

B3 用电流角分析超声换能器的匹配问题

鲍善惠

(陕西师范大学应用声学研究所, 西安·710062)

所谓电流角是指流过换能器的电流超前换能器两端电压的角度。引入电流角的概念,可以简化超声换能器的匹配计算,同时,便于直观地表达各相关参量之间的关系。

关键词: 电流角 匹配 超声换能器

1 前言

匹配是功率超声技术中的重要一环。实用中按匹配元件的接法不同而有串联匹配和并联匹配之分。对于现今占主导地位的开关型电源而言,串联匹配可以有效地抑制电源输出方波中的谐波成分,减轻功放管的负担。从这个意义上说,它明显地优于并联匹配。本文也只限于讨论串联匹配。

在进行匹配计算时,先要将换能器谐振时的等效电路由并联形式变换为串联形式,再根据变换后串联等效电容 C 的值确定匹配电感 L 。变换过程有如图 1 所示^[1]。图中 U_T 为换能器两端电压, I 为谐振回路电流, U_0 为发生器输出方波中的基波成分。 R 为换能器的动态电阻, $C = C_0$ 静态电容, R 和 C 分别为串联等效电阻和串联等效电容, L 为匹配电感。虚线示出的 C_p 意义见后。

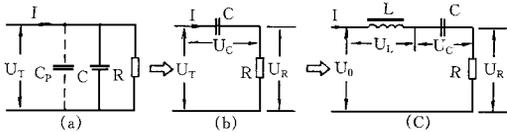


图 1 匹配变换过程示意图

串、并联电路间的变换关系为:

$$R = \frac{R}{1 + \omega^2 C^2 R^2}, \quad C = C + \frac{1}{\omega^2 C R^2},$$

匹配电感为:

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{C R^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2},$$

式中 ω 为换能器串联谐振角频率。

上面各式略嫌复杂,且各量随 R 和 C 变化的关系不够清楚。如果引入电流角,则可以得到较为简单明了的关系式,并且可以图示出各量间的关系,便于分析。

2 电流角的定义

图 1a、b、c 各图的电流电压矢量图分别示于图 2

的 a、b、c。由图 2a 可以看到电流 I 超前换能器两端电压 U_T 一个角度。这个由换能器参数 R 、 C 决定的角度,我们称之为电流角。由图 2b 可见串联等效电阻 R 两端的电压 U_R 与 U_T 之间的夹角亦为 α 。由图 2c 则可知,在完全匹配的前提下,对外加电压 U_0 有 $\vec{U}_0 = \vec{U}_L + \vec{U}_T = \vec{U}_L + \vec{U}_C + \vec{U}_R = \vec{U}_R$, 故 U_0 与 U_T 间的夹角也是 α 。

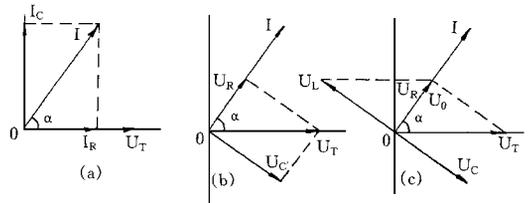


图 2 电流、电压矢量图

根据电流角的定义,可以求出它的表达式来,

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{I_C}{I_R} = \frac{U_T C}{U_T / R} = CR \\ &= \operatorname{arctg}(CR) \end{aligned} \quad (1)$$

由于 R 、 $C > 0$, 故 $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ 。

对照图 2, 可以写出各电流、电压之间的关系式:

$$\begin{aligned} I_R &= I \cos \alpha, & I_C &= I \sin \alpha, \\ U_R &= U_T \cos \alpha, & U_C &= U_T \sin \alpha, \\ U_L &= U_C = U_T \sin \alpha, & U_0 &= U_R \end{aligned}$$

3 用电流角表示各有关参数

和匹配有关的各个参数如串联等效电阻 R , 等效电容 C , 匹配电感 L , 回路的品质因数 Q , 换能器吸收的功率 P_L 等, 均可表示为电流角的三角函数与换能器参数 R 或 C 的乘积。

(1) 串联等效电阻 R , 由图 2b 知:

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{U_T \cos \alpha}{I_R / \cos \alpha} = \frac{U_T}{I_R} \cos^2 \alpha = R \cos^2 \alpha \quad (2)$$

(2) 串联等效电容 C , 由图 2b 知:

$$\frac{1}{C} = \frac{U_C}{I} = \frac{U_T \sin \alpha}{I_C / \sin \alpha} = \frac{U_T}{I_C} \sin^2 \alpha = \frac{\sin^2 \alpha}{C}$$

$$C = C/\sin^2 \quad (3)$$

(3) 匹配电感 L , 由图 2c 知:

$$L = \frac{U_T}{I} = \frac{U_T \sin}{I_R / \cos} = \frac{U_T}{I_R} \sin \cos = \frac{R \sin 2}{2}$$

$$L = \frac{R \sin 2}{2} \quad (4)$$

(4) 品质因数 Q , 由其定义知:

$$Q = \frac{L}{R} = \frac{R \sin \cos}{R \cos^2} = \tan = CR \quad (5)$$

(5) 换能器功率 P_L , 由定义有:

$$P_L = U_0^2 / R = U_0^2 / R \cos^2 \quad (6)$$

这些公式都比较简明, 只要知道了 C 的值, 就可通过这些公式方便地解出各有关参数。

4 对一种匹配方法的分析

作为例子, 我们来分析一种特别的匹配方法, 即先在换能器两端加并一个电容, 然后再串联适当的电感来实现匹配。给换能器并联电容可以有不同的用途, 例如, 用于减小由于工艺原因而造成的换能器静态电容的离散性, 使整个换能器易于调整^[2], 或者用于减小串联电阻 R 以实现功率自动跟踪^[3]。除此之外, 还可用于这里介绍的 L 型匹配^[4,5]。这种方法可以在发生器输出电压较低的情况下, 不用输出变压器升压而使换能器得到所需功率。

由(6)式知, 当 U_0 和 R 一定时, 功率 P_L 是电流角 α 的函数。如果给换能器并联一个电容 C_p 如图 1a 中虚线所示, 则(1)式中的 C 变成 $C_0 + C_p$, α 变大, P_L 也将变大。

设发生器输出幅度为 U_{cc} 的方波, 其基波成份的有效值为 U_0 , 则

$$U_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} U_{cc}$$

再设换能器所需功率为 P_L , 由(6)式有

$$\cos^2 = U_0^2 / P_L R = 2U_{cc}^2 / 2P_L R,$$

由(1)式有 $\tan^2 = C^2 R^2$,

$$\text{上两式联立可解出 } C = \frac{\sqrt{2P_L R - 2U_{cc}^2}}{2U_{cc}^2 R^2}$$

$$\text{则并联电容 } C_p = C - C_0 = \frac{\sqrt{2P_L R - 2U_{cc}^2}}{2U_{cc}^2 R^2} - C_0.$$

这表明, 选择合适的 C_p 值, 即可得到所需的功率。

再看看其他参数的变化趋向:

由(2)式, $R = R \cos^2$, α 增大, R 势必减小,

由(3)式, $C = C/\sin^2$, 当 C 增大时, 上式的分子分母都将增大, 故需将上式稍作变换:

$$C = \frac{C}{\sin^2} = \frac{CR}{R \sin^2} = \frac{\tan}{R \sin^2} = \frac{2}{R \sin 2} \quad (7)$$

因此可知, C 在 $\alpha = 45^\circ$ 时有一极小值, 此时 $CR = 1$ 。加并 C_p 后 C 是增大还是减小, 决定于加并 C_p 前的 C 值和 C_p 值本身。

与此相似的是匹配电感 $L = R \sin 2 / 2$, 不过 L 在 $\alpha = 45^\circ$ 时有极大值。在此点之外, 加并电容后的 L 可能大于, 也可能小于加并前的值。

一个令人感兴趣的参量是回路的品质因数 Q 。对于开关型电源来说, 出于抑制谐波的考虑, 要求回路的 Q 值不低于 5。由(5)式知 $Q = CR$ 将单调地随 C 而变。只要 C 增大, 则不管 C 和 L 是变大还是变小, Q 都将增大。这似乎有点出人意料, 然而真实情况是: C 增大会导致 R 确定无疑地减小, 并且 R 减小的速度大于 L 减小的速度, 由此使 $Q = L/R$ 随 C 增大而确定地增大。于是, 并联电容会使原先回路的 Q 值提高, 这可算是本方法的一个优点。而且, 如果加并电容后 L 减小, 则可以在小的 L 值上得到高的 Q 值。

如果用 U_0 为半径画一个圆, 则相关的参量可在这个圆上直观地表示出来, 如图 3 所示。

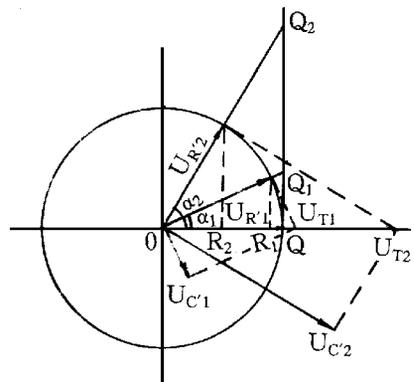


图 3 各相关参数的几何关系

图中, 对应不同的 ($\alpha > 45^\circ$) 换能器两端的电压 U_T 不同, 有 $U_{T2} > U_{T1}$, 而分别对应圆心角 α_1, α_2 的半径就是串联等效电阻 R_1, R_2 上的电压 U_{R1}, U_{R2} 。串联等效电容上的电压 U_{C1} 和 U_{C2} 亦可用作图法求得。

若把此圆当作一单位圆, 则线段 OR_1, OR_2 分别对应 $\cos \alpha_1, \cos \alpha_2$, 即它们与 $\overline{OR_1}$ 和 $\overline{OR_2}$ 相联系。设圆与水平轴的交点为 Q , 则线段 QQ_1 和 QQ_2 分别等于 $\tan \alpha_1$ 和 $\tan \alpha_2$, 即品质因数 Q_1, Q_2 。 OQ_1, OQ_2 则分别等于 $1/\cos \alpha_1$ 和 $1/\cos \alpha_2$, 因此, 可代表功率的平方根 $\sqrt{P_{L1}}$ 和 $\sqrt{P_{L2}}$ 。

参考文献

- 1 程存弟主编. 超声技术- 功率超声及其应用. 西安: 陕西师大出版社; 1993: 87
- 2 何友秦. 晶体管超声波清洗机(三). 声学技术, 1990; 9(4): 10~11
- 3 沈志祥. 关于功率超声源中功率自动跟踪问题的

探讨. 第三届全国功率超声学术会议交流资料. 1990

- 4 张镜澄、王志成. OTL 开关模式晶体管功率超声振荡器. 声学技术, 1987; 6(4): 19~21.
- 5 陆庆阳. 一种实用的频率跟踪方法. 声学技术, 1987; 6(4): 22~23.

B4 用染色法记录液体中大功率超声场的分布

方启平 颜忠余 黄金兰 何北星 林仲茂

(中国科学院声学研究所, 北京·100080)

利用染料在纸上染色可以方便、快速地记录液体中大功率超声场的分布, 本文给出了这一实验研究的结果, 表明该方法在声化学和超声清洗等大功率超声液体处理应用中, 对于测量空化强度的空间分布是一种实用、可取的方法。

关键词: 功率超声、声场测量、染色法、声化学

Recording of high-power ultrasonic field distribution in a liquid with dyeing method

FANG Qiping YAN Zhongyu HUANG Jinlan HE Beixing LIN Zhongmao

(Institute of Acoustics, Academia Sinica, Beijing · 100080)

The experimental result of recording high-power ultrasonic field distribution in a liquid conveniently and rapidly by dyeing a paper is given. It is shown that the method is practical and recommendable to measure the spatial distribution of cavitation intensity in high-power ultrasonic liquid processing applications, such as sonochemistry and ultrasonic cleaning.

Keywords: power ultrasound, ultrasonic field measurement, dyeing method, sonochemistry

1 引言

在大功率超声液体处理的各种应用中, 声场强度及其分布是非常重要的参数。由于超声处理是利用超声振动的能量与物质相互作用, 从而产生各种物理、化学和生物效应。因此, 超声处理的效果与声场的性质密切相关。比如在超声清洗中, 声场强度太弱不能有效地将污物除去, 太强不仅会引起声能分布不均, 还会侵蚀损坏被洗零件。而声能分布不均将导致局部清洗效果差, 形成清洗盲区, 影响整体清洗质量。尤其是在近年来兴起的新学科分支声化学领

域中, 声场强度及其分布对化学反应速率及化学选择性都有显著的影响^[1]。了解声化学反应器中声场的性质, 对于确定最佳的反应条件, 提高声化学反应的可重复性, 促进声化学从实验室规模向工业过渡都是至关重要的。

由此可见, 无论从研究角度还是在工业实际应用中衡量超声系统的性能和超声处理效果, 都需要对声场进行测量。然而, 低频(20~100kHz、大功率条件下液体中声场的测量是一个较复杂的难题, 迄今还没有完全成熟的测量方法。在声场分布测量中, 有

国家自然科学基金资助项目