

透射边界条件在点声源海底地震波 数值计算中的应用*

卢再华[†] 张志宏 顾建农

(海军工程大学 武汉 430033)

摘要 航行舰船在海底岩土层中引起的弹性波被称为舰船地震波, 主要由舰船低频辐射噪声引起, 可用于识别舰船目标。本文采用大型有限元软件 ANSYS 中的流固耦合计算模块, 结合多次透射公式 (MTF) 人工边界条件, 对较为简单的水平分层海洋环境下低频点声源海底地震波进行了数值计算, 并为了分析数值计算方法的精度, 将数值计算结果与波数积分方法结果进行了比较。频率较低时两种方法的声传播损失曲线符合较好, 频率较高时结果存在一定差别; 两种计算方法所得声传播频率特性曲线的形式有所不同, 但曲线总体变化趋势基本一致; 而海底表面竖直位移、水平位移、竖直加速度和水平加速度的频率特性曲线基本符合。由此认为, 基于多次透射公式人工边界, 采用大型有限元软件 ANSYS 中的流固耦合模块, 对较复杂环境下低频点声源海底地震波问题进行数值计算是基本可行的。

关键词 舰船地震波, 多次透射公式, 点声源, ANSYS, 流固耦合

Application of transmitting artificial boundary in the numerical calculation of seabed seismic wave caused by a point sound source

LU Zai-Hua ZHANG Zhi-Hong GU Jian-Nong

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

Abstract The elastic wave in seabed caused by the low frequency noise of a sailing vessel is often called ship seismic wave that can be used to identify ship target. A numerical calculation of seismic wave in seabed caused by a low frequency point sound source is carried out in this paper by applying the liquid-solid coupled calculating module of ANSYS in combination with the multi-transmitting formula artificial boundary. The results of numerical calculating method are compared with those of the wave-number integration technique in order to evaluate the accuracy of the numerical calculating method. The transmission losses of sound pressure vs. range are well agreed in the two methods when the frequency is relatively lower. Small differences are presented while the frequency is relatively higher. The characteristic curves of acoustic pressure vs. frequency are consistent on the whole in the two methods.

2009-12-01 收稿; 2010-03-31 定稿

*国防基金项目(51303030501), 海军工程大学基金项目

作者简介: 卢再华 (1972-), 男, 江西人, 博士, 副教授, 研究方向为舰船海底地震波。

张志宏 (1964-), 男, 教授, 博士生导师。

顾建农 (1963-), 男, 教授, 硕士生导师。

[†]通讯作者: 卢再华, E-mail: luzaihua01@163.com

Further more, the characteristic curves of displacement and acceleration on the surface of seabed in the frequency domain both in the vertical and the horizontal directions are basically accordant in the two methods. Use of numerical calculating method for simulation of seismic wave in seabed caused by low frequency point sound source is thus reasonable on the basis of the above comparison.

Key words Ship seismic wave, Multi-transmitting formula, Point sound source, ANSYS, Liquid-solid coupled

1 引言

航行舰船在浅海海底岩土层中引起的弹性波被称为舰船地震波, 主要由舰船低频辐射噪声引起, 可用于识别舰船目标^[1-2]。关于舰船海底地震波的波动特征问题, 目前已有的一些理论研究的公开报道。颜冰等采用简正波理论分析了海水层中声压的传播损失和频率特性^[3-4]。卢再华等基于波数积分方法, 通过 FFP 数值积分得到了海底表面声压、位移和加速度的频率特性曲线^[5]。简正波理论和波数积分方法一般基于与横距无关的点声源波动方程, 主要适用于简单的水平分层海洋环境。而实际的浅海地质条件较为复杂, 多数为不均匀厚度分层的楔形浅海环境, 有时海底存在不规则洼地或台地。对于此类地质条件较为复杂的浅海环境, 采用简正波理论和波数积分方法进行分析时, 计算方法相对较复杂。有限差分法和有限元法等数值计算方法能方便地处理不规则的边界条件, 在工程波动问题领域已获得广泛应用。由于舰船地震波问题沿水平方向和竖直向下方向是无限延伸的, 而数值计算模型不可能无限大, 需将原来的无限域截断为有限的波动计算域, 通过在截断边界上设置人工边界条件实现计算。廖振鹏等提出的多次透射公式 (MTF) 人工边界条件对无限域的模拟精度较高, 在许多工程波动问题的数值计算中已获得应用^[6-7]。据此, 本文采用大型有限元软件 ANSYS, 结合多次透射公式人工边界条

件, 对较为简单的水平分层海洋环境下低频点声源海底地震波进行数值计算, 并与波数积分方法结果进行比较, 从而对采用大型有限元软件分析低频点源海底地震波问题的可行性进行初步探讨, 为以后进一步采用大型有限元软件分析地质条件较为复杂的浅海环境低频点声源地震波问题提供理论依据。

2 数值计算方法

大型有限元软件 ANSYS 提供了流固耦合计算模块, 可以对流体介质及其周围固体结构进行建模, 并考虑流体-固体结构相互作用, 因而可用于低频点声源海底地震波的数值计算问题。其有限元控制方程为^[8]:

$$[M_s]\{\ddot{U}\} + [C_s]\{\dot{U}\} + [K_s]\{U\} = \{F_s\} + [R]\{P\} \quad (1)$$

$$[M_f]\{\ddot{P}\} + [C_f]\{\dot{P}\} + [K_f]\{P\} = \{F_f\} - \rho_0[R]^T\{\ddot{U}\} \quad (2)$$

式中, $[M_s]$ 、 $[C_s]$ 、 $[K_s]$ 分别为固体结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $[M_f]$ 、 $[C_f]$ 、 $[K_f]$ 分别为流体介质的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; U 、 P 分别为有限元节点的位移和声压; $\{F_s\}$ 、 $\{F_f\}$ 分别为作用在固体结构上的外力和作用在流体介质上的压力; $[R]$ 为耦合矩阵, 代表与流体-固体结构界面 (FSI) 上节点相联系的有效表面积。将未知的节点位移和声压全部放在方程左

边, 并且将两个方程合并为一个方程, 即得到完整的流固耦合问题的有限单元法离散方程:

$$\begin{bmatrix} [M_s] & [0] \\ [M^f] & [M_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \dot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_s] & [0] \\ [0] & [C_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U} \\ \dot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_s] & [K^f] \\ [0] & [K_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_s\} \\ \{F_f\} \end{Bmatrix} \quad (3)$$

其中: $[M^f] = \rho_0 [R]^T$ 、 $[K^f] = -[R]$ 分别为流固耦合界面的质量矩阵和刚度矩阵。

3 数值计算模型

某简单的水平分层海洋环境下, 低频点声源海底地震波数值计算模型的网格划分如图 1 所示。图中上部深色单元为 Fluid30 流体单元, 下部浅色单元为 Solid45 固体单元, 流体与固体界面为流体-结构接触面 FSI。液体层中的点声源采用半径为 1 m 的球面进行模拟, 位于水下深度 20 m 处, 点声源局部的网格划分如图 2 所示。

计算区域水平方向长度 400 m, 前后宽度 100 m, 上下高度 150 m, 水深 40 m。网格划分共计 49262 个单元, 其中固体单元 35266 个, 液体单元 13996 个, 总自由度数 129101。海水层密度 1000 kg/m^3 , 波速 1500 m/s 。基岩密度 2500 kg/m^3 , 纵波波速 3098 m/s , 横波波速 1789 m/s 。

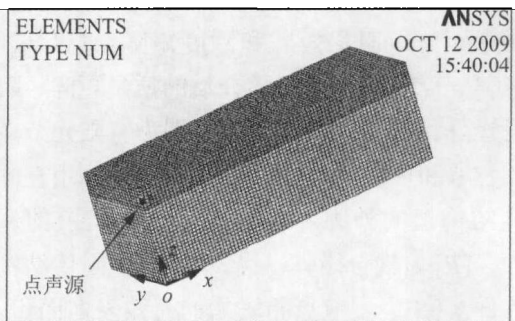


图 1 计算模型的网格划分

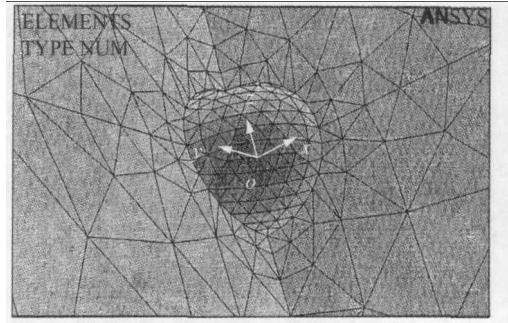


图 2 点声源局部的网格划分

为了模拟水平分层的半无限海底环境, 图 1 中顶面为自由液面, 声压为 0; 左面和前面 (yoz 面和 xoz 面) 为对称边界面; 右面、背面和底面为多次透射公式 (MTF) 人工边界面。

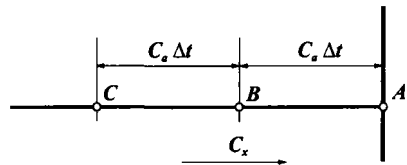


图 3 多次透射公式示意图

多次透射公式 (MTF) 人工边界属于时域局部人工边界。图 3 中右边界面即为人工边界, 相应的多次透射公式为:

$$u(t + \Delta t, x) \approx \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_a^j u[t - (j-1)\Delta t, x - jC_a \Delta t] \quad (4)$$

式中, $u(t + \Delta t, x)$ 表示坐标 x 处节点 A 在 $t + \Delta t$ 时刻的位移或声压; N 为透射阶数; C_a 为人工波速。由式 (4) 可见, 对于 2 阶透射公式, 下一荷载子步施加于人工边界上节点 A 的位移, 由本荷载步距离人工边界 $C_a \Delta t$ 节点 B 的位移、上一荷载步距离人工边界 $2C_a \Delta t$ 节点 C 的位移组合而成。利用有限元软件 ANSYS 提供的 APDL 二次开发语言, 可方便地将上述多次透射公式 (MTF) 嵌入

到 ANSYS 软件中, 实现对无限域的模拟。

4 计算结果及分析

建立数值计算模型后, 施加点声源荷载, 即可对低频点声源海底地震波进行数值模拟。Jensen 提出的波数积分方法已广泛应用于浅海低频声传播特性研究领域^[9], 文献[5]将其推广到低频声源引起的海底地震波研究中。为了分析本文数值计算方法的准确性, 下面将数值计算结果和波数积分方法的结果进行比较。图 4 和图 5 分别为 10 Hz 单频简谐点源在声源深度 (RD = 20 m) 和海底表面 (RD = 40 m) 的声传播损失曲线, 其中虚线为波数积分方法的计算结果, 实线为 MTF 人工边界的数值计算结果。可见, 两种方法相应的声传播损失曲线符合较好。

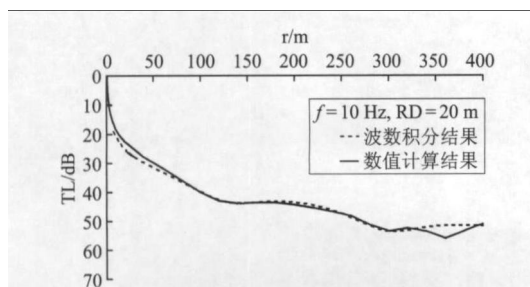


图 4 声源深度声传播损失曲线

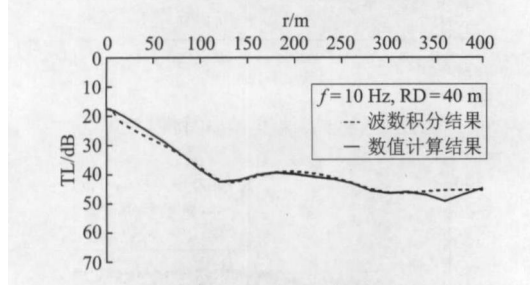


图 5 海底表面声传播损失曲线

类似地, 图 6 和图 7 分别为 50 Hz 单频简谐点源在声源深度 (RD = 20 m) 和海底表面 (RD = 40 m) 的声传播损失曲线。可见, 当

频率较高时, 数值计算结果与波数积分方法的结果存在一定差别, 但声传播损失曲线的总体变化趋势仍基本一致。

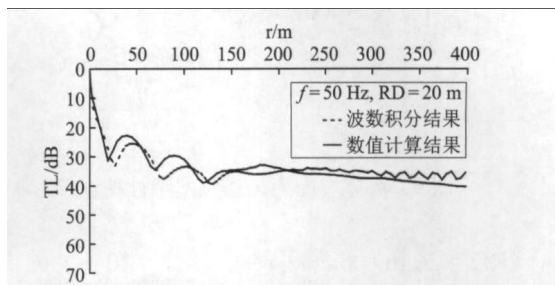


图 6 声源深度声传播损失曲线

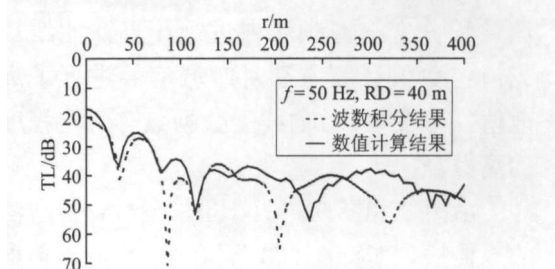


图 7 海底表面声传播损失曲线

多次透射公式 (MTF) 人工边界属于时域局部人工边界, 因此本文低频点声源海底地震波数值计算结果为时域波动信号。为了获得频域内的地震波传播特性曲线, 点声源由 1~100 Hz (步长 1 Hz) 的一系列单位压强简谐信号调制而成, 相位随机选取。然后对数值计算的时域地震波信号进行离散傅立叶变换, 即得到地震波传播的频率特性曲线。图 8 和图 9 分别为横距 400 m 处声源深度

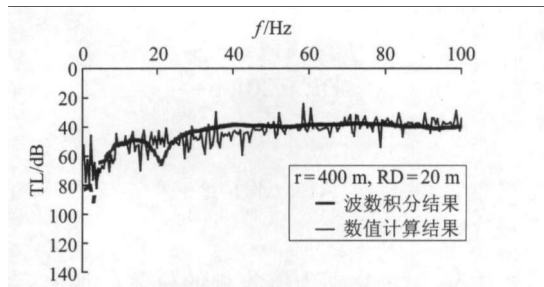


图 8 声源深度声传播频率特性曲线

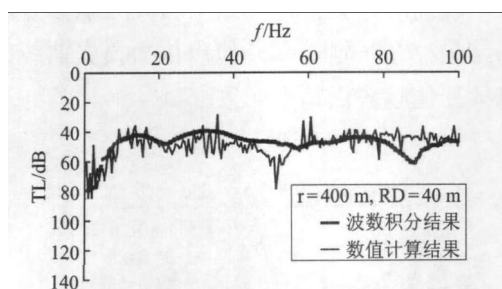


图9 海底表面声传播频率特性曲线

($RD = 20$ m) 和海底表面 ($RD = 40$ m) 的声传播频率特性曲线。考虑到海底地震波的频率通常较低, 频率特性曲线仅分析到 100 Hz。波数积分方法在频域内进行计算, 曲线较光滑; 数值计算方法对时域信号进行了离散傅立叶变换, 故曲线上数据点有一定程度的离散。

由图 8 和图 9 可见, 虽然两种计算方法的声传播频率特性曲线形式有所不同, 但曲线总体变化趋势基本一致: 在声源深度, 随频率增加传播损失逐渐减小, 较低频率成分的传播损失相对较大; 在海底表面, 随频率增加传播损失稍有增加。

对于位移和加速度而言, 由于点源采用的是压强单位, 两者物理量不同, 故不计算传播损失, 改为分析位移、加速度的幅值随频率的变化。考虑到点源在 400 m 横距处产生的位移、加速度幅值很小, 且不同频率范围存在数量级的差别。为分析方便起见, 参照水声学中声压级定义方法^[10], 定义位移级 DL 和加速度级 AL 如下:

$$DL = 20 \log \frac{w}{w_0} \quad (5)$$

$$AL = 20 \log \frac{a}{a_0} \quad (6)$$

式中 w 、 a 分别为接收处的位移、加速度幅值; w_0 、 a_0 分别为参考位移、参考加速度,

本文分别取 10^{-14} m 和 10^{-10} m/s²。

图 10~图 13 分别为距离声源横距 400 m 处海底表面 ($RD=40$ m) 的竖直位移、水平位移、竖直加速度和水平加速度的频率特性曲线。可见, 两种方法位移、加速度的频率特性曲线基本符合。

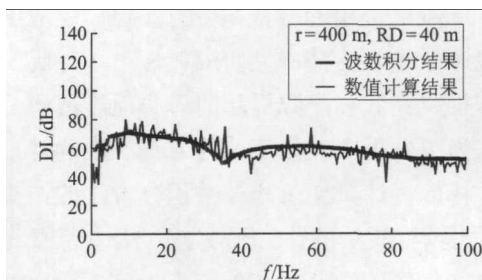


图10 竖直位移频率特性曲线

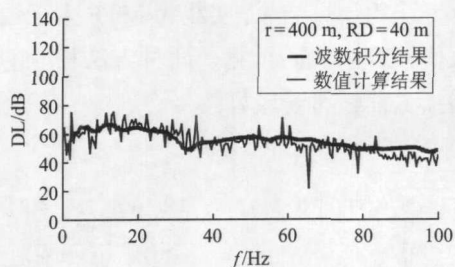


图11 水平位移频率特性曲线

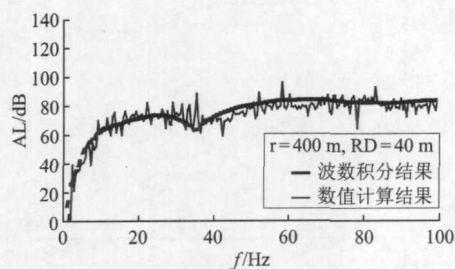


图12 竖直加速度频率特性曲线

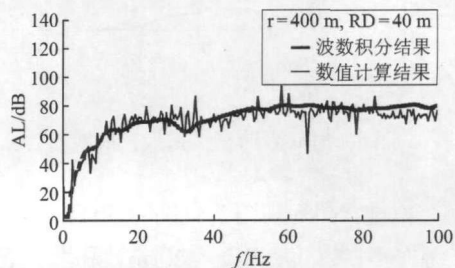


图13 水平加速度频率特性曲线

5 结论

采用大型有限元软件 ANSYS 中的流固耦合计算模块, 利用 APDL 二次开发语言, 将多次透射公式 (MTF) 嵌入到 ANSYS 软件中, 对水平分层海洋环境下低频点声源海底地震波进行了数值计算。数值计算结果与波数积分方法结果的比较表明:

(1) 频率较低时 (10 Hz), 两种方法相应的声传播损失曲线符合较好; 频率较高时 (50 Hz), 结果存在一定差别, 但声传播损失曲线的总体变化趋势仍基本一致。

(2) 两种计算方法的声传播频率特性曲线形式有所不同, 但曲线总体变化趋势基本一致: 在声源深度, 随频率增加传播损失逐渐减小, 较低频率成分的传播损失相对较大; 在海底表面, 随频率增加传播损失稍有增加。

(3) 对于海底表面竖直位移、水平位移、竖直加速度和水平加速度而言, 两种方法的频率特性曲线基本符合。

(4) 基于多次透射公式人工边界, 采用大型有限元软件 ANSYS 中的流固耦合模块, 对低频点声源海底地震波问题进行数值计算是可行的。

据此, 利用 ANSYS 强大的网格划分功

能, 可进一步对不均匀厚度分层的楔形浅海环境, 或对存在不规则洼地和台地的浅海环境低频点声源海底地震波问题进行数值计算, 分析地质条件较为复杂的浅海环境海底地震波的波动特征。

参 考 文 献

- [1] 卢再华, 张志宏. 舰船海底地震波及其在水雷引信中的应用. 水雷战与舰船防护, 2004, 4: 25-28.
- [2] 陈云飞, 吕俊军, 于枫. 航行舰船地震波及其在水中目标探测中的应用. 舰船科学技术, 2005, 27(3): 62-66.
- [3] 颜冰, 周伟, 龚沈光. 浅海地震波传播的简正波模型. 武汉理工大学学报, 2006, 30(5): 805-807.
- [4] 周伟, 颜冰. 舰船低频声传播的海底损失. 噪声与振动控制, 2006, 2: 62-65.
- [5] 卢再华, 张志宏, 顾建农. 不同浅海环境下点声源海底地震波特征研究. 声学技术, 2009, 28(5): 596-600.
- [6] 廖振鹏, 周正华, 张艳红. 波动数值模拟中透射边界的稳定实现. 地球物理学报, 2002, 45(4): 533-545.
- [7] 朱志辉, 尚守平, 吴方伯, 等. 分层土一箱基一框架结构在爆破地震作用下的计算分析. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 231-236.
- [8] ANSYS 流固耦合分析指南, ANSYS corp., 1995.
- [9] Jensen F B, Kuperman W a, Porter M B. Computational Ocean Acoustics, New York: AIP Press, 1993.
- [10] 刘伯胜, 雷家耀. 水声学原理. 哈尔滨工程大学出版社, 1993.