

用于水下目标监测的低频同振式 矢量水听器研制

葛松,付昌,卞加聪,苏宇博,归宏猛
(上海船舶电子设备所,上海 201108)

摘要:基于三维压电加速度传感器,设计了一款适用于低频的同振式矢量水听器,分析计算了其在水中的声学性能,并对制作的矢量水听器样品进行了性能验证。制成的球型矢量水听器样品直径为 78 mm,在驻波管中对该矢量水听器进行了灵敏度和指向性检测,检测结果与理论计算结果吻合。该矢量水听器在低频频段内具有较好的灵敏度和“8”字型指向性,适合用于浮标、潜标、UUV(无人水下航行器)等平台的水声监测模块。

关键词: 矢量水听器;加速度传感器;低频

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2022)01-0070-04

Development of low-frequency co-vibration vector hydrophone used for underwater target monitoring

GE Song, FU Chang, BIAN Jiacong, SU Yubo, GUI Hongmeng

(Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: In this paper, based on 3D piezo-electric accelerometer, a co-vibration vector hydrophone applicable at low frequency is designed and its acoustic performance is calculated. A sample of this vector hydrophone is made and tested. The diameter of the vector hydrophone sample is 78 mm. Test of sensitivity and directivity is proceeded in a standing wave tube. The test results are consistent with the calculation results. The vector hydrophone has high sensitivity and '8' shape directivity at low frequency. This vector hydrophone is appropriate for underwater acoustic detecting on platforms such as float, subsurface buoy and UUV(unmanned underwater vehicle).

Key words: vector hydrophone; acceleration transducer; low frequency

水声换能器(水听器)是有效的水下信息探测设备,受到各国的极大重视^[1-2]。与传统的标量水听器基阵相比,矢量水听器无需成阵即可获得水中声场的矢量信息,具有体积小、质量轻等优势。目前,矢量水听器技术发展的主要方向包括低频检测、高信噪比、小型化^[3-4]、阵列化^[5]、新材料^[6]、多用途、工程化应用等。

船舶噪声会损害船员及海洋生物的健康,同时其可以在一定程度上反映船体状态^[7]。布置水下声

学平台并对船舶噪声进行监测,可以及时发现异常船舶噪声,保障人员健康安全。低频船舶噪声对人员及海洋生物的危害更大^[8],这就要求水下声学传感器具有较高的低频灵敏度。

笔者基于水中声矢量信号的低频检测问题,设计了一款三维同振式球型矢量水听器,并对该矢量水听器的性能进行理论计算,经驻波管灵敏度检测,发现计算结果与实际检测结果吻合良好。

该矢量水听器在 20~800 Hz 频段内拥有较好的等效声压灵敏度以及“8”字型指向性,且体积相对较小,十分适用于浮标等海上声学监测平台,可布放在港口等处,用于对过往的船舶噪声等水下低频声信号进行监测。

收稿日期:2021-06-10

作者简介:葛松(1994—),男,硕士,主要从事矢量水听器的研究工作

通信作者:葛松,995699254@qq.com

1 同振式矢量水听器工作原理

1.1 加速度传感器原理

文中的矢量水听器核心元件为压电式加速度传感器,其结构及简化模型如图1所示^[9]。

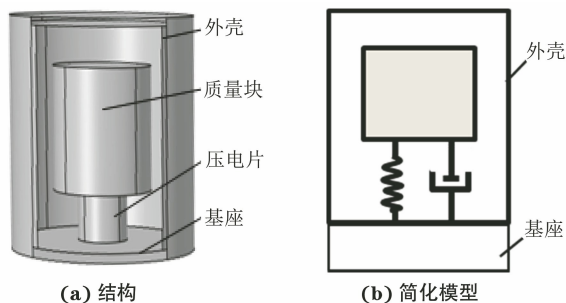


图1 加速度传感器结构示意图与简化模型

当加速度传感器感受到物体的振动时,振动通过压电元件传递给质量块,压电元件受到力的作用并产生与传感器加速度线性相关的电压,其运动方程为

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + R \frac{dy}{dt} + K \cdot y = -m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (1)$$

式中: m 为质量块的质量; K 为系统弹簧刚度; R 为系统阻尼系数; x 为基座的绝对位移; y 为质量块相对基座的位移,即压电元件的变形量; t 为时间。

在压电元件弹性范围内有

$$F = K_y \cdot y \quad (2)$$

式中: F 为作用在压电元件上的力; K_y 为压电元件的弹性系数。

压电元件表面的电荷量 Q 与 F 成正比,且与压电元件的压电系数 d_{33} 相关,其表达式为

$$Q = d_{33} F \quad (3)$$

加速度传感器的灵敏度 M_a 为

$$M_a = \frac{U}{a} = \frac{d_{33} K_y / \omega_0^2}{1 - (\omega / \omega_0)^2 + 2j\zeta(\omega / \omega_0)} \quad (4)$$

式中: U 为压电元件的输出电压; a 为加速度; ω 为振动角频率; ω_0 为传感器固有频率; ζ 为阻尼比。

由式(4)可知,加速度传感器的灵敏度随频率变化而变化,且在远离谐振点的低频频带内变化较为平缓。因此,通常选用 $\omega < \omega_0 / 3$ 的频段作为加速度传感器的工作频段,加速度传感器的灵敏度以 $\omega = 0$ 时的值表示[见式(5),式中 C 为压电元件的电容]。

$$M_a = \frac{d_{33} \cdot m}{C} \quad (5)$$

1.2 矢量水听器灵敏度分析

基于压电加速度传感器进行矢量水听器设计,

以三维压电加速度传感器作为矢量通道输出,以压电陶瓷圆管作为标量通道输出。为保证3个矢量通道的性能有较好的一致性,将矢量水听器外形设计为球型。

在实际应用中,常用分贝制的等效声压灵敏度表征矢量水听器的灵敏度信息,因此需将加速度传感器灵敏度转化为矢量水听器等效声压灵敏度,再计算传感器是否满足设计需求。

在理想条件下,矢量水听器为零浮力刚性球体,在水中呈自由状态,其振幅与相位与水质点的振幅与相位皆相同。矢量水听器等效声压灵敏度 M_p 与加速度传感器灵敏度 M_a 的转化关系为

$$M_p = \frac{\omega}{\rho_0 c} M_a \quad (6)$$

灵敏度等级 M_{pL} 为

$$M_{pL} = 20 \lg \left(\frac{\omega}{\rho_0 c} M_a \right) - 120 \quad (7)$$

式中: ρ_0 为水介质密度; c 为水中的声速。

实际设计中,由于安装尺寸限制,矢量水听器的密度也往往受限,难以实现完全的零浮力状态。此时,矢量水听器的密度会对矢量水听器的振动状态产生影响,需要对此进行分析并进行补正。

同振球型矢量水听器在水中近似为自由状态的刚性球体,由水声学理论分析可知,刚性球体在水中的振动状态与球心处的水质点振动状态有关。 $kr \ll 1$ (r 为球半径, k 为波数)的刚性球体满足以下关系式。

$$\left| \frac{v}{v_0} \right| = \left| \frac{3\rho_0}{2\rho_0 + \rho} \right| \quad (8)$$

式中: v 为刚性球体的振速; v_0 为球心处水质点的振速; ρ 为球体密度。

因此,当水质点加速度为 a 时,受矢量水听器密度的影响,矢量水听器的实际振动幅度与水质点的不同,矢量水听器振动加速度为 a' ,实际输出电压 U' 为

$$U' = \frac{3\rho_0}{2\rho_0 + \rho} a \cdot M_a \quad (9)$$

由此可得,当矢量水听器密度与介质密度不一致时,实际等效声压灵敏度为

$$M_{pL} = 20 \lg \left[\frac{3\omega}{(2\rho_0 + \rho)c} \cdot M_a \right] - 120 \quad (10)$$

当矢量水听器密度大于水介质密度时,矢量水听器密度越大,实际灵敏度越低。设计矢量水听器时,通常利用空心金属壳或填充浮力材料等方式减小矢量水听器的密度,使其接近水介质的密度。

2 矢量水听器设计

设计的矢量水听器核心元件为3维压电加速度传感器,加速度灵敏度为 $25\text{ V}\cdot\text{g}^{-1}$, x,y 通道谐振频率为 1.3 kHz , z 通道谐振频率为 2 kHz 。为尽量减小矢量水听器密度,使用低密度浮力材料进行填充,设计的矢量水听器直径为 78 mm ,质量为 410 g 。

根据式(7)计算得到矢量水听器等效声压灵敏度理论值约为 -179.6 dB 。矢量水听器密度约为 $1\,650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,高于水的密度,导致矢量水听器的实际灵敏度偏低,故需计算矢量水听器密度对灵敏度的影响以得到与实际灵敏度更接近的结果。

利用式(10)可理论计算考虑密度影响的矢量水听器的等效声压灵敏度(见图2)。由图2可知, 100 Hz 频率下灵敏度约为 -182.9 dB 。与理想条件(即矢量水听器为零浮力)下的等效声压灵敏度相比,该矢量水听器实际等效声压灵敏度降低约 3.3 dB 。

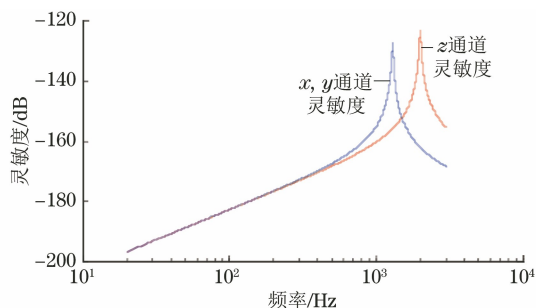


图2 矢量水听器等效声压灵敏度理论计算曲线

3 矢量水听器性能检测

基于以上分析,设计了三维同振式球型矢量水听器。为确保水听器在水中呈自由状态且姿态稳定,使用8颗弹簧将该矢量水听器悬挂在订制的支架上(见图3)。

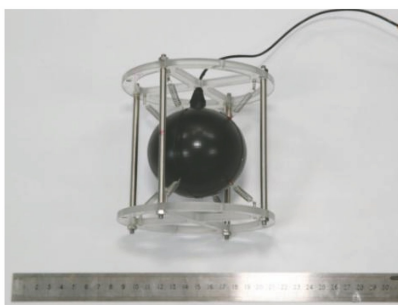


图3 矢量水听器实物

在驻波管中对该矢量水听器 $20\sim 1\,000\text{ Hz}$ 频段的灵敏度及指向性进行了测试,其3个矢量通道

的灵敏度实测结果与理论计算结果如图4所示。

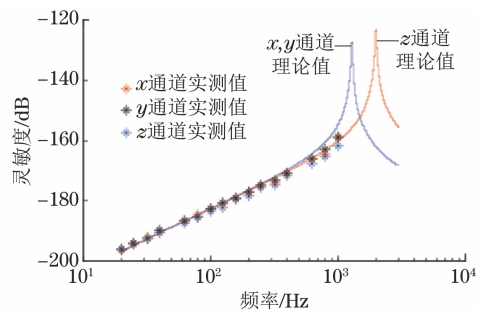


图4 矢量水听器灵敏度实测结果与理论计算结果

经对比可以看出,矢量水听器等效声压灵敏度实际值符合 6 dB 每倍频程的增长规律,与依据公式(10)计算所得的灵敏度理论值高度吻合。由此可见,在考虑了密度因素对灵敏度的影响后,根据加速度传感器灵敏度计算的矢量水听器等效声压灵敏度已十分接近真实情况,可以作为设计矢量水听器的依据。

在 $20\sim 800\text{ Hz}$ 频段内,该矢量水听器的 x,y,z 3个矢量通道的灵敏度一致性良好,可满足使用要求。另外,矢量通道的指向性与正交性同样是矢量水听器的重要指标。在 $20\sim 1\,000\text{ Hz}$ 频段内,对 x,y,z 3个矢量通道的指向性进行了测试,其中, 100 Hz 频率处的指向性如图5~7所示。

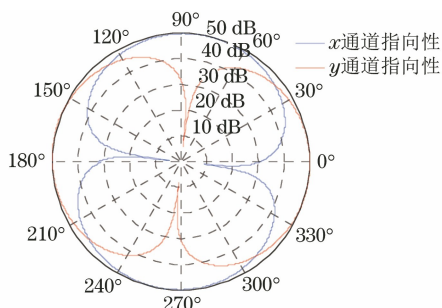


图5 矢量水听器 x,y 通道 100 Hz 频率处的指向性

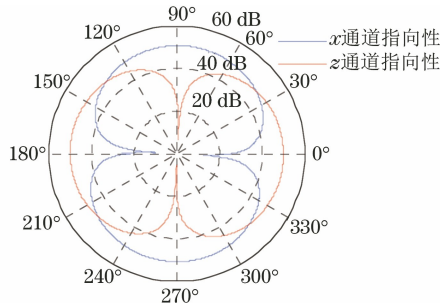


图6 矢量水听器 x,z 通道 100 Hz 频率处的指向性

指向性测试结果表明,所研制的水听器在 $20\sim 800\text{ Hz}$ 频带内,指向性均为良好的“8”字型,凹点深度大于 40 dB ,且 x,y,z 3个矢量通道两两正交。在 $800\sim 1\,000\text{ Hz}$ 范围内,凹点深度开始减

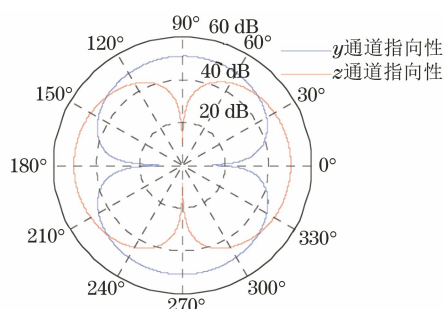


图7 矢量水听器 y, z 通道 100 Hz 频率处的指向性

小, 1 000 Hz 处凹点深度为 11 dB。文章以 100 Hz 频率处的指向性作为代表反映该矢量水听器的指向性。

研究表明, 单个矢量水听器定向角度误差随凹点深度的增加而减小, 通常认为当凹点深度大于 40 dB 时, 定向误差可忽略。

4 结语

完成了一种三维同振型矢量水听器的设计与制作, 实物性能与理论分析结果基本符合。该水听器在 20 Hz 的低频范围仍有较好的灵敏度和“8”字型指向性, 可以应用于浮标、潜标、UUV(无人水下航行器)等平台, 进行低频水声矢量信号监测。

参考文献:

[1] 孙玉, 胡博, 王晓春. 国际矢量水听器技术发展态势文献计量分析[J]. 情报探索, 2015(11):15-17, 21.

[2] 莫喜平. 我国水声换能器技术研究进展与发展机遇[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3):272-282.

[3] 郭静, 张国军, 刘源, 等. 四元阵型 MEMS 矢量水听器微结构设计[J]. 传感技术学报, 2016, 29(2):171-176.

[4] LIU M R, JIAN Z M, ZHANG G J, et al. Design of MEMS bionic vector hydrophone based on NBR sound-transparent cap[J]. Sensor Review, 2015, 35(3):303-309.

[5] LIU M R, ZHANG G J, SONG X P, et al. Design of the monolithic integrated array MEMS hydrophone[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(4):989-995.

[6] PYO S, KIM J, KIM H, et al. Development of vector hydrophone using thickness-shear mode piezoelectric single crystal accelerometer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 283:220-227.

[7] 陈实. 基于 IMO 新标准的船舶舱室噪声研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.

[8] 苏冠龙, 许肖梅. 水下打桩和船舶噪声对斑海豹听觉影响的初步分析[J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(2):178-183.

[9] 杨德森, 洪连进. 矢量水听器原理及应用引论[M]. 北京:科学出版社, 2009.

(上接第 69 页)

[14] IVERSON B J, SLAMOVICH E B, BOWMAN K J. Preferential substitution of Barium in orthorhombic lead metaniobate[J]. Ferroelectrics, 2010, 408(1):9-19.

[15] VENET M, VENDRAMINI A, ZABOTTO F L, et al. Piezoelectric properties of undoped and titanium or Barium-doped lead metaniobate ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2005, 25(12):2443-2446.

[16] CAI K, JIANG F, DENG P Y, et al. Enhanced ferroelectric phase stability and high temperature piezoelectricity in PN ceramics via multisite co-doping[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2015, 98(10):3165-3172.

[17] KATO M, KIMURA T. Effects of La_2O_3 on the microstructure and piezoelectric properties of PbNb_2O_6 [J]. Ferroelectrics, 2001, 263(1):353-358.

[18] WU F M, GAO M, WANG Z K, et al. Synthesis and

properties of $\text{Pb}_{0.92}\text{Sr}_{0.08}(\text{Nb}_{1-y}\text{Ta}_y)_2\text{O}_6$ high Curie temperature piezoelectric ceramics [J]. Integrated Ferroelectrics, 2017, 181(1):90-95.

[19] REHMAN A U, JEN C K, IHARA I. High temperature immersion type ultrasonic imaging probes [J]. AIP Conference Proceedings, 2001, 557(1):845-852.

[20] YUAN J J, CHEN X M, LIAN H L, et al. Effects of the doping of W^{6+} ions on the structure and electrical properties of $\text{Pb}_{0.95}\text{Ba}_{0.05}\text{Nb}_2\text{O}_6$ piezoelectric ceramics [J]. Ceramics International, 2015, 41:S662-S667.

[21] 杜霄, 周静, 杨雨舟, 等. 声测井压电接收换能器研究进展[J]. 石油化工应用, 2021, 40(8):1-4, 47.

[22] 乔文孝, 鞠晓东, 车小花, 等. 声波测井技术研究进展[J]. 测井技术, 2011, 35(1):14-19.

[23] ACHARYA V V N, BHANUMATHI A, UCHINO K, et al. Investigation on modified lead Barium niobate to optimize the piezoelectric properties [J]. Ferroelectrics Letters Section, 2000, 27(1/2):7-10.