

成的时空关系,可以获得较为满意的抑制指向性栅瓣的效果。栅瓣被抑制的程度在-17.7dB和-28dB之间。其中短脉冲的作用最为明显,其次是基元的指向性。聚焦距离主要是通过基元的指向性起作用的。从表1中可看出,在连续波情况下,若基元无指向性,聚焦距离又比较远,则高频线列阵的指向性栅瓣就与常规的线阵指向性栅瓣接近一致了。

作者在本工作中,得到了邱永德同志自始至终的关心和指导,在此深致谢意。

参 考 文 献

- [1] J. 克劳特克默等著,李靖等译,广东科技出版社,1984, 57.
- [2] Tancrell, R. H. et al., 1978 Ultrasonics Symposium Proceedings IEEE, 339—343.

声发射研究中的宽频带接收换能器

梁家惠 林耀海

(北京航空学院)

1985年10月22日收到

文章总结了作者在宽频带声发射换能器方面的一些工作和体会,并给出了若干换能器灵敏度估算的数学推导。

宽频带换能器在声发射(AE)技术及其应用中占有重要地位。AE检测要通过换能器把声信号转换成电信号,而声发射信号的出现往往是和材料或构件中局部能量的突然释放过程相关联的,具有很大的随机性。信号的频带很宽。因此,要从AE信号中提取各种有用的信息(如时域或频域的波形分析等),离不开宽频带接收换能器。即使是出于检测微弱信号的需要而采用谐振式换能器,也有一个如何获得噪声背景谱及信号谱的分布问题,以便更有效地选择频率窗口,提高信噪比。这同样也需要宽频带换能器。

各种测量表明,AE信号的频率分布与材料或构件的具体特性有关。考虑到低频机械噪声的干扰及高频的传播衰减等因素,通常的声发射接收换能器的频段在几十千赫到两兆赫附近。

宽频带换能器有多种类型。图1给出的是一种类似超声探头的AE换能器^[1],它由共振频率为几兆赫的压电陶瓷片加重背衬而构成。其接收灵敏度可由Mason等效线路如下算出。

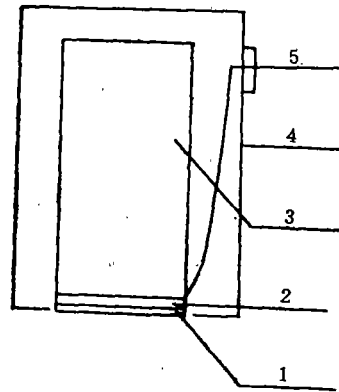


图1 宽频带换能器

1.保护膜; 2.压电片; 3.背衬; 4.外壳; 5.插座。

我们假定: 1. 保护膜和背衬与压电片完全匹配,声波进入背衬后,不再由端面反射回压电片; 2. 声波垂直入射到晶片表面。各端面严格平行,镀银层和粘接剂的影响可以忽略; 3. 晶体只作一维的轴向振动; 4. 接收时,换能器的电端开路。全部等效线路如图2所示。各单元之间用虚线隔开。其中 $z_0 = \rho CS$, 有关参数的意义可参见文献[2]。换能器的开路输出电

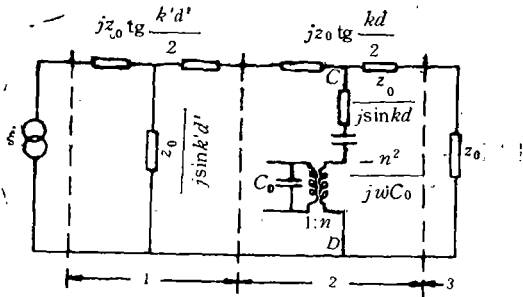


图2 宽带换能器的等效线路

1.保护膜; 2.压电晶片; 3.背衬.

压为

$$V = \frac{n \xi_{CD}}{j\omega C_0} = \frac{n}{j\omega C_0} \cdot \frac{[1 - j \operatorname{tg}(kd/2)][1 - j \operatorname{tg}(k'd'/2)]}{(1/j \sin kd)[1 + j \operatorname{tg}(k'd'/2)]} \xi_0$$

$$= \frac{n}{\omega C_0} \cdot \frac{2 \sin(kd/2)}{\exp[j(k'd' + kd/2)]} \xi_0$$

通常换能器的接收灵敏度定义为

$$M = |V/\xi_0| \quad (1)$$

ξ_0 是换能器置入前其表面位置处的法向位移速度。由于换能器的置入, 其相应位置处的位移速度由 ξ_0 变成 ξ , 两者的关系可由反射定律得出

$$\xi = \xi_0 z_d / (z_t + z_d)$$

z_d 和 z_t 分别是媒质和压电片的声阻抗率, 于是

$$\left| \frac{V}{\xi_0} \right| = \frac{z_d}{z_d + z_t} \cdot \frac{n}{\omega C_0} \cdot \frac{2 \sin kd}{2}$$

$$= \frac{\epsilon_{33} h_{33} S}{C C_0} \cdot \frac{z_d}{z_t + z_d} \cdot \frac{\sin(kd/2)}{kd/2} \quad (2)$$

计算中利用了机电转换系数 $n = \epsilon_{33} h_{33} S/d$ 。

由(2)式不难看到, 该灵敏度从低频到压电片半波共振频率 ($\sim 10^6 \text{Hz}$), 起伏在 $\pm 2 \text{dB}$ 之内。

这种结果只是在理想条件下获得的。首先是仅按照垂直入射的单一纵波模式来处理, 和 AE 应用的实际情况不一致; 其次, 压电片径向共振效应以及保护膜和背衬不可能与晶片严格匹配, 也都会影响换能器的平坦响应。

实现宽频带换能器的另一途径是采用电容传感的原理^[3]。如图3, 金属(或局部表面有金

属涂层的非金属)试块上, 平行放置一个绝缘导电板, 间距为 d , 偏置电压 U_0 通过高阻 R_0 加在试块和导电板上。设导电板的表面积为 S , 静电电容为 C_0 , 忽略边缘效应, 则有

$$U = Q/C_0 = Qd/(\epsilon_0 S) \quad (3)$$

ϵ_0 是介电常数。当声波传来时, 试样表面产生振动, 间距变为 $d + \Delta d$ 。如 R_0 足够大(时间常数远大于所要讨论的试块表面的振动周期)可认为 Q 不变, 于是换能器输出电压发生改变

$$\Delta V = \frac{Q}{\epsilon_0 S} \cdot \Delta d = \frac{Q}{C_0} \cdot \frac{\Delta d}{d}$$

$$= \frac{U_0}{d} \cdot \Delta d \quad (4)$$

由(4)式可见, 电容换能器是对位移敏感的换能器。它的灵敏度定义为

$$M = \Delta V/\Delta d = U_0/d \quad (5)$$

图4给出了我们制作的电容换能器的结构图。有关参数为 $d \sim 7 \times 10^{-6} \text{m}$; $U_0 \sim 80-100 \text{V}$; $R_0 \sim 100 \times 10^6 \Omega$ 。

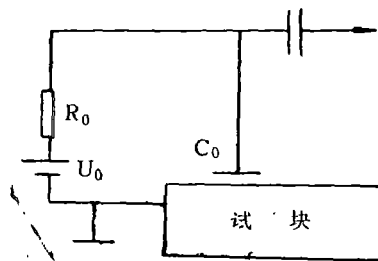


图3 电容换能器原理

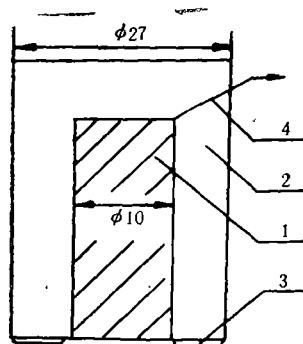


图4 电容换能器结构

1.黄铜柱; 2.聚四氟乙烯支架 3.衬垫薄膜; 4.引线。

电容换能器的频响平坦, 不用贴合, 不会给

声波的传播带来畸变。它的缺点是灵敏度低，对表面要求高，安装也困难。

上述两种宽频带换能器的弱点，还突出表现在：AE 和超声探伤不同，它是在材料自身受力状态下发出的一种弹性波，传播方向和模式都难于预先确定。经验表明，在许多构件，如厚板压力容器中，接收到的 AE 信号的主要成份是表面波。对金属而言，当 $f = 1\text{MHz}$ 时， $\lambda \approx 3\text{mm}$ 。如压电换能器晶片取为直径 $\phi = 10\text{mm}$ ，则为波长的三倍以上，晶片表面的不同部位将感受到不同相位的振动，很难对换能器造成强的激励。我们曾对自制的上述两种换能器，在表面波为主要模式的声场中作过测量，发现 300kHz 以上的高频分量明显减弱。解决的办法有两条。1. 在某些特定的场合（如换能器校准时），根据声波的传播特性来构造换能器；2. 采用点接触方式^[4]，使换能器与构件（或试件）的接触面积小于甚至远小于所测频段的波长。

图 5 给出了一种用于接收表面波的电容换能器的原理图（剖面图）。我们将其用于阶跃点源校准装置中。圆柱形的电极其轴向与试块表面平行。因校准所用的模拟声源传播方向预先可以确定，因此可以使圆柱形电极的轴线和表面声波传播的波阵面相切。其灵敏度可用保角变换算出。忽略圆柱两端的边缘效应，对一个无限长圆柱和一平面导体构成的电容（圆柱轴向与导体平面平行），单位长度的电容（证明见附录）为

$$C_s = 2\pi\epsilon_0 / \ln \left[1 + \frac{d}{R_0} + \sqrt{\frac{d}{R_0} \left(2 + \frac{d}{R_0} \right)} \right] \quad (6)$$

当电容换能器所在的试块表面产生法向位移 $\xi = \Delta d$ ，且 $\Delta d \ll R_0$ 时，可由泰勒展开求得换能器的输出电压为

$$\Delta V = \Delta \left(\frac{Q}{C} \right) = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L} \cdot \frac{d \ln \left[1 + \frac{x}{R_0} + \sqrt{\frac{x}{R_0} \left(2 + \frac{x}{R_0} \right)} \right]}{dx} \Big|_{x=d}$$

$$\begin{aligned} \Delta d &= \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 L \sqrt{1 + \frac{2R_0}{d}}} \cdot \frac{\Delta d}{d} \\ &= \frac{U_0}{\sqrt{1 + \frac{2R_0}{d} \ln \left[1 + \frac{d}{R_0} + \sqrt{\frac{2d}{R_0} + \frac{d^2}{R_0^2}} \right]}} \cdot \frac{\Delta d}{d} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 L 是圆柱导体的长度。当 $d \ll R_0$ 时，

$$\begin{aligned} &\sqrt{1 + \frac{2R_0}{d} \ln \left[1 + \frac{d}{R_0} + \sqrt{\frac{2d}{R_0} + \frac{d^2}{R_0^2}} \right]} \\ &\approx \sqrt{1 + \frac{2R_0}{d}} \sqrt{\frac{2d}{R_0}} \approx 2 \end{aligned}$$

因此其接收灵敏度为

$$\begin{aligned} M &= \Delta V / \Delta d = (U_0/2)(\Delta d/d)(1/\Delta d) \\ &= U_0/2d \end{aligned} \quad (8)$$

恰为 (5) 式的一半。

在点接触式宽频带换能器中，我们采用了美国国家标准局（NBS）提出的锥形换能器方

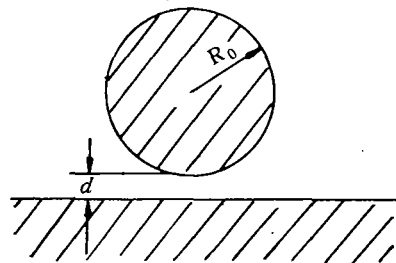


图 5 圆柱形电容换能器(剖面)

1. 试件； 2. 黄铜柱。

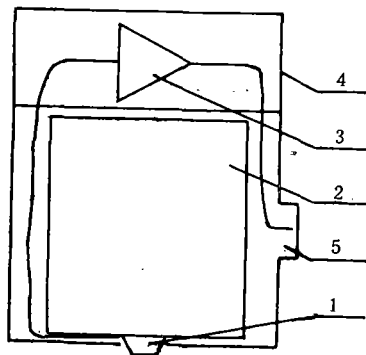


图 6 锥形换能器

1. 压电晶片； 2. 背衬； 3. 前放； 4. 外壳； 5. 插座。

案^[5]。其结构如图 6 所示。它仍用压电陶瓷作敏感元件，与试样接触面积很小 ($\phi 2\text{mm}$)；不加保护膜，消除了由此带来的信号畸变；锥形结构，削弱了径向共振效应。尽管采用重背衬，灵敏度仍较电容换能器高得多。在工艺上，我们对背衬、粘接和接地等均作了改进，效果比较理想。已在材料破碎、刀具损伤的信号分析中得到了初步应用。

小晶片制作的压电宽带换能器，用输出阻抗较高，带来馈送损失问题，为此，我们在部分锥形换能器内安装了前置放大器。它们由分立元件组成，压缩在 $\phi 28\text{mm}$ 的平面内。其主要参数为频带 1.5MHz ；增益 $50-100$ 倍；噪声 $< 4.5\mu\text{V}$ 。实验表明这种换能器的灵敏度约可提高 10% 左右(相对于 1m 长电缆馈送)。

宽带换能器的校准是采用 NBS 提出的阶跃点源方法进行的^[3]。利用 Lamb 问题的计算结果^[6]，一个阶跃点源在半无限表面产生的法向位移可以严格算出，从而为测定换能器的输出特性提供了定量的依据。实验上用玻璃毛细管破裂^[3]或 Nelson 铅笔芯折断^[7]来模拟上述的阶跃力。

图 7 和 8 给出了阶跃函数和上升时间为 $\sim 0.6\mu\text{s}$ 的点力源所产生的表面法向位移的理论曲线。图 9 和 10 则分别给出了电容换能器(圆柱形电极)和锥形换能器对模拟声源(铅笔芯折断)的输出波形。它们都属于对位移敏感的宽带换能器。频谱分析和使用结果都表明，它们

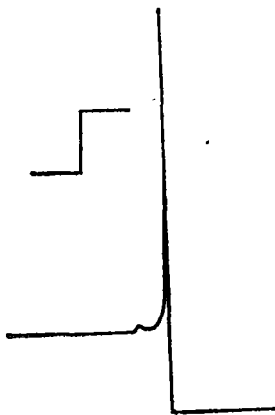


图 7 阶跃点源在半无限表面产生的法向位移

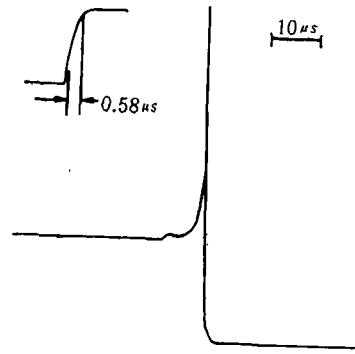


图 8 上升时间 $0.58\mu\text{s}$ 的点力源产生的法向位移

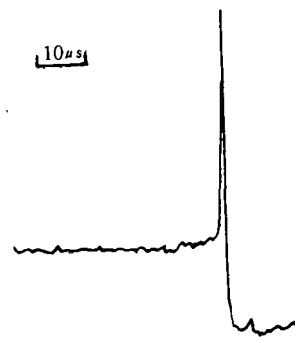


图 9 圆柱形电容换能器的输出



图 10 锥形压电换能器的输出

在 $20\text{kHz}-1\text{MHz}$ 范围内具有良好的平坦响应。

附录 无限长圆柱单位长度电容的计算

如正文图 5 所示， d 是电容器间隙， R_0 是圆柱半径。令 $R_0 + d = D$ 。作保角变换，由 Z 平面(垂直于圆柱截取的平面) $\rightarrow \xi$ 平面

$$\xi = (Z + aj)/(Z + bj) \quad (9)$$

a, b 由所谓对称点的关系式决定

$$a \cdot b = R_0^2 \quad (10)$$

$$a + b = 2D \quad (11)$$

解(10)、(11)式得

$$a = D - \sqrt{D^2 - R_0^2}; \quad b = D + \sqrt{D^2 - R_0^2} \quad (12)$$

变换后, 半径为 R_0 的圆和直线 $y = -D$ 变成半径为 ρ_1, ρ_2 的同心圆。在 ξ 平面上的圆心和 z 平面的 $-aj$ 相对应。其中

$$\begin{aligned} \rho_1 &= |(R_0 e^{i\varphi} + aj)/(R_0 e^{i\varphi} + bj)| \\ &= R_0 / (D + \sqrt{D^2 - R_0^2}) \end{aligned}$$

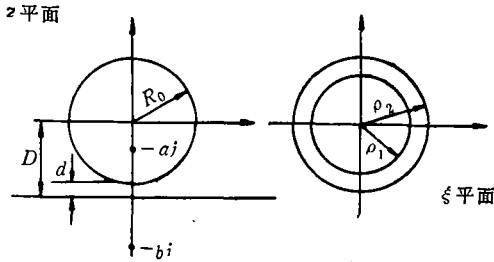


图 11 z 平面 \rightarrow ξ 平面的变换

$$\rho_2 = |(x - Dj + aj)/(x - Dj + bj)| = 1$$

利用同心圆柱的电容公式, 即得单位长度的电容

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(\rho_2/\rho_1)} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left[\frac{D}{R_0} + \sqrt{(D/R_0)^2 - 1}\right]} \\ &= \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left[1 + d/R_0 + \sqrt{(d/R_0)(2 + d/R_0)}\right]} \quad (13) \end{aligned}$$

参 考 文 献

- [1] Nesmashny, E. V. et al., *Soviet J. of NDT*, 5(1975), 107.
- [2] 应崇福等, *声学学报*, 4(1980), 249.
- [3] Breckenridge, F. R. et al., *J. Acous. Soc. Am.*, 57-3(1975), 626—631.
- [4] BK Product Data, AE Transducer and Preamplifiers.
- [5] Green, R. E., The 10th World NDT Conference, 1982, Moscow.
- [6] Lamb, H., *Phil. Trans. Royal soc.*, A203(1904), 1—42.
- [7] Hsu, N. N., US Patent 4018084.

混合液声速的温度特性

邓文祥 杨同盛 马凤岐

(中国科学院声学研究所)

1984年3月1日收到初稿, 1986年11月3日收到修改稿

本文考虑到绝热压缩系数与温度的关系, 导出了混合液声速与温度、液体比例的关系式。测量了由两种挥发速度不同的液体组成的混合液的声速与温度、液体比例的关系。结果表明, 由于挥发速度不同, 给测量结果带来较大误差。本文结果除对充液聚焦球内液体选择和配制有重要意义外, 也适用于其它各种混合液。

一、引 言

充液聚焦球形反射体(以下简称聚焦球)兼有球形目标和角形反射体的优点, 是一种理想的标准反射体, 有广泛用途。聚焦球是在金属球壳中填充低声速液体, 使人射声在前表面折射。适当调节球内液体声速, 可使声波聚焦在球壳后表面一个较小区域内, 经后表面反射, 部分能量再次在前表面折射, 返回声源所在方向的接收器, 形成聚焦反射波。因此, 设计与制造聚焦

球的关键之一, 是要研究球内所充低声速液体的特性。

到目前为止, 聚焦球内所充低声速液体一般以四氯化碳和氟里昂 F_{113} 的混合液为宜。因为它们的声速都较水低很多, 来源不困难, 价格较便宜, 声速可通过液体比例进行调节。这两种液体的声速是负温度系数, 而水的声速为正温度系数。当温度变化时, 二者朝相反方向变化, 因而折射率发生变化, 使聚焦焦点移动, 目标强度和聚焦增益也随着发生变化。为使聚焦