

# 一种带障板宽波束宽带纵振动换能器

唐少波<sup>1</sup>, 赵荣荣<sup>2</sup>, 田辉<sup>1</sup>, 欧阳荀<sup>1</sup>, 赵慧<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:** 介绍了一种带障板宽波束宽带纵振动换能器。通过将纵振动换能器的纵振动模态和前盖板弯曲振动模态有效耦合来达到拓宽换能器工作频带的目的; 并提出利用反声障板边界结构大幅度增大发射波束宽度的方法。利用有限元软件分析了其在水中的特性。分析结果表明, 通过纵弯模态耦合方式可有效拓宽换能器的频带宽度; 通过障板在纵振动换能器中的应用可有效调节纵振动换能器的波束特性, 从而实现宽波束的目的。实际制作该换能器并测试了其在不同情况下的性能, 测试结果表明: 有限元分析结果跟实验测量结果吻合。在 9.5~18 kHz 的频率范围内实现了发送电压响应起伏不超过 3 dB 的宽带工作; 在 11、12、13、14 kHz, 实现了 120°~160°的宽波束。

**关键词:** 宽带; 宽波束; 障板; 纵振动换能器

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-02-0184-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.02.019

## A kind of wide-beam broad-band longitudinal vibration transducer with a baffle plate

TANG Shao-bo<sup>1</sup>, ZHAO Rong-rong<sup>2</sup>, TIAN Hui<sup>1</sup>, OUYANG Xun<sup>1</sup>, ZHAO Hui<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, a kind of wide-beam broad-band longitudinal vibration transducers with a baffle plate is introduced. By the effective coupling of the longitudinal mode caused by the whole transducer and the flexural mode caused by the head mass, the transducer shows a broad-band performance. Furthermore, the conception of utilizing baffle plate boundary structure to realize the wide-beam of the transducer is put forward. On the basis of FEM software, the transducer electro-acoustic capability is analyzed. The FEM analysis result indicates that the band-width is effectively extended by using the two modes coupling method and the directivity of the transducer can be controlled by adjusting the distance between the baffle plate and the radiating head mass, so that it shows a wide-beam performance. The transducer is manufactured and measured in different conditions. From the experiment result, the fluctuation of the transmitting voltage response of the transducer in the operation frequency band does not exceed 3 dB. At the frequencies of 11kHz, 12kHz, 13kHz, and 14kHz, the -3dB beam-width of the transducer reaches 130~160 degree.

**Key words:** broad-band; wide-beam; baffleplate; longitudinal transducer

## 0 引言

纵振动换能器是水声领域比较常见的换能器类型之一, 因其具有结构简单、性能稳定、布阵方便等优点而被广泛采用, 单振动模态纵振动换能器频带宽度一般较窄。多模耦合是拓宽纵振动换能器频带宽度的有效方法, 在工程设计上常采用一些措施来产生多个振动模态以拓宽换能器工作频带, 如双激励源、前盖板上增加匹配层、纵向振动模态与前盖板弯曲振动模态耦合等。

指向性是水声换能器的一个重要指标。不同的使用场合换能器指向性的要求也不一样。当需要精准定位时, 要求指向性较为尖锐; 而当用来探测或者预警时, 则希望各角度的响应起伏不要太大, 在波束扫描时不出现死角, 此时我们就需要宽波束的换能器。

纵振动换能器存在的另外一个问题就是波束宽度一般较窄, 在宽波束扫描时往往受到限制。有科研人员通过改变辐射头的形状<sup>[1]</sup>, 巧妙利用后盖板的振动<sup>[2]</sup>等方法来拓宽纵振动换能器的波束宽度。高峰等通过障板来改善圆管换能器的指向性<sup>[3]</sup>, 但是通过障板来改善纵振动换能器的指向性的问题还鲜有人涉及。

本文根据研究现状, 拟通过在纵振动换能器中

收稿日期: 2012-12-14; 修回日期: 2013-03-18

作者简介: 唐少波(1987-), 男, 河南平顶山人, 研究生, 研究方向为水声换能器与基阵。

通讯作者: 唐少波, E-mail: tangshaobo@gmail.com

采用纵弯模态耦合和反声障板边界结构的方法来达到宽带和宽波束的目的。

### 1 带障板纵振动换能器结构设计

图 1 为设计的带障板换能器的剖面图，其由六部分组成，分别是类圆台前盖板、压电陶瓷堆、预应力螺杆、后盖板、刚性水密外壳以及障板。前盖板采用硬铝材料，而后盖板采用 45# 钢材料。压电陶瓷采用 PZT4，螺杆采用不锈钢材料。障板采用声阻抗与水相差较大的材料以起到较好的反声效果，由于刚性障板一般比较笨重，选软障板较为常见，最终达到调节方向性的目的，具体设计中障板的取材要综合耐压以及换能器重量等要求，合理选取。

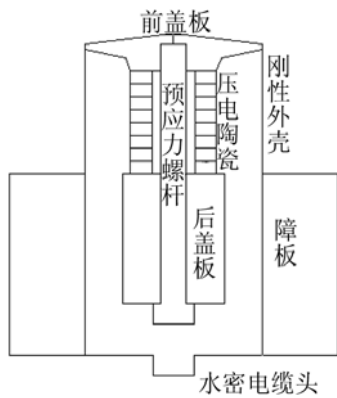


图 1 带障板换能器结构模型  
Fig.1 The structure model of the transducer with baffleplate

为了获得纵振动换能器大的前后盖板振速比，前盖板采用轻金属，后盖板采用重金属。在换能器中间位置附近存在一个纵振动的节点，根据动量守恒定律，节点两端的动量相等，所以对于前后盖板来说，速度与质量成反比，轻金属表面的质点振动位移大，将辐射出大部分能量。压电陶瓷晶堆由压电陶瓷片在机械上串连，电路上并联叠堆而成，便于获得高的发送电压响应；陶瓷片间夹有薄铜片作为焊接电极引线用，其间用环氧粘接，以实现良好的振动传递。前盖板采用类薄圆台并开槽结构以便得到较低的弯曲振动频率。后面反声障板用于调节方向性，以得到较大的波束宽度。

### 2 不带障板换能器有限元分析

采用 ANSYS 软件对换能器进行有限元分析。用有限元法模拟一个自由场水域，在其中建立换能器有限元模型。在前盖板正前方的远场单元中选取一点，提取声压可计算出该换能器的发送电压响

应，在远场单元中以换能器声中心为圆心取一条圆形路径作路径操作可得出换能器的指向性。

基于所设计换能器样机的轴对称特性，本文建立了该换能器的二维轴对称有限元模型。建模时忽略了透声聚氨酯橡胶、电极片，同时也忽略了水密外壳，用流体介质的刚性界面边界条件代替<sup>[4,5]</sup>。

为了获得较宽的工作频带，需同时激起换能器整体结构的纵振动模态和前盖板的弯曲振动模态，单一激起一种模态较为简单，关键是实现这两阶模态的耦合振动从而达到拓宽频带的目的，因此一阶纵振动的谐振频率与前盖板弯曲振动的谐振频率既不能靠得太近也不能离得太远。

本文根据换能器的频带要求初步选定压电晶堆的长度后，通过调节前盖板的外形尺寸以及微调压电晶堆的长度，使换能器整体结构的纵向振动模态与前盖板的弯曲振动模态很好地耦合，从而拓宽换能器的带宽。

对于无障板换能器，有限元分析后得到换能器的导纳和发送电压响应曲线如图 2 和图 3 所示，从图中可以看出，换能器整体的纵向振动模态与前盖板弯曲模态耦合较好，在导纳和发送电压响应上都实现了宽带。发送电压响应-3 dB 频带宽度约为

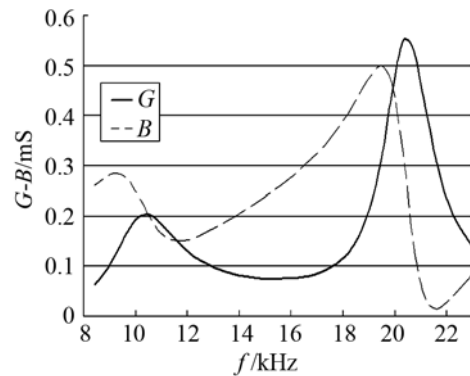


图 2 换能器水中导纳曲线  
Fig.2 Transducer admittance in water

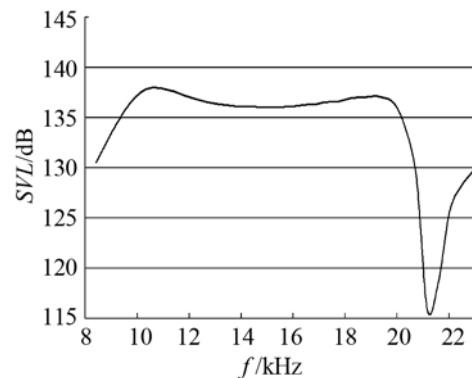


图 3 换能器发送电压响应级 (Re. 1 $\mu$ Pa·m/V)  
Fig.3 The transmitting voltage response of the transducer (Re. 1 $\mu$ Pa·m/V)

10~21kHz, 发送电压响应值稳定在 137 dB 左右。

通过声场分析, 得到不带障板情况下换能器的指向性。在 11~14 kHz 的频带范围内, -3 dB 波束宽度为 80°~110°。

### 3 带障板换能器有限元分析

使用一种低阻抗反声材料, 制作中间带有圆柱通道的圆柱体, 将换能器嵌入圆柱通道内。通过在水平方向调节障板的半径; 在垂直方向改变换能器前盖板辐射面与障板反声面的距离来调节换能器的指向性。

带障板换能器的声场较复杂, 其远场声压由两部分组成, 一部分是直达波, 另一部分是通过反声障板反射后到达。反射发生在换能器辐射声场的近场区域, 射线声学不适用, 因此采用有限元法进行分析。

仿真结果表明, 在合适的障板与换能器布置情况下, 该换能器在 11、12、13、14kHz 时, 波束宽度分别达到了 122°、141°、159°、163°, 实现了较宽的波束。图 4 所示为该障板布置情况下不同频点的极坐标指向性曲线(90°方向为换能器主轴方向, 声压级经归一化处理, 取声压极大值为 0dB)。图 5 为发送电压响应曲线。

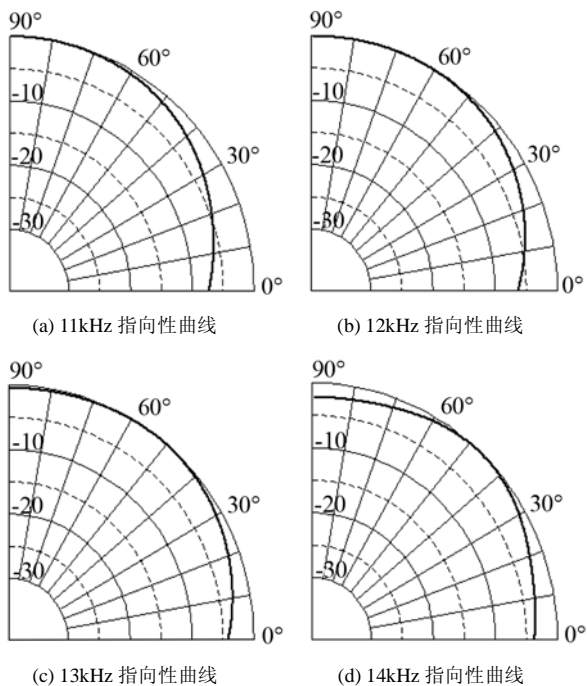


图 4 不同频率下换能器的指向性曲线仿真结果

Fig.4 The transducer directivity at different frequencies by FEM analysis

由图 5 发送电压响应曲线跟图 3 的发送电压响应曲线对比发现, 在波束宽度稳定变化的情况下,

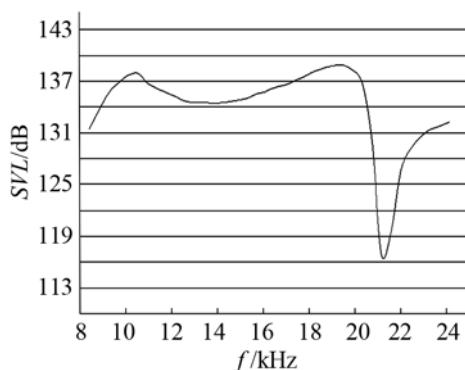


图 5 带障板换能器发射电压响应级仿真结果(Re. 1μPa·m/V)  
Fig.5 The transmitting voltage response of the transducer with a baffle plate by FEM analysis(Re. 1μPa·m/V)

该换能器依然能实现宽带工作。

通过大量的仿真我们得到以下的规律:

- (1) 带障板换能器的辐射声场是换能器直达声场和障板反射声场的叠加声场, 声场极大值方向不一定是换能器的主轴方向;
- (2) 在反声障板距离辐射面的垂直距离在 1/4~1/2 波长时, 波束开角较大;
- (3) 宽带换能器在加障板之后, 若在频段内波束开角稳定增大的情况下, 宽带换能器依然能实现宽带, 且在波束开角增大的频点响应值相应降低;
- (4) 障板对换能器的波束开角和发射电压响应同时产生影响, 实际应用时需综合考虑。

### 4 换能器样品研制和参数测试

根据上述技术设计, 实际装配并水密后的带障板换能器如图 6 所示。

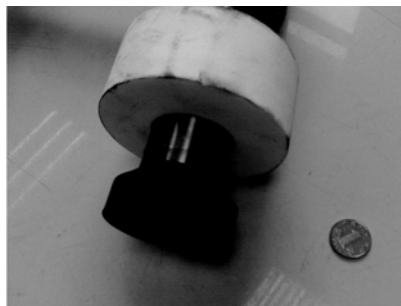


图 6 带障板换能器

Fig.6 The prototype transducer with a baffle plate

#### 4.1 不带障板换能器实测结果

图 7 和图 8 是不带障板换能器的导纳曲线和发送电压响应曲线。

从图 7 和图 8 可以看出, 不带障板换能器的导纳曲线与仿真计算结果吻合较好。发射电压响应-3 dB 带宽在 9.5~18kHz, 而发射电压响应较仿真计算

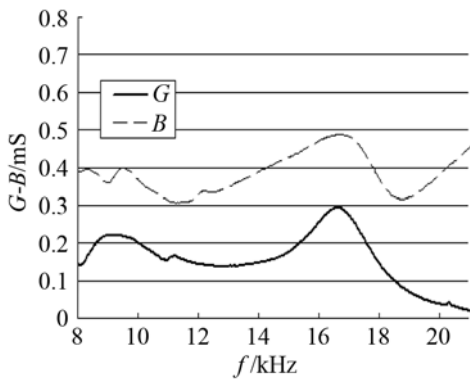


图 7 不带障板换能器导纳曲线

Fig.7 The admittance of transducer without a baffleplate

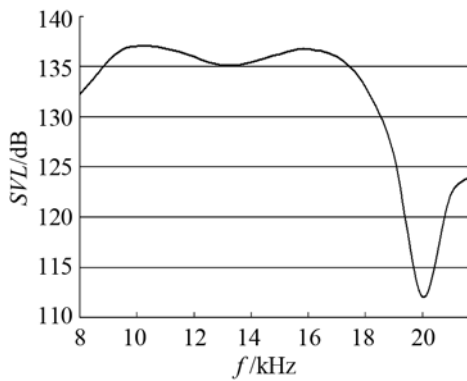


图 8 不带障板换能器发送电压响应曲线(Re. 1μPa·m/V)

Fig.8 The transmitting voltage response of transducer without a baffleplate(Re. 1μPa·m/V)

结果整体降低大约 1 dB。考虑造成此问题的主要原因是建模时忽略了前盖板上所覆盖的水密弹性透声材料，而弹性透声材料的阻尼效应以及对前盖板弯曲振动绝对自由边界的影响是造成响应值降低以及弯曲振动频率仿真不准的主要原因。

#### 4.2 带障板换能器实测结果

图 9 为带障板换能器发送电压响应与不带障板换能器的发送电压响应对比。

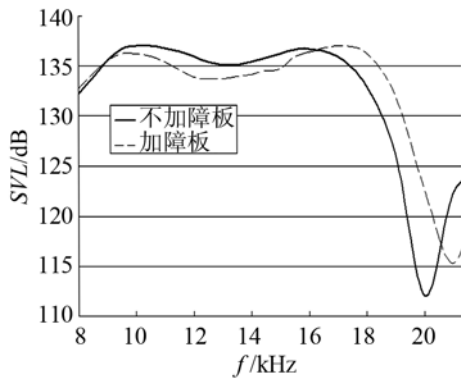


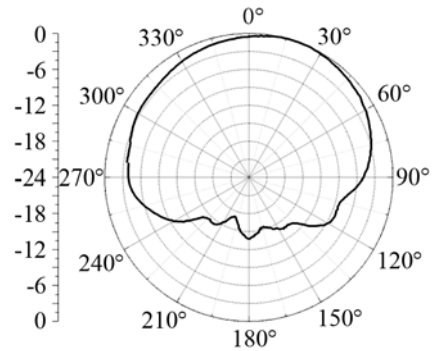
图 9 带障板换能器与不带障板换能器发送电压响应曲线对比 (Re. 1μPa·m/V)

Fig.9 The comparison of transmitting voltage response between the transducers with and without a baffle plate (Re. 1μPa·m/V)

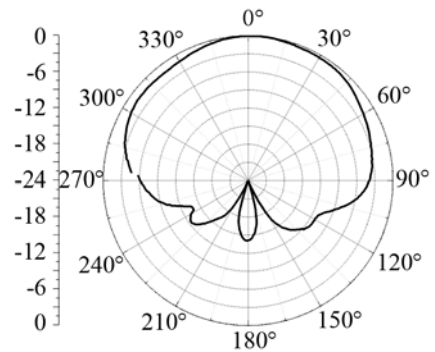
由图 9 可以看出，带障板换能器的发送电压响应在带宽内的较低频段较不带障板换能器明显降低，而在带宽内的较高频段较不带障板换能器增大。造成此问题的主要原因是由于障板对换能器辐射方向性的影响，在辐射波束开角增大的地方由于能量的扩散造成响应值的降低，而在辐射波束开角减小的地方由于能量的集中而造成了响应值的相应增大。

图 10 为带障板换能器在某障板布置情况下的归一化指向性曲线，左边对应标尺的单位为 dB。

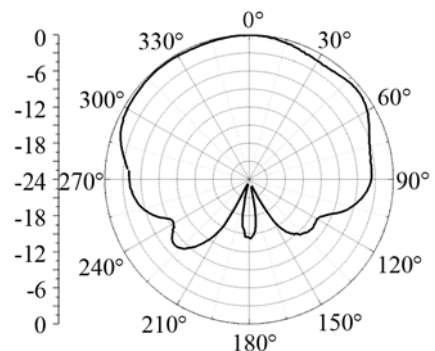
如图 10 所示，设计的带障板换能器的波束开角在 11、12、13、14kHz 分别达到 144°、154°、155°、135°，实现了较大的波束开角。



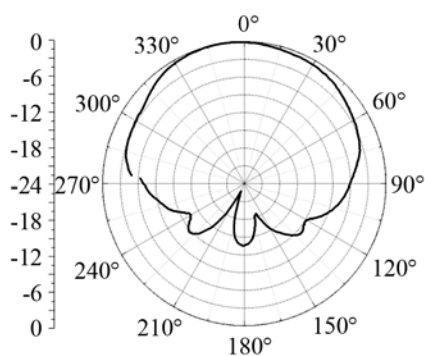
(a) 11kHz 指向性曲线



(b) 12kHz 指向性曲线



(c) 13kHz 指向性曲线



(d) 14kHz 指向性曲线

图 10 不同频率下换能器的实测指向性曲线

Fig.10 The directivity of the transducer with a baffle plate at different frequencies

研究发现障板对换能器方向性的影响与频率密切相关。在特定的障板与换能器布置情况下,只能使换能器在特定的频带宽度内实现宽波束,而在其它的频带范围内,发射波束并无明显的改善甚至有减小。如在本文的障板与换能器布置情况下,在11~14 kHz 范围内实现了120°以上的波束开角,而在15~19 kHz 的频率范围内,发射波束开角无明显的增大,甚至有减小。工程应用中,还要根据所使用的频段范围以及所要求的波束开角情况来确定合适的换能器与障板布置,来实现满意的波束开角。

## 5 结论

本文设计了一种宽带的纵振动换能器,提出并

实现了利用声障板边界结构大幅度增大发射波束开角的方法。有限元软件分析和实际测量结果表明:

(1) 利用纵振动换能器的纵弯模态耦合能有效拓宽换能器的频带宽度;

(2) 通过障板的使用可有效调节换能器的方向性,达到大幅度增大波束宽度的目的。

(3) 障板在调节换能器波束开角的同时也会影响换能器的发送电压响应,两者之间的合理配合需进一步的研究。

## 参 考 文 献

- [1] 莫喜平,刘永平,崔政,等. 宽带宽波束纵向水声换能器研究[J]. 应用声学, 2006, 25(5): 270-272.  
MO Xiping, LIU Yongping, CUI Zheng, et al. A broadband and wide-beam longitudinal underwater transducer[J]. Applied Acoustic, 2006, 25(5): 270-272.
- [2] 郝浩琦. 宽带宽波束纵振换能器设计[J]. 声学技术, 2010, 29(4): 421-424.  
HAO Haoqi. Design of Broadband and wide-beam Tonpliz Transducer[J]. Technical Acoustics, 2010, 29(4): 421-424.
- [3] 高峰,孙钟富. 一种大开角指向性换能器[J]. 舰船科学技术, 2003, 25(6): 59-60.  
GAO Feng, SUN Zhongfu. One projector of great direction[J]. Ship science and technology, 2003, 25(6): 59-60.
- [4] 莫喜平. 用 ANSYS 有限元软件模拟分析声学换能器[R]. 中国科学院声学研究所, 2004: 18-36.  
MO Xiping. Analyzing the acoustic transducer by using the ANSYS software[R]. Institute of acoustic, Chinese Academy of Sciences, 2004: 18-36.
- [5] John L Butler, Alexander L butler. Ultra wideband multiple resonant transducer[C]// Oceans 2003 Proceedings, 2003, 5: 2381-2387.

## 国内噪声与振动控制第五届企业家沙龙已举行

2014年4月11日~13日,中国环保产业协会噪声与振动控制委员会第五届企业家沙龙在江苏昆山周庄云海度假村举行,来自国内噪声与振动控制骨干企业的20余名老总们聚集一堂,秉承“交流、合作、共同发展”的永恒主题,畅叙“新形势下噪声与振动控制行业如何持续发展”的情景。中国环保产业协会、上海市环保局领导以及本领域的专家也参加了座谈。企业家沙龙从2010年开始每年一届,首届在上海,第二届在深圳,第三届在成都,第四届在北京,本次第五届由上海新华净环保工程有限公司王兵总经理任轮值主席。企业家沙龙是新形势下同行们通过对热门内容的讨论,交流经验,沟通信息,增强企业家之间的了解和互信,形成行业共识,对企业合作、有序竞争和本行业健康发展起到了积极的促进作用。下一届企业家沙龙拟在大连举行。