

基于势流理论的内孤立波与立管作用数值研究

胡英杰, 邹 丽, 孙 哲, 金国庆, 马鑫宇

THE NUMERICAL INVESTIGATION OF THE RESPONSE OF RISERS INDUCED BY INTERNAL SOLITARY WAVES BASED ON POTENTIAL FLOW THEORY

Hu Yingjie, Zou Li, Sun Zhe, Jin Guoqing, and Ma Xinyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/0459-1879-21-677>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

流致振动能量收集的钝头体几何设计研究

THE EFFECT OF GEOMETRIC FEATURE OF BLUFF BODY ON FLOW-INDUCED VIBRATION ENERGY HARVESTING
力学学报. 2021, 53(11): 3007-3015

利用摩擦纳米发电机的流体能量俘获研究新进展

PROGRESSION ON FLUID ENERGY HARVESTING BASED ON TRIBOELECTRIC NANOGENERATORS
力学学报. 2021, 53(11): 2910-2927

单一水平轴风电机组尾迹的模拟方法与流动机理研究综述

REVIEW OF RESEARCH ON THE SIMULATION METHOD AND FLOW MECHANISM OF A SINGLE HORIZONTAL-AXIS WIND TURBINE WAKE
力学学报. 2021, 53(12): 3169-3178

翼型颤振压电俘能器的输出特性研究

OUTPUT CHARACTERISTICS INVESTIGATION OF AIRFOIL-BASED FLUTTER PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTER
力学学报. 2021, 53(11): 3016-3024

高压捕获翼构型亚跨超流动特性数值研究

NUMERICAL STUDY ON FLOW CHARACTERISTICS OF HIGH-PRESSURE CAPTURING WING CONFIGURATION AT SUBSONIC, TRANSONIC AND SUPERSONIC REGIME
力学学报. 2021, 53(11): 3056-3070

基于S-ALE方法的圆柱体垂直出水破冰研究

RESEARCH ON VERTICAL MOVEMENT OF CYLINDRICAL STRUCTURE OUT OF WATER AND BREAKING THROUGH ICE LAYER BASED ON S-ALE METHOD
力学学报. 2021, 53(11): 3110-3123



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

基于势流理论的内孤立波与立管作用数值研究¹⁾

胡英杰* 邹 丽*,†,2) 孙 哲* 金国庆* 马鑫宇*

*(大连理工大学船舶工程学院, 辽宁大连 116024)

†(工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要 内孤立波是一种发生在水面以下的在世界各个海域广泛存在的大幅波浪, 其剧烈的波面起伏所携带的巨大能量对以海洋立管为代表的海洋结构物产生严重威胁, 分析其传播演化过程的流场特征及立管在内孤立波作用下的动力响应规律对于海洋立管的设计具有重要意义. 本文基于分层流体的非线性势流理论, 采用高效率的多域边界单元法, 建立了内孤立波流场分析计算的数值模型, 可以实时获得内孤立波的流场特征. 根据获得的流场信息, 采用莫里森方程计算内孤立波对海洋立管作用的载荷分布. 将内孤立波流场非线性势流计算模型与动力学有限元模型结合起来求解内孤立波作用下海洋立管的动力响应特征, 讨论了内孤立波参数、顶张力大小以及内部流体密度对立管动力响应的影响. 发现随着内孤立波波幅的增大, 海洋立管的流向位移和应力明显增大. 由于上层流体速度明显大于下层, 且在所研究问题中拖曳力远大于惯性力, 因此管道顺流向的最大位移发生在上层区域. 顶张力通过改变几何刚度阵的值进而对立管的响应产生明显影响. 对于弱约束立管, 内部流体的密度对管道的流向位移影响较小.

关键词 内孤立波, 海洋立管, 顶张力, 边界单元法, 分层流体

中图分类号: O352 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-21-677

THE NUMERICAL INVESTIGATION OF THE RESPONSE OF RISERS INDUCED BY
INTERNAL SOLITARY WAVES BASED ON POTENTIAL FLOW THEORY¹⁾

Hu Yingjie* Zou Li*,†,2) Sun Zhe* Jin Guoqing* Ma Xinyu*

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

†(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract Internal solitary waves are large waves that occur below the ocean surface and are widely present in all sea areas of the world. The huge wave profile undulations and energy pose a serious threat to marine structures like marine risers. Analysis of the flow field characteristics in the propagation and evolution process of internal solitary waves and the dynamic response law of the risers under the action of internal solitary waves are of great significance to the design of the marine risers. Multi-domain boundary element method is adopted to establish a numerical model to analyse and calculate the flow field of internal solitary wave based on the nonlinear potential flow theory in stratified fluids in this paper, and the flow field characteristics of internal solitary wave in real time can be obtained. The Morison equation is used to calculate the load distribution including inertia force and drag force induced by the internal solitary wave on the marine risers according to the flow field information calculated using the numerical simulations. The nonlinear potential

2021-12-20 收稿, 2022-02-17 录用, 2022-02-18 网络版发表.

1) 国家重点研发计划 (2019YFC0312400, 2019YFC0312402) 和国家自然科学基金 (52071056) 资助项目.

2) 邹丽, 教授, 主要研究方向: 海洋工程装备、深海矿产资源开发. E-mail: lizou@dlut.edu.cn

引用格式: 胡英杰, 邹丽, 孙哲, 金国庆, 马鑫宇. 基于势流理论的内孤立波与立管作用数值研究. 力学学报, 2022, 54(4): 892-900

Hu Yingjie, Zou Li, Sun Zhe, Jin Guoqing, Ma Xinyu. The numerical investigation of the response of risers induced by internal solitary waves based on potential flow theory. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(4): 892-900

flow calculation model of the internal solitary wave flow field is coupled with the dynamic finite element model to solve the dynamic response characteristics of the marine riser under the action of the nonlinear internal solitary wave. The influences of the internal solitary wave parameters, the top tension and the internal fluid densities on the dynamics of the riser are calculated and discussed. It is found that the displacement in flow direction of the ocean riser increases significantly as the amplitude of the internal solitary wave increases. The top tension has a significant impact on the response of the marine risers by changing the value of the geometric stiffness matrix. However, the density of the internal fluid has little effect on the displacement of the pipeline at flow direction for the weakly restrained risers.

Key words internal solitary waves, marine risers, top tension, boundary element method, stratified fluid

引言

海洋内波是一种发生在海面以下的波浪, 具有波幅大、周期长的特征, 内波在海洋中经常以大波幅的内孤立波及波列的形式传播, 在世界范围的海域内广泛存在^[1-3]. 在传播过程中, 内孤立波的流场会在海洋表面产生明显的特征, 因而使用合成孔径雷达 (SAR) 对海面特征的捕捉成为对其观测的重要依据^[4-6]. 同时, 使用声学多普勒流速仪 (ADCP) 等仪器的海洋实测也在多个区域观测到了内孤立波的存在^[7-8]. 通过遥感和实地观测表明我国南海也是内孤立波频发的海域^[9]. 在海洋资源开发过程中, 海洋石油和深海矿产输送立管长期在海上作业, 海洋立管在内孤立波流场的作用下会产生剧烈而大幅度的动力响应, 对管道的构形、结构强度、作业效率与安全都产生严重影响^[10]. 海洋内孤立波不仅对水下潜器和结构物影响巨大, 还会对海洋平台等水面结构物产生影响. 内孤立波在远距离传播过程中, 会在海洋表面引导出明显的海水流动, 因而会造成海洋平台的长距离漂移, 对锚泊结构是一个重大考验, 影响正常生产作业, 造成严重的经济损失^[11]. 在安德曼海作业的一个石油钻井机曾被海洋内孤立波的流场推移了 30.48 m, 严重影响作业安全^[12].

近年来, 内孤立波对海洋立管的作用引起了更多学者的关注. 文献 [13-15] 针对内孤立波对海洋立管的作用问题开展了系统深入的研究, 通过 KdV 和 mKdV 方程计算了内孤立波的流场特征, 采用动力有限元模型得到了顶张力立管的动力响应, 并讨论了内波参数对管道响应的影响. 文献 [16-18] 采用试验和数值模拟方法研究了内孤立波与海流共同作用下管道与海洋平台桩柱的动力响应问题, 获得了不同入射角度及不同波浪参数条件下的管道变形特征. Wang 等^[19] 采用非线性有限元模型计算了弱约

束深海矿产输送管道在内孤立波作用下的变形与运动特性, 讨论了内孤立波不同入射角度及水面平台运动对管道的影响. Wang 等^[20] 采用试验方法研究了内孤立波对小尺度桩柱的作用力分布特征, 讨论了不同水深条件下桩柱的受力情况, 分析了水动力系数选取与 KC 数的关系. Fan 等^[21] 基于欧拉-伯努利梁理论, 考虑了海流、表面波和内孤立波的共同作用, 发现内孤立波的存在明显增大了立管的变形包络, 并且分层流体的密度差也会对立管变形产生影响. 李朝玮等^[22] 采用准静态分析法研究了非均匀海流、表面波和内孤立波作用下隔水管的变形, 发现内孤立波对立管的横向位移和应力都有不可忽视的影响且表面波和内波相位角分别在 12° 和 0° 时对立管的影响最大. Zhang 等^[23] 采用数值模拟和试验方法研究了平台运动和内孤立波共同作用下顶张力立管的涡激振动特性, 发现内孤立波的波幅越大、平台升沉运动的频率越高, 立管的涡激振动越明显. Wang 等^[24] 在分层流水槽中开展模型试验分析了斜向入射的内孤立波的波流结构特征及其对水下细长结构的载荷作用特性. 文献 [25-28] 采用莫里森经验公式、模态分解和回归分析等方法对内孤立波对柱体及管道的动力载荷进行了深入分析.

内孤立波流场速度和加速度信息的准确获取是立管载荷确定的关键, 进而影响整个计算模型的准确性. 对于大尺度的海洋内孤立波, 无法开展实验获得流场信息, 同时求解 NS 方程的 CFD 方法计算量较大. 目前对大尺度内孤立波与立管作用的研究中, 内孤立波流场信息多是基于解析模型近似给定的. 本文工作基于势流理论采用多域边界单元法建立数值模型求解了内孤立波的流场特征, 较为高效又能实时准确地计算流场信息. 依据流场信息采用莫里森方程给定立管载荷, 采用动力学有限元方法计算了顶张力立管和弱约束立管的动力响应, 以期在海

洋立管设计在考虑内孤立波作用时提供参考.

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = 0, \text{ at } z = h_1 \quad (5)$$

1 计算模型

1.1 分层流体运动势流计算模型

内孤立波与立管作用如图 1 所示, 两层流体的深度分别为 h_1, h_2 ; 密度分别为 ρ_1, ρ_2 . 下凹型内孤立波位于密度界面分层处.

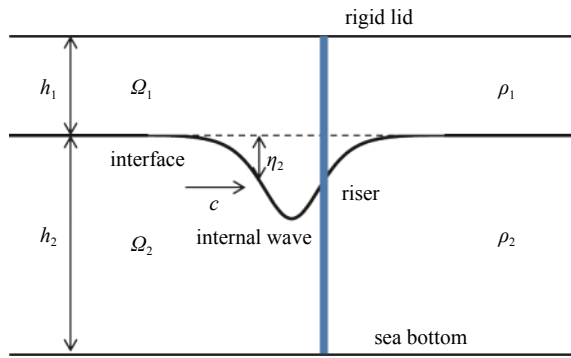


图 1 内孤立波与立管作用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the interaction between internal solitary wave and the riser

两层流体都假定为无旋, 无黏性, 不可压缩的, 因此两层流体中存在流动势函数 ϕ_k 满足拉普拉斯方程

$$\nabla^2 \phi_k = 0, \quad k = 1, 2 \quad (1)$$

在分层流体界面处的运动学边界条件为上下层流体沿界面法线方向的速度连续, 因此有

$$\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = \frac{\partial \phi_2}{\partial n}, \quad \text{at } z = \eta_2(x, t) \quad (2)$$

其中 η_2 为内孤立波波面, n 为计算区域 Ω_1, Ω_2 在界面处的外法线方向矢量.

在分层流体界面处的动力学边界条件为上下层流体区域在界面处的压力连续, 因此有

$$\rho_1 \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial t} + \frac{1}{2} |\nabla \phi_1|^2 + g \eta_2 \right) = \rho_2 \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial t} + \frac{1}{2} |\nabla \phi_2|^2 + g \eta_2 \right), \quad \text{at } z = \eta_2(x, t) \quad (3)$$

其中 g 为重力加速度. 海底满足不可穿透条件

$$\frac{\partial \phi_2}{\partial n} = 0, \quad \text{at } z = -h_2 \quad (4)$$

由于内孤立波传播时在海洋表面产生的波动较小, 为了提高计算效率, 本文对上表面采用刚盖假定, 因此上表面的边界条件为

通过格林第二定理, 可将上下两层流体区域 Ω_1, Ω_2 的控制方程拉普拉斯方程转化为两个边界上的曲线积分方程

$$c(\mathbf{r}) \phi_k(\mathbf{r}) = \int_{\Gamma_k} \left(\phi_k(\mathbf{q}) \frac{\partial G(\mathbf{r}, \mathbf{q})}{\partial n} - G(\mathbf{r}, \mathbf{q}) \frac{\partial \phi_k(\mathbf{q})}{\partial n} \right) d\mathbf{l}(\mathbf{q}) \quad (6)$$

其中 $\mathbf{r}$ 为源点, $\mathbf{q}$ 为场点, $G(\mathbf{r}, \mathbf{q}) = -1/(2\pi) \ln |\mathbf{r} - \mathbf{q}|$ 为格林函数, $c(\mathbf{r}) = 1 - \alpha(\mathbf{r})/(2\pi)$, $\alpha(\mathbf{r})$ 为场点 $\mathbf{r}$ 处的单元夹角, Γ_k 为上下层区域边界.

由于内孤立波位于密度分层的流场中, 所以计算过程需要涉及两个流体区域, 进而要将单独区域的边界单元法扩展到多个区域^[29-30]. 对于计算区域 Ω_1, Ω_2 的边界分别采用 n 个线单元进行离散, 从而积分方程 (6) 可以写成如下的形式

$$c(\mathbf{r}) \phi_{ki}(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^n \left[\int_{\Gamma_{kj}} \phi_{kj}(\mathbf{q}) \frac{\partial G(\mathbf{r}_i, \mathbf{q})}{\partial n} d\mathbf{l}(\mathbf{q}) \right] - \sum_{j=1}^n \left[\int_{\Gamma_{kj}} \psi_{kj}(\mathbf{q}) G(\mathbf{r}_i, \mathbf{q}) d\mathbf{l}(\mathbf{q}) \right] \quad (7)$$

其中, $\psi_{kj}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \phi_{kj}(\mathbf{q})}{\partial n}$.

根据两个区域的关系, 可以将边界点分为公共边界点和自身边界点, 从而将积分方程进一步处理为

$$c_i \phi_{ki} + \sum_{j=1}^{n^s} \left(\phi_{ki}^s \int_{\Gamma_{kj}^s} \frac{\partial G(\mathbf{r}_i, \mathbf{q})}{\partial n} d\mathbf{l}(\mathbf{q}) \right) + \sum_{j=1}^{n^c} \left(\phi_{ki}^c \int_{\Gamma_{kj}^c} \frac{\partial G(\mathbf{r}_i, \mathbf{q})}{\partial n} d\mathbf{l}(\mathbf{q}) \right) = \sum_{j=1}^{n^s} \left(\psi_{kj}^s \int_{\Gamma_{kj}^s} G(\mathbf{r}_i, \mathbf{q}) d\mathbf{l}(\mathbf{q}) \right) + \sum_{j=1}^{n^c} \left(\psi_{kj}^c \int_{\Gamma_{kj}^c} G(\mathbf{r}_i, \mathbf{q}) d\mathbf{l}(\mathbf{q}) \right) \quad (8)$$

其中, 上标 c 和 s 分别指公共边界点和自身边界点.

波面位置和速度势的更新格式分别根据运动学和动力学边界条件给定

$$\frac{D\mathbf{r}_2}{Dt} = \nabla \phi_1 \quad (9)$$

$$\frac{D\phi}{Dt} = -\frac{1}{2}|\nabla\phi_2|^2 - \frac{\gamma}{2}|\nabla\phi_1|^2 + \nabla\phi_1 \cdot \nabla\phi_2 + (\gamma-1)g\eta_2 \quad (10)$$

其中 $\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \nabla\phi \cdot \nabla$ 为物质导数算子, $\gamma = \rho_1/\rho_2$, $\phi = \phi_2 - \gamma\phi_1$.

内孤立波初始波形的给定依据强非线性的 MCC 模型, 实现对大振幅内孤立波的准确模拟.

1.2 管道动力响应模型

在内孤立波由远方向立管传播过程中, 立管处的流场速度及加速度是实时变化的, 因此不能用简单的均匀流或剪切流静力假定求解, 需要采用动力学进行求解.

海洋立管的动力学控制方程

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{Q}(t) \quad (11)$$

其中, $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{K}$ 分别为质量阵、刚度阵和阻尼阵, $\mathbf{x}(t)$, $\dot{\mathbf{x}}(t)$, $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ 分别为管道的变形位移、速度和加速度. $\mathbf{Q}(t)$ 为载荷向量, 根据内孤立波流场的速度、加速度以由莫里森方程给定.

在计算中需要考虑管道轴向张力的影响, 因此管道的刚度阵由两个部分组成, 分别是弹性刚度阵 $\mathbf{K}_E$ 和几何刚度阵 $\mathbf{K}_G$, 即

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_E + \mathbf{K}_G \quad (12)$$

单元几何刚度阵 $\mathbf{K}_G^{(e)}$ 与立管单元的有效张力 T_e 具有直接关系, 具体表达形式为

$$\mathbf{K}_G^{(e)} = \frac{T_e}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1.2 & 0.1L & 0 & -1.2 & 0.1L \\ 0 & 0.1L & \frac{2L^2}{15} & 0 & -0.1L & -\frac{L^2}{30} \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1.2 & -0.1L & 0 & 1.2 & -0.1L \\ 0 & 0.1L & -\frac{L^2}{30} & 0 & -0.1L & \frac{2L^2}{15} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中 L 为管道单元的长度.

阻尼阵采用瑞利阻尼, 质量阵与刚度阵的线性组合形式

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad (14)$$

其中 α 和 β 为比例系数, 根据模态频率给定, 分别为

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(\omega_2\zeta - \omega_1\zeta)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

$$\beta = \frac{2(\omega_2\zeta - \omega_1\zeta)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}$$

ω_1 和 ω_2 分别为管道的一阶和二阶频率, ζ 为管道的阻尼比.

采用 Newmark- β 法求解动力学控制方程 (11), 获得管道的动力响应.

2 内孤立波载荷

在通过对边界积分方程的求解获得区域边界上的速度势及其法向导数值后, 流场内部速度势可以用方程 (15) 表达. 对积分方程 (15) 进行微分, 即可将速度势的积分方程转化为关于流场速度的积分方程 (16), 对方程进行离散求解即可获得内孤立波流场内部的速度分布特征, 即

$$\phi_k(\mathbf{r}) = \int_{\Gamma_k} \left(\phi_k(\mathbf{q}) \frac{\partial G(\mathbf{r}, \mathbf{q})}{\partial n} - \psi_k(\mathbf{q}) G(\mathbf{r}, \mathbf{q}) \right) d\mathbf{l}(\mathbf{q}) \quad (15)$$

$$\mathbf{u}_k(\mathbf{r}) = \nabla\phi_k(\mathbf{r}) = \int_{\Gamma_k} (\phi_k(\mathbf{q}) \mathbf{Q}_n(\mathbf{r}, \mathbf{q}) - \psi_k(\mathbf{q}) \mathbf{Q}(\mathbf{r}, \mathbf{q})) d\mathbf{l}(\mathbf{q}) \quad (16)$$

其中, $\mathbf{Q}(\mathbf{r}, \mathbf{q}) = \frac{\mathbf{r}}{2\pi r^2}$, $\mathbf{Q}_n(\mathbf{r}, \mathbf{q}) = \frac{1}{2\pi r^2} \left[n - \frac{2\mathbf{r}}{r^2} (\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}) \right]$.

在进行计算求解时, 当内部的待求点与边界节点接近时, 格林函数会表现出近奇异特征, 导致计算精度降低甚至使计算失效. 本文的研究中采用了单元子分法^[31-32]来解决这一问题, 得到了良好的计算结果. 为了验证计算模型的准确性, 与文献中的内孤立波水平速度垂向分布试验结果^[33]进行了对比. 试验在分层流体水槽中开展, 上层流体深度 $h_1 = 15$ cm, 下层深度 $h_2 = 62$ cm, 密度分别为 $\rho_1 = 0.999$ kg/m³, $\rho_2 = 1022$ kg/m³, 内孤立波无量纲波幅为 $a/h_1 = 0.22$. 计算结果与分层流体内孤立波传播试验流场的测量结果吻合良好如图 2 所示. 计算得到的内孤立波流场速度分布如图 3 所示, 计算结果表明内孤立波流场速度具有明显的剪切特征, 上层流体的质点速度与内孤立波的传播方向相同, 而下层流体则与之相反, 且上层流体质点速度的绝对值要明显大于下层流体. 图 4 为内孤立波流场的水平速度在上层流体区域 $z/h_1 = 0.2$ 处沿水平方向的分布情况. 可以发现水平速度的最大值位于波谷位置 ($x/h_1 = 25$), 且随着与波谷距离的增大而迅速衰减. 图 5 为 $z/h_1 = 0.2$ 处流体质点加速度在波长方向的

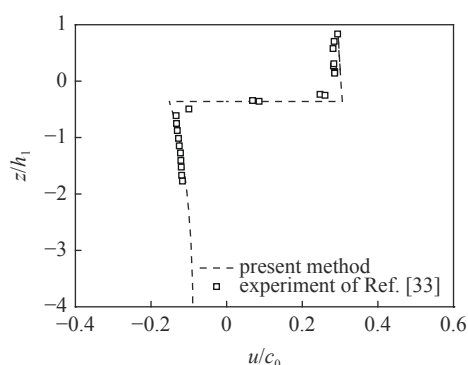


图2 水平速度垂向分布与文献 [33] 结果对比

Fig. 2 Comparison between the calculation result about the vertical distribution of horizontal velocity with the result of Ref. [33]

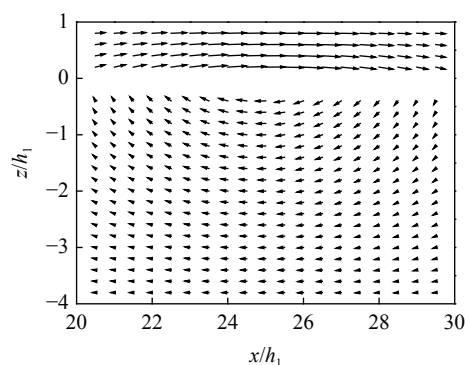


图3 内孤立波流场速度分布

Fig. 3 Velocity distribution of internal solitary wave flow field

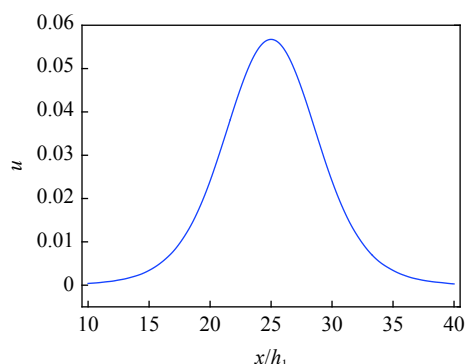


图4 内孤立波水平速度沿水平方向的分布

Fig. 4 Horizontal velocity distribution of internal solitary wave

分布情况,加速度的最大值位于波谷两侧,波谷位置处的加速度为零。

由于深海矿产输送管道具有大长细比特征,因此采用经典的莫里森公式作为桥梁将非线性内孤立波数值计算模型和管道响应的计算模型连接起来,从而实现内孤立波对管道作用的准确求解。

由于内孤立波对管道的作用过程中管道变形较

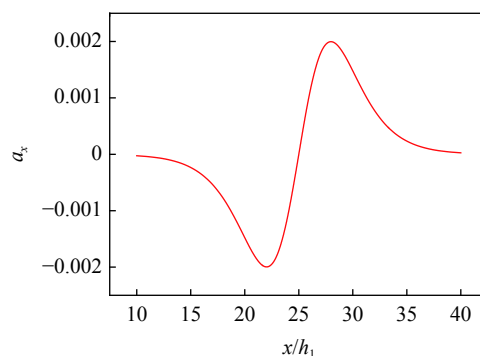


图5 内孤立波水平加速度分布

Fig. 5 Horizontal acceleration distribution of internal solitary wave

大,所以要考虑管道的位移以及管道倾角的影响,因此内孤立波对管道作用力的莫里森公式写成如下形式

$$F = C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} (\dot{U}_n - \ddot{x}) + \frac{1}{2} C_d \rho D (U_n - \dot{x}) |U_n - \dot{x}| \quad (17)$$

其中, C_m 为惯性力系数,本文计算取为 2.0; C_d 为拖曳力系数,取为 1.2; U_n 为垂直于轴向的内孤立波流场速度, $\dot{U}_n$ 为对应的加速度; ρ 为海水密度, $\dot{x}$ 和 $\ddot{x}$ 分别为管道运动的速度和加速度。根据前面内孤立波流场速度和加速度的计算结果及莫里森方程可知,当管道的直径相对较小时,对管道响应起主要作用的载荷为内孤立波对管道的拖曳力,惯性力的影响相对较小。

3 管道动力响应

3.1 顶张力立管动力响应

在海洋石油开采等领域,顶张力立管得到了广泛的应用,本文计算了内孤立波对顶张力立管的作用特性。为了验证本文计算模型的准确性,将计算结果与文献 [34] 结果进行了对比。上下层流体深度分别为 60 m 和 412 m,密度分别为 $\rho_1 = 1025 \text{ kg/m}^3$, $\rho_2 = 1028 \text{ kg/m}^3$,管道内外径分别为 0.26 m 和 0.21 m,内孤立波波幅为 75 m。对比结果如图 6 所示,可以发现两者吻合较好。由于本文内孤立波流场的给定方法与文献有一定区别,所以动力响应结果稍有偏差,管道顺流向最大位移处的偏差约为 3.34%。

本文计算的顶张力立管的几何参数和物理参数见表 1。为了讨论顶张力大小对管道动力响应的影响,顶张力 T 分别取为 400 kN, 500 kN, 600 kN, 700 kN, 800 kN。

计算中采用的分层流体参数见表 2。为了研究内

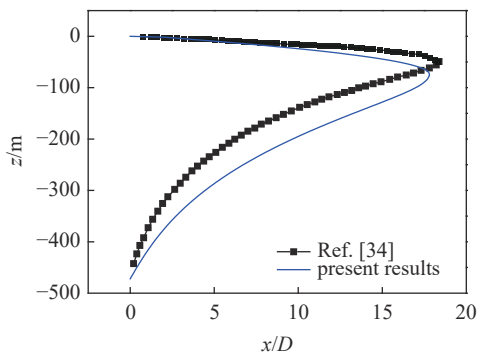


图 6 管道流向最大位移与文献 [34] 计算结果对比

Fig. 6 Comparison of the maximum displacement of the pipe in flow direction with the calculation results in the Ref. [34]

表 1 顶张力立管参数

Table 1 Parameters of the top tension riser

Parameters	Value
total length L/m	300
external diameter D/m	0.25
inner diameter d/m	0.2
material density $\rho_r/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7850
inner fluid density $\rho_f/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	800
elasticity modulus E/GPa	210

表 2 流体分层参数

Table 2 Parameters of stratified fluids

Parameters	Value
upper fluid depth h_1/m	50
lower fluid depth h_2/m	250
upper fluid density $\rho_1/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1025
lower fluid density $\rho_2/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1028

孤立波参数对管道动力响应的影响, 内孤立波的波幅分别给定为 40 m, 50 m, 60 m, 70 m, 80 m.

不同内孤立波波幅时管道的变形特征如图 7 所示, 可以发现立管的动力响应对波高敏感, 随着波高的增加, 管道的流向位移明显增大. 同时, 由于上层流体速度明显大于下层, 且在所研究问题中拖曳力远大于惯性力, 因此管道顺流向的最大位移发生在上层区域.

当内孤立波波幅为 60 m 时不同顶张力条件下的立管变形特征如图 8 所示, 可以发现顶张力对管道的流向变形具有重要影响. 在相同内孤立波参数

的条件下, 施加的顶张力越大, 管道的变形越小. 图 9 展示了不同张力时管道流向最大变形的变化趋势. 这是由于随着顶张力 T 的增加, 作用在管道单元上的有效张力 T_e 也逐渐增大, 通过方程 (13) 可知, 管道的几何刚度阵 K_G 值将随之增大, 进而提高管道的整体刚度. 因此, 在相同参数的内孤立波作用下, 顶张力越大, 管道的顺流向变形越小.

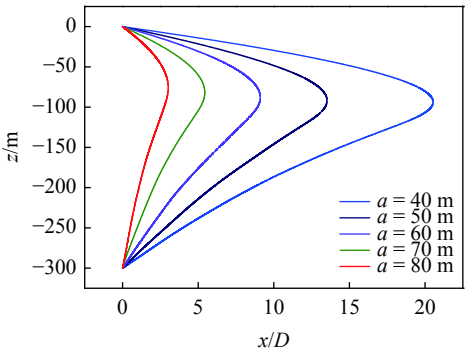


图 7 不同内孤立波入射波幅时顶张力立管的流向变形特征

Fig. 7 Characteristics deformation of top tension riser in flow direction with different incident amplitudes of internal solitary waves

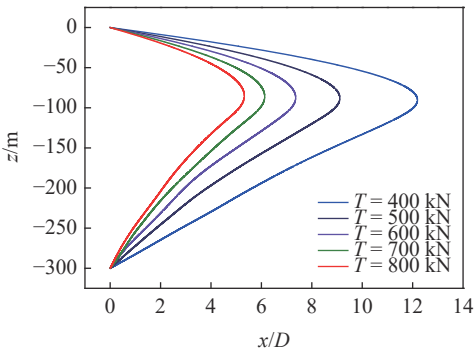


图 8 不同顶张力时管道的变形特征

Fig. 8 Deformation characteristics of the riser under different top tensions

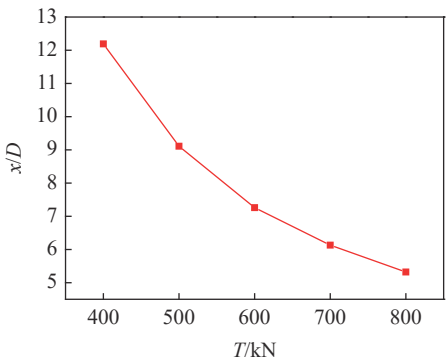


图 9 管道最大流向位移随顶张力大小的变化关系

Fig. 9 The relationship between the maximum displacement of the riser in flow direction and the value of the top tension

图 10 展示了 $z = -40\text{ m}$ 位置处管道的应力在不同内孤立波波幅条件下的变化特征. 管道应力随着波幅的增大而显著增大, 同时波幅较小的内孤立波作用时管道的最大应力时刻出现滞后. 根据分层流体 $\mathbf{KdV}$ 理论, 内孤立波的波速可以表示为 $c = c_0 + \frac{ac_1}{3}$, 其中 c_0 和 c_1 是与分层流体厚度和密度有关的量, 因此当分层参数确定之后, 内孤立波的波速与波幅密切相关, 波幅越大的内孤立波具有更大的波速. 因此, 当波幅较小时, 内孤立波传播到管道位置处的时间显著增加, 管道的最大应力出现的时刻明显滞后.

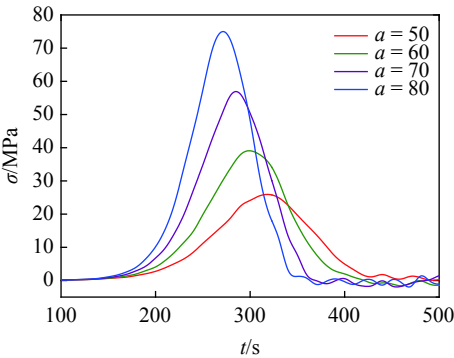


图 10 不同波幅内孤立波作用下管道的应力变化
Fig. 10 Stress changes of the riser under the action of solitary waves with different amplitudes

3.2 弱约束立管动力响应

本文讨论的弱约束立管是指上端与水面设备固定连接, 下端为自由端的海洋立管, 一般在深海采矿等领域得到应用. 计算所采用的管道几何和物理参数如表 3 所示.

为了讨论内孤立波参数对弱约束立管的作用规律, 计算了不同波幅内孤立波作用下的立管动力响

应如图 11 所示. 从图中可以发现内孤立波波幅的变化对立管变形作用明显, 立管的流向位移随初始内孤立波波幅的增大而显著增大.

对于深海矿产输送管道, 输送矿物浓度的变化会导致内部流体密度的变化, 因此本文讨论了内部流体不同密度对管道响应特征的影响. 不同内部流体浓度条件下管道变形特征如图 12 所示. 从图中发现, 管道内部流体密度对弱约束管道的流向变形影响较小.

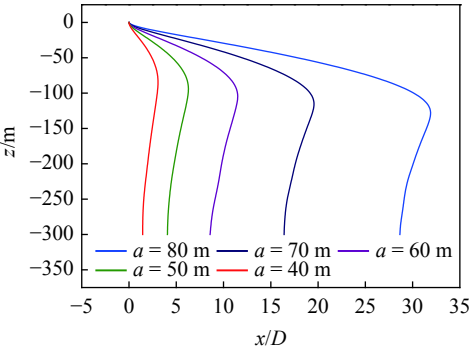


图 11 不同波幅内孤立波作用下弱约束立管的变形特征
Fig. 11 Characteristics deformation of weakly constrained riser in flow direction with different incident amplitudes of internal solitary waves

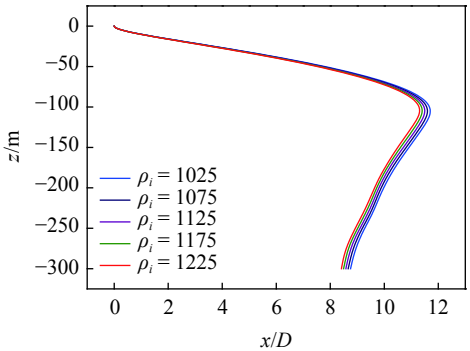


图 12 内部流体密度对弱约束管道位移的影响
Fig. 12 Influence of inner fluid densities on displacement of weakly constrained riser

表 3 弱约束立管参数

Table 3 Parameters of the weakly constrained riser

Parameters	Value
total length L/m	300
external diameter D/m	0.25
inner diameter d/m	0.2
material density $\rho_r/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7850
additional weight T/kN	100
elasticity modulus E/GPa	210

4 结论

本文基于势流理论采用多域边界单元法建立了内孤立波流场的计算模型, 内孤立波波面采用全非线性动力学和运动学边界条件, 准确获得了内孤立波流场的速度分布特征. 上下层的流体质点速度方向相反, 对于下凹型内孤立波, 上层流体速度与波的传播方向相同, 下层速度与之相反, 且上层流体质点速度明显大于下层.

根据计算获得的内孤立波流场信息, 采用莫里森方程确定了内孤立波对海洋立管的载荷输入, 计算了顶张力立管和弱约束立管在内孤立波作用下的动力响应特征. 管道的顺流向位移和管道应力随内孤立波波幅的增大而显著, 同时顶张力通过改变几何刚度阵而对管道的动力响应产生明显影响. 由于上层流体速度明显大于下层, 且在所研究问题中拖曳力远大于惯性力, 因此管道顺流向的最大位移发生在上层区域. 同时计算了不同波幅和不同内部流体密度条件下弱约束管道的动力响应, 发现内孤立波波幅对弱约束管道的动力响应影响显著, 而管道内部流体密度的影响则相对较小.

本文中内孤立波对立管的作用载荷根据流场信息采用莫里森方程给定, 没有考虑管道的涡激振动响应特征. 为了更加全面分析管道在内孤立波作用下的动力响应规律, 需要在今后的研究中进一步改进, 为实际工程中的海洋立管设计和安全性评估提供更加充分的依据.

参 考 文 献

- Helfrich KR, Melville WK. Long nonlinear internal waves. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2006, 38: 395-425
- Stanton TP, Ostrovsky LA. Observations of highly nonlinear internal solitons over the continental shelf. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(14): 2695-2698
- 李家春. 水面下的波浪——海洋内波. 力学与实践, 2005, 27(2): 1-6 (Li Jiachun. Billow under the sea surface-internal waves in the ocean. *Mechanics in Engineering*, 2005, 27(2): 1-6 (in Chinese))
- Alpers W. Theory of radar imaging of internal waves. *Nature*, 1985, 314(6008): 245-247
- Magalhaes JM, Da Silva JCB. Internal solitary waves in the andaman sea: New insights from SAR imagery. *Remote Sensing*, 2018, 10(6): 861
- Pisoni JP, Glembocki NG, Romero SI, et al. Internal solitary waves from L-band SAR over the Argentine inner Patagonian shelf. *Remote Sensing Letters*, 2020, 11(6): 525-534
- Groeskamp S, Nauw JJ, Maas LRM. Observations of estuarine circulation and solitary internal waves in a highly energetic tidal channel. *Ocean Dynamics*, 2011, 61(11): 1767-1782
- Gentil M, Floc' HF, Meunier T, et al. Internal solitary waves on the NW African shelf: A heuristic approach to localize diapycnal mixing hotspots. *Continental Shelf Research*, 2021, 226: 104492
- 蔡树群, 何建玲, 谢皆烁. 近 10 年来南海孤立内波的研究进展. 地球科学进展, 2011, 26(7): 703-710 (Cai Shuqun, He Jianling, Xie Jieshuo. Recent decadal progress of the study on internal solitons in the south china sea. *Advance in Earth Sciences*, 2011, 26(7): 703-710 (in Chinese))
- 安万博, 郭海燕, 刘震. 内波流场中悬链线立管涡激振动数值研究. 中国海洋大学学报, 2021, 51(8): 72-78 (An Wanbo, Guo Haiyan, Liu Zhen. Numerical study on vortex-induced vibration of catenary riser in internal wave flow field. *Periodical of Ocean University of China*, 2021, 51(8): 72-78 (in Chinese))
- 蔡树群, 甘子钧. 南海北部孤立子内波的研究进展. 地球科学进展, 2001, 16(2): 215-219 (Cai Shuqun, Gan Zijun. Research progress of internal solitary waves in the northern South China Sea. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(2): 215-219 (in Chinese))
- Osborne AR, Burch TL. Internal solitons in the andaman sea. *Science*, 1980, 208(4443): 451-460
- 刘治威, 郭海燕, 李晶石. 内孤立波与定常流共同作用下竖直圆管的响应分析. 海洋湖沼通报, 2021, 43(4): 31-171 (Liu Zhiwei, Guo Haiyan, Li Jingshi. Response analysis of vertical circular tube under the action of internal solitary wave and constant current. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2021, 43(4): 31-171 (in Chinese))
- 张莉, 郭海燕, 李朋等. 上凸型内孤立波场中顶张力立管极值响应分析. 船舶力学, 2019, 23(2): 163-171 (Zhang Li, Guo Haiyan, Li Peng, et al. Extreme response of top tensioned riser under elevation internal solitary wave. *Journal of Ship Mechanics*, 2019, 23(2): 163-171 (in Chinese))
- 张莉, 郭海燕, 李效民. 南海内孤立波作用下顶张力立管极值响应研究. 振动与冲击, 2013, 32(10): 100-104 (Zhang Li, Guo Haiyan, Li Xiaomin. Extreme response of top tensioned riser under internal solitary wave in South China Sea. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(10): 100-104 (in Chinese))
- 刘碧涛, 李巍, 尤云祥等. 内孤立波与深海立管相互作用数值模拟. 海洋工程, 2011, 29(4): 1-7 (Liu Bitao, Li Wei, You Yunxiang, et al. Numerical simulation of interaction of internal solitary waves with deep-sea risers. *The Ocean Engineering*, 2011, 29(4): 1-7 (in Chinese))
- 尤云祥, 李巍, 时忠民等. 海洋内孤立波中张力腿平台的水动力特性. 上海交通大学学报, 2010, 11(1): 56-61 (You Yunxiang, Li Wei, Shi Zhongmin, et al. Hydrodynamic characteristics of tension leg platforms in ocean internal solitary waves. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2010, 11(1): 56-61 (in Chinese))
- 蒋武杰, 林忠义, 尤云祥等. 内孤立波与非均匀海流共同作用下顶张立管动力特性. 水动力学研究与进展, 2012, 27(4): 421-435 (Jiang Wujie, Lin Zhongyi, You Yunxiang, et al. Dynamic characteristics of a top tension riser under combined internal solitary wave and non-uniform current. *Journal of Hydrodynamics*, 2012, 27(4): 421-435 (in Chinese))
- Wang RY, Chen GM, Liu XQ, et al. Safety analysis of deep-sea mining pipeline deployment operations considering internal solitary waves. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021, 40(2): 125-13
- Wang F, Wang CX, Fu Q, et al. Experimental study on flow field induced by internal solitary wave and load characteristics on pile sec-

- tions at different depth. *Ocean Engineering*, 2019, 188: 106292
- 21 Fan HH, Li CW, Wang ZM, et al. Dynamic analysis of a hang-off drilling riser considering internal solitary wave and vessel motion. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 37: 512-522
 - 22 李朝玮, 樊洪海, 汪志明等. 非均匀海流、表面波与内孤立波共同作用下钻井隔水管准静态分析. *中国海上油气*, 2015, 27(2): 78-86 (Li Chaowei, Fan Honghai, Wang Zhiming, et al. Quasi-static analysis of a drilling riser under combined loads of non-uniform currents, surface waves and internal solitary waves. *China Offshore Oil and Gas*, 2015, 27(2): 78-86 (in Chinese))
 - 23 Zhang J, Zeng Y, Tang YG, et al. Numerical and experimental research on the effect of platform heave motion on vortex-induced vibration of deep sea top-tensioned riser. *Shock and Vibration*, 2021, 2021: 8866051
 - 24 Wang SD, Wei G, Du H, et al. Experimental investigation of the wave-flow structure of an oblique internal solitary wave and its force exerted on a slender body. *Ocean Engineering*, 2020, 201: 107057
 - 25 Cai SQ, Xu JX, Chen ZW, et al. The effect of a seasonal stratification variation on the load exerted by internal solitary waves on a cylindrical pile. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(7): 21-26
 - 26 Cai SQ, Wang SG, Long XM. A simple estimation of the force exerted by internal solitons on cylindrical piles. *Ocean Engineering*, 2006, 33(7): 974-980
 - 27 Cai SQ, Long XM, Gan ZJ. A method to estimate the forces exerted by internal solitons on cylindrical piles. *Ocean Engineering*, 2003, 30(5): 673-689
 - 28 Cai SQ, Long XM, Wang SG. Forces and torques exerted by internal solitons in shear flows on cylindrical piles. *Applied Ocean Research*, 2008, 30(1): 72-77
 - 29 Gao XW, Guo L, Zhang C. Three-step multi-domain BEM solver for nonhomogeneous material problems. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2007, 31(12): 965-973
 - 30 Zou L, Hu YJ, Wang Z, et al. Computational analyses of fully nonlinear interaction of an internal solitary wave and a free surface wave. *Aip Advances*, 2019, 9(3): 035234
 - 31 Gao XW, Davies TG. *Boundary Element Programming in Mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
 - 32 王静, 高效伟. 基于单元子分法的结构多尺度边界单元法. *计算力学学报*, 2010, 27(2): 258-263 (Wang Jing, Gao Xiaowei. Structural multi-scale boundary element method based on element subdivision technique. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2010, 27(2): 258-263 (in Chinese))
 - 33 Grue J, Jensen A, Rusas P, et al. Properties of large-amplitude internal waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 1999, 380: 257-278
 - 34 Guo H, Zhang L, Li X, et al. Dynamic responses of top tensioned riser under combined excitation of internal solitary wave, surface wave and vessel motion. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(1): 6-12