

◇ 李启虎院士八十华诞学术论文 ◇

船舶辐射噪声信号仿真及评价

郑 援[†] 李智忠 姜 斌 孙 斌

(海军潜艇学院 青岛 266199)

摘要 船舶辐射噪声信号仿真应尽可能多地仿真特定船舶辐射噪声的信号特征,达到具体应用对信号仿真度的要求。对船舶辐射噪声仿真信号进行评价,是调整仿真参数和判定仿真信号是否达到要求的必要步骤。该文给出了一套对实测船舶辐射噪声信号进行重构仿真及评价的方法,仿真过程考虑了信号的听觉、连续谱、调制谱和线谱特征,评价方法对各特征进行指标提取和量化,并通过实测与仿真信号之间的相似度计算评价仿真信号的仿真度。对实测船舶辐射噪声信号进行重构仿真的试验结果显示,仿真信号具有较高的特征仿真度,与计算的仿真度评价数值一致。

关键词 船舶辐射噪声信号,仿真,评价,谱特征

中图法分类号: TN911.72;TB56 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2019)04-0750-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2019.04.036

Simulation and evaluation of ship radiated noise signals

ZHENG Yuan LI Zhizhong JIANG Bin SUN Bin

(Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

Abstract Simulation of ship radiated noise signals should exhibit the specified ship radiated noise signals' features as far as possible in order to meet the fidelity requirement of applications. Evaluation of the simulated ship radiated noise signals is necessary for the correction of simulation parameters and determination if the simulated signals have met the qualification. A method is proposed to reconstruct signals from measured ship radiated noise signals and then evaluate its fidelity. The simulation procedure synthesizes the auditory, continuous spectrum, line spectrum and demodulation spectrum features of the ship radiated noise signals. The evaluation method extracts and quantifies indices of features mentioned above, and evaluates the fidelity of the simulated noise signals by computing the similarity between the measured and simulated noise signals. Experiments are conducted to evaluate the feasibility and validity of this method with measured ship radiated noise signals. The results show that the reconstructed signals are of high simulation fidelity, which is coincident with the evaluated fidelity value.

Key words Ship radiated noise signal, Simulation, Evaluation, Spectrum feature

2019-02-12 收稿; 2019-06-08 定稿

作者简介: 郑援 (1973-), 女, 山东人, 博士, 教授, 研究方向: 水声信号处理。

[†] 通讯作者 E-mail: springzh@sohu.com

0 引言

船舶辐射噪声仿真信号被广泛应用于水下目标模拟信号源生成、目标识别算法研究、声呐训练模拟设备研制等领域,以满足需要不同类型船舶噪声信号进行检验、测试、训练的技术需求。在这类应用中,仿真信号通常作为信源信号使用,要求尽可能体现相对稳定的船舶辐射噪声的信号特征,不考虑偶然出现的各种瞬态噪声因素,也不必考虑信道传递函数的影响,后者将按照具体应用需求用于实际接收信号的生成。也就是说,船舶辐射噪声的信号仿真应尽可能全面地体现特定船舶辐射噪声的信号特征,以便达到具体应用对逼真度的要求^[1]。为此,在仿真过程中,技术参数需要不断进行调整直到仿真信号满足要求,而这种调整最重要的依据就是对所生成仿真信号的逼真度评价结果,仿真与评价通常交替进行。因此,对船舶辐射噪声仿真信号进行评价,是调整仿真参数和判定仿真信号是否达到要求的必要步骤。

船舶辐射噪声信号的仿真主要进行时域上的信号处理,通过增量式的仿真过程,逐步实现所需信号特征;而船舶辐射噪声仿真信号的评价,利用各种谱分析技术提取评价指标并进行量化计算,则是常用的手段^[2-4]。此外,人耳的听觉感受作为船舶辐射噪声的重要特征之一^[5-7],在信号仿真时用于调整调制深度等不易体现在谱特征中、但对听测逼真度有较大影响的特征参数;在评价仿真信号时,则以听觉特征参数的形式影响仿真度的计算结果。

船舶辐射噪声信号的仿真有两种方式,一种是依据给定的信号特征进行合成;另一种是仿照实测的船舶辐射噪声信号进行重构。后者由于依据了真实有效的样本,所以仿真信号评价时具有客观参照,因而更能够达到仿真度的要求。由此,本文从信号特征重构的角度,给出一套对实测船舶辐射噪声信号进行重构仿真及逼真度评价的方法。在进行信号的仿真时,该方法从高斯白噪声信号开始,通过信号处理逐步将其变换为具有实测信号特征的非高斯有色噪声信号,仿真过程中综合考虑了船舶辐射噪声信号的听觉、连续谱、调制谱和线谱特征。由于是基于实测信号的重构仿真,所以在对仿真信号进行评价时,仅对实测船舶辐射噪声信号工作频带内的上述特征进行提取和量化,并通过计算船舶辐射噪声的实测信号与仿真信号之间的相似度,给出信号

仿真度的数值评价,以判定仿真信号是否达到了逼真度要求。为检验该方法的实际效能,本文利用实测船舶辐射噪声信号进行了试验验证。

1 船舶辐射噪声信号的重构仿真

对船舶辐射噪声进行重构仿真^[7-9],就是针对某实测的船舶辐射噪声信号,分析其噪声特征并利用得到的噪声特征进行船舶辐射噪声信号的仿真。这样的仿真信号,由于特性贴近真实目标,并可通过后续信号处理生成满足不同应用要求的信号,例如具有不同信噪比、速度特征的该船舶辐射噪声信号等,因而用途非常广泛。

船舶辐射噪声信号的仿真通常采用公式(1)描述的经典时域波形模型^[10-12],将船舶辐射噪声表征为一种具有多种噪声成分的宽带随机信号,即:

$$s(t) = |1 + a(t)|g_x(t) + g_l(t), \quad (1)$$

式(1)中, $a(t)$ 为对应螺旋桨调制特征的周期调制波形; $g_x(t)$ 为对应宽带连续谱的时域波形; $g_l(t)$ 为对应线谱的时域波形。

显然,该模型很好地表征了船舶辐射噪声信号最基本的构成,且与信道传递函数无关,符合本文仅针对信号本身进行重构仿真的技术需求。因而,本文在进行船舶辐射噪声信号的重构仿真时沿用了该基本模型,这样信号仿真的重点就在于基于实测信号的连续谱、调制谱和线谱信号仿真。

1.1 连续谱信号仿真

连续谱信号仿真的常用方法是:针对给定连续谱特征进行有限脉冲响应(Finite impulse response, FIR)滤波器设计,再将高斯白噪声通过该滤波器,得到具有指定连续谱特性的时域宽带噪声信号^[6,8,10,12]。因而,连续谱信号仿真的关键在于FIR滤波器的具体设计方法。已有的FIR滤波器设计方法包括:利用谱峰频率、谱峰频率处的声压谱级、频谱的上升斜率、频谱的下降斜率4个参数描述船舶噪声连续谱曲线并完成FIR滤波器设计^[11],适用于对仿真效率要求高、对仿真精细度不做特殊要求的应用场景;按照实测船舶噪声信号连续谱分布,设计高阶数FIR滤波器^[8],或者依据人耳临界带生成多个窄带滤波器、然后加权求和的方法^[7],适用于对音色的仿真要求高、对仿真效率要求不高的应用场景等。

为了兼顾计算效率、船舶辐射噪声的音色和听觉感受以及仿真精细度等要求,在进行基于实测信号的船舶辐射噪声重构仿真时,采用如下滤波器设计方法^[1]:对实测辐射噪声信号进行连续谱估计和平滑处理;从连续谱中提取谱峰频率 $f_0(\text{Hz})$ 及其幅度 $\text{SL}_0(\text{dB})$;在连续谱的峰值频率 f_0 两侧, $[1, f_0)$ 和 $(f_0, f_s/2]$ 两个区间内按照倍频程取样(f_s 为信号采样率,单位为 Hz),分别得到频率值及其对应幅度;最后利用上述频率和幅度数值进行给定阶数的FIR滤波器设计。

将高斯白噪声通过该滤波器后即可得到具有实测信号特征的连续谱信号。

1.2 调制谱信号仿真

调制谱信号能够体现船舶的螺旋桨结构及其转动特征,调制谱信号的仿真主要从节奏和清晰度仿真两个方面着手。

在进行节奏仿真时,通常将调制包络处理为单个脉冲形状为高斯型的、幅度随机、具有规律性重复周期的脉冲性随机过程^[5,10,12]。而实际上,由螺旋桨结构及状态引起的脉冲幅度规律性的变化,将造成船舶辐射噪声调制谱的螺旋桨轴频及其倍频、叶频及其倍频以及各种谐波之间的谱级差异。但是,目前还无法直接从调制谱中的谱级关系等参数推导出调制脉冲幅度之间的数值关系,因而采用一种黑箱方式确定脉冲幅度。即:首先调整各螺旋桨叶片调制脉冲幅度参数,仿真调制谱信号、进行谱估计并计算谱级关系,形成脉冲幅度与谱级关系的对照表格;然后在该对照表格中,查找与实测信号调制谱估计最接近的谱级关系,从而反向得到各脉冲幅度的相对取值^[1,9]。

听觉清晰度仿真的技术关键在于确定脉冲宽度和调制深度。同等情况下,脉冲宽度越小,船舶辐射噪声信号的节拍越清晰;调制深度则反映调制谱信号整体的清晰程度。这些参数对谱估计的影响较小,但对人耳听觉感受的影响较大。在进行调制谱仿真时,上述参数的初始值可通过实测信号时域波形分析、统计得到,然后通过人耳听测进行参数调整,以便达到与听觉感受基本一致的要求^[1]。

1.3 线谱信号仿真

线谱信号可以看作一系列对应船舶辐射噪声信号线谱各分量的正弦或余弦信号迭加而成^[5,8,10,12],各线谱信号的幅值和频率可从各线谱分量中直接提取。考虑到非谐波线谱之间的相位

关系对仿真信号的影响较小,各线谱信号可以采用随机初相位^[7]。

2 船舶辐射噪声仿真信号的仿真度评价

评价船舶辐射噪声仿真信号的仿真度,可以采用人耳辨识和机器判定两种方式。机器判定通过信号处理和数值计算实现,更容易给出意义直观的量化数据,结果更客观,且工作效率更高。机器判定相关的工作包括:将多种连续谱表征方法,如频带能量法、非线性多项式拟合法、滤波器参数法、折线拟合法等,与多种相似度计算方法,如欧氏距离法、夹角余弦法和相关系数法等进行组合,进行船舶辐射噪声信号连续谱的相似度计算,并对各方法的性能进行比较^[2-3];针对船舶辐射噪声信号的时域信号发展过程、趋势及频域线谱等特征进行相容性检验,量化并计算仿真信号的置信度^[4]等。

借鉴上述工作,在进行船舶辐射噪声信号重构仿真的评价时,由于可以对比实测噪声信号,仿真度的机器判定可通过计算仿真与实测信号之间相似度的方式实现,即:仿真信号与实测信号越相似,仿真度评价价值越高。下面给出一种能够较全面、客观地对船舶辐射噪声仿真信号的仿真度进行机器评价的方法。该方法通过综合仿真信号与实测信号之间听觉、连续谱、线谱和调制谱仿真度的评价,实现对仿真信号总体仿真度的评价。

2.1 听觉仿真度评价

人耳听觉对于音色属性比较敏感,因而在对听觉仿真度进行评价时,选择能够较好、较稳定地反映船舶辐射噪声音色特性的谱质心和谱质心带宽^[13],作为量化听觉特征的指标。

谱质心是基于功率谱值的频带内等效中心频率;谱质心带宽则等于功率谱中高于谱质心的频带求得的谱质心减去低于谱质心的频带求得的谱质心得到的频率差值。仿真信号与实测信号之间谱质心和谱质心带宽的相似度越高,则仿真信号的听觉仿真度越好。

尽管谱质心和谱质心带宽的数值单位相同,但两者的物理意义不同,因此在进行听觉特征的相似度计算时,首先分别采用最小值/最大值的方式转换为归一化的分量相似度,然后通过加权相加的方式,得到听觉仿真度的评价价值。

2.2 连续谱仿真度评价

由于连续谱仿真中使用了FIR滤波器,因而该滤波器的设计参数可以作为量化连续谱特征、进行仿真度评价的指标^[2]。即:对最终的船舶辐射噪声仿真信号进行连续谱估计,依据该连续谱进行FIR滤波器设计,然后计算该滤波器的设计参数与实测信号的FIR滤波器设计参数之间的相似度。因为滤波器设计参数的量纲是统一的,相似度计算时可以直接使用夹角余弦法^[14]进行向量计算,得到仿真信号与实测信号之间连续谱仿真度的评价价值。

由于这样得到的连续谱仿真度评价价值通常较高,为便于将其计入总体仿真度,需要对其进行一次数值变换,即设定一个数值变换界限值 w ,将 $[0 \ w \ 1]$ 折线变换到 $[0 \ 0.5 \ 1]$ 。

2.3 调制谱仿真度评价

在针对调制谱的数据分析中,通常认为强度最高的谱线、轴频和叶频及其谐波谱线等是其重要的调制谱特征^[15-16],因此,在对船舶辐射噪声仿真信号的调制谱进行仿真度评价时,可以选择易于算法提取的调制谱特征谱线总数、强度最大特征谱线的频率、强度最大特征谱线与其相邻特征谱线之间的频率差作为评价使用的指标参数。通过计算仿真信号与实测信号相似度的这3个指标参数,实现对仿真信号调制谱仿真度的评价。

由于这3个指标参数的物理意义不同、量纲不同,在进行调制谱仿真度评价时,首先对3个指标参数分别采用最小值/最大值的方式转换为归一化的分量相似度,然后通过加权相加的方式,得到调制谱仿真度的评价价值。

2.4 线谱仿真度评价

船舶辐射噪声信号的线谱数量较多,通常认为幅值较大的线谱分量反映噪声的主要特征^[17]。因此,在对船舶辐射噪声仿真信号的线谱进行仿真度评价时,可以选择线谱的谱线总数、强度最大谱线的频率和基于线谱功率的等效中心频率作为指标参数。通过计算仿真信号与实测信号相似度的这3个指标参数,实现对仿真信号线谱仿真度的评价。

与调制谱仿真度评价相似,为了解决3个指标参数物理意义不同、量纲不同的问题,也需要先对各指标分别进行最小值/最大值变换求取分量相似度,然后通过加权相加的方式,得到线谱仿真度的评价价值。

2.5 总体仿真度评价

在对船舶辐射噪声仿真信号分别进行听觉、连续谱、线谱和调制谱的仿真度评价后,对上述评价价值进行加权相加,即可得到船舶辐射噪声仿真信号总体仿真度的综合评价价值。

3 试验及数据分析

为了检验所给出船舶辐射噪声信号仿真及仿真度评价方法的实际效能,利用近场实测船舶辐射噪声信号进行数据试验,下面给出一个试验结果。

3.1 船舶辐射噪声重构仿真结果

图1~图4依次给出一个船舶辐射噪声近场实测信号及其重构仿真信号的时域图、连续谱图、调制谱图和线谱图。

从图1来看,仿真信号的时域采样在视觉上节拍更为清晰,调制深度更大。而实际上,在进行信号的重构仿真时,调制深度是根据人耳的听觉感受进行调整的。如进一步降低调制深度,仿真信号的时域采样在视觉上更接近实测信号,但在人耳听觉上节拍清晰度的感受反而下降了。

图2~图4显示,仿真信号与实测信号的连续谱、调制谱、线谱特征非常相近。

3.2 船舶辐射噪声仿真信号的仿真度评价

按照第2节给出的评价方法,对所重构的船舶辐射噪声仿真信号进行仿真度评价,结果如下:

(1)听觉仿真度评价:设定谱质心、谱质心带宽指标的权值分别为0.7、0.3,得到听觉仿真度的评价价值为0.9320。

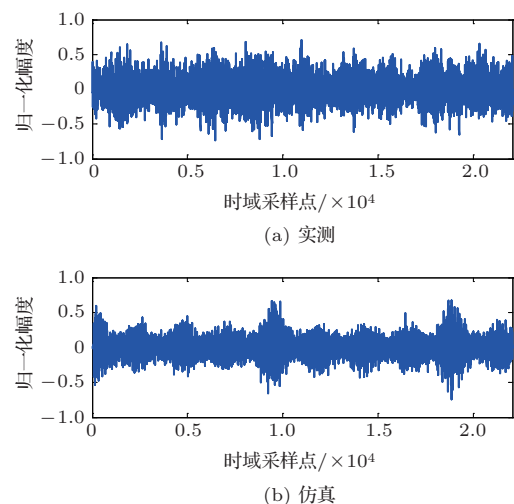


图1 实测与仿真信号的时域采样

Fig. 1 Signal samples of measured and simulated ship radiated noises

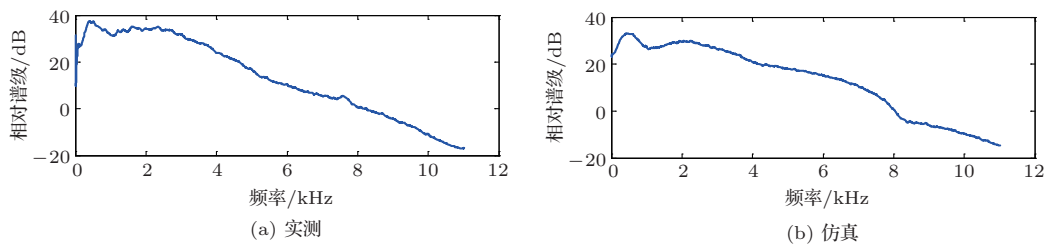


图2 实测与仿真信号的连续谱

Fig. 2 Continuous spectrums of measured and simulated ship radiated noises

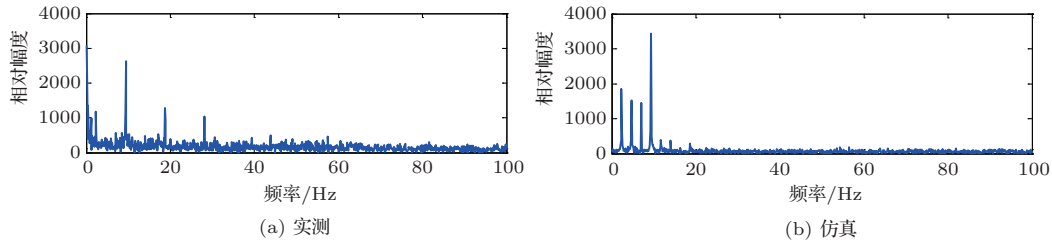


图3 实测与仿真信号的调制谱

Fig. 3 Demodulation spectrums of measured and simulated ship radiated noises

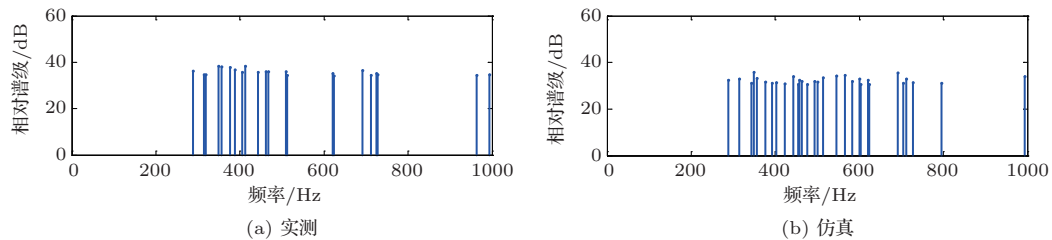


图4 实测与仿真信号的线谱

Fig. 4 Line spectrums of measured and simulated ship radiated noises

(2) 连续谱仿真度评价: 取滤波器阶数 $n = 32$, 设定数值变换界限值 $w = 0.9$, 得到连续谱仿真度的评价值为 0.9969。

(3) 调制谱仿真度评价: 设定调制谱特征谱线总数、强度最大特征谱线的频率、强度最大特征谱线与其相邻特征谱线之间频率差 3 个指标的权值分别为 0.1、0.45、0.45, 得到调制谱仿真度的评价值为 0.6618。

(4) 线谱仿真度评价: 设定线谱的谱线总数、强度最大谱线的频率和基于线谱功率的等效中心频率 3 个指标的权值分别为 0.2、0.4、0.4, 得到线谱仿真度的评价值为 0.8598。

(5) 总体仿真度评价: 按照各特征重要性相等的原则, 对各特征评价进行等权值相加, 得到该船舶辐射噪声仿真信号总体仿真度的评价值为 0.8626。

从仿真度评价的数据看: 采用滤波器参数法仿真的连续谱, 仿真信号与实测信号的谱分布能够较高程度地保持一致, 且听觉感受对于噪声信号的功

率谱分布最为敏感, 因而连续谱、听觉感受的仿真相似度高; 线谱稳定性低于连续谱, 且仿真只能基于主要谱线, 仿真信号与实测信号之间必然具有差异, 因而仿真相似度低于连续谱; 由于无法直接从实测信号的调制谱特征推导出调制脉冲幅度之间的数值关系, 调制谱的仿真采用前述黑箱方式进行, 尽管这种方法已是调制谱仿真方法中效果较好的, 其仿真相似度也仅达到可接受程度。此外, 由于各特征的相似度都分别达到了可接受的程度, 因而总体仿真度评价较高。

4 结论

本文研究了基于实测信号的船舶辐射噪声信号重构仿真及仿真度评价方法。在信号重构和仿真度评价时, 主要考虑了听觉、连续谱、调制谱和线谱 4 个方面的特征。船舶辐射噪声信号仿真时, 首先将白噪声信号通过具有实测信号连续谱特征的滤波器, 实现连续谱特征仿真; 然后产生具有实测信号调

制谱和听觉特征的脉冲包络信号,将其调制到仿真信号上;最后,叠加从实测信号中提取的线谱特征分量,生成最终的仿真信号。对船舶辐射噪声仿真信号进行仿真度评价时,首先分别针对上述4个特征提取指标参数并进行仿真度评价,然后对各特征仿真度进行加权相加,得到仿真信号的总体仿真度评价。数据试验结果显示,本文方法得到的仿真信号具有较高的特征仿真度,且与计算的仿真度评价数值一致。

此外,本文方法得到的船舶辐射噪声仿真信号主要作为信源信号使用,以信号本身特征为重构重点,数据试验采用的是近场实测船舶辐射噪声信号。如果要将信号作为声呐等接收设备的输入使用,还需要考虑信道传递函数的影响。信道对信号不同频率成分的衰减不同,将导致接收信号的连续谱分布、线谱特性、调制深度、听觉清晰度等与信源信号不完全相同,因而,针对接收设备实际接收信号的仿真与评价将成为下一步需要开展的工作。

参 考 文 献

- [1] 郑援, 胡成军, 宋汝刚. 船舶航行辐射噪声信号仿真方法研究[J]. 信号处理, 2016, 32(1): 14-20.
Zheng Yuan, Hu Chengjun, Song Rugang. On the simulation of vessel navigation noises[J]. Journal of Signal Processing, 2016, 32(1): 14-20.
- [2] Zheng Y, Li Z, Jiang B. Similarity evaluation of ship radiated noise's continuous spectrum[C]. Proceedings of 2018 IEEE 14th International Conference on Signal Processing, Beijing, 2018: 1024-1027.
- [3] 张宇. 舰船宽带连续谱特征监测技术[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(3): 104-108.
Zhang Yu. Research on feature monitoring technology of warship radiated noise continuous spectrum[J]. Ship Science and Technology, 2011, 33(3): 104-108.
- [4] 邹辽章, 朱艳, 陈刚. 舰船辐射噪声仿真模型置信度分析[J]. 水雷战与舰船防护, 2017, 25(4): 28-33.
Zou Liaozhang, Zhu Yan, Chen Gang. Analysis on confidence of simulation model of ship's radiated noise[J]. Mine Warfare & Ship Self-defence, 2017, 25(4): 28-33.
- [5] 曹红丽, 方世良. 舰船辐射噪声的响度和音色特征模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(2): 241-246.
Cao Hongli, Fang Shiliang. Loudness and timbre features model of ship radiated noise[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2013, 43(2): 241-246.
- [6] 王金昌, 陈克安. 基于听觉感知的不同航速稳态舰船噪声合成[J]. 声学技术, 2012, 31(5): 453-458.
Wang Jinchang, Chen Kean. Auditory perception based steady ship noise synthesis at different speeds[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(5): 453-458.
- [7] 王二庆, 王华奎. 船舶噪声合成与听觉感知分析[J]. 电声技术, 2014, 38(3): 65-69.
Wang Erqing, Wang Huakui. Ship noise synthesis and analysis of auditory perception[J]. Audio Engineering, 2014, 38(3): 65-69.
- [8] 唐兵, 朱艳, 陈卫东. 基于实测噪声信号的舰船辐射噪声重构[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(11): 148-151.
Tang Bing, Zhu Yan, Chen Weidong. Reconstruction of ship radiated noise based on measured noise signal[J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(11): 148-151.
- [9] 郑援, 姜斌, 刘启军. 船舶实测辐射噪声信号的调制谱重构仿真[J]. 电声技术, 2016, 40(8): 40-43.
Zheng Yuan, Jiang Bin, Liu Qijun. Reconstruction and simulation of measured ship radiated noise's modulation spectrum[J]. Audio Engineering, 2016, 40(8): 40-43.
- [10] 何正耀, 张翼鹏. 舰船辐射噪声建模及仿真研究[J]. 电声技术, 2005, 29(12): 52-55.
He Zhengyao, Zhang Yipeng. Modeling and simulation research of ship-radiated noise[J]. Audio Engineering, 2005, 29(12): 52-55.
- [11] 梁民赞, 王旭升, 李志伟. 舰船辐射噪声动态特性建模与重构[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(2): 95-97, 149.
Liang Minzan, Wang Xusheng, Li Zhiwei. Modeling and reconstruction of dynamic characteristics of ship radiated noise[J]. Ship Electronic Engineering, 2008, 28(2): 95-97, 149.
- [12] 李琴, 苑秉成, 张文娟. 舰船辐射噪声建模及仿真模拟器的实现[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(4): 121-124, 133.
Li Qin, Yuan Bingcheng, Zhang Wenjuan. Modeling of ship-radiated noise and its implement of simulator[J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(4): 121-124, 133.
- [13] 王娜, 陈克安. 听觉感知特征在目标识别中的应用[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(10): 3128-3132.
Wang Na, Chen Kean. Applications of auditory perceptual features into targets recognition[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(10): 3128-3132.
- [14] 张宇, 刘雨东, 计钊. 向量相似度测度方法[J]. 声学技术, 2009, 28(4): 532-536.
Zhang Yu, Liu Yudong, Ji Zhao. Vector similarity measurement method[J]. Technical Acoustics, 2009, 28(4): 532-536.
- [15] 邱家兴, 程玉胜, 张惊丞. 船舶噪声 DEMON 谱质量评估方法[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(9): 46-49.
Qiu Jiaxing, Cheng Yusheng, Zhang Jingcheng. Study of ship-radiated noise DEMON quality assessment methods[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(9): 46-49.
- [16] 王森, 王余, 王易川, 等. 水下高速目标声谱图特征提取及分类设计[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(11): 2684-2689.
Wang Sen, Wang Yu, Wang Yichuan, et al. Feature extraction and classification of spectrum of radiated noise of underwater high speed vehicle[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(11): 2684-2689.
- [17] 朱可卿, 田杰, 黄海宁, 等. 基于深度学习的船舶辐射噪声识别研究[J]. 应用声学, 2018, 37(2): 238-245.
Zhu Keqing, Tian Jie, Huang Haining, et al. Ship-radiated noise recognition research based deep learning[J]. Journal of Applied Acoustics, 2018, 37(2): 238-245.