



向家坝升船机承船厢设计水深标准*

李中华¹, 胡亚安¹, 刘克平²

- (1. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029;
2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙 410014)

摘要: 通过 1:16 的物理模型研究了船舶进出升船机承船厢时的最大下沉量与船厢水深、船舶航速及船厢断面系数间的变化规律。提出船舶出厢过程是船厢设计水深的控制条件, 建立了船舶下沉量的无量纲计算公式。通过综合比较不同船厢水深船舶下沉量及船底安全富余水深, 提出了向家坝升船机合理的船厢设计水深标准。

关键词: 升船机; 承船厢; 船舶下沉量; 物理模型

中图分类号: U 642.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0153-05

Water depth standard for Xiangjiaba ship lift's chamber

LI Zhong-hua¹, HU Ya-an¹, LIU Ke-ping²

- (1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China;
2. HydroChina Zhongnan Engineering Corporation, Changsha 410014, China)

Abstract: Based on a physical model with scale of 1:16, this paper studies the change rules of maximum squat to vessel's wet cross section when ships enter and exit ship chamber and chamber water depth, ship velocity, ratio of chamber cross section. The process of ship out of chamber as control condition of chamber's design water depth is proposed and dimensionless computing formula of vessel squat is established. With synthesized comparison of squat of ship and ship's safe under-keel clearance under the different chamber water depth, ship chamber design water depth standard in Xiangjiaba ship lift is proposed.

Keywords: ship lift; ship chamber; vessel squat; physical model

向家坝是金沙江下游河段规划的最末一个梯级, 升船机^[1]布置在枢纽左侧河槽中, 最大升程 114.2 m, 船厢有效船厢尺寸 116.0 m×12.0 m, 按通过 2×500 t 船队设计, 船型尺寸为 111.0 m×10.8 m×1.6 m (长×宽×吃水深); 同时需兼顾 1 000吨级单船, 船型尺寸为 85.0 m×10.8 m×2.0 m (长×宽×吃水深)。向家坝升船机为减小电气拖动

系统功率、降低工程造价和设备制造难度, 在保证船舶进出船厢安全的条件下, 尽可能将承船厢内的水深减小到最低。升船机承船厢的断面系数一般非常小, 船舶进出船厢时的阻塞效应十分明显^[2], 船舶进出船厢过程船厢内的水面波动及船舶下沉量十分显著, 需要确定合理的承船厢设计水深, 防止船舶进出船厢时发生触底, 保障船舶

收稿日期: 2016-09-16

*基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402006); 国家自然科学基金 (51479123)

作者简介: 李中华 (1974—), 男, 教授级高级工程师, 从事通航建筑物模型试验及数值模拟方面的研究。

及船厢安全。

升船机承船厢水深主要由设计船舶吃水 T 、船舶综合航行下沉量 δ 和安全余量 Δ 共 3 部分组成 (图 1), 船舶综合航行下沉量主要船舶航行下沉量和船舶航行推移波两部分影响, 安全富裕水深 (Δd) 由非恒定流引起的水位波动、水位误差、安全余量等组成。航行下沉量 δ 是决定船厢水深的

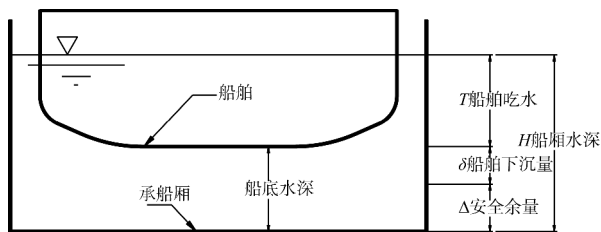


图 1 升船机承船厢水深组成

1 研究方法

船舶在承船厢、船闸闸室及中间渠道等限制性水域内航行时, 由于断面系数较小, 水流与船舶的相互影响较为显著, 船体附近流场变化将引起船舶航行速度改变。采用自航船模进行试验, 其航行过程船舶速度不易稳定, 这给资料的分析带来困难。一般采用牵引系统拖曳船模方式进行研究, 即在模型航线的上方设置导向装置, 通过固定的牵引装置, 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、不偏离航线、不碰壁。

因此, 在比尺为 1:16 向家坝升船机承船厢及引航道物理模型上采用牵引船模的方法研究船厢水深、船舶吃水及航速等因素与船舶最大下沉量间的关系, 以确定合理的承船厢水深和船舶航行速度, 模型牵引系统及测量设备见图 2。

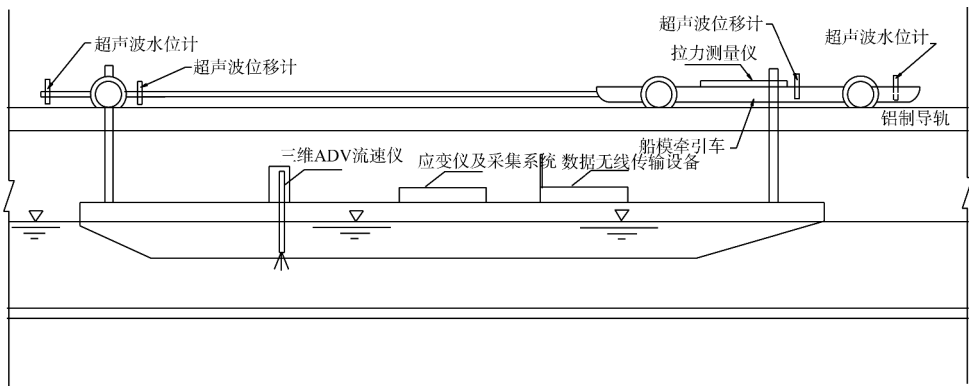


图 2 模型牵引系统及测量设备

2 船舶最大下沉量影响因素分析

2.1 船舶出船厢

根据模型试验, 船舶出承船厢时, 由于船舶后方是封闭水域, 船舶出厢推出的水体不能迅速补充, 船舶后方承船厢内的水位下降明显, 导致出厢过程船舶下沉十分显著。

由表 1 和图 3~4 可见, 相同船厢水深下, 船舶最大下沉量随船舶出厢速度的增大而增大; 船厢水深 3.0 m, 船舶出厢速度由 0.3 m/s 增加到

1.0 m/s, 船舶最大下沉量由 24.7 cm 迅速增加到 67.7 cm, 安全富余水深则由 75.3 cm 减小到 32.3 cm。相同出厢航速下, 船厢水深由 3.2 m 减小到 2.7 m, 1 000 t 单船对应的断面系数由 1.98 减小到 1.67, 阻塞效应增大, 船舶最大下沉量随之增大; 船舶 0.8 m/s 出厢, 船厢水深由 3.2 m 减小到 2.7 m, 船舶的最大下沉量由 43.9 cm 增大到 62.5 cm, 安全富余量则由 76.1 cm 迅速减小到 7.5 cm。

表 1 1 000 t 单船出船厢最大下沉量与安全富余量

船速/ (m/s)	承船厢水深 3.2 m		承船厢水深 3.0 m		承船厢水深 2.8 m		承船厢水深 2.7 m	
	δ/cm	$\Delta d/cm$	δ/cm	$\Delta d/cm$	δ/cm	$\Delta d/cm$	δ/cm	$\Delta d/cm$
1.0	-55.7	64.3	-67.7	32.3	-80.0	0		
0.8	-43.9	76.1	-52.0	48.0	-56.4	23.6	-62.5	7.5
0.7	-38.9	81.1	-41.8	58.2	-44.6	35.4	-48.9	21.1
0.6	-33.9	86.1	-36.2	63.8	-40.1	39.9	-42.1	27.9
0.5	-32.5	87.5	-35.0	65.0	-36.7	43.3	-35.0	35.0
0.3	-23.6	96.4	-24.7	75.3	-25.0	55.0	-23.5	46.5

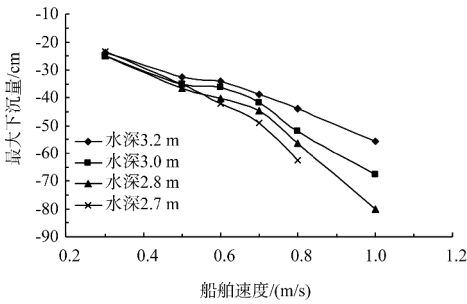


图 3 船舶出船厢最大下沉量与水深、航速关系

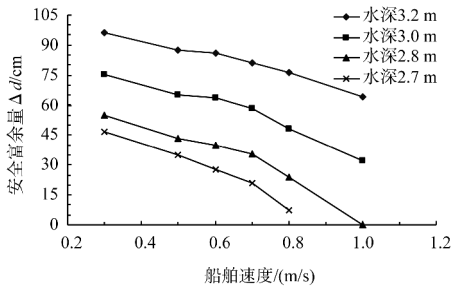


图 4 船舶出船厢安全富余量与水深、航速关系

表 2 1 000 t 单船进船厢最大下沉量与安全富余量

船速/ (m/s)	承船厢水深 3.2 m		承船厢水深 3.0 m		承船厢水深 2.8 m	
	δ/cm	$\Delta d/cm$	δ/cm	$\Delta d/cm$	δ/cm	$\Delta d/cm$
1.0	-32.5	87.5	-38.0	62.0	-47.3	32.7
0.8	-20.6	99.4	-22.5	77.5	-25.9	54.1
0.7	-18.6	101.4	-17.4	82.6	-22.5	57.5
0.6	-14.3	105.7	-12.3	87.7	-16.2	63.8
0.5	-10.0	110.0	-11.9	88.1	-12.8	67.2
0.3	-3.1	116.9	-5.0	95.0	-7.1	72.9

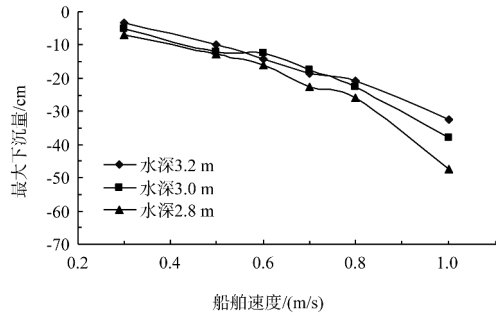


图 5 船舶进船厢最大下沉量与水深、航速关系

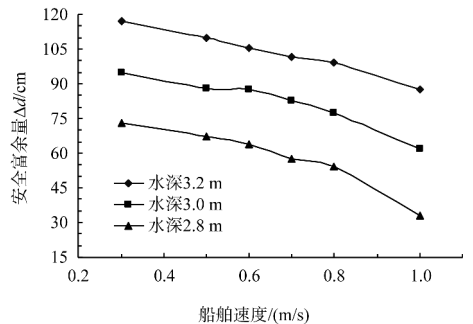


图 6 船舶进船厢安全富余量与水深、航速关系

2.2 船舶进船厢

根据模型试验, 船舶进承船厢时, 由于船舶航行后方直接与上下游河道连接, 船尾水位降低值较小, 因此船舶进厢过程的船舶的最大下沉量明显减小。

由表 2 和图 5~6 可见, 船舶进承船厢时船舶下沉量变化规律与出船厢时基本相同, 即相同船厢水深下, 船舶最大下沉量随船舶出厢速度增大而增大; 相同出厢航速下, 船舶最大下沉量随船厢水深增大而减小; 比较图 3 和图 5 可见, 相同条件下船舶进船厢的最大下沉量要小于出厢时的下沉量, 因此船舶出厢是承船厢设计水深的控制条件。

2.3 最大下沉量影响综合分析

根据前面试验资料结合量纲分析可知, 船舶进出承船厢时的最大下沉量 $\delta(m)$ 主要与船速 $v(m/s)$ 、船厢水深 $H(m)$ 和断面系数 $n = F/f$ 有关。根据向家坝升船机 1 000 t 单船和 2×500 t 船队模

型试验数据,无量纲化后 $P-K$ 的变化关系见图 7,

$$其中 P = \delta/H, K = \frac{v^2}{2gH} \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 - 1 \right].$$

采用最小二乘法对 $P-K$ 进行拟合可得:

$$\frac{\delta}{H} = 2.43 \times \frac{v^2}{2gH} \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 - 1 \right] + 0.07 \quad (1)$$

表 3 是模型试验实测值与船舶下沉量计算值(式(1))的比较。由表 3 可见,计算的船舶最大下沉量与模型实测值基本一致,可用式(1)预测向

家坝升船机船舶最大下沉量。

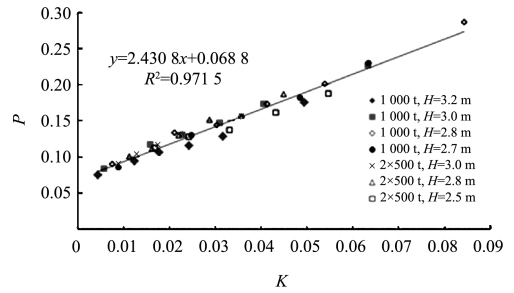


图 7 向家坝升船机船舶下沉量与影响因子关系曲线

表 3 向家坝升船机船舶下沉量模型与公式计算对比

船速/ (m/s)	船厢水深/ m	1 000 t 单船下沉量			2×500 t 船队下沉量		
		实测/m	公式/m	误差/%	实测/m	公式/m	误差/%
1.0	3.0	0.68	0.67	1.5	0.46	0.47	1.5
0.8	3.0	0.52	0.51	1.9	0.39	0.38	1.9
0.7	3.0	0.44	0.44	0.0	0.35	0.34	0.0
0.6	3.0	0.39	0.38	2.6	0.31	0.30	2.6
0.5	3.0	0.35	0.33	5.7	0.27	0.28	5.7
0.3	3.0	0.25	0.25	0.0			

3 承船厢合理设计水深

3.1 保证船舶不触底的安全富余量

目前国内外对升船机承船厢水深确定尚无明确的标准,我国 GB 50139—2014《内河通航标准》^[3]规定航道的标准水深 H 按下式计算:

$$H = T + \Delta H \quad (2)$$

式中: T 为船舶标准吃水; ΔH 为富余水深,为不触底的安全量 Δd 和船舶航行下沉量 δ 之和。目前国内外已建升船机船舶不触底安全富余量 Δd 一般按 0.5~0.6 m 考虑。

3.2 船舶进出承船厢的航速

目前我国尚无专门针对船舶进出升船机承船厢的航速的标准,但在相关的文献和类似工程的实际运行规程中有一些类似的航速指标可以参考。表 4 是国内部分升船机船舶进出厢速度限值的统计情况,从统计资料可以看出,目前国内大部分升船机船舶出厢的设计速度约为 0.5~0.6 m/s,船舶进厢速度约为 0.7~0.9 m/s。

根据三峡通航管理局对 500 多艘船舶通过三峡船闸的随机船舶航速监测数据,1~2 kt 货船出厢平均速度为 1.06 m/s; 闸室移泊平均速度

0.48 m/s, 最大速度达 0.97 m/s。以上数据均远大于升船机进出船厢的允许速度值,为减小船厢水深,采取降低升船机船舶出厢速度标准,在实际运行中会存在较大的安全隐患。

表 4 国内部分升船机船舶进出船厢速度

名称	进厢航速/(m/s)	出厢航速/(m/s)
陆水	0.80	0.50
丹江口	0.90	0.60
三峡升船机	0.70	0.50
水口升船机		0.50
三峡船闸闸室移泊	0.60	0.60

因此设计船厢水深时,船舶出厢速度应不低于 0.5~0.6 m/s,并保证船舶以 1.0 m/s 航速出船厢,仍要有一定的安全富余量,防止船舶出厢速度超设计标准,发生船舶触底的安全事故,影响升船机正常运行。

3.3 船舶进出承船厢的航速

根据第 2 节试验资料,向家坝升船机船舶进出承船厢时的最大下沉量主要发生在船舶出厢过程,因此船舶出厢过程是控制船厢正常设计水深的控制因素。

由图 3、4 可见,船厢设计水深 2.8 m 时,船

舶以 0.3 m/s 的极低速度出厢, 船厢的安全富余量 Δd 为 55 cm, 不能满足对安全富余量的要求, 并且其出厢速度远低于国内一般升船机船舶出厢速度 0.5~0.6 m/s 的标准^[4]。因此, 船厢设计水深 2.8 m 标准偏低, 将较难满足安全、高效运行的目标。

船厢设计水深 3.2 m 时, 1 000 t 单船出厢速度达到 1.0 m/s 时, 船厢的安全富余量仍有 64.3 cm, 船舶以 1.0 m/s 的航速进厢, 船厢的安全富余量则达到了 85.5 cm, 因此, 船厢正常设计水深取 3.2 m 时船厢的富余偏大, 有进一步减小水深的余地。

船厢设计水深 3.0 m 时, 船舶以 0.6 m/s 的航速出厢, 安全富余量 Δd 为 63.8 cm, 满足对安全富余水深的要求; 船舶以 1.0 m/s 航速出厢, 船舶底仍有 32.3 cm 的安全富余量。根据水口和岩滩试验资料^[4-5], 水口升船机船舶以 0.51 m/s 速度出厢, 船舶底部水深富余量为 72 cm, 岩滩升船机船舶以 1.0 m/s 速度出厢, 模型实测的船舶底部水深富余量为 31 cm, 而向家坝升船机船厢水深 3.0 m 时, 船舶以 0.5 m/s 和 1.0 m/s 出厢, 船底安全水深富余量分别为 65 cm 和 32.3 cm, 与水口和岩滩升船机的基本接近。因此, 向家坝升船机按 0.6 m/s 出厢考虑, 船厢正常设计水深选择 3.0 m 是较为合理的。

4 结语

1) 船舶出厢过程的下沉量是升船机船厢水深

的设计控制条件;

2) 船舶进出船厢的最大下沉量与船厢水深、断面系数、航速等间的关系可以通过 $P = \frac{\delta}{H}$ 和 $K = \frac{v^2}{2gH} \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 - 1 \right]$ 两个无量纲量表示, 二者间基本成线性变化关系, 对于向家坝升船机船舶进出承船厢最大下沉量可以通过式(1)进行预测;

3) 升船机船舶进出航速为 0.5~0.6 m/s 时, 承船厢安全富裕水深不小于 0.6 m;

4) 向家坝升船机承船厢设计水深选择 3.0 m 较为合理。

参考文献:

- [1] 李中华, 胡亚安. 向家坝水电站一级垂直升船机船舶进出船厢船模试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.
- [2] Spitzer D, Soehngen B. On the longitudinal dynamics of ship entry and exit at locks[C] // SMART Rivers Conference 2013. Belgium: PIANC, 2013: 23-27.
- [3] GB 50139—2014 内河通航标准[S].
- [4] 孙精石. 从《内河通航标准》看某些特殊限制性航道水深的确定[J]. 水道港口, 2006, 27(6): 300-305.
- [5] 包纲鉴, 陈锦珍, 方元岱. 福建水口水电站工程 2×500 吨级垂直升船机整体模型试验研究总报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1995.
- [6] 包纲鉴, 陈锦珍. 岩滩升船机整体模型试验研究总报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1996.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

振华重工设备抓起瓜达尔港开航第一箱

11 月 13 日, 首批中国商船从瓜达尔港出海, 将货物运往中东和非洲。随着瓜达尔港正式启用, 中开航仪式上, 由振华重工生产的港机设备现场抓起了第一标箱。当天, 振华重工港机将 150 个集装箱吊上“克斯克·威灵顿”号。

http://en.ccccltd.cn/cccltd/news/jcxw/jx/201611/t20161114_86528.html (2016-11-14)