

# 厚度振动换能器脉冲响应的研究

郎益夫 蔡崇成 蒋楠祥 卜书中

(哈尔滨船舶工程学院) (上海医用电子仪器厂)

本文对厚度振动圆片换能器的导纳、传递函数和脉冲响应进行了研究。利用换能器等效电路、基尔霍夫定律和傅里叶变换给出了导纳、传递函数和脉冲响应的表达式。通过在HP-1000微机上进行大量的计算,得到了ZNL-2压电陶瓷圆片换能器在不同匹配层和背衬层材料的导纳,传递函数和脉冲响应,得出了匹配材料声阻抗分别为4, 6 ( $10^6 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )和背衬材料声阻抗分别为7.5, 15.5 ( $10^6 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ )左右比较理想,然后用HP阻抗分析仪、X-Y3033记录仪和脉冲响应测试仪分别测出几个换能器的导纳和脉冲响应,从实验结果可知:理论和实验结果基本符合。所得结果可供工厂生产时参考。

## THE STUDY OF THE IMPULSE RESPONSE OF THICKNESS VIBRATING TRANSDUCER

Lang Yifu, Cai Chongcheng, Bu Shuzhong, Jiang Nanxiang

( Harbin Shipbuilding Engineering Institute )

**Abstract:** In this paper, we study the impulse response of thickness vibration of disc transducer. using mechano-electronic equivalent circuit, Kirchoff's law and Fourier's transformation. The formulas of admittance, transfer function and impulse response of thickness vibrating disc are obtained. By taking computation on HP-1000 computer with different backing and matching layers for ZNL-2 piezoelectric ceramic disc, we obtained the admittance, transfer function and impulse response at such cases. At the same time, we study the idea, put forward by H.W. Person and C.H. Hertz, that the transducer is of Gaussian shape's transfer function, its impulse response is the best.

When the impedance of matching layer is 4, 6 ( $10^6 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ), the backing layer's 7.5, 15.5 ( $10^6 \text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ), and the thickness of matching layer  $1.12\lambda/4$ , the impulse response is better, and H.W. Person and C.H. Hertz's idea is right.

We measured some admittance of thickness vibrating disc transducers utilizing HP-impedance analyser and 3033 X-Y recorder, so do the impulse response by impulse response measuring apparatus. The experimental result is agree with the theory, these result can be refered to in process of manufacturing in factory.

## 一、引言

随着人们对B超<sup>[1]</sup>成像清晰度的要求越来越高,这就要求提高B超的分辨率。本文仅研究如何提高B超的轴向分辨率,而B超的轴向分辨率的大小是由探头的脉冲响应决

定的,所以要提高B超的分辨率必须获得最佳的脉冲响应。在国内刊物上很少见到在高频范围内研究探头脉冲响应的文章。本文结合“B超凸阵探头的开发”来研究脉冲响应的,由于探头的每个阵元的导纳很小,信号

很弱，而脉冲响应又和压电陶瓷片面积无关，因此我们选圆片换能器来研究厚度振动的脉冲响应。

对圆片换能器传递函数和脉冲响应进行计算，然后用HP阻抗分析仪和脉冲响应测试仪测换能器的导纳和脉冲响应验证理论计算的正确性，同时讨论具有什么形状分布的传递函数换能器其脉冲响应为最佳的问题。

## 二、基本假设

1. 圆片仅作厚度振动 ( $a \gg h_0$ )，忽略一切损耗<sup>[1]</sup>；

2. 背衬视为无限厚，向后的声波被全部吸收；

3. 根据Gordon S. Kino和Charles S. Desilets等人的理论<sup>[2]</sup>可知：当介质中的  $ka > 3$  时，( $a$ 是介质与陶瓷片交界处圆半径， $k$ 是介质中的声波波数)，辐射阻抗可视为实数，而现在  $k_{油} a$ 、 $k_{背衬} a$  均远大于3，故油介质和背衬负载的阻抗均可看作实数，凸阵探头的阵元  $k_1$  也大于3。

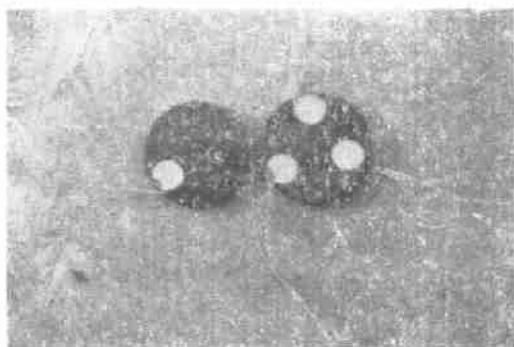


图1 换能器形状(带背衬层)

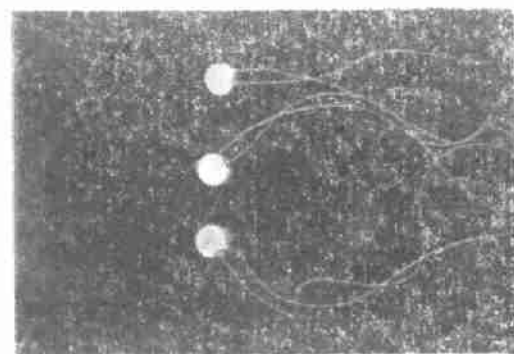


图2 换能器形状(无背衬层)

## 三、换能器的形状

换能器的形状见图1和图2，其中图1是带背衬层和匹配层的换能器，图2是不带背衬层只带匹配层的换能器。

## 四、理论推导

为了和实验对照，本文只考虑带背衬和一层匹配层情况。

### 1. 发射状态下的导纳和传递函数

根据Mason理论，带有背衬层一层和层匹

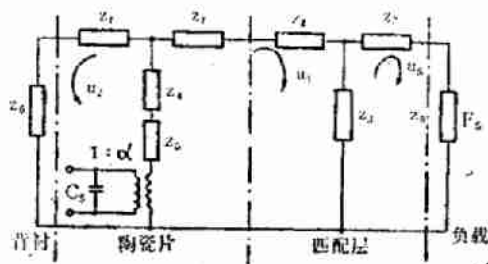


图3 换能器发射状态等效电路

配层的厚度振动换能器的等效电路如图3所示<sup>[3,4]</sup>，其中：

$$\alpha = \frac{h_{33} S}{\beta_{33}^S h_0}, \quad h_{33}, \beta_{33}^S \text{ 为压电陶瓷的物}$$

理参数；

$$C_s = \frac{S}{\beta_{33}^S h_0} \alpha, \quad c_s \text{ 分别是压电陶瓷片的}$$

机电转换系数和钳制电容；

$$Z_1 = j\rho_0 c_0 \text{Stg} \frac{k_0 h_0}{2}; \quad \rho_0, c_0, k_0, h_0 \text{ 分别是陶瓷片的密度、声速、波数和厚度；}$$

$$Z_2 = j\rho_1 c_1 \text{Stg} \frac{k_1 h_1}{2}; \quad \rho_1, c_1, k_1, h_1 \text{ 分别是匹配层的密度、声速、波数和厚度；}$$

是匹配层的密度、声速、波数和厚度；

$$Z_3 = \frac{\rho_1 c_1 S}{j \sin k_1 h_1} \quad S \text{ 是陶瓷片、匹配层、背衬层的面积；}$$

背衬层的面积；

$$Z_4 = \frac{\rho_0 c_0 S}{j \sin k_0 h_0}, \quad Z_5 = j \frac{\alpha^2}{\omega c_s};$$

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0}, \quad k_1 = \frac{\omega}{c_1}; \quad \omega \text{ 是工作的角频率；}$$

$$Z_6 = \rho_2 c_2 S; \quad \rho_2, c_2 \text{ 背衬层的密度、声}$$

速;

抗。

$R_s = \rho_{油} c_{油} S$ ;  $\rho_{油}$ 、 $c_{油}$  为负载油的密度和声速;  $X_s = 0$ ;  $R_s$ 、 $X_s$  辐射阻和辐射

有: 根据基尔霍夫定律, 对于发射状态, 则

$$\begin{cases} (Z_4 + Z_6)\dot{U}_1 + (Z_1 + Z_4 + Z_5 + Z_6)\dot{U}_2 + O\dot{U}_s = \alpha V \\ (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_6)\dot{U}_1 + (Z_4 + Z_6)\dot{U}_2 - Z_3\dot{U}_s = \alpha V \\ -Z_3\dot{U}_1 + O\dot{U}_2 + (Z_2 + Z_3 + Z_6)\dot{U}_s = 0 \end{cases}$$

推得导纳为:  $Y = Y_0 + Y_d = j\omega C_s + \frac{\alpha^2}{Z_m} = j\omega C_s$

$$+ \frac{\alpha^2[(2Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_6)(Z_2 + Z_3 + Z_6) - Z_3^2]}{(Z_1 + Z_6)(Z_4 + Z_6)(Z_2 + Z_3 + Z_6) + (Z_1 + Z_4 + Z_5 + Z_6)[(Z_1 + Z_2 + Z_3)(Z_2 + Z_3 + Z_6) - Z_3^2]}$$

其中:  $Z_0 = R_s + jX_s = R_s$   $Z_m$  为换能器的机械阻抗和负载阻抗

发射时的传递函数为:  $F_s/V = \frac{\dot{U}_s Z_0}{V}$  [5,6]

$$= \frac{Z_3 Z_6 (Z_1 + Z_6) \alpha}{(Z_1 + Z_6)(Z_4 + Z_6)(Z_2 + Z_3 + Z_6) + (Z_1 + Z_4 + Z_5 + Z_6)[(Z_1 + Z_2 + Z_3)(Z_2 + Z_3 + Z_6) - Z_3^2]}$$

其相对值为:  $\frac{F_s}{\alpha V}$

$$= \frac{(Z_1 + Z_6) Z_3 Z_6}{(Z_1 + Z_6)(Z_4 + Z_6)(Z_2 + Z_3 + Z_6) + (Z_1 + Z_4 + Z_5 + Z_6)[(Z_1 + Z_2 + Z_3)(Z_2 + Z_3 + Z_6) - Z_3^2]}$$

## 2. 接收状态下的传递函数

接收状态下换能器的等效电路如图 4 所示, 其中  $\bar{\gamma}$  是接收力系数,  $P_f$  是接收点自由场声压, 根据基尔霍夫定律有:

$$\begin{cases} (Z_1 + Z_4 + Z_6)\dot{U}_3 + Z_4\dot{U}_4 + O\dot{U}_r = 0 \\ Z_4\dot{U}_3 + (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4)\dot{U}_4 - Z_3\dot{U}_r = 0 \\ O\dot{U}_3 - Z_3\dot{U}_4 + (Z_2 + Z_3 + Z_6)\dot{U}_r = \bar{\gamma} P_f S \end{cases}$$

∴ 接收时的传递函数为:  $\frac{e_{oc}}{\bar{\gamma} P_f S} = \frac{F_r}{\alpha \bar{\gamma} P_f S}$

$$= \frac{-Z_3 Z_6 (Z_1 + Z_6)}{\alpha[(Z_1 + Z_4 + Z_6)(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4)(Z_2 + Z_3 + Z_6) - Z_3^2(Z_1 + Z_4 + Z_6) - Z_4^2(Z_2 + Z_3 + Z_6)]}$$

其相对值  $\frac{e_{oc} \alpha}{\bar{\gamma} P_f S}$  为:  $\frac{e_{oc} \alpha}{\bar{\gamma} P_f S}$

$$= \frac{-Z_3 Z_6 (Z_1 + Z_6)}{(Z_1 + Z_4 + Z_6)(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4)(Z_2 + Z_3 + Z_6) - Z_3^2(Z_1 + Z_4 + Z_6) - Z_4^2(Z_2 + Z_3 + Z_6)}$$

## 3. 脉冲响应的推导

设输入的脉冲调制信号为:

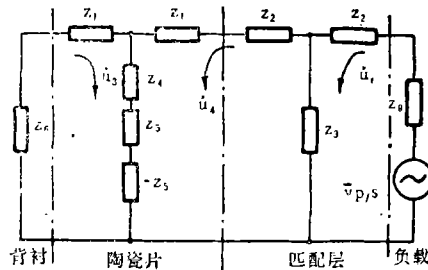


图4 换能器接收状态等效电路

$$f(t) = \begin{cases} A \sin \omega_0 t, & nT - \tau/2 < t < nT + \tau/2 \\ 0, & nT + \tau/2 < t < (n+1)T - \tau/2 \end{cases}$$

(n = 0, 1, 2, \dots)

其中 $\omega_0$ 为填充的正弦信号角频率, A为正弦信号幅值。 $\tau$ 为矩形脉冲的宽度, T为矩形脉冲信号的重复周期, 则输入信号的频谱为:

$IS(\omega) = F[f(t)]$ , F是傅里叶变换符号, 当信号通过换能器时, 可得经过换能器调制后的输出信号的频谱。

$OS(\omega) = IS(\omega)P(\omega)$ , P( $\omega$ )为换能器的传递函数, 再对上式进行傅里叶逆变换, 则得经过换能器后的输出信号。即脉冲响应<sup>[7]</sup>。

$$\varphi(t) = F^{-1}[OS(\omega)] = F^{-1}[IS(\omega)P(\omega)]$$

其中 $F^{-1}$ 是傅里叶逆变换符号。

## 五、数值计算

参数选取如下: ZNL-2陶瓷片:  $\rho_0 = 7.98 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $a = 0.65 \times 10^{-2} \text{ m}$ ,  $C_0 = 4530 \text{ m/s}$ ,  $k_t = 0.52$ ,  $\beta_{33}^S = 2.7027 \sim 3.225 \times 10^6$ ,  $h_{33} = 10.94 \sim 11.95 \times 10^8 \text{ V/m}$  (即  $1/\beta_{33}^S = 310 \sim 370 \times 10^{-10}$ ),  $e_{33} = 36.85 \sim 40.47 \text{ c/m}^2$ 其他参数见表1:

表 1

| 参 数<br>材 料 | 密 度<br>$\rho(10^3 \text{ kg/m}^3)$ | 声 速<br>$C(10^3 \text{ m/s})$ | 声阻抗<br>$(10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s})$ | 厚 度<br>$h(10^{-3} \text{ m})$ |
|------------|------------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------|
| ZNL-2压电材料  | 7.98                               | 4.530                        | 36.15   | 0.647                         |
| AV-13背衬层   | 2.80                               | 1.67666                      | 4.69  | 6.85                          |
| AV-14背衬层   | 3.65                               | 2.14178                      | 7.82  | 6.90                          |
| 匹配层1(环氧)   | 1.19                               | 2.800                        | 3.33  | 0.21                          |
| 匹配层2(增塑)   | 1.824                              | 3.125                        | 5.70  | 0.237                         |
| 匹配层3(玻璃)   | 2.60                               | 5.67                         | 14.74   | 0.43                          |
| 变压器油       | 0.99                               | 1.5652                       | 1.5   | /                             |

为了得到换能器的导纳, 传递函数和脉

冲响应。我们在HP-1000微机上改变匹配层、背衬层参数进行计算, 从中找出比较理想的脉冲响应。

为了和实验比较, 我们又计算了实验所用的五个换能器的导纳、传递函数和脉冲响应。五个换能器的参数如表2。此外, 我们还对有背衬无匹配层情况, 无背衬双层匹配情况下的陶瓷片换能器进行了计算。

表2 五个换能器的参数表

| 换能器号 | 材料参数  |      |    |   |          |
|------|-------|------|----|---|----------|
|      | 背衬层   | 匹配层  | 负载 | $1/\beta_{33}^S (10^{-10} \text{ F/m})$ | $e_{33}$ |
| 1    | AV-14 | 匹配层1 | 油  | 370                                     | 40.47    |
| 2    | AV-14 | 匹配层3 | 油  | 370                                     | 40.47    |
| 3    | 油     | 匹配层1 | 油  | 370                                     | 40.47    |
| 4    | 油     | 匹配层2 | 油  | 310                                     | 36.85    |
| 5    | 油     | 匹配层3 | 油  | 310                                     | 36.85    |

## 六、实验验证

测换能器导纳的方框图如图5所示。

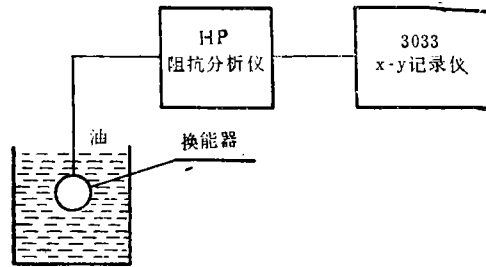


图5 测换能器导纳的方框图

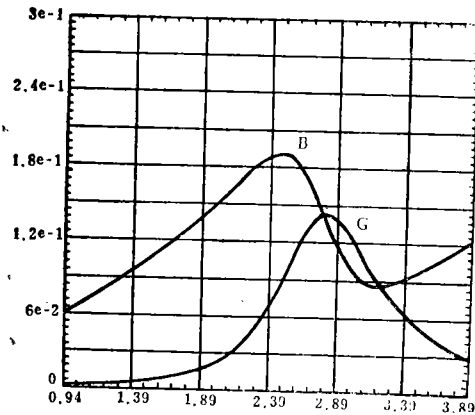


图6 理论导纳

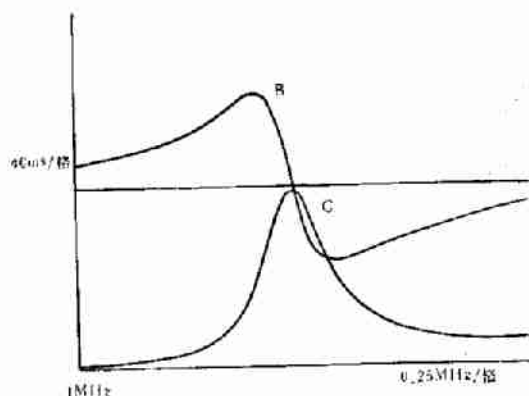


图7 实测导纳

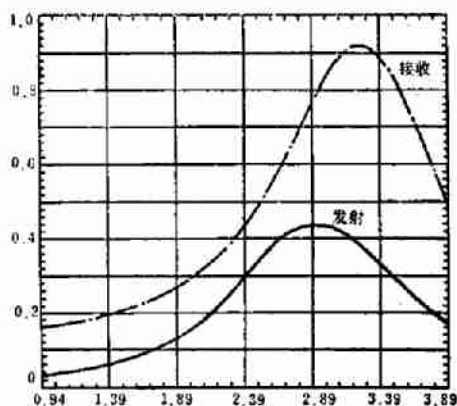


图8 传递函数

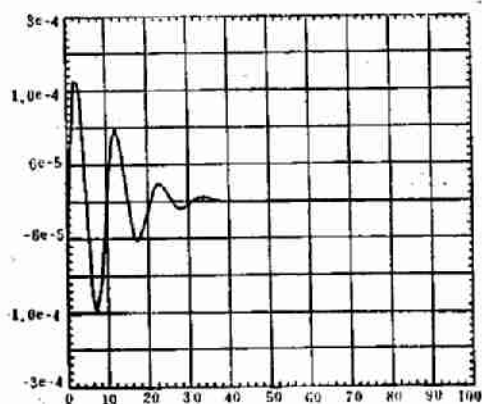


图9 理论脉冲响应

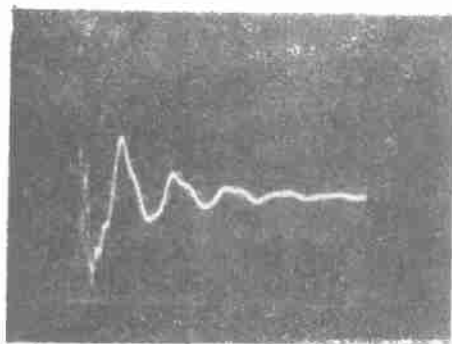


图10 实测脉冲响应

图6至图10分别是1<sup>#</sup>换能器的理论导纳、实测导纳、传递函数、理论脉冲响应和实测脉冲响应。由于篇幅所限各号换能器的资料不一列出。从理论曲线和实验曲线的对比可知，实验和理论基本符合。

## 七、结 论

从理论计算或实验结果中可知：带背衬层和一层匹配层的换能器比空气背衬，两层匹配层的换能器和带背衬层无匹配层的换能器的脉冲响应好，对带背衬一层匹配层换能器其背衬阻抗分别为7.5, 15.5( $10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ )、匹配层阻抗分别为4, 6( $10^6 \text{kg/m}^2\text{s}$ )，厚度为 $1.12\lambda/4$ 附近脉冲响应比较理想。通过对五个换能器的导纳和脉冲响应进行测量可得到如下结论：实验和理论计算基本符合，从而验证了理论的正确，此结果可供工厂生产时参考。

### 参考文献

- [1] Gordon S.Kino, "Design of slotted transducer arrays with matched backing", Ultrasonic imaging, 189—209, 1979.
- [2] A.R.Selfridge, G.S.Kino, and B-T.Khuri-Yakub, "Fundamenta concepts in acoustic transducer array

(下转封三)

压波形B~C段变为图8中所示的形状。可见，如呈电容性阻抗时，在BG41关断时，瞬时反压增高，容易损坏管子，故不宜采用。因此，在选择负载阻抗和进行匹配时，应尽量使负载呈纯阻或略偏电感性



图8 负载呈容性时UBG41的波形

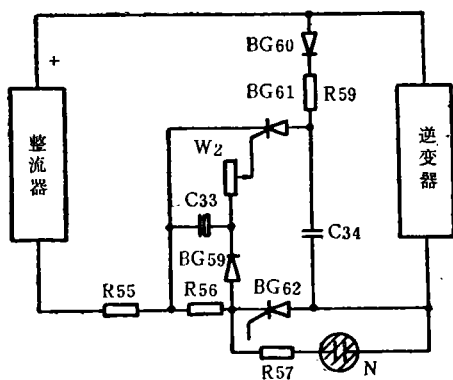


图9 过流保护电路

## 二、过流保护电路

有时由于某种原因会造成逆变失败。这时，逆变器呈直通状态，使电源短路，短路电流会使可控硅元件烧坏。故在电源电路中放置了过流保护电路。(见图9)

开机时，BG62受开机脉冲的触发而导通(此部分电路图9中未画出)，整流器向逆变器供电，同时经BG60，R59向电容C34充电，逆变器工作正常时，检测电阻R56上的压降不足以触发BG61。当逆变失败时，电流增大，在R56上的压降亦增大。此电压经BG59、W2加于BG61的控制极与阴极，使BG61导通。C34经BG61、R56及BG62放电。此瞬间很大的电流反向流经BG62，足以使BG62很快关断，使整机停止工作，起到保护机内元件的作用。C33为平滑BG61的触发电流用。W2用于调节过荷额定电流。在BG62关断后，BG62两端的电压点燃过荷指示灯N，以供故障指示。

可控硅超声波发生器的工作原理就介绍到这里。下一期将介绍晶体管超声波发生器。

(上接第17页)

design", IEEE Ultrasonic symposium, 989—998, 1980.

- [3] George Kossoff, "The effects of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducers", IEEE transaction on sonics and ultrasonics, Vol. SU-13, No.1, March 1966.

- [4] Jacques Souquet, Philippe Defra-nould, and Jean Desbois, "Design of low-loss wide-band ultrasonic transducers for noninvasive medical application", IEEE transaction on sonics and ultrasonics, Vol. SU-26

No.2, March 1979.

- [5] Charles S. Desilets, "The design of efficient broad-band piezoelectric transducers", IEEE transaction on sonics and ultrasonics, Vol. SU-25, No.3, May 1978.
- [6] Jeffrey H. Goll, "The design of broad-band fluid-loaded ultrasonic transducers", IEEE transaction on sonics and ultrasonics, Vol. SU-26, No.6, November 1979.
- [7] H. W. Persson and C. H. Hertz, "Acoustic impedance matching of medical ultrasound transducers", Ultrasonics, March 1985.