

# 基于最小电压法的超声换能器谐振频率自动跟踪\*

杜劲超<sup>†</sup> 罗辞勇 肖洪伟 周洪宇

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 400044)

**摘要** 首先分析了最大电流法跟踪超声换能器谐振频率的原理及应用范围。研究了基于由串联电感和并联电容匹配电路下,不同频率时换能器两端电压电流的变化规律。研究表明在串联电感和并联电容匹配电路下发生谐振时,换能器两端的电压最小而电流并非最大。由此形成了采用最小电压法跟踪谐振频率的自动跟踪策略,并给出了该方法的具体实施步骤。论文研究结果为换能器谐振频率的自动跟踪方法提供了新的选择。

**关键词** 超声换能器, 频率跟踪, 最小电压法, 匹配电路

**中图分类号:** TB553

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-310X(2013)05-0336-05

## The minimum voltage method for resonant frequency automatic tracking of ultrasonic transducers

DU Jinchao LUO Ciyong XIAO Hongwei ZHOU Hongyu

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract** The principle and application of maximum current method to track resonant frequency of an ultrasonic transducer were analyzed at first. Based on the series inductance and shunt capacitance matching circuit, the voltage and current of the transducer over different frequencies were studied. Research results show that when resonance occurs under the series inductance and shunt capacitance matching circuit, the voltage of the transducer is the smallest and the current is not the largest. Therefore the minimum voltage method for automatic tracking resonant frequency was proposed and detailed implementation steps were presented. This research result provides a new choice for automatic tracking resonant frequency of the ultrasonic transducer.

**Key words** Ultrasonic transducer, Frequency tracking, The minimum voltage method, Matching circuit

2013-02-25 收稿; 2013-03-22 定稿

\*国家大学生创新性实验计划项目(1210611021)

作者简介: 杜劲超 (1991-), 男, 河南郑州人, 本科生, 研究方向: 超声换能器。

罗辞勇 (1973-), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师。

肖洪伟 (1991-), 男, 本科生。

周洪宇 (1991-), 男, 本科生。

<sup>†</sup>通讯作者: 杜劲超, E-mail: 1363015174@qq.com

### 1 引言

超声波换能器是指将超声频的交变电能通过换能器转换成高频机械振动，超声波换能器广泛应用于超声波电机、超声波清洗以及超声波焊接等工业实际中。为保证超声电能有效地传输给压电超声换能器，必须在超声波发生器与换能器之间设置匹配电路，用以改变换能器的有关参数使其满足超声波发生器的要求<sup>[1]</sup>，通过匹配电路，一方面调节换能器阻抗，使换能器尽量接近纯阻状态，以减少无功分量，另一方面改变换能器电路的阻抗，使之与电源达到阻抗匹配，保证换能器获得最大的电功率<sup>[2]</sup>。

在超声加工中，换能器受到环境的影响，谐振频率发生漂移，故超声发生器实时跟踪换能器的谐振频率至关重要。目前，频率跟踪的方式有很多，如：跟踪系统的最大电流、最大功率、相位、最大导纳等<sup>[3]</sup>。文献[4]采用相位跟踪方法，采用高频采样电路获得换能器两端的电压电流波形，通过 FFT 算法计算出相位，基于 PI 算法实现相位的闭环控制（目标相位为 0），但是该方法运算量大，对硬件电路要求很高，控制效果不理想。文献[5]由串联电感构成的匹配电路，跟踪系统的最大电流，方法比较简单。然而研究表明对于不同的匹配电路，频率跟踪的方法将受到限制；对于由串联电感构成的匹配电路，上述频率跟踪的方法是适用的，而对于由串联电感和并联电容组成的匹配电路，跟踪系统的最大电流、最大导纳等方法不再适用。本文在由串联电感和并联电容组成的匹配电路上开展谐振频率的自动跟踪研究，研究发现在此匹配电路条件下，发生谐振时电流并非最大，而是电压最小，由此形成了基于最小电压反馈法进行谐振频率的自动跟踪策略。

### 2 最大电流法跟踪谐振频率的原理及应用范围

电流反馈式频率跟踪是基于谐振状态下换能器阻抗最小、回路电流最大、搜索电流最大值的跟踪方案。如图 1(a)所示电路中，图中  $C_0$  为静态电容， $C_1$ 、 $L_1$ 、 $R_1$  分别为动态电容、动态电感和动态电阻，匹配电路由电感  $L$  构成。换能器工作于谐振状态时，系统的输入阻抗为

$$Z = \frac{R_1}{1 + (\omega_s C_0 R_1)^2} + j \left( \omega_s L - \frac{\omega_s C_0 R_1^2}{1 + (\omega_s C_0 R_1)^2} \right), \quad (1)$$

谐振角频率为

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}. \quad (2)$$

此时的等效电路如图 1(b)所示，因  $L_1$  和  $C_1$  发生串联谐振，而导致整个回路中阻抗最小，因此回路电流最大。在谐振状态时，通过匹配电感  $L$  的作用，抵消换能器等效电路中的容抗部分，使发生器输出端为纯电阻负载，发生器输出功率全部转换为换能器的有功功率。因此匹配电感  $L$  应取值为

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

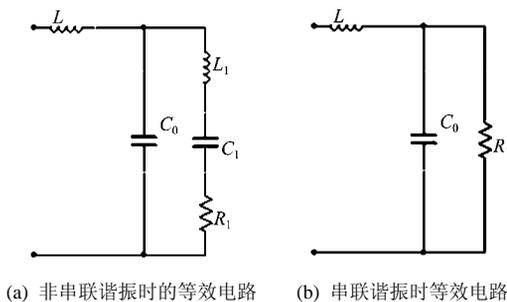


图 1 串联电感匹配等效电路

实验中使用的换能器等效参数为： $C_0=2.3 \text{ nF}$ ， $L_1=188.32 \text{ mH}$ ， $C_1=0.1763 \text{ nF}$ ， $R_1=48.33 \Omega$ ，谐振频率为： $f_s=27.62 \text{ kHz}$ ，根据公式 (3)，可得匹配电感值为： $L=10.9 \mu\text{H}$ 。从 26.5~28 kHz 改变发生器的频率，发生器输出端电抗的变化见图 2，从图中可以看出，在串联谐振频率点处，阻抗值最小，此时换能器的输入电流达到最大值，验证了在串联电感作

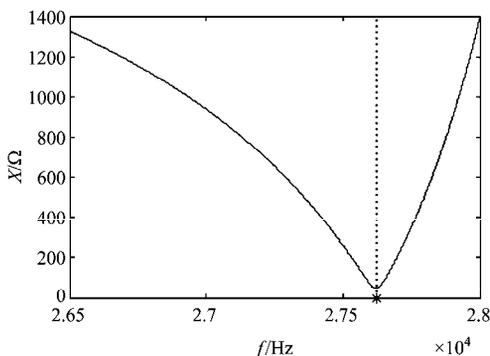


图 2 串联电感匹配下发生器两端阻抗变化曲线

为匹配电路时通过最大电流法跟踪谐振频率的正确性。

然而,在实验过程中发现,串联电感匹配电路存在着不足,一方面滤波效果不够好,波形毛刺现象严重,正弦波有较大的畸变,另一方面,单电感匹配难以实现发生器与负载的阻抗匹配,难以使换能器工作在理想的状态。通过理论分析和实验验证,使用串联电感和并联电容的匹配电路可以达到更好的匹配效果,实现理想匹配。

串联电感和并联电容的匹配电路见图 3(a),其中  $L$ 、 $C$  构成匹配电路,发生谐振时的等效电路如图 3(b),此时系统的输入阻抗为

$$Z = \frac{R_1}{1 + (\omega_s C' R_1)^2} + j \left( \omega_s L - \frac{\omega_s C' R_1^2}{1 + (\omega_s C' R_1)^2} \right), \quad (4)$$

其中:

$$C' = C + C_0, \quad (5)$$

谐振角频率为

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}}, \quad (6)$$

有功电阻为

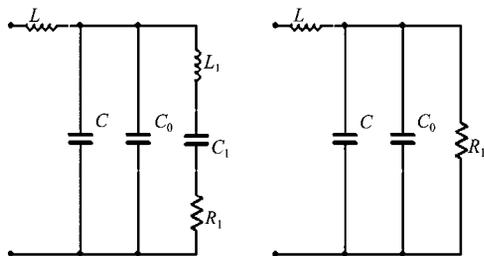
$$R = \frac{R_1}{1 + (\omega_s C' R_1)^2}. \quad (7)$$

根据阻抗匹配可得,并联电容:

$$C = \sqrt{\frac{R_1 - R}{R \cdot \omega_s^2 \cdot R_1^2}} - C_0, \quad (8)$$

匹配电感:

$$L = \frac{C' R_1^2}{1 + (\omega_s C' R_1)^2} = \frac{\sqrt{R \cdot (R_1 - R)}}{\omega_s}. \quad (9)$$



(a) 非串联谐振时的等效电路 (b) 串联谐振时的等效电路

图3 串联电感和并联电容的匹配等效电路

从中可以看出,通过改变  $L$ 、 $C$  的取值,既能够实现阻抗匹配,又可以实现调谐匹配,同时电感电容二阶滤波相比单电感滤波效果更好,换能器两端的波形更接近正弦波。

为满足换能器的工作要求,实现阻抗匹配与调谐匹配,实验中选取并联匹配电容为  $C = 0.368 \mu\text{F}$ ,串联匹配电感为  $L = 81.3 \mu\text{H}$ ,从 26~30 kHz 改变发生器的频率,发生器输出端电抗的变化见图 4,从中可以看出,串联谐振频率处的阻抗值不是最小,而最小的阻抗值出现在另一个谐振点(此时频率为 29.07 kHz,对应的阻抗值较小),因此通过最大电流法可能误跟踪到非串联谐振频率点,而这并不是换能器理想的工作频率,因此最大电流法对于由串联电感和并联电容组成的匹配电路的系统并不适用。

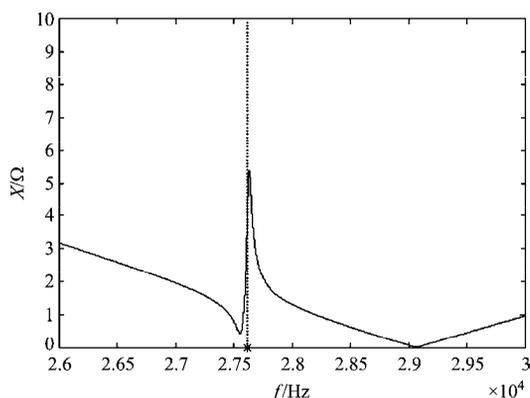


图4 基于串联电感并联电容匹配电路阻抗变化曲线

### 3 最小电压法跟踪谐振频率的原理

基于对图 3 等效电路的分析,当换能器处于串联谐振状态时,阻抗最小,换能器与电容  $C$  并联再和电感  $L$  串联后,换能器两端分压也会达到最小值,即在发生串联谐振时,换能器两端的电压是最小的。基于此,形成通过跟踪换能器两端电压的方法跟踪谐振频率。

通过 matlab 仿真可得,当发生器频率在 26~28.5 kHz 范围变化时,换能器两端电压的变化曲线,见图 5。图中可以看出,频率变化过程中,在换能器串联谐振频率点处,换能器两端电压出现了极小值点,且在通频带内,极小值点是惟一的,因此通过算法可以实现频率的准确跟踪。

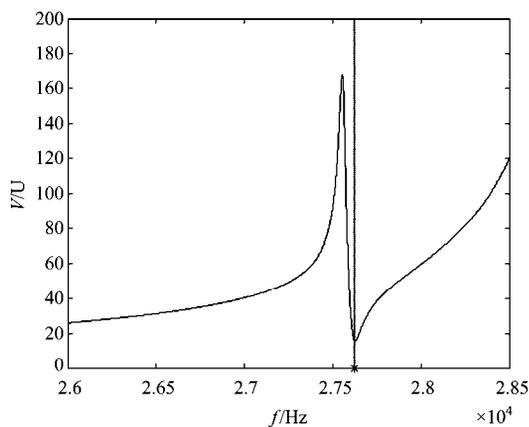


图 5 基于串联电感并联电容匹配电路换能器电压变化曲线

### 4 最小电压法频率跟踪的实现

在实际工作中，由于外界环境的变化，例如温度、刚度、负载等往往会引起超声波电机系统参数的变化。对应的超声波电机谐振频率也发生漂移，为了提高工作效率，激励频率必须能够跟踪谐振频率的变化<sup>[6]</sup>。

通过查阅参考文献<sup>[5-6]</sup>，基于电压反馈频率跟踪的超声波发生器结构按如图 6 所示结构来实现。电压传感器检测换能器两端的电压值，经 A/D 转换器给单片机；单片机将之前的电压值进行比较，确定新的工作频率；改变脉冲发生器的输出频率，脉冲发生器的输出信号经过驱动电路给逆变器，从而改变换能器的工作频率。直到找到最小电压对应的频率即为换能器串联谐振频率。

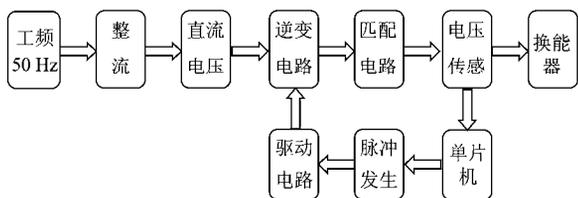


图 6 电压反馈式频率跟踪超声波发生器结构

文献资料中显示，换能器工作过程中谐振频率漂移范围在 1~2 kHz 左右<sup>[6]</sup>，对于本实验中用到的换能器初始谐振频率为 27.62 kHz，因此设定频率扫描范围为 26~30 kHz。加工开始前，首先设定一个电压变化阈值  $\Delta U$ ，当电压不超过  $U+\Delta U$  时不启动频率跟踪，当电压超过  $U+\Delta U$  时，启动频率跟踪，首先进行频率粗调，此时，频率向增大的方向变化，

且变化步长为 100 Hz（当扫描频率超出 30 kHz 时，改变扫描频率为 26 kHz，继续扫描），找到电压取值满足关系  $U_1 > U_2$  且  $U_2 < U_3$  对应的频率  $f_1, f_3$  则谐振频率必然满足  $f_1 < f_s < f_3$ 。然后进行频率细调，在  $f_1 \sim f_3$  范围内，以步长 5 Hz 改变频率，直到找到电压取值满足关系  $U'_1 > U'_2$  且  $U'_2 < U'_3$ ，则电压  $U'_2$  对应的频率即为换能器串联谐振频率。程序流程框图见图 7 所示。

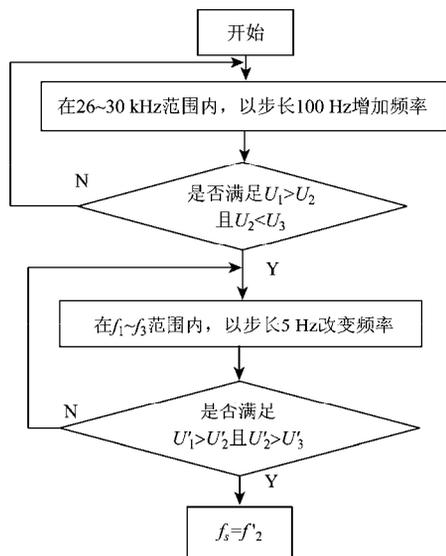


图 7 程序流程框图

### 5 结论

本文研究了最大电流法跟踪谐振频率的原理及应用范围，发现对于不同的匹配电路，频率跟踪的方法会受到制约。对于由串联电感和并联电容组成的匹配电路的系统，提出了最小电压法跟踪谐振频率的新策略，并给出了该方法具体的实施步骤，为换能器谐振频率的自动跟踪方法提供了新的选择。

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 郭林伟, 林书玉, 许龙. 压电陶瓷换能器电感与电容匹配特性研究[J]. 陕西师范大学学报, 2010, 38(2): 39-42.
- [3] 王艳东, 李赫, 王敏慧, 等. 锁相环跟踪超声振动系统谐振频率的改进[J]. 声学技术, 2007, 26(2): 253-256.
- [4] 卢斌. 超声波换能器谐振频率跟踪方法研究[D]. 重大大学硕士论文, 2012.
- [5] 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.
- [6] 张文科. 超声波电机频率自动跟踪与负载匹配技术[D]. 华南农业大学硕士论文, 2007.
- [7] 方由艳, 林书玉. L型匹配网络对超声换能器振动性能的影响[J]. 声学技术, 2010, 29(1): 112-115.
- [8] 韩庆帮, 林书玉, 鲍善惠, 等. 超声换能器电匹配特性研究[J]. 陕西师范大学学报, 1996, 24(4): 114-115.
- [9] 朱武, 张佳民. 多峰超声振动系统频率自动搜索和跟踪[J]. 声学技术, 2008, 27(3): 361-364.
- [10] 林书玉. 功率超声振动系统的研究进展[J]. 应用声学, 2009, 28(1): 10-19.
- [11] 潘仲明, 祝琴. 压电换能器阻抗匹配技术研究[J]. 应用声学, 2007, 26(6): 357-361.
- [12] ANTOINE F, PATRICE M. High-performance load-adaptive speed control for ultrasonic motor[J]. Control Engineering Practice, 1998, 6(01): 1-13.
- [13] FURUYA, S.-I, MARUHASHI, T. Load-adaptive frequency tracking control implementation of two-phase resonant inverter for ultrasonic motor[J]. IEEE Transactions on power Electronics, 1992, 7(3): 542-550.

## 第 21 届国际声学大会及室内声学卫星会议

第 21 届国际声学大会 ICA, 于 2013 年 6 月 2~7 日在加拿大东部 Montreal 与美国声学学会 165 届年会和加拿大声学学会 51 届年会联合举行。本届大会共有 1607 篇论文, 数量在 ICA 历届大会中最多, 分别在 174 个专题组进行。论文摘要集按各专题组时序、会场地点及时间表排列, 一目了然。这是由美国声学学会负责编印, 会前预先寄发给全体会员, 大会报到时亦人手一册, 方便与会者。这也是美国声学学会每年二届年会的惯例。会议另发存储于 U 盘上的所有报告全文, 便于阅读和保存。回顾我国学术会议组织安排上, 这方面最为欠缺。会期和安排往往不能及早确定公布, 会前印发论文摘要者亦属少见, 盼今后主办单位能够改进, 提高会务效率和效果。这次会议还规定, 所有报告人均需在报告前(以 12 小时为截止时间)将 ppt 文件向规定网站上传, 会场上即按日程表及时显示, 使报告会有条不紊地进行。会场不提供 PC 机, 省去临时安装 U 盘的时间和常见的种种麻烦。

大会安排五个特邀报告, 分别在五天上午 8~9 时全体大会上举行。分别是: 1. 利用声音研究海洋; 2. 心理声学基础研究及应用; 3. 乐器质量的客观评价; 4. 音乐厅音质的感知评估; 5. 公共活动空间声学与信息传递和安全措施。

美国和加拿大声学学会还分别进行了其他活动。一次大型颁奖典礼分别颁发了多项奖状, 并以书面和口头形式介绍他/她们的事迹, 对大众有很好鼓励作用。更多的学会专业组活动都是利用晚间进行的。国际声学委员会 ICA 在本次大会上还给从事声学工作约 10 到 15 年的“年轻有为奖”(Early Career Award 早期成就奖, 曾颁发过四次)于芬兰 Aalto 大学的 T. Lokki 副教授。他 1971 年出生, 2002 年获计算机科学博士。也是本次大会邀请报告人之一(题名: 音乐厅音质的感知评估)。他在音乐厅音质评估方面提出了在传统音质参量之外的重要属性。他与音乐结缘 30 多年, 担任国家交响乐团单簧管演奏员亦有 11 年, 这些特殊背景对他的音质研究工作亦有帮助。Lokki 博士现任芬兰声学学会会长, 全欧声学协会秘书长。

本次会议还举行了“纪念马大猷声学成就”专题报告

会, 由向宁和田静两教授发起组织的, 有 12 位来自各国的声学家分别从不同角度介绍马大猷的声学成就, 不少报告还结合本人的研究工作来谈, 历时四个多小时, 盛况热烈。99 岁高龄的 Leo Beranek 博士, 是当年与马大猷同日(1940 年 6 月)获哈佛大学博士学位的同窗好友。他的报告中出示了大量马大猷在抗日战争最艰苦时期, 毕业当年毅然奔回中国大后方, 为国效劳时期给他的通信, 展示了弥足珍贵的友谊和学术切磋交流, 以及当年工作和生活情况。马大猷教授生前(2012 年 5 月)还荣获美国声学学会荣誉会士称号, 是该学会 1929 年创始以来 83 年中, 第 19 位获此殊荣者。第一位是授给爱迪生的。马大猷的声学成就在国际上享有盛誉, 他的贡献具有里程碑式的价值。

澳洲 M. Burgess 教授(女)当选为新一届国际声学委员会主委, 我国田静教授为四位副主委之一。大会全部论文摘要可在网址 [www.acousticalociety.org](http://www.acousticalociety.org) 免费查阅。

大会之后的 6 月 9~11 日, “室内声学国际研讨会”(ISRA)卫星会议在加拿大的多伦多市举行。这项活动从 1986 年 ICA 多伦多大会后的温哥华卫星会议就开始了, 以后只是名称上略有变动而已。ISRA 已成为近年多届 ICA 大会的重要卫星活动, 上届 2010 在墨尔本举行。本次研讨会共有 96 个报告, 其中特邀报告 4 个。它们是: 1. 新西兰基督城音乐厅的音质设计回顾; 2. 音乐厅的室内音质评价—从实践经验中反思; 3. 音质环境的模拟和评价; 4. 抛开那个标准直接去聆听: 用您的双耳更好。本次研讨会内容丰富, 所有报告均可在网上 [www.caa-aca.ca/conferences/isra2013/](http://www.caa-aca.ca/conferences/isra2013/) 查阅。结合本届 ICA 大会的建声分组会(130 余篇报告, 展示了不少室内声学热点问题。例如涉及 ISO 3382 标准(室内音质参量的测试)的议论甚多, 两次会议中相关论文有一二十篇之多, 当予以关切和重视。

大会期间的一个晚上, 还在附近旅馆中举行水声学方面主题为“海洋中的声音: 最近一些发现和应用”的专题报告会。详情可查 [www.dosits.org/resources/all/meetings/symposium10/](http://www.dosits.org/resources/all/meetings/symposium10/)。

(同济大学声学研究所 王季卿)