

# 基于改进的快速场模型的空气声源 跨越空-水界面辐射声场仿真

邱宏安, 王主威, 张翼鹏, 崔腾飞

(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 建立空气声源跨越空-水界面辐射声场的快速场仿真计算模型, 并提出改进的可以处理海底为弹性介质时的声传播计算方法。通过用理论值和用传播矩阵法计算的水平波束与幅度、相位关系图以及传播曲线的比较, 验证了仿真计算算法的正确性。仿真计算结果表明: 该方法在计算空气声源的辐射声场时, 既包含了离散模式部分, 又包含了连续模式, 对中短距离的声场进行计算的结果较准确, 优于简正波方法。通过该仿真算法可对空气声源的在空气及水下的辐射声场进行分析, 对进一步研究水下对空中目标的探测技术具有重要意义。

**关键词:** 空气声波透射入水, 快速场模型, 辐射声场, 传播矩阵

中图分类号: O422.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-2758(2012)06-0814-06

研究空气声源跨越空-水界面的辐射声场特性, 对于进一步研究水下对空中目标探测技术具有重要的意义。而对空气中的声源在水下激发的声场, 国内外学者相继做了一些研究。在国外 50 年代和 60 年代, Hudimac<sup>[1]</sup> 和 Weinstein<sup>[2]</sup> 分别用射线声学 and 波动理论对这个问题进行了简单分析。到了 90 年代, Chapman<sup>[3]</sup> 用简正波的方法分析了这个问题, 并且用计算水下声场的标准程序经过简单的修正, 来计算空气中的声源在水下产生的声场。Kazandjian<sup>[4]</sup> 也在 1994 年, 对空气中运动的声源产生的水下声场进行了分析。在国内, 对这方面问题的研究不多, 西北工业大学的马远良教授在 70 年代曾对这个问题用射线声学的方法进行研究, 得到了与 Urick 的分析相近的结果。鄢锦提出用波束位移简正波方法对海面波浪对空气中声源激发的浅海声场的影响进行仿真计算<sup>[6]</sup>。但这些方法都存在着各自的问题, 如简正波是通过修改各阶简正波的激发系数来计算空气声源激发的水下声场, 不能同时计算空气中的辐射声场。且它适合于远距离声场计算, 在接收器距离较近时, 计算误差较大。另外, 空气声源激发的水下声场有侧面波, 简正波模型不能包含侧面波部分。这些不便于展开水下对空中目标定位技术的进一步研究。

快速场计算模型<sup>[5]</sup> 是从声场计算的积分表达式出发, 借助于 FFT 来进行计算。由于它利用 FFT 来计算, 所以计算速度较快, 而且一次可以得到一系列水平距离点上的声场, 所以在预报传播损失时非常方便。另外, 它在计算声场时, 既包含了离散模式部分, 又包含了连续模式, 因此, 对中短距离的声场进行计算的结果, 比简正波效果好。为此, 我们结合预研课题, 开展了该方面的研究工作, 并取得了一定的进展<sup>[7, 8]</sup>。本文是在已做相关研究的基础上, 给出一种改进的可以处理海底为弹性介质的空气声源跨越空-水界面的辐射声场计算方法。并利用该计算模型, 研究空中声源激发的水下声场特性, 为水下对空中声目标的探测技术的研究提供依据。

## 1 空气声源的跨越空-水界面的辐射声场快速场计算模型

### 1.1 空气声源辐射声场模型的积分表示

如图 1 所示, 为与距离无关的空气声源分层声传播介质示意图。这里, 假定对于短距离声传播, 海洋介质参数不随水平距离变化, 且海表面和海底是平整的。

收稿日期: 2011-11-01

作者简介: 邱宏安(1965—), 西北工业大学副教授, 主要从事信息信号处理等的研究。

根据水平分层介质中各向同性点声源辐射的声场具有柱对称性, 建立柱坐标系,  $z$  轴垂直向下。假定单频点声源位于  $(0, z_s)$  处, 则声压可以写成下面积分表示

$$p(r, z) = \int_0^\infty P(z, \xi) J_0(\xi r) \xi d\xi \quad (1)$$

$P(z, \xi)$  为  $p(r, z)$  的 Fourier-Bessel 变换, 它满足

$$\frac{d^2 P}{dz^2} + (k^2 - \xi^2) P = -2\delta(z - z_s) \quad (2)$$

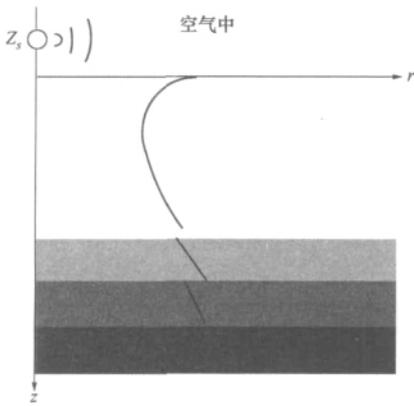


图 1 空气声源分层声传播介质示意图

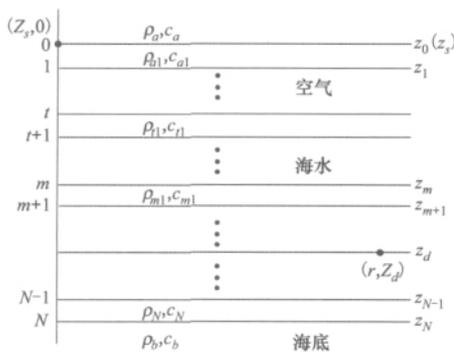


图 2 空气声源辐射声场  $N$  层介质水平分层图

### 1.2 建立基于改进的传播矩阵快速场计算模型

当  $k^2(z)$  具有简单的形式时, 例如常数或者线性函数, 可以得到深度分离方程 (2) 式的解析解。但在大部分情况下, 需要用数值方法求解深度分离方程。

图 2 为根据图 1 将空气声源辐射声场按薄层分成  $N$  层的介质水平分层图。其中, 在空气中, 以声源所在处作为分界面将空气层一分为二, 声源的上面作为液态半空间, 声源的下面将空气、海面、海水

和海底按水平分层分成若干薄层, 假定各个薄层的厚度足够小, 各层中介质密度和声速恒定, 则在每一个薄层里可假定介质具有可解的简单声速剖面。

根据图 2 所示, 由于在各层的分界面处 (声源所在分界面除外), 声压和质点垂直振速连续, 从而有

$$\begin{bmatrix} P(z_{m+1}) \\ U(z_{m+1}) \end{bmatrix} = T(z_m, z_{m+1}) \begin{bmatrix} P(z_m) \\ U(z_m) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $T(z_m, z_{m+1}) = M(z_{m+1}) M_m^{-1}(z_m)$  称之为传播矩阵, 而

$$M_m(z_m) = \begin{bmatrix} e^{i\gamma_m z} & e^{-i\gamma_m z} \\ \frac{1}{Z_{cm}} e^{i\gamma_m z} & -\frac{1}{Z_{cm}} e^{-i\gamma_m z} \end{bmatrix}$$

$Z_{cm} = \rho_m \omega / \gamma_m$  为第  $m$  层的特征阻抗,  $\gamma_m = \sqrt{k_m^2 - \xi^2}$ ,  $Y_{cm} = 1/Z_{cm} = \gamma_m / \rho_m \omega$  为特征导纳。

对于声源  $z_s$  处, 声压连续, 而质点垂直振速有限间断。将 (2) 式两端在区间  $(z_s - \delta, z_s + \delta)$  积分, 并取极限  $\delta \rightarrow 0$  可以得到

$$\begin{bmatrix} P(z_s + \delta) \\ U(z_s + \delta) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P(z_s - \delta) \\ U(z_s - \delta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -2/i\rho_s \omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

直接用传播矩阵求解深度分离方程时, 首先将声场从最下面的分界面  $z_N$  开始, 利用传播矩阵, 逐层向上“传播”直到声源处。然后利用 (4) 式, 继续向上“传播”到最上层分界面  $z_0$ 。利用无穷远辐射条件可以确定上、下半空间边界处的声场。最后从上下边界处开始, 利用传播矩阵求解接收器处的声场。

由于直接利用传播矩阵计算, 需要进行大量的矩阵相乘运算。当  $\xi > k_m$  时, 垂直波数  $\gamma_m$  为纯虚数, 传播矩阵的元素包含指数项  $\exp(\pm \gamma_m h_m)$ 。因此, 会出现数值稳定性差和数值精度低的问题。另一方面, 它只能模拟假定海底为液态半空间的情况, 无法完成针对海底为弹性介质的情况进行仿真。而实际中, 尤其是浅海环境, 低频声波能够穿透海底液态沉积层, 到达硬基底。这样, 弹性海底中的切变波对声传播有较大影响, 海底不能再简单假定为液态半空间。而应将海底硬基底建模为弹性半空间。为此, 引入了声导纳的概念, 给出改进的可以处理海底为弹性介质时的传播矩阵方法。

定义变化域声导纳  $Y(z, \xi)$

$$Y(z, \xi) = \frac{U(z, \xi)}{P(z, \xi)} \quad (5)$$

将 (4) 式展开, 并将 (5) 式代入可以得到

$$P(z_s) = \frac{2i}{\rho_s \omega [Y(z_s + \delta) - Y(z_s - \delta)]} \quad (6)$$

式中,  $P(z_s) = P(z_s + \delta) = P(z_s - \delta)$  为声源处的声压,  $Y(z_s + \delta)$ ,  $Y(z_s - \delta)$  分别为声源上下方的声导纳。

在上半无限空间中, 仅存在向上传播的声波, 因此声压和质点垂直振速可以分别表示为

$$P_a(z) = B_a e^{-i\gamma_a z} \quad (7)$$

$$U_a(z) = -\frac{\gamma_a}{\rho_a \omega} B_a e^{-i\gamma_a z} \quad (8)$$

式中,  $\gamma_a = \sqrt{k_a^2 - \xi^2}$ ,  $k_a = \omega/c_a$ 。

所以上边界  $z_0$  处的声导纳为

$$Y(z_0) = \frac{U_a(z_0)}{P_a(z_0)} = -\frac{\gamma_a}{\rho_a \omega} \quad (9)$$

同样可以得到下边界  $z_N$  处的声导纳

$$Y(z_N) = \frac{\gamma_b}{\rho_b \omega} \quad (10)$$

将(3)式展开得到

$$P(z_{m+1}) = \cos(\gamma_m h_m) P(z_m) + iZ_{cm} \sin(\gamma_m h_m) U(z_m) \quad (11)$$

$$U(z_{m+1}) = \frac{i}{Z_{cm}} \sin(\gamma_m h_m) P(z_m) + \cos(\gamma_m h_m) U(z_m) \quad (12)$$

由(11)式和(12)式, 可得

$$Y(z_{m+1}) = \frac{\frac{i}{Z_{cm}} \sin(\gamma_m h_m) + \cos(\gamma_m h_m) Y(z_m)}{\cos(\gamma_m h_m) + iZ_{cm} \sin(\gamma_m h_m) Y(z_m)} \quad (13)$$

上式给出了从上向下的声导纳迭代计算公式, 同样可以得到从下向上的声导纳迭代计算公式

$$Y(z_{m+1}) = \frac{-\frac{i}{Z_{cm}} \sin(\gamma_m h_m) + \cos(\gamma_m h_m) Y(z_{m+1})}{\cos(\gamma_m h_m) - iZ_{cm} \sin(\gamma_m h_m) Y(z_{m+1})} \quad (14)$$

由此可以得到从上到下的声压迭代计算公式

$$P(z_{m+1}) = [\cos(\gamma_m h_m) + iZ_{cm} \sin(\gamma_m h_m) Y(z_m)] P(z_m) \quad (15)$$

$$P(z_m) = [\cos(\gamma_m h_m) - iZ_{cm} \sin(\gamma_m h_m) Y(z_{m+1})] P(z_{m+1}) \quad (16)$$

利用(15)式或(16)式, 可以从声源处, 迭代求解接收器处的声压。

前面假定上、下半空间为均匀液态介质, 当海底

为弹性介质时, 将海底硬基底建模为弹性半空间, 介质的密度为  $\rho$ , 压缩波速为  $c_p$ , 切变波速为  $c_s$ , 有弹性半空间边界处的声导纳公式为

$$Y(H, \xi) = \frac{-i[-\sigma + \xi]}{\rho \omega \frac{2\xi}{\chi^2} \left[ \frac{\sigma^2}{\beta} - \gamma \right]} \quad (17)$$

式中,  $\sigma = (2\xi^2 - \chi^2)/2\xi$ ,  $k = \omega/c_p$  为压缩波数,  $\chi = \omega/c_s$  为切变波数,  $\beta = \sqrt{\xi^2 - k^2}$ ,  $\gamma = \sqrt{\xi^2 - \chi^2}$ , 利用公式(17)代替(10)式, 则改进的传播矩阵方法可以处理海底为弹性介质时的声传播计算。这样, 再通过波数积分的快速场近似计算, 用FFT进行计算, 可得到一系列离散距离上的声压值。

## 2 基于改进的传播矩阵快速场模型的验证及分析比较

### 2.1 快速场模型的验证

下面用理论值来验证上面算法的可靠性, 为了分析方便, 取 Pekeris 浅海环境。假定海深  $H = 100$  m, 海水为均匀介质, 声速为  $c = 1500$  m/s, 密度为  $\rho = 1000$  mg/m<sup>3</sup>, 空气层假定为均匀半无限空间, 空气层的声速为  $c_a = 334$  m/s, 密度为  $\rho_a = 1.21$  mg/m<sup>3</sup>, 海底假定为存在衰减的液态半空间, 平面波衰减系数为  $a_w = 0.5$  dB/wavelength, 海底声速为  $c_b = 1800$  m/s, 密度为  $\rho_b = 1800$  mg/m<sup>3</sup>, 声源深度为  $z_0 = 50$  m, 接收器深度为  $z = 30$  m, 声源频率为  $f$ 。

图3、图4为声源频率  $f = 200$  Hz,  $N = 4096$ ,  $k_{\max} = 1$  时, 由理论值和用传播矩阵法计算的水平波束与幅度、相位关系图, 由图可见,  $P(z, \xi)$  的计算与理论值是相吻合的。

下面对传播损失计算进行验证。取声源频率  $f = 200$  Hz, 采样点数  $N = 4096$ ,  $k_{\max} = 1$ ,  $\mu = 0.0005$ , 计算结果如图5、图6所示。

由图5可以看出, 用FFP计算得到的结果和直接积分得到的结果基本一致。在5000 m内, 用FFP计算得到传播曲线和直接数值积分得到的传播曲线比较吻合, 而当距离增大时, 由于Hankel函数的振荡的更加快, 使得直接数值积分的误差增大, 产生了许多毛刺, 而FFP得到的结果要比直接数值积分得到的传播曲线要光滑。

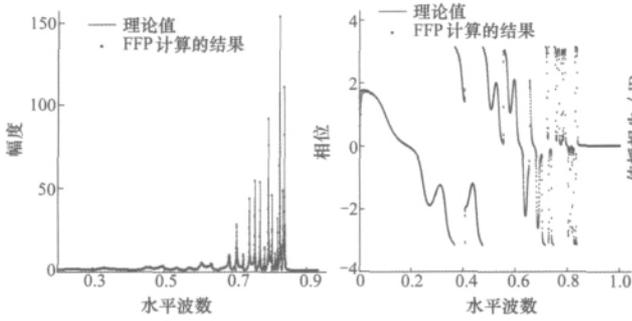


图 3 水平波束与幅度关系图 图 4 水平波束与相位关系图

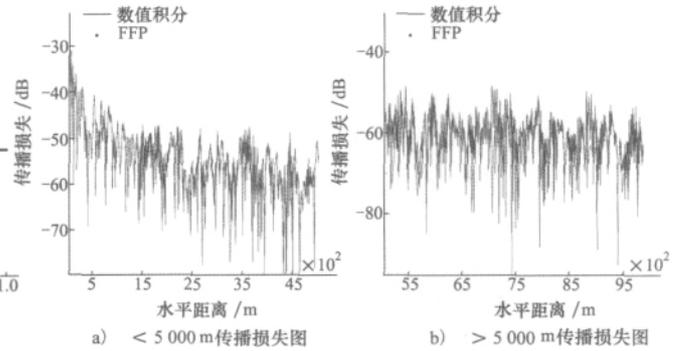


图 5 传播损失图

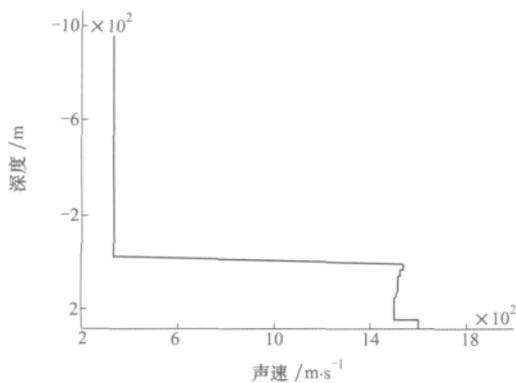


图 6 空气、海水及沉积层声速剖面

### 2.2 改进模型与原计算模型的分析

取空气的密度为  $1.21 \text{ kg/m}^3$ , 空气中的声速为  $334 \text{ m/s}$ , 不考虑空气中的声吸收, 声源频率为  $50 \text{ Hz}$ 。海水的密度为  $1000 \text{ kg/m}^3$ , 密度不随深度变化。空气、海水和沉积层中的声速剖面如图 6 所示, 不考虑海水中的声吸收, 海深  $200 \text{ m}$ 。沉积层声速取为  $1580 \text{ m/s}$ , 假定沉积层的密度不变, 为  $1600 \text{ kg/m}^3$ , 平面波吸收衰减系数为  $0.2 \text{ dB/波长}$ , 沉积层内存。基底为均匀弹性介质, 密度为  $2.09 \text{ cm}$ , 压缩波波速为  $1800 \text{ m/s}$ , 切变波波速为  $600 \text{ m/s}$ 。

图 7 为取沉积层深度为  $5 \text{ m}$  和  $0 \text{ m}$ , 水下水听器接收深度为  $20 \text{ m}$  时空气声源在水上  $100 \text{ m}$  处的水下声传播损失图。

由图可见, 在浅海中, 低频声波能够穿透海底液态沉积层, 到达硬基底。因此, 弹性海底中的切变波对声传播有较大影响, 海底不能再简单假定为液态半空间, 原计算模型方法具有算法简单、易于实现的优点, 但存在数值稳定性差, 精度不高的缺点, 且不能计算弹性海底, 而改进模型通过引入变换域声阻抗(或声导纳)的概念, 采用迭代算法, 改进了传播

矩阵方法的数值稳定性和计算精度, 且能够完整反映海底介质情况, 使仿真模型更能反映实际海洋浅海特性。

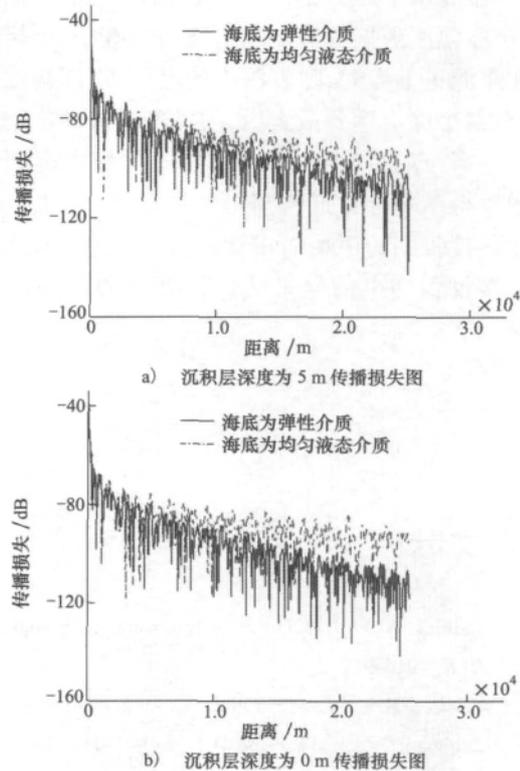


图 7 不同沉积层深度传播损失图

### 3 跨越空-水界面的空气声源水下辐射声场仿真与特性分析

取仿真浅海环境条件同第 2 节, 假定声源频率为  $100 \text{ Hz}$ , 液态沉积层深度为  $10 \text{ m}$ , 分别取空气声

源高度为 15 m、100 m 和 800 m 进行仿真计算。

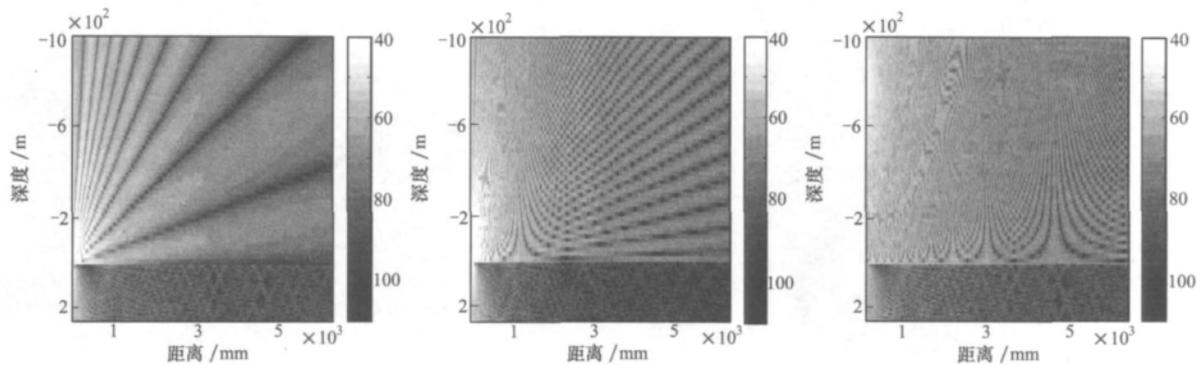


图 8 声源距海面高度 15 m 辐射声场 图 9 声源距海面高度 100 m 辐射声场 图 10 声源距海面高度 800 m 辐射声场

从图 8 ~ 图 10 中可以看出,空气中声源激发的水下声场具有明显余弦方向性。当接收器深度较浅时,声压随水平距离的增大迅速衰减。在声源正下方,声压幅度随接收器深度的增大而减小,当接收器不在声源正下方时,随着深度的增大,声压幅度先增大,在某个深度达到最大后,随深度的进一步增大而减小。当声源高度不是特别高时,空气中声源在水下激发得声场分布近似与声源高度无关,也就是说接收器接收到的声场对声源高度不敏感,因此通过水下接收到的声信号来估计远处声源的高度非常困难。

## 4 结 语

本文采用快速场模型,建立空气声源跨越空-水界面辐射声场的快速场仿真计算模型,提出改进的可以处理海底为弹性介质时的声传播计算方法。用理论值来验证了仿真计算算法的正确性。用本文提出的方法,对空气声源激发的水下声场进行了计算和仿真。仿真计算结果表明:该方法在计算声场时,即包含了离散模式部分,也包含了连续模式,对中短距离的声场进行计算的结果较准确,优于简正波方法。通过仿真可对空气声源的辐射声场进行分析,对进一步研究水下对空中目标的探测技术具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] Hudimac A A. Ray Theory Solution for the Sound Intensity in Water Due to a Point Source above It. *J Acoust Soc Am*, 1957, 29(8): 916-917
- [2] Weinstein M S. Wave Solution for Air-to-Water Sound Transmission. *J Acoust Soc Am*, 1965, 37(3): 899-901
- [3] Chapman D M F, Thomson D J, Ellis D D. Modeling Air-to-Water Sound Transmission Using Standard Numerical Codes of Underwater Acoustics. *J Acoust Soc Am*, 1992, 91(4): 1904-1910
- [4] Kazandjian L, Leviandier L. A Normal Mode Theory of Air-to-Water Sound Transmission by a Moving Source. *J Acoust Soc Am*, 1994, 96(3): 1732-1740
- [5] 鄢 锦, 张仁和. 海面波浪对空气中声源激发的浅海声场的影响. *自然科学进展*, 2003, 13(3): 243-247  
Yan Jing, Zhang Renhe. Sea Wave of Air Acoustic Source Excitation of Acoustic Field in Shallow Water. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(3): 243-247 (in Chinese)
- [6] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. *Computational Ocean Acoustics*. New York: Springer Verlag, 1994, 203-216
- [7] 张翼鹏, 马远良, 李蓉艳, 邹士新. 用快速场(FPP)分析空气中声源在水下产生的声场. *声学技术*, 2004, 23(z1), 106-109  
Zhang Yipeng, Ma Yuanliang, Li Rongyan, Zou Shixin. Analysis of the Air-to-Water Sound Transmission with Fast Field Pro-

gram. *Technical Acoustics*, 2004, 23( z1 ), 106-109 ( in Chinese)

[8] 张翼鹏, 马远良. 空气中快速运动声源水下声场的波数积分模型, *应用声学*, 2007, 26( 2 ): 74-82

Zhang Yipeng, Ma Yuanliang. Modeling the Underwater Sound Field by Wave Number Integration for a Rapidly Moving Source in Air. *Applied Acoustics*, 2007, 26( 2 ): 74-82 ( in Chinese)

## Improving Simulation Method for Acoustic Field of Underwater Transmission Excited by Airborne Source

Qiu Hongan, Wang Zhuwei, Zhang Yipeng, Cui Tengfei

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

**Abstract:** A Fast Field Program ( FFP ) is developed to calculate the underwater acoustic field excited by airborne source; in order to handle the elastic bottom environment, an improvement of simulation method is given. Sections I through 3 of the full paper explain and evaluate the improvement mentioned in the title, which we believe is helpful to designers in China and whose core consists of: ( 1 ) this method can be used to calculate air to water acoustic field in the near or not so far field, because it can provide not only continuous mode, but also discontinuous mode; ( 2 ) using the acoustic field programming, we analyze the characteristics of air to water sound transmission presented in Figs. 8 through 10 and give the important results which can help designers to study the method of detection from water to air.

**Key words:** acoustic fields, calculations, computer simulation, computer software, efficiency, mathematical models, underwater acoustics; air to water sound transmission, fast field program( FFP ), propagator matrix