

船舶辐射噪声远场空间指向性

孟春霞^{1,2}, 杨士莪¹, 李桂娟²

(1. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 哈尔滨 150001, mengchunxia2010@qq.com;

2. 水下测控技术国防科技重点实验室, 辽宁 大连 116013)

摘 要: 为了获得浅海波导条件下船舶辐射噪声的远场空间指向性, 提出了一种由水听器获得的船舶辐射噪声近场声压数据, 推算其远场辐射声压的方法, 即由近场声压数据, 反演出船舶辐射噪声源模型中的多极子强度和位置, 然后利用简正波理论, 计算该反演参数所对应的远场指向性. 仿真计算过程中, 将该方法获得的远场指向性与原假设声源直接计算的远场指向性进行对比. 结果表明, 该方法能有效的计算出船舶辐射噪声的远场空间指向性.

关键词: 浅海波导; 船舶; 辐射噪声; 远场空间指向性

中图分类号: TB53

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)05-0824-03

Spatial directivity of ship radiated noise at far field

MENG Chun-xia^{1,2}, YANG Shi-e¹, LI Gui-juan²

(1. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, mengchunxia2010@qq.com; 2. The Key Laboratory for Underwater Scientific Test and Control Technology, Dalian 116013, china)

Abstract: In order to obtain the spatial directivity of ship radiated noise at far field in shallow water, a new method is presented to compute the corresponding sound field distribution at far field. Firstly the sound pressure data measured by hydrophone array at near field was used to obtain the equivalent intensity and positions of multi-pole structure model for ship radiated noise, then the spatial directivity of far field radiated noise is computed by normal modes. A comparison between simulation results of far field spatial directivity of ship noise obtained by this method and the result obtained from direct computation using assumed data of sound sources show that the method presented in this paper can give an acceptable spatial directivity of far field.

Key words: shallow water; ship; radiated noise; spatial directivity at far field

舰船辐射噪声的测量对于舰船声隐身、声纳探测、鱼雷声自导等具有重要意义. 由于海洋环境的复杂性以及测量技术条件限制, 目前舰船辐射噪声特性测量一般在浅海, 且在几倍船长的近场中进行, 测量结果并不能完全反映舰船辐射噪声的远场特性^[1].

国外在发展船舶海上测试技术的同时, 为获取其远场特性进行了大量的实验室研究. 20 世纪

60 年代, Horton 等人在德克萨斯大学防卫研究实验室试验了一种近场测量的方法, 用一个水听器探针在大型换能器表面进行多点测量, 但积分面并不是封闭曲面, 即在换能器的上面和下面未作测量. 20 世纪 70 年代中期至 80 年代末, 美国出现了在理论上主要是基于声场的 Helmholtz 积分形式解和 Kirchhoff 平面波近似, 根据包围声源辐射面上的声压振幅和相位分布的实际测量值, 计算出声源的远场指向性. Frederick 在后来发展的模型中, 使用接收线阵代替探针, 并使用 Helmholtz 积分的付氏变换形式, 在近场测量得到了实际潜艇的远场线谱方向性. 美国海军研究生学院 J. T. Sanchez 利用波动方程的 Green 函数和决定随机振动辐射面的质点振速的时空相关函数构成

收稿日期: 2008-06-23.

基金项目: 水下测控技术国防科技重点实验室基金资助项目 (9140C260102070C26).

作者简介: 孟春霞 (1979—), 女, 博士研究生;

杨士莪 (1931—), 男, 教授, 中国工程院院士.

理论模型,采用在覆盖声源近场的一个平面上测量每一点的声功率,反推出测量面质点振速的均方值的方法获取质点振速的时空相关函数,由此得到了随机噪声源远场波束图.到了80年代末,国内外开始出现了声强测量技术和声场空间变换(STSF)技术,利用在声源附近一个大平面上的各点声强测量,也可以获取噪声场的远场特性.然而,实际测量包围声源辐射面上的声压振幅和相位分布是很困难的^[2].

鉴于目前船舶辐射噪声测试的现状,本文通过近场辐射噪声测量结果得到舰船辐射噪声的远场指向性特性.

1 从船舶近场声压数据获取辐射噪声源参数

根据船舶的振动激发点的位置,把船舶的辐射噪声源看作是沿着船舶艏艉线方向具有一定空间分布的多极子声源的组合^[3].

如图1所示的直角坐标系,取船舶的艏艉线方向为*x*轴,在艏艉线上共有3个声源位置 $S_i, i = 1, 2, 3$.为了与实际辐射噪声测量的坐标系相匹配,坐标原点取在第1个声源位置处.

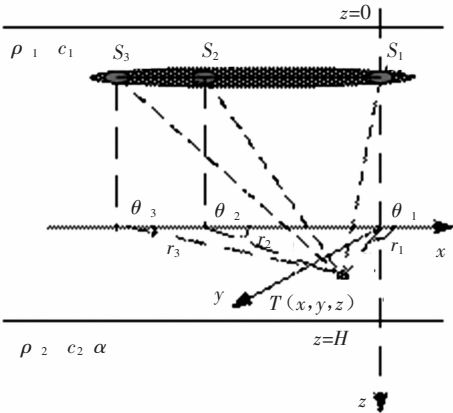


图1 声源位置关系图

每个声源位置都有单极子声源、偶极子声源、四极子声源和八极子声源.设第*i*个声源位置的单极子强度为 a_{i1} ,偶极子强度为 a_{i2} ,四极子强度为 a_{i3} ,八极子强度为 a_{i4} ,第*i*个声源位置的横坐标为 x_i ,空间接收点的坐标为 (x, y, z) .则有,空间中第*n*个接收点处的辐射噪声总声压为^[4]

$$p_n(x,y,z) = \sqrt{\sum_{i=1}^3 |p_i(x,y,z)|^2}. \tag{1}$$

其中, $p_i(x,y,z)$ 是第*i*个声源位置的所有多极子在接收点处产生的总声压.

通过设定多极子强度和位置的理论值可计算出船舶目标近场多个接收点的声压值,把这些声

压值代入到船舶辐射噪声源模型,用自适应优化搜索方法小生境遗传算法^[5]可反演出多极子强度和位置关系.因为求解的是非线性方程组,所以方程的个数,即测量数据点的个数要大于未知数的个数.测量近场辐射噪声时,可利用单个水听器在距离声源目标的不同位置进行测量,获取这些近场数据.这些位置要覆盖声源目标的四周,才能有效地描述声源的辐射噪声的分布特性.

仿真结果表明,当信噪比 R_{SN} 大于10 dB时,所有测量点的平均声压反演精度小于3 dB,即由反演后得到的多极子模型能够代表该船舶目标的辐射噪声源^[6].下面的表1给出辐射噪声为100 Hz时,多极子声源参数与位置的反演结果.

表1 不同信噪比下由近场声压反演得到的多极子系数对比

变量	理想值	无噪声	R_{SN}/dB	
			20	15
a_{12}	1.600	1.594	1.564	1.534
a_{13}	2.000	2.185	1.250	1.466
a_{14}	0.800	0.884	0.450	0.512
a_{21}	0.500	0.533	0.545	0.621
a_{22}	0.700	0.661	0.630	0.547
a_{32}	1.200	1.203	1.247	1.269
a_{33}	2.500	2.432	2.861	2.745
a_{34}	0.500	0.477	0.631	0.583
$x_1(m)$	0	0.289	-0.640	-0.347
$x_2(m)$	-55.000	-54.864	-52.010	-51.407
$x_3(m)$	-90.000	-89.940	-89.564	-89.886

2 船舶近场声压数据推算远场空间指向性的方法

推算远场空间指向性的方法实质是,把体积目标离散为若干多极子点源后,通过简正波等声传播计算方法推算出各多极子点源在远场的声场,再叠加形成传播辐射噪声的远场指向性.

浅海波导条件下辐射噪声的远场范围可近似由公式(2)确定.当接收点与头部声源的水平距离大于*L*时,可认为是多极子声源的远场.

$$L > \frac{D_2}{\lambda}. \tag{2}$$

其中:*D*为船舶的长度; λ 为波长.

3 远场空间指向性仿真计算

在浅海远距离声传播时,由于存在海底、海面的多次反射和折射对声场的影响,此时海水不能作均匀层近似,需考虑垂直声速梯度的影响.故本

文把海洋波导看作上层为具有恒定声速梯度的水层和下层为具有压缩波衰减的半无限流体介质^[7].

海洋波导环境如图 2 所示,上层海水的密度为 $1\,000\text{ kg/m}^3$,具有负的声速梯度,下层流体的密度为 $1\,800\text{ kg/m}^3$,纵波声速为 $1\,650\text{ m/s}$,纵波衰减系数为 $0.4\text{ dB}/\lambda$. 水深为 50 m ,声源深度是 25 m ,接收器的深度是 49 m ,声源和接收器之间的水平距离是 $9\,000\text{ m}$.

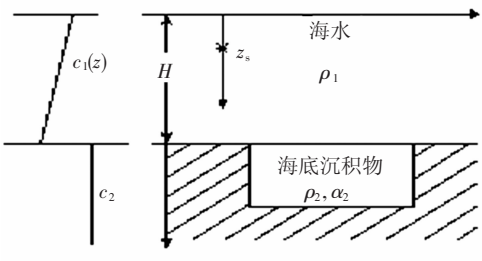


图 2 浅海声波导

考虑如图 3 中所示浅海声速分布. 在海面处声速为 c_0 ,不同深度处声速满足下列方程式:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{1 + az}}, \quad 0 \leq z < H. \tag{3}$$

其中 a 为正数.

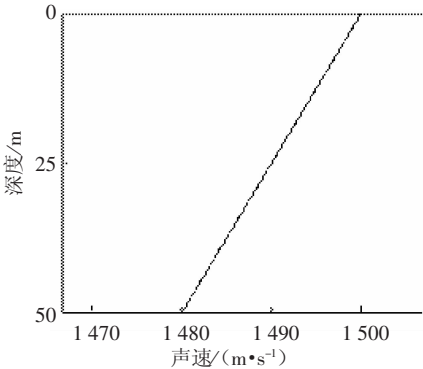


图 3 海水中的声速剖面

设声源所在的深度为 z_s ,并取 $0 < z_s < H$. 将声场势函数写成 Fourier – Bessel 积分形式,即

$$\varphi = \int_0^\infty Z(z, \xi) J_0(\xi r) \xi d\xi.$$

则由波动方程式容易得到 $Z(z, \xi)$ 所满足的微分方程式应为

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + [k_0^2(1 + az) - \xi^2] Z = -2\delta(z - h), \quad 0 \leq z < H. \tag{4}$$

考虑到海面为绝对软边界,在海面处声场势函数为 0 , z 趋于无穷大时,声场势函数满足无穷远辐射条件、点源条件,经过计算,可以得出声场势函数的表达式^[8-10],在此略去具体的推导过程. 利用表 1 的结果,采用声场计算软件 KRAKEN 计算多极子源的辐射声压,再通过叠加形成辐射

噪声在远场的空间指向性.

图 4~6 给出不同信噪比情况下 $1/3\text{ oct}$ 中心频率为 100 Hz 时的船舶辐射噪声远场指向性的理论值与计算值的对比结果. 其中理论值是由多极子参数和位置的理想值计算得到的远场空间指向性,计算值是由反演得到的多极子参数和位置推算出的远场空间指向性.

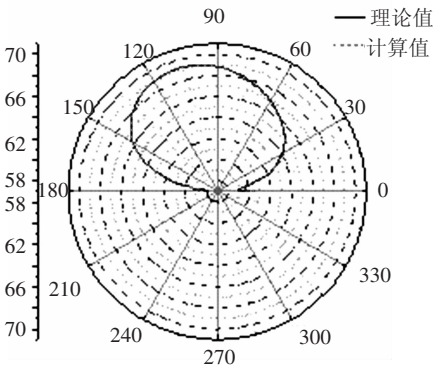


图 4 $f = 100\text{ Hz}$,理想情况

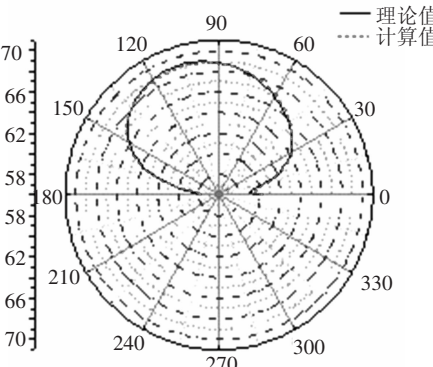


图 5 $f = 100\text{ Hz}$, $R_{\text{SN}} = 20\text{ dB}$

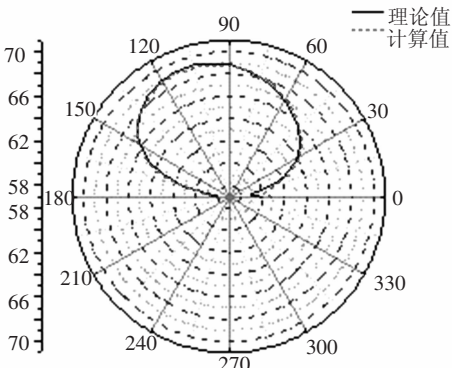


图 6 $f = 100\text{ Hz}$, $R_{\text{SN}} = 15\text{ dB}$

4 结 论

1)在近场信噪比大于 10 dB 的情况下,由辐射噪声近场声压数据反演得到的多极子参数计算出的远场空间指向性,与由多极子参数和位置关系的理想值计算得到的理论的远场空间指向性之间,吻合的较好. (下转第 831 页)