

# 耦合引航道二维水流模型的向家坝水电站运行模式研究

曾勇红, 黄敏程

(天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 向家坝水电站以发电为主,但其运行受引航道通航安全水流流态的限制。根据华东电网典型日负荷统计特性,考虑到机组运行特性以及水位小时变幅与日变幅条件的要求,按照实际水流条件拟定5种向家坝水电站日发电调节流量。采用二维水动力模型揭示电站在不同发电流量运行时下游引航道口门区的流态,使用 MIKE21 对模型求解,从航道的横向流速、纵向流速、水位变幅以及回流情况等指标选择出两种可行的调度工况。最后,通过比较两种工况的日发电量,选择出最适合向家坝水电站的调度模式。按此模式调度,向家坝水电站的平均出力为 2 914 MW,日发电量为  $7\ 285 \times 10^4$  kW·h。

**关键词:** 引航道; 口门区流态; 二维水流模型; 水电站运行模式; 向家坝水电站

中图分类号: TV741

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)02-0130-06

## Operational modes of Xiangjiaba Hydropower Station coupled with two-dimensional hydrodynamic model of the navigation channel

ZENG Yonghong, HUANG Mincheng

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Xiangjiaba Hydropower Station is mainly used for power generation, but its operation is mandated by the requirement of safe flow pattern in the navigation channel. According to the statistical characteristics of the typical daily load of the East China Power Grid, taking into account the operating characteristics of the unit and the requirements of the hourly and daily variation amplitude of the water level, we drew up five kinds of daily power regulation flow for Xiangjiaba Hydropower Station based on the actual water flow conditions. A two-dimensional hydrodynamic model was used to reveal the flow pattern at the entrance of the downstream navigation channel when the station was operating at different power generation flows. MIKE21 was used to solve the model and two feasible scheduling modes were selected from indicators including the channel's lateral flow velocity, longitudinal flow velocity, water level variation amplitude and return flow conditions. Finally, by comparing the daily power generation of the two operational conditions, we ascertained the most suitable scheduling mode for Xiangjiaba Hydropower Station. According to this mode, with an average output of 2, 914 MW, Xiangjiaba Hydropower Station can reach a daily power generation of  $72.85 \times 10^6$  kW·h.

**Key words:** navigation channel; flow pattern at the entrance; two-dimensional hydrodynamic model; hydropower station operational mode; Xiangjiaba Hydropower Station

## 1 研究背景

建有船闸的大型水利枢纽在发挥综合效益时,发电、防洪及航运等运行工况与近坝河道水力过程有着密切的动力关系,且呈高维、时变、非线性的复杂特性。解释枢纽运行动态行为间复杂的水力耦合

机理,在满足运输需求的同时,充分发挥电站的经济效益,对于枢纽运行安全具有十分重要的地位。

向家坝水电站是金沙江下游河段最末的一个梯级电站。电站以发电为主,兼顾防洪、灌溉和拦沙功能,并对上游溪洛渡水电站的下泄流量进行反调节,改善两站之间的航运条件<sup>[1]</sup>。坝址枢纽所在河段

收稿日期:2021-09-18; 修回日期:2022-01-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508403)

作者简介:曾勇红(1973-),男,湖北仙桃人,博士,讲师,研究方向为水库调度和电力市场。

河床地形条件及通航条件均较为复杂,且该枢纽又紧邻宜宾市河段,涉及众多的关键技术问题,包括通航建筑物的运用与水库发电优化调度对长江干线航道条件的影响等。

近坝区发电、通航运行的水力耦合主要研究的是船闸充、泄水产生的水力要素波动与电站发电调节所产生的非恒定流间的耦合作用,以便确定通航水流与发电水流最优的组合情况,在满足船舶安全通航的同时保证水电站的发电效益。船舶在引航道处,由于水域狭窄且断面系数小,航行会受到限制,船行波波高大、流速急,易破坏航道环境和边坡,或对其他涉水建筑物造成干扰或损害<sup>[2]</sup>。张绪进等<sup>[3]</sup>通过1:100的物理模型研究了向家坝水电站日调节非恒定流对下游不同河段水位及流速的影响,为研究电站日调节非恒定流对坝址下游长河段航道条件的影响提供了理论依据;Shang等<sup>[4]</sup>和Rao<sup>[5]</sup>分别采用不同电站特征的水动力模型对不同工况下的航道条件进行了模拟,模拟结果与实测数据较为吻合;蔡新永等<sup>[6]</sup>利用小比尺船模测控技术,通过试验研究了向家坝水电站非恒定流对下游河道通航条件的影响;王志力等<sup>[7]</sup>采用一维非恒定流数学模型,研究了向家坝水电站至泸县水文局约145 km河段的枢纽下泄水流传播规律。岷江与向家坝日调节非恒定流在宜宾段交汇耦合,对此,黄小

利等<sup>[8]</sup>建立平面二维模型,研究了上游干、支流梯级水库日调节引起的叙渝段最不利通航水流条件;母德伟等<sup>[9]</sup>结合向家坝水电站日调节工况的数学模型以及物理模型,分析了向家坝水电站在枯水期不同日调节工况下的非恒定流传播特性及其对水位变幅、流速等航运水力要素的影响规律。这些研究揭示了电站发电运行对下游河道航运的影响,但极少针对发电对引航道水流流态的影响进行分析,目前对发电与通航运行的水力耦合关系尚不明确。

本文针对向家坝水利枢纽工程引航道通航水流特点,采用平面二维非恒定流数学模型,模拟电站发电运行方式下的通航建筑物引航道口门区的水流条件,分析发电与通航运行的水力耦合响应特性,从而制定出满足通航要求的电站经济发电运行模式。

## 2 引航道口门区二维水动力模型

### 2.1 控制方程

对三向不可压缩的自由面航道水流,当服从Boussinesq假定与静水压力假定时,其二维非恒定浅水方程组如下<sup>[10]</sup>。

连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (1)$$

运动方程:

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial y} = f\bar{v}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \quad (2)$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} = -f\bar{u}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (3)$$

式中: $t$ 为时间,s; $x,y$ 为笛卡尔坐标系坐标,m; $h$ 为总水深,m, $h = \eta + d$ , $\eta$ 为水位,m, $d$ 为静止水深,m; $u,v$ 分别为 $x,y$ 方向上的速度分量,m/s; $S$ 为源项,m<sup>3</sup>/s; $f$ 为Coriolis力系数, $f = 2\omega\sin\varphi$ , $\omega$ 为地球自转角速度,rad/s, $\varphi$ 为当地纬度; $g$ 为重力加速度,m/s<sup>2</sup>; $\rho$ 为水的密度,kg/m<sup>3</sup>; $\rho_0$ 为水的初始密度,kg/m<sup>3</sup>; $p_a$ 为大气压力,Pa; $s_{xx},s_{xy},s_{yy}$ 分别为辐射应力分量,m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>; $u_s,v_s$ 为源项水流流速,m/s; $\bar{u},\bar{v}$ 为沿水深平均流速,m/s,由 $h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz$ 和 $h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz$ 来定义。 $T_{ij}$ 为水平黏滞应力项,包括黏性力、紊流应力和水平对流,采用涡流黏性方程(4)计算:

$$T_{xx} = 2A\frac{\partial\bar{u}}{\partial x}, T_{xy} = A\left(\frac{\partial\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial\bar{v}}{\partial y}\right), T_{yy} = 2A\frac{\partial\bar{v}}{\partial y} \quad (4)$$

式中: $A$ 为涡流黏性系数,m<sup>2</sup>/s。

### 2.2 求解方法

MIKE21 FM采用有限体积法求解二维水动力模型,其基本思路为<sup>[11]</sup>:将计算域划分成若干规则或不规则形状的单元或控制体,并使每个网格点周围有一个控制体,将待解的微分方程对每个控制体积分,得出一组离散方程。一般仅进行空间的单元剖分,进而采用时间离散求解线性代数方程组,最终得到数值近似解。

MIKE21 FM的空间离散、时间积分和边界条件的处理如下。

(1)空间离散。计算区域的空间离散方法为有限体积法,将计算区域离散成控制体积的不重叠单

元。MIKE21 中仅考虑三角形与四边形单元。

(2)时间积分。MIKE21 对于浅水方程的求解有两种方法,一是低阶法,即低阶显示的欧拉方法,二是高阶法,即使用二阶的龙格-库塔法。本文采用了低阶法,对于一般的模拟可达到精度和计算速度的平衡。

(3)边界条件。①闭合边界。沿着陆地闭合边界,法向流速为0。②开边界。开边界条件由流量过程、水位过程或水位流量关系给定。③动边界。动边界是水平计算域中有水与无水区域的界限,由于动边界的形状和整体位置的不断变化,所以其数值模拟的难度非常大。数值处理时既可以追踪动边界的准确位置,也可以只关注动边界所在的网格。本文采用 Zhao 等<sup>[12]</sup>的方法处理动边界(干湿边界)问题。当水深较小时,只考虑质量通量,不计动量通量;当水深足够小时,与相邻网格单元合并为一个单元。

### 3 发电调度运行模式提取

向家坝河段主汛期为7-9月,10月为汛后退水期。根据向家坝水电站水库调度规程<sup>[13]</sup>,丰水期时,电站主要承担基荷和部分腰荷,出力与下泄流量变幅较小,对航运影响不大。因而在丰水期时电站根据出力需求运行即可,需要考虑的是枯水期时电站的运行方式。

枯水期时,电站主要承担系统峰荷,出力与下泄流量变幅较大。华东电网供电区域处于我国东部经济发达地区,工业用电量较大。根据电网负荷统计可知<sup>[14]</sup>,华东电网典型日负荷曲线呈现出典型的双峰特征,中午11:00左右出现第1个高峰期,下午19:00左右出现日最高峰,如图1所示。

考虑到机组运行特性、水位小时变幅与日变幅条件的要求,本文工况的设定不是通过基腰荷的比例来确定极限工况的最大和最小流量,而是根据电网负荷峰谷出现时间和日负荷波动形状拟定了两种极限工况。第1种工况时,日调节最小流量为1500 m<sup>3</sup>/s(交通运输部认为向家坝水库调度规程拟定的最小下泄流量1200 m<sup>3</sup>/s的论证不充分,提倡使用1500 m<sup>3</sup>/s的最小下泄流量<sup>[15]</sup>),将最大下泄流量拟定为4750 m<sup>3</sup>/s;第2种工况时,日调节最大流量达到最大引用流量7100 m<sup>3</sup>/s,此时最小下泄流量为3800 m<sup>3</sup>/s。在两种极限流量工况的包络范围内再拟定3种工况,分别记为工况a、工况b与工况c,考虑该5种日发电调节流量对航运的影响。5种工况的流量过程如图2所示。

## 4 发电和通航运行耦合模拟

### 4.1 计算区域及网格划分

向家坝水电站通航建筑物主要由上游引航道、下游引航道与升船机组成。根据通航建筑物设计规范,引航道引导船舶安全顺利地进出船闸(升船机),要求引航道内的水流状况较为平稳,一般不存在通航安全问题。而进出河水流态平稳的引航道之前要经过动静水交界区域的口门区,口门区内的水流由于天然径流的变化、电站泄流及日调节等原因而呈现一定的不稳定状态,因而船舶容易在口门区遇到一些安全问题。为此,保证口门区水流要素满足安全限值的要求是保证船舶能够顺利进出流态较为稳定的引航道的关键<sup>[16]</sup>。在实际通航过程中,引航道口门区水力要素普遍存在着超过安全限值的问题,特别是当坝址位于山区时,河段较为弯曲,航道枢纽布置很难满足规范要求<sup>[17]</sup>。

向家坝水电站上游引航道位于大坝的坝身段,坝身段引航道上游外侧设有浮导航墙,而且水库库容较大,有利于改善上游引航道口门区的流态。实船试航表明<sup>[18]</sup>,在1700、3800、4600 m<sup>3</sup>/s 3个发电流量工况下,下游引航道口门区回流流速局部超过规范,超标区域集中在口门区下游岸坡附近。因此,本文将研究区域集中在下游引航道口门区附近。

引航道口门区一般是指分水建筑物头部以外一定范围内的区域,其宽度为引航道口门宽度,其长度为拖带船队的1.0~1.5倍船队长度。向家坝船闸闸室长度为125 m,即其船队计算长度约为120 m,所以口门区长度范围为120~300 m;下游引航道口门宽度取其实际宽度,即60 m。

模型模拟区域为下游分水堤头部向下游170 m与向上游300 m所围成的区域。计算采用三角形网格,每个单元宽20 m。分水堤头部下游区域共划分913个网格,最大网格面积为180 m<sup>2</sup>;分水堤头部上游区域共划分992个网格,最大网格面积控制在590 m<sup>2</sup>以内。下游引航道口门区模型范围及网格划分见图3。

### 4.2 数值模拟结果与分析

向家坝下游航道为Ⅳ级航道,规划航道等级为Ⅲ级。为保证向家坝的日常通航,向家坝下游水流条件需要满足一定的安全限值要求。对于航运而言,主要需要关注航道的横向流速、纵向流速、水位变幅以及回流情况等问题。向家坝口门区的水流条件限值见表1。

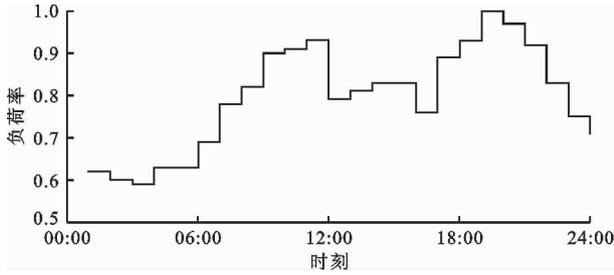


图 1 华东电网典型日负荷过程线

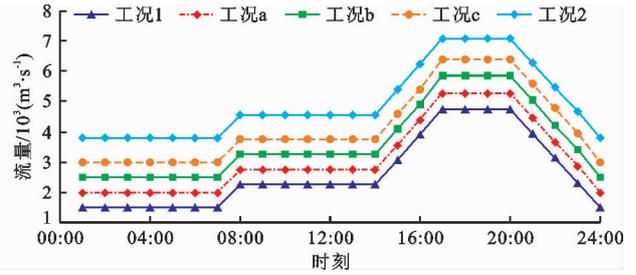
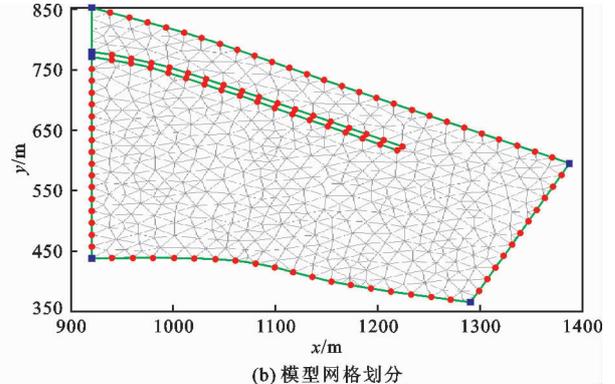


图 2 5 种设定工况的向家坝水电站日发电调节流量过程



(a) 模型模拟范围示意图



(b) 模型网格划分

图 3 下游引航道口门区模型模拟范围及网格划分

表 1 向家坝引航道口门区水流条件限值<sup>[19]</sup> m/s

航道级别	平行航线的纵向流速	垂直航线的横向流速	回流流速
I - IV	≤2.0	≤0.3	≤0.4

表 1 所示的水流条件限值是对航道水流的一般要求,即航道中大部分区域水流条件达到要求即可,对于少部分区域允许水流条件超过上述限值,纵向和横向安全流速分别可达 2.2 和 0.4 m/s。此外,一些研究表明,在最大纵向流速为 2.7 m/s 与最大横向流速为 0.45 m/s 时,亦可保证航道安全通航<sup>[20]</sup>。

模拟计算的上边界条件为日调节流量过程(图 2),下边界条件为给定水位。模拟结果见表 2。

表 2 5 种工况下引航道口门区流态与流速数值模拟结果

工况	流态	纵向流速	横向流速
工况 1	无回流	0 ~ 1.5	0 ~ 0.22
工况 a	无回流	0 ~ 1.7	0 ~ 0.40
工况 b	无回流	0 ~ 1.8	0 ~ 0.50
工况 c	有回流(≤0.3 m/s)	0 ~ 1.9	0 ~ 0.55
工况 2	有回流(≤0.3 m/s)	0 ~ 1.9	0 ~ 0.70

由表 2 可以看出,在 5 种工况下流态与纵向流速均能满足基本的航运需要,但是工况 b、工况 c 与

工况 2 均有横向流速超限,为此仅考虑工况 1 与工况 a 下的水力耦合特性,以确定满足航运要求的最大发电量的日调节方式。

给定工况 1 与工况 a 的流量过程,采用 MIKE21 水动力模型模拟下游航道水位变化。沿航道方向取一系列位置点,可得到航道水位的日变幅情况。模拟结果发现,水位剧烈变化的时段出现在晚高峰出力时段,其余时间几乎没有大的波动,这与负荷在晚高峰时有较大升高的特性相对应。下游航道水位最大日、小时水位变幅见表 3。

表 3 下游航道水位变幅

工况	最大日变幅/ (m · d <sup>-1</sup> )	最大小时变幅/ (m · h <sup>-1</sup> )
工况 1	2.2	1.2
工况 a	3.2	1.2

图 4 给出了工况 1 和工况 a 下游航道 3 个不同位置点的水位变幅,其中 3 个位置点按照点位顺序 1、2 和 3 分别距离分水堤头部 43.6、99.2 和 155.9 m。

向家坝水电站水库调度规程规定电站暂时可按下游水位最大小时变幅不超过 1.0 m/h 与最大日变幅不超过 4.5 m/d 来运行。但是根据中国电建集团中南勘测设计院的最新研究表明,向家坝水电站日

调节的水位小时变幅可采用 1.0、1.5 与 2.0 m/h 来控制,水位日变幅可采用 4.5 与 6.0 m/d 来控制。

因此,工况 1 与工况 a 均满足日调节所要求的航道水位变幅要求。

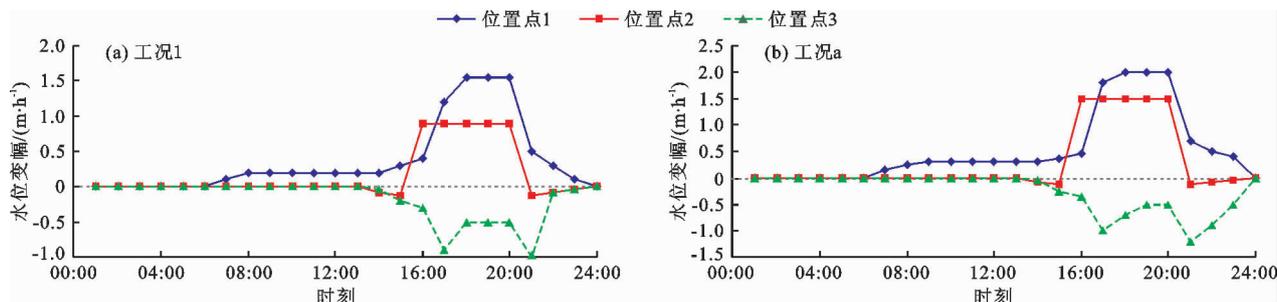


图4 工况 1 和工况 a 下游航道 3 个位置点的日水位变幅

### 4.3 电站运行模式优选

现行航电项目一般均以发电量作为效益评价指标<sup>[21]</sup>。在枯水期时,向家坝水电站日调节发电出力最大可拟采用工况 1 与工况 a 来运行,两工况水电站出力计算公式如下:

$$N = K \cdot Q \cdot H \quad (5)$$

式中:  $Q$  为通过水电站水轮机的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $H$  为水电站的净水头,  $\text{m}$ ;  $K$  为水电站的综合出力系数(向家坝水电站装机容量为 6 400 MW, 为大型水电站,  $K$  取 8.5)。

向家坝水库为季调节水库,兴利调节库容达  $9.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其日来流与泄流变化过程内上游水位变化不大,可认为上游水位在一天内恒定不变。因此,假定上游水位为正常蓄水位 380 m 恒定不变,下游水位根据各工况的下边界水位过程线取定,流量根据各工况的流量过程线取定,两种工况的水头与流量过程线见图 5。

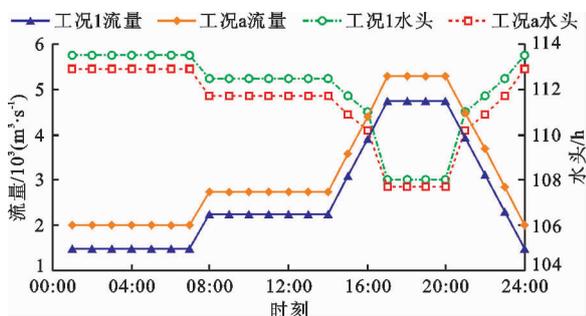


图5 工况 1 与工况 a 日流量过程线与水头变化曲线

根据公式(5),可计算出向家坝水电站枯水期典型日调节工况 1 的平均出力为 2 442 MW,发电量为  $6\ 100 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ;工况 a 的平均出力为 2 914 MW,发电量为  $7\ 285 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

为此可采用工况 a 作为满足航运条件的最大出力日调节工况。

## 5 结 论

本文采用 MIKE21 水动力模型模拟了向家坝引航道的水流情况,分析了向家坝水电站枯水期日调节运行的发电与通航水力耦合特性,研究了向家坝水电站日调节下泄水流产生的非恒定流对通航的影响。主要结论如下:

(1) 根据拟定的多组日调节工况来进行模拟,挑选出满足航运要求的工况 1 与工况 a,再结合通航发电小时变幅与日变幅的要求进行分析,两种工况均能满足变幅限值要求。

(2) 通过比较两种可行发电工况的日发电量,选择了日发电量较大的工况 a 作为日调节工况,用于指导电站枯水期调度运行,其平均出力为 2 914 MW,发电量为  $7\ 285 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

(3) 船舶运行的安全性和舒适性需要分析非恒定流引起的首摇、横摇和垂荡频率的变化规律,需要建立精细化的三维水动力模型来分析波浪对船舶的作用,在这方面还有待于进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 周铁柱,陈振虹,杨定贵. 向家坝工程巨大的综合效益[J]. 中国三峡,2012(11):14-19.
- [2] 王孟飞,邓斌,蒋昌波,等. 限制性航道中船行波传播特性的数值研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(5):157-163.
- [3] 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.
- [4] SHANG Yizi, LI Xiaofei, GAO Xuerui, et al. Influence of daily regulation of a reservoir on downstream navigation[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2017, 22(8): 05017010.
- [5] RAO G S. Influence on navigation of the flood-releasing and sedimentation of the Three Gorges Reservoir[C]// Riv-

- er sedimentation: Theory and applications, Proceedings of the 7th International Symposium on River Sedimentation, Beijing, 1998.
- [6] 蔡新永,蔡汝哲,李晓飏,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,2017,42(2): 77-82.
- [7] 王志力,陆永军. 向家坝水利枢纽下泄非恒定流的数值模拟[J]. 水利水电科技进展,2008,28(3): 12-15.
- [8] 黄小利,郭志学,陈日东. 基于日调节非恒定流影响的长江叙渝段最不利通航水位数值模拟[J]. 水电能源科学,2016,34(12): 78-82.
- [9] 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.
- [10] 孙光春. 取排水口附近流场模拟及对通航的影响研究[D]. 大连:大连海事大学,2017.
- [11] PENG Szu-hsien, TANG Chuan. Development and application of two-dimensional numerical model on shallow water flows using finite volume method[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2015, 3: 989-996.
- [12] ZHAO D H, SHEN H W, TABIOS G Q, et al. Finite-volume two-dimensional unsteady-flow model for river basins[J]. Journal of Hydraulic, 1994, 120(7): 863-883.
- [13] 周铁柱,陈振虹,杨定贵,等. 向家坝水电站水库调度规程综述[C]//中国水力发电工程学会,四川省水力发电工程学会. 2011年南方十三省(区、市)水电学会联合会暨学术交流会论文集,2011.
- [14] 王永强,母德伟,李学明,等. 兼顾下游航运要求的向家坝水电站枯水期日发电优化运行方式[J]. 清华大学学报(自然科学版),2015,55(2): 170-175+183.
- [15] 张毅,刘勇,张帅帅. 向家坝日调节运行对长江叙渝段航道维护影响研究[J]. 水运工程,2017(1): 108-114.
- [16] 李伟,张宝航. 船闸下引航道口门区回流特性及改善措施[J]. 水运工程,2013(8): 160-164.
- [17] 孙国栋. 濠里枢纽二线船闸引航道口门区通航水流条件改善措施研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.
- [18] 向家坝升船机试航指挥部. 向家坝升船机第一阶段实船试航报告[R]. 向家坝升船机试航指挥部,2018.
- [19] 陈辉,刘志雄,江耀祖. 引航道通航水流条件数值模拟[J]. 水利水运工程学报,2012(4): 13-18.
- [20] 龚德成,白成亮,杨世胜. 通航建筑物口门区及连接段通航水流条件探讨[J]. 中国水运,2007,7(1): 31-32.
- [21] 顾文钰,李晓英,蒲楠楠. 内河航电枢纽工程发电量指标评价研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2): 185-188.

(上接第129页)

- [13] 普晓刚,宋辉,金辉,等. 分汊河段河中布置船闸水沙碍航特性研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(2): 142-146.
- [14] 普晓刚,李俊,都媛媛,等. 湘江土谷塘航电枢纽船闸通航水流条件优化试验研究[J]. 水道港口,2011,32(5): 346-350.
- [15] 李艳富,杨宇,韩昌海,等. 瓯江三溪口航电枢纽引航道布置优化试验研究[J]. 水利水运工程学报,2014(2): 89-94.
- [16] 周华兴,郑宝友. 船闸引航道口门区通航水流条件改善措施[J]. 水道港口,2002,23(2): 81-86.
- [17] 周华兴,郑宝友,李金合. 船闸引航道口门区水流条件限值的探讨[J]. 水运工程,2002(1): 38-42.
- [18] 牛国杰. 弯曲河段船闸口门区通航水流条件限值的研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2018.
- [19] Department of the Army. Hydraulic design of navigation locks: EM 1110-2-1604 [S]. Washington: U S Army Corps of Engineers, 1975.
- [20] 中华人民共和国交通部. 船闸总体设计规范:JTJ 305—2001 [S]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [21] 彭伟,普小刚,乾东岳. 五强溪枢纽船闸下游引航道口门区通航条件物理模型试验研究报告[R]. 天津:交通运输部天津水运工程科学研究所,2015.