

引用格式: 程振阅, 赵荣荣, 马雄超, 等. 二阶镶拼圆管矢量接收换能器研究[J]. 声学技术, 2021, 40(1): 147-150. [CHENG Zhenyue, ZHAO Rongrong, MA Xiongchao, et al. Research on the second order vector receiving transducer composed of a segmented ring[J]. Technical Acoustics, 2021, 40(1): 147-150.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.01.023

# 二阶镶拼圆管矢量接收换能器研究

程振阅, 赵荣荣, 马雄超, 于祥龙

(上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

**摘要:** 文章介绍了一种二阶镶拼圆管矢量接收换能器的设计方法, 获得了类偶极子指向性以及波束宽度更为锐化的类四极子指向性。利用理论计算以及有限元仿真分析了镶拼圆管的指向性以及接收灵敏度, 并实际制作了二阶镶拼圆管矢量接收换能器。在消声水池的测试表明, 灵敏度测试结果与有限元仿真计算结果吻合较好, 镶拼圆管矢量接收换能器类偶极子指向性图-3 dB 波束宽度在 95°左右, 类四极子指向性图-3 dB 波束宽度在 40°左右, 二阶矢量指向性图波束宽度明显比一阶矢量指向性图波束宽度更加锐化。

**关键词:** 矢量接收; 镶拼圆管; 指向性; 灵敏度

中图分类号: TB565.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-01-0147-04

## Research on the second order vector receiving transducer composed of a segmented ring

CHENG Zhenyue, ZHAO Rongrong, MA Xiongchao, YU Xianglong

(Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** A design method for the second order vector receiving transducer composed of a segmented ring is introduced in this paper, which has both the quasi-dipole directivity pattern and the quasi-quadrupole directivity pattern with sharper beam width. The directivity and sensitivity of the segmented ring is analyzed by theoretical calculation and finite element simulation, and the second order vector receiving transducer based on the segmented ring is developed. The tests in an anechoic tank show that the measured sensitivity is in good agreement with the finite element simulation results. The -3 dB beam-widths of the quasi-dipole directivity pattern and the quasi-quadrupole directivity pattern are about 95° and 40° respectively. The beam width of the second order vector directivity pattern is sharper than that of the first order vector directivity pattern.

**Key words:** vector receiving; segmented ring; directivity; sensitivity

## 0 引言

矢量水听器可以同步、共点地获取声场中的标量和矢量信息, 为后续的信号处理拓展了空间, 也为水声探测技术提供了新的思路和方法<sup>[1]</sup>。压差式矢量水听器是矢量水听器中最常见的一种类型, 其原理是通过获取声场中某两点之间的声压差值和距离差值, 然后根据有限差分近似的方法计算得出两点声中心连线中心点处的声压梯度, 进而得到声场的矢量信息<sup>[2-3]</sup>。

矢量水听器的余弦指向性波束宽度较大, 为了解决在同一个波束中的目标分辨问题, 人们提出可

以获得高指向性的二阶矢量水听器<sup>[4]</sup>。通过对径向极化圆管的电极进行分割可以得到二阶矢量水听器, 然而其二阶模态下的灵敏度不高, 在实际应用时受到限制。镶拼圆管采用切向极化的压电陶瓷条粘接而成, 与径向极化的圆管相比, 具有更高的压电转换效率, 因而在用于水声信号的接收时其灵敏度也将得到提高<sup>[5-6]</sup>。

本文将切向极化的镶拼圆管用作接收换能器, 通过对其电极的划分以及压电陶瓷条极化方向的调整, 设计得到了一种高灵敏度的二阶矢量接收换能器。

## 1 二阶镶拼圆管矢量接收换能器设计

二阶镶拼圆管矢量接收换能器的结构示意图如图 1 所示, 镶拼圆管采用 32 片压电陶瓷条粘接而成, 圆管共包括 8 路开路输出电压信号和 1 路接

收稿日期: 2019-11-15; 修回日期: 2019-12-23

作者简介: 程振阅(1994—), 男, 山东滨州人, 硕士研究生, 研究方向为水声换能器与基阵。

通信作者: 程振阅, E-mail: sdchzhy@163.com

地参考电压信号，接地输出信号为 8 个接地电极的并联输出，接地电极将圆管划分为 8 部分，每一部分中的四片压电陶瓷条的极化方向以开路输出信号电极为对称轴对称分布，位于开路输出信号电极与接地电极之间的压电陶瓷条的极化方向相同。8 路开路输出电压信号组合得到矢量接收换能器的一阶以及二阶矢量分量通道，其中，电极 A1 与电极 A2 经过减法器相减后得到镶拼圆管矢量接收换能器  $x$  方向一阶矢量分量；电极 B1 与电极 B2 经过减法器相减后得到镶拼圆管矢量接收换能器  $y$  方向一阶矢量分量；电极 C1 和电极 C3、电极 C2 和电极 C4 两两并联后经过减法器相减输出得到镶拼圆管矢量接收换能器二阶矢量分量。

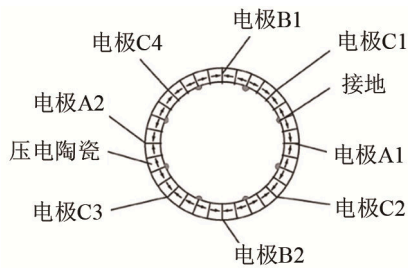


图1 镶拼圆管结构示意图  
Fig.1 Structure diagram of a segmented ring

## 2 理论分析及仿真

本文设计的二阶镶拼圆管矢量接收换能器包含两个一阶分量以及一个二阶分量，指向性以及灵敏度是衡量换能器接收特性的重要指标，下面对设计的接收换能器的指向性进行理论分析，并且对其灵敏度进行有限元计算仿真。

### 2.1 指向性理论分析

在谐和平面波中，若只研究  $xOy$  平面，声压可以表示为

$$p(\mathbf{r}, t) = p_0 e^{j(\omega t - k_0 \cos \theta \cdot x - k_0 \sin \theta \cdot y)} \quad (1)$$

其中： $k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ ，则：

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -jk_0 \cos \theta \cdot p(\mathbf{r}, t) \quad (2a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -jk_0 \sin \theta \cdot p(\mathbf{r}, t) \quad (2b)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y} = (jk_0)^2 \cos \theta \sin \theta \cdot p(\mathbf{r}, t) \quad (2c)$$

所以指向性函数  $D(\theta)$  的各方向分量分别为

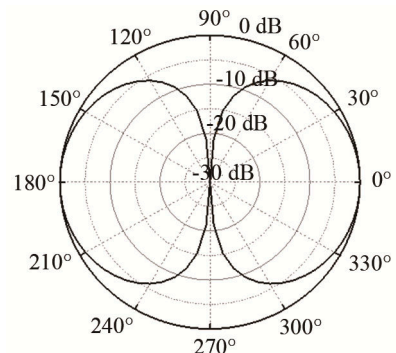
$$\begin{cases} D_x(\theta) = \cos(\theta) \\ D_y(\theta) = \sin(\theta) \\ D_{xy}(\theta) = \cos(\theta) \sin(\theta) \end{cases} \quad (3)$$

矢量接收换能器的两个一阶分量分别对应以上两个一阶偏导(式 2(a)、2(b))，二阶分量对应二阶混合偏导(式 2(c))。

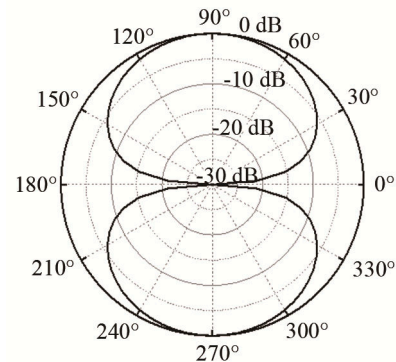
一阶分量对应的  $x$  方向的偶极子指向性如图 2(a)所示，一阶分量对应的  $y$  方向的偶极子指向性如图 2(b)所示，从图中可以看出，偶极子指向性图  $-3 \text{ dB}$  波束宽度为  $90^\circ$ 。二阶分量对应的四极子指向性如图 2(c)所示，其  $-3 \text{ dB}$  波束宽度为  $45^\circ$ ，二阶分量指向性图的  $-3 \text{ dB}$  波束宽度明显比一阶分量指向性图更为锐化。

### 2.2 有限元计算仿真

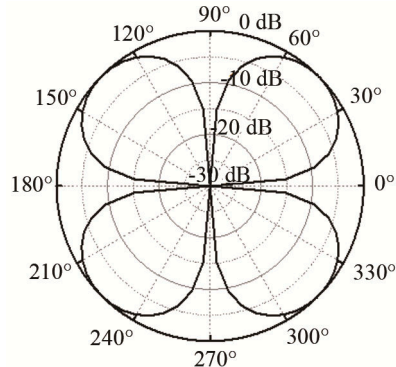
本文采用有限元软件对划分电极后的镶拼圆



(a)  $x$  方向一阶分量



(b)  $y$  方向一阶分量



(c) 二阶分量

图2 矢量接收换能器的理论指向性

Fig.2 Theoretical directivity patterns of the vector receiving transducer

管矢量接收换能器进行整体结构建模仿真分析。在仿真计算中涉及到的压电陶瓷材料选用 PZT-4; 对相同尺寸的径向极化圆管以及切向极化镶拼圆管在 13~19 kHz 频率范围的灵敏度进行仿真计算。

切向极化镶拼圆管以及径向极化圆管的一阶及二阶矢量灵敏度如图 3 所示。从仿真结果可以看出, 在仿真的频率范围内, 切向极化圆管一阶类偶极子灵敏度在 -173 dB 左右, 二阶类四极子灵敏度在 -188 dB 左右, 二阶量比一阶量低 15 dB; 径向极化圆管一阶类偶极子灵敏度在 -185 dB 左右, 二阶类四极子灵敏度在 -200 dB 左右, 二阶量比一阶量低 15 dB。对比仿真结果可知, 切向极化圆管与同样尺寸的径向极化圆管相比, 一阶及二阶矢量灵敏度均提高 12 dB 左右。

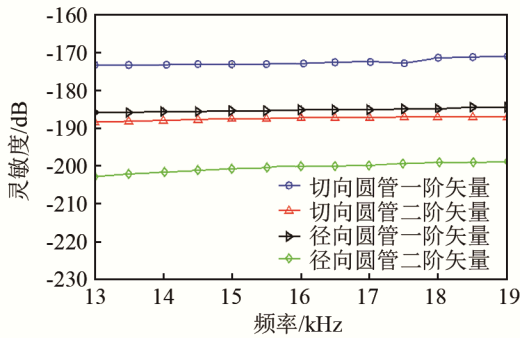


图 3 灵敏度仿真曲线  
Fig.3 The simulated sensitivity curves

### 3 实验测试

按照仿真时的参数设计镶拼圆管, 并进行聚氨酯水密封装处理, 得到的二阶镶拼圆管矢量接收换能器如图 4 所示。



图 4 换能器实物图  
Fig.4 The picture of the developed transducers

在消声水池中利用比较法得到镶拼圆管矢量接收换能器 x 方向与 y 方向的一阶分量以及二阶分量的自由场声压灵敏度曲线, 如图 5 所示。从图 5 可以看出实验测试结果与仿真结果基本吻合。

对二阶镶拼圆管矢量接收换能器在 13、16 kHz 以及 19 kHz 指向性进行测试, 其中 16 kHz 的一阶矢量 x 方向分量、一阶矢量 y 方向分量以及二阶矢

量的指向性图如图 6 所示, 与理论分析的指向性吻合较好。

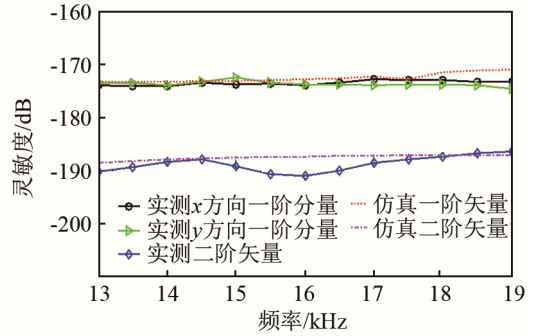
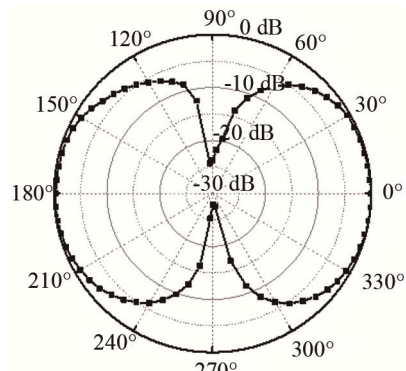
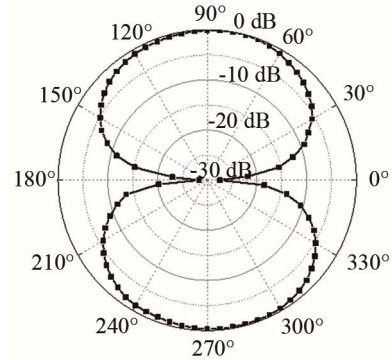


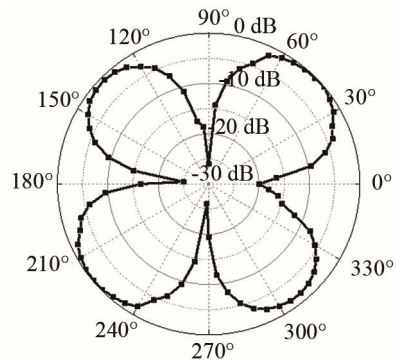
图 5 矢量接收换能器灵敏度仿真与测量曲线  
Fig.5 The simulated and measured sensitivity curves of the vector receiving transducer



(a) x 方向一阶分量



(b) y 方向一阶分量



(c) 二阶分量

图 6 矢量接收换能器实测指向性图  
Fig.6 The measured directivity patterns of vector receiving transducer

二阶镶拼圆管矢量接收换能器各个矢量通道在 13、16 kHz 以及 19 kHz 指向性图-3 dB 波束宽度的测试数据如表 1 所示。

表 1 矢量接收换能器在不同方向和不同频率的-3 dB 波束宽度  
Table 1 The -3 dB beam-widths of the vector receiving transducer in different directions and at different frequencies

频率/kHz	一阶矢量 x 方向 分量 $\theta_{-3\text{dB}}/(\circ)$	一阶矢量 y 方向 分量 $\theta_{-3\text{dB}}/(\circ)$	二阶矢量 $\theta_{-3\text{dB}}/(\circ)$
13	95	98	38
16	90	96	43
19	96	98	40

从表 1 中看出, 在测试频率范围内, 一阶矢量类偶极子指向性-3 dB 波束宽度在  $95^\circ$  左右, 二阶矢量指向性图-3 dB 波束宽度在  $40^\circ$  左右, 二阶矢量指向性图波束宽度明显比一阶矢量指向性图波束宽度更加锐化。镶拼圆管矢量接收换能器类偶极子指向性和类四极子指向性-3 dB 波束宽度的实际测试结果与指向性理论分析时的结果存在一定的误差, 这是由于理论分析时将接收换能器视为点接收器, 没有考虑到镶拼圆管实际尺寸和结构的影响。

## 4 结 论

本文通过对镶拼圆管中电极的划分以及压电陶瓷条极化方向分布的调整, 设计得到一种二阶矢量接收换能器。对其指向性进行理论分析, 并对其灵敏度进行仿真, 最后制作换能器样机进行测试, 得到的实际测试结果与仿真结果基本一致。

根据仿真以及实验测试的数据, 设计的二阶镶

拼圆管矢量接收换能器一阶矢量灵敏度在  $-173\text{ dB}$  左右, 二阶矢量灵敏度约  $-188\text{ dB}$ , 其一阶矢量与二阶矢量灵敏度与径向极化圆管相比均得到提高; 镶拼圆管矢量接收换能器二阶矢量指向性图波束宽度明显比一阶矢量指向性图波束宽度更加锐化。

本文通过仿真及实验测试证明了镶拼圆管用于矢量接收的可行性。镶拼圆管矢量接收换能器与径向极化分割电极的矢量接收换能器相比, 灵敏度得到了提高, 电极划分更灵活, 可以满足更加广泛的工程应用需求。

## 参 考 文 献

- [1] 孙贵青, 李启虎. 声矢量传感器研究进展[J]. 声学学报, 2004, 29(6): 481-490.  
SUN Guiqing, LI Qihu. Progress of study on acoustic vector sensor[J]. Acta Acustica, 2004, 29(6): 481-490.
- [2] GABRIELSON T B, GARDNER D L, GARRETT S L. A simple neutrally buoyant sensor for direct measurement of particle velocity and intensity in water[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1995, 97(4): 2227-2237.
- [3] 陈洪娟. 矢量传感器[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2006: 32-50.  
CHEN Hongjuan. Vector sensors[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2006: 32-50.
- [4] 刘爽. 零阶及一二阶组合水听器设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008: 11-55.  
LIU Shuang. The design of first and second order combined sensors[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008: 11-55.
- [5] 路德明. 水声换能器原理[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2001.
- [6] 滕舵, 王龔, 解柯柯. 基于切向极化薄壁压电圆管的水听器研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 30-34, 125.  
TENG Duo, WANG Yan, XIE Keke. Research on the tangential polarized thin shell piezoelectric cylindrical tube hydrophone[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 46(3): 30-34, 125.