

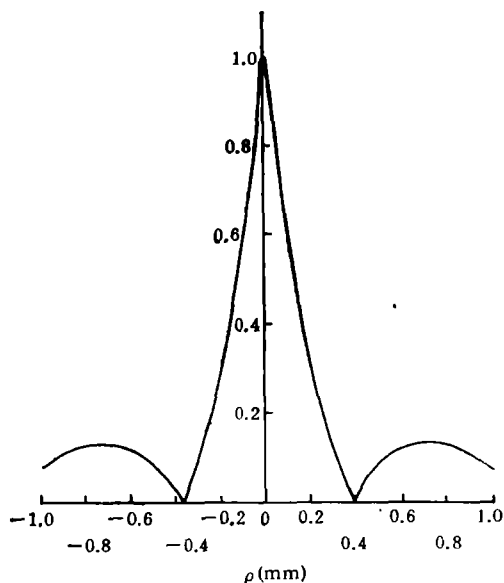


图7 焦平面上振速分布

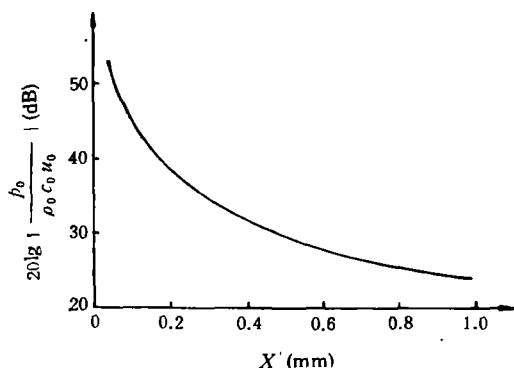


图8 角膜中的声压分布

平方成正比,而这个半径实际上是声源的有效半径,在现在的情况下,有效半径很小,所以,近场距离也很小。

四、结 束 语

本文是超声角膜测厚仪研制的一部分工作,它利用瑞利公式,通过适当的近似,计算了超声角膜测角探头沿轴向的声压分布,焦平面上的振速,以及角膜中的声压分布,所得的结果,在超声角膜测厚探头的设计中,对于探头的几何尺寸和材料的选取,具有一定的意义。

参 考 文 献

- [1] Krautkrämer J., Krautkrämer H. Ultrasonic Testing of Materials (Third Edition), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1983, 75—80.
- [2] O'neil H. T., J. Acous. Soc. Am., 21-5 (1949), 516—526.
- [3] Filipczynski L., Acustica, 28 (1973), 121—128.
- [4] Von U. Schlenger mann, Krautkrämer GmbH, Köln, Acustica, 30-6 (1974), 291—300.
- [5] 杜功焕,应用声学, 7-3(1988), 1—9.
- [6] 何祚镛,声学理论基础,国防工业出版社, 1981, 231—249.
- [7] 王竹溪、郭敦仁,特殊函数概论,科学出版社, 1979, 440—455.

有损耗多组压电体组成的夹心换能器的分析

颜 忠 余 林 仲 茂

(中国科学院声学所 北京 100080)

1992年6月1日收到

本文以压电材料的复常数表示法来计及换能器的损耗。由此导出了有损耗压电体及由多组压电体组成的夹心换能器的等效线路。提出实用条件下压电材料复常数的测量方法,并编制了有损耗一维纵向复合振动系统的通用计算程序。给出计算实例,理论计算与测量结果符合较好。

一、引言

在功率超声的实际应用中,评价、分析和设计换能器,有必要考虑换能器本身的损耗。此外,如何选择最佳结构,使换能器的频率及阻抗符合要求而且效率高,是换能器设计的重要课题。综合以前文献,对换能器的分析主要有以下几种做法:1. 不计及换能器损耗;2. 将换能器损耗等效为一集中阻值;3. 只设一组压电体,忽略压电片之间电极厚度影响;4. 以复常数方式计及材料损耗。

第一种处理方法存在明显的缺陷。第二种情况单纯引入一集中阻不恰当,因为引入一集中阻,势必引入一集中抗,然而这仅适用于某一频率。频率稍许变化就引起集中阻抗很大变化。方法3结构仅仅局限于一种形式,即压电片之间紧密相连,这样就不能解决厚电极情况。方法4计及的是材料损耗,对大功率压电陶瓷这种损耗小的材料无法测量其复常数,而且目前一些文献中所给的材料参数(纯实数)都是特殊测量条件下的结果,在实际的工作条件下会有较大偏差。以上不足就限制了这些方法的实际应用。

本文从复常数观点出发,将换能器的其它损耗计及在压电材料损耗中,得出纵向复合振动压电体的等效线路,推导了多组压电体(这里压电体指由压电片紧连成一体,中间没有以非压电片隔开)所组成换能器的等效线路,并给出具体结构下压电材料复常数的测量方法。由此,根据网络理论编制了通用程序 IACAS。并对一实例进行计算,给出计算结果,与实测值比较,符合较好。

二、考虑损耗的压电体等效线路

在纵向复合振动换能器中,压电体通常是由若干压电片组成。当压电片很薄时($l_0 \ll \lambda/4$),压电体等效线路如图1所示。

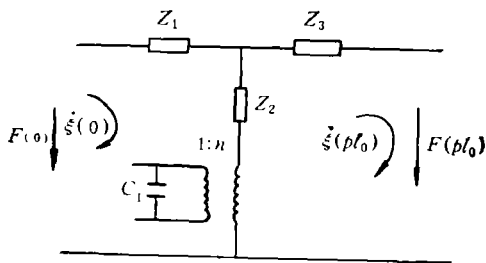


图1 多压电片构成的压电体等效线路

图中,

$$Z_1 = Z_3 = jZ_0 \tan \frac{1}{2} kl; \quad Z_2 = Z_0 / j \sin kl;$$

$$C_1 = PC_0; \quad n = d_{33} \cdot A / S_{33}^E \cdot l_0$$

其中

$$C_0 = \epsilon_{33}^S \cdot A / l_0 = A / l_0 \cdot \epsilon_{33}^T (1 - d_{33}^2 / S_{33}^E \cdot \epsilon_{33}^T);$$

$$l = Pl_0; \quad Z_0 = \rho \cdot v \cdot A; \quad v = (\rho \cdot S_{33}^E)^{-1/2};$$

$$k = \omega / v.$$

式中 l_0 ——单片压电片厚度; P ——压电体所含的压电片数; A ——压电片端面积; ω ——角频率; ρ ——压电材料密度; S_{33}^E ——压电材料纵向柔顺常数; d_{33} ——纵向压电常数; ϵ_{33}^T ——恒应力(T)条件下的纵向介电常数; ϵ_{33}^S ——恒位移(S)条件下的纵向介电常数; v 为细杆中纵波声速; k 为波数; n 为机电转换系数。

如果将换能器结构工艺及弹性滞后等引起的损耗全部看成是均匀分布在压电材料中,则可以引入复柔顺常数来计及机械损耗,用复介电常数和复压电常数分别计及介电损耗和机电转换过程中的能量损失^[1]。由此压电材料纵向振动复常数可表示为

$$S_{33}^E = S_{33}'^E - jS_{33}''^E; \quad \epsilon_{33}^S = \epsilon_{33}'^S - j\epsilon_{33}''^S;$$

$$d_{33} = d_{33}' - jd_{33}''$$

将这些复常数代入图1所示的各量中,可得到各参量的复数表示式

$$C_0 = \epsilon_{33}^S \cdot A / l_0 = C_0' - j \frac{1}{\omega R_e},$$

其中 $C_0' = \epsilon_{33}'^S \cdot A / l_0$; $1/R_e = \epsilon_{33}''^S \cdot A / l_0 \cdot \omega$ 反映介电损耗的大小。

$$n = d_{33} \cdot A / (S_{33}^E \cdot l_0) = n' - jn'';$$

$$\begin{aligned}
 n' &= \frac{A}{l_0} \cdot \frac{S_{33}^E d_{33}' + S_{33}^{E'} \cdot d_{33}''}{(S_{33}^E)^2 + (S_{33}^{E'})^2}; \\
 n'' &= \frac{A}{l_0} \cdot \frac{S_{33}^E d_{33}'' - S_{33}^{E'} \cdot d_{33}'}{(S_{33}^E)^2 + (S_{33}^{E'})^2}; \\
 v &= (\rho \cdot S_{33}^E)^{-1/2} = v' + jv''; \\
 v' &= (\rho \cdot S_{33}^E)^{-1/2} \cdot \frac{1}{D} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (D+1) \right]^{1/2}; \\
 v'' &= (\rho \cdot S_{33}^E)^{1/2} \cdot \frac{1}{D} \cdot \left[\frac{1}{2} (D-1) \right]^{1/2}; \\
 k &= \omega/v = k' - jk''; \\
 k' &= \omega \cdot \left[\frac{\rho \cdot S_{33}^E}{2} (D+1) \right]^{1/2}; \\
 k'' &= \omega \cdot \left[\frac{\rho \cdot S_{33}^E}{2} (D-1) \right]^{1/2}; \\
 D &= (1 + \sigma^2)^{1/2}; \sigma^2 = S_{33}^{E'}/S_{33}^E;
 \end{aligned}$$

于是 $Z_1 = R_1 + jX_1$; $Z_2 = R_2 + jX_2$; $Z_3 = R_3 + jX_3$

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{\rho \cdot A}{D} \cdot \left(\frac{1}{2\rho S_{33}^E} \right)^{1/2} \\
 &\quad \cdot \{ (D+1)^{1/2} \cdot \text{sh} k''l \\
 &\quad - (D-1)^{1/2} \cdot \sin k'l \} / \\
 &\quad \{ \text{ch} k''l + \cos k'l \} \\
 X_1 &= \frac{\rho \cdot A}{D} \left(\frac{1}{2\rho S_{33}^E} \right)^{1/2} \\
 &\quad \cdot \{ (D-1)^{1/2} \cdot \text{sh} k''l \\
 &\quad + (D+1)^{1/2} \cdot \sin k'l \} / \\
 &\quad \{ \text{ch} k''l \cdot l + \cos k'l \} \\
 R_2 &= \frac{\rho \cdot A}{D} \left(\frac{2}{\rho S_{33}^E} \right)^{1/2} \\
 &\quad \cdot \{ (D+1)^{1/2} \cdot \text{sh} k''l \cdot \cos k'l \\
 &\quad + (D-1)^{1/2} \text{ch} k''l \sin k'l \} / \\
 &\quad \{ \text{ch} 2k''l - \cos 2k'l \} \\
 X_2 &= \frac{\rho \cdot A}{D} \left(\frac{2}{\rho S_{33}^E} \right)^{1/2} \\
 &\quad \cdot \{ (D-1)^{1/2} \text{sh} k''l \cos k'l \\
 &\quad - (D+1)^{1/2} \text{ch} k''l \sin k'l \} / \\
 &\quad \{ \text{ch} 2k''l - \cos 2k'l \} \\
 R_3 &= R_1; X_3 = X_1
 \end{aligned}$$

此时, 压电体的等效线路可改为图 2 所示。图

应用声学

中 R 表示损耗。

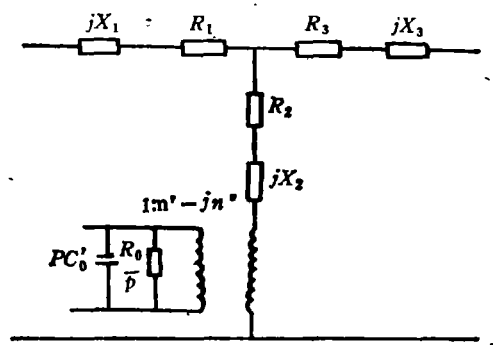


图 2 考虑损耗后压电体的等效线路

三、多组压电体组成的换能器等效线路

在以往的分析中, 复合纵向振动换能器的压电体部分仅考虑一组, 且常忽略压电片之间电极厚度影响, 即所有压电片紧紧连接在一起, 如图 3 中的 A 段。然而在功率超声的应用中, 时常遇到各种各样的换能器结构, 例如: 换能器具有多组压电体结构, 即在某两压电片之间夹有金属部分。如图 3 的 A 段和 C 段之间有金属部分 B 段, 这样就构成两组压电体结构。事实上, 厚电极换能器也可作为这种结构处理。下面先讨论单组夹心换能器典型结构, 如图 3 虚线框 I 内所示, 两金属块之间夹一组压电体 (若干压电片组成), 换能器前 (右) 端接负载或变幅杆, 另一端 (后端) 自由, 其等效线路如

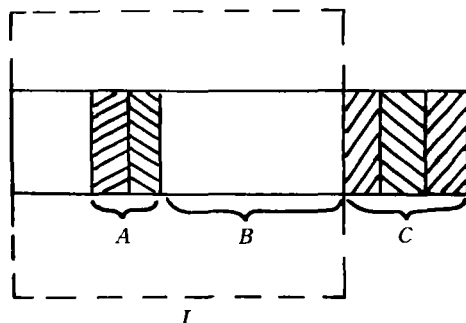


图 3 双组压电体结构的夹心换能器

图 4. Z_g 为后端块的输入阻抗, 虚线框 II 内为 B 段金属块的等效网络。其中

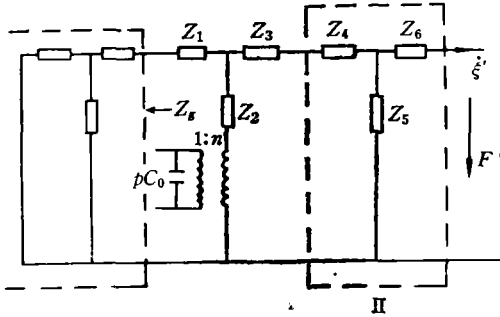


图 4 图 3 虚线框 I 内结构的等效线路

$$Z_4 = Z_6 = jZ_f \tan \frac{1}{2} k_f l_f;$$

$$Z_5 = Z_f / j \sin k_f l_f;$$

$$Z_f = \rho_f v_f \cdot A; k_f = \omega / v_f.$$

图 4 化简后的等效线路如图 5 虚线框 III 内所示。

$$C_{a0} = P \cdot C_0$$

$$\begin{cases} Z_{a1} = A_2 \\ Z_{a2} = A_1 - A_2 \\ Z_{a3} = A_4 - A_2 \end{cases}$$

$$A_1 = - \frac{H}{Z_g + Z_1 + Z_3 + Z_4 + Z_5};$$

$$A_2 = \frac{(Z_g + Z_1) \cdot Z_5}{Z_g + Z_1 + Z_3 + Z_4 + Z_5};$$

$$A_4 = \{ (Z_g + Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4 + Z_5) + Z_2(Z_g + Z_1) \} / \{ H \cdot (Z_g + Z_1 + Z_3 + Z_4 + Z_5) \} \cdot Z_5^2 + Z_5 + Z_6$$

$$H = Z_2^2 - (Z_g + Z_1 + Z_2) \cdot (Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5)$$

那么图 3 整体结构的等效图可表示为图 5, 其中虚线框 IV 内为第二组压电体 C 的等效线路。设各压电片材料、尺寸都相同, 则图 5 化简后的网络图仍和框 III 内的相似, 仅以 $Z_{w1}, Z_{w2}, Z_{w3}, C_{w0}$ 分别代替 $Z_{a1}, Z_{a2}, Z_{a3}, C_{a0}$ 。

$$C_{w0} = C_{a0} + C_{b0}$$

$$\begin{cases} Z_{w1} = -B_1 - B_2 \\ Z_{w2} = B_2 \\ Z_{w3} = -B_2 - B_4 \end{cases}$$

$$B_1 = \frac{G}{Z_{a2} + Z_{a3} + Z_{b1} + Z_{b2}};$$

$$B_2 = \frac{Z_{a2} \cdot Z_{b2}}{Z_{a2} + Z_{a3} + Z_{b1} + Z_{b2}};$$

$$B_4 = \frac{Z_{a2}^2 \cdot Z_{b2}^2}{G(Z_{a2} + Z_{a3} + Z_{b1} + Z_{b2}) - \frac{(Z_{a1} + Z_{a2}) \cdot Z_{b2}^2}{G} - Z_{b2} - Z_{b3}};$$

$$G = Z_{a2}^2 - (Z_{a1} + Z_{a2}) \cdot (Z_{a2} + Z_{a3} + Z_{b1} + Z_{b2}).$$

当有更多组压电体时, 则依此类推, 可得到同样形式的网络图, 由此可对更一般结构形式的夹心换能器进行分析。

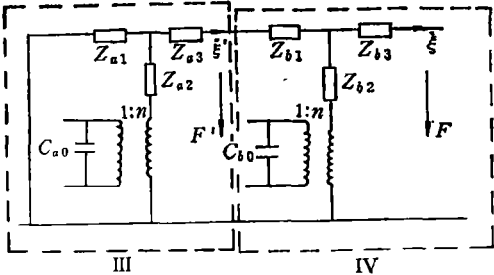


图 5 图 3 所示结构的等效线路

四、压电材料纵向复常数的测量方法

压电材料的复常数随材料所受的应力大小而变化, 且是频率的函数。因此有必要在实用条件下测量压电材料的复常数。参考文献[2], 我们建立了在给定预应力和一定的频率范围内材料复常数的测量方法。考虑实用情况, 换能器各组件间的接触损耗都计及在压电材料中。

如图 3 虚线框 I 所示的压电换能器, 用一定的预压力将其夹紧, 改变前后端金属块的长度, 就可以改变谐振频率。取前后端的金属块为同一材料, 这时其等效线路只是在图 1 的两端接上前后端块的输入阻抗 jZ_f 及 jZ_b 。

$$Z_b = Z_{b0} \tan k_b l_b; Z_f = Z_{f0} \tan k_f l_f;$$

$Z_{f_0} = Z_{f_1} = \rho_m v_m A$; $k_0 = k_f = \omega / v_m$.
 ρ_m, v_m 分别为金属块的密度和声速, 则机械端输入阻抗为

$$Z_m = \left\{ \left(jZ_0 \operatorname{tg} \frac{1}{2} kl + jZ_f \right) \cdot \left(jZ_0 \operatorname{tg} \frac{1}{2} kl + jZ_f \right) \right\} / \left\{ jZ_0 \operatorname{tg} \frac{1}{2} kl + jZ_0 \right. \\ \left. + jZ_0 \operatorname{tg} \frac{1}{2} kl + jZ_f \right\} + \frac{Z_0}{j \sin kl}$$

电端输入导纳为

$$Y = j\omega P C_0 + n^2 / Z_m = j\omega P A \epsilon_{33}^S / l_0 + d_{33}^2 \cdot \frac{A^2}{l_0^2 (S_{33}^E)^2} \cdot \frac{1}{Z_m} \quad (1)$$

根据(1), 首先测出三个频率点($\omega_1, \omega_2, \omega_3$)处的导纳值, 然后用迭代法按下列步骤确定复常数

1. 给出 S_{33}^E 的初始值 由(1)式及计算程序的多次模拟得知换能器共振频率主要由 S_{33}^E 的实部决定, 而共振频率处的导纳主要由复数 S_{33}^E 决定. 假定介电常数、压电常数都为实数, 编制专用程序即可估算 S_{33}^E 的初始值.

2. 求 ϵ_{33}^S, d_{33} 的值 利用 S_{33}^E 的值及两个测量频率点(ω_1, ω_2)处的导纳值, 由(1)式可求出 ϵ_{33}^S, d_{33} 值.

3. 求新的 S_{33}^E 的值 由(1)式解出

$$\operatorname{tg} \frac{kl}{2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2)$$

式中

$$a = j \cdot 4QZ_0 + Z_0(Z_f + Z_f); \\ b = j \cdot 2Q(Z_f + Z_f) - 2Z_0^2 + 2Z_f Z_f \\ c = -Z_0 \cdot (Z_f + Z_f); \\ Q = \pi^2 / (Y - j\omega P C_0); \\ n = d_{33} A / (S_{33}^E l_0).$$

因为压电体长度 $l \ll \lambda$, $\frac{1}{2} kl < \pi/2$, 所以 $\operatorname{tg}(kl/2) > 0$. 当 $R_e(b) > 0$, (2)式中取+号, 否则取-号. n 表达式中的 S_{33}^E 仍取上一次值. 利用步骤2中的 d_{33}, ϵ_{33}^S 值及第三测量频

应用声学

率点(ω_3)的导纳值, 即可求得 $\operatorname{tg}(kl/2)$ 的值, 进而得到 S_{33}^E 的新值.

4. 如此迭代, 直至达到一定的精度

由于压电陶瓷的损耗小及测量过程中存在一些误差, 所以三个频率点的选取应特别注意, 介电常数对反共振频率及阻抗影响显著, 压电常数虚部对反共振频附近而相角又大的点的导纳影响显著, 因此频率点(ω_1, ω_2)应取在反共振处及附近; 弹性柔顺常数对共振频率及其阻抗影响大, 所以 ω_3 应取在共振频率附近. 这样确定的复常数会更准确.

五、IACAS 程序

基于以上分析, 同时将各种类型的变幅杆系统也用等效线路表示^[3]. 根据网络理论, 我们可以对有损耗多组压电体所组成的复合换能器(包括变幅杆部分)振动系统进行定量分析. 编制了通用程序 IACAS.

程序具备如下功能

1. 空载情况下计算输入电阻抗与频率的关系, 可以算出共振、反共振频率, 画出导纳圆图. 2. 计算负载情况下电压、电流传输系数和各频率处的效率. 3. 能方便地找出各种参数(共振、反共振频率及其阻抗、负载传输情况等)与系统某一部分尺寸的变化关系, 并能画出关系曲线. 4. 可以找出效率随负载的变化情况, 并可描出关系曲线.

程序特点是

1. 在运行过程中经常出现提示, 给用户提供重新输入数据的机会, 节省了机时, 减少了重复运算. 2. 程序实行块结构编制, 可根据实际振动系统的特殊形状及特殊要求, 临时调编某一部分程序.

六、计算实例

用我们自己建立的方法测量了压电材料在不同频率附近的复常数, 列于表1, 并代入 IACAS 程序, 计算了一个如图6所示的由两组

表 1 在两个不同频率附近,压电材料的复常数

21kHz 附近	45kHz 附近
$S_{33}^E = 1.44 \times 10^{-11} [\text{m/N}]$ $S_{33}^{E'} = 6.2 \times 10^{-14} [\text{m/N}]$	$S_{33}^E = 2.14 \times 10^{-11} [\text{m/N}]$ $S_{33}^{E'} = 6.0 \times 10^{-14} [\text{m/N}]$
$\epsilon_{33}^S = 6.0 \times 10^{-9} [\text{F/m}]$ $\epsilon_{33}^{S'} = 6.0 \times 10^{-11} [\text{F/m}]$	$\epsilon_{33}^S = 8.0 \times 10^{-9} [\text{F/m}]$ $\epsilon_{33}^{S'} = 2.0 \times 10^{-10} [\text{F/m}]$
$d_{33}^E = 2.13 \times 10^{-10} [\text{C/N}]$ $d_{33}^{E'} = 1.0 \times 10^{-12} [\text{C/N}]$	$d_{33}^E = 2.3 \times 10^{-10} [\text{C/N}]$ $d_{33}^{E'} = 1.0 \times 10^{-12} [\text{C/N}]$

表 2 图 6 所示换能器的计算与测量值

方法	参 量			
	共振频率 (Hz)	电阻抗模量(Ω)	反共振频率 (Hz)	电阻抗模量 (Ω)
计算	23380	17.82	25680	1.068×10^5
	46945	31.0	48372	10300
测量	23576	13.40	25840	1.330×10^5
	45560	46.9	46100	9350

压电体组成的换能器系统,并与实测结果进行了比较,计算及测量结果见表 2。

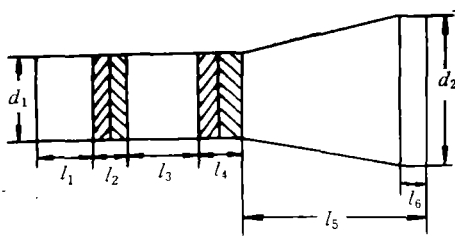


图 6 一种双组压电体换能器

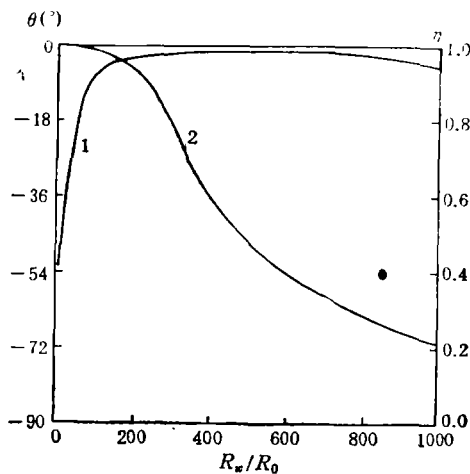


图 7 效率和输入相角与负载的关系
1——效率-负载曲线; 2——相角-负载曲线,
横坐标 R_w/R_0 为负载与空载损耗阻比。

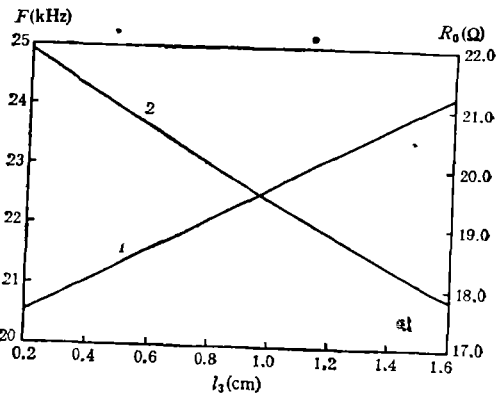


图 8 空载损耗阻 R_0 , 谐振频率 F 与 l_3 的关系
1—— R_0-l_3 曲线 2—— $F-l_3$ 曲线

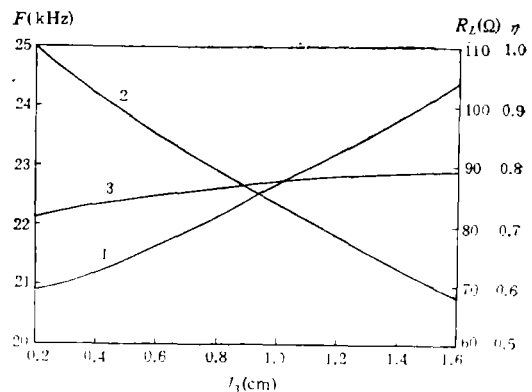


图 9 有负载时输入阻 R_L , 谐振频率 F 效率 η 与 l_3 的关系
1—— R_L-l_3 曲线 2—— $F-l_3$ 曲线 3—— $\eta-l_3$ 曲线

同时还画出了效率与负载的变化关系曲线(图7),空载情况下损耗阻 R_c 与金属块长度 l_1 的变化关系(图8),假定负载为水负载阻($\rho \times v \times A_m$)十分之一时反映到电端的输入阻抗(谐振处)以及换能器效率与 l_1 关系(图9)。

由表2可见,频率符合很好,而输入电阻抗模量偏差较大,这主要是由制备工艺差异引起的。由图7可知,当负载达到一定值时,换能器效率最高,而且随着负载加重,输入电阻抗相角(效率最大的频率点处)也增加,因此必须进行电匹配。图8和图9说明随中间金属块长度的

增加,换能器共振频率下降,而空载损耗阻及有载情况下电输入阻抗随之增加,效率略有升高。以上计算结果对正确设计换能器是有意义的。此外,也可找出一些性能参数随其它组成部分尺寸的变曲线。

参 考 文 献

- [1] Holland R., *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-14 (1967), 18.
- [2] Smits Jan. G., *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-23 (1976), 393.
- [3] 林仲茂,超声变幅杆的原理和设计,科学出版社,1985, 56—84.

自适应有源消声与滤波-X LMS 算法及实现

陈克安 马远良

(西北工业大学航海工程学院,西安 710072)

1992年6月8日收到

本文研究了滤波-X LMS 算法的稳定性条件及收敛特性对消声系统误差通道声延迟时间的依赖关系。针对以往硬件实现滤波-X 类有源消声算法的缺陷,提出误差通道自适应建模,以在线(On-Line)方式实现采用滤波-X 类算法的 AANC 系统。该方法实现简便,对工作环境无干扰,误差通道传递函数估计精度高。采用本方法完成了消声水池中自适应有源消声实验。

一、引 言

自适应滤波技术应用于有源消声,使得消声系统能够连续不断地跟踪噪声源及环境参数的变化,自动选取最佳次级声源强度(幅度和相位),从而保证消声系统始终工作在最佳状态。目前,三维空间有源消声几乎全部采用自适应滤波处理系统,由此构成自适应有源消声(Adaptive Active Noise Control, 简称 AANC)系统^[1-3]。

我们现在所说的 AANC 系统,指的是由 B. Widrow^[4] 等人提出的自适应噪声抵消器(Adaptive Noise Canceller, 简称 ANC)应用于有源消声时所构成的系统。长时间以来,人

们强调 AANC 与 ANC 的相似性,而对两者的差异重视不够。理论分析与实验发现^[2-3]:正是这种差异导致 AANC 系统稳态和瞬态特性发生不同于 ANC 的重要变化。

AANC 一般采用基于滤波-XLMS (Filtered-X LMS, 简称 FLMS) 算法的横向 FIR 自适应滤波器^[2],采用该算法的系统被广泛采用,构成了目前 AANC 的基础。但对它的理论分析却很少。另外,为完成 AANC 采用的滤波-X 类算法,必须得到误差通道传递函数。已存在的几种方法其估计精度均不能令人满意,从而导致一系列问题^[6]。

为此,本文详细推导了 FLMS 算法,在此基础上分析了它的稳定性条件及收敛特性,着重研究了误差通道声延迟的影响。然后,基于