

◇ 研究报告 ◇

基于 NI ELVIS 的超声换能器参数测量系统设计

王彦 赵洪亮[†]

(山东科技大学 青岛 266590)

摘要 为了满足超声换能器快速筛选的要求,在对超声换能器参数导纳圆法测量原理进行分析的基础上,利用 NI ELVIS 平台搭建了一种结构简单的超声换能器参数测量系统。采用点频法实现高精度、快速的导纳测量,采用最小二乘法拟合得到导纳圆,进而完成超声换能器诸参数的计算。基于 LabVIEW 软件平台编写了相应的软件系统。针对 40 kHz 超声换能器的测试表明,所设计的超声换能器参数测量系统精度高、处理速度快,且结构简单、便于使用。

关键词 超声换能器参数,导纳圆,NI ELVIS,点频法,最小二乘法

中图分类号: TB52+7 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2019)01-0114-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.01.015

Design of ultrasonic transducer parameter measurement system based on NI ELVIS

WANG Yan ZHAO Hongliang

(School of Electrical and Automation Engineering, Qingdao 266590, China)

Abstract In order to meet the requirements of ultrasonic transducer rapid screening, based on the analysis of ultrasonic transducer parameter admittance circle measurement principle, a simple structure ultrasonic transducer parameter measurement system was built by NI ELVIS platform. The improved point frequency method is used to realize high-precision and fast admittance measurement. The admittance circle is obtained by least squares fitting, and the parameters of the ultrasonic transducer are calculated. The corresponding software system was written based on the LabVIEW software platform. The test of 40 kHz ultrasonic transducer shows that the ultrasonic transducer parameter measurement system designed in this paper has high precision, fast processing speed, simple structure and easy to use.

Key words Ultrasonic transducer parameters, Admittance circle, NI ELVIS, Point frequency method, Least square

2018-09-03 收稿; 2018-10-17 定稿

作者简介: 王彦 (1994-), 女, 山东莱芜人, 硕士研究生, 研究方向: 电力系统运行与控制。

[†] 通讯作者 E-mail: zhl6401@126.com

0 引言

超声换能器的应用十分广泛,涉及工业、农业、医疗、军事等领域^[1]。超声换能器阻抗(或导纳)、模型参数的准确测量对于超声换能器的性能评估和应用至关重要^[2]。专业的超声换能器阻抗测试仪或者模型参数测量仪测试周期短、精度高,但成本昂贵^[3]。国外Francis等^[4]利用函数发生器NI PXI 5450和示波器NI PXI 5154生成和获取阻抗信号,利用LabVIEW软件编程计算换能器阻抗参数。国内天津大学的郭雯等^[5]研制了一种以ARM控制器为核心的数字式压电陶瓷导纳圆测量仪;陕西师范大学的陆飞等^[6]利用常规信号发生器、数字示波器等仪器实现了超声换能器性能参数测量;哈尔滨工业大学的蒋焱冬等^[7]以AVR单片机和FPGA作为控制核心,采用动态谐振法测量换能器的阻抗参数。

近年来,超声换能器阵列的使用愈加广泛,需要筛选出大量的参数一致的超声换能器。为此,本文基于NI ELVIS平台设计了一种高效的超声换能器参数测量系统。NI ELVIS是NI公司开发的通用性很强的虚拟仪器平台,具有2路16位DAC和8路16位ADC,在LabVIEW编程环境支持下能够进行多种测量工作,大大提高了工作效率。

1 超声换能器模型与参数测量原理

超声换能器等效电路如图1所示。其中, R_0 为静态电阻, C_0 为静态电容, L_1 、 C_1 、 R_1 分别为动态电感、电容、电阻。换能器导纳与角频率 ω 的关系如下^[8]:

$$Y = G + jB, \quad (1)$$

$$G = \frac{1}{R_0} + \frac{R_1}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2}, \quad (2)$$

$$B = \omega C_0 - \frac{\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2}. \quad (3)$$

由式(2)、式(3)得

$$\left(G - \frac{1}{2R_1} - \frac{1}{R_0}\right)^2 + (B - \omega C_0)^2 = \left(\frac{1}{2R_1}\right)^2. \quad (4)$$

在串联谐振角频率 ω_s 附近,电导 G 和电纳 B 随着角频率 ω 变化很大,而 ωC_0 的变化很小,可以

近似认为 $\omega_s C_0 \approx \omega C_0$ 。式(4)可以简化为

$$\left(G - \frac{1}{2R_1} - \frac{1}{R_0}\right)^2 + (B - \omega_s C_0)^2 = \left(\frac{1}{2R_1}\right)^2, \quad (5)$$

式(5)所表达的就是导纳圆方程。

基于导纳圆的超声换能器参数测量原理如图2所示。

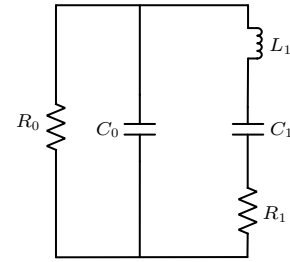


图1 超声换能器的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of ultrasonic transducer

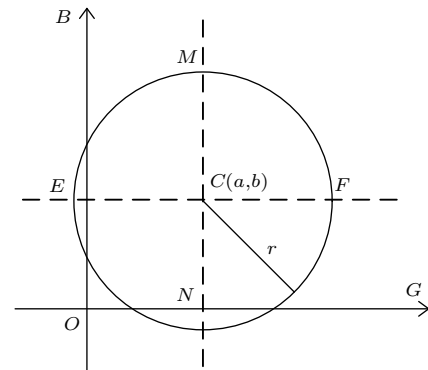


图2 超声换能器导纳圆示意图

Fig. 2 Admittance circle of ultrasonic transducer

设导纳圆的半径为 r 、圆心坐标为 (a, b) ,对比式(5),可得出参数 R_1 、 R_0 、 C_0 的计算公式:

$$R_1 = \frac{1}{2r}, \quad (6)$$

$$R_0 = \frac{1}{a - \frac{1}{2R_1}}, \quad (7)$$

$$C_0 = \frac{b}{\omega_s}. \quad (8)$$

由图2可以看出, M 点、 N 点分别对应电纳的最大值 B_{Max} 、最小值 B_{Min} 。设 M 点、 N 点对应的角频率分别为 ω_1 、 ω_2 ,根据式(2)、式(7),这两点处的电导均等于 a ,它们均满足式(9):

$$\frac{1}{R_0} + \frac{R_1}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2} = \frac{1}{2R_1} + \frac{1}{R_0}. \quad (9)$$

根据式(9)可以解出 ω_1 、 ω_2 ,得到参数 L_1 的计算公式:

$$L_1 = \frac{R_1}{\omega_1 - \omega_2}. \quad (10)$$

根据式(2)、式(3),在串联谐振角频率 ω_s 处:

$$\omega_s L_1 = \frac{1}{\omega_s C_1}. \quad (11)$$

根据式(11)可以得到参数 C_1 的计算公式:

$$C_1 = \frac{1}{\omega_s^2 L_1}. \quad (12)$$

2 系统组成

基于NI ELVIS平台搭建的超声换能器参数测量系统结构十分简单,如图3所示。其中Z为超声换能器、 R_m 为取样电阻。

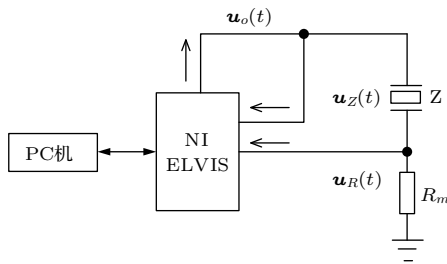


图3 基于NI ELVIS的超声换能器参数测量系统
Fig. 3 Ultrasonic transducer parameter measurement system based on NI ELVIS

PC机产生测试信号,通过NI ELVIS输出电压信号 $u_o(t)$,作为待测超声换能器Z和取样电阻 R_m 串联电路的输入。同时,PC机通过NI ELVIS同时采集超声换能器Z两端的电压信号 $u_Z(t)$ 和 R_m 两端的电压信号 $u_R(t)$ 。

3 算法设计

第一步,采用点频法测量串联谐振频率附近一段频率范围内若干个频率点的导纳。控制NI ELVIS模拟输出端口,逐个频率点发出正弦电压信号 $u_o(t)$,通过NI ELVIS的模拟输入端口对 $u_Z(t)$ 和 $u_R(t)$ 进行采样。

设所取频率点为 $f_k = f_L + k\Delta f$,其中 K 为频率点数, $k = 1, \dots, K-1$ 为序号, Δf 为频率间隔, f_L 为最低频率点。

对于第 k 个频率点,设获得的采样信号为 $u_{Z,k}(n)$ 和 $u_{R,k}(n)$,其中 $n = 0, \dots, N-1$, N 为采样点数。

第二步,对 $u_{Z,k}(n)$ 和 $u_{R,k}(n)$ 进行快速傅里叶变换,获得频率 f_k 处的电导 G_k 、电纳 B_k 。

设对应频率 f_k 处的频域信号分别为

$$U_{Z,k} = |U_{Z,k}| e^{j\phi_{Z,k}}, \quad (13)$$

$$U_{R,k} = |U_{R,k}| e^{j\phi_{R,k}}. \quad (14)$$

由图3可得,流经换能器的电流为

$$I_{Z,k} = I_{R,k} = \frac{U_{R,k} e^{j\phi_{R,k}}}{R_m}. \quad (15)$$

因此,换能器导纳为

$$Y_k = \frac{I_{Z,k}}{U_{Z,k}} = \frac{U_{R,k}}{R_m U_{Z,k}} e^{j(\phi_{R,k} - \phi_{Z,k})}. \quad (16)$$

换能器的电导、电纳分别为

$$G_k = \frac{U_{R,k}}{R_m U_{Z,k}} \cos(\phi_{R,k} - \phi_{Z,k}), \quad (17)$$

$$B_k = \frac{U_{R,k}}{R_m U_{Z,k}} \sin(\phi_{R,k} - \phi_{Z,k}). \quad (18)$$

第三步,采用最小二乘法对离散的 $B_k \sim G_k$ 数据进行曲线拟合,得到导纳圆及其半径 r 、圆心坐标 (a, b) 等参数。

第四步,计算串联谐振角频率 ω_s ,即电导最大值所对应的频率。根据 $G_k \sim f_k$ 数据,求得 G_k 的最大值 G_{M1} 以及其前后相邻电导 G_{M2} 、 G_{M3} 以及对应的角频率 ω_{M1} 、 ω_{M2} 、 ω_{M3} 。然后,通过二次多项式拟合方法,求得最大电导 G_{Max} 以及对应的频率 ω_s 。

第五步,根据 $B_k \sim f_k$ 数据,通过二次多项式拟合方法,计算电纳最大值 B_{Max} 、最小值 B_{Min} 所对应的频率 ω_1 、 ω_2 。

第六步,根据式(6)~(8)计算参数 R_1 、 R_0 、 C_0 ,根据式(10)~(12)计算参数 L_1 、 C_1 。

4 软件设计

软件前面板(如图4所示)包括输入输出信号基本参数(下限频率 F_L 、频率点数 K 、频率间隔 ΔF 、采样频率 F_s 、采样点数 N)设置与显示以及可导出的其他信号参数(上限频率 F_H 、采样时间 T_s 、信号持续时间 T_p)显示、输出信号参数(通道选择、输出信号幅度 A)设置、输入信号参数(通道选择)设置、

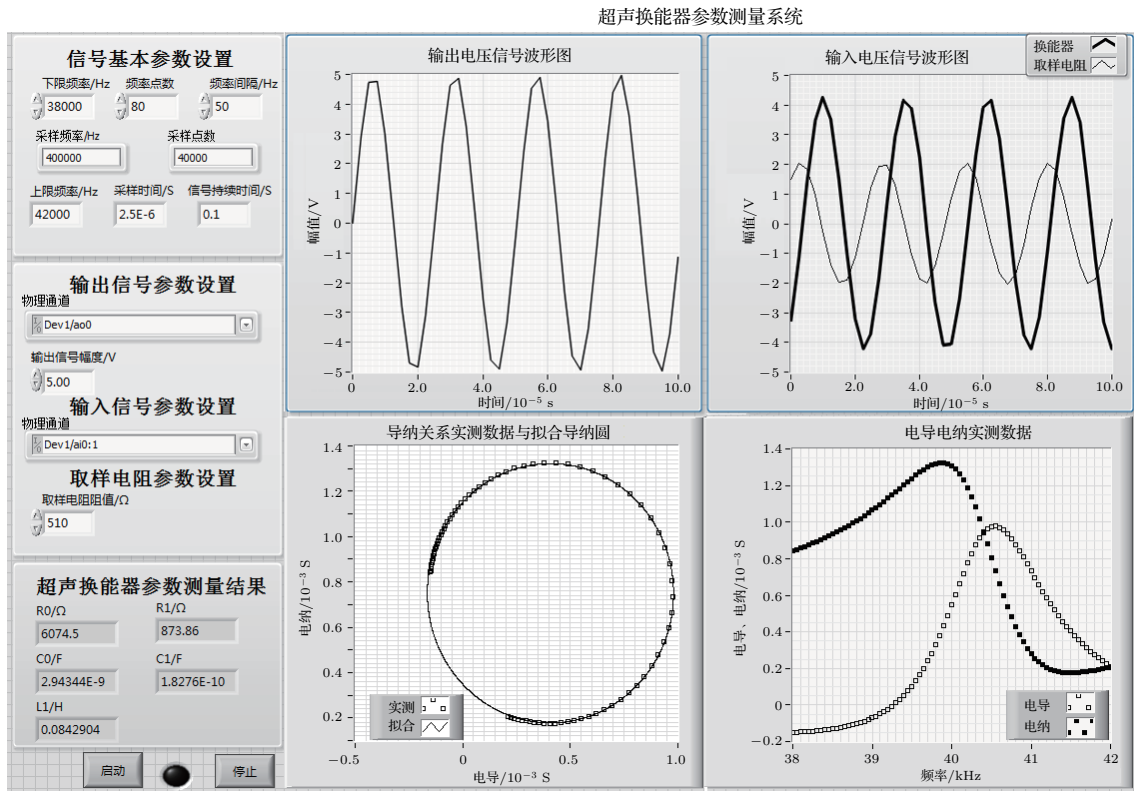


图4 软件前面板

Fig. 4 Software front panel

取样电阻阻值 R_m 设置, 以及输入输出电压信号波形、电导电纳-频率曲线、导纳关系图、拟合导纳圆、超声换能器参数等测量数据与结果的显示。

程序框图较为复杂, 文中不再赘述。

5 测试数据与结果分析

针对 40 kHz 超声换能器进行了测试。取样电阻 R_m 精度为 1%, 阻值为 510 Ω 。采样频率 $F_s = 400$ kHz, 采样时间 $T_s = 2.5$ μ s, 采样点数 $N = 40000$, 信号持续时间 $T_p = 0.1$ s。频率点数 $K = 80$, 频率间隔 $\Delta F = 50$ Hz。下限频率 F_L 、上限频率 F_H 、输出电压信号 $u_o(t)$ 的幅值 U_{om} 分别取不同数值。

图 5 为一组不同频率下电导、电纳的实测数据, 图 6 为对应的导纳关系数据散点图以及进行曲线拟合后所得到的导纳圆。可以看出, 拟合导纳圆与实测导纳数据点吻合得相当好。

对应的超声换能器模型参数为 $R_0 = 6.067$ k Ω , $R_1 = 0.8743$ k Ω , $C_0 = 2.975$ nF, $C_1 = 177.14$ pF, $L_1 = 86.97$ mH。

表 1 为输出电压信号幅值 $U_{om} = 5$ V、频率范围 38.00 kHz~42.00 kHz 时, 多次重复测量结果。表 2 为对应的相对测量误差。

表 3 为输出电压信号幅值 U_{om} 取不同数值、频率范围取 38.00 kHz~42.00 kHz、间隔 50 Hz 时的多次测量结果。表 4 为对应的相对测量误差。

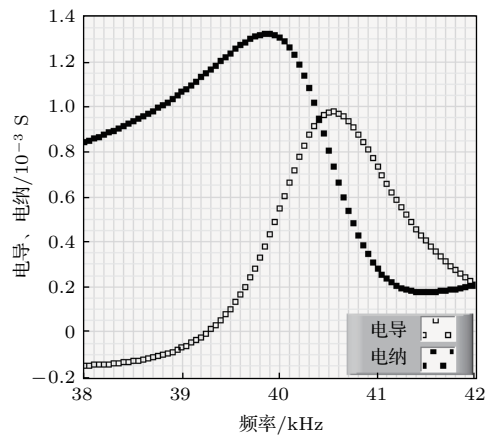


图5 电导、电纳实测数据

Fig. 5 Measured data of conductance and electricity

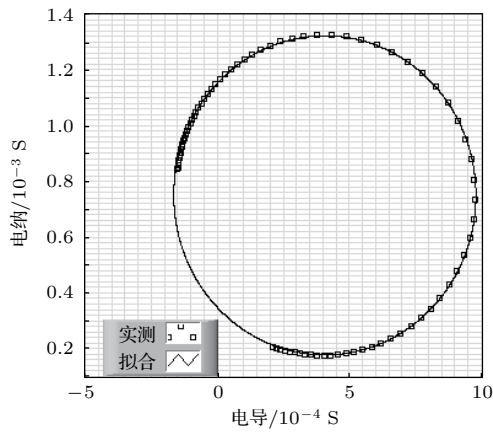


图6 导纳关系实测数据与拟合导纳圆

Fig. 6 Measured data of admittance relation and fitted admittance circle

表5为输出电压信号幅值 $U_{om} = 5\text{ V}$ 、频率点取不同数值时的多次测量结果。表6为对应的相对测量误差。

表1 $U_{om} = 5\text{ V}$ 时多次重复测量结果

Table 1 Repeated measurements at $U_{om} = 5\text{ V}$

次数	$R_0/\text{k}\Omega$	$R_1/\text{k}\Omega$	C_0/nF	C_1/pF	L_1/mH
1	6.067	0.8743	2.975	177.14	86.97
2	6.027	0.8777	2.970	176.45	87.31
3	6.018	0.8779	2.971	181.92	84.68
4	6.015	0.8781	2.975	176.80	87.35
5	6.013	0.8782	2.975	176.78	87.36
6	6.012	0.8782	2.975	176.79	87.35
均值	6.025	0.8774	2.974	177.65	86.84

表2 对应表1的相对误差

Table 2 Corresponds to the relative error of Table 1

次数	R_0	R_1	C_0	C_1	L_1
1	0.70	0.35	0.03	0.29	0.15
2	0.03	0.03	0.13	0.68	0.54
3	0.12	0.06	0.10	2.40	2.49
4	0.17	0.08	0.03	0.48	0.59
5	0.20	0.09	0.03	0.49	0.60
6	0.22	0.09	0.03	0.48	0.59
均值	0.24	0.12	0.06	0.80	0.83

表3 不同电压幅值下测量结果

Table 3 Measurement results under different voltage amplitudes

V_{in}/V	$R_0/\text{k}\Omega$	$R_1/\text{k}\Omega$	C_0/nF	C_1/pF	L_1/mH
5	6.067	0.8743	2.975	177.14	86.97
6	6.056	0.8813	2.963	181.22	85
7	6.081	0.8851	2.963	180.88	85.38
8	6.094	0.8888	2.964	185.58	83.21
9	6.064	0.8918	2.972	179.98	86.02
10	5.921	0.8913	2.989	185.53	83.44
均值	6.047	0.8854	2.971	181.72	85

表4 对应表3的相对误差

Table 4 Corresponds to the relative error of Table 3

V_{in}/V	R_0	R_1	C_0	C_1	L_1
5	0.33	1.26	0.13	2.52	2.32
6	0.15	0.47	0.27	0.28	0
7	0.56	0.04	0.27	0.46	0.45
8	0.78	0.38	0.24	2.12	2.11
9	0.28	0.72	0.03	0.96	1.2
10	2.08	0.66	0.61	2.10	1.84
均值	0.697	0.59	0.258	1.41	1.32

表5 取不同频率值时超声换能器参数测量结果

Table 5 Measurement results of ultrasonic transducer parameters at different frequency values

频率/kHz	$R_0/\text{k}\Omega$	$R_1/\text{k}\Omega$	C_0/nF	C_1/pF	L_1/mH
38.00~42.00	6.067	0.8743	2.975	177.14	86.97
38.01~42.01	6.022	0.8758	2.961	171.31	89.92
38.02~42.02	6.022	0.8761	2.963	171.25	89.95
38.03~42.03	6.014	0.8762	2.964	171.23	89.97
38.04~42.04	6.005	0.8764	2.965	171.18	89.99
均值	6.026	0.8758	2.966	172.42	89.36

表6 对应表5的相对误差

Table 6 Corresponds to the relative error of Table 5

频率/kHz	R_0	R_1	C_0	C_1	L_1
38.00~42.00	0.76	0.17	0.32	2.74	2.67
38.01~42.01	0.02	0.01	0.16	0.64	0.63
38.02~42.02	0.02	0.04	0.09	0.68	0.66
38.03~42.03	0.12	0.05	0.05	0.69	0.68
38.04~42.04	0.27	0.07	0.02	0.72	0.71
均值	0.26	0.07	0.13	1.09	1.07

6 结论

从上述测量数据可以看出,本文设计的超声换能器测量方案具有较高的测量精度,同时结构简单、效率高。另外,本系统采用NI ELVIS这样一个通用平台进行设计,还具有成本低的优点。

参 考 文 献

- [1] Zhong X, Sang L. Large-signal impedance measurements of piezoelectric ultrasonic transducers[C]// IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments. IEEE, 2016: 731-736.
- [2] Jeong J J, Choi H. An impedance measurement system for piezoelectric array element transducers[J]. Measurement, 2017, 97: 138-144.
- [3] Pan Q, Xiao D, Deng M, et al. A voltage-current method of measuring ultrasonic transducer impedance[C]. 2013 Far East Forum on Nondestructive Evaluation/Testing: New Technology and Application, IEEE, 2013.
- [4] Francis M, Jacob M. High frequency compatible impedance analyzer for ultrasound transducers using LabVIEW[C]// Fourth International Conference on Advances in Computing and Communications. IEEE, 2014: 235-238.
- [5] 郭雯, 袁金库, 沈建国. 一种高精度压电换能器导纳仪的研究[J]. 压电与声光, 2012, 34(6): 886-889.
Guo Wen, Yuan Jinku, Shen Jianguo. Research on a high precision piezoelectric transducer admittance device [J]. Piezoelectric and Acoustical Light, 2012, 34(6): 886-889.
- [6] 陆飞, 郭建中. 基于虚拟仪器的超声换能器阻抗分析仪设计[J]. 压电与声光, 2011, 33(3): 425-428.
Lu Fei, Guo Jianzhong. Impedance analyzer design of ultrasonic transducer based on virtual instrument[J]. Piezoelectric and Acoustooptic, 2011, 33(3): 425-428.
- [7] 蒋焱冬. 压电器件的参数测试与驱动系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] Kuang Y, Jin Y, Cochran S, et al. Resonance tracking and vibration stabilization for high power ultrasonic transducers[J]. Ultrasonics, 2014, 54(1): 187-194.