

基于弱横向耦合厚度振动传感单元的拖曳细线阵研究

陈致远¹, 刘爽^{1,2,3*}

¹哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨

²哈尔滨工程大学水声技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

³海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学), 工业和信息化部, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年1月22日; 录用日期: 2026年2月23日; 发布日期: 2026年3月18日

摘要

小型水下移动平台自身体积有限, 无法搭载大规模被动接收设备, 极大限制了对水下目标的接收能力。本文通过建立弱横向耦合厚度振动水听器有限元模型并优化其电声特性, 设计了一种基于厚度接收模式传感单元的拖曳细线阵, 阵列直径 $\Phi 35.6\text{ mm}$, 阵元数8元, 阵元灵敏度 $\geq -202\text{ dB}$ 。通过将有限元仿真与水下测试实验进行对比分析, 验证了弱横向耦合厚度振动接收模式的有效性。

关键词

弱横向耦合, 厚度振动, 拖曳细线阵

Research on Towed Thin-Line Array Based on Weakly Transversely Coupled Thickness Vibration Sensing Unit

Zhiyuan Chen¹, Shuang Liu^{1,2,3*}

¹College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang

²National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang

³Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Heilongjiang

Received: January 22, 2026; accepted: February 23, 2026; published: March 18, 2026

*通讯作者。

Abstract

Small underwater mobile platforms are limited by their own volume and cannot carry large-scale passive receiving equipment, which greatly restricts their capability of receiving underwater targets. In this paper, a finite element model of a sensing unit with weakly transversely coupled thickness vibration is established and its electroacoustic characteristics are optimized. On this basis, a towed thin-line array based on thickness-receiving-mode sensing units is designed, with an array diameter of $\Phi 35.6$ mm, 8 array elements and an element sensitivity of ≥ -202 dB. Through the comparative analysis of finite element simulations and underwater tests, the effectiveness of the weakly transversely coupled thickness vibration receiving mode is verified.

Keywords

Weakly Transversely Coupled, Thickness Vibration, Towed Thin-Line Array

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

拖曳细线阵是一种直径小于 $\Phi 40$ mm 的拖曳阵, 具有体积小、重量轻、能耗低的特点, 十分适用于小型船只、AUV 等小型平台的搭载。然而, 由于其内径很小, 对其内部的接收阵元提出了更高要求。目前, 随着 MEMS 技术的高速发展, MEMS 压电器件的制备趋于成熟[1], 高质量压电薄膜的沉积技术及其压电性能的精确测量方法的可用性, 为拖曳细线阵发展提供了新思路[2][3]。然而, MEMS 器件体积过小, 灵敏度通常较低, 在 -220 dB 左右。而在常规结构水听器中, 影响其电声特性的压电系数 g_{33} 与 g_{31} 的符号相反。因此, 在接收信号时, 两个系数会相互制约, 弱化灵敏度特性。如径向极化压电球壳, 其灵敏度公式就直接体现了 g_{33} 与 g_{31} 相互制约的关系[4]。为了避免 g_{33} 与 g_{31} 符号相反带来的负面影响, 目前通常利用压电复合材料或压电单晶材料特性来解决这个问题。而这些新材料不但制作难度大, 成本也远高于普通压电陶瓷[5]-[7]。

本文采用弱横向耦合厚度振动, 弱化压电系数 g_{31} 横向耦合带来的负面因素。研制直径为 35.6 mm 的拖曳细线阵。利用有限元方法对拖曳细线阵的传感单元进行了仿真研究, 并在水下进行了电声测试, 最后将仿真结果与实验数据进行了对比分析。

2. 拖曳细线阵传感单元设计

2.1. 弱横向耦合厚度振动基础理论

对于压电陶瓷传感单元来说, 如图 1 所示, 当所有的面都接收入射声压, 其灵敏度为 M_h 。

$$M_h = (g_{33} + 2g_{31})t \quad (1)$$

如果传感结构采用的是具有低 g_{31} 耦合振动的新型结构来接收, 此时灵敏度仅为 g_{33} 所确定, 灵敏度可用

$$M = g_{33}t \quad (2)$$

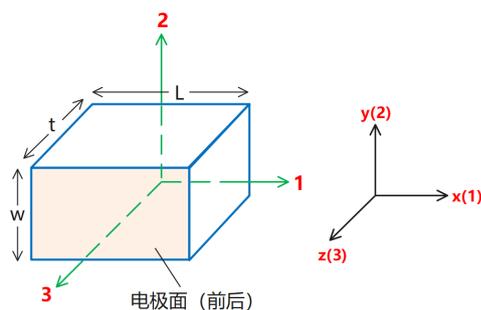


Figure 1. Piezoelectric ceramic sensing unit
图 1. 压电陶瓷传感单元

进行估算。由于避免了 g_{31} 负值带来的影响, 灵敏度会有较大幅度的提升。相比较圆柱形和球形等常规水听器来说, 在尺寸相同的情况下具有更高的灵敏度特性。

径向极化圆柱形水听器灵敏度表达式为

$$M = b \left[g_{33} (1 - \rho) / (1 + \rho) + g_{31} (2 - \rho) \right] \quad (3)$$

其中, b 为外半径, ρ 为内径与外径比值。

取其极限值, 当管壁很厚时, ρ 趋近于 0 时, 表达式为 $M = b(g_{33} + 2g_{31})$, 当管壁很薄时, ρ 趋近于 1, $M = 2bg_{31}$ 。由于 $g_{33} > -2g_{31}$, 而 b 对应厚度振动的 t 。因此, 无论哪种情况, 其绝对值均小于 $g_{33}t$ 。同理, 对于球形水听器, 可得出同样结论。

由此当外形尺寸相当时, 无论柱型或球形水听器其灵敏度均低于纯厚度振动。可以看出, 弱横向耦合厚度振动水听器的技术优势。

2.2. 传感单元有限元设计

基于理论分析, 建立拖曳细线阵传感单元基础结构, 如图 2 所示。下图 2(a) 为传感单元的结构示意图, 同时在图 2(b) 和图 2(c) 中给出剖面图和俯视图。电-声能量转换由两块压电陶瓷 PZT5 完成, 其长度为 l , 单片陶瓷厚 t , 陶瓷宽度在此固定为 5 mm。声屏蔽结构由铝合金 7075-T6 制成, 其壁厚为 1.5 mm, 压电陶瓷和屏蔽结构间隙尺寸为 a , 间隙部分填充聚氨酯。

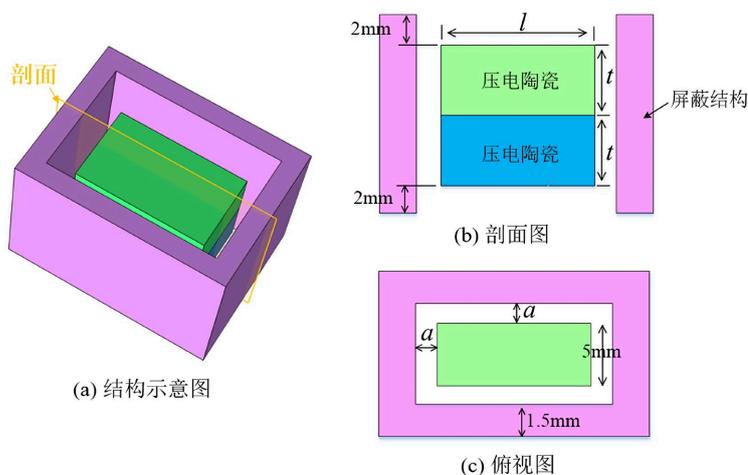


Figure 2. Schematic diagram of sensing unit structure
图 2. 传感单元结构示意图

通过利用 COMSOL 有限元软件建立传感单元 1/4 有限元模型, 如图 3 所示, 分析其水下接收特性。通过改变图 2 中压电陶瓷长度 l 、厚度 t , 以及间隙尺寸 a 分析结构参数对接收灵敏度的影响。

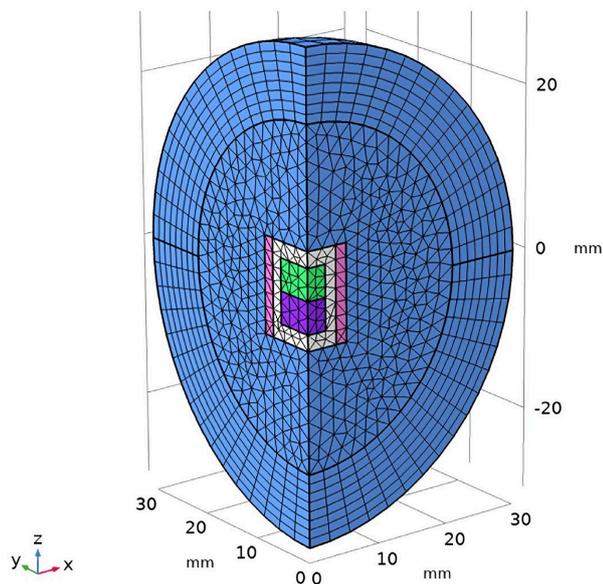


Figure 3. Finite element simulation model
图 3. 有限元仿真模型

首先分析压电陶瓷长度 l 对接收灵敏度的影响, 在此将宽度定为 5 mm, 间隙尺寸 a 定为 1.5 mm, 单片厚度 t 定为 4.5 mm。由图 4 可知, 随长度 l 从 9.5 mm 逐渐增加到 12.5 mm, 接收灵敏度从 -202 dB 下降到 -204.8 dB。

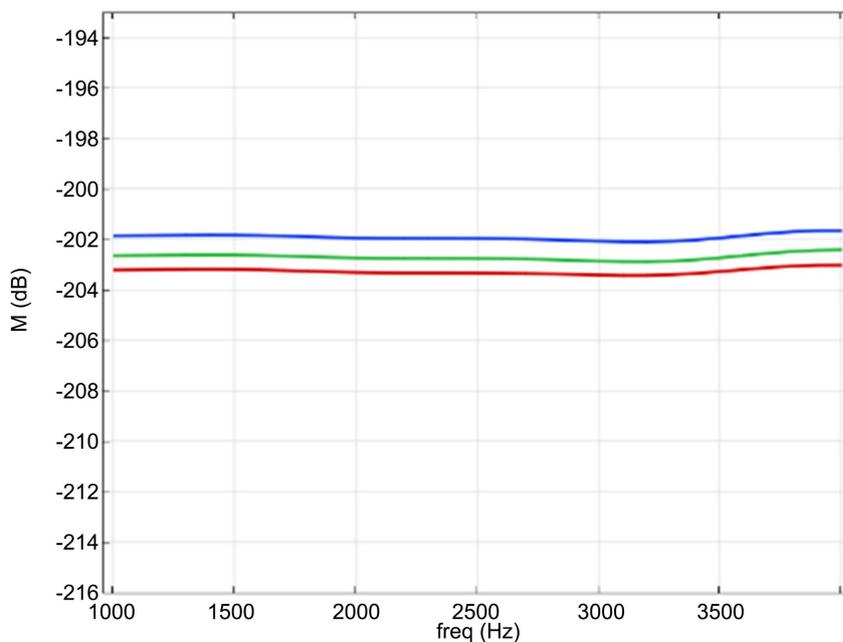


Figure 4. Effect of piezoelectric ceramic length l on receiving sensitivity
图 4. 压电陶瓷长度 l 对接收灵敏度的影响

图 5 为压电陶瓷厚度 t 对接收灵敏度的影响, 在此将长度定为 9.5 mm, 宽度定为 5 mm, 间隙尺寸 a 定为 1.5 mm, 由图 5 可知, 随单片陶瓷厚度 t 从 1.5 mm 逐渐增加到 4.5 mm, 接收灵敏度从 -212.8 dB 增加到 -202 dB。

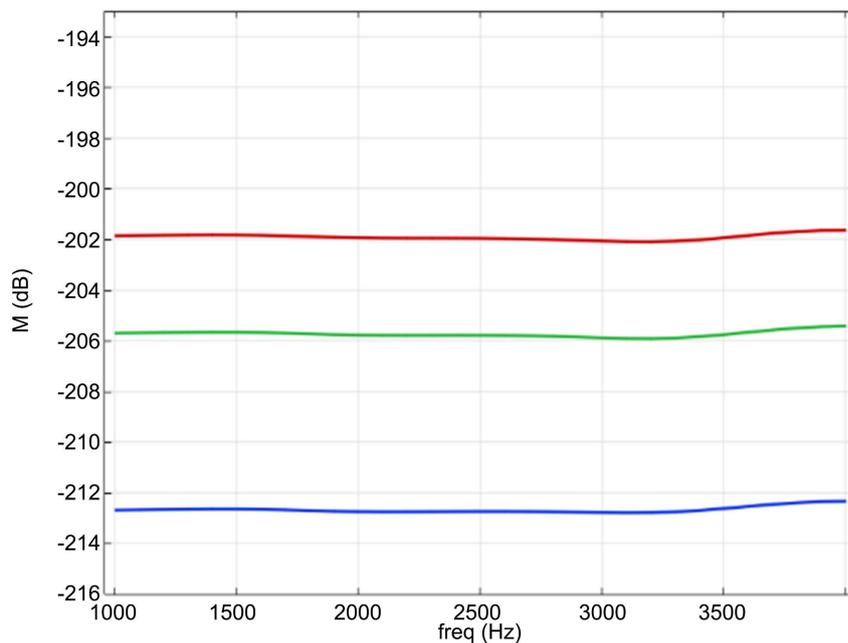


Figure 5. Effect of thickness t of monolithic piezoelectric ceramic on receiving sensitivity
图 5. 单片压电陶瓷厚度 t 对接收灵敏度的影响

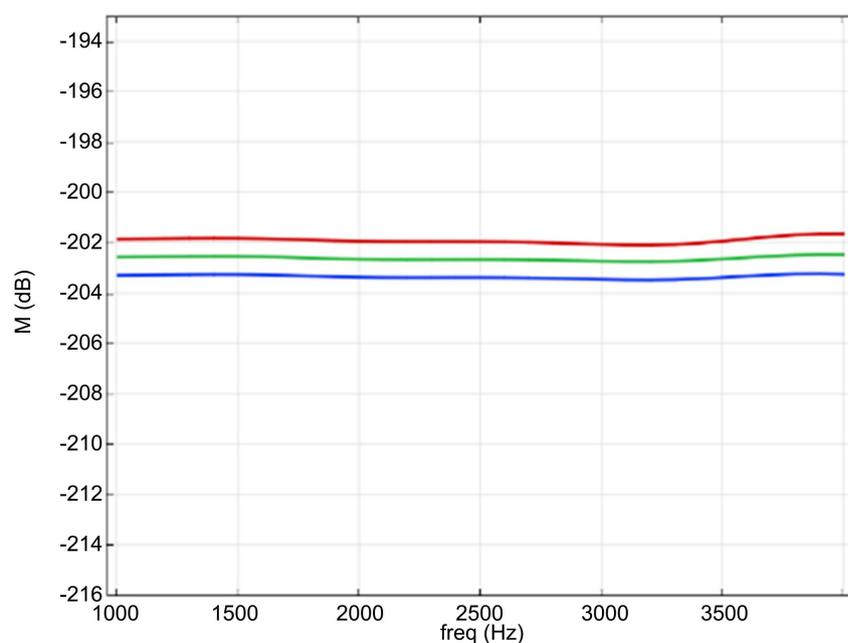


Figure 6. Effect of gap size a on receiving sensitivity
图 6. 间隙尺寸 a 对接收灵敏度的影响

图 6 为间隙尺寸 a 对接收灵敏度的影响, 在此将宽度定为 5 mm, 单片厚度 t 定为 4.5 mm, 长度 l 定为

9.5 mm。由图 6 可知, 当间隙尺寸从 0.5 mm 逐渐增加到 1.5 mm 时, 接收灵敏度逐渐由 -203.3 dB 增加到 -202 dB。

由以上分析可知, 减小压电陶瓷的长度 l 、增加单片压电陶瓷的厚度 t 、增加间隙尺寸 a 均能提高接收单元的灵敏度。

考虑到尺寸限制并满足接收灵敏度指标要求, 经过优化设计后, 将压电陶瓷长度 l 定为 9.5 mm, 宽度定为 5 mm, 厚度 t 定为 4.5 mm, 间隙 a 定为 1.5 mm, 屏蔽结构壁厚 1.5 mm, 此时接收单元的灵敏度曲线如图 7 所示, 灵敏度约为 -202 dB。

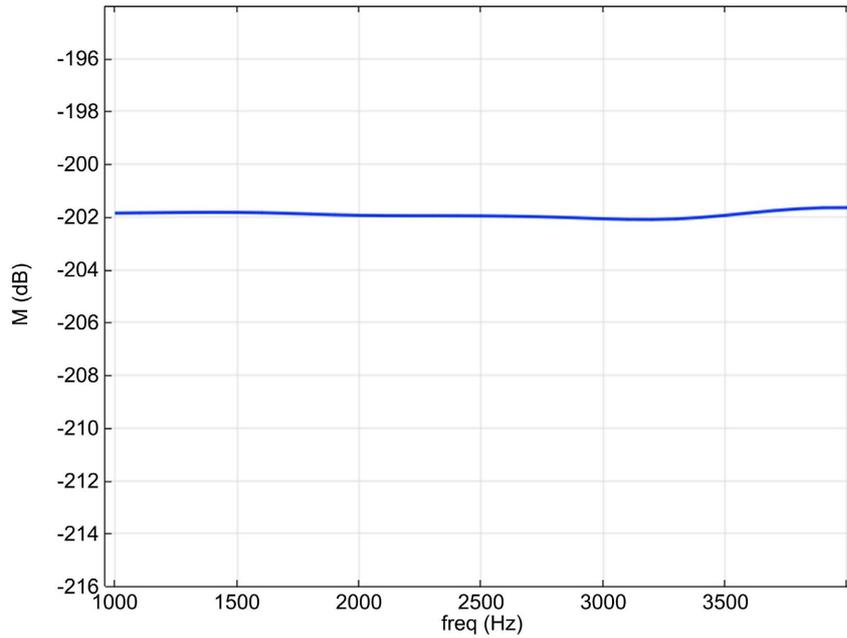


Figure 7. Optimized sensitivity curve
图 7. 优化后的灵敏度曲线

为了模拟传感单元可工作的最大工作深度, 这里对其进行了静压力分析, 如图 8 所示。通过对其在结构所有外表面施加 60 MPa 的压力, 其受到的最大应力为 400 MPa, 由于铝合金 7075-T6 的屈服强度为 550 MPa, 因此所设计的接收单元结构可耐 6000 米。

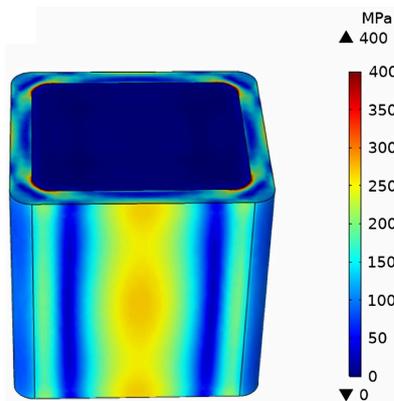


Figure 8. Static pressure analysis of sensing unit
图 8. 传感单元静压力分析

3. 拖曳细线阵的研制

3.1. 传感单元的研制

传感单元的制作是拖曳细线阵核心工艺, 包括一致性保障、电磁屏蔽。一致性首先要保障压电元件的一致性, 可采用电容、导纳等指标的控制进行挑选。电磁屏蔽采用金属网和金属壳结合的方式将压电元件包裹其中。其结构如图 9 所示。

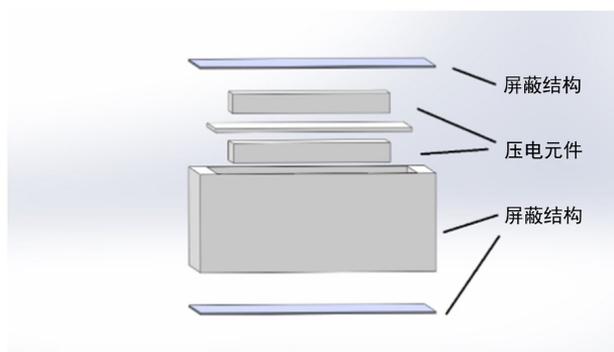


Figure 9. Sensing unit structure
图 9. 传感单元结构

基于传感单元的结构, 对压电片进行了粘接, 如图 10 所示。



Figure 10. Bonded piezoelectric elements and metal casing
图 10. 粘接好的压电片及金属壳

对于灌封好的传感单元阵元与前置放大器共同组成阵元, 如图 11 所示。



Figure 11. Diagram of single array element
图 11. 单一阵元图

3.2. 拖曳细线阵的研制

对于阵列, 本项目主要采用液体缆为主要成阵填充方式。这里设计了可靠的充油方法和专用工具, 使之能够在细管中快速填充并排出阵列内部空气, 避免气体残留对水听器阵元接收声波的影响。同时设计了成缆的水密问题, 防止阵列内部油体渗出或进水, 降低阵列的可靠性。采用金属封堵外观胶体的方式。其组成结构及最终细线阵样机如图 12 所示。



Figure 12. Array composition and physical object
图 12. 阵列组成及实物

4. 拖曳细线阵的电声特性测试

比较法测试阵元灵敏度, 是表征阵元声学特性最简单可靠的方法。通过比较待测阵元与标准水听器的输出, 可直接测试出阵元的灵敏度特性。图 13 为在消声水池对细线阵传感单元接收灵敏度进行测试的现场, 及测试出的灵敏曲线。

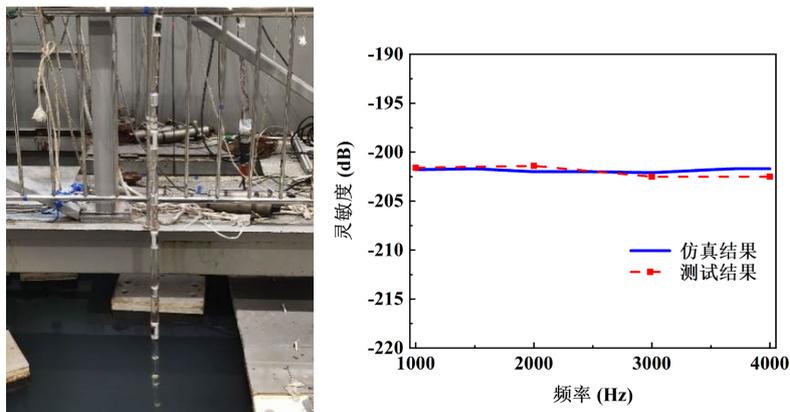


Figure 13. Towed thin-line array tested in anechoic tank
图 13. 消声水池测试拖曳细线阵

从测试数据与仿真结果可以看出, 实际灵敏度特性与仿真符合较好, 整体离散度不超过 1 dB。这与水声测量的不确定度是相关的。同时验证了设计方法的准确性。

5. 结论

本文提出了一种基于弱横向耦合厚度振动传感单元的新型拖曳细线阵。通过理论分析、仿真设计, 设计了 8 阵元的拖曳细线阵样机, 并在水声水池进行了电声性能测试, 灵敏度约为 -202 dB, 与仿真设计性能一致。同时也验证了弱横向耦合厚度接收模式的有效性, 为新型水下接收设备提供了新思路。

参考文献

- [1] Korobova, N. (2017) Piezoelectric MEMS Technologies. In: Uchino, K., Ed., *Advanced Piezoelectric Materials*, Elsevier, 533-574. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102135-4.00014-x>
- [2] Wang, Z., Miao, J., Tan, C.W. and Xu, T. (2008) Fabrication of Piezoelectric MEMS Devices—From Thin Film to Bulk PZT Wafer. *Journal of Electroceramics*, **24**, 25-32. <https://doi.org/10.1007/s10832-008-9454-x>
- [3] Kanno, I. (2018) Piezoelectric MEMS: Ferroelectric Thin Films for MEMS Applications. *Japanese Journal of Applied Physics*, **57**, Article ID: 040101. <https://doi.org/10.7567/jjap.57.040101>
- [4] 王文龙, 笪良龙, 尹航. 基于球形压电陶瓷的耐压水听器[J]. 应用声学, 2020, 39(2): 268-274.
- [5] Teng, D., Li, Y. and Yang, H. (2020). Comparison between 31-Mode and 33-Mode Thin-Walled Piezoelectric Tube Hydrophones. *Global Oceans 2020: Singapore-U.S. Gulf Coast*, Biloxi, 5-30 October 2020, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ieeconf38699.2020.9389084>
- [6] 程东旭, 岳晴雯, 周志勇, 等. 基于 PZFlex 的 1-3 压电复合材料横向振动模仿真[J]. 压电与声光, 2022, 44(3): 357-360+367.
- [7] Je, Y., Sim, M., Cho, Y., Lee, S. and Seo, H. (2023) Theoretical and Experimental Studies on Sensitivity and Bandwidth of Thickness-Mode Driving Hydrophone Utilizing a 2-2 Piezoelectric Single Crystal Composite. *Sensors*, **23**, Article No. 3445. <https://doi.org/10.3390/s23073445>