

船舶螺旋桨噪声远场湖泊试验研究

孙月明, 张世崧

中国人民解放军海军大连舰艇学院军事海洋与测绘系, 辽宁 大连

收稿日期: 2026年8月1日; 录用日期: 2026年8月27日; 发布日期: 2026年9月7日

摘要

船舶螺旋桨噪声特征可作为水下目标识别与声隐身的依据。研究在严格远场条件下开展水下背景噪声系统性试验, 涵盖水听器接收性能测试、湖泊背景噪声测试、静态2叶片螺旋桨噪声特性及实船航行螺旋桨噪声特征分析。采用时域统计、多维度频域分析(单边幅值谱、对数频谱、Welch功率谱密度)、时频联合分析(STFT、CWT小波变换)及LOFAR低频精细谱等方法, 结合MATLAB进行信号处理, 获取了典型水下噪声源的多维度特征图谱。结果显示, 某湖背景噪声呈10~100 Hz宽带平稳、中高频-9 dB/oct衰减特征; 螺旋桨噪声以离散谐波线谱为核心标识, 静态非空化时叶频最强, 较轴频高10~20 dB, 实船航行时轴系不平衡与流场非对称可使轴频成为主导分量。试验结果可为水下目标识别、背景噪声抑制及声学系统设计提供可复现的试验依据。

关键词

水下噪声, 船舶螺旋桨噪声, 时频域分析, 试验

Experimental Study on Far-Field Lake Noise of Ship Propellers

Yueming Sun, Shisong Zhang

Department of Hydrography and Cartography, PLA Dalian Naval Academy, Dalian Liaoning

Received: August 1, 2026; accepted: August 27, 2026; published: September 7, 2026

Abstract

The noise characteristics of ship propellers serve as the basis for underwater target identification and acoustic stealth technology. In this study, systematic underwater ambient noise measurements were performed under strict far-field conditions, including hydrophone calibration, *in situ* ambient noise testing of a freshwater lake, noise measurement of a static two-blade propeller, and noise feature analysis of ship propellers under sailing conditions. Combined with MATLAB-based signal processing,

multiple analytical methods were adopted: time-domain statistical analysis, multi-dimensional frequency-domain analysis (one-sided amplitude spectrum, logarithmic spectrum, Welch power spectral density), time-frequency joint analysis (Short-Time Fourier Transform (STFT), Continuous Wavelet Transform (CWT)), and LOFAR (Low Frequency Analysis and Recording) fine-line spectrum, to obtain multi-dimensional feature distributions of typical underwater noise sources. Experimental results indicate that the lake ambient noise maintains a stable wideband distribution within 10~100 Hz, with a decay slope of -9 dB/oct across the mid-to-high frequency band. Non-cavitating propeller noise is characterized by discrete harmonic line spectra; under non-cavitating conditions, the blade passing frequency (BPF) exceeds the shaft rotational frequency by 10~20 dB and dominates spectral energy. For sailing vessels, shaft unbalance and asymmetric inflow wake shift the dominant spectral component to shaft rotational frequency. The experimental data can provide reproducible benchmark references for underwater target recognition, ambient noise suppression, and the design of underwater acoustic detection.

Keywords

Underwater Noise, Ship Propeller Noise, Time-Frequency Domain Analysis, Experiment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水下噪声会制约海洋声学监测、目标探测及水声通信系统的工作性能,亟需精准掌握各类噪声源在远场下的时域、频域与时频域特征[1]-[3]。船舶辐射噪声是主要的人为水下噪声源,其中螺旋桨噪声尤为突出,具有特征显著、传播距离远等特点,现已成为水下目标识别与声隐身领域的研究热点[4]-[10]。

螺旋桨噪声主要采用理论分析、实船试验、数值计算三类研究方法[6]。其中,实船试验由于能复现真实流场与运行工况,弥补理论和仿真因理想假设产生的偏差,吸引大量学者开展相关研究。例如:1989年,叶祖荫等按照窄带频谱分析区分不同振动源与噪声源[7];同年,郭永松等测量空泡水筒背景噪声 > 500 Hz,螺旋桨噪声和各种类型空化噪声 > 100 kHz [8];2011年,刘竹青等依托循环水槽开展散货船模型螺旋桨噪声性能试验,测得空化噪声峰值低于 50 Hz,高频噪声以 6 dB/Oct 衰减,全频段辐射噪声较无空化工况抬升 10 dB 以上[9];2016年,Aktas 等证实带尾流屏的船模在空化水洞开展试验测得噪声数据可有效预报螺旋桨辐射噪声[4];同年,王超等在均匀流与非均匀流条件下,研究了不同流速、转速及空化数下螺旋桨空泡形态与辐射噪声特性的变化规律[10]。国内外研究初步探明螺旋桨噪声的基础频谱特征与工况响应规律,但现有试验多基于水洞模型,缺乏自然水域的对照实测数据,且噪声信号分析维度较为单一。

基于前人试验与分析短板,本试验通过四组独立且互补的测试,在统一远场标准下系统研究了湖泊背景噪声、静态螺旋桨噪声及实船航行螺旋桨噪声的特性,重点围绕以下问题展开:

- 1) 远场条件下水听器系统对高单频信号的接收能力测试。
- 2) 对比静态与动态螺旋桨噪声的远场特征差异及成因分析。
- 3) 评估不同信号处理方法在水下噪声分析中的适用性。

试验严格遵循声学测量相关标准和要求,所有数据处理过程可复现,试验结果可为水下声学领域的基础研究和工程应用提供支撑。

2. 试验仪器与方法

2.1. 试验仪器

自容式水听器, 灵敏度-168.3 dB re 1 V/ μ Pa (± 2 dB, 1 kHz~20 kHz), 工作频段 10 Hz~50 kHz。

2.2. 远场条件验证

所有试验均在远场条件下进行, 远场距离计算公式为:

$$R_{ff} \geq \frac{2L^2}{\lambda}$$

其中, L 为发射体最大尺寸, λ 为声波波长。

2.3. 信号处理方法与参数

采用标准化 MATLAB 信号处理流程, 所有参数统一设置, 确保分析结果可复现, 见表 1。

Table 1. Signal analysis methods, parameters, and applicable scenarios

表 1. 信号分析方法、参数及适用场景表

分析方法	核心参数	适用场景
时域统计分析	视情况截取 8~20 s 时长	信号平稳性评估、异常值检测
单边幅值谱	FFT 长度匹配数据段长度, 单边幅值修正	离散线谱识别、频率成分定量分析
对数频谱	对数变换, 添加 eps 避免零值	低幅值信号增强、宽动态范围显示
Welch 功率谱密度	4096 点 FFT, Hamming 窗, 50%重叠率	平稳随机信号功率估计、背景噪声级测量
STFT 时频分析	1024 点窗长, 50%重叠率, jet 色图	时变信号分析、多普勒频移检测
CWT 连续小波变换	Morlet 小波, 频率范围 0~5000 Hz	非平稳信号分析、瞬态特征提取
LOFAR 低频精细谱	8192 点长窗, Hanning 窗, 75%重叠率, 0~500 Hz 频段	旋转机械线谱识别

2.4. 试验总体安排

所有试验均在环境条件稳定的时段进行, 共包含四组独立测试, 顺序及核心内容如下:

试验一: 10 kHz 单频连续波水听器性能验证试验;

试验二: 某湖背景噪声测试;

试验三: 静态螺旋桨旋转噪声特征分析;

试验四: 实船航行螺旋桨噪声特征分析。

3. 分项试验结果与分析

3.1. 10 kHz 单频连续波水听器性能验证试验

3.1.1. 试验目的

验证远场条件下水听器对高频单频连续波信号的接收性能, 为后续现场试验提供参考依据。

3.1.2. 试验条件

试验环境: 某湖开阔水域, 背景噪声级 ≤ 60 dB re 1 μ Pa@10 kHz。

试验参数: 10 kHz 单频连续波(CW)信号; 约 200 m 收发距离(满足远场条件); $f_s = 3.2$ kHz 采样率; 5 m 水听器布放深度。

3.1.3. 结果与分析

STFT 时频图, 显示 10 kHz 处稳定水平亮带, 证实连续波信号正常接收, 无多普勒频移(相对静止)。功率谱中, 10 kHz 主峰两侧可见缓慢衰减的基底, 该基底主要源于水听器自噪声与放大器噪声共同构成的系统噪声底(非 sinc 旁瓣, 因 Hamming 窗已抑制), 见图 1。

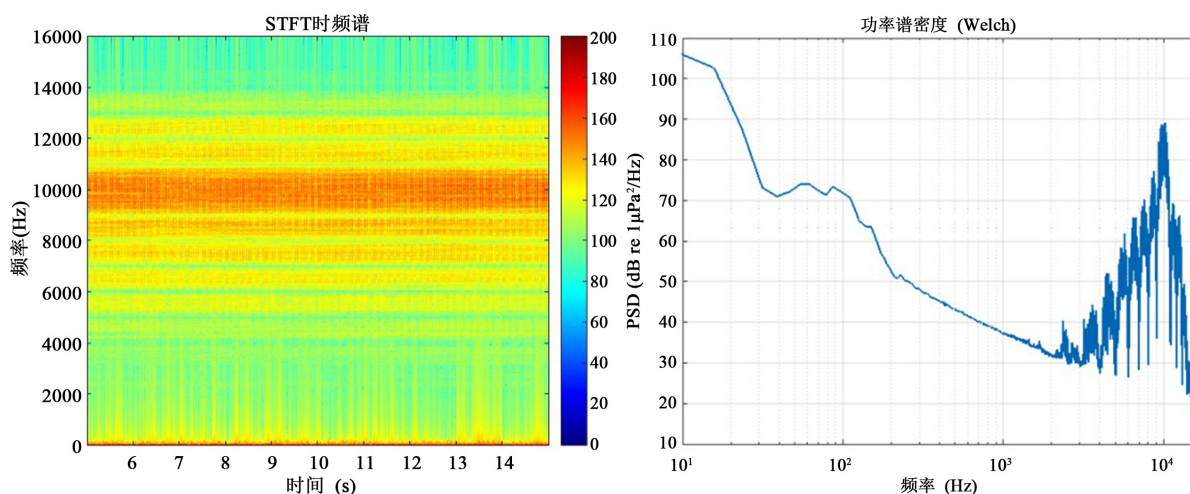


Figure 1. Time-frequency analysis of 10 kHz continuous signal

图 1. 10 kHz 连续信号时频分析

低频段(0~500 Hz) LOFAR 分析显示无明显线谱结构, 主要为环境干扰或设备本底噪声, 与 10 kHz 发射无关, 见图 2。

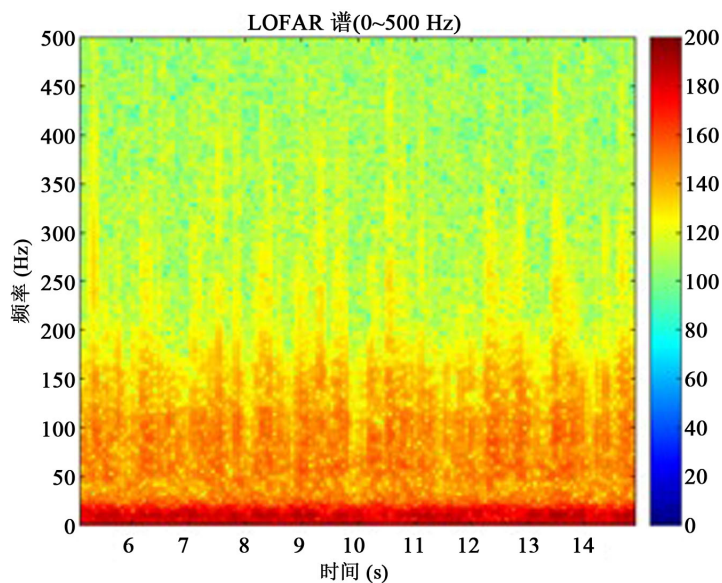


Figure 2. LOFAR analysis

图 2. LOFAR 分析

10 kHz 单频连续波水听器性能验证试验结论: 水听器工作正常, 10 kHz 连续波接收清晰, 信噪比满足监测要求, 可用于后续试验测量。

3.2. 某湖背景噪声测试

3.2.1. 试验目的

测量远场条件下某湖的背景噪声特性, 为水下目标识别提供背景噪声基准。

3.2.2. 试验条件

船舶状态: 待测船只处于靠港状态, 主机停机, 辅机(柴油发电机)额定运行。

环境条件: 气温 22℃, 湖面风速 3.5 m/s, 无浪花破碎。

水听器布放: 深度 5 m, 水平距离船体 50 m (远场条件)。

采集时长: 最大采集时长 15 分钟, 截取其中 20 秒稳态时段分析。

采样率: $f_s = 3.2 \text{ kHz}$ 。

3.2.3. 结果与分析

采用 Welch 法计算得到对数频率坐标下的湖泊背景噪声功率谱密度, 结果如图 3 所示。整体曲线呈单调衰减形态, 斜率约 -9 dB/oct 。该特征与开阔大洋 Wenz 背景噪声曲线存在明显差异, 低频声波传播过程中受湖底介质吸收作用显著; 同时, 湖泊空间尺度远小于海洋, 风生波浪噪声的激励范围受限, 最终造成其中高频噪声衰减速率高于大洋环境。

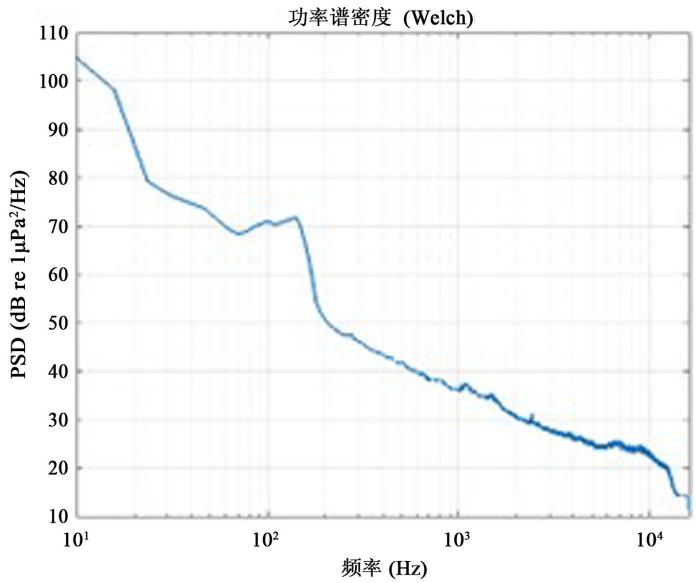


Figure 3. Power spectral density analysis of the whole frequency band
图 3. 全频段功率谱密度分析

由单边幅值谱(0~300 Hz)分析可得: 识别到 7.4 Hz 等弱线谱, 间隔非谐波关系。此噪声来源可能是锚泊状态水动力-结构耦合, 也就是锚链涡脱落和船体摇摆模态, 而非旋转机械。

由 LOFAR 精细谱(0~500 Hz)分析可得: 低频整体黄绿色分布, 无清晰水平亮线, 证实无恒定转速旋转机械, 这意味着辅机隔振良好或转速非典型值, 噪声主要来源于船辅机残余振动和湖泊环境噪声, 见图 4。

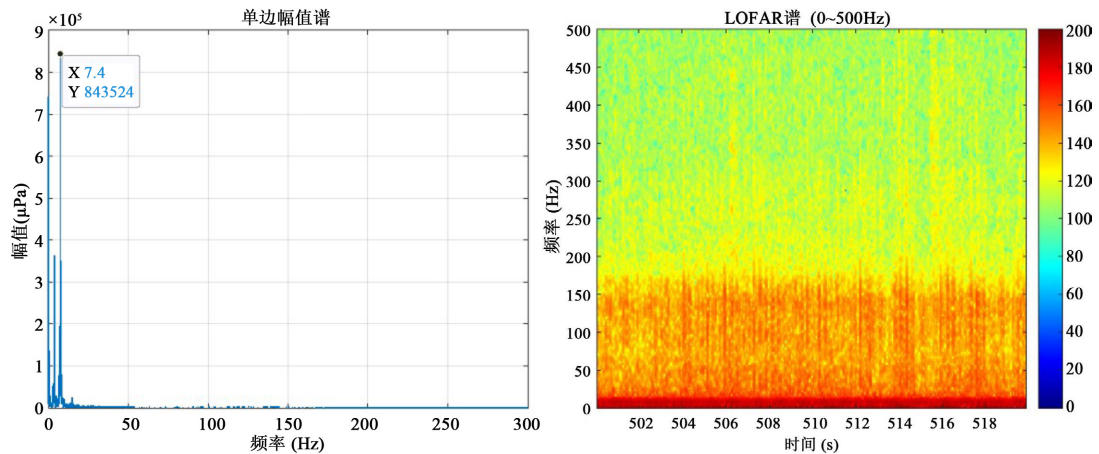


Figure 4. Spectrum analysis in the low frequency band

图 4. 低频段频谱分析

由时频分析(STFT/CWT)可得: 全频段能量分布均匀, 无时频集中结构。4200 Hz 附近黄绿色相对增强, 形成水平带。能量相对增强的原因, 可能为码头锚泊船只的辅机机械噪声与湖面风生湍流边界层噪声的叠加, 呈现“泊船辅机-风噪”复合特征, 此外无主动声纳、通信信号等确定性干扰, 见图 5。

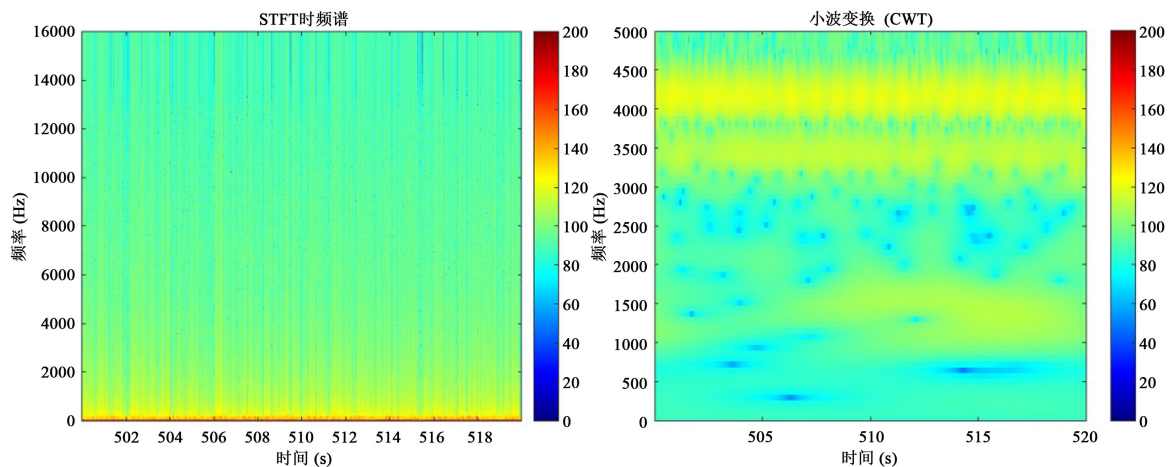


Figure 5. Time-frequency analysis

图 5. 时频分析

某湖背景噪声测试结论: 远场条件下某湖背景噪声以低频宽带噪声为主, 主要噪声源包括水动力-结构耦合噪声、湖面风声噪声及远处船舶残余噪声。

3.3. 静态螺旋桨旋转噪声特征分析

3.3.1. 试验目的

研究远场条件下螺旋桨在非空化状态下的旋转噪声特征, 为螺旋桨噪声源识别提供理论依据。

3.3.2. 试验条件

试验环境: 某湖开阔水域。

试验对象: 某船只。

水听器布放: 深度 5 m, 水平距离螺旋桨 > 200 m (远场条件)。

采样率: $f_s = 3.2$ kHz。

分析时段: 长度 12 s 稳态信号。

3.3.3. 结果与分析

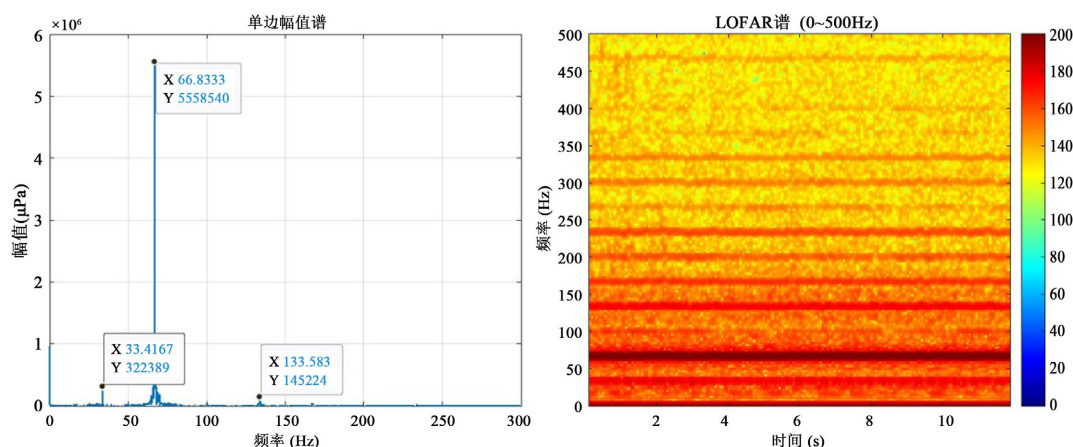


Figure 6. Line spectrum analysis of propeller noise

图 6. 螺旋桨噪声线谱分析

由单边幅值谱(0~300 Hz)分析可得(见图 6): 典型的 2 叶片螺旋桨旋转噪声特征, 典型线谱频率分别对应: 33 Hz, 为轴频(螺旋桨每秒转 33 圈, 转速 1980 RPM)。66 Hz, 为叶频(BPF) (2 片叶片 $\times$ 33 Hz 轴频), 是螺旋桨噪声中最强的线谱成分。133 Hz 为 2 倍叶频(2×66 Hz), 强度随谐波阶数增加而衰减。当噪声来源于螺旋桨旋转时, 叶片周期性切割流体产生压力脉动, 形成离散线谱噪声。其次, 叶频总是最强, 这是螺旋桨非空化状态下最显著的特征, 由叶片载荷和厚度效应共同产生, 声压级通常比轴频和高次谐波高 10~20 dB。其次, 谐波强度递减, 2 倍、3 倍叶频的幅值随阶数增加呈线性下降趋势。最后, 轴频较弱, 轴频由螺旋桨轴系不平衡、不对中等机械因素引起, 通常远低于叶频强度。

由 LOFAR 低频精细谱(0~500 Hz)分析可得(见图 6): 全频段呈现均匀橙黄色基底, 存在多条贯穿全时段的等间距水平亮线, 谱线能量稳定且无明显时变特征, 说明测试环境内存在持续恒定转速的旋转类噪声源。

静态螺旋桨旋转噪声特征分析结论: 远场条件下 2 叶片螺旋桨非空化噪声以离散谐波线谱为核心特征, 线谱频率与螺旋桨叶片数和转速存在严格的定量关系:

$$f_n = n \times Z \times f_s$$

其中: n 为谐波阶数, Z 为叶片数, f_s 为轴频。叶频分量最强, 轴频和高次谐波分量较弱, 幅值随谐波阶数增加线性衰减。

3.4. 实船航行螺旋桨噪声特征分析

3.4.1. 试验目的

研究远场条件下实船航行螺旋桨的噪声特性, 对比与静态螺旋桨噪声的差异, 分析实船环境对螺旋桨噪声的影响机制。

3.4.2. 试验条件

试验船舶: 小型双体船。

运行工况: 匀速直航。

水听器布放: 深度 5 m, 水平距离符合远场条件。

采样率: $f_s = 3.2$ kHz。

3.4.3. 结果与分析

测试获取的行船噪声频谱中, 20 Hz、40 Hz、80 Hz、66 Hz 为特征明显的离散线谱, 幅值强度呈现 20 Hz 最强、80 Hz 次之、40 Hz 较弱、66 Hz 最弱的分布规律, 其余高频线谱随频率升高整体逐步衰减, 见图 7。其中, 20 Hz 为螺旋桨轴频(旋转基频)、40 Hz 为 2 倍轴频、80 Hz 为 4 倍轴频, 三者构成以 20 Hz 为基频的稳定谐波族。20 Hz 基频幅值占优, 主要由螺旋桨轴系旋转不平衡、对中偏差及船体尾流场非对称效应共同激励形成; 40 Hz、80 Hz 分别为轴频的倍频成分, 由螺旋桨叶片载荷脉动与流场扰动产生, 能量大幅抬升; 而 66 Hz 叶频相对于静态螺旋桨旋转噪声试验变弱, 但并未消失, 其微弱能量来源于螺旋桨叶片固有厚度脉动、齿轮箱啮合与尾流场交叉耦合。

对比静态与实船航行工况可见, 噪声主导频率发生明显转换: 静态无船体扰动, 螺旋桨进流均匀, 叶片同步载荷脉动使 66 Hz 叶频成为噪声主峰; 船舶航行时船体产生畸变尾部伴流场, 桨叶旋转过程中来流速度与攻角周期性变化, 产生强非定常水动力, 引发整桨推力、力矩低频振荡并作用于桨轴, 放大轴系不平衡激励, 20 Hz 轴频谐波能量显著升高; 伴流打乱桨叶载荷同步性, 66 Hz 叶频辐射能量大幅下降。

提取两种工况特征谱线声压幅值, 依据声压级公式 $L_p = 20 \log_{10} (A/p_{ref})$ 换算定量分析(标准参考声压取 $1 \mu\text{Pa}$), 航行工况 20 Hz 轴频声压级较静态 33 Hz 轴频提升 22.70 dB, 66 Hz 叶频声压级同步衰减 28.58 dB, 定量证实非均匀船尾伴流是轴频谐波增强、噪声主导频率由叶频转向轴频的核心流体动力学诱因。

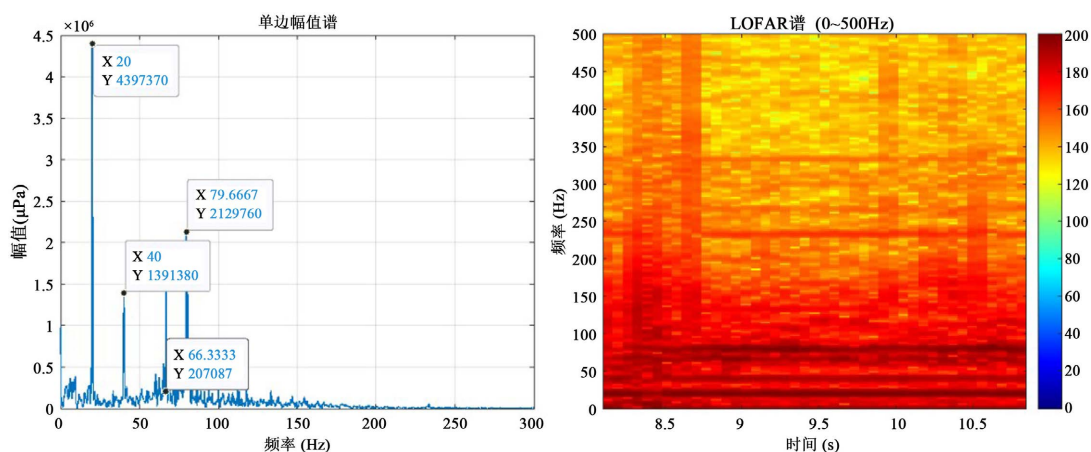


Figure 7. Line spectrum analysis of ship propeller noise
图 7. 行船螺旋桨线谱分析

频谱在 234 Hz、1406 Hz 处出现局部幅值略高的现象, 见图 8, 分别对应 12 倍、70 倍轴频的高次谐波, 是螺旋桨旋转压力脉动激励船尾舵、支架、船壳板架等结构发生局部共振放大所致, 不属于独立噪声源。

综合线谱间隔、谐波关系、幅值衰减规律及高频共振特征, 可判定本次行船噪声主要来源于船舶螺旋桨旋转脉动噪声, 与柴油机、齿轮箱、水泵、电机等机械设备辐射噪声特征明显不符。

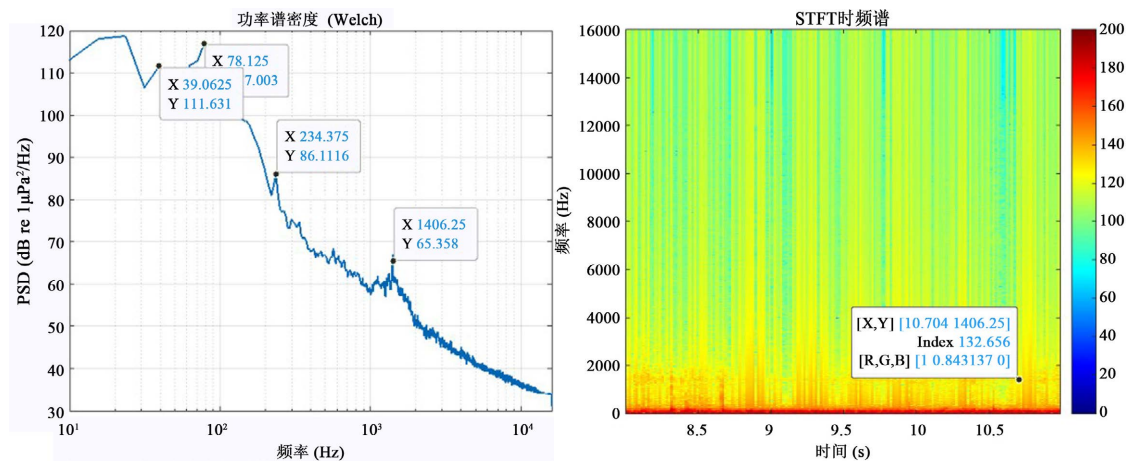


Figure 8. High-order harmonic analysis
图 8. 高次谐波分析

实船航行螺旋桨噪声特征分析结论：远场条件下实船航行螺旋桨噪声同样以离散谐波线谱为主要特征，但与静态螺旋桨相比，轴频分量可能因轴系不平衡和流场非对称成为主导分量。高次谐波可通过结构共振产生局部峰值，这是实船螺旋桨噪声的重要特征。这些特征为水下航行船舶的识别和分类提供了关键依据。

4. 综合结论

- 1) 远场条件对试验结果的影响
本次试验所有数据均在远场条件下获取，确保了测量结果的可靠性和工程适用性，主要原因为近场条件下声压分布复杂，存在干涉现象，而远场条件下声压分布稳定，测量结果可直接用于工程设计。
- 2) 低频远场特性
对于实船试验中的低频线谱(20 Hz)，虽然船舶长度较大，但低频波长较长(75 m)，实际测量距离满足远场条件，保证了低频线谱测量的准确性。
- 3) 通过对四组试验结果的综合分析，总结出远场条件下不同水下噪声源的典型特征，如表 2 所示：

Table 2. Typical characteristics of different underwater noise sources under far-field conditions
表 2. 远场条件下不同水下噪声源的典型特征

噪声源类型	时域特征	频域核心特征	典型线谱标识
水听器系统本底噪声	平稳高斯白噪声	宽带连续谱，斜率平坦	无显著离散线谱
湖泊背景噪声	平稳随机信号	-9 dB/oct 单调衰减	无旋转机械强线谱
静态螺旋桨噪声(非空化)	严格周期性信号	离散谐波线谱，叶频最强，幅值随阶数线性衰减	轴频、叶频及其谐波
实船航行螺旋桨噪声	准周期性信号	离散谐波线谱，轴频或叶频最强，可能有共振峰	轴频谐波族、结构共振峰

- 4) 信号处理方法的适用性评估
不同信号处理方法在水下噪声分析中具有不同的优势和局限性：
Welch 功率谱密度：采用 4096 点 FFT、50%重叠的 Hamming 窗，有效平衡了频率分辨力和估计方

差, 是平稳随机信号功率估计的最优方法, 特别适合背景噪声级的测量。

LOFAR 精细谱: 采用 8192 点长窗、75%重叠的 Hanning 窗, 频率分辨力达 15.625 Hz, 是识别低频旋转机械线谱的最有效方法, 能够清晰区分间隔较小的线谱成分。

STFT 时频分析: 采用 1024 点窗长、50%重叠率, 频率分辨力 31.25 Hz, 能够直观展示信号的时变频率特性, 适合检测多普勒频移和瞬态信号。

CWT 小波变换: 采用 Morlet 小波, 具有自适应时频分辨力, 在低频段频率、高频段时间分辨力高, 适合分析非平稳信号和瞬态特征。在实际应用中, 应根据噪声源的特征选择合适的信号处理方法, 或采用多种方法相结合的方式, 以获得全面准确的分析结果。

5. 展望

本研究在严格远场条件下开展水下背景噪声系统性试验, 得到以下结论: 某湖背景噪声呈 10~100 Hz 宽带平稳、中高频-9 dB/oct 衰减特征; 螺旋桨噪声以离散谐波线谱为核心标识, 静态非空化时叶频最强, 较轴频高 10~20 dB, 实船航行时轴系不平衡与流场非对称可使轴频成为主导分量。

但本试验仍存在以下局限性: 其一, 试验环境单一, 仅在湖泊环境下进行了测试, 缺乏开阔海洋环境下的对比数据, 无法全面反映不同水文环境对噪声传播的影响。其二, 螺旋桨噪声试验的工况较少, 未覆盖不同转速、不同载荷和不同空化状态, 特别是空化状态下螺旋桨噪声的特征变化规律仍需进一步研究。其三, 未对噪声源的指向性进行定量研究, 无法全面反映噪声在不同方向上的辐射特性。其四, 实船试验中未同时测量船舶的精确运动参数, 无法定量分析航速和航向对噪声特征的影响。

针对上述局限性, 试验应在以下方面进行改进: 第一, 开展海洋环境下的对比试验, 建立不同环境下的噪声特征数据库。第二, 系统研究不同工况下螺旋桨噪声的特性, 特别是空化状态下的噪声特征, 深入分析空化对螺旋桨噪声的影响机制。第三, 采用多元水听器阵列, 测量噪声源的指向性和传播特性。第四, 同步测量船舶的运动参数和流场参数, 建立噪声特征与船舶运动状态的定量关系。

参考文献

- [1] Urick, R.J. (1983) *Principles of Underwater Sound*. 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company.
- [2] 李整林, 余炎欣. 深海声学研究进展[J]. 科学通报, 2022, 67(2): 125-134.
- [3] 吴双林, 秦继兴, 戚聿波, 李整林. 深海声学及水下声源定位研究进展[J]. 声学学报, 2025, 50(3): 551-570.
- [4] Aktas, B., Atlar, M., Turkmen, S., Shi, W., Sampson, R., Korkut, E., et al. (2016) Propeller Cavitation Noise Investigations of a Research Vessel Using Medium Size Cavitation Tunnel Tests and Full-Scale Trials. *Ocean Engineering*, 120, 122-135. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.12.040>
- [5] 周坤. 螺旋桨噪声信号特征提取与建模研究[D]: [硕士学位论文]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2023.
- [6] 方世良, 杜栓平, 罗昕炜, 韩宁, 徐晓男. 水声目标特征分析与识别技术[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(3): 297-305.
- [7] 叶祖荫, 方开翔. 高速船舶的螺旋桨噪声[J]. 镇江船舶学院学报, 1989(2): 4-11.
- [8] 郭永松, 胡天群. 船研所空泡水筒背景噪声和 ITTC 标准螺旋桨空化噪声测量[J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报, 1989(1): 28-36.
- [9] 刘竹青, 丁恩宝, 陈奕宏. 某散货船模型螺旋桨噪声性能试验研究[J]. 中国造船, 2011, 52(S1): 83-88.
- [10] 王超, 孙帅, 郭春雨, 叶礼裕. 均匀流与非均匀流条件下螺旋桨空泡及噪声试验分析[C]//中国造船工程学会船舶力学学术委员会测试技术学组. 聚焦应用 支撑创新——船舶力学学术委员会测试技术学组 2016 年学术会议论文集. 无锡: 船舶力学学术委员会测试技术学组, 《船舶力学》编辑部, 2016: 307-317.