

# 换能器阵列形式对指向性的影响

杨天文<sup>1</sup>, 陈敏<sup>2</sup>, 黄大贵<sup>1</sup>, 张力文<sup>2</sup>, 陈祥<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学机械电子工程学院, 四川成都 611731; 2. 电子科技大学航空航天学院, 四川成都 611731)

**摘要:**针对声波定向换能器阵列形式对指向性的影响问题, 该文根据声波叠加原理, 从理论上推导了圆形活塞换能器阵的三维指向性计算公式。在此基础上, 利用该理论公式, 对24个压电换能器阵元分别布为 $4 \times 6$ 阵列、 $5 \times 5 - 1$ 阵列、 $3 \times 8$ 阵列、 $2 \times 12$ 阵列的指向性进行了分析, 发现不同阵列形式三维指向性存在明显差异; 方阵在各方向上指向性近似相同, 而长方形阵则随长宽比的增大, 在长、宽方向上的指向性差异增大。

**关键词:**声波定向换能器阵列; 阵列形式; 指向性; 圆形活塞换能器; 矩形阵; 三维指向性设计

**中图分类号:** TN912

**文献标识码:** A

## Effect of Transducer's Array Pattern on Array's Directivity

YANG Tianwen<sup>1</sup>, CHEN Min<sup>2</sup>, HUANG Dagui<sup>1</sup>, ZHANG Liwen<sup>2</sup>, CHEN Xiang<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical, Electronic, and Industrial Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** A three-dimension directivity calculating formula for circular piston transducer array is deduced theoretically according to the acoustic wave superposition principle to reveal how acoustic directional transducer array pattern affects the array directivity. The directivity of a  $4 \times 6$  array,  $5 \times 5 - 1$  array,  $3 \times 8$  array and  $2 \times 12$  array, which are all composed of 24 piezoelectric transducer array element, are analyzed by the theoretical formula, and the results show that there are significant differences existing in different arrays. The directivity of the square transducer array in various directions is approximately equal, while the difference of the directivity of the rectangular transducer array in length direction and width direction increases when the ratio of length and width increases.

**Key words:** acoustic directional transducer array; array pattern; directivity; circular piston transducer; rectangular array; three-dimension directivity design

## 0 引言

近年来, 声波定向技术受到了世界各国声学研究者的广泛重视<sup>[1-4]</sup>。利用声波定向技术可开发出参量扬声器(也称声频定向扬声器)<sup>[3-4]</sup>、声波驱散装置<sup>[3,5]</sup>等新型电声产品, 此类产品将为推动电声行业发展做出巨大贡献。对于此类声波定向产品, 指向性是衡量其声波定向效果的重要指标, 而指向性主要决定于换能器的阵列形式, 因此换能器阵列形式设计是声波定向产品的关键技术之一。早期的研究者一般都将换能器阵列设计为圆形、方形阵列<sup>[6-9]</sup>, 使得各方向上的指向性近似相等, 但在实际应用中, 对不同方向上的指向性有不同要求的情况

较常见, 这就亟需发展一种换能器阵列三维指向性设计方法<sup>[9]</sup>。本文拟通过理论推导求得声波定向活塞式压电换能器平面阵三维指向性理论计算公式, 并以此对方形阵、矩形阵的指向性进行分析, 探索阵列形式对换能器阵三维指向性的影响规律, 研究可对矩形换能器阵进行三维指向性理论设计与分析的方法。

## 1 换能器阵三维指向性理论计算

建立换能器阵的坐标系, 取换能器阵中心点  $O$  为坐标原点, 如图 1 所示。换能器阵为平面阵, 其在平面为  $xOy$  平面。声场中任一观察点  $P$  位于距  $O$  点的距离为  $r$ , 与  $z$  轴夹角为  $\theta$ , 旋转角为  $\varphi$  的位

收稿日期: 2013-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60901062, 61271286)

作者简介: 杨天文(1978-), 男, 四川乐至人, 博士生, 主要从事参量声源信号处理方法研究。

置。P点的直角坐标在此设为 $(x_0, y_0, z_0)$ 。

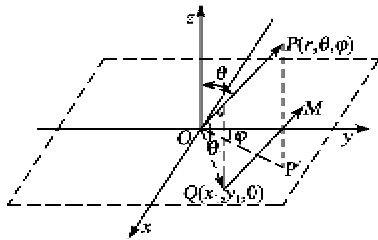


图1 换能器阵坐标系

若半径为  $a$  的圆形活塞换能器以速度  $u = u_0 e^{j\omega t}$  ( $u_0$  为速度振幅,  $\omega$  为振动角频率,  $t$  为时间) 振动, 且刚好位于坐标原点  $O$  处, 则其在远场 ( $r \gg a$ )  $P$  点产生的声压为

$$p = j\omega \frac{\rho_0 u_0 a^2}{2r} \left| \frac{2J_1(k a \sin \theta)}{k a \sin \theta} \right| e^{j(\omega t - kr)} \quad (1)$$

式中:  $\rho_0$  为媒质密度;  $k = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\lambda$  为声波波长。

当圆形活塞换能器位于  $xOy$  平面上任一点处时, 设  $Q$  点到  $P$  点的声程为  $r_1$ , 同理可得  $Q$  点处半径为  $a$  的圆形活塞换能器在  $P$  点产生的声压为

$$p_1 = j\omega \frac{\rho_0 u_0 a^2}{2r_1} \left| \frac{2J_1(k a \sin \theta_Q)}{k a \sin \theta_Q} \right| e^{j(\omega t - kr_1)} \quad (2)$$

式中  $\theta_Q$  为向量  $QP$  与  $z$  轴的夹角。

在远场时, 可近似认为向量  $OP \parallel QP$ , 则声程  $r_1$  与  $r$  的关系可表示为

$$r_1 = r - Pr_{j\omega} OQ \quad (3)$$

式中  $Pr_{j\omega} OQ$  为向量  $OQ$  在向量  $OP$  上的投影。由向量投影关系可知

$$Pr_{j\omega} OQ = |OQ| \cos \theta_1 = r_Q \cos \theta_1 \quad (4)$$

式中:  $r_Q$  为向量  $OQ$  的模;  $\theta_1$  为向量  $OQ$  与向量  $OP$  间的夹角。由于  $P$  点的直角坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ ,  $Q$  点的直角坐标为  $(x_1, y_1, 0)$ , 故向量  $OP, OQ$  可分别表示为  $\{x_0, y_0, z_0\}, \{x_1, y_1, 0\}$ 。则式(4)中的夹角余弦

$$\cos \theta_1 = \frac{|x_0 x_1 + y_0 y_1 + z_0 z_1|}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}} = \frac{|x_0 x_1 + y_0 y_1|}{r r_Q} \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入式(3)可得

$$r_1 = r - \frac{|x_0 x_1 + y_0 y_1|}{r} \quad (6)$$

将式(6)中的  $x_0, y_0$  转换为圆柱坐标, 有

$$\begin{cases} x_0 = r \sin \theta \sin \varphi \\ y_0 = r \sin \theta \cos \varphi \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6), 有

$$r_1 = r - \{x_1 \sin \theta \sin \varphi + y_1 \sin \theta \cos \varphi\} \quad (8)$$

在远场时, 式(2)振幅部分的  $r_1 \approx r, \theta_Q \approx \theta$ , 则将式(8)代入式(2)可得平面  $xOy$  内任意一点  $Q$  处半径为  $a$  的圆形活塞换能器在远场  $P$  点处产生的声压为

$$p_1 = j\omega \frac{\rho_0 u_0 a^2}{2r} \left| \frac{2J_1(k a \sin \theta)}{k a \sin \theta} \right| e^{j(\omega t - kr + k|x_1 \sin \theta \sin \varphi + y_1 \sin \theta \cos \varphi|)} \quad (9)$$

若平面换能器阵由  $M$  个圆形活塞换能器组成, 第  $i$  个换能器在平面上所处位置为  $(x_i, y_i)$ , 且每个换能器皆以速度  $u = u_0 e^{j\omega t}$  振动, 则  $M$  个在平面内任意分布的圆形活塞换能器在  $P$  点产生的声压为

$$p_M = j\omega \frac{\rho_0 u_0 a^2}{2r} \left| \frac{2J_1(k a \sin \theta)}{k a \sin \theta} \right| e^{j(\omega t - kr)} \sum_{i=1}^M e^{jk|x_i \sin \theta \sin \varphi + y_i \sin \theta \cos \varphi|} \quad (10)$$

由贝塞尔函数性质可知, 当  $x=0$  时, 有  $J_1(x)/x=1/2$ 。根据式(10)可求出由  $M$  个半径为  $a$ 、位置任意排布的圆形活塞换能器组成的平面阵的归一化指向性函数为

$$D(\theta, \varphi) = \left| \frac{p_M(\theta, \varphi)_\theta}{p_M(\theta, \varphi)_{\theta=0}} \right| = \left| \frac{2J_1(k a \sin \theta)}{M k a \sin \theta} \right| \times \left| \sum_{i=1}^M e^{jk|x_i \sin \theta \sin \varphi + y_i \sin \theta \cos \varphi|} \right| \quad (11)$$

由式(11)可计算任意排布的平面圆形活塞换能器的指向性。但式(11)较复杂, 如果要通过二维指向性研究方法进行阵列指向性判定的话, 将很难得到该阵的指向性, 因此可采用本课题组提出的三维指向性研究方法<sup>[3]</sup>进行指向性判定。

## 2 换能器阵形式设计

为研究换能器阵列形式对指向性的影响, 在此采用 24 个压电换能器进行不同的阵列形式设计。这些阵列设计为矩阵形式, 分别为 4 行 6 列、5 行 5 列(中心少一个换能器)、3 行 8 列、2 行 12 列阵列, 即分别对应  $4 \times 6, 5 \times 5 - 1, 3 \times 8$  和  $2 \times 12$  阵列。在这些阵列中, 选取的压电换能器的直径为  $\varnothing 76 \text{ mm}$ , 在  $x, y$  方向上换能器阵元间距为  $79 \text{ mm}$ 。

图 2 为  $4 \times 6$  阵列换能器的排布形式。换能器采用从左到右、从上至下的编号方式。第一个换能器的编号为 1, 各个换能器在  $xOy$  坐标系中的坐标如表 1 所示。

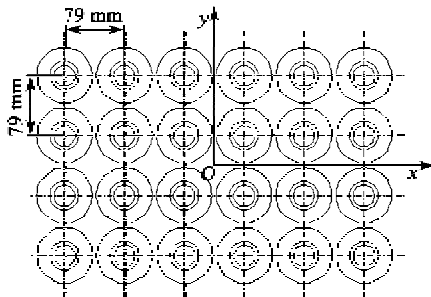


图 2 4×6 换能器阵列排布形式

表 1 4×6 阵列换能器坐标

编号	$x_i$	$y_i$	编号	$x_i$	$y_i$
1	-197.5	118.5	13	-197.5	-39.5
2	-118.5	118.5	14	-118.5	-39.5
3	-39.5	118.5	15	-39.5	-39.5
4	39.5	118.5	16	39.5	-39.5
5	118.5	118.5	17	118.5	-39.5
6	197.5	118.5	18	197.5	-39.5
7	-197.5	39.5	19	-197.5	118.5
8	-118.5	39.5	20	-118.5	118.5
9	-39.5	39.5	21	-39.5	118.5
10	39.5	39.5	22	39.5	118.5
11	118.5	39.5	23	118.5	118.5
12	197.5	39.5	24	197.5	118.5

图 3 为 5×5-1 的换能器阵列排布形式。在此阵列中间一个换能器被取出,以保证所有阵列的换能器个数均为 24 个。3×8 阵列及 2×12 阵列与 4×6 阵列类似,在此不再给出相应换能器阵列排布图。

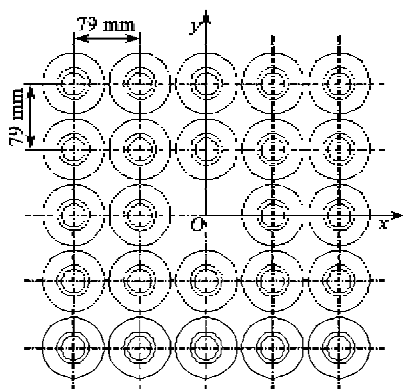


图 3 5×5-1 换能器阵列排布形式

### 3 换能器阵三维指向性分析

选取声波为 2 kHz 时对各阵列的指向性进行对比,如图 4 所示。图 4(a)中,其  $yOz$ 、 $xOz$  定向面内的波束宽度  $\theta_{-3dB}$  均为  $43.0^\circ$ 。图 4(b)中,其  $yOz$ 、 $xOz$  定向面内的波束宽度  $\theta_{-3dB}$  分别为  $59.2^\circ$ 、 $37.8^\circ$ 。图 4(c)中,其  $yOz$ 、 $xOz$  定向面内的波束宽

度  $\theta_{-3dB}$  分别为  $63.3^\circ$ 、 $27.9^\circ$ 。图 4(d)中,其  $yOz$ 、 $xOz$  定向面内的波束宽度  $\theta_{-3dB}$  分别为  $180^\circ$ 、 $18.5^\circ$ 。在  $yOz$  定向面内,随阵列行数的减少,波束宽度呈增大趋势;在  $xOz$  定向面内,随着阵列列数的增加,波束宽度呈减小趋势。

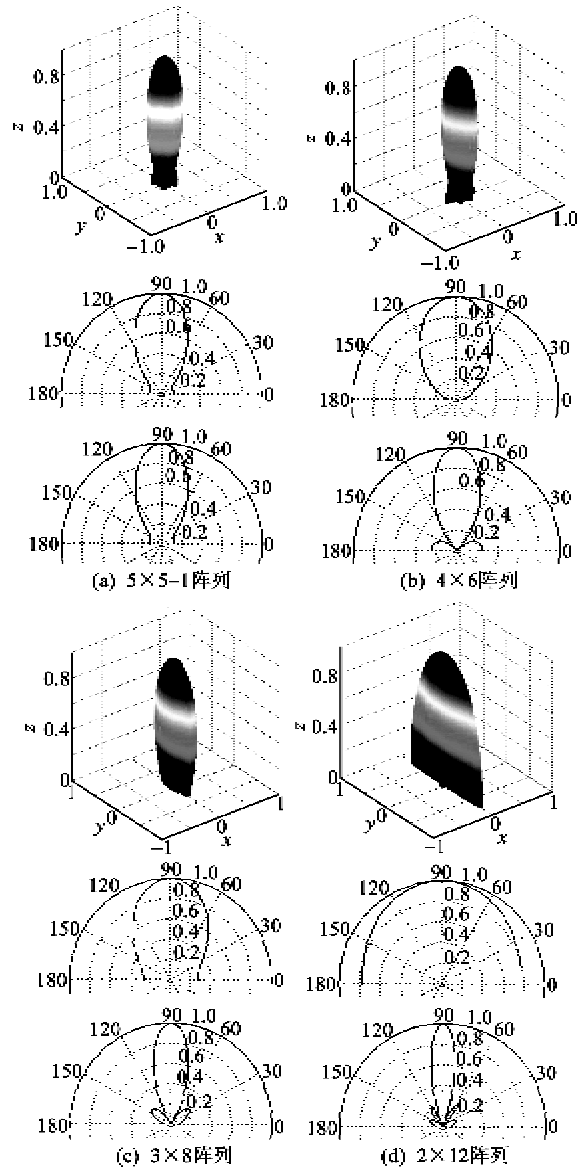


图 4 不同阵列形式的指向性图

如图 4(a)所示,方阵各个方向上指向性近似相同;在  $yOz$  定向面内,随阵列行数的减少,指向性变差;在  $xOz$  定向面内,随阵列列数的增加,指向性变得越来越好,但随列数增加,三维立体旁瓣开始出现,且其个数及水平随着列数增加分别变得更多、更显著。这些变化导致矩形阵三维指向性图从圆形纺锤状向扁形纺锤状变化,行、列两方向上换能器个数比越大,则三维指向性图变得越扁。

图5为声波频率变化时不同阵列 $xOz$ 、 $yOz$ 定向面内波束宽度及二者之差的变化曲线。图5(a)中, $xOz$ 、 $yOz$ 定向面内波束宽度在频率相同时相等;随着声波频率的增大,二者皆减小,但二者之差始终为0。当阵列行数和列数不等时,二者不同,二者之间存在一个差值;随着声波频率的增大,

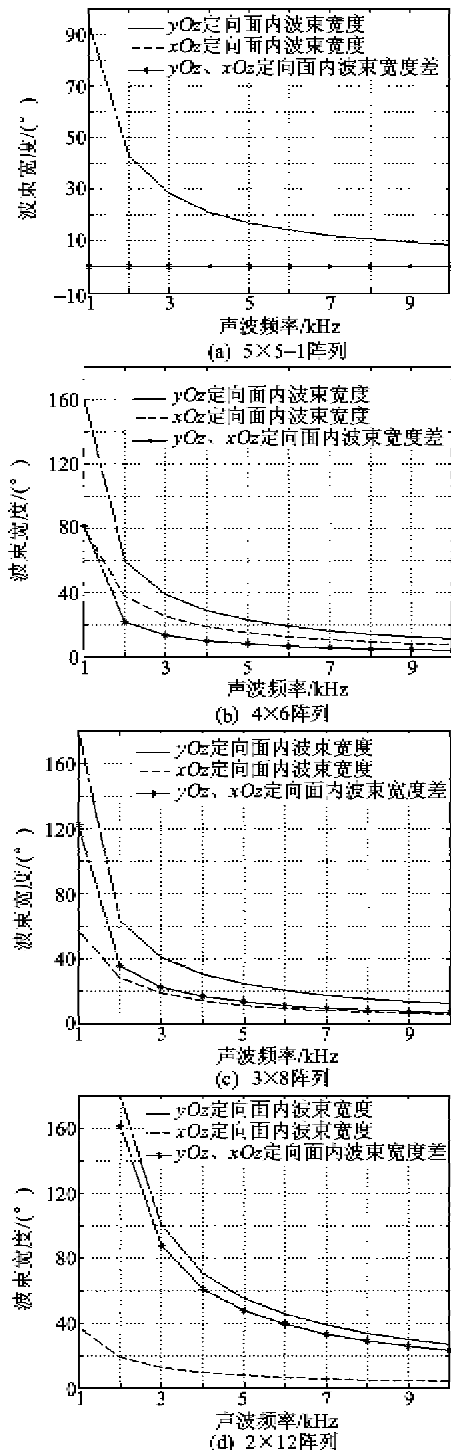


图5 不同阵列波束宽度随频率的变化曲线

$xOz$ 、 $yOz$ 定向面内波束宽度,以及二者之差均呈减小变化趋势。

图6为不同阵列 $xOz$ 、 $yOz$ 定向面内波束宽度的变化图。由图可知,阵列行数与列数差值越大,则在 $xOz$ 、 $yOz$ 定向面内波束宽度的差值也越大,且该值随着声波频率的增大而减小;当阵列中行数等于列数时, $xOz$ 、 $yOz$ 定向面内波束宽度的差值恒等于0,不随声波频率的变化而变化。

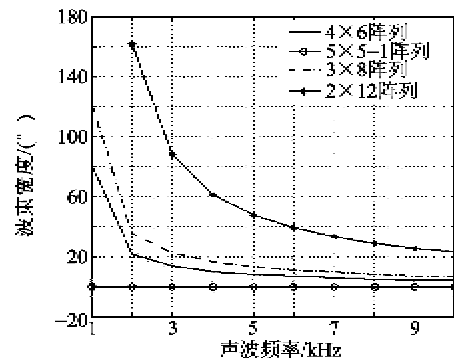


图6 不同阵列 $xOz$ 、 $yOz$ 定向面内波束宽度差变化

#### 4 结论

本文采用三维指向性研究方法,就圆形活塞换能器平面阵的阵列形式对阵列三维指向性的影响进行了研究,得到了如下结论:

1) 在声波频率相同时,方形阵的三维指向性图呈圆形纺锤状,而长方形阵的三维指向性图呈扁形纺锤状,且行、列数相差越大,则三维指向性图越扁。

2) 矩形换能器阵列变化时,若其行或列中的换能器个数增加,则对应定向面内的指向性会增强(也即波束宽度变小),同时三维立体旁瓣开始出现,且随着该方向上阵元个数的增加,旁瓣个数增多,且旁瓣水平变大。

3) 随着声波频率的增大,不同阵列中 $xOz$ 、 $yOz$ 定向面内波束宽度均减小;方阵中, $xOz$ 、 $yOz$ 定向面内波束宽度相同,但长方形阵中二者存在差异。

4) 对于不同的矩形阵列,阵列行数与列数差值越大,则在 $xOz$ 、 $yOz$ 定向面内波束宽度的差值也越大,呈该值随着声波频率的增大而减小;当阵列中行数等于列数时, $xOz$ 、 $yOz$ 定向面内波束宽度的差值恒为0,不随声波频率的变化而变化。

#### 参考文献:

- [1] CHENG Y, XU J Y, LIU X J. Tunable sound directional beaming assisted by acoustic surface wave[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(7): 1-3.

(下转第99页)