

引用格式: 杨志国, 姜莹, 刘保华, 等. 波浪滑翔器声学应用分析[J]. 声学技术, 2021, 40(2): 174-180. [YANG Zhiguo, JIANG Ying, LIU Baohua, et al. Acoustic application analysis of wave glider[J]. Technical Acoustics, 40(2): 174-180.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2021.02.004

波浪滑翔器声学应用分析

杨志国^{1,3}, 姜莹^{2,3}, 刘保华^{1,3}, 宗乐¹, 颜曦⁴, 董武文⁴

(1. 国家深海基地管理中心, 山东青岛, 266237; 2. 自然资源部第一海洋研究所, 山东青岛 266061;
3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东青岛 266237; 4. 杭州锐讯科技有限公司, 浙江杭州 310000)

摘要: 波浪滑翔器作为一种跨界面无人自主航行器具有独特的优势, 既可以作为水下与水面通信的中继节点, 又可以搭载观测设备在大洋上长期自主航行, 实现长时序、大范围观测。利用波浪滑翔器搭载声学负载组成声学探测节点, 由多个节点按一定的轨迹运行组成特殊接收阵型可以提高水下目标检测概率。文章利用波浪滑翔器搭载自容式水听器在青岛近海开展了海上试验, 评估了波浪滑翔器的本体噪声特性, 验证了其搭载声学负载的可行性。试验过程记录了环境噪声、波浪滑翔器运行过程中产生的自噪声以及附近海域的哺乳动物的声信号。通过分析波浪滑翔器运行原理以及岸上实际模拟, 给出了波浪滑翔器不同本体噪声产生的机理, 在此基础上给出了消除波浪滑翔器机械噪声的建议, 并给出了合理的声学负载拖曳方案。

关键词: 波浪滑翔器; 噪声分析; 声学负载; 自容式水听器

中图分类号: TB56

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2021)-02-0174-07

Acoustic application analysis of wave glider

YANG Zhiguo^{1,3}, JIANG Ying^{2,3}, LIU Baohua^{1,3}, ZONG Le¹, YAN Xi⁴, DONG Wuwen⁴

(1. National Deep Sea Center, Qingdao 266237, Shandong, China; 2. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, Shandong, China;
3. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, Shandong, China;
4. Hangzhou SonicInfo Technology Co., Ltd., Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

Abstract: The wave glider is a new unmanned ocean vehicle crossing sea-surface and underwater. It could be used as a mobile station to provide real-time relay communication between underwater equipment and shore station. As its propulsion power is almost unlimited, long term oceanographic observation could be deployed by the wave glider with different sensors in a large area. A wave glider integrated with acoustic payloads can be taken as an acoustic sensor. Detection capability can be improved when several acoustic sensors move along the planned trajectory that forms a large receiving array. A wave glider towed self-contained hydrophone is deployed in the offshore of Qingdao. Ambient noise, wave glider generated noise and bioacoustics signals are recorded. Self-noise characteristics of wave glider are analyzed with these recorded data. Noise generating mechanism of wave glider is analyzed according to the operational principles of wave glider and the experimental data recorded underwater and in laboratory. Some advices to reduce the mechanical noise of wave glider based on the noise analysis are proposed, and a reasonable towing structure of acoustic payload is given.

Key words: wave glider; noise analysis; acoustic payload; self-contained hydrophone

0 引 言

近年来, 随着海洋技术的不断发展, 海洋无人自主移动平台取得了显著的进步, 比较典型的有自主水下航行器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV)、水下滑翔机 (Underwater Glider) 和波浪滑翔

器 (Wave Glider)。这三种平台搭载声学设备进行水下目标监测与探测已经有了比较多的应用^[1-3]。通常, 自主水下航行器具备推进系统, 机动能力强, 搭载导航设备后轨迹控制精度高, 可搭载声学测绘、探测等设备进行水下地形、地貌扫测以及海底掩埋目标探测等, 但是受能量限制无法长时间运行。水下滑翔机通过改变油囊排水量实现上浮与下潜, 通过改变翼板的姿态调整前进方向。由于水下滑翔机通常不开启螺旋桨推进系统, 其轨迹控制精度较差, 但系统功耗低, 可以在海洋中长时间生存, 适合搭载声学记录仪、声学目标监测系统对海洋环境噪声进行长期观测以及水下目标探测。波浪滑翔器是一型利用其特殊双体结构转换波浪起伏为

收稿日期: 2020-01-09; 修回日期: 2020-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(41706066、41906170)、山东省重点研发计划(2016GSF115033)、泰山学者工程专项经费(tspd20161007)资助项目。

作者简介: 杨志国(1982—), 男, 山西朔州人, 博士, 研究方向为水声信号处理。

通信作者: 姜莹, E-mail: jiangying@fio.org.cn

前向动力的无人自主水面船，而且水面船体安装有太阳能电池板，可以利用太阳能发电。波浪滑翔器具有自动导航、位置保持和卫通监控等功能，该平台搭载卫星通信模块，可以实现与岸站实时通信，同时可以为负载提供持续的电源供给，适合搭载声学检测系统开展水下目标长期在线监测。多套搭载声学检测设备的波浪滑翔器利用卫星通信等无线远距离通信模块可以实现组网运行，从而可以组成大规模接收阵列提高水下目标检测的几率。

不同的平台由于自身机械结构以及控制系统的不同，呈现的平台噪声特性也不同，本文针对波浪滑翔器搭载声学设备开展声学应用的需求设计了波浪滑翔器平台声学特性分析试验，通过搭载自容式声学记录仪测量波浪滑翔器平台噪声，在青岛近海开展了海上试验。根据海上试验数据对平台噪声进行了分析，给出了平台噪声特性以及平台优化建议。在此基础上，设计了波浪滑翔器搭载声学负载的拖曳结构。

1 波浪滑翔器声学应用

1.1 波浪滑翔器组成与工作原理

波浪滑翔器是近年来海洋环境监测技术领域出现的新型海洋自主观测平台。该平台完全利用环境能源，可以在广阔的海洋上进行长期的路径跟踪和位置保持，并通过卫星通讯将搭载传感器测量的环境数据实时传达给监控基站，基站可视化显示平台状态和测量数据，并可基于矢量地图完成平台的路径规划等。

波浪滑翔器包括水面船体和水下牵引机，二者通过 4~7 m 柔性吊缆连接。主控系统安装在水面船体中，太阳能电池板和通讯导航设备安装在水面船体上；水下牵引机由主框架和水翼组成，其尾部设置有舵机转向机构，结构组成如图 1 所示。

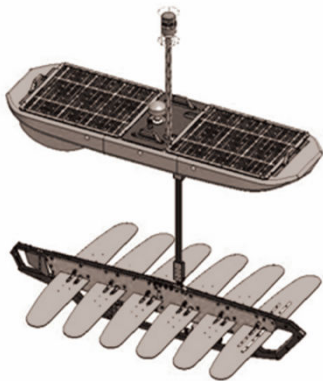


图 1 波浪滑翔器整体结构
Fig.1 Overview of wave glider

波浪滑翔器在海洋表面与起伏波浪相互作用而实现前向运动，整个过程中柔性通讯缆与系带缆时而张紧、时而松弛。水面船体随着波浪升高时柔性缆张紧，水下牵引机在水面船的拉升力作用下向上并向前产生位移；水面船体随波浪下降时柔性缆松弛，水下牵引机在自身重力作用下下潜，在翼板的推动下向前滑翔^[4]。波浪滑翔机运动过程如图 2 所示。

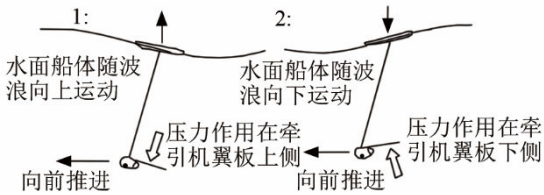


图 2 波浪滑翔机运动过程^[4]
Fig.2 The operational principles of wave glider^[4]

本文选用“黑珍珠”小型波浪滑翔器搭载 LoPAS 自容式声学记录仪开展平台噪声分析和近海噪声监测，该小型波浪滑翔器指标参数如表 1 所示。

表 1 “黑珍珠”小型波浪滑翔器指标参数 Table 1 “Black Pearl” wave glider specifications	
指标名称	技术指标
平台质量	双体结构总质量 60 kg
平台尺寸	水面船体：1.6 m×0.5 m×0.2 m； 水下滑翔机：1.6 m×1.0 m×0.3 m
续航能力	最大航行距离>10 000 km； 连续工作时间>1 y
运动速度	最大航行速度：SS1:≥0.5 kts, SS4:≥1.2 kts； 长期大范围平均航行速度：≥1.0 kts
风浪等级	可以抵抗 12 级台风，最大可生存浪高 10 m
定位精度	3 级海况(海流<0.5 kts)：24 小时内虚拟锚泊 定点误差<200 m 半径概率≥50%；24 h 内 直线路径跟踪偏差<200 m 概率≥80%
发电功率	峰值发电功率约为 90 W，长期平均功率 ≥12 W
负载能力	额外电能负载 8 W/12 V，额外结构负载 4 kg
蓄电储备	标准配置：连续无光工作时间 3 d；高级配 置：最大连续无光工作时间 15 d

注：1 kts=1 kn·h⁻¹=1 852 m·h⁻¹。

1.2 噪声测量设备

为评估波浪滑翔器搭载声学系统的可行性，利用波浪滑翔器搭载 LoPAS 低噪声自容式水听器进行平台自噪声测量。自容式声学记录仪参数如表 2 所示。

在试验前首先对自容式声学记录仪与水听器进行了室内测试，自容式声学记录仪配置柱状水听器，水听器灵敏度为(−200±2) dB re 1 V/μPa (20~

表 2 自容式水听器技术参数
Table 2 Self-contained hydrophone specifications

工作参数	技术指标
采样率	可调, 最大 128 kHz
分辨率	24 bit
放大倍数	0/20/26 dB
自噪声	$\leq 5 \mu\text{V}$
存储容量	1 TB
温度、深度精度	温度 $\leq 0.1^\circ\text{C}$, 深度 $\leq 0.025\%F_s$
功耗	工作模式 $\leq 180 \text{ mW}$, 休眠模式 $\leq 1 \text{ mW}$
工作方式	连续、周期
连续工作时长	$\geq 20 \text{ d}$
尺寸	$\Phi 7.2 \text{ cm} \times 43 \text{ cm}$
空气/水中重量	1.9 kg/230 g(工程塑料壳体, 耐压 200 m) 3.6 kg/1.9 kg(钛合金壳体, 耐压 2000 m)

注: F_s 为测深全量程值。

40 kHz)。利用图 3(a)所示真空罐对水听器与记录仪本底噪声进行了测量。本底噪声测量时首先将自容式声学记录仪与水听器连接好后, 配置好工作参数, 然后将自容式声学记录仪与水听器放置在真空罐内部支架上, 保证水听器与真空罐周围无接触, 处于悬空状态, 避免低频振动噪声影响(此处为便于安装, 只将自容式水听器电路部分与水听器悬挂固定在真空罐内)。为了避免电磁干扰, 将水听器用锡箔纸包裹, 处于全屏蔽状态, 如图 3(b)所示。安装好后通过真空泵将真空罐内空气抽出, 真空泵可以达到的真空度相对压力为 -98 kPa , 真空泵达到工作极限后自动停止, 真空罐处于保压状态, 此时达到中度真空。记录保压过程时间, 测量完成后读取保压过程的数据作为测量结果。

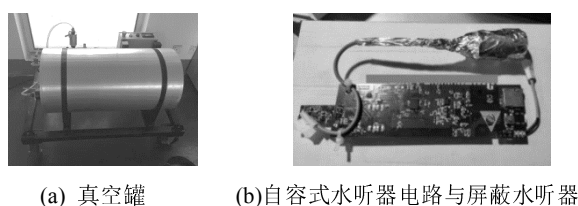


图 3 真空罐与自容式水听器电路
Fig.3 Vacuum container and circuit board of self-contained hydrophone

测量过程中声学记录仪相关参数设置如表 3 所示, 真空罐测量获得的设备本底噪声与 0 级海况^[5]对比曲线如图 4 所示。从图 4 中可以看出声学记录仪在测量频带内系统噪声低于 0 级海况噪声, 在 10 kHz 附近接近 0 级海况噪声。

表 3 声学记录仪工作参数配置
Table 3 Configurations of self-contained hydrophone

工作参数	技术指标	工作参数	技术指标	工作参数	技术指标
采样率	32 kHz	工作方式	连续采集	供电方式	锂电池
放大倍数	26 dB	文件大小	23 MB		

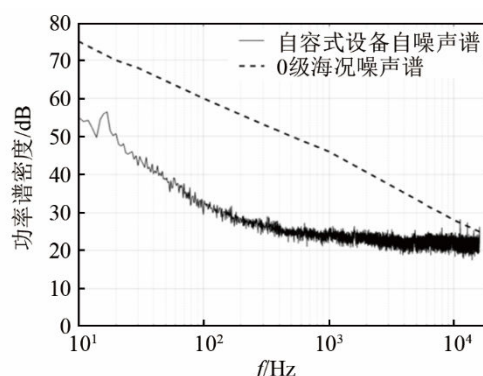


图 4 自容式水听器的本底噪声功率谱
Fig.4 Background noise spectrum of self-contained hydrophone

1.3 拖曳试验设计

为测量波浪滑翔器平台噪声, 将自容式声学记录仪与水听器放置在与波浪滑翔器水下牵引机同样深度, 由波浪滑翔器水面船体拖曳, 拖曳结构如图 5 所示。自容式记录仪与水听器悬挂在浮体下 5 m 位置, 通过配重保持垂直姿态, 浮体位于水面船体后 7 m 距离, 由水面船体拖曳前进。

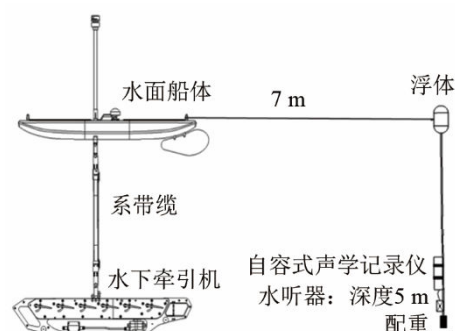


图 5 拖曳试验实施示意图
Fig.5 Schematic illustration of the towing experiment implementation

2 试验数据分析

2.1 海上试验

本次试验海域为青岛外海千里岩附近。2018 年 8 月 28 日试验船从崂山仰口码头出发, 到达 60 km 外的目标海域布放波浪滑翔器。波浪滑翔器的布放位置以及布放后状态如图 6 与图 7 所示。

布放完成后, 布放船离开测量海域, 波浪滑翔器控制岸站通过监控系统监控并存储铱星回传的数据, 分析平台的运行状态。通过铱星回传的数据包括: 电子罗盘数据、AirMAR 气象传感器数据、温盐传感器数据等。在整个试验过程中实时检测波浪滑翔器工作正常, 试验持续到 2018 年 8 月 29 日 18:31, 波浪滑翔器在千里岩东北侧完成观测任务。

此次海试 28 h 累计航程为 81.736 5 km。

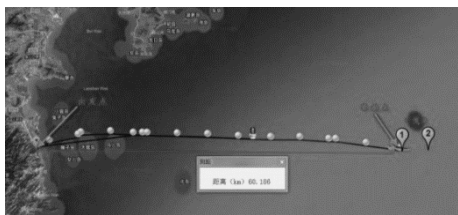


图6 波浪滑翔器布放位置
Fig.6 Deployed location of wave glider



图7 波浪滑翔器布放后状态
Fig.7 Deployed wave glider

2.2 数据分析

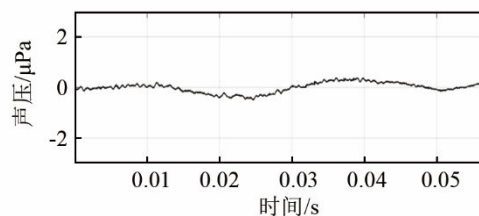
在波浪滑翔器布放、回收以及跟踪监测状态的过程中,布放船舶的噪声较大。从 8 月 29 日 11:48 开始船舶噪声消失,所测量信号为波浪滑翔器本体噪声以及环境噪声,有效数据到 8 月 29 日 17:30,共 342 min。

波浪滑翔器搭载的自容式声学记录仪采集的数据为原始数据,数据格式为*.bin。本文首先对数据进行了预处理与分类,将数据转换为*.wav 文件后,利用 Adobe Audition 软件对数据进行回放,在回放过程中通过人耳鉴别结合信号时频图对信号进行初步分类,本文将采集到的信号分为四类:环境噪声、平台结构噪声、水听器安装结构噪声与动物声信号。对分类后的信号利用 Matlab 软件进一步详细分析其功率谱密度以及时频特性。分析功率谱密度时采用 512 点傅里叶变换,滑动窗口同样为 512 点,50%重叠。计算时频特性时根据时间和频率分辨率折中调整短时傅里叶点数。

2.2.1 环境噪声

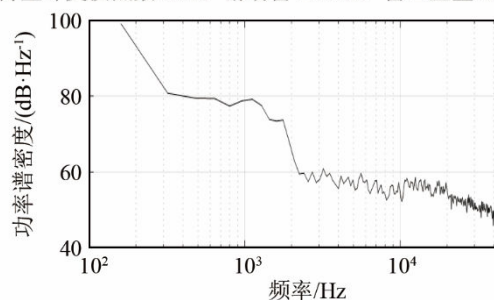
本次试验海域位于近海,试验过程中记录到的虾类信号比较多,虾类信号几乎存在于整个观测过程。在布放船舶离开波浪滑翔器后,等船舶发动机噪声消失后,选取一段无明显动物声信号以及其他干扰的数据作为环境噪声,计算观测海域的环境噪声功率谱密度。根据波浪滑翔器搭载的气象观测设

备记录,观测期间风向集中于西南,风速均值为 $6.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,约为 3 级海况。实测环境噪声谱如图 8 所示,由图 8 可见,中低频噪声较高,在 $300 \text{ Hz}\sim 2 \text{ kHz}$ 频段范围内存在一定的起伏,这个频段主要包括风成噪声等^[5]。



(a) 时域信号

傅里叶变换点数:512, 滑动窗口:512, 窗口重叠:256



(b) 功率谱密度

图8 环境噪声时域信号与功率谱密度

Fig.8 Waveform and power spectrum of ambient noise

2.2.2 平台结构噪声

波浪滑翔器依靠水下牵引机随波浪的起伏产生前进动力。水面船体随着波浪升高时柔性缆张紧,水下牵引机在水面船的拉升力作用下向上并向前产生位移;水面船体随波浪下降时柔性缆松弛,水下牵引机在自身重力作用下下潜,在翼板的推动下向前运动。翼板依靠弹簧实现回弹,翼板转动结构如图 9 所示。

在这一过程中弹簧存在拉伸与回弹过程,弹簧在这一过程中弹簧存在拉伸与回弹过程,弹簧的机械拉伸与回弹产生如图 10 所示的宽带噪声,信号带宽覆盖 $2\sim 40 \text{ kHz}$ 。通过在空气中转动翼板再让翼板自由回弹,记录这一过程产生的噪声,对比发

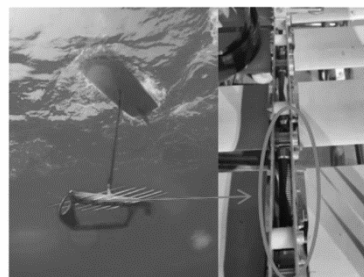
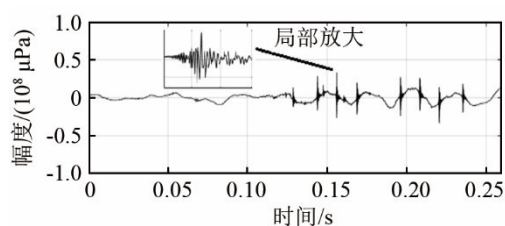


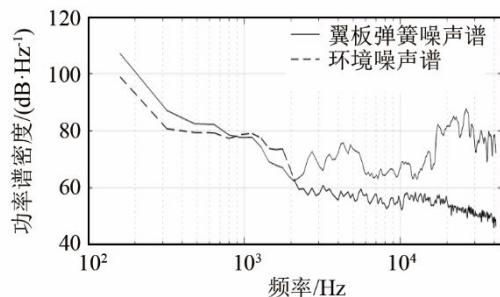
图9 翼板转动结构

Fig.9 Wing rotation structure of wave glider



(a) 时域信号

傅里叶变换点数:512, 滑动窗口:512, 窗口重叠:256



(b) 功率谱密度

图 10 翼板转动噪声波形与功率谱

Fig.10 Waveform and power spectrum of the noise caused by wing rotation

现空气中翼板转动偶尔产生的噪声与水下记录的此类噪声存在类似的频谱特征。

在水面船体上下起伏的过程中,系带缆会出现拉紧与松弛两个过程。波浪滑翔器系带缆外部为橡胶层,系带缆与水面船体以及水下牵引机连接部分采用金属部件,如图 11 所示。系带缆与金属结构在拉紧以及转动过程中会产生类似“门轴转动”的噪声,噪声在时频谱上表现为“上扫频”以及“下扫频”,存在明显谐波结构,如图 12 所示。

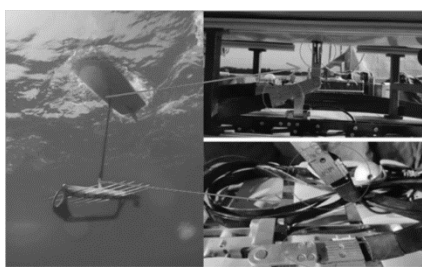
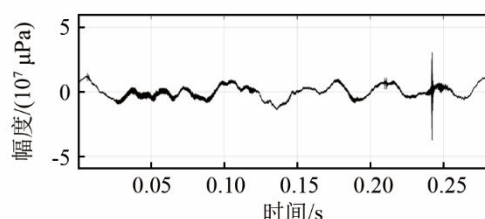


图 11 橡胶系带缆与船体及水下牵引机的连接

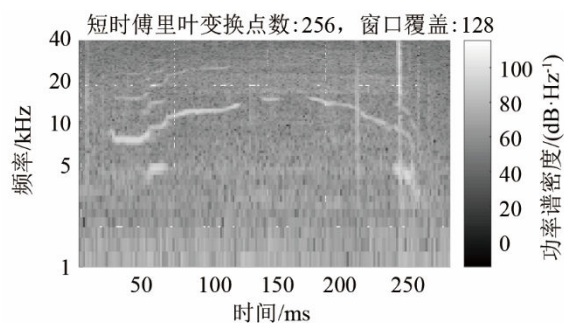
Fig.11 Connection of ribbon cable to hull and underwater tractor

2.2.3 水听器安装噪声

水听器在水下受水流冲击会引起振荡,引入噪声。目前,国内应用较为广泛的减震做法是采用如图 13 所示的框架加弹簧的结构安装水听器,外部再采用绒布等棉质或丝质布料覆盖,从而达到降低流噪声以及减震的作用。但是,波浪滑翔器搭载采用这种结构安装的水听器时,水听器会随着水面浮体上下起伏而一起起伏,在这一过程中当框架受到冲击的时候弹簧会出现持续高频振荡与低频振荡。



(a) 时域信号



(b) 时频图

图 12 系带缆拉扯信号与时频图

Fig.12 Waveform and spectrogram of the noise caused by ribbon cable stretching

高频振荡时弹簧会产生宽带噪声,如图 14 所示。高频噪声覆盖整个频带,高频振荡多出现在水听器受到纵向冲击时;低频振荡主要由水听器受到横向振荡引起,振荡时间持续较长,能量主要集中在 1 kHz 以内,如图 15 所示。

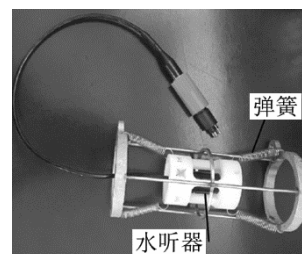


图 13 水听器安装结构

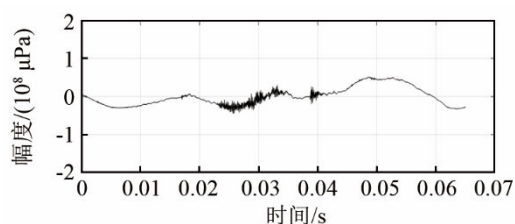
Fig.13 Installation frame of hydrophone

2.2.4 动物声信号

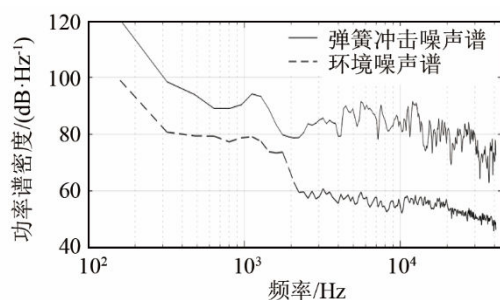
选取一段明显的虾类信号,如图 16 所示,大部分虾类信号后约 5~8 ms 均伴随着另外一个信号。结合图 5 所示拖曳结构,水听器位于水面以下 5 m 左右,随波浪以及拖曳存在一定起伏,信号从不同角度到达水听器后再经过水面反射回到水听器,与信号到达时间差吻合。此外,伴随信号相位与直达信号相反,因此判定伴随信号为水面反射信号。对信号功率谱分析如图 16 所示,虾类信号为宽带信号,在 2~30 kHz 均存在较强的能量,不同地区的虾类信号存在一定差异^[6]。

在试验过程中记录到部分哺乳动物声信号,由于虾类信号的存在以及采样频率的限制导致哺乳

动物的 click 信号较难分辨;而 whistle 结构较为清晰,在一定的背景干扰下仍然可以分辨。部分疑似海洋哺乳动物 whistle 信号如图 17 所示,包括中

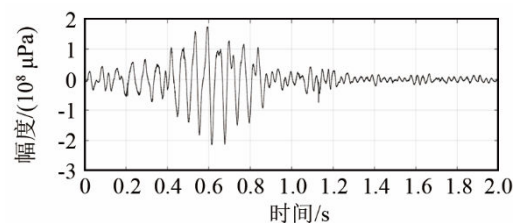


(a) 时域信号



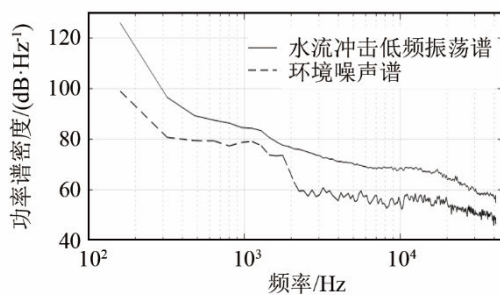
(b) 功率谱密度

图 14 弹簧被纵向冲击产生的噪声波形与功率谱
Fig.14 Waveform and power spectrum of the noise caused by hitting frame vertically



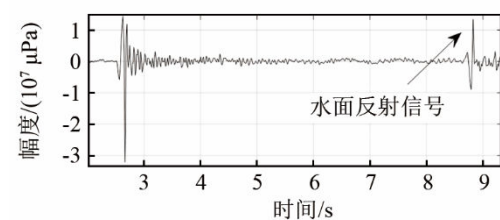
(a) 时域信号

傅里叶变换点数:512, 滑动窗口:512, 窗口重叠:256



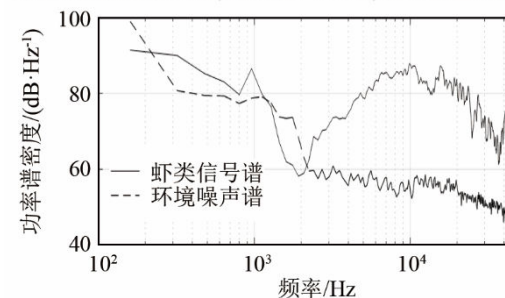
(b) 功率谱密度

图 15 水流等引起的噪声波形与功率谱
Fig.15 Waveform and power spectrum of the noise caused by water flow



(a) 时域信号

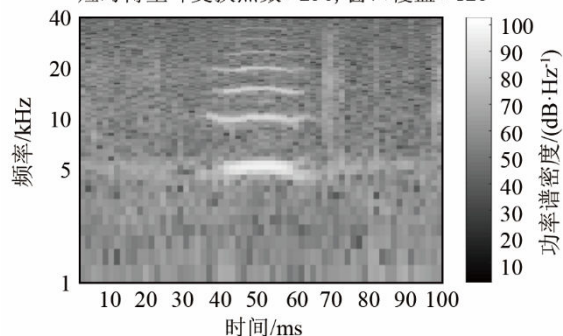
傅里叶变换点数:512, 滑动窗口:512, 窗口重叠:256



(b) 功率谱密度

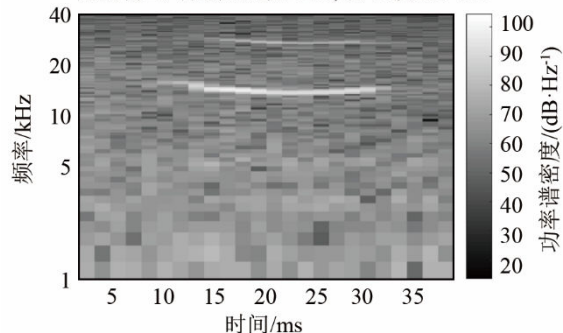
图 16 虾类的噪声信号与功率谱
Fig.16 Waveform and power spectrum of shrimp noise

短时傅里叶变换点数:256, 窗口覆盖:128



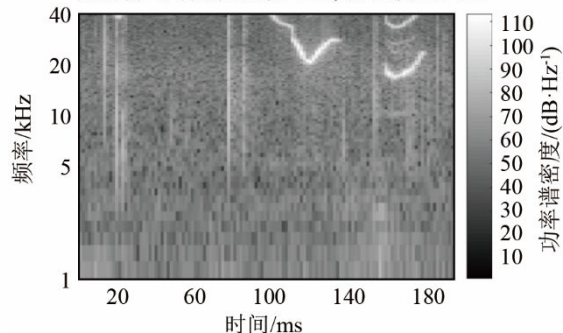
(a) 中频 Whistle 谐波时频图

短时傅里叶变换点数:256, 窗口覆盖:128



(b) 高频 Whistle 谐波时频图

短时傅里叶变换点数:256, 窗口覆盖:128



(c) V 型信号时频图

图 17 可疑海洋哺乳动物声信号时频图

Fig.17 Spectrograms of some potential marine mammal signals

高频谐波结构的信号,高频上扫频和下扫频以及“V”型结构信号。公开资料显示,近年来我国没

有在青岛近海开展过哺乳动物生态现状调查。早期文献显示,在青岛近海可能存在瓶鼻海豚(*Tursiops truncatus*)、伪虎鲸(*Pseudorca crassidens*)、虎鲸(*Orcinus orca*)、江豚(*Neophocaena phocaenoides*)、抹香鲸(*Physeter macrocephalus*)、侏儒抹香鲸(*Kogia sima*)、柏氏中喙鲸(*Mesoplodon densirostris*)^[7]。由于在试验过程中仅采用了自容式声学设备记录,波浪滑翔器工作时间段内没有视频记录数据,通过对试验数据分析并与文献结果对比,初步推测中频 whistle 信号可能为伪虎鲸信号,伪虎鲸 whistle 信号主要能量集中在 4~6 kHz 之间^[8],与本次试验观测结果接近。进一步识别更多海洋哺乳动物信号需要进一步开展视频和音频同步观测,获取更多数据。

2.3 机械噪声消除及声学负载拖曳方案

根据试验结果需要对波浪滑翔器本体噪声进行控制,包括优化翼板弹簧结构、改进系带缆与水面船体以及水下牵引机连接处之间的结构。对于声学负载而言,将图 14 所示水听器固定结构中的弹簧改为耐腐蚀橡胶,消除弹簧共振引起的噪声,如图 18 所示。

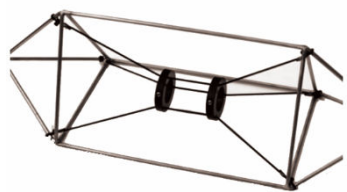


图 18 水听器隔振安装结构
Fig. 18 Installation of hydrophone: a protective cage with suspension

此外,声学拖曳负载拖曳方式需要采用多级缓冲结构,如图 19 所示,拖曳负载通过配置合适的浮子与重块保持零浮力,与水下牵引机之间采用由重块与浮子组成的多级横向“S”型结构缓冲。缓冲结构可以有效消除波浪滑翔器前进过程的不连续导致的低频拖曳振动噪声。

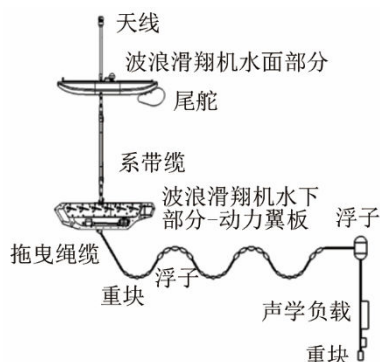


图 19 声学负载拖曳示意图
Fig. 19 Towing structure for acoustic payload

根据图 11 与图 13 所示,目前平台弹簧噪声与系带缆拉扯产生的噪声谱比环境噪声谱高出最多 33 dB。此处仅考虑传播损失因素,不考虑吸收因素,按照球面波扩展计算,采用目前平台在近海开展水下目标检测时声学负载拖曳距离至少需远离翼板 50 m 以上,才可以保证不受平台噪声影响。

3 结 论

波浪滑翔器作为一种新型海洋无人自主航行器,与 AUV 以及水下滑翔机相比有其独特的优势。波浪滑翔器不受能源限制,通过利用波浪能源与太阳能搭载观测设备实现长期观测。本文利用波浪滑翔机搭载低噪声自容式水听器对波浪滑翔机本体噪声进行了评估,分析了波浪滑翔器本体噪声以及水听器安装引入的噪声产生机制,并提出了改进方案;试验过程中记录到虾类与海洋哺乳动物信号,验证了波浪滑翔机搭载声学设备开展声学观测的可行性。结合波浪滑翔器跨界面自主运行的优势,可以通过卫星通信或其他远距离无线通信方式将水下观测或探测结果实时传回到远距离陆基或船基控制平台,再配合同步数据采集可实现水下、水面多节点实时组网。此外,波浪滑翔器具备航迹规划能力,具备一定的航迹控制精度,搭载声学探测装备的波浪滑翔器在海上可以按照预定轨迹在海上组成一定的阵型,从而可以提高水下目标检测能力,可以用于水下发声目标实时监测、探测等。

参 考 文 献

- [1] YOERGER D R, JAKUBA M, BRADLEY A M, et al. Techniques for deep sea near bottom survey using an autonomous underwater vehicle[C]//Robotics Research, 2007.
- [2] JIANG C, LI J L, XU W. The use of underwater gliders as acoustic sensing platforms[J]. Applied Sciences (2076-3417), 2019, 9, 4839.
- [3] BINGHAM B, KRAUS N, HOWE B, et al. Passive and active acoustics using an autonomous wave glider[J]. Journal of Field Robotics, 2012, 29(6): 911-923.
- [4] MANLEY J, WILLCOX S. The wave glider: a new concept for deploying ocean instrumentation[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine (1094-6969), 2010, 13(6): 8-13.
- [5] WENZGORDON M. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources[J]. J. Acoust. Soc. Am., (S0001-4966), 1962, 34: 1936-1956.
- [6] AU W W L, BANKS K. The acoustics of the snapping shrimp *Synalpheus parneomeris* in kaneohe bay[J]. J. Acoust. Soc. Am., (S0001-4966), 1998, 103(1): 41-47.
- [7] 王丕烈. 中国鲸类[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [8] OSWALD J N, BARLOW J, NORRIS T F. Acoustic identification of nine delphinid species in the Eastern Tropical Pacific Ocean[J]. Marine Mammal Science (1748-7692), 2003, 19(1): 20-37.