

一种换能器频率跟踪与振幅稳定方法的研究

屈百达,韩志刚

(江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室;江苏 无锡 214122)

摘要:针对超声波换能器工作过程中换能器的谐振频率漂移及其振幅不稳定问题,对一种同时实现振幅稳定和频率跟踪的方法进行了研究。通过正交相关法对换能器匹配网络的复阻抗幅值与相位进行分析。通过比例-积分-微分(PID)控制算法对超声波发生器输出电压的频率和幅值进行调节,从而实现换能器频率的跟踪和振幅稳定。对频率 28 kHz 的换能器进行了实验,实验表明,正交相关法和 PID 控制算法的结合能实现换能器的谐振频率跟踪和振幅稳定。

关键词:换能器;频率跟踪;振幅稳定;正交相关方法;比例-积分-微分(PID)

中图分类号:TM935 **文献标识码:**A

Research on a Method of Frequency Tracking and Vibration Stabilization for Transducer

QU Baida, HAN Zhigang

(Key Lab. of Advanced Process Control for Light Industry of Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Aiming at the problem of the resonant frequency drift and the amplitude instability of the transducer during operation, a method of achieving stable amplitude and frequency tracking simultaneously is studied. The amplitude and phase of the complex impedance of the matching network is analyzed by the orthogonal correlative method, the frequency and amplitude of the output voltage of the ultrasonic generator is regulated by the proportional-integral-differential (PID) control algorithm, then the frequency tracking and vibration stabilization is achieved. The experiment on the frequency of 28 kHz transducer is carried out and it indicates that the combination of orthogonal correlative method and PID control algorithm can achieve the frequency tracking and vibration stabilization of transducer.

Key words: transducer; frequency tracking; vibration stabilization; orthogonal correlative method; PID

0 引言

近一个世纪以来超声波的应用领域越来越广,如在医疗器械、焊接、超声萃取、废水的超声处理等领域起重要作用。在换能器工作过程中,声学负载变化导致换能器的振幅忽大忽小及换能器的发热和磨损而导致换能器的谐振频率的漂移^[1]。若换能器长时间工作在非谐振状态下,则超声波电源工作效率低,严重的会损坏换能器。目前常用的频率跟踪方法是锁相环(PLL)法,对换能器谐振频率跟踪能达到较好的效果;但却无法同时跟踪控制换能器的振幅使其振动稳定。因此研究了一种新型的控制方法,通过正交相关法对换能器复阻抗的幅值和相位

进行分析;通过比例-积分-微分(PID)控制法对超声波电源输出电压的频率和幅值进行控制,从而达到对换能器频率跟踪和振幅稳定的控制。

1 换能器匹配网络的阻抗分析

图 1 为电感 L_s 与换能器串联的等效电路图。

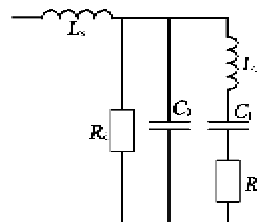


图 1 电感与换能器串联等效电路图

收稿日期:2014-01-14

基金项目:高等学校学科创新引智计划基金资助项目(B12018);江苏高校优势学科建设工程基金资助项目;江苏省产学研联合创新基金资助项目(120767)

作者简介:屈百达(1956-),男,辽宁北镇人,教授,博士,主要从事控制理论与应用,电力电子智能控制等方面的研究。韩志刚(1988-),男,山东东营人,硕士,主要从事电力电子与电力传动,电气工程等方面的研究。

图1中, R_d 为换能器的静态电阻, 通常压电换能器的 R_d 很大, 且与静态等效电容 C_0 并联, 因此在分析换能器的动态特性时, 通常将其忽略。 L_1 、 C_1 及 R_1 分别为动态电感、动态电容及动态电阻^[2]。谐振频率主要由 L_1 和 C_1 决定, 谐振频率为

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}} \quad (1)$$

图1中的电感与换能器串联等效阻抗为

$$Z = R + jX \quad (2)$$

其中

$$R = \frac{R_1}{(\omega_s C_0 R_1)^2 + 1} \quad (3)$$

$$X = \omega_s L_s - \frac{\omega_s C_0 R_1^2}{(\omega_s C_0 R_1)^2 + 1} \quad (4)$$

由式(1)可知, 当电感与换能器串联匹配时, 虚部电抗 X 为 0, 只剩实部电阻 R , 由此可见串联谐振时, 谐振阻抗主要由 R_1 和 C_0 组成。换能器中的 C_0 基本维持不变, 但 R_1 随着声负载的变化而变化, 因此 Z 会随之变化, 换能器的电流亦会产生波动, 导致换能器振幅不稳定。而 f_s 只与 L_1 与 C_1 有关, 这 2 个等效参数都会受到换能器老化和负载变化等因素的影响, 因此 f_s 会发生相应的漂移。

2 系统原理及其设计

图2为系统的总体框图。本文主要对正交相关方法的原理和实现及 PID 控制器进行分析。

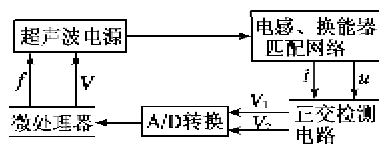


图2 系统总体框图

2.1 正交相关方法对阻抗的理论分析

假设测得电压和电流的相量形式分别为

$$U(j\omega) = Ue^{j\theta_V} \quad (5)$$

$$I(j\omega) = Ie^{j\theta_I} \quad (6)$$

由式(5)、(6)得到匹配网络的复阻抗计算式为

$$Z(j\omega) = (U/I)e^{j(\theta_V - \theta_I)} \quad (7)$$

式中: U, I 分别为测量计算得到的匹配网络的电压和电流的幅值; θ_V, θ_I 分别为测量计算得到的电压和电流的相位^[3]。

采用正交相关法分别对电压和电流的幅值及相位进行计算, 这样既可检测到电流和电压互感器采集到的有效信号, 也可降低其他频率信号及线路中

的噪声的影响。

2.1.1 正交相关方法原理

图3为正交相关法的原理框图。利用正交相关法分别对电压、电流的幅值和相位进行计算。

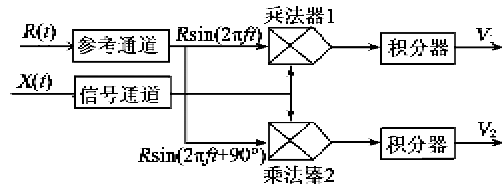


图3 正交相关计算方法框图

首先对电压进行正交相关分析, $X(t)$ 为匹配网络两端的电压信号, 且

$$X(t) = U\sin(2\pi ft + \theta_U) + n(t) \quad (8)$$

式中: $n(t)$ 为有效电压信号中夹杂的噪声信号; $R(t)$ 为参考信号, 经参考通道后分成相位差为 90° 的两路信号, 即与待检测信号 $X(t)$ 同频率的正交的参考信号^[4]。 V_1, V_2 分别为 $X(t)$ 与参考信号 $R(t)$ 的互相关函数。因 $n(t)$ 与参考信号无关, 则 $n(t)$ 与 $R(t)$ 的互相关函数为 0, 因此输出的互相关函数项只含有参考信号和有效输入信号, 可有效地将噪声信号滤除。图3中正交相关的输出相关函数为

$$V_1 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t)R\sin(2\pi ft) dt = \frac{UR \cos \theta_U}{2} \quad (9)$$

$$V_2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T X(t)R\sin(2\pi ft + 90^\circ) dt = \frac{UR \cos \theta_U}{2} \quad (10)$$

由式(9)、(10)得到电压的幅值和相位角分别为

$$U = 2 \sqrt{V_1^2 + V_2^2} / R \quad (11)$$

$$\theta_U = \arctan(V_2 / V_1) \quad (12)$$

对匹配网络的电流信号的正交相关分析与电压同理, 假定 $X(t)$ 为换能器的电流信号, 且

$$X(t) = I\sin(2\pi ft + \theta_I) + m(t) \quad (13)$$

式中 $m(t)$ 为电流信号中的噪声。上、下积分器的输出分别为 V_3, V_4 , 得到电流的幅值和相位分别为

$$I = 2 \sqrt{V_3^2 + V_4^2} / R \quad (14)$$

$$\theta_I = \arctan(V_4 / V_3) \quad (15)$$

在分别对电压和电流信号进行正交相关分析的过程中, $R(t)$ 为同一参考信号, $R(t)$ 由微控制器产生的与电流和电压信号同频率的方波信号。 θ_U, θ_I 分别为电压和电流以参考信号为基点的相位, 通过

式(11)~(15)中的 U 、 I 、 θ_U 、 θ_I 可计算出阻抗 Z 的幅值和相位分别为

$$Z = U/I \quad (16)$$

$$\theta = \theta_U - \theta_I \quad (17)$$

2.1.2 正交相关器的设计

正交相关器主要由信号通道, 2 个相同的乘法器和积分器等 3 部分组成^[5]。

信号通道由四阶 Butterworth 有源带通滤波器构成, 对传感器采集到的电压、电流信号中带有其他频率的噪声信号进行适当滤除, 并对输入的有效信号进行适当放大。图 4 为用 filterlab 软件设计的四阶有源带通滤波器。其通带中心频率为 28 kHz, 上、下限临界频率分别为 25 kHz 和 32 kHz, 衰减斜率为 -80 dB/decade, 经 MULTISIM 仿真其滤波效果很好^[6]。

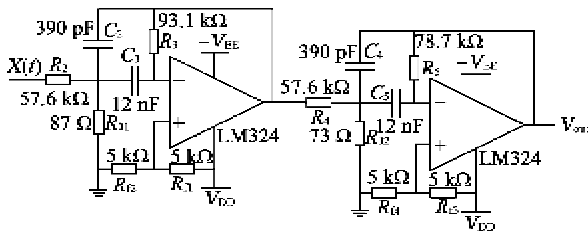


图 4 四阶有源带通滤波电路

V_{out} 及参考信号均为正弦信号或方波信号, 其有正有负, 所以要设计采用双平衡四象限模拟乘法器。图 5 为所设计的乘法器电路图。电阻 R_V 为负反馈电阻, R_S 可调节镜像电流的大小, $Q_1 \sim Q_8$ 均为 NPN 型三极管 2N2222。输入为信号通道的输出 V_{out} 和参考信号 $R_x(t)$; 输出 $u = KV_{out}R_x(t)$, u 包含直流和交流分量 2 个分量, 直流分量和交流分量分别为原信号的平均值和二倍频。

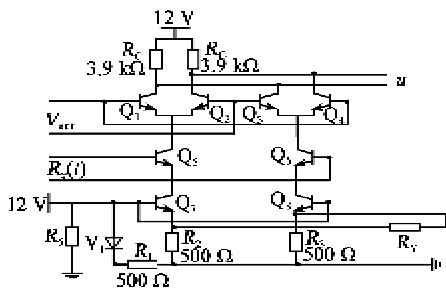


图 5 乘法器电路图

积分器采用由 filterlab 软件设计的四阶 Butterworth 有源低通滤波器, 将乘法器输出的二倍频的交流分量滤除, 使直流分量得以输出。图 6 为截止频率 1 kHz 四阶低通滤波器电路图, 由 2 个二阶

低通滤波器组成。

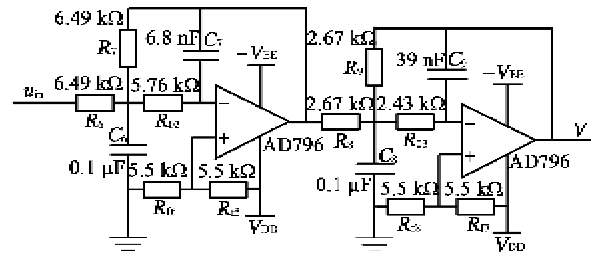


图 6 四阶低通有源滤波器

2.2 PID 控制模块的实现

系统采用数字增量式 PID 控制算法, 由 TMS320F28335 来实现, 分别以匹配网络的复阻抗相位和电流为控制对象: 通过对换能器阻抗的相位进行 PID 调节, 使相位趋于零, 从而使换能器达到谐振; 通过调节输出电压使换能器的电流保持稳定, 从而使换能器振动幅度保持稳定。

图 7 为 PID 控制器原理图。此 PID 控制器主要由谐振跟踪环和振动稳定环 2 个控制环组成。

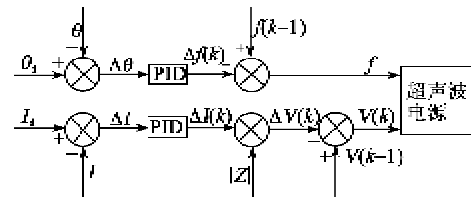


图 7 PID 控制器原理图

图 7 中, θ_d 和 θ 分别为换能器的给定目标相位为 0 和测得的阻抗相位, $\Delta\theta$ 为阻抗相位偏差, I_d 为给定的目标电流, I 为测得的换能器电流, ΔI 为电流偏差。 $V(k-1)$ 和 $f(k-1)$ 分别为前一时刻换能器工作频率和电压幅值。采用增量式数字 PID 控制算法对频率和电压进行控制^[7]。频率为

$$\Delta f(k) = K_{P1} \Delta e(k) + K_{I1} e(k) + K_{D1} [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (18)$$

式中: K_{P1} , K_{I1} , K_{D1} 分别为 PID 频率控制器的比例系数, 积分系数及微分系数, 且

$$e(k) = \Delta\theta(k) \quad (19)$$

$$\Delta e(k) = \Delta\theta(k) - \Delta\theta(k-1) \quad (20)$$

$$\Delta V(k) = U(k) - U(k-1) = |Z| \{ K_{P2} \Delta c(k) + K_{I2} c(k) + K_{D2} [\Delta c(k) - \Delta c(k-1)] \} \quad (21)$$

式中: K_{P2} , K_{I2} , K_{D2} 分别为 PID 电流控制器的比例系数, 积分系数和微分系数, 且

$$c(k) = \Delta I(k) \quad (22)$$

$$\Delta c(k) = \Delta I(k) - \Delta I(k-1) \quad (23)$$

3 实验结果及结论

对频率为 28 kHz, 静态电容为 5 600 pF 的换能器进行了实验。图 8 为未加正交相关控制器和 PID 控制器时换能器匹配网络两端的电压和负载电流波形, 实验过程中发出不规律的噪声。当前超声波电源输出频率下, 匹配网络呈现感性, 电流信号滞后电压信号, 换能器工作于非谐振状态且振幅不稳定。图 9 为带有正交相关器和 PID 控制器时换能器匹配网络两端的电压和负载电流波形。

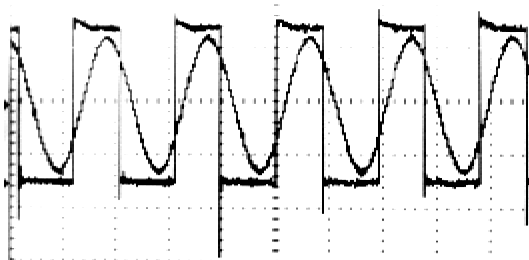


图 8 换能器工作非谐振状态

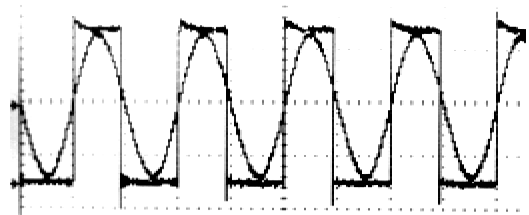


图 9 换能器工作在谐振状态

实验结果表明, 将根据换能器参数及正交相关原理设计的正交相关器和 PID 控制器加入到开环超声波电源中后, 能很好地对换能器的谐振频率进行跟踪, 同时能保持换能器振幅的稳定。

4 结束语

频率跟踪和振幅稳定是超声波电源实现频率和功率闭环控制中的重要环节。本文通过对正交相关方法进行分析, 且对其相应的硬件电路进行了设计及 PID 控制算法的编程, 不仅实现了对换能器频率的跟踪, 且实现了换能器振幅的稳定, 提高了整个超声波系统的工作效率, 能有效延长换能器的使用寿命,

为超声波系统中实现对换能器频率跟踪和振幅稳定提供了一种新的有效控制方法。

参考文献:

- [1] 张继东. 一种超声波电源的频率搜索与跟踪系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(10): 2354-2356.
ZHANG Jidong. Design of frequency searching and tracking system on ultrasonic power supply[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(10): 2354-2356.
- [2] 李祖胜, 李艺, 赵明, 等. 压电换能器谐振频率动态检测的研究[J]. 自动化仪表, 2011, 32(5): 53-55.
LI Zusheng, LI Yi, ZHAO Ming, et al. Study on dynamic detection of resonant frequency for piezoelectric transducers[J]. Process Automation Instrumentation, 2011, 32(5): 53-55.
- [3] KUANG Y, JIN Y, COCHRAN S, et al. Resonance tracking and vibration stabilization for high power ultrasonic transducers[J]. Ultrasonics, 2014, 54: 187-194.
- [4] 陆秋平. 基于相关原理的信号检测方法及其应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [5] 高爱华, 孙金荣, 秦文昆. 微弱激光信号的数字相关检测技术[J]. 西安工业大学学报, 2010, 30(1): 5-8.
GAO Aihua, SUN Jinrong, QIN Wengang. Investigation of a digital correlation for slight laser signal detection[J]. Journal of Xi'an Institute of Technology, 2010, 30(1): 5-8.
- [6] 杨海峰, 邢孟江. 具有三阶谐振腔的 S 波段 LTCC 带通滤波器设计[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2012, 26(6): 98-101.
YANG Haifeng, XING Mengjiang. A design of S-band LTCC passband filter with three resonant cavities[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2012, 26(6): 98-101.
- [7] 历风满. 数字 PID 控制算法的研究[J]. 辽宁大学学报: 自然科学版, 2005, 32(4): 367-370.
LI Fengman. The research of controlling arithmetic for figure PID[J]. Journal of Liaoning University: Natural Sciences Edition, 2005, 32(4): 367-370.