

# 一种高精度压电换能器导纳仪的研究

郭雯<sup>1</sup>,袁金库<sup>1</sup>,沈建国<sup>2</sup>

(1. 天津大学 电气与自动化工程学院,天津 300072; 2. 天津大学 药物科学与技术学院,天津 300072)

**摘要:**压电换能器的一致性检测需要导纳圆测量仪器。给出了基于高速模数转换器和 ARM7 控制器的数字式压电换能器导纳圆测量系统。用 ARM7 控制生成不同频率的正弦信号,用高速 A/D 转换器同时采集两路原始测量波形,用数字信号处理方法处理原始波形的相位差和幅度比,从而得到导纳圆。与模拟式导纳仪相比,基于 ARM 控制器的数字式压电换能器导纳仪消除了低频滤波器的影响,能有效测量低频区域。与基于采集卡的数字式导纳仪和 4294A 测量结果对比显示,基于 ARM7 的导纳仪测量精度有了一定的提高。

**关键词:**压电换能器;导纳圆;ARM7;测量精度;数据采集

**中图分类号:**TB52<sup>+</sup>7 **文献标识码:**A

## Study on an Admittance Circle Measuring Instrument for High-Accuracy Piezoelectric Transducer

GUO Wen<sup>1</sup>, YUAN Jinku<sup>1</sup>, SHEN Jianguo<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China,

2. School of Pharmaceutical Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The detection of the consistency of the piezoelectric transducer needs an admittance circle measuring instrument. The new generation of digital piezoelectric transducer admittance circle measurement system based on the ARM7 controller and high-speed ADC is given. The sinusoidal signals of different frequencies are generated with the control of ARM7, the two-way original measured waveforms are captured by high-speed ADC simultaneously, and the phase difference and amplitude ratio of the original waveforms are processed by the digital signal processing method, then the admittance circle can be obtained. Comparing with the analog admittance circle, the piezoelectric transducer admittance circle measurement instrument based on ARM controller can eliminate the influence of the low-frequency filter and can effectively measure the low-frequency region. The experimental results show that, compared with capture card-based admittance circle measuring instrument and 4294A, the accuracy of ARM7-based admittance circle measurement instrument has improved to some extent comparing with the capture card-based admittance circle measurement instrument and 4294A measured results.

**Key words:** piezoelectric transducer; admittance circle; ARM7; accuracy; data acquisition

### 0 引言

压电换能器的作用是实现声能与电能之间的相互转换。由于压电晶体的各向异性,以及其加工工艺复杂,使得即使外形、尺寸几乎相同的压电换能器一致性也不一定很好。压电换能器常配对使用,其一致性好坏决定着测量的成功与否,因此挑选出一致性较好的换能器非常关键<sup>[1-5]</sup>。

导纳圆测量仪是测量换能器导纳特性的主要仪器,可测得压电换能器的谐振频率、带宽和压电换能器等效电路中的具体参数。目前国内较成熟的导纳仪主要有模拟式导纳仪和基于采集卡的数字式导纳仪两种。模拟式导纳仪主要是通过模拟乘法器和低

通滤波器检测换能器前后两路信号的相位差,通过峰值检测电路测量两路信号的幅值<sup>[6]</sup>。数字式导纳仪是基于单片机和数据采集卡实现的,首先通过数据采集卡采集压电换能器两侧的原始测量信号,然后通过单片机将采集到的数据传输到上位机中进行数据处理,获得两路信号的相位差和幅度比,得到压电换能器的导纳圆<sup>[7]</sup>。但这两种导纳仪都有比较明显的缺点:模拟式导纳圆测量仪由于低通滤波器的影响,无法测量低频段的导纳参数,且测量精度较低;基于采集卡的数字式导纳圆测量仪不能同时采集换能器前后两路信号,导致测量结果误差较大。

针对上述缺点,本文设计了基于 ARM7 控制器

收稿日期:2011-10-28

作者简介:郭雯(1987-),女,河北省人,硕士生,主要从事导纳测量仪改进、超声电源研究。E-mail: ariellz2010@126.com

和高速 A/D 转换器的数字式压电换能器导纳圆测量系统,采集两路信号时严格同步,因此测量精度和频率测量范围都有提高。

### 1 换能器测量原理

根据压电换能器的谐振特性,得到其等效电路如图 1 所示。图中并联电容  $C_0$  为静态电容,表示压电换能器在无激励的情况下等效为一个纯电容,容性的大小与换能器的形状有关。并联电阻  $R_0$  为静态电阻,表示换能器的损耗电阻。 $L_1、C_1、R_1$  串联支路是动态支路,表示振动时压电换能器在谐振频率附近的电学特征,这些参数不仅与换能器自身的几何形状和材料有关,还与介质对振动的反作用和压电换能器所受到的力阻抗有关<sup>[8]</sup>。

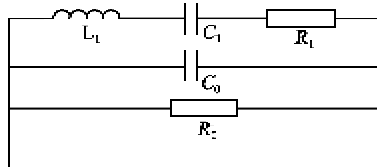


图 1 压电换能器等效电路图

压电换能器的测量原理图如图 2 所示。图中,AC 为频率可控的正弦交流信号源; $R$  为其内阻; $R_m$  为阻值可调的精密电阻,与压电换能器串联后构成测量系统,该电阻与换能器分压,与换能器的动态电阻越接近越好; $U_A$  为加在压电换能器前端的电压信号; $U_B$  为经过换能器之后加在精密电阻上的电压信号。由于压电换能器有静态电容和动态电感、动态电容以及动态电阻,其对输入的正弦信号进行相位移动和幅度改变;设  $U_A = U_{Am} e^{j\omega t}$ ,则经过换能器后的电压为  $U_B = U_{Bm} e^{j\omega t - \theta}$ 。只要测出各个频率下压电换能器两端信号的幅值比和相位差,就可通过计算得到压电换能器的各种电参数。因此,本系统设计了频率可变的正弦信号源,并通过高速 A/D 转换器对换能器两端的信号进行采集。用快速傅里叶变换的方法获得幅值比和相位差。

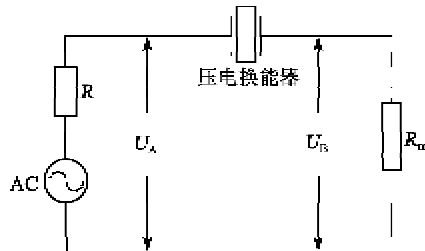


图 2 压电换能器测量原理示意图

### 2 系统的硬件设计

系统硬件设计原理框图如图 3 所示,其核心部分包括微控制器、正弦信号发生器和高速 A/D 转换

器。控制过程是:微控制器根据测量参数产生控制字符,向正弦信号发生器发送控制命令,使其产生所需频率的正弦信号,该正弦波激发压电换能器,用高速 A/D 转换器对压电换能器两端的信号同时进行 A/D 转换,采集到两路原始波形数据,经 I/O 口发送给控制器,控制器读取并保存这些数据,最后通过 USB 口与上位机通信,将数据发送到 PC 机进行处理和计算。

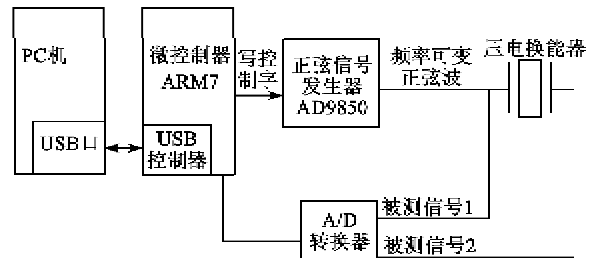


图 3 系统原理框图

本系统选用 ARM7 系列中的 LPC2146 芯片作为控制器,选用 AD9850 作为正弦信号发生器,选用最高转换速度为 32 Msps、精度为 12 位的模数转换器 ADS2806 对信号进行采集。图 4 为 AD9850 模块的外接电路图。

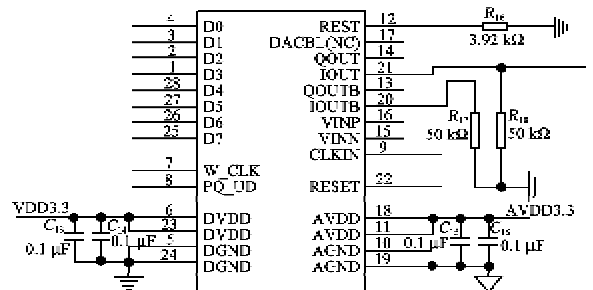


图 4 AD9850 模块的外接电路图

图 4 中,D0~D7 为 8 位数据线,用来传输控制字,接微控制器的 p0.0~p0.7 引脚;W\_CLK 为写数据控制信号线,接控制器的 p0.8 引脚;FQ\_UD 用来更新控制字,产生相应频率的信号,接控制器的 p0.9 引脚;CLKIN 为系统时钟输入端,接 30 M 有源晶振的输出端;RESET 为复位端,高电平时清零相位累加器和所有数据寄存器,接复位芯片 CAT1025 的 RESET1。

### 3 系统的软件设计

本系统的软件设计分为上位机软件和下位机软件两部分。上位机软件主要实现以下几个功能:

- 1) 提供用户界面,可设定测量的起始频率、频率步长、截止频率和每周期采集点数。

2) 进行数据处理,采用快速傅里叶变换<sup>[9]</sup>、数字相关法等数字信号处理方法对下位机传送的采样数据进行处理,计算出两路信号的幅值比和相位差。

3) 进行绘图并保存,绘制导纳圆及压电换能器的导纳随频率变化的曲线等,并将压电换能器的电参数保存。上位机程序设计的流程图如图5所示。

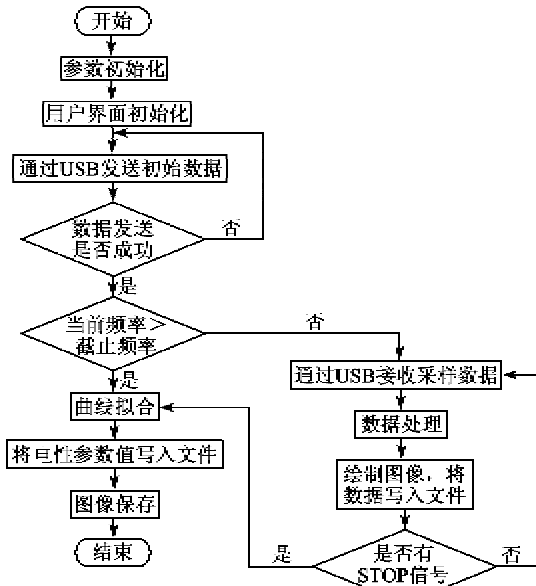
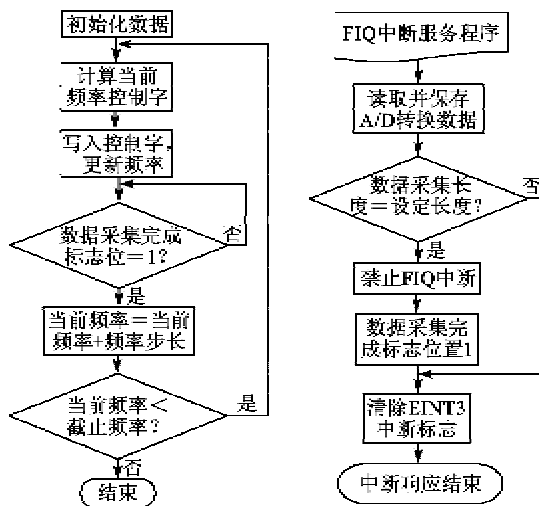


图5 上位机软件程序流程图

下位机软件主要完成的任务包括:更新正弦信号频率控制字、原始数据的采集及USB接收和发送数据。图6为更新正弦信号频率子程序和数据采集子程序的流程图。



(a) 正弦信号频率更新流程图 (b) 数据采集流程图

图6 正弦信号更新及数据采集程序流程图

#### 4 实验验证

以LPC2146为控制器,采用快速傅里叶变换

法<sup>[9-10]</sup>处理采集到的数据,实现相位差和幅度比以及导纳值的计算。图7为在相同的测试条件下,3种导纳测量仪对同一柱形压电换能器的测量结果。图中,中间的圆,即“\*-”曲线表示4294A阻抗分析仪的测量结果(作为参照标准)。最小的圆,即“-”曲线表示的是本文测量系统的测量结果。最大的圆,即“-”曲线表示的是基于单片机和采集卡的数字式导纳仪的测量结果。从测量结果中可看出,3种导纳仪测量曲线的走向趋势基本一致,但绘制的导纳圆图形显示,本系统测得的拟合圆半径、圆心位置更接近参考标准,其他3个图形显示本系统测得的电导、电纳、电阻等参数曲线也基本与4294A的测量曲线重合。总之,“-”曲线较之“-”曲线更接近于4294A的测量曲线。这说明了基于ARM7控制器的压电换能器导纳仪与基于采集卡的数字式导纳仪比较,其测量精度有了进一步的提高。

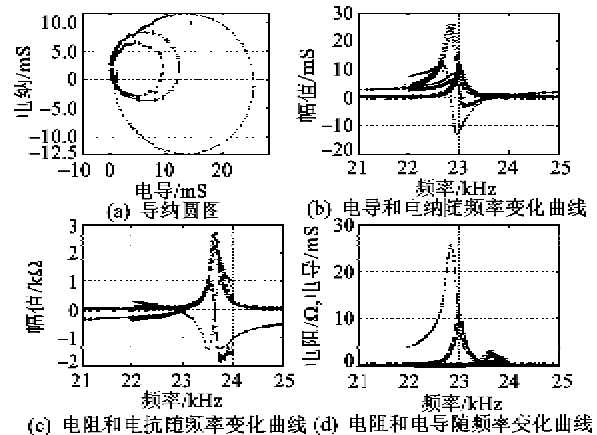


图7 3种测量系统的测量结果对比图

为了更直观地突出本系统测量精度有很大的提高,表1为3种导纳仪测量结果的具体数据。

表1 压电换能器3种仪器测量结果

测量设备	4294A型 阻抗仪	本系统	数字式 导纳仪
谐振频率/Hz	23 020	23 020	22 860
动态电阻 $R_1/\Omega$	81.911 9	119.445 1	40.750 4
动态电容 $C_1/nF$	0.806 7	0.653 8	2.316 8
动态电感 $L_1/H$	0.059 3	0.073 1	0.026 9
静态电阻 $R_0/\Omega$	11 083	12 916	976.430 2
静态电容 $C_0/nF$	15.295 0	10.695 0	-4.961 9
圆心横坐标/s	0.006 2	0.004 3	0.013 3
圆心纵坐标/s	0.002 2	0.001 5	-0.000 7
拟合导纳圆半径/S	0.006 1	0.004 2	0.012 3
机械品质因数 $Q_m$	104.636 4	88.538 5	73.741 9

## 5 结束语

本系统实现了不同频率的正弦信号的生成及两路正弦信号的同时采集,保证了原始测量信号中相位信息的精确采集。通过与已有的模拟导纳仪、数字式导纳仪和进口的 4294A 阻抗分析仪的测量结果对比得出:相对于国内模拟式、数字式导纳圆测量仪,本系统具有测量精度高、测量范围宽的优点,并克服了模拟式导纳仪不能进行低频区域测量的缺点,能延伸到低频段进行测量。相对于 4294A 阻抗分析仪,精度上还有一定的差距。

## 参考文献:

- [1] 聂建华,张廷全,沈建国. 压电换能器一致性筛选技术[J]. 石油仪器, 2009, 23(6): 7-9.  
NIE Jianhua, ZHANG Tingquan, SHEN Jianguo. Screening technology of piezoelectric transducers consistency[J]. Petroleum Instruments, 2009, 23(6): 7-9.
- [2] 贾宝贤,边文凤,赵万生,等. 压电超声换能器的应用与发展[J]. 压电与声光, 2004, 27(2): 131-135.  
JIA Baoxian, BIAN Wenfeng, ZHAO Wansheng, et al. Application and development of piezoelectric ultrasonic transducers [J]. Piezoelectrics and Acousto-optics, 2004, 27(2): 131-135.
- [3] GALLEGO J A, RODRIGUEZ G. Recent developments in vibrating-plate macrosonic transducers [J]. Ultrasonics, 2002, 40: 889-893.
- [4] 王建华. 声波测井技术综述[J]. 工程地球物理学报, 2006, 3(5): 395-399.
- WANG Jianhua. A summary of sonic logging techniques[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2006, 3(5): 395-399.
- [5] 陈永强,钟核俊,牛向东. 超声换能器性能对检测质量的影响[J]. 无损检测, 1999, 21(11): 494-496.  
CHEN Yongqiang, ZHONG Hejun, NIU Xiangdong. Effect of ultrasonic transducers characteristics on test quality[J]. NDT, 1999, 21(11): 494-496.
- [6] 张强,瞿敏,沈建国. 压电晶体导纳圆测量仪的设计与实现[J]. 压电与声光, 2005, 27(1): 21-23.  
ZHANG Qiang, QU Min, SHEN Jianguo. The design and realization of piezoelectric crystal admittance circle measurement machine [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2005, 27(1): 21-23.
- [7] 张蕊. 数字式压电陶瓷换能器导纳圆测量仪的研制[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [8] 栾桂东,张金铎,王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 280-284.
- [9] 杨新华,陈玉松,金兴文. 基于 FFT 谱分析算法的高精度相位差测量方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2006, 6: 75-77.  
YANG Xinhua, CHEN Yusong, JIN Xingwen. High precision measurement method of phase difference based on FFT spectrum analysis algorithm[J]. Automation and Instrumentation, 2006, 6: 75-77.
- [10] 齐国清,贾欣乐. 插值 FFT 估计正弦信号频率的精度分析[J]. 电子学报, 2004, 4: 625-629.  
QI Guoqing, JIA Xinle. Accuracy analysis of frequency estimation of sinusoid based on interpolated FFT [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 4: 625-629.
- (上接第 885 页)
- [3] 沈功田,井为科,左延田. 埋地管道无损检测技术[J]. 无损检测, 2006, 28(3): 137-141.  
SHEN Gongtian, JIN Wei, ZUO Yantian. Review of nondestructive testing technique for buried pipelines [J]. Nondestructive Testing, 2006, 28(3): 137-141.
- [4] BRUNO A C, SCHIFINI R. New magnetic techniques for inspection and metal-loss assessment of oil pipelines[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2001: 226-230.
- [5] 吴晓. 基于声传感器阵列的油气管道内检测器地面标记跟踪技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010: 34-35.
- [6] 吴晓,靳世久,李一博. 基于地震波传感器阵列的管道地面标记系统[J]. 纳米技术与精密工程, 2010, 8(6): 554-555.
- WU Xiao, JIN Shijiu, LI Yibo. Above-ground marker system of pipeline internal inspection instrument based on geophone array[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2010, 8(6): 554-555.
- [7] 穆林范,惠珍宁,宁显宗. 黄土层内的声波传播衰减[J]. 应用声学, 1995(1): 19-22.  
MU Linfan, HUI Zhenning, NING Xianzong. Attenuation of sound waves in soil[J]. Applied Acoustics, 1995(1): 19-22.
- [8] 陈尚. 硅微仿生矢量水声传感器研究[D]. 太原: 中北大学, 2008: 11-22.
- [9] ZHANG W D, XUE CH Y, XIONG J J, et al. Piezoresistive Effect of resonant tunneling structure for application in micro-sensors[J]. Indian Journal of Pure & Applied Physics, 2007, 45: 294-298.