

1-2-2019

## Modeling and Simulation of Ship Maneuvering Motion Based on Non-Uniform Flow and Shallow Water Effect

Sichen Tong

*1.School of river and ocean engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
;2.National engineering research center for inland waterway regulation, Chongqing 400074, China;*

Xiaoya Tang

*1.School of river and ocean engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
;2.National engineering research center for inland waterway regulation, Chongqing 400074, China;*

Zhang Huan

*1.School of river and ocean engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
;2.National engineering research center for inland waterway regulation, Chongqing 400074, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Modeling and Simulation of Ship Maneuvering Motion Based on Non-Uniform Flow and Shallow Water Effect

### Abstract

**Abstract:** To reflect and simulate the flow condition and ship attitude in mountainous river, a 3-DOF ship motion mathematical model based on open channel non-uniform flow and shallow water effect is put forward. Analysis of the numerical simulation shows that with the decrease of depth-draft ratio  $h/d$ , the ship direct navigation speed decreases, the shallow water effect and the turning diameter increases. Meanwhile, the Z motion fluctuation amplitude and the oscillation period increase with the decrease of  $h/d$ , which means the decrease of the rudder effect and maneuverability. Application of the model in a case study shows that the proposed model can be applied in the engineering research. It is more rational and practical to achieve the ship maneuverability model based on open channel non-uniform flow and shallow water effect.

### Keywords

waterway engineering, non-uniform flow, shallow water effect, ship maneuverability, ship motion mathematical model

### Recommended Citation

Tong Sichen, Tang Xiaoya, Zhang Huan. Modeling and Simulation of Ship Maneuvering Motion Based on Non-Uniform Flow and Shallow Water Effect[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 866-872.

## 基于非均匀流浅水效应的船舶操纵建模与仿真

童思陈<sup>1,2</sup>, 唐小娅<sup>1,2</sup>, 张欢<sup>1,2</sup>

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

**摘要:** 为更好体现和模拟山区河道的水流条件和船舶航行姿态, 在明渠恒定非均匀水流模型基础上, 开发了基于浅水效应的3自由度MMG船舶操纵运动数学模型。通过船舶定回转试验和Z型运动模拟结果表明, 随着水深吃水比 $h/d$ 的减小, 船舶浅水效应越为突出, 直航速度越小, 定回转直径越大; 同时, 船舶Z型运动的摆幅越大, 运动周期越长, 说明船舶的舵效和操纵性能越差。结合工程实例分析表明, 本文开发的基于非均匀流和浅水效应的船舶操纵运动数学模型可以应用于工程实际研究, 山区河道的船舶操纵运动采用基于浅水效应的模型计算才更加合理和符合实际。

**关键词:** 航道工程; 非均匀流; 浅水效应; 船舶操纵性; 船舶数学模型

中图分类号: U661.33 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 03-0866-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803012

### Modeling and Simulation of Ship Maneuvering Motion Based on Non-Uniform Flow and Shallow Water Effect

Tong Sichen<sup>1,2</sup>, Tang Xiaoya<sup>1,2</sup>, Zhang Huan<sup>1,2</sup>

(1. School of river and ocean engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

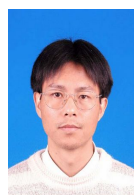
2. National engineering research center for inland waterway regulation, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** To reflect and simulate the flow condition and ship attitude in mountainous river, a 3-DOF ship motion mathematical model based on open channel non-uniform flow and shallow water effect is put forward. Analysis of the numerical simulation shows that with the decrease of depth-draft ratio  $h/d$ , the ship direct navigation speed decreases, the shallow water effect and the turning diameter increases. Meanwhile, the Z motion fluctuation amplitude and the oscillation period increase with the decrease of  $h/d$ , which means the decrease of the rudder effect and maneuverability. Application of the model in a case study shows that the proposed model can be applied in the engineering research. It is more rational and practical to achieve the ship maneuverability model based on open channel non-uniform flow and shallow water effect.

**Keywords:** waterway engineering; non-uniform flow; shallow water effect; ship maneuverability; ship motion mathematical model

## 引言

天然河道中的水流运动基本都是非均匀流,



收稿日期: 2016-03-02 修回日期: 2016-05-05;  
基金项目: 重庆市基础与前沿研究计划(cstc2015jcyjia90013), 重庆市社会民生科技创新专项基金(cstc2015shmszx30024);  
作者简介: 童思陈(1973-), 男, 重庆, 博士, 教授, 研究方向为河流动力学与船舶运动。

很少出现均匀流流动。以往船舶操纵运动模拟研究中为简化水流对船舶的作用力, 一般常将水流作均匀流考虑<sup>[1]</sup>。而对于简单非均匀流的影响, 则通常按概化方式进行处理<sup>[2]</sup>。采用这些途径可以大为简化计算工作量, 提高模拟效率, 适用于静水水域或水流流动规律性较强的情况。对于内河航道和山区航道, 水流条件较差, 若仍采取均

<http://www.china-simulation.com>

匀流或概化非均匀流流动方式进行处理, 显然与实际水流情况差别较大, 难以体现出天然河道非均匀流动的特性和影响。

此外, 内河航道尤其是山区航道水深并不富裕, 浅水效应问题往往十分突出。航行于浅水水域的船舶, 船体周围水流流动、压强分布与深水情况存在很大区别<sup>[3]</sup>。由于水深较小, 船底与河床之间将形成狭窄流动, 过水面积的减小使流速加大, 压强进一步降低, 船体相应下沉, 吃水增加, 附加质量及附加惯性均较深水明显增加, 航行阻力加大。通常认为, 船舶的浅水效应主要与航速、船舶吃水与水深、断面系数等有关, 不过对于深水航道与浅水航道的划分并无统一的标准和公式<sup>[4]</sup>。船舶在浅水水域中航行的下沉量可由相关经验公式进行初步估算, 主要与船型特点、航道特点以及通航密度等因素有关<sup>[5]</sup>。对于浅水域中船舶的操纵特性及其数值仿真模拟, 目前也有部分相关研究报告<sup>[6-10]</sup>。对于水流流场及其可视化也有一定研究<sup>[11-14]</sup>, 但基于实际河道非均匀水流运动的船舶浅水效应及其数值模拟的研究, 尚未见报道。本文首先对明渠恒定非均匀水流运动进行了数值模拟, 该模型可以很好模拟内河山区河道不同水流的坡降以及桥墩、丁坝、码头等对水流的影响作用, 然后将水流参数传递给船舶运动和受力, 基于 3 自由度 MMG (Manoeuvring Model Group) 模型建立了浅水效应船舶运动的操纵运动数值模型。本文非均匀水流模型和船舶操纵运动模型均采用 Fortran 语言进行编制。

## 1 非均匀水流数学模型

### 1.1 基本方程

天然河道平面形态并不规则, 为克服河道边界起伏变化较大的问题, 目前多采用计算网格与河道边界贴合的方法, 即利用贴体正交曲线坐标系进行计算。通常采用 Willemse 导出的正交曲线坐标方程作为转换方程:

$$\begin{cases} \alpha \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \alpha \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + J^2 \left( P \frac{\partial x}{\partial \xi} + Q \frac{\partial x}{\partial \eta} \right) = 0 \\ \alpha \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} + \alpha \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} + J^2 \left( P \frac{\partial y}{\partial \xi} + Q \frac{\partial y}{\partial \eta} \right) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\alpha = x_\eta^2 + y_\eta^2$ ;  $\gamma = x_\xi^2 + y_\xi^2$ ;  $J = x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi$ ;  $P$ 、 $Q$  为调节因子。假定水域中的水体做有势运动, 其流线簇与势线簇必然正交, 可导出以网格间距变化为调节因子的贴体正交曲线坐标方程:

(1) 水流连续方程

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial}{\partial \xi} (hu C_\eta) + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} (hu C_\xi) = 0 \quad (2)$$

(2)  $\xi$  方向动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta u^2) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi v u) + \right. \\ \left. v u \frac{\partial C_\eta}{\partial \eta} - v^2 \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right] = -g \frac{1}{C_\xi} \frac{\partial H}{\partial \xi} - \\ \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{4/3}} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta \sigma_{\xi\xi}) + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi \sigma_{\eta\xi}) + \sigma_{\xi\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - \sigma_{\eta\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

(3)  $\eta$  方向动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta v u) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi v^2) + \right. \\ \left. u v \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - u^2 \frac{\partial C_\xi}{\partial \xi} \right] = -g \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial H}{\partial \eta} - \\ \frac{v \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{4/3}} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta \sigma_{\xi\eta}) + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi \sigma_{\eta\eta}) + \sigma_{\eta\xi} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - \sigma_{\xi\xi} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\xi$ 、 $\eta$  分别表示正交曲线坐标系中的两个正交曲线坐标;  $u$ 、 $v$  分别表示沿  $\xi$ 、 $\eta$  方向的流速;  $h$  表示水深;  $H$  表示水位;  $C_\xi$ 、 $C_\eta$  表示正交曲线坐标系中的拉梅系数:  $C_\xi = \sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2}$ ,  $C_\eta = \sqrt{x_\eta^2 + y_\eta^2}$ ;  $\sigma_{\xi\xi}$ 、 $\sigma_{\xi\eta}$ 、 $\sigma_{\eta\xi}$ 、 $\sigma_{\eta\eta}$  表示紊动切应力:

$$\sigma_{\xi\xi} = 2\nu_t \left[ \frac{1}{C_\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right],$$

$$\sigma_{\eta\eta} = 2v_t \left[ \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{u}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right],$$

$$\sigma_{\xi\eta} = \sigma_{\eta\xi} = v_t \left[ \frac{C_\eta}{C_\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{v}{C_\eta} \right) + \frac{C_\xi}{C_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{u}{C_\xi} \right) \right]$$

式中： $v_t$ 表示紊动粘性系数，即： $v_t = C_\mu K^2 / \varepsilon$ ， $k$ ， $\varepsilon$ 分别为紊动动能及紊动耗散系数，由 $k$ 和 $\varepsilon$ 的输运方程确定。

## 1.2 方程求解

方程(1)~(4)形式相似，可表达为通用格式：

$$C_\xi C_\eta \frac{\partial \psi}{\partial t} + \frac{\partial (C_\eta u \psi)}{\partial \xi} + \frac{\partial (C_\xi v \psi)}{\partial \eta} =$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left( \Gamma \frac{C_\eta}{C_\xi} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \Gamma \frac{C_\xi}{C_\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} \right) + C \quad (5)$$

式中： $\Gamma$ 为扩散系数； $C$ 为源项。在数值计算时，只需对上式编制一个通用程序，所有控制方程均可用此程序求解。

# 2 浅水船舶操纵运动数学模型

## 2.1 基本方程

船舶的实际运动是一种具有6个自由度、非常复杂的运动。建模仿真时从实用性出发，可忽略船舶的起伏、纵摇及横摇运动，采用仅考虑前进、横漂和首摇运动3个自由度的运动方程。

### 2.1.1 静止深水中的船舶运动方程

船舶在静止深水中的运动方程为<sup>[15]</sup>：

$$\left. \begin{aligned} (m + m_{11}) \dot{v}_x - (m + m_{22}) v_y r &= X \\ (m + m_{22}) \dot{v}_y + (m + m_{11}) v_x r &= Y \\ (I_z + m_{66}) \dot{r} &= N \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_R \\ Y &= Y_H + Y_P + Y_R \\ N &= N_H + N_P + N_R \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： $v_x$ 、 $v_y$ 为船体与水流相对速度； $r$ 为转角速度； $X$ 、 $Y$ 分别为作用于船 $x$ 轴、 $y$ 轴方向合力； $N$ 为绕船重心垂直轴的合力矩； $m_{11}$ 、 $m_{22}$ 、 $m_{66}$

分别为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向附加质量或附加惯性矩。

### 2.1.2 考虑水流运动的深水船舶运动方程

考虑水流运动的深水船舶运动方程为：

$$\left. \begin{aligned} (m + m_{11}) \dot{u}_x &= X(v_x, v_y, r) + \\ (m + m_{22}) v_y r + (m + m_{11}) V_F r \sin(\psi_F - \psi) \\ (m + m_{22}) \dot{u}_y &= \\ Y(v_x, v_y, r) - (m + m_{11}) v_x r - \\ (m + m_{22}) V_F r \cos(\psi_F - \psi) \\ (I_z + m_{66}) \dot{r} &= N(v_x, v_y, r) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中： $V_F$ 、 $\psi_F$ 为水流速度和方向； $u_x$ 、 $u_y$ 为附体坐标原点速度； $v_x$ 、 $v_y$ 为船舶对水速度； $\psi$ 为艏向角。

### 2.1.3 基于浅水效应水流运动的船舶运动方程

基于浅水效应的船舶操纵运动数学模型主要是对深水模型中的各流体动力导数中进行修正得到。因此，运动方程型式同(8)式，但有关系数取值不同。

(1) 浅水域中附加质量和附加惯性矩的计算

浅水域中船舶受到的附加质量和附加惯性矩的计算采用李美菁回归公式进行估算<sup>[15]</sup>。

$$\left. \begin{aligned} m_{11h}/m_{11\infty} &= [(h/d - 1)^{1.3} + 3.77 + \\ 1.14 B/d - 0.233 L/d - 3.43 C_b] / (h/d - 1)^{1.3} \\ m_{22h}/m_{22\infty} &= [(h/d - 1)^{0.82} + 0.413 + \\ 0.0320 B/d + 0.0129 (B/d)^2] / (h/d - 1)^{0.82} \\ m_{66h}/m_{66\infty} &= [(h/d - 1)^{0.82} + 0.413 + \\ 0.0192 B/d + 0.00554 (B/d)^2] / (h/d - 1)^{0.82} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中： $m_{11h}$ 、 $m_{22h}$ 、 $m_{66h}$ 和 $m_{11\infty}$ 、 $m_{22\infty}$ 、 $m_{66\infty}$ 分别表示浅水及深水中的附加质量和附加惯性矩，可按文献[15]计算； $h$ 为水深； $d$ 为设计吃水深度。

(2) 浅水域中作用在船体的纵向流体动力的计算

浅水域中作用在船体的纵向流体动力的计算主要包括浅水中船舶的直航总阻力系数修正及浅

水船舶操纵运动造成的附加阻力的修正。

浅水中船舶的直航总阻力系数修正为<sup>[15]</sup>:

$$\frac{C_{th}}{C_{t\infty}} = A + \frac{B}{h/d} \quad (10)$$

式中:  $C_{th}$ 、 $C_{t\infty}$  分别为浅水、深水中的船舶直航总阻力系数;  $A$ 、 $B$  为有关系数<sup>[15]</sup>。

浅水船舶操纵运动造成的附加阻力<sup>[15]</sup>:

$$\frac{X_{v_y, rh}}{X_{v_y, r\infty}} = 1 - 0.9879 \frac{d}{h} + 21.9123 \left(\frac{d}{h}\right)^2 - 73.8161 \left(\frac{d}{h}\right)^3 + 71.1409 \left(\frac{d}{h}\right)^4 \quad (11)$$

式中:  $X_{v_y, rh}$ 、 $X_{v_y, r\infty}$  分别表示浅水、深水中的纵向流体动力导数。

(3) 浅水域中作用在船体的横向流体动力及动力矩的计算

浅水域中, 作用在船体的横向流体动力及动力矩可分为线性和非线性两种类别。

线性流体导数部分<sup>[15]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} Y'_{v_y, h} &= -\left(\frac{\pi}{2} \lambda_e + 1.4C_b \frac{B}{L}\right), & q &= 2.3 \\ Y'_{rh} &= \frac{\pi}{4} \lambda_e, & q &= 0.7 \\ N'_{v_y, h} &= -\lambda_e, & q &= 1.7 \\ N'_{rh} &= -(0.54\lambda_e - \lambda_e^2), & q &= 0.7 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: 有效展弦比  $\lambda_e = \lambda \left/ \frac{d}{2h} + \left(\frac{\pi d}{2h} \cot \frac{\pi d}{2h}\right)^q \right.$ , 展弦比  $\lambda = 2d/L$ ,  $q$  为常数。

非线性流体导数部分<sup>[15]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} Y'_{v_y, v_y, h} / Y'_{v_y, v_y, \infty} &= 1 + 14(d/h)^{3.5} \\ Y'_{rrh} / Y'_{rr\infty} &= 1 + 3(d/h)^{2.5} \\ Y'_{v_y, rh} / Y'_{v_y, r\infty} &= 1 + 3(d/h)^{2.5} \\ N'_{rrh} / N'_{rr\infty} &= 1 + 5(d/h)^{3.5} \\ N'_{v_y, v_y, rh} / N'_{v_y, v_y, r\infty} &= 1 + 6(d/h)^{2.5} \\ N'_{v_y, rrh} / N'_{v_y, rr\infty} &= 1 + 6(d/h)^{2.5} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: 下标“ $\infty$ ”表示深水相应流体导数参数, 其余为浅水对应参数。

(4) 浅水域螺旋桨推力和转矩的计算

浅水域中螺旋桨推力和转矩的计算主要是通过修正深水的推力减额系数  $t_p$  和伴流系数  $\omega_p$  得到。

推力减额系数  $t_p$  的修正<sup>[15]</sup>:

$$\frac{(1-t_p)_h}{(1-t_p)_\infty} = \frac{1}{1-0.2(d/h)+0.7295(d/h)^2} \quad (14)$$

伴流系数  $\omega_p$  的修正<sup>[15]</sup>:

$$\frac{(1-\omega_p)_h}{(1-\omega_p)_\infty} = \cos\left(1.4C_b \frac{d}{h}\right) \quad (15)$$

(5) 浅水域舵力和力矩的计算

浅水域中舵力计算的减额系数  $t_R$  可按深水值选取, 而力矩计算主要是通过修正深水船体和桨的整流系数  $\gamma_R$  得到<sup>[15]</sup>。

$$\frac{\gamma_{Rh}}{\gamma_{R\infty}} = 1 + 0.0161 \frac{d}{h} + 4.4222 \left(\frac{d}{h}\right)^2 - 4.9825 \left(\frac{d}{h}\right)^3 \quad (16)$$

式中: 下标“ $\infty$ ”表示深水相应整流系数, 其余为浅水对应参数。

## 2.2 方程求解

基于浅水效应水流运动的船舶运动方程为具有一阶导数的常微分方程组, 一般采用龙格—库塔法进行求解。在实际工程运用当中, 考虑到数据计算的精度及稳定性, 对于船舶操纵运动方程的数值求解通常采用龙格—库塔法四阶格式进行求解。

## 3 浅水船舶操纵运动仿真预报

为体现浅水效应对船舶操纵的影响, 采用了航行于山区河流浅水水域的某代表船舶, 有关基本参数如下表 1 所示。本文代表船舶采用的是双桨、双舵, 其中, 螺旋桨推力中伴流系数和推力减额系数均采用了霍尔特洛双桨船公式进行计算<sup>[15]</sup>、整流系数的确定采用贵岛公式进行计算<sup>[15]</sup>。

表 1 代表船舶主要参数表  
Tab. 1 parameters of typical ship

参数	数值	参数	数值
排水量/t	405	棱形系数	0.75
船长/m	46.2	舵面积/m <sup>2</sup>	4.0×2
船宽/m	7.6	舵直径/m	1.18
设计吃水/m	2.40	螺旋桨螺距/m	0.933
方形系数	0.724	螺旋桨个数	2

为验证本浅水船舶操纵运动模型的可靠性,比较了深水与浅水域实船和数值模型满舵回转运动(图1),可见二者符合良好,说明建立的基于浅水效应的船舶操纵运动模型可以较好模拟实际船舶操纵运动。

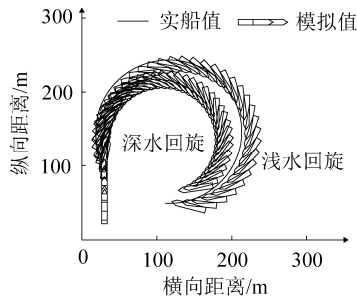


图1 实船、船模深水、浅水回转验证比较( $h/d=2.5, \delta=25^\circ$ )  
Fig. 1 Comparison of turning characteristics of measured and calculated ship in deep water and shallow water( $h/d=2.5, \delta=25^\circ$ )

### 3.1 浅水直航特性

直航特性是船舶最基本的操纵特性,基于浅水效应开发的船舶操纵仿真模型对不同水深吃水比( $h/d$ )的静水直航特性进行了模拟(航行时间60 s),如图2所示。可见,随着 $h/d$ 的减小,浅水效应越突出,船舶航行阻力越大,同一时段内航行距离越短。

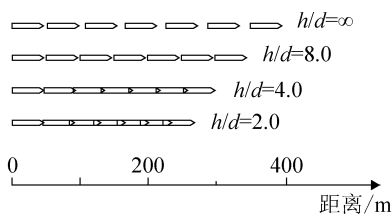


图2 不同水深吃水比浅水直航特性比较( $\delta=0^\circ, t=60$  s)  
Fig. 2 Comparison of straight line navigation characteristics with different  $h/d$  in shallow water( $\delta=0^\circ, t=60$  s)

### 3.2 浅水回转运动

基于开发的浅水船舶操纵运动数学模型对不同水深吃水比、不同回转舵角、以及存在水流流速条件下船舶的回转特性进行了模拟,见图3~5。

由图可见:(1) 由于浅水效应影响,在浅水情况下船舶航行阻力增大,回转直径较深水为大。水深吃水比( $h/d$ )越小,浅水效应越突出,船舶回转

直径越大;(2) 同一水深吃水比情况下,回转舵角越大,回转直径越小,与深水时基本一致;(3) 在水流流速存在情况下,船舶一边回旋同时向水流流动方向偏转,且随水流流速增加,船舶回转变形越大,从完整的圆形偏转为半径越来越小的弧形。

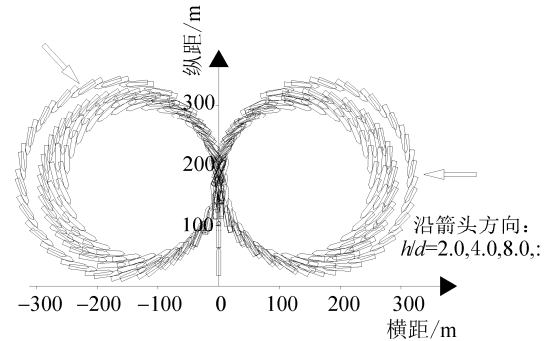


图3 不同水深吃水比浅水回转比较( $\delta=15^\circ$ )  
Fig. 3 Comparison of turning characteristics with different  $h/d$  in shallow water ( $\delta=15^\circ$ )

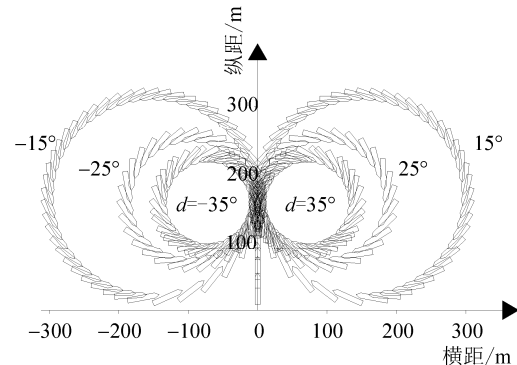


图4 不同舵角浅水回转比较( $h/d=3.0$ )  
Fig. 4 Comparison of turning characteristics with different rudder angle in shallow water ( $h/d=3.0$ )

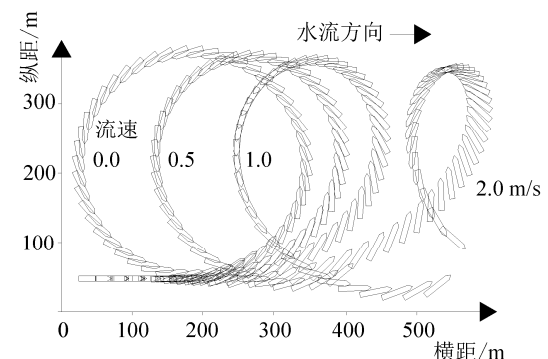


图5 不同水流流速的浅水回转比较  
( $h/d=2.0, \delta=15^\circ, v=0$  m/s, 0.5 m/s, 1.0 m/s, 2.0 m/s)  
Fig. 5 Comparison of turning characteristics with different flow velocity in shallow water ( $h/d=2.0, \delta=15^\circ, v=0$  m/s, 0.5 m/s, 1.0 m/s, 2.0 m/s)

### 3.3 浅水 Z 型运动

基于开发的浅水船舶操纵运动数学模型模拟了不同水深吃水比条件下船舶的  $20^\circ/20^\circ$  Z 型运动, 其运动轨迹和船舶操纵特性曲线分别如图 6 和图 7 所示。可见, 水深吃水比 ( $h/d$ ) 越小, 船舶作 Z 型运动摆动幅度越大, Z 型运动周期越长, 说明受浅水效应影响船舶航行阻力增大, 操纵性随之降低。以本文代表船舶为例, 在  $20^\circ/20^\circ$  Z 型试验工况下, 深水中船舶摆动幅度约 25.0 m, 而在水深吃水比  $h/d=2.0$  的浅水摆动幅度约 35.0 m; 深水中完成一次 Z 型运动的周期约 45 s, 而在  $h/d=2.0$  浅水中约为 70 s。说明在浅水中船舶操纵性能降低, 水深越小船舶操作性能越差。

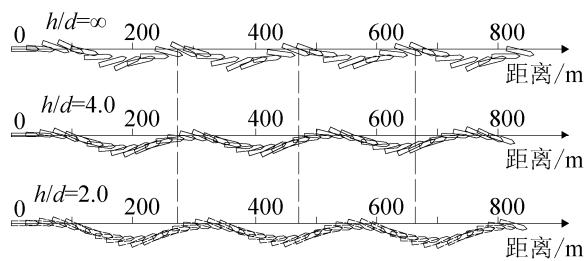


图 6 不同水深吃水比浅水  $20^\circ/20^\circ$  Z 型运动轨迹比较  
Fig. 6 Comparison of  $20^\circ/20^\circ$  Z motion trace with different  $h/d$  in shallow water

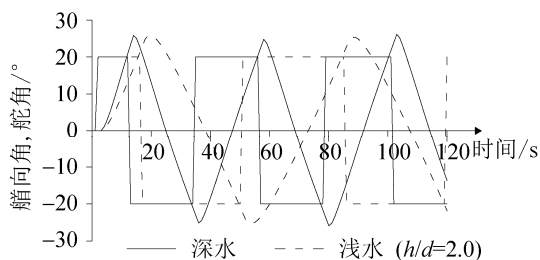


图 7 不同水深吃水比浅水  $20^\circ/20^\circ$  Z 型运动特性曲线  
Fig. 7 Comparison of  $20^\circ/20^\circ$  Z motion curves with different  $h/d$  in shallow water

## 4 非均匀流浅水船舶操纵运动应用

### 4.1 非均匀水流数学模型的验证

为检验本非均匀水流数学模型的可靠性, 选取了某山区河流实测水位、流速参数对数学模型进行了验证。本文水流数学模型计算的水位值和实测水

位值比较如图 8 所示, 计算的流速分布值和实测代表流速剖面的比较如图 9 所示, 可见水位、流速计算值与实测值均吻合良好, 说明本水流数学模型可以较好的模拟水流运动。

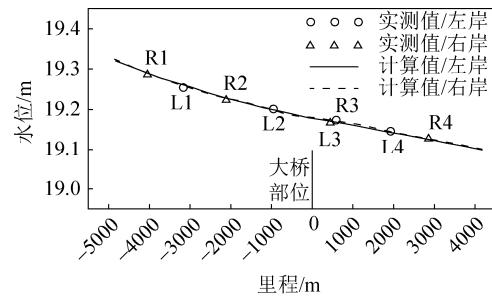


图 8 实测水位与计算水位的比较  
Fig. 8 Comparison of measured and calculated water level

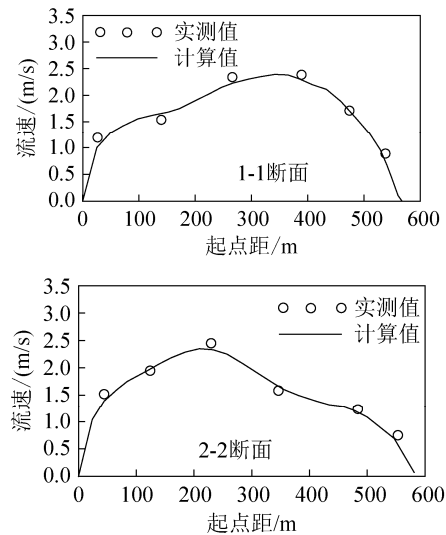


图 9 实测流速与计算流速的比较  
Fig. 9 Comparison of measured and calculated flow velocity

### 4.2 非均匀流浅水船舶模型的应用

将前文开发的基于非均匀水流浅水效应的船舶操纵运动模型应用于山区河道某大桥通航孔布设研究中。首先根据河道地形数据、河道糙率、上下游水文参数等计算获取二维水流流场(图 10)。在水流流场已知条件下加载浅水船舶操纵运动模型。如按深水情况船舶运动轨迹如图 10 所示, 而采用浅水效应模型计算, 航行舵角若仍采用深水值, 则得出的运动轨迹则有所不同。显然, 采用基于浅水效应的模型计算更加合理和符合实际。



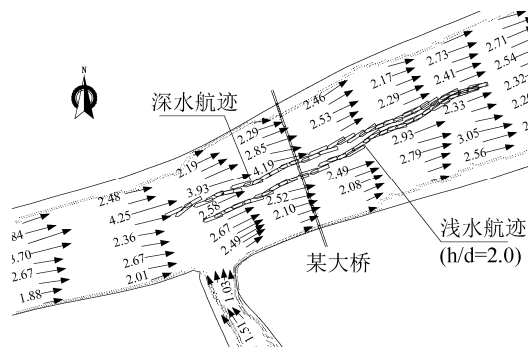


图10 非均匀流浅水船舶操纵运动模型的应用

Fig. 10 Application of ship maneuvering motion based on non-uniform flow and shallow water effect

## 5 结论

基于明渠非均匀水流和考虑浅水效应作用下开发了船舶操纵运动数学模型。模拟结果表明,水深吃水比( $h/d$ )越小,浅水效应越为突出,船舶直航速度越低;定回转直径越大;同时,船舶Z型运动的周期越长,摆幅越大,船舶的操纵性能越差。结合工程实例计算,表明所开发的基于非均匀流和浅水效应的船舶操纵运动数学模型可以应用于工程实际的研究。

## 参考文献:

- [1] 杨盐生. 船舶靠离泊操纵数学模型的研究[J]. 大连海事大学学报, 1996, 22(4): 11-15.  
Yang Yansheng. Study on mathematical model for simulating ship berthing or unberthing[J]. Journal of Dalian Maritime University, 1996, 22(4): 11-15.
- [2] 杨盐生, 方祥麟. 不均匀流中船舶操纵运动仿真模型及应用[J]. 中国造船, 1998 (1): 30-35.  
Yang Yansheng, Fang Xianglin. Simulation model of ship maneuvering motion in uneven current and its application[J]. Ship Building of China, 1998 (1): 30-35.
- [3] 招定友. 船舶浅水效应的研究[J]. 天津航海, 2009(2): 4-6.  
Zhao dingyou. Study on shallow water effect[J]. Tianjing Navigation, 2009(2): 4-6.
- [4] 周华兴, 郑宝友. 关于深水、浅水与限制性航道界定的探讨[J]. 水运工程, 2006 (1): 53-57.  
Zhou Huaxing, Zheng Baoyou. Discussion on defining deep water, shallow water and restricted channel. Port & Waterway Engineering[J]. Port and Waterway Engineering, 2006(1): 53-57.
- [5] 吴明, 王骁, 应荣蓉. 船舶浅水航行下沉量和纵倾的

数值计算[J]. 船舶, 2013, 24(3):7-11.

Wu ming, Wang Xiao, Ying rongrong. Numerical calculation of ship sinkage and trim in shallow water[J]. Ship & Boat, 2013, 24(3): 7-11.

- [6] TUCK E O. Sinkage and trim in shallow water of finite width [J]. Schiffstechnik, 1967(14): 92-94.
- [7] DAND I W, Ferguson A. The squat of full ships in shallow water [J]. The Naval Architect, 1973(4): 237-255.
- [8] Chen X N, Sharma S D. A slender ship moving at a near-critical speed in a shallow channel [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1995(291): 263-285.
- [9] Zhang Xiedong, Wu Xiuheng. Study of hydrodynamic forces of ships in narrow waterway [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2003, (4): 113-117.
- [10] Gu Min, Wu Chengsheng. CFD calculation for resistance of a ship moving near the critical speed in shallow water [J]. Journal of Ship Mechanics (S1007-7294), 2005, 9(6): 40-47.
- [11] 王宏志, 邹早建. 浅水条件下船舶通过船闸时的水动力性能数值研究[J]. 船舶力学, 2015, 19(6): 629-640.  
Wang Hongzhi, Zou Zaojian. Numerical study on the hydrodynamic behaviors of a ship passing through a lock in shallow water[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015, 19(6): 629-640.
- [12] 李超, 吴玲达, 赵彬. 矢量场拓扑分析及其在可视化中的应用[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(10): 2352-2359.  
Li Chao, Wu Lingda, Zhao Bin. Vector field topology analysis and application in visualization[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(10): 2352-2359.
- [13] 郭晨, 焉丽飞, 沈海清. 超大型双桨舵船舶运动数学模型与虚拟仿真[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(9): 1976-1983.  
Guo Chen, Yan Lifei, Shen Haiqing. Mathematical model of maneuvering motion and visual simulation for Ultra large twin-propeller twin-rudder ship [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 1976-1983.
- [14] 翟小明, 尹勇, 神和龙, 等. 内河船舶模拟器中基于过程法的河流仿真[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(9): 2189-2193.  
Zhai Xiaoming, Yin Yong, Shen Helong, et al. River simulation based on procedural in in-land river ship simulator[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(9): 2189-2193.
- [15] 贾欣乐, 杨盐生. 船舶运动数学模型—机理建模与辨识建模[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.  
Jia Xinle, Yang Yansheng. Mathematical model of ship maneuvering motion-mechanism modeling and recognition modeling[M]. Dalian: Dalian Maritime University press, 1999.