

引用格式: 熊翰林, 张希, 周炜, 等. 基于矢量运算的换能器指向性图修正方法[J]. 声学技术, 2023, 42(3): 391-396. [XIONG Hanlin, ZHANG Xi, ZHOU Wei, et al. A modification method of transducer directivity map based on vector operation[J]. Technical Acoustics, 2023, 42(3): 391-396.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2023.03.019

基于矢量运算的换能器指向性图修正方法

熊翰林¹, 张希¹, 周炜², 沈国栋¹, 段炼¹, 赵颀¹

(1. 昆明船舶设备研究试验中心, 云南昆明 650051; 2. 驻昆明地区第三军事代表室, 云南昆明 650051)

摘要: 换能器的指向性测试是其声学性能测试的基本项之一。文章对换能器的指向性测试时, 声中心与机械装置的旋转中心存在偏差的情况进行分析, 并采用极坐标下矢量运算的方法进行理论分析和仿真, 得出该偏差会直接对测试结果引入幅度与角度偏差, 使全指向性换能器指向性图形成类似心形的指向性图, 并得到了一种换能器指向性图修正方法。实测结果表明: 当声中心与机械装置的旋转中心存在偏差时, 换能器指向性响应测试及指向性开角的判读会存在偏差, 同时文中提出的指向性图修正方法对此工况下的测试结果有较好的修正效果, 有助于提高水声换能器指向性测量的精度, 且具有良好的工程适用性。

关键词: 水声换能器; 指向性测试; 矢量运算

中图分类号: TB552

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2023)-03-0391-06

A modification method of transducer directivity map based on vector operation

XIONG Hanlin¹, ZHANG Xi¹, ZHOU Wei², SHEN Guodong¹, DUAN Lian¹, ZHAO Xie¹

(1. Kunming Shipborne Equipment Reseach and Test Center, Kunming 650001, Yunnan, China;

2. The Third Military Representative Office in Kunming, Kunming 650001, Yunnan, China)

Abstract: The directivity test of the transducer is one of the basic acoustic performance test items. In this paper, the deviation between the sound center and the rotation center of the mechanical device is calculated in transducer directivity test, which shows that the deviation will directly introduce the amplitude and angle deviations of the test result to change the directivity pattern of a full-directional transducer into a pattern similar to heart-shape; and then a correction method for directivity pattern is proposed. The actual test results show that the correction method proposed in this paper is effective when the deviation between the mechanical rotation center and the sound center exists; and as the rotation radius of the mechanical device increases, the correction effect is gradually getting better. This method helps to improve the accuracy of the directivity measurement of underwater acoustic transducer, and has good engineering applicability.

Key words: underwater acoustic transducer; directivity test; vector operations

0 引言

水声换能器自由场、远场的指向性响应的特性描述有: 指向性图、指向性因数和指向性指数等^[1]。在换能器指向性图测量中的主要问题是如何获得自由场条件及解决换能器能在各个定向平面中旋转的精密机械装置^[2]。

目前换能器指向性实测的自由场条件是通过消声水池、湖上试验等场地条件解决, 单只换能器精

确旋转可通过高精度的旋转台来解决^[3]。而对于大尺寸水声换能器或者安装至航行体的水声换能器^[4], 在实测中, 其声中心与旋转中心难以重合, 导致实测的换能器指向性响应不能正确反映大尺寸换能器或安装至航行体的换能器的指向性响应。

本文通过对水声换能器的指向性图测量原理与实际指向性图测量中遇见的问题(即换能器声中心与旋转中心不重合的情况)进行分析, 推导了水声换能器指向性图测量修正的方法, 并通过测试实验进行比对, 结果显示该指向性图测量修正方法具有良好的操作性与工程适用性, 有利于提高水声换能器指向性测量的精确性。同时本文是以发射换能器指向性图测量为例, 进行分析、推导与实验, 根据水声测量的互易性, 该方法同样适用于发射换能器

收稿日期: 2021-11-19; 修回日期: 2022-02-11

作者简介: 熊翰林(1993—), 男, 湖北荆州人, 硕士, 工程师, 研究方向为水声换能器技术。

通信作者: 赵颀, E-mail: zhaoxie750@163.com

阵及接收水听器与阵列。

1 基于矢量运算的换能器指向性图修正原理

1.1 指向性图测量原理

发射换能器指向性图表示其处于自由场中辐射声波时,在其远场辐射的声能分布。通常以 $D(\varphi, \theta)$ 表示归一化的指向性图函数^[5-6]:

$$D(\varphi, \theta) = \frac{p(\varphi, \theta)}{p(0, 0)} \quad (1)$$

式中: $p(\varphi, \theta)$ 表示考察方向 (φ, θ) 上自由场声压的有效值; $p(0, 0)$ 表示声轴方向(或者选定方向)上自由场远场声压的有效值,通常选定 $p(0, 0)$ 方向就为有效值声压最大值的方向。由式(1)可知, $D(\varphi, \theta)$ 函数为一个不大于1的正数,若以分贝表示,则 $20 \lg D(\varphi, \theta)$ 恒为非正分贝数。在水声换能器测量中,指向性图测量实验布置图如图1所示。

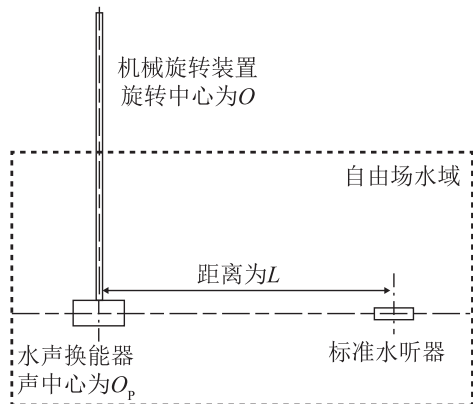


图1 指向性图测量装置布置图

Fig.1 Layout of the measuring device for directivity pattern

水声换能器指向性图测试时,将机械旋转装置旋转中心 O 与水声换能器声中心 O_p 对齐,测试步骤如图2所示。

而在大量水声换能器指向性图的实测过程中,水声换能器安装至水密结构件后,其辐射指向性响应受到结构件影响,会导致旋转中心 O 与声中心 O_p 存在偏差,最终水声换能器安装至水密结构件后不能正确地测试其指向性响应。旋转中心与声中心存在偏差时的装置布置图与俯视图如图3、4所示。

由图4可知,在水声换能器安装至水密结构件后的指向性图测量中,为了测试方便或无法精确旋转水声换能器声中心,造成旋转中心 O 与声中心 O_p 存在偏差时,往往将机械装置的旋转角 θ 当作水声换能器声中心与标准水听器声中心夹角 θ_p ,同时将旋转中心 O 与标准水听器声中心距离 L 默认为水声

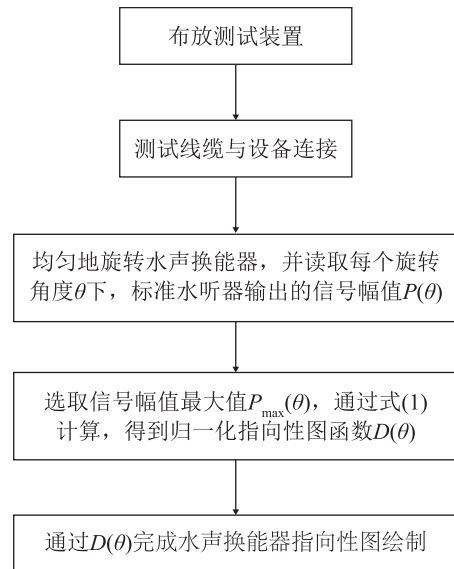


图2 水声换能器指向性图的测试过程

Fig.2 Procedure of the directivity pattern test of underwater acoustic transducer

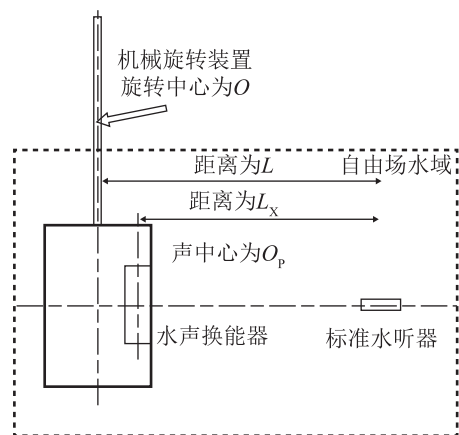


图3 旋转中心与声中心存在偏差情况的示意图

Fig.3 Schematic diagram of the deviation between the mechanical rotation center and the sound center

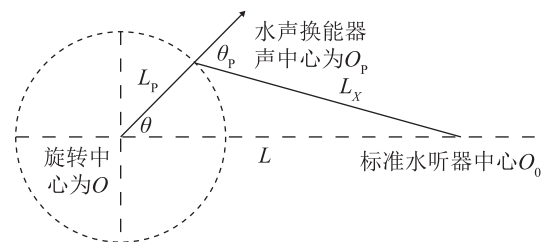


图4 偏差情况俯视图

Fig.4 Top view of the deviation

换能器声中心 O_p 与标准水听器声中心的距离 L_x ,从而引入了测量误差。而这一情况可以通过测试数据的处理进行修正。

1.2 声中心与旋转中心不重合的指向性测量修正原理

由1.1节分析可知,测量误差主要由测量距离和角度的偏差引起。因此对水声换能器指向性图测

试数据的修正可分为声压幅值修正与角度修正。

如图4所示,本节的推导是基于机械旋转装置的旋转角度 θ 、机械旋转装置的旋转中心 O 与标准水听器声中心的距离 L 、旋转中心 O 与声中心 O_p 的距离 L_p 、以及标准水听器接收到的声压幅值 $P(L_x)$ 已知情况。这也符合测量的实际情况。

如图4所示,根据余弦定理可知,水声换能器声中心 O_p 到标准水听器声中心的距离 L_x 与旋转中心 O 到标准水听器声中心距离 L 的关系满足:

$$L_x = \sqrt{L_p^2 + L^2 - 2L_p L \cos \theta} \quad (2)$$

在 L_x 通过式(2)已计算获知的情况下,可根据正弦定理计算得到水声换能器声中心 O_p 与标准水听器声中心夹角 θ_p 满足:

$$\frac{L}{\sin(\pi - \theta_p)} = \frac{L_x}{\sin \theta} \quad (3)$$

对式(3)分析可知,在换能器指向性实测时 $\theta \in [0, 2\pi]$,换能器声中心与标准水听器声中心夹角 θ_p 也能满足 $\theta_p \in [0, 2\pi]$ 。由于未考虑旋转中心 O 与声中心 O_p 存在偏差的情况,因此在实测中往往会引入角度误差。由于水声换能器指向性图的测量是在自由场、远场的条件下,同时其声传播规律符合球面波辐射规律,声压 $p(r)$ 传播规律为

$$p(r) = \frac{A}{r} e^{-jkr} = P(r) e^{-jkr} \quad (4)$$

式中: A 为取决于振源和边界条件的常数; r 为传播距离; $P(r) = A/r$ 为距离声源 r 处的声压幅值; ω 为角频率; k 为波数。

由式(4)可知,当换能器声中心与标准水听器声中心夹角为 θ_p 的情况下,满足球面波辐射条件时,距离声源 L_x 处的声压幅值 $P(L_x)$ 与距离其声中心1 m处的声压幅值 $P_{1\theta_p}$ 的关系为

$$P(L_x) = \frac{P_{1\theta_p}}{L_x} = \frac{P_{1\theta_p}}{\sqrt{L_p^2 + L^2 - 2L_p L \cos \theta}} \quad (5)$$

由于 $P(L_x)$ 可由待测水听器测量得出,而该声压幅值对应的待测换能器的声中心 O_p 与标准水听器声中心夹角 θ_p ,也由式(3)可计算得出。

因此在换能器指向性测试时,在机械旋转中心 O 与声中心 O_p 存在偏差的情况下,通过正弦定理与余弦定理,即式(3)与式(5)的修正,可得到正确的水声换能器指向性图。

1.3 基于矢量运算的换能器指向性测量修正

为了简化计算,提高指向性测量数据修正的数据处理速度,将极坐标引入该处理方法中,并通过

矢量计算的方法处理水声换能器指向性图测量数据。以机械旋转中心 O 为原点建立极坐标系,如图5所示。

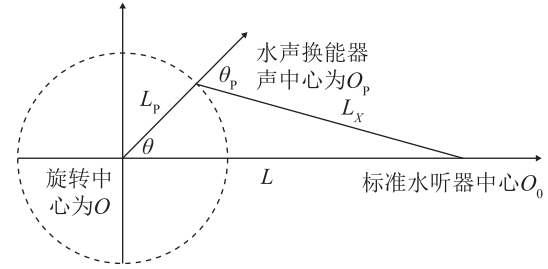


图5 指向性测试坐标系

Fig.5 Establishment of the coordinate system for directivity test

由图5可知,在该坐标系下待测的水声换能器声中心 O_p 坐标为 $(L_p \cos(\theta), L_p \sin(\theta))$,标准水听器声中心 O_0 为 $(L, 0)$ 。因此,可分别建立向量^[7-8]:

$$\overrightarrow{OO_p} = [L_p \cos(\theta) \quad L_p \sin(\theta)] \quad (6)$$

$$\overrightarrow{OO_0} = [L \quad 0] \quad (7)$$

$$\overrightarrow{O_p O_0} = [L - L_p \cos(\theta) \quad -L_p \sin(\theta)] \quad (8)$$

因此通过向量计算可知:

$$L_x = |\overrightarrow{O_p O_0}| = \sqrt{L_p^2 + L^2 - 2L_p L \cos \theta} \quad (9)$$

$$\theta_p = \arccos \left[\frac{\overrightarrow{OO_p} \cdot \overrightarrow{O_p O_0}}{(|\overrightarrow{OO_p}| \cdot |\overrightarrow{O_p O_0}|)} \right] = \arccos \left(\frac{LL_p \cos(\theta) - L_p^2}{L_p \sqrt{L_p^2 + L^2 - 2L_p L \cos(\theta)}} \right) \quad (10)$$

将式(10)代入式(5),即可得到在换能器声中心与标准水听器声中心夹角为 θ_p 的情况下,满足球面波辐射条件时,距离待测换能器声中心1 m处的声压幅值 $P_{1\theta_p}$,通过对一周向的距离声源 L_x 处的声压幅值 $P(L_x)$ 与换能器声中心和标准水听器声中心夹角 θ_p 采集与修正,即可得到待测换能器较为精确的指向性图。

1.4 指向性图测量偏差分析

通过上述的修正推导,机械旋转中心 O 与声中心 O_p 存在偏差情况下待测换能器指向性进行测试,会存在角度与数值的误差,为此本节将通过数值仿真的方法,模拟机械旋转中心 O 与声中心 O_p 存在偏差的情况,并分析角度和幅值的误差对换能器指向性测试带来的影响。本节选取 $L=1.5$ m。

角度偏差情况数值计算结果:分别计算在 $L_p=150、250、500$ 及 700 mm的情况下,机械旋转中心 θ 旋转一周时,实际换能器声中心与标准水听器声中心夹角 θ_p 与旋转角 θ 的差值如图6所示。

幅值偏差情况数值计算结果:为提高展示效果,以周向起伏为0 dB的全指向性换能器指向性

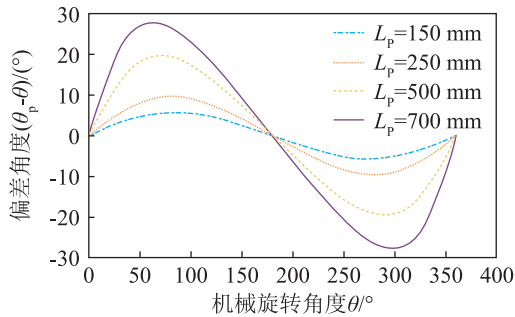


图6 换能器指向性图角度偏差数值计算结果

Fig.6 Numerical calculation results of the angular deviation of transducer directivity pattern

图为例, 分别计算在 $L_p=150$ 、250、500及700 mm的情况下, 机械旋转中心 θ 旋转一周时, 换能器指向性幅值偏差对数值。计算结果如图7所示。

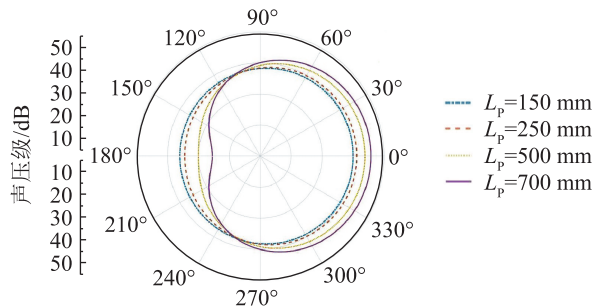


图7 换能器指向性图幅值偏差数值计算结果

Fig.7 Numerical calculation results of the amplitude deviation in the transducer directivity pattern

对图6、7中水声换能器指向性测试的角度偏差及幅值偏差的数值计算结果进行分析可知: 当水声换能器指向性测试存在换能器声中心与机械旋转装置中心有偏差时, 换能器指向性图测试会引入幅度偏差, 同时声中心实际旋转角度与换能器旋转中心角度也存在角度偏差。幅度与角度的偏差情况如式(9)、(10)所示, 二者不是简单的线性关系, 随 L_p 的增加偏差增大, 同时在靠近声中心与标准水听器组成的轴线附近, 偏差变化更加快速和明显。

综上所述: 由于在靠近声中心与标准水听器组成的轴线附近, 幅度与角度偏差变化更加快速和明显, 会使周向起伏为0 dB的全指向性换能器指向性图形成类似心形的指向性图, 从而影响换能器指向性开角的判读等。因此上述换能器指向性图测试时, 有必要对其换能器声中心与机械旋转装置中心有偏差的指向性测量结果进行修正。

2 指向性图测量实验结果

2.1 指向性测量比对实验

为验证本文修正方法的原理与可行性, 对换能

器指向性测试时机械旋转中心 O 与声中心 O_p 存在偏差的情况下进行待测换能器指向性测试。按图8布置换能器指向性测试实验, 测试频率为60 kHz, 模拟机械旋转中心 O 与声中心 O_p 存在偏差的情况, 并进行修正与对比, 其中 $L=1500$ mm。

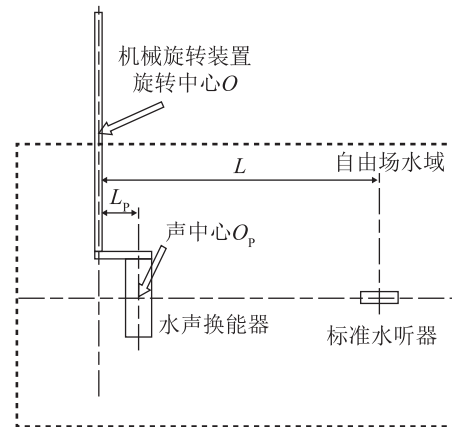


图8 换能器指向性测试实验布置示意图

Fig.8 Experimental layout of transducer directivity test

分别在旋转中心 O 与声中心 O_p 的距离 L_p 为0、150、250、500、700 mm情况下对待测发射换能器的指向性进行测试, 并将 L_p 为0与 L_p 为150、250、500及700 mm实验结果进行对比。

待测水声换能器装夹情况如图9所示, 换能器指向性测试步骤如图2所示。由标准水听器采集每隔 2° 的距离声源 L_x 处的声压 $P(L_x)$, 通过式(9)、(10)计算出每组数据下的 L_x 与 θ_p , 并代入式(5), 进行归一化处理即可得到修正后的待测换能器指向性测试结果。

2.2 换能器测试结果与对比

旋转中心 O 与声中心 O_p 的距离 L_p 为0、150、250、500、700 mm情况下, 待测发射换能器的指向性测试结果如图10所示, 为展示本文修正方法的有效性, 将 L_p 为150、250、500及700 mm修正前与修正后实验结果及 L_p 为0的结果分别绘制到一张图中, 并对测试结果与修正后的曲线进行归一化处理。为了便于直观地对比分析, 增加了指向性图的-10 dB波束宽度基准线。

对图10指向性图修正结果进行分析可知: 对比不同 L_p 修正前后的换能器指向性图测试结果, 未修正的指向性图随着 L_p 的增加, 在 0° 及 180° 轴线附近快速变化, 导致换能器指向性图逐渐扁平, 进而结合表1波束宽度判读结果, 可以看出此时波束判读结果会偏小。而修正后的指向性对比于未修正的指向性进行换能器指向性开角判读时, 其判读结果均更接近于 $L_p=0$ 的测试结果。

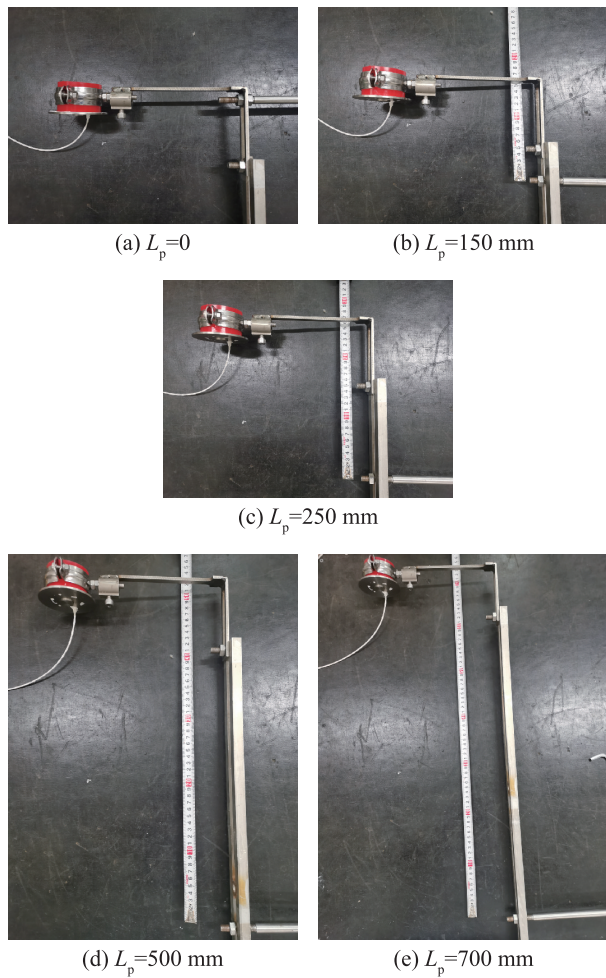
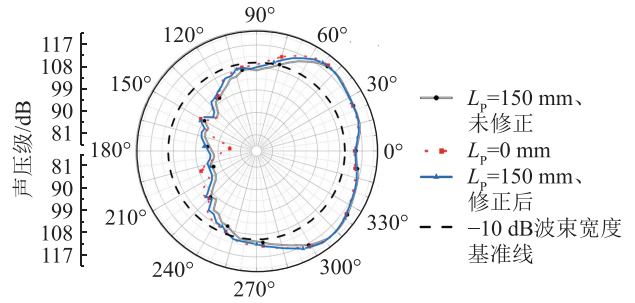


图9 不同 L_p 时待测换能器指向性测试安装图
Fig.9 Mounting the transducer for its directivity test with different L_p

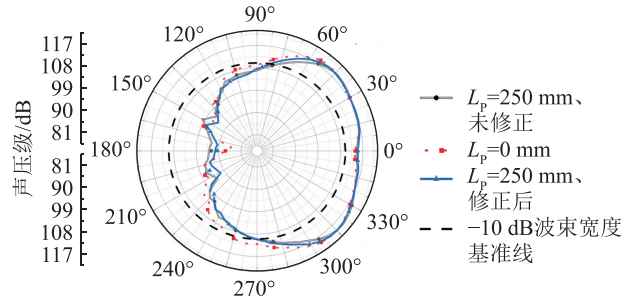
观察图10(a)、10(b)可知，当 L_p 较小时，未修正的指向性图测试结果与修正后的指向性曲线相比，换能器指向性图受 L_p 的影响但影响程度较小。而观察图10(c)、10(d)可知，当 L_p 进一步增加时，未修正的指向性图测试结果与修正后的指向性曲线相比，换能器指向性图受 L_p 的影响较大。

为进一步分析修正后的指向性与 $L_p=0$ 时的测试结果存在差异是否与测试环境有关，采用水平全指向性的球型发射换能器，与待测换能器的测试频率同为60 kHz、其余工况保持一致(即 L_p 为150、250、500、700 mm)的情况下，测试其水平指向性图。考虑到篇幅限制，将四种工况下测试的待测换能器的指向性图(未修正)分别绘制到图11中。为了方便分析，调整各测试数据的指向性图基准线，依次增加10 dB。

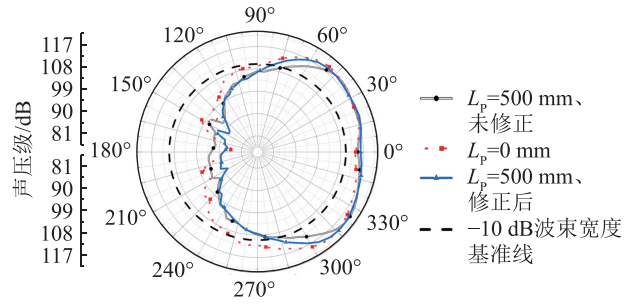
由图11中的测试结果，结合图9的装夹图分析可知，随着 L_p 的增加，整套测试夹具的刚度逐渐难以支撑换能器平稳旋转，出现垂直方向抖动的现象，导致指向性图出现起伏，并随着 L_p 的增加抖动



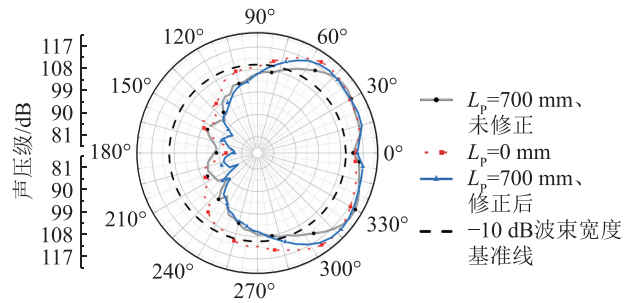
(a) $L_p=150$ mm测试对比图



(b) $L_p=250$ mm测试对比图



(c) $L_p=500$ mm测试对比图



(d) $L_p=700$ mm测试对比图

图10 待测换能器指向性图修正结果

Fig.10 Correction results of the directivity pattern of the transducer being tested

更加频繁、明显。进一步结合图10的待测换能器测试结果进行分析，可知待测换能器随着 L_p 的增加产生指向性图起伏加剧的现象，由于这种指向性图的起伏无法通过本文的方法修正，会导致修正后的指向性图与 $L_p=0$ 的测试结果偏差逐渐增加。这与前文的分析也是一致的。

综上所述：在 $L_p=150、250$ mm的修正结果中，如不考虑换能器测试时测试夹具出现的抖动，并导

表1 待测换能器修正前后波束宽度
Table 1 Beam-widths of the transducer being tested before and after correction

L_p/mm	$2\theta_{-6\text{dB}}/(\text{°})$		$2\theta_{-10\text{dB}}/(\text{°})$	
	修正前	修正后	修正前	修正后
0	145	145	194	194
150	141	144.4	182	184.6
250	133	141.3	170	171.0
500	120	136.4	147	159.8
700	110	136.3	139	156.3

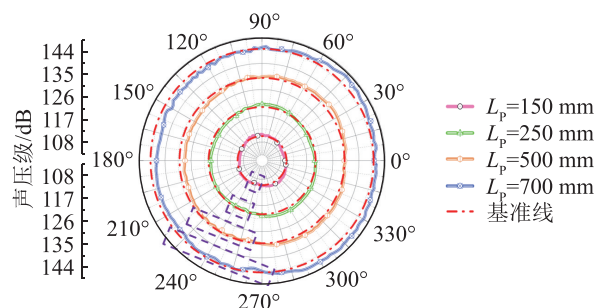


图11 球型发射换能器指向性图测试结果

Fig.11 Directivity diagram test results of spherical launch transducers

致指向性图起伏的现象,此时测试结果起伏较小。本文推导的水声换能器指向性图修正方法,对于水声换能器指向性测试时机械旋转中心与发射换能器声中心存在偏差的情况具有较好的修正效果。

当水声换能器安装至水密结构件或航行体等工况时,机械旋转中心与换能器声中心不可避免地存在较大偏差,不能正确地测试其指向性响应时,由于航行体等结构具有较大的刚度,因此不会出现抖动导致的指向性起伏。本文推导的指向性修正方法可以精确地测试水声换能器的指向性响应并进行指向性开角的判读。

3 结论

本文针对水声换能器的指向性测试时,其声中心与机械装置的旋转中心存在的偏差情况进行分析,并通过理论仿真方法得出以下结论:由于旋转中心偏差的存在,会给换能器指向性图测试结果带来幅度上的影响及与声中心实际旋转角度的偏差;且在靠近声中心与标准水听器组成的轴线附近,幅度与角度偏差的变化也更加快速和明显,会使周向起伏为0 dB的全指向性换能器的指向性图形成类似椭圆形的指向性图,影响换能器指向性响应测试

及指向性开角的判读。后续的测试结果也验证此情况下换能器指向性测试会产生这种偏差。因此必须对声中心与机械装置的旋转中心存在偏差下换能器的指向性测试结果进行修正。

通过模拟机械旋转中心与待测换能器声中心存在偏差的情况,进行了换能器指向性测试实验。实验结果显示:本文提出的水声换能器指向性图修正方法,对水声换能器指向性测试时机械旋转中心与发射换能器声中心存在偏差的情况有较好的修正效果;且在机械旋转中心与换能器声中心存在较大偏差(如换能器安装航行体等情况),航行体等结构具有较大的刚度时,本文的指向性修正方法在一定程度上可实现精确的换能器指向性响应测试及指向性开角判读。该数值修正方法较为简便,具有较好的工程实用性。

参考文献

- [1] 郑士杰,袁文俊.水声计量测试技术[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1995.
- [2] 鲍国良,王同庆.消声水池的设计及其自由场测量实验[J].电声技术,2005,29(1):18-21.
BAO Guoliang, WANG Tongqing. Design of an anechoic-water-tank and its free field measurement[J]. Audio Engineering, 2005, 29(1): 18-21.
- [3] 唐长寿,唐海清,陆渭林,等.水声换能器大功率特性校准装置的研究[J].声学及电子工程,2003(1):21-25.
TANG Changshou, TANG Haiqing, LU Weilin, et al. Research on calibration device for high power characteristics of underwater acoustic transducer[J]. Acoustics and Electrical Engineering, 2003(1): 21-25.
- [4] 安良,陈励军.水声换能器多频点指向性图同步测试方法[C]//中国声学学会水声学分会2013年全国水声学学术会议论文集.湛江,2013:91-93.
- [5] 张恒,蒋世军,邓秀华,等.一种矢量水听器指向性测试算法[J].水雷战与舰船防护,2014,22(2):21-25.
ZHANG Heng, JIANG Shijun, DENG Xiuhua, et al. Directivity test algorithm of vector-hydrophone[J]. Mine Warfare & Ship Self-Defence, 2014, 22(2): 21-25.
- [6] LIU H, ZHAO G. Two methods to test transducer array directivity[J]. Advanced Materials Research, 2014, 3137: 1485-1488.
- [7] 赵晓丹.高中物理力矢量建构的研究[D].济南:山东师范大学,2015.
ZHAO Xiaodan. The research of force vector construction in high school physics[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015.
- [8] 刘松山.二维矢量的极坐标表示及其合成快速算法[J].技术物理教学,2013,21(1):57-58.
LIU Songshan. Polar coordinate representation of two-dimensional vector and its fast synthesis calculation method[J]. Technical Physics Teaching, 2013, 21(1): 57-58.