

# 声障板对圆柱换能器轴向波束抑制技术研究

王敏慧<sup>1</sup>, 胡健辉<sup>2</sup>, 王艳<sup>1</sup>

(1. 上海船舶电子设备研究所, 上海 201108; 2. 水声对抗技术重点实验室, 上海 201108)

**摘要:** 文章研究了声障板对圆柱换能器轴向波束抑制特性。利用有限元仿真方法建立了带轴向反声障板的圆柱形换能器的水中模型, 通过改变障板距离圆柱形换能器的相对距离、直径等参数, 探索了障板对圆柱形换能器轴向波束的抑制效果, 并实际制作了带轴向障板的圆柱形换能器。结果表明: 有限元仿真计算结果与试验测试结果吻合较好, 利用障板技术可以有效地抑制圆柱换能器轴向声压。

**关键词:** 障板; 圆柱形换能器; 指向性径轴比

中图分类号: TB533

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-04-0476-04

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.04.020

## Research on axial beam suppression technique for baffled cylindrical transducer

WANG Min-hui<sup>1</sup>, HU Jian-hui<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>

(1. Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China;

2. Science and Technology on Underwater Acoustic Antagonizing Laboratory, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** In this paper, the axial beam suppression characteristics of acoustic barrier plate for cylindrical transducer are introduced. The model of cylindrical transducer with an axial barrier in water is established by using finite element simulation method. By changing the diameter of the baffle and its relative distance away from the cylindrical transducer, the suppression effect of the baffle on the axial beam of the cylindrical transducer is discussed. And the cylindrical transducer with an axial barrier plate has been developed. It is shown that the results of FEM simulation are in good agreement with the test results, and that the axial acoustic pressure of cylindrical transducer can be effectively suppressed by using barrier technique.

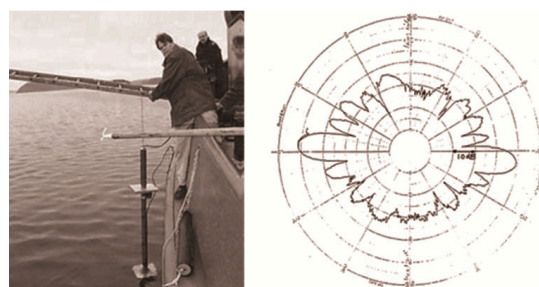
**Key words:** baffle plate; cylindrical transducer; ratio of radial to axial level in directivity pattern

## 0 引言

边发边收技术可以在发射强干扰的同时测量寻的信号频率, 从而控制发射频率自动跟踪寻的频率的变化, 使发射功率集中于较窄的频带, 增强干扰效果。为了实现边收边发的功能<sup>[1-2]</sup>, 要求收、发换能器系统具有良好的声隔离性能。除了拉大收/发换能器之间的距离提高声隔离效果以外, 在设计换能器时, 可采用有效的反声障板结构<sup>[3-4]</sup>设计增大换能器垂直方向性的径轴比, 从而提高收、发换能器之间的隔离效果。

国外针对边发边收系统的声隔离效果有一些研究, 瑞典的 GUSTAVSSON 利用在收、发换能器之间放置声障板的方式, 通过对圆柱形发射和接收换能器垂直波束径轴比的抑制, 获得了一定的声隔

离效果<sup>[5]</sup>, 其湖上试验图及测试结果如图 1 所示。图 1 中, 其障板尺寸较大, 适用于外形尺寸不受限的情况。声障板的作用效果如图 1(b)所示, 图中使用障板后接收换能器径轴比可达到 15 dB。



(a) 边发边收声隔离系统 (b) 带障板水听器的指向性图

图 1 瑞典制作的边发边收声隔离系统及带障板水听器的指向性图<sup>[5]</sup>

Fig.1 The Sweden made acoustic isolation system (a) and the directivity pattern of the hydrophone with baffle (b)<sup>[5]</sup>

本文在探索圆柱换能器端部无源材料对其垂直波束轴向径轴比的影响规律<sup>[6]</sup>的基础上, 进一步研究反声障板安装在换能器轴向时对圆柱换能器径轴比的影响。

收稿日期: 2018-12-08; 修回日期: 2019-02-20

作者简介: 王敏慧(1980—), 女, 青海西宁人, 硕士研究生, 研究方向为水声换能器设计。

通讯作者: 王敏慧, E-mail: mh\_\_@163.com

### 1 障板结构设计

带轴向障板的圆柱换能器结构示意图如图 2 所示，障板采用防水、隔热、保温、阻燃性能较好的硬质聚氨酯泡沫材料，声反射系数约为 0.9。本文主要借助有限元的理论计算，获得不同障板状态下的换能器垂直方向性，通过调节反声障板到圆柱换能器的距离  $d$  和障板的直径  $D$ ，探索障板对圆柱换能器垂直波束径轴比影响的规律，从而指导工程应用。在不同的空间约束下选择合适的距离和尺寸，获得最佳的垂直波束径轴比。障板的仿真数据与实际制作的带轴向障板的换能器实物的试验数据吻合较好，在工程应用中具有实用价值。

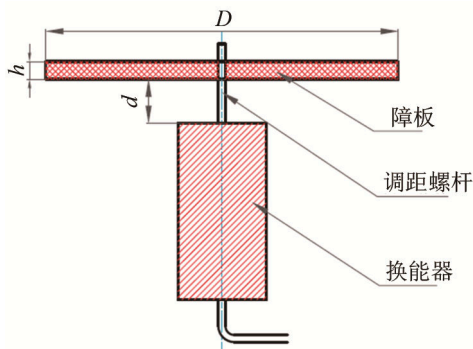


图 2 带障板的圆柱换能器结构示意图  
Fig.2 Structure diagram of the cylindrical transducer with baffle

### 2 有限元计算仿真

本文采用有限元软件对带反声障板的圆柱换能器进行整体建模分析。在仿真模型中涉及的材料有压电陶瓷、金属材料 and 障板材料等。其中压电陶瓷选用 PZT-4；金属盖板选用铝，其杨氏模量为 70 GPa，泊松比为 0.33，密度为 2 700 kg·m<sup>-3</sup>；反声障板材料选用硬质泡沫，其密度为 290 kg·m<sup>-3</sup>。换能器的主要有功器件由 3 个径向极化的陶瓷圆管并联组成，圆管直径为 50 mm，厚度为 2 mm，高度为 20 mm，加入无源去耦材料和盖板后，换能器整体高度约为 90 mm。图 3 为带障板的圆柱换能器在频率为 15 kHz 时的仿真声场，其中反声障板厚度  $h=10$  mm，直径  $D=200$  mm，障板安装距离  $d=50$  mm( $\lambda/2$ )。以下仿真数据均针对频率  $f=15$  kHz， $\lambda=100$  mm 时的指向性图进行研究分析。

#### 2.1 径轴比与障板安装距离 $d$ 的关系

硬质聚氨酯泡沫反声障板厚度  $h=10$  mm，直径  $D=200$  mm，调节障板到换能器轴向端面的距离  $d$ ，

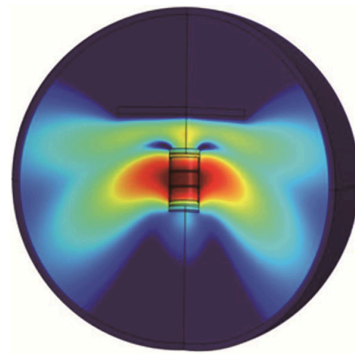


图 3 带障板圆柱换能器的仿真声场  
Fig.3 Simulated sound field of the cylindrical transducer with baffle

选择  $d=0$  mm， $d=25$  mm( $\lambda/4$ )， $d=50$  mm( $\lambda/2$ )， $d=75$  mm( $3\lambda/4$ )， $d=100$  mm( $\lambda$ )，分析频率为 15 kHz 时，障板安装距离  $d$  对圆柱换能器垂直波束径轴比的影响。指向性图仿真结果如图 4 所示。

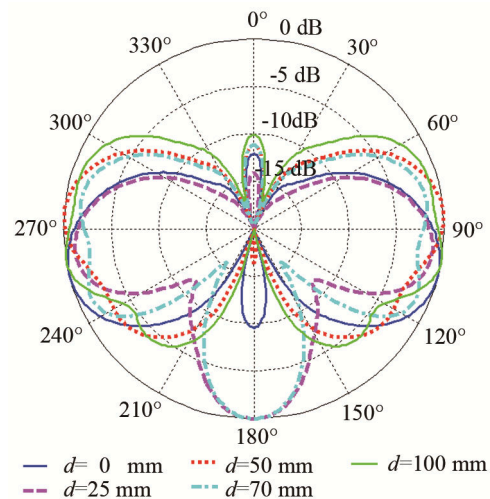


图 4 不同障板安装距离作用下圆柱换能器 15 kHz 仿真指向性图(障板直径为 200 mm)  
Fig.4 Simulated directivity patterns of the cylindrical transducer with different baffle installation distances at 15 kHz (the baffle diameter is 200 mm)

不同障板距离  $d$  作用下圆柱换能器垂直方向的  $-3$  dB 垂直开角和径轴比数据如表 1 所示。

表 1 不同障板安装距离作用下圆柱换能器仿真垂直方向性对比表(障板直径为 200 mm)

Table 1 Comparison of simulated vertical directivity of the cylindrical transducer with different baffle installation distances (the baffle diameter is 200 mm)

	$d/mm$	$\theta_{-3dB}/(^{\circ})$	$0^{\circ}$ 径轴比/dB	$180^{\circ}$ 径轴比/dB
无障板	/	78	6.0	4.0
有障板	0	50	12.2	9.5
	25	39	14.0	-1.0
	50	66	11.2	16.4
	75	66	9.7	-1.4
	100	60	10.1	20.0

参照图4并对比表1中的数据可知:

(1) 圆柱换能器未安装反声障板时,其垂直方向 $-3\text{ dB}$ 开角为 $78^\circ$ , $0^\circ$ 方向和 $180^\circ$ 方向的径轴比分别为 $6.0\text{ dB}$ 和 $4.0\text{ dB}$ ,两个方向径轴比的差别是由于在 $180^\circ$ 方向上换能器电缆的影响造成的,仿真模型与实际情况相符。将反声障板安装在圆柱换能器一端( $0^\circ$ 位置)后,圆柱换能器垂直方向 $-3\text{ dB}$ 开角均受到障板的影响而变小;在 $d=\lambda/4$ 时,开角最小,为 $39^\circ$ 。由此可知,用障板抑制径轴比的同时,减小了垂直开角,这个现象在工程实施过程中要兼顾考虑。

(2) 5种曲线在安装障板的轴向 $0^\circ$ 位置均有小的凸起。当 $d=\lambda/4$ 时,障板对轴向的径轴比抑制为最大 $14\text{ dB}$ ,其他距离可获得约 $10\text{ dB}$ 的径轴比,且径轴比与距离的变化没有特别的规律。由于障板安装在换能器的近场,陶瓷圆管在振动时不能简单地视为理想的点声源进行分析处理,障板反声后的声场较为复杂,这种凸起现象是由于散射声场叠加造成的。

(3) 在换能器未安装障板的 $180^\circ$ 位置,当 $d=\lambda/4$ 和 $d=3\lambda/4$ 时轴向声压最大,与水平径向声压相当;当 $d=\lambda/2$ 和 $d=\lambda$ 时出现凹点,且凹点的大小随障板距离的增大而增大,当 $d=\lambda$ 时,径轴比最大,为 $20\text{ dB}$ 。由此可知,在圆柱换能器的轴向一端安装反声障板时,对轴向另一端的径轴比有较明显的影响。

## 2.2 径轴比与障板直径 $D$ 的关系

硬质聚氨酯泡沫反声障板厚度 $h=10\text{ mm}$ ,取相对距离 $d=50\text{ mm}$ ,通过调节障板直径 $D$ , $D=50\text{ mm}(\lambda/2)$ , $D=100\text{ mm}(\lambda)$ , $D=150\text{ mm}(3\lambda/2)$ , $D=200\text{ mm}(2\lambda)$ , $D=250\text{ mm}(5\lambda/2)$ ,研究频率为 $15\text{ kHz}$ 时,障板直径 $D$ 对圆柱换能器垂直波束径轴比的影响。指向性仿真结果如图5所示。

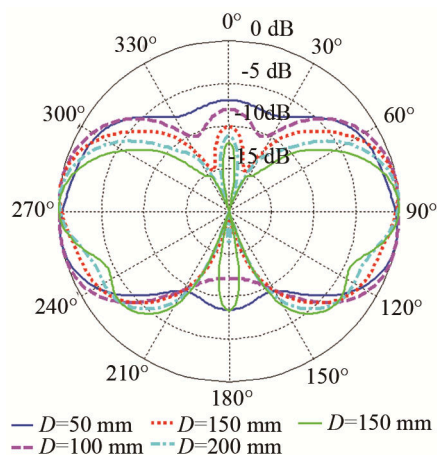


图5 不同直径障板作用下圆柱换能器 $15\text{ kHz}$ 时仿真指向性图(障板安装距离为 $50\text{ mm}$ )

Fig.5 Simulated directivity patterns of the cylindrical transducer with different baffle diameters at  $15\text{ kHz}$  (the baffle installation distance is  $50\text{ mm}$ )

不同直径 $D$ 的障板作用下圆柱换能器垂直方向的 $-3\text{ dB}$ 垂直开角和径轴比数据如表2所示。

表2 不同障板直径作用下圆柱换能器仿真垂直方向性对比表(障板安装距离为 $50\text{ mm}$ )

Table 2 Comparison of simulated vertical directivity of the cylindrical transducer with different baffle diameters (the baffle installation distance is  $50\text{ mm}$ )

	$D/\text{mm}$	$\theta_{-3\text{dB}}/^\circ$	$0^\circ$ 径轴比/ $\text{dB}$	$180^\circ$ 径轴比/ $\text{dB}$
无障板	/	78	6.0	4.0
	50	72	6.9	8.4
	100	77	8.1	12.0
有障板	150	68	10.1	22.0
	200	66	11.2	16.4
	250	68	12.0	8.4

参照图5中的方向性曲线,对比表2中的数据可知:

(1) 当 $d=50\text{ mm}$ ,改变障板直径 $D$ 时,换能器垂直方向的 $-3\text{ dB}$ 开角比未安装障板时变小,垂直开角随障板直径的变化不大。

(2) 随着 $D$ 的增大,障板对轴向 $0^\circ$ 位置的轴向声压的抑制效果逐渐增强,径轴比由 $6.9\text{ dB}$ 增大到 $12\text{ dB}$ ,如图6所示。

(3) 在换能器未安装障板的 $180^\circ$ 位置,出现了径轴比先增大后减小的变化,当 $D=3\lambda/2$ 时,垂直波束径轴比达到最大值 $22\text{ dB}$ ,如图6所示。

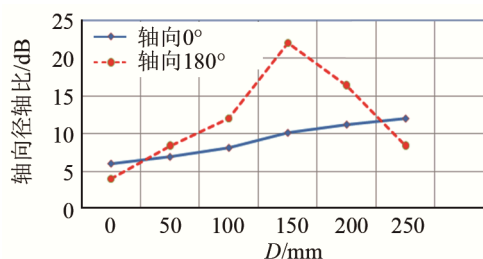


图6 不同直径障板作用下圆柱换能器指向性图的径轴比(蓝线指 $0^\circ$ 轴,红线指 $180^\circ$ 轴)

Fig.6 The ratio of radial to axial level in the directivity pattern of the cylindrical transducer with different baffle diameters (the blue line for the axis of  $0^\circ$  and the red line for the axis of  $180^\circ$ )

## 3 实验测试

依据仿真结果,选取径轴比最佳的障板安装距离 $d=50\text{ mm}$ 和直径 $D=150\text{ mm}$ 进行试验验证,实际制作了厚度 $h=10\text{ mm}$ 的硬质聚氨酯泡沫反声障板,障板表面进行水密封装涂覆处理,涂覆层厚度小于 $0.5\text{ mm}$ ,将障板与圆柱换能器进行组合安装。安装轴向障板的圆柱换能器实物图如图7所示。

在消声水池中利用脉冲法测量了带障板圆柱换能器的指向性曲线,将仿真数据与消声水池的实

测数据进行对比分析,如图8所示。

由图8可知,仿真结果与实际测试结果基本一致,略有不同是由于实际材料参数与仿真模型中使用的材料参数有所差别造成的,另外安装障板的螺杆也会对径轴比的测试数据有一定的影响。通过试验测试,在15 kHz时,在圆柱换能器的轴向 $0^\circ$ 位置安装反声障板,在换能器轴向 $180^\circ$ 的位置获得20 dB的垂直波束径轴比。实测在未安装障板时,15 kHz主波束发射电压响应为138.5 dB;安装障板后为140.6 dB。由此可知,在15 kHz时,障板对轴向波束有较好的抑制效果,且使得主波束发射电压响应略有增加。

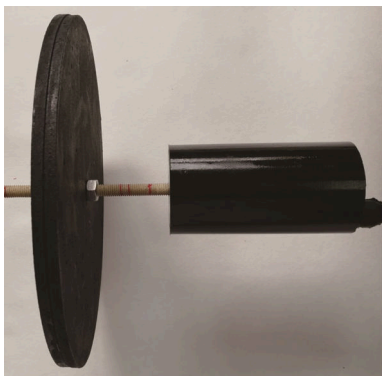


图7 带障板的圆柱换能器实物照片

Fig.7 The picture of the developed cylindrical transducer with baffle

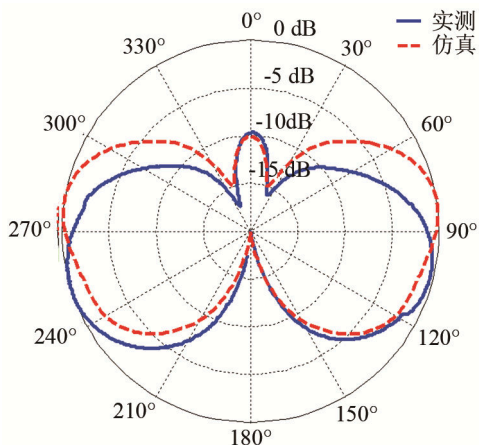


图8 仿真与实测的图7所示换能器在15 kHz的指向性图  
Fig.8 The simulated and measured directivity patterns of the transducer shown in Fig.7 at 15 kHz

## 4 结论

本文对带障板的圆柱换能器进行了仿真计算,探索反声障板到圆柱换能器的距离 $d$ 和障板直径 $D$ 对圆柱换能器垂直波束径轴比的影响规律。仿真结果与实际测试结果基本一致。

依据仿真和实验结论,使用反声系数为0.9的聚氨酯泡沫障板,当障板距离圆柱换能器边缘 $d=50$  mm,障板直径 $D=150$  mm时,在15 kHz频率可以获得20 dB的垂直波束径轴比,且在障板作用下主波束发射电压响应略有增加。

通常在圆柱换能器的轴向安装障板时,认为障板对安装障板的一侧声压有抑制和减弱的效果,然而通过本文的研究分析发现,在圆柱形换能器轴向安装障板的另一侧获得了更好的径轴比,这一发现对工程应用具有重要的参考意义。

## 参 考 文 献

- [1] 王守义. 智能声诱饵第一类边发边收方案及信号处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009: 14-19.  
WANG Shouyi. Intelligent zed acoustic decoy' first Receiving and sending project and processing signal technique[D]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2009: 14-19.
- [2] 吴培荣. 基于边收边发技术的声隔离度研究[J]. 声学技术, 2013, 32(4): 281-285.  
WU Peirong. Research on isolation degree of 'receiving and sending' technique[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(4): 281-285.
- [3] 路德明. 水声换能器原理[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2001, 220.  
LU Deming. Principles of underwater transducer[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 2001, 220.
- [4] 赵锦园, 郝浩琦, 夏铁坚. 发射换能器带障板特性分析[J]. 声学与电子工程, 2012(2): 28-30.  
ZHAO Jinyuan, HAO Haoqi, XIA Tiejian. Analysis of project transducers with baffle plate[J]. Acoustic and electronic engineering, 2012(2): 28-30.
- [5] GUSTAVSSON L. Equipment for torpedo tests[M]. FOI, Stockholm, Sweden.
- [6] 王敏慧, 胡健辉. 圆柱换能器端部无源材料对其垂直波束的影响[C]//2018年全国声学大会, 2018.