

# 基于声强向量法的体积目标定向和缩比实验研究<sup>1</sup>

刘 勋 相敬林\*

(上海交通大学图像与通信所 上海 200030)

\*(西北工业大学航海工程学院 西安 710072)

**摘 要** 该文提出和研究了利用小型的菱形声强向量阵进行舰船目标三亮点部位的定向和定位。仿真结果表明了所用方法的正确性。在半消声室中应用自行设计的一套实验装置对体积目标进行了缩比定向实验, 实验结果与仿真结果是一致的。

**关键词** 声强向量, 体积目标定向, 缩比实验研究

**中图分类号** TN958.99

## 1 引 言

在近距离上某些被动声探测设备, 例如声引信, 对舰船进行定向和跟踪时, 不能把舰船看作一个点源, 而应看作辐射声源具有某种纵向分布的体积目标。根据文献 [1], 作为体积目标的舰船的辐射噪声的纵向分布可近似为 3 个辐射声亮点结构: (1) 尾部: 推进器是主要噪声源, 主要特征是连续谱能量很强, 主要能量覆盖 1000-5000Hz 频域, 并且具有典型的空化噪声频谱。此外, 尾部也会出现螺旋桨叶片和轴引起的旋转频率及其谐波的线谱, 也可能出现唱音。(2) 中后部, 约从尾部起 1/4 船长处: 主机是主要的噪声源, 主要能量覆盖 10-100Hz 频域, 具有弱连续谱加强线谱的功率谱特征。(3) 中部, 约 1/2 船长处: 各类辅机是主要噪声源, 主要能量覆盖 100-1000Hz 频域, 功率谱中既包含连续谱成分, 也包括线谱成分。表 1 为实船噪声通过特性时频分析的实验结果<sup>[1]</sup>。

表 1 实船的实验分析结果

	舰船 1			舰船 2			舰船 3		
	船中部	船后部	船尾部	船中部	船后部	船尾部	船中部	船后部	船尾部
频率 (Hz)	323	35	3880-	245	37	3800-	278	22	3900-
	411	74	4010	358	67	4120	462	46	4200
	628		4800-	578	84	4920-	632	88	4700-
	742		5000	734		5020			5000

如果利用主机和辅机引起的线谱分量和螺旋桨引起的高频连续谱分量, 分别检测到舰船 3 个部位的辐射声信号, 根据这一模型实现对体积目标的 3 个特定部位的定向成为可能<sup>[1]</sup>, 但是, 在小尺度的平台上利用线性加法阵对线谱分量定向有很大困难。而声强可处理为一个向量, 在自由声场的条件下, 这一向量的指向也就是声源的方向。应用这一方法可对目标, 特别是体积目标的各特定部位进行定向。在本文中, 首先介绍了互谱法声强定向原理, 然后利用小型的菱形声强向量阵进行了舰船目标 3 亮点部位的定向和定位仿真实验, 最后在半消声室中应用自行设计的一套实验装置对体积目标进行了缩比定向实验。

## 2 互谱法声强定向原理<sup>[2-4]</sup>

空间任意方向  $r$  上的声强分量谱函数可以表示为

<sup>1</sup> 2000-05-10 收到, 2000-10-11 定稿

国家部级基金和高等学校博士学科点专项科研基金资助

$$I_r(f) = -[1/(2\pi f\rho d)]\text{Im}[S_{p_1 p_2}(f)] \quad (1)$$

其中  $S_{p_1 p_2}(f)$  是声压水听器  $p_1$  和  $p_2$  处的声压  $p_1(t)$  和  $p_2(t)$  的互谱密度函数,  $\rho$  是水的密度,  $\text{Im}[\ ]$  表示取复数的虚部运算,  $d$  是  $r$  方向上两声压传感器的间距。

要实现三维空间中的声源目标的定向,则需要观测点处的3个互相垂直的声强分量,为此可采用如图1所示声压水听器的布置方案,其中  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴组成一个空间笛卡儿坐标系  $oxyz$ ,  $p_1$  和  $p_2$ ,  $p_3$  和  $p_4$ ,  $p_5$  和  $p_6$  分别位于  $x$  轴,  $y$  轴,  $z$  轴上,它们之间的间距都为  $d$ , 其中心都在观测点处,则  $x$  轴,  $y$  轴,  $z$  轴的声强分量分别为

$$I_x(f) = -[1/(2\pi f\rho d)]\text{Im}[S_{p_1 p_2}(f)] \quad (2)$$

$$I_y(f) = -[1/(2\pi f\rho d)]\text{Im}[S_{p_3 p_4}(f)] \quad (3)$$

$$I_z(f) = -[1/(2\pi f\rho d)]\text{Im}[S_{p_5 p_6}(f)] \quad (4)$$

图2表示声源  $s$  与观测点处坐标系  $oxyz$  的关系,则声源的方位角  $\varphi$  和俯仰角  $\theta$  分别为

$$\varphi(f) = \tan^{-1}[I_y(f)/I_x(f)] \quad (5)$$

$$\theta(f) = \cos^{-1}[I_z(f)/\sqrt{I_x^2(f) + I_y^2(f) + I_z^2(f)}] \quad (6)$$

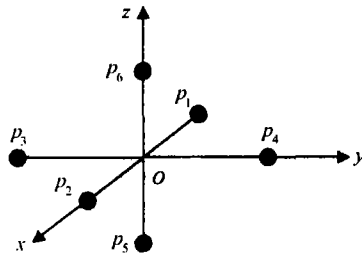


图1 全方位定向传感器布置图

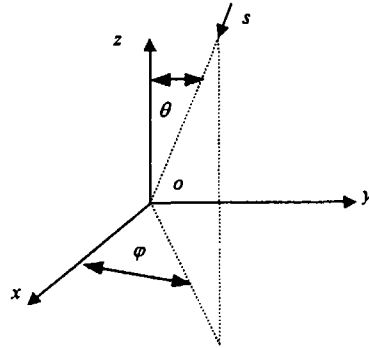


图2 声源的空间位置示意图

### 3 声强向量法对舰船目标的定向和定位

#### 3.1 声强向量空间定位方法的误差分析

由声强向量方法进行目标的定向时,我们可以测得目标的方位角  $\varphi$  和俯仰角  $\theta$ ,而且我们已知观测点处的深度为  $H$  米,也即知道舰船在观测点处直角坐标系中的  $z$  分量的值,即  $z = H$ ,根据这三个值,就可定出直角坐标系中目标的空间位置矢量  $X = [x, y, z]^T$  来,这里,设坐标系原点位于观测点处,由图3可以看出目标的空间位置矢量的各个分量为

$$x = H \cos \varphi \tan \theta \quad (7)$$

$$y = H \sin \varphi \tan \theta \quad (8)$$

$$z = H \quad (9)$$

图中示出目标的水平距离为  $D$ , 即

$$D = (x^2 + y^2)^{1/2} = x \cos \varphi + y \sin \varphi \quad (10)$$

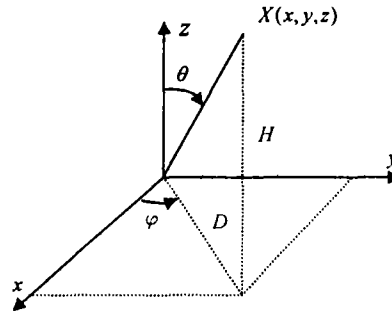


图 3 目标位置与观测点的关系

实际测量中, 必然会引入测向误差  $\delta\theta$  和  $\delta\varphi$ , 应该了解这些测向误差与直角坐标系中的目标位置定位误差的关系。已知

$$x = f_x(H, \varphi, \theta) \quad (11)$$

$$y = f_y(H, \varphi, \theta) \quad (12)$$

$$z = H \quad (13)$$

在一阶近似条件下, 可得

$$\delta x = (\partial f_x / \partial \varphi) \delta \varphi + (\partial f_x / \partial \theta) \delta \theta \quad (14)$$

$$\delta y = (\partial f_y / \partial \varphi) \delta \varphi + (\partial f_y / \partial \theta) \delta \theta \quad (15)$$

$$\delta z = 0 \quad (\text{假设海深是已知的, 并且为常数 } H) \quad (16)$$

定义  $\delta X = [\delta x \ \delta y]^T$  及  $\delta R = [\delta \varphi \ \delta \theta]^T$ , 可得如下矩阵表达式为

$$\delta X = A \delta R \quad (17)$$

这里的系数矩阵  $A$  为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial f_x / \partial \varphi & \partial f_x / \partial \theta \\ \partial f_y / \partial \varphi & \partial f_y / \partial \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -H \sin \varphi \tan \theta & H \cos \varphi \sec^2 \theta \\ H \cos \varphi \tan \theta & H \sin \varphi \sec^2 \theta \end{bmatrix} \quad (18)$$

若方位角和俯仰角的测量误差是相互独立的, 它们的协方差矩阵为

$$P_R = E[\delta R \ \delta R'] = \begin{bmatrix} \delta_\varphi^2 & 0 \\ 0 & \delta_\theta^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

则定位误差的协方差  $P_X$  为

$$P_X = E[\delta X \ \delta X'] = E[A \delta R \ \delta R' A'] = A P_R A' = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \rho_{xy} \sigma_x \sigma_y \\ \rho_{xy} \sigma_x \sigma_y & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

因此可得

$$\sigma_x^2 = \sigma_\varphi^2 (H \sin \varphi \tan \theta)^2 + \sigma_\theta^2 (H \cos \varphi \sec^2 \theta)^2 \quad (21)$$

$$\sigma_y^2 = \sigma_\varphi^2 (H \cos \varphi \tan \theta)^2 + \sigma_\theta^2 (H \sin \varphi \sec^2 \theta)^2 \quad (22)$$

$$\rho_{xy} \sigma_x \sigma_y = -H^2 \sin \varphi \cos \varphi \tan^2 \theta \sigma_\varphi^2 + H^2 \sin \varphi \cos \varphi \sec^4 \theta \sigma_\theta^2 \quad (23)$$

由此可见协方差矩阵中的各个元素，都与目标位置  $(H, \varphi, \theta)$  有关。

为了描述定位误差与目标几何位置的关系，定义一个名词叫“定位精度的几何稀释”即 GDOP(Geometrical Dilution of Precision)<sup>[5]</sup>，它用下式表达：

$$GDOP = [\sigma_x^2 + \sigma_y^2]^{1/2} \tag{24}$$

它是描述定位误差的三维几何分布的。

图 4 描述了  $H = 350\text{m}$ ,  $\sigma_\varphi = \sigma_\theta = 0.015\text{rad} = 0.8594^\circ$  时，用声强向量阵对目标进行定位时的 GDOP 的等误差曲线。根据前面几节的分析，我们可以据此来进行声强向量阵的优化设计及其性能分析。由图 4 可知，当在  $600 \times 600\text{m}^2$  的矩形区域内对纵向长度为  $160\text{m}$  的舰船目标实现 3 个特定部位的分离定位，要求方位角和俯仰角的定位精度达到  $\Delta\varphi = \Delta\theta = 0.8594^\circ$ 。

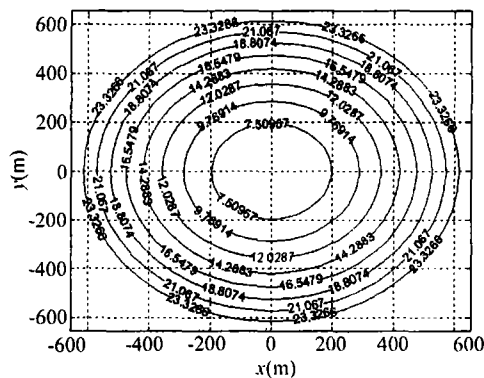


图 4 GDOP 的等误差曲线

由此，根据  $kd = \omega d/c = 0.4$ ，可以确定声传感器之间的间距  $d$ ，因舰船 3 个特定部位的声辐射频率不同，要实现 3 个特定部位的定向，在 3 个坐标轴上分别需要 3 对传感器间距不同的声基元对。

如图 5(a) 所示的菱形声强向量阵，它是最基本和最直观的一种阵排列形式。它在三维笛卡儿直角坐标系的 3 个互相垂直的坐标轴上分别配置了 3 组实际的声基元对。每对声基元测量舰船目标的 3 个特定部位的一个声强分量，并根据 (5) 和 (6) 式来进行目标的定位。图 5(b) 画出了其中的一组声基元在空间的布置情况。

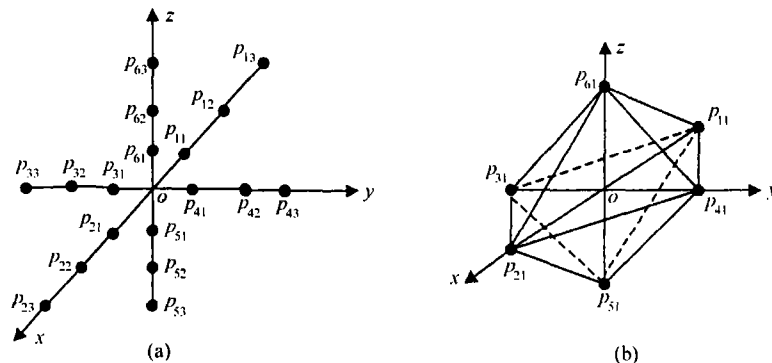


图 5 菱形声强向量阵结构图

这种声强向量阵的优点是阵的体积较小, 消除相位失配误差更容易, 因为它只需要每对声基元实现相位匹配, 而不是多个声基元之间实现相位匹配。这对于提高定向精度是很重要的, 尤其是对舰船的中后部和中部实现定位。

但这种配置的缺点是声强向量阵所用的声基元较多。

### 3.2 仿真试验及结果分析

不失一般性, 在本文中, 我们采用了菱形声强向量阵结构。在仿真实验中, 对于 10-100Hz 频率范围内的线谱分量, 我们用 60Hz 的正弦波信号进行模拟; 而 100Hz-1000Hz 频率范围内的线谱信号, 这里用 400Hz 的正弦波信号进行模拟; 1000-5000Hz 频率范围内的连续谱信号, 用频率范围为 1000-5000Hz 舰船噪声的重构信号进行模拟, 在一个坐标轴上的 3 对声强探头的间距分别为:  $d_w = 3.5\text{cm}$ ,  $d_{zh} = 20\text{cm}$  和  $d_z = 10\text{cm}$ ; 信噪比分别为:  $\text{SNR}_w = 10\text{dB}$ ,  $\text{SNR}_{zh} = 12.8\text{dB}$  和  $\text{SNR}_z = 12\text{dB}$ ; 相位失配分别为:  $\Delta\phi_w = 0.8^\circ$ ,  $\Delta\phi_{zh} = 0.2^\circ$  和  $\Delta\phi_z = 0.05^\circ$ , 舰船纵向长度  $L = 160\text{m}$ , 观测点处水深  $H = 300\text{m}$ 。

在本实验中, 我们模拟了舰船运行中的定向和定位结果。图 6 所示为舰船运动的轨迹。

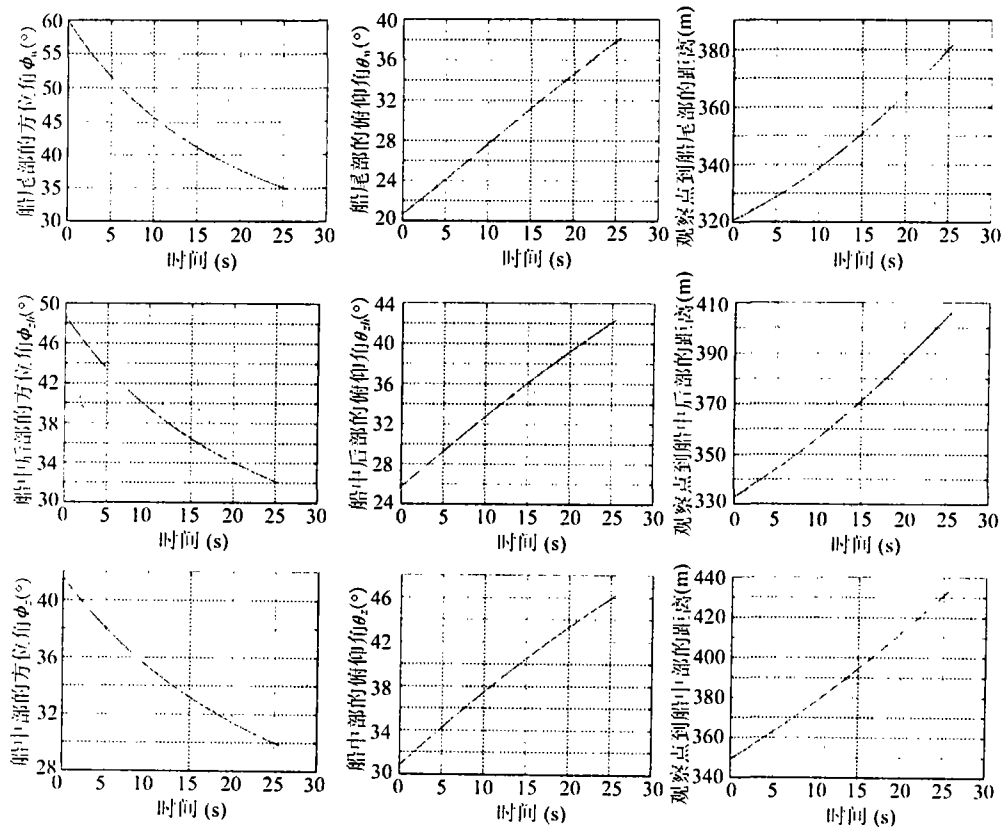


图 6 舰船运行轨迹

在图 7 中, 我们画出了在图 6 运行轨迹的条件下, 利用声强向量方法对舰船的三个特定部位的定向和定位误差结果, 为了减小相位失配误差, 使用了交换通道技术<sup>[4,6,7]</sup>。

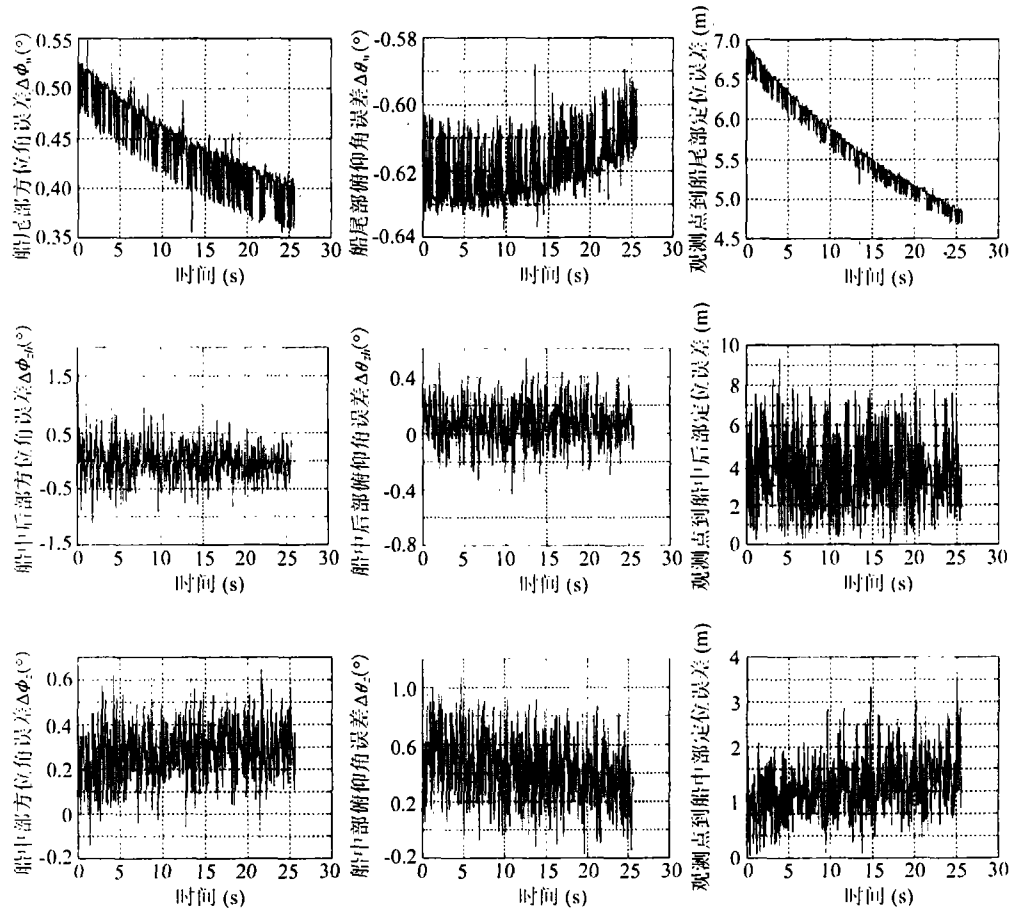


图 7 声强向量对舰船目标 3 个特定部位的定向和定位误差

从仿真结果我们可以得出以下结论:

(1) 声强向量阵是一种比较小型的阵列, 它利用互谱方法实现远处声源目标声场的声强计算, 由此实现声源目标的定位。由于互谱方法的声强计算是在频域进行的, 因此, 它可以实现宽频带内的辐射不同频率的声源的分别定位, 从而完成舰船目标 3 个不同部位的定位。

(2) 为了减小各种定向误差, 以使总体误差在误差允许范围内, 必须折衷选择声强向量阵的各种参数, 包括探头两传感器阵元之间的间距等。

(3) 利用声强向量方法能实现舰船三个亮点的定位和分辨。在给定舰船纵向长度  $L = 160$ , 水深为 300m, 作用半径为 400m 的条件下, 舰船 3 个亮点的定位相对误差都小于 1.6%, 3 个亮点的相对分辨误差都小于 17%。

#### 4 缩比实验结果

在体积目标的缩比实验中, 我们用 3 个相距一定距离的喇叭来模拟一个舰船的 3 个不同的部位, 其中假设舰船的纵向长度为  $L = 160\text{m}$ , 则舰船的 3 个部位的间距为  $L/4 = 40\text{m}$ , 设缩

比比例为 100 : 1, 则 3 个喇叭之间的间距为 40cm, 设观测点处的水深为 315m, 观测点到舰船的正横距离为 100m, 相应地, 声强探头的声中心距离喇叭高度为 3.15m, 到 3 个喇叭连线的正横距离为 1m, 实验中用 4000Hz-5000Hz 的连续谱信号经功率放大器放大后驱动喇叭来模拟舰船尾部的螺旋桨高频连续谱噪声, 用 30Hz 的正弦信号来模拟舰船中后部主机所辐射的线谱分量, 用 100Hz 的正弦信号来模拟舰船中部的辅机所辐射的线谱分量, 为了研究海洋环境噪声对体积目标定向的影响, 我们按照海洋环境噪声的模型<sup>[8]</sup>在采集到的声压信号中加入了高斯分布的噪声。缩比实验所得结果如表 2 所示。

表 2 体积目标缩比实验结果

信噪比 (dB)	船尾部误差			船中后部误差			船中部误差		
	方位角误差 (°)	俯仰角误差 (°)	定位误差 (cm)	方位角误差 (°)	俯仰角误差 (°)	定位误差 (cm)	方位角误差 (°)	俯仰角误差 (°)	定位误差 (cm)
0	13.1	-13.5	64.6	12.8	13.2	61.8	13.4	13.8	67.5
6	6.0	-6.4	30.5	6.4	6.7	32.3	6.2	6.6	31.8
12	2.3	-2.8	12.9	2.1	2.5	11.6	1.9	2.3	10.4

应用交换通道的方法后, 缩比实验所得结果如表 3 所示。

表 3 体积目标缩比实验结果 (利用了交换通道技术, 以消除相位误差)

信噪比 (dB)	船尾部误差			船中后部误差			船中部误差		
	方位角误差 (°)	俯仰角误差 (°)	定位误差 (cm)	方位角误差 (°)	俯仰角误差 (°)	定位误差 (cm)	方位角误差 (°)	俯仰角误差 (°)	定位误差 (cm)
0	9.5	-10.2	53.4	9.2	10.1	50.3	9.8	10.6	54.2
6	3.3	-4.2	19.6	3.5	4.5	20.2	3.8	4.7	21.6
12	0.84	-0.92	7.4	0.89	0.81	6.1	0.76	0.87	5.5

由实验结果可以看出: (1) 采用声强向量方法可以实现舰船目标不同部位的定向和定位。(2) 定向和定位的精度受到环境噪声的影响, 即与信噪比有关。(3) 采用交换通道的方法, 可以消除相位失配误差的影响, 从而提高了舰船目标不同部位的定向和定位精度。(4) 缩比定向实验的结果与仿真实验的结果是一致的。

## 参 考 文 献

- [1] 刘勋, 相敬林等, 作为体积目标的船舶声辐射纵向分布特性的研究, 西北工业大学学报, 2000, 18(3), 409-412.
- [2] R. Hickling, W. Wei, Finding the direction of a sound source using a vector sound-intensity probe, J. Acoust. Soc. Am., 1993, 94(5), 2408-2412.
- [3] F. J. Fahy, Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals, J. Acoust. Soc. Am., 1977, 62(2), 1057-1059.
- [4] J. Y. Chung, Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch, J. Acoust. Soc. Am., 1978, 64(3), 1613-1616.
- [5] 孙仲康, 等, 单多基地有源无源定位技术, 北京, 国防工业出版社, 1996, 5, 24-37.
- [6] 陈继康, 用简易声强计测量声强, 声学学报, 1983, 8(4), 250-254.
- [7] 甘长胜, 陈心强, 李登啸, FFT 分析仪—微机声强测量系统及其应用, 应用声学, 1983, 8(5), 4-15.
- [8] 刘勋, 体积目标的被动声定向方法和尺度估计研究, [博士学位论文], 西安, 西北工业大学, 2000.

STUDY ON BEARING AND SCALEDOWN EXPERIMENT OF  
VOLUME TARGET BASED ON ACOUSTIC INTENSITY VECTOR

Liu Xun    Xiang Jinglin\*

*(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200036, China)*

*\*(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)*

**Abstract** In this paper, the method to determine the bearings and ranges to three highlight sections of a ship is proposed and studied by means of a small rhombic acoustic intensity array. The simulation results show that the method is correct. An experimental facility is designed and manufactured. The scaledown experiment determining the bearings and ranges to three highlight sections of a ship is completed in semi-anechoic room. The experimental results are consistent with simulation results.

**Key words** Acoustic intensity vector, Volume target bearing, Study on scaledown experiment

刘 勋: 男, 1969 年生, 博士后, 主要从事水下信号与信息处理、图像与通信的研究.

相敬林: 男, 1936 年生, 教授, 主要从事水下信号分析与信息处理的研究.