



金沙江向家坝升船机实船试航研究

高 策, 孙志峰, 张春光

(中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为检验向家坝升船机通航条件, 协调部、省、市三级航运主管部门, 明确实船试航工作流程及组织实施模式, 对“船-机-水”相互适应性进行了枯水期、丰水期实船试航试验。结果表明, 升船机及助导航设备设施性能良好, 船舶安检调度及航路航法科学合理。泄洪工况下, 下游引航道及口门区通航水流条件较差, 对通航影响较大, 研究应用“无人机+自动跟踪浮子”及“三维立体视觉”水流条件观测新方法, 提出电站出流 8 500 m³/s, 泄洪不超 2 200 m³/s 双控通航流量标准, 试航成果为后续升船机试通航运行及通航验收提供数据支撑。

关键词: 升船机; 实船试航; 原型观测; 向家坝水电站

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0082-06

Seaworthiness test of actual ships for Xiangjiaba ship lift in Jinsha River

GAO Ce, SUN Zhi-feng, ZHANG Chun-guang

(China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China)

Abstract: To evaluate the navigable conditions of the Xiangjiaba ship lift, we coordinate with the shipping authorities at ministerial, provincial, and municipal levels to define the work process and organization mode for seaworthiness tests of actual ships and carry out prototype tests of “ship-ship lift-water” mutual adaptability in the dry and wet seasons. The results show that the ship lift and facilities providing navigation aids are in good condition, and the scheduling of ship security inspection and navigation routes are scientific and rational. Under flood discharge conditions, the navigable flow conditions in the downstream approach channel and the entrance area are poor, which has a great impact on navigation. Hence, we develop and apply a new method of the “unmanned aerial vehicle(UAV) + automatic tracking float” and “three-dimensional(3D) vision” to observe flow conditions. We propose the dual-control navigable traffic standards of the outflow from the power station of 8 500 m³/s and the flood discharge of no more than 2 200 m³/s. The results provide data support for the follow-up trial operation and navigation acceptance of the ship lift.

Keywords: ship lift; seaworthiness test of actual ships; prototype test; Xiangjiaba hydropower station

向家坝水电站是金沙江流域开发的最后一个梯级, 位于四川省与云南省交界处的金沙江下游河段, 工程以发电为主, 同时改善航运条件、防洪、灌溉、拦沙以及对溪洛渡水电站进行反调节等综合作用。枢纽工程由混凝土重力坝、右岸地下厂房、左岸坝后厂房、通航建筑物和两岸灌溉取水口组成^[1], 电站枢纽布置见图 1。向家坝枢纽

通航建筑物布置在左岸, 为全平衡齿轮爬升螺母柱保安式一级垂直升船机, 主要由上游引航道、上航槽、船厢室段、下闸首和下游引航道等 5 部分组成, 全长约 1 530 m, 最大提升高度 114.20 m, 最小提升高度 92.75 m, 按 IV 级航道标准设计, 代表船型为 2×500 t 级一顶二驳船队尺寸为 111.0 m×10.8 m×1.6 m(长×宽×吃水深), 同时兼顾 1 000 t 级

单船尺寸为 $85.0\text{ m} \times 10.8\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ ^[2]。上游最高通航水位为 380.00 m , 即水库正常蓄水位, 上游最低通航水位为 370.00 m , 下游最高和最低通航水位分别为 277.25 和 265.80 m , 船厢设计水深 3.00 m ,

通航净空 10.00 m , 设计年货运量 112 万 t 。按照向家坝升船机通航验收工作安排, 实船试航分两个阶段, 第一阶段在试通航前完成实船试航试验; 第二阶段在通航验收前完成实船试航全部检验工作^[3]。



图1 向家坝水电站枢纽布置平面

1 试航准备

1.1 成立组织机构

根据四川、云南两省航务海事机构意见^[4], 向家坝升船机实船试航相关工作由电站业主负责实施, 省市行业主管部门协调参与, 升船机运行管理单位提出“电站实施+行业指导+专家支撑”实船试航组织模式, 联合宜宾、昭通地方海事及向家坝升船机设计、施工、监理、建设等单位, 并邀请金沙江行船经验丰富的船长组建试航指挥部, 统一领导监督实船试航工作, 并对其重大问题进行研究决策。指挥部下设通航调度组、升船机运行组、船舶观测组、水力学及航道观测组、驾引技术组、安全保障组等6个专业组, 各司其职, 保障实船试航工作顺利开展。

1.2 试航船舶选择

向家坝升船机过机船型参差不齐, 船舶尺度、功率差异化较大, 船舶标准化处于零起步状态, 实际过机船舶与设计代表船型出入较大。经调研发现金沙江段在航船型达100多种, 船长、船宽、满载吃水深度分别在 $13.0\sim107.0\text{ m}$ 、 $2.0\sim19.2\text{ m}$ 、 $0.4\sim4.9\text{ m}$ 范围内。通过分析宜宾、乐山、泸州、昭通4市共500余艘金沙江在航船舶信息, 以船舶载质量、船宽为分析变量, 其中船宽为控制变

量, 结合升船机对过机船舶吃水及净空高度等要求^[5], 最终选择26艘船舶的技术要求为: 1) 船舶总长 $\leq 85.0\text{ m}$, 船舶总宽 $\leq 10.8\text{ m}$ 。2) 船舶最大吃水 $\leq 2.3\text{ m}$ 。3) 船舶自水线以上最大净空高度 $< 10.0\text{ m}$ 。4) 载质量 $\leq 1000\text{ t}$ 。

1.3 试航方案编制

为全面做好实船试航工作, 升船机运行管理单位编制《向家坝升船机试航方案》, 通过长江航务管理局, 四川、云南两省各级航务海事机构及业内专家审查, 主要内容包括试航组织机构、试航应具备的条件、试航总体安排、测试内容、试航船舶选择、试航技术要求、试航安全保障及试航工作的组织实施等。为细化试航指挥部下设各专业组的工作内容, 升船机运行管理单位在《向家坝升船机试航方案》基础上编制更具实操性的《向家坝升船机试航实施方案》《向家坝升船机试航应急方案》以及包含呼叫应答对话在内的《试航工作手册》, 组织开展实船试航前船舶安全检查和船员培训, 并在试航前安排过机预演。

1.4 配套设施建设

实船试航前, 试航江段航道需具备通航条件。升船机通航配套设施包括航道助航设施和升船机通航安全管理系统, 其中助航设施为向家坝

坝址上游 3 km 和下游 2 km 范围内的航标设施、航道标牌和航行水尺, 坝上最小航道尺度 3.0 m×60 m×480 m(水深×航宽×弯曲半径), 坝下最小航道尺度 2.7 m×50.0 m×560.0 m, 航标按一类配布并满足夜航要求, 维护正常率不低于 99%, 航道维护等级为一类; 升船机通航安全管理系统建设范围为向家坝坝址上游 3 km 到下游 7 km, 包括 VHF(甚高频)、VTS(船舶交通服务)、AIS(船舶自动识别系统)、CCTV(图像通信系统)等子系统。升船机通航配套设施建设工程于 2017 年 8 月正式实施, 实船试航前建设完成并通过行业主管部门组织的验收。升船机上下游引航道及口门区经水下地形测量和扫床测试等, 满足通航水深要求。

2 试航实施

2.1 试航工况选取

结合电站投产发电以来(2012—2017 年度)机组出力及电站泄洪情况, 选取枯水期机组最小出力,

丰水期机组满发及不满发出力(不泄洪、泄洪)等多种常遇典型工况。2018 年 1 月, 开展第一阶段枯水期实船试航, 通航流量范围为 1 600~4 600 m³/s, 电站未泄洪, 上游航道水位 375.70~373.75 m, 下游航道水位 269.45~265.96 m。2018 年 9 月及 2019 年 7—10 月, 开展第二阶段汛期实船试航, 通航流量范围为 6 800~9 500 m³/s, 其中泄洪流量范围为 1 000~3 100 m³/s, 上游航道水位 376.10~374.21 m, 下游航道水位 273.60~271.55 m。

2.2 试航内容

向家坝升船机实船试航均在华龙码头(坝址下游 7 km)至上游锚地(坝址上游 3 km), 共计 10 km 范围水域内开展, 按照“先上行、后下行、先空载、后重载”的原则过机, 第二阶段汛期实船试航重点测试范围为向家坝坝下重大件安检码头至辅助闸室区间。试航船舶上游集结地在上游锚地, 下游集结地为华龙码头。试航范围见图 2。

实船试航主要观测内容见表 1。

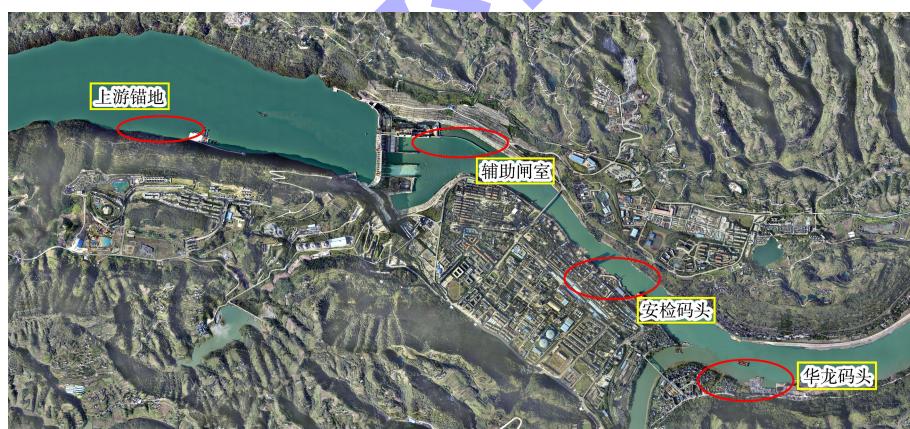


图 2 实船试航范围

表 1 实船试航主要观测内容

观测类别	观测内容
升船机运行性能测试	升船机主要运行参数(对接、开关门、升降、船舶进出厢时间等); 船舶进出船厢时, 水动力引起的垂直载荷变化对船厢对接锁定机构受力影响, 进一步观测设计水位差±10 cm 对接状态下, 船厢门开启过程中船厢对接锁定机构受力变化情况; 客船应急疏散时间
水力学测试	升船机下游引航道及口门区连接段水位、比降、表面流速/流向及流态(含横向、纵向和回流)及辅助闸室、引航道内水位波动测量; 船舶过升船机承船厢时航行动吃水测试; 船舶进出升船机时船厢内水位波动过程测量; 观测船厢升降运行过程中, 船厢水面波动情况及船舶停泊状态; 在设计允许的对接水位差情况下, 船厢门开启时测试厢内船舶系缆力和水位波动

续表1

观测类别	观测内容
船舶测试	船舶进出升船机上下闸首航槽及船厢时的航速测试(重点测试船舶自进入上下闸首航槽起,至船厢1/2段范围内的航速与行程对应关系,并做好航速、行程、时间的记录); 测量航迹线、航速、下沉量、航向角、漂角、微倾等; 测量试航船舶通过升船机时引航道风速风向,观察风对船舶进出船厢和引航道的影响; 对船舶主机工况进行观测; 船舶在靠船墩、船厢、辅助闸室、上下游靠船墩(趸船)、重大件码头、下游引航道靠泊及停泊候机条件测试; 船舶从发航直到出升船机的历时记录; 升船机船厢、上下口门区驾引操作,记录通过升船机船舶航路全过程用车用舵情况
通航调度与通信导航验证测试	验证向家坝升船机调度规程及通航调度系统的适应性; 升船机控制室与试航船舶之间的通信联络测试; 升船机本体通信指挥系统及引航道通航指挥信号、通信导航信号试运行验证; 升船机相关通信导航设备设施的可靠性、抗干扰性和有效性检验
航道航标设施匹配性验证	航路航法的合理性验证; 助航标志布设的合理性检验

2.3 观测方法

2.3.1 升船机运行测试

通过向家坝升船机计算机监控系统操作升船机设备,记录升船机主要运行参数,通过客船实船试航船厢人员疏散应急演练,测试人员疏散时间。

2.3.2 船舶进出厢测试

1)对接锁定机构受力特性观测。船厢对接过程产生的荷载通过支承油缸传递到锁定机构,锁定机构受力可通过测量支承油缸受力获得。采用传统的应变测试方法,通过在锁定机构的支承油缸布置应变计,测量向家坝升船机各种工作状态下锁定机构的受力特性。

2)船厢水动力特性观测。在船厢右侧沿程布置11支量程1.5 m的高精度波高计,测量船厢内水面波动变化特性,计算船厢重力变化。

3)船舶进出厢航速与下沉量观测。采用徕卡TS60超高精度自动跟踪式全站仪观测船舶的下沉量。船舶进出船厢时,全站仪架设在岸上,360°反射棱镜布置于船尾,船舶行驶过程中,全站仪自动追踪棱镜并获取3个方向的坐标,计算船舶运行全过程的下沉量,同时获得船舶的位置及航行速度。

2.3.3 水流条件及船舶航行测试

1)引航道水动力特性观测。第一阶段枯水期实船试航期间,由于上下游水位波动较小,通过

在上航槽左岸382.0 m平台和下闸首右岸296.0 m平台各布置一支量程为35.0 m的雷达水位计,观测引航道水面波动。第二阶段汛期实船试航期间,下游引航道内水位波动较大,采用大范围波动“三维立体视觉”测试分析系统,基于计算机立体视觉双目视差原理,利用高分辨率工业相机,将波浪运动基本理论与数字图像处理技术相结合,通过多时刻立体图像序列构建大范围三维水面,提取波浪数据,有效地解决下游引航道波动测试难题。

2)口门区通航水流条件观测。第一阶段枯水期实船试航期间,由于电站不泄洪,采用船舶定位接触测量方法法定点观测表面流速点处流速。第二阶段汛期实船试航期间,口门区观测条件恶劣,采用口门区流速流场“无人机+自动跟踪浮子”测试技术^[6],利用无人机对安装GPS定位系统的浮子进行全自动定点抛投,浮子入水后,利用GPS定位技术计算浮子的运动速度和方向,从而获得水流的流速、流向,有效解决下游引航道口门区通航水流条件观测难题。

3)船舶航行特性观测。船舶航行特性包括航速、航迹线、航向角、漂角、纵倾、横倾、用车、用舵等多个参数。通过在船舶中轴线上布置SDI-600GI惯性导航系统(GPS/INS组合导航设备,内部有3个陀螺、3个加速度计和NovAtel OEMV3接收机,采用GPS和IMU紧耦合技术,提供比单一GPS

导航或单一惯性导航系统更高精度的三维位置、速度和姿态信息)，直接测量获得船舶航速、横倾、纵倾、方位角及位置经纬度，并通过后处理获得船舶航迹线及漂角。

3 试航结论及成果应用

3.1 主要结论

过机历时 (48.90 min) 与可研阶段设计值 (45.98 min) 相差不大，船舶进出厢船速控制在 0.5 m/s 以内，下沉量在 10~18 cm，不存在触底风险。非泄洪工况下，下游引航道内及口门区水面平稳，波动不足 10 cm，最大纵向流速均小于 1.00 m/s，最大横向流速均小于 0.30 m/s，回流流速局部超标(规范要求最大纵向流速小于 1.00 m/s，最大横向流速小于 0.30 m/s，最大回流流速小于 0.40 m/s)，但超标区域已远离航线，对船舶进出引航道的航行安全影响较小；泄洪工况下，下游引航道最大波高与泄洪流量呈线性关系，且在泄洪流量相同的情况下，出库流量越大，最大波高也越大(有效最大波高 0.86 m)，口门区最大纵向流速 2.81 m/s，最大横向流速 0.90 m/s，最大回流流速 1.18 m/s。

3.2 成果应用

1) 提出电站出流和泄洪流量升船机双控通航流量标准。突破口门区流速限制，创新性的引入横摇角标准，经充分论证，综合认为横摇角在 6° ($\pm 3^\circ$) 以内基本能够满足安全航行需要。基于此提出了汛期试航终止条件及试通航期最高通航流量标准(电站出流 8 500 m³/s，泄洪不超 2 200 m³/s 双控制，并提出不同船舶功率、装载吨位的分级通航标准)，实现泄洪工况下的试通航，为相关规范标准的补充完善做出实践积累。

2) 提高过机船舶吃水控制标准。试验表明，2.0~2.3 m 吃水船舶正常速度出厢，平均航速 0.274 m/s，最大航速平均值 0.465 m/s(下沉量在 18 cm 以内)；2.3 m 吃水重载船舶能够到达的最大出厢速度为 0.700~0.800 m/s(下沉量在 30 cm 以内)。在保障安全前提下，经广泛征求意见，试

通航期间过机船舶吃水设计从 2.0 m 提高到 2.2 m，提升了通航效益。

4 试航特点、难点

4.1 试航组织难度、规模较大

向家坝升船机位于向家坝枢纽左岸侧，受电站所处河段天然地形限制，升船机下游引航道布置长度受限，电站泄洪时，泄洪水流斜冲下游引航道口门区及连接段，口门区横向流速、回流流速、波浪较大，对船舶航行影响明显。另电站运行受电网影响，弃水现象较多，因此出现虽然电站总出库流量相同，但是发电流量与泄洪流量组合不同，导致枢纽河段通航环境差异较大。为保障升船机后续安全运行，需要更多罗列不同的组合工况，向家坝升船机共开展 72 种不同工况下实船试航试验，试航组次多达 112 次，参试船舶总计 26 艘，参试人员近 70 人，第二阶段汛期实船试航跨越 2 个汛期。

4.2 汛期试航水流条件观测难度大，安全风险突出

第二阶段汛期实船试航期间，由于电站泄洪，下游引航道口门区涌浪较大，无法采用第一阶段枯水期实船试航测量方法对口门区通航水流条件进行观测，采用口门区流速流场“无人机+自动跟踪浮子”测试技术及引航道内部大范围波动“三维立体视觉”测试分析系统^[7]，解决大流量泄洪恶劣观测条件下的口门区大范围流场测试难题。同时，为保障汛期实船试航安全，配备 2 艘大功率拖轮作为应急保障船舶对参试船舶进行护航，协调海事管理部门加强对实船试航江段秩序管控，试航前编制专项安全保障措施及应急预案，逐级开展安全技术交底，试航期间随船安排有经验的船长进行驾引指导。

4.3 汛期试航窗口期短

向家坝枢纽上游干支流水库众多，统一调控困难，汛期受各电站泄水影响，来水的不确定性显著增加，水雨情预见期相应缩短，在汛限水位强监管新常态下，升船机汛期实船试航预报期一般为 1~2 d，试航窗口期一般为 1~3 d。为保证第

二阶段汛期实船试航如期开展,更多地掌握船舶观测数据,为分析论证可安全通航的流量标准提供更多基础数据,提出集中试航与普适性试航相结合的方式。集中试航为短时间试航,旨在探索最高通航流量标准;普适性试航主要利用申请过机船舶进行试航,对相同流量级下的不同尺度船舶过机情况进行对比分析,不但节约租船成本,同时获取大量原观数据,对制定科学合理的分类分级过机通航流量标准具有重大指导意义。

5 结语

1)明确向家坝升船机实船试航与验收的先后顺序,开展实船试航前助航设施建设验收、实船试航方案编制、上下游航道查验开通等相关行政管理事项审批流程及实船试航实施的组织模式,确保实船试航的顺利开展。

2)针对大流量泄洪工况下通航水流条件观测难题,研究应用口门区流速流场“无人机+自动跟踪浮子”测试技术、“三维立体视觉”大范围波动测试分析系统,建立“升船机-船舶-水动力学”一体化观测技术,显著提升通航领域原型观测技术水平。

3)探索并建立考虑船舶横摇的通航安全控制

(上接第51页)

对于部分重要货类,例如LNG、原油、铁矿石等重要能源物资及生产原材料,应着眼服务保障国家经济安全和供应链稳定,提高战略储备能力,适度超前建设形成码头能力,增强港口端的能力保障度。

参考文献:

- [1] 彭玉生,丁敏,张志霞,等.“十三五”期全国沿海港口发展思路[J].水运工程,2016(10):13-17.
- [2] 郝军,齐越,王达川,等.沿海港口发展环境及适应性分析[J].水运工程,2015(6):70-74.
- [3] 丁文涛,王达川,齐越,等.2018年沿海港口基本建设回顾[J].中国水运(下半月),2019,19(11):53-54.
- [4] 交通运输部.水运“十四五”发展规划[R].北京:交通运输部,2021.
- [5] 朱善庆,陈建新.2015年沿海港口基本建设回顾[J].

新标准,构建融合“船-机-水”多因素的升船机通航安全综合评价体系及标准,提出机组出流和泄洪流量双控的通航流量标准,解决山区河流通航安全评价技术难题。

参考文献:

- [1] 潘江洋.向家坝工程规划设计历程及关键技术研究与实践[J].中国三峡,2012(11):44-49.
- [2] 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.
- [3] 水电水利规划设计总院.《关于成立金沙江向家坝水电站升船机特殊单项工程委员会及印发验收工作大纲的通知》:水电规办[2018]34号[R].北京:水电水利规划设计总院,2018.
- [4] 交通运输部.《关于明确向家坝枢纽河段通航行政管理有关事宜的函》:交办水函[2017]1105号[R].北京:交通运输部,2020.
- [5] 王新,孙志峰.基于升船机实船试验的船舶吃水控制标准影响因素分析[J].水道港口,2020,41(5):578-584.
- [6] 王新,周承芳,韩俊,等.一种水流流速现场测试方法[P].中国专利:CN111308123A,2020-06-19.
- [7] 陈诚,王新,李子阳,等.基于无人机自标定的表面流场测量方法[J].水利水电科技进展,2020,40(4):39-42,50.

(本文编辑 赵娟)

中国港口,2016(5):6-8.

- [6] 朱善庆,陈守勇.2014年沿海港口基本建设回顾[J].中国港口,2015(2):1-3.
- [7] 扬懿,朱善庆,史国光.2012年沿海港口基本建设回顾[J].中国港口,2013(2):9-10.
- [8] 姚海元,扬懿,靳廉洁,等.我国沿海主要港口布局规划方案深化研究[J].综合运输,2017,39(10):10-14.
- [9] YAO H Y, WANG D C, LI Y J, et al. Analysis on the layout and capacity adaptability of China's coastal iron ore unloading terminals[J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2021, 671(1): 012008.
- [10] 齐越,郝军,王达川,等.沿海港口煤炭专业化运输系统适应性探讨[J].水运工程,2017(5):69-72.
- [11] 贾大山,徐迪,蔡鹏.2020年沿海港口发展回顾与2021年展望[J].中国港口,2021(1):4-16.

(本文编辑 王传瑜)