引用格式: 倪俊帅, 胡长青, 赵梅, 等. 基于 VMD 和窄带包络相关的船舶辐射噪声改进 DEMON 分析[J]. 声学技术, 2023, **42**(6): 701-708. [NI Junshuai, HU Changqing, ZHAO Mei, et al. Improved DEMON analysis of ship radiated noise based on VMD and narrow-band envelope correlation[J]. Technical Acoustics, 2023, **42**(6): 701-708.] **DOI**: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2023.06.001

基于VMD和窄带包络相关的船舶辐射 噪声改进DEMON分析

倪俊帅^{1,2},胡长青¹,赵梅¹,吕国涛¹,郭 政¹

摘要:船舶辐射噪声的包络谱中蕴含着轴频和桨叶数等船舶固有特征信息,对船舶目标识别具有重要意义。为了提高船舶辐射噪声包络谱解调性能,提出了基于变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)和窄带包络相关的改进DEMON分析方法。首先利用VMD算法代替传统带通滤波器,将船舶辐射噪声信号分解为若干个子带;然后对各子带进行希尔伯特(Hilbert)检波并计算平均窄带包络相关系数,用于衡量信号的包络调制在频域上的非均匀性;最后提取各子带信号包络谱并按照平均窄带包络相关系数进行加权融合,从而得出宽带噪声信号的包络谱。利用该方法对实测不同类型和不同航速船舶辐射噪声信号进行了处理,结果均表明所提方法能有效提高包络谱解调效果,较传统方法更为有效。

关键词:船舶辐射噪声;变分模态分解;窄带包络相关;希尔伯特变换;解调
中图分类号: O429
文献标志码: A
文章编号: 1000-3630(2023)-06-0701-08

Improved DEMON analysis of ship radiated noise based on VMD and narrow-band envelope correlation

NI Junshuai^{1,2}, HU Changqing¹, ZHAO Mei¹, LYU Guotao¹, GUO Zheng¹ (1. Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Science, Shanghai 201815, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: The envelope spectrum of ship radiated noise contains characteristic information such as shaft frequency and blade number, which is of great significance for ship target recognition. In order to improve the demodulation performance of envelope spectrum of ship radiated noise, an improved DEMON analysis method based on variational mode decomposition (VMD) and narrow-band envelope correlation is proposed in this paper. Firstly, VMD is used to replace the traditional band-pass filter to decompose the ship radiated noise signal into several sub-bands. And then, by Hilbert detection of each sub-band, the average narrow-band envelope correlation coefficient is calculated to measure the non-uniformity of modulation in frequency-domain. Finally, the envelope spectrum of each sub-band signal is extracted and weighted according to the average narrow-band envelope correlation coefficient to obtain the envelope spectrum of broadband noise signal. The measured noise signals radiated by different types and speeds of ships are processed. The results show that the proposed method can effectively improve the demodulation effect of envelope spectrum, and is more effective than the traditional method.

Key words: ship radiated noise; variational modal decomposition (VMD); narrow band envelope correlation; Hilbert transform; demodulation

0 引言

船舶航行具有动态复杂性, 航速变化对船舶目标识别造成了困难。船舶动力系统的工作方式决定

了船舶辐射噪声具有听觉节奏^[1],反映在时域信号 上则为包络起伏的调制特性,利用解调船舶辐射噪 声信号得到的包络线谱,能够提取发动机气缸数、 变速箱传动比、主轴转速、螺旋桨叶片数等^[2]船舶 的固有物理特征。在这些特征中,主轴转速和船舶 航速之间存在数学关系,结合经验公式^[3]可估计船 舶吨位等特征参数;而其他特征是航速无关的,因 此在航速变化的情况下,均可借以辅助分类系统实 现更准确的船舶目标识别。

DEMON谱估计是船舶辐射噪声包络解调的关

收稿日期: 2022-07-25; 修回日期: 2022-08-28

基金项目: 中国科学院声学研究所自由探索项目资助。

作者简介: 倪俊帅(1995一), 男, 山东德州人, 博士研究生, 研究方向 为水声目标识别。

通信作者: 赵梅, E-mail: zhaomei@mail.ioa.ac.cn

键技术,在船舶调制特征提取中得到了广泛的应 用。陈光等^[4]提出基于希尔伯特(Hilbert)变换的包络 解调方法并将其应用于鱼雷电磁引信: 陶笃纯[5]分 析了船舶辐射噪声听觉节奏的物理根源,建立了各 种调制类型的功率谱密度数学模型; 吴国清等⁶⁶基 干海上实验数据, 讨论了在噪声中低频线谱和调制 线谱的检测性能; 王晶等¹⁷将小波变换用于船舶辐 射噪声调制信息检测,相对于传统的 DEMON 分析 可以更快更好地提取调制信息;程玉胜等¹⁸提出了 基于现代信号处理技术的舰船噪声信号 DEMON 分 析方法,探讨了解调带宽对船舶辐射噪声调制谱的 影响:刘启军等¹⁹研究了船舶螺旋桨空化噪声的非 均匀调制特性,提出一种基于多子带自适应加权的 DEMON 增强算法。王森等^[10]提出了相关特性船舶 辐射噪声DEMON谱信噪比增强算法。基于传统 DEMON分析的改进方法,在一定程度上提高了包 络谱质量,为特征线谱检测提供了有利条件。

本文针对传统DEMON分析方法解调性能对带 通滤波器设计的依赖,以及不同类型和不同航速下 截止频率选择困难的问题,结合船舶辐射噪声特性 的分析,将变分模态分解应用于船舶辐射噪声包络 解调,利用变分模态分解(Variational Mode Decomposition, VMD)算法自适应分解信号的能力和频域 抗混叠的优势^[11],以及多子带加权融合方法对包络 线谱的增强作用,对传统DEMON方法进行了改 进,提出了基于VMD和窄带包络相关的船舶辐射 噪声DEMON分析方法,并利用实测数据对该方法 进行了验证。

1 船舶辐射噪声特性

船舶辐射噪声主要由机械噪声、螺旋桨噪声、 水动力噪声组成¹¹²,是由多个声源耦合的宽带非平 稳信号。船舶辐射噪声具有的包络周期起伏的调制 特性,反映在听觉上则为有节奏的时变响度。水动 力噪声在时间上是平稳的,基本不具备可供船舶识 别的有效特征;辅机、空调机、泵等发出的噪声也 是平稳的,具有明显的稳定的线谱,但容易被其他 噪声成分淹没。轴系碰磨和螺旋桨叶片切割流场产 生的辐射噪声在时间上是非平稳的。这类辐射噪声 在船舶辐射噪声中占据主要地位,均可近似看作描 述声源平稳振动特性的基带信号和描述调制特性的 包络函数的乘积。轴系碰磨噪声的功率谱主要为呈 谐波关系的线谱,频率分布满足轴系故障噪声的一 般规律^[13]。螺旋桨噪声的功率谱主要为线谱和连续 谱,线谱分布在低频段,连续谱能量集中在高 频段。

图1和图2为两种不同类型船舶辐射噪声的功率谱。大型货船辐射噪声能量主要集中在低频段,频率大于200 Hz时功率谱强度基本衰减到100 dB以下,未见明显连续谱峰。渔船辐射噪声功率谱的连续谱峰在500 Hz 左右,100 Hz 附近可见高于连续谱10 dB的轴系噪声线谱簇。







Fig.2 Noise power spectrum radiated by fishing boats

图3和图4为同一船舶在不同航速下辐射噪声的功率谱。该试验船低速时线谱分布在50~100 Hz, 连续谱峰在400 Hz左右,高速时线谱分布在70~ 150 Hz,连续谱峰在600 Hz左右。





j





Fig.4 Noise power spectrum radiated by the test ship at high speed

通过对以上典型船舶辐射噪声功率谱进行分析 可以得到以下结论:

(1)船舶辐射噪声功率谱强度基本遵循随频率 先增大后减小即存在谱峰的总体规律,不同类型船 舶以及同一船舶在不同航速下辐射噪声功率谱的形 状和谱峰位置均具有一定的差异。

(2)船舶辐射噪声功率谱由线谱和连续谱组成, 线谱数量和频率分布根据船舶类型和航速不同存在 差别。随着航速的增大,线谱和连续的谱峰向高频 方向移动。

通过分析船舶辐射噪声产生机理,可认为船舶 轴系噪声和螺旋桨噪声调制频带与船舶类型和航速 有关,轴系噪声和螺旋桨某一叶片噪声具有相同的 调制周期,能够起到增强轴频线谱的作用。因此, 在船舶辐射噪声 DEMON 解调时根据信号内在特性 自适应地划分解调频带,同时有效检测提取船舶轴 系噪声调制成分,对提升 DEMON 谱质量、提高包 络线谱信噪比具有重要意义。

2 改进 DEMON 分析

2.1 变分模态分解原理

传统的经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)算法存在模态混叠、难以分辨频率距离相近的模态分量、易受采样频率影响等局限性。VMD算法是在参考EMD的基础上,提出的一种非递归自适应的模态分解信号处理方法^[14],通过构造约束变分模型来求解,从而克服EMD算法的局限性。

VMD 算法中将固有模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)定义为

$$u_k(t) = A_k(t) \cos\left[\varphi_k(t)\right] \tag{1}$$

式中:
$$A_k(t)$$
表示模态的瞬时幅度, $\varphi_k(t)$ 表示模态

的相位,模态u_k(t)为调幅-调频信号形式。首先预 设原始信号的模态阶数,将原始信号分解为K阶带 限本征模态函数,构造并求解变分约束模型。假设 每个模态u_k具有中心频率和有限带宽,约束条件为 各阶 IMF 分量估计带宽之和最小,且所有 IMF 之和 等于输入信号。根据上述步骤构造变分约束模型, 表达式为

$$f(t) = \min_{\{u_k\},\{\omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^{K} \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \times u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \cdot \sum_{k=1}^{K} u_k(t)$$
(2)

式中: *K*为IMF的阶数, $\delta(t)$ 为单位脉冲函数, ∂_t 为函数求偏导符号, $\{u_k\} = \{u_1, u_2, \dots, u_K\}$ 表示*K*个 有限带宽IMF分量, $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K\}$ 表示各 阶IMF的中心频率。

为了求解式(1)中的约束变分问题,引入惩罚 因子 α 和Lagrange算子 $\lambda(t)$,将式(1)转化为非约束 变分问题,得到:

$$L\left(\left\{u_{k}\right\},\left\{w_{k}\right\},\lambda\right) = \alpha \sum_{k=1}^{K} \left\|\partial t\left[\left(\delta(t)+\frac{j}{\pi t}\right)\times u_{k}(t)\right]e^{-jw_{k}t}\right\|_{2}^{2} + \left\|f(t)-\sum_{k=1}^{K}u_{k}(t)\right\|_{2}^{2} + \left\langle(t),f(t)-\sum_{k=1}^{K}u_{k}(t)\right\rangle \quad (3)$$

采用交替方向乘子算法对式(2)进行迭代计算, 迭代过程在频域对*u_k*, *w_k*, λ进行更新,表示为

$$\hat{u}_{k}^{n+1}(w) = \frac{\hat{f}(w) - \sum_{i < k} \hat{u}_{i}^{n}(w) - \sum_{i > k} \hat{u}_{i}^{n}(w) + \frac{\lambda^{n}(w)}{2}}{1 + 2\alpha \left(w - w_{k}^{n}\right)^{2}}$$
(4)

$$w_{k}^{n+1} = \frac{\int_{0}^{\infty} w \left| \hat{u}_{k}^{n+1} \right|^{2} dw}{\int_{0}^{\infty} \left| \hat{u}_{k}^{n+1} \right|^{2} dw} \hat{\lambda}^{n+1}(w)$$
(5)

$$\hat{\lambda}^{n+1}(w) = \hat{\lambda}^n(w) + \tau \left[f(w) - \sum_k \hat{u}_n^{n+1}(w) \right]$$
(6)

$$\sum_{k=1}^{K} \frac{\left\| \hat{u}_{k}^{n+1} - \hat{u}_{k}^{n} \right\|_{2}^{2}}{\left\| \hat{u}_{k}^{n} \right\|_{2}^{2}} < \varepsilon$$
(7)

其中: 符号^{*}表示傅里叶变换, *n*为迭代的次数, τ 为更新因子。如式(1)所示,当迭代相对误差小于 预设门限ε时,停止迭代过程,得到最终模态分解 结果。

2.2 窄带包络相关原理

船舶辐射噪声信号的包络调制存在频域不均匀 性,不同窄带上的调制程度会有较大差异。多子带 融合DEMON分析方法能够有效保留原始信号丰富 的调制信息,提高包络线谱质量,但是其中的弱调 制和非调制频带不仅增加了运算成本,也会对融合 后的包络谱产生噪声干扰。为解决这一问题,本文 采用窄带包络相关法来衡量船舶辐射噪声的非均匀 调制特性,利用平均窄带包络相关系数对多子带包 络谱进行加权融合,原理如下^[15]。

假设船舶辐射噪声信号模型为

$$s(t) = \lfloor 1 + g(t) \rfloor x(t) \tag{8}$$

式中: g(t)为船舶辐射噪声调制包络, x(t)为宽带 噪声。船舶辐射噪声经过不同中心频率窄带滤波后 的输出为

$$y_i(t) = g\left(t, f_i\right) \cos\left[2\pi f_i t + \varphi\left(t, f_i\right)\right]$$
(9)

其中: $g(t,f_i)$ 为窄带噪声包络,i=1,2,...,K。定义 不同中心频率窄带包络相关系数为

$$R(\tau, f_n - f_k) =$$

$$\frac{\left\langle \left[g(t,f_{k})-\left\langle g(t,f_{k})\right\rangle\right]\right]\left[g(t-\tau,f_{n})-\left\langle g(t-\tau,f_{n})\right\rangle\right]\right\rangle}{\left\langle \left[g(t,f_{k})-\left\langle g(t,f_{k})\right\rangle\right]^{2}\right\rangle\left\langle \left[g(t-\tau,f_{n})-\left\langle g(t-\tau,f_{n})\right\rangle\right]^{2}\right\rangle}$$
(10)

式中: *f*_n为参考窄带中心频率,符号〈·〉表示求平均。为了便于衡量船舶辐射噪声包络调制的频域不均匀性,定义第*k*个参考窄带处的平均包络相关系数:

$$R_{n} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} R_{nk} (\tau, f_{n} - f_{k})$$
(11)

其中: R_n 表示第n个参考窄带的平均包络相关系数, 且n=1,2,...,K。

2.3 传统 DEMON 分析方法

DEMON分析是获取船舶辐射噪声包络谱(调制谱)的重要手段,在船舶轴频和螺旋桨叶片数提取中得到了广泛的应用。传统DEMON分析流程如图5所示。

传统DEMON分析中检波的目的是提取带通滤 波输出信号的包络,常用的方法有绝对值检波、平 方检波和Hilbert检波。3种方法的不同在于非线性





运算方式的不同,解调性能也略有差异。Hilbert法 能够几乎无失真地还原包络信号波形,检波性能通 常优于其他两种方法。假设*s*(*t*)是带通滤波器输出 的一维连续时间信号,其Hilbert变换*ŝ*(*t*)定义为

$$\hat{s}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{s(\tau)}{t-\tau} d\tau = \frac{1}{\pi t} * s(t)$$
(12)

根据 Hilbert 变换的频响特性,利用 $\hat{s}(t)$ 和 s(t) 构造解析函数:

$$z(t) = s(t) + j\hat{s}(t)$$
(13)

由此可得信号的包络为

$$z(t) = \sqrt{s^2(t) + \hat{s}^2(t)}$$
(14)

对信号包络进行低通滤波和功率谱分析得到船 舶辐射噪声的包络谱。通过分析包络谱中的基频线 谱频率和谐波线谱数量,提取船舶的轴频和螺旋桨 叶片数等特征参数。

2.4 改进DEMON分析方法

传统 DEMON 分析方法采用频域均分法确定带 通滤波器个数和截止频率,无法根据船舶不同类型 以及船舶工况变化自适应地调整滤波器参数。为了 解决这一问题,更好地提取船舶辐射噪声的包络调 制信息,本文提出了基于VMD和窄带包络相关的 改进 DEMON 分析方法。VMD 本质上是一种维纳 滤波,在船舶辐射噪声信号处理中能够有效抵抗环 境噪声的干扰,具有很好的噪声稳健性,且能够较 灵敏地提取耦合信号中轴系碰磨噪声成分,对轴系 故障引发的轴频调制信号包络具有很好的提取作 用^[16]。此外, VMD分解各阶 IMF 均紧密围绕中心 频率的特性也使其达到对特定频率进行窄带滤波的 效果,同时考虑多子带加权融合方法可以起到抑制 干扰噪声和增强调制线谱的作用,结合VMD和窄 带包络相关对传统 DEMON 分析方法进行改进,从 而更好地获取船舶辐射噪声信号的包络谱。本文提 出的改进 DEMON 分析方法分析流程如图6 所示。 具体实现步骤如下:

(1)采用VMD方法取代带通滤波器。对船舶辐





射噪声信号进行变分模态分解,获得K阶固有模态 函数,即K个具有不同中心频率和有限带宽的窄带 信号。在该步骤中,K的取值由EMD¹¹⁷¹分解结果 确定。

(2) 分别对每一个 IMF 分量进行 Hilbert 检波, 计算 IMF 检波后的平均窄带包络相关系数。然后按 照传统 DEMON 方法依次进行低通滤波和功率谱分 析,得到K个窄带包络谱。

(3)利用平均窄带包络相关系数对K个窄带包 络谱进行加权融合,融合过程中舍弃中心频率最低 的模态以降低噪声干扰,将融合后的结果作为螺旋 桨噪声包络谱。

3 实验及结果分析

3.1 不同类型船舶辐射噪声 DEMON 分析

为了验证本文中改进DEMON分析方法的可行 性和实际应用效果,对实测船舶辐射噪声信号进行 处理。目标为长江吴淞口附近水域的4类船舶,分 别为货船、油轮、渔船、执法船。利用自容式水听 器获取船舶辐射噪声信号,采样率为32000 Hz, 信噪比不大于5dB,截取时长为5s的信号并采用 本文改进DEMON方法进行分析。首先,对信号进 行VMD处理,图7为4类船舶辐射噪声信号8阶 IMF的中心频率。由图7可以看出,中心频率满足 随阶数升高而增大的趋势,不同类型船舶辐射噪声 的IMF中心频率分布不同。货船辐射噪声能量集中 在低频,因此其前4阶IMF的中心频率较其他类型 船舶的中心频率更低。





接下来,计算各阶 IMF 的平均窄带包络相关系数,为了更好地衡量船舶在不同频带上调制非均匀性,对不同类型船舶平均窄带包络相关系数进行0~1 的放缩处理。各阶 IMF 的平均窄带包络相关系数如图8 所示。由图8 可以看出,船舶辐射噪声的

调制现象具有频域非均匀性,而且对于不同船舶这种非均匀特性不同。一般地,船舶辐射噪声的低频段主要是机械噪声和包络信号线谱,调制现象不明显,且容易受到环境噪声和其他船舶辐射噪声的干扰,因此1阶IMF的DEMON谱中基本不包含有效调制信息,在多子带融合DEMON分析时将其剔除。

图9和图10为传统多子带融合DEMON分析方











法对4类船舶辐射噪声解调得出的包络谱,均采用 窄带包络相关系数进行加权融合,图9为Hilbert检 波,图10为平方检波。图11为本文改进DEMON 分析方法处理结果。与传统方法相比,本文方法能 够对包络谱中的连续谱成分进行有效的抑制,线谱 成分中叶频线谱更加明显,有效提高了包络谱的信 噪比。





Fig.10 Demodulation results of four types of ship radiated noises by using the traditional square wave detection method







3.2 不同航速船舶辐射噪声 DEMON 分析

利用本文提出的改进DEMON方法对千岛湖实 测四叶桨合作船不同航速辐射噪声数据进行处理。 图 12 为不同航速下各阶 IMF 的中心频率,图 13 为 平均窄带包络相关系数。合作船低速行驶时各阶 IMF 中心频率最低,而中速行驶比高速行驶辐射噪



图 12 不同航速船舶辐射噪声的 VMD 中心频率 Fig.12 VMD center frequencies of ship radiated noise at different speeds



图13 不同航速下各阶固有模态函数的平均窄带包络相关系数

Fig.13 Average narrow-band envelope correlation coefficient of each order of IMF at different speeds

声中心频率更高,这是因为当螺旋桨转速达到一定 的限度时,轴系碰磨噪声强度产生急剧下降,导致 船舶辐射噪声高频成分显著减少,这一现象在包络 谱中也有所体现。

图 14 和图 15 为利用传统多子带窄带包络相关 系数加权融合 DEMON 分析方法对合作船不同航速



图14 不同航速时传统Hilbert检波方法DEMON分析结果 Fig.14 DEMON analysis results by the traditional method used Hilbert wave detection at different speeds





辐射噪声解调得到包络谱。图14采用的检波技术 为Hilbert检波。图15采用的检波技术为平方检波。 图 16 为本文改进 DEMON 分析方法解调得到的包 络谱。通过对比可以看出:在低速时,本文方法与 传统方法解调性能大致相近,主要是因为船舶低速 行驶时船体激起的水动力噪声较弱,船舶辐射噪声 信号中的螺旋桨调制成分占据优势。本文方法对非 叶频高次谐波线谱的抑制效果略好;在中速时,随 着作为干扰噪声的点火噪声、轴系噪声、水动力噪 声的增强,本文方法的解调优势得到凸显,包络谱 叶频线谱得到明显增强,而传统方法包络谱容易被 误识为五叶桨;在高速时,本文方法解调性能优势 更加突出,有效去除了传统方法产生的非谐波线谱 和低频段连续谱,明显抑制了5次谐波线谱,包络 线谱信噪比更高。此外,我们观察到中速航行的包 络谱轴频线谱强度相对更高,这是合作船在该工况 下轴系噪声占主要地位的原因。





4 结论

本文提出了基于VMD和窄带包络相关的改进 DEMON分析方法,实现了船舶辐射噪声信号自适 应窄带分解和多子带包络谱加权融合。本文利用提 出的改进DEMON分析方法,分别对4艘不同类型 船舶以及合作试验船在3种不同航速时的辐射噪声 数据进行了处理,解调得到了船舶辐射噪声包络 谱。结果表明,本文所提方法能够有效提高包络谱 解调性能,与传统方法相比具有更好的线谱结构, 且能有效抑制调制谱中的连续谱和非叶频谐波线 谱,具有更高的包络线谱信噪比。尤其在中、高速 时的船舶辐射噪声调制谱分析应用中,解调性能优 势更加明显。在本文方法计算包络谱的基础上,可 以实现更精准的线谱检测和特征提取。

参考文献

- 韩雪, 朴胜春, 付金山. 舰船辐射噪声听觉节奏的时变响度特 征提取[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(4): 487-492.
 HAN Xue, PIAO Shengchun, FU Jinshan. Time-varying loudness feature extraction of the audition rhythm of ship radiation noise[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(4): 487-492.
- [2] 杨日杰,郑晓庆,韩建辉,等.基于序列匹配的螺旋桨轴频自动 提取方法[J].振动与冲击, 2018, 37(16): 57-61.
 YANG Rijie, ZHENG Xiaoqing, HAN Jianhui, et al. An automatic extraction method of propeller shaft frequency based on sequence matching[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(16): 57-61.
- [3] RAJAGOPAL R, SANKARANARAYANAN B, RAMAK-RISHNA RAO P. Target classification in a passive sonar-an expert system approach[C]//International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Albuquerque, NM, USA. IEEE, 2002: 2911-2914.
- [4] 陈光, 任志良, 张涛. 基于 Hilbert 变换的包络解调法在鱼雷电 磁引信中的应用[J]. 海军工程大学学报, 2009, 21(4): 21-25. CHEN Guang, REN Zhiliang, ZHANG Tao. Application of an envelope demodulation method based on Hilbert transform to torpedo electromagnetic fuze[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2009, 21(4): 21-25.
- [5] 陶笃纯. 舰船噪声节奏的研究(I): 数学模型及功率谱密度[J]. 声学学报, 1983, 8(2): 65-76.
 TAO Duchun. Study on ship noise rhythm (I)—mathematical model and power spectrum density[J]. Acta Acustica, 1983, 8(2): 65-76.
 [6] 吴国清, 李靖, 陈耀明, 等. 舰船噪声识别(II): 线谱稳定性和唯
- 一性[J]. 声学学报, 1999, 24(1): 7-11.
 WU Guoqing, LI Jing, CHEN Yaoming, et al. Identification of ship noise (II) —— stability and uniqueness of line spectrum[J]. Acta Acustica, 1999, 24(1): 7-11.
- [7] 王晶, 袁连喜, 孙绍武. 小波变换用于舰船辐射噪声调制信息 检测[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25(1): 53-57.
 WANG Jing, YUAN Lianxi, SUN Shaowu. Detection modulated information from radiated noise of naval ships through

wavelet transform[J]. Journal of Harbin Engineering Universi-

ty, 2004, 25(1): 53-57.

- [8] 刘启军, 邱家兴, 程玉胜. 船舶螺旋桨空化噪声非均匀调制特 性及其应用[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(11): 18-22.
 LIU Qijun, QIU Jiaxing, CHENG Yusheng. Non-uniform modulation feature of ship propeller cavitation noiseand its application[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(11): 18-22.
- [9] 王森, 邱家兴, 王顺杰. 基于相关特性船舶辐射噪声 DEMON 谱信噪比增强算法[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(8): 24-27.
 WANG Sen, QIU Jiaxing, WANG Shunjie. Enhancement of ship radiated noise DEMON spectrum SNR based on correlation properties theory of principles of system-dynamics[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(8): 24-27.
- [10] WANG S J. Enhancement of ship radiated noise DEMON spectrum SNR based on correlation properties theory of principles of system-dynamics[J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(08): 24-27.
- [11] 李余兴,李亚安,陈晓,等.基于VMD和SVM的舰船辐射噪声 特征提取及分类识别[J].国防科技大学学报,2019,41(1): 89-94.

LI Yuxing, LI Yaan, CHEN Xiao, et al. Feature extraction and classification of ship radiated noise based on VMD and SVM[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, **41**(1): 89-94.

- [12] JIANG J J, WU Z N, LU J N, et al. Interpretable features for underwater acoustic target recognition[J]. Measurement, 2021, 173: 108586.
- [13] 肖飞, 张宏立, 马萍, 等. 基于多时频曲线提取广义特征的变转 速轴承故障诊断[J]. 振动与冲击, 2022, 41(13): 152-159, 188.
 XIAO Fei, ZHANG Hongli, MA Ping, et al. Fault diagnosis of variable rotating speed rolling bearing using generalized features based on MTFCE[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(13): 152-159, 188.
- [14] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [15] 苏晓乐,张明敏. 浅海中舰船辐射噪声非均匀调制特征分析 [J]. 声学技术, 2012, 31(4): 385-388. SU Xiaole, ZHANG Mingmin. Analysis of uneven modulation feature of ship radiated noise in shallow water[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(4): 385-388.
- [16] 李余兴,李亚安,陈晓,等.基于VMD和中心频率的舰船辐射 噪声特征提取方法研究[J].振动与冲击,2018,37(23):213-218,285.

LI Yuxing, LI Ya'an, CHEN Xiao, et al. Feature extraction of ship-radiated noise based on VMD and center frequency[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, **37**(23): 213-218, 285.

[17] ZHANG J H, SANG H D, ZHAO S. EMD-based time - frequency denoising algorithm for the self-sensing of vibration signals in ultrasonic-assisted grinding[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(10): 104004.