



乌江思林和沙沱升船机船舶超吃水 可行性研究*

周承芳¹, 韩俊¹, 王新²

(1. 贵州省航务管理局, 贵州 贵阳 550003; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对乌江思林、沙沱两座升船机船舶 1.6 m 吃水控制标准导致载货量偏低的实际问题, 开展超吃水船舶进出升船机船厢系统性的实船试验, 论证船舶吃水标准提升的可行性。结果表明, 船舶出厢为控制性工况, 2.0 m 吃水船舶正常出厢实测最大下沉量 16.46 cm, 富余水深大于 30 cm; 基于实船试验数据改进的下沉量预测公式, 将船舶实际下沉量预测精度提高 1 倍以上; 按目前 2 座升船机运行水位协调机制, 上下游水位变化在 10 cm 以内, 船舶最大吃水提升至 2.0 m 是可行的。建议在运行中按照 1.8~2.0 m 吃水逐步放宽控制标准。

关键词: 升船机; 超吃水船舶; 下沉量; 富余水深

中图分类号: U 642.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0091-06

Feasibility study on over-draught ship through Silin and Shatuo ship lifts in Wujiang River

ZHOU Cheng-fang¹, HAN Jun¹, WANG Xin²

(1. Navigational Matters Authority of Guizhou Province, Guiyang 550003, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Aiming at the practical problem that the 1.6 m draught control standard of Silin and Shatuo ship lifts in Wujiang River leads to the low loading capacity of the ship, we conduct systematical prototype tests of the over-draught ship to enter and leave the chamber to demonstrate the feasibility of upgrading the draught standards for ships. The results show that the ship leaving the chamber is the control condition, the maximum sinkage of the ship with the draught of 2.0 m is measured as 16.46 cm, and the under-keel clearance is more than 30 cm. An improved prediction formula based on the actual ship's test data can increase the prediction accuracy of the ship's sinkage by more than double. According to the current water level coordination mechanism of the two ship lifts, the upstream and downstream water levels change within 10 cm, and the maximum draught of the ship could be increased to 2.0 m. It is recommended that the draught control standards could be carried out from 1.8 m to 2.0 m during the navigation trial period.

Keywords: ship lift; over-draught ship; sinkage; under-keel clearance

乌江是长江上游一级支流, 属国家规划的“两横一纵两网十八线”高等级航道之一, 目前干流乌江渡以下为通航 500 吨级船舶标准的 IV 级航道, 思林和沙沱水电站分别为干流的第八和第九梯级, 均位于此航道内。思林、沙沱水电站通航

设施均采用了垂直升船机方案, 工程面貌见图 1。2016 年 12 月, 思林、沙沱升船机完成了 500 吨级标准货船过船试验和全线试航, 2017 年 8 月, 两座升船机同时正式向社会船舶开放投入试运行, 断航 15 年之久的乌江水运成功复航, 成为贵州水

收稿日期: 2020-07-06

***基金项目:** 贵州省交通运输厅科技项目(2019-211-008)

作者简介: 周承芳(1976—), 女, 工程师, 从事水运工程管理。

运发展历史上一个重要的里程碑。



a) 思林升船机



b) 沙沱升船机

图 1 升船机工程

思林升船机位于电站大坝左岸，最大提升高度为 76.7 m，为钢丝绳卷扬式全平衡单级垂直升船机。思林升船机承船厢有效水域尺寸为 58.0 m×12.0 m×2.5 m(长×宽×水深)；设计通航净空高度为 8.0 m。设计代表船型为 500 吨级机动驳船，船型尺寸为 55 m×10.8 m×1.6 m(总长×型宽×吃水)，设计年单向通过能力为 200 万 t。上游最高、最低通航水位分别为 440、431 m，下游最高、最低通航水位分别为 374.5、363.3 m。

沙沱升船机位于电站大坝右岸，最大提升高度为 75.38 m，同样为钢丝绳卷扬式全平衡单级垂直升船机。升船机承船厢有效尺度和设计代表船型与思林升船机相同，设计单向年通过能力为 210 万 t。上游最高、最低通航水位分别为 365.00、353.50 m，下游最高、最低通航水位分别为 300.38、289.62 m。

两座升船机试运行发现，过机船舶最大吃水按设计控制为 1.6 m，而实际通航船舶满载吃水达到 2.0 m 以上，导致船舶的装载率很低，航运效

益受到很大影响，不利于乌江航运的复苏。根据 GB 51177—2016《升船机设计规范》，船厢水深与船舶吃水比 H/T 可取 1.25~1.40，对于思林和沙沱升船机船厢 2.5 m 水深，船舶吃水最大可采取 2.0 m，为此，提出在目前船舶吃水控制标准的基础上，通过实船试验，研究升船机船舶吃水提升的可行性，研究成果可为两座升船机的通过能力及船舶航运效率提升提供依据，也可供其他升船机工程运行管理参考。

1 实船试验概况

1.1 试验船舶

实船试验选择乌江航道代表性船舶“航电2号”散货船，主要技术参数为：船舶总长 55.0 m，满载水线长 53.2 m，船长 51.93 m，型宽 10.5 m，型深 3.0 m，全高为 9.15 m，空载吃水 0.7 m，满载吃水 2.5 m，空载排水量 200.4 t，满载排水量 905 t，航区为 B 级，航段为 J2 级急流航段。当船舶吃水按升船机要求的 1.6 m 控制时，载货量约 380 t；当船舶吃水 2.0 m 时，载货量约 570 t。可见，按目前 1.6 m 设计吃水控制，船舶载货量与 500 t 还有较大的差距。

1.2 试验工况

实船试验按循序渐进的总体思路，从设计吃水 1.6 m 开始试验，逐步增大到 1.8、1.9 和 2.0 m。由于思林和沙沱两座升船机船厢尺度完全一致，对两座升船机均进行船舶进出船厢试验，观测成果可以统一分析。因船舶在下游航道掉头距离较远，试验成本较大，采用船舶出厢→倒车进厢→再出厢等多次工况进行试验。试验过程中，船舶进出船厢最大速度不允许超过 0.5 m/s，上下游水位保持稳定以满足要求。

1.3 测量方法

实船试验重点观测船舶不同吃水条件下进出船厢的航行特性，观测参数包括船舶航速、船尾下沉量、对接过程船厢水深及水面波动等。船舶的航速和下沉量采用高精度自动跟踪式全站仪测量，船厢的水深变化及水面波动采用波高仪测量。

2 实船试验成果

按预定的试验方案,在安全可控的条件下,逐步提高船舶吃水深度,共完成了20个工况试验,其中1.6 m吃水船舶8次进出船厢、1.8 m吃水船舶2次进出船厢、1.9 m吃水船舶4次进出船厢、2.0 m吃水船舶6次进出船厢。船舶按不超过0.5 m/s的航速完成了多次正常进出厢。

2.1 船舶航速与下沉量

以船舶吃水2.0 m为例,进厢、出厢航速和下沉量过程线见图2,其中下沉量正值表示上升、负值表示下沉。可以看出,进厢过程,船舶速度逐渐减小,至船舶停稳后速度降为0,船舶进厢后随水面上下沉较明显;出厢过程,在船舶尚未启动出厢时,受卧倒门开启对接影响,船厢水面发生明显的周期性波动,船舶随之升沉,在船舶加速驶出船厢过程中,船舶下沉量明显增大。船舶进出厢过程符合一般规律,出厢下沉量大于进厢。

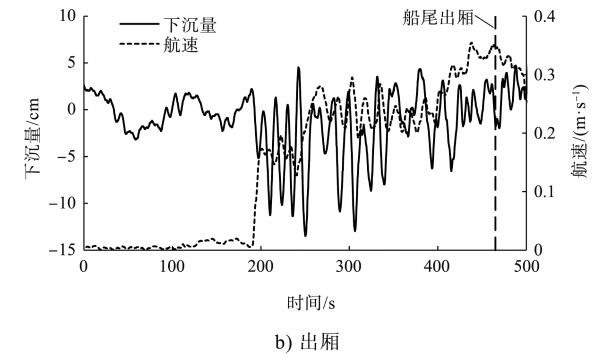
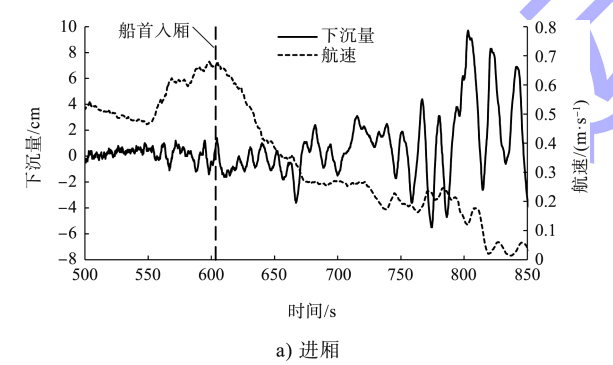


图2 船舶进出船厢航速与下沉量过程线

对20个试验工况船舶最大下沉量、对应航速、最大航速、平均航速进行统计,见表1,其中最大航速和平均航速为船首驶入船厢之后(进厢工况)或船尾驶出船厢之前(出厢工况)的航行时段最大航速和平均航速。从航速统计可看出,船舶进出厢阶段最大航速基本达到试验要求的0.5 m/s左右,由于船舶较宽、易与两侧碰擦,且进出厢船舶阻力较大,船舶正常进出厢航速不大,尤其在吃水增大后,船舶出厢阻力明显增大,船舶航速受到限制,对船舶触底风险来说偏于安全。从实测下沉量来看,船舶进厢过程下沉量总体较小,均在10 cm以内,最大为8.58 cm,出现在船舶2.0 m吃水进厢工况;船舶出厢过程下沉量总体大于进厢,实测最大下沉量16.46 cm,出现在船舶2.0 m吃水下游出厢工况;与船舶进厢类似,随着吃水的增大,船舶的下沉量呈增大的趋势,如图3所示。

表1 船舶下沉量极值与航速

工况	船舶吃水/m	过程	船尾最大下沉量/cm	对应航速/(m·s ⁻¹)	最大航速/(m·s ⁻¹)	平均航速/(m·s ⁻¹)
1	1.6	下游进厢	2.48	0.160	0.295	0.117
2	1.6	上游出厢	6.66	0.155	0.214	0.150
3	1.6	上游进厢	1.85	0.200	0.323	0.226
4	1.6	下游出厢	6.43	0.257	0.362	0.234
5	1.6	下游进厢	3.82	0.423	0.634	0.492
6	1.6	上游出厢	5.27	0.316	0.390	0.279
7	1.6	上游进厢	2.73	0.103	0.542	0.190
8	1.6	下游出厢	7.45	0.416	0.446	0.313
9	1.8	下游进厢	3.16	0.348	0.840	0.294
10	1.8	上游出厢	9.07	0.417	0.641	0.316
11	1.9	下游进厢	5.60	0.230	0.314	0.194
12	1.9	上游出厢	7.10	0.220	0.400	0.175
13	1.9	下游进厢	7.71	0.488	0.589	0.233

续表1

工况	船舶吃水/m	过程	船尾最大下沉量/cm	对应航速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大航速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均航速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
14	1.9	上游出厢	10.10	0.182	0.307	0.163
15	2.0	下游进厢	8.14	0.240	0.434	0.195
16	2.0	上游出厢	10.04	0.258	0.418	0.171
17	2.0	上游进厢	5.50	0.234	0.674	0.276
18	2.0	下游出厢	13.47	0.295	0.354	0.217
19	2.0	上游进厢	8.58	0.398	0.693	0.300
20	2.0	下游出厢	16.46	0.276	0.422	0.286

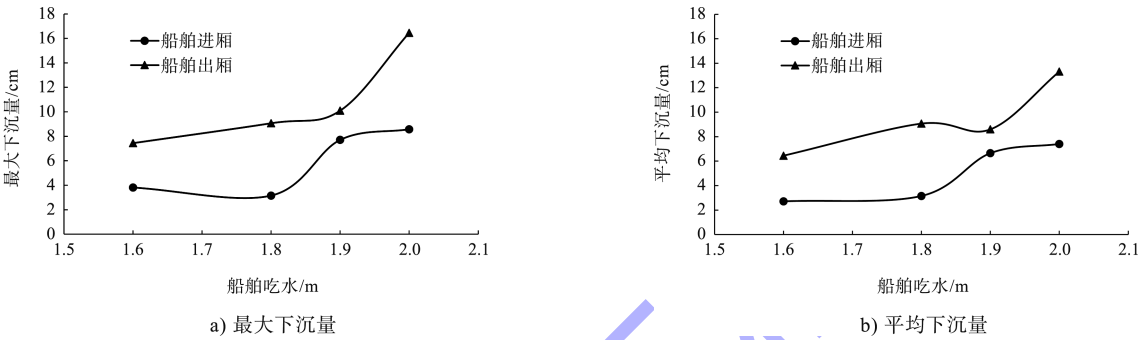


图 3 船舶最大、平均下沉量与吃水的关系

2.2 船厢水深变化及水面波动

船厢对接后厢内水深变化及水面波动对船舶的富余水深有较大影响，也是实船试验重点观测

的参数之一。船舶 1.9 和 2.0 m 吃水试验船厢水力学参数统计见表 2，其中“+”和“-”分别表示船厢水深增大和减小。

表 2 水位变化及水面波动

工况	船舶吃水/m	过程	对接水位差/cm	对接过程中水位变化/cm	船厢内水面最大波动/cm
11	1.9	下游进厢	+4.0	-1.0	13
12	1.9	上游出厢	+4.0	0	16
13	1.9	下游进厢	-2.0	-3.0	14
14	1.9	上游出厢	+6.0	-2.0	25
15	2.0	下游进厢	+2.0	0	14
16	2.0	上游出厢	+9.0	0	21
17	2.0	上游进厢	+6.5	+6.5	15
18	2.0	下游出厢	+1.0	0	15
19	2.0	上游进厢	+3.0	0	10
20	2.0	下游出厢	-4.0	0	22

可以看出，船厢对接时存在一定的水位差，以船厢内水深增大为主，对接后船厢水深最大变化 9 cm；对接过程中上下游水位总体稳定，最大变化约 6.5 cm，发生在上游对接工况，升船机过船运行水位条件控制良好。船舶进出厢过程中，船厢内波动较大，主要是船舶航行引起的推进波，并与卧倒门启闭波动叠加，水面波动是引起船舶进出厢过程中上升、下沉的主要原因，船舶实测

综合下沉量中水面波动影响占比较大。

3 船舶下沉量预测公式与吃水标准提升分析

3.1 船舶下沉量预测公式

关于船舶下沉量，已有不少预测公式^[1-4]，但使用条件存在较大差异。本文基于思林、沙沱升船机实船试验实测资料，建立适用于两座升船机船舶出厢下沉量预测公式。从已有的研究^[5-7]可

知, 船舶出厢下沉量的主要影响参数为断面系数和水深弗劳德数, 拟在包纲鉴公式^[8]的基础上, 以减小公式的预测误差为目标, 进行改进, 建立两个无量纲参数 P' 和 K' , 关系为:

$$P' = \frac{\delta}{T} K' = \left(\frac{1}{n}\right)^{2.5} \left(\frac{v}{\sqrt{gh}}\right)^{1.3} \tag{1}$$

$$P' = \alpha K' \tag{2}$$

式中: δ 为船舶下沉量 (m); h 为船厢水深 (m); v 为船舶航速 (m/s); n 为断面系数, 其值为 F/f , 其中 F 为船厢水下横断面面积 (m²), f 为船舫水下横断面面积 (m²); T 为船舶吃水 (m); α 为系数。

两个无量纲参数的线性系数 α 通过实测资料拟合获得 (图 4), α 取 8.053 即得到下沉量预测公式为:

$$\delta = 8.053 \left(\frac{v}{\sqrt{gh}}\right)^{1.3} \left(\frac{1}{n}\right)^{2.5} T \tag{3}$$

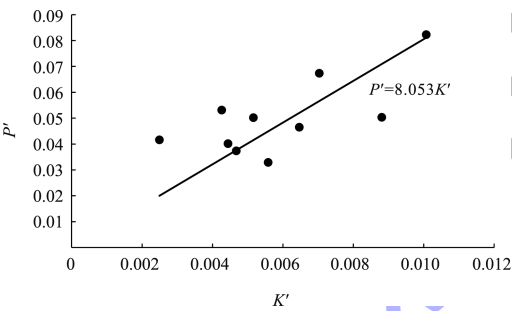


图 4 P' - K' 关系

利用实测资料对建立的下沉量预测公式进行验证表明, 改进的预测公式可将下沉量预测精度提高 1 倍以上, 可靠性大幅提高。

3.2 船舶吃水控制标准提升分析

从实船试验可看出, 设计船舶 2.0 m 吃水时每次均安全顺利通过了思林、沙沱升船机, 具备船舶吃水由 1.6 m 提升到 2.0 m 的可行性。但船厢富余水深受水位变化、水面波动等因素影响, 较为复杂, 需要对 2.0 m 吃水的可行性和运行条件进行深入分析:

- 1) 当船舶吃水 2.0 m 时, 船厢水深吃水比为 1.25, 在升船机设计规范建议范围之内。
- 2) 在协调通航水位的条件下, 多次试验过程

中上下游水位稳定, 未出现水位大幅变化情况, 船舶进出厢具有较好的水位条件。

3) 船厢对接水位差设计为 ± 15 cm, 多次试验对接过程中船厢最大水位差约 9 cm, 以船厢水深增大为主, 对船舶进出安全有利, 可以考虑人为设置 5 cm 对接水位差, 使对接后船厢水深由标准的 2.5 m 变为 2.55 m, 甚至是 2.6 m, 为船厢水深提供充足保障。

4) 船舶进厢下沉量较小, 在最大航速超过 0.5 m/s 的情况下, 船舶下沉量不足 10 cm, 船舶正常进厢过程不存在触底风险; 船舶出厢下沉量大于进厢, 在船舶正常出厢最大航速超过 0.4 m/s、平均航速近 0.3 m/s 的情况下, 最大下沉量约 16.5 cm, 正常出厢过程富余水深在 30 cm 以上。

5) 按建立的下沉量预测公式, 标准水深按 2.5 m 考虑, 不同速度出厢水深富余量与平均航速的关系如图 5 所示, 平均航速 0.3 m/s 时, 最大下沉量约 17.5 cm; 平均航速 0.35 m/s (最大航速约 0.5 m/s) 时, 最大下沉量约 21.4 cm。船舶正常出厢平均速度一般为 0.3 m/s 左右, 即使达到最大限制航速, 也不存在触底风险。

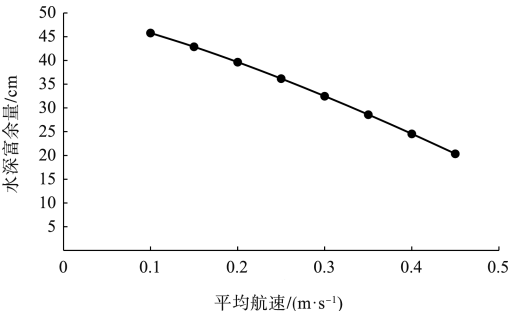


图 5 船底水深富余量与平均航速关系

综上, 按目前思林、沙沱两座升船机运行水位协调机制, 上下游水位变化在 10 cm 以内, 船舶最大吃水提升至 2.0 m 是可行的。

4 结论

1) 通过思林和沙沱升船机 20 个工况实船试验, 掌握了不同吃水船舶进出厢下沉量特性, 船舶出厢下沉量大于进厢, 出厢为控制工况, 2.0 m 吃水船舶正常出厢实测最大下沉量 16.46 cm, 上

下游水位稳定，富余水深大于 30 cm。

2) 基于实船试验数据，改进了下沉量预测公式，将船舶实际下沉量预测精度提高了 1 倍以上，为预测分析不同尺度及吃水的船舶的下沉量奠定基础。

3) 设计船舶 2.0 m 吃水试验中，每次均安全顺利通过了思林、沙沱升船机，按目前两座升船机运行水位协调机制，上下游水位变化在 10 cm 以内，船舶最大吃水提升至 2.0 m 是可行的。建议先将过机船舶吃水标准放宽至 1.8 m，待运行一段时间并收集到大量的资料后，逐步放宽至 2.0 m。

参考文献：

[1] 谢凯, 胡亚安, 周丰. 提高三峡船闸通过能力的若干措施研究[J]. 水运工程, 2012(1): 79-82.

(本文编辑 王璁)

(上接第 74 页)

3 结 语

1) 按照相关标准规范，运用强度回弹法、碳化深度值以及氯离子检测等方法对旧码头结构耐久性进行评价，并提出加固修补措施：对于混凝土破坏露筋，除锈并喷涂防锈剂，裂缝周围混凝土应凿除并重新浇筑，表面用碳纤维布加强；对于部分桩基，考虑采用补打灌注桩并与原有结构连成整体受力的加固方式；对于桩与桩帽连接处存在开裂、错位、桩头斜向开裂的情况，采取加大桩帽与桩基连成一个整体受力的加固方式。极大延长了码头的使用寿命，为码头正常运营提供重要保障。

2) 由于前板桩承受较大土压力，因此在码头升级改造时应尤其注意复核其内力及位移，并对其进行耐久性评价，避免板桩变形过大、漏土而影响码头结构安全。

3) 针对前板桩高桩梁板码头的结构特点，结合升级改造后码头水深条件、靠系泊设施、使用

[2] 周华兴. 船舶进、出闸室(或船厢)速度的商榷[J]. 水道港口, 2001, 22(1): 14-17.

[3] 李中华, 胡亚安, 刘克平. 向家坝升船机承船厢设计水深标准[J]. 水运工程, 2016(12): 153-157.

[4] 吴澎, 曹凤帅, 严庆新. 船舶航行下沉量计算方法对比分析[J]. 中国港湾建设, 2010(S1): 38-41.

[5] 王新, 胡亚安, 黄群, 等. 升船机船厢防撞装置工作特性原型观测[J]. 水运工程, 2016(12): 204-208.

[6] 曹凤帅, 黄瑶. 船闸门槛水深研究进展[J]. 水道港口, 2018, 39(2): 162-166.

[7] 傅陆志丹, 胡亚安, 王新, 等. 景洪升船机 500 吨级船舶实船试验船厢水面波动特性研究[J]. 水运工程, 2020(7): 105-110.

[8] 包纲鉴. 船舶行驶在船厢中最大下沉量的确定[J]. 水利水电科学, 1991(3): 279-282.

荷载等各种因素，采取在码头后方新建 10 m 宽高桩平台与原码头连接成整体受力的方案，经济适用，并成功将原 5 000 吨级码头升级为 30 000 吨级，对类似升级改造工程具有借鉴意义。

参考文献：

[1] 吴国鑫, 姚玮雯, 贝建忠. 老码头升级改造中窄长高桩结构设计优化[J]. 水运工程, 2019(9): 113-118.

[2] 沈迪, 葛晓丹. 前板桩高桩承台码头结构计算[J]. 水运工程, 2018(1): 69-71, 99.

[3] 中交四航工程研究院有限公司. 水运工程水工建筑物检测与评估技术规范: JTS 304—2019[S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2019.

[4] 任增金, 只红茹. 前板桩高桩码头结构形式的应用[J]. 水运工程, 2014(3): 107-110.

[5] 张多, 杨杰. 组合型前板桩高桩承台结构研究与应用[J]. 水运工程, 2017(11): 17-21.

(本文编辑 郭雪珍)