

# 基于近场声全息舰船水下辐射噪声识别研究

刘 强,王永生,苏永生,李 剑

(海军工程大学 动力工程学院,湖北 武汉 430033)

**摘 要:**基于半自由场平面近场声全息的基本原理,采用数值计算的结果作为全息数据,对水面舰船水下辐射噪声进行了反演,着重研究了由螺旋桨噪声和流噪声的数据获得的重建结果与重建距离之间的关系。研究结果表明,半自由场平面近场声全息重建算法能对水面舰船水下辐射噪声进行识别;半自由场平面近场声全息对重建距离的变化较敏感,从而限制了重建距离的适用范围;螺旋桨噪声在船尾附近是主要噪声源。

**关键词:**声源识别;半自由场;平面近场声全息;水下声辐射;舰船

**中图分类号:**O42;TB532

**文献标识码:**A

## Research on Identification of Ship Underwater Radiated Noise Based on Near-field Acoustical Holography

LIU Qiang, WANG Yongsheng, SU Yongsheng, LI Jian

(College of Marine Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Based on the principles of planar near field acoustical holography (PNAH) in the semi-free field, the results computed by numerical methods are used as holographic data to reconstruct an image of underwater noise radiated by a ship. The relationship between reconstructive results obtained by propeller noise and flow noise and reconstructive distance is investigated. The results show that, the underwater noise radiated by a ship can be identified by PNAH in the semi-free field. It is so sensitive to changeable reconstructive distance using PNAH in the semi-free field that the applicable range of reconstructive distance is limited. Propeller noise is the dominating noise near the stern of the ship.

**Key words:** source identification; semi-free field; planar near field acoustical holography; underwater sound radiation; ship

### 0 引言

舰船辐射噪声是由舰船上机械运转和舰船运动产生并通过船体辐射到水中的噪声,主要包括机械噪声、螺旋桨噪声和流噪声<sup>[1]</sup>,因此对舰船辐射噪声源的识别与定位已成为一个备受关注的课题。近场声全息<sup>[2-5]</sup>作为噪声源识别与定位的方法之一,以其独特的抗干扰性能和较高的空间分辨率,得到国内外研究人员的广泛关注。王登峰等<sup>[6]</sup>以载货汽车为研究对象,利用近场声全息和声场空间变换方法对车外噪声进行了分析预测。文献[7]借用商业化软件,并对机舱前后两端部分进行特殊处理,成功地将近场声全息应用到飞机内部空间的声场反演中。项昌乐等<sup>[8]</sup>采用近场声全息的方法对车辆的变速箱在不同工况下的噪声源进行识别与定位,得到了变速箱

箱体噪声辐射的主要规律及影响因素。但将近场声全息应用到舰船辐射噪声反演的研究却很少,这一现象最主要的原因是该研究内容较敏感。另外,体积相对较大的舰船在获得全息数据时通常需要大量的水听器组成线阵或大型阵列<sup>[9]</sup>,因而实验的成本较高。为实现近场声全息对舰船辐射噪声的反演,本文首先采用近水面的点声源作为研究对象,对半自由场平面近场声全息重建算法的准确性进行了验证。在此基础上以一艘航速不变的水面舰船水下辐射噪声的数值计算结果作为全息数据,通过半自由场平面近场声全息对水面舰船产生的螺旋桨噪声与流噪声共同作用的噪声场进行成像,并将反演后重建面上的结果与反演前的理论值相比,说明了将近场声全息应用于水面舰船水下辐射噪声识别的有效

收稿日期:2013-01-16

作者简介:刘强(1987-),男,黑龙江哈尔滨人,博士生,主要从事舰艇水下辐射噪声声全息的研究。

性和准确性。最后研究了重建距离对重建结果的影响。

## 1 基本原理

对于单频声波,波动方程可通过傅里叶变换得到稳态声场的 Helmholtz 方程:

$$\nabla^2 p(x, y, z) + k^2 p(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

式中:  $p(x, y, z)$  为声场空间点  $(x, y, z)$  的复声压;  $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$  为波数,  $\omega$  为声源简谐振动的角频率,  $\lambda$  为声波波长。

由格林公式和 Dirichlet 边界条件可得

$$p(x, y, z) = \iint_S [p(x_s, y_s, z_s) \cdot g_D(x-x_s, y-y_s, z-z_s)] dS \quad (2)$$

式中  $(x_s, y_s, z_s)$  为源面  $S$  上的任意一点。

对式(2)两边作二维连续傅里叶变换,并由二维卷积定理可得

$$P(k_x, k_y, z) = P(k_x, k_y, z_s) G_D(k_x, k_y, z-z_s) \quad (3)$$

式中:  $P(k_x, k_y, z)$ ,  $P(k_x, k_y, z_s)$  分别为  $p(x, y, z)$ ,  $p(x_s, y_s, z_s)$  的二维连续傅里叶变换;  $G_D(k_x, k_y, z-z_s)$  为  $g_D(x-x_s, y-y_s, z-z_s)$  二维连续傅里叶变换,其解析表达式为

$$G_D(k_x, k_y, z-z_s) = \begin{cases} e^{j(k_z - k_{zs}) \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}} & k_x^2 + k_y^2 \leq k^2 \\ e^{-j(k_z - k_{zs}) \sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2}} & k_x^2 + k_y^2 > k^2 \end{cases} \quad (4)$$

当已知全息面  $z = z_h$  上的声压分布  $p(x_h, y_h, z_h)$  ( $(x_h, y_h, z_h)$  为全息面  $H$  上的任意一点) 时,就可由式(3)通过二维傅里叶逆变换得到声源面上的重建声压公式

$$p(x_s, y_s, z_s) = F^{-1} [P(k_x, k_y, z_h) \cdot G_D^{-1}(k_x, k_y, z_h - z_s)] \quad (5)$$

式中  $G_D^{-1}(k_x, k_y, z_h - z_s)$  为声压重建的逆向传递因子。

对于存在反射影响的半自由声场,式(5)不能直接用于声场的重建,因此对自由场平面近场声全息理论要进行改进。具体方法<sup>[10]</sup>是首先得到包含反射声压的一个  $N \times N$  的全息复声压阵列,然后将水面看作是绝对软边界条件,在此条件下把水下的声场关于水面进行反对称,可将上述全息复声压阵列变换为一个  $2N \times N$  的矩阵,这样就得到了等效无界的自由声场,从而消除了水面反射对重建结果的

影响。再将处理过的全息数据作为平面近场声全息的输入,就能实现半自由场的声场重建。

## 2 重建算法的验证与重建结果的分析

### 2.1 重建算法的验证

如图1所示,设有一点声源位于坐标原点,振动频率为 10 kHz,两个平行的平面分别为全息面和重建面,全息面离点源中心距离 0.05 m,全息面尺寸为  $0.63 \text{ m} \times 0.31 \text{ m}$ ,沿  $x, y$  方向采样间隔为 0.01 m,采样点数为  $64 \times 32$ ,声源强度为  $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ ,水中声速为 1500 m/s,水的密度为  $1000 \text{ kg/m}^3$ 。重建面离点源中心距离 0.03 m,重建面的大小和网格划分方式与全息面相同。两个面的上沿距水面 0.008 m。

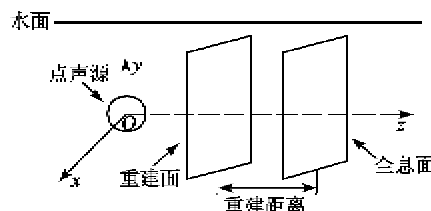


图1 点声源、全息面和重建面的几何示意图

图2为离点源中心距离 0.03 m 处的重建面上声压的重建值与理论值的比较图。

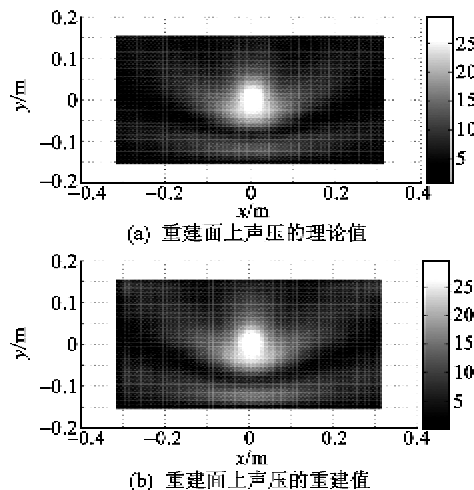


图2 重建面上声压的重建值与理论值比较

由图2可看出,通过半自由场平面近场声全息重建的声压值与由点声源解析解得到的声压值相吻合,在原点处声压达到最大值,这与点声源所在位置一致,从而验证了半自由场平面近场声全息识别噪声源的准确性。

### 2.2 重建结果的分析

为了实现近场声全息对舰船辐射噪声的反演,下面以一艘航速不变的水面舰船模型为研究对象,通过半自由场平面近场声全息对该舰船的螺旋桨噪

声和流噪声共同作用的噪声场进行重建。图3为水面舰船、全息面和重建面之间的相对位置。设坐标原点选在舰船水面以下部分中轴面的中点,全息面离原点的距离为0.25 m,全息面的大小为 $3.1\text{ m} \times 0.23\text{ m}$ ,采样点数为 $32 \times 24$ ,沿 $x$ 、 $y$ 方向的采样间隔分别为0.1 m和0.01 m,水中声速为1 500 m/s,水的密度为 $1\,000\text{ kg/m}^3$ ,频率为100 Hz。重建面离原点的距离为0.22 m,且重建面的大小和网格划分方式与全息面相同。两个面的上沿与水面相平。在下面的重建过程中,全息数据由Virtual Lab软件计算得到。

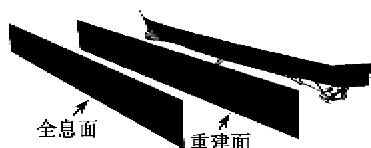


图3 水面舰船、全息面和重建面的几何示意图

图4为采用半自由场平面近场声全息得到的声压重建值与水面舰船的螺旋桨噪声和流噪声共同作用的总声场在重建面上计算值的比较。

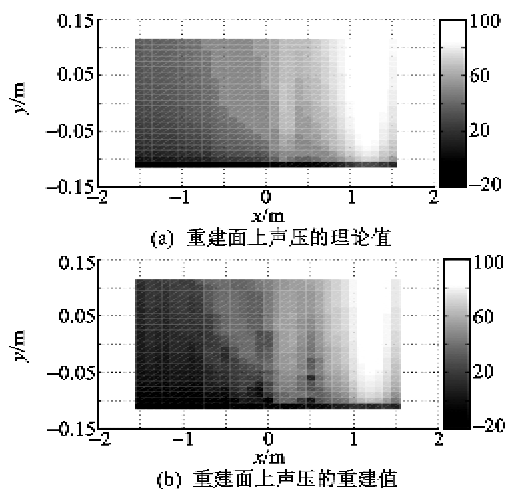


图4 重建面上声压重建值与理论值比较  
(重建距离0.03 m)

由图4可见,通过半自由场平面近场声全息重建的声压分布与数值计算得到的声压分布基本一致。虽然重建结果与数值计算<sup>[11]</sup>结果存在一定的偏差,但对舰船和螺旋桨组成的整体与水作用而产生的声源进行识别影响不大,从而验证了半自由场平面近场声全息应用于舰船水下辐射噪声成像的可行性和正确性。同时,声压的分布规律是沿着船首到船尾方向逐渐增加的,并在船尾附近声压达到最大值。一般情况下,在船尾附近螺旋桨噪声在强度方面常高于舰船的流噪声,因此在船尾附近螺旋桨

噪声是主要噪声源,这也说明半自由场平面近场声全息能对水面舰船水下辐射噪声进行识别。

为了研究重建距离对舰船水下辐射噪声重建结果的影响,将全息面离原点的距离改为0.37 m,其他仿真条件不变。采用半自由场平面近场声全息重建算法对水面舰船的螺旋桨噪声和流噪声共同作用的总声场进行反演,结果如图5所示。

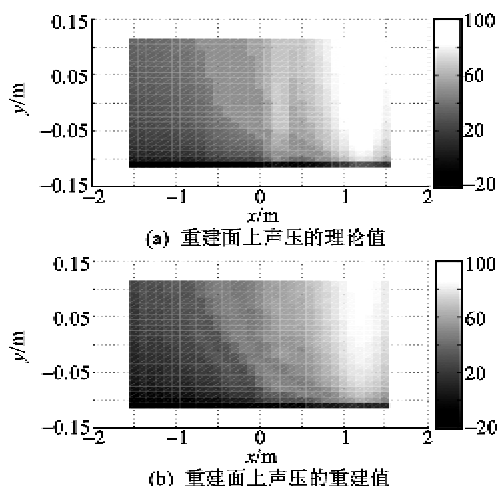


图5 重建面上声压重建值与理论值比较  
(重建距离0.15 m)

对比图4(b)与图5(b)可知,声压分布规律基本上无变化,仍是由船首到船尾呈逐渐增加的趋势,但采用半自由场平面近场声全息重建算法得到的重建结果与数值计算结果之间存在着较大的偏差,重建结果已无法识别舰船和螺旋桨组成的整体与水作用而产生的声源,这主要是由于全息孔径效应带来的误差被逆向重建时的病态格林函数所放大,使得重建结果不能真实地反映噪声源的分布。说明这种算法对重建距离的变化较敏感,限制了重建距离的适用范围。

### 3 结论

本文根据半自由场平面近场声全息的基本理论,采用数值计算结果作为全息数据,对水面舰船产生的螺旋桨噪声与流噪声共同作用的噪声场进行成像,并研究了这种重建算法得到的重建结果与重建距离之间的关系,得到如下结论:

- 1) 半自由场平面近场声全息重建算法能对舰船水下辐射噪声进行识别。
- 2) 半自由场平面近场声全息对重建距离的变化较敏感,从而限制了重建距离的适用范围。
- 3) 螺旋桨噪声在船尾附近是主要噪声源。

(下转第785页)