

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.10.015

基于奇异积分处理技术的低频声散射特性仿真

徐忠昌, 周泽渊

(海军工程大学理学院, 武汉 430033)

摘要: 针对水下复杂条件下难以远程探测目标的问题, 运用基于奇异积分处理技术的低频声散射数值计算方法, 对目标低频散射特性进行仿真研究。仿真实验给出刚性球的目标强度随分置角、接收点到目标中心的距离、声阻抗等不同物理参数的变化关系图, 揭示目标低频声散射的一些近场特性。结果表明: 新方法可较方便地用于双基地声纳、目标低频散射特性等方面的相关研究。

关键词: 奇异积分; 等价面元方法; 回声强度; 声散射; 分置角; 声阻抗

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Simulations of Acoustic Scattering at Low Frequency Based on Technique of Singularity-Integral Processing

Xu Zhongchang, Zhou Zeyuan

(College of Science, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at the problem of difficult to long-distance detect object in underwater condition, study on its scattering characteristic of object low frequency, using simulations mathematical method of acoustic scattering at low frequency based on of singularity-integral processing technique. Through simulating, we calculated echo strength which is under circumstances of different azimuths, positions of receiver and acoustic impedance. At the same time, we plot direction diagram of acoustic scattering at different wave number radii. The results demonstrate that the proposed new method can be used to the research of bistatic sonar and the scattering characteristics of complicated objects at low frequencies.

Keywords: singular integral; equivalent facet method; echo strength; acoustic scattering; azimuth; acoustic impedance

0 引言

随着近代水声对抗、舰艇隐身等技术的发展, 水下复杂目标的远程探测变得越来越困难, 使得声纳的探测能力受到了严重挑战。一方面, 吸声材料的出现降低了主动声纳的作用距离; 另一方面, 潜艇降噪技术的发展, 也使得被动声纳的探测范围大大减小^[1]。水下目标的低频回波包含着丰富的目标信息(如体积、形体轮廓等具体信息), 而且低频水声信号能得到更为有效地传播。在研究复杂目标的低频散射特性时, 常用的一种方法是边界元法。在用边界元法求解低频散射声场时, 理论上会不可避免地出现奇异积分与近似奇异积分的难题。边界元法要达到高效、精确, 寻找处理奇异积分与近似奇异积分的有效技术就显得尤其重要。

声散射边界元分析中的奇异积分处理常用的方法有等价面元方法^[1-3]、修改的边界积分方程法^[4]、有限部分方法等^[5-6]。这些方法都有各自的特殊性, 普适性较差; 同时, 在目前应用边界元法解决声散射计算问题的文献中, 大部分的方法中都没有涉及

到近似奇异积分的处理。

文献[7-9]中提出了一种基于奇异值提取技术的处理奇异积分与近似奇异积分的新方法, 该技术采取解析积分的策略, 利用基于奇异值提取技术的高斯积分技巧, 通过引进局部坐标系与合适的坐标变换, 将奇异积分的计算转化为在局部坐标系内的积分面元上计算沿边界的曲线积分, 最终给出了奇异积分与近似奇异积分的数值计算公式, 从而实现了 Helmholtz 表面积分方程积分分解的数值计算。文献[9]中通过理论验模, 仿真结果表明, 新方法与解析值取得了较好的一致性。文献[10]通过仿真试验表明, $ka < 3$ 时, 新方法的仿真结果与解析值以及等价面元方法取得了较好的一致性, 而 $ka \geq 3$ 时, 新方法的仿真结果要好于等价面元方法。

因此, 笔者在已有工作的基础上, 对水下目标散射声场中一些物理参数进行相关的仿真试验, 进一步讨论目标低频散射的一些近场特性。

1 奇异积分的数学处理技术

文献[1]中给出了平面波入射声场为

收稿日期: 2011-06-01; 修回日期: 2011-07-04

基金项目: 国家部委基金资助项目(4010501010102)

作者简介: 徐忠昌(1969—), 男, 江苏人, 博士研究生, 副教授, 从事声散射建模及仿真计算研究。

$$p_{inc}(x, y, z, t) = p_0 e^{-j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{R})} = p_0 e^{-j(\omega t - kx \cos \alpha \sin \beta - ky \sin \alpha \sin \beta - kz \cos \beta)}$$

其中: p_0 为入声波声压的幅值; ω 为入射声波的角频率; $k = \frac{\omega}{c}$ 为波数; c 为水中声速; \vec{R} 为坐标原点到 Σ 上任意点 (x, y, z) 处的矢径; α, β 分别表示入射声波的方位角、极角。

通过对目标表面进行边界元分析以及简单推导后, 可得目标的散射声场为

$$\begin{aligned} & \left(2\pi + \frac{j\omega\rho}{Z} \iint_{\Sigma} \frac{e^{jkr}}{r} dS \right) p_{sca}(M_i) + \\ & \sum_{l \neq i} \iint_{\Sigma_l} \left[\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{jkr_l}}{r_l} \right) + \frac{j\omega\rho}{Z} \frac{e^{jkr_l}}{r_l} \right] p_{sca}(M_l) dS = \\ & - \iint_{\Sigma} j p_{inc} \frac{e^{jkr}}{r} \left[\frac{\omega\rho}{Z} + k(\cos \alpha \sin \beta \cos \theta_1^i + \right. \\ & \quad \left. \sin \alpha \sin \beta \cos \theta_1^2 + \cos \beta \cos \theta_1^3) \right] dS \end{aligned} \quad (1)$$

写成矩阵形式

$$A\mathbf{u} = B\mathbf{p} \quad (2)$$

其中

$$A = (a_{il}), a_{il} = \begin{cases} \iint_{\Sigma_i} \left[\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{jkr_i}}{r_i} \right) + \frac{j\omega\rho}{Z} \frac{e^{jkr_i}}{r_i} \right] dS, & i \neq l \\ 2\pi + \frac{j\omega\rho}{Z} \iint_{\Sigma_i} \frac{e^{jkr_i}}{r_i} dS, & i = l \end{cases}$$

$$B = (b_{il}), b_{il} = -j \left[\frac{\omega\rho}{Z} + k(\cos \alpha \sin \beta \cos \theta_1^i + \sin \alpha \sin \beta \cos \theta_1^2 + \cos \beta \cos \theta_1^3) \right] \iint_{\Sigma_i} \frac{e^{jkr_i}}{r_i} dS$$

$$\mathbf{u} = (p_{sca}(M_1), p_{sca}(M_2), \dots, p_{sca}(M_N))^T,$$

$$\mathbf{p} = (p_{inc}(M_1), p_{inc}(M_2), \dots, p_{inc}(M_N))^T$$

在矩阵方程 (2) 中, 涉及到 $\iint_S \frac{1}{r} dS$ 与 $\iint_{\Sigma} \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS$

两类奇异积分的处理。文献[7-8]中, 提出了一种基于奇异值提取术的奇异积分处理技术,

引理 1.1^[7]

$$\iint_S \frac{1}{r} dS = \sum_i t_i^0 \ln \frac{s_i^+ + R_i^+}{s_i^- + R_i^-} - |w_0|$$

引理 1.2^[8]

$$\iint_{\Sigma} \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS = \sum_i \ln \frac{R_i^+ + s_i^+}{R_i^- + s_i^-} \hat{m}_i + \text{sgn}(w_0)$$

$$\left[\sum_i \left(\arctan \frac{t_i^0 s_i^+}{(R_i^0)^2 + R_i^+ |w_0|} - \arctan \frac{t_i^0 s_i^-}{(R_i^0)^2 + R_i^- |w_0|} \right) \right] \hat{w}$$

2 仿真研究

笔者就与目标强度紧密相关的几个物理参数, 对半径为 1 的刚性球进行数值仿真, 从而加深对目标低频散射机理的理解与认识。

2.1 分置角

分置角定义为接收点到目标中心的连线与入射声波的夹角。现对半径为 1 m 的刚性球在不同方向上目标强度的分布进行仿真实验, 考虑入射声波的频率为 $f=1000$ Hz, 入射声波的方位角为 $\alpha=0^\circ$, 入射声波的极角为 $\beta=90^\circ$, 经计算得到刚性球在 $0 \sim 360^\circ$ 范围内的目标强度的直角坐标图 ($r=50$ m), 参见图 1。

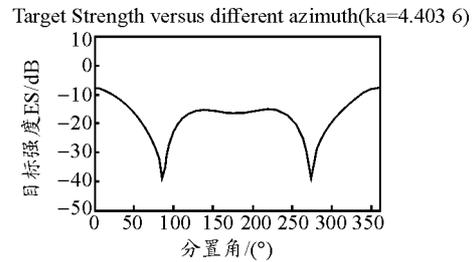


图 1 入射声波频率为 1000 Hz 时的目标强度变化图

由图 1 可以看出, 刚性球的目标强度值关于入射方向呈现出很好的对称性。进一步, 在 0° 方向上, 目标强度值达到最大; 而在 90° 与 270° 方向上, 目标强度值达到最小。

2.2 接收点到目标中心的距离

设入射声波的方位角为 $\alpha=0^\circ$, 极角为 $\beta = \frac{\pi}{2}$,

接收点均位于入射方向, 入射声波的频率为 ka 分别为 0.860 7、1.721 4、4.303 6、8.607 1 时, 考察在 2 种不同的回声强度定义下, 刚性球目标回声强度 ES 与 r 的定量关系。如图 2, 其中图(a)、(b)分别为回声强度声散射远场、近场随接收点到目标中心的距离的变化曲线, 图(c)为剔除回声强度定义中的“距离因子”的影响, 重新定义回声强度为

$$ES = 20 \lg \left| \frac{p_s}{p_i} \right|$$

的条件下, 回声强度随距离变化的曲线。

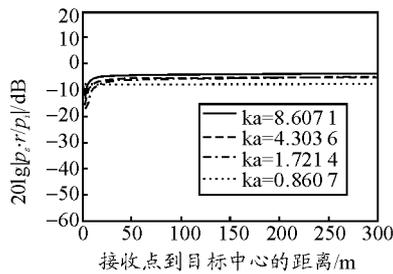
由图 2 (a)大致可以看出, 在平面声波的入射下, 随着 r 的增大, 刚性球目标回声强度

$ES = 20 \lg \left| \frac{p_s}{p_i} \cdot r \right|$ 先是递减, 然后逐渐增大 ($r > 50$ m),

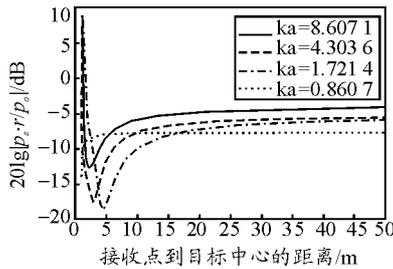
最后趋于某一定值。如果进一步地将近场部分放大,

由图 2 (b) 则可以看到, 在刚性球体声散射的近场中, 回声强度起伏较大。这说明回声强度不同于目标强度只能适用于声散射的远场, 它同时还可描述近场区目标回声的相对强度, 而且在远场区中回声强度等同于目标强度。

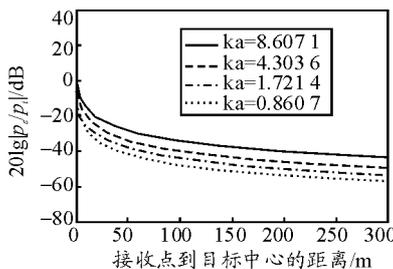
但从图 2 (c) 可以看出, 同样在平面声波的入射下, 随着 r 由小到大的变化, 刚性球目标的回声强度 $ES = 20 \lg \left| \frac{p_s}{p_i} \right|$ 则是单调下降的。这一结论与日常生活经验“越远的地方回声越小”是相一致的。



(a) 远场回声强度随接收点到目标中心的距离的变化曲线



(b) 近场回声强度随接收点到目标中心的距离的变化曲线



(c) 剔除“距离因子”影响后的回声强度

图 2 回声强度 ES 随 r 的变化关系图

2.3 声阻抗

物体的声散射不仅取决于入射声波的频率、接收点到目标中心的距离以及入射声波与接收换能器的分置角, 而且也与散射体的声阻抗有关。设入射声波的频率为 200 Hz, 接收点到目标中心的距离为 10 m, 目标回声强度随声阻抗的变化曲线如图 3。

由图 3 可以看出, 当声阻抗从 1 瑞利变化到 10^8 瑞利时, 目标的回声强度先是下降, 然后上升到某

一值后不再变化。

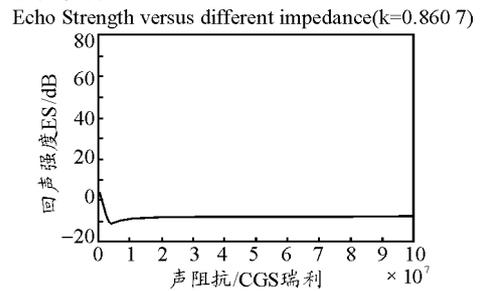


图 3 目标强度随声阻抗变化的直角坐标图

3 结束语

仿真实验给出了刚性球的目标强度随分置角、接收点到目标中心的距离、声阻抗等不同物理参数的变化关系图以及不同波数半径下的目标散射方向性图, 从而揭示了目标低频声散射的一些近场特性。仿真结果表明: 由于新方法给出了目标的散射方向性图, 因而可较方便地用于双基地声纳、目标低频散射特性等方面的相关研究工作。

参考文献:

- [1] 程广利, 张明敏. 双基地声纳目标低频散射特性研究[J]. 海军工程大学学报, 2008, 20(6): 31-34.
- [2] 程广利, 张明敏, 刘成元. Helmholtz 表面积分方程中奇异性解决方法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(5): 1286-1288.
- [3] 程广利, 刘成元, 张明敏. 混合法研究水下刚性目标全波数散射特性[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2009, 33(4): 745-748.
- [4] Nishimura N, Kobayashi S. A regularized boundary integral equation method for elastodynamic crack problems[J]. Computational Mechanics, 1989(4): 319-328.
- [5] Yang S A. On the singularity-free boundary integral equation formulation for two-dimensional acoustic scattering[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 105: 93-105.
- [6] Hwang W S. Hypersingular boundary integral equations for exterior acoustic problems[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 101: 3336-3342.
- [7] 徐忠昌, 吴冬冬. 声场计算中一类奇异积分的数学处理[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(7): 173-176.
- [8] 吴冬冬, 徐忠昌. 关于格林函数梯度的奇异积分处理及其在声场计算中的应用[J]. 佳木斯大学学报: 自然科学版, 2009, 27(5): 752-756.
- [9] XU Zhongchang, WU Dongdong, ZHANG Mingmin. A new method based on treatment of singular integration in computation of acoustic scattering[C]. In: Proceedings of the 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing. 2009, 3: 1560-1564. (EI: 20100212630898)
- [10] 徐忠昌, 周泽渊. 奇异积分处理技术在低频声散射计算中应用[J]. 舰船电子工程, 2011.