

## 五、结 束 语

本研究结果告诉我们：首先，模拟置乱，特别是分段置乱，只能实现语音特征的宏观变化，微观地看并没有造成重大的变化，残存的音调、能量、频谱特征等还为辨识置乱信号中的有用信息提供了重要线索。其次，用十个数字组成的中小规模的字串集合来主观评价置乱装置的剩余可懂度，得到的结果是比较可靠和有效的。

实验证明，置乱技术的任何改进，都会灵敏地反映出数字串剩余可懂度的降低。

### 参 考 文 献

- [1] Jayant N. S. et al, *B. S. T. J.*, Part1, 62-1 (1983), 25—47.
- [2] Miller, G. A. G. A. Heise, and W. Lichten, *J. Exp. Psychol.* 41, (1951), 329—335.
- [3] 阿姆斯特特 B. L. 著，“可靠性数学”，科学出版社 (1978)，3—41.

# 一种近似测量换能器效率及其等效电参数的简易方法

林书玉 张福成 周光平 钱建平

(陕西师范大学声学研究所) (七〇五所西安分部)

1989年4月1日收到

本文提出了一种近似测量换能器效率的简易方法。在换能器负载对其共振频率影响不大的情况，利用换能器的等效电路，根据换能器效率的定义，推出了只依赖于频率及谐振时换能器两端电压与电流之间相位角的效率表达式，把测量阻抗的要求变成了测量相位角的要求，与导纳圆法比较，所用仪器简单，测量迅速，克服了导纳圆法中逐点测量及逼近的麻烦，为迅速分析换能器的性能提供了一条简单的测量途径。

## 一、引 言

在分析换能器的性能时，换能器的等效电路是非常重要的，换能器的大部分性能参数都是根据等效电路中的概念定义的，并且换能器的许多分析及测量方法也都是由分析研究等效电路而得出的，例如导纳圆图法<sup>[1]</sup>，M曲线法等。导纳圆图法是一种普遍采用的方法，它能给出换能器的绝大部分性能参数。但是导纳圆图法也存在一定的局限性。第一，所用仪器较复杂。第二，测试步骤较烦，需要测量换能器谐振频率附近许多频率点的导纳值，并且为了提高测量精度，所取频率间隔要小，同时每改变一

次频率均需重新平衡导纳电桥。第三，有时导纳圆并非规则的几何圆，从畸变的导纳圆中得到换能器的性能参数比较困难，且容易产生较大的误差。鉴于这些原因，目前在分析换能器的某一性能时我们已很少采用导纳圆方法。

本文提出了一种利用相位角的概念来测量换能器效率的方法，在一定的近似条件下，结合换能器低频电容的测量，可以获得换能器等效电路中的各个参数值及换能器的有关性能参数，方法简单，测量迅速，而且不需要很复杂的测量仪器。

## 二、测量原理

在共振频率附近, 压电换能器的等效电路如图 1 所示, 其中  $R_0$  代表换能器的介电损耗电阻,  $C_0$  是静态电容,  $L_1, C_1$  及  $R_1$  分别表示空载时换能器的动态电感, 动态电容及机械损耗电阻,  $L'_1$  及  $C'_1$  是有载时换能器的动态电感及动态电容,  $R_r$  是换能器的负载反映电阻, 由换能器的结构, 几何尺寸, 工作频率, 负载性质及工作状态决定, 其具体数值一般由实验测得.

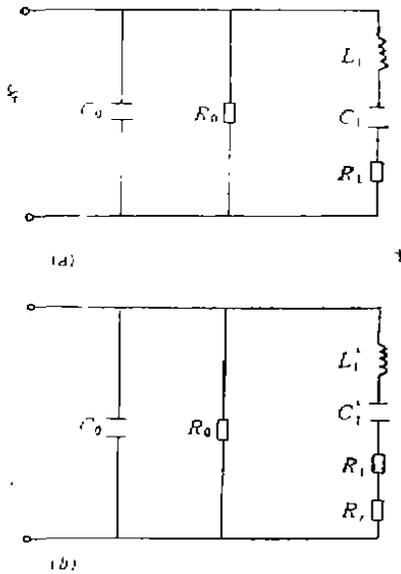


图 1 共振时压电换能器的等效电路  
(a) 空载换能器, (b) 有载换能器

当换能器机械共振时, 图 1 中 a 和 b 两图中的串联支路为纯阻, 由抗部分为零可得

$$\omega_1^2 = 1/L_1 C_1 \quad (1)$$

$$\omega_2^2 = 1/L'_1 C'_1 \quad (2)$$

其中  $\omega_1 = 2\pi f_1$ ,  $\omega_2 = 2\pi f_2$ ,  $f_1$  及  $f_2$  分别是换能器空载及有载时的机械共振频率. 由图 1 也可推得换能器共振时其端电压与电流间的相位差与电路参数间的关系式

$$\text{空载 } \text{tg } \varphi_1 = \omega_1 C_0 R_N \quad (3)$$

$$\text{有载 } \text{tg } \varphi_2 = \omega_2 C_0 R_L \quad (4)$$

$$\text{式中 } R_N = R_0 \cdot R_1 / (R_0 + R_1) \quad (5)$$

$R_L = R_0 \cdot (R_1 + R_r) / (R_0 + R_1 + R_r)$  (6)  
 $\varphi_1$  及  $\varphi_2$  分别为空载及有载时, 换能器电压与电流间的相位差.

### 1. 换能器效率表达式

由图 1 可得换能器的机电效率  $\eta_{mc}$ , 机声效率  $\eta_{ms}$  及电声效率  $\eta_{es}$  的一般表达式<sup>[2]</sup>

$$\eta_{mc} = R_0 / (R_0 + R_1 + R_r) \quad (7)$$

$$\eta_{ms} = R_r / (R_1 + R_r) \quad (8)$$

$$\eta_{es} = \eta_{mc} \eta_{ms}$$

$$= R_0 R_r / (R_0 + R_1 + R_r)(R_1 + R_r) \quad (9)$$

由(3)(4)两式可得,

$$\frac{\text{tg } \varphi_2}{\text{tg } \varphi_1} = \frac{f_2 R_0 (R_1 + R_r) + R_1 (R_1 + R_r)}{f_1 R_1 (R_0 + R_1 + R_r)} \quad (10)$$

结合上述各式, 经过一系列变换可得

$$\eta_{mc} = 1 - \frac{1}{\omega_2 R_0 C_0 \text{tg } \varphi_2} \quad (7')$$

$$\eta_{ms} = \frac{\omega_1 R_0 C_0 \text{tg } \varphi_1 - \omega_2 R_0 C_0 \text{tg } \varphi_2}{\omega_1 R_0 C_0 \text{tg } \varphi_1 - 1} \quad (8')$$

$$\eta_{es} = \frac{\omega_2 R_0 C_0 \text{tg } \varphi_2 - 1}{\omega_1 R_0 C_0 \text{tg } \varphi_2 - 1} \cdot \left( \frac{f_1 \text{tg } \varphi_1}{f_2 \text{tg } \varphi_2} - 1 \right) \quad (9')$$

在以上三式中,  $f_1$  和  $f_2$ ,  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  可直接测量,  $R_0$  和  $C_0$  的乘积可在远离谐振频率的低频处来测量.

### 2. 换能器等效电路诸参数的表达式

一般说来, 换能器负载工作时, 其有载共振频率与空载共振频率是有差别的, 但是在某些情况下, 如果换能器的负载对其共振频率影响不大, 例如, 换能器在轻负载下工作, 或者尽管换能器处在重负载下工作, 但负载是纯阻性的(液体中工作的大辐射面积高频换能器近似属于这种情况), 此时我们可以近似认为  $f_1 = f_2$ , 即换能器的负载几乎不影响换能器的共振频率. 另外低频时换能器的等效线路可用图 2 来表示, 其中  $C^T = C_0 + C_1$  为换能器的低频电容, 可用电容电桥直接测量.

由图 2 得

$$\text{tg } \varphi_L = \omega_L R_0 C^T \quad (11)$$

其中  $\varphi_L$  为低频时换能器电压与电流之间的相位差,  $\omega_L = 2\pi f_L$ ,  $f_L$  为测试频率, 例如取  $f_L = 1000\text{Hz}$ . 根据(11)式可测得  $R_0$  及  $C^T$  的乘

$$Q_L = \omega_1 L_1 / (R_1 + R_r) \quad (20)$$

### 3. 简易测量方法

从上述各个表达式中我们可以发现，换能器的许多性能参数可以由几个基本的可测量参数导出，这些基本参数包括，换能器的机械共振频率，谐振时电压与电流间的相位角，换能器的低频电容及并联调谐电感。用比较简单的实验仪器测出这些参数，利用上述导出的表达式就可以间接地获得换能器的各个性能参数，从而对换能器的工作性能有所了解，为评价换能器提供一些可供利用的实验数据。

## 三、测量结果

运用上面提出的方法我们进行了一些具体的测量。待测换能器是自制的夹心式压电换能器

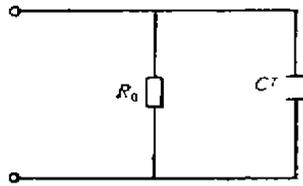


图2 低频时换能器的等效电路

积，由  $C^T$  的测量值可得  $R_0$

$$R_0 = \text{tg} \varphi_L / \omega_L C^T \quad (12)$$

在换能器两端并联调谐电感  $L$  可测出换能器的静态电容  $C_0$

$$C_0 = 1 / \omega_1^2 L \quad (13)$$

由此可得换能器的动态电容及动态电感

$$C_1 = C^T - C_0 \quad (14)$$

$$L_1 = 1 / \omega_1^2 C_1 \quad (15)$$

由(3)(4)二式可得换能器的内部机械损耗电阻  $R_1$  及负载反映电阻  $R_r$

$$R_1 = R_0 / (\omega_1 R_0 C_0 \text{ctg} \varphi_1 - 1) \quad (16)$$

$$R_r = R_0 \cdot \left( \frac{1}{\omega_2 R_0 C_0 \text{ctg} \varphi_2 - 1} - \frac{1}{\omega_1 R_0 C_0 \text{ctg} \varphi_1 - 1} \right) \quad (17)$$

换能器的有效机电耦合系数为

$$K_{eff}^2 = \frac{C_1}{C_1 + C_0} \quad (18)$$

换能器的固有机电品质因数及负载机械品质因数为

$$Q_m = \omega_1 L_1 / R_1 \quad (19)$$

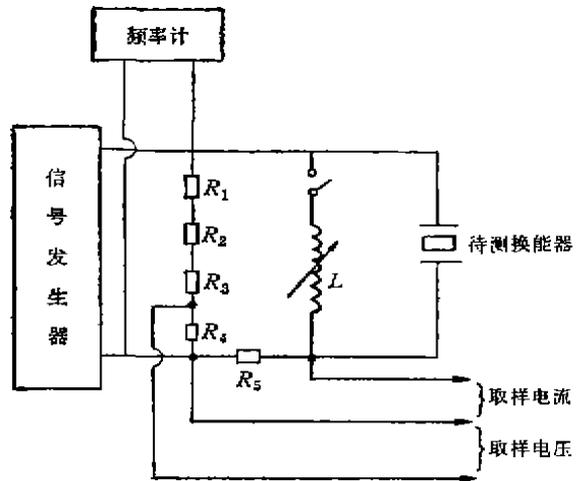


图3 换能器测试电路图

表1 换能器性能参数的测量结果

测试方法	$f_1(\text{Hz})$	$f_2(\text{Hz})$	$\varphi_1(\text{度})$	$\varphi_2(\text{度})$	$\varphi_L(\text{度})$	$C^T(\text{PF})$	$C_1(\text{PF})$	$L(\text{mH})$	$C_1(\text{PF})$
导纳圆法	20008	19873	×	×	×	6439.3	5854.6	10.81	584.7
本文方法	20334	20254	6.8	57.4	66.0	6017.0	5579.5	10.98	437.5
$L(\text{mH})$	$R_0(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$R_r(\Omega)$	$\eta_{me}$	$\eta_{ms}$	$\eta_{ex}$	$Q_m$	$Q_L$	$K_{eff}$
108.21	$5.20 \times 10^4$	135.9	1302.1	0.973	0.905	0.881	100.1	9.5	0.301
140.00	$5.94 \times 10^4$	167.8	2110.0	0.963	0.926	0.892	106.6	7.9	0.270

，测试电路见图3，测试结果见表1。为了便于比较，表中同时列出了导纳圆图法的测量结果，导纳圆是利用七〇五研究所西安分部研制的自动导纳测试仪测量的。图3中  $R_4$  是电压取样电阻， $R_5$  是电流取样电阻， $R_{1-5}$  五个电阻皆为无感电阻， $L$  是换能器的并联调谐电感。电压及电流取样送入示波器或相位计进行相位测量。

从表中测量数据可以看出，本文所得测量结果与导纳圆法的结果基本符合。

## 四、讨 论

通过上述分析可以看出，本文所用的测量方法中直接测量参数较少，减少了误差来源，有可能提高测量精度。在几个直接测量参数中，频率的测量精度较高，所以误差主要来源于相位差的测量，如果能够提高相位差的测量精度，就可以保证该法的测量精度。另外由于换能器有载时电压与电流间的相位差大于空载时电压与电流间的相位差，而利用示波器法测相位时，较大相位角的测量精度相对来说高于较小相位角的测量精度，因此本文提出的测量方法可以提高有载时的测量精度，克服了导纳圆法的不足，因为有载导纳圆比较难于测出，圆的畸变可能带来较大误差。

为了提高相位角的测量精度，可采取以下的方法与措施。

### 1. 提高示波器测量中距离的测量精度

利用双线示波器测量相位归结为测量距离。为提高测量精度，可在示波器屏上放一张带有细密刻度的透明纸。另外测量前必须调整示波器使双线之间本身的相位差为零。

### 2. 利用相位计直接测量相位

在小信号下，换能器的电压及电流信号畸变可以忽略不计，用相位计直接测相位时可以

提高测量精度。但在大信号下，由于换能器的非线性效应，波形发生畸变<sup>[1]</sup>，相位计的相差测量将产生较大的误差。

### 3. 利用三电压法测量相位角

用三电压法也可以测量相位角为提高测量精度，必须利用大输入阻抗的电压表，例如真空管电压计，同时，串联无感电阻的大小应与换能器谐振时的阻抗绝对值在同一个数量级内。

通过上述分析与讨论可以看出，本法的适用范围是，1. 由于换能器的非线性效应，大信号时换能器上的电压及电流波形将发生畸变，造成相位差测量困难，产生较大的误差。所以本法适宜于换能器小信号的测量及分析。2. 由于假设换能器负载对其共振频率影响不大，所以如果某些情况下负载对换能器的共振频率影响较大，利用本法会产生一定的误差。故本法只适用于负载对换能器的共振频率影响不大的场合，例如轻负载或纯阻负载。

## 五、结 论

本文提出的方法与换能器的常规测量方法在原理上差不多。利用换能器谐振时的等效电路，在一定的局限条件下，我们推出了换能器的等效电路参数及性能参数与谐振时换能器电压与电流间的相位差和机械谐振频率的关系式。具体分析表明，此法直接测量参数较少，大部分性能参数可由几个基本的可测量参数导出。与导纳圆法相比，测试仪器简单，测量迅速，测量结果表明，在小信号情况下，本法所得结果与导纳圆法的结果基本符合。

## 参 考 文 献

- [1] 王矜奉等，声学报，13-6(1988)，401—407。
- [2] 林仲茂，声学报，7-4(1982)，267—270。
- [3] Sadayuki Ueha, Minoru Kuribayashi, *J. Acoust Soc. Am.*, 79-4 (1986), 985—989。