

向空气辐射的弯曲振动型超声换能器的研制

吴永芬 冯永方

(无锡市超声设备研究所)

1981年9月8日收到

以“弯曲”振动阶梯盘作为辐射面的超声换能器具有高的效率和方向性。本文叙述了阶梯辐射盘的振动方式,理论及计算公式。设计了20 kHz 具有阶梯辐射盘的超声换能器,并对轴向声压进行了测试。该换能器结构简单,制作方便,在实际工作中有一定的应用价值。

引言

气体中强超声产生和传播的主要问题是空气介质的低声阻抗和高的介质吸收。为了获得有效的声波辐射,需要在换能器和空气介质之间进行良好的声阻抗匹配。为了得到长距离的传播,换能器必须具有高的效率和方向性。目前,基于一种“弯曲”振动阶梯盘作为辐射面向空气中辐射超声时,能得到高的效率和方向性。

一、产生方法与振动方式

目前,连接在换能器上被激励的薄金属圆盘的弯曲谐振器,由于与空气介质的声阻抗匹配较好,所以可获得比较高的电声转换效率,但是,当平盘作一个或若干个节圆振动时,在节圆两边的振动相位相反,因此,将会有一部分的辐射超声被抵消,而使其辐射效率降低。为了提高辐射效率, Gallego^[1] 将辐射盘表面组成阶梯形式,其阶梯高度等于辐射介质中的二分之一波长,这样修正后的辐射盘避免了相位抵消,提高了辐射效率。

图1是 Barone 等^[2]解释在圆盘中心由振子推动的阶梯圆盘的振动方式,盘的横截面由直线P表示,线w表示动态变形曲线,图线 A_0A_1 $A_2A_3 \cdots A_m$ 表示了空气中质点运动的垂直分

量可以看到图线 A_{2m} 和 A_{2m+1} 是反相的,如果圆盘组成阶梯形,在媒质中,空间连续位移是由表面部分 $x_0x_1, x_2x_3 \cdots$ [图(a)] 或 $x_0x_0, x_1x_2, x_3x_4 \cdots$ [图(b)] 向前推进 $\lambda/2$ 。这样出现的新的曲线 A'_1 和 A'_2 就与其他部分相同了。

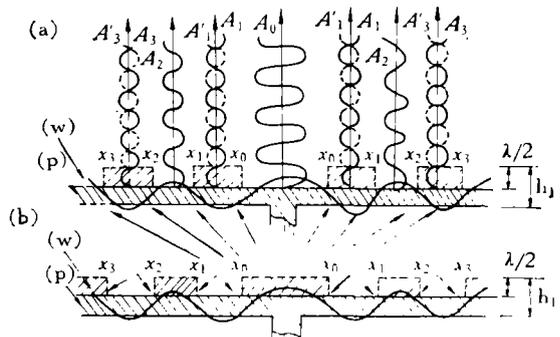


图1 阶梯盘辐射机理

(a) 中心地区凹下; (b) 中心地区凸出

阶梯形式的辐射圆盘作为新的发射器,结构简单,可在空气介质中产生高强度的超声波和良好的方向性。

二、理论

假定:小振动,薄盘并忽略转动惯量和切变的影响.考虑盘的材料均匀,各向同性及理想弹性. Gallego^[3]由轴对称的简谐振动微分方程出发.考虑如图2两种典型的阶梯板的弯曲振动,并由边界的连续条件得到下面六个联立方程式。

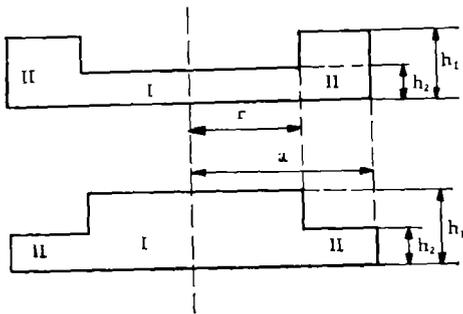


图2 两种单一波阶梯盘的横截面

$$A_1 J_0(\nu_1 r_1) + C_1 I_0(\nu_1 r_1) - A_2 J_0(\nu_2 r_1) - B_2 r_0(\nu_2 r_1) - C_2 I_0(\nu_2 r_1) - F_2 k_0(\nu_2 r_1) = 0, \quad (1)$$

$$A_1 \nu_1 J_1(\nu_1 r_1) - C_1 \nu_1 I_1(\nu_1 r_1) - A_2 \nu_2 J_1(\nu_2 r_1) - B_2 \nu_2 r_1(\nu_2 r_1) + C_2 \nu_2 I_1(\nu_2 r_1) - F_2 \nu_2 k_1(\nu_2 r_1) = 0, \quad (2)$$

$$A_1 \nu_1^3 h_1^3 J_1(\nu_1 r_1) + C_1 \nu_1^3 h_1^3 I_1(\nu_1 r_1) - A_2 \nu_2^3 h_2^3 J_1(\nu_2 r_1) - B_2 \nu_2^3 h_2^3 y_1(\nu_2 r_1) - C_2 \nu_2^3 h_2^3 I_1(\nu_2 r_1) + F_2 \nu_2^3 h_2^3 k_1(\nu_2 r_1) = 0, \quad (3)$$

$$A_1 \nu_1 h_1^3 \left[-\nu_1 J_0(\nu_1 r_1) + \frac{1-\sigma}{r_1} J_1(\nu_1 r_1) \right] + C_1 \nu_1 h_1^3 \left[\nu_1 I_0(\nu_1 r_1) - \frac{1-\sigma}{r_1} I_1(\nu_1 r_1) \right] - A_2 \nu_2 h_2^3 \left[-\nu_2 J_0(\nu_2 r_1) + \frac{1-\sigma}{r_1} J_1(\nu_2 r_1) \right] - B_2 \nu_2 h_2^3 \left[-\nu_2 y_0(\nu_2 r_1) + \frac{1-\sigma}{r_1} y_1(\nu_2 r_1) \right] - C_2 \nu_2 h_2^3 \left[\nu_2 I_0(\nu_2 r_1) - \frac{1-\sigma}{r_1} I_1(\nu_2 r_1) \right] - F_2 \nu_2 h_2^3 \left[\nu_2 k_0(\nu_2 r_1) + \frac{1-\sigma}{r_1} k_1(\nu_2 r_1) \right] = 0, \quad (4)$$

$$A_2 J_1(\nu_2 a) + B_2 y_1(\nu_2 a) + C_2 I_1(\nu_2 a) - F_2 k_1(\nu_2 a) = 0, \quad (5)$$

$$A_2 \left[-\nu_2 J_0(\nu_2 a) + \frac{1-\sigma}{a} J_1(\nu_2 a) \right] + B_2 \left[-\nu_2 y_0(\nu_2 a) + \frac{1-\sigma}{a} y_1(\nu_2 a) \right] + C_2 \left[\nu_2 I_0(\nu_2 a) - \frac{1-\sigma}{a} I_1(\nu_2 a) \right]$$

$$+ F_2 \left[\nu_2 k_0(\nu_2 a) + \frac{1-\sigma}{a} k_1(\nu_2 a) \right] = 0. \quad (6)$$

其中

$$\nu_1^4 = \omega^2 \frac{\rho h_1}{D(h_1)} = (2\pi f)^2 \frac{12 \rho (1-\sigma^2)}{E h_1^2}$$

$$\nu_2^4 = \omega^2 \frac{\rho h_2}{D(h_2)} = (2\pi f)^2 \frac{12 \rho (1-\sigma^2)}{E h^2}$$

$\omega = 2\pi f$ 为角频率

ρ 为材料密度

h 为盘的厚度。

$D = E h^3 / 12(1-\sigma^2)$ 为弯曲刚度

E 为板材料的杨氏模量

σ 为泊松比

J_0 和 y_0 为第一类和第二类的零阶贝塞耳函数。而 I_0 和 k_0 是第一类和第二类零阶修正贝塞耳函数。

三、换能器结构

我们制造了工作频率为 20 kHz 的换能器，如图 3 所示，采用了单螺钉夹心式换能器。换能器由匹配块、电极片、压电陶瓷片和耦合块组成。匹配块、电极片和压电陶瓷片的总长为四分之一波长 ($\lambda/4$)，耦合块的长度为 $\lambda/4$ ，这样组成了半波长振子，中孔锆钛酸铅压电陶瓷片其极性相对，插入耦合块和匹配块之间，(压电陶

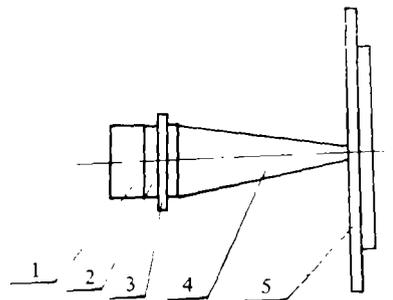


图3 夹心式压电陶瓷换能器

1. 匹配块; 2. 压电陶瓷片; 3. 电极片;
4. 耦合块; 5. 辐射盘

瓷片尺寸为 $\phi 42 \times \phi 15 \times 5$ 。两块压电陶瓷片被一电极隔开，该端电极接高电位，匹配块的材料为 45 号钢，采用圆柱形式，直径为 42 mm，长为 30mm。耦合块的材料也是 45 号钢，采用圆

锥形,大端直径为 42mm,小端直径为 14mm,长为 94 mm,全部零件用环氧粘合在一起,并用内六角螺钉把这些零件夹在一起,组成一个半波长的换能器,由于换能器的耦合块采用圆锥形,又起到了振幅放大作用。

换能器的小端激励阶梯圆盘,而产生三个波节环的弯曲振动。盘是用铝合金制造的,其尺寸决定于所选取频率和使用的振动波形。我们选用盘的直径为 200 mm,厚大约为 5 mm,阶梯的厚度为 8 mm,它相当于声在传播介质空气中的半波长。

四、辐射盘的设计

为降低成本,采用材料为合金铝(LY₁₂),计算时采用 C. G. S 制,在空气中声速为 $c = 33.4 \times 10^3 \text{ cm/s}$ 。

泊松比: $\sigma = 0.21$ 。杨氏模量: $E = 6.6 \times 10^{11}$ 。密度: $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$ 。频率: $f = 20 \times 10^3 \text{ Hz}$ 。盘直径: $2a = 20 \text{ cm}$ 。盘厚: $h_2 = 0.5 \text{ cm}$ 。阶梯厚: $h_1 - h_2 = \lambda/2 = c/2f = 0.8 \text{ cm}$ 。 $h_1 = 1.3 \text{ cm}$ 。(c 为声在空气中的声速)。

$$\text{利用公式: } v_1^4 = \omega^2 \frac{\rho h_1}{D_1}, \quad v_2^4 = \omega^2 \frac{\rho h_2}{D_2}.$$

$$\text{得出: } v_1 = 0.2430, \quad v_2 = 0.3918.$$

把 v_1, v_2, a, λ 代入方程(1)~(6)

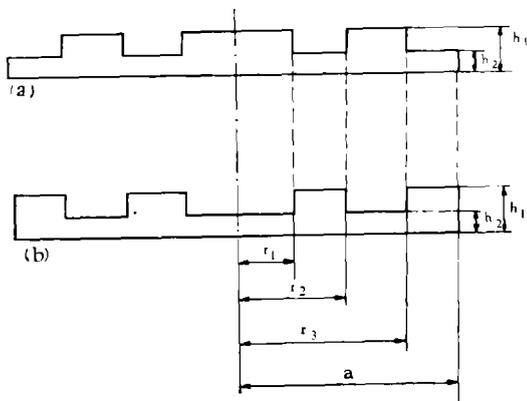


图4 阶梯辐射盘的横截面
(a) 中间凸起; (b) 中间凹下

$$\begin{aligned} \text{求得: } r_1 &= 2.53 \text{ cm.} \\ r_2 &= 5.88 \text{ cm.} \\ r_3 &= 8.57 \text{ cm.} \end{aligned}$$

根据求得的 r_1 、 r_2 和 r_3 分别组成中间凸的和中间凹的两部分阶梯形式,如图 4 所示。

五、试验和结论

1. 试验: (1) 方法 用低频讯号发生器(XFD-7 A)。直接激励向空气辐射的换能器,输出阻抗为 150Ω ,输出功率为 5W,用 ND₂ 精密声级计测辐射超声的声压级。(2) 试验结果见下表(房间体积为 $3.8 \text{ m} \times 7.6 \text{ m} \times 2.8 \text{ m} = 100 \text{ m}^3$)。

编号	频率(kHz)	声级计离换能器中心距离(m)	轴向声级(dB)	室内平均声级(dB)	辐射盘形式
1	21.185	1	118	95	中凸
2	21.116	1	117	95	中凸
3	20.050	1	109	90	中凹
4	20.119	1	112	90	中凹
5	21.096	1	119	95	中凸

2. 结论: 利用阶梯辐射盘组成向空气辐射的换能器,结构简单,在空气中可以产生高强度的超声,高的辐射效率和高的方向性。从试验结果中看出,中间凸的阶梯辐射盘比中间凹的阶梯辐射盘更为优越。目前,我们已将该换能器应用于产品以便在空气中产生高强度的超声。但是,由于条件有限,还有许多工作,如声强还不够高,轴向声压的分布,方向性图案,还没有进行测试,因此这工作仅仅是开始,还有不少问题有待于进一步解决。

参 考 资 料

- [1] J. A. Gallego, *Ultrasonics*, No. 6 (1978), 267—271.
- [2] A Barone and J. A. Gallego, *J. A. S. A.*, 51 (3) (1972), 953—957.
- [3] J. A. Gallego, *Journal of Sound and Vibration*, 26 (3) (1973), 411—426.