压电换能器在并联谐振频率附近特性的研究

鲍善惠，王艳东

（陕西师范大学应用声学研究所，西安 710062）

摘要：对压电换能器在并联谐振频率附近的特性包括功率自动调节性能、品质因数、效率、激励电压及承受电压等进行了分析研究。这些特性对大功率超声换能器的合理运用具有重要影响。用实验验证了分析计算的结果，并在某些方面给出了与串联谐振频率附近特性的比较。

关键词：压电换能器；并联谐振频率；功率自动调节；效率

中图分类号：TB559 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2006)-02-0165-04

Behavior of piezoelectric transducer at frequencies near parallel resonance

BAO Shan-hui, WANG Yan-dong

(Institute of Applied Acoustics, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: This paper studies characteristics of piezoelectric transducers working at frequencies near parallel resonance including the automatic power adjustment feature, quality factor, efficiency, driving voltage required, and maximum sustained voltage. These are all important to appropriate application of high-power ultrasonic transducers. Experiments were carried out made to verify the results of analyses and calculation. Comparison is made with some features at frequencies around series resonance.

Key words: piezoelectric transducer; parallel resonance frequency; automatic power adjustment; efficiency

1 引 言

压电换能器工作于并联谐振频率的报导首见于文献[1, 2]。A.Shoh 指出：换能器工作于并联谐振频率时，其输出功率会随负载的变化而自动调节。这样可以保证换能器在有载时得到足够的功率，而在空载时避免了因承受过大功率而损坏。文献[3]研究了在并联谐振频率上换能器的力负载对电端阻抗的影响。文献[4]和[5]分别介绍了工作在并联谐振频率上的超声波塑焊机和超声粉碎设备。文献[6]从输出回路的效率角度出发，提出并联谐振频率附近是较佳工作区域。文献[7, 8]认为超声马达和超声变压器工作在反共振频率时，发热较少且品质因数较高。本文对加工、焊接用大功率超声换能器在这个区域中的特性作了进一步的分析和探讨。

收稿日期：2005-11-07；修回日期：2006-01-06

作者简介：鲍善惠(1946-)，男，江苏镇江人，教授，主要研究方向为功率超声的机理、设备和应用。

2 压电换能器的功率自动调节性质

为考察压电换能器在并联谐振频率 f_P 附近的特性，可将换能器的等效电路作图 1 所示的变换。

图 1(a)是常用的压电换能器等效电路，图中 C_0 是静态电容，L_1, C_1 和 R_1 分别是动态电感、动态电容和动态电阻（机械损耗阻）。将 C_0 由并联改为串联（其值不变），其他元件由串联改为并联，即得到图 1(b)。设变换前串联支路的阻抗为 Z_1，变换后并联部分的导纳为 Y_1'，则有：

$$Z_1=R_1+j\omega L_1+\frac{1}{j\omega C_1} \tag{1}$$

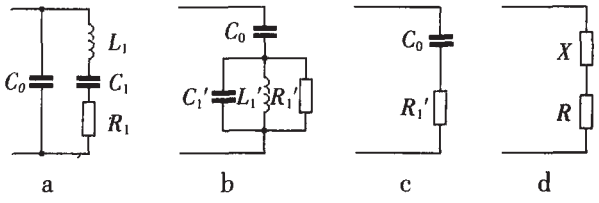


图1 并联谐振时压电换能器等效电路的变换

Fig.1 Transformation of the piezoelectric transducer's equivalent circuit on parallel resonance

$$Y_1=\frac{1}{R_1'}+\frac{1}{j\omega L_1'}+j\omega C_1' \tag{2}$$

上式中的 $\omega=2\pi f$ 为激励信号角频率，f 为激励信号频率。由两个电路的总阻抗相等得

$$\frac{1}{j\omega C_0+\frac{1}{Z_1}}=\frac{1}{j\omega C_0}+\frac{1}{Y_1'} \tag{3}$$

将式(1)和式(2)中的 Z_1 和 Y_1' 代入上式，再令实部和虚部分别相等，即得

$$R_1=\frac{1}{\omega^2C_0^2R_1},\ L_1'=\frac{C}{\omega^2C_0^2},\ C_1'=\omega^2C_0^2L_1 \tag{4}$$

式中 $C=C_0C_1/(C_0+C_1)$。由定义

$$f_P=\frac{1}{\sqrt{\frac{L_1C_1C_0}{C_1+C_0}}}=\frac{1}{\sqrt{L_1C_1}} \tag{5}$$

因此 $f=f_P$ 时，L_1 和 C_1 并联谐振，可视为开路。换能器因此简化成图1(c)所示的 C_0 和 R_1 的串联。由于换能器的负载可表示为与 R_1 串联的负载阻 R_L，故在有载时只需将图1a和式(4)中的 R_1 换成 (R_1+R_L) 即可。设 U 为加在 R_1' 两端的激励电压，则换能器消耗的功率为

$$P=\frac{U^2}{R_1'}=U^2\omega_P^2C_0^2(R_1+R_L)=U^2\omega_P^2C_0^2R_1+U^2\omega_P^2C_0^2R_L \tag{6}$$

上式右端的前一项是换能器的机械损耗功率，后一项是与 R_L 成正比的负载消耗功率，它随着 R_L 增大而增大。这就是换能器工作在 f_P 时所具有的自动调节功率性质。对于超声焊接和超声加工等负载变动频繁、剧烈的场合，这种性质是非常有用的。若换能器工作在串联谐振频率 f_s，则一般不具备这种性质。曾对一个加工用换能器进行了功率自动调节实验，实验时将接有变幅杆的换能器垂直放在 6mm 厚的橡胶垫上，先给换能器输入一定的功率，然后给换能器逐渐加大压力，观察输入电功率随压力的变化。所用频率有两个，一个频率(23516Hz)在 f_s 附近，另一个频率(23831Hz)在 f_P 附近，实验结果如表1所示。从表中可以看出，换能器工作在 f_s 附近时，功率随压力的增大而减小，而在 f_P 附近正好相反，功率随压力的增大而增大。

3 功率自动调节的频率范围

上节的例子实际上说明了功率调节性质不是只存在于 f_P 一点上，而是存在于它附近的一个区间里。这个区间可以用求导的方法确定。当信号角频率为任意值 ω 时，将图1(b)中的 R_1 化为电导 G_1'，并联的 C_1 和 L_1 合并为电纳 B_1'。G_1 和 B_1 分别为

$$G_1=\frac{1}{R_1'}=\omega^2C_0^2(R_1+R_L),\ B_1=\omega^3C_0^2L_1-\frac{\omega C_0(C_0+C_1)}{C_1} \tag{7}$$

再把 B_1'，G_1 和 C_0 变换为串联的 R 和 X，就得到图1(d)。R 和 X 分别是换能器的等效电阻和等效电感。它们由下式确定

$$R=\frac{G_1'}{G_1'^2+B_1'^2},\ X=-\frac{1}{\omega C_0}-\frac{B_1'}{G_1'^2+B_1'^2} \tag{8}$$

将 R_L 包括在 R_1 内，则只有当 R 对 R_1 的导数为负即 R 随着 R_1 的增大而减小时，换能器才有功率自动调节性质。由式(8)得

$$\frac{dR}{dR_1}=\frac{\omega^2C_0^2(-G_1'^2+B_1'^2)}{(G_1'^2+B_1'^2)^2} \tag{9}$$

当 $\omega=\omega_P$ 时 $B_1=0$，代入上式有

$$\frac{dR}{dR_1}=-\frac{\omega_P^2C_0^2}{G_1'^2}<0 \tag{10}$$

这表明，在 ω_P 处，R 的确是随着 R_1 的增大而减小的，因此具有功率自动调节性能。令式(9)等于0，得到导数改变符号的条件：

$$G_1'^2=B_1'^2 \tag{11}$$

表1 不同频率下换能器功率与负载的关系(单位：W)

Table 1 Relation between transducer's power and its load at different frequencies

频率/Hz	功率/W												
压力/kg	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
23516	20	17	14	12	10	8.6	8.3	8.0	7.5	7.0	-	-	-
23831	4.5	6.5	8.0	10	12	14	15	13	11	8.5	7.0	6.2	5.8

忽略高阶小量时,式(11)的解为

$$\omega_1=\omega_p-\frac{R_1}{2L_1},\ \omega_2=\omega_p+\frac{R_1}{2L_1} \tag{12}$$

在区间(ω_1, ω_2)的任一点上,均有 $dR/dR_1<0$,即在此区间里 R 随着 R_1 的增大而减小,换能器的功率会随负载的改变而自动调节。可以证明 ω_1 和 ω_2 即半功率点角频率。图 2 示出了功率自动调节区间。

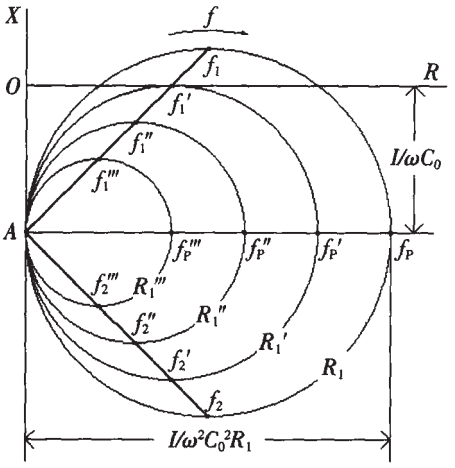


图 2　功率自动调节区间随负载而变化的示意图

Fig.2　Sketch map of the auto-power-adjusting area varying with the load

图中的 R_1, R_1', R_1'', R_1''' 代表不同的负载,负载越大,对应的阻抗圆越小。平行于 OR 轴的直径 Af_p 与各个阻抗圆的交点为并联谐振频率 f_p, f_p', f_p'', f_p''',半功率点分别分布在直线 Af_1 和 Af_2 上。直线 Af_1, Af_2 和半圆 $f_1f_pf_2$ 围成的区域即功率自动调节区间。

4　并联谐振频率处的品质因数 Q

通常所说的机电和机械品质因数是由换能器的结构、材料、负载等决定的,这里所讨论的是由换能器的工作点决定的品质因数,定义为 Q=X/R, X 和 R 分别为换能器的等效电抗和等效电阻。从图 3 所示的阻抗圆图上看,在某个频率点上的 Q 就等于该点的纵、横坐标之比。

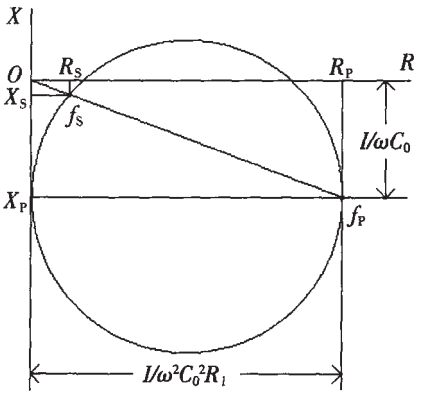


图 3　压电换能器的品质因数示意图

Fig.3　Sketch map of the piezoelectric transducer's quality factor

按定义,f_p 位于平行于横轴的直径与阻抗圆的交点处,f_s 则位于直线 Of_p 与圆的交点处。由三角形的相似关系,有 $X_s/R_s=X_p/R_p$,因此这两点的 Q 相等。去掉 ω 的下标,可将这两点的品质因数写成

$$Q=\omega C_0R_1 \tag{13}$$

由阻抗圆的性质知道,其半径等于 $1/2\omega^3C_0^2R_1$,其圆心到横轴的距离为 $1/\omega C_0$。一般情况下,阻抗圆是与横轴相交的,于是有 $1/\omega C_0<1/2\omega^3C_0^2R_1$,即:

$$\omega C_0R_1<1/2 \tag{14}$$

将式(13)代入式(12)得 Q<1/2。这说明一般结构的压电换能器在 f_s 和 f_p 处的 Q 值都很小。表 2 列出了对一个换能器 Q 值的实测结果。

从表 2 看出,在空气中,Q_s 和 Q_p 均小于 1/2。把换能器的前端浸入水中后,Q 虽有所增大,数值却仍不大。用正弦激励信号时,谐波的影响并不显著。而对于高效的 D 类放大电路,因其输出为方波,f_s 和 f_p 处换能器电流波形严重失真,三次谐波分量非常明显。因此,欲在方波驱动下得到较标准的正弦电流波形,需要较高的 Q_0。此时的频率必定低于 f_s 或高于 f_p。对上述换能器在空气中测量,发现电流呈无明显失真正弦波形状时,频率为 23.644 kHz,此时 Q=3.9。

表 2　某换能器 Q 值的实测结果

Table 2　Measured values for an active transducer's quality factor

测量点	在空气中				在水中			
	f/kHz	R/kΩ	X/kΩ	Q	f/kHz	R/kΩ	X/kΩ	Q
f_s	23.721	0.529	-0.144	0.27	23.549	0.880	-0.474	0.54
f_p	23.807	7.779	-2.052	0.26	23.630	3.786	-2.040	0.54

5 激励电压和承受电压

大功率换能器在工作时通常接有匹配电感。绝大多数情况下匹配电感是与换能器串联的，如图 4a 所示。图中，L_M 是匹配电感，X 和 R 分别是换能器的等效电抗和等效电阻。在工作频率上，L_M 的感抗 X_L 应和换能器的等效电抗 X 共轭，即 $X_L=-X$。因而 L_M 的压降 V_L 与 X 上的压降 V_X 正好抵消。此时换能器和电感组成的系统呈纯阻，激励电压的基频分量 V_F 完全落在等效电阻 R 上，R 两端的电压 $V_R=V_F$。R 消耗的功率 P_R 是换能器的机械损耗功率 P_1 和负载消耗功率 P_0 之和。当 P_R 为一定时，R 两端的电压 $V_R=(RP_R)^{1/2}$，即 R 越大对应的 V_R 越大，要求 V_F 也越大。因此，在 f_p 附近工作的换能器需要较高的激励电压。

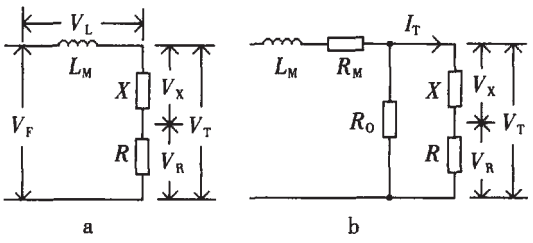


图 4 考虑匹配和损耗时的换能器等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of the transducer involving matching and losses

换能器的承受电压是指换能器两端的实际电压 V_T。由图 4(a)知 $V_T=(V_R^2+V_X^2)^{1/2}$。由于 X/R=Q，故 $V_X=QV_R$，代入得

$$V_T=(1+Q^2)^{1/2}V_R=(1+Q^2)^{1/2}(RP_R)^{1/2} \quad (15)$$

因此，V_T 不仅与 R，而且与 Q 有关。可以按 R 和 Q 的大小将阻抗圆分为三个区域：f_s 附近 R 和 Q 都很小的区域 1，f_p 附近 R 很大、Q 很小的区域 2，以及频率甚低于 f_s、R 很小、Q 却很高的区域 3。由式(14)知，区域 1 的 V_T 很小，区域 2 的 V_T 较高，区域 3 的 V_T 可能比区域 2 的还要高。

6 结 语

换能器的工作点决定了它的多种特性。工作在 f_p 附近时，除了具有很好的功率自动调节性能之外，还可以具有较高的系统效率。这两种优点对于用于超声加工和超声焊接的换能器来说，是非常重要的。在 f_p 附近工作的换能器虽然需要较高的驱动电压，但低的 Q 值使其实际承受电压却相对较低，匹配电感的耐压要求也随之降低（但发生器输出变压器的耐压则需提高）。从另一方面看，工作在 f_p 附近对于发生器的性能要求较高，同时，由于此处的电流波形较差，会给控制带来一定困难。另外，在多个换能器并联使用的情况下，工作在 f_p 附近的可行性尚有待研究。尽管如此，f_p 附近仍是一个具有良好应用前景的工作区域，值得重视对它的研究。

参 考 文 献

[1] Shoh A. US Patent[J]. 3, 432, 691. 1969 年.

[2] Shoh A. Welding of thermoplastics by ultrasound[J]. Ultrasonics, 1976, (9): 209-217.

[3] 林仲茂，马玉龙. 塑料焊接超声振动系统的力负载对其电端阻抗的影响[J]. 声学技术，1992, 11(1-2): 52-56.
LIN Zhongmao, MA Yulong. The effect of the load on the electric impedance in a plastic-soldering ultrasonic vibrating system[J]. Technical Acoustics, 1992, 11(1-2): 52-56.

[4] 蒋贻龙，王建荣，江乃杰，等. 一种新颖的超声波塑料焊接机[J]. 声学技术，1988, 7(4): 14-18.
JIANG Yilong, WANG Jianrong, JIANG Naijie, et al. A novel ultrasound-plastic-soldering machine [J]. Technical Acoustics, 1988, 7(4):14-18.

[5] 王志诚. 一种适用于实验室造影应用的高声强发生器[J]. 声学技术，1998, 17(3): 123-127.
WANG Zhicheng. A high-power ultrasound generator for sonication ultrasound contrast agents [J]. Technical Acoustics, 1998, 17(3): 123-127.

[6] 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.

[7] Hayashi S, Kuwabara Y, SasaKi Y. Rapid tracking of resonance and antiresonance of a piezoelectric resonator [J]. J J A P, 1990, 29(8): L1470-L1472.

[8] Sung K Ha, Young H Kim. Analysis of an asymmetrical piezoelectric annular bimorph using impedance and admittance matrices[J]. J A S A, 2001, 110(1): 208-215.

[9] 林仲茂. 决定超声换能器最大效率的参量 Neff [J]. 声学学报，1982, 7(4): 267-270.
LIN Zhongmao. A parameter Neff for determination of maximum efficiency of ultrasonic transducer [J]. ACTA ACUSTICA, 1982, 7(4): 267-270.