

文章编号:1000-582X(2012)08-116-06

## 船舶浅水操纵性能的数值仿真

蔡 创, 蔡新永, 赵传波, 陈 敏

(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

**摘 要:**采用深水 MMG 船舶操纵运动方程, 对其中各水动力导数进行浅水修正, 建立了浅水操纵运动数学模型。采用四阶龙格库塔法求解, 用 MATLAB 语言编制了相应计算程序, 并对三峡水利工程枢纽通航船队浅水操纵性进行了模拟仿真处理。通过与已有文献试验结果的对比, 证明了数值模拟的准确性。通过对浅水中船队回转性和航向稳定性的模拟仿真, 研究了浅水对回转性和航向稳定性的影响。发现船队在浅水区域运动, 在同样舵角下定常回转圆的直径增大; 在同样的回转圆直径下, 漂角减小, 速度降减小。通过对船队在浅水中 Z 形运动性能预报, 模拟计算的  $K$ 、 $T$  指数与试验结果进行了对比, 吻合较好。浅水较深水初转期时间增加, 超越角减小, 说明船队航向稳定性有所提高, 相应舵力变小。

**关键词:**MMG 运动方程; 浅水修正; 枢纽通航; MATLAB 模拟仿真

**中图分类号:**U675.58; U675.91

**文献标志码:**A

## Numerical simulation on ships maneuverability in shallow water

CAI Chuang, CAI Xinyong, ZHAO Chuanbo, CHEN Min

(River and Ocean Engineering School, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

**Abstract:** Hydrodynamic coefficients are corrected for shallow water, and shallow water maneuverability equations are established by using MMG ship maneuverability equations. The equations are computed by using fourth-order Runge-Kutta method. MATLAB language is adopted to make calculation program. Simulation processing is given for Three Gorges Project fleet of ships of shallow water navigation by using MATLAB software. The accuracy of shallow water maneuverability equations are verified by comparing the simulation result with the experimental results in literatures. Turning ability and shipping-direction stability of fleet in shallow water are simulated, the effect of shallow water is studied. It is found that constant turning circle diameter of flee increases with the same rudder angle in shallow water, the drift angle decreases with the same turning circle diameter. Z shape motion performance of fleet for shallow water is forecasted, the simulated  $K$ ,  $T$  are in agreement with experimental data. The shipping-direction stability of shallow water increases compared to deep water.

**Key words:** MMG equation; shallow water corrected; hub navigation; MATLAB simulation

船舶航行于江河、运河、进出港航道, 以及港内水域往往有浅水区域。对于船舶的航行操纵将受到影响。为解决浅水中船舶操纵问题, 有必要对浅水

操纵性进行模拟计算研究, 以保证船舶在水深限制水域的通航安全。目前国内外对船舶浅水水动力及操纵性有着较多的研究<sup>[1-8]</sup>, Kijima 为了估算浅水区

收稿日期: 2012-03-30

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(59453600); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC, 2008BB6354)

作者简介: 蔡创(1968-), 男, 重庆交通大学副研究员, 主要从事通航小尺度船模及计算机应用研究,

(E-mail) caichuang@sina.com.

域船舶操纵水动力导数,并提出近似计算公式,结果表明对于同一艘船来说,其船体流体动力、力矩因水深变化而表现出不同。盛子寅通过考虑二维船体横截面横向附加质量的浅底效应,把极短翼理论推广到浅水情况,提出了计算浅水区域船体水动力导数的计算方法。Bakountouzis 等通过对浅水区域有关船舶航行线性水动力导数进一步改进,航道底部对船体和船体下沉之间相互作用进行了系统的阐述,通过与 Mariner 船型试验结果比较,水动力导数的线性速度项和加速度项能够吻合一致。上述理论对浅水水动力导数进行了详细研究,但截止目前,还没有关于船舶浅水操纵性影响的系统研究。另外,船体水动力导数是与船舶操纵性相关的最为重要的因素,获得这些水动力的关键是确定这些水动力导数,虽然这些水动力导数可以通过上述诸多理论的计算来获取,但在船舶通航设计阶段,更需要快捷的获取船舶操纵性的方法,笔者基于试验资料数据库法,利用简单的回归公式来计算浅水水动力导数的方法更为有效。

三峡通航船队吃水为 2.9 m,三峡工程引航道中,其水深仅为 5 m 左右, $H/T$ (水深/吃水)不足 2,属于限制深水域<sup>[9]</sup>。限制深水域对船队的操纵性能有一定的影响,制约了浅水区域航道的船队通航安全,因此探讨浅水区域船队操纵性对通航安全具有重要的意义。笔者通过探讨浅水修正水动力导数模型,将深水 MMG 船舶操纵运动方程推广到浅水,利用基于试验资料数据库法的简单回归公式计算各水动力,利用机翼理论计算舵力,通过查取螺旋桨推进性能图谱求得螺旋的推力,首次使用 MATLAB 软件对浅水操纵模型进行了数字模拟仿真,并与小尺度船模试验结果相对比,发现模拟计算值与试验结果基本相一致,为浅水区域船队操纵提供了更准确更快捷的数值预测方法和参考。

## 1 数学模型

目前还没有系统研究浅水区域的船舶操纵运动

数学模型,笔者通过探讨浅水修正水动力导数模型,将深水 MMG 船舶操纵运动方程推广到浅水,利用基于试验资料数据库法的简单回归公式计算各水动力,建立船舶浅水操纵性运动数学模型:

$$\left. \begin{aligned} (m + \lambda_{11h})\dot{u} - (m + \lambda_{22h})vr &= X_{Hh} + X_{Ph} + X_{Rh}, \\ (m + \lambda_{22h})\dot{v} + (m + \lambda_{11h})ur &= Y_{Hh} + Y_{Ph} + Y_{Rh}, \\ (I_z + \lambda_{66h})\dot{r} &= N_{Hh} + N_{Ph} + N_{Rh} - Y_{Hh} \cdot x_C. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:下标 Hh、Ph、Rh 分别代表浅水区域船体、螺

旋桨、舵, $h$  数值表示水深; $\lambda_{(11,22,66)}$  分别表示船体的附加质量、附加惯性矩; $X$ 、 $Y$ 、 $N$  分别表示所受的力、力矩。

### 1.1 浅水对船体水动力导数模型

浅水对水动力导数的影响主要通过一系列约束船模变水深试验来研究。通过试验得出以下规律性结论:线性导数  $Y_v$ 、 $N_v$ 、 $Y_r$ 、 $N_r$  随水深变浅呈现出增加的趋势;对于非线性导数,对于不同的船型存在较大的离散性。浅水对于纵向水动力的影响主要是船舶直航阻力  $X(u)$  和耦合粘性水动力  $X_{vr} \cdot vr$  两个部分。浅水对直航阻力系数影响采用如下修正模型

$$\frac{C_{th}}{C_{t\infty}} = A + \frac{B}{h \cdot d^{-1}}, \quad (2)$$

式中:下标  $\infty$  表示深水区; $A$ 、 $B$  表示船模试验系数; $d$  表示船舶平均吃水。

浅水对耦合粘性水动力导数  $X_{vr}$  的影响采用四阶回归浅水修正模型

$$\begin{aligned} X_{vr}/X_{vr\infty} &= 1 - 0.9879 \frac{d}{H} + 21.9123 \left(\frac{d}{H}\right)^2 - \\ &73.8161 \left(\frac{d}{H}\right)^3 + 71.1409 \left(\frac{d}{H}\right)^4. \end{aligned} \quad (3)$$

浅水对船体附加质量  $\lambda_{11h}$ 、 $\lambda_{22h}$  和附加惯性矩  $\lambda_{66h}$ ,可采用流体力学的势流理论进行计算。目前,切片法、有限元法、奇点分布法三种方法计算附加质量和附加惯性矩<sup>[10-13]</sup>。切片法属于二维计算,计算方法较为简单,但与试验结果差距较大,有限元法和奇点分布法属于三维计算,精度较高,但过程复杂。利用切片法计算简单便于实施的特点,对此进行了修正,经过回归分析得出如下计算公式

$$\lambda_{11}/\lambda_{11\infty} = [(H/d - 1)^{1.3} + 3.77 + 1.14B/d - 0.233L/d - 3.43C_B]/(H/d - 1)^{1.3}, \quad (4)$$

$$\lambda_{22}/\lambda_{22\infty} = [(H/d - 1)^{0.82} + 0.413 + 0.032B/d + 0.0129(B/d)^2]/(H/d - 1)^{0.82}, \quad (5)$$

$$\lambda_{66}/\lambda_{66\infty} = [(H/d - 1)^{0.82} + 0.413 + 0.0192B/d + 0.00554(B/d)^2]/(H/d - 1)^{0.82}. \quad (6)$$

### 1.2 浅水对螺旋桨和舵力水动力导数模型

浅水对螺旋桨影响主要体现在对于船体伴流系数  $\omega_p$  和推力额减系数  $t_p$  两者的影响。采用如下浅水修正水动力模型

$$(1 - \omega_p) = \cos[C_b(d/H)] \cdot (1 - \omega_p)_\infty. \quad (7)$$

式中: $C_b$ —船型修正系数。

$$(1 - t_p) = f(h)(1 - t_p)_\infty. \quad (8)$$

其中: $f(h) = 1 - 0.2 \frac{d}{H} + 0.7295 \left(\frac{d}{H}\right)^2$ 。

浅水对舵的影响主要考虑整流系数  $\gamma$ 、横向力增额系数  $\alpha_H$ 、中心坐标  $x_H$  三者的影响。采用如下

浅水修正模型

$$x_{Hh}/x_{H\infty} = 1 + 0.3328 \left(\frac{d}{h}\right) - 3.2134 \left(\frac{d}{h}\right)^2 + 2.5916 \left(\frac{d}{h}\right)^3 \quad (9)$$

$$\alpha_{Hh}/\alpha_{H\infty} = 1 + 0.3621 \left(\frac{d}{h}\right) + 1.1724 \left(\frac{d}{h}\right)^2 \quad (10)$$

$$\gamma_h/\gamma_\infty = 1 + 0.0161 \left(\frac{d}{h}\right) + 4.4222 \left(\frac{d}{h}\right)^2 - 4.9825 \left(\frac{d}{h}\right)^3 \quad (11)$$

## 2 试验部分

### 2.1 试验船队

试验采用的船队为三峡工程枢纽通航船队,由近期、中期、远期三种船队组成。近期船队为  $3 \times 1\,000\text{ t} + 2\,640\text{ HP}$ (图 1),中期船队为  $6 \times 1\,000\text{ t} + 2\,640\text{ HP}$ (图 2),远期船队为  $9 \times 1\,000\text{ t} + 2\,640\text{ HP}$ (图 3)。

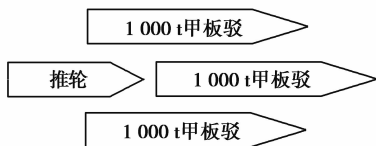


图 1 三峡近期通航 3000T 船队队形图

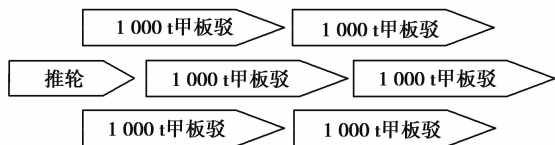


图 2 三峡中期通航 6000 t 船队队形图

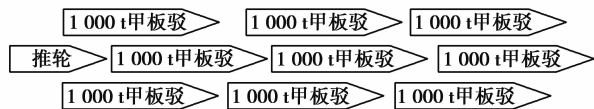


图 3 三峡远期通航 9000 t 船队队形图

浅水试验着重进行  $9 \times 1\,000\text{ t}$  和  $3 \times 1\,000\text{ t}$  两个队形的船模试验。

### 2.2 试验设备及测定方法

船模试验水池:  $42\text{ m} \times 13.5\text{ m} \times 1.4\text{ m}$ ,水深可在  $0 \sim 1.4\text{ m}$  之间调节,池底平整度误差  $< \pm 1\text{ mm}$ ,可用作船模浅水试验。

试验船模:船体采用玻璃钢按几何相似制作,船模可以在航行中遥控无级操舵,变换车速,并设置有

照相试验用的节拍闪光灯,激光扫描用的反标。

测控设备:CMZ-2B 船模自动试验系统<sup>[15]</sup>,该系统可以实时遥测船模运行姿态,并对试验数据同步处理,图形数据同步在窗口显示。

测定方法:三峡航道窄曲多变,船队在航行中以频繁左右操小舵角为主,因此用于三峡通航试验的船模,用 Z 形试验来分析其操纵性能,比较符合实际情况。Z 形试验操舵,船模姿态遥测,图形数据处理均有 CMZ-2B 系统自动完成。

### 2.3 试验结果

浅水船模操纵性能试验着重进行了与三峡引航道相近水深( $H=5\text{ m}$ )的浅水 Z 形试验。

首先根据遥测资料,给出  $\theta-t, \delta-t$  过程图(图 4)。

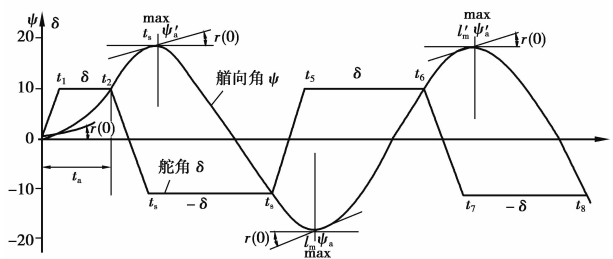


图 4  $\theta-t, \delta-t$  过程图

利用野本方程求解  $K, T$  指数。船模浅水 Z 形试验( $H=5\text{ m}, 15^\circ Z$ )结果如表 1 所示。

表 1 仿真结果与实船试验比较

水深	船队	$K'$	$T'$	
		数值	数值	
$H = \infty$	实船	九驳	1.540	0.640
		三驳	1.680	0.695
	试验	九驳	1.371	0.646
		三驳	1.451	0.716
$H = 5\text{ m}$	仿真	九驳	1.379	0.652
		三驳	1.462	0.723
	试验	九驳	1.598	0.995
		三驳	1.891	1.067
	仿真	九驳	1.582	0.962
		三驳	1.879	1.059

## 3 模拟仿真

将浅水船舶操纵运动数学模型①采用 4 阶龙格

库塔法求解,利用 MATLAB 语言编制相应计算程序,对船队操纵性进行数字模拟仿真结果输出。

### 3.1 龙格-库塔法 MATLAB 编程

在 MATLAB 中编程实现的经典龙格—库塔法的函数为:DELGKT4—lungkuta,其功能为求解一阶常微分方程的数值解。调用格式为:

$y = \text{DELGKT4—lungkuta}(f, h, a, b, y_0, \text{varvec})$ ,  
其中: $f$ —一阶常微分方程的一般表达式的右端函数;

- $h$ —积分步长;
- $a$ —自变量取值上限;
- $b$ —自变量取值下限;
- $y_0$ —函数初值;
- $\text{varvec}$ —常微分方程的变量组。

经典的龙格—库塔法的 MATLAB 程序代码如下所示。

```
function y = DELGKT4—lungkuta(f, h, a, b,
y0,varvec)
%一阶常微分方程的一般表达式的右端函数:b
%积分步长:h
%自变量取值上限:a
%自变量取值下限:b
%函数初值:y0
%常微分方程的变量组:varvec
format long;
N=(b-a)/h;
y=zeros(N+1,1);
y(1)=y0;
x=a:h:b;
var=findsym(f);
```

```
for i=2:N+1;
k1=Funval(f,varvec,[x(i-1)y(i-1)]);%
经典龙格—库塔三阶公式的第一步
k2=Funval(f,varvec,[x(i-1)+h/2 y(i-1)
+k1 * h/2]); %经典龙格—库塔三阶公式的第二步
k3=Funval(f,varvec,[x(i-1)+h/2 y(i-1)
+k2 * h/2]); %经典龙格—库塔三阶公式的第三步
k4= Funval(f,varvec,[x(i-1)+h y(i-1)+
k3 * h]); %经典龙格—库塔三阶公式的第四步
y(i)=y(i-1)+h * (k1+2 * k2+2 * k3+k4)/
6; %经典龙格—库塔三阶公式的第五步
end
format short;
```

MATLAB 求解船舶浅水操纵运动方程:

```
function ydot=shipmovement(t,y)
ydot=[((m+m22) * y(2) * y(3)+XH+XP+
XR)/(m+m11);(YH+YR-(m+m11) * y(1) * y
(3))/(m+m22);(NH+NR-YH * xc)/(Iz+m66)]
tpan=[0,70];y0=[0;0;1];
[t, y] = ode45 (@ shipmovement, [0, 70],
y0);%龙格-库塔法求解微分方程组
```

### 3.2 MATLAB 模拟仿真

根据资料,应用仿真程序对三峡水利枢纽的近期通航船队 2 640 kW+3×1 000 t、2 640 kW+6×1 000 t、2 640 kW+9×1 000 t 进行了船舶 Z 形和回转的浅水操纵性能数字模拟仿真,得出了船舶操纵性  $K'$ 、 $T'$  指数的值,并与实船试验结果进行比较。上述船队的船型具体资料如表 2 所示。

表 2 2 640 kW 推轮的船型参数

船舶长度/m	水线长/m	排水量/t	型宽/m	型深/m	满载吃水/m	丰满度系数	水面线系数	方型系数	棱形系数	桨舵形式	边舵面积/m <sup>2</sup>	中舵面积/m <sup>2</sup>	边舵展弦比	中舵展弦比	桨直径/m	桨盘面积/m <sup>2</sup>	桨螺距比	设计航速/(km·h <sup>-1</sup> )	设计航速/推力/t
46	44	640	10	3.7	2.5	0.931	0.822	0.579	0.621	两桨三舵	3.4	3.7	1.30	1.03	1.85	2.69	0.62	14	18

通过 MATLAB 平台对船队回转性和 Z 形运动进行了仿真输出,如图所示。

图 5、图 6 为右舵 35° 回转数值与试验数值的比较,可以看出数值给出船队回转预报与试验较好吻合。

利用 MATLAB 数值模拟软件对船队 Z 形操纵运动 15° 舵角模拟仿真输出,仿真计算得到三驳、六

驳、九驳顶推船队舵角 15° Z 形试验模拟图,分别见图 7~9。

从图 7~9 的舵角为 15° Z 仿真模拟曲线表明,船队的舵角、艏向角仿真曲线的变化是有规律的,且程序运行稳定。从表 1 仿真试验结果与实船试验的结果数据来看,程序仿真模拟计算的结果基本吻合于实船试验的结果。

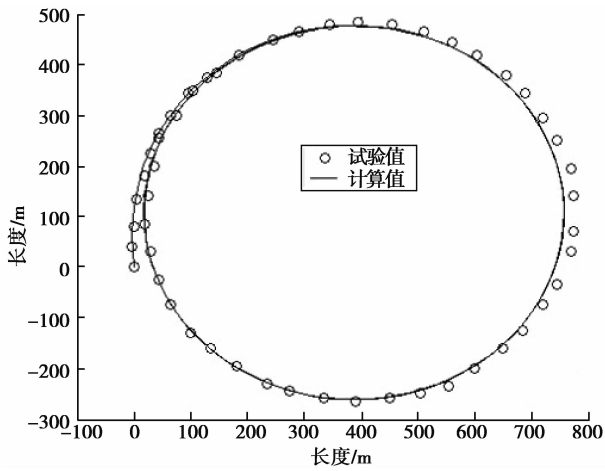


图 5  $\delta=35^\circ$  船队回转轨迹

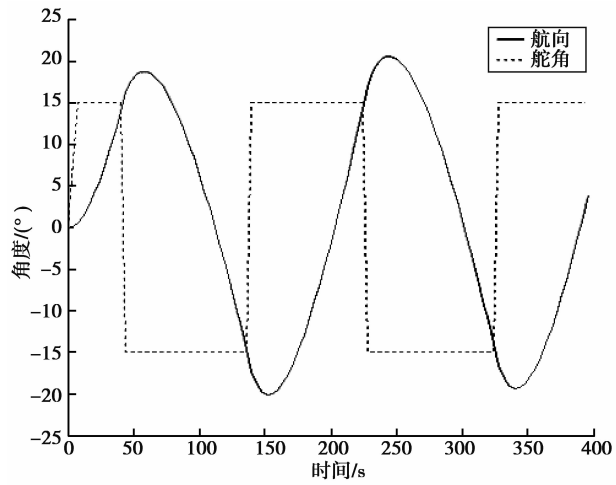


图 8 六驳顶推船队 Z 形仿真试验曲线

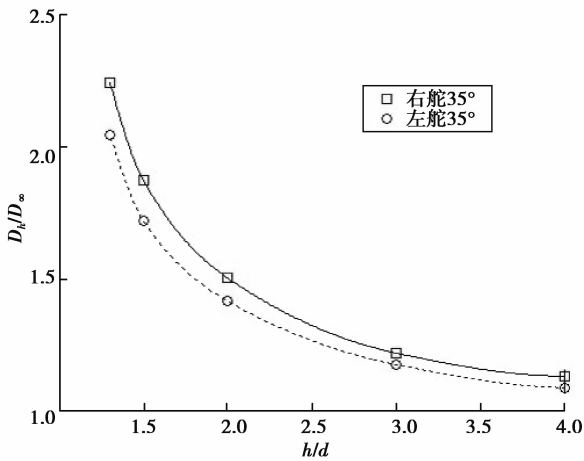


图 6  $\delta=35^\circ$  船队浅水区与深水区左右回转圈直径比

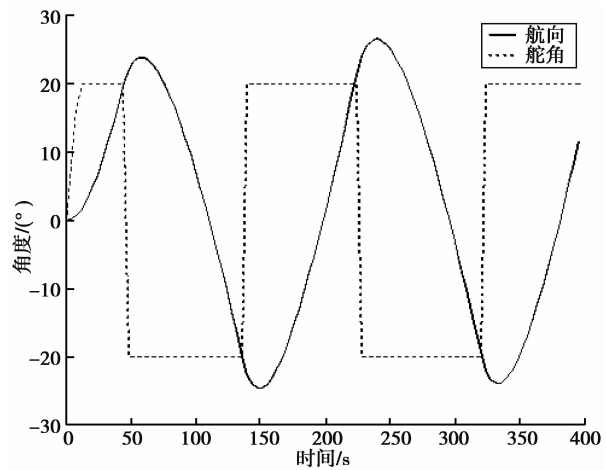


图 9 九驳顶推船队 Z 形仿真试验曲线

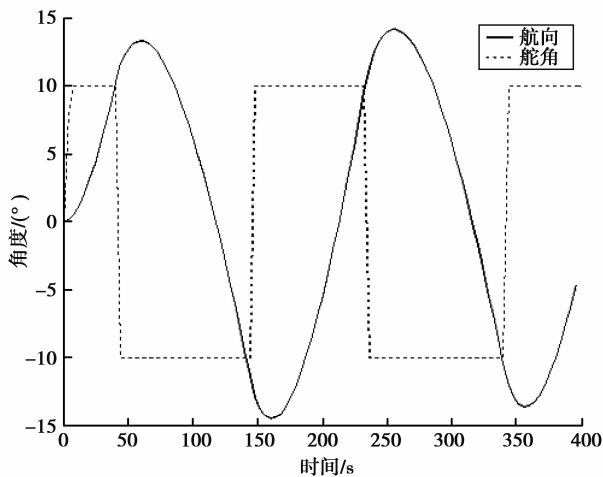


图 7 三驳顶推船队 Z 形仿真试验曲线

通过编制计算程序,借助 MATLAB 仿真模拟计算得出的船舶操纵性运动( $15^\circ$ )Z 形曲线与实船

试验的( $15^\circ$ )Z 形曲线大致相同,获得的  $K'$ 、 $T'$  指数与实船试验之间存在一定的偏差。船舶浅水操纵运动方程模拟计算结果与实船和船模试验成果相比, $H=5\text{ m}$  时,模拟计算结果与实船  $K'$ 、 $T'$  相比,九驳  $K'$  较实船减小了 10.45%, $T'$  增大 1.88%,三驳  $K'$  较实船减小了 12.98%, $T'$  增大 4.03%,基本满足  $T'$  与实船相比误差不大于 5%, $K'$  不小于实船的 80% 的要求。 $H=5\text{ m}$  时,浅水操纵运动方程模拟计算结果与浅水船模试验成果相比,数值基本相接近,误差相对很小。

## 4 结 论

通过流体力学相关原理,得出船舶在浅水中水动力导数修正模型,结合深水船舶 MMG 操纵运动方程,进而求得浅水中船舶操纵运动数学模型。利用 MATLAB 语言编程计算,并得到了三峡水利工

程枢纽通航船队浅水操纵预报仿真,通过分析 with 试验结果对比,达到较好的数值仿真精度,其预报结果比较可信。

对浅水航道通航船队的操纵性进行了预报,主要对船队的回转性和 Z 形操纵性试验做了数值仿真预报,船队在浅水区域运动,在同样舵角下定常回转圆的直径增大;在同样的回转圆直径下,漂角减小,速度降减小。对 Z 形运动性能预报,浅水较深水初转期时间增加,超越角减小,说明船队航向稳定性有所提高,相应舵力变小。结果表明,浅水操纵运动数学模型在其自身的适用范围内,能够很好地反映出浅水区域中船队的操纵性变化规律。本文工作将被进一步深入拓展,并对公式中一些参数进行修正,以达到尽量减小计算误差的目的。

#### 参考文献:

- [1] Hasanadil M, Duan W Y, Wang Y. Hydrodynamic coefficients of ships with forward speed in shallow waters[J]. Journal of Ship Mechanics, 2004, 8(3): 46-54.
- [2] Vantorre M, Delefortrie G, Eloit K, et al. Experimental investigation of ship-bank interaction forces[C]//Proceedings of the International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability, Aug. 25-28, 2003, Kanazawa, Japan. [S. l.]: [S. n.], 2003, 3: 1-9.
- [3] Varyani K S, Mcgregor R C, Wold P. Identification of trends in extremes of sway-yaw interference for several ships meeting in restricted waters [J]. Schiffahrts-Verlag Hansa, 2002, 49(6): 174-191.
- [4] Ong M C, Lee S C C, Lim A T B, et al. Simulating ship maneuvers in deep and coastal waters[J]. Journal of Ship Research, 2007, 51(3): 204-216.
- [5] Kijima, K. Ship Maneuverability in Shallow Water. 25th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, St. John's, Canada.
- [6] 盛子寅. 浅水中船体操纵水动力导数的计算[J]. 中国造船, 1982(3): 31-42.
- SHENG Ziyang. Computation of ship maneuverability dynamic coefficients in shallow water[J]. Ship Building of China, 1982(3): 31-42.
- [7] Wang D J, Bakountouzis L, Katory M. Prediction of ship hydrodynamic derivatives in shallow and restricted waters[J]. International Shipbuilding Progress, 2000, 47(452): 379-396.
- [8] Pan C H, Dai S Q, Chen S M. Numerical simulation for 2D shallow water equations by using Godunov-type scheme with unstructured mesh [J]. Journal of Hydrodynamics Ser. B, 2006, 18(4): 475-480.
- [9] 蔡汝哲. 三峡通航船模操纵性能率定及浅水操纵性能试验研究三峡水利枢纽工程应用基础研究(第 2 卷) [M]. 北京:中国科学技术出版社,1997:128-129.
- [10] 郑环宇, 吴晞, 宋崇利, 等. 浅水域中船舶的操纵运动仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(2): 99-103.
- ZHENG Huanyu, WU Xi, SONG Chongli, et al. Research on the simulation of ship's maneuver on shallow water[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(2): 99-103.
- [11] Yamasaki K, Masuda S, Katsui T. Application of CFD to the study of ship maneuverability on initial stage of hull design [J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 2001(189): 55-62. .
- [12] Gu M, Wu C S. CFD calculation for resistance of a ship moving near the critical speed in shallow water [J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(6): 40-46.
- [13] Susumu T, Koyu K. A numerical study on hydrodynamic interaction among oblique ship hull propeller and rudder[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 2002(192): 61-69.
- [14] 蔡创. 三峡枢纽通航船模试验系统软件开发[J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20(2): 110-115.
- CAI Chuang. The development of JG II-V3.0 general software in Three Gorge pivot ship model experiment[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2001, 20(2): 110-115.

(编辑 张小强)