

# 压电换能器的动态匹配

鲍善惠

(陕西师范大学应用声学研究所 西安 710062)

1996年12月23日收到

**摘要** 本文用耦合振荡的原理对压电换能器的匹配问题进行了分析,提出一种关于匹配的新概念——动态匹配,强调了效率在匹配中的重要性,使压电换能器与电发生器之间的匹配有可能变得简单易行且更为有效.

**关键词** 压电换能器, 阻抗匹配, 耦合振荡

## Dynamic matching for a piezoelectric transducer

Bao Shanhui

(Shaanxi Teachers University, Xian 710062)

**Abstract** Based on the coupled resonance theory, analysis is made on the piezoelectric transducer's matching problem. A new concept of matching—dynamic matching is proposed with emphasis on the importance of efficiency in matching. Matching between the ultrasonic generator and the transducer may get easier and more effective.

**Key words** Piezoelectric transducer, Impedance matching, Coupled resonance.

## 1 引言

在超声波加工、超声波清洗等大功率超声应用场合,经常会遇到超声换能器与发生器之间的阻抗匹配问题.匹配在很大程度上决定了超声设备能否高效而安全地工作,因而是一个非常重要的技术环节.一般而言,匹配应起以下作用:

(1) **调谐** 即使负载处于谐振状态,换能器是一个二端器件,它自己并不能识别外加信号是否经匹配而来.只要外加信号的幅度和频率一定,它就可以工作.也就是说,换能器对调谐并无要求.然而,负载失谐会对发生器产

生不利的影 响,严重时甚至会损坏机器<sup>[1]</sup>.因此,调谐实际上是发生器对匹配的要求,是从安全角度出发所必须作到的.

(2) **变阻** 即将换能器的阻抗变至适当值,使发生器达到额定的输出而换能器获得足够的功率.变阻一般通过变压器来实现,在换能器两端并联一个电容也可以减小其等效电阻.

(3) **滤波** 开关型电源的输出为方波,含有大量的谐波成分.设计合理的匹配网络能够有效地滤除这些谐波成分.这有利于减轻功放管的负担,提高设备效率.为减少插入损耗,匹配网络多采用电抗性元件.尽管如此,在进行匹配时仍需把效率作为一项重要指标来考虑.

否则,将会有相当一部分功率损失在匹配元件上,引起发热,破坏正常的工作条件.

## 2 通常采用的匹配原理<sup>[2,3]</sup>

通常采用的匹配方法有串联和并联两种.对于现已流行的开关型超声电源来说,串联匹配能有效地滤除其输出方波中的谐波成分,因而更具实用价值.本文亦限于讨论串联匹配,其原理可用图1来说明.图1a为压电换能器的等效电路. $C_0$ 、 $L_1$ 、 $C_1$ 和 $R_1$ 分别是换能器的静态电容、动态电感、动态电容和动态电阻.换能器的串联谐振频率 $f_s = 1/2\pi\sqrt{L_1C_1}$ .当激励信号的频率等于 $f_s$ 时,串联支路谐振,等效电路成为图1b所示.再进行串并联电路之间的等效变换,即可得到图1c的实线图.图中 $R'_1 = R_1/(1 + \omega_s^2 C_0^2 R_1^2)$ , $C'_0 = C_0 + 1/\omega_s^2 C_0 R_1^2$ ,式中 $\omega_s = 2\pi f_s$ 为串联谐振角频率.如取匹配电感 $L = 1/\omega_s^2 C'_0$ ,如图1c虚线所示,则由换能器和电感组成的系统在 $f_s$ 上谐振,对外呈现为一纯电阻(图1d).这时,发生器与换能器之间只有功率的定向传递而无能量的往复交换.调节激励信号的电压即可使换能器上的功率达到额定值.

这种方法的特点是:换能器工作于一个特定的频率 $f_s$ ,匹配电感也谐振于 $f_s$ ;匹配电感必须取一个由计算而定的量;计算只涉及换能器的自身参数.由于这种匹配是对换能器的静止状态进行的,故可称为静态匹配.静态匹配作为一种模型是简单明了的,但在实际使用时却存在一些问题,主要是:

(1) 选取 $f_s$ 作为换能器工作频率的理由不充分.在激励电压一定的条件下,并联匹配或未加匹配的换能器在 $f_s$ 上可以得到最大功率.但对于串联匹配的换能器来说,最大功率点并不在 $f_s$ 上.

(2) 为了确定匹配电感 $L$ 的值,必须先测量换能器的参数 $f_s$ 、 $C_0$ 和 $R_1$ .这使匹配工作量加大.而小信号下测出的参数值与大信号下实际运用的值并不相等,在测量和计算之后,仍需进行实际调试.换能器最终很难工作在原先设计的频率上,设计和计算的意义因而被削

弱.

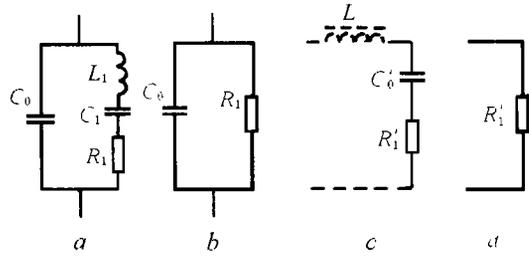


图1 通常匹配方法示意图

(3) 这种理论不支持频率跟踪.由前述可知,当换能器的频率漂移时,只有同时改变外加信号的频率和匹配电感,才能使串联支路和匹配回路都重新谐振于新的串联谐振频率.而通常的频率跟踪(无论是自动还是手动)只调节频率,并不改变匹配电感.这样,整个系统虽恢复谐振,串联支路却并不谐振,图1所示的变换过程不再成立.因此,静态匹配的原理只在一个点上有效,这显然不够实用.

(4) 这种方法未考虑系统的效率.

针对上述问题,作者探索了一种新的匹配机理,即建立在耦合振荡基础上的所谓动态匹配.

## 3 换能器与匹配电感的耦合振荡

如果不是孤立地看待换能器,而是把它和匹配电感当作一个系统,则会得到一个如图2a所示的耦合振荡回路.这个回路的初级由匹配电感 $L_0$ 、初级回路损耗电阻 $R_0$ 和换能器静态电容 $C_0$ 组成,次级由 $C_0$ 和换能器动态电感 $L_1$ 、动态电容 $C_1$ 及动态电阻 $R_1$ 组成.初次级之间的耦合元件为 $C_0$ .由耦合振荡理论可知,初次级回路的自然频率分别为 $\omega_0 = 1/\sqrt{L_0C_0}$ 和 $\omega_1 = 1/\sqrt{L_1C_p}$ ,式中 $C_p = C_0C_1/(C_0 + C_1)$ .可见 $\omega_1$ 实际上就等于换能器的并联谐振频率 $\omega_p$ .初次级之间的耦合系数为 $k = \sqrt{C_1/(C_0 + C_1)} = \sqrt{C_p/C_0}$ .

设初次级回路的阻抗分别为 $Z_0$ 和 $Z_1$ ,耦合电抗为 $X_{01}$ ,外加信号电压为 $E$ ,初次级电

流分别为  $I_0$  和  $I_1$ . 根据基尔霍夫定律可以写出初次级回路的电路方程

$$Z_0 I_0 - j X_{01} I_1 = E \quad (1)$$

$$-j X_{01} I_0 + Z_1 I_1 = 0 \quad (2)$$

式中  $Z_0 = R_0 + j X_0 = R_0 + j(\omega L_0 - 1/\omega C_0)$ ,  $Z_1 = R_1 + j X_1 = R_1 + j(\omega L_1 - 1/\omega C_1)$ ,  $X_{01} = -1/\omega C_0$ . 由 (1)(2) 两式可解出初级回路的等效阻抗

$$\begin{aligned} Z_e = E/I_0 &= Z_0 + X_{01}^2/Z_1 = R_e + j X_e \\ &= (R_0 + R_1 X_{01}^2/|Z_1|^2) \\ &\quad + j(X_0 - X_1 X_{01}^2/|Z_1|^2) \end{aligned} \quad (3)$$

图 2b 示出了耦合回路的等效电路 [4]. 由式 (3) 知, 谐振时应有  $X_e = 0$ , 即

$$X_0 - X_1 X_{01}^2/|Z_1|^2 = 0 \quad (4)$$

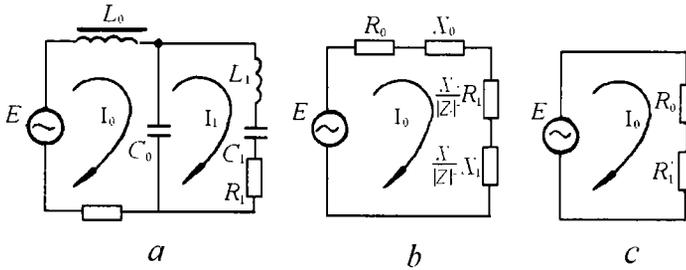


图 2 匹配电感和换能器构成的耦合回路

为了清楚地表示出耦合频率与自然频率之间的关系, 将 (6) 式两边同除以  $\omega_1$ . 以  $\omega_0/\omega_1$  为自变量, 可绘出分别代表  $\omega_I$  和  $\omega_{II}$  的曲线 I 和曲线 II, 如图 3 所示, 这种图称为维恩图 [5]. 图中的两条直线分别代表  $\omega = \omega_1$  和  $\omega = \omega_0$ . 由维恩图可以看出, 对应任一个  $\omega_0$ , 都存在两个耦合频率  $\omega_I$  和  $\omega_{II}$ .  $\omega_I$  总是大于两个自然频率,  $\omega_{II}$  则总是小于两个自然频率. 即使两个自然频率相等, 两个耦合频率也不重合. 这就是通常匹配调节时会遇到一高一低两个谐振点的原因.

将  $X_0, X_1, X_{01}$ , 和  $|Z_1|$  的表达式代入上式, 进行化简并忽略  $R_1$  项 (本文不涉及对耦合频率的精确计算, 忽略  $R_1$  不会对耦合振动的主要结论产生影响), 即可得到耦合回路的频率方程:

$$\omega^4 - (\omega_0^2 + \omega_1^2)\omega^2 + (1 - k^2)\omega_0^2\omega_1^2 = 0 \quad (5)$$

解方程 (5), 舍去两个无意义的负根, 最后得到

$$\omega_{I,II} = \sqrt{\frac{\omega_0^2 + \omega_1^2 \pm \sqrt{(\omega_0^2 + \omega_1^2)^2 - 4(1 - k^2)\omega_0^2\omega_1^2}}{2}} \quad (6)$$

$\omega_I$  和  $\omega_{II}$  即耦合回路的谐振频率, 称为耦合频率. 在耦合频率上, 系统的电抗等于零, 只剩下电阻分量, 如图 2c 所示.

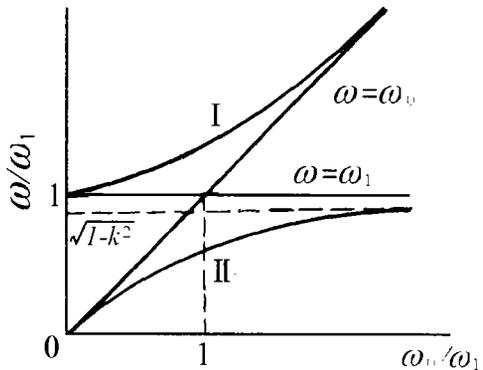


图 3 耦合回路的维恩图

## 4 压电换能器的动态匹配

图 4 是测量匹配电感 - 换能器系统耦合频率的原理图. 图中  $L_0$  为匹配电感,  $R$  为换能器电流取样电阻,  $K$  为用以测量电感量的切换开关,  $Tr$  为压电换能器. 测量时保持放大器的输出电压一定, 用双踪示波器观察换能器电压波形和电流波形的相位以判断系统是否谐振. 取一系列电感值, 每一个电感值对应于初级回路的一个自然频率  $\omega_0$ . 在每个  $\omega_0$  上找寻使系统谐振的所有频率, 这些频率即该  $\omega_0$  下的耦合频率. 以  $\omega_0(\propto 1/L_0)$  为横轴画出所有的耦合点并加以连结便得到图 5 所示的维恩图. 图中除了表示  $\omega_I$  和  $\omega_{II}$  的两条曲线外, 还有一条近似于水平的直线, 它代表方程 (4) 的第三个根  $\omega_{III}$ (解方程时因略去  $R_1$  而丢失). 从物理意义上讲,  $\omega_{III}$  是一些很小的谐振点. 当  $\omega_0$  趋于无限大时,  $\omega_{III}$  将趋于换能器的反共振频率  $\omega_a$ ,  $\omega_{II}$  则趋于共振频率  $\omega_r$ . 由图 4 可见, 对应任何一个  $\omega_0$ , 都存在三个耦合频率. 这就是说, 匹配电感的取值不是唯一的. 不管  $L_0$  取何值, 都可使系统谐振的要求得到满足. 从图 4 还可看到, 换能器的串联谐振频率  $\omega_s$  只是曲线  $\omega_{II}$  上一个普通的点, 因此, 没有理由一定把工作点选取在  $\omega_s$  上.

选定工作点的一个重要依据应当是系统的效率. 系统在谐振时呈一电阻, 阻值为  $R_e = R_0 + R'_1$ (见图 2c). 式中  $R_0$  代表初级回路的损耗, 包括匹配电感和变压器的铁损、铜损以及静态电容的介质损耗, 可以近似看成不随频率而变.  $R'_1$  为次级回路的反射电阻, 具体形式为

$$R'_1 = \frac{1}{\omega^2 C_0^2} \cdot \frac{R_1}{R_1^2 + (\omega L_1 - 1/\omega C_p)^2} \quad (7)$$

由上式可见, 当工作点靠近  $\omega_1$  时,  $R'_1$  会变得很大. 而由图 2c 可知, 系统的效率为  $\eta = R'_1/(R_0 + R'_1) = 1/(1 + R_0/R'_1)$ ,  $R'_1$  大则效率高. 工作点远离  $\omega_1$  时  $R'_1$  较小,  $R_0$  上分得的电压和功率增大, 结果是电感和换能器发热而振动却不佳. 因此, 从提高效率出发, 应该使换能器工作在  $R'_1$  较大的区域, 用加大激励电

压的方法来保证足够的功率.

作者用一种振动车削换能器进行了动态匹配实验, 实验装置同图 4. 换能器前面接有车削刀具, 其端头浸入水中. 工作时刀具作弯曲振动, 端头会溅起水柱, 由水柱的射程即可判断振动的强弱. 实验步骤与前相似, 但在各工作点上不仅要调节频率使系统谐振, 而且要调节激励电压使振动达到设定的强度. 实验结果示于表 1. 表中的  $P_{ac}$  为电功率计测出的系统吸收的总功率,  $V_{dc}$  为功率放大器的电源电压.

由表 1 可以看出:

(1) 不论是在  $\omega_I$ ,  $\omega_{II}$  还是  $\omega_{III}$  上, 只要有足够的激励电压, 换能器就能达到设定的振动强度. 这说明换能器不是只能工作在一个特定的频率上, 而是可以工作在一定的频率范围内(这里所说的频率范围不同于通常说的换能器带宽).

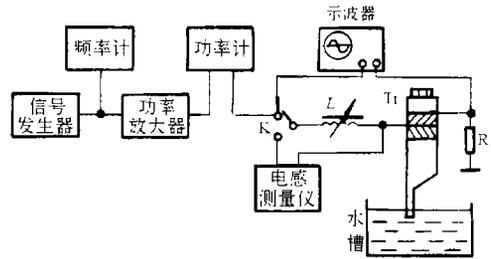


图 4 测量电感 - 换能器系统耦合频率的实验框图

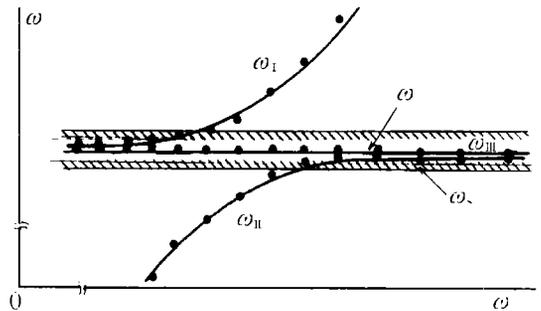


图 5 电感 - 换能器系统的耦合频率实验曲线

表 1 某种车削用换能器的动态匹配实验数据

工作区间	工作点	$L_0$ (mH)	f(Hz)	$P_{ac}$ (W)	$V_{dc}$ (V)	匹配电感发热情况
$\omega_I$	1	15.8	22212	30	245	微温
	2	15.3	22254	40	210	较热
	3	14.8	22312	45	180	同上
	4	14.3	22370	50	125	发烫
$\omega_{II}$	1	13.5	21897	55	150	发烫
	2	13.0	21996	40	150	较热
	3	12.5	22054	30	155	微温
$\omega_{III}$	1	15.8	22200	30	275	微温
	2	14.8	22182	30	290	同上
	3	13.9	22163	25	275	同上
	4	13.0	22142	25	260	同上
	5	12.0	22132	25	230	同上

(2) 在  $\omega_I$  附近只需较小的功率就可达到设定的振动强度, 说明效率较高. 距  $\omega_I$  越远, 需要的功率越大, 同时电感发热加剧, 说明效率降低. 在  $\omega_{III}$  上效率最高, 但需要的激励电压也最高, 同时电流波形较差.

(3) 电功率计的读数 (即表中的  $P_{ac}$ ) 并不一定能反映换能器的工作状况.

(4) 对于此换能器而言,  $\omega_I$  上的 #1,  $\omega_{II}$  上的 #3 以及  $\omega_{III}$  上的所有点, 都是较好的工作点. 换能器实际可取的工作范围如图 5 中的阴影区所示.

从滤波的角度讲,  $L_0$  的值小则系统的品质因数低, 因而滤波的效果差. 实验中看到, 当  $L_0$  较小而  $R'_1$  较大时, 换能器的电流波形有明显失真. 这也会造成系统的效率下降, 并给控制和跟踪带来困难. 因此, 在保证一定效率的前提下, 以使用较大的  $L_0$  为好.

实际匹配主要靠调节完成, 并不需要真正绘制维恩图. 调节的目标是: 换能器电流波形与电压波形同相且无明显失真; 匹配电感和换能器的温升可接受; 换能器的振动状况良好而发生器功放级电流尽可能小. 这种调节过程与通常的匹配调节在机理上虽不相同, 操作上却有相似之处.

动态匹配与频率跟踪是相容的. 因为从定义上讲, 动态匹配与特定频率  $f_s$  无关. 当换能器的频率漂移使系统失谐时, 只需调节信号频率使系统谐振, 就回到了我们所定义的匹配状态.

总起来讲, 动态匹配的特点是: 不要求串联支路谐振; 工作点不是限定在某个特定频率上, 而是可以有一个变动范围, 因而, 匹配电感的值也可在一个范围内选取; 效率被当作重要因素加以考虑; 匹配不是由计算实现, 而是通过动态条件下的调节完成. 这些特点正是动态匹配名称的由来.

动态匹配的缺点是尚未建立起各匹配参量间的定量关系, 操作时主要依赖经验. 此外, 与静态匹配一样, 缺少功率自动调节的机制. 这些问题或许可在进一步的研究中得到解决.

### 参 考 文 献

- 1 胡长阳. D类和E类开关模式功率放大器, 北京: 高等教育出版社, 1985. 27-29.
- 2 田侯萌. 应用声学, 1993, 12(1): 30.
- 3 张镜澄, 王志诚. 声学技术, 1987, 6(4), 21.
- 4 常迥. 无线电信号与线路原理, 北京: 高等教育出版社, 1965. 102-116.
- 5 B. П. 阿谢也夫. 无线电基础, 新一版. 北京: 人民教育出版社, 1957. 184-189.