

# 一型拖轮下方辐射噪声空间分布特性分析

杨学猛, 刘彦森, 杜鹏

(大连测控技术研究所水下测控技术重点实验室, 辽宁大连 116013)

**摘要:** 以拖轮为代表的舰船下方辐射噪声空间分布特性研究对于以被动方式工作的探测设备和水下攻防装备的开发与研制具有重要意义。基于直线阵测量系统获取的拖轮下方辐射噪声数据, 利用通过以特性分析为基础的数据处理与分析方法, 对该拖轮下方辐射噪声的空间分布特性进行分析, 获得了被测拖轮下方的特征线谱、连续谱及总声级等典型的水平等声压分布曲线, 研究成果为该类水面目标的有效探测和识别等提供了重要依据。

**关键词:** 拖轮; 辐射噪声; 空间分布

中图分类号: O427.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2012)-06-0611-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2012.06.016

## Measurement and analysis of the spatial distribution of underwater noise radiated from tugboat

YANG Xue-meng, LIU Yan-sen, DU Peng

(Science and Technology on Underwater Test and Control Laboratory,  
Dalian Scientific Test and Control Technology Institute, Dalian 116013, Liaoning, China)

**Abstract:** It is import to study the characteristics of the spatial distribution of the underwater noise radiating from tugboat for the research and development of the detection tools in passive working mode and the underwater defense equipment. In this paper, based on the noise data obtained from the linear array under the tugboat, the spatial distribution of sound field below the tugboat is analyzed by using data processing and analyzing method from the characteristic analysis theory. The characteristic line-spectrum, continuous spectrum and total pressure level of the sound field are derived from the raw data. These are the classical acoustic curves for revealing the features of the sound field, and can be considered as important supports for the detection and recognition of tugboat-like targets.

**Key words:** tugboat; radiated noise; space distribution

## 0 引言

在水下警戒、目标识别和防御对抗等领域, 离不开以被动方式工作的探测设备和水下攻防装备等的开发与研制, 而这些都需要目标的噪声空间分布特性信息提供支撑。因此, 掌握各种目标(包括水面船、水下航行体及其他水下声辐射源等)的噪声空间分布特性, 对于推动相关技术及装备的研究与发展具有重要的意义<sup>[1-5]</sup>。本文在以往空间分布分析方法研究成果的基础上, 结合海上实测数据, 对一型拖轮的下方辐射噪声的空间分布特性进行深入地分析, 为该类水面目标的有效探测和识别等提供了依据。

## 1 分析模型及方法

### 1.1 分析模型

本文基于直线阵测量系统获取了一型拖轮下方的辐射噪声数据, 被测拖轮船体纵向长度约为 60m, 双桨。测量时, 左桨开启, 右桨停车, 以 4kn 航速匀速直线通过测量阵上方, 航迹与阵体水平夹角为 70°。目标船与阵体的相对空间位置及其机动方式如图 1 所示。

根据目标船与阵体的相对空间位置及其目标机

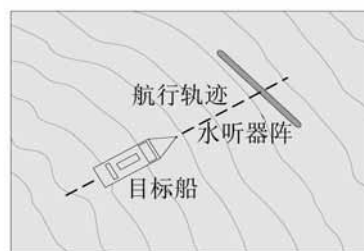


图 1 目标机动方式  
Fig.1 Sailing path of target

收稿日期: 2011-11-04; 修回日期: 2012-03-23

基金项目: 重点实验室基金资助项目(9140C2601071001)

作者简介: 杨学猛(1985-), 男, 内蒙古赤峰人, 助理工程师, 研究方向为水声信号与信息处理。

通讯作者: 杨学猛, E-mail: yxmeng\_yxmeng@163.com

动方式等,建立被测拖轮目标下方辐射噪声空间分布特性的分析模型,如图2所示。图中,坐标原点为船体中心, $x$ 轴为沿船体横向的水平距离坐标,由目标船和各接收阵元的空间位置决定,左舷为负,右舷为正; $y$ 轴为沿船体纵向的水平距离坐标,由航速和船体中心位置通过测量系统的时刻决定,船艏为正,船艉为负。

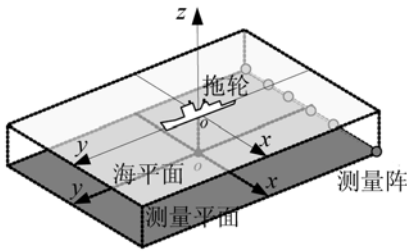


图2 被测拖轮下方辐射噪声空间分布分析模型  
Fig.2 Model of equal pressure contours below tugboat

## 1.2 分析方法

针对上述分析模型,建立空间分布特性分析方法如下<sup>[6-7]</sup>:

### 1.2.1 计算各接收阵元数据的通过特性

在测试条件和被测舰船状态固定的情况下,舰船辐射噪声级、谱特性等参数是舰船相对于测试水听器位置(与测试水听器之间的距离)的函数,称为纵向通过特性或简称通过特性<sup>[1]</sup>。下面具体说明通过特性的计算方法。

用分贝表示声压级

$$L_p = 20 \lg \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (1)$$

式中, $p$ 为测得的声压值, $p_0$ 为基准值,按国际标准,选用 $1\mu\text{Pa}$ 。

频带声压级是指有限频带内的声压级,其频率宽度必须指明。用频程来表示两个声音的频率之间的间隔或频带宽度,它以上限频率( $f_h$ )和下限频率( $f_l$ )之比的对数来表示,此对数通常以2为底,单位为倍频程(oct),数学表达式为

$$n = \log_2 \frac{f_h}{f_l} \quad (2)$$

对于1/3 oct

$$\frac{f_h}{f_l} = 2^{\frac{1}{3}} = 1.26 \quad (3)$$

频带中心频率为

$$f_c = \sqrt{f_h f_l} \quad (4)$$

相对带宽为

$$\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{f_h - f_l}{f_c} = \sqrt{2^{1/3}} - \frac{1}{\sqrt{2^{1/3}}} = 23.1\% \quad (5)$$

对于一个能量连续分布的随机噪声信号,进行1/3 oct谱分析,就可以得出各个1/3 oct的频带声压级 $L_p(f_i)$ 。当已知各1/3 oct的频带声压级时,可以求得宽带声压级,也称为总声级。由1/3 oct的频带声压级计算指定的频率范围内的宽带声压级的公式为

$$L_p = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_p(f_i)} \right) \quad (6)$$

式中: $i$ 为1/3 oct滤波器的序号; $n$ 为指定的频率范围内包含的1/3 oct滤波器的个数; $f_i$ 为第*i*号1/3 oct滤波器的中心频率; $L_p(f_i)$ 为第*i*号1/3 oct滤波器频带内的频带声压级<sup>[1]</sup>。

通过计算不同频率和频带(如宽带谱和线谱等)的声压级的时频分布,即可得到各接收阵元数据的通过特性曲线。

### 1.2.2 计算被测目标在不同的通过时刻相对于测量阵的空间距离

根据被测目标的航迹、航速及其与测量直线阵的相对位置关系和各接收阵元的间距等,计算出被测目标在不同的通过时刻相对于测量阵的空间距离。

### 1.2.3 绘制有效被测平面内的三维声压谱群

在上述工作的基础上,绘出有效被测平面内的三维声压谱群<sup>[6]</sup>,如图3所示。

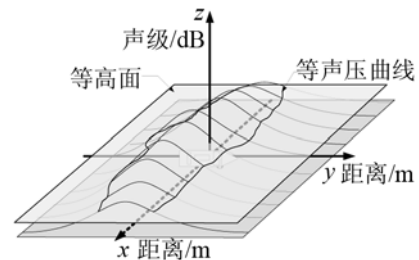


图3 三维声压谱群  
Fig.3 Curves of 3D sound pressure spectra

### 1.2.4 绘制等声压分布曲线

利用不同量值的等声压剖面对上述三维声压谱群进行截取,并对截取到的点进行曲线拟合处理,如图3所示,绘出相应量值的等声压分布曲线,如图4所示,得出等声压各点的空间分布规律。

曲线拟合方式采用多项式拟合,具体方法如下:

根据已知平面上一些数据的点,找一条满足一定性质的曲线,使它与这些点最接近,这种找曲线的方法称为曲线拟合。所求出的曲线称为拟合曲线。考虑到数据误差的存在,拟合并不要求曲线通过所有这些点。

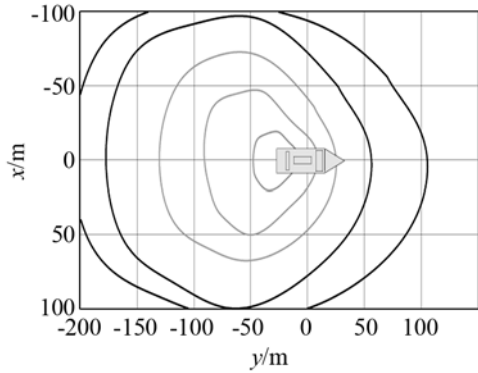


图 4 等声压分布曲线示意图  
Fig.4 Sketch map of equal pressure contours

对给定的试验数据点  $(x_i, y_i)$  ( $i=1, 2, \dots, N$ )，可构造  $m$  次多项式

$$P(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m \quad (m < N) \quad (7)$$

由曲线拟合的定义，应使下面的多项式取极小

$$\sum_{i=1}^N \left[ \sum_{j=0}^m a_j x_i^j - y_i \right]^2 \quad (8)$$

通过简单的运算可得出系数是下面线性方程组的解。

$$\begin{bmatrix} c_0 & c_1 & \dots & c_m \\ c_1 & c_2 & \dots & c_{m+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_m & c_{m+1} & \dots & c_{2m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} c_k = \sum_{i=1}^N x_i^k, & (k=0, 1, \dots, 2m) \\ b_k = \sum_{i=1}^N y_i x_i^k, & (k=0, 1, \dots, m) \end{cases} \quad (10)$$

由直接求解法可求出式(9)中的多项式系数  $[a_0 \ a_1 \ \dots \ a_m]^T$ ，拟合出等声压曲线。

## 2 结果分析与讨论

由上述分析模型和分析方法，对被测拖轮下方辐射噪声空间分布特性进行分析。首先对测量数据进行功率谱分析，确定该目标船在该种航行工况下辐射噪声的频谱分布和主要线谱等，为后续空间分布分析提供必要信息。选择距离目标船最近的接收阵元数据进行功率谱分析<sup>[8,9]</sup>，结果如图 5 所示。

根据上述谱分析结果，以下选取线谱 I 和线谱 II 两根能量较强的线谱、主要特征频段的连续谱和总声级进行空间分布分析，获得该拖轮下方的有效测量平面内的等声压分布曲线，如图 6~9 所示。

由图 6 可知，线谱 I 的强度以船艏最大，随着与船艏距离的增加而减小，而螺旋桨为船艏处的主

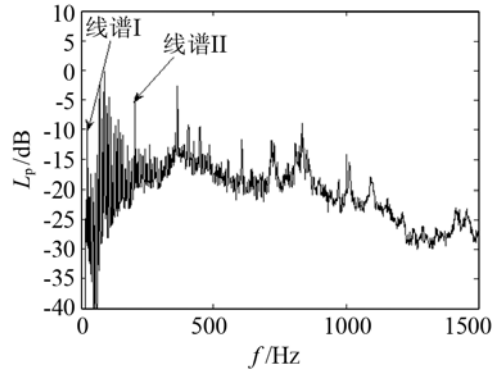


图 5 典型阵元数据功率谱图  
Fig.5 Power Spectral Density (PSD) from a typical hydrophone

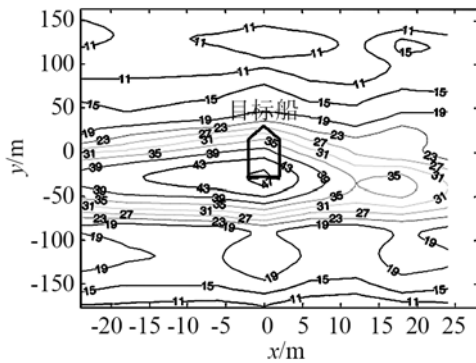


图 6 线谱 I 等声压分布曲线  
Fig.6 Equal pressure contours of line-spectrum I

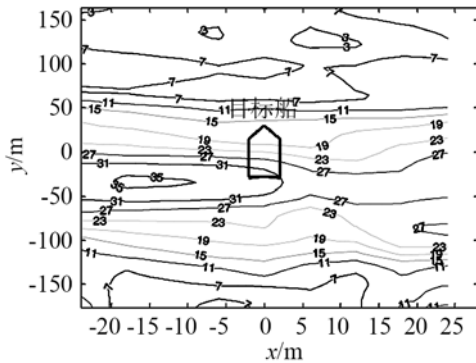


图 7 线谱 II 等声压分布曲线  
Fig.7 Equal pressure contours of line-spectrum II

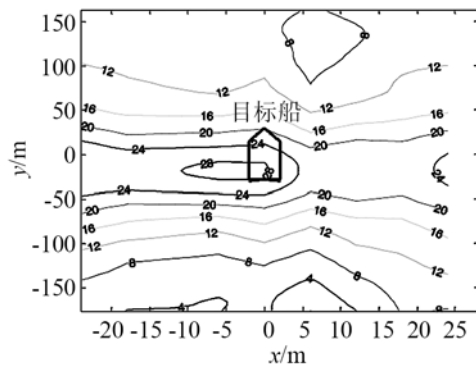


图 8 主要特征频段连续谱等声压分布曲线  
Fig.8 Equal pressure contours of continuous spectra

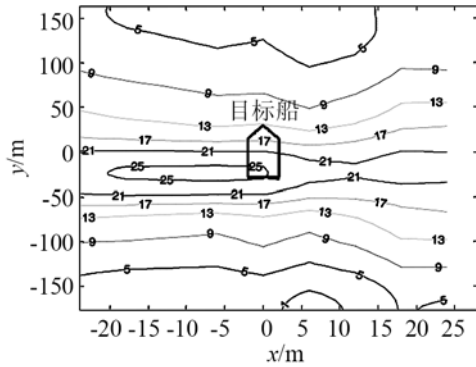


图9 总声级等声压分布曲线

Fig.9 Equal pressure contours of total sound level

要噪声源,因此线谱 I 为螺旋桨噪声线谱。由测量时目标船的工况可知,测量时只有左桨开启,因此该线谱在左舷的强度要高于右舷。

由图 7 可知,线谱 II 亦为螺旋桨噪声线谱,其在船体艏部左侧距离龙骨 10~20m 处强度最大,这主要是由于螺旋桨噪声具有一定的垂直指向性,且只有左桨开启,造成该线谱强度最大点并非分布在拖轮龙骨的正下方,而是分布在左桨的斜下方。

由图 8 可知,主要特征频段连续谱强度最大点分布在船体后部的左舷,这表明该位置处的机械噪声源起支配地位,且左右舷机械分布和开启情况不同,造成连续谱强度的左右舷差别。

由图 9 可知,结合图 6~8 的分析结果,在被测工况下,位于船体后部的机械和螺旋桨为较强的噪声源,均对辐射声场的贡献较大,因此总声级强度最大点分布在目标船后部。但由于数据获取时,只有左侧桨开启,因而左舷声辐射强度明显高于右舷,呈现明显的非对称性。

### 3 结论

本文基于直线阵测量系统获取的拖轮下方辐射噪声数据,以特性分析为基础的数据处理与分析方法,对该拖轮下方辐射噪声的空间分布特性进行分析,获得了被测拖轮下方的总声级和特征线谱等典型的水平等声压分布曲线,针对该类水面目标的探测和识别,由分析结果可得到以下三点重要依据,即:

(1) 在低航速下,主辅机噪声和螺旋桨噪声起主导作用,尤其是低频线谱,且其空间分布以艏部正下方及其临近区域为最强;

(2) 以拖轮为代表的舰船辐射噪声空间分布通常为非对称的,而单桨开启状态则会明显加剧这种趋势。

(3) 由于空间分布的存在及其复杂性,不同位置获取的线谱幅度会出现波动,因此空间分布是影响线谱幅度稳定性的重要因素之一,建议在舰船辐射噪声测试中增加空间分布特性测试内容或指定测量水听器相对于舰船的位置。

### 参 考 文 献

- [1] 王之程,陈宗岐,于枫,等. 舰船噪声测量与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 208-211.  
WANG Zhichen, CHEN Zongqi, YU Feng, et al. Warship noise measuring and analyzing[M]. Beijing: Defence Industry Press, 2004: 208-211.
- [2] 罗伯特·尤立克. 汪德昭译 声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1985: 263-264.  
Robert J. Urick. Principles of underwater sound[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press 1985: 263-264.
- [3] 刘伯胜,雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1993: 224-232.  
LIU Bosheng, LEI Jiayu. Principium of underwater sound[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1993: 224-232.
- [4] 朱安珏. 水中目标辐射噪声特性仿真[J]. 声学技术, 2004, 23(2): 128-131.  
ZHU Anjue. Simulation of radiation noise from underwater targets[J]. Technical Acoustics, 2004, 23(2): 128-131.
- [5] 李凯,黄建国. 水下航行体辐射噪声的线谱分析及建模[J]. 声学技术, 2007, 26(6): 1112-1115.  
LI Kai, HUANG Jianguo. Analysis and modeling of line spectrum of underwater vehicle's radiating noise[J]. Technical Acoustics, 2007, 26(6): 1112-1115.
- [6] 周飞,张明之. 一种舰船辐射噪声场水平分布特性分析方法[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(1): 83-85.  
ZHOU Fei, ZHANG Mingzhi. An analytical procedure for horizontal distribute characteristic of ship's radiated noise field[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(1): 83-85.
- [7] 罗雪峰,张明之. 一种基于线阵的舰船辐射噪声空间分布特性分析方法[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(7): 82-84.  
LUO Xuefeng, ZHANG Mingzhi. An analyzing method base on line hydrophone array for the space distributing character of warship's radiated noise[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(7): 82-84.
- [8] 谢骏,笄良龙,胡均川. 舰船螺旋桨空化低频辐射噪声时频域仿真[J]. 声学技术, 2011, 30(4): 364-368.  
XIE Jun, DA Lianglong, HU Junchuan. Waveform simulation of low frequency line spectrum on nearfield radiated propeller cavitation noise[J]. Technical Acoustics, 2011, 30(4): 364-368.
- [9] 段立晶. 水中目标辐射噪声调制谱提取方法[J]. 声学技术, 2010, 30(1): 32-36.  
DUAN Lijing. A study of target echo light analysis method[J]. Technical Acoustics, 2010, 30(1): 32-36.