

超声手术刀换能器的谐振频率特性研究

罗 琚, 阮 程, 徐寅林

(南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏 南京 210046)

[摘要] 介绍了超声手术刀换能器的结构, 详细分析了换能器的等效电路. 通过 Matlab 仿真, 研究了手术刀换能器的谐振频率特性, 并与实际测量作比较, 验证了该手术刀换能器的等效电路和电参数的设置基本符合实际. 在此基础上, 还进行了外接匹配电感的公式推导研究, 以便找到更适合电路的电感参数.

[关键词] 超声换能器, 谐振频率, 匹配电感

[中图分类号] TP212 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2011)01-0052-03

Study on Characteristics of Resonant Frequency of Ultrasonic Scalpel Transducer

Luo Jun, Ruan Cheng, Xu Yinlin

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: A structure of the ultrasonic scalpel transducer is described with analysis of the equivalent circuit of the transducer. The characteristics of the transducer's resonant frequency were studied through MATLAB simulation. Compared with the actual measurement results, both the equivalent circuit and the parameters are proved to be reasonable. In addition, an external matching inductor formula is derived in order to find a more suitable inductance parameters.

Key words: ultrasonic transducer; resonant frequency; matching inductance

20 世纪七、八十年代出现的工作频率在 20~30 kHz 的低频超声外科手术刀, 采用超声能量粉碎、分离及切除人体的病变组织或器官, 以达到手术治疗目的. 它主要由两部分组成: 超声功率源和超声振动系统, 其中, 超声振动系统又包含 3 个组成部分: 超声换能器、聚能器和刀头. 与传统的手术刀相比, 因其具有操作简便、创伤小、手术质量高等优点, 得到了较为广泛的应用^[1].

近年来, 许多学者从结构、材料、负载特性等方面对超声换能器的特性都做了一定的研究.

本文主要是通过实验和用 Matlab 参数仿真, 对超声手术刀换能器在谐振频率附近的工作特性进行了研究, 另外, 对匹配电感的大小进行了推算, 以便选择更适合电路需要的电感工作.

1 超声换能器简介

超声换能器又称超声波振子, 是指在超声频率范围内将交变的电信号转换成声信号或者将声信号转换成电信号的能量转换元件, 它是超声设备中的关键器件.

超声换能器的种类有很多. 本实验所用的超声换能器为压电陶瓷材料制作的超声换能器, 它由中央压电陶瓷元件、前后金属盖板、预应力螺杆、电极片以及绝缘管组成. 这种夹心换能器在负荷变化时产生较稳定的超声波, 是获得功率超声波的主要方法. 它的工作频率比较低, 在 20 kHz 左右.

2 超声换能器和等效电路及参数^[2-4]

在谐振频率附近, 对于压电元件而言, 在低压电耦合系数和无耦合振动下, 任一种模式的电特性都可以等效为如图 1 所示的等效电路.

收稿日期: 2010-06-08

通讯联系人: 徐寅林, 博士, 副教授, 研究方向: 智能仪器仪表的设计、生物医学与电子学. E-mail: xuyinlin@njnu.edu.cn

图中, C_0 为静态电容, C_1 , L_1 和 R_1 分别为动态电容, 动态电感和动态电阻. 其等效电路的阻抗为:

$$Z = \frac{\left[R_1 + \left(j\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right] \frac{1}{j\omega C_0}}{R_1 + \left(j\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) + \frac{1}{j\omega C_0}} = \frac{j}{\omega C_0} \frac{\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) - R_1}{\frac{1}{\omega C_0} + \frac{1}{\omega C_1} - \omega L_1 + R_1}. \quad (1)$$

通常 R_1 很小, 假设 $R_1 \rightarrow 0$

$$Z = \frac{j}{\omega C_0} \frac{\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right)}{\frac{1}{\omega C_0} + \frac{1}{\omega C_1} - \omega L_1}. \quad (2)$$

根据交流电路理论, 当 $\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} = 0$ 时电路出现串联谐振现象. 由此设

$$\omega_s^2 = \frac{1}{L_1 C_1}, \quad (3)$$

当 $\frac{1}{\omega C_0} + \frac{1}{\omega C_1} - \omega L_1 = 0$ 时整个等效电路出现并联谐振现象. 此时可得

$$\omega_p^2 = \frac{C_0 + C_1}{C_0 C_1 L_1}. \quad (4)$$

所以, 称 ω_s 和 ω_p 分别为换能器的串联谐振频率和并联谐振频率.

换能器两端的阻抗为:

$$Z = \frac{j}{\omega C_0} \cdot \frac{\omega^2 - \omega_s^2}{\omega_p^2 - \omega^2}. \quad (5)$$

图 1 中的各元件参数可用下述方法近似求得.

当压电换能器的工作频率远远低于其内部固有的谐振频率时, 压电换能器的电学特性等于 1 个电容器 (从图 2 中可以看出, 当 $\omega < \omega_s$ 时, $Z < 0$), 通常就把这个称谓静态电容 C_0 . 它是受夹持压电振子的极板之间的电容, 可以通过电容表直接测得. 本文中我们利用电容电桥在 1 kHz 下直接测得了 C_0 的大小. 然后导出 C_1 , L_1 的大小:

$$C_1 = C_0 \cdot [(f/f_s)^2 - 1], \quad (6)$$

$$L_1 = [4\pi^2 f_s^2 C_1]^{-1}. \quad (7)$$

根据这些参数, 用 Matlab 仿真得到超声换能器阻抗与谐振频率的关系曲线如图 2 所示.

图中, Z 表示换能器的阻抗 (见公式 (5)). 由图可见, 当 $f < f_s$ 时, $Z < 0$ 电路呈容性. 当 $f = f_s$ 时, 换能器阻抗为 0 即处于串联谐振状态. 之后, 随着工作频率的增加, 电路又呈感性. 直到 $f = f_p$ 换能器阻抗为 ∞ , 即处于并联谐振状态. 之后电路又为容性, 并在高于并联谐振处会出现另一个串联谐振频率.

3 外加匹配电感后的工作特性

当换能器工作在串联谐振频率时, 尽管损耗电阻 R_1 较小, 但却确实存在, 因而换能器实际仍为容性负载, 需要一电感与之谐调以抑制其产生的容抗分量的影响. 在本实验中, 我们构建了一个由电感、超声手术刀换能器和 1 千欧姆电阻串联的电路, 其中串联电感为 17.4 mH 输入的交流电压为 10 V 当频率从 19 kHz 到 21 kHz 的变化过程中去测电阻上通过的电流的大小, 即由图 3 中的离散点所示. 再用 Matlab 仿真一条曲线, 通过比较测试点与仿真曲线的关系, 验证了我们对超声手术刀换能器的等效电路和电参数的设置基本符合实际.

由于在前面公式推导的过程中忽略了超声手术刀换能器的动态电阻的大小, 图中的一些离散点跟理想的仿真直线有所偏差.

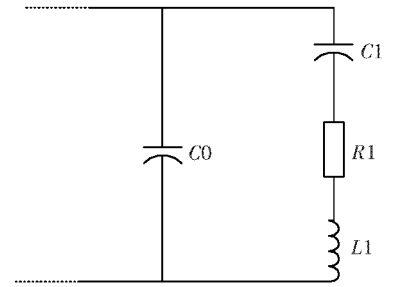


图 1 超声换能器等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit of ultrasonic transducer

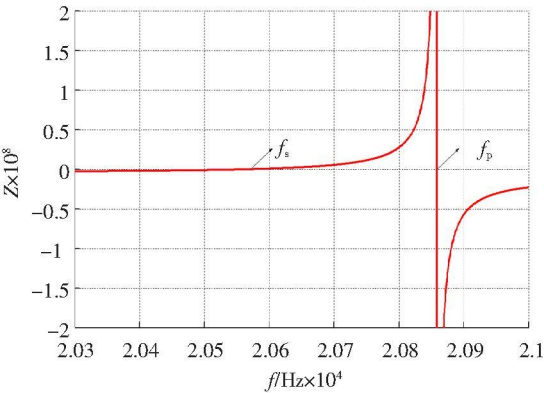


图 2 超声换能器阻抗与谐振频率的关系曲线

Fig.2 The curve of the relationship between ultrasonic transducer's impedance and resonant frequency

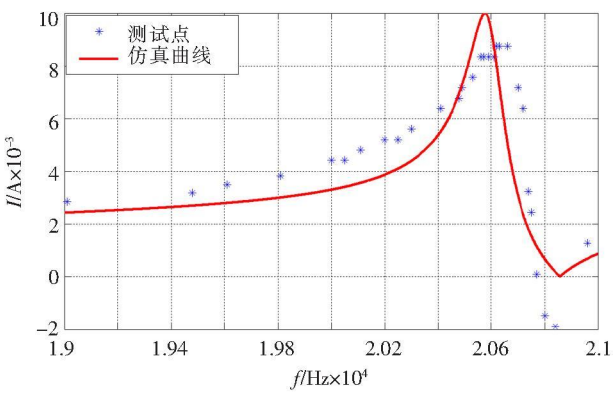


图 3 实际测试点与模拟仿真曲线的对比图

Fig.3 Comparison of the test points and the simulation curve

4 对匹配电感的研究

按照匹配理论,当换能器工作在共振频率 f_s 上,(见图 1 换能器的等效电路)此时串联支路的感抗与容抗相等,支路呈纯阻性.等效电路的简化过程如图 4 所示.

从并联到串联的等效过程,关系式表达如下:

$$\frac{R_1 \cdot \frac{1}{j\omega_s C_0}}{R_1 + \frac{1}{j\omega_s C_0}} = \frac{1}{j\omega_s C'_0} + R'_1.$$

(8)

经推导可得

$$C'_0 = \frac{C_0}{(\omega_s C_0 R_1)^2} + C_0.$$

(9)

所以当外接匹配电感 $L_0 = \frac{1}{\omega_s^2 C'_0}$ 时,整个电路即在 f_s 上谐振.通过之前测量的参数值,在超声换能器共振频率为 20 kHz 的前提下,可把匹配电感的大小算出来.其中, R_1 可用电桥直接测定,因为其值比较小,数量级在 10^{-2} ,所以在之前的推导上被忽略了.在本实验中,串联的匹配电感为 17.4 mH 下实测得的串联谐振频率为 20.66 kHz,符合要求.

5 结论

本文研究了超声手术刀换能器在谐振频率附近的特性,通过理论的分析 and 测试,利用 Matlab 进行仿真,可判定,该超声手术刀中换能器的等效电路和电参数的设定与实际测量的结果基本吻合.并对外接匹配电感参数大小的选择进行了推导,对实际应用有较好的参考价值.

[参考文献]

[1] 吴敏,汤黎明,刘铁兵,等. 超声手术装置的原理及临床应用[J]. 仪器原理, 2004, 25(10): 44-48

[2] 袁易全. 超声换能器[M]. 南京: 南京大学出版社, 1992 165-167.

[3] 张沛霖,张钟渊. 压电测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983 34-43

[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): 115-117.

[责任编辑: 顾晓天]