

# 基于 DEMON 谱信息提取算法的目标识别方法研究

白敬贤, 高天德, 夏润鹏

(西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072)

**摘要:** 宽带噪声解调(Detection of Envelope Modulation on Noise, DEMON)谱中的轴频叶频, 对应螺旋桨转速和叶片数等舰船自身相对特征, 这些特征可以作为目标识别的依据。综合运用改进的最大公约数算法和余数门限算法提取 DEMON 谱中的轴频和叶频, 解决了传统最大公约数算法提取轴频叶频误差较大的问题。仿真数据与实测数据的实验结果均验证了 DEMON 谱信息提取算法的有效性。

**关键词:** DEMON 谱分析; 轴频叶频提取; 目标识别; 余数门限算法

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2017)-01-0088-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.01.016

## Target recognition based on the information extraction algorithm of DEMON spectrum

BAI Jing-xian, GAO Tian-de, XIA Run-peng

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

**Abstract:** The shaft-frequency and blade-frequency of the Detection of Envelope Modulation on Noise (DEMON) spectrum correspond to the rotation speed of propeller, the number of blade and so on, which could be used as the gist of target recognition. This paper proposes the modified greatest common divisor algorithm and the remainder threshold algorithm to extract shaft-frequency and blade-frequency from the DEMON spectrum, which solves the problem of big deviation caused by traditional algorithm. The results of simulation and experiment show that the proposed DEMON spectrum information extraction algorithm is effective.

**Key words:** DEMON spectrum analysis; extraction of shaft-frequency and blade-frequency; target recognition; the remainder threshold algorithm

## 0 引言

被动声呐通过接收和处理水中目标发出的辐射噪声来获取目标参数。传统被动声呐目标识别是靠声呐员监听目标舰船的噪音(包括音色、节拍和起伏)来判定的。随着声呐技术的发展,对声呐输出信息进行自动判决的需求逐渐增加。学者们对此进行了大量研究:加拿大的 J. N. Maksym 等人开发了舰船辐射噪声的分析专家系统 INTERSENSOR<sup>[1]</sup>;英国的 Sheppard 和 Gent 利用神经网络技术开发出被动声呐分类专家系统<sup>[2]</sup>;李启虎等人研制了“EXPLORE”目标识别专家系统<sup>[3]</sup>。

被动声呐目标识别的核心是分析舰船辐射噪声

的特征,并对其进行特征提取。舰船辐射噪声的声源有三类:第一类是舰船内部机械振动产生的机械噪声,由低频线谱和连续谱叠加而成;第二类是风浪及附面层湍流形成空化产生的螺旋桨噪声,由高频连续谱和线谱叠加而成;第三类是水动力变化引起的水动力噪声,其频谱为连续谱<sup>[4]</sup>。其中,前两类噪声源为主要的舰船辐射噪声源。从频谱角度分析,舰船辐射噪声的频谱主要由线谱、连续谱以及低频线谱对高频段辐射噪声调制后形成的调制谱三部分组成。对于线谱特征的提取,工程上大多采用低频分析与记录(Low Frequency Analysis Recording, LOFAR)谱图从时-频两个方面来描述舰船噪声,通过对噪声信号做短时傅里叶变换来对线谱进行提取;对于连续谱特征的提取,工程上常采用最小二乘曲线拟合原理从功率谱曲线中拟合出连续谱曲线,进而得到连续谱峰值及谱密度变化率等信息;对于调制谱特征的提取,工程上常采用 DEMON 谱分析<sup>[5]</sup>对高频连续谱进行频谱搬移,提

收稿日期: 2016-06-02; 修回日期: 2016-08-30

作者简介: 白敬贤(1994—),男,黑龙江鹤岗人,硕士研究生,研究方向为信号与信息处理。

通讯作者: 高天德, E-mail: gaotiande@nwpu.edu.cn

取轴频及其谐波分量在内的低频线谱。其中轴频在数值上等于螺旋桨转速，叶频在数值上等于轴频与叶片数的乘积，即轴频与叶频分别对应螺旋桨转速和叶片数两个舰船自身的相对特征，具有较高的稳定性。因此 DEMON 谱分析被广泛应用于舰船辐射噪声的特征提取，例如国外学者 Lourens 和 Preez 提出了 DEMON 谱分析舰船螺旋桨转速的被动最大似然估计等<sup>[6]</sup>。

本文首先介绍了舰船辐射噪声的仿真，通过查阅相关资料，模拟产生四种目标舰船的辐射噪声；其次介绍了改进的 DEMON 谱信息提取算法，针对传统方法得到的 DEMON 谱信噪比低、轴频叶频提取误差较大等问题，将波束形成引入 DEMON 分析，并综合运用改进的最大公约数算法和余数门限算法，提取 DEMON 谱中的轴频叶频信息；最后用仿真数据和实测数据验证本文 DEMON 谱信息提取算法的有效性。

## 1 舰船辐射噪声的模拟

舰船辐射噪声的频谱主要由线谱、连续谱和调制谱三部分组成，可分别根据三种谱特性对舰船辐射噪声进行模拟。舰船辐射噪声的时域波形表达式为

$$X(t) = g_l(t) + [1 + a(t)]g_x(t) \quad (1)$$

式中： $g_l(t)$  为线谱分量时域波形； $a(t)$  是调制包络信号； $g_x(t)$  是连续谱分量时域波形<sup>[7]</sup>。

### 1.1 线谱仿真

线谱主要由船体内部机械周期性振动产生，工程上常通过产生不同周期的正弦信号来仿真产生不同的线谱分量，即：

$$S_i(n) = \sum_{i=1}^m A_i(n) \sin(2\pi n f_i / f_s) \quad (2)$$

其中： $m$  表示线谱个数； $f_s$  为采样频率； $A_i(n)$  表示线谱振幅； $f_i$  为线谱频率<sup>[8]</sup>。

线谱大致可分为低频线谱和高频线谱。其中 100 Hz 以下的低频线谱主要为螺旋桨旋转形成的叶频及其谐波分量；100 Hz 以上可设定几根随机强度的高频线谱来模拟不同的船型。线谱的强度一般比连续谱高出 10~25 dB。

### 1.2 连续谱仿真

连续谱主要由水动力噪声、机械噪声和螺旋桨噪声叠加而成。舰船辐射噪声连续谱是非平稳随机过程，工程上常将其拆解成平稳谱与慢时变非平稳谱，用局部平稳过程来拟合<sup>[9]</sup>。本文采用宽带平稳

随机过程来模拟宽带连续谱，方法是将宽带高斯白噪声通过一个自回归(Auto Regressive, AR)模型滤波器，AR 模型选用 Ecs 型功率谱模型，其中 AR 模型参数用 Levinson-Durbin 算法求解，自相关函数为

$$R(n) = \cos(2\pi n f_0 / f_s) \exp(-2\pi n f_m / f_s) \quad (3)$$

其中， $f_s$  为采样频率， $f_0$  为功率谱峰值的位置， $f_m$  则决定功率谱的高度与尖锐程度<sup>[10]</sup>。

### 1.3 调制谱仿真

舰船辐射噪声的轴频及其谐波具有较大的功率，会对高频段的舰船辐射噪声形成调制。工程上常通过对随机幅度、相同形状与周期的脉冲型随机过程的处理来作为舰船辐射噪声的调制包络。单个脉冲  $\mu_\xi(t)$  表达式为

$$\mu_\xi(t) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}} \exp[-t^2 / (2\sigma^2)] \quad (4)$$

其中： $\sigma$  表示脉冲宽度； $\xi$  为不同脉冲的幅度<sup>[8]</sup>。

## 2 DEMON 谱信息提取算法

### 2.1 改进的 DEMON 分析

由图 1 可知，对被动声呐接收到的时域信号进行带通滤波，尽量选择调制强的频段进行解调。本文仿真数据的采样率为 96 kHz，用 5~9 kHz 的带通滤波器对时域信号进行滤波。再对滤波后的信号做正交解调即可检出其包络波形。由于舰船辐射噪声与环境噪声的频段相同，无法通过频域滤波提高信噪比。针对此问题，本文对解调信号做波束形成，进行空间域滤波以提高空间指向性，获得空间处理增益，进而提高信噪比。本文波束成形是将圆阵上的 48 个阵元信号经过处理使其对某些空间方向的声波具有所需响应，采用时延波束形成，在不同阵元之间插入时延使波束控制于不同方位，对接收信号进行滤波处理，使指定方向的信号通过，滤除空间其他方位的信号干扰。DEMON 谱提取的轴频和叶频都是低频线谱，故对波束形成处理后的信号做低通滤波后进行 FFT 变换，得到的低频解调谱即为 DEMON 谱。DEMON 分析流程图如图 1 所示。

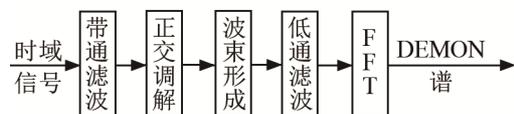


图 1 DEMON 分析流程图

Fig.1 Flowchart of DEMON analysis

## 2.2 信息预处理

被动声呐接收到的时域信号经过带通滤波、正交解调、波束形成等处理后,得到的 DEMON 谱信息为 46 组携带线谱信息的信号。每组信号的线谱信息为线谱频率及其对应的强度。如果把 DEMON 谱中每组信号的线谱全部用作信息提取,会使轴频叶频的误判率大大增加。因为轴频叶频的范围一般为 3~100 Hz,故每组信号选取 3~100 Hz 线谱进行处理。同时为了降低误判率,通过线谱的强度信息对其进行筛选,每次只取强度最高的 15 个线谱进行处理。DEMON 谱信息预处理流程图如图 2 所示:

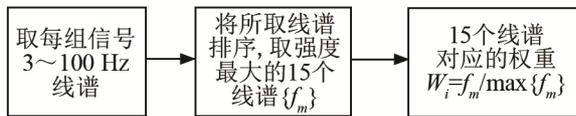


图 2 DEMON 谱信息预处理流程图

Fig.2 Flowchart of DEMON spectrum information preprocessing

## 2.3 信息提取

首先对预处理后 DEMON 谱中的叶频信息进行提取。水流流过螺旋桨,可以在螺旋桨噪声中产生单频分量,并且叠加在空化噪声的连续谱上。一般单频分量分布在低频端。因为螺旋桨叶片切割所有进入螺旋桨和在螺旋桨附近处的不规则流动,所以螺旋桨噪声含有离散的、分布在叶频倍数上的“叶片速率”线谱系列,其频率为

$$f_{mns} = mns \quad (5)$$

其中:  $f_{mns}$  是叶频的第  $m$  次谐波(Hz);  $n$  是螺旋桨叶片数;  $s$  是螺旋桨转速(r/s)。“叶片速率”线谱一般分布在 100 Hz 以内,通常在  $m$  取 1(即为叶频)时强度最大,所以提取 DEMON 谱中 100 Hz 以内强度最大的线谱的频率就是叶频<sup>[11]</sup>。将预处理后每组信号强度最大的线谱的频率记为该组信号的叶频,分别计算上述 46 组信号的叶频,记入叶频数组。

其次对 DEMON 谱中的轴频信息进行提取,综合运用最大公约数法和余数门限法两种算法提取轴频。

改进的最大公约数算法提取轴频<sup>[12]</sup>的具体步骤如下:

(1) 取预处理后每组 15 个线谱频率  $\{f_{mns}\}$ , 相互之间分别求差频,并将其四舍五入,记下其对应的权重:

$$F_{i,j} = f_i - f_j, \quad i=1, 2 \cdots 14; \quad j=2, 3 \cdots 15; \quad j > i \quad (6)$$

$$W_{i,j} = W_i + W_j, \quad i=1, 2 \cdots 14; \quad j=2, 3 \cdots 15; \quad j > i \quad (7)$$

式中,  $F_{i,j}$  为求得的差频,  $W_{i,j}$  为该差频对应的权重。相同差频只记一次,将对应的权重相加。

(2) 分别用预处理后每组的 15 个线谱频率  $\{f_{mns}\}$  除以该组每一个差频  $F_{i,j}$ , 若满足:

$$\left| \frac{f_{mns}}{F_{i,j}} - R \right| < \delta, \quad m=1 \cdots 15; \quad i=1 \cdots 14; \quad j=2 \cdots 15 \quad (8)$$

则将  $W_{i,j}$  加 1。上式中  $R$  为  $f_{mns}/F_{i,j}$  四舍五入值,  $\delta$  为差频门限,当  $F_{i,j} \leq 10$  时,  $\delta=1/F_{i,j}$ ; 当  $F_{i,j} > 10$  时,  $\delta=2/F_{i,j}$ 。

(3) 最终取每组  $W_{i,j}$  最大时对应的差频记为该组信号的轴频。

(4) 依据此方法,分别计算 46 组信号的轴频,记入轴频数组。取轴频数组中出现次数最多的数记为最大公约数算法判决的轴频,并记下轴频数组中与其不相等的轴频个数,记为最大公约数算法的误差。

余数门限算法提取轴频具体步骤如下:

(1) 将预处理后每组的 15 个线谱的信息分别放入轴频矩阵中,矩阵第一列放入线谱频率  $\{f_{mns}\}$ , 第二列放入线谱对应的权重  $W_i$ , 第三列记为  $F_i$  作为判决依据,  $F_i$  初始值赋零。

(2) 将 15 个线谱频率互相相除,记下所得的余数:

$$D_{i,j} = f_j \% f_i, \quad i=1, 2 \cdots 14; \quad j=2, 3 \cdots 15; \quad j > i \quad (9)$$

若满足  $0.2 < D_{i,j} < 0.8$ , 则按式(10)对  $F_i$  赋值:

$$F_i = F_i + W_i + W_j \quad (10)$$

(3) 最终取每组  $F_i$  最大时对应的信号频率记为该组信号的轴频。

(4) 依据此方法分别计算 46 组信号中的轴频,记入轴频数组。取轴频数组中出现次数最多的数记为余数门限算法判决的轴频,并记下轴频数组中与其不相等的轴频个数,记为余数门限算法的误差。

比较最大公约数算法与余数门限算法的误差,取误差更小的方法的判决结果记为最终判决的轴频。有时由于噪声或直流分量等干扰,会使叶频的判定产生误差,从而影响螺旋桨叶片数的判定。而前文中轴频的判定综合运用了两种方法,具有较高的可信度,所以根据轴频判定结果对叶频的判定加以校正。叶频数值上等于轴频与叶片数的乘积,螺旋桨一般有 3~7 片桨叶,所以叶频理论上不会小于轴频的 3 倍或大于轴频的 7 倍。轴频对叶频校正的流程图如图 3 所示(其中  $ZP$  表示轴频,  $YP$  表示叶频)。

对 46 组信号的叶频进行校正后记入叶频数组中。取叶频数组中出现次数最多的数记为最终

判决的叶频。DEMON 谱信息提取算法流程图如图 4 所示。

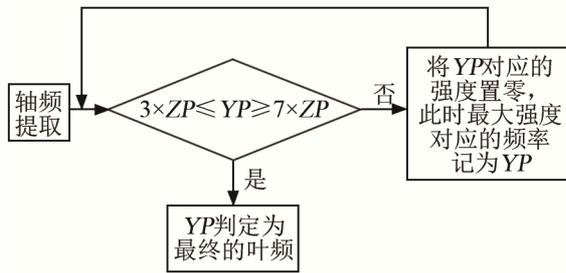


图 3 轴频对叶频校正的流程图  
Fig.3 Flowchart of blade frequency rectified correction by shaft-frequency

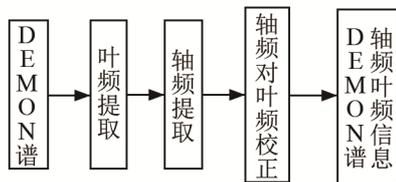


图 4 DEMON 谱信息提取算法流程图  
Fig.4 Flowchart of information extraction algorithm of DEMON spectrum

### 3 实验验证

#### 3.1 仿真数据实验验证

仿真舰船目标的螺旋桨转速为 720 r/min, 故轴频为 12 Hz; 螺旋桨叶片数为 7, 故叶频为 84 Hz。产生的六根高频线谱频率分别为 370、460、550、620、790 Hz 和 900 Hz。仿真数据的采样频率为 96 kHz, 对数据先进行降采样, 再做 2 048 点的 FFT, 取单边功率谱 1~1 024 Hz 的信号, 得到的舰船辐射噪声功率谱如图 5 所示。

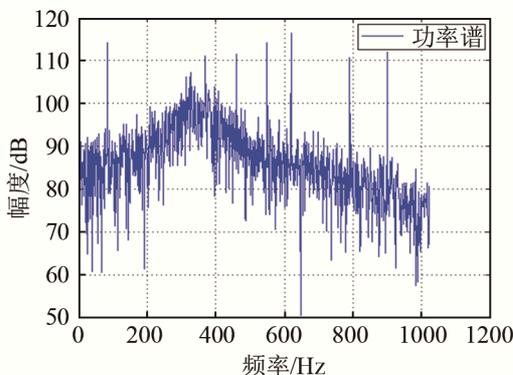


图 5 仿真产生的舰船辐射噪声功率谱  
Fig.5 The power spectrum of simulated ship-radiated noise

从图 5 可以清晰地看出, 强度较大的六根高频线谱与一根低频线谱(即叶频 84 Hz), 与仿真结果相

同, 连续谱形状也与仿真相同, 若要进一步提取调制谱信息, 需对信号做 DEMON 谱分析。DEMON 谱分析时每组谱分析的样本为 136 点, 频率分辨率为 0.732 4 Hz, 显示的频率范围为 2.93~99.6 Hz。所得的 DEMON 谱如图 6 所示。

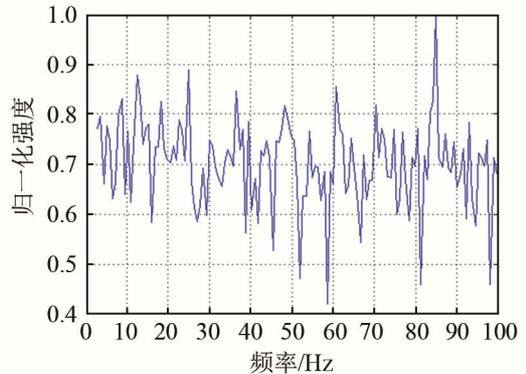


图 6 仿真数据的 DEMON 谱  
Fig.6 Illustration of simulated data's DEMON spectrum

依次仿真产生四种舰船目标的辐射噪声数据, 对其进行 DEMON 分析, 再对 DEMON 谱信息进行提取, 其中螺旋桨叶片数根据最终判定的轴频叶频算得, 最终的实验结果如表 1 所示。表 2 为传统最大公约数算法、改进的最大公约数算法与余数门限算法三种算法的轴频提取结果对比, 从中可以明显看出, 改进后最大公约数算法的误判率大大降低。

表 1 仿真数据的 DEMON 谱分析结果  
Table 1 The analysis results of simulated DEMON spectrum

DEMON 谱信息	最大公约数法判决轴频	余数门限法判决轴频	最终轴频	最终叶频	螺旋桨叶片数
舰船 1	实验结果	9	9.522	9.522	5
	误判率	0.217 4	0.152 2	0.152 2	0.065 2
舰船 2	实验结果	10	10.254	10.254	3
	误判率	0.173 9	0.130 4	0.130 4	0.087 0
舰船 3	实验结果	12	12.451	12.451	7
	误判率	0.195 7	0.152 2	0.152 2	0.065 2
舰船 4	实验结果	12	12.451	12	5
	误判率	0.152 2	0.195 7	0.152 2	0.087 0

从表 2 中数据可以看出, 改进后的最大公约数判决算法和余数门限算法的误判率相比于传统最大公约数判决算法的误判率有了较明显的降低。

#### 3.2 实测数据实验验证

对实测数据进行 DEMON 谱分析, 每组谱分析样本同样为 136 点, 频率分辨率为 0.732 4 Hz, 显示的频率范围为 2.93~99.6 Hz。所得的 DEMON 谱如图 7 所示。

表 2 三种算法的轴频提取结果对比

Table 2 Comparison of three algorithms' shaft-frequency extraction results

DEMON 谱信息		传统最大公约数法判决轴频	改进后最大公约数法判决轴频	余数门限法判决轴频
舰船 1	实验结果	9	9	9.522
	误判率	0.304 3	0.217 4	0.152 2
舰船 2	实验结果	10	10	10.254
	误判率	0.434 8	0.173 9	0.130 4
舰船 3	实验结果	4	12	12.451
	误判率	0.739 1	0.195 7	0.152 2
舰船 4	实验结果	12	12	12.451
	误判率	0.456 5	0.152 2	0.195 7

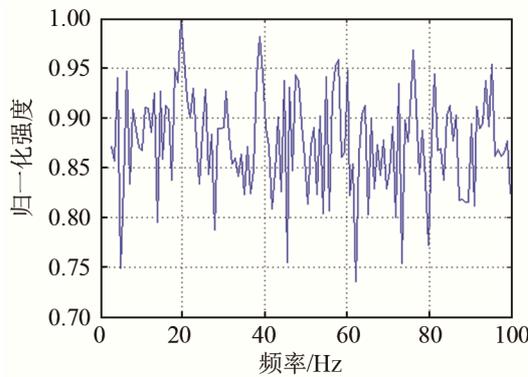


图 7 实测数据的 DEMON 谱

Fig.7 Illustration of experimental data's DEMON spectrum

对 DEMON 谱信息进行提取,得到的实验数据如表 3 所示。实验结果与实际舰船数据一致,进一步证明了本文 DEMON 谱信息提取算法的有效性。

表 3 实测数据的 DEMON 谱分析结果

Table 3 The analysis results of experimental DEMON spectrum

DEMON 谱信息	最大公约数法判决轴频	余数门限法判决轴频	最终轴频	最终叶频	螺旋桨叶片数
实验结果	4	4.395	4	19.775	5
误判率	0.195 7	0.260 9	0.195 7	0.130 4	

## 4 结 论

舰船辐射噪声特性往往与航速密切相关,但对于被动声呐来说,目标航速是未知的,所以轴频与叶频作为舰船自身相对特征对于被动声呐目标识别具有重要意义。本文通过改进的 DEMON 谱信息提取算法提取 DEMON 谱信息中的轴频和叶频:首先对解调后的数据做波束形成以提高信噪比;其次对

DEMON 谱信息数据做预处理以减小误判率;最后,综合运用最大公约数算法和余数门限算法提取轴频,并用轴频判决结果对叶频判决结果加以校正。仿真数据及实测数据均验证了本文 DEMON 谱信息提取算法的可行性。

## 参 考 文 献

- [1] Maksym J N, Bonner A J, Dent C A, et al. Machine analysis of acoustical signals[J]. Pattern Recognition, 1983, 16(6): 615-625.
- [2] Sheppard C P, Gent C R. A neural network based sonar Classification system[C]//Undersea Defence Technology: conference and EX-hibition, 1992: 628-633.
- [3] LI Qihu, WANG Jinlin, WEI Wei. An application of expert system in recognition of radiated noise of underwater target[C]// Beijing: Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, 1989: 404-408.
- [4] 陈航. 工程水声学基础[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013, 8: 194-195.  
CHEN Hang. Underwater Acoustics basis[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013, 8: 194-195.
- [5] 张群飞. 基于目标运动信息的被动自导特征提取新方法[J]. 鱼雷技术, 2008, 16(3): 33-36.  
ZHANG Qunfei. A New method of passive homing featurre extraction based on target moving information[J]. Torpedo Technology, 2008, 16(3): 33-36.
- [6] Lourens J G, du Preez J A. Passive sonar ML estimator for ship proceller speed[J]. IEEE J. of Oceanic Eng, 1998, 23(4): 448-453.
- [7] 杜选民, 姜亚浩. 舰船辐射噪声模拟技术研究[J]. 声学技术, 1999, 18(1): 10-14.  
DU Xuanmin, JIANG Yahao. Research on simulation of radiating noise from vessels[J]. Technical Acoustics, 1999, 18(1): 10-14.
- [8] 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, 24(12): 52-55.  
HE Zhengyao, ZHANG Yipeng. Modeling and simulation research of ship-radiated noise[J]. Audio Engineering, 2005, 24(12): 52-55.
- [9] 熊紫英, 朱锡清. 基于 LOFAR 谱和 DEMON 谱特征的舰船辐射噪声研究[J]. 船舶力学, 2007, 11(2): 300-306.  
XIONG Ziyang, ZHU Xiqing. Ship radiated-noise research based on the LOFAR spectrum and DEMON spectrum charac teristics[J]. Journal of Ship Mechanics, 2007, 11(2): 300-306.
- [10] 薄连坤, 熊瑾煜. 基于 AR 模型的舰艇辐射噪声仿真研究[J]. 电信技术研究, 2014, 4(4): 21-25.  
BAO Liankun, XIONG Jinyu. Ship radiated-noise simulated research based on the AR model[J]. Research on the telecommunication Technology, 2014, 4(4): 21-25
- [11] 尤立克, 洪申, 译. 工程水声原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990: 277.  
R J Urlick, translated by Hong Shen. Principles of under-water sound[M]. Harbin: Harbin Ship Engineering Institute Press, 1990: 277.
- [12] 殷敬伟, 惠俊英, 姚直象, 等. 基于 DEMON 线谱的轴频提取方法研究[J]. 应用声学, 2005, 24(6): 369-374.  
YIN Jingwei, HUI Junying, YAO Zhixiang, et al. Extraction of shaft frequency based on the DEMON line spectrum[J]. Applied Acoustics, 2005, 24(6): 369-374.