

固态拖线阵和液态拖线阵的试验分析

张 祥, 李淑秋, 王文博

(中国科学院声学研究所综合声纳技术实验室, 北京 100190)

摘要: 拖曳线列阵声纳以低频、大孔径等特点而受到关注。作为湿端的主要组成部分, 拖线阵的发展也比较迅速。由于应用较早, 液态拖线阵技术已经比较成熟。相比于液态拖线阵, 固态拖线阵具有自身的特点, 因此近年来对固态拖线阵的研究也逐渐增多。为了比较两种成阵工艺对拖曳线列阵性能的影响, 进行了湖试, 通过对湖试数据进行分析, 比较两种拖线阵中阵元一致性和拖线阵波束形成性能的差异。结果表明, 在阵元一致性方面, 液态拖线阵和固态拖线阵的性能基本相似; 在波束形成性能方面, 静态时两者性能无明显的差别; 在拖曳状态下, 固态拖线阵对拖曳时产生的噪声敏感性低, 因而具有更好的波束形成性能。

关键词: 固态拖线阵; 液态拖线阵; 阵元一致性; 波束形成性能

中图分类号: O4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-05-0476-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.05.006

Analysis of experimental data of the solid towed linear array sonar and liquid towed linear array sonar

ZHANG Xiang, LI Shu-qiu, WANG Wen-bo

(The Laboratory of Oceanic Information Technology, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Towed linear array sonar attracts attention for its properties of low frequency and large aperture. As an important part of the wet-end, the towed linear array has been developed rapidly. The liquid towed linear array is mature due to being used earlier. Meanwhile, more studies on solid towed linear array have been done for its special feature. To compare the consistency of hydrophones and the beam forming performance between the two kinds of towed linear arrays, the lake experimental results are presented. The analysis results show that the liquid towed linear array has almost the same performance as the solid towed linear array in consistency among different hydrophones. In the aspect of beam forming, the performances of the two kinds of arrays have no significant differences in static state; but under the condition of towing, the solid towed linear array is better than the liquid towed linear array because it's less sensitive to the noise while towing.

Key words: solid towed linear array; liquid towed linear array; consistency of hydrophones; beam forming performance

0 引言

在目标远程探测和海洋石油勘测领域, 拖曳线列阵声纳以低频、孔径大等特点而被广泛使用^[1-3]。作为其主要组成部分, 拖线阵主要完成声信号的采集、放大、量化及将处理后的数字信号向干端部分的可靠传输, 因此拖线阵的性能将直接决定整个声纳系统的稳定性和可靠性。目前, 拖线阵中使用的水听器主要分为压电水听器和光纤水听器两种, 压电水听器较为成熟, 其组成的拖线阵已经被广泛使用; 光纤水听器出现较晚, 虽然国内外已经对其开展了大量的研究^[4,5], 并取得了一定的进展, 但使用

其组成拖线阵的技术还不完善, 因此本文讨论的拖线阵中均使用了传统的压电水听器。按照阵中填充的材料的不同, 可以将拖线阵分为液态拖线阵和固态拖线阵两种。液态拖线阵应用较早, 成阵技术也比较成熟; 固态拖线阵具有自身的优点, 因此近年来对它的研究也逐渐增多, 但目前国内还没有给出比较两种拖线阵性能差异的数据。本文针对这种情况, 通过对湖试数据的分析, 比较了两种成阵工艺对系统性能的影响。

1 压电水听器及拖线阵结构介绍

1.1 压电水听器介绍

压电水听器通常采用压电陶瓷制成, 当对这种陶瓷片施加压力或拉力, 它的两端会产生极性相反的电荷, 通过回路而形成电流, 这种效应称为压电

收稿日期: 2011-08-09; 修回日期: 2011-11-18

作者简介: 张祥(1983-), 男, 河北秦皇岛人, 博士研究生, 研究方向为信号与信息处理。

通讯作者: 张祥, E-mail: duozhe@yahoo.cn

效应。如果把用这种压电陶瓷做成的换能器放在水中, 那么在声波的作用下, 在其两端便会感应出电荷来, 这样就构成了压电水听器, 其对应的方程式可表示如下^[6]:

$$\begin{cases} S_h = s_{hk}^E T_k + d_{jh} E_j & h, k=1, 2, \dots, 6 \\ D_i = d_{ik} T_k + \epsilon_{ij}^T E_j & i, j=1, 2, 3 \end{cases} \quad (1)$$

其中: S_h 为应变分量; s_{hk}^E 为恒电场的柔性常数分量; T_k 为应力分量; d_{ik} 为压电常数分量; E_j 为电场强度; D_i 为电位移分量; ϵ_{ij}^T 为恒应力的介电常数分量。

在本次湖试中, 两条拖线阵中使用的水听器为同一批采购的产品, 经过测试, 这批产品的各方面参数基本一致, 其灵敏度均为 -201 ± 1.5 dB re 1V/ μ Pa, 有效频带为 1Hz~5kHz, 本试验中用到的频段低于 2kHz, 水听器尺寸为长 38mm, 直径 16.5mm。某水听器的灵敏度响应曲线如图 1 所示, 图中所得数据的测试环境: 压力为 0.3 MPa, 温度为 22℃, 湿度为 60%。

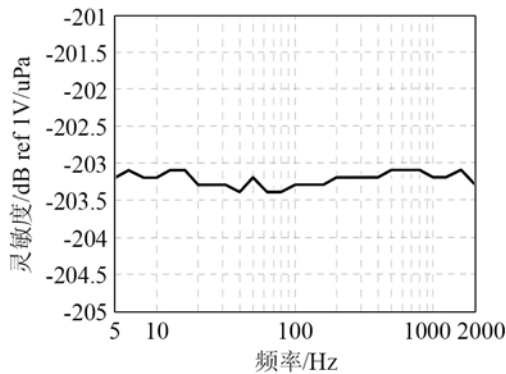


图 1 压电水听器灵敏度曲线

Fig.1 Sensitivity response of a piezoelectric hydrophone

1.2 拖线阵结构介绍

作为拖曳线列阵声纳的主要功能单元, 本文涉及的液态拖线阵和固态拖线阵均为数字阵, 其中的主要功能模块具有很强的通用性, 可以根据需要灵活配置, 而不用重新设计电路; 此外, 两段声阵均满足了细长阵的要求, 成阵后其外径为 39mm。为了便于比较性能差异, 本次试验中使用的两条拖线阵均包含了 16 路压电水听器, 当然, 声阵在设计时充分考虑了可扩展性, 可以根据实际需要灵活设置拖线阵中水听器数量。由于压电水听器的输出为幅度很小的模拟电信号, 所以必须对其进行放大、采样并量化为数字信号后再通过数据传输系统传输到干端进行处理^[7]。因此每段拖线阵中还包含了前放模块、A/D 模块和数据传输模块, 各部分协调工作, 完成了对声信号的放大、处理和传输功能。

上述各部分在拖线阵中的连接情况如图 2 所示(拖线阵中阵元间距为 1m)。

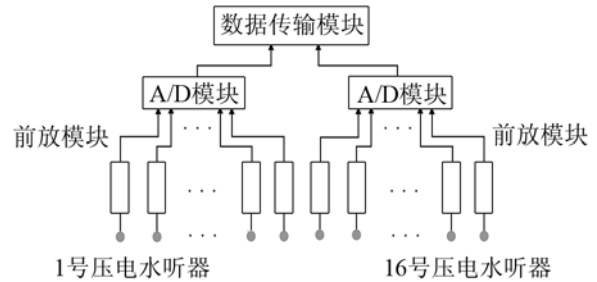


图 2 模块连接情况示意图

Fig.2 Schematic of module connection

为了满足实际应用时的要求, 即拖线阵在水中基本达到零浮力要求, 在成阵时要在拖线阵内填充特定的物质。液态拖线阵和固态拖线阵的区别在于内部填充物不同, 本试验中的液态拖线阵中填充的是氟蜡油(液体石蜡的一种), 固态拖线阵中填充的是固体凝胶, 两种材质的部分参数对比如表 1 所示。

表 1 两种材质参数对比

Table 1 Parameter comparison between the two kinds of material

物质名称	密度/(g/cm ³)	主要成分	常温下物质状态
氟蜡油	0.766	环烷烃	液态
固体凝胶	0.94	硅凝胶	固态

2 固态拖线阵和液态拖线阵性能分析

由于拖线阵中的模块(如水听器、前放模块等)被填充物包围, 因而填充物的性质可能对拖线阵中各模块的工作特性产生影响, 如声阵中各水听器间阵元一致性、声阵波束形成性能等。针对可能的影响, 我们进行了湖试。为了保证数据的可靠性, 试验过程中始终保持两段拖线阵处于相同的环境条件下。通过分析湖试数据, 得到了如下对比结果。

2.1 阵元一致性分析

线阵中阵元的一致性是度量其性能的一个重要方面, 它将直接影响线阵的指向性, 影响目标定位的准确性。测试时将声源置于两段拖线阵的正横方向处发射单频信号, 这时可以认为到达拖线阵中相邻阵元接收的声信号的相位和幅度应基本一致。为了比较两种拖线阵对水听器接收声信号一致性的影响, 分别计算了两种拖线阵中相邻水听器接收信号的相关系数, 并以此作为信号阵元一致性的一个度量。

测试阵元一致性时, 拖线阵静止于水下约 15m 处, 将声源置于距离拖线阵约 1 km、水下约 10 m

的位置,发射频率为 400Hz 的单频信号,声源级约为 157 dB re 1 μ Pa@1m。图 3 为固态拖线阵中 10 号水听器器和 11 号水听器器相关系数的波动曲线,经过计算,其均值为 0.7428。

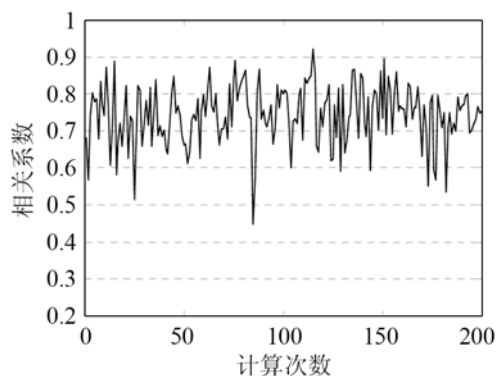


图 3 静态时固态拖线阵两相邻水听器相关系数曲线

Fig.3 The correlation coefficient between two adjacent hydrophones of solid towed array in static state

表 2 为固态拖线阵中相邻水听器相关系数的均值,从表 2 可以看出,均值在 0.6422~0.7428 之间波动。

表 2 静态时固态拖线阵相邻水听器相关系数

Table 2 The correlation coefficient between two adjacent hydrophones of solid towed array in static state

水听器编号	相关系数	水听器编号	相关系数
1-2	0.6577	9-10	0.6431
2-3	0.7262	10-11	0.7428
3-4	0.7250	11-12	0.7180
4-5	0.6975	12-13	0.7318
5-6	0.6862	13-14	0.7281
6-7	0.6839	14-15	0.6876
7-8	0.7375	15-16	0.6422
8-9	0.6591		

在同样的环境下测试液态拖线阵中相邻水听器的相关系数。图 4 为液态拖线阵中 10 号水听器和 11 号水听器器相关系数的波动曲线,其均值为 0.7791。

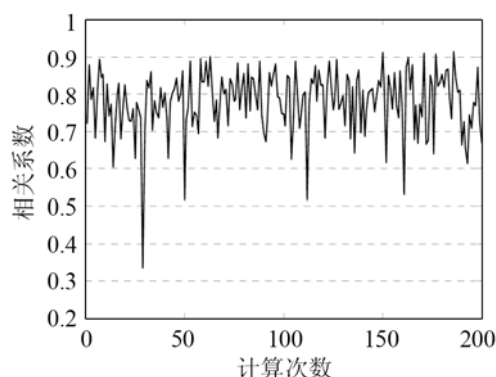


图 4 静态时液态拖线阵两相邻水听器相关系数曲线

Fig.4 The correlation coefficient between two adjacent hydrophones of liquid towed array in static state

表 3 为液态拖线阵中相邻水听器相关系数的均值,从表中可以看出,均值在 0.6850~0.7791 之间。

表 3 静态时液态拖线阵相邻水听器相关系数

Table 3 The correlation coefficient between two adjacent hydrophones of liquid towed array in static state

水听器编号	相关系数	水听器编号	相关系数
1-2	0.6971	9-10	0.7567
2-3	0.7422	10-11	0.7791
3-4	0.7481	11-12	0.7679
4-5	0.7661	12-13	0.7641
5-6	0.7332	13-14	0.7314
6-7	0.7265	14-15	0.7360
7-8	0.7031	15-16	0.6850
8-9	0.7318		

对比两种拖线阵中的相邻水听器接收声信号的相关系数平均值可以看出,对于 400Hz 的低频声信号,液态拖线阵接收信号的计算结果与固态拖线阵的计算结果相差很小,表明在低频情况下液态拖线阵相邻水听器接收信号的相关性与固态拖线阵的情况基本一致,信号间相似程度均较好。

2.2 波束形成性能分析

波束形成性能是线阵的一个重要参数,它直接反映了线阵对目标定向的准确度。本次试验分别对两种线阵在静态及拖曳状态下的波束形成性能进行了对比研究,同时还分析了两种条件下线阵接收的声信号的功率谱密度情况。由于试验过程中风浪较大,并且经过的船只较多,为了获得更好的结果,在分析波束形成性能时使用了窄带的信号处理方法^[8]。

2.2.1 线阵静态时的波束形成性能分析

在拖线阵静态测试过程中,将固态拖线阵和液态拖线阵级联起来并静止于水下约 15m 处,使用鱼唇式弯张换能器作为水下声源,由低速航行的动力拖船携带,并保持其位于水下约 10m 的位置。试验分别针对高信噪比和低信噪比条件进行测试。

(1) 高信噪比条件下的试验结果分析

动力拖船在试验过程中保持低航速运动,在距离拖线阵约 0.42km、方向角约为 20° 方位开始发射频率为 700 Hz 的单频信号,声源级约为 167 dB re 1 μ Pa@1m。

图 5 为固态阵 16 路压电水听器接收信号的平均功率谱密度图,图 6 为液态阵 16 路压电水听器接收信号的平均功率谱密度图,从两图中均可以看到 700Hz 处信号明显。

图 7 和图 8 分别是在上述高信噪比条件下固态拖线阵和液态拖线阵对接收到的信号进行波束成

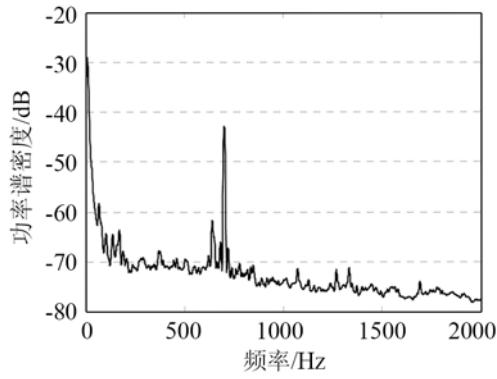


图 5 静态高信噪比时固态拖线阵 16 通道信号平均功率谱密度
Fig.5 The average power spectral density of 16-channel signals received by solid towed array in static state with high SNR

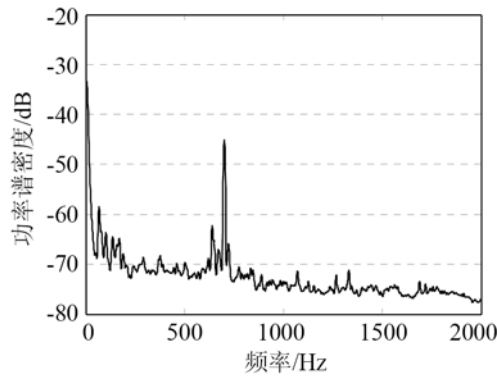


图 6 静态高信噪比时液态拖线阵 16 通道信号平均功率谱密度
Fig.6 The average power spectral density of 16-channel signals received by liquid towed array in static state with high SNR

形处理得到的方位历程图。

从图 7 和图 8 中可以明显辨识出声源所在的方向, 对比两图可以看出, 在静态高信噪比时, 两种拖线阵接收数据的波束形成结果均比较清晰, 波束形成性能基本相似。

(2) 低信噪比条件下的试验结果

同样将声源由动力拖船携带, 在距离拖线阵约 0.96km、方向角约为 60° 方位开始发射频率为 400Hz 的单频信号, 声源级约为 157dB ref 1μPa@1m, 由

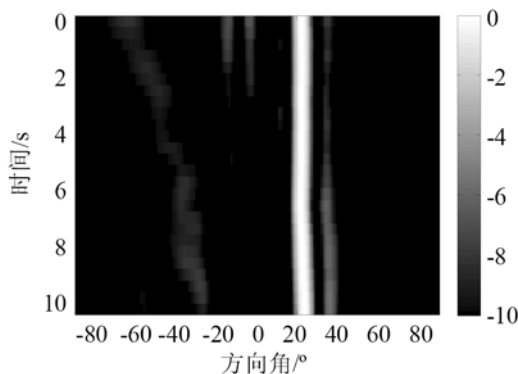


图 7 静态高信噪比时固态拖线阵接收 700Hz 信号方位历程图
Fig.7 Time-bearing tracks for 700Hz signal received by solid towed array in static state with high SNR

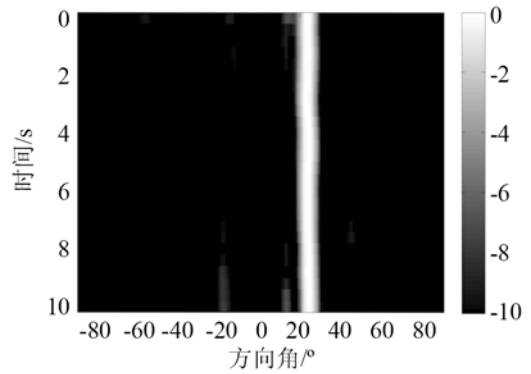


图 8 静态高信噪比时液态拖线阵接收 700Hz 信号方位历程图
Fig.8 Time-bearing tracks for 700Hz signal received by liquid towed array in static state with high SNR

于此时湖况条件较差, 信噪比较低。图 9 和图 10 分别为固态阵和液态阵水听器接收 400 Hz 信号时得到的平均功率谱密度图, 对比两图可以看出, 在低信噪比条件下, 固态拖线阵和液态拖线阵接收的 400Hz 单频信号的幅度均很小。

图 11 和图 12 为在上述低信噪比条件下对接收信号进行波束形成后得到的方位历程图。上述试验过程中, 由于拖船距离拖线阵较远, 且其移动速度较慢, 因此在短时间内其相对于拖线阵的方向角几

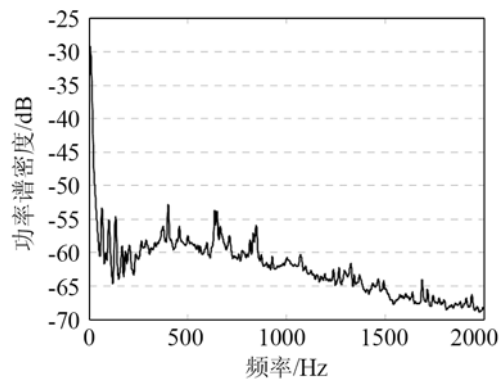


图 9 静态低信噪比时固态拖线阵 16 通道信号平均功率谱密度
Fig.9 The average power spectral density of 16-channel signals received by solid towed array in static state with low SNR

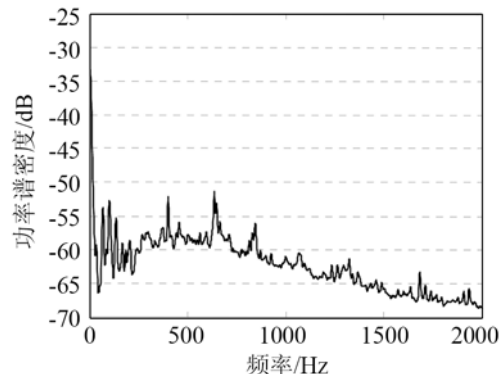


图 10 静态低信噪比时液态拖线阵 16 通道信号平均功率谱密度
Fig.10 The average power spectral density of 16-channel signals received by liquid towed array in static state with low SNR

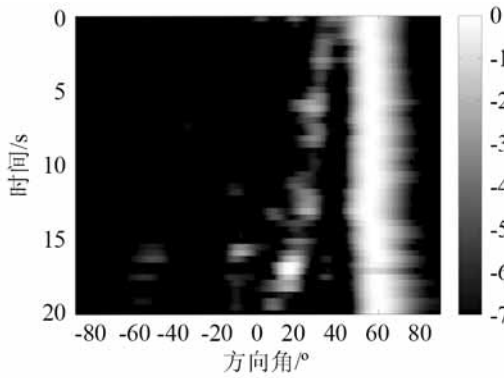


图 11 静态低信噪比时固态拖线阵接收 400Hz 信号方位历程图
 Fig.11 Time-bearing tracks for 400Hz signal received by solid towed array in static state with low SNR

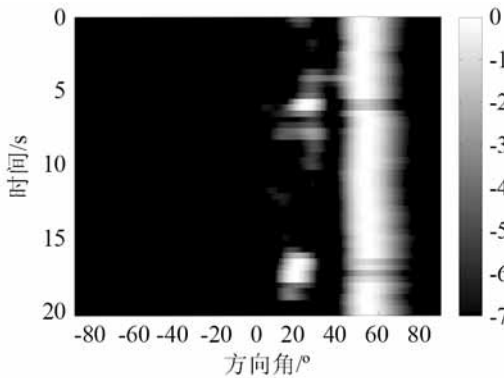


图 12 静态低信噪比时液态拖线阵接收 400Hz 信号方位历程图
 Fig.12 Time-bearing tracks for 400Hz signal received by liquid towed array in static state with low SNR

乎保持不变，图 11 和图 12 的波束形成结果也反映了这一情况。对比两种拖线阵的波束形成结果可以看出，在低信噪比情况下，两种拖线阵均可实现对目标的测向，波束形成性能相似。

2.2.2 拖曳状态下拖线阵波束形成性能分析

在拖曳状态测试过程中，为了保证数据的可靠性，将固态拖线阵和液态拖线阵级联起来，由动力拖船进行拖曳；为了保持拖线阵在拖曳过程中始终位于水下某一深度(试验中设定为 12 m)，动力船保持 3kn 左右的速度航行。试验中使用鱼唇式弯张换能器作为水下声源，并将其静止于水下约 10m 处。开始发射 800 Hz 信号时声源距离拖线阵 0.32 km，声源级约为 164dB ref 1μPa@1m。

图 13 和图 14 分别为拖曳状态下固态拖线阵 1 号水听器和液态拖线阵 16 号水听器在同一时间段内接收信号的时域波形图，从图中可以看出，接收的 800 Hz 信号幅度较小且叠加在了较大的干扰信号之上；由于两水听器临近(两水听器距离为 1m)，因此其受到的拖船噪声的干扰应基本一致。但从两图对比中可以看出，液态拖线阵中水听器接收的噪声信号明显高于固态拖线阵。进一步分析对比拖曳

状态下两者在不接收声源信号时的噪声情况，液态拖线阵中水听器受到的噪声干扰也大大高于固态拖线阵，造成这种现象的原因之一是液态拖线阵中存在气泡，在拖曳状态下线阵受到的压力不均匀，导致阵中填充的液体氟蜡油发生了流动，从而对水听器接收的信号产生了严重的影响；而固态拖线阵中填充物为固态，在拖曳状态下不会发生运动，因此固态拖线阵对拖曳时产生的噪声具有更好的抑制性能，这个结论也与国外研究成果相吻合^[9-12]。

当然，其它原因也可能造成上述情况的出现，由于本论文侧重于两种拖线阵性能的比较，对造成上述现象的原因将在以后的论文中做更进一步的分析。

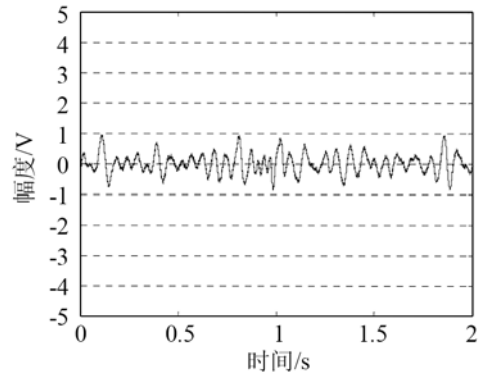


图 13 拖曳状态下固态拖线阵单通道信号时域波形图
 Fig.13 The waveform of single-channel signal received by solid towed array in towing state

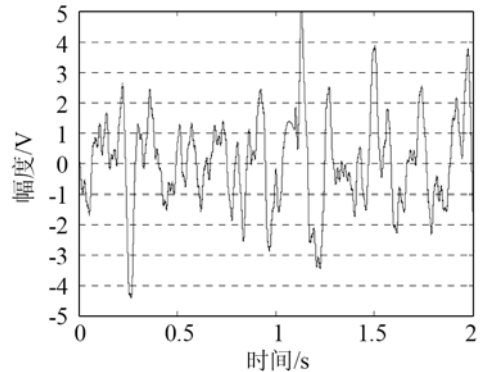


图 14 拖曳状态下液态拖线阵单通道信号时域波形图
 Fig.14 The waveform of single-channel signal received by liquid towed array in towing state

图 15 和图 16 是在拖曳状态下对固态拖线阵和液态拖线阵接收的信号进行波束形成后得到的方位历程图。对比图 15 和图 16 可见，拖曳状态下固态拖线阵和液态拖线阵均能对目标进行准确的测向，且两者的主瓣宽度基本一致；但固态拖线阵对弱目标具有更强的检测能力，这主要与拖曳状态下固态拖线阵具有更好的噪声抑制性能紧密相关，因此在拖曳状态下固态拖线阵具有更好的波束形成性能。

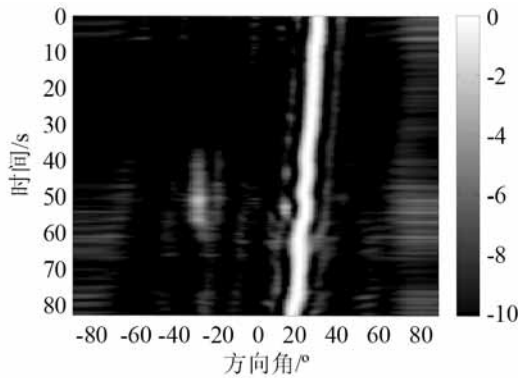


图 15 拖曳状态下固态拖线阵接收 800Hz 信号方位历程图

Fig. 15 Time-bearing tracks for 800Hz signal received by solid towed array in towing state

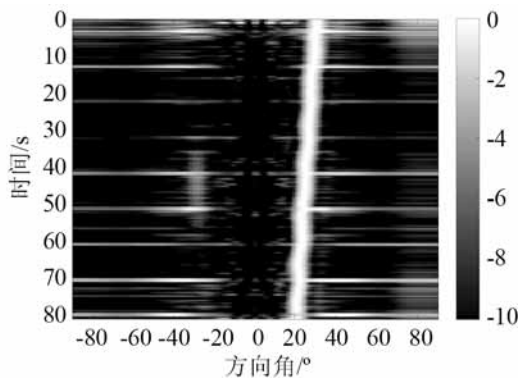


图 16 拖曳状态下液态拖线阵接收 800Hz 信号方位历程图

Fig. 16 Time-bearing tracks for 800Hz signal received by liquid towed array in towing state

3 结论

本文对应用于拖线阵声纳的固态阵和液态阵进行了介绍, 并通过分析湖试数据对比了两者在性能方面的差异。通过对比分析可以看出, 在对阵元一致性的影响方面, 液态拖线阵中相邻水听器接收信号计算的相关系数值与固态拖线阵中的计算结果相差很小; 在波束形成性能方面, 拖线阵静态时两者性能无明显的差别; 在拖曳状态下, 固态拖线阵对拖曳时产生的噪声敏感性低, 因而具有更好的波束形成性能。此外, 由于工艺的不同, 固态拖线

阵和液态拖线阵在其它性能方面也存在着差异, 成阵时选择使用哪种方式要权衡考虑。

参 考 文 献

- [1] Stanley G. Lemon, Towed-Array History[J], 1917-2003. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(2): 365-373.
- [2] 刘孟庵. 拖曳线列阵声纳技术发展综述[J]. 声学及电子工程. 2006(3): 1-5.
LIU Meng'an. Summarization of the development of towed array sonar[J]. Acoustics and Electronic Engineering, 2006(3): 1-5.
- [3] 江怀友, 赵文智, 闫存章, 等. 世界海洋油气资源与勘探模式概述[J]. 海洋油气地质. 2008, 13(3): 5-10.
JIANG Huaiyou, ZHAO Wenzhi, YAN Cunzhang, et al. Review on marine petroleum resources and exploration models in the globe[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(3): 5-10.
- [4] 杨光等. 压电水听器线阵与 DFB 光纤水听器线阵的分析[J]. 声学技术, 2011, 30(3): 294-299.
YANG Guang, et al. Analysis of experiment data of the piezoelectric hydrophone and DFB fiber laser hydrophone arrays[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(3): 294-299.
- [5] Hill D J, Nash P J. In-water acoustic response of a coated DFB fiber laser sensor[C]// DERA 2000. WE2-9:33-36.
- [6] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
LUAN Guidong, ZHANG Jinduo, WANG Renqian. Piezoelectric transducer and transducer array[M]. Beijing: Pecking University Press, 2005.
- [7] 余华兵, 孙长瑜, 李启虎. 探潜先锋—拖曳线列阵声纳[J]. 物理, 2006, 35(5): 420-423.
YU Huabing, SUN Changyu, LI Qihu. Towed line array sonar spearheads submarine detection[J]. Physics, 2006, 35(5): 420-423.
- [8] 李启虎. 声纳信号处理引论[M]. 第二版. 北京: 海洋出版社, 2000.
LI Qihu. Signal processing of sonar(2nd Edition)[M]. Beijing: Ocean Press, 2000.
- [9] ION. Data Acquisition[EB/OL]. http://www.iongeo.com/Marine_Imaging/Towed_Streamers/Data_Acquisition/. 2011.
- [10] Marschall R A, Stinson D L, Pearce R E, et al. The use of an innovative solid towed array for exploring the antarctic marine environment[C]// OCEANS'93. Engineering in Harmony with Ocean. Proceedings. 1993. VOL.2, II/35-II/40.
- [11] Sercel. Sentinel[EB/OL]. <http://www.sercel.com/Products/marine/streamers/sentinel.php>. 2011.
- [12] Sercel. Marine Acquisition[EB/OL]. <ftp://ftp.sercel.com/pdf/brochures/Marine%20Acquisition-ch.pdf>2010.