

文章编号:1004-2474(2012)05-0724-04

提高压电换能器导纳圆测量精度的方法研究

何素娟¹, 聂建华², 沈建国²

(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:不同压电换能器的动态电阻、电容、电感和静态电阻、电容的值不同, 这些参数均可从其对应的导纳圆中得到。分析了导纳圆测量中的两个重要影响因素: A/D 转换器的量化误差、测量电阻。为提高导纳圆的测量精度, 量化误差不变时不同的压电换能器需选择不同的测量电阻以保证所测量的两路正弦信号有适当的幅值比和相位差。测量电阻的值为压电换能器动态电阻值的 0.15~3.5 倍时, 导纳圆半径的相对误差小于 0.5%, 测量电阻为动态电阻的 0.7 倍时导纳圆的相对误差最小。

关键词:压电换能器; 导纳圆; 测量精度; 测量电阻; 取值范围

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A

Improvement on Measurement Accuracy of Piezoelectric Transducer Admittance Circle

HE Sujuan¹, NIE Jianhua², SHEN Jianguo²

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

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

Abstract: Different piezoelectric transducers have different dynamic resistance, capacitance, inductance and static resistance, capacitance. These parameters can be obtained from the corresponding admittance circle. Two factors of quantizing error of A/D converter and measurement resistance in the admittance circle measurement have been analyzed in this paper. In order to improve measurement accuracy of admittance circle, different piezoelectric transducers need to choose different measurement resistances to ensure that two sinusoidal signals have right amplitude ratio and phase difference when the quantizing error is a constant. When the measurement resistance is in the value between 0.15 to 3.5 times of piezoelectric transducer dynamic resistance, the relative error of the admittance circle radius is less than 0.5%. When the measurement resistance is 0.7 times of the dynamic resistance, the admittance circle has the minimum relative error.

Key words: piezoelectric transducer; admittance circle; measurement accuracy; measurement resistance; numeric area

0 引言

用导纳圆测量仪可测量压电换能器的动态电阻、电容、电感和静态电阻、电容。这些参数可准确地描述压电换能器的工作特性。压电换能器应用广^[1-4], 声波测井仪器^[5]基本采用压电换能器发射和接收声波信号。不同的压电换能器参数各异, 选择参数一致或接近的压电换能器安装到仪器上, 可较好地保证同一只仪器上的压电换能器或经维修后换上的压电换能器性能与原来一致。

压电晶体是各向异性材料, 制作工艺复杂, 即使是同一条件下生产出来的同一批压电晶片, 其自身

的电特征都存在较大的差异^[6]。如果不进行认真挑选, 制作成压电换能器后其一致性较差, 测量的声波波形的幅值和相位相差较大。因此, 对压电换能器进行必要的筛选^[7-8]是提高声波测井仪器性能的一个重要方面。

换能器的筛选主要依据其参数, 这些参数可从导纳圆中得到。因此, 得到精度较高的导纳圆对挑选压电换能器很重要。在导纳圆测量电路中, 电导、电纳值^[9]只与加在换能器两端的电压信号的幅值比和相位差有关, 而测量电路中的测量电阻对其影响很大。因此, 如何针对不同的压电换能器, 选择合适

收稿日期: 2011-09-27

基金项目: “八六三”计划基金资助项目(2007AA06Z226)

作者简介: 何素娟(1987-), 女, 江西高安人, 硕士生, 主要从事大功率超声波的研究。

的测量电阻是导纳仪研发中的一个重要环节。

在过去的文献中,没有对测量电路中的测量电阻 R_m 进行过研究,一般都取固定值 200Ω 。但实际应用中我们发现, R_m 对导纳圆测量的影响较明显。 R_m 偏大或偏小时导纳圆的测量效果不能达到最佳,本文将就此进行初步研究与讨论。

1 导纳圆测量原理

图 1 为压电换能器导纳圆测量的原理图。图中,AC 为频率可变的交流电源, R 为其源内阻, U_A 为经压电换能器前的电压, U_B 为经换能器后的电压。设

$$U_A = U_{Am} e^{j\omega\varphi} \quad (1)$$

$$U_B = U_{Am} e^{j(\omega\varphi + \theta)} \quad (2)$$

式中: U_{Am}, U_{Bm} 为两路信号的幅值; ω 为角频率; φ 为 U_A 的初始相位; θ 为两路信号的相位差。只要求出不同频率下的 U_{Am}, U_{Bm}, θ , 就可求出压电换能器的导纳值为

$$R = R_m (U_A / U_B \cos \theta - 1) \quad (3)$$

$$X = -R_m U_A / U_B \sin \theta \quad (4)$$

$$G = R / (R^2 + X^2) \quad (5)$$

$$B = -X / (R^2 + X^2) \quad (6)$$

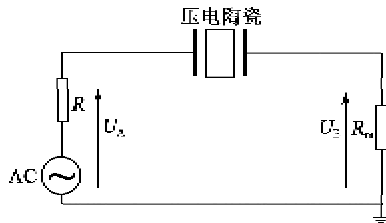


图 1 导纳测量原理图

2 导纳圆测量的影响因素

影响导纳圆测量精度的因素包括频率范围、采样步长、A/D 转换器的量化误差和测量电阻等。本文对 A/D 转换器的量化误差及测量电阻进行了详细阐述。

2.1 A/D 转换的量化误差

在数字导纳圆的测量过程中,所测量的两路正弦信号首先通过 A/D 转换器将模拟信号转换为数字信号。转换过程包括采样、保持、量化及编码 4 个步骤。其中,量化的方法一般包括四舍五入法和只舍不入法。采用不同的量化方式,其量化结果不同,量化结果与采样值间存在误差,即量化误差^[10]。四舍五入法比只舍不入法的误差小。四舍五入法的误差范围为 $-D/2 \sim D/2$ (D 为最小量化单位),为只舍不入法误差的一半。所以在信号处理中进行量化时,多采用四舍五入法^[11]。

针对本文的两路正弦信号,由于量化误差的存

在,根据四舍五入法,对于同一频率下的两路信号的幅值比可能存在以下 4 种误差情况:

$$1) (U_A + D/2) / (U_B + D/2)$$

$$2) (U_A + D/2) / (U_B - D/2)$$

$$3) (U_A - D/2) / (U_B + D/2)$$

$$4) (U_A - D/2) / (U_B - D/2)$$

4 种不同的幅值比得出 4 个不同的导纳点: $(G_1, B_1), (G_2, B_2), (G_3, B_3), (G_4, B_4)$ 。设不考虑量化误差的导纳点为 (G_0, B_0) , 圆心为 (R_g, R_b) 。分别计算 4 个点到圆心的距离, 设为 r_1, r_2, r_3, r_4 。点 (G_0, B_0) 到圆心的距离为 r_0 。将 $r_1 \sim r_4$ 分别与 r_0 作差, 绝对值最大的点即为 (G_0, B_0) 考虑量化误差后的最大绝对误差, 设为 r_m 。由此可得导纳圆半径的相对误差为

$$\sigma = \frac{r_m - r_0}{r_0} \quad (7)$$

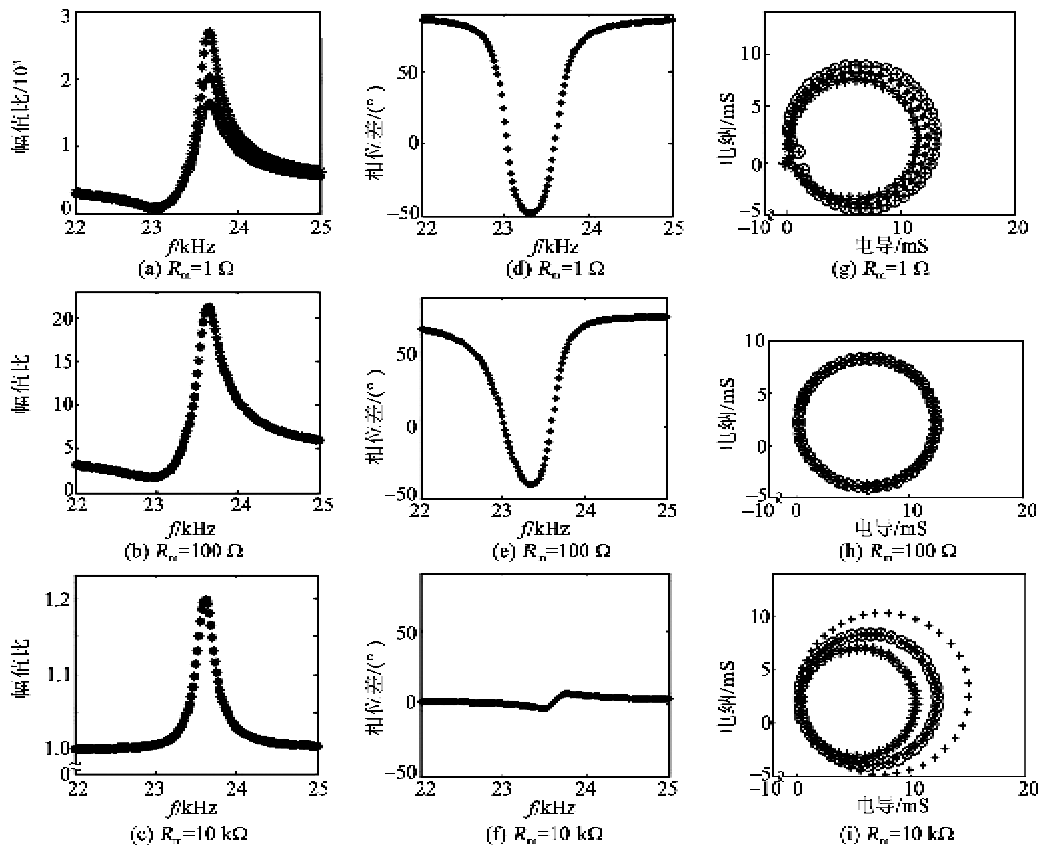
取导纳圆上所有采集点的 σ 的最大值为量化误差对该导纳圆的影响程度。当 $\sigma \leq 0.5\%$ 时, 称量化误差对导纳圆的影响可忽略。

2.2 测量电阻

测量电阻不同时, 两路正弦信号的幅值比和相位差不同。测量电阻过小时, 所测量的 2 个正弦信号的幅值差异很大, 第二路正弦信号的幅值很小, A/D 转换器的量化误差对其幅值的影响较大, 这导致计算出的导纳圆存在较大误差; 测量电阻过大时, 两路正弦信号的幅值接近, 量化误差对其幅值的影响较小, 但随着 R_m 的增加, 两路信号的相位差越来越小, 当相位差很小时, 即使很小的量化误差也将导致计算出的导纳圆存在较大的误差。

以动态电阻 $R_1 = 81.9 \Omega$, 动态电容 $C_1 = 0.81 \text{ nF}$, 动态电感 $L_1 = 0.059 \text{ H}$, 静态电阻 $R_0 = 11083 \Omega$, 静态电容 $C_0 = 15.3 \text{ nF}$ 的压电换能器为例来说明 R_m 对导纳圆测量的影响。

取测量电阻为 $1 \Omega, 100 \Omega, 10 \text{ k} \Omega$, 设第一路正弦信号 $y = \sin(\omega t)$, A/D 转换器的最小量化单位为 $D = 2^{-12}$, 分别计算两路信号的幅值比、相位差和导纳圆, 并在 MATLAB 中进行仿真, 结果如图 2 所示。图中, “.” 表示未考虑量化误差时的幅值比、相位差和导纳圆, “o” 表示第 1) 种误差时的幅值比、相位差和导纳圆, “*” 表示第 2) 种误差时的幅值比、相位差和导纳圆, “+” 表示第 3) 种误差时的幅值比、相位差和导纳圆, “x” 表示第 4) 种误差时的幅值比、相位差和导纳圆。

图2 R_m 不同时的幅值比、相位差和导纳圆

当 $R_m = 1 \Omega$ 时(见图 2(a)、(d)、(g)),第 1)、3) 种误差时的幅值比、导纳圆基本重合,幅值比比未考虑量化误差时小,导纳圆半径比未考虑量化误差时大;第 2)、4) 种误差的幅值比和导纳圆也基本重合,且幅值比比未考虑量化误差时大,导纳圆半径比未考虑量化误差时小。4 种误差时的相位差基本不变,均与未考虑量化误差时相等。导纳圆半径的相对误差最大为 13.3%。

当 $R_m = 100 \Omega$ 时(见图 2(b)、(e)、(h)),4 种误差时幅值比、相位差和导纳圆均与未考虑量化误差时基本重合。导纳圆半径相对误差最大仅为 0.3%。

当 $R_m = 10 \text{ k}\Omega$ 时(见图 2(c)、(f)、(i)),4 种误差时的幅值比和相位差都与未考虑量化误差时基本重合,第 1)、4) 种误差时的导纳圆与未考虑量化误差时的导纳圆基本重合,第 2) 种误差时的导纳圆基本重合,且比未考虑量化误差时的导纳圆半径小,第 3) 种误差时的导纳圆比未考虑量化误差时的导纳圆半径大。导纳圆半径相对误差最大为 47.4%。

从上述结果可看出,测量电阻对导纳圆测量的影响较大。测量电阻与导纳圆的动态电阻接近时,测量误差对导纳圆的影响较小,测量电阻偏小或偏

大均会对导纳圆测量有较大的影响。

3 分析与讨论

设两路信号的幅值比为 A ,代入式(5)、(6)可得

$$G = \frac{A \cos \theta - 1}{R_m (A^2 + 1 - 2A \cos \theta)} \quad (8)$$

$$B = \frac{A \sin \theta}{R_m (A^2 + 1 - 2A \cos \theta)} \quad (9)$$

R_m 偏小时,测量的第二路电压信号幅值很小, A/D 转换器的量化误差对其幅值的测量影响较大,导致两路信号的幅值比误差较大,图 2(a) 中,未考虑量化误差的幅值比最大为 2 026.3,4 种误差时的幅值比分别为 1 630.2、2 677.7、1 629.8、2 677.0。取谐振频率附近一点(23 017 Hz)的幅值比和相位差,代入式(8)、(9),得到的 G, B 值分别为:

$$(G_0, B_0) = (12.3 \times 10^{-3}, 1.6 \times 10^{-3}) \quad (10)$$

$$(G_1, B_1) = (13.0 \times 10^{-3}, 1.7 \times 10^{-3}) \quad (11)$$

$$(G_2, B_2) = (11.5 \times 10^{-3}, 1.5 \times 10^{-3}) \quad (12)$$

$$(G_3, B_3) = (13.1 \times 10^{-3}, 1.7 \times 10^{-3}) \quad (13)$$

$$(G_4, B_4) = (11.5 \times 10^{-3}, 1.5 \times 10^{-3}) \quad (14)$$

由此可看出, A 差异大,导致电导、电纳值差别较大,从而导致导纳圆的半径差异较大。

R_m 偏大时,测量的第二路电压信号幅值很大时,A/D 转换器的量化误差对其幅值的测量影响很小,两路电压信号幅值比接近于 1(见图 2(c)),未考虑量化误差的幅值比最大为 1.196 8,4 种误差时的幅值比分别为 1.196 8、1.197 2、1.196 6、1.196 8。此时,相位差接近于 0(见图 2(f))。同样取 $f=23\ 017$ 的幅值比和相位差,代入式(8)、(9),得到的 G, B 值分别为

$$(G_0, B_0) = (12.3 \times 10^{-3}, 1.6 \times 10^{-3}) \quad (15)$$

$$(G_1, B_1) = (12.3 \times 10^{-3}, 1.6 \times 10^{-3}) \quad (16)$$

$$(G_2, B_2) = (10.3 \times 10^{-3}, 1.1 \times 10^{-3}) \quad (17)$$

$$(G_3, B_3) = (15.1 \times 10^{-3}, 2.4 \times 10^{-3}) \quad (18)$$

$$(G_4, B_4) = (12.3 \times 10^{-3}, 1.6 \times 10^{-3}) \quad (19)$$

由此可看出, A 接近于 1 时,由于相位差接近于 0,导致最终算得的导纳值存在较大误差,从而导致导纳圆的半径差异较大。

R_m 适中时,测量的第二路电压信号幅值适中,A/D 转换器的量化误差对其幅值的测量影响也很小。由式(8)、(9)可看出,微小的幅值比误差对 G, B 的值影响极小,导纳圆的半径基本保持不变。

由此可知,两路信号的幅值比过大或相位差过小都将导致较大的导纳圆测量误差。

4 测量电阻的取值范围

根据上述结果,针对不同的压电换能器选择合适的测量电阻将显著提高导纳圆的测量精度。根据式(7),在 MATLAB 中仿真得到以下 6 个压电换能器在相对误差 0.5% 以内时, R_m 的取值范围如表 1 所示,表中 f 为压电换能器的谐振频率。

表 1 R_m 的取值范围

压电换能器	1 号	2 号	3 号
f/Hz	19 880	20 040	23 020
R_1/Ω	41.996 5	43.406 5	81.911 9
L_1/H	0.037 1	0.038 4	0.059 3
C_1/nF	1.726 0	1.640 1	0.806 7
R_0/Ω	5 093.9	11 243.0	11 083.0
C_0/nF	19.071 0	15.946 0	15.295 0
R_m/Ω	6.2~145.2	6.5~153.9	11.7~286.2
压电换能器	4 号	5 号	6 号
f/Hz	23 020	3 365	3 375
R_1/Ω	119.445 1	1 404.700 0	1 673.100 0
L_1/H	0.073 1	5.589 3	4.841 5
C_1/nF	0.653 8	0.400 0	0.462 1
R_0/Ω	12 916.02	$3\ 594.2 \times 10^8$	$2\ 846.7 \times 10^8$
C_0/nF	10.695	12.433	11.700
R_m/Ω	17.3~413.6	209.2~4 934.1	240.0~5 804.1

由表可看出,导纳圆的相对误差小于 0.5% 时, R_m 的取值范围为 R_1 的 0.15~3.5 倍。各压电换能器相对误差最小的测量电阻依次为 29.5 Ω , 30.6 Ω , 57.7 Ω , 83.6 Ω , 976.4 Ω , 1 178.3 Ω , 都为动态电阻的 0.7 倍。因此,在导纳圆测量的过程中,可采用数字电位器代替传统测量电路中的固定测量电阻。利用 $R_m=0.7R_1$ 对测量电阻进行调整可提高导纳圆测量精度。

5 结束语

本文以图表形式肯定了 A/D 转换器的量化误差一定时,不同的测量电阻得出导纳圆的测量精度不同。传统测量电路中测量电阻为固定值 200 Ω , 该阻值适合谐振频率为 20 kHz 左右的普通压电换能器参数测量,但压电换能器的谐振频率很小或很大时,其振动模态不同,动态电阻值不同,固定的测量电阻不一定适合测量电路。本文通过计算得出,测量电阻为动态电阻的 0.7 倍时导纳圆的测量效果最佳。针对不同的压电换能器选择合适的测量电阻将在一定程度上提高导纳圆的测量精度。

参考文献:

- [1] MOULIN E, ASSAAD J, DELEARRE C, et al. Piezoelectric transducer embedded in a composite plate: Application to lamb wave generation[J]. J Appl Phys, 1997, 82 (5):2049-2055.
- [2] ZHANG Peng, ZHU Liyou, GUO Xingyu, et al. Research on piezoelectric transducer application in micro hole vibration drilling [C]//Inner Mongolia, China; 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, 2011;1557-1560.
- [3] 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. The application and development of piezoelectric ultrasonic transducer [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2004, 27(2):131-135.
- [4] 万学华.压电陶瓷换能器和压电陶瓷材料的应用与发展[J].世界产品与技术,2002(6):71-74. WANG Xuehua. The application and development of piezoelectric transducers and piezoelectric ceramic materials [J]. World Products & Echnology, 2002(6):71-74.
- [5] 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.

(下转第 731 页)