4.1 测量仪精度实验

选取精准电阻和高精度电容串联方式作为待测阻抗,在 $0.8\sim 100\ \text{kHz}$ 的激励频率下对系统进行测试,测试结果与具有 0.05% 精度的惠普4284A数字电桥的测量结果进行比较,结果如表2所示。

从表2可以看出在 $0.8\sim 100\ \text{kHz}$ 频率范围内本测量仪测量相对误差控制在 1% 以内,并且非常的稳定可靠。精度满足一般测量需求,其他5~32通道测量结果与1~4通道基本一样,此处就不在列出。

表2 测量精度实验

Tab.2 Experimental measurement accuracy

通道	频率 f /kHz	R_c 串联实际值		HP 4284A 测量值/ Ω	本测量仪测量值/ k Ω	相对误差/%
		R/ Ω	C/pF			
1	0.8	330	0	$0.330\ 1\times10^3$	$0.332\ 0\times10^3$	0.575 6
2	10	20 000	470	$3.934\ 6\times10^4$	$3.956\ 4\times10^4$	0.554 8
3	20	47 000	10	$7.967\ 9\times10^5$	$7.912\ 6\times10^5$	0.693 3
4	100	100 000	680	$1.000\ 8\times10^6$	$1.009\ 3\times10^5$	0.850 6

4.2 岩土水分测量实验

实验探头采用自制的水分探头。依据文献^[4]的原理,采用陶瓷湿敏材料为填充材料及两同心圆环作为电极制作成水分探头。通过上述测试电路,将水分探头中水分的变化转换成电信号的变化测试记录。试验简要的步骤为:调配好土样,装入土盒并编号(编号为1,2,3,4),再把探头埋入土样中。将水分测试仪链接探头和电脑,输入参数并开始测量,测量结束后把数据保存并处理分析,结果见表3。在水分探头埋设时,应使探头埋入的紧密状态要与土样填筑的紧密状态相似。

表3 阻抗与岩土水分测试结果

Tab.3 Measurement results of impedance and soil moisture

次数	1		2		3		4	
	含水量/%	阻抗值/ Ω	含水量/%	阻抗值/ Ω	含水量/%	阻抗值/ Ω	含水量/%	阻抗值/ Ω
1	33.50	2.85×10^3	30.83	3.42×10^3	31.73	2.86×10^3	32.20	2.63×10^3
2	31.65	3.48×10^3	28.31	3.79×10^3	29.99	3.47×10^3	29.47	2.71×10^3
3	28.61	3.91×10^3	25.65	4.08×10^3	27.12	3.90×10^3	27.38	3.32×10^3
4	25.19	3.98×10^3	23.69	4.68×10^3	25.07	3.96×10^3	25.20	3.73×10^3
5	23.04	4.06×10^3	21.05	4.75×10^3	22.36	4.04×10^3	22.38	3.74×10^3
6	20.72	6.08×10^3	18.72	5.12×10^3	20.16	6.05×10^3	20.23	5.60×10^3
7	16.88	6.32×10^3	15.42	5.77×10^3	16.64	6.28×10^3	16.50	5.68×10^3
8	15.94	8.79×10^3	12.33	6.68×10^3	15.81	8.77×10^3	15.78	8.36×10^3
9	13.28	1.00×10^4	11.36	8.06×10^3	13.23	1.00×10^4	13.08	1.03×10^4
10	12.27	3.91×10^4	10.09	1.02×10^4	12.25	3.77×10^4	12.15	4.01×10^4
11	10.94	3.79×10^4	9.08	4.94×10^4	10.78	3.88×10^4	10.69	4.20×10^4
12	9.88	6.90×10^4	8.19	5.85×10^4	9.62	6.85×10^4	9.60	7.28×10^4
13	8.66	7.10×10^4	7.42	5.91×10^4	8.62	6.98×10^4	8.61	7.57×10^4
14	7.44	1.08×10^5	6.74	1.23×10^5	7.45	1.08×10^5	7.81	8.94×10^4
15	6.99	1.27×10^5	6.38	1.25×10^5	6.60	1.26×10^5	6.83	1.10×10^5

根据表3中所得结果,采用matlab软件进行曲线拟合,得出水分与阻抗值的曲线关系,拟合曲线见图6。

根据图6的结果发现水分探头的阻抗值随着探头的含水量减少而增大,含水量在13%~35%时,含水率与阻抗值的关系在图6中趋于直线;而在5%~13%之间,含水量与阻抗值的成阶梯型递减线段。此外,测试仪的参数设置不一样时,测试的结果会不一样。一方面是测试仪对不同频率段的测试相对误差不一样;另一方面是水分探头的阻抗值与频率也有关系,不同的激励频率会产生不同阻抗值。水分探头采用由湿到干的曲线进行拟合,也可以采用有干到湿的曲线进行拟合。曲线拟合时,采用不同的拟合曲线会得到不同

的拟合方程,但曲线的变化趋势大体一致。

5 总结

本文研制出了一种以STM32为控制核心,以阻抗转换芯片AD5933为测量核心的32通道岩土水分测试仪系统。32通道能实时对岩土水分进行测量,频率可选范围宽,支持USB通讯等等,另外,装置具有体积小,操作简单,成本低等优点,系统具有很好的工程实用价值。

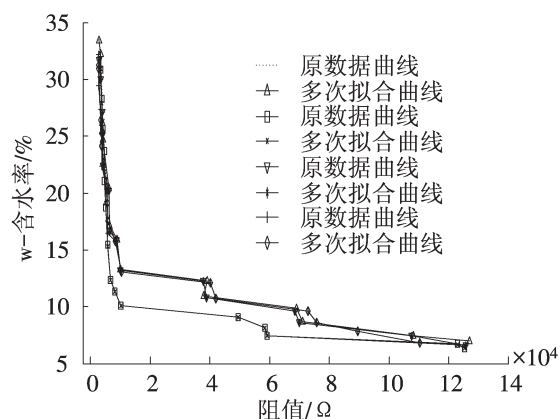


图6 水分探头12次方拟合曲线图

Fig.6 The 12 square fitting curve of the moisture probe

参考文献:

- [1] 南京水利科学研究院. GB/T 50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [2] 王力. 焦柳线红砂岩地质水害工点整治[J]. 路基工程, 2012(1): 185-187.
- [3] 熊德祥. 石膏电阻块法测定土壤水分研究初报[J]. 南京农业大学学报, 1992, 15(3): 110-114.
- [4] 赵春江, 王成, 乔晓军. 电阻式土壤含水量传感器的设计与开发[J]. 农业工程技术, 2004(12): 57-58.
- [5] 伍群芳, 赖建英, 刁心宏. 基于STM32的土壤含水量传感器阻抗测量仪的研制[J]. 华东交通大学学报, 2013, 30(2): 52-57.
- [6] 赵秀珍, 王乃钊, 毛文华. 土壤含水量传感器的研究和实验[J]. 农机化研究, 2004(5): 201-203.
- [7] 傅元, 吴然, 韩吉声. AD5933 测量水电导率电路设计中的若干问题[J]. 仪表技术与传感器, 2011(7): 63-65.
- [8] 崔传金, 郭志强, 赵楠, 等. 用AD5933实现电导率测量的研究[J]. 机电工程技术, 2008, 37(4): 44-47.

Design of 32-Channel Soil Moisture Meter Based on AD5933

Liu Liang, Wu Qunfang, Lai Jianying, Diao Xinhong, Peng Hao

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on the measurement principle of converting soil moisture measurement into electrical signal, this paper designs a 32-channel soil moisture meter which adopts STM32 as the control core and impedance conversion chip AD5933 as the measuring core. The system has the functions of automatic control, automatic correction and supporting USB communication and so on. Results show that the measuring instrument has the advantages of highly integrated circuits, easy operation, and high accuracy, stable and reliable performance, which may have wide engineering applications.

Keywords: soil moisture; transducer impedometer; STM32; AD5933