

厚圆盘基频振动声场指向性^{*1}

刘志永^{1,2}, 贺西平¹, 周宏建¹

(1. 陕西师范大学应用声学研究所, 陕西 西安 710062; 北京师范大学大同附中, 山西 大同 037009)

摘要:指向性是描述声场特性的一个重要指标. 因中厚盘弯曲振动的解析解难以得到, 数值计算了3种边界条件下弯振厚圆盘基频振动下的辐射声场指向性. 计算结果表明, 对几何尺寸相同的厚圆盘, 在基频振动模式下, 固定边界下弯振厚圆盘辐射声场指向性最尖锐, 简支居中, 自由边界盘的辐射声场只有旁瓣, 没有主瓣, 指向性不好. 与线度相同的薄圆盘相比, 厚圆盘的指向性更加尖锐.

关键词:指向性; 基频; 弯曲振动; 辐射声场

中图分类号: O 426.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-7971(2011)05-0569-04

根据板的厚度 t 与宽度(或者直径) b 之比的不同, 板可以分为厚板、薄板及薄膜. 当 $t/h > 1/5$ 时, 称之为厚板. 厚板在现代的科学技术及生产领域中有着广泛的应用价值. 在大功率超声领域中, 弯振圆盘辐射体因具有大辐射面积的特点得到了很好的应用^[1]. 中厚盘辐射体因机械强度高、横向尺寸小, 在高频、大功率声辐射条件下是个好的选择. 目前对圆盘弯振特性及声场指向性^[2-4]的研究计算, 多数采用薄板理论. 该理论不计剪切形变对板的影响, 得到的弯曲振动频率一般高于实际值, 只能适用于薄板, 具有一定的局限性.

指向性是描述声源辐射体将声波辐射到空间各个方向的能力, 它是描述声场特性的一个重要指标. 为了得到某些给定方向的有效声强, 同时降低其他方向的干扰, 在实际中人们广泛使用具有指向性的声辐射体. 文献[5]用边界元法计算了任意阵型水声换能器的辐射声场, 文献[6]对阶梯圆盘复合式换能器的指向性进行了理论计算和实验研究. 人们也设计出其他形状的阶梯板或穿孔板^[7-8], 进行了相应的声场指向性研究. 目前对中厚盘辐射声场指向性的研究不多, 因中厚盘^[9]弯曲振动的位移解很难求得, 致使其辐射声场指向性也不易根据解析解得到, 为了解决这一问题, 本文研究计算了其辐射声场指向性.

1 理论公式

设弯曲振动圆盘被安装在一个无限大平面障板上, 当圆盘产生弯曲振动时, 将会向无限大平面障板前面的半空间辐射声波. 为了方便直观地计算辐射声场, 采用球面坐标来表示圆盘的辐射声场分布, 其中坐标原点为板几何中心点 O , P 点表示声场中任意位置处的一个观察点, (x_0, y_0, z_0) 为其直角坐标, (r, θ, φ) 为其球面坐标. r 是观察点 P 与坐标中心 O 之间的距离, ds 是圆盘上一个微元面积, $ds = dx dy$. 观察点 P 与微元 ds 之间的距离是 H , θ 为 r 与 z 方向的夹角, φ 为 P 点在 xy 平面内的投影与 x 轴正方向的夹角. 对瑞利积分公式进行离散得到中厚盘远场辐射声压展开式, 用(1)式表示,

$$P = j \frac{k \rho_0 c_0}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \iint u(x, y) ((\cos(kx \sin\theta \cos\varphi) \cos(ky \sin\theta \sin\varphi) - (kx \sin\theta \cos\varphi) \sin(ky \sin\theta \sin\varphi)) +$$

* 收稿日期: 2011-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(10874107)、中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(GK201001008).

作者简介: 刘志永(1985-), 男, 山西人, 硕士生, 主要研究方向: 超声工程. E-mail: liuzhiyong@163.com.

通讯作者: 贺西平(1965-), 男, 江西人, 教授, 博士生导师, 研究方向为超声工程, 水声换能振动系统的理论与设计. E-mail: hexiping@snnu.edu.cn.

$$j(\cos(kx\sin\theta\cos\varphi)\sin(ky\sin\theta\sin\varphi) + \cos(ky\sin\theta\sin\varphi)\sin(kx\sin\theta\cos\varphi)) dx dy \quad (1)$$

离散^[10](1)式,可表为

$$V_1 = \sum_{l=1}^N u_l (\cos(kx_l\sin\theta\cos\varphi)\cos(ky_l\sin\theta\sin\varphi) - \sin(kx_l\sin\theta\cos\varphi)\sin(ky_l\sin\theta\sin\varphi)) \Delta S_l, \quad (2a)$$

$$V_2 = \sum_{l=1}^N u_l (\cos(kx_l\sin\theta\cos\varphi)\cos(ky_l\sin\theta\sin\varphi) + \cos(ky_l\sin\theta\sin\varphi)\sin(kx_l\sin\theta\cos\varphi)) \Delta S_l, \quad (2b)$$

得到声压幅值为

$$P_4 = j \frac{k\rho_0 c_0}{2\pi r} \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (3)$$

式中 u_l 表示第 l 个单元中心点的振速, x_l, y_l 为第 l 个单元的横坐标和纵坐标, N 为离散后组成振动面的单元总数, ΔS_l 为第 l 个单元的面积。

2 厚盘声场指向性

利用有限元法计算了厚圆盘的弯曲振动特性,得到相应各阶模态下组成圆盘的各单元面积、中心点坐标和挠度(也就是位移解)。取圆盘材料为45#钢,其弹性模量 $E = 2.16 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,泊松比为 $\sigma = 0.28$,密度 $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。取圆盘半径 r 为 0.025 m ,计算了自由、简支、固定3种边界下弯振厚圆盘的声场指向性,并与弯振薄圆盘进行了对比。其中自由边界下对应圆盘边界处的弯矩及横向剪力为0,简支边界下对应圆盘的横向位移及弯矩为0,固定边界下对应圆盘边界处的横向位移及其导数为0。

考虑篇幅所限,这里以厚度为 0.02 m 的圆盘为例,其辐射声场指向性如图1所示,其中图1(a)为自由边界,图1(b)为简支边界,图1(c)为固定边界。由图可知在基频振动模式下,自由边界下弯振厚圆盘在中心轴上能量分布少,能量主要分布在中心轴两侧,辐射声场指向性不好。在简支、固定边界条件下,弯振圆盘辐射能量集中分布在中心轴上,没有旁瓣,辐射声场指向性较好。两者相比,固定边界下圆盘指向性更加尖锐,更好一些。3种边界下固定边界辐射声场指向性最好,简支居中,自由边界辐射声场指向性最差。

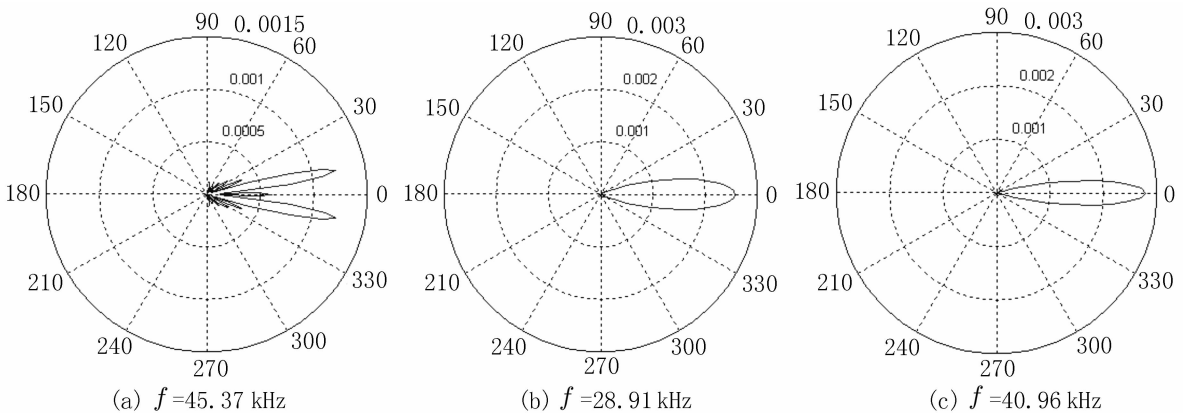


图1 厚度为20 mm的3种边界下厚盘声场的指向性

Fig. 1 Directivity patterns of the 20 mm thick plate under three boundary conditions

3 厚、薄圆盘指向性比较

为了对比3种边界下厚、薄圆盘辐射声场指向性,本文计算了从薄到厚圆盘的辐射声场指向性,以厚度为 0.005 m 为例,辐射声场如图2所示,图2(a)为自由边界,图2(b)为简支边界,图2(c)为固定边界。由图可知在基频振动模式下,自由边界的薄、厚盘能量主要分布在中心轴两侧,辐射声场指向性不好,且厚度越大,旁瓣也多,辐射能量更加分散;固定、简支边界下薄、厚盘能量分布在中心轴上,且随着厚度的增大,能量分布越来越集中,指向性变得尖锐。相对于薄盘,厚盘的指向性更好些。

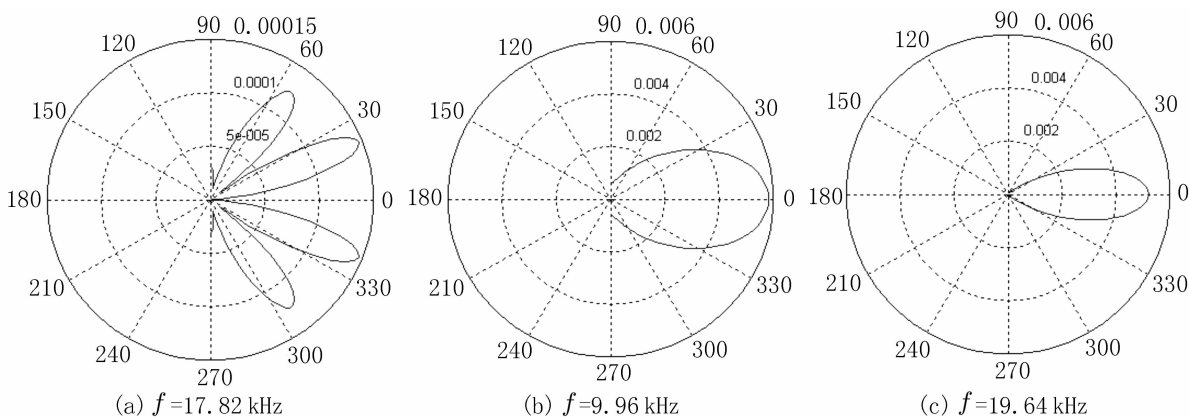


图2 厚度为5 mm 3种边界薄盘声场的指向性

Fig.2 Directivity pattern of the 5 mm thin plate under three boundary conditions

4 三维指向性图

为直观地看到简支、固定边界弯曲振动圆盘指向性空间分布,这里计算了5,20 mm 弯曲振动圆盘在简支、固定边界下的三维指向性分布图.其中图3为20 mm 中厚盘的三维指向性分布图,图4为5 mm 薄圆盘的三维指向性分布图.由图3,4可知,指向性关于俯视角对称,能量主要分布在中心轴上,其中固定边界中厚盘相对薄盘的指向性更尖锐.

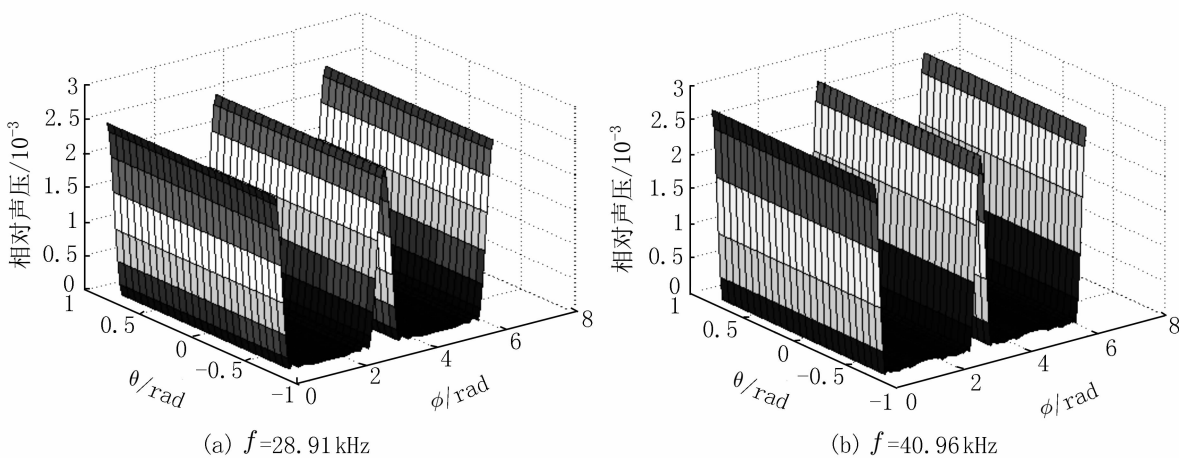


图3 中厚盘三维指向性分布图

Fig.3 Distribution of three - dimensional directivity pattern of the thick plate

5 结论

本文计算了几何尺寸相同的厚圆盘在基频振动模式下的声场指向性.固定边界的弯振厚圆盘辐射声场指向性最尖锐,简支居中,自由边界盘的辐射声场只有旁瓣,没有副瓣,指向性不很好.与线度相同的薄圆盘相比,厚圆盘的指向性更加尖锐.

使用厚圆盘的好处是在大功率条件下可以克服薄盘机械强度不足的缺点.

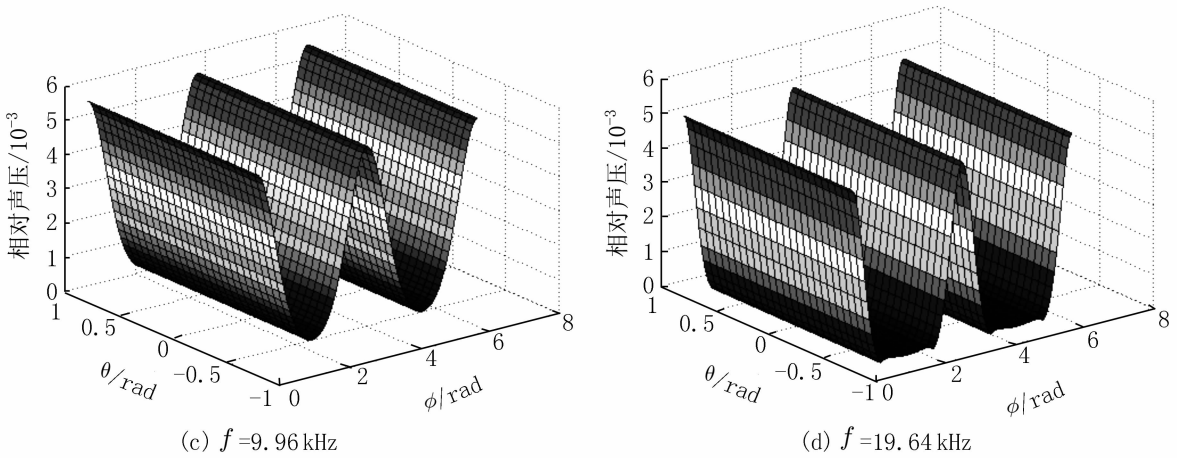


图4 薄圆盘三维指向性分布图

Fig.4 Distribution of three - dimensional directivity pattern of the thin plate

参考文献:

- [1] 尚志远. 检测声学原理[M]. 西安:西北大学出版社,1996:96-98.
- [2] HUTCHINS D A, SCHINDEL D W, BASHFORD A G, et al. Advances in ultrasonic electrostatic transduction[J]. Ultrasonics, 1998, 36(1):1-6.
- [3] 廖一, 曾迎生, 崔慧海, 等. 超声换能器在陆地自主车上的应用[J]. 计算机仿真, 2009, 26(2):179-182.
- [4] 石焕文, 盛美萍. 有限长圆柱壳水中辐射声场解析解与有限元/边界元研究[J]. 陕西师范大学:自然科学版, 2010, 4(38):40-45.
- [5] 何正耀, 马远良. 任意阵形水声换能器阵辐射声场计算[J]. 应用声学, 2006, 25(2):69-75.
- [6] C Campos - Pozuelo, LAVIE A, DUBUS B, et al. Numerical study of air - borne acoustic field of stepped - plate high - power ultrasonic transducers [J]. Acustics, 1998, 84(6):1 042-1 046.
- [7] 阎玉舜, 张串, 高克成. 复合弯曲振动换能器的相位阻抗变换穿孔板[J]. 声学技术, 1998, 17(2):82-85.
- [8] XIANG Y, ZHANG L. Free vibration analysis of stepped circular Mindlin plates[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 280:633-55.
- [9] 潘晓娟, 贺西平. 厚圆盘弯曲振动的研究[J]. 物理学报, 2010, 59(11):7 911-7 915.
- [10] 张勇, 贺西平, 李伟, 等. 自由边界弯曲振动矩形薄板辐射声场指向性研究[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版, 2010, 38(4):36-40.

A Study on directivity patterns of radiated acoustic field based on a thick circular plate

LIU Zhi-yong^{1,2}, HE Xi-ping¹, ZHOU Hong-jian¹

(1. Institute of Applied Acoustics, Shanxi Normal University, Xi'an 710062, China

2. Datong Middle School of Beijing Normal University, Datong 037009, China)

Abstract: Directivity pattern is one of the key indicators describing the radiated acoustic field. The displacement of flexural vibration of a thick plate is difficulty to obtain through the analysis solution. The directivity pattern of a thick plate with fundamental frequency at its flexural vibration has been calculated through numerical calculation. The results show that in terms of its fundamental frequency vibration mode, the directivity pattern with clamped boundary is the best, simply - supported better, while free boundary the poorest. In comparison with the thin plate, the directivity pattern of the thick plate is more acute.

Key words: directivity pattern; fundamental frequency; flexural vibration; radiated acoustic field