

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514678

基于压差式矢量水听器指向性的幅相误差校正方法

李 赞¹, 陈杭洋¹, 蒋晓斌², 贾辰午¹, 黄新敬¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072; 2. 中海油(天津)管道工程技术有限公司 天津 300451)

摘 要:压差式矢量水听器由多对独立的标量水听器组成,而各个标量水听器间存在的幅相误差会导致矢量水听器的压差指向性变形,并且降低对水下目标的测向精度。针对该问题,提出了一种有源旋转校正方法,利用矢量水听器固有的偶极子指向特性,旨在校正压差式矢量水听器硬件系统中的固有幅相误差。该方法无需知道辅助声源的精确位置,使用精密转台控制矢量水听器旋转一周,选择一个不在旋转轴上的标量水听器作为基准,对其他标量水听器信号进行幅值缩放和时域平移,直至全部压差指向性曲线被修正为理想形状,从而校正幅相误差。在消声水池中使用实验室自研的三维压差式矢量水听器开展了幅相误差校正和声源测向实验。结果表明,校正后的矢量水听器压差指向性曲线接近理想形状;与校正前相比,旋转水听器测向的方位角测量误差 $<5^{\circ}$ 的测试点数增加了 10.6%,俯仰角测量误差 $<10^{\circ}$ 的测试点数提高了 92.9%;平移声源测向的方位角测量误差 $<5^{\circ}$ 的测试点数增加了 46.3%,俯仰角测量误差 $<10^{\circ}$ 的测试点数提高了 42.6%。实验结果证明,该方法能够有效校正压差式矢量水听器的幅相误差,并且显著提高对水下目标的测向精度。该方法降低了幅相误差的校正难度和成本,具有一定的应用价值。

关键词: 压差式矢量水听器;幅相误差校正;水下目标测向

中图分类号: TB565 TH73 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

Amplitude and phase error correction method based on the directivity of pressure-gradient vector hydrophone

Li Zan¹, Chen Hangyang¹, Jiang Xiaobin², Jia Chenwu¹, Huang Xinjing¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. CNOOC (Tianjin) Pipeline Engineering Technology Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract: Pressure gradient vector hydrophones are composed of multiple pairs of independent scalar hydrophones. However, the amplitude and phase errors between the scalar hydrophones can cause the distorted pressure difference directivity and degrade the direction-finding accuracy of underwater targets. To address this issue, an active rotational correction method using the inherent dipole directivity is proposed to correct the intrinsic amplitude and phase errors of pressure-gradient vector hydrophone hardware system, which does not require the accurate position of auxiliary sound source. The vector hydrophone is rotated 360° on a precision turntable. Meanwhile a scalar hydrophone located off the rotation axis is selected as the reference, and the amplitude scaling and time-domain shifting optimization are applied to the signals of other hydrophones until the pressure difference directivity curves are corrected to their ideal shapes, thereby compensating for the amplitude and phase errors. Amplitude/phase error correction and sound source localization experiments are conducted in an anechoic tank using a laboratory-developed three-dimensional pressure-gradient vector hydrophone. The results show that the corrected pressure difference directivity curves of vector hydrophone closely approximate the ideal shapes. Compared to the results before correction, the number of test points with azimuth errors below 5° increases by 10.6%, and the number of test points with elevation errors below 10° increases by 92.9% in rotating hydrophone tests; meanwhile the number of test points with azimuth errors below 5° increases by 46.3% and the number of test points with elevation errors below 10° increases by 42.6% in moving sound source tests. Experimental results verify that the proposed method effectively corrects amplitude and phase errors of the pressure-gradient vector

hydrophone, which significantly improves the accuracy of underwater target localization. This method reduces the difficulty and cost of amplitude and phase error correction, making it valuable for practical applications.

Keywords: pressure gradient vector hydrophone; amplitude and phase error correction; underwater target localization

0 引言

矢量水听器可以同步共点地获得声场的标量和矢量信息,具有良好的低频指向性、抑制各向同性噪声等优点,已被成功应用于噪声测量、水下目标测向测距、水下声通信等领域^[1-2]。矢量水听器从测量原理上可分为压差式和同振式两种类型。其中,压差式矢量水听器是利用有限差分近似原理,直接测量声场中远小于波长范围的临近两点的声压标量,从而间接获得声压梯度矢量^[3]。压差式矢量水听器一般由多对独立的标量水听器组成,以实现声压梯度的测量,使用的标量水听器包括光纤水听器^[4-5]、压电水听器^[6-7]、压电敏感结构^[8]等。与同振式相比,压差式矢量水听器不依赖精密惯性元件,不需要绳系结构,不需要将水听器配重为悬浮状态,对机械振动不敏感^[9],工作原理简单,技术实现相对容易。

水下目标测向是矢量水听器的一项重要应用。对于由多对标量水听器组成的压差式矢量水听器,各水听器在灵敏度一致性、相位一致性、前置电路、安装误差等方面的差异使得输出信号在幅度和相位响应上出现不一致,从而引入幅相误差。这种幅相误差会导致矢量水听器的指向性产生畸变,并且影响对水下目标的测向精度^[9-12],因此需要校正压差式矢量水听器的幅相误差。压差式矢量水听器可以视作小型水听器阵列,而阵列的幅相误差校正方法可分为有源校正和无源自校正两类。其中,无源自校正方法使用环境噪声或目标信号本身,通过遗传算法、粒子群优化、快速独立成分分析等算法估计阵列的幅相误差^[13-16],对环境适应性强,但运算量大,且不确定的环境噪声难以保证参数估计的收敛性。有源校正方法需要借助外部辅助信号源,配合多信号分类^[17]、模拟退火^[18]、加权最小二乘^[19]等算法,在可控环境中对阵列的幅相误差进行校正,校正精度通常比自校正方法高,但要求辅助信号源的方向准确已知。针对此问题,古树星等^[20]提出了基于阵列旋转的圆柱阵幅相误差有源校正方法,不需要知道信号源的精确位置,而是先通过旋转阵列校准信号源方位,再通过特征分解和算术平均获得幅相误差参数,提高了阵列幅相误差的校正精度。

本文提出了一种三维压差式矢量水听器幅相误差的有源校正方法。与上述旋转阵列的有源校正方法不同,本方法不需要知道声源的位置,也不校正声源的位置,而是利用压差式矢量水听器固有的偶极子指向特性,对标量水听器采集的信号进行幅值缩放和时域平移,直至全

部压差指向性曲线被修正为理论公式所确定的理想形状,直接消除标量水听器的幅相误差。本方法旨在校正由水听器频率响应差异、前置电路不一致及安装误差等因素所引入的硬件系统固有幅相误差,使压差式矢量水听器输出的声压与振速信号尽可能真实地反映测量的声场。本文通过理论推导阐明了幅相误差影响压差指向性曲线形状的规律,提出了一种幅相误差校正方法,并在消声水池中开展幅相误差校正和声源测向实验,验证了该方法的有效性。

1 理论分析

1.1 三维压差式矢量水听器的压差指向性

三维压差式矢量水听器由6个标量水听器组成,其模型如图1所示。 O 为矢量水听器的中心,位于坐标轴原点。水听器1~6分别位于三轴的正负方向,同一轴上的两个水听器间距为 d ,入射声信号的方位角和俯仰角分别为 θ 和 ϕ 。单个三维压差式矢量水听器利用三轴方向的声压梯度间接获得中心位置处的质点振速矢量,从而估计入射声信号的方位信息。

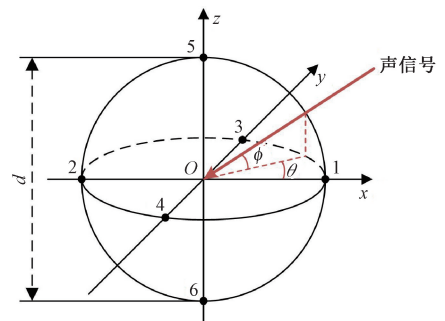


图1 三维压差式矢量水听器模型

Fig. 1 Model of three-dimensional pressure-gradient vector hydrophone

远场声信号传播到矢量水听器附近时可近似为平面波。在行波场中,水听器 i 处的声压 p_i 如式(1)所示。

$$\begin{cases} p_1 = p_0 \exp(jkd \cos \phi \cos \theta/2) \\ p_2 = p_0 \exp(-jkd \cos \phi \cos \theta/2) \\ p_3 = p_0 \exp(jkd \cos \phi \sin \theta/2) \\ p_4 = p_0 \exp(-jkd \cos \phi \sin \theta/2) \\ p_5 = p_0 \exp(jkd \sin \phi/2) \\ p_6 = p_0 \exp(-jkd \sin \phi/2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: p_0 为矢量水听器中心位置的声压; k 表示波数。假设在理想情况下, 各水听器的灵敏度均为 M_0 , 则水听器 i 输出信号的电压值为 $u_i = M_0 p_i$ 。因此, 矢量水听器三轴方向上的压差灵敏度 M_x 、 M_y 、 M_z 如式(2)所示。

$$\begin{cases} M_x = |(u_1 - u_2)/p_0| = 2M_0 |\sin(kd \cos \phi \cos \theta/2)| \\ M_y = |(u_3 - u_4)/p_0| = 2M_0 |\sin(kd \cos \phi \sin \theta/2)| \\ M_z = |(u_5 - u_6)/p_0| = 2M_0 |\sin(kd \sin \phi/2)| \end{cases} \quad (2)$$

则三轴方向上的压差指向性 D_x 、 D_y 、 D_z 如式(3)所示。

$$\begin{cases} D_x = |\sin(kd \cos \phi \cos \theta/2)| \\ D_y = |\sin(kd \cos \phi \sin \theta/2)| \\ D_z = |\sin(kd \sin \phi/2)| \end{cases} \quad (3)$$

当 $kd/2 \ll 1$ 时, 三轴方向上的压差均呈现偶极子指向性, 即指向性为“8”字形, 如图2所示。

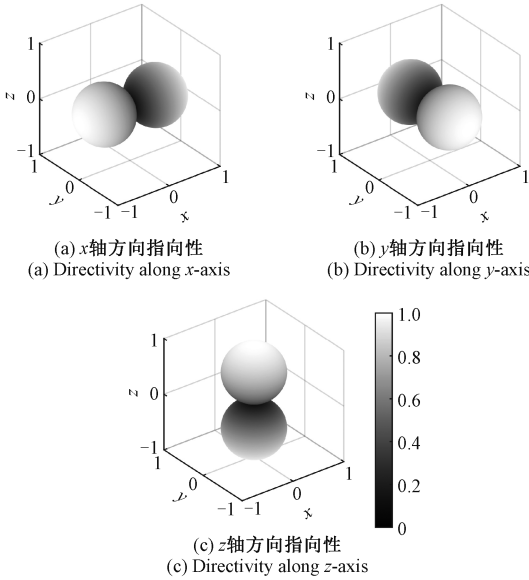


图2 三轴方向上的压差指向性

Fig. 2 Pressure difference directivities along the three axes

压差式矢量水听器在三轴方向上的压差指向性, 也是水听器 1 与 2、3 与 4、5 与 6 这 3 对标量水听器的压差指向性。除了这 3 对水听器, 组成压差式矢量水听器的 6 个水听器中, 任意两个水听器的压差均具有偶极子指向性, 这是本文提出的幅相误差校正方法的基础。以水听器 1、4、6 为例, 水听器 1 与 4 的压差指向性 D_{14} 和水听器 1 与 6 的压差指向性 D_{16} 如式(4)所示。

$$\begin{aligned} D_{14} &= |\sin[kd \cos \phi (\cos \theta + \sin \theta)/4]| \\ D_{16} &= |\sin[kd (\cos \phi \cos \theta + \sin \phi)/4]| \end{aligned} \quad (4)$$

当 $kd/2 \ll 1$ 时, 这两对水听器的压差也呈现偶极子指向性, 如图3所示。以此类推, 任意两个水听器均具有“8”字形压差指向性, 只是指向方向不同。

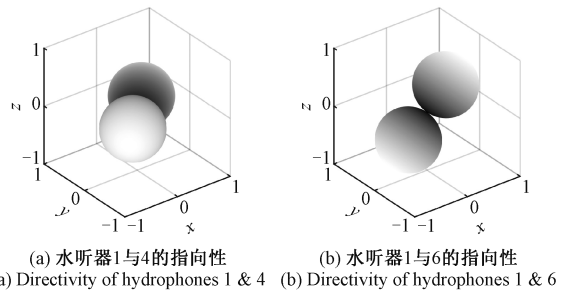


图3 任意两个水听器的压差指向性

Fig. 3 Pressure difference directivities of two arbitrary hydrophones

1.2 幅相误差对压差指向性的影响

组成压差式矢量水听器的各个标量水听器之间存在幅相误差。假设水听器 1 与 2 的灵敏度分别为 M_1 和 M_2 , 并且水听器 1 相对水听器 2 存在相位误差 α , 令幅度误差 $Q = M_1/M_2$, 则两个水听器的输出电压如式(5)所示。

$$\begin{cases} u_1 = M_1 p_1 = Q M_2 p_1 = \\ Q M_2 p_0 \exp[j(kd \cos \phi \cos \theta/2 + \alpha)] \\ u_2 = M_2 p_2 = M_2 p_0 \exp[j(-kd \cos \phi \cos \theta/2)] \end{cases} \quad (5)$$

可以推导出压差指向性 D 如式(6)所示。

$$D = \sqrt{Q^2 - 2Q \cos(kd \cos \phi \cos \theta + \alpha) + 1} \quad (6)$$

为方便说明, 以俯仰角 $\phi = 0^\circ$ 的情况为例。幅相误差对压差指向性的影响如图4所示。

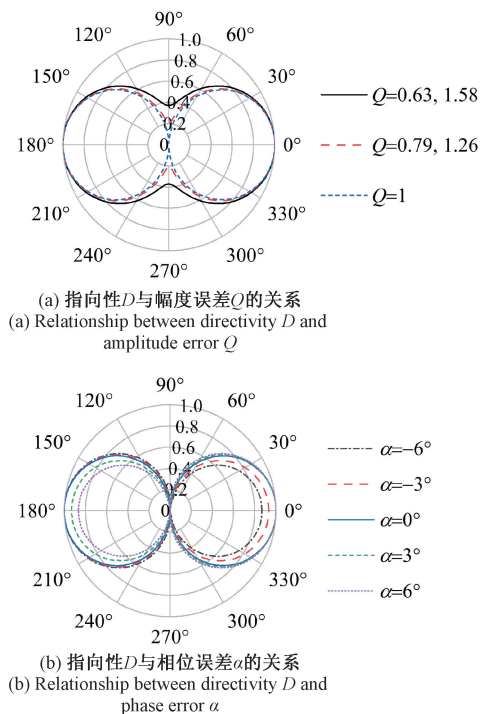


图4 幅相误差对压差指向性的影响

Fig. 4 Influences of amplitude and phase errors on the pressure difference directivity

当两个水听器的灵敏度相差 -4、-2、0、2、4 dB, 即幅

度误差 $Q=0.63, 0.79, 1, 1.26, 1.58$ 时, D 与 Q 的关系如图 4(a) 所示; 当相位误差 $\alpha=-6^\circ, -3^\circ, 0^\circ, 3^\circ, 6^\circ$ 时, D 与 α 的关系如图 4(b) 所示。可以看出, 幅度误差会对偶极子指向性的凹陷深度造成影响, 而相位误差会对偶极子指向性的对称性造成影响。当不存在幅相误差, 即 $Q=1, \alpha=0^\circ$ 时, 式(6)中 D 的表达式与式(3)中 D_x 表达式相同。

2 方 法

2.1 基于矢量水听器指向性的幅相误差校正方法

当压差式矢量水听器不存在幅相误差时, 任意一对标量水听器的压差指向性曲线均为“8”字形, 曲线完全对称且凹陷最深, 理论曲线可以提前计算获得; 当水听器存在幅相误差时, 压差指向性曲线会发生畸变。因此, 本方法通过将压差灵敏度曲线修正为理想形状校正幅相误差, 从而降低水下目标测向误差。

校正装置布置如下: 将声源固定, 压差式矢量水听器放置在声源的远场区域, 声源与水听器保持在相似深度。使用精密转台控制水听器按预设角度间隔逐次旋转, 每旋转一次, 声源发出数个单频脉冲信号, 各标量水听器同步采集并存储声信号数据。

数据处理步骤为:

- 1) 对各通道信号进行滤波等预处理操作;
- 2) 选取一个不在旋转轴上的水听器作为基准;
- 3) 对各通道信号的幅值进行缩放, 扫描缩放量 Q , 计算水听器 i 与基准水听器的压差指向性 $D_{Q,i}(\theta)$, 直至每条指向性曲线的凹陷深度均为最深, 如式(7)所示。

$$\min[\min[D_{Q,i}(\theta)]/\max[D_{Q,i}(\theta)]] \quad (7)$$

- 4) 对各通道信号进行时移, 扫描时移量 Δt , 计算水听器 i 与基准水听器的压差指向性 $D_{\Delta t,i}(\theta)$, 直至每条指向性曲线接近完全对称, 如式(8)所示。

$$\min\left[\int_0^\pi D_{\Delta t,i}(\theta) d\theta - \int_\pi^{2\pi} D_{\Delta t,i}(\theta) d\theta\right] \quad (8)$$

至此, 各标量水听器与基准水听器间的幅相误差校正完成。

本方法相比于其他有源校正方法, 无需声源精确位置, 且声源与矢量水听器入水深度也无需完全相同, 因为不论声源从哪个方向入射, 各水听器间的压差均会呈现偶极子指向性。只要声源保持不动, 测量到完整的指向性曲线, 即可采用以上方法。需要注意的是, 本方法针对窄带信号设计, 且被校正的频率需要满足 $kd/2 \ll 1$ 的条件, 以保持矢量水听器的偶极子指向性。

2.2 校正结果的使用

单个矢量水听器可通过复声强法进行水下目标测向。复声强法在频域对声压和质点振速进行联合处理, 可以抑制各向同性的背景噪声, 并且能实现不同频段多目标的区分^[9,21]。

复声强法的计算过程为: 使用压差式矢量水听器测量声压 p 和振速矢量的 3 个轴向分量 v_x, v_y, v_z , 再变换到频域, 得到 P 和 V_x, V_y, V_z , 则复声强 I 在三轴方向分量的表达式如式(9)^[9]所示。

$$\begin{cases} I_x = \overline{PV_x^H} \\ I_y = \overline{PV_y^H} \\ I_z = \overline{PV_z^H} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $(\cdot)^H$ 表示取共轭。那么目标的方位角 θ 和俯仰角 ϕ 可由式(10)^[9]计算, 即:

$$\begin{cases} \theta = \arctan \frac{\operatorname{Re}[I_y]}{\operatorname{Re}[I_x]} \\ \phi = \arctan \frac{\operatorname{Re}[I_z]}{\sqrt{(\operatorname{Re}[I_x])^2 + (\operatorname{Re}[I_y])^2}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\operatorname{Re}[\cdot]$ 表示取实部。

3 实验验证

3.1 实验装置搭建

利用实验室自研的 6 个声压水听器^[22] 搭建了一个三维压差式矢量水听器, 各声压水听器固定于不锈钢材质的框架上。以框架中心为原点, 1~6 号水听器分别位于 $\pm x, \pm y, \pm z$ 轴上, 每条轴线上的两个水听器间距为 0.1 m。矢量水听器模型和实物如图 5 所示, 图中标注的数字为声压水听器的序号。由于工艺的原因, 各声压水听器的灵敏度和相位一致性存在一定差异。

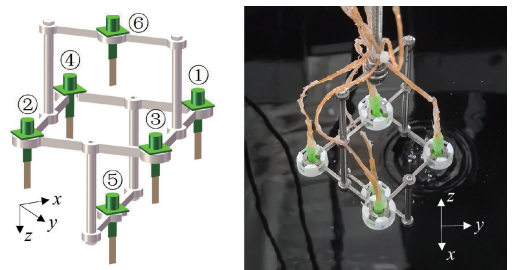


图 5 压差式矢量水听器模型及实物

Fig. 5 Model and photo of the tested pressure-gradient vector hydrophone

实验在交通运输部天津水运工程科学研究所消声水池中进行, 如图 6 所示。该消声水池为六面消声水池, 尺寸为 $30 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 8 \text{ m}$, 对于 3 kHz 以上频率声波的吸声系数 $\geq 99\%$ 。消声水池上有两个行车平台, 大车可沿水池长边移动, 小车可沿水池短边移动。

将待测试的压差式矢量水听器固定在行车平台小车的精密转台上, 入水深度 1.5 m, 整体可绕 z 轴旋转。使用的水声换能器型号为 ST-150, 固定在另一行车平台上, 入水深度

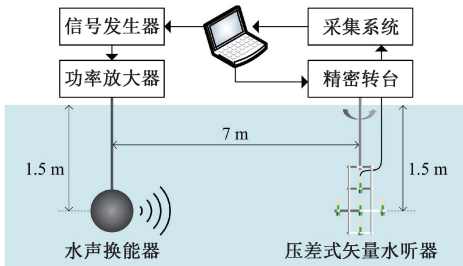
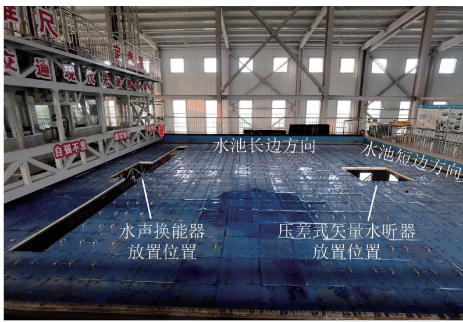


图 6 消声水池及测试装置

Fig. 6 Diagram of anechoic tank and apparatus

1.5 m,可沿三坐标轴平移,与矢量水听器中心的最短距离约为 7 m。采集系统、发射系统均布放在行车平台上,水听器各通道信号由采集系统同步采集,并传输至计算机。

3.2 压差指向性测试及幅相误差校正

首先测试压差式矢量水听器的压差指向性,并以此校正矢量水听器的幅相误差。考虑到消声水池的吸声频率范围,选择 3 kHz 作为测试频率。未旋转时,换能器位于水听器坐标系 +x 轴方向。每次控制精密转台逆时针旋转 5°,旋转完成后,用计算机控制水声换能器发出 3 kHz 的脉冲串,同步采集各声压水听器的接收信号,并存储在计算机中。旋转一周后,绘制压差指向性曲线,可得 x 轴方向、y 轴方向、水听器 1 与 4、水听器 1 与 6 的压差指向性曲线如图 7(a) 所示。由图可知,各指向性曲线出现了不对称和凹陷深度较浅的情况,意味着各声压水听器之间存在幅相误差。

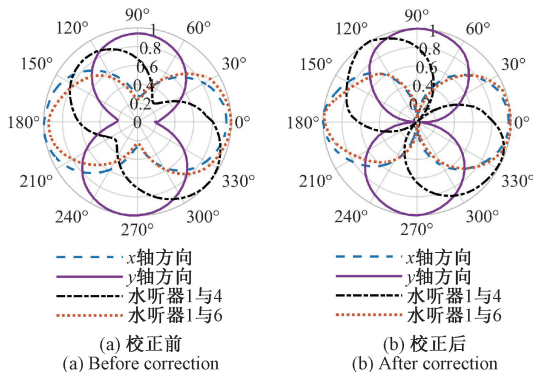


图 7 幅相误差校正前后的压差指向性 (3 kHz)
Fig. 7 Pressure difference directivities before and after correction (3 kHz)

选取不在旋转轴上的 1 号水听器作为基准,按照 2.1 节的方法对 2~6 号水听器进行幅相误差校正,使 1 号水听器与 2~6 号水听器的压差指向性均为基本对称的“8”字形。校正后的压差指向性曲线如图 7(b) 所示,可以看出,各指向性曲线已接近理想形状,说明水听器的幅相误差已被校正。其中,部分压差指向性曲线出现局部凹陷,这是因为当矢量水听器旋转至某些角度时,个别声压水听器受到其他水听器或水下结构的遮挡,相应角度的压差幅值发生变化,导致指向性曲线不完全对称。下面通过旋转矢量水听器和平移声源的声源测向实验证明校正的有效性。

3.3 单压差式矢量水听器声源测向实验

1) 旋转矢量水听器测向

保持换能器位置不动,精密转台控制矢量水听器逆时针旋转一周,采用复声强法测量换能器的方位角和俯仰角。共进行 3 次测试,校正前后的方位角和俯仰角测量结果以及误差统计如图 8 所示。

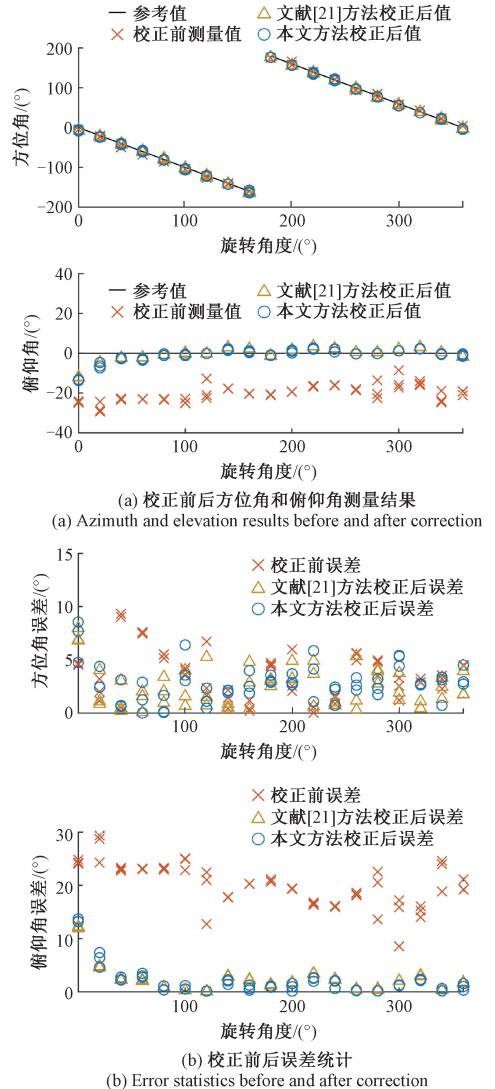


图 8 旋转水听器测向结果和误差统计 (3 kHz)
Fig. 8 Results and error statistics of sound source localization tests by rotating hydrophone (3 kHz)

校正前,方位角误差 $<5^\circ$ 的数据点占比 78.9%,用本文方法校正后提升至 89.5%,提升了 10.6%,用文献[21]方法校正后提升至 91.2%;校正前,俯仰角误差 $<10^\circ$ 的数据点占比 1.8%,用本文方法和文献[21]方法校正后均提升至 94.7%,提升了 92.9%。校正前的俯仰角测量值误差较大是因为 5 号水听器存在较大的幅相误差,因此校正后测向误差也大幅下降。

2) 平移声源测向

保持压差式矢量水听器位置不动,控制声源行车平台的小车沿水池短边方向平移,小车带着换能器从 650 mm 移动至 8 650 mm,每移动 500 mm 记录 3 次数据并测量换能器的方位。校正前后的方位角和俯仰角测量结果以及误差统计图如图 9 所示。

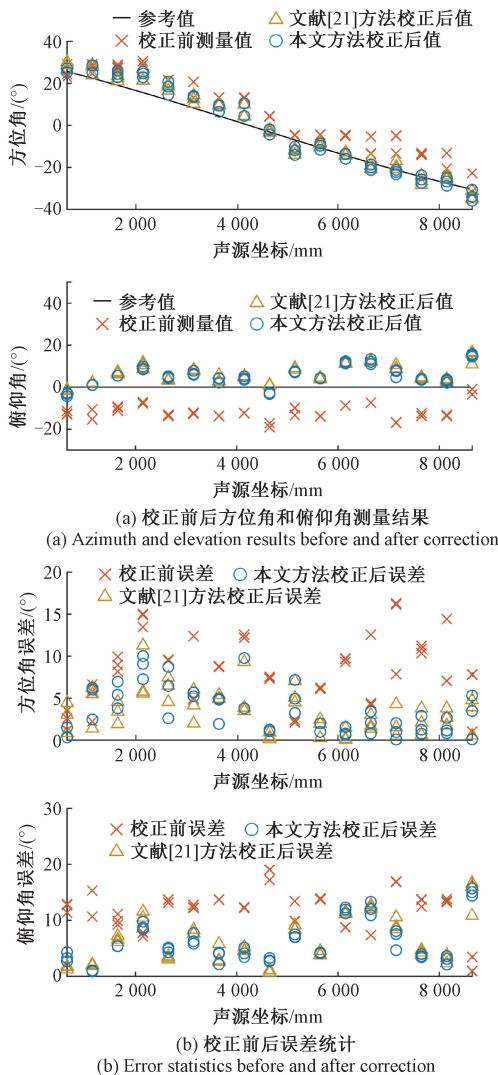


图9 平移声源的声源测向结果和误差统计(3 kHz)

Fig. 9 Results and error statistics of sound source localization tests by moving sound source (3 kHz)

校正前,方位角误差 $<5^\circ$ 的数据点占比 25.9%,用本

文方法校正后提升至 72.2%,提升了 46.3%,用文献[21]方法校正后提升至 77.8%;校正前,俯仰角误差 $<10^\circ$ 的数据点占比 35.2%,用本文方法校正后提升至 77.8%,提升了 42.6%,用文献[21]方法校正后提升至 72.2%。由此证明,本文提出的幅相误差校正方法与文献[21]提出的方法校正效果基本持平,本文提出的幅相误差校正方法是有效的。

4 结 论

本文针对三维压差式矢量水听器中各标量水听器之间存在的幅相误差问题,提出了一种基于压差式矢量水听器偶极子指向特性的有源旋转校正方法。通过理论分析阐明了幅相误差影响指向性曲线形状的规律,为校正方法提供了理论依据。在消声水池中使用实验室自研三维压差式矢量水听器进行了实验验证。结果表明,校正后各水听器间压差指向性曲线均呈现理想的“8”字形;在旋转水听器和平移声源的声源测向实验中,方位角和俯仰角误差均有效降低,声源测向精度显著提高。该方法无需声源精确位置,仅通过旋转操作即可完成校正,降低了校正难度和成本,不仅适用于由多对标量水听器组成的压差式矢量水听器,理论上也适用于阵元对称分布的小型立体阵列,具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 井岩,沈毅,冯乃章,等. 确定性采样的矢量水听器阵列舰船目标方位估计[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(6): 1267-1276.
JING Y, SHEN Y, FENG N ZH, et al. Ship target bearing estimation based on deterministic sampling vector hydrophone array [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1267-1276.
- [2] 李楠松,朴胜春. 单矢量水听器被动测距方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(10): 2273-2282.
LI N S, PIAO SH CH. Research on passive ranging method with single vector hydrophone [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2273-2282.
- [3] 李智,杨士莪. 水声矢量传感器研究进展与挑战[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 1-19.
LI ZH, YANG SH E. Advances and challenges in underwater acoustic vector sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 1-19.
- [4] 吕文磊,庞盟,王利威,等. 基于顺变柱体和膜片复合结构的压差式光纤矢量水听器研究[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 340-346.

- LYU W L, PANG M, WANG L W, et al. Study on optic fiber gradient hydrophone based on composite structures of compliantly variable cylinder and diaphragm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 340-346.
- [5] 张滔, 胡斌杰, 陈超育, 等. 三维压差式光纤矢量水听器设计与实验[J]. *半导体光电*, 2020, 41(2): 173-176, 181.
- ZHANG T, HU B J, CHEN CH Y, et al. Design and experiment of three-dimensional gradient fiber optic vector hydrophone[J]. *Semiconductor Optoelectronic*, 2020, 41(2): 173-176, 181.
- [6] WANG X Y, LIU CH B, WU G Q. An acoustic pressure-gradient MEMS vector hydrophone system based on piezoelectric micromachined ultrasonic transducer array[J]. *Microelectronics Journal*, 2024, 151: 106332.
- [7] ZHOU ZH K, LIU CH B, JIA L CH, et al. A ScAlN piezoelectric high-frequency acoustic pressure-gradient MEMS vector hydrophone with large bandwidth[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, 43(7): 1109-1112.
- [8] 丁俊文, 涂其捷, 邢建新, 等. 双迭片压差式矢量水听器设计与制造[C]. *中国声学学会水声学分会2019年学术会议论文集*, 2019: 95-97.
- DING J W, TU Q J, XING J X, et al. Design and manufacture of double-stack pressure-gradient vector hydrophone[C]. *Proceedings of the 2019 Academic Conference of the Underwater Acoustics Branch of the Acoustical Society of China*, 2019: 95-97.
- [9] 聂林涛. 基于单压差式矢量水听器的测向算法[J]. *数字海洋与水下攻防*, 2024, 7(6): 670-677.
- NIE L T. Direction finding method based on single pressure gradient vector hydrophone[J]. *Digital Ocean & Underwater Warfare*, 2024, 7(6): 670-677.
- [10] CAO W, ZHAO X F, LI X SH, et al. Influence of element characteristics on DOA estimation for pressure-gradient vector hydrophones[C]. *2024 OES China Ocean Acoustics*, 2024: 1-6.
- [11] 程彬彬, 杨士莪. 基于二维压差式矢量水听器源估计误差分析[J]. *西北工业大学学报*, 2006, 24(6): 800-803.
- CHENG B B, YANG SH E. Quantitative analysis of error of estimated bearing of acoustic source location with TDPG vector hydrophone[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2006, 24(6): 800-803.
- [12] 熊水东, 王付印, 罗洪, 等. 驻波管测试下压差式光纤矢量水听器的改进[J]. *压电与声光*, 2012, 34(6): 820-823.
- XIONG SH D, WANG F Y, LUO H, et al. Improvement of fiber-optic gradient hydrophone under standing wave tube measurement method[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2012, 34(6): 820-823.
- [13] CHI F Y, ZHAO M Y, XIAO Y. Calibration method for phase consistency of hydrophone array based on PSO-SA[C]. *2023 IEEE 11th International Conference on Computer Science and Network Technology*, 2023: 212-218.
- [14] 段晶晶, 李钢虎. 基于遗传算法的矢量水听器阵相位误差校正[J]. *声学技术*, 2012, 31(2): 174-178.
- DUAN J J, LI G H. GA based phase error correction of vector hydrophone array[J]. *Technical Acoustics*, 2012, 31(2): 174-178.
- [15] 李明荃, 刘帅, 闫锋刚, 等. 基于FastICA的DOA估计和幅相误差校正算法[J]. *电波科学学报*, 2025, 40(5): 864-871.
- LI M Q, LIU SH, YAN F G, et al. Direction-of-arrival estimation and gain-phase error calibration based on FastICA[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2025, 40(5): 864-871.
- [16] 王鹏, 王红云, 郭亚强, 等. 基于声矢量水听器阵列误差的自校正算法[J]. *数学的实践与认识*, 2017, 47(6): 136-143.
- WANG P, WANG H Y, GUO Y Q, et al. Error self-calibration algorithm for acoustic vector hydrophone array[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2017, 47(6): 136-143.
- [17] 郝崇宇, 施伟, 王保卫. 基于单辅助源校正的MUSIC测向性能分析与实验验证[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(18): 167-172.
- HAO CH Y, SHI W, WANG B W. Analysis and experimental verification of MUSIC direction finding based on single auxiliary source correction algorithm[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(18): 167-172.
- [18] 晁大海, 李光远, 侯朋. 基于模拟退火法的水下多元线阵阵列误差有源校正方法[J]. *舰船科学技术*, 2018, 40(9): 107-110.
- CHAO D H, LI G Y, HOU P. Calibration of underwater linear array with multiple sources based on simulated

annealing [J]. *Ship Science and Technology*, 2018, 40(9): 107-110.

- [19] CHITHRA K, KOKILA R, SREEDEV D S, et al. A method to calibrate phased hydrophone array elements in near field [C]. *OCEANS 2022-Chennai*, 2022: 1-4.
- [20] 古树星, 郭世旭, 焦君圣, 等. 基于旋转阵列的圆柱阵幅相误差校正方法 [J]. *声学技术*, 2025, 44(1): 148-154.
- GU SH X, GUO SH X, JIAO J SH, et al. A method of amplitude and phase errors correction for cylindrical array based on array rotation [J]. *Technical Acoustics*, 2025, 44(1): 148-154.
- [21] ZHANG X H, YANG G. Optimization of acoustic energy flux method based on single pressure gradient vector hydrophone [C]. 2024 IEEE 13th International Conference on Communications, Circuits, and Systems, 2024: 286-291.
- [22] 王硕元. 管道泄漏检测空腔水听器研制 [D]. 天津: 天津大学, 2024.
- WANG SH Y. Development of cavity hydrophone for pipeline leakage detection [D]. Tianjin: Tianjin University, 2024.

作者简介



李赞, 2019 年和 2022 年于天津大学获得学士学位和硕士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院博士研究生, 主要研究方向为水下声学感知和声学超材料。

E-mail: lizan@tju.edu.cn

Li Zan received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from Tianjin University in 2019 and 2022, respectively. He is currently a Ph.D student in School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main

research interests include underwater acoustic sensing and acoustic metamaterials.



蒋晓斌, 2002 年于西安石油学院获得学士学位, 2006 年于西安石油大学获得硕士学位, 现为中海油(天津)管道工程技术有限公司海底管道重点实验室负责人, 高级工程师, 主要研究方向为海底管道评估评价及检测。

E-mail: jiangxb3@cnooc.com.cn

Jiang Xiaobin received his B.Sc. degree from Xi'an Petroleum Institute in 2002, his M.Sc. degree from Xi'an Shiyou University in 2006. He is currently the head and a senior engineer of Key Laboratory of Submarine Pipeline of CNOOC (Tianjin) Pipeline Engineering Technology Co., Ltd. His main research interests include the evaluation and monitoring of submarine pipelines.



黄新敬(通信作者), 2010 年和 2016 年于天津大学获得学士学位和博士学位, 现为天津大学精密仪器与光电子工程学院副教授、博士生导师, 研究方向为结构健康检测技术及仪器、声磁智能感知、管道缺陷检测和新型管道内检测器。

E-mail: huangxinjing@tju.edu.cn

Huang Xinjing(Corresponding author) received his B.Sc. and Ph.D. degrees both from Tianjin University in 2010 and 2016, respectively. He is currently an associate professor and a doctoral advisor in School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering at Tianjin University. His main research interests include structural health inspection and monitoring technology and instruments, acoustic and magnetic intelligent sensing, pipeline defect detection, and new type pipeline detector.