



# 三峡升船机下游引航道 非恒定流波动特性试验研究\*

程 龙<sup>1,2</sup>, 李 云<sup>1</sup>, 安建峰<sup>1</sup>

(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. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 通过 1:80 的三峡枢纽及下游引航道整体物理模型研究了典型的大坝泄洪、电站调峰、船闸泄水及其叠加工况下的升船机下游引航道非恒定流波动特性。结果表明: 三峡枢纽下游引航道内的水位波动是引航道波流运动和两坝间流量差引起的河道涨、落水长波耦合叠加的结果。枢纽进行百年一遇洪水调节时升船机下闸首水位波动最大小时变幅 0.61 m/h。当大坝泄洪单次调节流量小于 2 000 m<sup>3</sup>/s 时, 升船机下闸首水位波动小时变幅小于 0.42 m/h。电站调峰运行时, 升船机引航道水位波动首波幅值随流量变幅和变率的增大而增大, 最大小时变幅则取决于流量变幅和两坝间净流量大小。船闸双线同时泄水时升船机下闸首水位最大小时变幅 0.18 m/h, 基本不影响升船机运行。

**关键词:** 引航道; 非恒定流; 波动; 模型试验

中图分类号: U 642.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0158-06

## Experiment on the unsteady flow in downstream approach channel of the Three Gorges ship lift

CHENG Long<sup>1,2</sup>, LI Yun<sup>1</sup>, AN Jian-feng<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Nanjing 210029, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** An integrated physical model of the Three Gorges Project and the downstream approach channel at a scale of 1:80 was used to simulate water level fluctuation in the approach channel of the ship lift under experimental conditions, i. e. flood discharge, peaking, and ship lock emptying, and superimposed conditions of the three. The results indicated that the water level fluctuated in downstream approach channel of the Three Gorges Project because of the combination of long wave caused by the flow difference between the two dams and the channel and the fluctuation in the approach channel. Under condition of a 100-year recurrence flood discharge, the hourly variation of water level for downstream lock head of the ship lift was 0.61 m/h. The hourly variation of water level for downstream lock head of the ship lift was less than 0.42 m/h with one time flood discharge adjustment of more than 2 000 m<sup>3</sup>/s. Under conditions of peaking, the first wave amplitude of fluctuation in downstream approach channel of the ship lift increased with the increase of flow amplitude and variable rate, while the variable rate depended on the flow amplitude and the net flow between the two dams. When the two lines of ship lock empty at the same time, the water level fluctuation for downstream lock head of the ship lift had no significant impact on running of the ship lift with a maximum hourly variation of 0.18 m/h.

**Keywords:** approach channel; unsteady flow; fluctuation characteristics; experimental research

收稿日期: 2016-09-16

\*基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402002, 2016YFC0402004, 2016YFC0402007, 2016YFC0401906)

作者简介: 程龙 (1989—), 男, 博士研究生, 从事通航水力学方面的研究。

三峡升船机是目前世界上技术难度最高、规模最大的升船机,其安全稳定运行对提高三峡水利枢纽的航运通过能力、保障枢纽通航的质量、保证长江黄金水道通航效益及社会效益均具有十分重要的意义。

升船机下游引航道内的非恒定流波动特性是影响升船机安全稳定运行的重要因素,大变幅、大变率的水位波动不仅会降低升船机运行效率,而且会对到达船舶在引航道内的航行安全、升船机船厢对接及承船厢的误载水深控制等产生不利影响<sup>[1-3]</sup>。

升船机引航道波流运动主要源于枢纽泄洪、电站调峰及船闸泄水等过程中的非恒定流量调节。枢纽调节运行过程中,泄水波在向下游方向传播过程中绕过隔流堤头经口门传入引航道,并与水波下行过程中传至弯道、岔道、束窄处和封闭端后形成的反射波和次生波在引航道这一“盲肠”河道内相互叠加,形成往复波流的复杂态势。研究表明,三峡枢纽下游引航道往复波流的波高及变率主要受枢纽调节流量变幅和变率影响,同时与葛洲坝枢纽的反调节运行方式密切相关。

三峡枢纽下游引航道非恒定流作用十分突出,掌握其变化规律对升船机安全、高效运行意义重大。本文通过物理模型研究典型的泄洪、调峰和船闸泄水及工况组合叠加条件下的引航道非恒定流波动特性,重点分析引航道水位波动小时变幅的变化规律,为三峡升船机运行提供技术支持。

## 1 物理模型

为深入分析三峡枢纽下游引航道非恒定流变化规律,依据重力相似准则建立了几何比尺为1:80的引航道整体物理模型,模型主要包括三峡枢纽主体、升船机引航道、船闸引航道、引航道口门区及口门区下游主河道等。

模型上游边界为三峡大坝中心线,坝前布置面积为1 000 m<sup>2</sup>的水库保证枢纽流量调节过程中水库水位降幅较小,使下泄流量较为稳定。对于

模型下游模拟范围,综合考虑两坝间河势特征、模型规模、河道水流条件及两坝间波动特性等因素的影响,选择河道较窄、易于实施下游边界水位动态控制、湍流发展充分、反射波不影响首波幅值的喜滩处作为模型下边界。因此,模拟范围为三峡坝趾至喜滩约19.5 km河道,模型占地面积230 m×50 m,是目前国内比尺最大的三峡枢纽及引航道整体模型,见图1。



图1 物理模型航拍图

模型上库设置升降式溢流堰,通过跟踪堰板升降调节水库水位,从而控制模型泄水阀门水头。模型下游尾门采用电动翻板门,可动态跟踪给定的下游水位变化过程。

## 2 大坝泄洪时非恒定流波动特性

三峡枢纽对大洪水进行削峰滞洪,以减轻长江中下游的防洪负担。大坝调洪的运行原则是:当上游来水量大于56 700 m<sup>3</sup>/s时,下泄流量不超过该值;当来水量小于该值时,按天然流量过程下泄。

三峡枢纽调洪时,对于不同频率的洪水,下泄流量变化过程差别较大,选择典型的百年一遇洪水调节过程及近十年泄洪流量日变幅最大的调节过程分别进行模型试验<sup>[4-5]</sup>。

### 2.1 百年一遇洪水调节

该洪水频率下,河道基流47 200 m<sup>3</sup>/s,葛洲坝坝前水位66.0 m。由于此情况下葛洲坝枢纽敞泄,故近似视其水位在非恒定流过程中保持不变。三峡枢纽流量调节过程见图2,单次流量调节时间25 min。升船机下闸首水位变化过程的模型试验结果见图3。

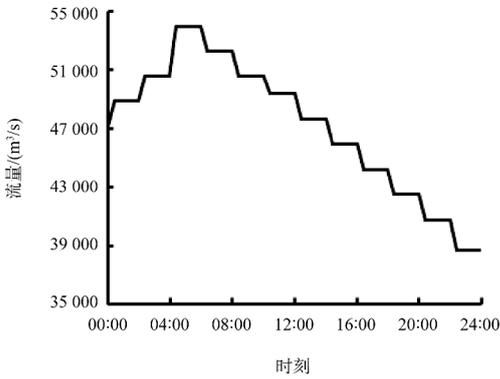


图2 百年一遇的调洪工况流量过程线

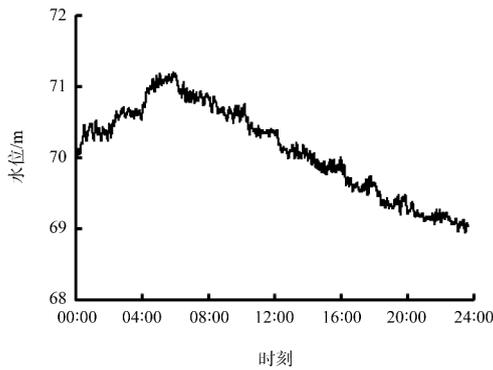


图3 百年一遇的调洪工况升船机下闸首水位过程

由图2、3可知，0:00—6:00时枢纽下泄流量由47 200 m<sup>3</sup>/s增至54 000 m<sup>3</sup>/s，水体自口门向“盲肠”内倒灌并缓慢向封闭端运移，并经边壁、弯道、岔道、束窄、封闭端反射，与后续原生波叠加，使升船机下闸首水位在抬升过程中波动不已。6:00—24:00流量逐步降为37 000 m<sup>3</sup>/s，“盲肠”内的水体经由口门向主河道入汇，落水波逆行，在反射波与后续原生波的叠加作用下引航道水面起伏不断。该过程水位波高小时变幅的最大值出现在4:00—6:00时段，该时段内三峡枢纽泄量增幅3 400 m<sup>3</sup>/s，升船机下闸首波高变率最大值为0.61 m/h。

### 2.2 泄量日变幅最大的泄洪工况调节

统计2005—2015年三峡枢纽汛期调洪过程，选取日调节流量变幅最大的实际调洪过程进行模型试验。河道基流36 000 m<sup>3</sup>/s，葛洲坝坝前水位取最不利的63.0 m。三峡与葛洲坝枢纽流量调节过程见图4。图5为模型试验得到的升船机下闸首水位过程线。

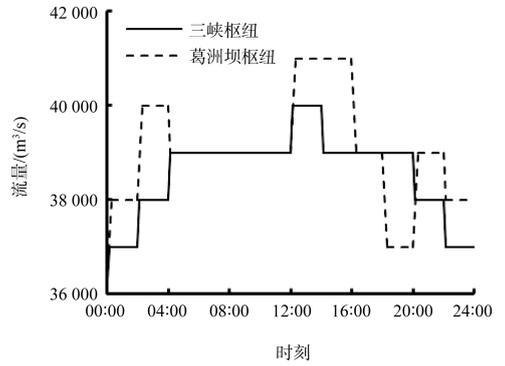


图4 典型泄洪工况枢纽流量过程线

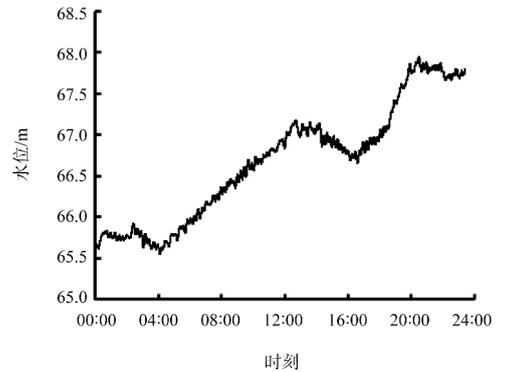


图5 典型泄洪工况升船机下闸首水位过程

由图4、5可知，0:00—12:00时的三峡枢纽下泄流量由36 000 m<sup>3</sup>/s逐步增至40 000 m<sup>3</sup>/s，12:00—24:00流量逐步下降至37 000 m<sup>3</sup>/s，葛洲坝枢纽流量则由36 000 m<sup>3</sup>/s逐步增至41 000 m<sup>3</sup>/s，然后逐步下降至37 000 m<sup>3</sup>/s。受两枢纽流量变化过程影响，两坝间及引航道内水位在重力长波作用下出现涨落。其中，波高变率最大值出现在18:00—20:00时段，该时段内三峡枢纽流量为39 000 m<sup>3</sup>/s，葛洲坝流量自39 000 m<sup>3</sup>/s降至37 000 m<sup>3</sup>/s，变幅2 000 m<sup>3</sup>/s，最大小时变幅为0.42 m/h。

由上述泄洪工况的研究可知，枢纽泄洪时河道及引航道内水位变化与枢纽下泄流量变化情况相对应，升船机下闸首波高小时变幅的最大值出现在枢纽下泄流量变幅最大的时段。在涨水过程中，水体自口门向“盲肠”内倒灌并缓慢向封闭端运移，并形成反射波，反射波与后续原生波叠加，使水面隆起后又跌落，如此反复，导致水面在抬升的过程中波动不已。在落水过程中，“盲肠”内的水体经由口门向主河槽入汇，落水波逆向而行，同样发生反射。快慢不一的相邻水体发

生能量的转换和传递, 形成次生波, 导致水面起伏不断。在枢纽调洪过程中, 升船机和船闸引航道内的波流运动是由水体的运移、水面的升降和波动复合而成, 但是全过程波动都不大, 水面完整、平滑而不破碎。

### 3 典型调峰工况下的波动规律

统计 2005—2015 年三峡电站单峰调节和双峰调节时三峡枢纽和葛洲坝枢纽流量变化过程, 分别选取流量小时变幅最大的典型调峰过程进行试验研究。

#### 3.1 单峰调节

近十年枢纽下泄流量小时变幅最大的单峰调节工况下三峡枢纽和葛洲坝枢纽的流量过程线见图 6, 葛洲坝坝前初始水位 63.0 m。图 7 为实测的升船机下闸首水位过程线。

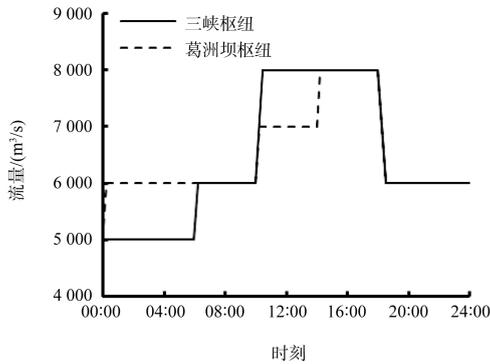


图 6 典型单峰调节枢纽流量过程线

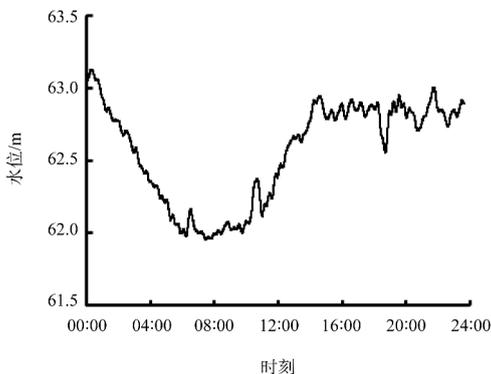


图 7 典型单峰调节升船机下闸首水位过程线

由图 6、7 可知, 引航道水位变化速率最快的时段是 10:00—14:00, 该时段内三峡枢纽下泄流量增幅为  $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ , 对应的调节时间为 30 min, 葛洲坝枢纽流量增幅为  $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 。在此调节方式

下, 三峡枢纽泄水波在升船机下闸首处的作用结束时刻早于葛洲坝枢纽流量调节产生的逆涨波波前抵达下闸首的时刻, 因而葛洲坝枢纽的调节对升船机下闸首的首波波幅基本无影响, 之后由于引航道水体惯性涨落和葛洲坝枢纽逆落波联合作用下开始下降, 升船机下闸首水位波动首波波幅为 0.26 m, 最大小时变幅为 0.41 m/h。

#### 3.2 双峰调节

近十年枢纽下泄流量小时变幅最大的双峰调节工况下, 三峡枢纽和葛洲坝枢纽的流量过程线见图 8, 葛洲坝坝前初始水位 63.0 m。图 9 为实测的升船机下闸首水位过程线。

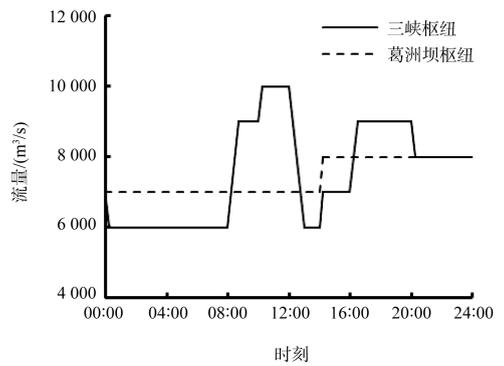


图 8 典型双峰调节枢纽流量过程线

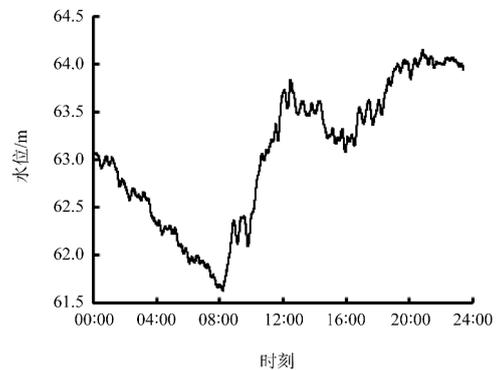


图 9 典型双峰调节升船机下闸首水位过程线

由图 8、9 可知, 引航道水位变化速率最快的时段是 12:00—14:00, 该时段内三峡枢纽下泄流量减幅  $4\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ , 葛洲坝枢纽流量不变。由于该过程中上下游流量差较大, 升船机下闸首水位波动主要受上下游边界流量差引起的水位下降的影响, 同时也受泄水波和葛洲坝枢纽反射波叠加影响。试验结果表明升船机下闸首最大小时变幅为 0.71 m/h; 电站调峰时, 泄水波传入引航道后在

其内形成往复波流，水位波幅受两坝间流量差引起的水位涨落和引航道内波流运动耦合作用影响，波动过程中升船机下闸首最大小时变幅通常出现在流量调节幅度最大的时段。

#### 4 船闸泄水工况波动特性

船闸泄水时，主泄水廊道的外泄出口与长江主河道垂直，两股水流相互激射叠加，产生水波下行。本文取更不利的双线同时泄水工况进行模型试验研究，河道基流  $5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ，模型尾门水位  $63.0\ \text{m}$  固定不变。图 10 为船闸双线同时泄水流量过程线，图 11 为实测的升船机下闸首水位过程线。

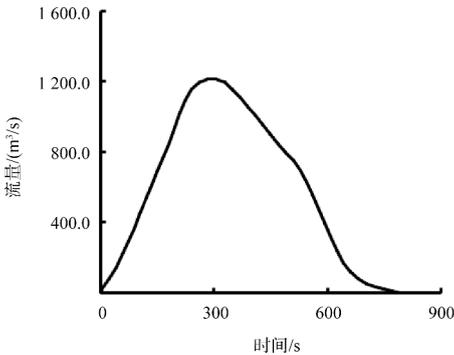


图 10 船闸双线同时泄水流量过程线

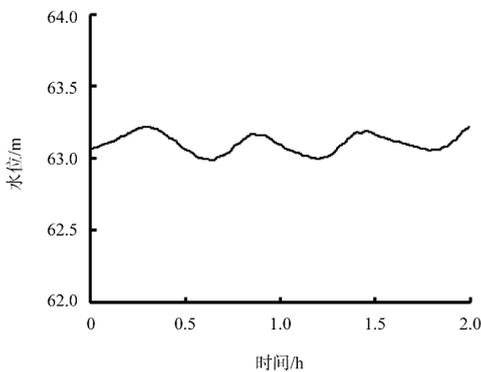


图 11 船闸双线同时泄时升船机下闸首水位过程线

由图 11 可知，升船机下闸首水位波动首波峰值为  $0.18\ \text{m}$ 。船闸泄水波传至升船机下闸首历时约  $13.5\ \text{min}$ 。船闸双线同时泄水时升船机下闸首水位波动首波峰值小于相同条件、相同流量变幅下枢纽泄流(升船机下闸首首波幅值  $0.20\ \text{m}$ ，引航道口门首波幅值  $0.09\ \text{m}$ )，这主要是因为船闸主泄水廊道的外泄出口与长江主河道垂直，出口面积

远小于河面面积，局部水头损失较大，且两股水流相互激射叠加，波能耗散较高。船闸双线同泄时，引航道水位波动变率较小。

#### 5 叠加工况下的非恒定流特性

三峡枢纽兼顾防洪、发电和航运效益，实际运行中，必然存在电站调峰和船闸泄水相叠加的运行工况。选取特定调洪工况、电站调峰工况分别与船闸泄水工况的叠加进行模型试验研究。

##### 5.1 枢纽泄洪与船闸泄水叠加

取河道基流  $25\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ，葛洲坝坝前水位  $65.0\ \text{m}$ 。两枢纽流量相继调节，变幅  $10\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ，变率  $1\ 000\ \text{m}^3/\text{s}/(10\ \text{min})$ 。船闸双线同时泄水，叠加时刻范围为  $0\sim 140\ \text{min}$ 。不同叠加时刻波动特性见表 1。

表 1 枢纽泄洪与船闸泄水叠加工况波动特性

叠加时刻/min	第一波幅/m	小时变幅/(m/h)	叠加时刻/min	第一波幅/m	小时变幅/(m/h)
不叠加	0.78	0.49	65	0.70	0.58
0	0.27	0.50	80	0.82	0.58
15	0.33	0.51	100	0.96	0.55
30	0.45	0.53	120	0.78	0.56
50	0.58	0.57	140	0.78	0.50

由表 1 统计结果可知，船闸泄水叠加与否对引航道波动特性有一定影响。船闸泄水与枢纽泄洪工况叠加时，升船机下闸首水位波动的小时变幅最大值较未叠加时更大，最不利情况下增量为  $0.09\ \text{m/h}$ ；叠加时刻对首波幅值影响较大，泄洪波峰与船闸泄水波谷的叠加可能使第一波幅得到一定程度的削减，而波峰与波峰的叠加则将造成更大的波动幅值，当叠加时刻大于  $100\ \text{min}$  时，船闸泄水波传至升船机下闸首时该处水位已在惯性波动作用下回落，因而首波波幅与未叠加时相同。

船闸泄水叠加枢纽泄洪时，首波幅值、小时变幅等波动参数并非简单的加和关系。总体而言，船闸泄水与枢纽泄洪叠加时引航道水位波动特性的变化并不十分显著。

## 5.2 电站调峰与船闸泄水叠加

取河道基流  $5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ , 葛洲坝坝前水位  $63.0\ \text{m}$ 。三峡枢纽流量相继调节, 变幅  $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 。船闸双线同泄, 叠加时刻范围为  $0\sim 60\ \text{min}$ 。不同叠加时刻波动特性见表 2。

表 2 电站调峰与船闸泄水叠加工况波动特性

叠加时刻/min	第一波幅/m	小时变幅/(m/h)	叠加时刻/min	第一波幅/m	小时变幅/(m/h)
不叠加	0.27	0.49	30.0	0.34	0.54
0	0.20	0.48	37.5	0.32	0.46
7.5	0.29	0.51	45.0	0.27	0.54
15.0	0.32	0.58	52.5	0.27	0.54
22.5	0.36	0.59	60.0	0.27	0.57

由表 2 统计结果可知, 船闸泄水与电站调峰工况叠加时, 升船机下闸首水位波动的小时变幅最大值较未叠加时更大; 叠加时刻对首波幅值影响较大, 当叠加时刻大于  $45\ \text{min}$  时, 船闸泄水波传至升船机下闸首时该处水位已在惯性波动作用下回落, 因而首波波幅与未叠加时相同。

船闸泄水与枢纽泄洪、电站调峰叠加时, 首波幅值、小时变幅等波动参数并非简单的加和关系。总体而言, 小时变幅增量未超过  $0.1\ \text{m/h}$ 。由此可见, 船闸泄水与电站调峰工况叠加时引航道水位波动特性的变化并不十分显著, 对升船机运行影响较小。

## 6 结语

1) 三峡枢纽下游引航道内的水位波动是枢纽下泄流量引起的引航道波流运动和两坝间流量差引起的河道涨、落水长波耦合叠加的结果。

2) 大坝泄洪和电站调峰运行时, 河道及引航道内水位变化与枢纽下泄流量变化情况相对应,

升船机下闸首波高小时变幅的最大值出现在枢纽下泄流量变幅最大的时段。

3) 枢纽进行百年一遇洪水调节时升船机下闸首水位波动最大小时变幅  $0.61\ \text{m/h}$ , 大于升船机船厢对接的水位变率要求。当大坝泄洪单次调节流量小于  $2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$  时, 升船机下闸首水位波动小时变幅小于  $0.42\ \text{m/h}$ , 能够满足升船机安全运行要求。

4) 电站调峰运行时, 升船机引航道水位波动首波幅值随流量变幅和变率的增大而增大, 最大小时变幅则取决于流量变幅和两坝间净流量大小。

5) 三峡船闸双线同泄时升船机下闸首水位波幅约  $0.18\ \text{m}$ , 基本不影响升船机对接运行。

6) 船闸泄水工况与枢纽泄洪、电站调峰工况叠加时, 升船机引航道波高略有增大, 增幅随叠加时刻的不同存在差异, 最不利条件下波高变率最大增幅约  $0.1\ \text{m/h}$ 。

## 参考文献:

- [1] 梁应辰. 三峡工程通航建筑物技术设计审查[J]. 中国工程科学, 2000, 2(5): 34-43.
- [2] 宋维邦. 长江三峡水利枢纽通航建筑设计[J]. 中国三峡建设, 1995(3): 10-47.
- [3] 李中华, 胡亚安. 非恒定水流作用下升船机对接安全预警措施研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2005, 34(4): 87-90.
- [4] 须清华, 张瑞凯. 通航建筑物应用基础研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [5] 李焱, 孟祥玮, 李金合, 等. 三峡工程下游引航道通航水流条件试验[J]. 水道港口, 2003, 24(3): 121-125.

(本文编辑 武亚庆)