



# 构皮滩通航建筑物中间渠道船舶 航行特性试验研究

王小威<sup>1</sup>, 李中华<sup>2</sup>, 李昌钊<sup>3</sup>, 宋金育<sup>3</sup>, 马要坡<sup>3</sup>

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;  
3. 贵州乌江水电开发有限责任公司, 贵州 遵义 564400)

**摘要:** 中间渠道船舶航行特性与通航建筑物通航效率和船舶航行安全息息相关。利用牵引船模缩尺试验, 研究构皮滩水电站通航建筑物中间渠道内船舶上下行过程中的航行特性, 分析了不同航速下船舶的升沉特性, 基于试验结果拟合了船舶在中间渠道内最大下沉量与航速、渠道水下面积、船舶舯断面水面以下部分面积以及初始水深的关系, 建立了可准确预测船舶最大下沉量的无量纲公式。研究结果表明: 1) 相同航速下, 船舶出船厢下沉量远大于进厢, 船舶出厢过程是船舶下沉量的控制工况; 2) 中间渠道断面系数小于 3.0 时, 断面系数变化对船舶下沉量影响较为明显, 且断面系数越小对船舶下沉量影响越显著; 中间渠道断面系数大于 4.0 后, 断面系数增大对船舶下沉量的影响迅速减小。

**关键词:** 通航建筑物; 中间渠道; 船舶; 下沉量; 航行安全

中图分类号: U643

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0125-08

## Navigation characteristics of ships in middle channel of Gouptan navigation buildings

WANG Xiaowei<sup>1</sup>, LI Zhonghua<sup>2</sup>, LI Changzhao<sup>3</sup>, SONG Jinyu<sup>3</sup>, MA Yaopo<sup>3</sup>

(1. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China;  
2. Nanjing Hydralic Research Institute, Nanjing 210029, China;  
3. Guizhou Wujiang Hydropower Development Co., Ltd., Zunyi 564400, China)

**Abstract:** The navigation characteristics of ships in intermediate channels are closely related to the navigation efficiency of navigable buildings and the safety of ship navigation. A scale test of tugboat model is used to study the navigation characteristics of the ship in the middle channel of the navigable building of the Gouptan Hydropower Station, and the sinking amount characteristics of the ship under different sailing speeds are analyzed. The relationship between the maximum sinking amount of the ship in the intermediate channel and the sailing speed, underwater area of channel, area below the water surface of midship section of ship and initial water depth is established, and a dimensionless formula that can accurately predict the maximum sinking amount of the ship is established. The research results show that: 1) Under the same speed, the sinking amount of the ship out of the cabin is much larger than that of the entering cabin, and the ship's exit process is the control condition of the ship's sinking amount. 2) When the section coefficient of the intermediate channel is less than 3.0, the change in section coefficient has a more significant impact on the sinking amount of ships, and the smaller the section coefficient, the more significant the impact on the sinking volume of ships; when the section coefficient of the intermediate channel is greater than 4.0, the influence of the increase of the section coefficient on the sinking volume of the ship decreases rapidly.

**Keywords:** navigation building; intermediate channel; ship; sinking amount; navigation safety

收稿日期: 2022-10-02

作者简介: 王小威 (1991—), 男, 博士, 工程师, 从事大型通航建筑物设计和科研工作。

构皮滩枢纽通航建筑物最大通航水头 199 m, 上游通航水位变幅 45 m, 选用三级垂直升船机方案, 第一、三级垂直升船机采用下水式, 各级升船机间通过通航隧洞和渡槽相连接, 总长 2 181 m(图 1), 升船机按Ⅳ级航道、500 吨级船型标准建设, 是目前世界上通航水头最高、水位变幅最大的通航建筑物。



图 1 构皮滩水电站通航建筑物

构皮滩升船机第一级中间渠道长 980 m, 宽 12~38 m, 设计水深 3.0 m, 由通航隧洞、渡槽等组成一个封闭的狭长水域(图 2)。在此特殊限制性渠道中, 如何确定船舶安全航行标准, 包括安全行驶、会让速度和方式、船行波浪等, 以确保船舶航行安全, 是工程设计和运行管理关心的问题。我国 GB 50139—2014《内河通航标准》规定了限制性航道和船闸尺度, 但特殊限制性航道包括通航隧洞和渡槽的断面尺度尚无标准可依<sup>[1]</sup>。中间渠道可视为两端封闭的限制性航道<sup>[2]</sup>, 部分学者<sup>[3-11]</sup>对中间渠道的水流条件和船舶航行特性进行了大量有益的研究, 其成果有助于对中间渠道水流条件产生更深刻的认识。在实际工程中, 船舶在特殊限制性航道内的航行是多场耦合的过程, 且受大量边界条件的限制, 数值模拟的方法只适用于简化的工况, 为了更真实、直观地反映船舶航行特性, 物理模型试验是较为通用的方法。本文以乌江构皮滩水电站通航建筑物中间渠道为研究对象, 采用自航船模试验方法, 分析了船舶在中间渠道内的航行特性, 建立了船舶在构皮滩第一级中间渠道内航行时最大下沉量  $\delta$  与船厢水深  $H$ 、船舶航速  $v$  及船厢断面系数  $n$  之间的无量纲计算公式, 准确预测中间渠道内船舶的最大下沉

量, 研究成果可为中间渠道的研究和设计提供参考。



图 2 构皮滩水电站通航建筑物中间渠道布置

## 1 模型设计和试验方法

### 1.1 模型设计

船舶进、出船厢船模试验一般按重力相似准则进行设计, 构皮滩升船机第一级中间渠道水流条件及船舶航行试验选择模型比尺为 1:16(图 3,4)。



图 3 中间渠道试验模型



图 4 500 吨级船舶模型

各物理量的比尺与几何比尺的关系为: 时间比尺:  $\lambda_t = \lambda_L^{1/2} = 4$ ; 速度比尺:  $\lambda_v = \lambda_L^{1/2} = 4$ ; 力的比尺:  $\lambda_F = \lambda_L^3 = 4 096$ ; 体积比尺:  $\lambda_W = \lambda_L^3 = 4 096$ 。

根据以上比尺关系, 试验用承船厢尺寸为  $3.69\text{ m} \times 0.73\text{ m} \times 0.16\text{ m}$ (长×宽×水深), 船模尺寸为  $3.44\text{ m} \times 0.66\text{ m} \times 0.10\text{ m}$ (长×宽×吃水)。

## 1.2 试验方法

船舶在船厢、中间渠道限制性航道内航行时, 一般采用牵引系统拖曳船模方式进行, 即在模型航线的上方设置导向装置, 通过固定的牵引设施, 拖曳船舶按设定的速度和航线航行, 保证船模在渠道及船厢中航行时航速恒定且不偏离航线和碰壁, 模型牵引系统, 见图 5。船首、船尾的升沉量用超声波位移计测量, 船边流速采用三维 ADV(超声多普勒流速仪)进行测量, 船模阻力采用自行研

制的全桥式应力环拉力仪测量。此外, 在中间渠道及承船厢内共布置 16 个波高仪, 波高仪布置见图 6。

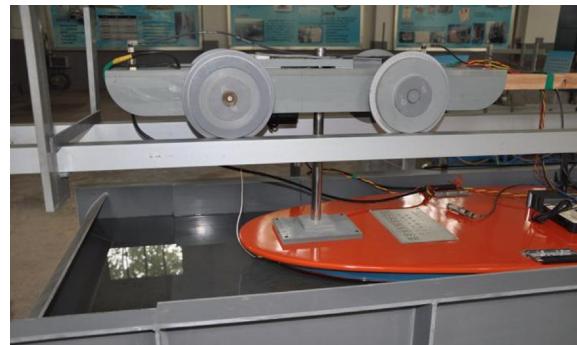


图 5 船模牵引系统

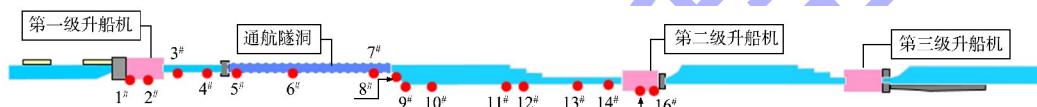


图 6 波高仪测点布置

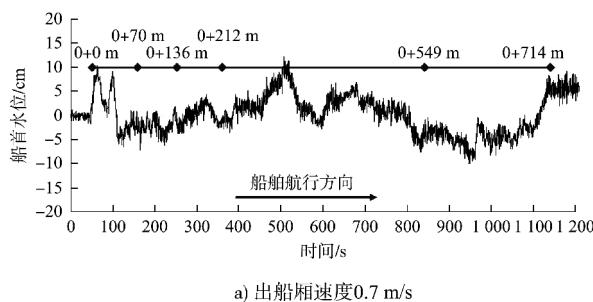
## 1.3 试验工况

主要针对 500 t 设计船舶, 分别以 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8 和 2.0 m/s 等 11 种航速在第一级中间渠道内航行, 进出第一、二级升船机船厢进行试验研究。

## 2 船舶航行特性试验结果

### 2.1 船舶出船厢过程中升沉特性

500 t 船舶出第一级升船机船厢( $1^{\#}$ 船厢), 以  $0.4\sim2.0\text{ m/s}$  速度通过  $1^{\#}$  渡槽、 $1^{\#}$  明渠、通航隧洞进入船舶交汇区时, 船首、船尾典型水位变化见图 7、8, 船舶最大下沉量与船舶航速关系见图 9。



a) 出船厢速度  $0.7\text{ m/s}$

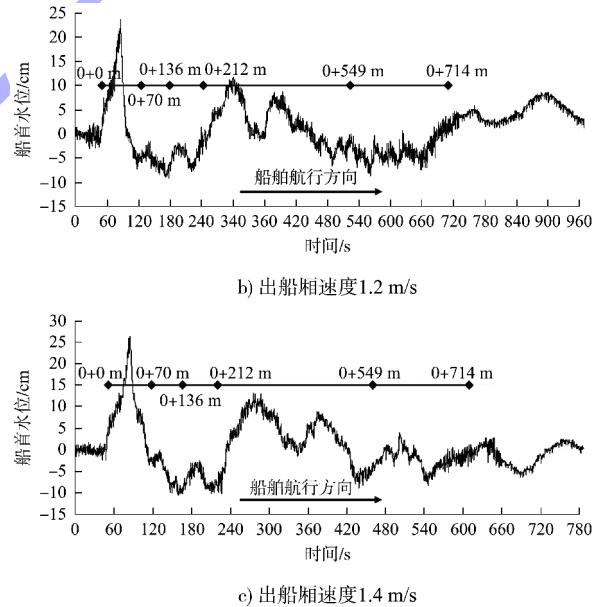
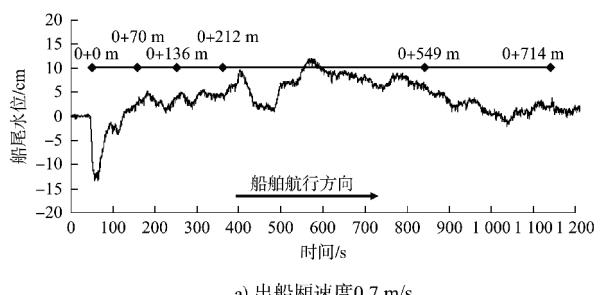
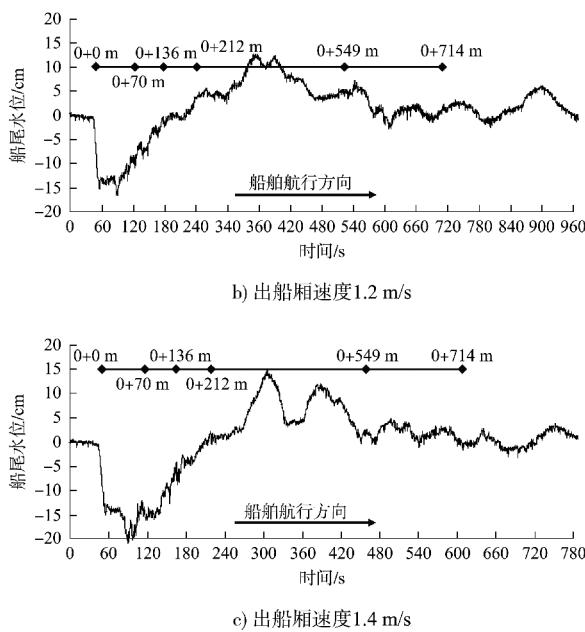
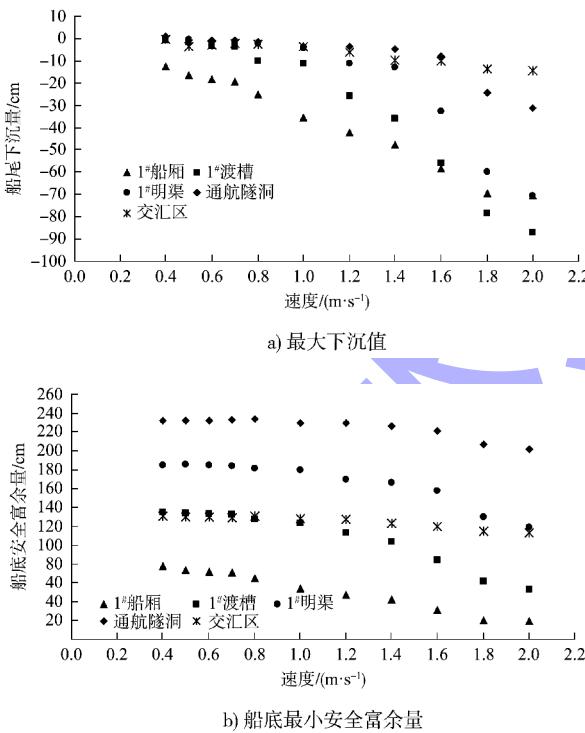


图 7 船舶出  $1^{\#}$  船厢船首水面变化



a) 出船厢速度  $0.7\text{ m/s}$

图 8 船舶出 1<sup>#</sup>船厢船尾水面变化图 9 船舶出 1<sup>#</sup>船厢速度与最大下沉量关系曲线

船舶从第一级升船机船厢进入中间渠道交汇区时,由于船舶后方为封闭水域,船舶出厢推出的水体不能迅速补充,船舶后方渠道内的水位下降,引起船舶下沉。由图 9 可见,船舶出厢过程,船舶最大下沉量随航速增大而增大。

根据水口试验资料,水口升船机船舶以 0.5 m/s 速度出厢,实测船舶底部水深富余量为 72.0 cm,

思林升船机以 0.7 m/s 航速出厢,模型实测的船底水深富余量为 63.7 cm,而构皮滩升船机船舶以 0.5 和 0.7 m/s 出船厢,船舶最大下沉量分别为 17.7 和 22.7 cm,船底水深富余量分别为 72.3 和 67.3 cm 与水口、思林升船机实测值基本接近。

在 1<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 渡槽(水深 3.0 m、渠道宽 12.6 m)内,船舶航速小于 0.8 m/s 时,船速对船舶下沉量影响较小,最大下沉量不足 10 cm;船速超过 1.0 m/s 时,最大下沉量随船速迅速增大,船舶以 1.2、1.4、1.6、2.0 m/s 航速通过 1<sup>#</sup> 渡槽时,对应的船舶最大下沉量分别为 26.0、35.8、55.9 和 87.1 cm;通过 3<sup>#</sup> 渡槽时对应的最大下沉量分别为 25.7、35.6、44.7 和 76.7 cm;因此船舶出船厢进入交汇区航速小于等于 1.4 m/s 时,在 1<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 渡槽的船舶下沉量基本相同(最大约 35.8 cm),船底安全富余水深量大于 1.0 m;在通航隧洞(水深 4.0 m、宽 16.0 m)内航速小于 1.4 m/s 时,船舶航速对其最大下沉量影响较小,实测最大下沉量仅为 4.2 cm;航速 1.6 m/s 时,最大下沉量 8.6 cm;船舶航速超过 1.8 m/s 后,船舶下沉量增大;航行速度 2.0 m/s 时,船舶最大下沉量也仅为 38.1 cm,船舶底部尚有 2.02 m 的安全富余水深。因此在通航隧洞内,断面尺寸对船舶沉降量的影响已明显减小;在交汇区(水深 3.0 m、渠道宽 37.0~38.4 m)内,由于渠道断面系数较大,船舶对航速的阻塞效应明显减小,船舶以 2.0 m/s 航速出 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 船厢进入交汇区,在交汇区船舶的最大下沉量也仅有 26.7、28.4 cm,船舶底部尚有 1.12 cm 的安全富余水深。因此在相同航速下,船舶出厢进入交汇区时,船舶在中间渠道不同位置最大下沉量差异较大。

由图 10 可见,中间渠道断面系数小于 3 时,断面系数变化对船舶下沉量影响较为明显,且断面系数越小对船舶下沉量影响越显著。航速 0.8 m/s,断面系数 1.91(船厢)、2.41(1<sup>#</sup> 渡槽)、2.81(1<sup>#</sup> 明渠)对应的船舶下沉量分别为 29.9、12.1、8.7 cm;船速 1.2 m/s,对应的船舶下沉量分别为 51.8、26.7、20.3 cm;船速 1.6 m/s,断面系数由 1.91 增大到 2.81,船舶最大下沉量则由 67.9 cm

迅速下降到 32.5 cm。中间渠道断面系数大于 4.0 后, 断面系数增大对船舶下沉量的影响迅速减小, 船速 2.0 m/s, 断面系数由 4.08 增大到 7.08, 最大下沉量也仅由 38.1 cm 下降到 28.4 cm; 船速小于 1.6 m/s 时, 断面系数由 4.08 增大到 7.08, 二者最大下沉量基本相同, 因此出船厢进入中间渠道交汇区, 中间渠道断面系数大于 4.0, 可基本忽略渠道断面尺寸对船舶下沉量的影响。

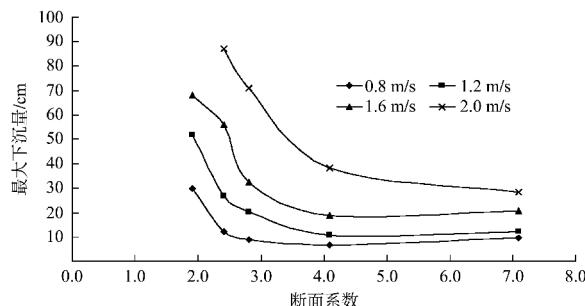
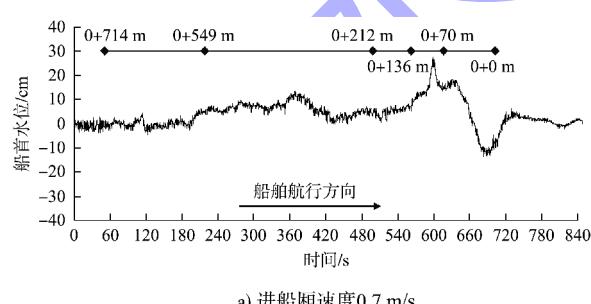


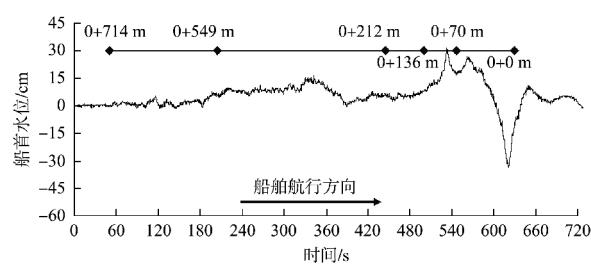
图 10 中间渠道断面系数与船舶下沉量关系

## 2.2 船舶进船厢过程中升沉特性

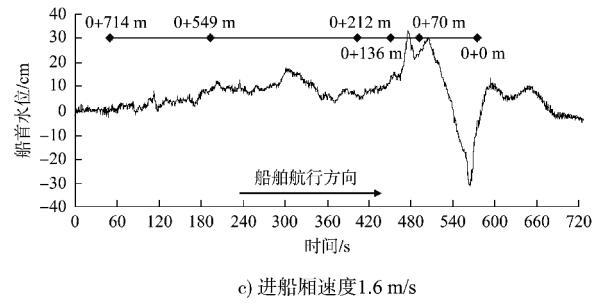
500 t 船舶由第一级中间渠道交汇区, 以 0.4~2.0 m/s 速度通过通航隧洞、1#明渠和 1#渡槽进入第一级升船机船厢(1#船厢), 该过程船首、船尾典型水位变化见图 11、12, 船舶最大下沉量与船舶航速关系见图 13。



a) 进船厢速度 0.7 m/s

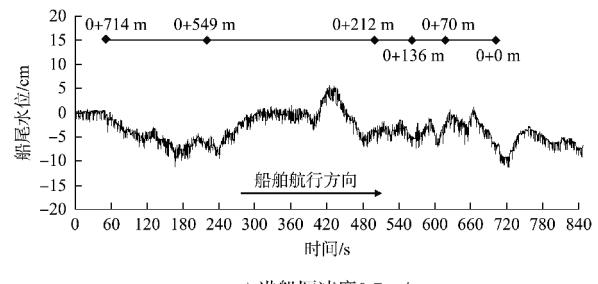


b) 进船厢速度 1.4 m/s

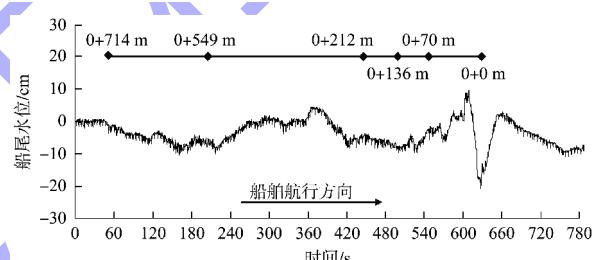


c) 进船厢速度 1.6 m/s

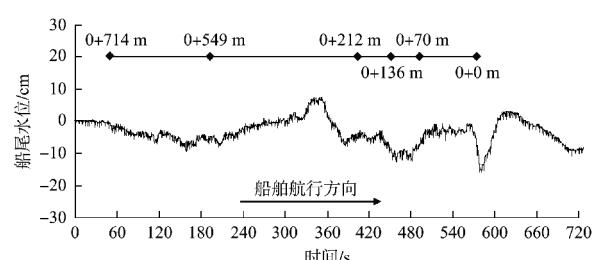
图 11 船舶进 1#厢船首水面变化



a) 进船厢速度 0.7 m/s

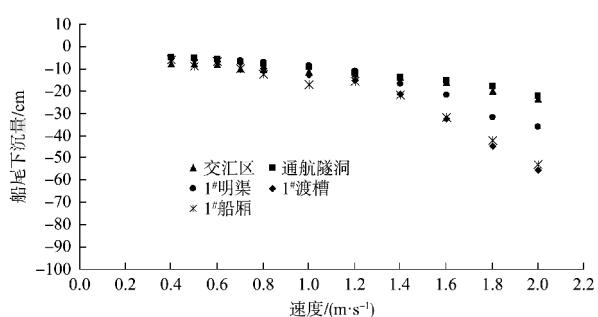


b) 进船厢速度 1.4 m/s

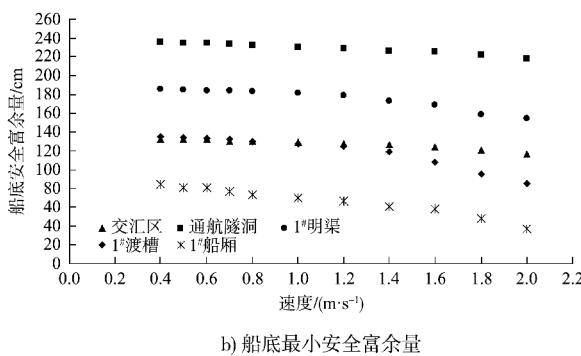


c) 进船厢速度 1.6 m/s

图 12 船舶进 1#厢船尾水面变化



a) 最大下沉值

图 13 船舶进 1<sup>#</sup>船厢速度与最大下沉量关系曲线

船舶从中间渠道交汇区进入升船机船厢时，船舶最大下沉量随航速增大而增大，但由于船舶后方为水域相对开阔的船舶交汇区，船舶后方水位的降低值较小，因此船舶进厢过程的最大下沉量明显小于船舶出厢过程。

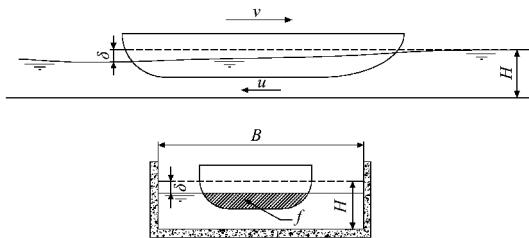
船舶进厢航速为 0.7 m/s 时，在 1<sup>#</sup>船厢内的最大下沉量为 9.2 cm，船舶底的安全富余量为 81.1 cm；航速 1.0 m/s 时，最大下沉量为 18.3 cm；船速超过 1.2 m/s，进入船厢根据船舶的制动距离，将撞击船厢门，因此为防止撞击，船舶航速超过 1.2 m/s 时，船舶在 1<sup>#</sup>渡槽内就开始制动；船舶以 1.4 和 2.0 m/s 的航速在 1<sup>#</sup>渡槽内制动进入 1<sup>#</sup>船厢，船舶最大下沉量分别为 21.5 和 52.6 cm，船底的安全富余量分别为 61.0 和 37.4 cm。

船舶进厢，以 0.4~2.0 m/s 速度在通航隧洞（水深 4.0 m、宽 16.0 m）和交汇区（水深 3.0 m、渠道宽 37.0~38.4 m）内航行，船速对其最大下沉量影响较小。航速 1.4 m/s 时，在通航隧洞和交汇区的最大下沉量均仅为 13.7 cm；最大航速 2.0 m/s 时，最大下沉量也只有 21.9 和 23.3 cm，船舶底部尚有 2.18 和 1.18 m 的安全富裕水深。因此船舶进厢过程，船舶在通航隧洞和交汇区内的最大下沉量基本为同一量级，可忽略断面尺寸对下沉量的影响。

### 2.3 船舶下沉量影响因素分析

船舶进出中间渠道引起的船舶下沉量  $\delta$  一般主要与中间渠道过水断面面积  $F$ 、船舶舯断面水面以下部分的面积  $f$ 、船舶航速  $v$ 、船舶吃水  $d$ 、闸室长度  $L$ 、船舶长度  $l$ 、船舶线型等参数有关。

因此，影响船舶下沉量的影响因素十分复杂，为分析船舶下沉量的主要影响因素，通常可假定船舶在狭浅无限长区域航行。船舶航行过程中，前方被船首推开的水体移动到船尾，形成水流围绕船体运动，这种水流的回流运动伴随流速损失，产生水位落差，形成船舶的下沉，见图 14。



注： $\delta$  为船舶下沉量，m； $f$  为船舶舯断面水面以下面积， $m^2$ ； $v$  为船舶航速， $m/s$ ； $u$  为船舶周围水流回流速度， $m/s$ ； $H$  为初始水深， $m$ ； $B$  为过水断面宽度。

图 14 船舶下沉量概化

假定坐标系固定在船舶上，则可建立方程组：

$$\text{连续方程: } vF = (v+u)(F-f-B\delta) \quad (1)$$

$$\text{能量方程: } \frac{v^2}{2g} = \frac{(v+u)^2}{2g} - \delta \quad (2)$$

由方程组得出  $\delta$  主要与  $F$ 、 $f$ 、 $v$  等因素有关， $F$  与  $B$ 、 $H$  有关， $f$  与  $d$  及船型有关。因此通过量纲分析，即无量纲  $p = \delta/H$ ， $K = \frac{v^2}{gH} \times \left[ \left( \frac{F}{F-f} \right)^2 - 1 \right]$ ，则  $P-K$  间存在一定的函数关系。

根据构皮滩第一级中间渠道 500 吨级船舶不同航速、不同渠道断面及水深等条件下， $\delta$  与  $F$ 、 $f$ 、 $V$ 、 $H$ 、 $d$ 、 $B$  的模型试验数据，建立了如图 15、16 所示的  $P-K$  关系曲线。通过分析，构皮滩第一级中间渠道船舶最大下沉量  $\delta$  与  $F$ 、 $f$ 、 $V$ 、 $H$ 、 $d$ 、 $B$  间存在以下关系：

$$\text{出第一级船厢: } P = 1.0935K \quad (3)$$

$$\text{出第二级船厢: } P = 1.1132K \quad (4)$$

$$\text{进第一级船厢: } P = 0.6447K \quad (5)$$

$$\text{进第二级船厢: } P = 0.4317K \quad (6)$$

实测数据与该曲线的相关系数达 0.95 以上。因此，构皮滩第一级中间渠道内船舶航行最大下沉量  $\delta/H$ ，可根据船舶航速  $v$ 、过水断面面积  $F$ 、船舶舯断面水面以下部分的面积  $f$ ，用式(3)~(6) 进行近似估算。

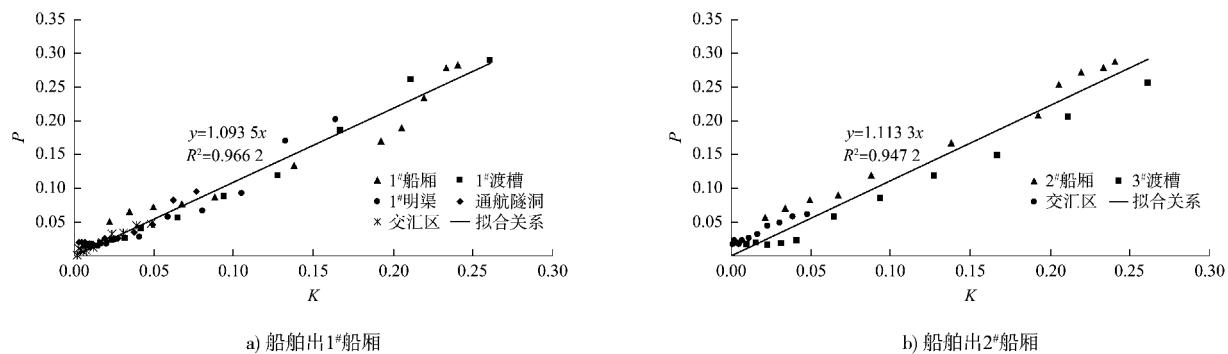


图 15 船舶出船厢下沉量与影响因子关系曲线

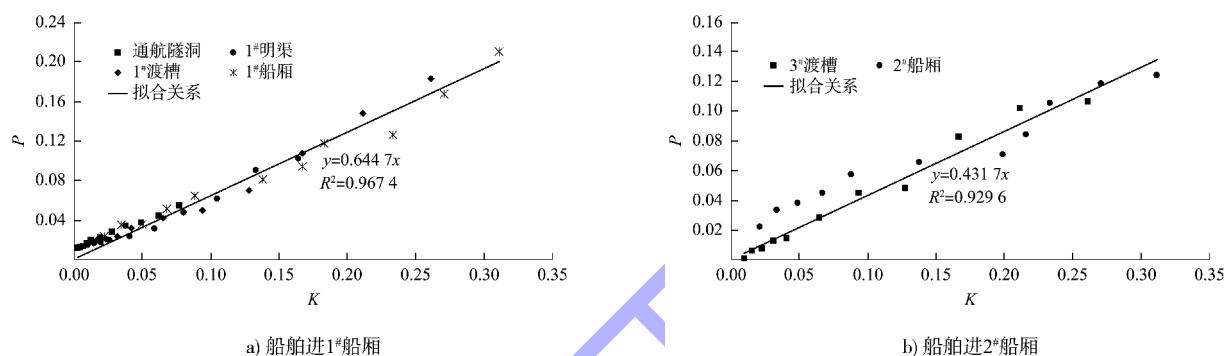


图 16 船舶进船厢下沉量与影响因子关系曲线

模型试验实测值与经验公式(3)~(6)计算的船舶下沉量值比较, 见表1。可知经验公式计算的船舶最大下沉量与模型实测值基本一致, 最大误差为 5 cm, 因此用公式预测构皮滩升船机中间渠

道船舶下沉量合理可行。

表 1 船舶下沉量实测值与计算值比较

航行 方式 (m·s <sup>-1</sup> )	船舶下沉量/cm																
	1#船厢		1#渡槽		1#明渠		通航渠道		交汇区		3#渡槽		2#船厢		交汇区		
	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	
出船厢	0.5	13.6	18.2	7.7	7.0	5.7	5.3	3.0	8.1	1.4	2.7	7.8	5.1	13.8	20.8	1.5	6.0
	0.6	18.5	19.4	10.5	7.9	7.7	6.4	4.1	7.2	1.9	2.1	10.7	5.9	18.8	22.7	2.0	5.3
	0.8	24.2	24.9	13.7	12.1	10.0	8.7	5.4	6.5	2.5	2.5	13.9	7.1	24.6	29.9	2.6	7.1
	1.0	37.8	35.6	21.4	17.1	15.7	9.9	8.4	10.3	4.0	3.7	21.8	17.6	38.4	41.8	4.0	8.2
	1.2	52.6	42.5	30.8	26.7	22.6	20.3	12.1	10.6	5.7	6.0	31.4	25.7	53.5	51.8	5.8	9.7
	1.4	56.2	47.6	42.0	35.8	30.8	23.5	16.5	14.2	7.8	9.7	42.7	35.6	57.2	63.1	7.9	13.4
	1.6	60.0	58.5	54.8	55.9	40.2	32.5	21.5	18.6	10.2	10.2	55.8	44.7	61.0	67.9	10.3	15.0
	1.8	63.8	69.6	69.4	78.3	50.9	59.7	27.3	33.1	12.9	13.8	70.6	61.7	65.0	69.4	13.1	17.7
	2.0	65.8	70.7	85.6	87.1	62.8	70.8	33.6	38.1	15.9	14.3	87.2	76.7	67.0	71.7	16.2	18.5
进船厢	0.5	8.0	9.1	4.5	6.4	3.3	5.7	1.8	5.2	0.8	7.8	3.0	2.3	5.4	9.5	0.6	2.8
	0.6	10.9	12.9	6.2	7.1	4.5	6.0	2.4	6.5	1.1	9.8	4.1	3.8	7.3	11.3	0.8	4.2
	0.8	14.3	16.2	8.1	9.6	5.9	6.8	3.2	7.7	1.5	10.1	5.4	4.3	9.5	14.3	1.0	2.7
	1.0	22.3	20.3	12.6	12.7	9.3	8.3	5.0	9.1	2.3	11.2	8.5	8.5	14.9	16.4	1.6	4.2
	1.2	26.9	23.6	18.2	15.0	13.3	10.9	7.1	11.3	3.4	12.3	12.2	13.4	21.5	17.7	2.3	6.6
	1.4	29.4	29.4	24.7	21.1	18.1	16.6	9.7	13.7	4.6	13.5	16.6	14.4	23.3	21.0	3.1	7.5
	1.6	37.6	31.6	32.3	32.2	23.7	21.4	12.7	15.0	6.0	15.9	21.6	24.7	25.2	26.3	4.0	7.9
	1.8	43.6	41.9	40.9	44.5	30.0	31.7	16.1	17.7	7.6	19.7	27.4	30.5	29.2	29.6	5.1	13.9
	2.0	50.1	52.6	50.5	55.1	37.0	35.8	19.8	21.9	9.4	23.3	33.8	31.9	33.5	31.0	6.3	17.5

### 3 结语

1) 相同航速下, 船舶出船厢下沉量远大于进厢, 船舶出厢过程是船舶下沉量控制工况, 该结论与文献[4]的试验结果相同。船舶出厢在相同航速下, 船舶在中间渠道不同位置最大下沉量差异较大, 中间渠道断面系数小于 3 时, 断面系数变化对船舶下沉量影响较为明显, 且断面系数越小对船舶下沉量影响越显著, 船速 1.2 m/s, 断面系数由 1.91 增大到 2.81, 对应的船舶最大下沉量由 51.8 cm 下降到 20.3 cm; 中间渠道断面系数大于 4.0 后, 断面系数增大对船舶下沉量的影响迅速减小。

2) 建立了船舶在构皮滩第一级中间渠道内航行时最大下沉量  $\delta$  与船厢水深  $H$ 、船舶航速  $v$  及船厢断面系数  $n$  间的无量纲计算公式; 与以往船舶下沉量计算公式相比, 该公式可较准确的预测船舶最大下沉量, 考虑的影响因素全面并进行了无量纲化处理, 更具有普遍性, 为通航建筑物中间渠道研究设计提供参考。

### 参考文献:

- [1] 李中华, 胡亚安, 陈莹颖. 中间渠道交汇区尺度及船舶航行方式研究[J]. 水运工程, 2016(12): 142-147.
- [2] 郑飞东, 李云, 王晓刚. 中间渠道次生波发育长度数值模拟研究[J]. 水利水运工程学报, 2022(6): 1-8.
- [3] 陈莹颖, 胡亚安, 李中华, 等. 龙滩第二级升船机船舶出

厢过程水力特性综合研究[J]. 水运工程, 2020(11):

18-25, 70.

- [4] 李焱, 郑宝友, 周华兴. 构皮滩升船机中间渠道通航隧洞和渡槽的尺度研究[J]. 水道港口, 2012, 33(1): 45-50.
- [5] 李焱, 郑宝友, 周华兴. 升船机中间渠道的航行水力特性和尺度试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2007(2): 23-29.
- [6] 李焱, 刘红华, 迟杰, 等. 升船机船厢出入水中间渠道内水力特性试验[J]. 水道港口, 2007(1): 38-43.
- [7] 郑宝友. 高坝通航中间渠道和渡槽的尺度及通航条件研究. [R] 天津: 交通部天津水运工程科学研究所, 2006.
- [8] 姜亚庄, 贺德斌. 清江隔河岩两级升船机中间渠道及下游引航道船舶牵引方式优化方案[J]. 岩土力学, 2003, 24(S1): 186-188.
- [9] 李焱, 刘俊涛. 百色升船机中间渠道内船舶航速与渠道尺度分析及航行条件试验[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 393-398.
- [10] ALDERF N, LEFRANCOIS E, SERGENT P, et al. Dynamic ship response integration for numerical prediction of squat in highly restricted waterways [J]. International journal for numerical methods in fluids, 2011, 65(7): 743-763.
- [11] ZHANG Z H, DENG H, WANG C. Analytical models of hydrodynamic pressure field causing by a moving ship in restricted waterways [J]. Ocean engineering, 2015, 108(1): 563-570.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 124 页)

### 参考文献:

- [1] 包起帆, 任国华, 横沙东滩纳入浦东新区统筹规划的前瞻思考[J]. 上海经济, 2021(4): 1-13.
- [2] 陈海英, 孙鹏, 楼飞, 等. 长江口横沙东滩滩涂整治利用和展望[J]. 水运工程, 2017(11): 152-155, 160.
- [3] 赵恩宝, 王大伟, 曹慧江, 横沙东滩促淤圈围工程对长江口北槽深水航道的影响[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(9): 14-19.
- [4] 武云龙, 陈括, 匡翠萍, 等. 长江口枯季盐度锋对深水航道及横沙东滩圈围工程的响应特征[J]. 水动力学研究

与进展 A 辑, 2022, 37(1): 115-124.

- [5] 匡翠萍, 董智超, 陈括, 等. 长江口深水航道及横沙东滩促淤圈围对滞流点的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(11): 1621-1628.
- [6] 刘杰, 程海峰, 韩露, 等. 流域水沙变化和人类活动对长江口河槽演变的影响[J]. 水利水运工程学报, 2021(2): 1-9.
- [7] 樊咏阳, 陈正兵, 张志林, 等. 长江口水下三角洲演变规律及河势控制初探[J]. 海洋工程, 2020, 38(4): 91-99.

(本文编辑 王传瑜)