

利用 COMSOL 仿真复杂情况下的海洋声传播模型

朱 军¹, 朴胜春², 宋 扬², 祝捍皓³, 杨春梅⁴

1. 船舶与机电工程学院, 浙江海洋大学, 浙江省, 舟山市

2. 水声工程学院, 哈尔滨工程大学, 黑龙江省, 哈尔滨市

3. 海洋科学与技术学院, 浙江海洋大学, 浙江省, 舟山市

4. 海洋环境与数值模拟重点实验室, 国家海洋局第一海洋研究所, 山东省, 青岛市

摘要: 本篇文章使用 COMSOL 软件中的二维以及二维轴对称模型下的压力声学-频域模块。分别仿真了在点声源和线声源情况下, 复杂液态海底地形环境下的海洋声传播模型。通过改变模型中设置的海底倾斜度以及液态海底模型中的声速以及密度参数, 计算使用 COMSOL 软件仿真海洋声场在不同海水-海底阻抗下的声传播结果。通过对比结果发现, 仿真得出的声传播结果较于传统的抛物方程方法 (RAM) 以及耦合简正波模型 (COUPLE) 会更接近与实际情况下的海洋声传播, 同时仿真结果与对比文献中的全局矩阵耦合简正波模型 (DGMCM) 的结果趋于一致。

关键词: 压力声学; 复杂地形; 海洋声传播; 全局矩阵耦合简正波方

简介

声波作为当前水下信息实现远距离传播最有效的载体, 其在海洋中的传播规律以及传播特性的研究对于声纳设计、水下对抗等领域具有重要的指导意义。而目前对于海洋声传播研究常用的数学模型主要有射线模型、简正波模型、快速场模型以及抛物方程模型, 它们只适用与在某些特性假设条件海洋环境下的声传播建模。而随着计算机软硬件的发展, 原本常被用于解决结构工程问题的有限元方法, 逐渐的用作研究愈多领域, 以及使得许多科学理论在技术上得以实现和应用。有限元方法优于其可以精确地求解出各种复杂边界下的问题, 同时也由于完美匹配层 (PML) 这一概念在有限元方法中运用的提出以及发展, 使得近年来有许多学者使用有限元方法来仿真并求解小尺度范围内海洋声传播的问题。

实验设置

在海洋声场的仿真研究中, 选用了二维轴对称以及二维模型下的压力声学-频域模块分别。这两种模型分别对应了在点声源以及线声源下, 理想三维海洋环境下的声传播问题模型。

为了研究在复杂海底地形环境下, 利用 COMSOL 仿真研究海洋声传播问题的准确性, 分别讨论分析了几类在不同倾斜角、海底环境参数下的波导问题, 图 1、图 2 为在二维轴对称模型下所仿真的几何模型示意图。图 3、图 4 为在二维模型下所仿真的几何模型示意图。同时将 COMSOL 仿真下计算得到的海洋声传播结果与传统的抛物方程模型 (RAM)、耦合简正波模型 (COUPLE) 以及计算精度高的全局矩阵耦合简正波模型 (DGMCM) 进行对比, 验证其仿真的准确性。

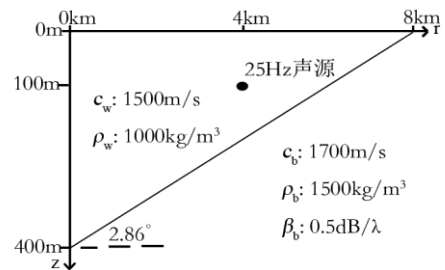


图 1 小倾斜角可穿透海底模型 (线源)
Fig.1 Mode of small angle permeable sea bottom (line source)

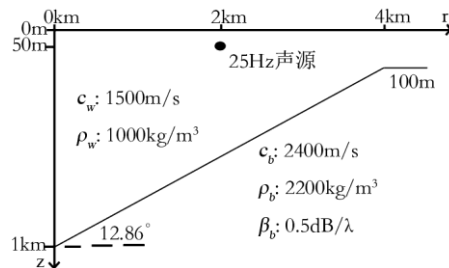


图 2 大倾斜角可穿透海底模型 (线源)
Fig.2 Mode of big angle permeable sea bottom (line source)

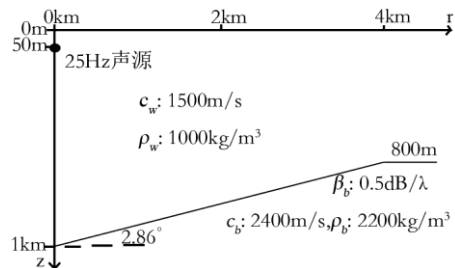


图 3 小倾斜角可穿透海底模型 (点源)
Fig.3 Mode of small angle permeable sea bottom (point source)

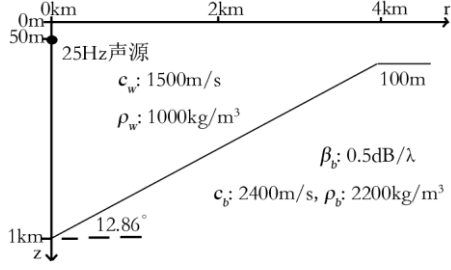


图4 大倾斜角可穿透海底模型 (点源)
Fig.4 Mode of big angle permeable sea bottom (point source)

控制方程

海洋声传播的仿真选用 COMSOL 软件中的压力声学-频域接口并选择频域作为研究对象,其求解声学问题的控制方程为公式(1)给出的亥姆霍兹方程:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m \quad (1)$$

$$p_t = p + p_b \quad (2)$$

$$k_{eq} = \frac{\omega}{c_c} \quad (3)$$

其中, ρ_c 为密度, c_c 为声速, p 为声压, p_b 为背景场压力, p_t 为总压力, \mathbf{q}_d 为偶极声源, k_{eq} 为波数, ω 为角频率。声源选用单极点源, 其控制方程如下公式(4)给出

$$Q_m = \frac{4\pi}{\rho c} S \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (4)$$

同时为了仿真海洋表面,在几何的上边界选用软声场边界条件 $p=0$ 。

为了仿真在无限空域的情况,将在几何模型的周围覆盖了完美匹配层(PML层)模拟无限广域,完美匹配层的宽度为6倍的声波波长。若所仿真模型为二维轴对称模型,则在几何的右边界以及下边界设置完美匹配层;若所仿真的模型为二维模型,则在几何的左、右边界以及下边界设置完美匹配层。完美匹配层的典型声速选用海水环境(压力声学1)下的声速参数。同时为了设置海水水层以及海底水层,在压力声学-频域处添加压力声学2,分别在压力声学1、压力声学2中分别设置海水水层以及海底水层的声速、密度、声衰减

参数。

在所研究的结果中,声传播损失的计算如下公式(5)给出:

$$TL_p = -20 \lg \left| \frac{p(r, z, \omega)}{p_{ref}} \right| \quad (5)$$

其中 $p(r, z, \omega)$ 为声压; p_{ref} 为参考声压,取几何模型中距离声源1m处的声压。

在所仿真的结果中,为了更好的观察声波在海洋环境中的传播,本篇文章将选用声能流密度这一矢量场特有的物理量对海洋声传播特性来进行观察。

对于流体而言,声能流密度在频域上的定义如下公式(6)给出。

$$I(\omega) = \begin{bmatrix} I_r(\omega) \\ 0 \\ I_z(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p v_r^* \\ 0 \\ p v_z^* \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $I_r(\omega)$ 为水体中 r 方向上的声能量的强度, $I_z(\omega)$ 为水体中 z 方向上的声能量的强度; $p(\omega)$ 为水体中声压; $v_r(\omega)$ 为水体中 r 分量上的声速, $v_z(\omega)$ 为水体中 z 分量上的声速。

声能量的强度与传播方向为,

$$I = \sqrt{\left\{ \text{Re} [I_r(\omega)]^2 + \text{Re} [I_z(\omega)]^2 \right\}} \quad (7)$$

$$\theta_I = \arctan \left\{ \frac{\text{Re} [I_z(\omega)]}{\text{Re} [I_r(\omega)]} \right\}$$

仿真结果

对于图1海洋环境模型仿真结果,图5(a)为所仿真结果的声能流伪彩图。图5(b)为接受深度为30m, COMSOL 与 COUPLE 模型仿真得到的传播损失曲线图,红色虚线、绿色虚线分别为利用 COUPLE 模型分别仿真左半边以及右半边模型得到的传播损失曲线。图5(c)为接受深度为30m, COMSOL 与 DGMCM 模型仿真得到的传播损失曲线图,蓝色虚线为 DGMCM 模型仿真得到的传播损失曲线。

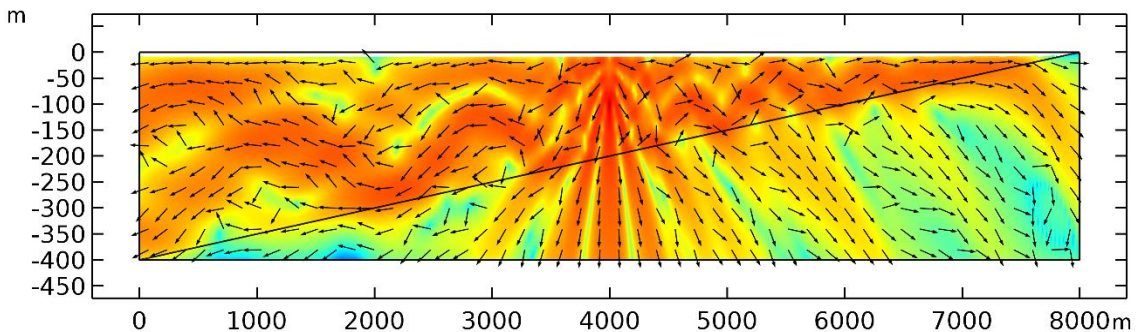


图5(a) 图1海洋环境模型声能流图
Fig.5(a) The propagation of acoustic energy flux in Fig.1 ocean environment

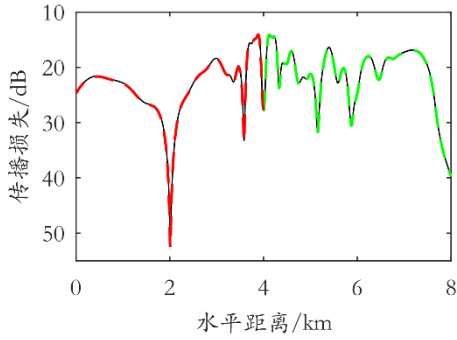


图 5(b) COMSOL 与 COUPLE 模型的传播损失曲线图(声源深度 350m)
Fig 5(b) Transmission loss of COMSOL and COUPLE models (receive depth is 30m)

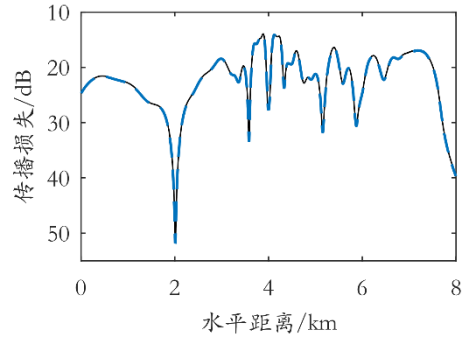


图 5(c) COMSOL 与 DGMCM 模型的传播损失曲线图(声源深度为 30m)
Fig 5(c) Transmission loss of COMSOL and COUPLE models (receive depth is 30m)

对于图 2 海洋环境模型仿真结果, 图 6(a)为所仿真结果的声能流伪彩图。图 6(b)为接受深度为 30m, COMSOL 与 COUPLE 模型仿真得到的传播损失曲线图, 红色虚线、绿色虚线分别为利用 COUPLE 模型分别仿真左半边以及右半边

模型下得到的传播损失曲线。图 6(c)为接受深度为 50m, COMSOL 与 DGMCM 模型仿真得到的传播损失曲线图, 蓝色虚线为 DGMCM 模型仿真得到的传播损失曲线。

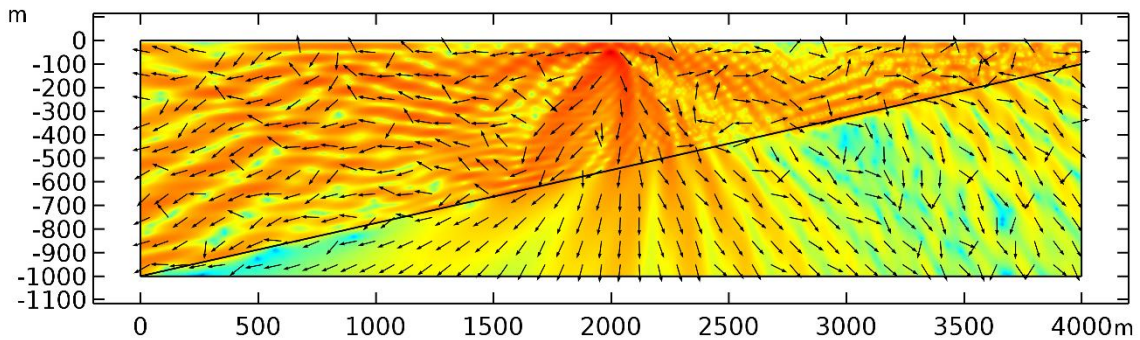


图 6(a) 图 2 海洋环境模型声能流图
Fig.6(a) The propagation of acoustic energy flux in Fig.2 ocean environment

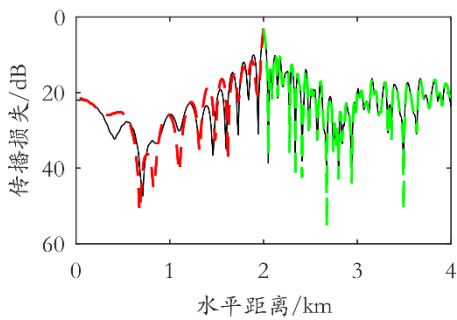


图 6(b) COMSOL 与 COUPLE 模型的传播损失曲线图(声源深度为 50m)
Fig 6(b) Transmission loss of COMSOL and COUPLE models (receive depth is 50m)

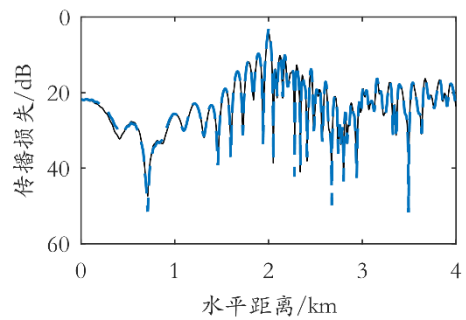


图 6(c) COMSOL 与 COUPLE 模型的传播损失曲线图(声源深度为 50m)
Fig 6(c) Transmission loss of COMSOL and COUPLE models (receive depth is 50m)

对于图 3 海洋环境模型仿真结果, 图 7(a)为所仿真结果的声能流伪彩图。图 7(b)为接受深度为 50m, COMSOL 与 COUPLE 模型仿真得到的传播损失曲线图, 红色虚线为利用 RAM 模型分别仿真得到的传播损失曲线。图 7(c)为接受

深度为 50m, COMSOL 与 DGMCM 模型仿真得到的传播损失曲线图, 蓝色虚线为 DGMCM 模型仿真得到的传播损失曲线。

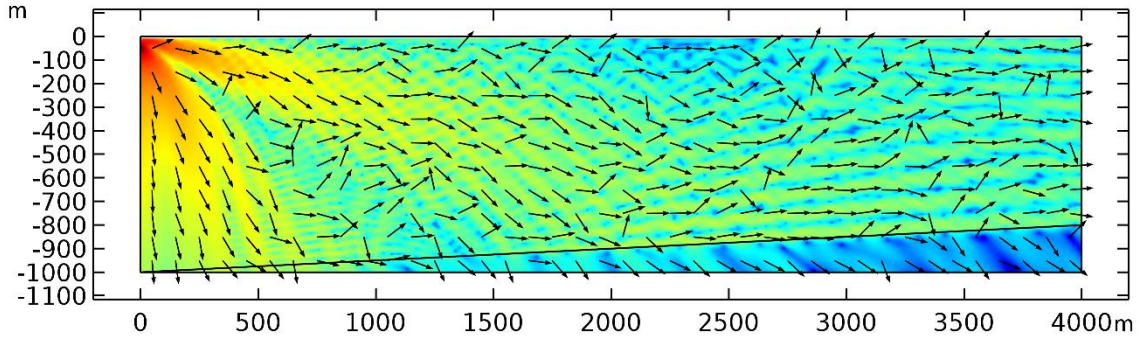


图 7(a) 图 3 海洋环境模型声能流图
Fig.7(a) The propagation of acoustic energy flux in Fig.3 ocean environment

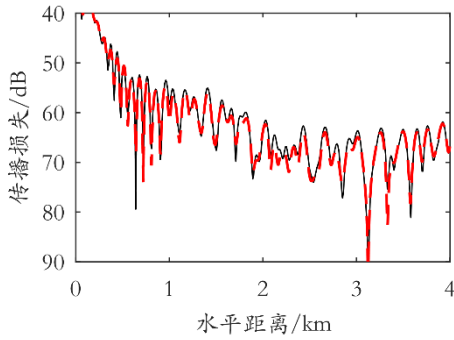


图 7(b) COMSOL 与 COUPLE 模型的传播损失曲线图(声源深度为 50m)
Fig 7(b) Transmission loss of COMSOL and COUPLE models (receive depth is 50m)

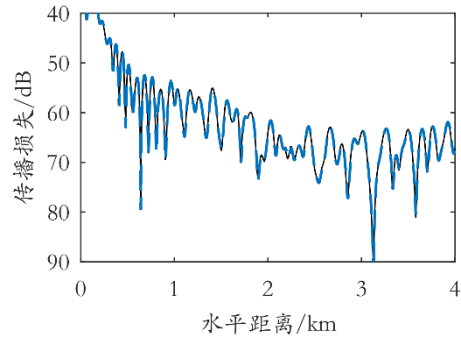


图 7(c) COMSOL 与 DGMCM 模型的传播损失曲线图(声源深度为 50m)
Fig 7(c) Transmission loss of COMSOL and DGMCM models (receive depth is 50m)

对于图 4 海洋环境模型仿真结果, 图 8(a)为所仿真结果的声能流伪彩图。图 8(b)为接受深度为 50m, COMSOL 与 RAM 模型仿真得到的传播损失曲线图, 红色虚线利用 RAM

模型分别仿真得到的传播损失曲线。图 8(c)为接受深度为 50m, COMSOL 与 DGMCM 模型仿真得到的传播损失曲线图, 蓝色虚线为 DGMCM 模型仿真得到的传播损失曲线。

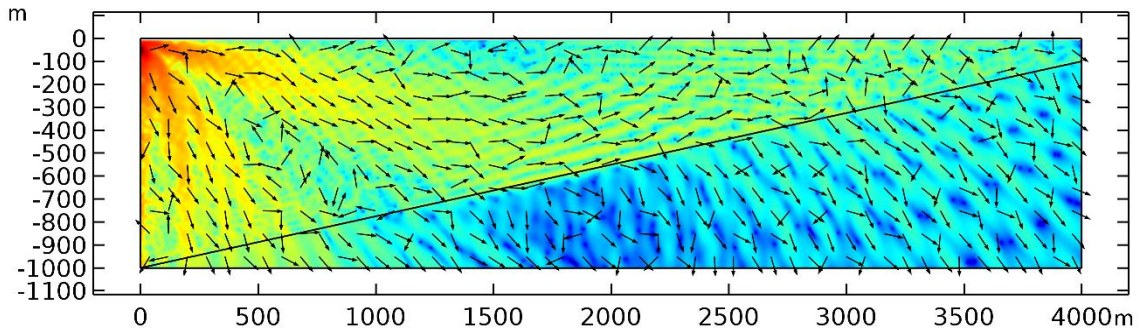


图 8(a) 图 4 海洋环境模型声能流图
Fig.8(a) The propagation of acoustic energy flux in Fig.4 ocean environment

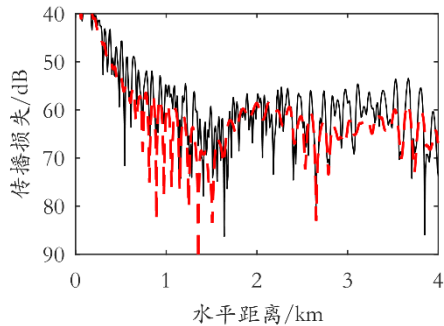


图 8(b) COMSOL 与 COUPLE 模型的传播损失曲线图(声源深度为 50m)
Fig 8(b) Transmission loss of COMSOL and COUPLE models (receive depth is 50m)

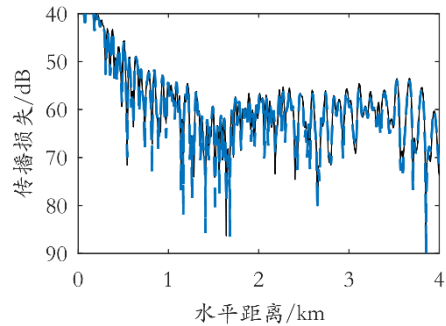


图 8(c) COMSOL 与 DGMCM 模型的传播损失曲线图(声源深度为 50m)
Fig 8(c) Transmission loss of COMSOL and DGMCM models (receive depth is 50m)

结论

观察所仿真结果可以得出，通过 COMSOL 压力声学模块仿真上述四类海洋声传播模型，其结果与实际理论模型情况下的声传播轨迹完全吻合。同时通过声能流的方向矢量可以观察到，合理的设置完美匹配层可以使声波在其层中得到完全的衰减，使其不会受到因为边界的反射影响而影响仿真水层范围内的仿真结果。

通过观察不同海水-海底阻抗比的海底环境模型得到的声传播损失曲线图可以得出，在模型 1、模型 3 海水-海底阻抗比较小的声传播模型中，由于倾斜海底对海洋声传播后向散射的影响微弱，利用 COMSOL 模型仿真得到的结果结果与传统 COUPLE 模型以及 RAM 模型的出的结果完全吻合。但是当在模型 2、模型 4 海水-海底阻抗比较大的情况

下，由于传统模型忽略了其声场后向散射的影响，在所计算的传播损失曲线图中，可以看出使用传统方法的传播损失值会比 COMSOL 软件仿真得出的传播损失值高。为了验证运用 COMSOL 在计算海水-海底阻抗比较大的海洋环境下其仿真结果的准确性，传播损失曲线值的结果与全局矩阵耦合简正波模型 (DGMCM 模型) 仿真的出的结果进行了对比。结果得出，运用两种仿真模型得出的传播损失曲线完全吻合。

致谢

感谢与本文 FEM 模型进行对比验证的 DGMCM 模型的建立者骆文于研究员。

参考文献

- [1] 杨春梅, 全局矩阵耦合简正波方法与现有模型比较, 声学学报, 39(3), 295-308 (2014)

