



哈尔滨工程大学学报  
*Journal of Harbin Engineering University*  
ISSN 1006-7043, CN 23-1390/U

## 《哈尔滨工程大学学报》网络首发论文

题目：结构声源浅海辐射声场计算及特性研究  
作者：王佳, 张揽月, 胡博, 吴迪, 胡雪茹  
网络首发日期：2024-07-15  
引用格式：王佳, 张揽月, 胡博, 吴迪, 胡雪茹. 结构声源浅海辐射声场计算及特性研究[J/OL]. 哈尔滨工程大学学报.  
<https://link.cnki.net/urlid/23.1390.U.20240712.1006.014>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 结构声源浅海辐射声场计算及特性研究

王佳<sup>1,2,3</sup>, 张揽月<sup>1,2,3</sup>, 胡博<sup>1,2,3</sup>, 吴迪<sup>1,2,3</sup>, 胡雪茹<sup>1,2,3</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学), 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学 水声工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对浅海环境影响噪声测量准确性的问题, 开展水下航行器类结构声源在浅海环境下辐射声场计算及特性研究。首先基于联合有限元等效源法与声传播模型相结合的方法建立结构声源在浅海环境下辐射声场计算模型, 对该模型进行改进以提升计算效率, 并对其有效性进行验证。分析声源频率、海水深度、潜深及声速剖面等因素对结构声源与点源辐射声场的影响。结果表明: 在近距离处, 结构声源的辐射声场与点源相比更为复杂, 但随着距离的增加, 二者有一定的相似性。声源在高频段的辐射声场相较低频段更为复杂。随着声源与界面距离的增加, 在近距离处的声场分布接近于自由场中的声场分布。声速剖面在近距离处对声场影响较小, 但随着距离的增加影响逐渐增大。

**关键词:** 波导; 结构; 有限元法; 等效源法; 射线声学; 简正波; 声场特性; 声传播

DOI: 10.11990/jheu.202401007

中图分类号: O427.1 文献标识码: A

## Calculation and characteristics of the radiated sound field of structural sound sources in shallow water

WANG Jia<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Lanyue<sup>1,2,3</sup>, HU Bo<sup>1,2,3</sup>, WU Di<sup>1,2,3</sup>, HU Xueru<sup>1,2,3</sup>

(1. National Key Laboratory of Underwater Acoustic Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security (Harbin Engineering University), Ministry of Industry and Information Technology; Harbin 150001, China; 3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** To address the issue of noise measurement accuracy in shallow water environments, this paper undertook a study on the calculation and characteristics of the radiated sound field of structural sound sources in shallow water. Initially, a radiated sound field model for structural sound sources in shallow water was developed, combining the coupled finite element / equivalent source method with the ocean acoustic propagation model. This model has been improved to enhance computational efficiency, and the effectiveness has been verified. The study analyzed the impact of factors such as frequency, sea depth, submergence depth, and sound speed profile on the radiation sound field of structural and point sources. The results indicated that at close distances, the radiation sound field of the structural source is more complex compared to the point source, but similarities increase with distance. The radiation sound field of the source is more complex at high frequencies than at low frequencies. As the distance between the source and the interface increases, the sound field distribution at close distances approximates that in a free field. The sound speed profile has a minor effect on the sound field at close distances but its impact grows with distance.

**Keywords:** waveguides; structures; finite element method; equivalent source method; ray acoustics; normal modes; sound field characteristics; acoustic wave propagation

**基金项目:** 国家自然科学基金(52171333; 52250344; 52327901).

**作者简介:** 王佳, 女, 博士研究生;

张揽月, 女, 教授, 博士生导师.

**通信作者:** 张揽月, E-mail: zhanglanyue@hrbeu.edu.cn.

水下航行器在海战中的突袭优势和威慑作用除了其本身所具有的机动性之外,很大程度上取决于其声隐身性<sup>[1]</sup>。水下航行器辐射噪声的准确测量是评估其声隐身性能的基础,对减振降噪及水下对抗等方面技术的发展具有重要意义。因此,水下航行器辐射噪声测量是世界各强国都极为重视的研究领域<sup>[2]</sup>。目前,国内外研究机构发布的水下噪声测量标准和指南大多针对深水域测量,但由于我国沿海多为浅海,建设深水试验场投资较大且维护困难<sup>[3]</sup>。与之相比,在浅海开展辐射噪声测量具有成本低以及易于工程实现等优势,但浅海复杂多变的环境特性影响了噪声测量的准确性<sup>[4]</sup>。虽然已经有一些文献针对传播损失的修正进行了研究,但一般将声源模型简化为点源模型<sup>[5]</sup>。对于一些较大尺度的结构而言,其声辐射特性远比点源复杂,尤其在规定的测量距离内,例如在 ISO 17208-1:2016 标准中规定测量距离为 100m 或 1 倍船长中的较大值<sup>[6]</sup>,采用点源模型难以准确描述浅海声场。因此,有必要对浅海环境中结构声源进行建模,研究其辐射声场特性,为辐射噪声准确测量提供理论参考及指导。

对于浅海环境中结构声源的辐射声场计算,传统的边界元法和有限元法受边界条件及计算效率等条件限制无法发挥其效用。有限元-等效源法被认为是一种有效的浅海环境中结构声源辐射声场计算方法<sup>[7]</sup>。其中有限元法作为成熟的数值算法,具有适用广泛等优点,但受计算量的影响,该方法常用于计算结构声源较近距离辐射声场。对于等效源法<sup>[8]</sup>,其基本思想是将结构辐射声场用结构内部的一系列等效源所产生的声场叠加替代。该方法直接建立结构内部等效源与外部辐射声场的关系,避免了繁琐的奇异积分处理,且声场计算效率较高<sup>[9]</sup>。联合有限元等效源法将上述两种方法的优势相结合,实现弹性结构辐射声场的计算。针对点源的海洋声传播

问题,已有大量学者进行了相关研究,形成的计算模型主要包括:射线理论模型、简正波理论模型、抛物方程模型等<sup>[10]</sup>。但这些传播模型都存在一定的适用条件,应根据实际计算需求进行选择。

本文针对实际计算需求对声场计算模型进行改进以提升计算效率,其中主要包括以下两方面的改进:1) 由于结构声源满足一定的潜深条件时,界面对结构振动的影响可以被忽略,因此对有限元模型进行了适当的简化。2) 考虑到等效点源数量过多影响计算效率这一问题,通过等效源配置优化方法,采用了更少数量的等效源得到了准确的声场计算结果,并且对改进后声场计算模型进行了验证。之后以水下航行器简化模型为例,对比分析结构声源辐射声场与点声源辐射声场的差异与联系。分析了声源频率、海水深度、潜深及声速梯度等因素对辐射声场传播特性的影响,以期水下结构辐射噪声测量提供参考。

## 1 理论模型

如图 1 所示,应用有限元-等效源法计算浅海环境下弹性结构声辐射的基本思路为:首先通过有限元法建立声固耦合数值模型,计算获取结构声源近场处的声压值作为等效源法的输入,然后通过等效源法进行等效源强求解,最后结合海洋声传播模型计算在浅海环境中任意场点的声场信息。在本节中将分别对上述计算过程中涉及到的声固耦合有限元建模、等效源法以及海洋声传播模型进行详细介绍。

### 1.1 声固耦合有限元模型

声固耦合问题为结构在水等流场中发生振动导致流场的压力脉动而产生声音,流场的压力脉动反过来对结构的振动产生影响,形成反馈的声-结构相互作用,这属于一种广义的流固耦合问题<sup>[11]</sup>。理想

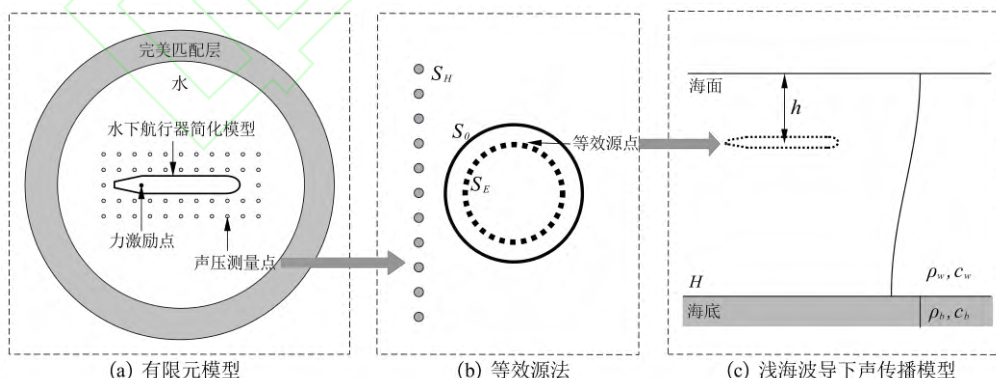


图 1 浅海环境下弹性结构声辐射计算原理图

Fig.1 Schematic diagram of sound radiation calculation for elastic structures in shallow water

流体介质中的声学波动方程为:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中:  $p$  为瞬时声压,  $c$  为声波在介质中的传播速度。在声固交界面上有:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_n \quad (2)$$

式中:  $\ddot{u}_n$  为声固交界面上法向加速度,  $\rho$  为介质密度。对于声固耦合问题,采用有限元离散将结构振动和声场在同一个耦合环境中计算,声固耦合动力学方程如下:



$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ -\rho \mathbf{K}_c^T & \mathbf{M}_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}} \\ \ddot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{K}_c \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_s \\ \mathbf{f}_a \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{K}_s$ 、 $\mathbf{C}_s$  和  $\mathbf{M}_s$  分别表示结构的刚度矩阵、阻尼矩阵和质量矩阵,  $\mathbf{K}_c$  为声固耦合矩阵,  $\mathbf{K}_a$ 、 $\mathbf{C}_a$  和  $\mathbf{M}_a$  分别表示流体的刚度矩阵、阻尼矩阵和质量矩阵,  $\mathbf{u}$  表示结构位移列向量,  $\mathbf{p}$  为声压列向量,  $\mathbf{f}_s$  为结构上的外载荷列向量,  $\mathbf{f}_a$  为声场激励载荷列向量。

考虑浅海环境下弹性结构在机械荷载作用下的声辐射问题, 应建立涉及到声固耦合、海面 and 海底沉积层的边界耦合以及无反射边界条件的有限元模型, 但针对于本文所计算的模型, 为提升计算效率, 对上述有限元模型进行了简化。根据文献[12]有, 随着圆柱体距离海面或海底的距离  $d$  的增大, 界面对圆柱壳低频段振动的影响将逐渐减小, 当距离  $d$  与柱壳的半径  $R$  满足关系  $d \geq 4R$  时, 海面或海底对水下圆柱壳低频段振动的影响可以忽略。由于本文在进行数值仿真时均满足此条件, 因此在进行有限元建模时采用了如图 1(a) 所示的无限域中弹性结构声辐射有限元模型。其中, 结构外部流体介质为水, 最外部利用完美匹配层作有限截断, 以满足无穷远边界上的 Sommerfeld 辐射条件。由于本文的研究针对于浅水域, 故不考虑与下潜深度有关的静水压力。

## 1.2 等效源法

等效源法的基本思想是将结构辐射声场用结构内部分布的若干等效源产生的声场叠加替代, 等效源强可以由结构表面法向速度或声压信息确定。在本文中, 等效源强通过基于有限元法计算的结构声源近场处的一系列声压值确定。等效源法的原理图如图 1(b) 所示, 考虑流体中的一个振动体, 振动体的表面记为  $S_0$ , 在其内部的虚拟边界  $S_E$  为等效源面,  $\mathbf{r}_E$  为  $S_E$  上的一点。在其外部的面  $S_H$  为声压测量面, 其中  $\mathbf{r}_{Hm}$  处的声压可以由所有的等效源积分得到:

$$p(\mathbf{r}_{Hm}) = \int_{S_E} q(\mathbf{r}_E) G(\mathbf{r}_{Hm}, \mathbf{r}_E) dS_E(\mathbf{r}_E) \quad (4)$$

式中:  $q(\mathbf{r}_E)$  表示  $\mathbf{r}_E$  位置处的等效源强。  $G(\mathbf{r}_{Hm}, \mathbf{r}_E)$  为等效源面上  $\mathbf{r}_E$  与测量面上  $\mathbf{r}_{Hm}$  之间的自由场格林函数,  $G(\mathbf{r}_{Hm}, \mathbf{r}_E) = \exp(ik|\mathbf{r}_{Hm} - \mathbf{r}_E|) / (4\pi|\mathbf{r}_{Hm} - \mathbf{r}_E|)$ , 忽略时间因子  $\exp(-i\omega t)$ 。

将式 (4) 离散化并写成矩阵形式为:

$$\mathbf{p}_H = \mathbf{G}_{HE} \mathbf{W} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{p}_H$  为测量面上  $M$  个声压测点得到的声压列向量,  $\mathbf{W}$  为等效源面上  $N$  个等效源强度的系数向量,  $\mathbf{G}_{HE}$  为  $M \times N$  维矩阵。为保证等效源强解的唯一性, 一般要求  $M \geq N$ 。在配置好等效源后, 未知

的等效源强列向量  $\mathbf{W}$  可以通过反演上式来求取:

$$\mathbf{W} = (\mathbf{G}_{HE})^+ \mathbf{p}_H \quad (6)$$

式中:  $(\mathbf{G}_{HE})^+$  为  $\mathbf{G}_{HE}$  的广义逆。这一计算过程是严重病态的, 在数值实现中也称为非适定性问题。针对该问题, 可以通过截断奇异值分解 (TSVD) 或 Tikhonov 正则化处理来消除非适定性的影响<sup>[13]</sup>。在得到等效源强列向量  $\mathbf{W}$  后即可计算无声源区域任一点处的声压值。

上述计算过程可以分为两个部分。首先通过匹配声场中的声压信息求解结构内部一系列等效源源强。之后通过等效源源强及传输函数计算任意点处的声压值。可以看出, 等效源的配置及求解属于关键步骤, 会对声场计算结果的准确性产生显著影响, 因此要对等效源进行合理配置。一般来说等效源会均匀分布在一个与结构体共形缩比的等效源面上, 并且等效源的数量不能过少, 以保证等效源叠加产生的声场准确地替代振动体所产生的声场。但等效源的数量也不宜过多, 以免产生过高的测量成本。为了提高计算效率, 在保证声场计算准确性的前提下尽量减少等效源数量, 本文采用了文献[14]中的等效源优化方法。该方法简单有效、易于实现, 可同时确定等效源位置及数量。该优化方法以传递函数之间的相干系数作为参考, 在传递矩阵的病态性与模拟结构辐射声场的充分性之间进行折衷。虽然该方法得出的等效源分布不是严格的数学意义上的最优解, 但与最常使用的均匀布置等效源所得到的结果相比, 可以采用更少数量的等效源得到了更准确的声场计算结果。该方法的基本原理和具体推导详见文献[14]。虽然该优化方法有一定的计算量, 但该过程可以离线计算并将优化后的等效源存储起来, 计算不同的浅海波导环境下的辐射声场时直接代入即可。

## 1.3 浅海波导下声传播模型

浅海波导下弹性结构声辐射问题需要结合海洋声传播相关理论来计算结构的辐射声场。声波在海洋中的传播满足最基本的波动方程, 根据假设和近似的不同建立了不同的声传播模型, 比如: 射线模型、简正波模型、抛物方程模型等。这些模型都有各自的适用范围, 应针对不同的问题选择不同的模型, 以保证声场计算准确性。射线模型、简正波模型和抛物方程模型是针对于浅海环境声传播计算的 3 种主流计算模型<sup>[15]</sup>。其中抛物方程模型由于模型假设上的限制, 导致该方法不能计算近场。因此, 本文主要采用简正波模型以及射线模型进行浅海波导下弹性结构的声辐射计算。

简正波模型用特征函数来分解声场, 每一个特征函数都是波动方程一个解, 满足相应的边界条件和初始条件<sup>[16]</sup>。简正波模型作为海洋声学主要计算模型发展较为完善, 目前已有许多简正波计算程序, 如 KRAKEN、SNAP 等。射线模型是模拟海洋声传播最直观和最简单的方法。射线理论引入一些简化假设, 由波动方程导出, 该方法在频率较高时计算

结果非常精确。近年来经常使用的射线模型主要有 BELLHOP、RAY 等。

以典型的 Pekeris 波导下点源声传播为数值算例,验证射线模型和简正波模型声场计算的准确性。由于水下航行器等水下结构的辐射声呈现出低频大、高频小的变化趋势<sup>[17]</sup>。辐射声能主要集中在中低频段,并包含较高的峰值线谱,严重威胁了其安全性,因此本文所关注的频段为 10~200 Hz。点声源深度和接收点深度均为 50 m,声源频率为 10 Hz 及 200 Hz,波导深度为 100 m,海水声速在各深度上均为 1 500 m/s,密度为 1 024 kg/m<sup>3</sup>。海面为绝对软边界,海底为半无限液态空间,其声速为 1 650 m/s,密度为 1 900 kg/m<sup>3</sup>,吸收系数为 0.8 dB/ $\lambda$ ,分别采用射线模型和简正波模型计算该环境下点源辐射声场声压级,并与有限元解对比,结果如图 2 所示,2 个子图中采用的图例相同。

虽然通常认为射线模型只在高频情况下适用,但在近距离范围内(小于  $H^2/\lambda$ ),高阶虚源不起作用,这时也可采用射线模型。由仿真结果可以看出,在此波导条件下当声源频率为 10 Hz 时在近距离内射线模型和有限元的计算结果非常吻合。而简正波模型由于旁侧波的影响在近距离处有较为显著的误差,但随着计算距离的增加,旁侧波的影响逐渐减小,与有限元的结果逐渐吻合,且计算高效,所以适合对远距离处的声场进行计算。当声源频率为 200 Hz 时,两种计算模型都与有限元结果吻合较好。因此在近距离处采用射线模型进行计算,在远距离处则采用简正波模型计算。

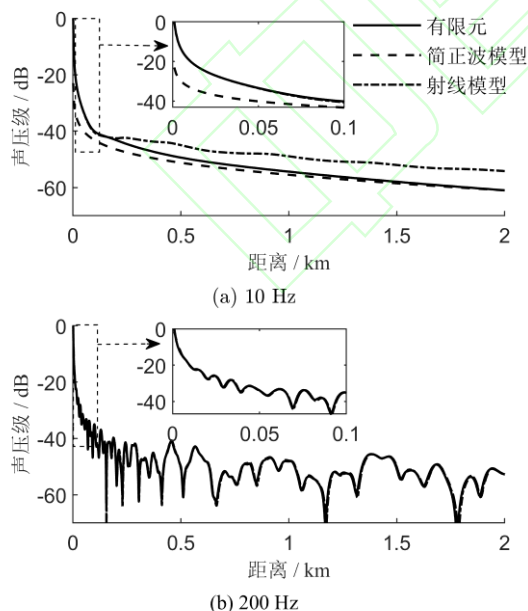


图2 Pekeris 波导下点源传播模型验证

Fig.2 Validation of the point sound source propagation model under Pekeris waveguide

#### 1.4 计算模型有效性及准确性验证

由于在前文的声场计算模型建立中涉及到等效源配置优化以及有限元模型的简化,因此对声场计

算模型的有效性进行验证。

首先对等效源配置优化方法进行验证,考虑一个水下航行器简化模型在无限水域中的声辐射问题,建立如图 3(a)所示的有限元数值模型。该水下航行器简化模型为由均匀、各向同性材料构成的锥-柱-球组合壳体结构。圆柱壳的长度为 40 m,半径为 4 m,厚度为 0.1 m。半球体的半径为 4 m,锥形体的高度为 14 m,顶端半径为 1 m,底端半径为 4 m,二者厚度与圆柱壳相同。材料参数为:杨氏模量 209 GPa,泊松比 0.27,密度为 7890 kg/m<sup>3</sup>,结构损耗因子 0.002,后文中的数值仿真均采用此模型。结构体的几何中心为坐标系零点,在壳体中后部坐标为 (-16 m, 4 m, 0 m) 和 (-16 m, -4 m, 0 m) 处加载一对相反方向的 10 N 法向点力,如图 1(a)所示。一般来说,有限元法在一个波长内设置 6 个单元就可以达到计算要求,对于波长较大的低频段情况,需要对网格进行细化处理。

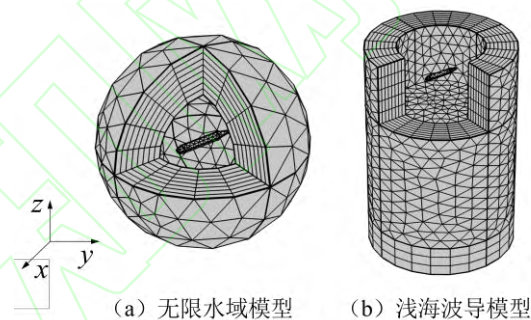


图3 有限元数值模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of finite element numerical model

假设等效源法的测量面为平面,位于  $y = 4.5$  m 处,测点共有为  $81 \times 21 = 1\,701$  个,测量间隔为 1 m。计算面位于  $y = 10$  m 处,与测量面大小及设置相同。等效源分布在与结构体共形缩比的等效源面上,缩进比为 0.8,采用 2 种配置方式,一种为均匀分布方式,等效源数量为 1 529 个,另一种按照参考文献[14]所述的等效源优化方法进行优化分布。根据测量面测得的复声压值,采用等效源法计算计算面处的声压值并与有限元解进行对比。在等效源求解过程中采用了 Tikhonov 正则化方法来减小非适定性的影响,正则化参数用 L 曲线法来确定。图 4 显示了当激励频率为 100 Hz 时使用这两种等效源分布方式计算的计算面声压值与理论值(有限元解)的比较结果。其中图 4(a)为理论值(有限元法计算值), (b) 为均匀分布等效源的计算值, (c) 为优化分布等效源的计算值。由图 4 可以看出,采用等效源法计算出的声压值与理论计算结果符合得很好,并且相较于均匀分布的 1 529 个等效源,经过优化后等效源需要 841 个,这显著减少了等效源的数量。可见,该优化方法能利用更少数量的等效源准确地计算声场。



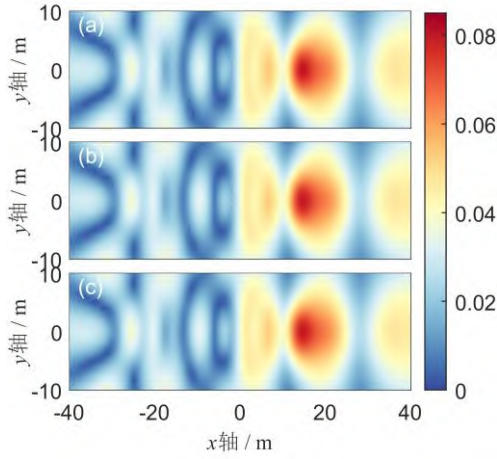


图4 等效源法计算结果图

Fig.4 Calculation results using equivalent source method

为了分析激励频率对计算结果的影响,计算了不同频率下优化分布等效源的计算误差及数量,并与均匀分布等效源进行比较。为了进行定量分析,定义了以下误差计算方法<sup>[18]</sup>:

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^M (|\hat{p}_i| - |p_i|)^2} / \sqrt{\sum_{i=1}^M |p_i|^2} \times 100\% \quad (7)$$

其中,  $\hat{p}$  和  $p$  分别表示计算面上的利用等效源法计算的声压和由有限元法计算的理论声压。分析频率的频段为 10~200 Hz, 频率间隔 10 Hz, 结果如图 5 所示。

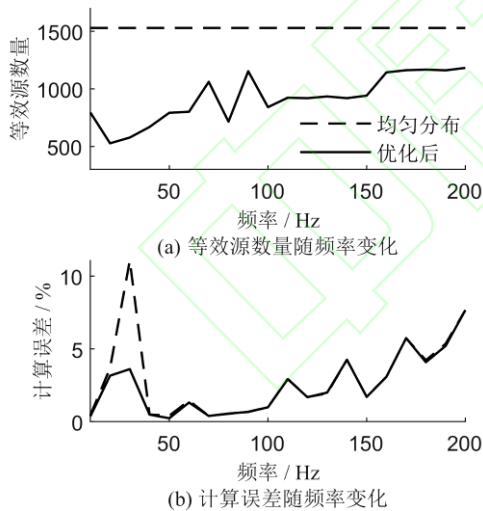


图5 等效声源数量及计算误差随频率变化结果图

Fig.5 Diagram of changes in equivalent sound source quantity and calculation error with frequency

图 5 的结果表明,虽然随着频率的增加计算误差有所增大,但在分析的频率范围内计算误差仍保持在较低的水平。无论是从等效源数量还是计算准确度的角度来看,经优化后的等效源均优于均匀分布的等效源。由于大多数现有的声传播模型每次计算只能得到一个声源产生的声场,因此后续浅海波导下声传播的计算时间正比于等效源数目。针对于文中的计算模型,总体上看经过等效源优化后计算效率提升约为 30%,在低频段的提升更为显著。

对简化后的有限元模型进行验证。如图 3 (b)

所示,建立典型 Pekeris 波导下力激励弹性结构声辐射有限元模型,信道参数与 1.3 中的仿真条件一致,激励频率为 50 Hz。结构的中心轴线与海面平行,定义距离海面的距离  $h$  为潜深。分别对结构在 50、20 以及 5 m 潜深情况下的辐射声场进行计算,验证有限元模型简化的合理性以及讨论边界条件对振动声辐射特性的影响。计算的场点与结构中轴线位于同一水平面,且各场点距离中轴线均为 4.5 m,计算结果如图 6 所示。其中有限元解为利用图 3 (b) 中的模型计算出的圆柱壳在浅海波导中辐射的声场,等效源解为利用上文计算出的等效源强度结合浅海波导下的声传播模型计算出的声压值。可以看出,当潜深为 50 m 以及 20 m 时有限元结果与等效源法计算出的结果一致。但当潜深为 5 m 时,等效源法的计算结果与有限元法结果偏差较大。这是由于海面与结构表面距离较近,自由液面对结构振动产生了影响,结构的振动特性与其在自由场中时产生了差异。由于本文所讨论的情况均满足与海底海面的距离大于四倍圆柱壳半径这一条件,因此利用自由场有限元模型计算出的声压值得到的等效源强来模拟浅海波导条件下结构的辐射声场是合理的,并且有效的减少了有限元法的计算代价。

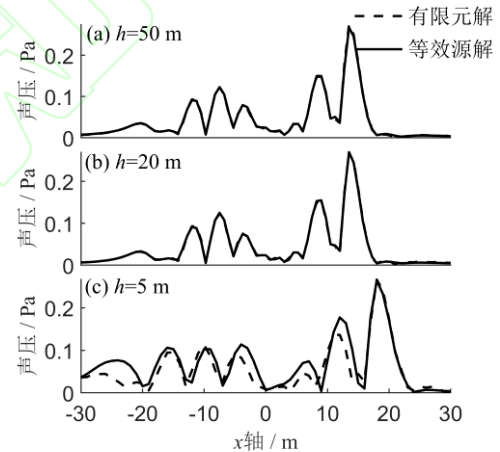


图6 不同潜深下结构辐射声场对比图

Fig.6 Diagram of radiated sound fields of structures at different submersion depths

## 2 浅海环境下结构声源声辐射特性分析

前文已经验证过基于有限元-等效源法计算浅海环境下弹性结构声辐射模型的有效性,下面的声场计算结果均通过该计算模型给出。为了对比结构声源的声辐射特性与点源的区别,在进行研究之前,先定义自由场中结构中心点的正横方向上距离壳表面 1 m 处的声压值作为基准参考值,将点源辐射声场按照此值进行修正。由于结构在波导环境中的辐射声场受结构本身特性和波导条件影响,因此本节仅针对文中设置的结构及波导参数给出定性分析结果。

## 2.1 声源频率对声场的影响

建立典型浅海波导下结构声辐射模型, 波导深度为 100 m, 海水密度为  $1\,024\text{ kg/m}^3$ , 声速剖面为图 12 中冬季 S4 区的声速梯度。海面为绝对软边界, 海底为半无限液态空间, 声速为  $1\,650\text{ m/s}$ , 密度为  $1\,900\text{ kg/m}^3$ , 吸收系数为  $0.8\text{ dB}/\lambda$ , 潜深为 50 m。首先在标准中规定的测量舰船辐射噪声的距离范围内, 对不同频率下的结构声源与点源的辐射声场特性进行对比分析, 此外还给出了自由场下辐射声场的计算结果作为参考。如图 7 所示, 计算频率为 10\200 Hz 以及宽带(频率范围为 10~200 Hz)时, 深度为 50 m 的水平截线上声压级随距离的变化曲线。

从趋势上看, 声源辐射声场随着距离按一定规律衰减, 但由于海面海底的影响, 波导中的辐射声场出现了复杂的干涉结构。由于不同频率的声波在浅海中存在的简正波的阶数不同, 随着激励力频率的增高, 声压级随距离的变化出现的起伏现象越发明显。当声源辐射宽带噪声时, 相较于辐射单频噪声时声压级随距离的起伏现象减弱。在近距离处, 结构声源的声场更为复杂, 与点声源有很大不同。

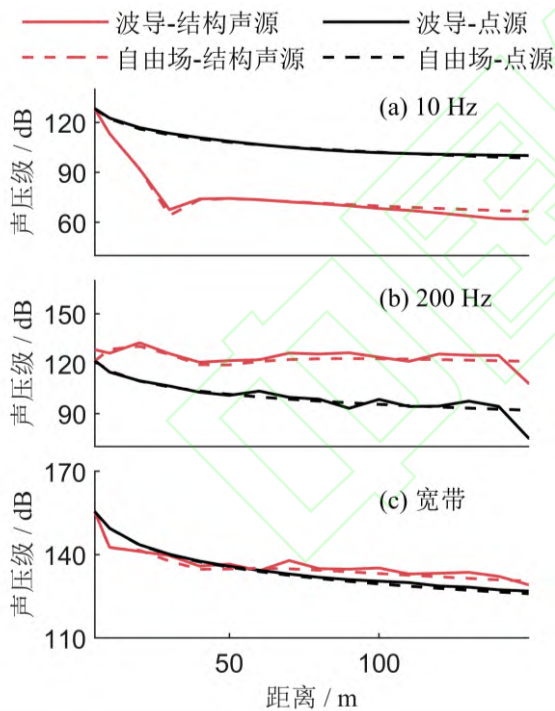


图 7 结构声源与点源辐射声场随距离变化曲线

Fig.7 Structural sound source and point source radiated sound fields with distance

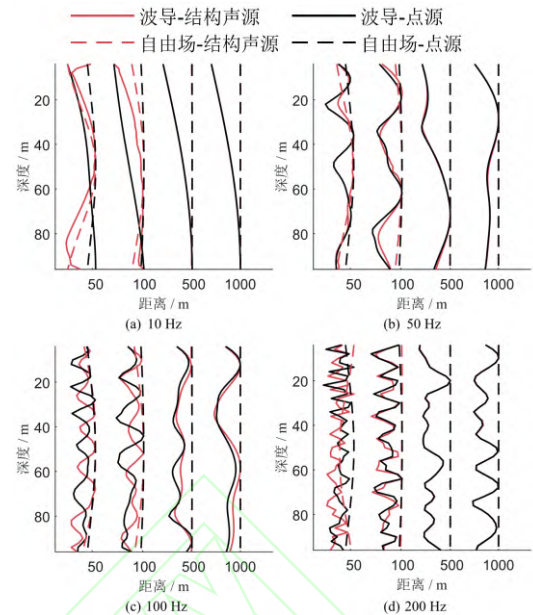


图 8 不同水平距离处深度方向上结构源与点源辐射声场

Fig.8 Radiated sound fields of structural and point sources in the depth direction at different horizontal distances

图 8 计算了在不同水平距离处深度方向上结构声源与点源的归一化声压幅值。可以看出, 由于海面及海底界面的存在, 在深度方向上的声场分布出现了类似驻波的分布。海面可以认为是绝对软表面, 声压会出现极小值, 而海底则是介质突变的界面, 波场会连续延伸到海底之下。在较近距离处, 结构源与点源在深度方向上的波动规律差距较大。随着距离的增加, 结构在深度方向上的辐射声场与点源的声场波动逐渐一致。这是由于本文中设置的结构模型的力激励点位于其  $z$  轴的中心, 因此在自由场中该模型的辐射声场是关于  $xoy$  平面对称的, 在远距离处接近于点源的辐射声场。随着频率的增加, 波导中存在的简正波阶数增多, 这会导致声场的干涉结构越发复杂。但高阶简正波的能量随传播距离衰减较大, 在远距离处能量主要集中在前几阶简正波上。所以远距离处深度方向上的声压波动情况没有近距离处剧烈。

## 2.2 海水深度对声场的影响

本节讨论了海水深度对浅海环境下结构体辐射声场的影响。浅海环境下, 海水深度决定了声波与界面接触的次数, 影响了浅海中声场的空间分布。图 9 和图 10 分别给出了近距离范围内及远距离范围内频率为 50 Hz 时不同海水深度下 (100、200、400 以及 1 000 m) 水平截线上声压级随距离的变化曲线, 2 图所采用的图例相同。其中水平截线的深度与结构体中心面深度相同, 结构声源及点源均位于水体中央, 并且给出了自由场声压级计算结果作为参考。



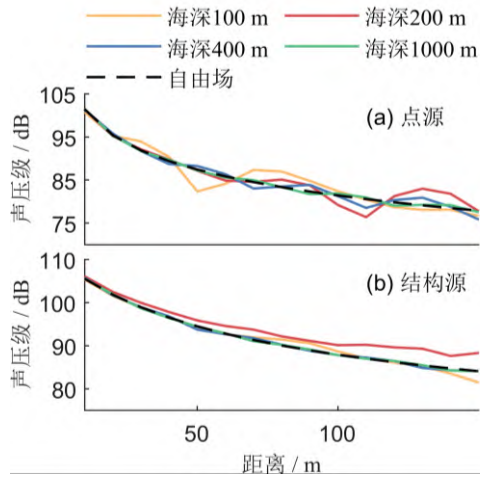


图9 不同海深条件下结构声源与点源辐射声场随距离变化曲线

Fig.9 Structural sound source and point source radiated sound fields with distance under different sea depth conditions

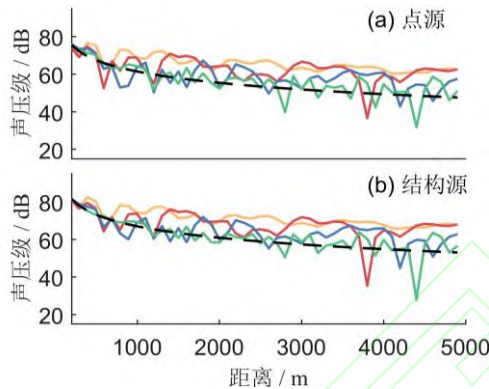


图10 不同海深条件下结构声源与点源辐射声场随距离变化曲线

Fig.10 Structural sound source and point source radiated sound fields with distance under different sea depth conditions

可以看出,在近距离处虽然有波导上下界面的存在,但直达波占场点声压的主要成分,并且海水深度越深,声源距离界面的距离越远,因此声压级随距离的变化趋势越接近于自由场的变化趋势。在标准规定的测量距离范围内,海深大于400 m时的辐射声场接近于自由场中的辐射声场。随着距离的增加,海面海底的影响逐渐显现,在传播过程中出现了明显的起伏现象。

### 2.3 潜深对声场的影响

本节讨论了潜深对浅海环境下结构体辐射声场的影响。当结构声源处于不同深度时,海面及海底的反射声对结构辐射声场的影响不同。图11给出了海水深度为100 m,频率为50 Hz时不同潜深条件下(30、50以及70 m)水平截线上声压级随距离的变化曲线,其中水平截线的深度与结构体中心面深度相同。

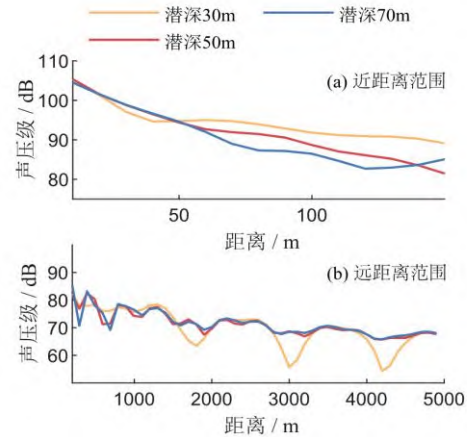


图11 不同潜深条件下结构声源与点源辐射声场随距离变化曲线

Fig.11 Structural sound source and point source radiated sound fields with distance under different submersion depth conditions

由图11可以看出,潜深对浅海环境下结构体辐射声场有较大的影响。虽然潜深30 m与潜深70 m均偏离水体中心20 m,但潜深70 m时声压级随距离的变化曲线与潜深50 m的变化曲线更为接近。这是由于本文中所设置的液态 Pekeris 波导的海底为声速1650 m/s,密度1900 kg/m<sup>3</sup>的半无限空间,相较于可以被视为绝对软边界的海面,声波会因为海底沉积层的透射作用而衰减,海底反射声与海面反射声相对声场的作用更小。

### 2.4 声速梯度对声场的影响

在浅海信道环境中,由于水深较浅,季节的改变和风浪作用等会使海水的压力和温度出现变化,进而导致海水声速常常随深度不同而存在差异。文献[19]中的研究表明,我国近海的浅海型海区(主要包括渤海、黄海、东海、北部湾以及南海北部)具有明显的季节性变化特征,冬季为正梯度或均匀型结构,春、夏、秋三季,海区呈现出“混合层+季节性跃层+下均匀层”的结构。本文选取其中较为有代表性的冬季S1子区域,秋季S1子区域以及冬季S4子区域的声速来讨论声速梯度对浅海环境下结构体辐射声场的影响,各区域声速梯度如图12所示。

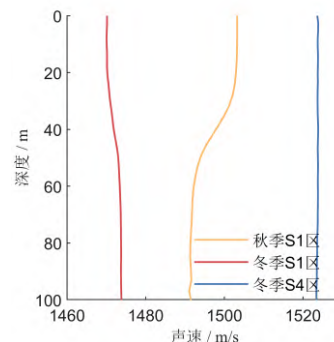


图12 浅海典型声速梯度示意图

Fig.12 Diagram of typical sound velocity gradient in shallow water

图13给出了频率为50 Hz时,不同声速梯度条



件下水平截线上声压级随距离的变化曲线,其中水平截线的深度为 50 m,海水深度为 100 m,结构源位于水体中央。可以看出在 50 m 以内的范围,声速梯度对声场的影响不大,3 种声速梯度的声压级计算结果比较接近。随着距离的增加,声速梯度对声场的影响开始显现。在 50 ~200 m 的距离范围内,冬季 S1 区与冬季 S4 区的声压级随距离变化曲线不存在明显差异,但秋季 S1 区的计算结果产生了较大的差异。这是由于虽然冬季 S1 区为正梯度型声速梯度结构,但其在各深度上的声速差距不大,基本接近于均匀型结构。而秋季 S1 区的声速梯度结构则与其他 2 种声速梯度有着较为明显的差别。当在远距离处,3 种声速梯度下的声场有着较为明显的差异。

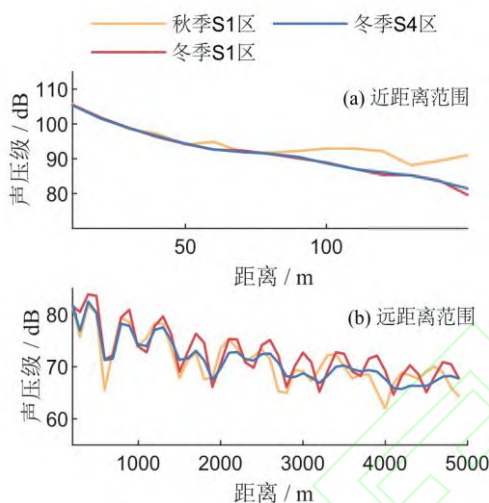


图 13 不同声速梯度条件下结构声源与点源辐射声场随距离变化曲线

Fig.13 Structural sound source and point source radiated sound fields with distance under different sound velocity gradient conditions

### 3 结论

1) 在较近距离处,结构声源的辐射声场与点源辐射声场相比,声场分布较为复杂。当到达一定距离后,其声场分布与点源辐射声场相似。

2) 在高频段,结构声源的辐射声场相较于低频段更为复杂。当结构声源辐射宽带噪声时声压级随距离变化曲线相较于辐射单频噪声时波动减小。

3) 随着海深以及声源与界面距离的增加,波导上下边界对声场的影响减小,在近距离处声源的声场分布越接近于自由场中的声场分布。

4) 在近距离处,声速剖面对声场的影响较小,但随着距离的增加影响逐渐增大

以上分析结果可以为浅海环境下结构声源的辐射噪声测量等领域的研究工作提供参考。但在本文的研究中仅考虑了液态 Pekeris 波导,在后续的工作中,可进一步分析弹性海底的影响。

### 参考文献:

- [1] 张磊, 胡震. 多学科设计优化方法在水下无人航行器中应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(1): 144-152.
- ZHANG Lei, HU Zhen. Application of multidisciplinary design optimization methods in underwater unmanned vehicle[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(1): 144-152.
- [2] 刘宁. 典型潜艇水下辐射噪声空间分布特性测试与分析技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- LIU Ning. The test and analysis technique research of space distributing characteristic on typical submarine's radiated noise[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006.
- [3] 胡鹏涛. 浅海中声能量分布的不均匀性对潜艇辐射噪声测量的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- HU Pengtao. The study on measurement of radiated noise from submarine due to inhomogeneous distribution of acoustic energy in shallow sea[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010.
- [4] 俞孟萨, 庞业珍. 舰船辐射声场及声源特性测量方法研究综述[J]. 船舶力学, 2017, 21(1): 107-126.
- YU Mengsa, PANG Yezhen. A review of measurement methods of radiation acoustic field and acoustic source characteristics for ships[J]. Journal of ship mechanics, 2017, 21(1): 107-126.
- [5] 庞业珍, 俞孟萨. 基于多距离声阵实测回归传播损失的浅水域水下辐射噪声源级测量方法[J]. 船舶力学, 2023, 27(4): 598-606.
- PANG Yezhen, YU Mengsa. Source level measurement method of underwater radiated noise in shallow water based on regression propagation loss using multi-distance arrays[J]. Journal of ship mechanics, 2023, 27(4): 598-606.
- [6] Underwater acoustics - Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships - Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes: ISO 17208-1[S]. ISO, 2016.
- [7] HE Tengjiao, WANG Bin, MO Shiqi, et al. Predicting range-dependent underwater sound propagation from structural sources in shallow water using coupled finite element/equivalent source computations[J]. Ocean engineering, 2023, 272: 113904.
- [8] KOOPMANN G H, SONG Limin, FAHNLIN J B. A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition[J]. Acoustical society of America journal, 1989, 86(6): 2433-2438.
- [9] 商德江, 钱治文, 何元安, 等. 基于联合波叠加法的浅海信道下圆柱壳声辐射研究[J]. 物理学报, 2018, 67(8): 125-138.
- SHANG Dejiang, QIAN Zhiwen, HE Yuan'an, et al. Sound radiation of cylinder in shallow water investigated by combined wave superposition method[J]. Acta physica sinica, 2018, 67(8): 125-138.
- [10] 卢晓亭, 张林. 水声传播建模研究现状综述[J]. 海洋技术, 2010, 29(4): 48-53.
- LU Xiaoting, ZHANG Lin. Review of sound propagation modeling in underwater warfare environment[J]. Ocean technology, 2010, 29(4): 48-53.
- [11] 李清, 杨德庆, 郁扬. 舰船低频水下辐射噪声的声固耦

- 合数值计算方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(3): 174-179.
- LI Qing, YANG Deqing, YU Yang. Numerical methods for ship underwater sound radiation in low frequency domain with vibro-acoustic coupling[J]. Journal of vibration and shock, 2018, 37(3): 174-179.
- [12] 王鹏. 声边界约束下水中有限长圆柱壳的声振特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- WANG Peng. Vibro-acoustic characteristics of A finite cylindrical shell submerged in bounded acoustic media[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [13] 陈心昭, 毕传兴. 近场声全息技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 79-85.
- [14] ZHANG Lanyue, WANG Jia, YANG Desen, et al. Optimization of the equivalent source configuration for the equivalent source method[J]. Journal of marine science and engineering, 2021, 9(8): 807.
- [15] 习强, 傅卓佳. 基于浅海环境潜器振动的水下声辐射计算模型研究进展[J]. 科学通报, 2022, 67(27): 3269-3281.
- XI Qiang, FU Zhuojia. A review of computational models for underwater acoustic radiation induced by structural vibration in the shallow marine environment[J]. Chinese science bulletin, 2022, 67(27): 3269-3281.
- [16] JENSEN F B, KUPERMAN W A, PORTER M B, et al. Computational Ocean Acoustics[M]. New York, NY: Springer New York, 2011.
- [17] 董博文. 复杂海洋环境舰船水下噪声特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
- DONG Bowen. Study on underwater noise characteristics of ships in complex ocean environment[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [18] 高源, 杨博全, 郭强, 等. 基于单元辐射叠加法的水下矩形板声场重建[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(5): 922-929.
- GAO Yuan, YANG Boquan, GUO Qiang, et al. Sound field reconstruction of an underwater rectangular plate based on the element radiation superposition method[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(5): 922-929.
- [19] 张旭, 张永刚, 黄飞灵, 等. 中国近海声速剖面的模态特征[J]. 海洋通报, 2010, 29(1): 29-37.
- ZHANG Xu, ZHANG Yonggang, HUANG Feiling, et al. Mode characteristics of sound speed profile in sea areas of China[J]. Marine science bulletin, 2010, 29(1): 29-37.