

基于压电换能器谐振网络幅频特性的 频率跟踪技术*

巩丽文 杨 军 李跃杰 宋学东[†]

(北京协和医学院 中国医学科学院 生物医学工程研究所 天津 300192)

摘要 本文分析了压电换能器谐振网络的幅频特性,介绍了利用该特性进行频率跟踪的实现方法,并对眼科白内障超声乳化仪中的超声手柄进行了频率跟踪实验。实验研究表明利用谐振网络的幅频特性,对超声振动系统进行频率跟踪是一种简单、有效、可行的方案。

关键词 压电换能器, 谐振网络, 幅频特性, 频率跟踪

The frequency tracking technology based on amplitude-frequency characteristics of piezoelectric transducer resonant network

GONG Liwen YANG Jun LI Yuejie SONG Xuedong

(Institute of Biomedical Engineering, Chinese Academy of Medical Sciences, Peking Union Medical College, Tianjin 300192)

Abstract In this paper, the amplitude-frequency characteristics of piezoelectric transducer resonant network are analyzed, and implementation by use of the characteristics is described, and frequency tracking experiments for the ultrasound handle of the ophthalmic phaco-emulsifier of cataract are carried out. Experimental studies have shown that by using amplitude-frequency characteristics of the resonant network, and the frequency tracking method of ultrasonic vibration system is a simple, effective and feasible solution.

Key words Piezoelectric transducer, Resonant network, Amplitude-frequency characteristics, Frequency tracking

1 引言

随着科学技术的发展,一些功率超声应用领域,例如超声马达、超声塑料焊接、超声加工以及超声外科手术等,受到了人

们的普遍重视^[1]。与此同时,超声振动系统作为超声设备的核心部分^[2],其研究一直相当活跃。

超声振动系统一般由换能器、变幅杆和工具头组成。在超声应用中,为得到较大的

2011-07-08 收稿; 2011-10-08 定稿

*天津市技术创新基金项目(OPZXCXS03100)

作者简介: 巩丽文(1984-),女,山西省人,硕士研究生,研究方向:医学超声。

杨军(1964-),男,研究员,硕士生导师。

李跃杰(1963-),男,研究员,硕士生导师。

宋学东(1963-),女,副研究员。

[†]通讯作者: 宋学东, E-mail: XDSong@yahoo.com.cn

振幅以提高工作质量, 要求振动系统工作在谐振状态, 此时有较高的能量转换效率。实际应用中, 由于振动系统的温度、刚度、负载特性、工具磨损等因素的影响, 使系统的谐振频率发生漂移, 换能器的工作性能下降。因此, 需要对振动系统进行频率跟踪^[3]。

本文采用理论分析与实验结合的方法, 从压电换能器谐振网络的幅频特性入手, 对其频率跟踪技术进行了深入的研究, 并以眼科白内障超声乳化仪中的超声手柄为例进行了频率跟踪实验。

2 原理

超声手柄作为超声乳化仪中的振动系统部分, 一般由配重块、换能器、变幅杆和乳化针头组成。换能器通常采用磁致伸缩材料或压电晶体, 眼科通常采用 2~6 片压电晶体。工作中晶体在交变的电压作用下产生振动, 由变幅杆将幅度放大后传递到乳化针头^[4]。

超声手柄振动系统中, 谐振网络等效电路见图 1。其中压电换能器的等效电路^[5]如图 1(a)所示, 串联支路的等效阻抗为

$$Z_1 = R_1 + j(\omega L_1 - 1/\omega C_1). \quad (1)$$

串联谐振时, 有表达式(2),

$$\omega L_1 - 1/\omega C_1 = 0. \quad (2)$$

此时该支路呈纯阻性, 且等效阻抗 Z_1 取得最小值 R_1 。作者在研究中使用的手柄谐振频率为 40 kHz, 静态电容 C_0 为 1 nF 左右, 该支路的容抗约为 4 k Ω , 手柄谐振时的等效阻抗在 100 Ω 以下, 因此谐振点附近, 换能器等效阻抗的变化曲线主要受串联支路的影响。那么, 串联支路与 C_0 并联后的换能器等

效阻抗 $Z = R + jX$, 也将会在谐振点上有一极小值。

为有效抑制开关型功率输出中的谐波成分, 提高超声手柄功率输出的效率, 减小无功功率的损耗, 一般在压电换能器等效电路中串联一匹配电感^[6], 如图 1(b)所示, 此时, 电路的等效阻抗为

$$Z' = Z + j\omega L_0 = R + jX + j\omega L_0, \quad (3)$$

L_0 的取值等于或接近 $-X/\omega$, 使阻抗 Z' 的虚部尽量减小, 以抵消容性负载 X 对手柄输出功率的影响。此时阻抗 Z' 接近一个纯电阻, 且模为最小。

超声乳化仪工作时, 手柄与非理想电压源形成闭合回路, 如图 1(c)所示。由于非理想电压源 E 存在内阻 R_0 , 等效阻抗 Z' 上的压降为

$$U = Z' / (R_0 + Z') \times E. \quad (4)$$

其中 R_0 为定值, 因此, 当 Z' 的模最小时其两端的压降 U 最小。通过以上分析可以看出, 超声手柄谐振时, 等效阻抗 Z' 上的压降最小, 即谐振网络负载阻抗两端的分压最小。

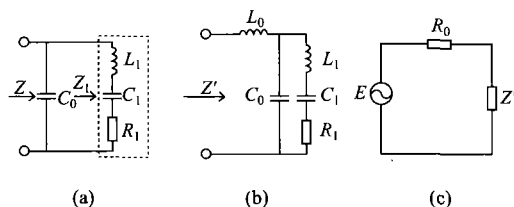


图1 谐振网络等效电路

根据这一理论, 在匹配良好的条件下, 通过扫频, 检测谐振网络两端电压的最小值可确定手柄的谐振频率。工作时, 以扫频得到的手柄谐振频率为基准, 不断微调激励信号频率并实时检测输出电压, 使输出电压保持在最小值, 从而实现系统的动态频率跟踪。

3 实现

基于以上谐振网络的幅频特性原理,在压电换能器匹配良好的条件下,通过寻找谐振网络两端的电压最小值,并实时调节激励信号的频率,控制实现超声乳化仪中超声手柄谐振频率的跟踪。

系统结构框图如图 2 所示,首先由控制系统分别控制功率电源和频率发生器给出具

有一定功率和频率的超声波激励信号,该信号经驱动电路,在匹配网络的共同作用下,激励超声手柄谐振工作。同时在超声乳化仪工作过程中,实时检测谐振网络两端的输出电压,该电压经 A/D 转换反馈到控制系统;控制系统根据反馈电压及时调整激励信号的频率,使电压 U 趋向最小,保证超声手柄始终工作在谐振状态,从而达到频率跟踪的目的。

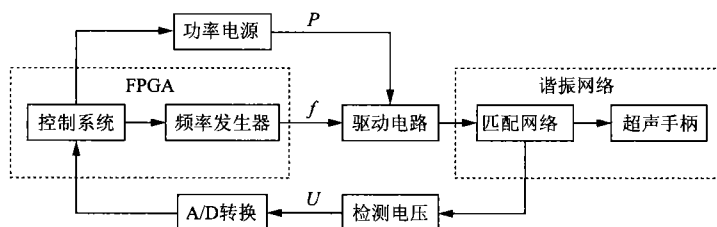


图 2 系统结构框图

4 实验结果与讨论

4.2 扫频实验

本系统使用的超声手柄标称谐振频率为 40 kHz。根据经验,超声手柄的实际谐振频率略低于其标称频率,因此,选取扫频范围为 37 kHz~41 kHz,在空气中,以步进 Δf 从最低频率点 37 kHz 开始扫频, Δf 约为 10 Hz。在扫频的同时,实时检测等效负载阻抗两端的电压,直至扫频结束。

扫频过程中,谐振网络两端电压随频率变化的幅频特性曲线如图 3 所示:

从图 3 可看出,扫频得到的幅频特性曲线具有明显的电压最小值,且具有较高的机械品质因素(Q_m)。因此,在频率跟踪实验中,即使是微小 Δf 的变化,都能够准确地捕捉谐振频率。

4.2 频率、电压与振幅关系实验

在扫频的基础上,进一步研究了超声手

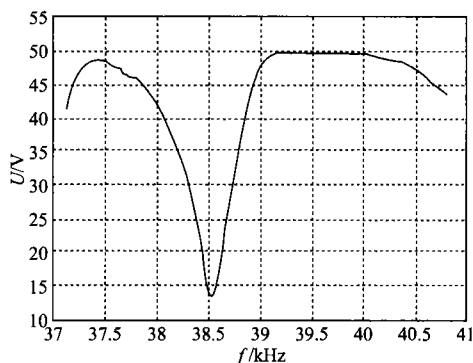


图 3 电压随频率变化的幅频特性曲线

柄工作时,频率、电压、振幅三者之间的关系。为了避免观察过程中因超声手柄的发热产生自身谐振频率的漂移,影响实验结果。因此,采用较小的输出功率。

将超声手柄置于空气中工作于 38 kHz~39 kHz 之间的若干个频率点处,分别检测其电压值,同时用读数显微镜读出每个频率点处超声手柄尖端的振动幅度。其频率、电压、振幅三者的关系如表 1 所示。

表 1 频率、电压、振幅的关系

频率 f/kHz	电压 U/V	振幅 μm
38.00	34	25
38.05	32	30
38.11	30	30
38.17	27	35
38.23	24	35
38.28	20	40
38.34	15	55
38.40	14	100
38.46	15	90
38.52	24	85
38.58	34	85
38.64	41	80
38.70	46	70
38.76	48	60
38.82	49	55
38.88	50	45
38.94	50	40
38.00	50	40

从表 1 可看出，超声手柄的工作频率在 38.4 kHz 时，电压最小且值为 14 V，此时超声手柄尖端的振幅取得最大值 100 μm 。由此可知，当电压取得最小值，即谐振网络等效阻抗的模最小时，手柄尖端的振幅最大，此时超声手柄处于谐振状态，这与理论分析完全吻合。

5 频率跟踪实验

频率跟踪的软件控制流程如图 4 所示，超声手柄工作时，控制系统首先将扫频得到的手柄谐振频率 f_0 作为激励信号的频率给出，并检测谐振网络两端的电压 U ，同时令 $U_{\text{save}} = U$ 。然后以步进 Δf 右移谐振频率，检测此时的输出电压 U ，若 $U \leq U_{\text{save}}$ ，则令 $U_{\text{save}} = U$ ，并继续以相同的步进右移频率；若 $U > U_{\text{save}}$ ，也令 $U_{\text{save}} = U$ ，则以相同的步进左移频率。此过程不断进行，直至超声手柄停止工作。

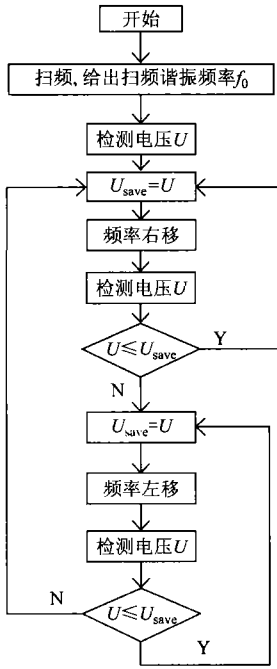


图 4 频率跟踪的软件控制流程图

根据上述频率跟踪方案，我们研究了负载力变化的跟踪情况，首先超声手柄在水中自由状态下工作，待 t_1 时刻，将针尖顶在硬物上，加负载工作，直到 t_2 时刻恢复自由工作状态，并继续工作一段时间。该过程中，频率、电压随时间变化的曲线如图 5 所示：

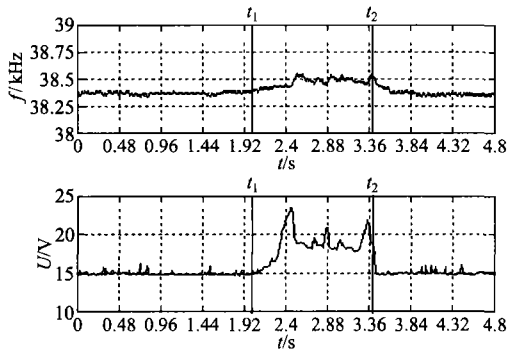


图 5 频率、电压随时间变化的曲线

由图 5 可知， t_1 时刻以前，电压微小变化的同时，频率在 38.4 kHz 左右稳定调节； t_1 时刻以后，频率提高，且在 38.5 kHz 附近微

调,此过程中,电压增加的同时并不断微变; t_2 时刻恢复自由工作状态后,频率下降,恢复至原来微调状态,电压随之变化,也恢复原来微变状态。通过以上结果可知,该方法能够很好地保持超声手柄的谐振状态,并能够迅速跟踪谐振频率的变化。

传统锁相环频率跟踪法,是利用谐振网络的相频特性,通过判断谐振电路提取的电压与电流信号的相位差,来跟踪谐振频率。由于提取的电压与电流信号来自不同的预处理回路,容易因干扰引起附加相移,导致失锁,从而跟丢谐振频率。而本文研究的频率跟踪方案是根据检测到的电压值的大小,以合理的频率步进来跟踪谐振频率,即使因某时刻的干扰引起一次判断错误,也会在下次采样判断时予以纠正,不会产生错误的累积。从图5也可看出,电压反馈信号上偶发的干扰并不影响频率跟踪的总趋势,不会产生锁相环跟踪时因干扰造成误判而失谐的现象。

以上实验证明,本文研究的频率跟踪技术不仅实现方法简单,而且具有较强的抗干扰能力,能够很好地跟踪谐振频率。

6 结论

通过以上理论推导和实验分析可知:包

括超声手柄在内的谐振网络谐振时,其等效阻抗的模最小,因而网络两端的电压最低;利用谐振网络的幅频特性,通过寻找网络两端电压最小值确定并跟踪超声手柄的谐振频率是一种有效可行的跟踪方法;该方法不仅原理简单,容易实现,而且具有较强的抗干扰能力。同时,该方案与工作频率无关,只要选择合适的匹配电感,就可适用于任何超声振动系统的频率跟踪。

参 考 文 献

- [1] 林书玉. 大振幅纵-扭复合振动模式超声变幅杆[J]. 压电与声学, 2002, 24(1): 81-84.
- [2] 林书玉. 纵-扭复合振动模式超声变幅杆研究[J]. 声学电子工程, 1996, (4): 14-18.
- [3] 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: 1-60.
- [4] 杨军, 李跃杰, 李穗, 等. 超声乳化原理在眼科的应用[J]. 生物医学工程研究, 2005, 24(2): 110-112.
- [5] 鲍善惠. 压电换能器的动态匹配[J]. China Academic Journal Electronic Publishing House, 1998, 17(2): 16-20.
- [6] 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.
- [7] 周立功, 等编著. SOPC 嵌入式系统基础教程[M]. 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [8] 夏宇闻, 编著. Verilog 数字系统设计教程[M]. 北京航空航天大学出版社, 2008(2).
- [9] 谭浩强著. C 程序设计(第二版)[M]. 清华大学出版社, 2002(2).