第48卷第4期
2008年7月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 48, No. 4
July 2008

船舶、土木工程

文章编号：1000-8608(2008)04-0528-05

浅海波导中椭球体声散射特性研究

姜　琳，赵德有*

（大连理工大学 船舶工程学院，辽宁 大连　116024）

摘要： 利用边界元法研究了三维海洋波导中声波与椭球散射体相互作用问题. 分析了海洋波导中声波与结构体相互作用的声散射特性，包括声压在水平断面和垂直断面的分布特点. 数值分析表明：浅海中椭球体的散射特性与自由场中明显不同，当椭球体按照一定比例变化时，其散射声压变化规律会近似于球体而声压幅值低于球体，这对于浅海中非规则目标散射特性的研究是非常重要的. 浅海波导对散射目标有显著的影响.

关键词： 浅海波导；声散射；边界元法

中图分类号： TB53　　**文献标志码：** A

0　引　言

浅海是水下活动中具有最重要战略地位的区域，受到军事和民用的广泛关注. 浅水中海洋表面和海底对声传播的影响不可忽视，尤其是声波与浅水中散射体相互作用问题更加值得重视. 早在20世纪50年代学者们便开始了目标声散射问题研究，发展了大量的研究方法，如积分方程法、T-矩阵法、有限元法、边界元法以及共振散射理论等. 自由场中刚性球的散射特性已经有很多研究，而将目标散射特性与浅海特性相结合的研究始于20世纪80年代中期. Kravtsov 等采用WKB近似来得到非均匀波导中的散射场. Ingenito[1]利用格林函数并将入射声场写成简谐波的形式，研究了分层介质中刚性球的目标散射场. 在此基础之上，Perkins 等[2]利用绝热近似理论对其进行了扩展，能够计算声源和接收器到目标距离比波导厚度大很多的目标散射情况. Collins等[3]利用抛物线研究了目标的三维散射，对于距离相关的散射得到了较好的结果. Athanassoulis等[4]利用分离变量法推导了浅海中柱岛的散射声场，计算了不同边界条件下柱岛的散射特性. Makris 等[5,6]利用频谱法对目标被动探测和定位做了大量的研究，利用波数积分给出了分层介质中球的散射场计算公式，并研究了目标散射过程中的能量损失. 王桂波等[7]在 Ingenito 特征函数基础上，对浅海波导中的刚性球散射特性做了一定的研究；汤渭霖[8]将物理声学方法用于界面附近目标回波的分析，考虑了海底对目标声散射回波的影响. 赵洪等[9]利用 Kirchhoff 积分公式研究了不同界面附近柱目标的散射. 潘文峰等[10]基于伽辽金变分原理和 DtN 映射方法发展了声散射问题的一种有限元数值求解方法，提出了相对有效的数值实现手段.

以上的研究中大部分工作均以规则的刚性球或者规则柱岛为研究对象，而对浅海波导中不同形状的球体目标散射特性研究较少. 为此，本文利用浅水域的声学边界元方程计算不同长、短轴比的球状体散射特性，对浅水波导中复杂结构的散射特性进行一定的探索.

1　浅水域声学边界积分方程

考虑一实际结构在浅水域中的散射问题，如图1所示，其中流体为理想介质，因此流体域内的声压 p 应该满足如下方程：

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \tag{1}$$

$$p = p_i + p_s \tag{2}$$

收稿日期： 2006-05-20；　**修回日期：** 2007-11-20.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(54079060).
作者简介： 姜　琳(1979-)，男，博士生，E-mail：jlzha@163.com；赵德有*(1935-)，男，教授，博士生导师.

式中：p_i 为入射波，p_s 为散射波. 采用加权残值法可得 Helmholtz 积分方程：

$$C(P)p(P)=\int_s\left(p(Q)\frac{\partial G}{\partial \boldsymbol{n}}(P,Q)-G(P,Q)\frac{\partial p}{\partial \boldsymbol{n}}\right)\mathrm{d}S(Q)+4\pi p_i(P) \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{n}$ 为物面 s 上指向流体域的单位法向量，$C(P)$ 参见文献[11].

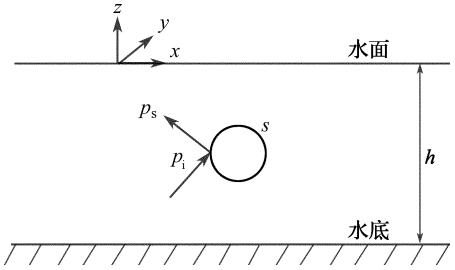

图 1　浅水散射问题示意图

Fig. 1　Scattering sketch for a shallow water problem

假设水面和水底为理想边界条件，相应的边界条件可以写成[12]

$$p=0(\text{水面});\ \partial p/\partial z=0(\text{水底}) \tag{4}$$

散射声压 p_s 还必须满足 Sommerfeld 辐射条件：

$$\lim_{r\to\infty}\left[r\left(\frac{\partial p_s}{\partial r}-\mathrm{i}kp_s\right)\right]=0 \tag{5}$$

满足方程(1) 和方程(4) 的特解为[13]

$$G(P,Q)=\sum_{l=0}^{\infty}(-1)^l\left(\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kR_{l1}}}{R_{l1}}+\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kR_{l2}}}{R_{l2}}-\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kR_{l3}}}{R_{l3}}-\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kR_{l4}}}{R_{l4}}\right) \tag{6}$$

其中

$R_{l1}=2lh+z_P-z_Q$，$R_{l2}=2(l+1)h+z_P+z_Q$，$R_{l3}=2lh-z_P-z_Q$，$R_{l4}=2(l+1)h-z_P+z_Q$

z_P 和 z_Q 分别为场点和源点的坐标，h 为水深.

$$R_{li}=\sqrt{r^2+Z_{li}^2}\ (i=1\sim 4) \tag{7}$$

对于源点 P 和场点 Q 的水平距离：

$$r=\sqrt{(x_P-x_Q)^2+(y_P-y_Q)^2} \tag{8}$$

利用边界元方法对方程(3) 进行离散求解，可以得到 L 个节点上的压力值的线性方程，用矩阵表示为

$$\boldsymbol{Ap}=\boldsymbol{Bv}+\boldsymbol{p}_i \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{A}$ 为 $L\times L$ 阶方阵；$\boldsymbol{p}$ 为 L 维向量；$\boldsymbol{B}$ 为 $L\times N$ 阶矩阵；$\boldsymbol{v}$ 是声压的法向导数，为 N 维向量；$\boldsymbol{p}_i$ 为 L 维向量，文中采用改进的 CHIEF 点法解决特征频率处解的不惟一性[14].

2　浅水域散射边界元程序[15]的验证

为验证程序的正确性，以柱岛为例(边界元网格如图 2)，同文献[4]的解析解进行了比较. 相关参数：柱岛半径 $r=1$ m，高 $h=2$ m，水密度1 000 kg/m^3，水中声速1 500 m/s，点声源位置 $x=10$ m，$y=0$，$z=-1.0$ m，声源幅值为 1 Pa，计算场点为 $x=3$ m，$y=0$，$z=-1.0$ m 的散射场声压随频率变化(如图 3 所示)以及沿水深方向的散射场声压分布(如图 4 所示). 计算结果表明边界元程序的计算结果与解析结果吻合较好.

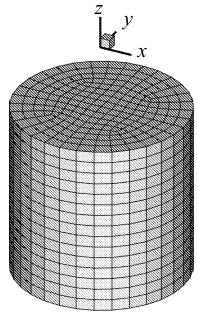

图 2　柱岛的边界元网格

Fig. 2　BEM grids for a cylindrical island

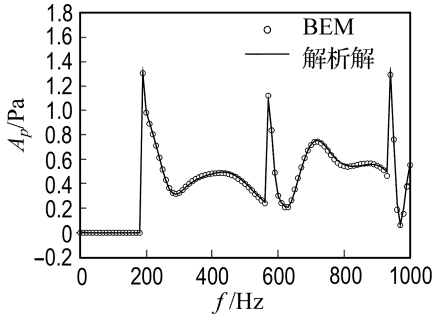

图 3　柱岛散射场声压

Fig. 3　Pressure in the scattering field for the rigid cylindrical island

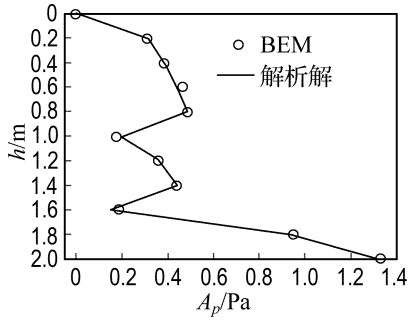

图 4　柱岛散射场声压沿水深方向的分布($f=940$ Hz)

Fig. 4　Pressure along z direction in the scattering field of the rigid cylindrical island ($f=940$ Hz)

3 椭球体的声散射数值计算

3.1 椭球尺寸对散射场的影响

为探讨球体比例变化对散射场的影响，本文计算 5 种不同比例椭球体的散射. 假设球体沿 x、y、z 三个方向的直径分别为 a、b、c，其基本尺寸列于表 1.

表 1 椭球体的计算尺寸

Tab. 1 Dimension for ellipsoid m

计算种类	a	b	c
球体 I	1.0	1.0	1.0
椭球体 II	1.0	0.5	0.5
椭球体 III	1.0	0.5	0.2
椭球体 IV	1.0	0.2	0.2
椭球体 V	1.0	0.1	0.1

计算水深依然取 2 m，建立直角坐标系 $Oxyz$，使 xOy 平面位于海平面，Oz 轴垂直向下，球体中心所对应的坐标为(0，0，−1). 点声源位置取 $x=5$ m，$y=0$，$z=-1.0$ m，其余计算参数与第 2 章完全相同. 假设球体表面速度为零，并位于波导正中心，以1 000 Hz 为例，比较椭球体与圆球体散射特性. 计算场点($x=-1.5\sim1.5$ m，$y=0$，$z=-0.4$ m). 球体的单元划分见图 5 和图 6.

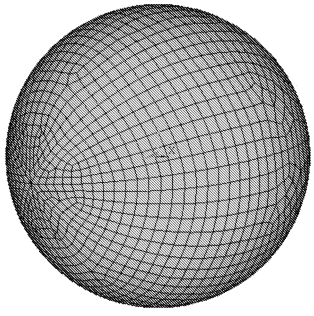

图 5 球体的边界元网格

Fig. 5 BEM grids for a sphere

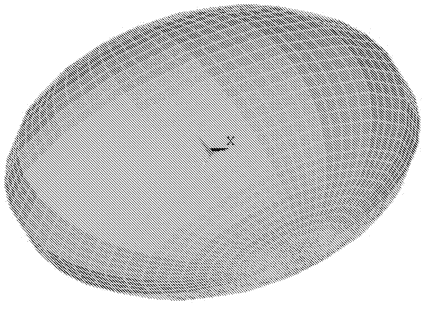

图 6 椭球体的边界元网格

Fig. 6 BEM grids for an ellipsoid

图 7 是不同椭球体与球体在水平断面上散射声压的比较. 从图中可以看出，对于 $a:b:c=1:1:1$的圆球体来说，球体正面场点会产生波动声压，距离球体越近，声压越大. 图 7(a)是 $a:b:c=2:1:1$ 的椭球体与圆球体的声压幅值比较，结果发现，正面波动声压的变化规律与圆球体有所不同，该种椭球体所产生的声压峰值范围稍大，而且较平. 而当 $a:b:c=10:5:2$ 时，在椭球体正面附近的声压波动会更大一些，而背面的散射声压比球体略低一些，如图 7(b)所示. 图 7(c)是当 a 保持不变，$a:b:c=5:1:1$ 时，椭球体与圆球体的散射声压幅值的比较. 结果表明，这种比例的椭球体正面及背面的散射声压与球体极其相似，且幅值低于球体，对于浅海中目标散射特性的作用是不言而喻的. 图 7(d)是 a 保持不变，$a:b:c=10:1:1$ 时椭球体与圆球体散

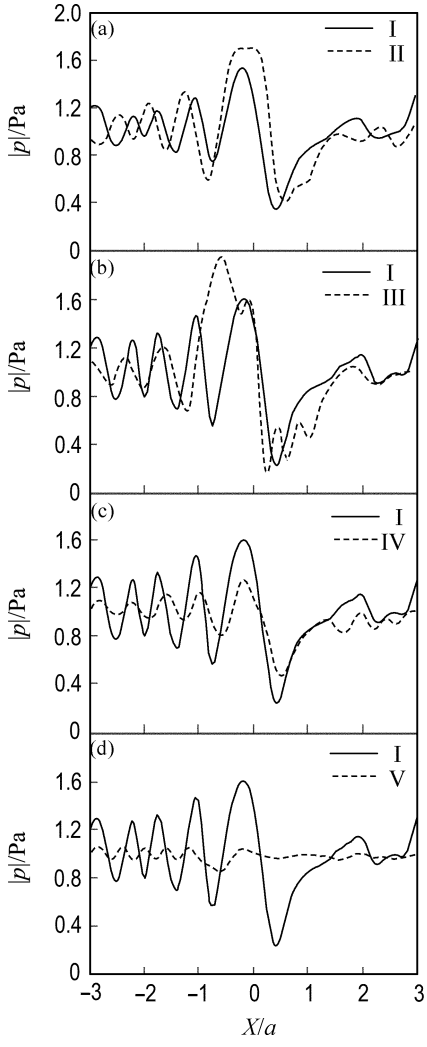

图 7 椭球体散射场在水平断面上的传播特征

Fig. 7 The horizontal propagation characteristics of the scattering field for the ellipsoids

射声压的比较，计算结果表明，由于此时椭球体的体积缩小，散射声压的幅值波动变得非常小，而球体背后的散射声压变化也趋于平稳. 因此，在进行水下结构设计时，应按照一定比例设计水下结构，尤其在浅水域中有效地控制散射效果.

3.2　水深对散射场的影响

图 8 反映的是不同比例的椭球体沿水深方向的散射场传播特征图. 计算结果表明，在沿水深方向上，各种椭球体的散射声压也有较大差别，散射声压峰值出现的位置较难确定. 原因有两方面：其一是由于结构的形状不同，散射声压不同；其二是由于浅水对结构散射目标的相干效应.

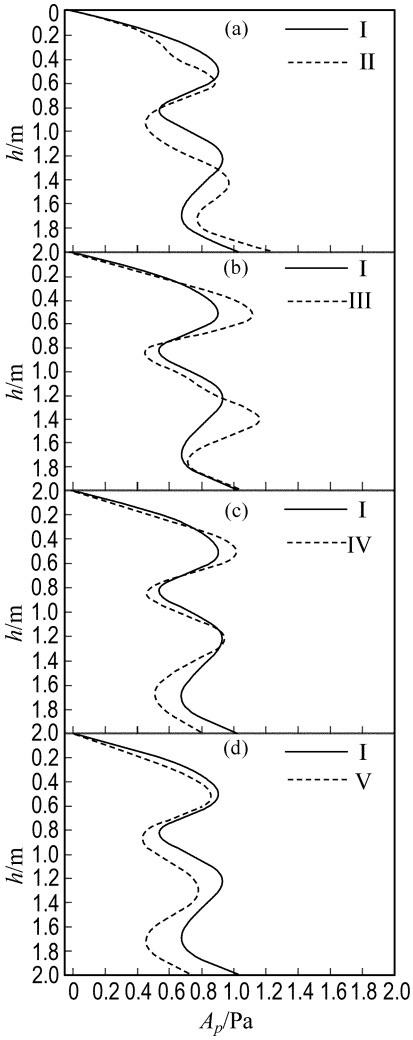

图 8　椭球体散射场在垂直断面上的传播特征

Fig. 8　The vertical propagation characteristics of the scattering field for the ellipsoids

以第 IV 种椭球为例，对不同波导厚度下（即 $h=2,20,100$ m）目标的散射特性进行计算（不考虑水声信道影响），如图 9 所示. 计算结果表明水深对散射影响较大，20 m 水深的计算结果与 100 m 水深的计算结果较为接近，原因在于：当波导的厚度无限大时，海底及海面的边界条件对结构的散射影响就会变得微弱，此时可以近似理解为自由场目标散射，目标的散射场也就不再相干. 当水深为 100 m 时，其深度已为椭球长轴的 100 倍，其散射声压依然有所变化，可见浅海对散射波幅是有着显著影响的.

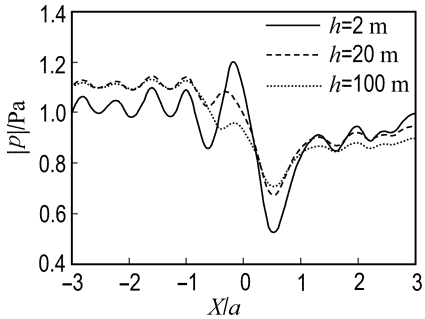

图 9　不同波导厚度下椭球体散射特征曲线

Fig. 9　Scattering characteristics of the ellipsoids with different thickness of the wave-guide

图 10 给出了水深为 2 m 椭球体的散射场分布. 声压计算点位于 xOz 平面内目标与声源之间一侧（仅考虑一次反射），90°和 270°分别对应的坐标为（0，0，0）、（0，0，−2），计算半径为 1 m. 计算结果表明：浅水域中椭球体散射场空间分布比较复杂，由于边界条件的影响，指向性非对称分布，水底（硬边界）的指向要比水面（软边界）的指向大，目标离海底越近散射声压越大.

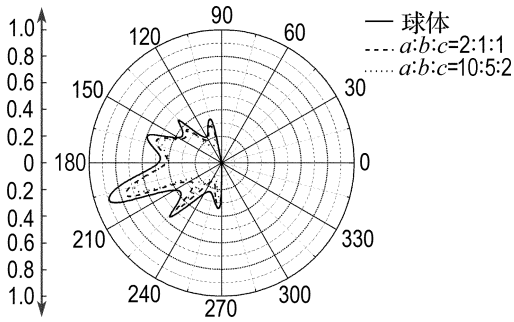

图 10　椭球体散射场分布（$f=1\ 000$ Hz、$r=2$ m）

Fig. 10　Sound field distribution for ellipsoid when $f=1\ 000$ Hz and $r=2$ m

4　结　论

（1）球体正面会产生较大的波动声压；在浅水中，不同比例椭球体产生的声压差别较大. 椭

球体的体积按照一定比例改变,会有效地改变散射声压幅值的波动范围. 以本文的算例为例,当椭球的尺寸为 $a:b:c=5:1:1$ 时,椭球体正面及背面的散射声压变化规律与球体相似,幅值低于球体,这对于浅海中目标散射特性的研究是非常重要的.

(2)由于受到浅水波导的影响,目标的散射场会有一定的相干性,当波导的厚度增大时,海底及海面的边界条件对结构的散射影响会变得微弱.

以上是浅海波导中椭球体散射特性的部分工作,将结构考虑为弹性体以及不同水底阻抗边界条件对椭球体的声散射影响,将在下一步工作中进行. 合理设计水下结构,控制其在浅水域中散射特性是未来研究发展的方向.

参考文献:

[1] INGENITO F. Scattering from an object in a stratified medium [J]. **Journal of Acoustic Society of America**, 1987, **82**(4): 2051-2059

[2] PERKINS J S, KUPERMAN W A, TINKER L E, *et al*. Active matched field processing[J]. **Journal of Acoustic Society of America**, 1992, **91**(4): 2366-2378

[3] COLLINS M D, WERBY M F. A parabolic equation model for scattering in the ocean [J]. **Journal of Acoustic Society of America**, 1989, **85**(3): 1895-1902

[4] ATHANASSOULIS G A, PROSPATHOPOULOS M. Three-dimensional acoustic scattering of a source-generated field from a cylindrical island [J]. **Journal of Acoustic Society of America**, 1996, **100**(4): 206-218

[5] MAKRIS N C, INGENITO F, KUPERMAN W A. Detection of a submerged object insonified by surface noise in ocean wave-guide [J]. **Journal of Acoustic Society of America**, 1994, **96**(3): 1703-1724

[6] MAKRIS N C. A spectral approach to 3-D object scattering in layered media applied to scattering from submerged spheres [J]. **Journal of Acoustic Society of America**, 1998, **104**(4): 2105-2113

[7] 王桂波,彭临慧. 浅海波导中刚性球声散射特性研究[J]. 中国海洋大学学报,2005,**35**(3):515-520

[8] 汤渭霖. 用物理声学方法计算界面附近目标的回波[J]. 声学学报,1999,**24**(1):1-5

[9] 赵 洪,徐海亭. 消声瓦声参数匹配与水下目标的回波消声效果预报[J]. 声学技术, 2000,**19**:222-235

[10] 潘文峰, 尤云祥, 缪国平. 二维海洋波导中Helmholtz方程外问题数值解的有限元法[J]. 上海交通大学学报,2006, **40**(11): 2003-2008

[11] WU T W. On computational aspects of the boundary element method for acoustic radiation and scattering in a perfect waveguide [J]. **Journal of Acoustic Society of America**, 1994, **96**(6): 3733-3743

[12] 刘伯胜,雷家煜. 水声学原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社,1993

[13] 布列霍夫斯基赫 Л M. 分层介质中的波:第2版[M]. 杨训仁译. 北京: 科学出版社, 1985

[14] WU T W, SEYBERT A F. A weighted residual formulation for the CHIEF method in acoustics [J]. **Journal of Acoustic Society of America**, 1991, **90**(3): 1608-1614

[15] 邹元杰,赵德有. 结构在浅水中的振动和声辐射特性研究[J]. 振动工程学报, 2004,**17**(3): 269-274

Study of acoustic scattering from ellipsoids in shallow water wave-guide

JIANG Lin, ZHAO De-you*

(School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The interaction of acoustic wave with the scattering ellipsoids object in an ocean wave-guide was examined by using boundary element method (BEM). The experimental scattering characteristics of the acoustic wave by an obstacle were considered, including the horizontal and vertical propagation characteristics of the sound pressure for the ellipsoids. The results show that the scattering characteristics of ellipsoids in shallow water are different from those in infinite field. The scattering pressure made by ellipsoids is similar and lower than that made by sphere when the ellipsoids scale is appropriate. The result is very significant to research into the scattering characteristics of irregular objects in shallow water. The effect of scattering characteristics by an obstacle in shallow water wave-guide is prominent.

Key words: shallow water wave-guide; acoustic scattering; BEM