

# 基于 STM32 和 AD5933 的多通道阻抗测量仪的设计与实现

刘 亮, 朱璐闻, 艾颖梅, 伍群芳

(华东交通大学 电气与电子工程学院, 南昌 330013)

**摘要:** 针对目前传统使用的阻抗测量仪通道少、精度低、操作复杂等诸多缺点, 研制了一款测量阻抗范围  $0\sim 10\text{M}\Omega$ 、支持 USB 总线的全自动多通道阻抗测量仪; 系统采用 STM32F103C8T6 处理器为控制核心, 高精度阻抗转换芯片 AD5933 为测量核心, 通过上位机设置 AD5933 配置参数即可完成多通道的单频、多频自动化测量, 阻抗数据经 USB 总线传输至上位机存储及图形方式显示; 结果表明该测量仪电路集成度高, 操作简单, 而且测量相对误差小于  $1\%$ , 性能稳定可靠。

**关键词:** AD5933; 全自动; 多通道; USB; 阻抗测量仪

## Design of Multichannel Impedance Meter Based on AD5933 and STM32

Liu Liang, Zhu Luwen, Ai Yingmei, Wu Qunfang

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

**Abstract:** Aiming at the traditional impedance measurement instrument channel less, low precision, operation complex, and many other disadvantages. Developed a automatic multi-channel impedance meter measuring impedance range  $0\sim 10\text{M}\Omega$ , supported USB bus. System adopted STM32F103C8T6 processor as the control core, high precision impedance conversion chip AD5933 as measuring core. AD5933 through the PC configuration parameters can be set up multi-channel single-frequency, multi-frequency automated measurement. Impedance data through the USB bus transmitted to PC storage and graphics display. Results shows that the measuring instrument highly integrated circuits, easy operation, and measuring the relative error is less than  $1\%$ , stable and reliable performance.

**Key words:** AD5933; automatic; multi-channel; USB; impedance meter

## 0 引言

阻抗谱测量在生物医学工程、元器件性能检测、工业测量和国防等领域有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。传统的阻抗测量仪由多个独立的模块组成, 其中涉及 DDS (直接数字频率合成器)、数模转换器 (DAC)、可编程增益放大器、模数转换器 (ADC) 等模块, 使其具有结构复杂、测量精度低、操作繁琐等诸多缺点。也有文献提出使用 AD5933<sup>[3]</sup> 研制阻抗测量仪, 但许多实验装置和软件源于芯片公司的评估板, 并不适合普遍的阻抗测量<sup>[4]</sup>, 另外一些没有考虑到芯片特性的一些限制<sup>[5-6]</sup>, 影响测量精度和准确度, 并且没有实现全自动化测量。

为克服以上不足之处, 实现多通道、测量精度高、全自动化测量。本文介绍了一种基于高精度阻抗转换芯片 AD5933 的新型多通道阻抗测量仪的设计方法。

## 1 测量仪硬件设计

### 1.1 测量仪系统组成

阻抗测量仪结构框图如图 1 所示。本系统采用上下位机的设计方法, 整个系统全部由上位机 PC 通过 USB 总线发送相应命令控制。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 (微控制器), 微控制器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。下位机采用具有 Cortex-M3 内核的 STM32F103C8T6 芯片作为主控制器, 经 I<sup>2</sup>C 总线与 AD5933 芯片通信, AD5933 阻抗转换完成后通过 I<sup>2</sup>C 接口向微控制器传送测量到的阻抗实部 R 和虚部 I 数据, 数据经微控制器处理和计算, 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性、低漂移的外部有源晶振提供, 分频电路参考文献[7]的设计。

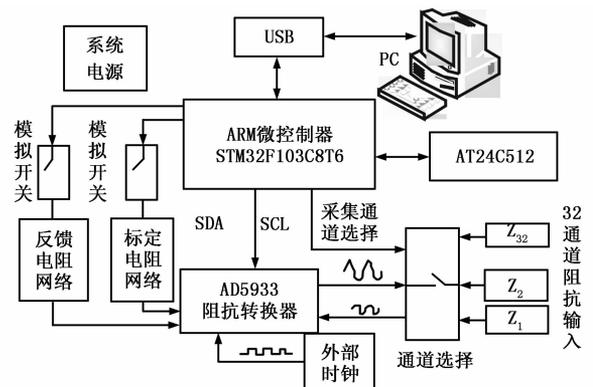


图 1 多通道阻抗测量仪结构框图

### 1.2 外围电路设计及优化

由于 AD5933 芯片存在激励信号输出阻抗高、激励电压驱动能力较弱、直流偏置非  $V_{DD}/2$  等一些限制影响测量精度, 需通过外围电路的优化以提高阻抗测量的整体精度。

图 2 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  $V_{DD}/2$  ( $R_1$ 、 $R_2$  分压, 其中  $R_1=R_2$ ), 之后利

收稿日期: 2013-12-25; 修回日期: 2014-02-17。

基金项目: 华东交通大学研究生创新基金 (YC 2012-X010)。

作者简介: 刘 亮 (1989-), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 主要从事行波故障测距方向的研究。

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。

1.3 系统原理电路

对外围电路进行设计优化后, 再考虑到方便进行系统的自动标定和档位的自动切换, 最终的测量仪电路如图 2 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  $F_2 F_1 F_0$  进行反馈电阻的选择。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 (U5) 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。

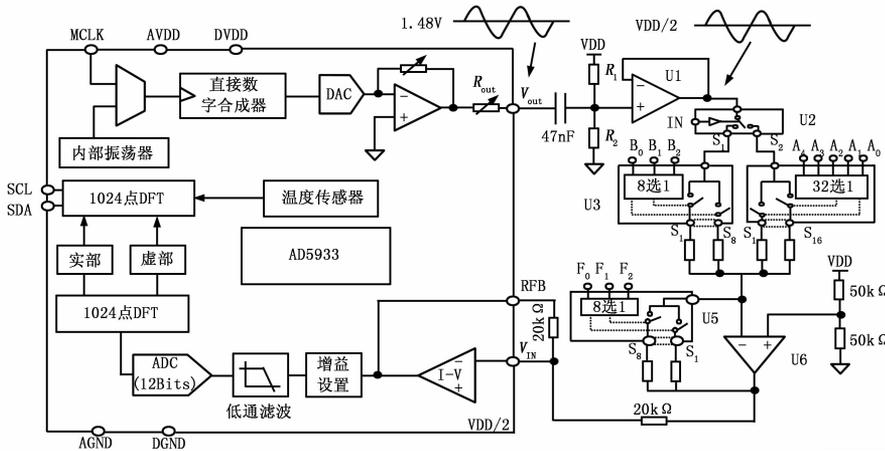


图 2 多通道阻抗测量仪原理电路

2 软件设计

2.1 全自动标定与自动量程切换

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 (1) 和 (2) 可计算出阻抗的模值  $A$  和相位  $\varphi$ 。

$$A = \sqrt{R^2 + I^2} \tag{1}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{I}{R}\right) \tag{2}$$

式 (1) 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 2, 通过微控制器 I/O 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:

$$G = \frac{1}{R_c * A_c} \tag{3}$$

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 Vpp 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。

表 1 反馈电阻及增益系数

测量阻抗范围	反馈电阻	标定电阻	增益系数
0 到 1 kΩ	100 Ω	100 Ω	$1.033\ 734 \times 10^{-6}$
1 kΩ 到 10 kΩ	1 kΩ	1 kΩ	$1.026\ 257 \times 10^{-7}$
10 kΩ 到 33 kΩ	10 kΩ	10 kΩ	$1.025\ 076 \times 10^{-8}$
33 kΩ 到 100 kΩ	33 kΩ	33 kΩ	$3.154\ 921 \times 10^{-9}$
100 kΩ 到 330 kΩ	100 kΩ	100 kΩ	$1.021\ 103 \times 10^{-9}$
300 kΩ 到 1 MΩ	300 kΩ	300 kΩ	$3.067\ 621 \times 10^{-10}$
1 MΩ 到 9.1 MΩ	1 MΩ	1 MΩ	$1.004\ 036 \times 10^{-10}$
9.1 MΩ 到 10 MΩ	9.1 MΩ	9.1 MΩ	$1.388\ 825 \times 10^{-11}$

自动量程切换与测量流程如图 3 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 (4) 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 Ω 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 (4) 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 (4) 条件, 自动选择下一反馈电阻 1 kΩ, 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 (5) 求实际阻抗  $Z_x$ 。

$$A_{min} \leq A_x \leq A_{max} \tag{4}$$

$$ZX = \frac{1}{G * AX} \tag{5}$$

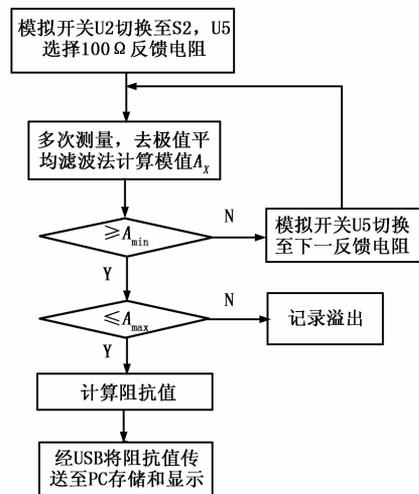


图 3 自动量程切换与测量流程

3 实验结果

由于阻抗测量结果与标定电阻和反馈电阻的精度有很大的关系, 所以系统中标定电阻和反馈电阻都选取温度系数小、精度为 0.1% 的电阻。采用电阻与电容串联方式作为待测阻抗, 利用本测量仪测量待测阻抗与使用惠普 4285A 型 LCR 分析仪 (精度 0.1%) 测量结果做一个对比。测量仪通道 1~4 上分别

使用 1 kHz、10 kHz、20 kHz、100 kHz 对不同的待测阻抗进行激励, 最终得到表 2 的测量结果, 从表中可以看出测量相对误差可以保证在 1% 以内, 说明设计的阻抗测量仪可靠性高, 精度满足一般测量需求。

表 2 测量阻抗对比结果

通道	频率 (f/kHz)	RC 串联实际值		HP 4285A 测量值(kΩ)	本测量仪测 量值(kΩ)	相对误 差(%)
		R(kΩ)	C(pF)			
1	1	5.1	4700	34.225	34.004	0.646
2	10	20	2200	21.257	21.058	0.936
3	20	51	470	53.729	53.289	0.819
4	100	100	680	100.028	99.072	0.956

在进行扫频测量时, 通过 PC 配置 AD5933 扫描起始频率、扫描点数及频率参数, 微处理器采集的数据通过 USB 总线实时传输至上位机, 上位机将数据存储并通过阻抗-频率曲线显示出来。对 10 kΩ 纯电阻进行扫频测量 (起始频率设置为 20 kHz, 频率增量步长 200 Hz, 扫描点数 200) 绘制图 4, 对由 25 kΩ 和 200 pF 电容串联组成的阻抗进行扫频测量 (起始频率设置为 20 kHz, 频率增量步长 500 Hz, 扫描点数 80) 绘制图 5。

通过图 4、5 可以看出扫频测量的结果都是围绕理论计算值上下波动的, 测量相对误差小于 1%。通过上位机的频率-阻抗图可以非常直观的读出某一特定频率下的阻抗值。

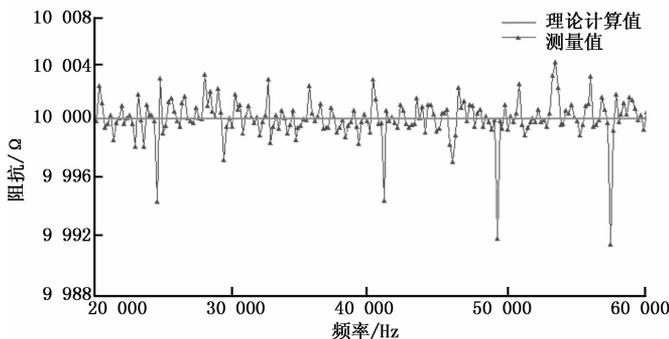


图 4 10 kΩ 纯电阻扫频测量结果

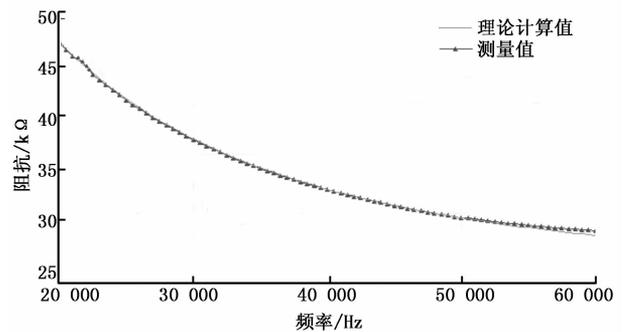


图 5 25 kΩ 电阻与 200 pF 电容串联扫频测量结果

#### 4 结论

本文设计的基于 AD5933 的全自动多通道阻抗测量仪具有精度高, 测量范围广, 操作简单, 可靠性高等优点, 很好地克服了传统阻抗测量仪的一些缺点, 给新型阻抗测量仪的设计提供了一个新的思路和较好的框架。

#### 参考文献:

- [1] 郭兴明, 彭承林, 唐敏. 生物阻抗测量系统的研究 [J]. 电子技术应用, 1995, (11): 13-15.
- [2] 吴成雄, 王君, 程功. 基于集成芯片的细胞生理参数自动分析仪的硬件设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2009, (s): 281-231.
- [3] Analog Device, Inc. AD5933 Data Sheet [Z]. 2008: 1-44.
- [4] 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.
- [5] 王可宁, 王小攀, 张雄星, 等. AD5933 在肉类阻抗谱测量系统中的应用 [J]. 西安工业大学学报, 2012, 32 (10): 806-810.
- [6] 李静, 陈世利, 靳世久. 基于 AD5933 的阻抗分析仪的设计和实现 [J]. 现代科学仪器, 2009, (2): 28-30.
- [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] 温新华, 颜小飞, 安东. 基于 AD5933 的便携式阻抗仪研制 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (4): 1090-1092.

(上接第 1660 页)

#### 4 结束语

软件构件技术和软件复用技术是嵌入式软件发展的两大法宝, 是解决软件危机的重要手段。文章针对 MQX 嵌入式实时操作系统难以复用现有成熟的底层驱动构件的问题, 详细分析和研究了 MQX 底层设备驱动管理机制。研究结果表明其根源在于设备驱动程序与 MQX 操作系统的耦合过于紧密, 设备的公共参数信息的提取与设备驱动程序融为一体。针对此问题, 提出了将设备驱动程序从操作系统中剥离的思想, 使底层设备驱动与操作系统无关, 设计了底层设备驱动管理的四层体系结构。并应用该体系结构成功地复用了已成熟的串口底层驱动构件, 验证了该方法的可行性, 为操作系统底层驱动构件的复用提供了思路。

#### 参考文献:

- [1] 郭坚, 叶志玲, 陆岚. 星载软件复用技术探讨 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (4): 541-543.
- [2] 吕明琪, 薛锦云, 胡启敏. 基于软件体系结构的可复用构件模型 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25 (1): 120-122.
- [3] 马永杰, 蒋兆远, 张燕. 基于功能构件的软件复用方法 [J]. 计算机应用与软件, 2009, 26 (8): 75-77.
- [4] 杨美清, 梅宏, 李克勤. 软件复用与软件构件技术 [J]. 电子学报, 1999, (2): 68-75.
- [5] Freescale. MQX Real-Time Operating System User Guide [EB/OL]. <http://www.freescale.com/mqx>, 2013.
- [6] Freescale. Freescale MQX I/O Drivers Users Guide [EB/OL]. <http://www.freescale.com/mqx>, 2013.
- [7] Carlos N, Luis R. How to Develop I/O Drivers for MQX [EB/OL]. <http://www.freescale.com/mqx>, 2009.
- [8] 王宜怀, 朱仕浪, 郭芸. 嵌入式技术基础与实践 (第 3 版) - ARM Cortex-M0+ Kinetis L 系列微控制器 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.