



向家坝升船机船舶吃水控制标准

原型观测分析及应用实践^{*}

孙志峰¹, 王新², 刘芳枝¹

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038; 2. 南京水利科学研究院
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要: 向家坝升船机投入试通航后, 由于金沙江下游河段实际航行的1 000吨级船舶与升船机设计过机船舶主尺度匹配性差, 船舶过机装载率较低。为进一步提高升船机通过能力及船舶运输经济效益, 开展船舶过机吃水原型观测分析, 逐步放开船舶过机吃水控制标准非常必要。通过大量过机船舶不同吃水、航速的进出厢试验原型观测, 对影响过机船舶吃水控制标准的航道水位变幅、船厢水深变化, 进出船厢航速、下沉量等因素进行系统的分析研究。结果表明, 向家坝升船机过机船舶吃水提升至2.4 m, 依然有30 cm以上的防触底安全富余量, 满足船舶安全过机要求。

关键词: 升船机; 船舶吃水; 原型观测; 成果; 应用

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0101-05

Prototype observation and application of ship draught control standard for Xiangjiaba ship lift

SUN Zhi-feng¹, WANG Xin², LIU Fang-zhi¹

(1. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute,
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, Nanjing 210029, China)

Abstract: After Xiangjiaba ship lift is put into trial navigation, due to the poor matching between the actual navigation of 1 000 DWT ships in the lower reaches of Jinsha River and the main scale of the designed ship, the loading rate of the ship is low. To improve the traffic capacity of ship lift and the economic benefit of ship transportation, it is very necessary to carry out prototype observation of ship draught and gradually release the control standard of ship draught. Through prototype observations of entering and leaving the chamber of a large number of ships with different draughts and speeds, some factors about the draught control standard, such as the fluctuation of channel water level, water depth variation of ship chamber, speed and sinkage of ships entering and leaving the ship chamber, are systematically analyzed. The results show that there is still a safety clearance of more than 30 cm even if the ship draught is raised to 2.4 m.

Keywords: ship lift; ship draught; prototype observation; achievement; application

向家坝升船机位于四川省宜宾市和云南省水富市交界的金沙江下游河段, 主要由上游引航道、上闸首、船厢室段、下闸首和下游引航道5部分组成。最大提升高度为114.20 m, 是目前建成的

提升高度最大的升船机^[1]。按IV级航道标准设计, 设计代表船型为2×500吨级一顶二驳船队, 尺寸为111.0 m×10.8 m×1.6 m(长×宽×吃水), 同时兼顾1 000吨级单船(85.0 m×10.8 m×2.0 m),

收稿日期: 2020-12-20

*基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51779151)

作者简介: 孙志峰(1978—), 男, 高级工程师, 从事流域枢纽运行管理工作。

船厢设计水深 3.0 m^[2]，过机船舶设计最大吃水 2.0 m，进出船厢航速控制在 0.5 m/s 以内。2018 年 5 月，向家坝升船机通过试通航验收，进入试运行阶段。由于金沙江下游航运发展的局限性，船舶建造标准化程度较低，与其他投运的景洪、思林、沙沱等多座大型升船机一样，也存在实际通航船型与升船机设计船型不匹配问题^[3-4]。实际通航情况表明，目前经常通过向家坝升船机的船舶约 160 条，主要为干散货和自卸砂船，满载吃水基本集中在 2.5~3.0 m，满载吃水在 2.0 m 以内的仅为 7%，如按设计的 2.0 m 船舶吃水控制标准，绝大部分船舶面临减载，过机装载率较低，对船舶的航运效益以及升船机的通过能力产生很大的影响。

根据 GB 51177—2016《升船机设计规范》规定，升船机承船厢有效水深与船舶吃水比 H/T 可取 1.25~1.40^[5]。向家坝升船机承船厢有效水深 H 为 3.0 m，则船舶过机允许吃水深度 T 可为 2.14~2.40 m。而目前设计吃水控制为 2.0 m，船舶过机吃水深度标准理论上具备提升的空间^[6]。因此，在目前向家坝升船机试通航运行条件下，开展过机船舶吃水原型观测分析，论证船舶吃水控制标准提升的可行性，并在保障安全的前提下，逐步放开船舶过机吃水控制标准具有重要意义。

1 原型观测概况

在保障通航安全的前提下，安排部分社会船舶在设计 2.0 m 吃水的基础上逐步提高吃水至 2.2、2.3 和 2.4 m，通过对不同吃水的社会过机船舶开展多样本观测，掌握不同主尺度、不同吃水的船舶进出船厢航速、下沉量、船厢水面波动特性；为体现不同因素的影响，对 2 艘船舶船厢停泊位置和进出厢航速进行控制干预，分析船舶下沉量特性和富余水深的普遍性变化规律。另外，上、下游水位变化会对船舶进出船厢产生较大影响，故对上、下游航道水位变化规律也开展了长周期的观测分析，为科学提升过机船舶吃水标准奠定基础。

1.1 观测内容与方法

原型观测内容主要包括船舶的位置、航速、

下沉量和船厢水面波动等。其中船舶的位置、航速、下沉量采用超高精度自动跟踪式全站仪进行测量，通过在升船机上、下游各布置 1 台全站仪，自动追踪过机船舶尾部安装的目标棱镜，获取 3 个方向的坐标从而计算得到船舶航行过程中的位置、航速、下沉量。船厢水面波动采用高精度无线波高传感器测试，通过在船厢一侧沿程布置 5 个测点，测量得到船厢内水面波动特性。

1.2 观测工况

本次原型观测涉及船舶 28 条，船舶进出厢 124 航次，其中进厢 60 航次、出厢 64 航次，重载 79 航次、空载 45 航次。其中小于 2.0 m 吃水 45 航次、2.0 m 吃水 12 航次、2.2 m 吃水 44 航次、2.3 m 吃水 18 航次、2.4 m 吃水 5 航次。

2 观测成果

2.1 上、下游引航道水位变幅

2.1.1 上游引航道水位变幅

2014 年 1 月—2018 年 12 月连续 5 年时间上游引航道水位小时变幅情况如图 1 所示。从图 1 可知，上游水位小时变幅基本在 0.2 m 内，平均为 0.031 m，超过 0.3 m 仅 5 次，最大小时变幅 0.45 m。可见，上游水位变幅对升船机影响相对较小，若上游对接保持时间 20 min 左右(船舶进出厢时间之和)，则正常水位变化在 5~10 cm 内，极端情况约 15 cm。

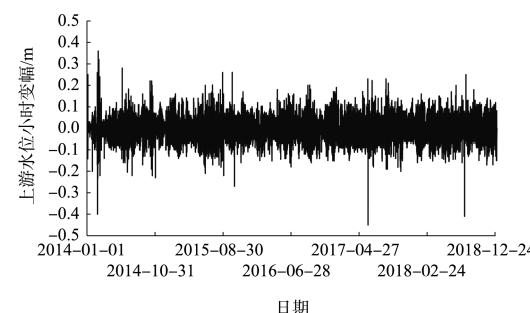


图 1 上游水位小时变幅

2.1.2 下游引航道水位变幅

2018 年 2 月—2019 年 3 月向家坝升船机下游引航道水位总体变化过程如图 2a) 所示。从图 2a) 可知，在 6 月末至 10 月末的汛期泄洪时段，

下游水位变幅较大, 约 10 m (270~280 m 高程之间); 在非泄洪时段, 水位变化稳定, 基本在 266~269 m 高程范围内呈现规律性波动。随机选取汛期泄洪某时段分析发现, 在泄洪工况下, 下游水位最大小时变幅基本在 0.4~0.5 m, 但每小时内局部时段存在瞬时变幅较大的现象 (如在 14 min 内水面降低 0.27 m), 对升船机下游对接影响较大。随机选择连续 3 d 非泄洪时段, 下游水位变化过程见图 2b), 在非泄洪工况下, 受电站调峰影响, 下游水位呈现周期性变化规律, 与电站的发电负荷密切相关, 最大小时变幅可在 0.8~0.9 m。向家坝下游水位变幅大、变率快是我国大型升船机运行面临的普遍性技术难题, 但向家坝升船机首次采用了辅助闸室, 可以彻底解决船厢对接效率和船舶进出船厢安全问题。

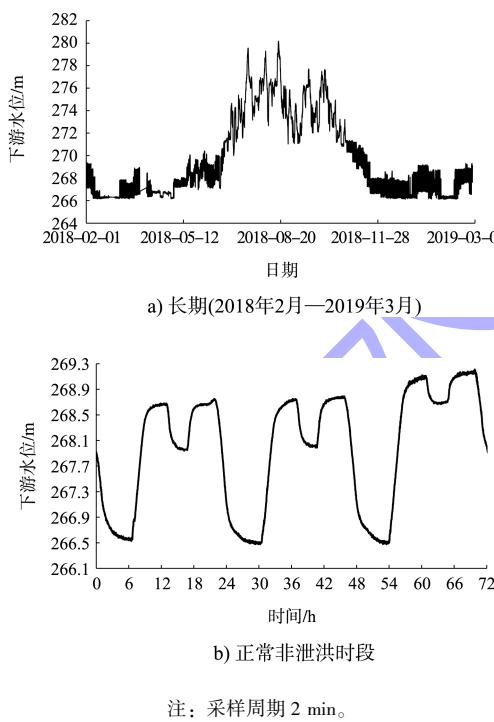


图 2 下游水位变化过程线

2.2 船厢水深变化

2.2.1 对接引起的船厢水深变化

船厢上、下游对接原型观测共 63 次, 船厢上、下游对接后, 以船厢水深减小为主, 仅出现 3 次船厢水深增大情况; 对接船厢水深最大减小值为 14 cm, 最大增大值为 7 cm, 63 次对接船厢水深平均减小约 4 cm, 水深减小 5~8 cm 者占比较

大。船厢水深变化过程表明, 受船厢门及闸首通航门开门的影响, 对接初期船厢水深发生较大降幅, 对接后船厢水深变化很小。

2.2.2 船舶进出厢过程船厢水深变化

船舶进出船厢过程中船厢水深是一个重要参数。124 个航次船舶进出厢时的水深概率分布如图 3 所示。从图 3 可知, 船厢水深近似正态分布, 船厢水深在 300~302 cm 之间概率最大; 最大船厢水深为 310 cm, 最小船厢水深为 293 cm, 平均船厢水深约 300.5 cm。目前运行方式下, 船厢水深满足 (300 ± 10) cm 的要求, 船厢水深增大对船舶进出厢安全有利, 最小水深大于 290 cm 是有保障的。

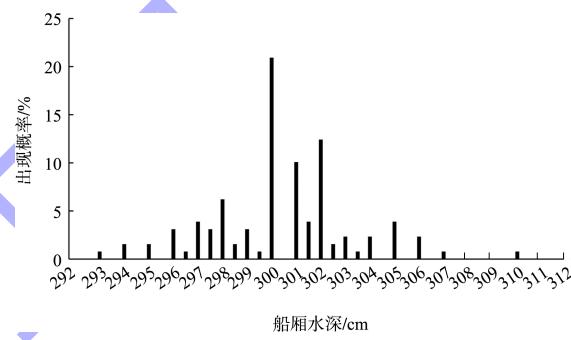


图 3 船舶进、出船厢水深

2.3 船舶进、出厢速度

2.3.1 重载出厢航速

重载船舶正常出厢 40 个工况航速分析表明, 最大航速基本在 0.5 m/s 左右, 基本出现在船尾出厢时刻, 最大航速 0.3~0.6 m/s, 占比 87.5%; 平均航速 0.20~0.35 m/s, 占比 82.5%, 船舶吃水 2.3 m 和 2.4 m 时, 出厢平均航速均未超过 0.35 m/s, 平均航速约为最大航速的 0.6 倍。

2.3.2 重载进厢航速

重载船舶正常进厢 31 个工况航速分析表明, 最大航速在 0.3~0.8 m/s 之间, 相对分散, 主要出现在船首进厢时刻, 随后船舶减速缓慢进厢, 因为向家坝升船机船厢较长, 在船首进厢时刻航速依然较大, 但进厢不是富余水深的控制工况, 从保证通航效率看, 航速略大也是可接受的; 船舶重载进厢平均航速与出厢基本一致, 为 0.3 m/s 左右, 平均航速约为最大航速的 0.55 倍。

2.3.3 空载出厢航速

空载船舶出厢 19 个工况航速分析表明, 最大航

速为 $0.7\sim0.8\text{ m/s}$ ，相对重载出厢明显增大，平均航速为 0.4 m/s 左右，相对于重载出厢其平均航速有所增大，主要是因为空船出厢阻力明显减小，与两侧碰撞的能量也较小，因此船舶速度普遍较大。

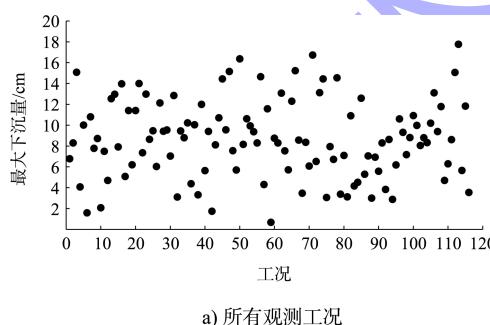
2.3.4 空载进厢航速

空载进厢 23 个工况航速分析表明，船舶空载进厢，最大航速为 $0.3\sim0.8\text{ m/s}$ ，相对分散，与重载进厢基本相当；平均航速为 $0.3\sim0.5\text{ m/s}$ ，最大值为 0.533 m/s ，比重载进厢略大。

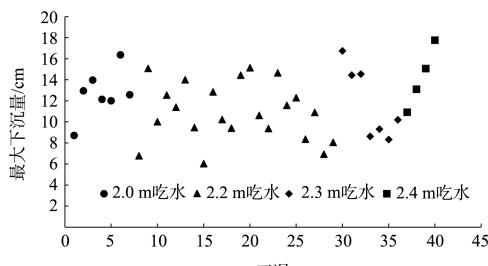
2.4 船舶下沉量

2.4.1 船舶正常进、出厢下沉量

不同船舶吃水的正常进、出厢工况船舶最大下沉量见图 4a)。可以看出，船舶正常进出厢过程中，最大下沉量均在 18 cm 以内，最大 17.77 cm ，总体上看船舶下沉量不大，统计获得重载出厢、重载进厢、空载出厢、空载进厢最大下沉量的平均值分别为 11.70 cm 、 6.84 cm 、 8.94 cm 、 5.85 cm 。不同吃水深度(2.0 m 、 2.2 m 、 2.3 m 、 2.4 m)下重载出厢 40 个工况船舶最大下沉量如图 4b) 所示。可以看出，随着船舶吃水增大，在断面系数逐渐减小的情况下，船舶的最大下沉量变化不明显，基本处于 $[(12\sim13)\pm5]\text{ cm}$ 的变化范围。



a) 所有观测工况



b) 不同吃水对比

图 4 船舶最大下沉量

图 5 为典型的船舶下沉量过程线。可以看出，在船舶的下沉量中水面波动引起的船舶下沉占据

较大比重，在正常进出厢情况下，航速引起的船舶下沉量较小，断面系数的影响体现不明显。

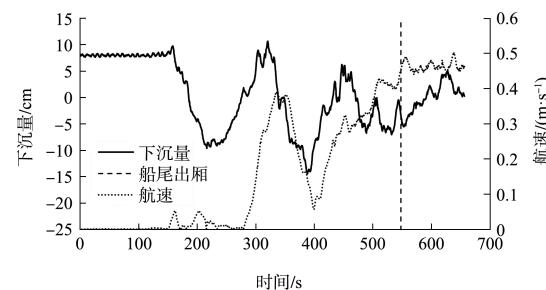
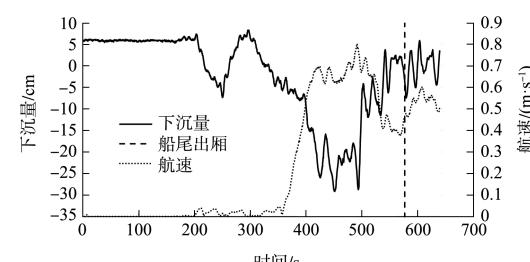


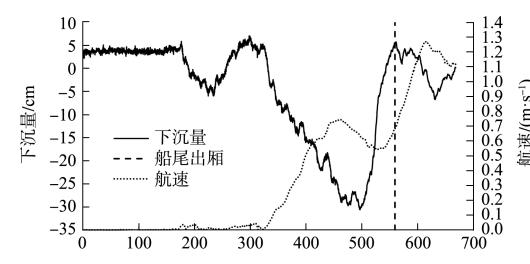
图 5 2.3 m 吃水时船舶出厢下沉量过程线

2.4.2 船舶快速出厢试验下沉量

为研究航速对船舶下沉的影响，对“东升9号”和“金川6号”2艘1000吨级吃水 2.3 m 船舶进行快速出厢试验，在船舶出厢过程中，持续加速到 0.5 m/s 以上，并保持快速出厢。其中2次出厢的航速和下沉量过程线如图 6 所示。可以看出，2次出厢过程相似，出厢速度均连续增加到 0.7 m/s 左右，并且都能够保持一段时间，船舶的下沉量相比于正常速度出厢明显增大，均达到 30 cm 左右，航速对船舶下沉量影响较大。同时，船舶下沉增大后，其航行阻力迅速增大，船舶操纵性变差，船舶速度已很难进一步提高，试验中 $0.7\sim0.8\text{ m/s}$ 最大航速基本是 1000 吨级 2.3 m 吃水重载船舶能够到达的最大出厢航速。



a) “东升9号”下游出厢



b) “金川6号”上游出厢

图 6 船舶快速出厢航速和下沉量过程线

3 船舶吃水控制标准

船厢水深 H 由船舶吃水 T 和富余水深 ΔH 组成, 根据大量原型观测分析可知, 富余水深 ΔH 主要由船厢对接误差、对接过程中(船厢开关门及船舶进出厢时间和)航道水位变化、船舶进出厢综合下沉量(进出厢引起的水面波动及船舶动吃水)、防触底安全富余量等组成。结合向家坝升船机现玚长周期、大量船舶的原观数据, 对富余水深各影响因素进行分析, 进而得到船舶吃水的控制建议:

- 1) 船厢对接误差可控制在 10 cm 以内。
- 2) 船厢对接过程中电站泄洪或调峰, 下游航道水位变化较大, 向家坝升船机下闸首设置了辅助闸室, 辅助闸首投用可保持水位稳定不变, 上游航道正常水位变化在 5~10 cm。
- 3) 超吃水船舶重载进出厢平均航速均在 0.3 m/s 左右, 最大下沉量均在 18 cm 以内, 为实时控制船舶进出厢航速, 在承船厢上下厢头安装了雷达测速装置, 精度为 0.05 m/s, 可实现船舶航速动态管控。
- 4) 关于防触底安全富余量取值, 目前规范没有统一定义和规定。参照《航道工程手册》中要求 I~Ⅲ 级航道船闸的不触底安全富余量应取 0.3~0.4 m; 三峡船闸过闸船舶的不触底安全富余量按 0.3 m 取值, 向家坝升船机船舶不触底的安全富余量也按 0.3 m 考虑。

综上, 向家坝升船机船舶过机允许吃水深度 T 可取 2.32 m, 满足升船机设计规范规定的 2.14~2.40 m 范围要求。

4 成果应用与相关问题对策

2019 年 3 月, 向家坝升船机过机船舶吃水控制标准暂提升至 2.20 m。截至 2020 年 10 月 31 日, 累计安全通过装载吃水 2.20 m 船舶 2 153 艘次, 货物约 160 余万吨; 其中下行 1 773 艘次, 上行 380 艘次。下行货物主要是矿建材料、煤炭、化肥等, 上行货物主要是硫磺, 少量水泥、粉煤灰等。相较于设计吃水 2.0 m 装载, 提升升船机货物通过

能力约 30% 以上, 船舶过机运输经济性提高, 过机需求保持稳定增长, 成果应用经济效益、社会效益显著。后续将在完善相关安全保障措施的基础上, 进一步放开过机船舶吃水控制标准至 2.30 m。另外, 针对实际运行管理中存在的一些问题, 提出如下对策和建议:

- 1) 由于过机船舶的船型多样化、装载吃水瞒报或误差、船舶底部中垂变形或有突出物等, 均可能造成船舶过机刮擦船厢底板的风险。在后续运行管理过程中应加强过机船舶标准引导, 增设船舶吃水检测及水下检查装备, 加强船舶安全检查, 强化过机船舶船员的安全警示教育等, 以保障船舶过机安全。
- 2) 由于承船厢对接及船舶进出厢过程对上下游水位变化要求极高, 应加强与电站水(电)调沟通联系, 建立水情信息实时共享机制, 及时采取投用辅助闸室等措施应对。
- 3) 辅助闸室的使用可消除下游航道水位波动对船厢水深的影响。实际应用中, 船舶过机允许吃水标准可实行差异化控制: 下行船舶吃水控制最大可为 2.42 m, 上行船舶吃水控制标准可为 2.32 m。

5 结论

- 1) 通过向家坝升船机长周期大量超吃水船舶进出船厢试验原型观测分析, 全面掌握了上、下游引航道水位波动、升船机对接船厢水深、船舶进出厢速度、船舶航行下沉量等参数变化特征, 为升船机吃水控制标准研究提供重要依据。
- 2) 在各项保障措施到位的情况下, 向家坝升船机过机船舶吃水提升至 2.4 m, 依然有 30 cm 以上的防触底安全富余量, 满足船舶安全过机要求。
- 3) 在吃水控制标准从 2.0 m 提升到 2.2 m 运行的一年多时间中, 升船机的通过能力和船舶航运效益大幅提升, 目前已初步具备进一步放宽至 2.3 m 和 2.4 m 的条件, 将进一步发挥显著的经济和社会效益, 促进金沙江下游水运事业发展与繁荣。

(下转第 119 页)