

◇ 研究报告 ◇

宽体液腔 Janus-Helmholtz 换能器*

伊子旭^{1,2,3} 莫喜平^{1†} 柴勇^{1,3} 张运强^{1,3} 崔斌^{1,3}

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 北京海洋声学装备工程技术研究中心 北京 100190)

摘要: 该文使用有限元方法对宽体液腔 Janus-Helmholtz(JH) 换能器进行了仿真分析, 得出了壳体宽度拓展增量对 JH 换能器工作性能的影响规律。使用三维建模的方式, 分析了连接部分对换能器性能的影响及宽体壳体的模态, 证明了三维建模的必要性。依据仿真优化结构设计了一款宽体液腔 JH 换能器并进行了湖上测试。最终测试结果与仿真结果有很好的 consistency, 相较直筒 JH 换能器其谐振频率降低 300 Hz, 发射电压响应最高可达 144 dB。

关键词: Janus-Helmholtz 换能器; 宽体壳体; 有限元分析; 振动模态

中图法分类号: TB565

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2020)05-0656-05

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2020.05.002

The Janus-Helmholtz transducer with dilated cavity

YI Zixu^{1,2,3} MO Xiping¹ CHAI Yong^{1,3} ZHANG Yunqiang^{1,3} CUI Bin^{1,3}

(1 *Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

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

(3 *Beijing Engineering Technology Research Center of Ocean Acoustic Equipment, Beijing 100190, China*)

Abstract: In this paper, the finite element method is used to simulate the Janus-Helmholtz (JH) transducer with dilated cavity, and the influence law of shell width increment on the working performance of JH transducer is obtained. By means of three-dimensional modeling, the influence of the connecting part on the performance of the transducer and the mode of the dilated shell are analyzed, and the necessity of three-dimensional modeling is demonstrated. A JH transducer with dilated cavity was designed according to the simulation optimization structure. The final experiment results are in good agreement with the simulation results. Compared with the JH transducer, the resonant frequency is reduced by 300 Hz, and the transmitting voltage response is up to 144 dB.

Keywords: Janus-Helmholtz transducer; Dilated cavity; Finite element analysis; Mode of vibration

2020-01-06 收稿; 2020-03-31 定稿

*国家自然科学基金项目(11874387), 国家自然科学基金青年科学基金项目(11804367)

作者简介: 伊子旭(1993-), 男, 山东济南人, 博士研究生, 研究方向: 水声换能器。

†通信作者 E-mail: moxp@mail.ioa.ac.cn

0 引言

随着远洋水声通信、海底地质探测、海底地震预警等水声技术的发展,对于拥有低频、宽带、深水工作等优良特性的水声换能器产生了巨大的应用需求。在不同种类的换能器中,利用有源驱动与 Helmholtz 共振器相结合设计的一类 Helmholtz 发射换能器,因其在以上提及方面上所具有的独特优势,成为了水声换能器研究的一个热点^[1-4]。这其中,由法国学者设计的一类 Janus-Helmholtz(JH)换能器在一众 Helmholtz 换能器中脱颖而出。Janus-Helmholtz 换能器利用可双面辐射的 Janus 振子作为驱动,在振子辐射头背侧装有直筒 Helmholtz 腔体,在模态耦合中利用振子振动模态与液腔谐振模态进行耦合发射,同时利用二者声辐射耦合中的多极子效应,使其发射响应尽量平坦^[5]。

JH 换能器虽然可实现低频、宽带、深水工作,但其低频工作性能相较其他宽带换能器有一定差距,工作频带内发射电压响应起伏较大,实际工作时 Helmholtz 腔体谐振部分不能善加利用^[6]。通过在 Helmholtz 腔体内添加顺性管的方式,可有效改善其工作能力,但由于顺性管存在工作水深的限制,这也影响到了 JH 换能器的深水工作能力^[7]。文献^[8]提出了一种宽体壳体 JH 换能器设计,通过有限元二维轴对称建模仿真,发现使用宽体壳体后,不仅两个谐振频率有不同的改变,发射电压响应的低谷亦得到提高,整体平坦度有很大改善,这种结果与单纯振动液腔增大的影响还是有区别的。

本文使用有限元软件 COMSOL 对宽体壳体 JH 换能器进行了三维建模仿真分析,得出了发射电压响应随壳体宽度变化的规律。分析了二维建模中忽略的连接件部分对换能器性能的影响,并分析了存在连接件条件下的壳体模态。根据仿真结果设计了一款实验样机,最终样机测试结果与仿真结果有很好的一致性,宽体壳体 JH 换能器相较直筒 JH 换能器则产生了谐振频率降低 300 Hz 的效应,最高发射电压响应可达 144 dB。

1 宽体液腔 JH 换能器的有限元仿真

JH 换能器的辐射声场,可以看作 Janus 驱动振子两端前盖板处声辐射与腔体谐振于壳体开口处

声辐射叠加而形成的多极子辐射声场。Janus 振子两端的前盖板与其后盖板激发的液腔谐振可以看作这个多极子系统内的不同的声源。这其中两端前盖板与两个液腔可分别看作是一组同相声源,而这两组声源的相位则相反。故此多极子系统的声辐射能力不仅仅与单个声源的性能相关,还与系统中各个声源总体声辐射耦合息息相关。

现提出一种宽体壳体设计思想。通过将外壳体沿 Janus 振子辐射面平行的方向扩展,形成如图 1 所示的宽体壳体结构。此种结构类似于声障板,通过改变各个声源之间的声程差来改变多极子系统的声耦合,从而改变 JH 换能器整体的声辐射性能。JH 换能器在工作时,因对称性在图 1 所标注的径向为全指向性,常采用竖直吊放方式以达到水平方向的全指向性,故本文研究的也主要是径向方向换能器整体的声辐射特性。

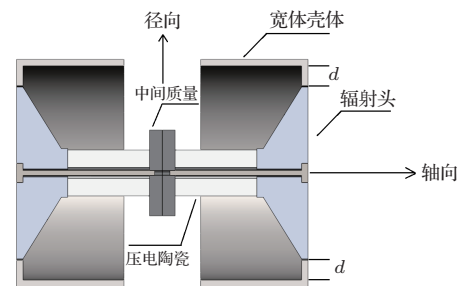


图 1 宽体液腔 JH 换能器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of JH transducer with dilated cavity

为分析宽体液腔对 JH 换能器声辐射性能的影响。本文使用有限元方法对宽体液腔 JH 换能器进行建模与分析。由于换能器本身具有很好的对称性,故建立如图 2 所示的 1/8 模型,模型的整体尺寸为 $\phi 250 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$,前辐射头及中间质量块使用钛合金材料,壳体使用硬铝,材料参数包括杨氏模量、泊松比和材料密度。有源材料为厚度极化的 PZT-4 圆环压电陶瓷片,材料参数包括介电常数、压电常数、弹性常数和材料密度。建模中包括了壳体与 Janus 振子的连接体部分。

通过改变宽体壳体的宽度拓展增量 d ($d=0$ 代表筒壳时的状态) 分析 d 对发射电压响应的影响,得出如图 1 中所标识的径向方向的发射电压响应曲线,如图 3 所示。

由图3可见,相较于传统的筒型壳体,采用宽体壳体后,发射电压响应曲线出现了如下变化:第一,谐振频率降低,且随着壳体宽度增加而降低;第二,谐振开始随壳体宽度增加降低,到达一定宽度后其变化不再明显;第三,随着壳体宽度的进一步增加,换能器两个谐振频率的间隔扩大,凹谷处的发射电压响应逐渐降低。

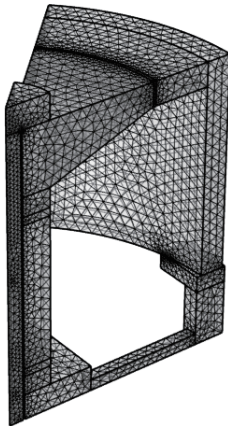


图2 宽体液腔 JH 换能器有限元建模图

Fig. 2 Finite element modeling diagram of JH transducer with dilated cavity

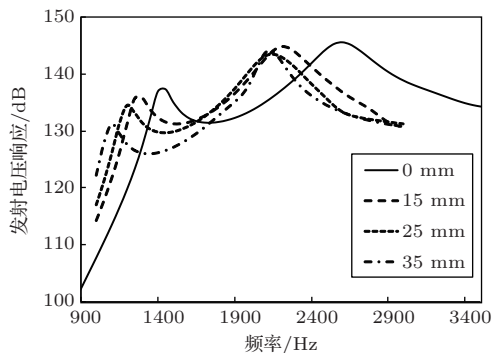


图3 不同宽度增量 d 下的发射电压响应

Fig. 3 Transmit voltage response at different width increment d

2 连接件部分对换能器工作性能的影响

在对 JH 换能器进行轴对称二维建模时,为了满足轴对称条件, JH 换能器壳体与 Janus 振子的连接部分常常被忽略。使用三维建模方法则可以分析连接部分对换能器工作性能的影响。连接件设计为工字结构,其结构截面示意面如图4所示。本文对连接结构材料的杨氏模量与工字型结构中尺寸 L 两个参数对换能器发射电压响应的影响进行仿真分析。

改变连接结构材料的杨氏模量,分析换能器的发射电压响应如图5所示。

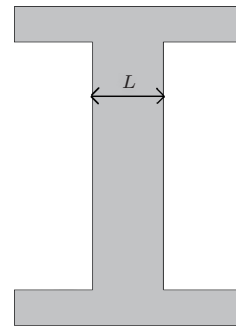


图4 宽体液腔 JH 换能器连接件结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of connector structure

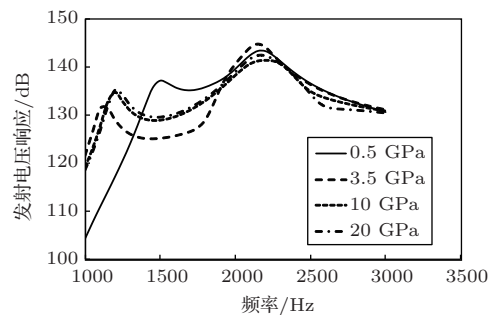


图5 发射电压响应随材料杨氏模量变化曲线

Fig. 5 Transmit voltage response at different Young's modulus

由图5可见,当所选材料的杨氏模量足够大时,连接件刚度变大,发射电压响应随杨氏模量的升高基本不发生变化。随着杨氏模量的降低,连接件呈现弹性体的特性,壳体和连接件组成振动系统可能受激引起谐振现象,从而影响换能器发射电压响应曲线变化。而当材料的杨氏模量足够小时(如设为实际材料的1/10以下),在系统中可视为柔性连接,所得出的结果与文献[8]中忽略连接件的二维轴对称建模仿真结果类似,发射电压响应曲线变化明显有别于实际连接杆情况。由此可见,除非换能器实际工艺中采用隔振去耦一类手段,忽略连接件的二维轴对称建模才不会带来较大的分析误差,从而体现了采用三维建模来进行优化设计的必要性。

改变工字型结构尺寸 L 后,换能器的发射电压响应如图6所示。

连接件结构的影响与材料杨氏模量的影响有相似性,当 $L > 20$ mm 时,发射电压响应已基本无变化。当 $L < 15$ mm 时,发射电压响应曲线向低频偏移,并在两个谐振峰之间出现了很明显的凹谷,可

见连接件的刚度对换能器发射电压响应曲线有明显的影响,只有刚度足够大时,这种影响才变得不明显。

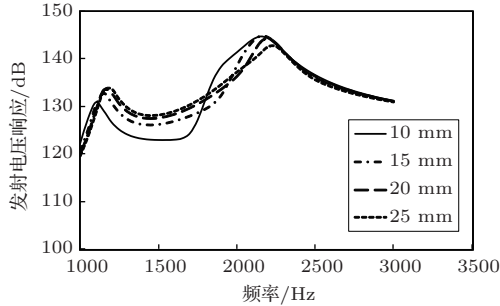


图6 发射电压响应随结构尺寸 L 变化曲线
Fig. 6 Transmit voltage response at different L

3 宽体壳体模态分析

在 JH 换能器的应用中,由于水的特性阻抗与空气相比相差悬殊,且与壳体材料的特性阻抗可以比拟,因此 Helmholtz 腔体的结构壁不能被认为是完全刚性的,需要考虑壳体谐振对换能器声辐射的影响。在典型的 JH 换能器中,通过使用杨氏模量较高的壳体材料以及增加壳体厚度的方法,减弱壳体谐振的干扰,硬铝材料的壳体在厚度增加到 16 mm 以上时,发射电压响应的变化就已不再明显^[9]。改用宽体壳体后,由于壳体结构发生变化,壳体谐振对于 JH 换能器的影响就很有分析的必要。

建立壳体的三维对称模型如图7所示,模型包括宽体壳体、连接部分、Janus 振子中间质量3个部分,对其进行模态分析。在模态分析中,中间质量在 Janus 振子的振动时,由于振子的对称性而可认为是不参与振动的,故在模态分析中施加固定边界条件。

对不同的模态分析后的结果中一阶模态为壳体的平动,不影响换能器工作。其二阶模态分析

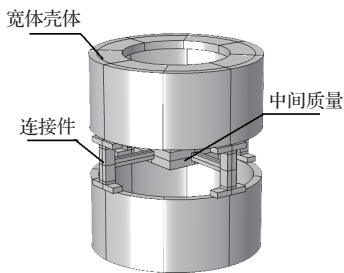


图7 壳体建模结构示意图
Fig. 7 Schematic diagram of shell modeling structure

结果如图8所示,可见二阶模态的谐振频率在 2.6 kHz 以上,远大于换能器基频谐振(受腔体参数影响较大)工作模式,因此改变腔体结构参数时,宽体壳体和连接件构成的振动体统符合第2节的分析结果,使换能器分析结果受连接件的影响较小,便于优化比较宽体壳体的宽度拓展增量 d 的影响情况。

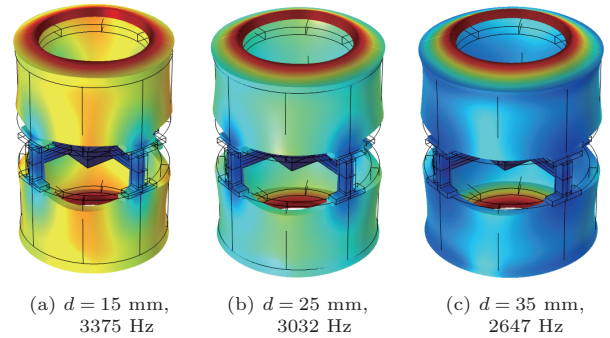


图8 不同宽度拓展增量 d 下的壳体模态及其频率
Fig. 8 Shell modes at different width increment d

4 宽体壳体 JH 换能器实验样机制作与实验验证

经过反复优化,确定如下结构参数:辐射头直径 198 mm,壳体开口长度 90 mm,壳体厚度 15 mm,壳体宽度增量 35 mm。依据最终确定的 JH 换能器结构参数制作了实验样机。

对宽体壳体 JH 换能器样机进行湖上测试,发射电压响应实测曲线与仿真结果对比如图9所示,仿真结果中 JH 换能器的谐振频率分别为 1250 Hz 与 2250 Hz,谐振频率处的发射电压响应分别为 134 dB、142 dB;实测谐振频率 1200 Hz 与 2300 Hz 处的发射电压响应分别为 133.9 dB、143.2 dB。

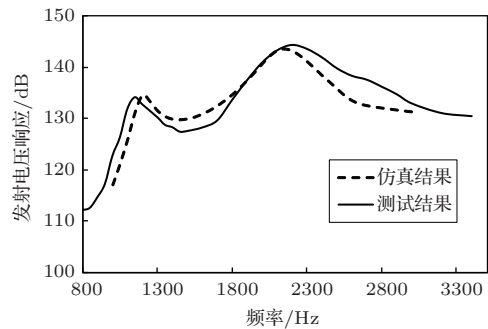


图9 宽体壳体 JH 换能器实验样机的发射电压响应
Fig. 9 Transmit voltage response of experimental prototype

实测发射电压响应与计算结果基本吻合,其中第一谐振频率略向低频漂移。

图10是使用相同振子的情况下,分别加装直筒壳与宽体壳体后,发射电压响应曲线测试结果对比。由图10可见,宽体壳体JH换能器的谐振频率降低了约300 Hz,发射电压响应在第一谐振频率处略有降低,第二谐振频率处略有升高。湖试的测试结果与有限元方法所得到的仿真结果相吻合,验证了前文的分析结论。

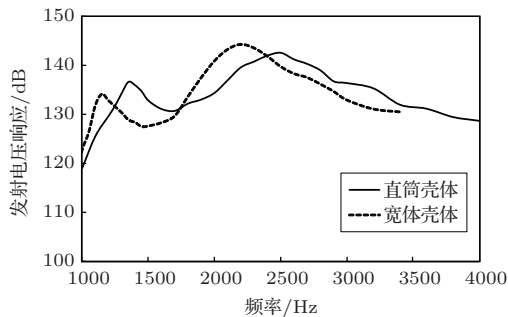


图10 宽体壳体JH换能器与JH换能器的发射电压响应比较

Fig. 10 Comparison of transmit voltage response between two kinds of JH transducer

5 结论

本文使用有限元分析方法,对宽体壳体JH换能器进行三维建模,得出了壳体宽度增量对发射电压响应的仿真结果。研究了连接件结构尺寸与杨氏模量对换能器工作性能的影响,证明了三维建模的必要性。同时分析了带连接件结构的壳体模态。依据仿真优化结构设计了一款宽体液腔JH换能器并进行了湖上测试。最终测试结果与仿真结果有很好的一致性,将之与直筒JH换能器相比其谐振频率

降低300 Hz,发射电压响应最高可达144 dB。

参 考 文 献

- [1] 张振雨, 王艳, 陈光华. 一款低频双端纵振亥姆霍兹换能器[J]. 声学技术, 2015, 34(2): 188-192.
Zhang Zhenyu, Wang Yan, Chen Guanghua. A low frequency Janus-Helmholtz transducer[J]. Technical Acoustics, 2015, 34(2): 188-192.
- [2] 桑永杰, 蓝宇, 吴彤, 等. 外液腔式Janus-Helmholtz水声换能器[J]. 声学学报, 2017, 42(4): 397-402.
Sang Yongjie, Lan Yu, Wu Tong, et al. Outer cavity Janus-Helmholtz underwater acoustic transducer[J]. Acta Acustica, 2017, 42(4): 397-402.
- [3] Mosca F, Vial M, Greninguey G, et al. Low frequency electro acoustic transducer and method of generating acoustic waves: U.S., 9387514[P]. 2016-07-12.
- [4] Butler A L, Butler J L. A deep-submergence, very low-frequency, broadband, multiport transducer[C]. OCEANS '02 MTS, IEEE, 2002: 2350-2353.
- [5] Le Gall Y, Boucher D, Lurton X, et al. Great depth, high efficiency, broadband, reliable low frequency transducer for acoustical oceanography[C]. IEEE, 1994, 2: 284-288
- [6] Le Gall Y, Boucher D. 300 Hz Janus-Helmholtz transducer for ocean acoustic tomography[C]. Piscataway: IEEE, 1993: I278-I281.
- [7] Shashaty A J. The elastic problem of the flattened-cylinder type of underwater acoustical compliance element[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1979, 66(6): 1818-1825.
- [8] 伊子旭, 莫喜平, 柴勇, 等. 宽体液腔Janus-Helmholtz换能器设计分析[C]. 中国声学学会2017年全国声学学术会议论文集, 2017: 803-804.
- [9] 桑永杰, 蓝宇. 低频大功率Janus-Helmholtz换能器的设计[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2013, 41(6): 21-26.
Sang Yongjie, Lan Yu. Design of low-frequency high power Janus-Helmholtz underwater acoustic transducer[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2013, 41(6): 21-26.