



## 弯曲航道船舶操纵运动数值模拟

林江<sup>1</sup>, 董炳江<sup>2</sup>, 李俊<sup>3</sup>

(1.重庆交通大学西南水运工程科学研究所, 重庆 400016;

2.长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010;

3.长江上游水文水资源勘测局, 重庆 400014)

**摘要:** 弯曲航道是内河航道中较常见的形式之一, 由于弯曲航道水流条件复杂, 导致船舶操作难度较大, 为了改善通航条件, 需要对弯曲航道进行整治。结合弯道三维水流数学模型和船舶操纵运动数学模型, 应用于湖南益阳至芦林潭航道整治工程的通航论证中, 通过模拟计算结果来评价弯曲航道的通航条件, 为弯道整治工程提供科学依据和科学指导。

**关键词:** 弯曲航道; 船舶操纵; 数学模型; 通航论证

中图分类号: U 661

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0040-06

### Numerical simulation of ship maneuvering motion in bending channel

LIN Jiang<sup>1</sup>, DONG Bing-jiang<sup>2</sup>, LI Jun<sup>3</sup>

(1. Southwest Hydraulic Engineering and Science Research Institute for Waterways, Chongqing Jiaotong University,

Chongqing 400016, China; 2. Hydrology Bureau of Yangtze River Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;

3. Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of the Upper Yangtze River, Chongqing 400014, China)

**Abstract:** Bending channel is common in inland waterways. Due to the complex flow conditions, which increased the difficulty of ship maneuvering, we need to regulate the bending channel to improve the navigation conditions. The bending channel's 3D flow model and ship maneuvering motion numerical mode are jointly used in Yiyang to Lulintan waterway project to evaluate navigation conditions based on the simulation results, which provide a scientific basis and guidance for the regulation project of bending channel.

**Key words:** bending channel; ship maneuvering; numerical model; navigation safety evaluation

内河航运因其特点和优势成为我国综合运输体系中的重要运输方式之一, 在我国交通运输体系中有举足轻重的作用。常见的内河航道为弯曲河道, 河道弯曲不一, 且有时非常狭窄, 有些地方弯弯相连, 构成复杂的连续弯道, 增加了船舶操作的难度。为了改善通航条件、提升航道等级, 需要对弯曲航道进行整治。一般弯曲航道整治尺寸的确定都需要做大量的工作, 如流速和流向测量、船模试验、实船试验以及必要的对比分析, 不能单凭公式计算确定。而采用船舶操

纵运动数学模型对船舶运动轨迹进行模拟计算, 是研究船舶是否能在弯曲航道或者连续弯曲航道安全通航的一种快捷而又经济的方法和手段。目前, 船舶操纵运动数学模型有两类, 一类是以Abkouwitz<sup>[1]</sup>为代表的整体性模型, 一类是以日本操纵性数学模型小组为代表的MMG分离型数学模型。由于MMG模型中各项有明确的物理意义, 可以比较简单合理地表达出作用在船体上的流体动力和螺旋桨、舵的作用以及船、桨、舵之间的互相干扰, 得到了广泛应用。

收稿日期: 2012-03-15

作者简介: 林江(1983—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事水力学及河流动力学研究。

本文主要是应用基于MMG的船舶操作运动数学模型结合三维水流数学模型来研究弯曲航道的通航条件。河道水流情况是模拟船舶航行的基础,本文利用弯道准三维水流数学模型计算得到弯曲航道的水流情况,再结合船舶操纵运动数学模型进行弯曲航道船舶操纵运动轨迹的模拟计算,通过模拟计算结果评价弯曲航道的通航条件,为弯道整治工程提供科学依据和科学指导。

## 1 船舶操纵运动数学模型

### 1.1 操纵运动方程

忽略对船舶水平面内运动影响较小的垂荡、纵摇和横摇运动,即考虑首摇、纵荡和横荡三自由度时船舶操纵运动方程可表达如下:

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr) = X \\ m(\dot{v} + ur) = Y \\ I_z \dot{r} = N - Yx_c \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u$ ,  $v$ ,  $r$ 为船舶相对水的 $x$ ,  $y$ 方向的速度分量和首摇角速度;  $m$ 为船舶质量;  $I_z$ 为船舶绕 $z$ 轴的惯性矩;  $x_c$ 为船舶中心坐标值。根据MMG原理<sup>[2-5]</sup>:  $X$ ,  $Y$ ,  $N$ 包含了船体黏性力、惯性力、螺旋桨力、舵力,还包括螺旋桨、舵、船体之间相互干涉产生的流体动力和力矩,将惯性力以附加质量和附加惯性矩的形式放到方程的左边,方程(1)也可写为:

$$\begin{cases} (m + m_x)(\dot{u} - vr) = X_H + X_P + X_R + X_{WD} + X_{WV} + X_C \\ (m + m_y)(\dot{v} + ur) = Y_H + Y_P + Y_R + Y_{WD} + Y_{WV} + Y_C \\ (I_z + J_z)\dot{r} = N_H + N_P + N_R - Y_H x_c + N_{WD} + N_{WV} + N_C \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $m_x$ ,  $m_y$ ,  $J_z$ 为船体的附加质量和附加惯性矩,按元良诚三图谱采用回归公式计算<sup>[6]</sup>;下标 $WD$ ,  $WV$ ,  $C$ 分别表示风、波浪、和水流的作用力和力矩;下标 $P$ 和 $R$ 分别表示螺旋桨和舵产生的力或力矩;  $X_H$ ,  $Y_H$ ,  $N_H$ 为不包括惯性力在内的船体水动力。

### 1.2 水动力的计算

根据MMG模型,作用在船体上的水动力可以表示为:

$$\begin{cases} X_H = X_{uu}u^2 + X_{vv}v^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 \\ Y_H = Y_vv + Y_r r + Y_{vv}|v| + Y_{rr}|r| + (Y_{vvr}v + Y_{vrr}r)vr \\ N_H = N_vv + N_r r + N_{vv}|v| + N_{rr}|r| + \\ (N_{vvr}v + N_{vrr}r)vr \end{cases} \quad (3)$$

为便于将船模试验数据直接应用于原型,按照相似理论将 $X_H$ ,  $Y_H$ ,  $N_H$ 转化为无量纲的流体动力导数,并把 $Y_H$ 和 $N_H$ 表达式中的变量 $v$ ,  $r$ 换成漂角 $\beta$ 和 $r$ ,则所得结果如下式所示:

$$\begin{cases} X'_H = X'_{uu}u'^2 + X'_{vv}v'^2 + X'_{vr}vr' + X'_{rr}r'^2 \\ Y'_H = Y'_{\beta\beta}\beta + Y'_r r' + Y'_{\beta\beta}|\beta| + Y'_{rr}|r'| + \\ (Y'_{\beta\beta r}\beta + Y'_{\beta r r}r')\beta r' \\ N'_H = N'_{\beta\beta}\beta + N'_r r' + N'_{\beta\beta}|\beta| + N'_{rr}|r'| + \\ (N'_{\beta\beta r}\beta + N'_{\beta r r}r')\beta r' \end{cases} \quad (4)$$

上述表达式中上标“'”表示无量纲量,  $r' = rL/U$ 为无量纲角速度。  $X'_{uu}$ 为船舶直航阻力系数,  $X'_{vv}$ ,  $X'_{rr}$ ,  $X'_{vr}$ 为纵向速度导数,  $Y'_v$ ,  $Y'_r$ ,  $N'_v$ ,  $N'_r$ 为线形横向速度导数,  $Y'_{\beta\beta}$ ,  $Y'_{\beta r}$ ,  $Y'_{rr}$ ,  $Y'_{\beta\beta r}$ ,  $Y'_{r\beta\beta}$ 为非线性横向速度导数。

### 1.3 螺旋桨作用力的模拟

考虑螺旋桨工作在第一象限工况时的情况,船舶向前行驶( $n > 0$ ,  $u > 0$ )。同时由于螺旋桨的横向力和力矩的数值相对于船体横向力(矩)和舵的横向力(矩)是一个小量,MMG模型将 $Y_p$ 和 $N_p$ 归在裸船体流体动力模型中。则螺旋桨上的流体动力和力矩模型为:

$$\begin{cases} X_p = (1 - t_p)T \\ T = \rho n^2 D_p^4 K_t(J_p) \\ Y_p = 0 \\ N_p = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $t_p$ 为螺旋桨推力减额系数;  $D_p$ 为桨直径;  $n$ 为螺旋桨转速;  $T$ 为桨推力;  $K_t$ 为由螺旋桨敞水特征曲线决定的推力系数,  $J_p$ 为进速系数。

### 1.4 舵作用力的模拟

根据MMG模型,舵所产生的力和力矩为:

$$\begin{cases} X_R = -(1 - t_R)F_N \sin\delta \\ Y_R = -(1 - a_H)F_N \cos\delta \\ N_R = -(x_r + a_H x_H)F_N \cos\delta \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\delta$ 为舵角;  $t_R$ 为舵力减额系数;  $a_H$ 为操舵引

起船体水动力的增额系数； $x_R$ 为舵力作用的中心坐标； $x_H$ 为操舵引起船体增额水动力作用中心坐标。

### 1.5 三维水流作用

弯曲河段岸线曲折、地形复杂，引起弯道环流，水流具有明显的三维特性。本文采用三维水流数学模型结合船舶操作运动数学模型的方法来研究弯曲航道的通航条件，三维水流数学模型的控制方程及具体离散方法详见参考文献[7]。

由于在弯道或其他一些三维水流特征较明显的水域，垂线平均流速和表层流速相差较大，因此不能简单地把垂线平均流速作为水流对船体作用力处理。如图1所示，较合理的处理方法应该用有效流速区的垂线平均流速作为水流对船体的作用力，有效流速用下式求解：

$$U_c = \frac{1}{d} \int_{h-d}^h v dz \quad (7)$$

式中： $v$ 为流速沿垂线的分布； $h$ 为水深； $d$ 为船舶的吃水深。



图1 有效流速区

### 1.6 操纵离线模拟

本文采用了船舶操纵运动的离线模拟方法，建立了船舶操纵的自动舵系统[7]。

#### 1) 舵机方程。

舵机特性通常用下列模型来表示：

$$T_E \dot{\delta} = \delta_E - \delta \quad (8)$$

式中： $\delta_E$ 为指令舵角； $\delta$ 为实际舵角； $T_E$ 为舵机时间常数，一般取2.5 s；此外 $|\delta| \leq 35^\circ$ ， $|\dot{\delta}| \leq 3^\circ/\text{s}$ （双舵机）， $|\dot{\delta}| \leq 1.5^\circ/\text{s}$ （单舵机）是舵机实际受限的条件。

#### 2) 实际舵角求解。

在实际船舶航行操纵过程中，除了操舵改变舵角外，船舶还有可能改变螺旋桨转速，为了简化起见，本文所建立的自动舵模型只对舵角进行操纵，不自动改变螺旋桨转速，其主要功能为实

现船舶在螺旋桨转速一定时，船舶尽可能沿预定航道行驶。当需要模拟船舶的船速改变条件时，可采用人为设定的方法进行。

船舶在航行时，应该遵循使航迹尽可能沿设计航道行驶的原则，因此，自动舵的航线保持模式可采用以下形式[8]：

$$\delta_E = \gamma(\psi - \psi_a^T) + \sigma \dot{\psi} + kd \quad (9)$$

式中： $\delta_E$ 为指令舵角； $\psi_a^T$ 为理想航线上前方距离为 $a$ 处船舶首向角； $\dot{\psi}$ 为船舶转速； $d$ 为船舶偏离航线的距离。在舵角变化时， $k+1$ 时刻的实际舵角根据舵机特性方程式求出 $\delta$ 后进行设置：

$$\delta_{k+1} = \delta_k + \dot{\delta} \Delta t \quad (10)$$

上述方法在一定程度上模拟了人为操舵过程，较好地解决了船舶操纵运动数学模型的操纵离线模拟。

### 1.7 方程求解

船舶操纵运动方程是具有—阶导数的常微分方程组，用一般的解析求解非常困难，所以必须要用数值解法，本文采用四阶龙格-库塔方法来实现，即是以描述船舶运动的参量 $u$ ， $v$ ， $r$ ， $\delta$ 为输出的一阶常微分方程组：

$$\begin{cases} (m + m_x) \dot{u} = (m + m_y) vr + (m_x - m_y) U_c r \sin(\theta_c - \psi) + \tilde{X}_H + \tilde{X}_P + \tilde{X}_R + X_{WD} + X_{WV} \\ (m + m_y) \dot{v} = -(m + m_x) ur + (m_x - m_y) U_c r \cos(\theta_c - \psi) + \tilde{Y}_H + \tilde{Y}_R + Y_{WD} + Y_{WV} \\ (I_z + J_z) \dot{r} = -x_c \tilde{Y}_H + \tilde{N}_H + \tilde{N}_R + N_{WD} + N_{WV} \\ T_E \dot{\delta} = \delta_E - \delta \end{cases} \quad (11)$$

初始条件是：

$$\begin{cases} u = u_0 \\ v = v_0 \\ r = r_0 \\ \delta = \delta_0 \end{cases} \quad (12)$$

## 2 模型应用

### 2.1 工程概况

洞庭湖区益阳至芦林潭航运建设工程，上起资水桃江县，经益阳、甘溪港、毛角口、临资口，下至芦林潭及濠河口。其中毛角口至临资口

有25个弯道,由于航宽和弯曲半径不足,河段多处出现弯曲半径过小、转弯过急、中心转角过大和连续弯道,中间没有合适的过渡段,给航行造

成较大的影响,特别是油麻潭和焦潭湾及附近的多个连续弯道碍航较为严重,与Ⅲ级航道还存在一定的差距,需进行航道整治来改善通航条件。

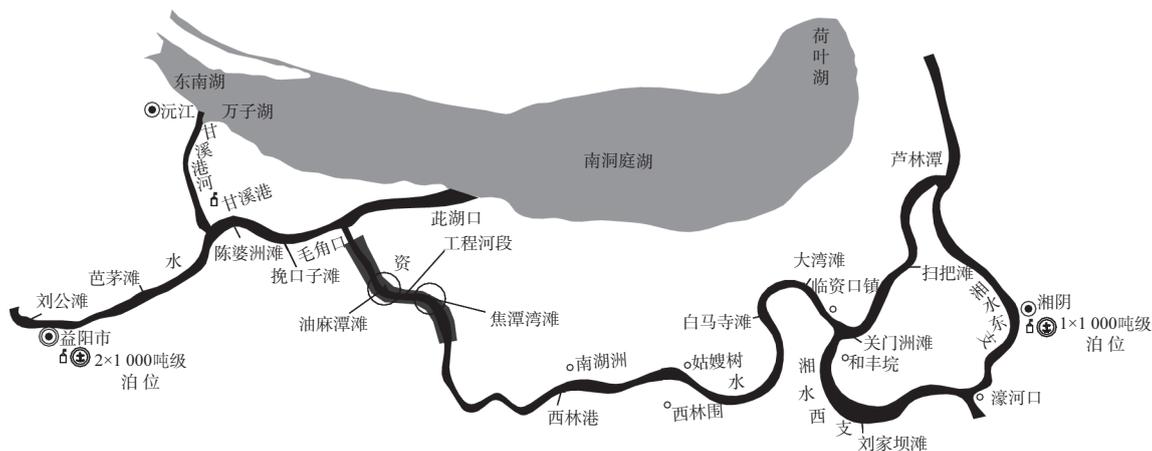


图2 洞庭湖区益阳至芦林潭航道

现状情况下,油麻潭滩为一弯顶处的突然扩宽段,转弯半径仅300 m,枯水河宽在80 m左右,堤距在120~360 m,水深大多达到3~5 m,最小水深1.8 m。焦潭湾滩受两岸大堤的控制,河道急剧右转,最小转弯半径仅220 m,枯水河宽在80~120 m,堤距在140~200 m,水深大多达到3~4 m,最小水深1.8 m。综合考虑航运、防洪护岸、取水、环境保护等多方面的要求,分别对油麻潭和焦潭湾采取了切嘴和内裁整治措施,如图3和4。本文采用上述模型对油麻潭和焦潭湾整治工程实施后进行船舶操纵运动数值模拟。

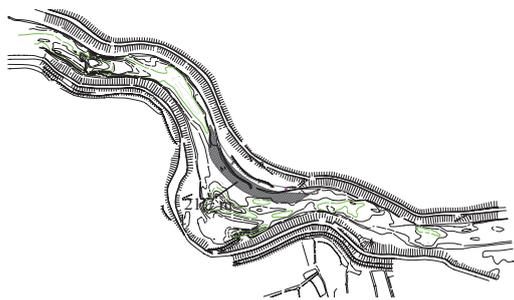


图3 油麻潭方案

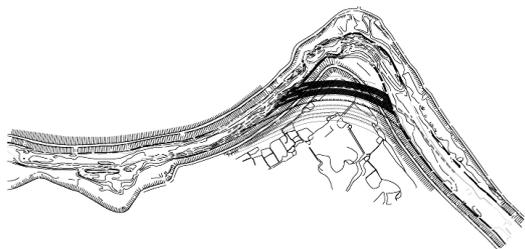


图4 焦潭湾方案

## 2.2 模型率定

### 2.2.1 水流数学模型率定

采用2008年4月工程河段实测资料(进口流量 $Q=485 \text{ m}^3/\text{s}$ )对三维水流数学模型进行率定;并采用2008年6月工程河段实测资料(进口流量 $Q=1096 \text{ m}^3/\text{s}$ )对模型进行验证。经率定,计算河段河道糙率变化范围为0.020~0.030,滩地糙率变化范围为0.025~0.035。表1为测流断面水位实测值与计算值对比结果。由表1可见,各级流量下水位计算值与实测值间的误差在-0.02~0.02 m,率定得到的本河段糙率基本合理。

图5和图6分别为模型计算得到的油麻潭和焦潭湾在 $Q=1096 \text{ m}^3/\text{s}$ 情况下表层与底层流场分布对比。由图可知:两河段底表层水流呈现出明显的弯道水流特性,在弯道上下游顺直段底表层流方向基本趋于一致,在弯道段则底流方向指向凸岸,表流方向偏向凹岸,可见本文三维水流数学模型能很好地模拟实际河段的弯道水流情况,结果较为合理。

### 2.2.2 船舶操纵运动数学模型率定

工程河段规划航道等级为Ⅲ级航道,本文选用1000吨级机动货船作为代表性船舶进行论证。为了能基本上控制住货船的操纵性,本文进行了 $\pm 10^\circ$ Z形试验的模拟计算,并将结果无因次化与相应的实测数据作了比较,见表2。

表1 测流断面水位实测值与计算值结果

岸别	水尺编号	测次1 $Q=485 \text{ m}^3/\text{s}$ (率定)			测次2 $Q=1\,096 \text{ m}^3/\text{s}$ (验证)		
		实测/m	计算/m	误差/m	实测/m	计算/m	误差/m
左岸	V3	26.783	26.791	0.008	31.341	31.348	0.007
	V4	26.699	26.705	0.006	31.214	31.217	0.003
	V5	26.630	26.638	0.008	31.092	31.107	0.015
	V6	26.604	26.610	0.006	31.080	31.092	0.012
右岸	V3	26.803	26.794	-0.009	31.354	31.342	-0.012
	V4	26.693	26.687	-0.006	31.205	31.213	0.008
	V5	26.628	26.635	0.007	31.100	31.115	0.015
	V6	26.603	26.617	0.014	31.075	31.062	-0.013
	Q3	26.571	26.559	-0.012	31.029	31.014	-0.015

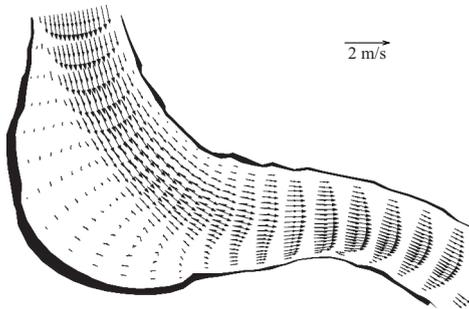


图5 油麻潭表层与底层流场分布对比

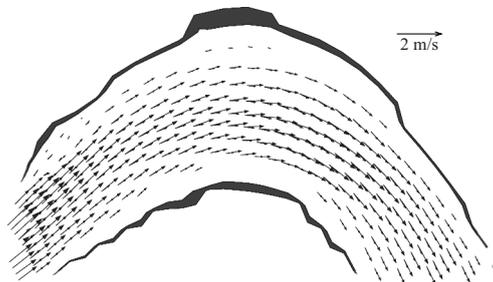


图6 焦潭湾表层与底层流场分布对比

表2 1 000 t机动货船实测值与计算值比较

数值	$K'$		$T'$		$P=(K'/T')/2$		试验航速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
	数值	误差/%	数值	误差/%	数值	误差/%	
实测值	1.895		0.586		1.617		4.5
计算值	1.642	-13.35	0.613	4.61	1.339	-17.19	

船舶操纵性指数 $K$ 和 $T$ 是描述船舶操纵性能的重要指标<sup>[9]</sup>，从表2中可知：回转指数 $K'$ 误差为-13.35%，航向稳定性指数 $T'$ 误差为4.61%，即模型与实船比较在机动操纵时模型的舵效偏差，两项性能表明本文的模型中的船舶操纵性能与实船相似，且稍劣于实船，符合试验结果略偏安全的要求。

## 2.3 计算方案及结果分析

### 2.3.1 计算方案

根据工程河段实际航行以及兼顾枯水和洪水的需要，本论文只针对航道工程后3个流量级下的1 000吨级船舶上行和下行进行了模拟计算。表3列出了模拟计算的水流条件。

表3 模拟计算的水流条件

流量级方案	进口流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	出口水位/m	说明
1	240	25.41	枯水
2	485	26.52	中水
3	1 096	30.92	洪水

### 2.3.2 计算结果分析

#### 1) 油麻潭。

表4为油麻潭滩整治后，船队上行和船队下行3个流量级下的试验结果。

船队上行：在试验的3个流量级中，船舶的最大舵角均介于 $18^\circ \sim 22^\circ$ ，尚小于试验最大舵角

表4 油麻潭整治船模航行试验结果

航向	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	最大舵角/ $(^\circ)$	最大漂角/ $(^\circ)$	最小航速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	平均对岸航速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
上行	240	18.37	19.76	1.95	2.56
	485	20.20	18.82	1.72	2.28
	1 096	21.78	18.35	1.68	2.14
下行	240	31.96	23.05	2.16	2.98
	485	32.50	24.10	2.24	3.12
	1 096	33.14	25.09	2.31	3.32

限值(25°),最小航速分别为1.95 m/s, 2.28 m/s和1.07 m/s,大于试验最小航速限值(0.4 m/s),需要谨慎驾驶,船队可以自航上行通过工程后的油麻潭险滩航段。

船队下行:在试验的3个流量级中,船舶的最大舵角分别为31.96°, 32.50°和33.14°,大于试验最大舵角限值(25°),由于本文是使用自动舵系统,能够在考虑复杂环境影响时智能地进行操舵,若是人工操作将较难通过油麻潭航段。

航行试验结果表明,由于该滩段上下共有3个连续弯道,船舶上下行的难度原本很大,由于其他两个弯道未作处理,致使船舶在连续过弯时仍有困难。特别是船舶下行,在保持静水航速3.5 m/s的情况下,操舵都大于舵角的安全限值。

#### 2) 焦潭湾。

表5为焦潭湾裁湾整治后,船队上行和船队下行3个流量级下的试验结果。

表5 焦潭湾整治船模航行试验结果

航向	流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	最大舵角/ (°)	最大漂角/ (°)	最小航速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	平均对岸航速/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
上行	240	11.72	14.11	2.93	3.49
	485	10.62	12.77	2.64	3.38
	1 096	10.74	12.06	2.51	3.12
下行	240	10.98	13.90	2.73	3.30
	485	10.42	14.04	2.55	3.54
	1 096	10.25	14.31	2.37	3.76

船舶上行:在试验的3个流量级下,最大舵角未超过12°,船舶可以自航上行通过工程后的焦潭湾滩段。

船舶下行:在试验的3个流量级下,最大舵角未超过11°,船舶可以自航下行通过工程后的焦潭湾滩段。

焦潭湾原是急湾,原河道的弯曲半径过小,经工程裁湾整治后,弯道的弯曲半径增加为500 m,航道宽度为80 m。在3个流量级下试验航行(上行和下行),最大的漂角为15°,转换成单行的航迹带宽度为32 m,足够长为85 m且宽为10.5 m的1 000吨级机动货船自航通过。

### 3 结论

本文结合弯道三维水流数学模型和船舶操纵运动数学模型,应用于湖南益阳至芦林潭航道整治工程的通航论证中。得到如下主要结论:

1) 应用船舶操纵运动数学模型在航道三维水流数据的基础上,对工程河段枯水、中水和洪水情况进行航行模拟计算。计算结果表明:油麻潭由于是3个连续的弯道,操纵难度相对比较大,此河段由于其他两个弯道未作处理,船舶在连续过弯时仍有困难;焦潭湾经工程裁湾整治后,弯道的弯曲半径增加为500 m,航道宽度为80 m,此河段工程后船舶能自航安全通过。

2) 论述弯曲航道尺度的确定都需要做大量的工作,如流速、流向测量,船模试验,实船试验以及必要的对比分析。采用船舶操纵运动数学模型对船舶运动轨迹进行模拟计算,是研究船舶是否能在弯曲航道或者连续弯曲航道安全通航的一种快捷而又经济的方法,具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] Abkowitz M A. Lectures on ship hydrodynamics—steering and maneuverability[R]. Denmark: W Hydroand Aerodynamics Laboratory, 1964.
- [2] 小川宏阳,小山健夫,贵岛胜朗. MMG报告-I [R]. 东京:日本造船协会志, 1977:575.
- [3] 小川宏阳,小山健夫,贵岛胜朗. MMG报告-II [R]. 东京:日本造船协会志, 1977:577.
- [4] 小川宏阳,小山健夫,贵岛胜朗. MMG报告-III [R]. 东京:日本造船协会志, 1977:578.
- [5] 小川宏阳,小山健夫,贵岛胜朗. MMG报告-IV [R]. 东京:日本造船协会志, 1980:579.
- [6] 周昭明,盛子寅,冯悟时. 多用途货船的操纵性预报计算[J]. 船舶工程, 1983 (6): 21-29.
- [7] 崔占峰,张小峰. 三维紊流模型在丁坝中的应用[J]. 武汉大学学报:工学版, 2006(1):15-20.
- [8] 张庆河,李炎保,韩涛. 考虑外环境影响的船舶操纵模拟自动舵系统[J]. 中国造船, 2001(3): 34-38.
- [9] 曹国富,李志. 利用K、T指数评价船舶的操纵性能[J]. 天津航海, 1995 (2): 8-10.

(本文编辑 武亚庆)