

大功率超声换能器匹配技术研究

王露, 杨靖, 王登攀, 方鑫, 鲜晓军, 董姝, 张静雯

(中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

摘要:在电源与超声换能器间, 匹配电路起纽带和桥梁作用。大功率超声系统能否正常工作, 取决于匹配电路的设计。该文从大功率超声换能器的阻抗特性和实际工作条件出发, 对换能器匹配技术进行了研究, 提出了一种电容、电感串、并联结合的匹配电路, 以及一种可对匹配电感值进行在线调节的新型电路结构。经过 ADS 仿真和实际工作验证, 大功率超声换能器在这种匹配电路下可长时间稳定地工作, 且调试上更方便快捷。

关键词:大功率超声; 电源; 换能器; 匹配

中图分类号: TM935 **文献标识码:** A

Research on Matching Technology of High Power Ultrasound Transducer

WANG Lu, YANG Jing, WANG Dengpan, FANG Xin, XIAN Xiaojun, DONG Shu, ZHANG Jingwen

(26th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The matching circuits play the roles of ligament or bridge between the power supply and the ultrasound transducer. Whether the high power ultrasound system can work normally highly depends on the designing of the matching circuits. This paper discusses from the impedance of the high power ultrasound transducer and the actual work condition, studies the matching technology of the transducer, and advances a series-parallel connective matching circuit with capacitance and inductance. We also advance a new circuit structure which can adjust the value of the matching inductance on-line. ADS emulation and actual work shows that the high power ultrasound transducer can work steadily for a long time with this matching circuit, at the same time, we reduce the work of debugging.

Key words: high power ultrasound; power supply; transducer; matching

0 引言

超声系统一般由驱动电源和换能器两部分组成。驱动电源能提供一定频率和功率的超声频电能。由于功率超声换能器多采用压电材料作为功能元件, 与驱动电源间存在阻抗失配, 电源信号直接加到换能器时, 传输效率很低。为解决这一问题, 必须在分析和测试超声换能器的阻抗特性的基础上, 设计相应的匹配电路, 使换能器的阻抗与驱动电源的阻抗相匹配, 同时在换能器的工作频点上进行调谐。这样, 不仅能实现超声波换能器的输出功率最大, 热损耗最小, 且可最大限度地延长换能器及驱动电源的连续工作时间及工作寿命。因此, 在大功率超声系统中在电源与换能器间匹配电路起纽带和桥梁作用, 系统能否正常工作, 以及长时间稳定地工作, 很大程度上取决于匹配电路的设计。本文从分析大功

率超声换能器的阻抗特性和实际工作环境出发, 对换能器匹配技术进行了研究, 设计了一种串并联结合的匹配电路, 且可对匹配电感进行在线的调节, 最后通过实验进行了验证。

1 换能器频率特性

如图 1 所示, 压电超声换能器在其谐振频率附近可等效为图中虚线右边的电学模型^[1]。其中 C_0 为静态电容, 它是在远低于谐振频率的频率上测出的换能器电容, 是一个真实的电学量。 C_1 、 L_1 、 R_1 为动态电容、动态电感和动态电阻, 它们不是真正的电学量, 而是从换能器的质量、机械特性和损耗等分别折算过来的等效参数, 一般常测到的 C_1 、 L_1 、 R_1 值是其谐振频率上的值。 C_0 所在的支路称为静态支路, C_1 、 L_1 、 R_1 所在的支路称为动态支路。

收稿日期: 2014-05-23

作者简介: 王露(1985-), 男, 重庆璧山人, 工程师, 硕士, 主要从事声学器件、组件的研究。

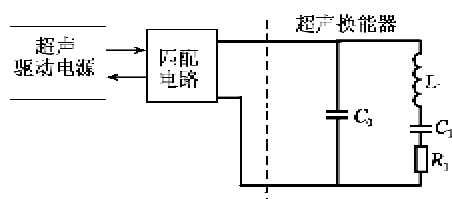


图1 大功率超声系统组成结构框图

由电路理论可知,压电换能器的电端阻抗为

$$Z = R + jX \quad (1)$$

其中电阻分量

$$R = (C_0^2 R_1) / \{ C_0^2 C_1^2 L_1^2 \omega^4 + C_0 C_1 [C_0 C_1 R_1^2 - 2(C_0 + C_1) L_1] \omega^2 + (C_0 + C_1)^2 \} \quad (2)$$

电抗分量

$$X = \{ C_1 (C_1 L_1 \omega^2 - 1) - C_0 \{ C_1 [C_1 R_1^2 + L_1 (C_1 L_1 \omega^2 - 2)] \omega^2 + 1 \} \} / \{ C_0^2 C_1^2 L_1^2 \omega^5 + C_0 C_1 [C_0 C_1 R_1^2 - 2(C_0 + C_1) L_1] \omega^3 + (C_0 + C_1)^2 \omega \} \quad (3)$$

式中 ω 为角频率。

当串联角频率 $\omega_s = 1/\sqrt{L_1 C_1}$ 时,动态支路发生串联谐振,此时换能器的串联谐振频率为

$$f_s = 1/(2\pi \sqrt{L_1 C_1}) \quad (4)$$

C_0 、 C_1 和 L_1 共同决定超声换能器的并联谐振频率 f_p ,且

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{C_0 C_1 L_1}}} \quad (5)$$

以 R 为横坐标, x 为纵坐标,以信号频率 f 为自变量在平面内作图,可得压电换能器的阻抗圆如图2所示。由图可看出,换能器在 f_s 、 f_p 时都会表现出一定的容性。若在换能器两端直接施加交变电压,电源的功率因素很小,效率很低,所以一般都需在超声换能器和电源间加入匹配电路。

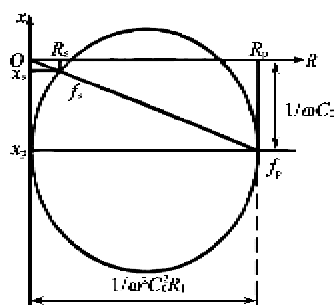


图2 换能器阻抗圆

2 换能器匹配方案

一个完整的大功率超声专用匹配电路需同时满足变阻、调谐及滤波3个功能。变阻一般是由变压

器来实现,通过设置合适的变压器变比,使电源达到额定的输出而换能器获得足够的功率。传统的调谐方法是将一个匹配电感 L 与换能器串联(见图3)^[2],使 L 的感抗与动态电容 C_0 的容抗相等,即 L 与换能器的并联等效电容产生并联谐振,从而使换能器所呈现出的阻抗接近于动态电阻 R_1 。

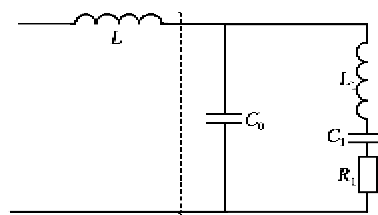


图3 串联电感匹配电路

串联单个匹配电感后,系统的阻抗为

$$Z = \frac{R_1}{1 + (\omega_s C_0 R_1)^2} + j \left(\omega_s L - \frac{\omega_s C_0 R_1^2}{1 + \omega_s^2 C_0^2 R_1^2} \right) \quad (6)$$

由此可得所需串、联匹配的电感为

$$L = \frac{C_0 R_1^2}{1 + \omega_s^2 C_0^2 R_1^2} \quad (7)$$

功率超声系统的等效阻抗为

$$Z = \frac{R_1}{1 + (\omega_s C_0 R_1)^2} \quad (8)$$

由式(8)可看出,串联匹配使换能器的等效输入阻抗呈纯电阻性,阻值降低,串联电感起阻抗匹配作用。但这是假定 L 为无损耗电感的前提来讨论的结果,实际上 L 是有损耗的,这直接影响并联谐振回路的品质因数,在大功率时更明显。

在大功率工作时, C_0 会随着换能器温度的升高而发生改变。针对换能器静态电容变化的问题,本文作者提出了一种电感、电容串、并联相结合的匹配电路形式,如图4所示。

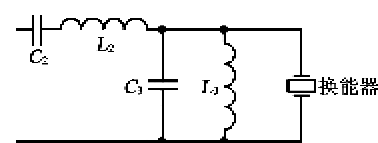


图4 串并联结合匹配电路

对于这种串并联结合的匹配电路,系统的总导纳为

$$Y = \frac{R}{R^2 + (\omega L_2 + X)^2} - j \left[\frac{\omega L_2 + X}{R^2 + (\omega L_2 + X)^2} + \frac{1}{\omega L_3} \right] \quad (9)$$

式中 R 和 X 分别为超声换能器的电阻和电抗。 C_2 和 C_3 具有调谐和滤波的作用,根据实际经验,一般

取 $C_3 = C_0, C_2 \ll (C_3 + C_0)$ 。 L_2, C_2, L_3, C_3 需满足:

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_3(C_0 + C_3)}} \approx f_s \quad (10)$$

这种匹配电路降低换能器的 f_s , 升高换能器的 f_p , 牺牲了一定的 Q 值, 增加了整个系统的工作带宽, 使换能器电容在一定变化范围内变化时, 换能器都可谐振工作。

3 在线调试技术

超声换能器的各个参数都是在小信号下测得, 而在实际的使用环境中, 换能器电端的激励电压和激励电流都比小信号下大, 由于电场强度高, 振动幅度大, 内温升高和媒质空化等原因, 其阻抗特性相比小信号测试会发生一定变化。因此, 理论计算出来的匹配电路并不一定适用于实际工作环境。我们需在大信号条件下对换能器的各个参数进行提取, 根据参数对匹配电感、变压器及匹配电容的值进行适当修改, 从而得到最佳的匹配电路。

本文所述大功率超声系统实际工作时, 电压高达 1 kV, 电流最高可达 2 A, 难以直接连接仪表进行在线调试。因此, 我们设计了电流、电压采样电路, 对电流、电压的波形进行采样, 通过观察它们的相位变化来对实际匹配效果进行检测, 如图 5 所示。

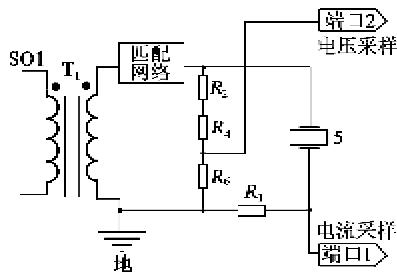


图5 电流电压采样电路

在匹配电感的设计上, 本文除采用传统的抽头式电感设计方案外, 还设计了一种开关电感电路, 通过 FPGA 和继电器对电路进行切换选择, 可得 0.5~7.5 mH, 以 0.5 mH 为步进变化的各种不同的电感值, 如图 6 所示。

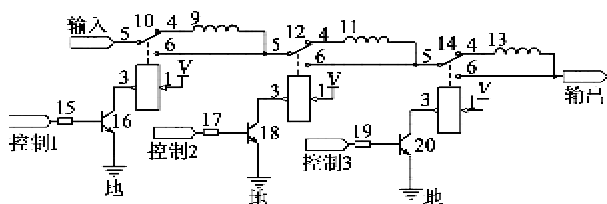


图6 匹配电感在线调试电路

在实际调试过程中, 只需在操作界面上输入相应的电感值, 点击“确定”即可, 这样就省去了不断地对各个电感进行接线、换线的麻烦, 且也更安全, 实现了对匹配电路的在线调试。

4 实验结果

为了验证上述匹配电路在大功率超声系统中的使用效果, 我们进行了一些实验。实验中, 用阻抗分析仪测得换能器相关参数: $f_s = 19.437$ kHz, $C_0 = 23.5953$ nF, $C_1 = 0.20357$ nF, $R_0 = 15.7094$ Ω , $L_0 = 329.37$ mH。通过计算取 $L_2 = 5.6$ mH, $L_3 = 1.3$ mH, $C_2 = 13$ nF, $C_3 = 26$ nF。我们将上述计算结果代入 ADS 进行仿真(见图 7), 得到的仿真结果如图 8 所示, 系统谐振频率 $f = 19.5$ kHz。

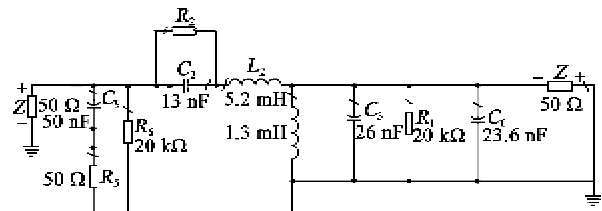


图7 ADS对匹配参数进行仿真

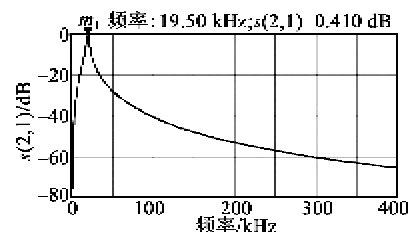


图8 频率仿真结果

将上述匹配电路装入自行研制的大功率超声系统(见图 9), 并将其与单电感匹配电路, 以及不匹配电路的情况进行试验对比, 结果如表 1 所示。由表可知, 加入匹配电路后, 在相同的输入脉冲幅度及换能器条件下流过换能器的电流明显增加。此外, 与单电感匹配电路相比, 新型的串、并联结合匹配电路匹配效果更好, 系统输出功率更大。

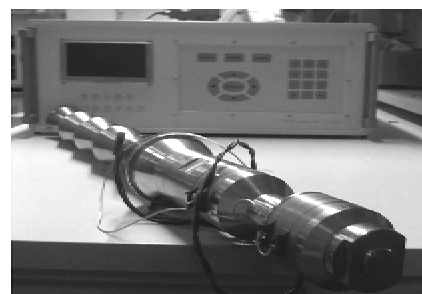


图9 自制大功率超声系统

表1 不同匹配电路实验效果

测量项目	电压峰-峰值/kV	频率/kHz	电流最大值/A	电流电压相位角/(°)
不加匹配	1	19.5	0.8	30
单电感匹配	1	19.5	1.5	5
串并联结合匹配	1	19.5	1.7	1

对换能器进行连续工作测试,连续激发换能器4 h,实验发现,激励脉冲的电压、电流信号的波形稳定性好,说明在电容、电感串、并联结合的匹配电路下,系统的工作状态稳定可靠。

5 结束语

本文设计了一种电容、电感串、并联结合的大功率超声换能器匹配电路,以及一种可对匹配电感进行在线调试的电路结构。理论计算及实验结果表

明,新的匹配电路工作带宽变宽,可使整个超声系统在一定的频率范围内长时间稳定地工作,调试过程更简单。

参考文献:

- [1] 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.
FANG Youyan, LIN Shuyu. Effects of L-type matching network on characteristics of ultrasonic transducer[J]. Technical Acoustics, 2010, 29(1): 112-115.
- [2] 郭林伟,林书玉,许龙. 压电换能器静态匹配电路的研究[J]. 纺织高校基础科学学报,2008,21(3):361-367.
GUO Linwei, LIN Shuyu, XU Long. Study on matching circuit of ultrasonic transducers[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2008, 21(3): 361-367.
- [3] 郭林伟,林书玉,许龙. 压电换能器静态匹配电路的研究[J]. 纺织高校基础科学学报,2008,21(3):361-367.
- [4] 杜小振,曾祥伟,卞丰,等. MEMS 自供能压电电磁集成发电发展现状[J]. 微纳电子技术,2014,51(3):161-167.
- [5] GONSALEZ C G, FRANCO V R, BRENNAN M J, et al. Energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic transducers[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(5): 625-632.
- [6] KHALIGH A, ZENG P, WU X, et al. A hybrid energy scavenging topology for human-powered mobile electronics[C]//Orlando, FL: Industrial Electronics, 2008 IECON, 2008. 34th Annual Conference of IEEE, 2008: 448-453.
- [7] 任佳琦. 基于谐振式悬臂梁的压电-电磁复合俘能技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [8] SHAN Xiaobiao, GUAN Shiwei, LIU Zhangshi, et al. A new energy harvester using a piezoelectric and suspension electromagnetic mechanism[J]. Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering, 2013, 14(12): 890-897.
- [9] 关世伟. 梁式结构压电-电磁复合俘能技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [10] LI Ping, GAO Shiqiao, NIU Shaohua, et al. An analysis of the coupling effect for a hybrid piezoelectric and electromagnetic energy harvester[J]. Smart Material and Structure, 2014, 23(6): 065016-065017.
- [11] 李平,高士桥,刘海鹏,等. 压电-电磁复合式俘能器的归一化机电耦合模型与分析[J]. 北京理工大学学报, 2012, 33(增刊 2): 31-34.
- [12] LI P, GAO S, CAI H. Modeling and analysis of hybrid-piezoelectric and electromagnetic energy harvesting from random vibrations[J]. Microsystem Technologies, 2013, 19(8): 1137-1144.
- [13] ERTURK A, INMAN D J. Piezoelectric energy harvesting[M]. New Jersey: Wiley, 2011.
- [14] 曹金云. 电磁式振动能量收集和存储系统的研究[D]. 包头:内蒙古科技大学 2012.

(上接第253页)