

【引用格式】黄志浩. 利用压电效应进行水下声能量收集的研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6 (5): 638-646.

利用压电效应进行水下声能量收集的研究

黄志浩^{1, 2}

(1. 中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003;
2. 清江创新中心, 湖北 武汉 430076)

摘要 为了解决水下低功耗无人设备的供能问题, 给出了一种针对水下航行设备所发射特定频段的水声信号进行捕获和能量收集的方法。对方法中所涉及的能量收集器进行了数学建模与仿真分析, 证明方法的理论可行性。最后基于仿真结果与设计参数对系统进行试验设计, 发现水声信号在 400 Hz, 186 dB 时, 采用 30 mm×40 mm 的单涂层压电陶瓷可以产生最大输出电压, 为 2.69 V。使用能量收集器对该能量进行收集储存, 测得其最大输出功率为 315 nW, 证明该方法切实可行。

关键词 压电效应; 水下远程供能; 微型能量收集

中图分类号 TB565⁺¹ 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2023)05-0638-09

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.05.015

Research on Underwater Acoustic Energy Harvesting by Piezoelectric Effect

HUANG Zhihao^{1, 2}

(1. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China; 2. Qingjiang Innovation Center, Wuhan 430076, China)

Abstract In order to solve the energy supply problem of underwater low-power unmanned equipment, a method of capturing and collecting energy for underwater acoustics signals in specific frequency bands emitted by underwater navigation equipment is presented. The mathematical modeling and simulation analysis of the energy collector involved in the method are carried out to prove its theoretical feasibility. Experiments are carried out based on simulation results and design parameters. It is found that when the underwater acoustic signal is 400 Hz and 186 dB, the maximum output voltage which is 2.69 V can be generated by using 30 mm×40 mm single-coated piezoelectric ceramics. Energy is collected and stored by an energy collector, and the maximum output power is 315 nW, which proves that the method is feasible.

Key words piezoelectric effect; underwater remote power supply; micro energy harvesting

0 引言

微机电系统 (Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 是一类体积小、功耗低、特征长度约为 1 μm 至 1 mm 不等的小型系统, 具备较高的精确度和可控性。自 20 世纪 80 年代末出现至今, MEMS 系统已经被广泛应用于各类产品中, 如手机中的振荡器、麦克风等。在水声领域中, MEMS 技术则被大量应用于各类传感器及换能器的设计中, 如压电换能器、水听器等。这些设备大都继承了 MEMS 系统的低功

耗特点, 仅需较为微小的能量便可以持续稳定长时间工作^[1]。

对于需要在水下大量投放的传感器设备而言, 虽然其系统自身的功耗很低, 但传感器设备本身所携带的能源有限, 故若想要其在能源耗尽后实现再启动, 需要将设备打捞起来进行电源的更换。在水下布放的传感器设备一般体积较小, 打捞十分困难, 且会产生巨额的经济支出。由于这类产品的成本一般较为低廉, 故目前对这些能源耗尽的设备的处理方案为弃之不顾, 转而投放全新的设备取而代

之, 这种方法不但会造成海洋环境的污染, 而且无法保证在应用时的可靠性^[2-3]。基于以上问题, 本文给出了一种解决水下低功耗无人设备供电问题的新途径, 即利用水声能量收集的方法进行远程充电。

水声能量收集, 即利用声波可以在水下低损耗远距离传播的特点, 及其所具有的声压特性, 结合声电转化装置, 进而将声波转化为电能, 并配置储能电路将这部分电能储存起来以备使用, 最终实现能量收集的一种方法。以为水下信标供能为例, 该远程充电的工作过程如图 1 所示。

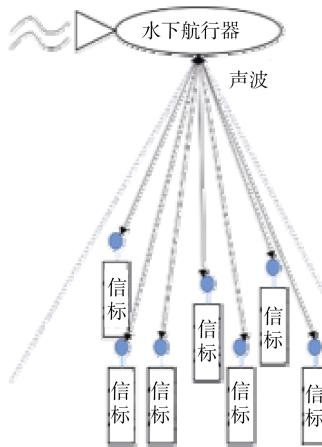


图 1 工作过程示意图
Fig. 1 Working process diagram

水下航行器为水底的信标持续发射某一频段的声波信号, 为信标内部的声电转化装置提供连续的激励, 令其为储能电路供能。可见, 影响能量收集效率的因素主要有 3 方面: 声音在水中的传播损失、能量转化装置的设计及能量收集电路的设计。本文将基于前 2 方面对该远程充电方法进行数学建模和仿真分析, 并最终进行试验, 验证方法的可行性。

1 压电方程与声呐方程

压电方程是描述力学量和电学量转化关系的一组表达式, 其表现形式会因压电振子的机械边界条件和电学边界条件的不同而产生区别, 压电材料进行声电转化的过程称为压电效应。对于以电容为储能元件的能量收集电路而言, 影响其电压上升速率的主要因素为电路的输出电流, 即压电效应中因

极化而发生的电荷转移的多少, 对于在 d_{33} 方向上极化的压电振子而言, 其产生电荷满足式

$$Q = d_{33} \cdot F \quad (1)$$

式中: Q 为压电效应产生电荷, C; d_{33} 为压电常数, C/N; F 为作用于振子 d_{33} 方向上的力, N。从式(1)可以看出, 影响压电效应电荷产生的因素为压电常数 d_{33} 和作用力 F , 压电常数主要受压电材料自身的影响, 在振子类型确定时便可视为一常数, 故受声压影响的变量为 F 。

声波在水中传播满足声呐方程, 即

$$SL - TL - (NL - DI) = DT \quad (2)$$

其中: 传播损失 TL 满足

$$TL = 10K \lg r + \alpha r \quad (3)$$

式中: K 为随波阵面变化而改变的常量, 当声波为球面波时, $K=2$; r 为声源与目标的距离, m, α 为海水声吸收系数, dB/km, 其主要受声波频率 f 影响, 满足^[4]

$$\alpha = \frac{0.036f^2}{f^2 + 3600} + 3.2 \times 10^{-7} \cdot f^2 \quad (4)$$

由式(4)可知, 当声信号的频率较低时, 海水声吸收系数 α 可忽略不计, 故应选择低频声波作为能量的载体。式(2)中的声源级 SL 满足

$$SL = 170.8 + 10 \lg(\eta P) + DI_T \quad (5)$$

式中: η 为换能器的声电转化效率; P 为换能器的电功率; DI_T 为指向性指数。

压电材料对激励的响应情况称为压电材料的灵敏度, 由 M 表示, 用 dB 表征其大小。灵敏度为 M 的压电材料表示当作用于其表面的声压级为 M 时, 其可输出 1 V 的电压。

考虑水下航行器可产生 190 dB 的声源级, 产生声波的频率为 1 kHz, 传播距离 $r=100$ m, 代入式(2)和式(3)中, 可以得到作用于压电材料表面的声压级 $L_p=170$ dB。水中的参考声压为 1 μ Pa, 故 170 dB 对应声压为 316.23 Pa。若选择压电材料 PZT-5H 为压电振子, 其 $d_{33}=670 \times 10^{-12}$ C/N, 设其尺寸规格为 10 mm × 10 mm × 10 mm, 则其正向面积为 10^{-4} m², 根据压强定义式, 得到此时 $F=0.32$ N。将 $F=0.32$ N 代入式(1)中得到此时 $Q=2.144 \times 10^{-10}$ C。根据电流定义式, 此时该材料受 1 s 激励时的输出

电流为 $I=2.144 \times 10^{-10}$ A。若该片压电陶瓷的灵敏度为 -170 dB，则其可以产生 1 V 的输出电压，此时计算输出功率为 0.21 nW。

单片压电陶瓷的输出功率较低，但其体积小，可以大量堆叠使用，经计算，仅需 0.01748 m^3 的压电陶瓷便可以产生 0.2 mW 的输出功率。同时此处的计算并未利用其谐振特性，通过一些方式提高同等声源级下作用于压电材料表面的声压便可以大幅度提高系统的输出，故选择合适的能量转换结构是水声能量收集的研究核心。

2 能量转换装置

2.1 悬臂梁式压电能量转换器

悬臂梁式压电能量转换器是最为常用的能量收集模型，其一般结构与等效模型如图 2 (a) 与图 2 (b) 所示^[5-6]。

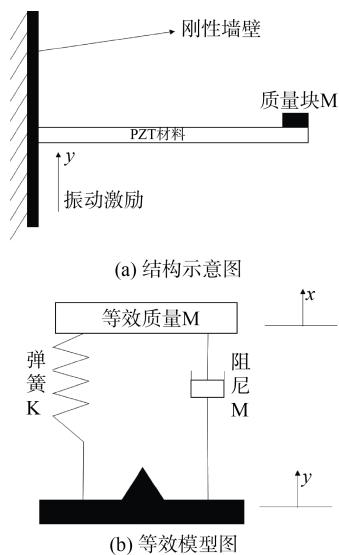


图 2 悬臂梁与等效模型

Fig. 2 Cantilever beam and equivalent model

可见，悬臂梁结构可视为一由弹簧-质量块构成的二阶系统，建立其运动方程，经推导后可以得到系统的最大输出功率为^[7]

$$P_{\max} = \frac{mY^2\omega_n^3}{4\zeta} \quad (6)$$

式中：m 为系统等效质量；Y 为激励幅度； ω_n 为系统本征频率，受系统的刚度和质量影响； ζ 为系统阻尼比。可见，当激励和阻尼比一定时，提高系统

的等效质量或是本征频率都可以大幅度地提高系统的功率输出。

为了更好地分析压电材料的能量产生过程，这里选择使用 Comsol 对该过程进行仿真分析^[8-10]，首先对压电陶瓷进行选型。这里选用 3 种压电材料进行试验，将其命名为 A, B, C 3 类。3 类压电材料均以纯铜为基板，PZT-5H 为压电材料。A 类由 $60\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 的基板和单涂层的 $40\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 的 PZT-5H 构成；B 类为双涂层结构，两涂层位置对称，其余参数与 A 类一致；C 类由 $70\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 的基板和 2 层 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$ 的压电陶瓷构成。

该仿真过程涉及 3 种物理场：压力声学、固体力学、静电场，包含声-结构及压电效应 2 种多物理场耦合方式。压电材料采用映射-扫掠的方式进行网格划分，外围水域网格选择自由四面体网络进行绘制，所有网格最大尺寸为波长的 $1/3$ 。设外部水域边界为硬声场边界，压电材料本构关系为应力-电荷型，初始电荷、压力、形变均为 0，计算相对容差 0.001。

分别令 3 种材料单端约束，置于一体积远大于压电陶瓷自身体积的水域中，令水中声速为 1500 m/s ，忽略温度等因素对水中声速及材料的影响，首先确定 3 类压电材料的本征频率。研究过程中发现压电材料不同的振动模态会对应不同的本征频率，在单边约束的条件下，其中 3 种振动模态如图 3 所示。

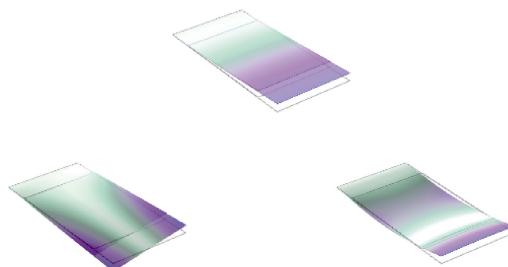


图 3 3 种振动模态

Fig. 3 3 modes of vibration

由于在压电陶瓷自身体积较小，在声压场中可视为各向同性均匀受力，故选择第 1 种振动模态对应的本征频率进行分析，在无阻尼条件下 3 类压电

材料的特征频率分别为 37.626 Hz, 366.28 Hz, 179.13 Hz。在压电振子上表面施加大小为 1000 Pa, 即 180 dB 的声压, 该声压以“声载荷”的形式均匀施加于压电材料, 其中 A 类压电陶瓷上表面声压如图 4 所示, 该值保持恒定且不随频率变化。为研究机械阻尼对系统能量产生情况的影响, 此处引入 0.01 的损耗因子作为对比项, 损耗因子定义为系统运行 1 个周期后损耗的能量与周期最大储能之比, 0.01 的损耗因子即系统工作一周期后能量损失 1%。对系统进行频域分析, 研究频率设置在系统特征频率附近, 步长 4 Hz, 得到 3 类压电材料的电压输出情况如图 5 (a) – (d) 所示, 所得到电压均为峰峰值。

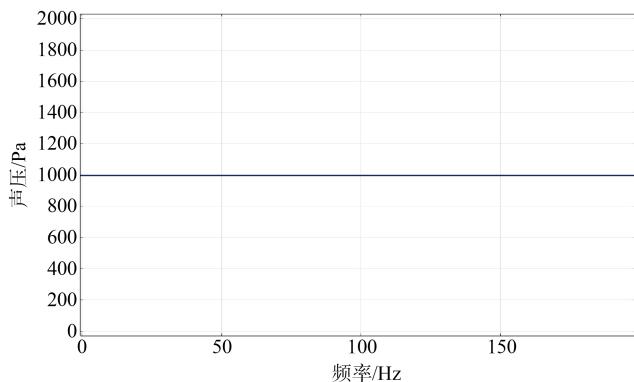


图 4 A 类压电陶瓷上表面声压值

Fig. 4 Sound pressure value of upper surface of Class A piezoelectric ceramics

从图中可以看出, 压电材料在特征频率附近的电压输出要远大于其余频段, 峰值处甚至要高于常态数十倍, 仿真过程中由于设置的压电陶瓷品质因数 Q 较高, 故导致谐振峰较尖, 谐振带来的增益频带较窄。同时在研究中发现, 引入阻尼后会使系统在进行特征频率计算时含有复数部分, 同时其实数部分几乎不发生偏移, 这是由于引入阻尼后的振动运动中, 若振子上 2 点的位移处所处的相角不一致, 会导致该 2 点不同时达到谐振峰值。这里以 C 类为例, 给出了损耗因子不同时的电压输出情况, 可以看出随着损耗因子的提高, 压电陶瓷的电压输出呈现出非线性的下降趋势, 同时其谐振频率也未发生偏移。故为了获取更大的输出电压, 在实际的应用选型过程中应尽量选用低阻尼材料。

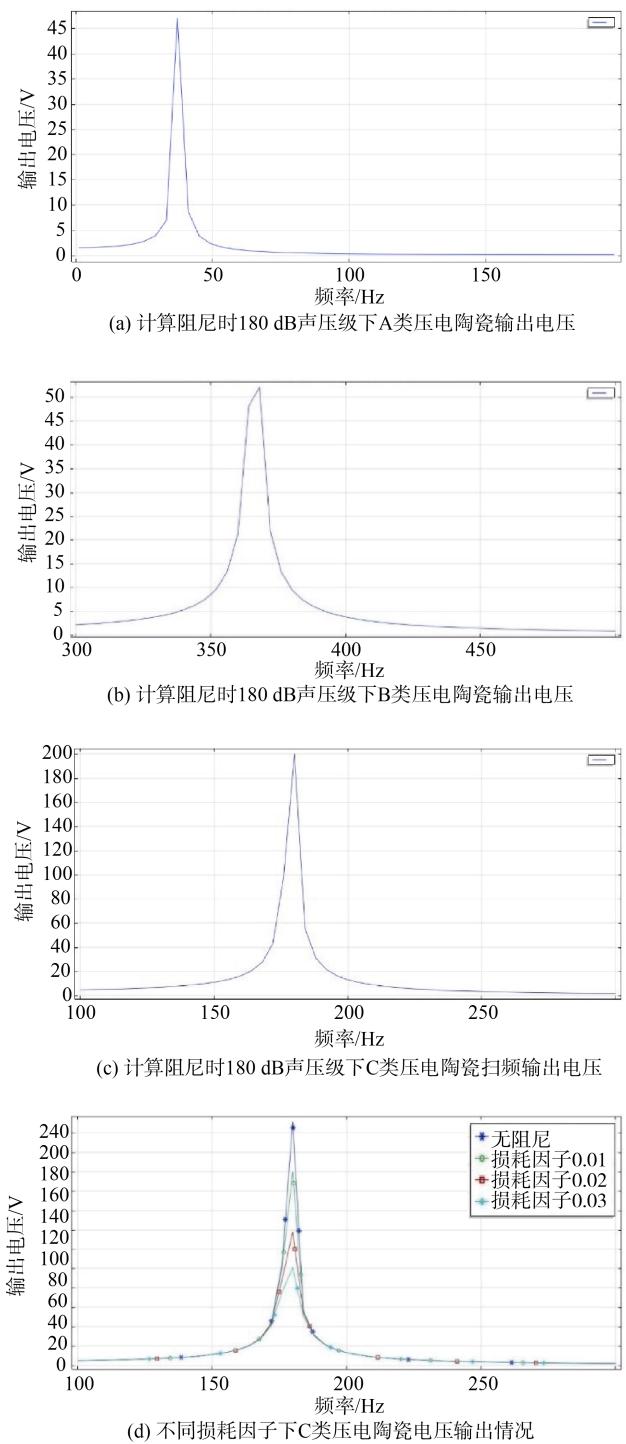


图 5 3 类压电材料电压输出

Fig. 5 Voltage outputs of 3 kinds of piezoelectric materials

2.2 双夹持式压电能量转换器

双夹持结构也是一种较为常见的能量采集器, 其一般结构模型如图 6 所示。

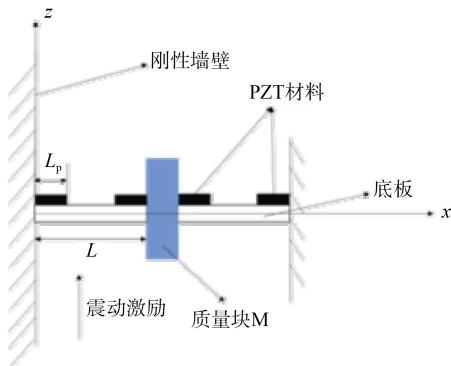


图 6 双夹持式结构模型

Fig. 6 Double clamping structure model

与悬臂梁式结构类似，双夹持式也是由金属底板、PZT 材料、质量块构成，但双夹持式的自由运动区域由梁的边缘转移至基础梁中心部分。建立如图 6 所示的坐标系，建立状态方程，得到系统的平均输出功率为^[11]

$$\bar{P}_p = \frac{E(V_p^2)}{R_p} \quad (7)$$

式中： R_p 为系统外载荷； $E(V_p^2)$ 为系统输出电压平方的数学期望，可由式（8）确定。

$$E(V_p^2) = \left(\theta \frac{R_p R}{R + R_p} \right)^2 \frac{\pi S_0}{c_m + \frac{\theta^2 R_p R}{m_e (R + R_p)}} \quad (8)$$

式中： S_0 为加速度谱密度； θ 为压电传递因子； m_e 为系统等效质量； c_m 为系统的机械阻尼； R 为压电系统等效电阻，该阻值大小与系统本征频率成反比。分析式（8）与式（9）可知，提高系统输出功率的方式仍然为提高系统的本征频率，或是提高外激励幅度，即提高作用于系统表面的声压。同样，对双夹持式压电陶瓷的发电过程用 Comsol 进行仿真分析，仍然选用上文提及的 A, B, C 这 3 类压电陶瓷，得到 3 种不同的振动模态，如图 7 所示。

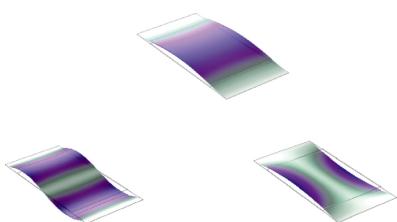
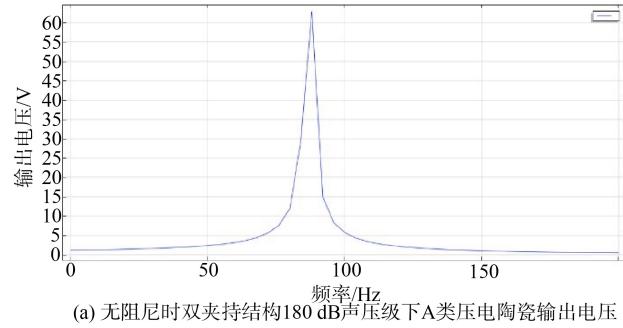
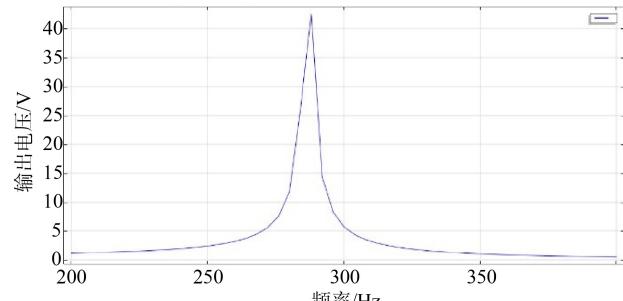


图 7 双夹持式 3 种振动模态

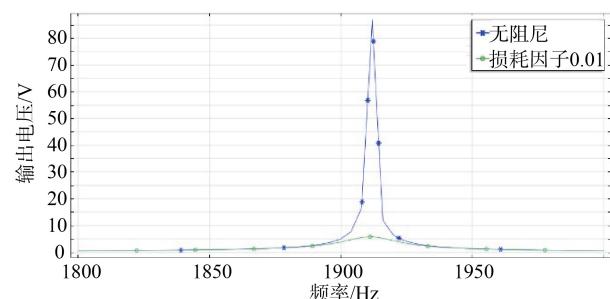
Fig. 7 3 vibration modes of double clamping structure



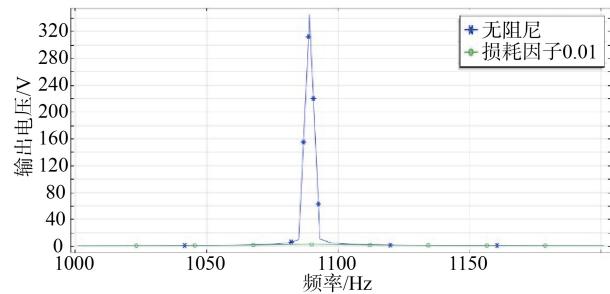
(a) 无阻尼时双夹持结构180 dB声压级下A类压电陶瓷输出电压



(b) 计算阻尼时双夹持结构180 dB声压级下A类压电陶瓷输出电压



(c) 双夹持180 dB声压级下B类压电陶瓷扫频输出电压



(d) 双夹持180 dB声压级下C类压电陶瓷输出电压

图 8 双夹持下 3 类压电陶瓷的电压输出

Fig. 8 Voltage outputs of 3 kinds of piezoelectric ceramics with double clamping structure

根据实际的物理过程选择第 1 种振动模态进行分析，3 类压电陶瓷对应的谐振频率分别为 266.74 Hz, 1 911.4 Hz, 1 089.1 Hz，可以看出双夹持结构的谐振频率要明显高于悬臂梁结构，在振子

表面施加 180 dB 的声压激励, 引入损耗因子为 0.01 的阻尼, 得到 3 类压电陶瓷的电压输出情况如图 8 所示。

比较图 5 与图 8 可以发现, 阻尼不会让 2 种夹持结构的压电陶瓷的特征频率发生偏移, 在同等激励下, 双夹持结构的电压输出要优于悬臂梁结构, 但由于双夹持所处的谐振频率较高, 导致在较高频率的信号激励下阻尼对系统输出电压的影响要大得多, 即使损耗因子只有 0.01, B 类与 C 类的电压输出也都发生了较大幅度的下降。故 2 种结构实际上各自存在优势区间, 需针对具体的使用情况对结构进行选择。

3 能量收集试验

试验在声驻波管中进行, 其基本结构如图 9 所示, 由驻波管、发射换能器、信号源及功率放大器 4 部分组成, 驻波管全长约 1.2 m, 发射换能器高约 0.3 m, 试验时用水将驻波管注满, 令信号源发射正弦波。

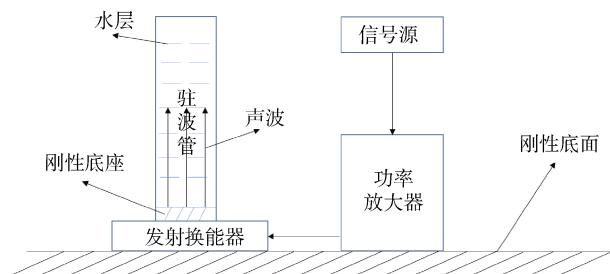


图 9 声驻波管构成

Fig. 9 Structure of acoustic standing wave tube

首先需确定发射换能器的工作频带, 选用 8103 标准水听器进行测量, 其灵敏度约为 -210 dB, 由于其较低的灵敏度, 在声源级较小时无法准确的测量输出电压, 故需配合测量放大器和带通滤波器使用, 扫频从 10 Hz 开始, 每次做 1.25 倍频, 每个频率保持 10 s, 用式 (9) 计算声源级, 得到的工作频谱如图 10 所示。

$$SL - G_{in} + G_{out} + M = 20 \lg U \quad (9)$$

式中: SL 为声源级; G_{in} 为输入增益; G_{out} 为输出增益; M 为标准水听器灵敏度; U 为水听器输出电

压。分析其工作频谱可知: 其工作频带为 50 Hz 左右, 200~400 Hz 之间, 在该区间内可以产生最大的声源级; 而在 500 Hz 之后, 其产生的声源级下降约 20 dB。试验中选用的压电陶瓷和铜板的器材参数如表 1 所示。

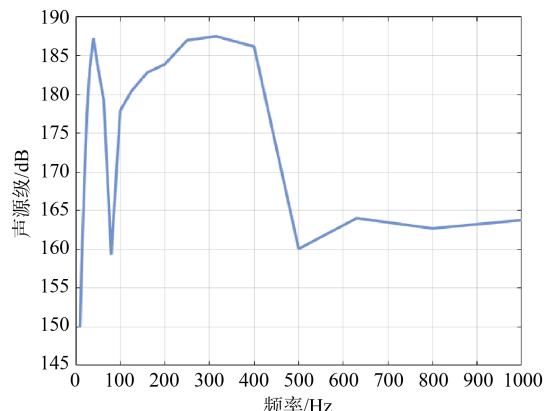


图 10 发射换能器工作频谱

Fig. 10 Operating spectrum of transmitting transducer

表 1 试验所用器材参数

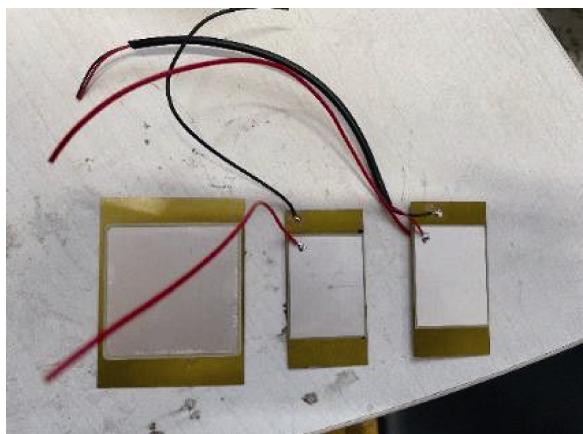
Table 1 Test equipment parameters

名称	铜板	PZT-5H
杨氏模量/ (N/m ²)	11.2×10^{10}	5.6×10^{10}
密度/cm ³	8.78	7.5
泊松比	0.35	0.36
声速/ (m/s)	8 960	3 900
品质因数	-	70
$d_{33}/ (C/N)$	-	670×10^{-12}
s_{33}	-	20.7

由于试验的发电环境在水中, 而压电陶瓷本身无法在水中正常工作, 且其表面的电极会因浸水而产生短路, 为同时保证压电陶瓷性能不受过大影响, 且使其发电过程完全处于隔水的环境下, 选择使用水密绝缘胶带将压电陶瓷表面缠紧的形式使压电陶瓷与水层分离, 将导线从上方引出, 用时使用水密胶带包好。试验所用的压电陶瓷和处理完的情况如图 11 所示。

将水密处理好的压电陶瓷从声驻波管上方置入, 放于距发射换能器约 1 m 处。为分析频率对压

电陶瓷发电性能的影响，在 400~1 000 Hz 间以 50 Hz 为间隔进行扫频测量，每个频率保持 10 s，所得结果如图 12 所示。



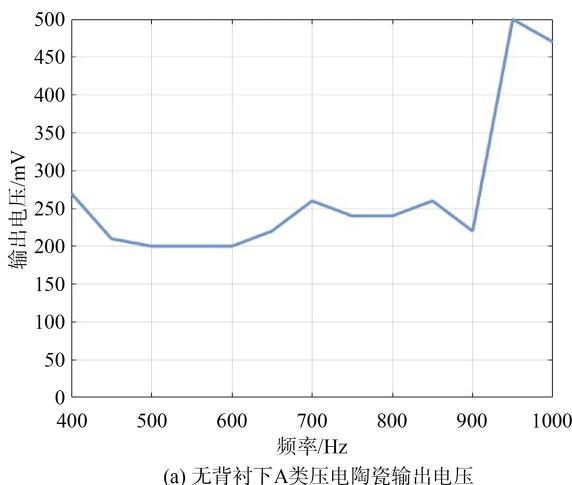
(a) 压电陶瓷



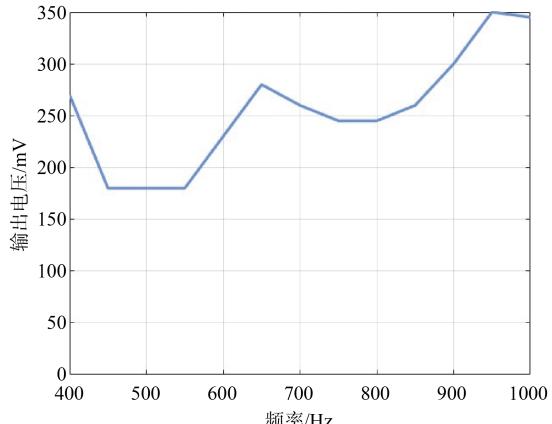
(b) 水密处理后的压电陶瓷

图 11 压电陶瓷及水密处理情况

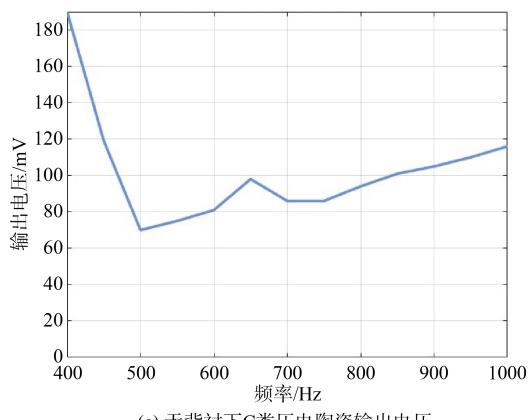
Fig. 11 Piezoelectric ceramics and water tight treatment



(a) 无背衬下A类压电陶瓷输出电压



(b) 无背衬下B类压电陶瓷输出电压



(c) 无背衬下C类压电陶瓷输出电压

图 12 3 类压电陶瓷的扫频结果

Fig. 12 Frequency sweep results of 3 kinds of piezoelectric ceramics

其中，C 类压电陶瓷的电压输出与预想情况一致，其输出电压和激励信号的幅值成正相关，当激励的幅值降低时其输出电压也随之下降。但 A 类与 B 类压电陶瓷的输出情况则有所不同，虽然发射换能器在 400 Hz 处的声源级要超过 1 000 Hz 处近 20 dB，但 A 类与 B 类压电陶瓷在 950 Hz 处的输出电压要高于 400 Hz 处，表明此时由绝缘胶带和压电陶瓷构成的整体接近了其谐振频率，与仿真结果一致，谐振频率对压电陶瓷输出电压的影响要高于激励信号幅值的影响。

由于压电陶瓷本身质量较轻，在无附加背板的情况下声压对压电陶瓷的作用效果会大幅度减弱，即导致能量收集效率降低。为解决这一问题，需为压电陶瓷引入背板，以提高声压作用效果。背板的作用除提高系统等效质量外，还可以实现对压电陶瓷的双夹持固定。这里选择使用一质量远大于

压电陶瓷本身的电路板作为背板, 将压电陶瓷两端焊接至电路板上以构成双夹持模式, 如图 13 所示, 并将其完全固定, 随后利用如图 11 (b) 的方式对其进行水密处理, 得到 A 类与 C 类的电压输出情况如图 14 所示。

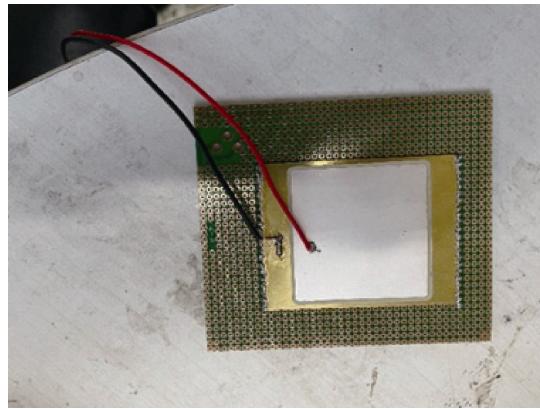
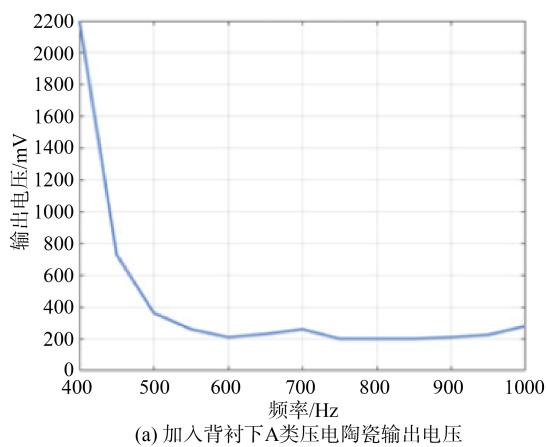


图 13 加入背板后的压电陶瓷

Fig. 13 Piezoelectric ceramics with backplane



(a) 加入背衬下A类压电陶瓷输出电压

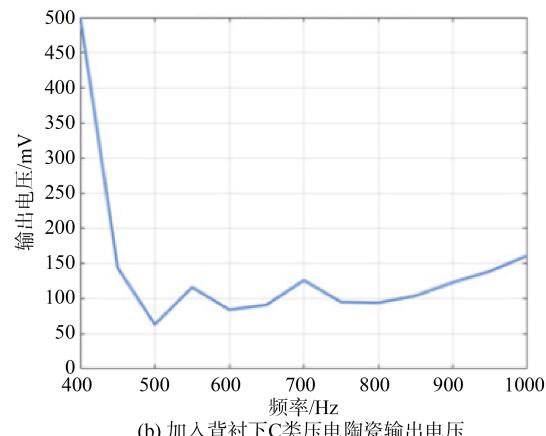
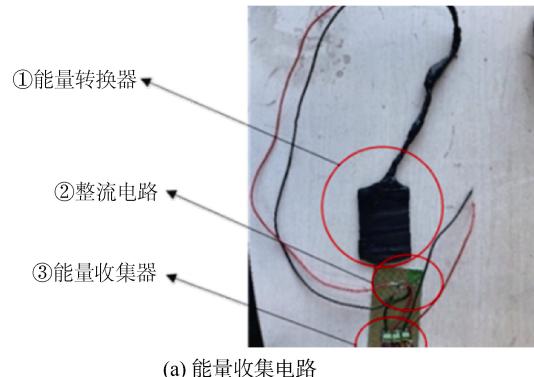


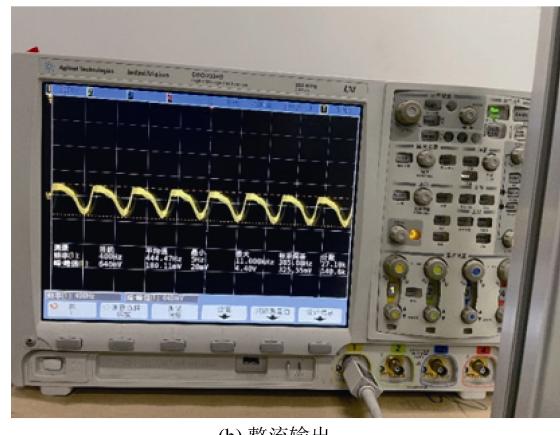
图 14 加入背板后电压输出

Fig. 14 Voltage output after adding the backplane

与图 12 相比, 加入背板后的压电陶瓷在同等激励下的电压输出有了明显的提高, 同时由于系统等效质量的提高, 其谐振频率也从 950 Hz 降低至 400 Hz 附近。针对该种情况下的 A 类压电陶瓷进行能量收集, 试验中使用的能量收集电路及系统的整流输出如图 15 所示。



(a) 能量收集电路



(b) 整流输出

图 15 能量收集电路与整流后的电压输出

Fig. 15 Energy collection circuit and voltage outputs after rectification

电路中选用的整流二极管为 TI 公司生产的 BAS4002ARPPE6327HTSA1, 能量采集板选用 bq25570 能量采集板, 其上装有一 107 钽电容。使用该能量采集器为钽电容充电, 测得其电压上涨速度约为 5 mV/s, 计算后得到此时系统的输出功率, 约为 315 nW。

4 结束语

本文针对水下 MEMS 系统的能源耗尽难以进行能源补给的问题, 提出了一种利用压电效应进行

水下声能量收集的方法。试验中虽然得到的功率较低,仅为315 nW,但试验中所使用的压电陶瓷仅有 $50\text{ mm}\times70\text{ mm}\times4\text{ mm}$,即 $1400\times10^{-8}\text{ m}^3$ 。若需得到1 mW 的功率,仅需集成体积约 $4.4\times10^{-2}\text{ m}^3$ 的能量收集器。通过在较小区域集成大量能量收集单元,令这些能量收集单元工作在其特征频率附近可以使系统产生的能量进一步提高,从而大幅度提高系统的充电速率,实现水下的远距离供电需要。

参考文献

- [1] ZHAO L, YAN L, CHENG J H, et al. The research of inertial navigation system based on submarine space motion[C]// 2008 IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application. Wuhan: IEEE, 2008.
- [2] 刘伯胜, 黄益旺, 雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2019.
- [3] RUAN T W, CHEW Z J, ZHU M L. Energy-aware approaches for energy harvesting powered wireless sensor nodes[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(7): 2165-2173.
- [4] 东海. 海水吸收曲线[J]. 水声译丛, 1976(1): 43-48.
- [5] 邹玉炜, 黄学良, 柏杨, 等. 基于 PZT 的超声波无接触能量传输系统的研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 144-150.
- [6] 赵冠兴. 基于 PVDF 能量收集器的仿真及制备[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [7] ERTURK A, INMAN D J. 压电能量收集[M]. 舒海生, 赵丹, 史肖娜, 译. 北京: 国防工业出版社. 2015: 19-32
- [8] 陈劲松, 王亚洲, 翟亚进, 等. 基于 Comsol 的宽带复合棒水声换能器优化研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(3): 101-105.
- [9] 李春熠, 胡安琦, 张格格, 等. COMSOL 仿真在声波谐振管实验中的应用[J]. 大学物理, 2022, 41(11): 58-64, 76.
- [10] MOURA C A, KUBRUSLY C S. The Courant Friedrichs Lewy(CFL) condition[M]. Communications on Pure & Applied Mathematics. Rio de Janeiro: Birkhauser, 2013.
- [11] CAO L M, CAI Y, XU G T, et al. Research on output characteristics of double-ended fixed beam piezoelectric energy harvester under random excitation[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(6): 1075-1083.

(责任编辑: 张曼莉)