

压电换能器谐振频率动态检测的研究

Study on Dynamic Detection of Resonant Frequency for Piezoelectric Transducers

李祖胜 李 艺 赵 明 马 立

(苏州大学机电工程学院,江苏 苏州 215021)

摘 要: 超声波换能器串联谐振频率的检测和研究都是基于静态分析,因而存在无法对实际应用电路进行动态参数的识别和实时跟踪的缺点。基于压电换能器的等效电路,结合导纳圆分析,提出了一种检测换能器谐振频率和相关参数的方法。该方法对超声波电源实现自动识别、跟踪以及动态匹配压电换能器谐振频率等具有非常重要的参考作用。动态检测结果表明,该方法可以较好地检测出压电换能器的谐振频率。

关键词: 换能器 等效电路 谐振频率 动态检测 DSP

中图分类号: TM938.8 **文献标志码:** A

Abstract: The detection and research on the serial resonant frequency of ultrasonic transducer are all based on static analysis, thus the dynamic parameter identification and real-time tracking for actual applicable circuit are impossible. Based on the equivalent circuit of piezoelectric transducer, and combining with the admittance chart analysis, the method of detecting resonant frequency and related parameter for transducer is proposed. The method is significant to automatic identifying and tracking ultrasonic power supply, and dynamic matching piezoelectric transducer resonant frequency. The result of dynamic detection indicates that this method is able to detect the resonant frequency of the piezoelectric transducer.

Keywords: Transducer Equivalent circuit Resonant frequency Dynamic detection DSP

0 引言

随着超声抛光加工技术的深入研究^[1],对超声波电源也提出了新的要求。市场上超声电源和换能器基本都是一对一配置,一旦更换不同的换能器,超声波电源就无法识别新换能器的谐振频率,从而进行动态匹配。目前,对于超声波电源的研究主要集中在如何提高功率、改进控制方式和频率跟踪等方面^[2-4],对压电换能器串联谐振频率的理论研究也仅限于静态的分析测量^[5-7]。由于在超声抛光中要更换不同的加工设备,这样的研究也就无法满足超声抛光的要求,限制了超声波电源的使用范围。本文主要讨论和介绍了一种在动态情况下检测换能器谐振频率的方法,对以后研究新型的、可以自动识别换能器参数的超声波电源有一定的借鉴和指导作用。

1 谐振频率检测

1.1 换能器的特性

超声波电源的负载中较为常用的是压电换能器,

要使压电换能器工作在最佳状态,就必须了解换能器的等效电路和相关的参数。压电换能器的等效电路有多种形式,典型的有 Mason 等效电路和 KLM 等效电路。Mason 等效电路是一个描述压电振子机电特性的六端口网络,而 KCM 等效电路是在 Mason 等效电路的基础上提出的,它是把压电片的电学特性用集中参数表示,力学部分用传输线表示。压电换能器的等效电路如图 1 所示。

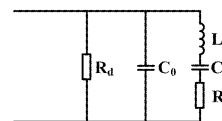


图 1 压电换能器等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit piezoelectric transducer

图 1 中, R_d 为静态电阻,通常阻值很大,一般不考虑; C_0 为静态等效电容,是一个实际存在的量; R_1 为动态电阻; L_1 为动态等效电感; C_1 为动态等效电容。

1.2 测量静态电容 C_0

压电换能器在没有工作时就相当于一个电容,这个电容的大小就是换能器的静态电容 C_0 。对于静态电容 C_0 ,可以在低频时(一般小于 1 kHz)通过测量获得,测量电路如图 2 所示。图中电路的开关 K 由控制

修改稿收到日期:2010-08-24。

第一作者李祖胜,男,1979年生,现为苏州大学精密仪器及机械专业在读硕士研究生;主要从事智能仪表及动态测试方面的研究。

电路控制。

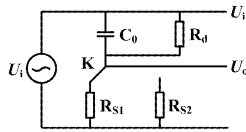


图2 静态电容测量电路

Fig. 2 Static capacitance measuring circuit

电路的阻抗 Z 可由式(1)求得：

$$Z = R + jX = \frac{R_d + R_s + \omega^2 C_0^2 R_d^2 R_s}{1 + \omega^2 C_0^2 R_d^2} - j \frac{R_d^2 \omega C_0}{1 + \omega^2 C_0^2 R_d^2} \quad (1)$$

式中： R_d 为电容的静态电阻； $\omega = 2\pi f$ ，其中， f 为外加频率信号； R_s 为开关 K 连接的 R_{S1} 或 R_{S2} 。

总电路的电压和电流的关系式为：

$$\frac{\dot{U}_i}{Z} = \frac{\dot{U}_o}{R_s} = \dot{I} \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知， \dot{U}_i 与 \dot{U}_o 相位差为 $\delta = \arctan \frac{X}{R}$ ， δ 的大小可以通过检测得出，且由式(1)可知，改变 R_s 的大小，可以列出两个方程，从而求解出 C_0 和 R_d ，这就是测量 C_0 的原理。但是由于换能器的静态电阻非常大，所以在工程上实际测量时可以不考虑 R_d 的影响，而直接测量 \dot{U}_i 与 \dot{U}_o 的相位差，则求解出：

$$C_0 = \frac{1}{\omega R_s \tan \delta} \quad (3)$$

正选信号的产生采用德州公司的 TMS320F2812 控制 AD9852 产生。TMS320F2812 的处理速度快，主频高达 150 MHz，片内自带 SRAM 和 Flash，减少了外部电路的复杂性，12 位的 ADC 转换模块，其最高转换速率可以达到 12.5 MS/s，所以可以比较精确地检测出相位差^[9]。对于相位差的检测，还可以使用专业的芯片 AD8302，这样可以提高 DSP 芯片的利用率。

1.3 换能器动态特性

由于静态电阻比较大，在动态分析时，一般不考虑静态电阻的影响，因此，根据图 1 中换能器的等效电路，可以写出电路的总导纳 Y ，并画出导纳圆图。

$$\begin{cases} Y = Y_1 + Y_0 = G + jB \\ G = \frac{R_1}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2} \\ B = \omega C_0 - \frac{\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)}{R_1^2 + \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right)^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中： Y 为电路的总导纳； Y_1 为动态导纳； Y_0 为静态导纳。则可推导出：

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

假设动态参数都为在串联谐振时的等效参数，那么由式(5)可以画出如图 3 所示的导纳圆图。图 3 中，横轴为实部 G ，纵轴为虚部 B 。

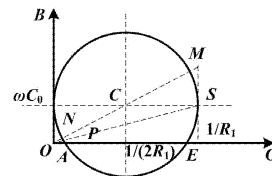


图3 导纳圆图

Fig. 3 Admittance chart

图 3 中， $C\left(\frac{1}{2R_1}, \omega C_0\right)$ 为导纳圆的圆心； $S\left(\frac{1}{R_1}, \omega C_0\right)$ 为换能器的串联谐振点； A 和 E 为导纳圆与 G 轴相交的点。 A 对应的频率是反谐振频率 f_a ， E 对应的是谐振频率 f_e ； S 对应的频率为串联谐振频率 f_s ， P 点为并联谐振频率 f_p ； M 、 N 为过原点和圆心的直线和导纳圆的交点， M 点为阻抗最小频率 f_m ， N 为阻抗最大频率 f_n 。由于压电换能器动态参数是相对于串联谐振的时候来说的，所以实际上测得的 f_a 、 f_e 、 f_m 和 f_n 并不能很好地表示一个圆。

1.4 换能器串联谐振频率的检测

换能器串联谐振频率检测电路如图 4 所示。正弦信号由 DSP 芯片控制 AD9852 产生，需要检测的信号有 U_o 、 U_i 的最大值和相位 (U_o 为测试电阻 R_{S3} 的电压， U_i 为正弦信号的电压)。测试电阻尽量选择小一点，电压的大小可以通过传感器来获得。相位检测用 AD8302 芯片在硬件部分检测，最后输入到 TMS320F2812 芯片中进行处理分析。

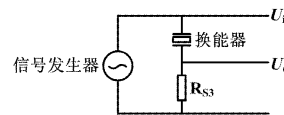


图4 动态测试电路

Fig. 4 Dynamic test circuit

首先 DSP 在 16 ~ 40 kHz 频率范围内进行频率扫描，记下电流最大值和最小值，确定换能器的谐振频率带。电流最大值的频率就是导纳圆上 M 点的频率 f_m ，最小值为 N 点的频率 f_n 。然后在所确定的频率带内寻找 U_o 和 U_i 同相位点，较小的点为 A 点的频率 f_a ，电流较大的为 E 点的频率 f_e 。换能器等效于一个电阻 R_e ， R_e 可以通过式(6)计算得到。在 E 点测出 U_i 和 U_o 的大

小,根据式(4)并结合导纳圆图在 E 点的性质,可以得出式(7)、(8)并推出式(9)。

$$R_{11} = \frac{U_i}{U_0} R_{S3} - R_{S3} \quad (6)$$

$$\frac{R_1}{R_1^2 + \left(\omega_e L_1 - \frac{1}{\omega_e C_1}\right)^2} = \frac{1}{R_{11}} \quad (7)$$

$$B = \omega_e C_0 - \frac{\left(\omega_e L_1 - \frac{1}{\omega_e C_1}\right)}{R_1^2 + \left(\omega_e L_1 - \frac{1}{\omega_e C_1}\right)^2} = 0 \quad (8)$$

$$R_1 = \frac{R_{11}}{\left(\omega_e C_0 R_{11}\right)^2 + 1} \quad (9)$$

需要指出的是,在式(9)中, R_1 并不是真正意义上的在串联谐振点的动态电阻,但是由于换能器在谐振点附近阻抗变化很小,可以近似认为导纳圆在串联谐振点附近是成立的^[10],所以可以用式(9)近似求得 R_1 的大小。另外,对于上面提到的6个特征频率,一般情况下有 $f_e > f_s > f_m$ 和 $f_n > f_p > f_a$ 。

在串联谐振时,由于动态支路的阻抗等于动态电阻 R_1 ,所以可以得出动态串联谐振频率 $f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$,结合导纳 $Y = \frac{1}{R_1} + j\omega C_0$,可以得到:

$$\frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_0} = \frac{1}{R_{S3}} \left[\frac{R_{S3} + R_1 + R_{S3}(R_1 C_0 \omega)^2 - j\omega C_0 R_1^2}{1 + (R_1 C_0 \omega)^2} \right] \quad (10)$$

由式(10)可得 \dot{U}_i 与 \dot{U}_0 的相位差为:

$$\theta = \arctan \frac{\omega C_0 R_1^2}{R_{S3} + R_1 + R_{S3}(R_1 C_0 \omega)^2}$$

扫描 f_m 与 f_e 之间的频率,实时检测 θ 的大小并利用公式计算出来的 θ 进行比较,当两者差值最小时,就认为这一点为串联谐振点。

2 试验对比

本试验的目的是为了验证用这种方法检测压电换能器谐振频率是否可行。测量一个未知参数的压电换能器,分别用 DSP 控制电路进行动态检测,并与手动检测进行比较。具体步骤为首先用 DSP 控制电路进行动态检测压电换能器的串联谐振频率, R_s 选用阻值为 $20\ \Omega$ 的精密电阻,然后按上面的方法设计相应的外围硬件电路和编程,最后检测出压电换能器的串联谐振频率 $f_0 = 19.825\ \text{kHz}$ 。

手动检测具体操作如下。首先用手动检测出静态电容为 $8.1\ \text{nF}$ (检测电路如图4所示);然后在 $16 \sim 40\ \text{kHz}$ 之间用示波器检测电流与频率的关系,记录下被测换能器各点的频率和电流的关系,如图5所示,并且列出相应

的表格,最后对测得的数据进行处理。从手动检测中可以看出,外加频率在 $19.844\ \text{kHz}$ 和 $19.931\ \text{kHz}$ 时为同相位点,在 $19.745\ \text{kHz}$ 时为电流最大点。在 $19.844\ 2\ \text{kHz}$ 和 $19.745\ 6\ \text{kHz}$ 之间用 $1\ \text{Hz}$ 进行扫描,测出电路的电流和电压的大小以及相位差,输入计算机进行导纳圆的拟合,通过拟合的导纳圆计算出换能器的串联谐振频率为 $f_0 = 19.832\ \text{kHz}$ 。

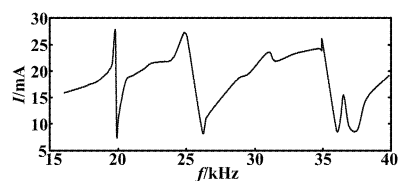


图5 电流与频率的关系

Fig. 5 Relationship between current and frequency

3 结束语

本文在分析压电换能器串联谐振频率检测方法的基础上,引入了导纳圆的分析方法;通过试验比较,分析了压电换能器串联谐振频率的动态检测结果。通过试验的比较可以看出,用 DSP 检测换能器的串联谐振频率虽然需要反复比较和检测,但可以实现压电换能器的动态检测,检测方法相对比较方便。本文方法的最大优点是使超声波电源在带负载的情况下进行动态匹配和跟踪成为可能,且大大提高了换能器的使用效率,延长了压电换能器的使用寿命。

参考文献

- [1] 马立,李艺,刘亮,等. 超声抛光的理论模型和试验分析[J]. 机械制造与自动化,2009,38(6):37-39.
- [2] 廉士良. 油田专用大功率超声波电源的设计[J]. 科技创新导报,2008(5):101.
- [3] 裴玖玲,屈百达. 基于单片机 8089 的超声波电源控制技术研究[J]. 现代电子技术,2008,31(9):102-104.
- [4] 裴玖玲,屈百达,周鹏. 基于 DSP 的超声波电源控制技术研究[J]. 电子测量技术,2008,31(3):23-23.
- [5] 马雪花,蒋鑫元. 压电换能器导纳圆图的测定[J]. 天津科技大学学报,2004,19(2):66-68.
- [6] 李继容. 导纳圆图在压电式超声波换能器中的研究[J]. 仪表技术,2007(11):62-64.
- [7] 鲍善惠. 一种直接测量压电换能器串联谐振频率和并联谐振频率的新方法[J]. 应用声学,2004,23(6):12-15.
- [8] 王艳东. 压电换能器在并联谐振频率附近的特性及自动频率跟踪的研究[D]. 西安:陕西师范大学,2006.
- [9] 孙丽明. TMS320F2812 原理及其 C 语言程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2008:274-301.
- [10] 孙波,季远,李光军,等. 功率超声换能器导纳特性检测及端匹配研究[J]. 振动测试与诊断,2002,22(4):287-289.