



# 向家坝日调节对中嘴码头运行的影响

张 湛<sup>1</sup>, 刘亚辉<sup>1</sup>, 何冷慧<sup>2</sup>, 张绪进<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400016;  
2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

**摘要:** 为分析向家坝水电站日调节运行对下游中嘴码头通航水流条件的影响, 建立 1:100 正态物理模型, 对向家坝水电站典型日调节工况进行模拟, 分析日调节非恒定流引起的中嘴码头水域流速、水位和比降等通航水力要素的变化过程, 同时结合流场分布资料和自航船模试验, 研究日调节对船舶航行以及进出港靠泊的影响。结果表明, 电站按照拟定的水位变幅进行日调节时, 码头河段水位变幅未超过电站运行调度规程允许值, 水流条件满足船舶航行要求, 船舶可以正常进出港靠泊作业, 对码头运行影响较小。研究成果可为电站日调节调度运行提供参考。

**关键词:** 非恒定流; 日调节; 物理模型; 通航条件

中图分类号: U618; TV737

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0145-06

## Influence of Xiangjiaba daily regulation on operation of Zhongzui Wharf

ZHANG Zhan<sup>1</sup>, LIU Yahui<sup>1</sup>, HE Linghui<sup>2</sup>, ZHANG Xujin<sup>1</sup>

(1. Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;  
2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** To analyze the influence of daily regulation operation of Xiangjiaba Hydropower Station on the navigable flow conditions of downstream Zhongzui Wharf, a 1:100 normal physical model is established to simulate the typical daily regulation operation of Xiangjiaba Hydropower Station, and the change process of navigable hydraulic factors such as velocity, water level and gradient of the water area of Zhongzui Wharf caused by daily regulation unsteady flow is analyzed. At the same time, combining the flow field distribution data and self-propelled ship model test, the influence of daily regulation on ship navigation and berthing in and out of the port is studied. The results show that when the power station conducts daily regulation according to the proposed water level variation, the water level variation of the wharf reach does not exceed the allowable value of the power station operation regulation, the flow conditions meet the requirements of ship navigation, and the ships can normally enter and leave the port for berthing operation, with little impact on the wharf operation. The research results can provide reference for daily regulation and operation of power stations.

**Keywords:** unsteady flow; daily regulation; physical model; navigation condition

大型水电枢纽的建设一方面可以渠化上游河道, 增加枯水期下泄流量; 另一方面, 电站调峰以及水库调度运行产生的非恒定流将改变天然河道的水流条件, 而水位、流速的频繁变化将给船

舶航行带来不利影响<sup>[1-4]</sup>。为确保航运安全, 需要研究非恒定流对通航水流条件的影响。刘亚辉等<sup>[5]</sup>建立景洪水电站物理模型, 通过试验研究电站日调节对近坝河段通航水流条件的影响。张绪

收稿日期: 2022-12-06

作者简介: 张湛 (1980—) 男, 硕士, 助理研究员, 从事水利水运工程研究。

进等<sup>[6]</sup>、母德伟等<sup>[7]</sup>和蔡新永等<sup>[8]</sup>将物理模型、数值模拟计算以及船模试验相结合,研究向家坝水电站非恒定流的传播规律及其对下游河道通航条件的影响。已有的研究成果主要集中于非恒定流特性及其对通航的影响,而针对近坝河段码头运行所受影响的研究成果相对较少。

中嘴码头位于向家坝水电站下游约3 km处,由于距离枢纽较近,码头水域通航水流条件受电站泄流影响非常明显。本文以向家坝水电站和中嘴码头为例,通过物理模型试验的方法,分析电站日调节非恒定流对下游码头运行的影响,为向

家坝水电站调度运行提供参考。

## 1 模型概况

本文研究了金沙江向家坝水电站整体枢纽及坝下游长河段非恒定流物理模型<sup>[9]</sup>,该模型范围包括向家坝枢纽及以下总长度约54 km河段。模型采用几何比尺 $\lambda_L = \lambda_h = 100$ 正态定床,制作过程严格控制精度,平面误差在±0.5 cm以内,高程误差在±1.0 mm以内。模型试验的流量、水位变化过程采用计算机实时跟踪模拟。中嘴码头河段模型布置见图1。

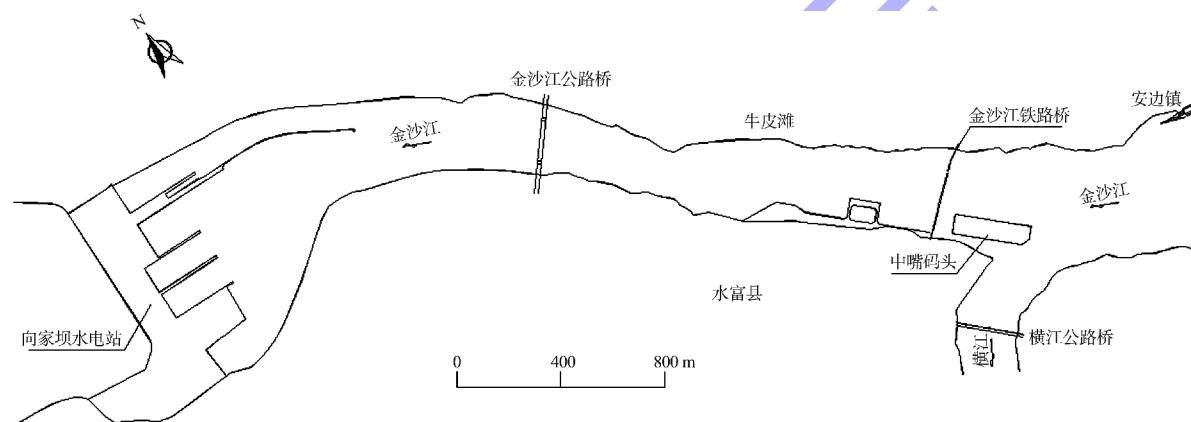


图1 中嘴码头物理模型布置

模型河道采取梅花形加糙,根据不同河段的糙率情况,采用不同粒径、间距的卵石加糙,并通过水面线试验结果反复进行调整。模型河道采用分段验证,其中金沙江牛皮滩—横江口河段采用实测枯水流量1 587 m<sup>3</sup>/s、中水流量7 690 m<sup>3</sup>/s和洪水流量13 085 m<sup>3</sup>/s的瞬时水面线资料对模型相似性进行验证。结果表明,模型水位与原型水位差值在±0.05 m以内,满足糙率相似要求。

为检验模型测控系统的可靠性,试验依据2013年6月21—24日向家坝水电站枢纽下泄流量 $Q$ 及坝下游李庄水文站同期水位 $H$ 变化过程资料对测控系统稳定性进行验证。验证成果如图2所示,流量误差不超过2%,水位误差不超过0.5 mm,表明模型测控系统精度高,模型流量和水位过程的模拟跟踪与原型吻合较好。

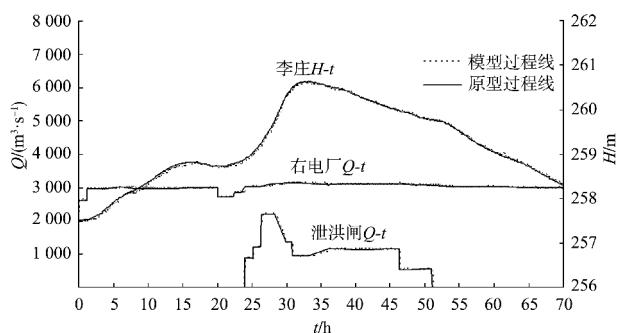


图2 测控系统可靠性验证

## 2 模型试验方案

### 2.1 试验工况

针对向家坝水电站出力特点,考虑下游水位日变幅和时变率等因素,模型试验选取2个典型日调节工况对码头水域通航水流条件进行研究。

- 工况1,流量变化范围为3 253~6 186 m<sup>3</sup>/s,水位日变幅不超过3.0 m/d,时变幅不超过1.0 m/d;

2) 工况2, 流量变化范围为 $2\ 494\sim6\ 723\text{ m}^3/\text{s}$ , 水位日变幅不超过 $4.5\text{ m/d}$ , 时变幅不超过 $1.0\text{ m/d}$ 。试验工况流量变化过程见图3。

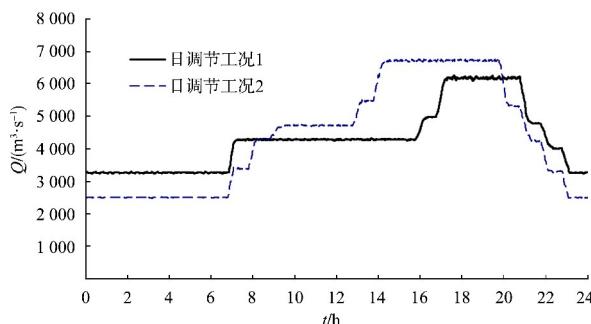


图3 日调节试验工况流量变化过程

## 2.2 船舶消滩指标

天然河道中, 船舶正常航行能力除受航道尺度影响外, 还与水流条件密切相关。船舶正常航行的基本条件必须是船舶有效推力大于水流阻力, 前者与主机功率、船舶排水量及船型有关, 后者则主要受流速、比降的影响。参照恒定流研究成果, 试验河段代表船型为1 000吨级货船, 其自航消滩水流指标见表1, 结合试验资料分析日调节非恒定流对船舶航行的影响。

表1 船舶自航消滩水流指标

水面比降 $J/\%$	1.2	0.9	0.6	0.3	0.1
相应流速 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3.5	3.6	3.8	3.9	4.0

## 3 试验结果分析

### 3.1 对水力要素的影响

图4a)为日调节工况1的水力要素变化过程。在00:00:00—06:45:00时段电站下泄流量维持在 $3\ 253\text{ m}^3/\text{s}$ , 码头水域保持最低水位268.05 m; 之后下泄流量逐渐增大, 约07:00:00泄水波到达码头水域, 水位开始抬高, 07:00:00和17:00:00水位上涨最快, 上涨速率达 $0.20\text{ m/10 min}$ , 至17:00:00增至最大流量 $6\ 181\text{ m}^3/\text{s}$ , 15 min流量最大增幅 $1\ 193\text{ m}^3/\text{s}$ , 20:45:00达到最高水位270.51 m; 之后下泄流量快速减小, 至24:00:00流量降至 $3\ 253\text{ m}^3/\text{s}$ , 15 min流量最大降幅 $1\ 410\text{ m}^3/\text{s}$ , 水位也随之降至最低。全天最小下泄流量 $3\ 253\text{ m}^3/\text{s}$ , 最大下泄流量 $6\ 181\text{ m}^3/\text{s}$ , 平均流量 $4\ 294\text{ m}^3/\text{s}$ 。水位日变幅 $2.46\text{ m/d}$ , 水位时变幅 $0.76\text{ m/h}$ 。

图4b)为日调节工况2的水力要素变化过程, 在00:00:00—06:45:00时段电站下泄流量维持在 $2\ 494\text{ m}^3/\text{s}$ , 码头水域保持最低水位267.08 m; 之后下泄流量逐渐增大, 约07:00:00泄水波到达码头水域, 水位开始抬高, 在14:00:00水位上涨最快, 上涨速率达 $0.25\text{ m/10 min}$ , 至14:00:00增至最大流量 $6\ 723\text{ m}^3/\text{s}$ , 15 min流量最大增幅 $1\ 247\text{ m}^3/\text{s}$ , 19:45:00分达到最高水位270.81 m; 之后下泄流量快速减小, 至24:00:00流量降至 $2\ 494\text{ m}^3/\text{s}$ , 15 min流量最大降幅 $1\ 410\text{ m}^3/\text{s}$ , 水位也随之降至最低。全天最小下泄流量 $2\ 494\text{ m}^3/\text{s}$ , 最大下泄流量 $6\ 723\text{ m}^3/\text{s}$ , 平均流量 $4\ 382\text{ m}^3/\text{s}$ 。水位日变幅 $3.73\text{ m/d}$ , 水位时变幅 $0.94\text{ m/h}$ 。

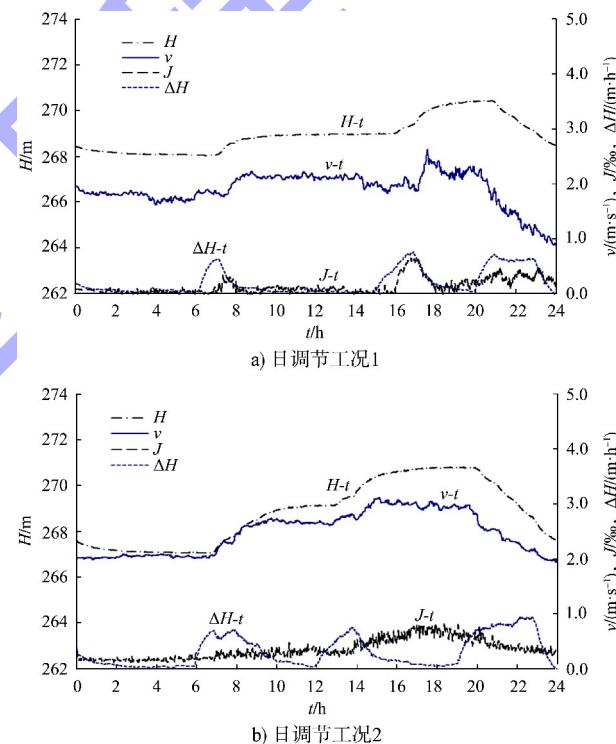
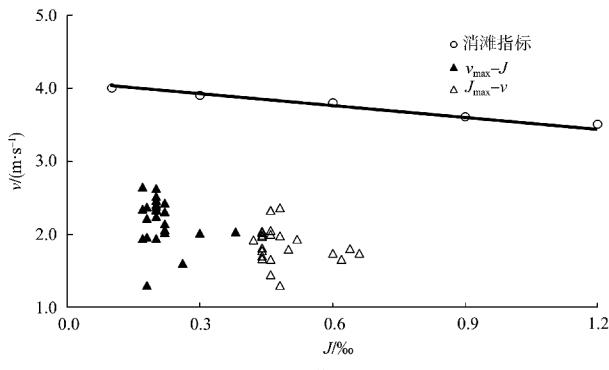


图4 中嘴码头非恒定流要素变化过程

向家坝水电站日调节工况的电站下泄流量均为单峰过程, 水位、流速变化与流量增减呈正相关。随着流量的增加或减小, 水位上涨或降低, 流速也相应增大或减小, 流速峰值一般出现于高水位阶段; 水面比降主要受水位变幅的影响, 短时间内水位变幅越大, 比降变化也越大。工况1在水位未上涨前, 水面比降 $0.07\%$ , 流速在 $1.8\text{ m/s}$ 左右。之后随着水位的变化, 码头水域流速和水面比降也逐渐变化。最大水面比降出现在水位快速上涨阶

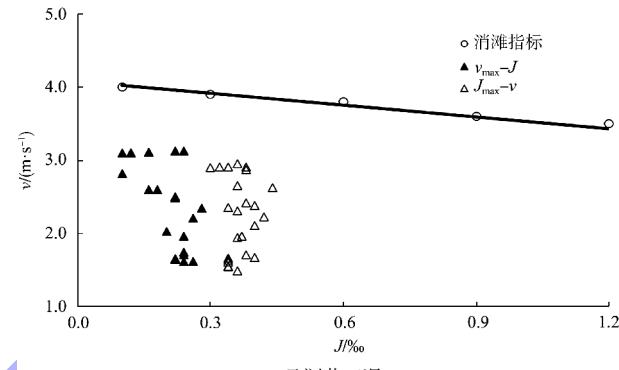
段, 为 0.66‰, 相应流速 1.73 m/s。最大流速出现在最高水位(最大流量)时段, 为 2.64 m/s, 相应比降 0.17‰。工况 2 在水位未上涨前, 水面比降 0.16‰, 流速在 2.0 m/s 左右。之后随着水位的变化, 码头水域流速和水面比降也逐渐变化。最大水面比降出现在水位快速上涨阶段, 为 0.44‰, 相应流速 2.63 m/s。最大流速出现在最高水位(最大流量)时段, 为 3.10 m/s, 相应比降 0.24‰。



a) 日调节工况1

### 3.2 对船舶上行能力的影响

将试验观测的中嘴码头水域 2 个工况各时段的最大流速和相应比降、最大比降和相应流速以及设计代表船型自航消滩指标一并绘于图 5。由图可见, 工况 1、2 各时段最不利水力指标绘点均位于船舶自航消滩指标曲线下方, 表明向家坝水电站按照上述 2 个日调节工况运行时, 设计代表船型 1 000 吨级货船均可在码头水域顺利上行。



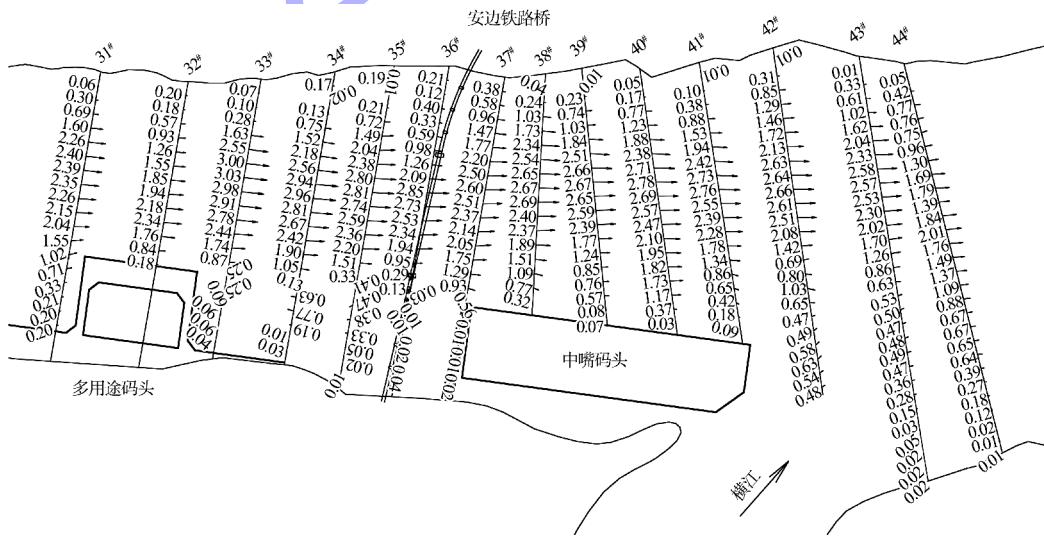
b) 日调节工况2

图 5 中嘴码头非恒定流水力指标与消滩指标比较

### 3.3 对船舶航行及停靠条件的影响

日调节工况 1 在电站下泄至最大流量  $6 181 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 码头水域最大流速 2.69 m/s, 码头前沿距主流线约 135 m, 码头停泊区最大流速 0.32 m/s, 流速分布见图 6a)。日调节工况 2 在电站下泄至最大流量  $6 723 \text{ m}^3/\text{s}$  时, 码头水域最大流速 3.12 m/s,

码头前沿距主流线约 150 m, 码头停泊区最大流速 0.48 m/s, 流速分布见图 6b)。模型实测流速分布表明, 向家坝水电站日调节运行时, 中嘴码头水域流速较小, 无回流、泡漩等不良流态, 船舶可以在该河段正常航行和进出港靠泊作业。

a) 日调节工况1,  $Q=6 181 \text{ m}^3/\text{s}$

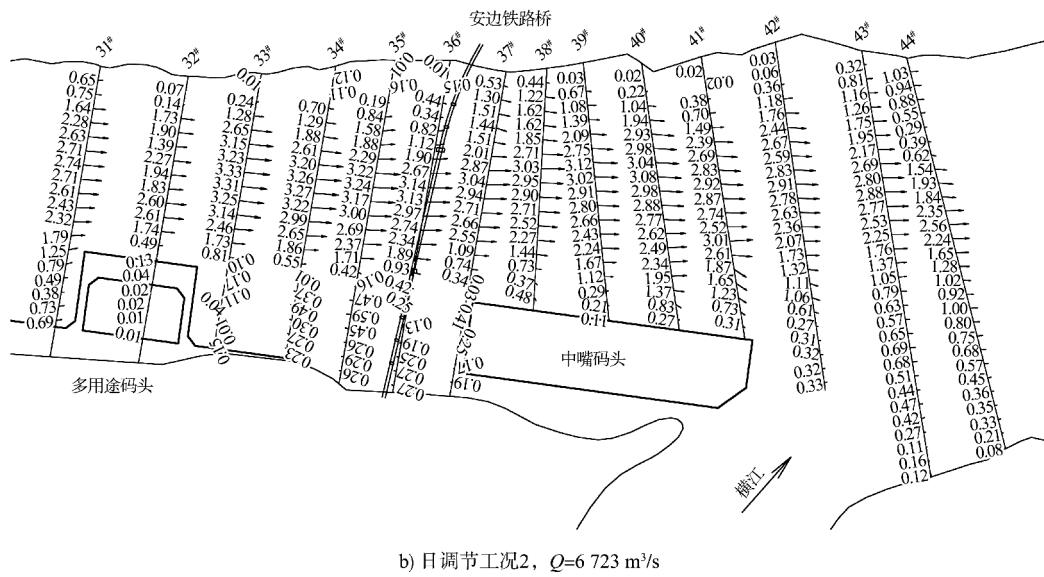


图6 中嘴码头河段流速分布

### 3.4 船模试验

为进一步研究非恒定流对中嘴码头水域船舶航行的影响, 选取日调节工况1开展自航船模航行试

验, 船型采用1 000吨级货船, 尺寸为85.0 m × 10.5 m × 2.0 m (长 × 宽 × 吃水深度)。船模比尺采用1:100正态, 试验航段长约1 000 m。试验成果见表2。

表2 日调节工况1船模试验成果

航行时段	航向	最大舵角/(°)		最大漂角/(°)		车档/(m·s⁻¹)		航速/(m·s⁻¹)		平均航速/(m·s⁻¹)
		右	左	右	左	最大	最小	最大	最小	
01:56:20—02:01:40	上行	7.64	11.55	1.59	9.39	5.00	5.00	2.99	2.68	3.06
08:05:40—08:11:30	上行	5.28	14.83	1.81	13.74	5.00	5.00	2.79	2.40	2.77
16:16:10—16:22:20	上行	7.88	13.95	5.06	11.20	5.00	5.00	2.61	2.34	2.55
16:56:00—17:02:15	上行	6.84	15.35	5.99	12.08	5.00	5.00	2.70	2.13	2.55
17:57:50—18:05:00	上行	6.64	16.03	9.28	19.23	5.00	5.00	2.91	1.65	2.19
20:52:50—21:00:20	上行	6.80	15.95	3.48	12.58	5.00	5.00	2.30	1.78	2.09
02:09:50—02:12:40	下行	0.60	9.51	1.22	2.89	4.00	4.00	5.80	3.97	5.47
08:20:00—08:22:50	下行	2.36	11.23	2.30	2.90	4.00	4.00	5.74	4.14	5.54
16:28:40—16:31:20	下行	6.00	10.83	2.71	7.52	4.00	4.00	6.04	4.42	5.96
17:08:30—17:11:05	下行	2.80	10.11	1.38	7.13	4.00	4.00	6.28	4.16	6.10
18:10:50—18:13:40	下行	3.40	9.71	0.79	8.61	4.00	4.00	5.83	4.04	5.71
21:06:40—21:09:25	下行	4.16	10.83	2.44	8.04	4.00	4.00	6.09	3.84	5.76

注: 所有数据均已换算为原型值。

泄水波到达时段(17:57:50—18:05:00)与到达前时段(08:05:40—08:11:30)航行试验成果相比, 主航道流速由2.1 m/s增加至2.8 m/s, 上行平均航速由2.77 m/s降低到2.19 m/s, 上行最小航速由2.40 m/s降低到1.65 m/s; 最大漂角由13.74°增加至19.23°; 机动货船上行的最大舵角由14.83°加大到16.03°。从试验结果看, 试验工况船舶上行最大舵角未超过船模舵角安全限值25°,

最小航速优于船模试验最低航速安全限值0.4 m/s, 1 000吨级货船可以顺利自航上行通过码头水域。

### 4 结语

1) 向家坝水电站日调节过程中, 下游中嘴码头河段水位和流速的变化与电站下泄流量呈正相关。水面陡比降发生在水位快速上涨阶段, 流速峰值则出现在高水位阶段。

2) 日调节工况 1 水位日变幅 2.46 m/d, 水位时变幅 0.76 m/h; 工况 2 水位日变幅 3.73 m/d, 水位时变幅 0.94 m/h。2 个试验工况水位变幅均未超过电站运行调度规程允许值, 通航水力指标满足设计代表船型自航上行要求, 船舶可以正常航行和进出港靠泊作业。日调节对码头运行影响较小。

3) 从航运安全考虑, 水位变幅和变率越小对航道、船舶航行越有利, 建议向家坝水电站日调节运行按水位日变幅不大于 3.0 m/d、时变幅不大于 1.0 m/d 运行。

## 参考文献:

- [1] 尚毅梓, 郭延祥, 李晓飞, 等. 小南海水电站日调节非恒定流对通航的影响[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 65-69.
- [2] 郑守仁, 孙尔雨, 杨文俊. 三峡电站调峰与通航问题研究[J]. 水电能源科学, 2002, 20(2): 7-12.

(上接第 144 页)

2) 有效控制了施工降水。施工展布方案实施以来, 航道通航条件逐步得到改善, 没有因施工降水发生断航事件。且在受上游地区降雨持续性偏少造成西江水位持续偏低的情况下, 西江梧州水文站甚至出现有水文记载以来的最低水位 1.37 m, 实测最小流量 708 m<sup>3</sup>/s, 远小于 2 000 吨级航道所需的设计流量 1 140 m<sup>3</sup>/s, 航道依然处于正常运营状态。

## 6 结论

1) 研究航段船舶通航密度大, 且桥孔通航净宽不满足单孔双向通航要求。龙圩水道航道整治施工展布方案采用通航交通管制措施, 较好地解决了施工与通航、桥孔通航净宽不足问题, 做到施工与通航两不误。

2) 研究河段为枢纽坝下天然河道, 枢纽下泄流量不均衡, 需结合整治断面开挖工程量分布, 选定分层施工区域和分层施工厚度。龙圩水道航道整治施工展布方案选取西江大桥上、下游右半幅航道共约 2 500 m 的长度范围作为分层施工航段, 同时选取施工至设计航道底高程之上 1 m 作为分层施工控制范围, 较好地解决了施工降水过快引起断航事件。

- [3] 刘亚, 李义天, 孙昭华. 电站日调节波对葛洲坝下游枯期通航条件影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(2): 147-152.
- [4] 刘臣. 乌江渡电站泄流对乌江渡码头航行影响[J]. 水运工程, 2017(4): 151-155, 165.
- [5] 刘亚辉, 王云莉. 景洪水电站对下游近坝河段通航条件的影响[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 103-107.
- [6] 张绪进, 胡真真, 刘亚辉, 等. 向家坝水电站日调节非恒定流的传播特征研究[J]. 水道港口, 2015, 36(5): 414-418.
- [7] 母德伟, 王永强, 李学明, 等. 向家坝日调节非恒定流对下游航运条件影响研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(6): 71-77.
- [8] 蔡新永, 蔡汝哲, 李晓飚, 等. 向家坝非恒定流对航道通航条件影响的试验研究[J]. 水运工程, 2017(2): 77-82.
- [9] 刘亚辉, 张湛. 向家坝水电站正常运行期非恒定流对下游通航条件影响物理模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2017.

(本文编辑 王传瑜)

## 参考文献:

- [1] 张明, 冯小香, 郝品正. 长洲枢纽坝下河段水沙变化及河床变形分析[J]. 水运工程, 2013(4): 134-138.
- [2] 刘临雄, 李俊娜, 黄文辉. 西江长洲水利枢纽至界首河段航道碍航分析及整治措施[J]. 水运工程, 2020(7): 158-163, 174.
- [3] 中铁建港航局集团勘察设计院有限公司. 西江航运干线贵港至梧州 3 000 吨级航道工程 - 二期工程水文专题报告[R]. 广州: 中铁建港航局集团勘察设计院有限公司, 2019.
- [4] 李俊娜. 西江梧州水文站设计最低通航水位探讨[J]. 水运工程, 2020(10): 138-142.
- [5] 庞雪松, 杜敬民, 假冬冬, 等. 西江长洲枢纽下游近坝段水位下降特征及调控措施[J]. 水利水运工程学报, 2014(3): 42-48.
- [6] 马爱兴, 曹民雄, 胡颖, 等. 多重因素影响下西江长洲枢纽至界首段枯水位降落特征[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(11): 97-98, 101.
- [7] 南京水利科学研究院. 西江航运干线贵港至梧州 3 000 吨级航道工程长洲坝下航道整治物理模型试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2020.

(本文编辑 王传瑜)