

弯曲圆盘驱动的双 Helmholtz 共振腔换能器^{*}

桑永杰^{1,2,3} 蓝 宇^{1,2,3†} 刘茂伊³

(1 哈尔滨工程大学 水声技术重点实验室 哈尔滨 150001)

(2 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 哈尔滨 150001)

(3 哈尔滨工程大学 水声工程学院 哈尔滨 150001)

2019 年 6 月 24 日收到

2019 年 7 月 16 日定稿

摘要 使用双面同相振动的弯曲圆盘换能器驱动双 Helmholtz 共振腔, 既放大了弯曲圆盘换能器弯曲共振频率以下频段的声输出, 又利用两个 Helmholtz 共振腔的同相声源辐射模型实现了在 Helmholtz 共振频率处的“ ∞ ”字形垂直指向性, 实现了低频指向性声发射。阐述了换能器实现“ ∞ ”字形低频指向性发射的机理, 研究了腔体长度、金属圆片厚度及弯曲圆盘边缘简支厚度等关键结构参数对 Helmholtz 共振频率的影响, 求解了换能器的发送电压响应、指向性等参数。依据仿真结果制作了实验样机, 在消声水池中进行了电声性能测试。测试结果显示, 指向性形状及液腔共振频率与仿真结果基本相符。这种由弯曲圆盘驱动的双 Helmholtz 共振腔水声换能器为实现水声换能器小尺寸、低频指向性发射提供了一种技术手段。

PACS 数: 43.38, 43.30, 43.40

Dual-Helmholtz resonator transducer driven by flexural disc

SANG Yongjie^{1,2,3} LAN Yu^{1,2,3} LIU Maoyi³

(1 *Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University* Harbin 150001)

(2 *Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University),
Ministry of Industry and Information Technology* Harbin 150001)

(3 *College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University* Harbin 150001)

Received Jun. 24, 2019

Revised Jul. 16, 2019

Abstract An underwater acoustic transducer with dual-Helmholtz resonator is presented. The acoustic output of flexural disc transducer below its resonant frequency can be amplified by Helmholtz resonators, the “ ∞ ” beam pattern can be obtained due to in-phase radiation of two Helmholtz resonators. Thus, the transducer has the characteristic of low frequency directional transmitting which is difficult for low frequency, small size transducers. The principle of achieving directivity for the low frequency transducer is described. Finite element model is modeled by ANSYS software for studying its acoustic performance. The influence of key structural parameters such as the length of cavity, the thickness of metal disc in flexural disc transducer and the thickness of simply supported structure on Helmholtz resonant frequency have been investigated. The transmitting voltage response and directivity are solved. The prototype is fabricated based on simulation dimension result, transmitting voltage response and directivity are tested in anechoic tank. Test results revealed that the transducer has “ ∞ ” vertical directivity at Helmholtz resonant frequency, the beam pattern and Helmholtz resonant frequency are in good agreement with simulation results. The transducer presented in this paper can provide technical support for low frequency directional transmitting with small size.

^{*} 国家自然科学基金项目(11304057)和水声技术重点实验室稳定支持课题项目(JCKYS2019604SSJS004)资助

[†] 通讯作者: 蓝宇, lanyu@hrbeu.edu.cn

引言

低频发射换能器实现指向性是目前水声换能器设计领域的一个技术难题。由于低频时换能器的声尺寸 $ka < 1$, 典型的低频发射换能器通常在空间上不呈现指向性。在一些水声技术应用领域, 如浅海环境的主动探测和水声通信中, 需利用多个低频发射换能器组成阵列以增加孔径, 产生“ ∞ ”字形垂直指向性以抑制多径干扰。

目前, 能够实现“ ∞ ”字形垂直指向性的水声换能器有溢流圆环换能器、双端开口的 Helmholtz 换能器等。其中 Helmholtz 换能器以其结构简单、成本低等优点在低频、超低频水声技术领域得到了广泛的应用, 吸引了国内外学者开展了大量的研究工作。

Rossby^[1] 等利用压电圆环换能器驱动双端开口的 Helmholtz 共振腔, 实现了在 Helmholtz 共振频率处的“ ∞ ”字形垂直指向性; Butler^[2-3] 利用一组压电圆环换能器驱动同轴嵌套的两个直径、长度均不同的双端开口 Helmholtz 共振腔, 产生了低频、高频两个 Helmholtz 共振, 在两个共振频率处均产生了近似“ ∞ ”形垂直指向性, Hiroshi^[4] 改进了这种换能器的集中参数模型得到了更加符合测试结果的发送电压响应解析结果; Morozov^[5-7] 设计了一种可调谐风琴管式 Helmholtz 声源, 它利用双面辐射的纵振动换能器驱动了两段尺寸相同的 Helmholtz 共振腔, 通过隔板调节 Helmholtz 共振腔的尺寸产生不同的 Helmholtz 共振, 垂直指向性也实现了近似的“ ∞ ”形; 桑永杰^[8] 等利用 Janus 换能器的外辐射面驱动两个尺寸相同的 Helmholtz 共振腔, 称之为外液腔式 Janus-Helmholtz 换能器, 实现了在 Helmholtz 共振频率处近似的“ ∞ ”形垂直指向性。

上述研究工作具有共同的特点: 各换能器都有两个间隔一定距离的同相辐射的辐射口, 在满足一定条件的波长/间距比的情况下, 两个辐射口辐射出的声波在声场远场处叠加, 径向 0° 位置同相叠加声压最大, 轴向 90° 位置则声压最小; 在驱动源选择上, 多采用双面辐射的纵振动换能器或圆环换能器。对于压电陶瓷换能器, 在基频以下的频段, 频率每降低一个倍频程发送电压响应下降约 12 dB^[9], 因此对于压电换能器来说, 远离基频处的发送电压响应非常低。Helmholtz 共振腔的作用就是将压电驱动源共振频率以下频段 (Helmholtz 共振频率附近频段) 的声输出放大。Helmholtz 共振腔的共振频率越接近驱动源的共振频率, 在低频段的声放大作用越明显。纵振

动换能器及圆环换能器自身结构刚度相对较大, 自身的共振频率通常远高于所驱动的 Helmholtz 共振腔的共振频率, 因此在 Helmholtz 共振频率处所获得的声放大效应有限。弯曲共振和 Helmholtz 共振是水声换能器领域常用的两种小尺寸、低频振动模态, 相对于纵振动模态和圆环径向共振模态, 弯曲振动共振频率更接近 Helmholtz 共振频率, 利用弯曲振动模态驱动 Helmholtz 共振腔共振, 可在 Helmholtz 共振频率处获得更大的声放大效应, 更易于实现小尺寸低频、大功率发射。

研究中使用双面辐射的弯曲圆盘换能器驱动两个同尺寸 Helmholtz 共振腔, 利用弯曲共振频率和 Helmholtz 共振频率接近的优势, 提高 Helmholtz 共振腔对驱动源在低频段的声放大效应, 并在低频段获得“ ∞ ”字形垂直指向性, 以满足水声技术领域对小尺寸、低频指向性、大功率发射的水声换能器的需求。

1 弯曲圆盘驱动的 Helmholtz 换能器工作原理

弯曲圆盘驱动的 Helmholtz 换能器结构示意图如图 1(a) 所示。主体部分包括一只双面同相辐射的弯曲圆盘换能器、两个由腔体围成 Helmholtz 共振腔 (也称液腔)。两只三叠片结构的弯曲圆盘边缘简支在质量块上, 弯曲圆盘为空气背衬结构。每个三叠片中的两片压电陶瓷圆片沿厚度方向极化且极化方向相同, 电学上并联连接。两组三叠片结构中的压电陶瓷圆片极化方向相反, 可使两组三叠片弯曲圆盘产生同相的弯曲振动。弯曲圆盘换能器置于圆柱壳金属腔体中间位置, 弯曲圆盘换能器外径边缘与腔体内径边缘留有狭缝并填充隔振材料, 以保持弯曲圆盘换能器振动时的自由边界条件并隔离出两个 Helmholtz 共振腔。其中的压电陶瓷材料为 PZT-4, 金属圆盘材料为轻质金属硬铝, 质量块为重质金属不锈钢, 腔体为 45# 钢。

换能器置于水中时, 腔内充水形成上、下两个尺寸相同的 Helmholtz 共振腔。两个弯曲圆盘同相弯曲振动时, 驱动 Helmholtz 共振腔产生液腔共振, 在两个管口处的声压等幅同相, 因此两个管口的声辐射可看做两个有一定间距的同相声源辐射, 如图 1(b) 所示。此时, 换能器的指向性函数为^[10]:

$$D(\theta) = \left| \frac{\sin(kl \sin \theta)}{2 \sin\left(\frac{kl}{2} \sin \theta\right)} \right|, \quad (1)$$

式中, k 为波数, l 为两个辐射口的间距。 θ 为图 1b 中所示, 在 $l < \lambda$ 时, 式 (1) 所示的指向性图不会出现次极大值, 指向性为近似的“ ∞ ” 形状。对于两端开口的刚性圆柱壳 Helmholtz 共振腔来说, 在不计及管口声辐射带来的腔体长度修正时, Helmholtz 共振频率近似为:

$$f_r = \frac{c}{2l}, \quad (2)$$

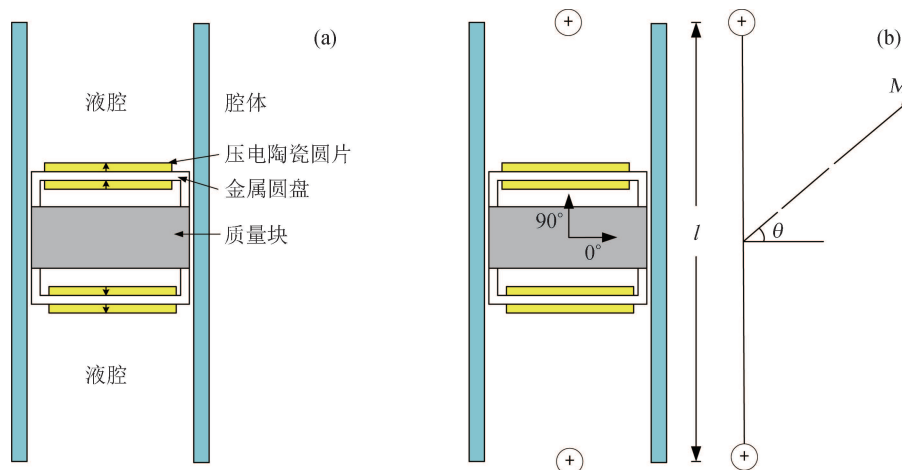


图 1 弯曲圆盘驱动的 Helmholtz 换能器结构示意图及实现指向性原理

2 基于有限元法的发送电压响应及指向性求解

弯曲圆盘驱动的双 Helmholtz 换能器结构形式上较为复杂, 在水中工作时涉及到阻抗底面的 Helmholtz 共振腔共振频率修正、圆柱管波导声场中弯曲圆盘辐射阻抗对自身共振频率的影响、双辐射口互辐射等问题, 使用传统的等效电路法进行电声性能分析难以获得精确的解析结果。因此, 基于 ANSYS 软件分析主要结构参数对换能器的发送电压响应、指向性的影响。

研究中涉及的主要结构尺寸如图 2(a) 所示。使用尺寸为直径 90 mm, 厚度 3 mm 的压电陶瓷圆片和已知内半径 $r_2 = 57.5$ mm 及壁厚 8 mm 的钢质腔体。弯曲圆盘换能器外半径 $r_1 = 55.5$ mm, 即弯曲圆盘换能器外径与腔体内径间隔 2 mm。优化的主要结构尺寸为:

(1) Helmholtz 共振腔的等效长度 l_0 。它决定着两个辐射口的间距, 主要影响 Helmholtz 共振腔的共振频率和换能器的垂直指向性;

(2) 三叠片的边缘简支厚度 d_0 。它决定着三叠片简支边界条件的满足程度, 主要影响三叠片的有效机

式中 c 为共振腔内传播的平面波声速, 若腔体和底面为阻抗壁面, 则需对该声速进行修正^[11-13]。

由式 (2) 可知, 在 Helmholtz 共振频率处的声波波长 $\lambda = 2l$, 也即始终大于两个辐射口的间距 l , 这样式 (1) 中所示的指向性始终不会出现次极大值, 即双端辐射的 Helmholtz 共振腔换能器在 Helmholtz 共振频率处的垂直指向性始终为近似的“ ∞ ” 形状。

电耦合系数、弯曲共振频率及 Helmholtz 共振腔的底面阻抗, 进而影响 Helmholtz 共振腔的共振频率;

(3) 三叠片中的金属圆盘厚度 t_2 。它决定着三叠片的弯曲共振频率及 Helmholtz 共振腔的底面阻抗, 进而影响 Helmholtz 共振腔的共振频率。

在结构优化过程中, 除了优化的结构参数发生变化, 其它主要结构参数均设为定值, 各结构的参数值如表 1 所示。

图 2(b) 为在 ANSYS 软件中建立的换能器流体中的有限元模型。考虑到换能器结构上的轴对称性和上下对称性, 仅建立 1/2 二维轴对称模型, 在上下对称边界处施加对称边界条件以节省求解时间; 在流体边界处使用无限吸收单元, 模拟流体中的自由场。弯曲圆盘驱动的 Helmholtz 换能器在流体中工作时存在两种振动: 弯曲圆盘换能器的弯曲振动和 Helmholtz 共振腔的液腔振动。弯曲振动共振频率通常高于 Helmholtz 共振频率。在弯曲共振频率附近频段, 由于两个辐射口的间距 l 通常大于声波波长 λ , 换能器的垂直指向性图中出现了次极大值, 指向性图不再呈现“ ∞ ” 形状, 因此弯曲振动共振频率附近频段的声辐射特性不在研究范围, 只研究各结构参数对 Helmholtz 共振频率及该共振频率处指向性的影响。

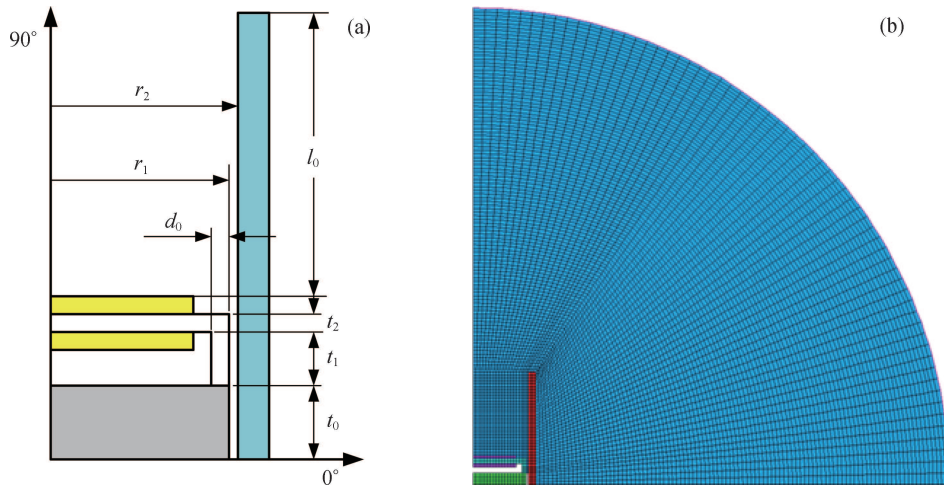


图 2 优化的主要结构尺寸及流体中的有限元模型

图 3 所示的是不同的 Helmholtz 共振腔有效长度 l_0 对 Helmholtz 共振频率的影响。随着腔体有效长度增加, Helmholtz 共振频率逐渐降低。这是符合 Helmholtz 共振频率与腔体有效长度的关系的: 一端刚性封闭的细长圆柱管形状的 Helmholtz 共振腔共振频率的基频可近似为:

$$f_r = \frac{c_0}{4(l_0 + 0.637r_2)}, \quad (3)$$

式中 c_0 为管中传播的平面波声速, 若腔壁和底面为阻抗壁面, 则需对 c_0 进行修正。

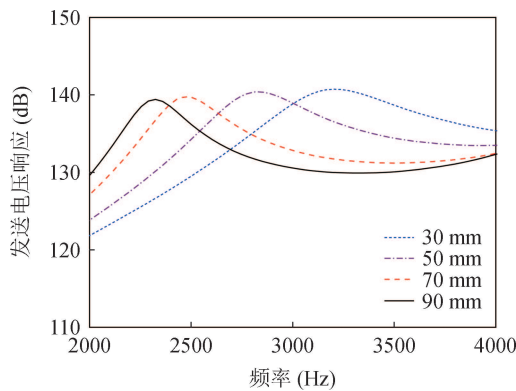


图 3 不同的腔体有效长度对 Helmholtz 共振频率的影响

图 4 所示的是不同的腔体有效长度下, 在对应的 Helmholtz 共振频率处的垂直指向性图。由图 4 可以看出, 总体上在 Helmholtz 共振频率的垂直指向性呈现出了“ ∞ ”形状, 符合第 1 部分关于 Helmholtz 共振频率处垂直指向性恒为“ ∞ ”字形的理论预测。腔体有效长度越长, 90° 方向的凹谷越深, 这意味着弯曲圆盘驱动的双 Helmholtz 换能器在更低频段发射时具有更加明显的“ ∞ ”形垂直指向性, 显示出了这种换能器在低频指向性发射时的优势。

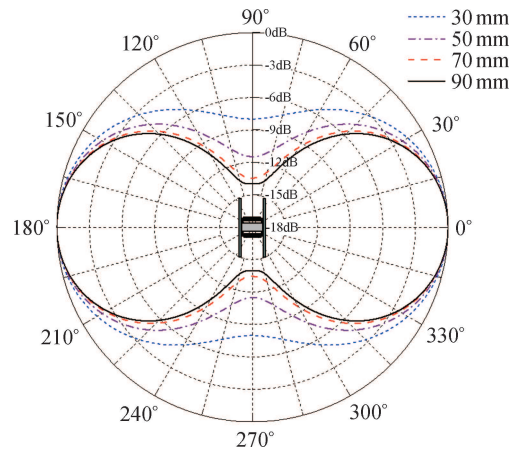


图 4 不同腔体有效长度时对应的 Helmholtz 共振频率处的垂直指向性图

图 5 所示的是两片压电陶瓷圆片之间的金属圆片的厚度改变时对 Helmholtz 共振频率的影响。金属圆片越薄, Helmholtz 共振频率越低, 这一现象反映出: 在弯曲圆盘驱动的双 Helmholtz 换能器中, Helmholtz 共振腔的共振频率不仅只与腔体的尺寸(腔体有效长度、直径)有关, 还与构成腔体的壁面的阻抗特性有关。式 (3) 中描述的 Helmholtz 共振频率与腔体有效长度的关系, 是在腔壁和底面为刚性壁的条件下得出的。对于由弯曲圆盘换能器作为底面的 Helmholtz 共振腔, 边缘简支的弯曲圆盘具有较大的柔顺性, 显然无法视作刚性壁面。弯曲圆盘的机械阻抗可视为附加阻抗并入 Helmholtz 腔的流体顺性中, 等效电路如图 6 所示^[14], 图中 M'_a 和 C'_a 别为弯曲圆盘的等效声质量和等效声顺, R_a , M_a , C_a 分别为 Helmholtz 共振腔的声阻、声质量和声顺。刚性壁面及阻抗底面时 Helmholtz 共振腔的共振频率公式可分别写为式 (4) 和式 (5) 的形式, 也即 Helmholtz 共

振腔的声顺元件并入弯曲圆盘的等效声顺和声质量后, 阻抗底面时的 Helmholtz 共振频率比起刚性壁面时要低, 且弯曲圆盘的金属圆片越薄, 并入 Helmholtz 共振腔的等效声顺越大, 导致 Helmholtz 共振腔的共振频率越低。

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{M_a C_a}}, \tag{4}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{M_a \left(C_a + \frac{C'_a}{1 - \omega^2 M'_a C'_a} \right)}}. \tag{5}$$

图 7 所示的是不同的弯曲圆盘边缘简支厚度对 Helmholtz 共振频率的影响。由图可见, 边缘简支越薄, Helmholtz 共振频率越低, 其原因和金属圆片厚度对 Helmholtz 共振频率的影响相同: 边缘简支厚度越小, 弯曲圆盘的机械顺性越大, 归算到 Helmholtz 共振腔中的等效声顺越大, 因此 Helmholtz 共振频率

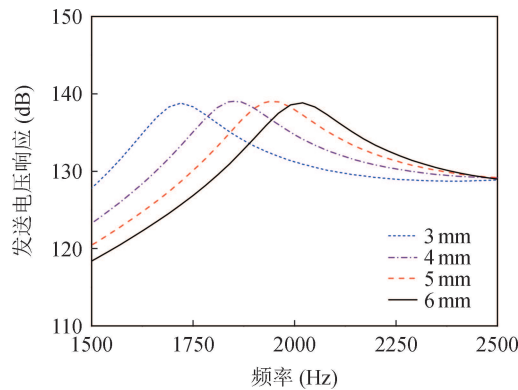


图 5 不同的金属圆盘厚度对 Helmholtz 共振频率的影响

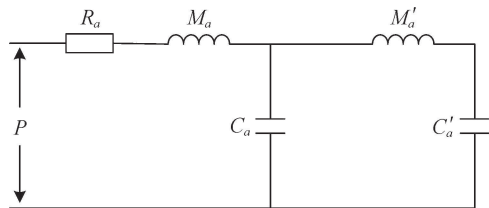


图 6 阻抗底面时 Helmholtz 共振腔等效电路图

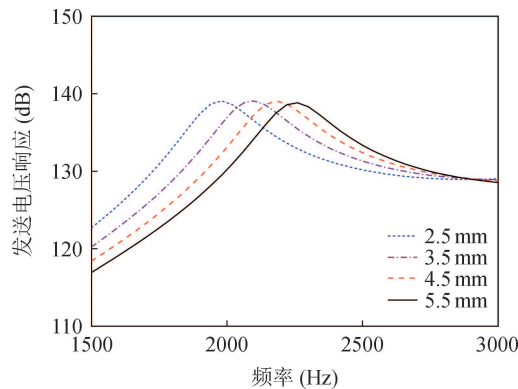


图 7 不同的边缘简支厚度对 Helmholtz 共振频率的影响

就会越低。

3 样机制作及性能测试

依据前述有限元仿真结果, 选择了一组尺寸 (如表 1 所示) 制作了实验样机在消声水池中进行了发送电压响应、指向性测试。样机照片如图 8 所示。为制作方便, Helmholtz 腔体分成两段, 两个等长的腔体在一端使用螺栓连接固定在一起; 弯曲圆盘换能器外表面使用聚氨酯整体包覆实现水密, 在质量块的上下对称平面处 (即弯曲圆盘换能器的振动节面处) 设置 3 个向心均布的螺纹孔, 使用螺栓实现弯曲圆盘换能器与腔体的固定连接, 在节面处设置螺栓可保证弯曲圆盘的振动基本不受连接状态的影响。

表 1 换能器样机的各主要尺寸 (单位: mm)

r_1	r_2	d_0	t_0	t_1	t_2	l_0
55.5	57.5	5.5	12	10	6	90



图 8 换能器样机照片

在哈尔滨工程大学水声技术重点实验室的消声水池进行了发送电压响应和指向性测试。测得的发送电压响应曲线如图 9 所示。测试结果显示, Helmholtz 共振频率为 2150 Hz, 与仿真结果相符。在 Helmholtz 共振腔以上的频段, 发送电压响应值有所差异, 主要是由于仿真中的阻尼设置为恒定的经验值, 且未考虑弯曲圆盘表面的聚氨酯密封层对振动系统阻尼带来的影响。

图 10 所示的为在 Helmholtz 共振频率 2150 Hz 处测得的垂直指向性结果。测试结果与仿真结果基本相符, 呈现了明显的“∞”字形指向性, 验证了预期设计结果。测试结果在 90° 和 270° 附近与仿真值有所差别, 主要由于测试中在这两个角度附近的声压在示波器上显示读数过小, 无法读取真实声压值的缘故。

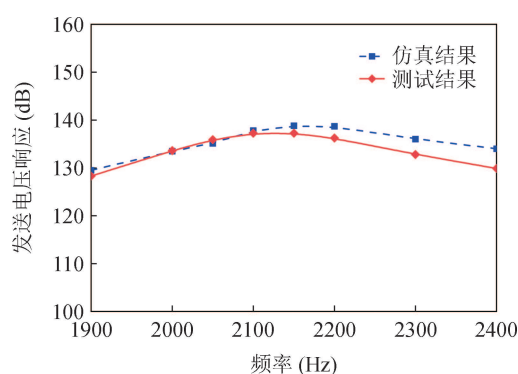


图 9 发送电压响应测试结果与仿真结果对比

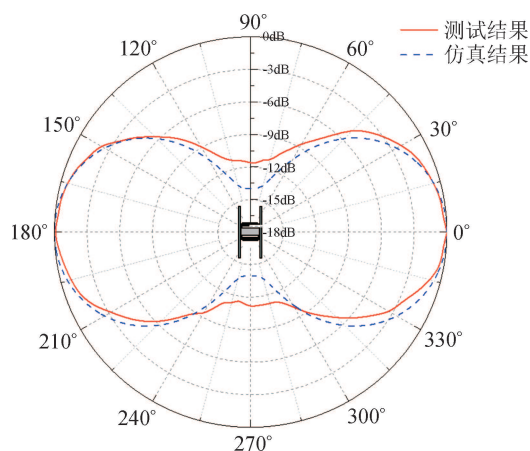


图 10 样机在 Helmholtz 共振频率处指向性测试结果与仿真结果比较

4 结论

基于水声换能器中常用的弯曲振动和 Helmholtz 共振腔振动这两个低频模态, 设计了弯曲圆盘驱动的双 Helmholtz 共振腔换能器, 主要研究了该换能器的垂直指向性特点及弯曲圆盘的阻抗特性对 Helmholtz 共振频率的影响, 得到结论如下:

(1) 弯曲圆盘驱动的双 Helmholtz 共振腔换能器, 在 Helmholtz 共振频率附近恒具有“ ∞ ”字形垂直指向性, 且腔体长度越长“ ∞ ”字形垂直指向性越明显。

(2) 弯曲圆盘换能器作为 Helmholtz 共振腔底面进行驱动时, 其自身的阻抗对 Helmholtz 共振腔的共振频率具有重要影响, 自身等效声顺越大, Helmholtz 共振频率越低。

研究中存在一个重要的问题尚待解决: 使用空

气背衬的弯曲圆盘驱动 Helmholtz 共振腔, 虽然有效的利用了两个低频模态, 但也使 Helmholtz 换能器失去了最重要的特点——无限工作深度, 对该弯曲圆盘进行静水压力环境下的静力分析结果显示, 理想状况下换能器样机的生存深度约 300 m, 工作深度约 100 m。因此设计耐压的弯曲圆盘换能器是下一步研究工作的重点。

参 考 文 献

- 1 Rossby T, Ellis J, Webb D C. An efficient sound source for wide-area RAFOS navigation. *J. Atmospheric Ocean. Technol.*, 1993; **10**(3): 397—403
- 2 Butler J L, Butler A L. A new deep-submergence broadband multiport underwater sound transducer. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999; **105**(2): 1119
- 3 Butler A L, Butler J L. A deep-submergence, very low-frequency, broadband, multiport transducer. In: OCEANS'02 MTS/IEEE. Biloxi, MI, USA, 2002(4): 2350—2353
- 4 Hiroshi Kamata. Lumped parameter equivalent circuit analysis of the multiport transducer. *J. Marine Acoust. Soc. Jpn.*, 2007; **34**(1): 17—24
- 5 Morozov A K, Webb D C. A sound projector for acoustic tomography and global ocean monitoring. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 2003; **28**(2): 174—185
- 6 Morozov A K, Webb D C. Underwater tunable organ-pipe sound source. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2007; **122**(2): 777—785
- 7 Morozov A K, Scussel K F, Wolf M *et al.* The new development of the autonomous sources for ocean acoustic navigation, tomography and communications. In: OCEANS 2017 IEEE. Anchorage, AK, USA, 2017: 1—8
- 8 桑永杰, 蓝宇, 吴彤等. 外液腔式 Janus-Helmholtz 水声换能器. *声学学报*, 2017; **42**(4): 15—20
- 9 Henriquez T A, Young A M. The Helmholtz resonator as a high-power deep-submergence source for frequencies below 500 Hz. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1980; **67**(5): 1555—1558
- 10 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. *声学基础*. 南京: 南京大学出版社, 2012: 212
- 11 周城光, 刘碧龙, 李晓东, 田静. 腔壁弹性对充气亥姆霍兹共振器声学特性的影响: 圆柱形腔等效集中参数模型. *声学学报*, 2007; **32**(5): 426—434
- 12 王泽锋, 胡永明, 孟洲等. 水下圆柱形 Helmholtz 共振器的声学特性分析. *物理学报*, 2008; **57**(11): 7022—7029
- 13 王泽锋, 胡永明, 罗洪等. 腔壁弹性对水下小型圆柱形亥姆霍兹共振器共振频率的影响. *物理学报*, 2009; **58**(4): 2507—2512
- 14 桑永杰, 蓝宇, 丁玥文. Helmholtz 水声换能器弹性壁液腔共振频率研究. *物理学报*, 2016; **65**(2): 182—189