

文章编号:1009-3087(2014)06-0071-07

## 向家坝日调节非恒定流对下游航运条件影响研究

母德伟<sup>1</sup>,王永强<sup>2\*</sup>,李学明<sup>2</sup>,钟德钰<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 西南水运工程科学研究所,重庆 400016;

2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

**摘要:**水电站日调节产生的非恒定流常恶化下游河道的通航条件,需提出适合下游航道安全通航的水流控制参数。结合向家坝水电站下游日调节工况的水动力模拟计算和物理模型试验,分析枯水期向家坝水电站不同运行工况下的非恒定流传播特性及其对水位变幅、流速、比降等航运水力要素的影响规律,并通过自航船模试验进一步给出代表船型在重点航段通航上行的条件要求。研究结果表明:向家坝日内的调峰幅度和调峰变率不宜过大,建议日调节运行方式按枢纽下游水位最大小时变幅不超过 1.5 m/h、最大日变幅不超过 4.5 m/d 进行控制,对向家坝下游航运影响较低。

**关键词:**日调节;非恒定流;数学模型;物理模型;水力要素;航运条件

中图分类号:TV135.4

文献标志码:A

### Study on the Effect of Downstream Navigation by Unsteady Flow Caused by Xiangjiaba Daily Regulation

MU Dewei<sup>1</sup>, WANG Yongqiang<sup>2\*</sup>, LI Xueming<sup>2</sup>, ZHONG Deyu<sup>2</sup>

(1. Chongqing Southwest Water Transport Eng. Research Inst., Chongqing Jiaotong Univ., Chongqing 400016, China;

2. State Key Lab. of Hydrosience and Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

**Abstract:** The navigable condition is often worsen by the effect of unsteady flow caused by daily regulation of hydropower station. In order to reduce this kind of phenomenon, the control parameters need to be proposed which can give appropriate safety navigable waterways. According to the results obtained by one-dimensional mathematical model calculation and physical modelling experiment, the propagation characteristics of unsteady flow caused by daily regulation of Xiangjiaba hydropower station under different operating conditions in the dry season were illuminated. Its influences on water level amplitude, velocity, slope and other shipping hydro impact factors were analyzed. The self-propelled ship model test was used for giving the conditions of navigation in key leg upward. The results showed that the peaking and peaking amplitude variability of Xiangjiaba hydropower station should not be too large in a day. The water level downstream hub amplitude does not exceed the maximum hours of 1.5 m/h, and the maximum daily amplitude does not exceed 4.5 m/d, which will have minor impact on navigation of downstream.

**Key words:** daily regulation; unsteady flow; mathematical model; physical model; hydraulic factors; navigation condition

水电站日调节产生的非恒定流使得下游河道水位变幅、流速、比降等比天然河道变化大,不能满足航运要求。水电站日调节与下游航运的矛盾中,水电站日调节常居于主导地位,由其产生的非恒定流可引起下游河道水位、流速、比降变幅过大,影响船队通航。需研究水电站日调节非恒定流的传播规

律、水位和比降变率等水力要素,以为制定合理的兼顾下游航运的水电站日调节方案。因此,如何分析日调节非恒定流对下游航运条件的影响,为进一步协调航电冲突关系、保证航运安全提供数据支撑成为重点研究。近年来,相关学者针对水电站日调节对下游航运条件影响做了大量研究。郑守仁等<sup>[1]</sup>

收稿日期:2014-01-04

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAB05B01);博士后面基金资助项目(2013M530635)

作者简介:母德伟(1970—),男,副研究员。研究方向:水库泥沙淤积。E-mail:mdwxks@163.com

\*通信联系人 E-mail:wangyongqiang1022@gmail.com

给出了非汛期电站调峰和葛洲坝反调节运行条件下的通航条件;曹民雄<sup>[2]</sup>、刘亚辉<sup>[3]</sup>、刘亚<sup>[4]</sup>、黄颖<sup>[5]</sup>等,分别从水沙特性、水力条件和比降变化等方面对电站下游航道水流条件进行研究;张波<sup>[6]</sup>、Huang<sup>[7]</sup>和 Zhou<sup>[8]</sup>等分别提出结合不同电站特征的水动力模拟模型;Rao<sup>[9]</sup>则结合水动力模型分析了水库泥沙淤积对航道影响。上述研究表明不同水电站及其下游航道分析方法不尽相同,且主要集中在1维、2维非恒定流数学模型的建立、验证与模拟分析,结合物理模型进行不同运行工况的对比分析较少,尚未形成一套完整的分析方法。作者以向家坝水电站为背景,通过数值模拟与物理模拟相结合的方法,进行日调节非恒定流对航运影响以及水电站日调节方案优化等研究,相关成果分为2部分,本文作为第1部分,重点论述日调节非恒定流对下游航运条件的影响分析;第2部分重点论述考虑航运条件要求下的日调节优化方案制定。

金沙江汛期来水量丰沛,向家坝水电站平均出力大,日内出力变化平稳,对下游航运条件的影响较小。但在枯水期,由于来水量较小,发电平均出力小,在电力系统中承担峰荷运行时,日内出力及下泄流量变幅较大,其下泄的非恒定流对下游航运条件的影响较大<sup>[10]</sup>。因此,重点分析向家坝水电站枯水期12月一次年4月的日调节运行时对下游航运条件的影响。采用1维非恒定流数学模型与物理模型试验相结合的方式开展研究。运用1维数学模型进行各种典型工况下1维非恒定流计算,分析不同工况非恒定流对下游河道的影响范围及程度,初步分析非恒定流对通航水流条件的影响,同时为下游近坝河段的非恒定流物理模型试验提供边界控制条件。通过与物理模型结果对比分析,表明非恒定流水流特性及工况间的变化规律与数模成果基本一致,进而提出适合下游航道安全通航的水位日变幅、小时变幅等水流控制参数,给出电站调峰调度优化方式和通航安全管理措施等合理建议。

## 1 向家坝水库运行方式与电站发电特性

向家坝水电站是金沙江下游河段水电规划的最下游梯级,以发电为主,具有防洪、通航、灌溉等功能,并具有对溪洛渡水电站进行反调节等作用。水库总库容 $51.63 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,具有季调节性能。电站初期运行拟定以电站发电量最大为目标,结合水库库容条件、径流特性、下游防洪要求等因素,向家坝水电站保证出力为2 010 MW,多年平均发电量为

$308.80 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,装机年利用小时4 825 h。从年内发出电能分布特性分析,向家坝水电站发电具有明显的季节规律性,汛期与枯水期枯差别较大,大致可分为3个不同的时期:1)主汛期(7—9月份)和汛后退水期(10月份)。各月多年平均出力在4 900 MW以上,在电网中多承担基荷运行,日内下泄流量变幅较小,对下游航运基本无影响。2)汛前或汛初5月、6月和退水后期的11月份,各月多年平均出力均在3 300 MW以上,该时期电站一般在电力系统中承担腰荷或部分进入基荷,日内发电负荷率较高,出力变化较平稳,电站下泄的非恒定流对下游航运不会产生明显的影响。3)12月一次年4月为枯水期,电站各月多年平均出力在2 153.7~2 455.3 MW,各月最小平均出力为2 010~2 164.3 MW,该时期电站一般在电力系统中承担腰、峰荷运行,日内出力变化较大,相应的下泄流量变化也较大,需要研究下游河道非恒定流对航运的影响。

## 2 研究模型与方法

### 2.1 水动力模拟

根据向家坝水电站枯水期代表性平均出力,考虑向家坝供电区华东电网的日负荷特性、机组运行特性及安全稳定运行要求,以及下游航道安全通航及港口、升船机等安全作业的水流条件和限制要求,拟定不同平均出力下的日调峰运行工况和下泄流量变化过程。运用1维数学模型进行各种典型工况下非恒定流计算,获得各种工况时下游河道各重点断面(包括引航道口、港口、码头、滩险河段等)的水力要素的变化情况,包括水位变幅(含水位日变幅、小时变率、20 min变率等),水面比降、流速等水力要素随时间的变化过程及传播特性。根据向家坝水电站坝址至和尚岩河段的江床地形图,选取60个代表性断面。计算模型以向家坝枢纽的下泄流量过程线作为上边界条件,以和尚岩的水位流量关系作为下边界条件,同时考虑横江、岷江等支流的流量入汇。利用天然河道的水文资料对计算河段的糙率进行率定,使模型计算成果能与计算河段的实际情况吻合。

#### 1) 1维非恒定流数学模型

水流连续方程:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

水流运动方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( P + \frac{Q^2}{A} \right) = gA(S_0 - S_f) + F \quad (2)$$

式中:  $A$  为过水面积;  $Q$  为流量;  $q$  为区间入流或分流流量;  $P$  为断面静水压强;  $F$  为河床在  $x$  方向对水流作用力的投影;  $S_0$  为河床比降;  $S_f$  为河床摩擦降,  $S_f = n^2 Q |Q| / A^2 R^{\frac{4}{3}}$ , 其中,  $n$  为 Manning 糙率系数,  $R$  为水力半径,  $g$  为重力加速度。

## 2) 数学模型求解

求解 1 维非恒定流模型的数值方法很多, 寻找 1 种计算高效及精度高的数值格式为最佳。作者采用钟德钰等<sup>[11]</sup>提出来的基于有限体积法的 TVD 的数值格式, 运用 1 阶显格式有限体积法 TVD 离散, 并对谭维炎等的方法进行了改进, 将流量与水位交错布置, 使得对于进出口的边界布置非常简单。该方法可使流量不出现振荡现象, 有效改善计算精度, 且求解速度快。

## 2.2 物理模型试验

通过物理模型试验模拟向家坝水电站日调节运行方案, 可取得下游近坝河段的非恒定流特性资料, 包括涨落波、水位日变幅、小时变幅、水面比降、流速等水力要素随时间变化过程、传播规律及其特征。物理模型试验入口边界条件为日调节不同工况下 1 维非恒定流数值模拟计算的下泄流量过程, 出口边界条件为 1 维数模计算得到的出口断面水位随时间的变化过程。采用大比尺水力学定床水流模型与自航船模相结合的方式进行, 建立向家坝水电站枢纽至下游和尚岩河段的正态物理模型, 模型比尺为 1:100, 长度约 10 km。模型河道根据 2008 年测量的 1:3 000 江床地形图, 采用断面板法进行制作, 对向家坝枢纽, 河段内的大桥以及沿岸分布的码头等按几何相似要求进行了精细化模拟, 如图 1 所示。



图 1 向家坝水电站物理模型

同时, 将原型观测资料分河段对屋里模型进行了验证, 验证结果表明, 在枯、中、洪 3 级流量情况下, 模型水位与原型水位均较为接近, 其差值多在 0.1 m 以内, 最大不超过 0.18 m, 满足模型与原型河

道阻力相似的要求。各河段及相应流量下模型水流的表面流速、流向均与原型吻合良好, 水流流态与原型流态基本接近。

## 2.3 日调节运行工况拟定

### 2.3.1 工况设计原则

向家坝水电站位于新市镇至水富 V 级航道的下端, 下游 2.5 km 为水富港、33 km 为宜宾港, 水富至宜宾为 IV 级航道。为保证下游航道、港口等安全运行, 日调节运行时下游河道水位日变幅、小时变幅、断面流速、水面比降等水力要素需满足一定的要求。相关研究表明, 在基流相同的情况下, 单位时间内下泄流量的变幅越大, 非恒定流波峰越陡, 下游河道水位变幅越剧烈, 水面比降越大, 对船舶航行和码头作业的影响越大。此外, 参考三峡水库下游安全通航水力要素控制指标, 以水位小时变幅 1.0、1.5 和 2.0 m/h, 水位日变幅 4.5 和 6.0 m/d 左右作为控制条件, 设计不同的日调峰运行工况, 并开展相应的物模试验和船模试验。依据电站长系列旬径流调节计算成果可知, 向家坝水电站枯水期 12 月一次年 4 月多年平均出力为 2 336 MW, 平均出力小于 2 500 MW 的旬数占总旬数的 81.6%, 小于 2 900 MW 的旬数约占 97.1%。由此, 结合枯水期出力分段情况, 选取 2 010、2 400 和 2 800 MW 3 种情况作为代表。

### 2.3.2 工况拟定

在工况设计原则的基础上, 考虑向家坝供电区华东电网的日负荷特性、机组运行特点及安全稳定运行要求, 日调节非恒定流研究工况考虑以下几种因素的组方案:

1) 平均出力: 枯水期典型日平均出力考虑 2 010、2 400 和 2 800 MW 3 种情况;

2) 日内水位变幅: 考虑 2 个方案, 4.5 和 6 m/d 左右;

3) 小时水位允许变幅: 考虑 3 个方案, 1.0、1.5 和 2.0 m/h。

对于相同日平均出力, 电站的工作容量主要受下游河道水位最大日变幅控制, 下游河道允许的水位最大日变幅越大, 电站承担的工作容量越大。在相同平均出力条件下, 下游允许的水位最大日变幅由 4.5 m 增加到 6.0 m, 电站工作容量可增加 1 500 MW 左右。在相同日平均出力和日变幅条件下, 下游河道允许的水位小时变幅越大, 电站出力调整的次数越少。

### 3 电站日调节非恒定流特性及其对下游航运条件影响分析

#### 3.1 日调节非恒定流水流特性分析

##### 1) 数模计算分析

运用1维非恒定流数学模型分别对拟定的不同工况进行水力要素计算。图2所示为表1中3种不同工况的下泄流量过程,模拟计算结果如表1所示。

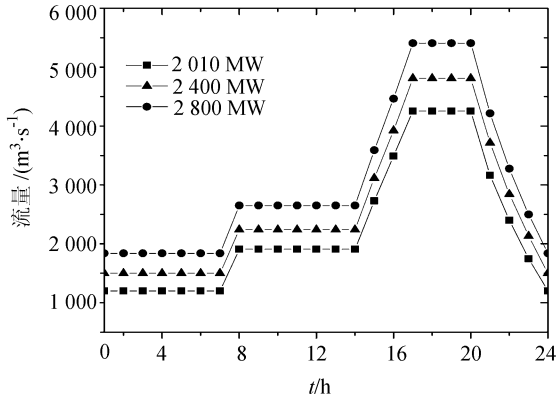


图2 不同工况下的下泄流量变化过程

Fig. 2 Discharge process under different working conditions

表1 日调节非恒定流典型断面不同工况下相关水力要素(部分)

Tab.1 Hydraulic factors of typical section under daily regulation unsteady flow conditions(partial)

工况	断面名称	距坝 里程/ m	最大日 变幅/ ( $m \cdot d^{-1}$ )	最大小 时变幅/ ( $m \cdot h^{-1}$ )	最大水 面比降/ %	最大平 均流速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )
2 010 MW	下引航口	1 083	4.55	1.01	0.042	0.80
	水富港	2 948	4.21	0.93	0.041	1.88
	国电码头	7 164	3.63	0.79	0.187	2.21
	和尚岩	8 088	4.34	0.93	0.011	2.35
	物模边界	10 271	4.11	0.88	—	1.28
2 400 MW	下引航口	1 083	4.55	1.02	0.048	0.89
	水富港	2 948	4.17	0.95	0.046	2.04
	国电码头	7 164	3.63	0.81	0.166	2.24
	和尚岩	8 088	4.22	0.93	0.013	2.35
	物模边界	10 271	3.98	0.85	—	1.36
2 800 MW	下引航口	1 083	4.54	1.03	0.053	0.98
	水富港	2 948	4.13	0.93	0.051	2.20
	国电码头	7 164	3.62	0.80	0.144	2.28
	和尚岩	8 088	4.11	0.91	0.015	2.33
	物模边界	10 271	3.87	0.82	—	1.44

由于篇幅限制,表1仅列出部分工况,其中3种工况日平均出力逐步增大,最大日变幅均为4.5 m,最大小时变幅均为1 m,出力调整为8次。通过分析计算结果可知,由于河道槽蓄作用,向家坝电站日调节所产生的非恒定流沿程坦化,水位日变幅与最大小时变幅随距离向家坝坝址的距离增加而呈现沿程递减趋势。在日变幅限制条件相同的情况下,流量日变幅越小,发电流量的调整次数越少,非恒定流沿程坦化越快。对比可知,各工况的最大水面比降均出现在国电码头附近,在水位日变幅相同的条件下,下泄流量小时变率越大,即小时水位变幅越大,非恒定流波峰越陡,下游河道典型断面的最大水面比降略大。河段的平均流速基本均在2.0 m/s以上,主要受日最大流量控制,日最大流量越大,各断面平均流速也越大,在日最大流量相同的条件下,各断面平均流速差别很小。

##### 2) 物模试验分析

在设计物理模型试验中,各日调节工况的电站出流均为单峰过程,其下游各断面水位变化也相应呈单峰过程。坝下游各测站水位随下泄流量增加而上涨,水位也相应升高,反之亦然,在各测站水位降落直至次日电站下泄流量再次开始增加时,各测站水位出现全天最低值。

由图2可知,日调节2 010 MW工况下流量变化范围为1 200 ~ 4 255  $m^3/s$ ,最大流量为最小流量的3.54倍,最大日变幅为4.5 m左右;日调节2 400 MW工况流量变化范围为1 500 ~ 4 811  $m^3/s$ ,最大流量是最小流量的3.21倍,河段各测站日变幅最小为3.63 m,最大为4.55 m左右;日调节2 800 MW工况下流量变化范围为1 838 ~ 5 407  $m^3/s$ ,最大流量是最小流量的2.94倍,河段各测站日变幅最小为3.62 m,最大为4.54 m左右。试验观测结果表明,向家坝电站日调节过程中枢纽下游河段水位日变幅主要与电站日下泄流量变化大小有关,其规律是日下泄流量变化越大,水位日变幅就越大。由于流量波峰的沿程衰减坦化,下游近坝河段的水位变幅沿程总体呈递减的趋势,在和尚岩河段受河道走势及局部地形条件的影响,其水位日变幅反而较大。在日调节过程中随着坝下河段水面的升降,其比降也处于不断变化之中。试验发现安边铁路桥处于狭窄河道出口段,距坝址较近,加之高水期桥墩具有一定的阻水作用,波峰经过时进一步加强了桥墩的影响,使桥下河心比降较大。

图3所示为某日调节工况安边铁路桥处比降与

相应的流量变化过程。

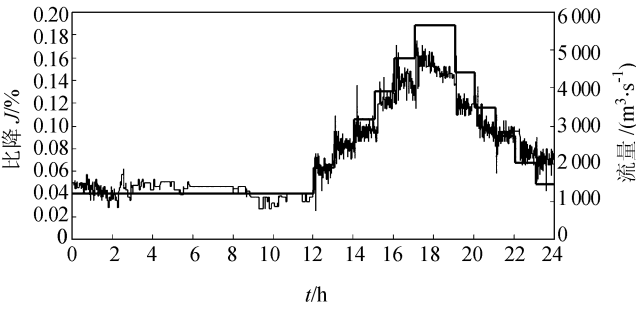


图3 日调节某工况下安边铁路桥桥下水面比降变化与电站流量过程

Fig.3 Change process of surface slope and flow under Anbian railway bridge under a certain condition

由图3可知,日调节过程中每当电站增加下泄流量时水面比降均相应增大,达到最大后均有不同

表2 2日调节不同工况下数模与物模结果对比(部分)

Tab.2 Constrast of results obtained by mathematical and physical model under daily different regulation unsteady flow conditions( partial)

工况	断面名称	数模计算结果				物模计算结果			
		日水位变幅/m	小时水位变幅/m	最大流速/(m·s <sup>-1</sup> )	最大比降/%	日水位变幅/m	小时水位变幅/m	最大流速/(m·s <sup>-1</sup> )	最大比降/%
最大小时变幅1 m 出力调整8次	牛皮滩	4.32	0.95	1.40	0.029	3.93	0.92	1.72	-0.060
	横江口	4.02	0.90	1.93	0.028	3.68	0.87	2.51	0.040
	瞿睡坝3	3.70	0.81	2.09	0.054	3.66	0.80	2.56	0.070
	国电码头	3.63	0.79	2.21	0.187	3.68	0.80	2.01	0.039
最大小时变幅2 m 出力调整4次	牛皮滩	4.32	1.36	1.40	0.030	3.88	1.20	1.78	-0.061
	横江口	4.02	1.25	1.94	0.029	3.61	1.11	2.59	0.040
	瞿睡坝3	3.69	1.12	2.09	0.054	3.61	1.02	2.93	0.076
	国电码头	3.62	1.03	2.24	0.193	3.66	1.01	2.46	0.048

由图4可得,各典型断面数学模拟计算的日内24 h水位过程与物理模型试验实测水位过程变化规律一致,在0:00~20:00涨水时段,数学模拟计算水位普遍高于物模试验水位,牛皮滩断面相差0~0.53 m,横江口断面相差0~0.69 m,瞿睡坝断面相差0.41~1.00 m,国电码头断面相差0.20~0.65 m,在图中20:00以后的落水时段,二者水位过程基本重合。

### 3.2 日调节非恒定流对下游航运条件影响

#### 3.2.1 对引航道口门区通航条件影响

根据物模试验观测资料,统计分析向家坝水电站日调节工况引航道典型断面水力要素。日调节过程中下泄最小流量为1200 m<sup>3</sup>/s时,瞬时最低水位为265.08 m,引航道内的底板高程均为260.00 m,

程度的减小,这表明波峰过后水面逐渐趋于平缓。因此,在边界条件一定的情况下,日调节过程中下游河段的水面比降变化主要受电站每次调节时流量变率的影响,流量增率越大,比降增加的幅度也越大。

#### 3) 数模计算与物模试验非恒定流特性对比分析

根据数学模型计算及物理模型试验布设断面情况,选取位置相近的牛皮滩、横江口、瞿睡坝、国电码头4个典型断面,对数模计算及物模试验成果进行对比分析,各断面主要水力要素见表2。由于篇幅限制,表中仅列出部分工况,所示2个工况出力均为2010 MW,最大日变幅均为4.5 m,但二者小时变幅和出力调整次数不同。物模试验与数模成果基本一致,各日调节工况各典型断面电站下游日水位变幅和小时水位变幅相差不大,断面最大流速差值在0.03~1.00 m/s,最大比降差值在0.011%~0.157%。

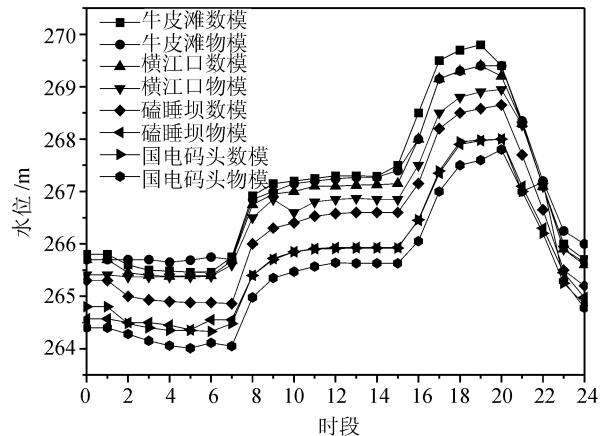


图4 某工况下典型断面数模计算、物模试验水位过程  
Fig.4 Change process of water level obtained by mathematical and physical model for a typical section under a certain condition

水深为 5.08 m,可以满足设计船舶对航深的要求;其它工况的下引航道瞬时最低水位均高于 265.08 m。在水位涨落过程中,引航道内水面均较平稳,比降小,无明显波浪。在引航道停泊段、调顺段及导航段内水流亦极缓,但在口门段长约 100~200 m 范围内存在一定的往复水流。往复流持续时间短,在 10~20 min 之间,具有间歇性特点,其最大流速随电站下泄流量增减速率的增加而增大,部分工况最大流速可达到 1.2 m/s。

在引航道口门区,日调节各工况最大流速均未超过 2 m/s,满足《船闸总体设计规范》(JTJ305—2001)要求。但受河道主流横向扩散的影响,口门区存在不同程度的斜流,从而产生横向水流。电站下泄流量越大,横向水流越明显。由于水位的频繁变化,将直接影响升船机承船厢与引航道下闸首工作门的安全对接,过大的水位变率还可能给升船机带来安全运行问题。而向家坝枢纽升船机对下游水位变率的要求是 20 min 不超过 0.5 m。因此,在电站进行出力调整前,建议关闭下游引航道内的辅助闸门,保障船舶过坝时升船机承船厢与下闸首工作门进行安全对接。

### 3.2.2 对下游近坝河段通航条件影响

#### 1) 代表船型消滩指标分析

由物模试验成果可知,在枢纽下泄流量突然增大时,下游河段将形成涨水顺波,波峰所经之处,流速、比降均相应增大,对船舶(队)航行带来一定的影响。船舶能否安全顺利上行,取决于船舶能否克服水流流速与比降所产生的阻力。

因此,流速和比降是影响船舶(队)上行的 2 个关键因素。根据四川省交通厅交通勘察设计研究院编制的《长江干线(水富至宜宾)航道建设工程工程可行性研究报告》中代表船型自航上滩的水力指标,见表 3,结合试验观测资料分析判断日调节各种工况下船舶是否能顺利上行。

表 4 日调节某工况船模试验结果

Tab.4 Experimental results of shipmodel under a certain daily regulation condition

船模	向家坝大桥—引航道口门航段	安边铁路桥—牛皮滩航段	烧瓦沱—和尚岩航段
1+2×1000 t 船队	可以顺利下行,但上行最大舵角已接近安全舵角的最大限值,需用舵克服斜横流的影响	上行最低航速及舵角已接近安全限值,上行极为困难;可顺利下行,但航速较高	低水期上下行最大舵角均超过安全舵角最大限值,无法安全上下行
1000 t 机动货船	可顺利上下行,但在口门区存在一定的斜流	可顺利上下行,但在铁路桥下航速偏低,用舵偏大	在水位在 266 m 以上,均可顺利上下行;在其他时段的低水期,因航槽弯窄,通行十分困难

表 3 船舶自航上滩水流指标

Tab.3 Indicator of flow while ship ascending rapid in generalized rapids reach

水面比降/%	相应流速/(m·s <sup>-1</sup> )
0.30	2.5
0.18	3.0
0.07	3.5

注:设计代表船型为 500 t 及 1000 t 级单船机驳。

由图 5 可得,各日调节工况条件下的水流指标均小于船舶上行允许的水流指标,表明在拟定的各种日调节工况下,设计代表船型 500 t 及 1000 t 及单船机驳可以在试验河段内顺利上行。

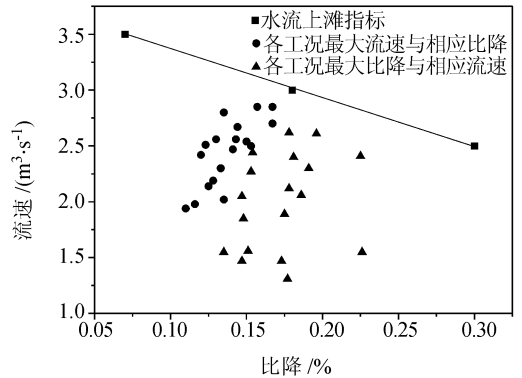


图 5 日调节各工况水力指标与上滩指标比较图

Fig.5 Comparison result of hydraulic indexes and ascending rapid indexes

#### 2) 船模试验成果分析

为进一步分析非恒定流对下游近坝河段通航条件的影响程度,采用两种试验船型进行自航船模试验,船型如下:1) 1+2×1000 t 顶推船队,尺寸为 160 m×10.8 m×2.0 m;2) 1000 t 机动货船,尺寸为 85.0 m×10.5 m×2.0 m。试验时船队(船)载重状态为满载。根据研究河段的具体情况,选择了 3 个航行难度较大的航段进行船模试验,分别为向家坝大桥—引航道口门航段,安边铁路桥—牛皮滩航段,烧瓦沱—和尚岩航段。某典型日调节工况的船模试验成果见表 4。

由表4可知,对于1+2×1 000 t级船队,和尚岩航段在低水期航槽弯窄,航道尺度小,船队无法安全通行;铁路桥下高水期流速及比降较大,船队上行十分困难。对于1 000 t级单体货船,除低水期的和尚岩航段通行较为困难外,其余试验河段船舶均能自航通过。

#### 4 结论与建议

作者通过1维数学模型计算与物理模型试验对向家坝水电站日调节所产生的非恒定流进行模拟,综合分析了非恒定流特性及其对航运水力要素的影响,并结合自航船模试验对重点航段进行了通航试验。研究表明:向家坝水电站要充分考虑下游航道船舶的安全通航要求,日内的调峰幅度和调峰变率不宜过大。水电站的日调节运行方式按枢纽下游水位最大小时变幅不超过1.5 m/h、最大日变幅不超过4.5 m/d进行控制。如果下游水富一宜宾段航道整治工程完成后,航运条件将有较大程度的改善,向家坝水电站非恒定流对下游航运条件的影响可能会有所减小。因此,后期可根据下游航道的整治情况进一步开展有关研究工作,同时对下游非恒定流特性及其对船舶航行的影响进行原型观测,积累实践经验,为进一步优化工程的调度运行方案提供依据。

#### 参考文献:

- [1] Zheng Shouren, Sun Eryu, Yang Wenjun. Study on the navigation and power station for hump modulation of Three Gorges and Gezhouba project [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2002, 20(2): 7-12. [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.]
- [2] Cao Minxiong, Pang Xuesong, Wang Xiuhong, et al. Experimental study on unsteady flow and sediment characteristic downstream of Xiangjiaba power station [J]. Hydro-science and Engineering, 2011, 127(1): 28-34. [曹民雄, 庞雪松, 王秀红, 等. 向家坝水电站下游非恒定水沙特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2011, 127(1): 28-34.]
- [3] Liu Yahui, Wang Yunli. Influence of daily regulation schemes of Jinghong hydropower station downstream navigation flow conditions [J]. Hydro-science and Engineering, 2012, 134(4): 103-107. [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, 134(4): 103-107.]

- [4] Liu Ya, Li Yitian, Sun Zhaohua. Impact of daily regulation for hydropower station on navigation conditions of downstream side of Gezhouba project in dry season [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(2): 147-152. [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.]
- [5] Huang Ying, Li Yitian, Han Fei. Influences of the Three Gorges hydropower station's daily regulation on water surface slope of downstream reach [J]. Hydro-science and Engineering, 2004, 101(3): 62-66. [黄颖, 李义天, 韩飞. 三峡电站日调节对下游河道水面比降的影响[J]. 水利水运工程学报, 2004, 101(3): 62-66.]
- [6] Zhang Bo, Li Bohai, Liu Xiaofei. Two-dimensional unsteady flow model of waterway on the lower reaches of Wujiangdu hub [J]. Port & Waterway Engineering, 2012, 101(7): 161-165. [张波, 李伯海, 刘晓菲. 乌江渡枢纽下游航道二维非恒定流数学模型研究[J]. 水运工程, 2012, 101(7): 161-165.]
- [7] Huang Y, Li Y T, Sun Z H. Influence of daily regulation reservoir on the downstream waterway [C]//Proceedings of the 9th International Symposium on River Sedimentation. Beijing: Science Press Ltd, 2004: 706-711.
- [8] Zhou G, Wang H, Shao X J, et al. Numerical model for sediment transport and bed degradation in the Yangtze River channel downstream of Three Gorges reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2009, 135(9): 729-740.
- [9] Rao G S. Influence on navigation of the flood-releasing and sedimentation of the Three Gorges Reservoir [C]//River Seimentation: Theory and Applications, Proceedings of the 7th International Symposium on River Sedimentation. Beijing: Science Press Ltd, 1998: 537-542.
- [10] 张绪进, 刘亚辉. 向家坝水电站下闸蓄水对下游河段通航条件的影响及对策分析报告[R]. 重庆: 西南水运工程科学研究所, 重庆交通大学, 2012.
- [11] Zhong Deyu, Peng Yang, Zhang Hongwu. Unsteady one-dimensional numerical model for alluvial rivers with heavy sediment load and its applications [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(6): 706-710. [钟德钰, 彭杨, 张红武. 多沙河流的非恒定一维水沙数学模型及其应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 706-710.]