

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2020.05.22

限制性航道中船行波传播特性的数值研究

王孟飞¹, 邓斌^{1,2,3}, 蒋昌波^{1,2,3}, 伍志元^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114; 3. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114)

摘要: 基于完全非线性 Boussinesq 方程的开源程序包 FUNWAVE - TVD 建立了限制性航道中船行波运动的数值模型, 重点分析了船舶在该类型航道中诱导生成的最大船首孤立波波高、最大船尾波波高以及最大近岸横向流速的时空分布规律。结果表明: 模型能较好地捕捉船行波在限制性航道中的演化过程; 根据回归分析得到了最大船首孤立波波高 η_{\max} 与船舶吃水 p 、弗汝德数 F_r 的幂函数型经验关系; 最大船尾波波高 η_{\max} 及最大近岸横向流速 $u_{y\max}$ 随船舶吃水 p 和弗汝德数 F_r 的不同呈分段式变化规律。研究结果可为限制性内河单线航道的设计以及通航要求提供参考。

关键词: 船行波; 限制性航道; Boussinesq 模型; FUNWAVE - TVD

中图分类号: TV143

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)05-0157-07

Numerical study on propagation characteristics of ship waves in a restricted channel

WANG Mengfei¹, DENG Bin^{1,2,3}, JIANG Changbo^{1,2,3}, WU Zhiyuan^{1,2,3}

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-environmental Control and Restoration of Hunan Province,

Changsha, Changsha 410114, China; 3. Key Laboratory of Water-sediment Sciences and Water Disaster

Prevention of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: Based on the open source package FUNWAVE - TVD in the fully nonlinear Boussinesq equation, a numerical model of ship wave motion in restricted channels was established. The spatial and temporal distribution laws of the maximum bow solitary wave height, the maximum stern wave height and the maximum nearshore lateral velocity induced by ships in this type of channels are emphatically analyzed. The results showed that the model performed better at capturing the propagation and evolution of ship waves in restricted channels. According to the regression analysis, the power function empirical relationship between the maximum bow solitary wave height η_{\max} and the ship draft p , Froude Number F_r was obtained. The maximum stern wave height η_{\max} and the maximum nearshore lateral velocity $u_{y\max}$ showed a piecewise variation rule with the ship draft p and Froude Number F_r . The research results can provide reference for the design and navigation requirements of restricted single channels.

Key words: ship wave; restricted channel; Boussinesq model; FUNWAVE - TVD

1 研究背景

限制性航道是指因水域狭窄、断面系数小而对船舶航行有明显限制作用的航道。限制性航道中船行波具有波高大、流速急等特点^[1], 易破坏航道环

境^[2]和航道边坡^[3]或对其他涉水建筑物造成干扰或损害^[4]。目前, 我国内河通航标准中关于限制性航道尺度的确定, 仅给出双航线下的最小取值(限制性航道断面系数大于6), 航道尺寸的确定仅依据航迹带宽度附加一定安全距离, 没有充分考虑航道

收稿日期: 2020-01-17; 修回日期: 2020-03-14

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2018JJ3535), 湖南省教育厅科研项目(CX2018B553)

作者简介: 王孟飞(1995-), 男, 山东平度人, 硕士研究生, 研究方向为水动力学数值模拟研究。

通讯作者: 邓斌(1985-), 男, 湖南长沙人, 博士, 副教授, 研究方向为水动力学数值模拟研究。

尺寸与船舶航行条件的影响。为防止船行波对航道及周围船舶产生影响,往往仅规定航道内船舶的限制航速^[5]。近年来,随着“一带一路”的深入推进,我国内河航运的任务日益繁重,船舶大型化、快速化的发展特点,使得现有航运条件日益紧张,加大对限制性航道的开发与恢复通航越来越受关注。因此,深入开展限制性航道通航关键技术研究极为必要,特别是限制性水域条件中船行波的相关研究。

目前,国内外很多学者通过现场调查^[3,6]、物理实验^[7-8]及数值模拟^[9-10]等方法对船行波的传播特性^[11,12]、船舶的稳定性^[13]以及船行波对周围护岸^[3]、泥沙^[2]及船舶本身^[4]的影响进行了大量的研究。船行波有首波系、尾波系、散波和横波等不同分类形式,通常是随弗汝德数 Fr 的不同呈现不同的运动形式^[11]。部分学者针对开阔水域条件建立了可描述船行波波高与弗汝德数、离船舷距离、船型等因素的相关关系的数学模型^[14-15]。但限制性水域条件下船行波的传播特性不同于开阔水域^[16]。因此,越来越多的学者研究限制性水域条件内船行波的相关特性。如:Zhu等^[17]解释了浅水条件下单船体与双船体船的首波系与尾波系的不同传播规律。Ji等^[1]通过求解 Navier - Stokes 方程和采用不同的湍流方法分析了不同船型和航速下船行波波高的演化规律,并讨论了船舶尾流的水动力特性。骆婉珍等^[18]基于 CFD 技术应用重叠网格的方法模拟分析狭窄、浅水航道内船行波波形的叠加、反射等现象,但该类方法计算量大,难以求解大船速下船行波的传播演化^[2]。

近年来,随着 Boussinesq 方程不断的改进,如消除了浅水的限制又考虑了波浪的破碎,减小了数值计算量^[19],越来越多的学者运用 Boussinesq 方程模拟波浪的传播变形等。如:Dam等^[16]通过建立二维 Boussinesq 模型,模拟细长船行波及其传播过程,并得到不同船速下波高的变化规律。Shi等^[20]基于完全非线性的 Boussinesq 模型 FUNWAVE - TVD 模拟了船行波引起的紊动破碎,并针对两种不同的破碎准则(黏性破碎准则和波高破碎准则)进行对比分析,结果表明两种破碎标准均能准确的模拟船行波在不同 Fr 下的传播过程。卓明泉等^[21]基于 COUL-WAVE 开源程序代码实现浅水航道船行波的数值模拟,再现了浅水条件下船首孤立波现象。然而,上述研究大都基于 Boussinesq 模型下船行波传播特性的研究,较少对船舶吃水以及跨临界航速范围内船

行波的特性进行详细描述。

综上所述,尽管现有研究对限制性水域内船行波的传播规律有了一定的认识,但基于限制性水域内船舶航行诱导的船首孤立波波高以及横向流速的研究相对较少。因此,为弥补现有研究的不足,本研究运用完全非线性的 Boussinesq 模型 FUNWAVE - TVD^[22-23],以压力源项近似表示船舶引起自由面的波动,采用 Shi等^[20]提出的破碎准则,重点讨论限制性水域内船行波的相关特性。

2 数值模型建立

基于完全非线性 Boussinesq 方程建立了限制性航道内船舶航行的数值模型,具体控制方程如下。

质量守恒方程:

$$\eta_t + \nabla \cdot \mathbf{M} = 0 \quad (1)$$

式中: η 为波表面高度,m; η_t 为 η 对时间的偏导数; ∇ 为水平梯度算子; \mathbf{M} 为水平体积通量。

$$\mathbf{M} = H(\mathbf{u}_\alpha + \bar{\mathbf{u}}_2) \quad (2)$$

式中: $H = h + \eta$,为当地水深,m; h 为静水深,m; \mathbf{u}_α 为参考位置 $z = z_\alpha$ 处水质点的水平速度矢量,m/s; $\bar{\mathbf{u}}_2$ 为平均水深下的垂向速度,m/s;其色散性精确到 $O(\mu^2)$,其中, $\mu = kh$,表征频率色散的无量纲参数, k 为波数。

动量守恒方程为:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_t + \nabla \left[\frac{\mathbf{M}\mathbf{M}}{H} \right] + \nabla \left[\frac{1}{2}g(\eta^2 + 2h\eta) \right] \\ = \mathbf{V}_{dis} + g\eta \nabla h - gH \nabla P_a - S_{brk} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: \mathbf{M}_t 为流体体积通量对时间 t 的导数; g 为重力加速度,m/s²; $\nabla \left[\frac{\mathbf{M}\mathbf{M}}{H} \right]$ 表示对 $\left[\frac{\mathbf{M}\mathbf{M}}{H} \right]$ 分别求 x, y 方向偏导数; \mathbf{V}_{dis} 表示色散项^[20]; 右侧第 3 项为船舶尾流生成的压力源项,其中, P_a 为施加在水体表面的扰动压强,Pa; S_{brk} 为与人工涡流黏度相关的耗散项,耗散项参见 Kennedy等^[24]的描述。

涡流黏度如下所示:

$$v = B\delta^2(h + \eta)\eta_t \quad (4)$$

式中: δ 为混合长度系数,本研究取 $\delta = 1$; B 为避免数值振荡的常数^[19],本研究取 $B = 1$ 。

船舶模型的实现由压力源确定,即在完全非线性 Boussinesq 模型中加入压力源项。其中,船舶中心点为 (x^*, y^*) 的压力分布可由公式(5) ~ (7) 给出:

$$P_a(\tilde{x}, \tilde{y}, t) = Pf(\tilde{x}, t)q(\tilde{y}, t) \quad (5)$$

$$f(\bar{x}, t) = \begin{cases} \cos^2 \left[\frac{\pi(|\bar{x} - x^*(t)| - \frac{1}{2}\alpha L)}{(1 - \alpha)L} \right], & \frac{1}{2}\alpha L < |\bar{x} - x^*(t)| \leq \frac{1}{2}L \\ 1, & |\bar{x} - x^*(t)| \leq \frac{1}{2}\alpha L \end{cases} \quad (6)$$

$$q(\bar{y}, t) = \begin{cases} \cos^2 \left[\frac{\pi(|\bar{y} - y^*(t)| - \frac{1}{2}\beta R)}{(1 - \beta)R} \right], & \frac{1}{2}\beta R < |\bar{y} - y^*(t)| \leq \frac{1}{2}R \\ 1, & |\bar{y} - y^*(t)| \leq \frac{1}{2}\beta R \end{cases} \quad (7)$$

式中: L 和 R 分别为压力源的长度和宽度(即船长和船宽),m; (\bar{x}, \bar{y}) 为相对于压力源的坐标系; $P = \rho g p$ 为船舶中心点处压强,Pa,其中 ρ 为水的密度, p 为船舶吃水,m;船舶 α 和 β 为吃水区域的形状的参数 $0 \leq (\alpha, \beta) \leq 1$,可通过船舶的阻力系数进行计算, α, β 均取值为0.5。

数值模型基于三阶 Runge - Kutta 方法的自适应时间步长和 MUSCL - TVD 数值解法;干湿边界网格最小深度为0.001 m, CFL 数设置为0.25, 通量计算采用 HLL(Harten Lax & van Leer)构造方法,数值消波技术采用耗散型海绵层消波方法。

3 数值模型工况设置与验证

3.1 数值模型工况设置

参考我国《内河通航标准》(GB 50139 - 2014)规范的要求,模型计算区域采用VI级单线航道尺寸,船模采用VI级航道标准驳船(船长 $L = 32$ m,宽 $B = 7.0$ m,满载设计吃水 p 为1.0 m,船舶形状系数 α 和 β 均为0.5),并在计算区域左侧设置消波区域。考虑到船行波的传播在航道内通常呈对称分布,计算在航道一侧布置15个测点,数值模型计算平面布置图如图1所示。

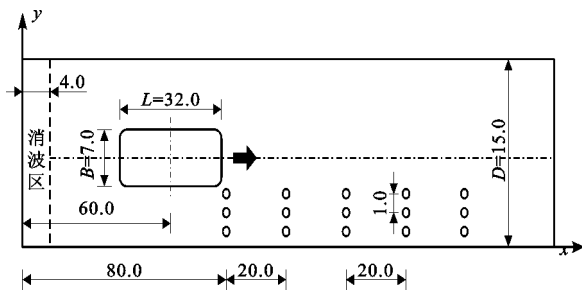


图1 数值模型计算平面布置图(单位:m)

考虑VI级航道内标准驳船的空载吃水 $p \approx 0.4 \sim 0.5$ m,满载吃水 $p \approx 0.9 \sim 1.0$ m,以及标准航行船速,共设置5种计算工况(A1 ~ A5),拟定的模型计算工况如表1所示。

表1 模型计算工况设置

工况	h/m	D/m	p/m	F_r
A1	1.2	15	0.4	0.4 ~ 1.2
A2	1.2	15	0.5	0.4 ~ 1.2
A3	1.2	15	0.7	0.4 ~ 1.2
A4	1.2	15	0.9	0.4 ~ 1.2
A5	1.2	15	1.0	0.4 ~ 1.2

3.2 数值模型验证

为验证数值模型计算限制性航道内船行波的可靠性,分别从数值实例和网格收敛性验证两个方面进行详细说明。二维验证算例取自参考文献[7],实验水槽宽 D 为3.5 m,水深 h 为0.114 m;船舶长度 L 为1.6 m,宽度 B 为0.4 m,吃水 p 为0.1 m,船舶的形状系数 α 和 β 均为0.5;初始时刻船舶位于 $x = 6$ m、 $y = 1.75$ m的位置,其他参数设置均与参考文献[7]保持一致。

图1给出了3种工况下测点($x = 33.125$ m, $y = 0.72$ m)波高历时曲线的对比,结果显示,数值模型计算波高与文献[7]中船行波的变化趋势相吻合。采用 skill 数验证模型精度要求:

$$skill = 1 - \frac{\sum |X_{num} - X_{obs}|^2}{\sum (|X_{num} - \bar{X}_{obs}| + |X_{obs} - \bar{X}_{obs}|)^2} \quad (8)$$

式中: X_{num} 为数值计算结果; X_{obs} 为实测值; \bar{X}_{obs} 为实测平均值。skill 数越接近1,表明模型精度越高;越接近0,则精度越低。

图2为船行波波高计算值的实验验证结果。计算结果表明各工况下 skill 数均大于0.90,均方根误差均小于0.038,说明模型能较好地模拟船行波的传播。此外,图2(a)~2(c)黑色方框内为船首孤立波,这是典型浅水航道内船行波的重要特征。

3.3 网格收敛性验证

为探究网格大小对计算结果的影响,确保所有

航速下 CFL 数均小于 0.25。选取满载吃水工况 A4、 $F_r = 1.2$ 下 $x = 80\text{ m}$ 、 $y = 1\text{ m}$ 处 4 种不同大小网格的船行波波高历时曲线进行收敛性验证,验证结果见图 3。从图 3 可以看出,各波高历时曲线基本吻合,其中,以 $dx \times dy = 0.2\text{ m}^2$ 网格大小为参考,网格 $dx \times dy = 0.19, 0.21, 0.22\text{ m}^2$ 的波高历时曲线的均方根误差分别为 0.004, 0.004, 0.008 m; 同一位置处不同网格下船行波最大波高相对误差小于 3%。可见,模型在网格大小 $dx \times dy = 0.2\text{ m}^2$ 下已达到计算精度要求。因此,模型计算采用 $dx \times dy = 0.2\text{ m}^2$ 的网格尺度。

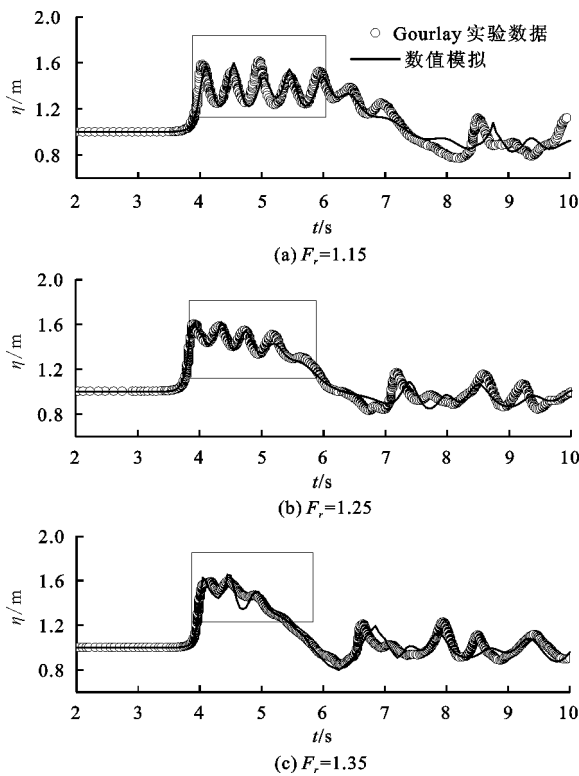


图 2 不同 F_r 数船行波波高模拟值的实验验证结果

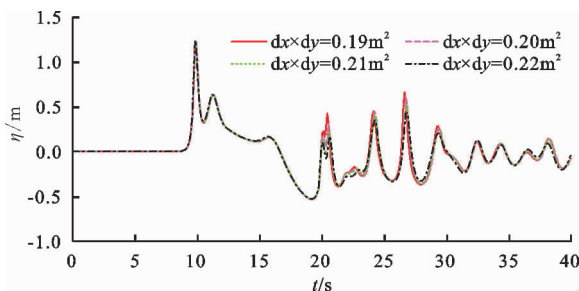


图 3 4 种不同大小网格的收敛性验证

4 结果分析与讨论

4.1 波面的演化及最大波高

由于船行波以 $F_r = 1$ 为界呈现不同的传播特

性^[7],其中,在跨临界航速 ($F_r = 1$) 下船行波中横波和散波叠加易形成较大波高。因此,选取工况 A3、 $F_r = 1$ 分析船舶运动过程中船行波波面的历时演化过程,结果见图 4。由图 4 可看出,在船舶航行的起始阶段 ($t = 5\text{ s}$),船舶前方形成弯曲的孤立波波列面。随着船舶的运动,弯曲的波列面开始变直,船舶前方孤立波数量逐渐增多。与此同时,船舶后方的尾波呈现出开尔文尾流模式,船尾波传播受侧壁反射、叠加等影响,在限制性航道两侧及航道中间各点处(如: $x = 100\text{ m}$, $t = 15\text{ s}$) 易形成较大波高,从而对近岸航道边坡等设施产生不利影响。

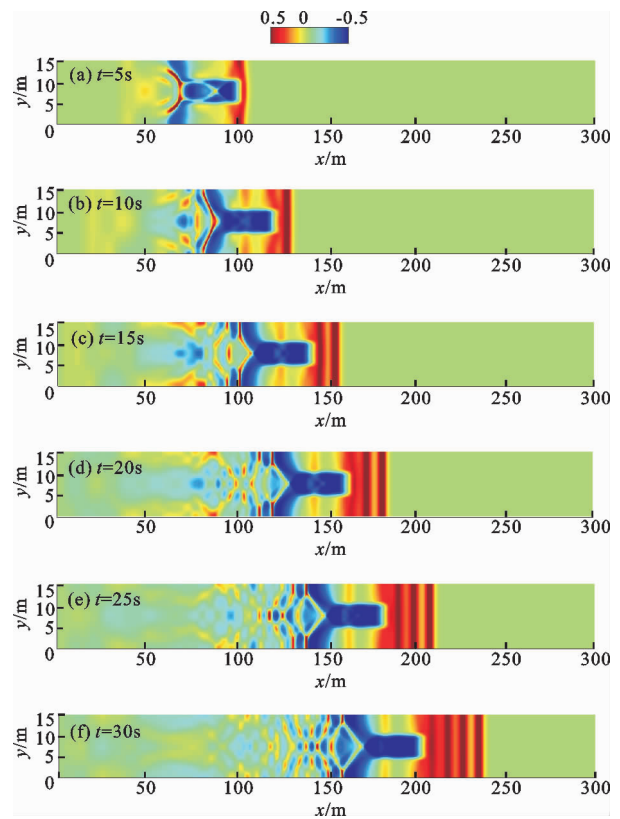


图 4 限制性航道内船行波自由液面的演化过程 (A3、 $F_r = 1$)

为深入分析船首孤立波的传播特征,以 A3、 $F_r = 0.75$ 下船行波波高历时曲线为例,定义船行波中船首孤立波和船尾波的最大波高,如图 5(a) 所示。由于限制性航道内船行波的传播易形成复杂的横向流动,对航道两岸设施及船舶航行造成严重的影响。因此,为分析近岸横向流动的分布规律,定义最大近岸横向流速如图 5(b) 所示。

图 6 为工况 A3、 $F_r = 0.75$ 下距离近岸 1 m 处不同位置 ($x = 80, 100, 120, 140, 160\text{ m}$) 的船行波波高历时曲线图。从图 6 可以看出,在浅水条件下,船首孤立波波高在 $80\text{ m} < x < 120\text{ m}$ 范围内逐

渐增大,并在 $x = 120 \text{ m}$ 处达到最大值。随着时间的推移,限制性航道内船首孤立波抬升自由液面后出现了较深的波谷,之后形成较大的船尾波波高。相比于最大船首孤立波,最大船尾波具有波高较大、

波长较短的特征。因此,最大船尾波波陡较大,更易破碎。随着船尾波沿 x 方向传播,在 $80 \text{ m} < x < 140 \text{ m}$ 范围内船尾波波高逐渐增加,并在 $x = 140 \text{ m}$ 处船尾波波高达到最大值,之后逐渐减小。

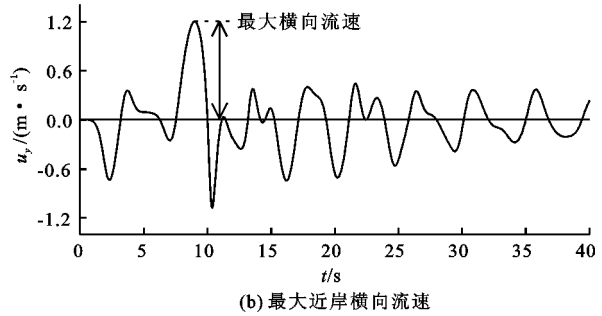
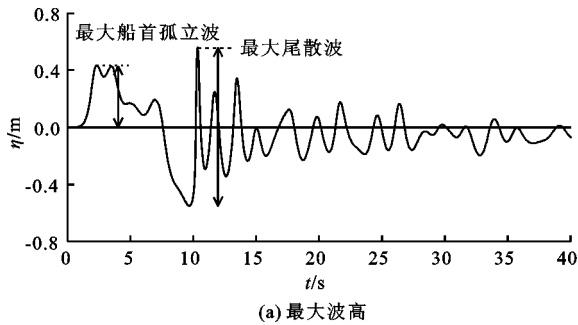


图 5 最大波高及近岸横向流速的定义

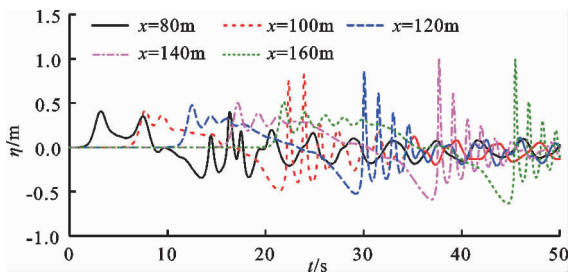


图 6 距离近岸 1 m 处不同位置 ($x = 80, 100, 120, 140, 160 \text{ m}$) 的船行波波高历时曲线 ($A_3, F_r = 0.75$)

图 7 为工况 $A_3, F_r = 0.75$ 下距离近岸不同位置 ($y = 1, 2, 3 \text{ m}$) 的船行波波高历时曲线图。可见船尾波波高在最大值出现之后易受航道宽度及边壁影响,且越靠近岸壁船尾波波高越大。另外,随着船首孤立波不断向前传播,船首孤立波逐渐形成新的次孤立波,造成航道水位的上升。

4.2 船行波最大波高分布

基于上述最大船首孤立波波高的定义,图 8(a) 给出了不同 F_r 数条件下最大船首孤立波波高随相对吃水的分布规律。可以看出,随着相对吃水的增加,最大船首孤立波波高呈线性规律增加,斜率大致为 $0.4 \sim 0.7$ 。图 8(b) 给出了不同吃水条件下最大船首孤立波波高随 F_r 数的变化规律。可以看出,随着 F_r 的增加,最大船首孤立波波高呈幂函数形式增加,且幂次方约为 3.5 。

基于上述分析,通过多元非线性回归方程得到了 p, F_r 与最大船首孤立波波高的经验关系式:

$$\frac{\eta_{\max}}{h} = 0.865 F_r^{2.628} \left(\frac{p}{h}\right)^{0.770} + 0.148 \quad (9)$$

式中: η_{\max} 为最大船首孤立波波高, m; h 为水深, m; F_r 为弗汝德数; p 为船舶吃水, m。

方程式(9)各系数标准差见表 2,多元非线性回归方程拟合优度 $R^2 = 0.967$ 。为了更加直观地展现多元回归方程的拟合精度,图 8(c) 给出了数值计算与多元回归方程式(9)的结果对比,可见方程式(9)可以较好地预测不同吃水条件下最大船首孤立波的波高。

表 2 船首孤立波回归方程的系数

方程系数	0.865	2.628	0.770	0.148
标准差	0.040	0.020	0.067	0.025

图 9 为不同吃水条件下最大船尾波波高随 F_r 的变化规律。由图 9 可以看出,当 $p \leq 0.7 \text{ m}$ 时,最大船尾波波高以 $F_r = 0.9$ 为界呈现不同的分布规律。当 $F_r < 0.9$ 时,最大船尾波波高逐渐增加;相反,当 $F_r > 0.9$ 时,最大船尾波波高逐渐减小,这是由于当 $F_r > 0.9$ 时船尾波破碎导致波高减小,这与 David 等^[24]的研究大体一致,但 David 等并未讨论船舶相对吃水与最大船尾波波高之间的影响关系。然而,当 $p > 0.7 \text{ m}$ 时,最大船尾波波高随 F_r 增加逐渐增加,与上述 $p \leq 0.7 \text{ m}$ 下最大船尾波波高呈现不同的分布规律,这是由于当船舶吃水较大时,同一波高下最大船尾波长相对较长,船尾波不易破碎。

4.3 船行波最大近岸横向速度

影响限制性航道设计的主要因素除最大船行波波高外,还受航道内横向速度大小的影响。图 10 为限制性航道内不同吃水条件下最大近岸横向流速随 F_r 的变化规律。从图 10 中可以看出,受船行波破碎影响,最大近岸横向流速仅在 $p \leq 0.7 \text{ m}, F_r \leq 0.9$ 下整体呈线性关系,具体为随 F_r, p 的增加分别呈线性减少和线性增加的趋势。

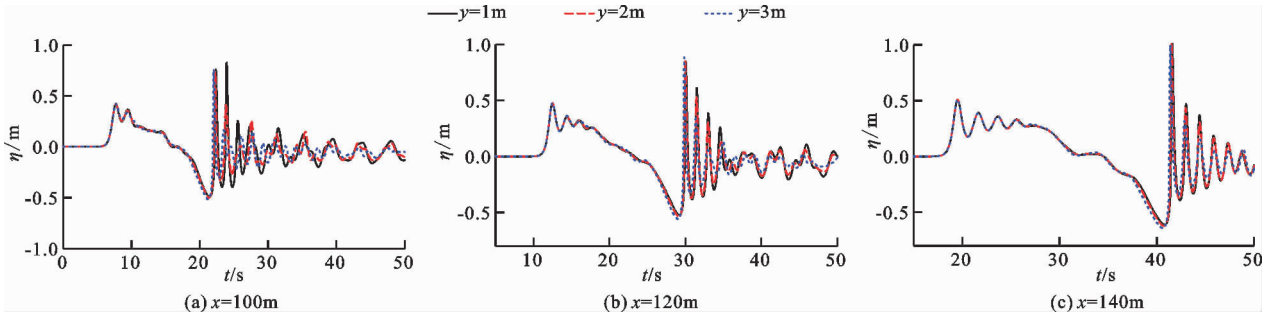


图7 距离近岸不同位置 ($y = 1, 2, 3 \text{ m}$) 的船行波波高历时曲线 ($\Delta 3, F_r = 0.75$)

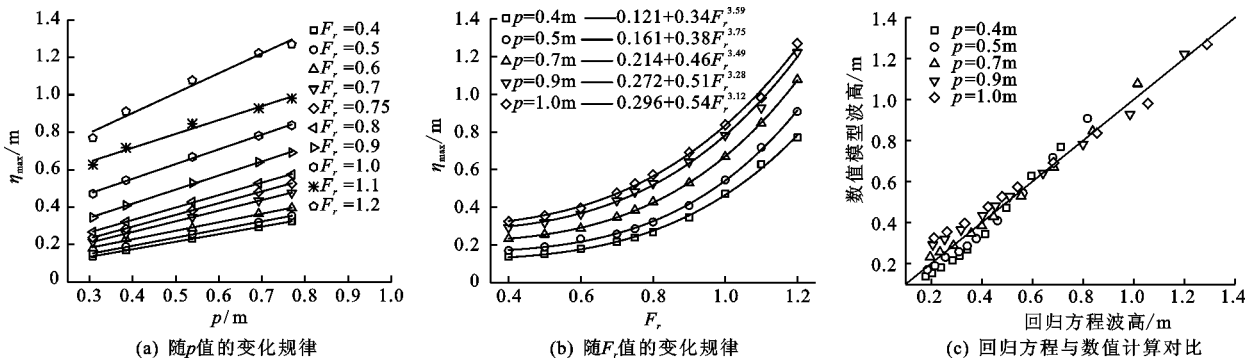


图8 最大船首孤立波波高变化规律

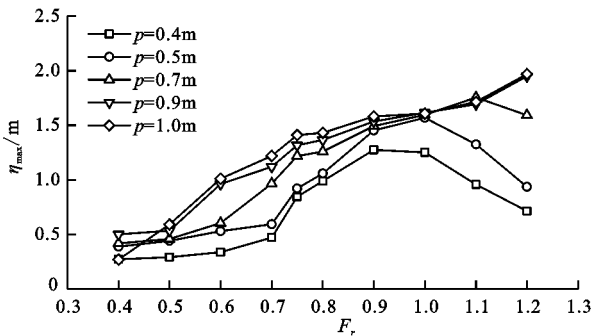


图9 不同吃水条件下最大船尾波波高随 F_r 的变化规律

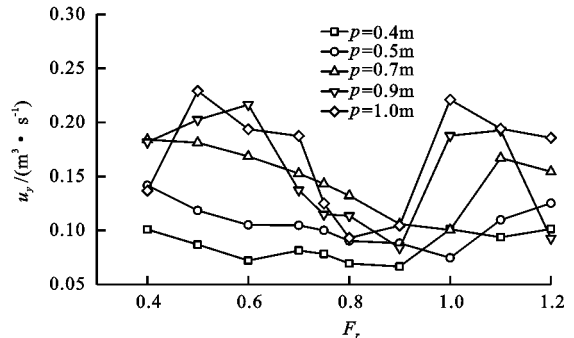


图10 不同吃水条件下最大近岸横向流速随 F_r 的变化规律

5 结论

基于完全非线性的 Boussinesq 方程建立了限制性航道内船舶运动的数值模型,重点研究了船首孤立波、船尾波以及近岸横向流速在不同 p, F_r 下的分布规律。与传统开阔水域及深水条件下船舶航行的数值模型相比,该模型能更合理的描述限制性航道中船舶航行过程中波高、流速等分布规律。具体结论如下:

(1) 基于我国《内河通航标准》(GB 50139 - 2014)规范的要求,采用 FUNWAVE - TVD 模型建立了精确描述船行波传播及演化的数值模型。研究表明该模型能很好地模拟限制性航道条件下船行波的传播特征。

(2) 本文研究条件下,最大船首孤立波波高与船舶吃水之间呈线性关系,斜率约为 0.4 ~ 0.7 之间;最大船首孤立波波高与 F_r 之间呈幂函数关系,幂次方约为 3.5;此外,基于上述规律与分析建立了限制性水域条件下最大船首孤立波波高与船舶吃水、弗汝德数的幂函数经验公式。

(3) 船尾波波高及近岸横向流速受波浪破碎影响,以 $p = 0.7 \text{ m}$ 和 $F_r = 0.9$ 为界分别呈现不同的分布规律。其中, F_r 主要通过船行波波高影响船行波的破碎,而 p 主要通过船行波波长影响船行波的破碎。同样,受波浪破碎影响最大近岸横向流速仅在 $p \leq 0.7 \text{ m}, F_r \leq 0.9$ 内整体呈线性分布规律。

本研究基于完全非线性的 Boussinesq 方程、压力源项以及黏性破碎准则模拟了限制性航道内船首

波系以及船尾波系的传播演化过程,为进一步开展限制性航道中船舶安全通航提供了理论基础,但本研究仅考虑一定船型、航道断面尺寸、静水条件下船行波的演变规律,更复杂的航道条件、船舶运动以及水动力特性之间的内在关系还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] JI Shengcheng, OUAHSINE A, SMAOUI H, et al. 3-D numerical simulation of convoy generated waves in a restricted waterway[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2012,24(3):420-439.
- [2] JI Shengcheng, OUAHSINE A, SMAOUI H, et al. 3D numerical simulation of ship-induced waves and sediment transport in restricted waterways [J]. *La Houille Blanche*, 2014,32(6):68-73.
- [3] DE ROO S, TROCH P. Field monitoring of ship wave action on environmentally friendly bank protection in a confined waterway [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2013,139(6):527-534.
- [4] HE Jiayi, ZHANG Chenliang, ZHU Yi, et al. Interference effects on the Kelvin wake of a catamaran represented via a hull-surface distribution of sources[J]. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2016,56:1-12.
- [5] 李森. 船舶港内航行限制航速研究[D]. 大连:大连海事大学,2015.
- [6] GHARBI S, VALKOV G, HAMDI S, et al. Numerical and field study of ship-induced waves along the St. Lawrence Waterway, Canada [J]. *Natural Hazards*, 2010,54(3):605-621.
- [7] GOURLAY T P. The supercritical bore produced by a high-speed ship in a channel [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2001,434:399-409.
- [8] PETHIYAGODA R, MORONEY T J, MACFARLANE G J, et al. Time-frequency analysis of ship wave patterns in shallow water:Modelling and experiments[J]. *Ocean Engineering*, 2018,158:123-131.
- [9] MA Gangfeng, SU S F, LIU Shuguang, et al. Numerical simulation of infragravity waves in fringing reefs using a shock-capturing non-hydrostatic model [J]. *Ocean Engineering*, 2014,85:54-64.
- [10] WANG Benlong, GUO Xiaoyu, LIU Hua, et al. Numerical simulations of wake signatures around high-speed ships [J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 2014,26(6):986-989.
- [11] WU Huiyu, HE Jiayi, LIANG Hui, et al. Influence of Froude number and submergence depth on wave patterns [J]. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2019,75:258-270.
- [12] WU Huiyu, HE Jiayi, ZHU Yi, et al. The Kelvin-Havelock-Peters farfield approximation to ship waves [J]. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2018,70:93-101.
- [13] SONG S, DEMIREL Y K, ATILAR M. An investigation into the effect of biofouling on the ship hydrodynamic characteristics using CFD [J]. *Ocean Engineering*, 2019,175:122-137.
- [14] BHATTACHARYYA A, STEEN S. Propulsive factors in waves:A comparative experimental study for an open and a ducted propeller [J]. *Ocean Engineering*, 2014,91:263-272.
- [15] DAM K T, TANIMOTO K, NGUYEN B T, et al. Numerical study of propagation of ship waves on a sloping coast [J]. *Ocean Engineering*, 2006,33(3-4):350-364.
- [16] DAM K T, TANIMOTO K, FATIMAH E. Investigation of ship waves in a narrow channel [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2008,13(3):223-230.
- [17] ZHU Yi, HE Jiayi, ZHANG Chenliang, et al. Farfield waves created by a monohull ship in shallow water[J]. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 2015,49:226-234.
- [18] 骆婉珍, 郑青榕, 吴铁成. 船舶在狭窄浅水航道船行波的数值模拟[J]. *船舶工程*, 2014,36(4):88-91.
- [19] 卓明泉. 浅水航道船行波数值模拟研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.
- [20] SHI Fengyan, MALEJ M, SMITH J M, et al. Breaking of ship bores in a Boussinesq-type ship-wake model [J]. *Coastal Engineering*, 2018,132:1-12.
- [21] 卓明泉, 许劲松, 朱志夏. 浅水航道船行波数值模拟研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2019,34(1):63-68.
- [22] SHI Fengyan, KIRBY J T, HARRIS J C, et al. A high-order adaptive time-stepping TVD solver for Boussinesq modeling of breaking waves and coastal inundation [J]. *Ocean Modelling*, 2012,43-44:36-51.
- [23] KIRBY J T. Boussinesq models and their application to coastal processes across a wide range of scales [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 2016,142(6):31-46.
- [24] KENNEDY A B, KIRBY J T, CHEN Q, et al. Boussinesq-type equations with improved nonlinear performance [J]. *Water Motion*, 2001,33(3):225-243.
- [25] DAVID C G, ROEBER V, GOSEBERG N, et al. Generation and propagation of ship-borne waves - Solutions from a Boussinesq type model [J]. *Coastal Engineering*, 2017,127:170-187.