

# 水中目标强度的一致性时域有限差分计算

冯玉田<sup>1</sup>, 王荣庆<sup>2</sup>, 王朔中<sup>1</sup>

(1. 上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072; 2. 中国船舶重工集团七六〇研究所, 大连 116013)

**摘要:** 本文应用一致性时域有限差分法(FDTD)和近场-远场变换计算散射声目标的反射声压强度, 找出反射声压级与目标声中心到换能器间距离的关系。数值计算中考虑了自由场和有海面及海面波浪影响时的不同情况。根据声源和目标的几何特征对入射波和散射波分别作了球面和柱面扩散修正, 并将计算结果与水池实验结果进行了比较。本文的讨论可对水下目标强度测量方法提供参考。

**关键词:** 时域有限差分法; 目标强度; 散射

中图分类号: O427.2 文献标识码: A

## Uniform finite-difference time-domain method for underwater target strength estimation

FENG Yu-tian<sup>1</sup>, WANG Rong-qing<sup>2</sup>, WANG Shuo-zhong<sup>1</sup>

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. Research Institute 760, China Shipbuilding Corp. Group, Dalian 116013, China)

**Abstract:** Using the finite-difference time-domain (FDTD) method and near-field to far-field transformation, pressure of the reflected sound from the scattering target is calculated. The aim is to find the relationship between the reflected sound pressure and the distance from the transducers to the target. In the calculation, both free field and surface-bounded field with surface waves are considered. Spherical and cylindrical corrections are made based on the geometry of the source and the target. The calculated results are compared with the measured data. The method described may provide a means to aid the target strength measurement.

**Key words:** FDTD; target strength; scattering

### 1 引言

自从 Yee 在 60 年代提出时域有限差分法(FDTD)以来, 已经在电磁场得到广泛的应用。这种方法用一组差分方程组代替 Maxwell 方程组, 在时域中以逐步递推的方式模拟波的传播, 从而解出相应的场。FDTD 方法将场的基本方程组表示成一组显的递推关系式, 其算法简单、稳定、有效, 而边界条件则在递推中自然得到满足。近年来, FDTD 在水声学中有越来越多的应用, 如用于水下目标的声散射<sup>[1, 2]</sup>, 研究过的问题包括理想目标<sup>[1]</sup>、透声液态目标<sup>[3]</sup>、弹性体<sup>[4]</sup>、多层复合目标<sup>[5]</sup>等。在处理这些问题时, 通过采用适当的吸收边界处理技术<sup>[6]</sup>将空间有限范围内的声场模拟成无限空间, 而当目标下潜深度较小, 或在研究水面目标的散射特性时, 海面影响不可忽略<sup>[7, 8]</sup>, 在浅海中还必须计入海底的

影响。

实验中, 在对散射声目标的反射声压强度进行测量时, 往往将声源和接收器合置, 且多在远场进行测量。在选择测量距离时, 若太近, 由于散射波不稳定, 给测量带来误差; 若太远, 则由于反射波衰减较大, 给测量造成困难。本文在 FDTD 数值分析框架的基础上, 用 FDTD 模拟水下声目标周围的声场分布, 通过近场-远场变换推算远场散射特性, 预报目标强度( $TS$ ), 并找出目标强度与声源至目标距离的关系。在计算目标强度时, 考虑了无限范围(自由场)以及有海面和波浪影响时的情况, 还对入射波和散射波作了几何扩散修正, 并与水池实验结果进行了比较。本文的讨论表明, FDTD 数值计算结果可对目标特性测量方法提供依据。

### 2 一致性 FDTD 算法

根据弹性体中声波方程以及弹性散射体与流体界面上的边界条件可导出一致性 FDTD 公式。为表达简洁仅给出二维表达式<sup>[4]</sup>:

收稿日期: 2001-02-20; 修回日期: 2001-07-20

作者简介: 冯玉田(1966), 男, 浙江人, 副教授, 主要从事信号与信息处理、水声学等方面的研究。

$$v_x^{(n)}(i, j) = v_x^{(n-2)}(i, j) + \frac{1}{\rho} \frac{\Delta t}{\delta} [T_{xx}^{(n-1)}(i+1, j) - T_{xx}^{(n-1)}(i-1, j) + T_{xy}^{(n-1)}(i, j+1) - T_{xy}^{(n-1)}(i, j-1)] \quad (1)$$

$$v_y^{(n)}(i, j) = v_y^{(n-2)}(i, j) + \frac{1}{\rho} \frac{\Delta t}{\delta} [T_{xy}^{(n-1)}(i+1, j) - T_{xy}^{(n-1)}(i-1, j) + T_{yy}^{(n-1)}(i, j+1) - T_{yy}^{(n-1)}(i, j-1)] \quad (2)$$

$$T_{xx}^{(n)}(i, j) = T_{xx}^{(n-2)}(i, j) + \frac{1}{C} \frac{\Delta t}{\delta} [v_x^{(n-1)}(i+1, j) - v_x^{(n-1)}(i-1, j) + v_y^{(n-1)}(i, j+1) - v_y^{(n-1)}(i, j-1)] - \frac{2}{B} \frac{\Delta t}{\delta} [v_y^{(n-1)}(i, j+1) - v_y^{(n-1)}(i, j-1)] \quad (3)$$

$$T_{yy}^{(n)}(i, j) = T_{yy}^{(n-2)}(i, j) + \frac{1}{C} \frac{\Delta t}{\delta} [v_x^{(n-1)}(i+1, j) - v_x^{(n-1)}(i-1, j) + v_y^{(n-1)}(i, j+1) - v_y^{(n-1)}(i, j-1)] - \frac{2}{B} \frac{\Delta t}{\delta} [v_x^{(n-1)}(i, j+1) - v_x^{(n-1)}(i, j-1)] \quad (4)$$

$$T_{xy}^{(n)}(i, j) = T_{xy}^{(n-2)}(i, j) + \frac{1}{B} \frac{\Delta t}{\delta} [v_y^{(n-1)}(i+1, j) - v_y^{(n-1)}(i-1, j) + v_x^{(n-1)}(i, j+1) - v_x^{(n-1)}(i, j-1)] \quad (5)$$

式中  $v_x$  和  $v_y$  为质点速度分量,  $T_{xx}$ 、 $T_{yy}$  为正向应力分量,  $T_{xy}$  为切应力;  $\delta$  为网格尺寸,  $\Delta t$  为时间步长, 一般应取  $\delta$  小于波长的  $1/10$ ,  $\Delta t \leq \delta/\sqrt{2}c_0$ 。  $i$  和  $j$  分别为水平和垂直方向的网格点标号,  $n$  为离散的时间指标。  $\rho$  为介质密度,  $C$  为介质对压缩形变的顺性系数,  $B$  为介质对切向形变的顺性系数。水和弹性体中相应的参数分别为:

$$C_1 = \frac{1}{\lambda_1 + 2\mu_1} = \frac{1}{\rho_1 c_1^2} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{1}{\lambda_2 + 2\mu_2} = \frac{1}{\rho_2 c_2^2} \quad (7)$$

$$B_1 = \frac{1}{\mu_1} = \frac{1}{\rho_1 b_1^2} \quad (8)$$

$$B_2 = \frac{1}{\mu_2} = \frac{1}{\rho_2 b_2^2} \quad (9)$$

其中  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\mu_1$  和  $\mu_2$  为 Lamé 常数,  $c_1$ 、 $c_2$  和  $b_1$ 、 $b_2$  分别为纵波和横波速度,  $(i, j)$  和  $(n)$  分别为空间和时间的指标。在流体内部不存在横波, 即  $B_1 = \infty$ 。分界面上介质的顺性系数和惯性系数(密度)为:

$$C_{12} = \frac{1}{2}(C_1 + C_2) = \frac{\rho_1 c_1^2 + \lambda + 2\mu}{2\rho_1 c_1^2(\lambda + 2\mu)} = \frac{\rho_1 c_1^2 + \rho_2 c_2^2}{2\rho_1 c_1^2 \rho_2 c_2^2} \quad (10)$$

$$B_{12} = \frac{1}{2}(B_1 + B_2) = \infty \quad (11)$$

$$\rho_{12} = \frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2) \quad (12)$$

不难看出, 只要初始时刻  $T_{xx} = T_{yy}$ ,  $T_{xy} = 0$ , 则在递推中这两个等式将保持成立。同时考虑到  $\lambda = \rho c^2$ , 这些公式即简化为流体中声波的 FDTD 表达式<sup>[1]</sup>。

根据式(1)~式(5)和适当的吸收边界条件, 可通过时、空间的多重循环求得声场分布。

### 3 散射特性数值计算

目标强度  $TS$  是指距离散射体中心 1m 处的反向散射声压级超过向该散射体入射平面波声压级的差值。由于在实际测量目标强度时, 换能器到目标的距离是有限的, 对于线源, 入射波以柱面扩散; 如目标长度足够长, 则反射波也以柱面扩散。

本项研究的目的是寻求在收发合置情况下, 换能器所接收到的反向散射声压与换能器到目标之间的距离  $r$  之间的关系, 观察从近场到远场的过度特性, 并与水池测量结果进行比较, 从而为水下目标强度测量方法提供参考。

对于三维模型, FDTD 的计算复杂度通常超出一般计算机的能力, 因而需要在并行计算平台上才能完成, 这一工作有待于进一步研究。本文采用二维近似加上几何修正的方法, 将数值计算分为 FDTD 计算和几何扩散修正两个步骤。

#### 步骤 1: FDTD 计算

选取计算域尺寸为  $10\text{m} \times 10\text{m}$ 。先假设目标为无限长的圆柱体, 直径 5m, 目标轴线距海面 5m; 设声源为无限长线源, 产生连续正弦波, 频率为 1500Hz。入射波到达目标后被散射, 用 FDTD 方法计算出散射波折合到距目标中心 1m 处的反向散射声压  $P_s$ 。

改变声源至目标中心的距离  $r$ , 再计算出相应的  $P_s$  值, 便得到  $P_s$  与  $r$  的关系。在计算中, 先令声源一侧的区域边缘上入射声压幅度为 1, 其相位分布则根据实际声源所处位置按几何扩散规律计算得到。入射波的实际幅度需要在下一步根据球面扩散规律进行修正。

在分析海面影响时,假设海面波浪为正弦波,波长 4m,浪高分别取 0m(无风浪)、0.4m、0.8m。图 1 分别画出了在无海面影响(自由场)以及有海面影响时声压级  $P_s$  与  $r$  的关系(本文仅考虑相对值,参考声压级是任选的。)

### 步骤 2: 几何扩散修正

若入射波和散射波均为柱面扩散,将图 1 的结果折合成到距离目标中心  $r$  处的目标强度与  $r$  的关系如图 2 所示。

实际声源位于足够远处时可看作点源,则入射波作球面扩散,这样得到距目标  $r$  处的散射波声压级与  $r$  的关系,如图 3 中所示。

若考虑目标为有限长弹性圆柱体,可近似认为散射波介于球面扩散和柱面扩散之间,此时需对图 3 的结果再作一些小的修正。

由图 1 可看出,当距离很近时接收到的散射波强度随距离的变化无确定规律,而在距离大于 200m

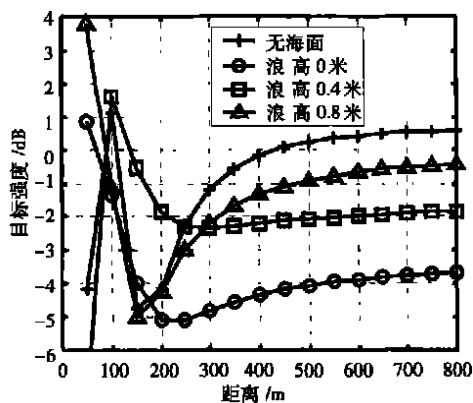


图 1 散射波声压级与声源至目标距离  $r$  的关系(仅考虑了几何扩散对入射波相位的影响,未考虑几何扩散对入射波和散射波幅度的影响。)

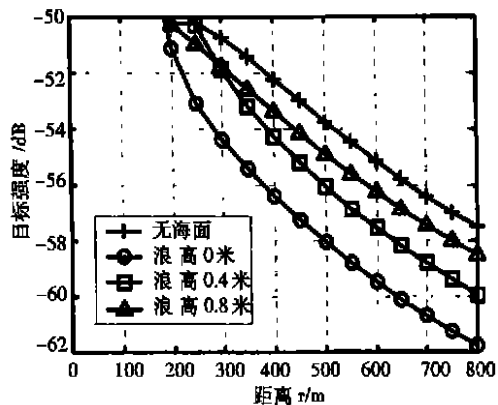


图 2 散射声压级与  $r$  的关系(对入射波和散射波均作柱面扩散修正)

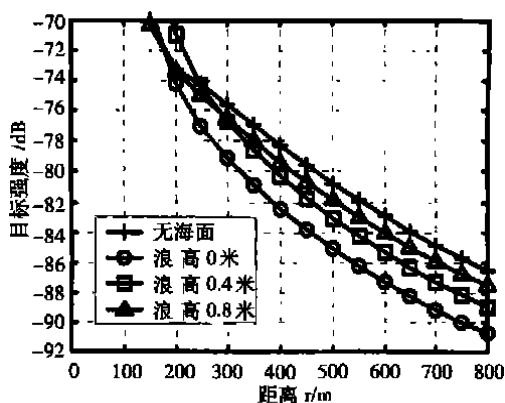


图 3 散射声压级与  $r$  的关系(对入射波和散射波分别作球面和柱面扩散修正。)

时开始呈现规律。从数值计算的角度看,这是因为在近场条件下照射目标表面的入射波相位分布会随距离发生较大的变化。此结果也可在目标散射特性测量中为距离的选取提供参考。

图 2 和图 3 给出  $r$  增加时接收声压的下降规律。当  $r$  很大时,目标强度下降趋缓,且与  $r$  基本呈线性关系。在图 2 中,当  $r$  增加 1 倍时,反射声压强度降低约为 6dB。而在图 3 中,当  $r$  增加 1 倍时,反射波声压下降约为 8dB~9dB。

计算结果还表明,海面影响使接收的散射声压级升高,浪大则影响加大,但随距离衰减的规律大致不变。

图 4~ 图 6 给出水池测量结果,所用的目标模型 1 和模型 2,是尺寸不一的椭球体。目标与水面距离为 3m 或 0.5m,测量中所用的声波频率均为 400kHz。实验结果表明,无论是模型 1 还是模型 2,在远场,当换能器与目标之间的距离  $r$  增加时,测得的散射声压级呈线性下降趋势。当  $r$  增加 1 倍时,测得反射声压强度降低约 8dB,与 FDTD 经球面-柱面修正后所得结果相印证。

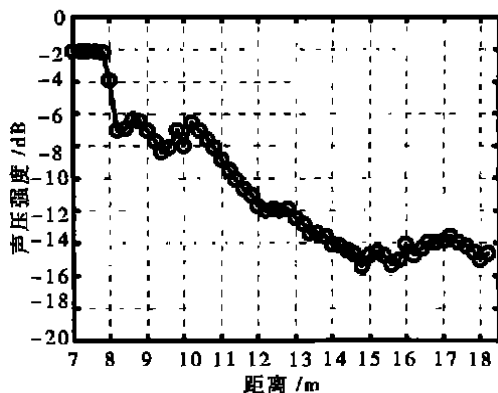


图 4 模型 1 实验数据(距离水面 3m)

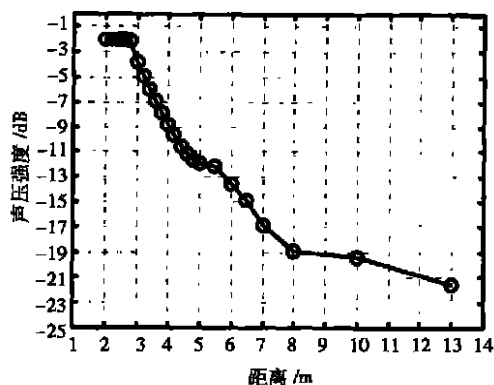


图5 模型2实验数据(距离水面3m)

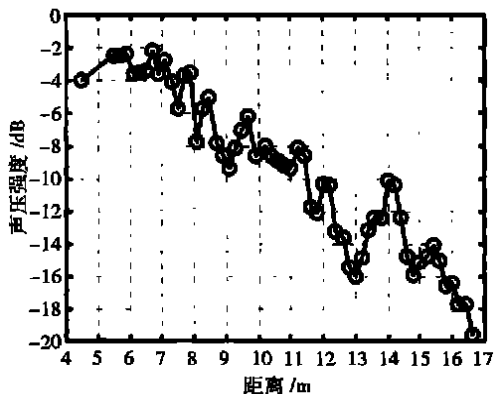


图6 模型1实验数据(目标距离水面0.5m)

## 4 结论

用时域有限差分同步算法和近场-远场变换可计算水下声目标的反向散射特性。采用二维近似和几何扩散修正能得到与水池测量数据可比的结果。实验中目标采用椭球体,与FDTD计算所用的二维模型存在明显差异。由于几何扩散修正部分地补偿了散射场与二维模型的差别,在距离目标不很远处用FDTD得到了和实验可比的结果。更精确的结果有待于在并行计算平台上采用三维模型得到。

基于FDTD数值计算结果和水池实验,本文归纳以下几点作为水下目标特性测量时参考:

(1) 在近场,照射到目标上的入射波相位变化较大,散射强度随距离的变化缺乏规律(见图1)。当 $r$ 超过200m时,折合到距声目标中心1m处的声压强度的变化趋于稳定,曲线渐平坦。

(2) 折合到换能器处的声压强度随着 $r$ 的增大而降低。当 $r$ 大于200m时,下降近似呈线性;经球面-柱面扩散修正后,距离增大1倍,散射声压级下降8dB~9dB,与实验结果可比(见图3)。

(3) 海面对反向散射测量会有影响,但一般说来只要海面距目标不是太近,对相对声压级的测量影响不会太大,远场的声压强度随 $r$ 的变化规律与自由场基本一致。需要指出,这里仅考虑了计算域内局部海面的影响。对于无限大的平静海面,有可能基于声源镜象的影响得到更为准确的结果,而对于有波浪的复杂情况则有待于从海面建模出发作进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] Wang S. Finite-Difference Time-Domain Approach to Underwater Acoustic Scattering Problems [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1996, 99(4): 1924-1931.
- [2] Liu Q H, Schoen E, Daube F, Rabdall C, Liu H, and Lee P. A Three Dimensional Finite-Difference Simulation of Sonic Logging[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1996, 100(1): 72-79.
- [3] 汪彤,王期中.对透声界面的时域有限差分处理[J].应用科学学报,1999,17(3):289-295.
- [4] 王期中.弹性体对声波散射的时域有限差分一致性表达式[J].中国学术期刊文摘,1998,4(4):477-479.
- [5] 王期中,汪彤.用时域有限差分法计算透声目标的散射声场[J].声学技术,1998,17(1):2-5.
- [6] Wang S. An Efficient Absorbing Boundary for Finite-Difference Time-Domain Field Modeling in Acoustics[J]. Chinese Journal of Acoustics, 1997, 16(2): 121-134.
- [7] Stephen R A. Modeling Sea Surface Scattering by Time-Domain Finite-Difference Method[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1996, 100(4): 2070-2078.
- [8] Hastings F D, Schneider J B, and Broschat S L. A Finite-Difference Time-Domain Solution to Scattering from a Rough Pressure-Release Surface [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1997, 102(6): 3394-3400.

### ·简讯·

## 《声学技术》编委会会议纪要

《声学技术》于2002年12月27日,在中船重工集团726研究所召开了编委会,编委们在百忙之中都出席了会议。

会上,大家对于期刊的国际化网络化问题进行了讨论,一致认为:为了使期刊冲出国门,走向世界,增进国际交流,展示我国声学界的科技成果,参与国际竞争;也为了争取世界范围内高水平的科研人员的支持,以获得高质量的科学论文,更快地提高期刊的质量,在促进声学科技繁荣昌盛的过程中发挥作用。会议决定今年出版壹期英文版增刊[2003年英文版增刊],约64页(16开),出版时间约为2003年12月份,欢迎广大的声学工作者踊跃投稿。

丁玉薇