

二维声学黑洞结构高灵敏度水听器

朱浩¹⁾²⁾ 李俊宝^{1)†} 葛晓辉¹⁾²⁾ 李德鹏¹⁾

1) (中国科学院声学研究所, 海洋声学技术实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院大学物理学院, 北京 100049)

(2025年6月9日收到; 2025年7月27日收到修改稿)

针对目前水下微弱信号探测对水听器高灵敏度的需求, 提出一种声学黑洞结构形式的高灵敏度水听器. 从几何声学出发, 将声学黑洞中弯曲波汇聚特性类比为水声学中声线弯曲, 提出一种波聚集特性简化理论. 基于该特性设计了一种二维声学黑洞水听器, 通过在弯曲式水听器中引入二维声学黑洞结构, 实现振动聚集, 进而提升水听器的高灵敏度性能. 通过结构控制变量, 对比分析4种厚度形式板, 验证了声学黑洞板在1.7—5.8 kHz频段内提高水听器接收灵敏度的显著优势. 分析了声学黑洞结构水听器接收灵敏度起伏较大的原因, 并进一步设计了声学黑洞与单端开口 Helmholtz 液腔耦合水听器, 将前两阶声学黑洞弯曲振动模态与液腔模态耦合实现宽带接收特性. 制作了两种水听器样机并在消声水池中进行测试. 结果表明, 二维声学黑洞水听器通过弯曲振动聚集效应可有效提高水听器接收灵敏度, 并与液腔结构通过多模态耦合形成宽带, 在2.6—5.3 kHz频段内灵敏度最高可达-169 dB, 起伏控制在8 dB以内.

关键词: 水听器, 二维声学黑洞, 高灵敏度, 模态耦合**PACS:** 43.30.+m, 43.58.+z, 43.40.+s**DOI:** 10.7498/aps.74.20250741**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250741

1 引言

水听器是感应水声信号并转换为电压信号输出的仪器, 是水声探测技术的重要组成部分. 接收灵敏度是水听器最重要的指标之一, 在海洋远距离探测与通信应用中, 水听器必须有较高的灵敏度以满足微弱声信号的探测需求. 当前主流的水听器按传感原理主要分为光纤式与压电式两类: 前者利用光纤中激光的强度、波长和相位等特性对声压进行感知, 凭借其超高灵敏度在微弱信号探测中展现出显著优势^[1,2]; 而压电水听器依赖压电材料机电转换特性, 因结构简单、工艺成熟且成本可控, 在水声探测领域已经展开了广泛的应用, 但其接收灵敏度性能相较于光纤水听器仍有较大差距. 面向深远海高精度探测需求, 如何实现压电水听器灵敏度的突破性提升, 已成为亟待攻克的关键研究方向. 目

前国内外对于提高压电水听器灵敏度性能的研究主要集中在选择高灵敏度功能材料和优化换能器结构设计两大方面. 材料方面除了传统的压电陶瓷, 新型材料如高分子聚合物材料^[3]、弛豫铁电单晶材料^[4]和压电复合材料^[5]等用作敏感元件制成的水听器, 也已经取得了不同程度的发展, 但这些材料均存在成本高、制作难度大等缺陷, 工艺成熟、成本低、性能稳定的压电陶瓷作为敏感元件材料仍是最常见的选择^[6]. 结构设计方面, 一般通过设计增敏结构, 利用其模态振动实现灵敏度的提升. 比如三叠片^[7]、钹型^[8]、液腔^[9]等结构形式的水听器, 可在谐振频率附近达到较高的接收灵敏度, 但接收响应曲线起伏较大, 只能获得较窄的带宽. 李世平等^[10]设计了一种复合液腔水听器, 将两个液腔模态与压电圆管径向谐振模态耦合工作实现宽带接收, 但在工作频段内接收灵敏度平均值并未取得较大的突破, 且响应起伏仍较大.

† 通信作者. E-mail: lij@mail.ioa.ac.cn

近年来声学黑洞 (acoustic black hole, ABH) 结构因其特殊的波聚集特性在声学及振动领域展开了广泛的研究. ABH 效应是通过调整结构的厚度变化规律, 使弯曲波在结构中的传播速度逐渐减小, 理想情况下波速减小至零而不发生反射的现象, 这种现象可以将弯曲波聚集在特定的位置, 实现波捕获与能量聚集^[11,12]. 在实际应用中, ABH 结构具有截断厚度, 但其能量聚集现象依然存在. Huang 等^[13] 基于非完美的二维 ABH 模型提出了弯曲波射线方程的数值积分格式, 可将其用于预测 ABH 压痕中弯曲波的射线轨迹. 但其推导较为复杂且计算量大, 目前 ABH 的波聚集特性仍缺乏一种简单普适的理论解释.

在 ABH 结构的应用方面, 其特殊的波聚集特性以及结构简单等特点已经在振动噪声控制^[14,15]、能量回收^[16,17] 等领域取得了广泛的应用. 此外, 利用 ABH 在谐振频率处较高的位移响应, 研究人员在换能器领域也取得了一些成果. 刘洋等^[18] 将一维环形 ABH 结构与夹心式圆环换能器复合在一起, 有效提高了换能器机电转换性能和声辐射能力. Chen 等^[19] 提出一种 ABH 超声手术刀, 利用其在单频点的高声辐射性能实现高效的手术切割和止血. 王怡等^[20] 提出将一维 ABH 结构作为纵振动换能器的辐射板, 利用该变厚度板不同位置声辐射能力的不同构造多功能声场, 可实现粒子筛选. 以上研究表明 ABH 可作为一种新型结构形式提升声学换能器性能, 但上述换能器的相关研究均聚焦于空气中的超声振动系统, 且均为单频点声辐射性能的提升, 在水声换能器研究领域尚未存在相关报道.

本文从几何声学原理出发, 将 ABH 结构的弯曲波汇聚特性类比为水声学中声线弯曲, 提出一种适用于二维 ABH 结构的波聚集特性简化理论. 基于该特性设计了一种二维 ABH 水听器, 通过有限元仿真对二维 ABH 水听器提高接收灵敏度的能力进行了验证. 并进一步设计了 ABH 与单端开口 Helmholtz 液腔耦合水听器, 将前两阶 ABH 弯曲振动模态与液腔模态耦合工作以实现宽带接收. 加工了两种水听器样机, 并在消声水池中进行接收灵敏度测试. 将实测结果与有限元仿真结果进行对比, 验证两种水听器的接收性能. 证明了二维 ABH 水听器通过弯曲振动聚集效应可有效提高水听器接收灵敏度, 并与液腔结构通过多模态耦合实现宽

带接收, 为 ABH 结构在水声换能器的应用建立了较好的研究基础.

2 二维 ABH 波聚集简化理论与验证

2.1 ABH 效应与二维 ABH 波聚集简化理论

ABH 效应是在一维厚度变化的均匀介质中推导而得, 由变厚度梁结构的弯曲振动方程和几何声学近似方法可得局部弯曲波数表达式为^[12]

$$k_a(x) = \left[\frac{12(1-\sigma^2)\rho}{E} \right]^{1/4} \left[\frac{\omega}{h(x)} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

其中, ρ , E , σ 分别为材料的密度、杨氏模量、泊松比, ω 为角频率, $h(x)$ 为梁的局部厚度. 由 (1) 式可得弯曲波群速度表达式:

$$c_g = \frac{\partial \omega}{\partial k_a} = 2 \left[\frac{E}{12(1-\sigma^2)\rho} \right]^{1/4} \omega^{1/2} [h(x)]^{1/2}. \quad (2)$$

由 (2) 式可知随着结构厚度的减小, 弯曲波速逐渐减小. 当梁厚度以幂律形式变化时, 即 $h(x) = \varepsilon x^m$, 截面如图 1(a) 所示, 弯曲波在该梁上从 x_0 传播到 x_1 位置所需时间为

$$T = \int_{x_0}^{x_1} \frac{dx}{c_g} = \frac{1}{2} \left[\frac{E}{12(1-\sigma^2)\rho} \right]^{-1/4} \omega^{-1/2} \varepsilon^{-1/2} \times \int_{x_0}^{x_1} x^{-m/2} dx. \quad (3)$$

由积分表达式可知, 当幂次 $m \geq 2$ 且 $x_1 \rightarrow 0$ 时, $T \rightarrow \infty$, 即弯曲波永远传播不到 x_1 位置, 也就不会发生反射, 因此弯曲波能量被聚集在结构的边缘, 即产生了黑洞效应, 这种变厚度形式的梁称为一维 ABH 结构.

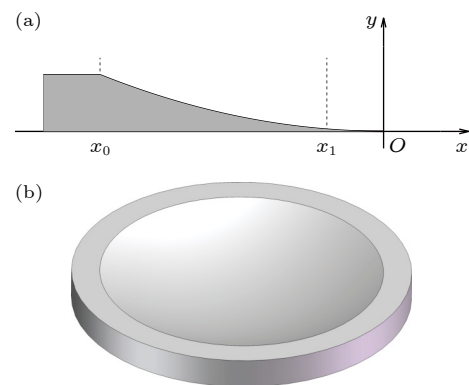


图 1 (a) 厚度呈幂律形式变化的梁横截面; (b) 二维 ABH 结构

Fig. 1. (a) Cross-section of a beam with power-law thickness variation; (b) 2D ABH structure.

将一维 ABH 结构的截面绕纵轴旋转一周即形成二维 ABH 结构, 如图 1(b) 所示, 其是一种呈中心对称的变厚度薄板结构. 对于局部厚度为 $h(x, y)$ 的薄板, 考虑简谐振动 $w = w(x, y) e^{i\omega t}$, 在稳态时, 变厚度薄板弯曲振动方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[D(x, y) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sigma \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right] \\ & + 2(1 - \sigma) \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[D(x, y) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right] \\ & + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[D(x, y) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \sigma \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \right] \\ & - \omega^2 \rho h(x, y) w = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

其中, 结构在 (x, y) 处的局部弯曲刚度为

$$D(x, y) = \frac{Eh^3(x, y)}{12(1 - \sigma^2)},$$

$w(x, y)$ 为板的横向位移. 根据几何声学近似方法, (4) 式的位移解可表示为如下形式:

$$w(x, y) = A(x, y) e^{i\phi(x, y)} = A(x, y) e^{ik_R \varphi(x, y)}, \quad (5)$$

其中 k_R 为均匀部分波数, 与位置无关; $A(x, y)$, $\varphi(x, y)$ 和 $\phi(x, y)$ 分别表示缓慢变化的幅度、程函以及累积相位. 将 $w(x, y)$ 和 $D(x, y)$ 的表达式代入 (4) 式中, 要使得等式成立, 需要等式左边的实部和虚部均等于零, 令实部为零并且忽略关于 $A(x, y)$ 和 $\varphi(x, y)$ 的高阶导数项, 即可得到弯曲波程函方程与局部弯曲波数表达式^[21]:

$$[\nabla \varphi(x, y)]^4 = \frac{k_a^4(x, y)}{k_R^4} = n^4(x, y), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} k_a(x, y) &= \left[\frac{\omega^2 \rho}{ah^2(x, y)} \right]^{1/4} \\ &= \left[\frac{12(1 - \sigma^2)\rho}{E} \right]^{1/4} \left[\frac{\omega}{h(x, y)} \right]^{1/2}, \end{aligned} \quad (7)$$

$n(x, y)$ 表示与位置相关的折射率. 可见二维 ABH 局部弯曲波数表达式与一维 ABH 相同, 只是将变厚度 $h(x)$ 换为 $h(x, y)$, 那么波速表达式也相同, 一维 ABH 效应在二维结构中仍然成立.

对于位移解 (5), 由于 k_R 是常数, 当在某些空间位置 (x, y) 上, $\varphi(x, y)$ 取同一数值时, 这些点就组成了位移解的等相位面. 程函梯度 $\nabla \varphi(x, y)$ 表示弯曲波轨迹方向, 处处与等相位面垂直. 水声学中通过相同的几何声学近似, 根据折射率与程函梯度的关系, 在直角坐标系下推导了声线弯曲规律^[22].

本文考虑的二维 ABH 结构的厚度只与半径 r 有关, 类比水声学中声线弯曲, 在极坐标系下推导弯曲波的传播规律. 在极坐标系中,

$$\nabla \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \mathbf{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \mathbf{e}_\theta,$$

其中 \mathbf{e}_r 与 \mathbf{e}_θ 分别表示径向和周向的单位向量. 根据 (6) 式以及程函梯度表达式可知, 在极坐标系中折射率与程函梯度的关系写为

$$n = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right)^2}. \quad (8)$$

设弯曲波轨迹方向与其径向和周向分量的夹角分别为 α 和 β , 其余弦值分别为 $\cos \alpha$ 和 $\cos \beta$, 那么有

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = n \cos \alpha \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = rn \cos \beta \end{cases} \quad (9)$$

此外, 从图 2 所示的弯曲波轨迹微元几何关系可见, 弯曲波轨迹方向与其径向和周向分量的夹角余弦值也可近似表示为 $\cos \alpha = dr/ds$ 和 $\cos \beta = rd\theta/ds$, 这里 $ds = \sqrt{(dr)^2 + (rd\theta)^2}$ 表示弯曲波轨迹微元.

(9) 式左端对 s 求导可得

$$\begin{cases} \frac{d}{ds} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \frac{dr}{ds} + \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{ds} \right) \\ = \frac{\partial}{\partial r} \left(n \cos \alpha \cos \alpha + rn \cos \beta \frac{\cos \beta}{r} \right) = \frac{\partial n}{\partial r}, \\ \frac{d}{ds} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \frac{dr}{ds} + \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{ds} \right) \\ = \frac{\partial}{\partial \theta} \left(n \cos \alpha \cos \alpha + rn \cos \beta \frac{\cos \beta}{r} \right) = \frac{\partial n}{\partial \theta}. \end{cases} \quad (10)$$

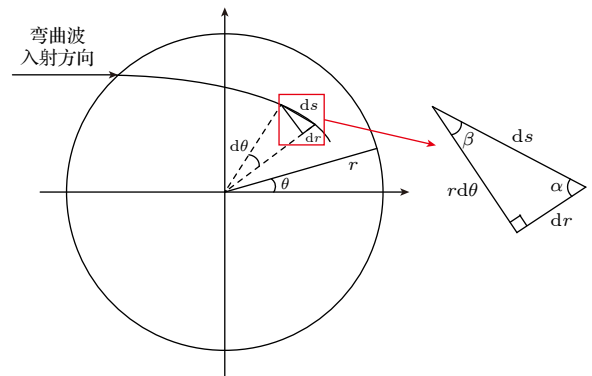


图 2 极坐标系中弯曲波轨迹微元几何关系

Fig. 2. Geometric relationship of an infinitesimal element along the bending wave trajectory in the polar coordinate system.

联立 (9) 式和 (10) 式, 可得

$$\begin{cases} \frac{d}{ds}(n \cos \alpha) = \frac{\partial n}{\partial r}, \\ \frac{d}{ds}(rn \cos \beta) = \frac{\partial n}{\partial \theta}. \end{cases} \quad (11)$$

考虑图 1(b) 所示的二维 ABH 结构, 其中变厚度部分为一维 ABH 截面旋转而得, 即变厚度 $h(r)$ 只与 r 有关, 那么弯曲波数 $k_a(r)$ 表示为 r 的函数, 折射率表示为

$$n(r) = \frac{k_a(r)}{k_R} = \frac{c_0}{c(r)}, \quad (12)$$

其中 c_0 , $c(r)$ 分别表示均匀厚度和变厚度区域的波速. 从 (12) 式可知在极坐标系中折射率仅表示为 r 的函数, 与 θ 无关. 那么 (11) 式转化为

$$\begin{cases} \frac{d}{ds}(n \cos \alpha) = \frac{dn}{dr}, \\ \frac{d}{ds}(rn \cos \beta) = 0. \end{cases} \quad (13)$$

根据 (13) 式以及文献 [22], 可以直接得到:

$$\frac{d\alpha}{ds} = \frac{\sin \alpha}{c} \frac{dc}{dr}. \quad (14)$$

当 $dc/dr > 0$ 时 (弯曲波速正梯度), $d\alpha > 0$, 即 α 逐渐增大, 弯曲波轨迹接近圆心; 当 $dc/dr < 0$ 时 (弯曲波速负梯度), $d\alpha < 0$, 即 α 逐渐减小, 弯曲波轨迹远离圆心; 可见弯曲波轨迹总是弯向波速减小的方向. 对于本文中研究的二维 ABH 结构, 变厚度区域越接近圆心处的弯曲波波速越小, 那么弯曲波轨迹就会偏向中心区域. 由于 ABH 板为轴对称结构, 且图 2 中弯曲波入射方向为随机设置, 所以本文提出的理论对于 ABH 板中各个方向入射的弯曲波均适用. 当板中有无数列弯曲波经过 ABH 区域时, 就会形成波聚集的趋势.

2.2 基于有限元仿真的二维 ABH 波聚集理论验证

本节对含有二维 ABH 凹坑的板结构建立有限元模型, 通过数值模拟分析二维 ABH 结构的波聚集特性. 由 (2) 式可知, 理想 ABH 可将弯曲波速减小到零, 形成完美的陷波器, 实现波的全吸收. 但实际中厚度为零的结构难以实现, ABH 往往会在结构厚度减小到一定值时截断, 且后续的水听器设计需要考虑在波聚集区域放置压电元件将聚集的

振动信号转化为电信号, 因此本文中的二维 ABH 结构中心设计为一个厚度均匀的小圆台, 称为截断区域. 为了观察 ABH 结构对弯曲波传播轨迹的影响, 考虑平面弯曲波入射的情况. 建立如图 3(a) 所示几何模型, 在一块均匀厚度的铝制矩形薄板的中央位置嵌入二维 ABH 凹坑所构成, 薄板长 $l_1 = 800$ mm, 宽 $l_2 = 300$ mm, 厚度 $h_1 = 5$ mm. 凹坑区域板厚度表达式为

$$h(r) = \begin{cases} h_0, & 0 \leq r \leq 20, \\ \varepsilon_1 r^2, & 20 < r \leq 100, \end{cases} \quad (15)$$

其中, 截断厚度 $h_0 = 0.2$ mm, 变厚度系数 $\varepsilon_1 = 5 \times 10^{-4}$. 在板的左端施加初始位移激励 $x(t)$, 位移方向垂直于板面, 以模拟平面弯曲波入射. 激励信号为 5 个周期的正弦波, 频率为 10 kHz, 波形如图 3(b) 所示. 使用有限元软件分别计算嵌入二维 ABH 凹坑的薄板与同尺寸的均匀板在位移激励下的时域响应, 计算结果如图 4 所示. 对于均匀板, 弯曲波由入射端传播经过板结构的过程中, 波阵面保持平行, 弯曲波逐渐分散在板结构中. 而在嵌入二维 ABH 的薄板中, 弯曲波经过 ABH 区域时, 波阵面的形状明显发生变形, 且传播方向逐渐弯向截断区域, 形成了波聚集现象. 从而验证了 2.1 节的结论.

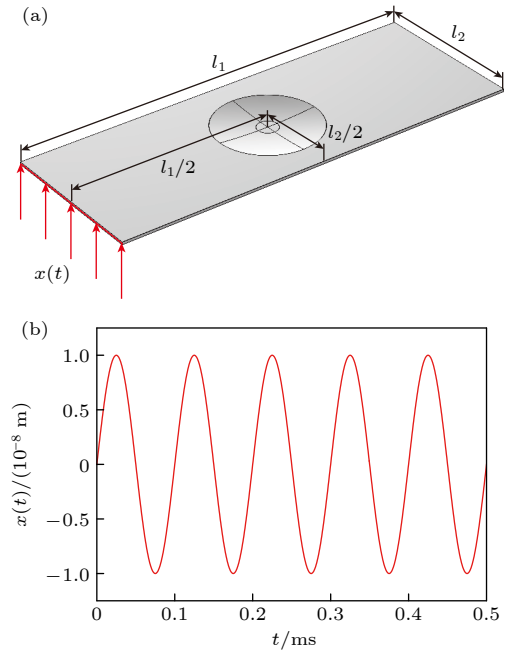


图 3 (a) 嵌入二维 ABH 凹坑的薄板; (b) 正弦激励信号
Fig. 3. (a) Thin plate embedded with a 2D ABH pit; (b) sinusoidal excitation signal.

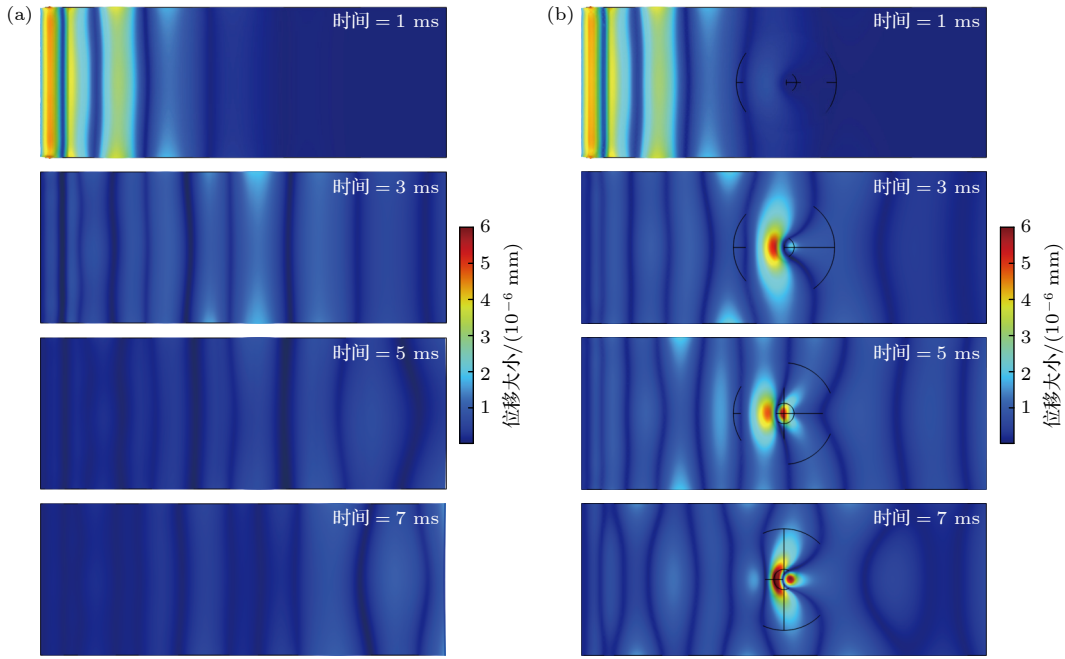


图 4 1—7 ms 时刻两种板的位移响应 (a) 均匀板; (b) 嵌入二维 ABH 凹坑的薄板

Fig. 4. Displacement responses of two types of plates at 1-7 ms: (a) Uniform plate; (b) thin plate embedded with a 2D ABH pit.

3 水听器结构与仿真分析

根据上述等效理论及仿真分析, ABH 结构可使弯曲波聚集在特定区域, 实现振动信号的聚集与叠加. 根据该特性可知, 将二维 ABH 结构作为水听器声波接收面用于水中接收水声信号时, ABH 结构由于受到声扰动产生的振动波将在局部区域产生高度聚集, 在此区域放置的压电元件接收聚集的振动信号, 产生较大输出电压, 从而可有效提高水听器的接收电压灵敏度. 但在水听器的实际设计中, 需要综合考虑仪器的声学性能与环境适应能力, 尤其是耐压性, 这决定了水听器的最大工作深度. 对于图 3(a) 所示的 ABH 结构, 截断厚度只有 0.2 mm, 不仅难以承受水下静水压, 而且加工难度大, 不适用于水听器实际制作. 后续的水听器制作中要求 ABH 结构截断厚度不能过薄, 且要选用强度较大的材料比如不锈钢、钛合金等材质.

3.1 二维 ABH 水听器

本文提出的二维 ABH 水听器由二维 ABH 板、压电片、外壳、支撑圆环以及去耦垫片组成, 结构剖面如图 5(a) 所示, 图中灰色部分的材质为不锈钢, 银白色部分的材质为硬铝, 淡黄色部分为厚

度方向极化的 PZT-5 A 压电陶瓷, 红色部分为去耦材料. 二维 ABH 板由图 5(b) 所示的一维截面绕纵轴旋转一周所得, 其厚度表达式为

$$h(r) = \begin{cases} h_1, & 0 \leq r \leq r_1, \\ \varepsilon_2(r - r_1)^2 + h_1, & r_1 < r < r_2, \\ h_2, & r_2 \leq r \leq r_3. \end{cases} \quad (16)$$

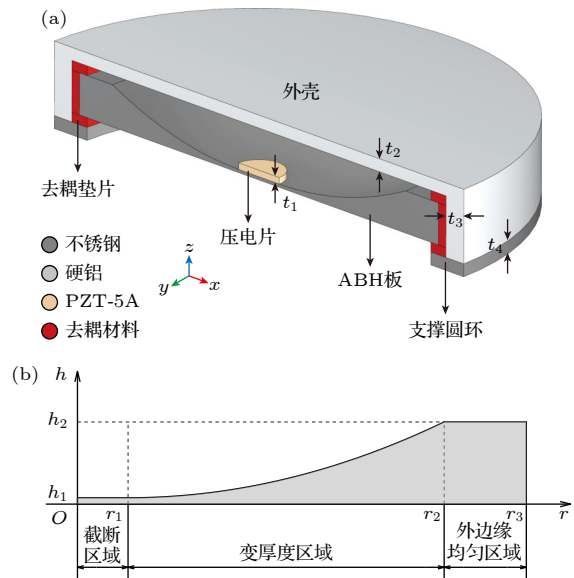


图 5 (a) 二维 ABH 水听器结构剖面图; (b) ABH 板的一维截面

Fig. 5. (a) Cross-sectional view of the 2D ABH hydrophone structure; (b) 1D profile of the ABH plate.

(16) 式中 3 个分段分别表示截断区域、ABH 变厚度区域和外边缘均匀区域. 其中变厚度系数 $\varepsilon_2 = 4.8 \times 10^{-3}$, 截断半径 $r_1 = 8 \text{ mm}$ 、变厚度区域外径 $r_2 = 58 \text{ mm}$ 、ABH 板外径 $r_3 = 71 \text{ mm}$ 、截断厚度 $h_1 = 1 \text{ mm}$ 、外边缘厚度 $h_2 = 13 \text{ mm}$. 压电片厚度为 $t_1 = 2 \text{ mm}$, 半径与 ABH 板的截断半径相同, 将其固定在 ABH 板的截断区域. 水听器外壳顶部壁厚 $t_2 = 4 \text{ mm}$ 、侧壁厚 $t_3 = 7 \text{ mm}$, 其与 ABH 板之间为空气背衬, 这种设计有利于提高水听器的接收灵敏度. 支撑圆环厚度 $t_4 = 4 \text{ mm}$. ABH 板外径边缘和外壳、支撑圆环的连接处填充去耦材料, 起到隔振去耦和限位的作用.

为研究 ABH 水听器的振动特性以及接收能力, 使用 COMSOL 有限元分析软件对水听器进行仿真计算. 由于设计的二维 ABH 水听器为轴对称结构, 所以可建立二维轴对称模型以简化计算. 忽略去耦材料、水密材料、电缆接口以及螺孔等对声学性能影响较小的结构细节, 建立如图 6 所示的有限元模型. 使用背景声场法计算水听器的接收灵敏度^[23], 该方法可以考量水听器自身散射对声场的影响. 设置水域半径为 0.75 m , 模型的最外层设置厚度为 0.15 m 的完美匹配层, 用于模拟吸收边界, 避免反射声波对计算造成影响. 水域中施加 1 Pa 大小且波矢方向为 z 方向的平面波, 经有限元计算得到压电片的开路输出电压, 从而根据定义可得水听器接收电压灵敏度级.

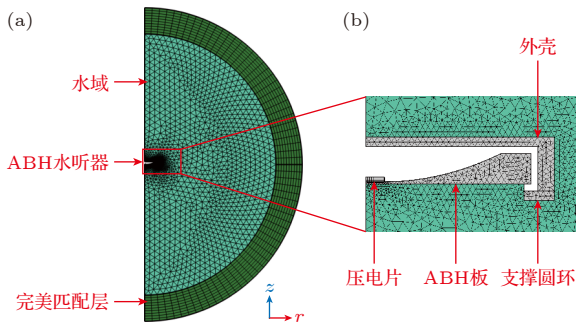


图 6 ABH 水听器的有限元模型 (a) 整体图; (b) 局部图
Fig. 6. Finite element model of the ABH hydrophone: (a) General view; (b) enlarged view.

为了验证 ABH 结构的优势, 将图 5 中 ABH 板分别换成厚度为 h_1, h_2 的均匀板以及线性变厚度板, 其外径均相同, 线性变厚度板只是将 ABH 板的变厚度区域换为线性变化形式, 4 种厚度板及其一维截面如图 7 所示. 对比分析 4 种板作为水听

器声波接收面计算得到的接收灵敏度曲线及 $x-z$ 面内指向性图, 计算结果如图 8 和图 9 所示. 表 1 分别对上述 4 种水听器接收性能进行对比. 可以看出, ABH 板作为接收面的水听器在 $1.7\text{--}5.8 \text{ kHz}$ 频段内的接收灵敏度要显著高于其他厚度板, ABH 板作为水听器接收面在提升灵敏度方面具有显著优势.

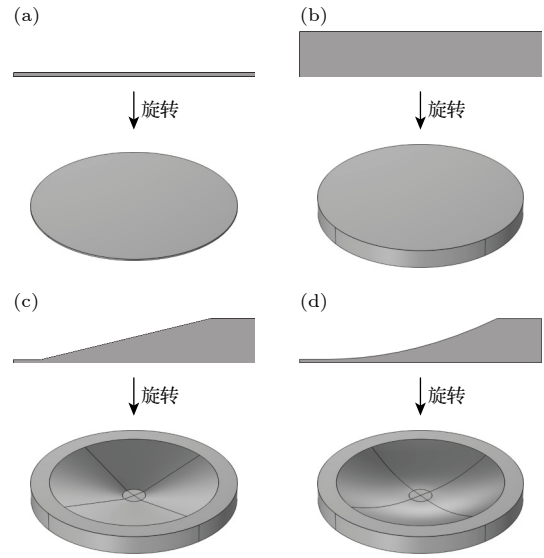


图 7 4 种厚度板的一维截面 (a) 均匀厚度 h_1 ; (b) 均匀厚度 h_2 ; (c) 线性变厚度; (d) ABH
Fig. 7. One-dimensional profiles of plates with four thickness types: (a) Uniform thickness h_1 ; (b) uniform thickness h_2 ; (c) linear thickness variation; (d) ABH.

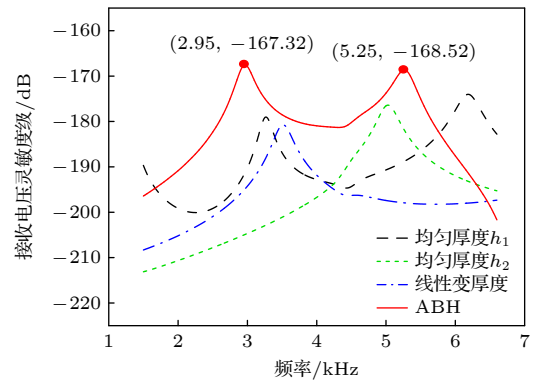


图 8 4 种厚度形式的板作为声波接收面的水听器接收电压灵敏度级曲线
Fig. 8. Receiving voltage sensitivity level curves for hydrophones with plates of four thickness types as the acoustic wave receiving surface.

ABH 水听器接收灵敏度级曲线在计算频段内出现了两个响应峰值, 对应频率分别为 2.95 kHz 和 5.25 kHz . 提取出这两个频率处的位移响应, 如

图 10 所示, 可见水听器中的二维 ABH 板截断区域位移幅值最大, 符合 ABH 结构中的振动聚集特性, 验证了这种新型结构水听器是利用 ABH 效应实现灵敏度的提高. 此外, 为了观察水听器较大的尺寸对声场的干扰, 图 10 还给出了水听器对声场的影响结果. 为了定量分析这种影响, 采用文献 [24] 中衍射常数的概念来度量此干扰作用, 衍射常数定义为

$$D_a = p_b / p_i, \quad (17)$$

其中 p_b 为水听器表面有效声压的空间平均, p_i 为自由场声压. 在本文的有限元计算模型中, p_b 为水听器中 ABH 板表面的声压平均, $p_i = 1 \text{ Pa}$, 经计算可得 D_a 随频率的变化曲线如图 11 所示. 可以看出 D_a 曲线出现的峰值分别对应 ABH 水听器接收灵敏度级曲线的两个响应峰值, 这是因为在以上两

个频率处, ABH 板的振动汇聚效果最为显著, 从而对自由场产生了声辐射, 使得水听器表面声压变大. 但由图 10 可见, 这种干扰只出现在水听器表面小范围内, 对整体自由声场影响很小.

表 1 4 种厚度形式的板作为声波接收面的水听器性能对比

Table 1. Performance comparison of hydrophones with plates of four thickness types as the acoustic wave receiving surface.

水听器接收面模型	接收灵敏度/dB		指向性-3 dB开角/(°)	
	最大值	最大起伏	2.95 kHz	5.25 kHz
均匀板 $h = h_1$	-178.7	21.35	121.6	91.8
均匀板 $h = h_2$	-176.3	33.2	144.8	139.2
线性变厚度板	-180.6	23.1	153.7	116.6
ABH板	-167.3	20.7	156.0	99.0

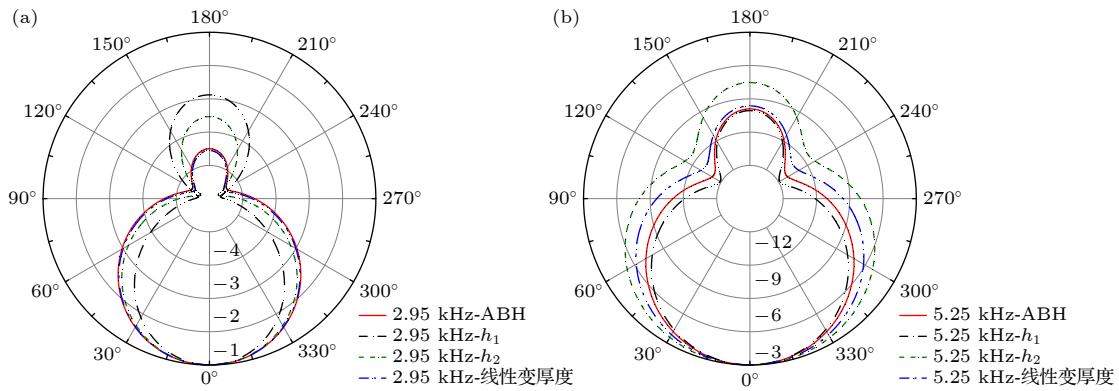


图 9 4 种厚度形式的板作为声波接收面的水听器接收指向性 (a) 2.95 kHz; (b) 5.25 kHz

Fig. 9. Receiving directivity of hydrophones with plates of four thickness types as the acoustic wave receiving surface: (a) 2.95 kHz; (b) 5.25 kHz.

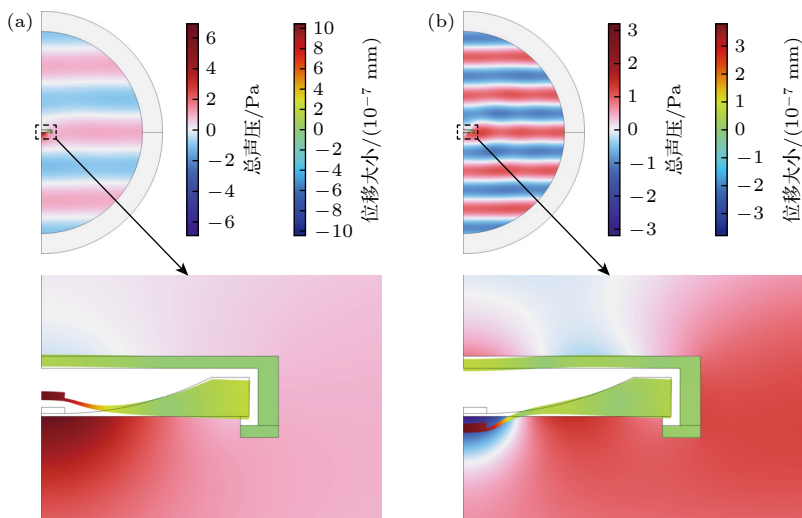


图 10 ABH 水听器位移场和稳态声压场的整体图和局部放大图 (a) 2.95 kHz; (b) 5.25 kHz

Fig. 10. General and enlarged views of displacement fields and steady-state sound pressure fields for the ABH hydrophone: (a) 2.95 kHz; (b) 5.25 kHz.

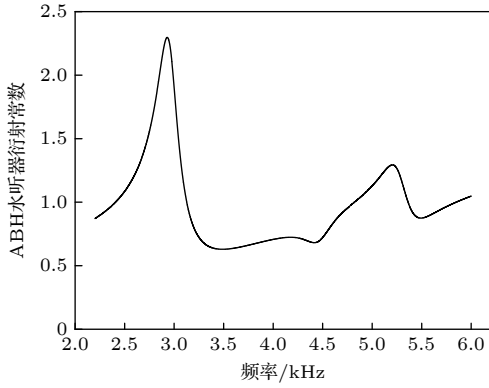


图 11 ABH 水听器衍射常数
Fig. 11. Diffraction constant of the ABH hydrophone.

3.2 二维 ABH 水听器响应起伏问题分析

从图 8 可见, 虽然 ABH 效应可以有效提高水听器的接收灵敏度, 但是响应曲线起伏过大, 有效工作频段过窄, 无法在实际水声工程应用中投入使用. 可从振动叠加的角度分析这一问题. 虽然 ABH 结构可以有效地使弯曲波聚集在特定区域, 但是对于不同位置激发某一频率的弯曲波, 传播到聚集区域时可能出现相位不同, 从而使得叠加信号出现相消干涉即振幅减小的现象. 当 ABH 板接收声波作用时, 整个接收面受到激励等效为无数个同心圆周上的同时施加均匀线激励叠加的结果, 每个圆上受到的线激励又可近似为无数个线段上同时施加均匀线激励叠加的结果, 叠加模型如图 12

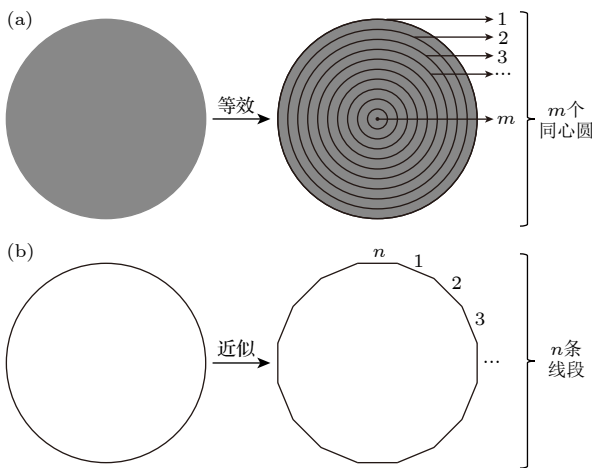


图 12 (a) 面激励等效为无数个同心圆周上线激励叠加;
(b) 圆周上线激励近似为无数个线段上线激励叠加
Fig. 12. (a) Equivalence of a surface excitation to the superposition of an infinite number of line excitations on concentric circumferences; (b) approximation of a line excitation on a circumference as the superposition of an infinite number of line excitations on line segments.

所示. 线激励产生弯曲波, 与圆心距离相同的 n 条线段上的线激励关于中心对称, 弯曲波传播到截断区域时一定可以同相叠加. 但不同圆周上激励位置与中心距离不同, 且由 (2) 式可知, 波速是与频率有关的函数, 那么聚集的弯曲波相位也是与频率有关的函数. 弯曲波传播到截断区域时累积相位与传播路径和频率均有关, 其振幅不一定同相叠加, 从而导致 ABH 板的位移响应会随着频率的变化而变化.

以两列同频率弯曲波叠加为例, 对上述分析进行有限元仿真验证. 在水听器中 ABH 板的接收平面上半径 $r = 63 \text{ mm}$ 和 $r = 66 \text{ mm}$ 处绘制两个同心圆周, 分别命名为圆周 1 和圆周 2. 在两个圆周处施加垂直于板平面方向的位移激励信号, 信号形式均与图 3(b) 所示波形相同, 分别在圆周 1 处单独、圆周 2 处单独、圆周 1 和 2 处共同施加不同频率的激励信号, 观察结构在不同位置且不同频率激励下的位移响应. 由于这里 ABH 板整体较厚, 为了更明显地观察结构的位移响应, 将激励信号幅值增大为 $1 \times 10^{-6} \text{ m}$. 计算结果如图 13 所示, 在频率为 5.86 kHz 的信号激励下, 两列信号实现了同相叠加, 使叠加信号幅值放大; 在频率为 6.53 kHz 的信号激励下, 两列信号反向叠加, 使得叠加信号幅值小于原两列信号单独作用的结果. 可以看出, 不同位置振动相位的不同使得 ABH 结构的位移响应随着频率的变化而变化, 从而导致了 ABH 水听器的接收灵敏度曲线出现较大起伏的现象.

3.3 二维 ABH 结构与液腔耦合水听器

从振动模态角度来看, 二维 ABH 水听器的接收响应峰值的出现正是对应于 ABH 结构的几阶弯曲振动模态. 可以考虑多模态耦合思想, 在 ABH 结构的前两阶弯曲振动模态之间设计一个新模态, 模态之间相互耦合从而减小接收响应起伏. 根据这一思想, 在 ABH 水听器结构基础上设计一个与支撑圆环外径相同的圆管, 与水听器连接后形成一个单端开口的 Helmholtz 液腔, 从而设计出一种 ABH 与单端开口 Helmholtz 液腔耦合水听器 (ABHH 水听器), 结构剖面图如图 14 所示. 液腔共振放大声压信号使原水听器在一二阶模态之间产生新的响应峰值, 从而使 3 个模态耦合, 形成宽带接收效果.

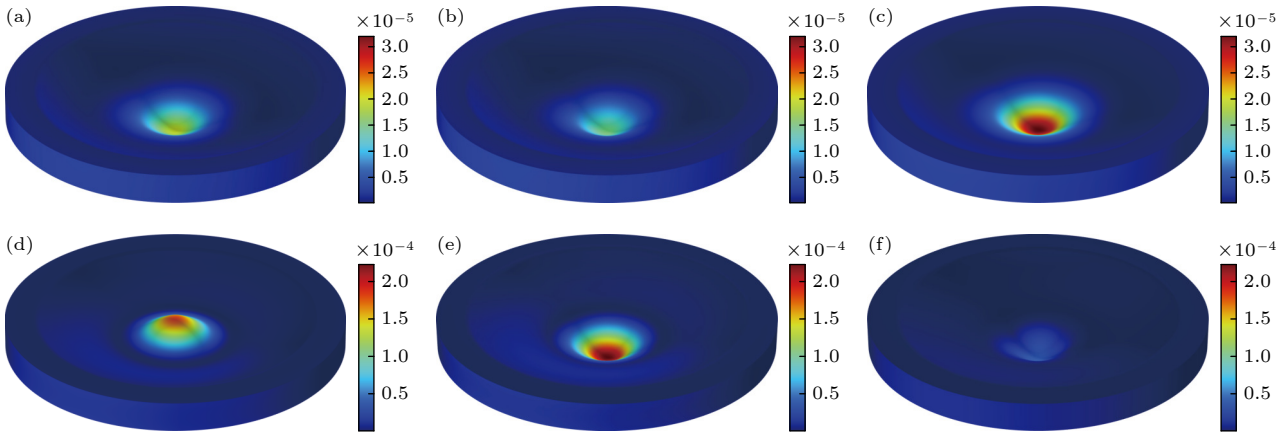


图 13 不同位置不同频率激励信号下的位移响应 (a) 圆周 1 处施加 5.86 kHz 信号激励; (b) 圆周 2 处施加 5.86 kHz 信号激励; (c) 圆周 1 和 2 处共同施加 5.86 kHz 信号激励; (d) 圆周 1 处施加 6.53 kHz 信号激励; (e) 圆周 2 处施加 6.53 kHz 信号激励; (f) 圆周 1 和 2 处共同施加 6.53 kHz 信号激励

Fig. 13. Displacement responses under excitation at different positions and frequencies: (a) Excitation on circumference 1 with a 5.86 kHz signal; (b) excitation on circumference 2 with a 5.86 kHz signal; (c) simultaneous excitation on circumferences 1 and 2 with a 5.86 kHz signal; (d) excitation on circumference 1 with a 6.53 kHz signal; (e) excitation on circumference 2 with a 6.53 kHz signal; (f) simultaneous excitation on circumferences 1 and 2 with a 6.53 kHz signal.

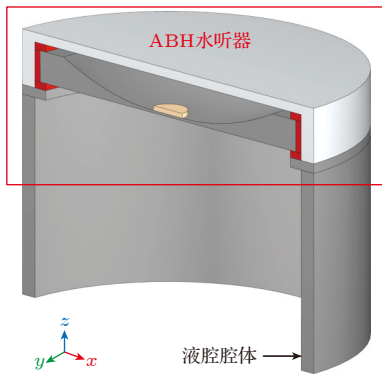


图 14 ABHH 水听器结构剖面图

Fig. 14. Cross-sectional view of the ABHH hydrophone structure.

根据文献 [25], 单端开口 Helmholtz 共振液腔可近似视为 $1/4$ 波长管, 即腔体长度 $l = \lambda/4$, 从而得到谐振频率 $f = c/4l$. 由该公式可得某一长度单端开口液腔的谐振频率, 也可以根据想要得到的液腔模态频率计算出对应的腔体长度. 对于图 8 中的 ABH 水听器接收电压灵敏度级曲线, 只考虑前两阶 ABH 弯曲振动模态, 在两阶模态之间大概 4 kHz 左右设计一个液腔模态, 计算 $f = 4$ kHz 的声波波长 λ 代入波长管长度计算公式, 得到腔体长度 $l \approx 95$ mm. 根据该长度设计了 ABHH 水听器, 并对其进行了仿真计算, 得到增加液腔前后水听器接收灵敏度对比曲线如图 15 所示, 以及 ABHH 水听器只改变液腔腔体长度得到的接收灵敏度对比曲

线如图 16 所示. 可以看出, 增加液腔结构后接收灵敏度级曲线在原 ABH 水听器的基础上出现了新的峰值, 3 个响应峰值对应频率分别为 2.75 kHz, 3.85 kHz, 5.3 kHz, 计算其指向性如图 17 所示, -3 dB 开角分别为 156° , 96° , 66° . 此外, 腔体长度的增大使得中间峰值向低频方向移动, 符合液腔模态频率与腔体长度的关系, 从而可以说明该响应峰值为液腔模态. 经过参数优化后选择长度为 90 mm 的腔体, 最终设计的 ABHH 水听器在 2.5—5.5 kHz 频段内接收灵敏度最高可达 -167 dB, 带内起伏控制在 8 dB 以内, 实现了中低频段的高灵敏度接收.

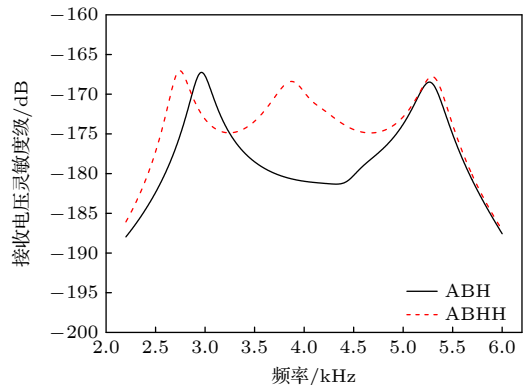


图 15 ABH 水听器和 ABHH 水听器仿直接收电压灵敏度级曲线对比

Fig. 15. Comparison of simulated receiving voltage sensitivity level curves between the ABH hydrophone and the ABHH hydrophone.

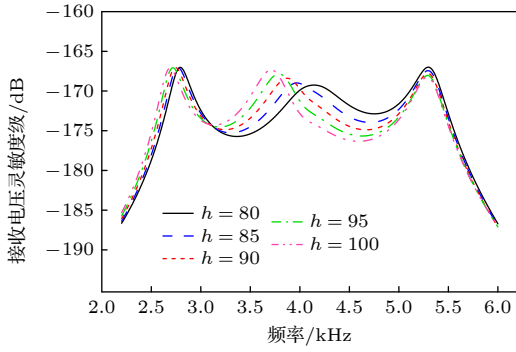


图 16 ABHH 水听器改变液腔体长度接收电压灵敏度级曲线对比

Fig. 16. Comparison of receiving voltage sensitivity level curves for the ABHH hydrophone with variation in the liquid cavity length.

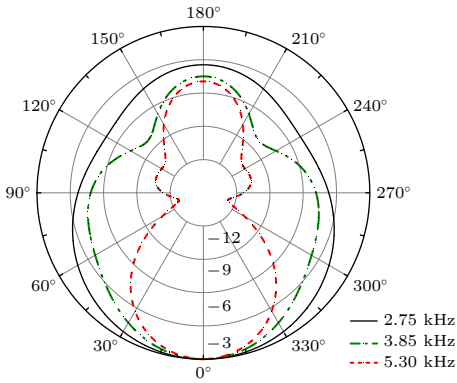


图 17 ABHH 水听器仿真指向性图

Fig. 17. Simulated directivity pattern of the ABHH hydrophone.

与 3.1 节相同, 这里也对 ABHH 水听器的位移响应及其对声场的干扰进行了仿真计算与分析, 得到水听器位移响应和稳态声压场计算结果如图 18 所示, ABHH 水听器的衍射常数 D_a 随频率的变化曲线如图 19 所示. 可以看出 D_a 曲线出现的峰值分别对应 ABHH 水听器接收灵敏度级曲线的 3 个响应峰值. 由图 18 可见, 在 2.75 kHz 频率处, ABH 板的振动汇聚效果最为显著, 从而对自由场产生了声辐射, 使得水听器表面声压变大; 在 3.85 kHz 频率处, ABH 振动聚集效应和水听器的液腔模式共同作用, 使得水听器表面声压变大; 在 5.3 kHz 频率处, ABH 板的振动聚集效应仍起作用, 但由于板的振动出现了反相区, 此时声辐射能力已大大减弱, 所以此处衍射常数接近 1. ABHH 水听器对声场的干扰只出现在水听器表面小范围内, 对整体自由声场影响很小.

4 样机制作与实验验证

根据前述有限元仿真结果, 制作了实验样机在消声水池中进行接收灵敏度测试. 水听器零件及水密灌封后的样机如图 20 所示. 为制作方便, 设计了一个包含卡槽的不锈钢圆管, 其中卡槽尺寸与水密灌封后的 ABH 水听器外径相同, 将 ABH 水听器放入卡槽中固定, 再放入水中后即可在 ABH 水

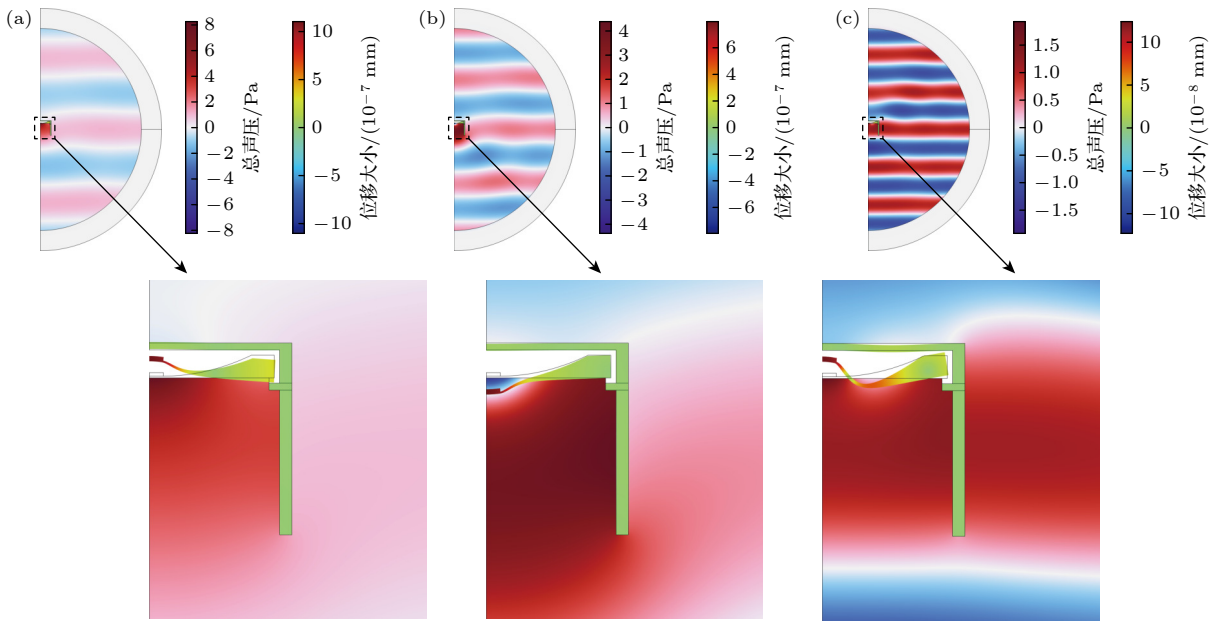


图 18 ABHH 水听器位移场和稳态声压场的整体图和局部放大图 (a) 2.75 kHz; (b) 3.85 kHz; (c) 5.3 kHz

Fig. 18. General and enlarged views of displacement fields and steady-state sound pressure fields for the ABHH hydrophone: (a) 2.75 kHz; (b) 3.85 kHz; (c) 5.3 kHz.

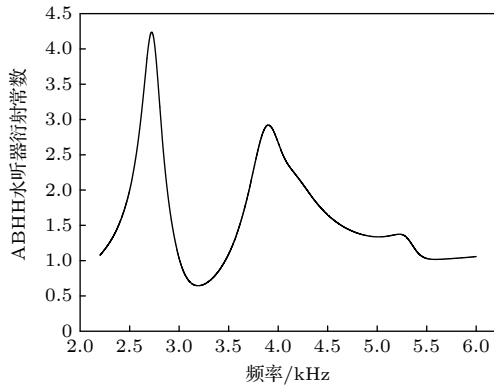


图 19 ABHH 水听器衍射常数

Fig. 19. Diffraction constant of the ABHH hydrophone.

听器的声波接收面前形成一个单端开口液腔, 从而获得 ABHH 水听器. 采用比较法测量以上两种水听器的接收灵敏度, 测试装置与水听器入水姿态如图 21 所示. 将声源、待测水听器和已知灵敏度为 $(M_e L)_1$ 的标准水听器分别吊放在消声水池的同一深度, 分别记录标准水听器和待测水听器与声源的距离 d_1 , d_2 , 根据 (18) 式, 比较二者开路输出电压 e_1 , e_2 即可得到待测水听器的接收电压灵敏度级 [26]. 此外, 通过旋转待测水听器, 记录其不同方向上的开路输出电压并计算接收电压灵敏度级, 归一化即可得水听器的接收指向性图.

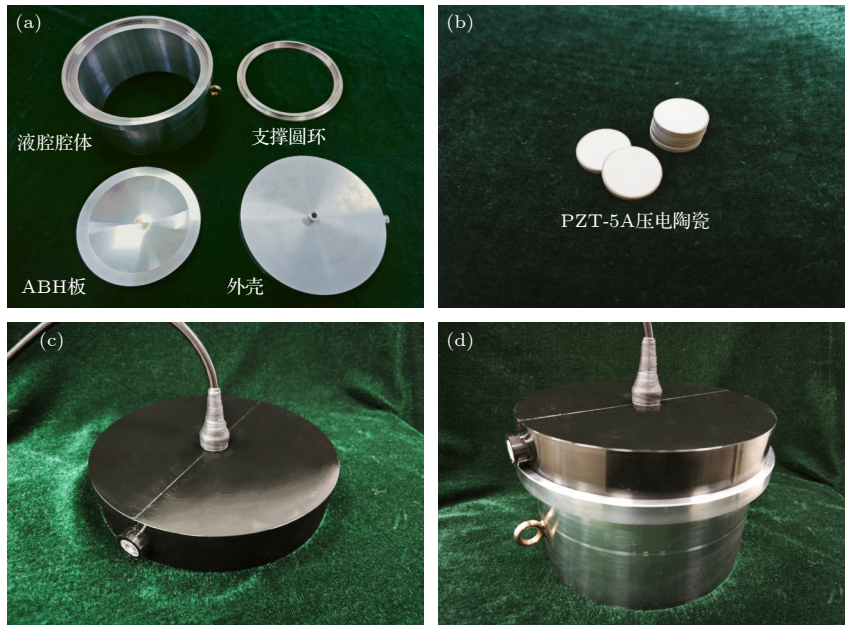


图 20 水听器零件及水密灌封后样机 (a) 水听器金属零件; (b) PZT-5 A 压电陶瓷; (c) ABH 水听器样机; (d) ABHH 水听器样机
Fig. 20. Hydrophone components and prototypes after waterproof potting: (a) Metal components; (b) PZT-5 A piezoelectric ceramic; (c) ABH hydrophone prototype; (d) ABHH hydrophone prototype.

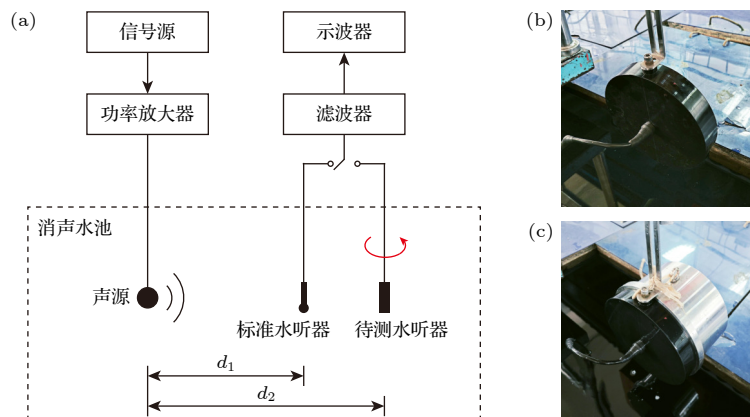


图 21 (a) 水听器接收灵敏度和指向性的实验测量装置; (b) ABH 水听器入水姿态; (c) ABHH 水听器入水姿态

Fig. 21. (a) Experimental setup for measuring hydrophone receiving sensitivity using the comparative method; (b) immersion posture of the ABH hydrophone; (c) immersion posture of the ABHH hydrophone.

$$M_e L = (M_e L)_1 + 20 \log(d_2/d_1) + 20 \log(e_2/e_1). \quad (18)$$

将 ABH 水听器和 ABHH 水听器分别作为待测水听器, 根据上述操作步骤得到二者接收灵敏度级曲线以及指向性测试结果分别如图 22 和图 23 所示. 表 2 和表 3 分别对 ABH 水听器和 ABHH 水

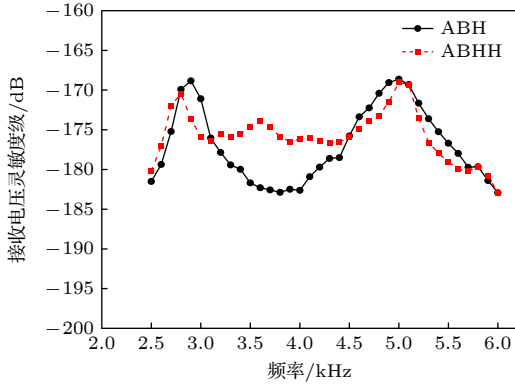


图 22 ABH 水听器和 ABHH 水听器实测接收电压灵敏度级曲线

Fig. 22. Measured receiving voltage sensitivity level curves for the ABH hydrophone and ABHH hydrophone.

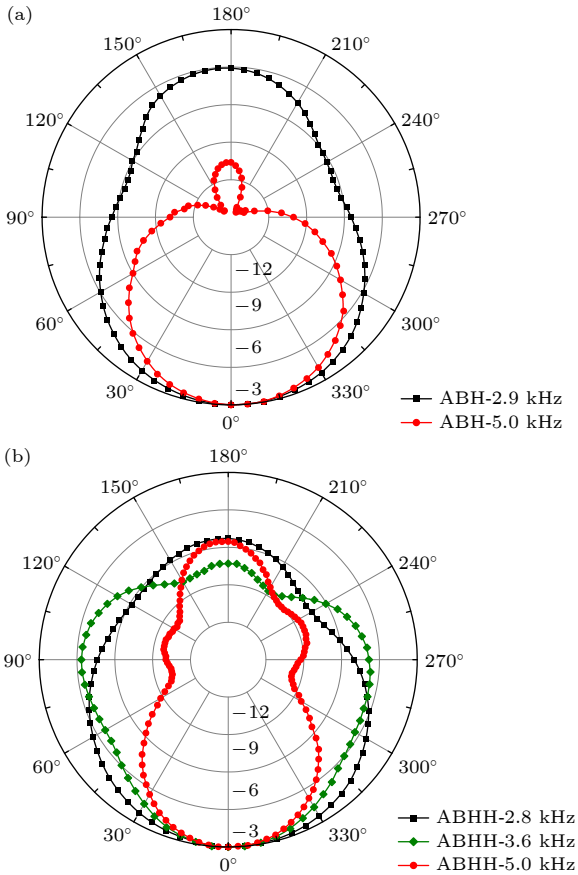


图 23 ABH 水听器和 ABHH 水听器实测指向性图

Fig. 23. Measured directivity patterns of the ABH hydrophone and ABHH hydrophone.

听器的仿真和实测接收性能进行了对比. 从结果可以看出, 实测与仿真结果基本吻合. 接收灵敏度和指向性的实测值与仿真有一定的偏差, 主要是去耦垫片、水密灌注层对振动系统阻尼带来的影响. 其中实测 ABHH 水听器的第二阶模态也就是液腔模态的灵敏度相较于仿真降低较多, 达到 5.5 dB. 这是因为样机制作时未将钢管与支撑圆环直接连接, 二者之间的水密灌注层为透声橡胶材料, 相当于钢管与支撑圆环之间产生了狭缝, 会导致声能量损失. 但两种水听器均在两阶 ABH 弯曲振动模态处实现了较高的灵敏度, 最高可达 -169 dB 以上, 验证了这种新型结构水听器可利用 ABH 效应实现灵敏度的提高. 此外, 在水听器接收面前安装液腔的设计可以在 ABH 水听器的两个接收灵敏度峰值之间产生新的响应峰值, 相较于 ABH 水听器, ABHH 水听器在 2.6—5.3 kHz 频段内的起伏由 14.3 dB 降低到 8.0 dB. 两种水听器的实测结果表明, ABH 结构的弯曲振动聚集效应可有效提高水听器接收灵敏度; 在两阶 ABH 弯曲振动模态之间设计液腔模态可有效减小接收响应起伏, 扩宽工作带宽.

表 2 ABH 水听器的仿真与实测性能对比

Table 2. Comparison of simulated and measured performance for the ABH hydrophone.

模态阶数	仿真			实测		
	频率/kHz	灵敏度/dB	-3 dB开角/(°)	频率/kHz	灵敏度/dB	-3 dB开角/(°)
1阶	2.95	-167.3	156	2.9	-168.8	120
2阶	5.25	-168.5	99	5.0	-168.6	85

表 3 ABHH 水听器的仿真与实测性能对比

Table 3. Comparison of simulated and measured performance for the ABHH hydrophone.

模态阶数	仿真			实测		
	频率/kHz	灵敏度/dB	-3 dB开角/(°)	频率/kHz	灵敏度/dB	-3 dB开角/(°)
1阶	2.75	-167.0	160	2.8	-170.4	135
2阶	3.85	-168.4	96	3.6	-173.9	95
3阶	5.30	-167.8	64	5.0	-169.0	69

5 结论

本文从几何声学原理出发, 将声学黑洞的弯曲波汇聚特性类比为水声学中声线弯曲, 提出了一种适用于二维 ABH 结构的波聚集特性简化理论. 根据这一特性设计了一种二维 ABH 结构水听器, 通

过分析其振动特性以及接收能力,揭示了该水听器高灵敏度形成机理. 并与均匀厚度板以及线性变厚度板作为声波接收面的水听器进行对比,论证了本设计的优势. 从振动叠加的角度分析了二维 ABH 水听器出现灵敏度曲线起伏较大现象的原因. 针对这一问题,在 ABH 水听器的基础上增加了特定长度液腔腔体,设计了一种 ABH 与单端开口 Helmholtz 液腔耦合水听器. 最后制作了两水听器样机并对其接收灵敏度性能进行了实测. 根据理论推导、仿真分析以及实验验证得到以下结论:

1) 本文提出的二维 ABH 结构波聚集理论简单高效,对于 ABH 板中各个方向入射的弯曲波均适用;

2) 提出的二维 ABH 水听器可利用 ABH 结构产生的振动聚集效应实现高灵敏度接收,最高可达 -169 dB, ABH 板相较于其他厚度形式板在提高接收灵敏度方面具有显著优势,但曲线起伏较大;

3) ABH 板不同位置的弯曲波传播到截断区域时振动相位的不同使得结构的位移响应会随着频率的变化而变化,从而导致 ABH 水听器的接收灵敏度曲线出现较大起伏.

4) 提出的 ABH 与单端开口 Helmholtz 液腔耦合水听器可使得前两阶 ABH 弯曲振动模态与液腔模态耦合工作从而降低接收灵敏度起伏,可在 $2.6\text{--}5.3$ kHz 频段内将起伏控制在 8 dB 以内,实现一个倍频程内的高灵敏度接收.

本项研究工作针对水下微弱信号探测领域对高灵敏度水听器的需求,提供了一种创新且有效的解决方案. 通过理论、仿真与实验验证,为 ABH 结构在水声换能器中的应用建立了较好的研究基础,为研制实用化高性能宽带水听器提供了新路径. 该研究成果对于提升被动声呐探测、海岸防潜警戒和噪声监测等系统的性能具有积极意义.

参考文献

[1] Guang D, Sun X Y, Shi J H, Wu X Q, Zhang G S, Zuo C, Zhu P C, Yu B L 2024 *Opt. Express* **32** 47721
 [2] Yang Y 2022 *Ph. D. Dissertation* (Changchun: Jilin University) (in Chinese) [杨悦 2022 博士学位论文 (长春: 吉林大学)]
 [3] Zhou L S, Xu X R 2021 *Acta Acust.* **46** 1250 (in Chinese) [周

利生, 许欣然 2021 *声学学报* **46** 1250]
 [4] Tu X Y, Li J B, Liu X D, Shen J K 2021 *Piezoelectr. Acoustoopt.* **43** 449 (in Chinese) [涂馨予, 李俊宝, 刘晓迪, 申健康 2021 *压电与声光* **43** 449]
 [5] Wang H W, Hui H, Rong T 2022 *Acta Acust.* **47** 364 (in Chinese) [王宏伟, 惠辉, 荣叟 2022 *声学学报* **47** 364]
 [6] Xu Y Z 2020 *M. S. Thesis* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology) (in Chinese) [徐言哲 2020 硕士学位论文 (武汉: 华中科技大学)]
 [7] Xu Y F, Zhou T F, Lan Y 2020 *Appl. Sci. Technol.* **47** 99 (in Chinese) [许延峰, 周天放, 蓝宇 2020 *应用科技* **47** 99]
 [8] Kim D, Roh Y 2023 *Sensors* **23** 9086
 [9] Li S P, Mo X P, Pan Y Z, Zhang Y Q, Cui B 2017 *Acta Acust.* **42** 729 (in Chinese) [李世平, 莫喜平, 潘耀宗, 张运强, 崔斌 2017 *声学学报* **42** 729]
 [10] Li S P, Mo X P, Zhang Y Q, Cui B 2017 *Appl. Acoust.* **36** 54 (in Chinese) [李世平, 莫喜平, 张运强, 崔斌 2017 *应用声学* **36** 54]
 [11] Mironov M A 1988 *Sov. Phys. Acoust.* **34** 318
 [12] Krylov V V 1989 *Sov. Phys. Acoust.* **35** 176
 [13] Huang W, Ji H L, Qiu J H, Cheng L 2018 *J. Sound Vib.* **417** 216
 [14] Tang L L, Cheng L, Ji H L, Qiu J H 2016 *J. Sound Vib.* **374** 172
 [15] Deng J, Gao N S, Chen X, Han B, Ji H L 2023 *Mech. Syst. Signal Proc.* **191** 110182
 [16] Zhao L X, Conlon S C, Semperlotti F 2014 *Smart Mater. Struct.* **23** 065021
 [17] Song T T, Zheng L, Deng J 2022 *J. Vib. Shock* **41** 186 (in Chinese) [宋婷婷, 郑玲, 邓杰 2022 *振动与冲击* **41** 186]
 [18] Liu Y, Chen C, Lin S Y 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 148 (in Chinese) [刘洋, 陈诚, 林书玉 2024 *物理学报* **73** 148]
 [19] Chen C, Tang Y F, Ren W B, Wang Y, Guo J Z, Lin S Y 2024 *Ultrasonics* **143** 107417
 [20] Wang Y, Chen C, Lin S Y 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 044303 (in Chinese) [王怡, 陈诚, 林书玉 2025 *物理学报* **74** 044303]
 [21] Huang W 2019 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics) (in Chinese) [黄薇 2019 博士学位论文 (南京: 南京航空航天大学)]
 [22] Liu B S, Lei J Y 2010 *Principles of Underwater Acoustics* (2nd Ed.) (Harbin: Harbin Engineering University Press) pp76–82 (in Chinese) [刘伯胜, 雷家煜 2010 *水声学原理* (第2版) (哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社) 第76–82页]
 [23] Yang R Y, Wu T, Cui B 2022 *Proceedings of the Academic Conference of Underwater Acoustic Branch of Acoustics Society of China in 2021–2022 Qingdao, China, August 15, 2022* p393 (in Chinese) [杨荣耀, 吴彤, 崔斌 2022 中国声学学会水声学分会 2021–2022 年学术会议论文集 中国青岛, 2022 年 8 月 15 日 第 393 页]
 [24] Butler J L, Sherman C H 2016 *Transducers and Arrays for Underwater Sound* (2nd Ed.) (Cham: Springer International Publishing) p325
 [25] Sang Y J, Lan Y, Ding Y W 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 024301 (in Chinese) [桑永杰, 蓝宇, 丁玥文 2016 *物理学报* **65** 024301]
 [26] Teng D, Yang H 2020 *Fundamentals of Hydroacoustic Transducers* (2nd Ed.) (Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press) pp220–224 (in Chinese) [滕舵, 杨虎 2020 *水声换能器基础* (第2版) (西安: 西北工业大学出版社) 第220–224页]

High-sensitivity hydrophone with two-dimensional acoustic black hole structure

ZHU Hao¹⁾²⁾ LI Junbao^{1)†} GE Xiaohui¹⁾²⁾ LI Depeng¹⁾

1) (*Ocean Acoustic Technology Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 9 June 2025; revised manuscript received 27 July 2025)

Abstract

Acoustic black hole (ABH) structures are renowned for their unique wave-focusing ability and have been widely utilized in the fields of acoustics and vibration. Based on this property, a novel high-sensitivity hydrophone design incorporating a two-dimensional (2D) ABH structure is proposed in this work. According to the principles of geometrical acoustics, the wave-converging behavior of bending waves in ABH structures is compared to the bending of acoustic ray in underwater acoustics. A simplified theoretical model describing the relationship between the bending wave trajectory and the wave speed gradient in polar coordinates is established for two-dimensional (2D) ABH configurations and verified through numerical simulations. Based on this mechanism, a 2D ABH hydrophone is developed by integrating the ABH structure into bending-plate hydrophone, enabling vibration energy concentration and significantly enhancing sensitivity. The comparative studies of hydrophones using uniform-thickness plates and linearly tapered thickness plates as receiving surfaces confirm the superior performance of the ABH hydrophone in a frequency range of 1.7–5.8 kHz. To address the significant undulations observed in the sensitivity response, which is attributed to vibration superposition, a liquid cavity of specific length is introduced. This leads to the development of an ABH-Helmholtz-coupled hydrophone (ABHH hydrophone), wherein the first two bending modes of the ABH structure are coupled with the resonant modes of a single-ended open liquid cavity, resulting in broadband reception capability. The prototypes of both hydrophone designs are fabricated and experimentally tested in an anechoic water tank. The results show that both devices achieve peak receiving sensitivities exceeding -169 dB. Notably, the ABHH hydrophone maintains sensitivity fluctuations within 8 dB in a frequency band of 2.6–5.3 kHz. This study confirms that 2D ABH structures can effectively improve hydrophone sensitivity through bending wave convergence, and can achieve broadband acoustic detection when the structure is coupled with liquid cavity resonators. These findings lay a solid foundation for the application of ABH structures in the design of underwater acoustic transducer.

Keywords: hydrophone, two-dimensional acoustic black hole, high sensitivity, modal coupling

PACS: 43.30.+m, 43.58.+z, 43.40.+s

DOI: [10.7498/aps.74.20250741](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250741)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250741](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250741)

† Corresponding author. E-mail: lijb@mail.ioa.ac.cn



二维声学黑洞结构高灵敏度水听器

朱浩 李俊宝 葛晓辉 李德鹏

High-sensitivity hydrophone with two-dimensional acoustic black hole structure

ZHU Hao LI Junbao GE Xiaohui LI Depeng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 194301 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250741

CSTR: 32037.14.aps.74.20250741

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250741>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于流体模型的碳纳米管电离式传感器的结构优化方法

Structure optimization of carbon nanotube ionization sensor based on fluid model

物理学报. 2021, 70(9): 090701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201828>

凹凸梁型低频指向性弯张换能器

Low-frequency directional flexensional transducer with concave-convex beam

物理学报. 2025, 74(11): 114301 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250161>

基于多孔金膜的太赫兹导模共振生化传感特性仿真

Performance simulation of terahertz waveguide resonance biochemical sensor based on nanoporous gold films

物理学报. 2022, 71(21): 218701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220722>

宽带腔增强吸收光谱技术应用于大气NO₃自由基的测量

Broadband cavity enhanced absorption spectroscopy for measuring atmospheric NO₃ radical

物理学报. 2021, 70(1): 010702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201066>

基质与掺杂离子Pr³⁺荧光强度比的新型高灵敏度光学测温研究

Novel high-sensitivity optical thermometry based on fluorescence intensity ratio of to Pr³⁺

物理学报. 2024, 73(9): 097801 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240012>

二维黑磷的光学性质

Optical properties of two-dimensional black phosphorus

物理学报. 2021, 70(2): 027802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201497>