

压电超声换能器的阻抗匹配分析

徐晓伟

(中国船舶重工集团公司 第七一五研究所, 浙江 杭州 310012)

摘要:介绍了压电超声换能器在串、并联谐振时的等效电路,并对换能器工作在两种谐振频率时的实时跟踪和工作性能进行了详细分析,通过对换能器的外部LC串联匹配分析和相应的阻抗匹配变换,提出了压电超声换能器在并联谐振角频率附近,具有很好的功率自动调节性能。

关键词:压电超声换能器;阻抗匹配;谐振;等效;变阻

中图分类号: TB552 **文献标识码:** A

Analysis on the Matching Impedance of Piezoelectric Ultrasonic Transducer

XU Xiaowei

(715th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The equivalent circuit of the piezoelectric ultrasonic transducer in series, parallel resonant of the transducer is introduced. The in-time tracking and working characteristics work in the two resonant frequencies are analyzed in detail. Through the external LC series matching analysis of the transducer and the corresponding impedance matching transformation, the piezoelectric ultrasonic transducer shows good performance of automatic regulation with power at near parallel resonant angular frequency.

Key words: piezoelectric ultrasonic transducer; impedance matching; resonance; equivalent; resistance

0 引言

随着超声技术的发展进步,超声清洗、焊接、生化学、无损检测、医疗等应用变得越来越普及。当超声振动系统工作在谐振状态时,能量转换效率最高,发热最小,寿命更久,因此要求对换能器进行阻抗匹配,使振动系统在谐振点附近工作。换能器的匹配^[1]主要包括调谐、变阻及滤波。调谐的作用是外加一个电抗来减少或消除换能器本身的电抗,使换能器阻性负载功率增加;变阻的目的是将换能器的阻抗变换至合适的值,使换能器输出足够的功率;滤波是因为开关型电源的输出是方波,含有大量的谐波成分,需设计合理的滤波网络滤除谐波,滤波可减少换能器的发热,提升设备效率。

1 换能器等效电路

换能器是一种非线性容性负载,其等效电路如图1所示。图中, C_0 为换能器的静态电容,主要是指换能器因夹持而产生的电容,一般为 10^{-6} F量级; R_0 为压电陶瓷片内的介质电损耗,通常可忽略其影响(一般认为 R_0 为无穷大); L_m 为动态电感,由换能器质量引起; C_m 为动态电容,由换能器力顺引

起,量级为 10^{-12} F; R_1 为动态电阻,由换能器机械损耗引起; R_L 为负载电阻(无负载时 $R_L=0$); $R_m=R_1+R_L$ 。

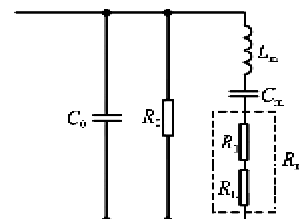


图1 换能器内部等效电路

1.1 串联等效

当换能器串联支路谐振时,即工作在串联谐振角频率 $\omega_s=1/\sqrt{L_m C_m}$ 时, L_m 与 C_m 电抗相抵消,则换能器等效电路如图2(b)所示,进一步将电路作等效变换,等效电路如图2(c)所示。

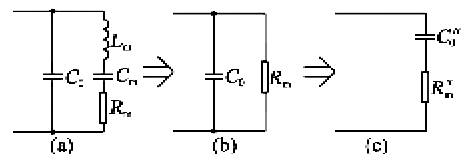


图2 换能器串联谐振等效电路变换

收稿日期:2013-12-02

基金项目:国家“八六三”计划基金资助项目(2011AA09A107)

作者简介:徐晓伟(1982-),男,浙江兰溪人,工程师,主要从事功率超声的开发与应用的研究。

电路的总阻抗和串联支路参数为

$$Z_s = \frac{R_m - j\omega_s R_m^2 C_0}{1 + \omega_s^2 R_m^2 C_0^2} = R''_m + \frac{1}{j\omega_s C''_0} \quad (1)$$

$$R''_m = \frac{R_m}{1 + \omega_s^2 R_m^2 C_0^2} \quad (2)$$

$$C''_0 = C_0 + \frac{1}{\omega_s^2 R_m^2 C_0} \quad (3)$$

当换能器空载时, $R_m = R_1$, 阻值较小, C_0 一般为 10^{-9} F 量级, 因此有 $R'_m \approx R_m$, 串联支路容抗远小于 R'_m , 则有 $Z_s \approx R'_m$, 可见此时换能器两端电压电流相位差近乎为 0, 有许多设计者以换能器两端电压电流相位差为 0 来跟踪换能器谐振, 却发现换能器在实际工作环境中失谐严重, 表现为效率不高、发热严重。其原因是换能器在实际工作中动态参数随负载、温度、湿度等变化, 尤其是负载增加引起 R_L 增大, 随着 R_L 的增大, 容抗增加, 串联谐振频率处相角差增大, 导致换能器跟踪失谐。如果针对不同的负载进行一定的相位补偿, 实现存在一定困难, 往往会过失补偿而使换能器寿命降低。

1.2 并联等效

当换能器并联支路谐振时, 即工作在并联谐振角频率 $\omega_p = \sqrt{\frac{C_0 + C_m}{L_m C_0 C_m}}$ 时, L_m 与 C_m 、 C_0 电抗相抵消, 则换能器等效为图 3(b) 所示, 进一步将电路作等效变换, 可得到图 3(c) 所示电路图。

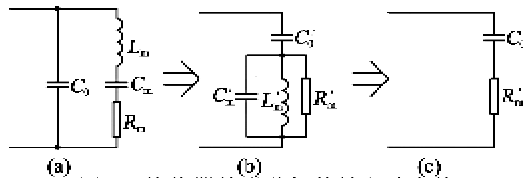


图 3 换能器并联谐振等效电路变换

在并联谐振角频率处, 换能器总阻抗为

$$Z_p = \frac{1}{\frac{1}{R_m + j\omega_p L_m} + \frac{1}{j\omega_p C_m} + j\omega_p C_0} = \frac{1}{\frac{j\omega_p C_m}{1 - \omega_p^2 L_m C_m} + j\omega_p C_0} = \frac{1 - \omega_p^2 L_m C_m + j\omega_p C_m R_m}{j\omega_p (C_m + C_0 - \omega_p^2 L_m C_m C_0) - \omega_p^2 C_m C_0 R_m} = \frac{\omega_p^2 L_m C_m - 1 - j\omega_p C_m R_m}{\omega_p^2 C_m C_0 R_m} = \frac{1}{\omega_p^2 C_0^2 R_m} - j \frac{1}{\omega_p C_0} \quad (4)$$

结合式(4)和图 3(c), 则有

$$R'_m = \frac{1}{\omega_p^2 C_0^2 R_m} \quad (5)$$

$$C'_0 = C_0 \quad (6)$$

由式(5)、(6)可知, 并联等效前、后静态电容未发生变化, 且 R'_m 随 R_m 的增大而减小, 换能器机械损耗功率 $P = U^2 / R'_m = U^2 \omega_p^2 C_0^2 (R_1 + R_L)$ 随负载 R_L 增大而增大。即换能器工作在并联谐振角频率 ω_p 时, 输出功率自动调节; 且换能器在 ω_p 处的品质因数 Q 值较小, 能量分布较平坦, 因此 ω_p 附近的一个区间里都具有功率自动调节性能, 该特性对于超声焊接和超声加工等负载变动频繁、剧烈的场合, 具有重要作用。

2 阻抗匹配

2.1 LC 调谐及滤波

换能器串联等效和并联等效时均对应于电容与电阻的串联, 因此为消除电容的容抗, 提升换能器的有功功率, 需增加合适的感抗来消除容抗, 使换能器和电感的组合表现为阻性, 达到调谐和滤波的目的^[2]。对于电感匹配, 主要有串联电感和并联电感匹配, 串联电感具有滤波功能, 同时为防止换能器负载因短路现象而损毁功放部分, 遂采用串联电感与换能器匹配。考虑到换能器的静态电容随温度、工作时间等发生变化, 影响外部调谐和滤波频率的变化, 因此在换能器两端并联电容 C_1 , 减少静态电容对匹配电路的影响, 电路如图 4 所示。

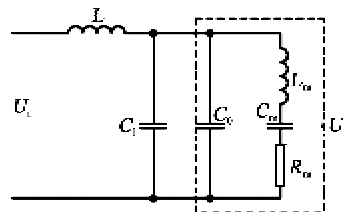


图 4 换能器 LC 匹配电路图

2.2 串联等效匹配

令换能器两端总并联电容为 $C = C_0 + C_1$, 则对于串联等效 ω_s 的总输入阻抗 Z'_s 为

$$Z'_s = \frac{R_m}{1 + \omega_s^2 R_m^2 C^2} + j\omega_s \left(L - \frac{R_m^2 C}{1 + \omega_s^2 R_m^2 C^2} \right) \quad (7)$$

C 一般为 10^{-9} F 量级, 则 $\omega_s^2 R_m^2 C^2 \ll 1$, 对应的串联等效匹配电感取值为

$$L = R_m^2 C \quad (8)$$

电路的增益为

$$A_s = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{1 - \omega_s^2 LC + j\omega_s^2 L/R_m} \quad (9)$$

由式(8)可知, 串联等效时, 整个电路呈纯阻性, 可依据输入电压、电流同相来跟踪匹配状态。匹配 L 、 C 参数与 R_m 相关, 然而 R_m 在实际工作中随负载变化而变化, 若要保持动态匹配, 则要求电路实时调

整 L 、 C 参数值来实现匹配^[3], 这样的设计不仅会增加功放匹配电路的体积, 且在工作过程中动态改变 L 、 C 参数, 会严重影响电路的可靠性和安全性。若要减小或消除 R_m 的影响, 提高匹配电路的适应能力, 可在电路中串联一较小的匹配电容^[4], 从一定程度上而言可改善换能器参数变化所带来的影响。但随着负载增大, 电流减小, 功率下降; 而空载时功率损耗严重, 会引起换能器发热、失谐等现象, 严重影响寿命。对于非宽带功率换能器而言, 其串联谐振频率处频带宽度很窄, 有时仅几赫兹, 在如此窄的频率范围内, 实时跟踪谐振频率点难, 稍有不慎就有可能损坏换能器, 尽管国内设计人员采用数字信号处理(DSP)及直接数字式频率合成器(DDS)等芯片, 甚至用上了现场可编程逻辑门阵列(FPGA)来实时采样并输出频率, 但结果还是常损毁换能器。因此对于大功率和负载变化剧烈的场合, 串联等效匹配并不适用。

2.3 并联等效匹配

令换能器两端总并联电容 $C = C_0 + C_1$, 则对于并联等效 ω_p 的总输入阻抗为

$$Z'_p = \frac{1}{\omega_p^2 R_m C^2} + j \left(\omega_p L - \frac{1}{\omega_p C} \right) \quad (10)$$

由式(10)可知, 当虚部为 0 时电路呈纯阻, 即

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (11)$$

可见在并联谐振点处, 外部匹配的 L 、 C 原件与负载无关, 此时电路的增益为

$$A_p = \frac{U_o}{U_i} = 1 - j \frac{1}{\omega_p R_m C} \quad (12)$$

由式(10)、(11)可知, 并联等效时, 整个电路呈纯阻性, 可依据输入电压、电流同相来跟踪匹配状态, 跟踪与 R_m 变化无关。同时随着负载增大, 等效电阻 R'_m 减小, 功率输出增加; 而空载时功率损耗较小。由式(12)可知, 空载时换能器两端的电压高, 电流小, 因而产生的机械损耗小, 换能器发热小, 即换能器在并联谐振频率处频带宽度很宽, 即使失谐亦不影响换能器使用寿命, 从而简化跟踪采样等电路, 降低成本; 换能器空载时两端的虚部电压很高, 要求换能器及 LC 匹配原件能承受较高的电压, 然而随着负载增加, 换能器两端的虚部电压反而降低。对于大功率和负载变化剧烈的场合, 并联等效匹配较实用。

2.4 变阻

根据式(7)、(10)可知换能器两端并联电容 C_1 可减小换能器的等效电阻, 使阻性负载的电压和功率增加, 起变阻作用。但如果换能器输出功率不满足实际要求, 则需进行变阻以使换能器得到合适的功率, 通常使用变压器来改变电压。如果变压器初次级匝数比为 n , 则电阻和电感等效到变压器初级的为原来的 n^2 倍, 电容等效到变压器初级的为原来的 $1/n^2$, 可见谐振频率无变化, 但功率变为原来的 $1/n^2$, 选择合适的匝比 n , 以满足实际功率要求。

3 结束语

换能器工作在并联谐振角频率 ω_p 附近时, 产生的机械损耗小, 即使失谐不影响换能器使用寿命; 且输出功率随负载增加而增大, 因此适合超声加工及超声焊接等大功率、负载变化剧烈场合的应用。而串联谐振时则没有此类特性。当换能器工作在 ω_p 附近空载时, 产生较高的电压应力, 要求换能器和功放具有相应的耐压能力。外部 L 、 C 参数具有一定的动态误差, 实际工作过程中会使得跟踪的谐振点与换能器本身的谐振点有一定的误差。对于工作在剧烈变化场合的换能器而言, 一般采用硬件锁相的方式进行频率跟踪; 并联谐振附近采样电流在空载时幅值很小, 波形较差, 会给控制带来一定困难, 为避免跟踪不当造成频率上、下限死锁, 必须增加相应的解锁电路, 必要时采用软件辅助解锁。

参考文献:

- [1] 鲍善惠. 压电换能器的动态匹配[J]. 应用声学, 1998, 17(2): 16-20.
BAO Shanhui. Dynamic matching for a piezoelectric transducer[J]. Applied Acoustics, 1998, 17(2): 16-20.
- [2] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声纳技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000.
- [3] 徐春龙, 胡卓蕊, 田华. 压电超声换能器电端匹配电路研究[J]. 纺织高校基础科学学报, 2007, 20(2): 193-197.
XU Chunlong, HU Zhuorui, TIAN Hua. Study on matching circuit of piezoelectric ultrasonic transducers [J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2007, 20(2): 193-197.
- [4] 郭建中, 林书玉, 高伟. 超声换能器电感电容匹配电路的改进[J]. 压电与声光, 2005, 27(3): 257-259.
GUO Jianzhong, LIN Shuyu, GAO Wei. A modification of matching circuit for ultrasound transducer[J]. Piezo-electrics & Acoustooptics, 2005, 27(3): 257-259.