

◇ 研究报告 ◇

超声换能器并联谐振频率的复合式跟踪方法研究*

刘丽晨 杨明[†] 李世阳 庄晓奇 李奇磊

(上海交通大学仪器科学与工程系 上海 200240)

摘要 为了使超声换能器适应变化比较剧烈的负载,本文通过分析超声换能器在并联谐振频率附近工作时的频率特性和实际需求特点,利用变压器初级匹配方法得到了更好的频率特性,并对比了换能器空载和带负荷情况下的阻抗特性曲线,提出了复合式自动频率跟踪方法,空载时找到超声换能器最小电流的对应的频率点,加载过程中利用比例积分微分算法实现频率的快速跟踪。并对超声换能器在不同负载时的功率输出进行了实验,结果表明,复合式频率跟踪方法可以稳定地跟踪到超声换能器的并联谐振频率,能实现超声换能器的功率自调节,对提高换能器的工作效率和负荷适应能力具有实际的指导意义和应用价值。

关键词 复合式跟踪, 并联谐振频率, 变压器初级匹配, 比例积分微分算法

中图分类号: TB553 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-310X(2015)01-0045-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2015.01.007

Parallel resonant frequency composite tracking of piezoelectric transducer*

LIU Lichen YANG Ming[†] LI Shiyang ZHUANG Xiaoqi LI Qilei

(Department of Instrument Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract In order to make the ultrasonic transducer adapt to fast-changing load, by analyzing the frequency characteristics of ultrasonic welding transducer near its parallel resonant frequency and the practical demand, a primary matching method was developed to get a better frequency characteristics. Then, comparisons of the transducer impedance curve between on load and no-load were made. The composite tracking strategy was that the frequency with the minimum current was found when the transducer had no load and was quickly tracked with the proportional integral derivative algorithm when it had load. An experiment about the output power of ultrasonic welding transducer under different load was made. The research results show the tracking method can track the parallel resonance frequency of ultrasonic transducer stably and reflect the characteristics of ultrasonic transducer automatic power adjustment. It has practical significance and application value for ultrasonic transducer to improve the efficiency and adaptability.

Key words Composite tracking, Parallel resonance frequency, Transformer primary matching, Proportional integral derivative algorithm

2014-04-01 收稿; 2014-05-10 定稿

*国家自然科学基金项目 (51275287)

作者简介: 刘丽晨 (1989-), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向: 超声焊接电源。

[†] 通讯作者 E-mail: myang@sjtu.edu.cn

1 引言

超声换能器是一种把超音频的电能转化为机械能的装置,被广泛应用于超声波清洗、超声波焊接、超声化学等工业实际中^[1-2]。对于一些负载变化比较大的场合^[3],希望换能器的吸收功率能够随负载的变化而变化。当空载时换能器输出功率较低,而负载增大时,换能器能输出较大功率。因此,超声换能器是否工作在谐振状态对于超声电源能否正常工作起着至关重要的作用。

传统的跟踪换能器串联谐振频率的方法很多,如基于最大电流^[4]、基于电压和电流的相位差^[5]等,但在实际使用中发现,在负载变化剧烈而频繁的场所,工作在串联谐振频率的超声换能器因较大的工作电流使换能器发热量大,导致换能器性能下降甚至损坏。

研究表明换能器工作在并联谐振频率处具有功率自动调节功能^[6-8]。目前,跟踪超声换能器并联谐振频率的方法并不多,且都是基于变压器次级匹配的频率跟踪方法,而在实际工作中,这种匹配方法并不能得到很好的正弦波。文献[9]提出了利用锁相环实现频率的自动跟踪,通过鉴相器控制压控振荡器,实现电压和电流的同向。这种方法必须仔细调整电路参数才能达到满意的效果,且有可能出现失锁的现象。本文研究了工作于并联谐振频率的超声换能器的阻抗特性曲线,在实现变压器初级匹配的情况下,针对换能器空载和有负荷时主回路电流的变化情况,提出了复合式自动频率跟踪方法,空载时扫频定位并联谐振点,带载时利用比例积分微分(PID)算法的快速性和稳定性跟踪到换能器的并联谐振点。

2 复合式频率跟踪方法的工作原理

2.1 换能器阻抗和主回路电流变化分析

如图1,是超声换能器常用的等效电路^[10],其中 C_0 为超声换能器的静态电容, C_1 为动态电容, L_1 为动态电感, R_1 为动态电阻。

为使超声波发生器的输出功率高效地传输给换能器,必须进行换能器的电端匹配。理论上,超声电源的输出阻抗为纯阻性^[11],故一般采用变压器次级匹配法实现共轭匹配,但在实际实验中,由于变压

器的非理想性,这种匹配方法并非理想,匹配后的波形毛刺现象严重,正弦波有较大畸变,带宽频率范围很窄,无法适应负载剧烈变化的频率跟踪要求。本文采用了变压器初级匹配的方法^[12],即在变压器初级串联电感或电容实现换能器的电端匹配,如图2为本文采用的变压器初级匹配的原理图, X 为初级串联匹配元件, Z_a 为输出变压器和换能器的整体输入阻抗,当换能器和输出变压器等确定后, Z_a 的电抗性质由换能器的并联谐振频率决定。若 Z_a 在并联谐振频率附近呈感性,则 X 为一容量适宜的电容;反之,应取一合适电感实现共轭匹配。

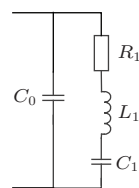


图1 超声换能器的等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of ultrasonic transducer

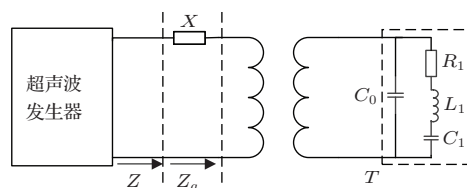


图2 换能器的初级匹配原理图

Fig. 2 Theory of the primary series matching of the transducer

实验中采用的换能器参数为: $C_0 = 4.66 \text{ nF}$, $L_1 = 478.82 \text{ mH}$, $C_1 = 0.033 \text{ nF}$, $R_1 = 67.10 \Omega$, 其阻抗特性曲线如图3中实线所示。其并联谐振频率为 $f_p = 40080 \text{ Hz}$ 。相对于谐振频率时的阻抗 67.93Ω ,并联谐振频率下的阻抗显著增加为 $10.24 \text{ k}\Omega$ 。

本文将变压器和换能器看成一个整体负载,利用阻抗分析仪测量在换能器并联谐振频率 $f_p = 40080 \text{ Hz}$ 处的阻抗特性, $Z_a = 763.084 - j387.494$,因此需要串联一个电感 $L = 1.54 \text{ mH}$,即图2中变压器初级串联的元件 $X = L = 1.54 \text{ mH}$,从而使整体对外呈现纯阻性。经仿真,换能器初级匹配后,当工作频率在 $39000 \text{ Hz} \sim 41500 \text{ Hz}$ 范围内变化时,换能器的阻抗特性曲线如图3中的虚线。从图3中可

以看出,与匹配前阻抗特性对比,匹配后,并联谐振频率距离两边的最小阻抗频率较远一些,在扫频时,不会导致回路中电流激增,造成换能器的损坏,这为基于最小电流法跟踪并联谐振频率提供的更好的外界条件。

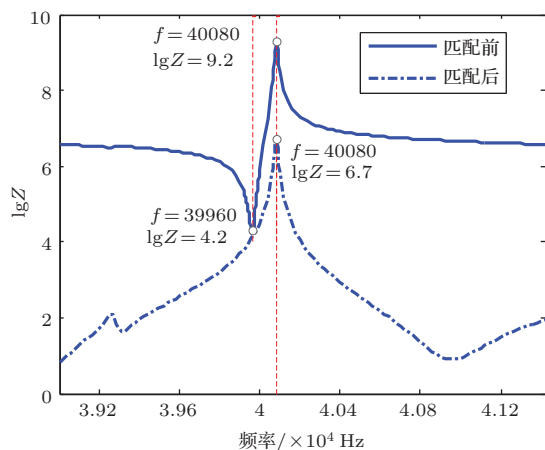
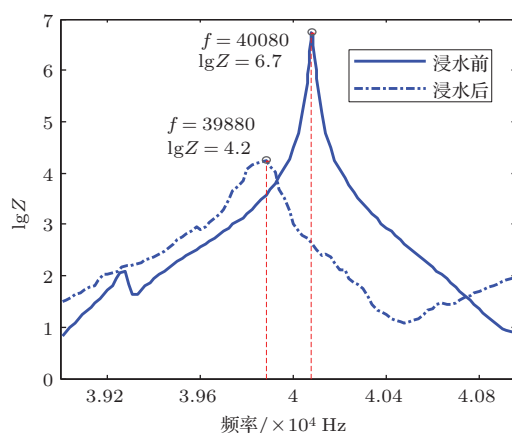


图3 匹配前后的阻抗特性曲线

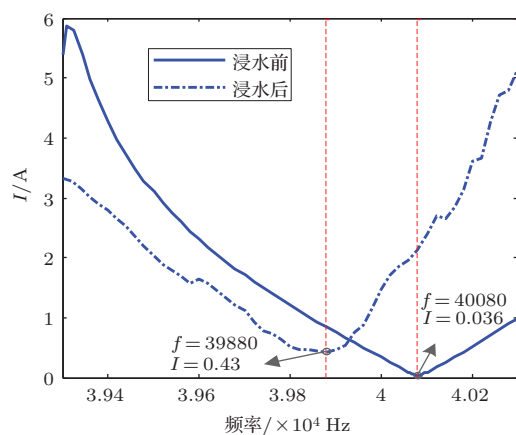
Fig. 3 Curve of impedance characteristics before and after matching

为了实验方便,本文采用了液体负载—水作为换能器的负载,当换能器浸水即加载后,整体的阻抗特性曲线图4(a)从曲线1偏移到2,显然,它的并联谐振频率从40080 Hz 偏移到39880 Hz。图4(b)可以直观地看到主回路电流随频率的变化趋势,换能器空载时主回路电流在换能器的并联谐振频率40080 Hz 处的电流最小,换能器浸水后,电流曲线从1偏移到2,电流最小点变为39880 Hz 处,这一结果表明,利用最小电流法跟踪到换能器的并联谐振频率是可行的。

一般情况下,我们认为换能器空载时由于工具受损和温度变化引起的频率漂移属于缓慢变化,而加工时由于负载和刚度变化引起的频率变化属于瞬间变化,必须随时改变激励频率,否则会造成换能器的损坏。从图4(b)中的电流变化曲线可以看出,换能器空载时,电流变化较为平滑稳定,我们可以采用小范围内扫频,找到并联谐振频率,但是换能器浸水后,电流变化有所波动,如果采用空载时的跟踪方法,容易使换能器的工作状态不稳定,出现输出电压跳变,对换能器的工作性能以及整个系统的稳定性产生不良影响。所以本文在换能器带载后选取不同的方法实现跟踪,即采用了复合式跟踪方法。



(a) 换能器浸水前后lgZ-f



(b) 换能器浸水前后 I-f

图4 换能器浸水前后阻抗特性及主回路电流变化曲线

Fig. 4 Curve of impedance characteristics and main circuit's current before and after immersion

2.2 控制策略

传统的超声电源频率自动跟踪存在一些不足。跟踪并联谐振频率一般采用锁相环的方法,这种方法线路复杂、控制精度不高、过渡响应时间长,甚至可能会出现失锁现象;常规的基于电流跟踪频率的方法,主循环中一直都在变化频率,寻找最佳工作点,这种方法容易使换能器工作不稳定,使加工质量受到影响。本文提出复合式自动频率跟踪方法,可以很好地解决传统跟踪控制方法的不足,利用内核为Cortex-M3的STM32微控制器控制算法实现,可靠性高。STM32实时检测电流大小,若换能器加载,采用增量式PID控制实现频率的自动跟踪,利用比例环节加快调节,减小偏差;利用积分环节消除静态误差;利用微分环节改善系统的动态性能。经

典的增量式比例积分微分算法 (PID 算法) 方程为

$$\begin{aligned} \Delta u(n) &= u(n) - u(n-1) \\ &= K_p[e(n) - e(n-1)] + K_p \frac{T}{T_I} e(n) \\ &\quad + K_p \frac{T_D}{T} [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)], \quad (1) \end{aligned}$$

其中, K_p 为比例系数, T_I 为积分常数, T_D 为微分常数。

控制过程为换能器加载后, 若电流偏差 $e(n)$ 超过一定值, 则启动 PID 控制器, 输出频率偏差量 $\Delta u(n)$ 到 STM32, STM32 经过计算后输出系统修正后的频率, 再检测电流计算偏差量, 直到偏差量在允许范围内。

3 复合式自动频率跟踪的实现

系统采用 ST 公司的 STM32f103zet6 为控制电路的核心, 通过软件实现控制算法。主要包括信号采集及预处理程序、显示子程序、通信和保护子程序等。本文设计的超声电源的主要组成结构如图 5 所示。

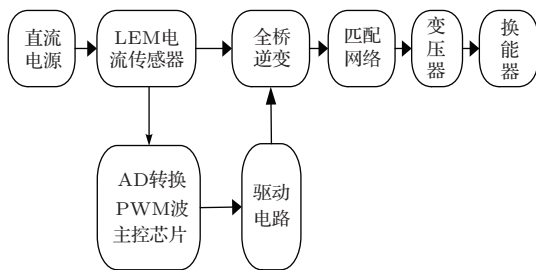


图 5 电流反馈式超声电源结构图

Fig. 5 Block diagram of ultrasonic welding power with a current feedback frequency tracking

如图 5 所示, 利用主回路中的 LEM 电流传感器测量主回路中的电流, AD 转换后给主控芯片, STM32 通过比较, 找到电流最小值对应的频率点, 通过改变其高级定时器的自动重新装载寄存器 TIMx_ARR 和捕获/比较寄存器 TIMx_CCRx 的值改变输出 PWM 波的频率, 通过驱动电路给全桥逆变电路, 实现换能器工作频率的调整。在加工过程中或随工作温度的升高, 主回路电流升高, 需要减小频率使换能器始终工作在并联谐振频率处。本文在调试过程中, 空载时首先使寄存器 TIMx_ARR 和 TIMx_CCRx 值为 0x702, 即输出频率从 40100

Hz 开始, 先以 20 Hz 为步长减小频率, 并比较当前电流和上次电流, 找到 $I_1 > I_2$ 且 $I_2 < I_3$ 对应的频率 f_1 和 f_3 , 在 f_1 和 f_3 之间进行频率细调, 以 5 Hz 为步长改变频率, 从而寻找空载时最小电流对应的频率点; 换能器加载后, 根据基本算式 (1), 采用增量式 PID 算法快速跟踪到换能器的并联谐振频率, 同时改善系统的动态性能和稳态精度。

整个复合式频率自动跟踪方法通过主控芯片 STM32 程序语言实现。换能器空载时通过小范围扫频修正换能器的初始电流和初始频率; 带载时, 如果当前电流 I_p 相对于上次电流 I_l 变化超过一定阈值 ζ , 则计算比例项 $\Delta f_p(k)$, 积分项 $\Delta f_i(k)$ 和微分项 $\Delta f_d(k)$, 累加得到频率变化量 $\Delta f(k)$, 从而得到当前频率 f_p , 这个过程一直进行, 直到找到换能器的并联谐振频率为止, 整个跟踪过程采用了复合式频率跟踪方法, 使超声电源可靠稳定地工作。图 6 为软件控制流程图。

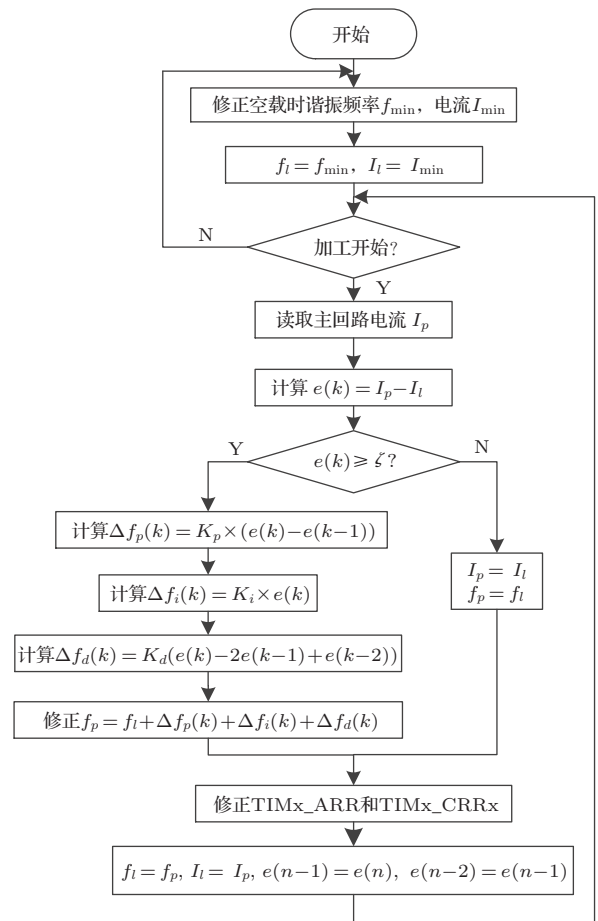


图 6 频率跟踪程序流程图

Fig. 6 Flow chart of frequency tracking

4 实验及讨论

为了验证系统跟踪并联谐振频率的稳定性和跟踪效果,同时考虑到液体负载和固体负载理论上可以采用相同的公式近似表示^[13],为了实验方便,实验中用水作为换能器的负载,用换能器浸水深度变化模拟负载的变化情况。实验装置示意图如图7所示。本文在直流电源电压为150 V的情况下,记录了超声换能器分别在空负载和浸水深度 d 为2 cm情况下频率、主回路电流以及功率随换能器工作时间的变化,见表1。

表1 跟踪方法的稳定性
Table 1 Stability of the tracking

时间 t (min)	空气中			浸水深度 $d = 2$ cm		
	频率 f (Hz)	电流 I (A)	功率 P (W)	频率 f (Hz)	电流 I (A)	功率 P (W)
0	40040	0.093	8	39982	1.355	136
5	40032	0.090	8	39964	1.166	134
10	40029	0.095	9	39954	1.135	134
15	40013	0.097	9	39944	1.177	140
20	40000	0.102	10	39942	1.164	137

从表1中可以看到,前20 min内换能器的输出功率基本不变,说明利用本文的复合式频率跟踪方法,换能器工作基本稳定。表2记录了超声换能器在不同浸水深度下的工作频率以及输出功率。浸水深度越深,换能器的负载越大^[13],根据 $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$,等效质量 m 越大, f 越小,所以并联谐振频率越小,而在并联谐振频率附近,换能器负载越大,其输出功率越大^[8]。表2中的实验结果可以看出这一结论:随浸水深度的增加,系统的工作频率降低,换能器输出功率增大,即从表中可以看出超声换能器工作在并联谐振频率下的功率自调节能力。表明本文的跟踪方法得到了很好的跟踪效果。

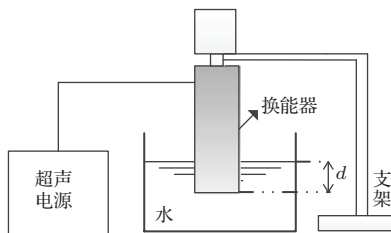


图7 实验示意图

Fig. 7 Schematic diagram of experiment

表2 换能器在并联谐振时的功率自调节能力
Table 2 Power self-adjusting ability of transducer with parallel resonance

浸水深度 d (cm)	频率 f (Hz)	功率 P (W)
1	40020	95
2	39982	134
3	39977	150
4	39949	171
5	39929	186
6	39870	237
7	39841	293

5 结论

本文在研究超声换能器的阻抗特性曲线的基础上,采用了变压器初级匹配,比较了换能器空载和带载情况下的阻抗特性曲线变化和主回路电流的变化,提出了换能器空载和带载需采用不同的跟踪方法,并提出了具体的跟踪策略。实验结果表明这种复合式的跟踪方法可以稳定地跟踪到换能器的并联谐振频率。

参 考 文 献

- [1] 林书玉. 超声技术的基石——超声换能器的原理及设计[J]. 物理, 2009, 38(3): 141–148.
LIN Shuyu. Foundations of ultrasonic technology—the theory and design of ultrasonic transducers[J]. Physics, 2009, 38(3): 141–148.
- [2] 王建国. 功率超声技术的现状与展望[J]. 声学技术, 1997, 16(1): 46–48.
WANG Jianming. Present status and prospect of power ultrasonic technology[J]. Acoustic Technique, 1997, 16(1): 46–48.
- [3] 蒋贻龙, 王建荣, 江乃杰, 等. 一种新颖的超声波塑料焊接机[J]. 声学技术, 1988, 7(3): 14–18.
JIANG Yilong, WANG Jianrong, JIANG Naijie, et al. A novel ultrasonic plastic welding machine[J]. Technical Acoustics, 1988, 7(3): 14–18.
- [4] 董惠娟, 张广玉, 董玮, 等. 压电超声换能器电端匹配下的电流反馈式频率跟踪[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(3): 115–122.
DONG Huijuan, ZHANG Guangyu, DONG Wei, et al. Current feedback frequency tracking control with matching of piezoelectric[J]. Journal of Harbin institute of technology, 2000, 32(3): 115–122.
- [5] 杨景卫, 曹彪, 尹天罡. 基于 DSP 控制的超声金属焊接电源[J]. 焊接学报, 2012, 33(7): 29–32.

- YANG Jinwei, CAO Biao, YIN Tiangang. Ultrasonic metal welding power source based on DSP[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2012, 33(7): 29–32.
- [6] SHOH A. Apparatus for limiting the motional amplitude of an ultrasonic transducer: US Patent 3, 443, 130[P]. 1969.
- [7] SHOH A. Welding of thermoplastics by ultrasound[J]. Ultrasonics, 1976, 14(5): 209–217.
- [8] 鲍善惠, 王艳东. 压电换能器在并联谐振频率附近特性的研究[J]. 声学技术, 2006, 25(2): 165–168.
- BAO Shanhui, WANG Yandong. Behavior of piezoelectric transducer at frequencies near parallel resonance[J]. Technical Acoustics, 2006, 25(2): 165–168.
- [9] 鲍善惠. 用锁相环电路跟踪压电换能器并联谐振频率区[J]. 应用声学, 2001, 20(3): 1–5.
- BAO Shanhui. Tracking the parallel resonance frequency region of the piezoelectric transducer by the phase-locked loop circuit[J]. Applied Acoustics, 2001, 20(3): 1–5.
- [10] 林书玉. 超声换能器的原理及设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [11] 林书玉, 张福成. 压电超声换能器的电端匹配电路及其分析[J]. 压电与声光, 1992, 14(4): 29–38.
- LIN Shuyu, ZHANG Fucheng. Analyses of Matching Circuits of Piezoelectric Ultrasonic Transducers[J]. Piezoelectrics & Acoustics, 2001, 20(3): 1–5.
- [12] 武剑, 董惠娟, 张松柏, 等. 压电超声换能器初级串联匹配新方法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(6): 1641–1645.
- WU Jian, DONG Huijuan, ZHANG Songbo, et al. Novel primary series matching scheme for piezoelectric ultrasonic transducer[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2009, 39(6): 1641–1645.
- [13] 林书玉. 夹心式功率超声压电换能器负载特性研究[J]. 陕西师范大学学报, 2002, 30(2): 29–34.
- LIN Shuyu. Load characteristics of high power sandwich piezoelectric ultrasonic transducers[J]. Journal of Shaanxi Normal University, 2002, 30(2): 29–34.