



# 向家坝日调节运行对长江叙渝段 航道维护影响研究

张毅, 刘勇, 张帅帅

(长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

**摘要:**金沙江最下游梯级向家坝水电站, 因其装机容量大, 发电运行期间非恒定流造成坝下水位日变幅及小时变幅较大, 会对长江叙渝段航道维护造成严重影响。基于长河段非恒定流数学模型, 研究向家坝水电站日调节运行后长江上游非恒定流传播特性, 分析日调节运行对航道维护的影响, 提出相应航道维护管理对策。

**关键词:** 日调节; 非恒定流; 航道维护; 长江叙渝段

**中图分类号:** TV 135.4; U 61

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2017)01-0108-07

## Effect of unsteady flow caused by Xiangjiaba daily regulation on downstream waterway maintenance

ZHANG Yi, LIU Yong, ZHANG Shuai-shuai

(Changjiang Chongqing Harbor and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** Xiangjiaba hydropower station in the Jinsha river has a big installed capacity. During operating, it will cause downstream unsteady flow which makes the big water level variation amplitude, and thus influence seriously the waterway maintenance management of Yibin to Chongqing reach of the Yangtze River. Based on the long river unsteady flow mathematical model, we study the development of the unsteady flow, analyze the influence of the daily regulation of waterway maintenance, and put forward corresponding maintenance management measures.

**Keywords:** daily regulation; unsteady flow; waterway maintenance; river reach from Yibin to Chongqing

2013年, 向家坝水库蓄至正常蓄水位 380 m, 电站已经步入运行期。根据《金沙江向家坝水电站水库运用和电站运行调度规程(试行)》(简称《调度规程》), 向家坝水电站相关的航运参数为: 下游水位最大日变幅暂按不超过 4.5 m/d 控制, 最大时变幅暂按不超过 1 m/h 控制, 最小下泄流量为 1 200 m<sup>3</sup>/s<sup>[1]</sup>。然而, 向家坝下游紧接长江干线叙渝段航道, 未来随着电站日调节运行, 势必对河段通航条件和航道维护产生重要影响。目前, 关于向家坝日调节对下游航道维护影响的研究很少, 相关日调节非恒定流计算多采用一维数学模型,

而本文建立了长河段平面二维非恒定流数学模型, 研究向家坝日调节运行后长江上游非恒定流传播特性, 揭示电站日调节对航道维护的影响, 为航道维护管理提供对策。

### 1 叙渝段航道概况及上游枢纽建设情况

#### 1.1 航道概况

长江上游宜宾合江门—重庆羊角滩河段(简称叙渝段), 全长 384 km。目前, 叙渝段航道技术等级为Ⅲ级, 维护尺度标准为 2.7 m×50 m×560 m, 保证率为 98%, 航道维护类别为一类, 航标配布

收稿日期: 2016-05-05

作者简介: 张毅(1984—), 男, 工程师, 从事航道整治工程设计工作。

类别为一类。叙渝段实行分月的维护尺度, 其中 12 月至 4 月执行 2.7 m×50 m×560 m 的维护尺度, 5 月和 11 月执行 3.2 m×60 m×600 m 的维护尺度, 6 月和 10 月执行 3.5 m×60 m×600 m 的维护尺度, 7—9 月, 执行 3.7 m×80 m×700 m 的维护尺度<sup>[2]</sup>。长江叙渝段河势见图 1。



图 1 长江叙渝段河势

### 1.2 金沙江、岷江枢纽建设情况

长江上游金沙江已建的大型水电枢纽主要有溪洛渡和向家坝水电站。岷江已建及在建的大型水利水电枢纽主要有岷江干流的梯级水电站(包括紫平铺水利枢纽)、大渡河梯级水电站(包括瀑布沟、龚嘴、铜街子、沙湾、安谷等)。金沙江向家坝、溪洛渡等水电枢纽和岷江梯级水电枢纽势必给下游航道水文条件带来一定影响。

## 2 向家坝日调节下长江叙渝段非恒定流模拟研究

对于长河段日调节非恒定流计算, 以往多采用一维非恒定流数学模型, 只能反映断面(流速、水位)平均值变化情况, 与实际情况存在较多的差异。为此, 本次计算分析研究时, 建立了兼顾计算精度、效率、稳定性、非恒定流交汇、叠加的平面二维非恒定流数学模型, 实现水富—重庆全河段二维非恒定流数值模拟。

### 2.1 模型建立

基本控制方程采用水深平均下的浅水方程:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot hu = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d(hu)}{dt} = A_H h \nabla^2 u - gh \nabla \eta - \frac{gn^2 |u| u}{h^{1/3}} \quad (2)$$

式中:  $\eta$  为水位;  $u$  为水流平均速度;  $h$  为水深;  $g$  为重力加速度;  $n$  为糙率;  $A_H$  为水平涡黏系数。

模型采用隐式与显式嵌套方法求解。求解思路为: 先采用基于欧拉-拉格朗日方法(ELM)的隐式格式对水流方程进行初步求解。利用 ELM 求解对流项时, 能从  $n+1$  时刻的质点位置高效地沿流线逆向追踪到  $n$  时刻的位置, 这样就摆脱了常规欧拉方法的 CFL 条件限制, 它与隐式因子的联合应用使得模型能以一致的较大的时间步长求解, 而数值稳定性不受影响, 故效率大为提高, 较好地缓解了模型跨尺度计算的要求, 但是 ELM 追踪其实是基于流线追踪, 对于溃坝这类复杂的非恒定流, 流线与迹线相差较大。因此, 在临时水位与流场的基础上, 通过特征分裂算法显式迭代修正流场和水位, 还原了一些被隐式算法抹去了流场信息, 提高了计算精度。

模型计算河段从金沙江向家坝水电站、岷江高场水文站至长江干流重庆长寿, 采用实测地形资料, 以三角形网格划分区域, 网格间距 25 ~ 50 m, 节点数 291 969, 网格数 562 502。

### 2.2 模型验证

模型采用航行基面水尺实测资料对沿程河段糙率进行率定(图 2)。糙率随水深变化, 模型糙率率定按不同流量级进行, 由小流量级向大流量级推进, 对于小流量级率定完成的网格糙率值, 将不再调整, 流量增加后的糙率调整只对新增过流区内网格糙率进行调整。

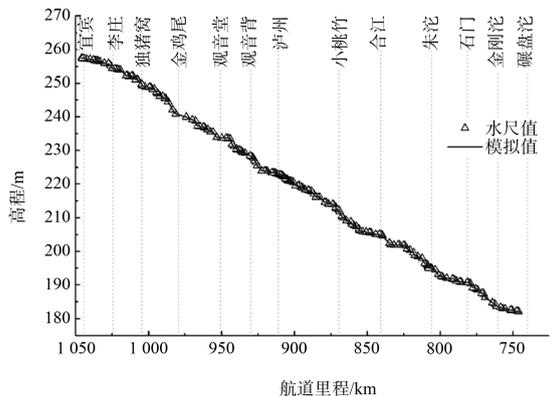


图 2 叙渝段沿程水尺水位验证

非恒定流的验证采用向家坝运行后叙渝段宜宾合江门、棺木岩、泸州、合江、朱沱等航行水尺和水文(位)站实测资料进行验证(图 3)。

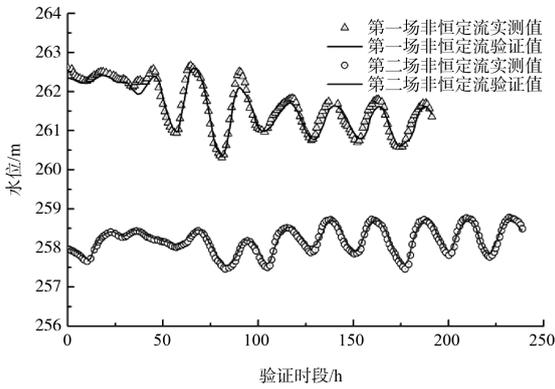


图3 宜宾合江门非恒定流验证

### 2.3 计算工况

长江叙渝段上游由金沙江、岷江汇入，非恒定

流工况应同时考虑金沙江向家坝日调节和岷江枢纽日调节。

针对《调度规程》确定的向家坝水电站相关航运参数，交通运输部提出：“向家坝水库最小下泄流量 1 200 m<sup>3</sup>/s 论据不充分，在 2014 年 4 月底前暂按最小下泄流量 1 500 m<sup>3</sup>/s 试运行，下游水位最大日变幅不超过 3 m 试运行<sup>[3]</sup>。”根据不同平均出力下的日调峰运行工况与相应的电站下泄流量变化过程(中南勘测设计研究院提供)，及以上相关文件要求，拟定了 2 种运行方案，每种方案各有 10 个典型工况。各工况流量过程见表 1。

表1 向家坝日调节工况下泄流量特征

日调节 工况	日均出力/ (万 kW·h)	日最大流量/ (m <sup>3</sup> /s)	日最小流量/ (m <sup>3</sup> /s)	日均流量/ (m <sup>3</sup> /s)	日最大流量/ 日最小流量	设计拟定控制参数
1	1 500	2 299	1 518	1 648	1.51	
2	1 700	2 982	1 518	1 817	1.96	
3	2 000	3 578	1 518	2 241	2.36	
4	2 200	3 817	1 681	2 462	2.27	
5	2 500	4 066	1 843	2 727	2.21	
6	3 000	4 283	2 006	3 184	2.14	
7	3 500	4 988	2 548	3 798	1.96	
8	4 000	5 747	2 928	4 389	1.87	
9	4 500	6 072	3 719	4 935	1.57	
10	5 000	6 072	4 446	5 460	1.37	
11	1 500	2 711	1 200	1 559	2.26	
12	1 700	3 036	1 200	1 888	2.53	
13	2 000	4 337	1 200	2 152	3.61	
14	2 200	4 717	1 410	2 419	3.35	
15	2 500	5 205	1 627	2 728	3.20	
16	3 000	5 205	1 952	3 211	2.67	
17	3 500	5 205	2 310	3 783	2.25	
18	4 000	5 693	1 843	3 186	3.09	
19	4 500	6 072	2 060	3 721	2.95	
20	5 000	6 072	2 819	4 370	2.15	

方案 1：水位日变幅不超过 3 m，水位时变率不超过 1 m

方案 2：水位日变幅不超过 4.5 m，水位时变率不超过 1 m

岷江枢纽日调节根据 2013—2015 年岷江高场站非恒流实测资料确定。高场水文站非恒定流情况主要有 4 种类型：类型 1 水位变幅较小(小于 0.4 m)，波峰波谷出现时间比较乱；类型 2 水位变幅约 0.6 m，波峰值在 7 点开始且持续较长，波谷在 2 点左右；类型 3 水位变幅约 1.0 m，波峰值在 12 点左右，波谷在 6 点左右；类型 4 水位变幅超过约 0.8 m，波峰值在 18 点左右，波谷在 6~

9 点左右。考虑水位变幅最大，选择类型 3 作为岷江非恒定流工况，其日最小下泄流量 765 m<sup>3</sup>/s，日均流量 1 161 m<sup>3</sup>/s。

计算工况按照金沙江向家坝日调节工况(20 个工况，图 4、5)与岷江非恒定流工况(类型 3，图 6)的组合。确定最大水位日变幅与时变幅时，下边界采用三峡水库正常蓄水位 175 m。最大变幅工况下，下边界采用了三峡水库正常蓄水位 175 m

与消落期水位 155 m 两种水位。

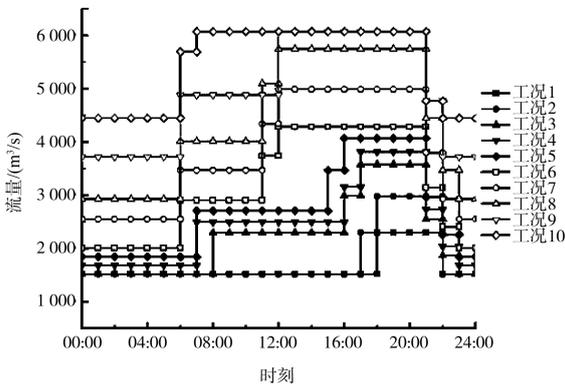


图 4 向家坝非恒定流工况 1~工况 10

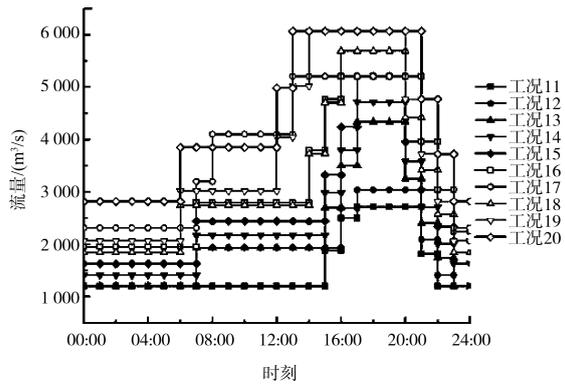


图 5 向家坝非恒定流工况 11~工况 20

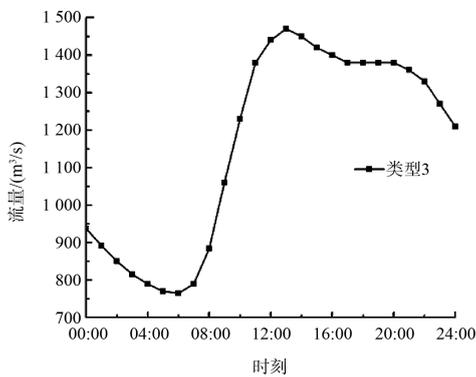


图 6 岷江非恒定流工况

### 2.4 成果分析

通过模型计算, 得到向家坝不同日调节工况下叙渝段沿程的水位变化、流场变化及重点滩段的非恒定流量变化过程。本文主要介绍日调节工况下叙渝段沿程水位变化的成果:

1) 向家坝运行方案 1 下(图 7), 工况 8 的非恒定流日变幅和最大时变幅都是最大, 宜宾日调节非恒定流最大日变幅、最大时变幅分别为 2.39 和 0.41 m;

李庄日变幅、最大时变幅分别为 1.66 和 0.27 m; 泸州日变幅、最大时变幅分别为 1.29 和 0.17 m; 合江日变幅、最大时变幅分别为 0.86 和 0.14 m; 朱沱日变幅、最大时变幅分别为 0.90 和 0.12 m; 九龙滩日变幅、最大时变幅分别为 0.64 和 0.09 m。

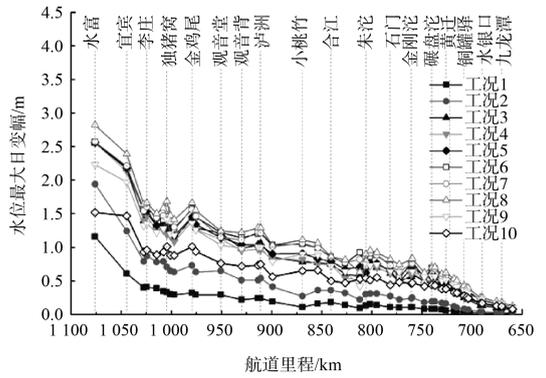


图 7 方案 1 (工况 1~10) 水位日变幅

2) 向家坝运行方案 2 下(图 8), 工况 19 的非恒定流日变幅和最大时变幅都是最大, 宜宾日调节非恒定流最大日变幅、最大时变幅分别为 3.24 和 0.56 m; 李庄日变幅、最大时变幅分别为 2.25 和 0.38 m; 泸州日变幅、最大时变幅分别为 1.69 和 0.27 m; 合江日变幅、最大时变幅分别为 1.21 和 0.18 m; 朱沱日变幅、最大时变幅分别为 1.07 和 0.18 m; 九龙滩日变幅、最大时变幅分别为 0.73 和 0.09 m。

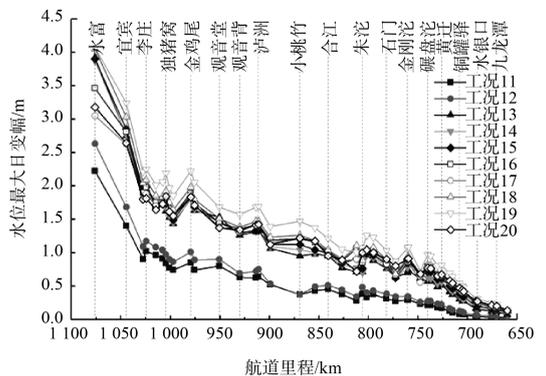


图 8 方案 2 (工况 11~20) 水位日变幅

3) 根据沿程水位变化, 电站下泄流量日变幅越大, 叙渝段沿程水位日变幅也越大, 水位变幅沿程总体呈递减的趋势, 但局部存在变幅加大的情况, 主要原因是局部河段滩槽分明, 枯水期河槽狭窄、边滩较宽, 洪水期边滩淹没、水面变宽。

### 3 向家坝日调节对叙渝段航道维护的影响

#### 3.1 日调节运行对航道维护尺度的影响

##### 3.1.1 对最小维护尺度的影响

叙渝段航道维护尺度主要受来流的影响，而电站日调节不同工况对来流的调节最终决定最小维护尺度。电站日调节的最不利工况直接限制下

游航道维护尺度，为分析向家坝日调节对叙渝段重点滩险航道尺度的影响，根据前述章节建立的叙渝段二维非恒定流模型，选取最不利工况组合，对主要水尺水位进行计算。根据水位计算成果，对重点滩险进行航道尺度核查(表2)。

表2 向家坝日调节不利工况下叙渝段航道维护尺度

工况组合	向家坝日调节工况	岷江日调节工况	叙渝段可达到的维护尺度 (水深×航宽×弯曲半径)/(m×m×m)
计算工况1	方案1(工况1):日最小下泄流量1 518 m <sup>3</sup> /s,日均流量1 648 m <sup>3</sup> /s	类型3:日最小下泄流量765 m <sup>3</sup> /s,日均流量1 161 m <sup>3</sup> /s	2.7×50×560
计算工况2	方案2(工况11):日最小下泄流量1 200 m <sup>3</sup> /s,日均流量1 559 m <sup>3</sup> /s	类型3:日最小下泄流量765 m <sup>3</sup> /s,日均流量1 161 m <sup>3</sup> /s	2.5×50×560

从表2中可以看出，当向家坝最小下泄流量为1 200 m<sup>3</sup>/s时，叙渝段部分重点滩险维护尺度只能达到2.5 m×50 m×560 m。当向家坝最小下泄流量为1 518 m<sup>3</sup>/s时，叙渝段主要滩险的维护尺度可以保证最小维护尺度达到2.7 m×50 m×560 m。

从电站下泄流量变化的角度看，只要电站最小下泄流量确定，则电站运行的下泄流量会在最小下泄流量以上一定范围变化。如果最小下泄流量偏小，则肯定会对叙渝段最小维护尺度造成重要影响。因此，最小下泄流量的确定至关重要。

##### 3.1.2 对分月维护尺度的影响

通过近年叙渝段航道维护水尺观测资料可知，只要保证一定的宜宾流量，则下游航道尺度就能基本达到维护要求<sup>[4]</sup>。所以，通过对叙渝段主要浅滩或水道航道尺度进行核查，得出相应维护水深尺度下滩段水位要求，进而推求水位对应的宜宾流量(表3)。

根据向家坝电站枯水期日调节最小下泄流量(方案1为1518 m<sup>3</sup>/s,方案2为1 200 m<sup>3</sup>/s)，中洪水期月平均出力最小值对应的下泄流量，以及各支流分月的最小流量(根据1990—2011年22 a序列实测日平均流量资料)，可计算出向家坝日调节运行后分月的宜宾流量<sup>[5]</sup>。对比向家坝运行后分月的宜宾流量与叙渝段分月维护尺度所需宜宾流量(表3)。

表3 向家坝运行后分月宜宾流量与叙渝段分月所需宜宾流量对比 m<sup>3</sup>/s

月份	分月维护尺度所需 宜宾流量	方案1分月宜 宾流量	方案2分月宜 宾流量
1	2 071	2 144	1 826
2	2 071	2 113	1 795
3	2 071	2 121	1 803
4	2 071	2 150	1 832
5	3 200	2 277	2 277
6	3 800	3 263	3 263
7	5 000	5 318	5 318
8	5 000	5 659	5 659
9	5 000	5 582	5 582
10	3 800	5 586	5 586
11	3 200	2 644	2 644
12	2 071	2 239	1 921

综合以上得知，向家坝运行对叙渝段分月维护尺度的影响如下：

1) 12月至次年4月为枯水期，由于来流量较小，电站平均出力小，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，但只要最小下泄流量合理，就基本不会影响枯水期叙渝段维护尺度。

2) 汛前或汛初5、6月和汛后退水期的10、11月，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。但目前叙渝段这几个月份实行中洪水期维护尺度，维护水深为3.2 m或3.5 m，根据表3，5、6、11

月遇到极端条件则难以满足维护水深,影响分月的维护尺度。

3) 主汛期7~9月,水库原则上按泄量等于来量的方式控制水库下泄流量,由于水量丰沛,电站满装机或按预想出力发电几率较高,出流日内变化较小。从表3来看,向家坝日调节运行正常情况下可以满足叙渝段洪水期维护尺度所需流量要求,基本不会影响洪水期分月的维护尺度。

### 3.2 日调节运行对航标维护的影响

#### 3.2.1 对过河标的影响

根据日调节不同工况的水位计算成果,日调节引起宜宾—泸州段(简称叙泸段)水位变幅较大,多数工况条件下最高水位位于过河水位以下,对船舶过河影响不大;香炉滩、水井湾处部分工况条件下最高水位均超过了过河水位3 m,对香炉滩和水井湾两处由于日调节影响水位在过河水位上下幅动,对过河航标维护影响较大。

#### 3.2.2 对侧面浮标、岸标的影响

根据日调节计算成果,从长河段来看,向家坝日调节引起叙泸段水位变幅较大,因此对叙泸段侧面浮标、岸标的维护影响较大。部分河心礁石河段,当水位较低礁石露出水面时需配布侧面岸标,当水位抬高礁石被淹没至水下时,需配布侧面浮标。如台子石(上游航道里程1 038.4 km)在水位2 m以下时设置侧面岸标,在2 m水位以上时设置侧面浮标。根据向家坝20个典型日调节工况,水位存在2 m以上和以下的情况,由此,增加了此类航标的维护难度。部分浅滩河段,在水位较低时设置侧面浮标,当水位较高时进行撤除。如冷饭碛(上游航道里程1 037 km),在2 m以下是设置侧面浮标,在2 m以上时对该标志进行撤除。而20个典型日调节工况下,该处水位存在2 m以上和以下的时段。由此,对此类航标的维护影响较大。

### 3.3 日调节运行对通行控制河段的影响

叙渝段主要有筲箕背、铜鼓滩和香炉滩等14处控制河段,22个信号台,控制河段里程长20.2 km。根据计算成果,向家坝日调节运行方

案1的工况8及方案2的工况19日调节非恒定流特性最为明显,两种工况下日调节对筲箕背、铜鼓滩和香炉滩3个控制河段影响较大,航道维护将变得更加困难。

## 4 向家坝日调节条件下叙渝段航道维护对策

向家坝电站日调节对下游长江叙渝段航道条件的影响明显,影响范围较长,河段航道条件复杂,维护管理涉及云南、四川和重庆三省市水利及航运两大部门多家相关单位,为确保航道安全、畅通,首先必须做好各方面的协调组织工作。

1) 在航道尺度维护方面,应加强水文信息收集与分析;加大对浅险水道的测量、探测力度;加大航道维护管理力度;加强现场维护力量,安排船舶维护性疏浚。

2) 在航标维护方面,优化调整航标配布方案;加强航标检查,掌握航标异动;把握时机,及时调整航标;增加维护投入,储备航标器具;加强航标信息通告。

3) 在通行控制河段维护方面,需对通信信号台的控制水位及开收班时间进行调整,确保通行信号揭示的准确性与可靠度,并加强信号台的指挥管理。

## 5 结论

1) 建立了水富—重庆长河段平面二维非恒定流数学模型,进行向家坝电站两种日调节方案20个工况的非恒定流模型研究,得出两种方案下叙渝段沿程非恒定流传播特性。

2) 通过非恒定流计算、实测数据分析及航道尺度核查,分析得出向家坝日调节运行将对叙渝段基本维护尺度及分月维护尺度产生重要影响。枯水期(12月至次年4月),按方案2(最小下泄流量 $1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ )日调节运行,则12月至4月难以保证叙渝段最小维护尺度,按方案1(最小下泄流量 $1\ 518\ \text{m}^3/\text{s}$ )可以满足叙渝段最小维护尺度要求;中水期(5、6、10、11月)虽然流量较枯水期略有增加,但仍将造成部分时段难以满足目前维护尺

度要求;洪水期(7—9月)下泄流量较大,日调节运行能够满足维护尺度需要。

3) 向家坝日调节引起坝下游水位变化频繁,日变幅大,将对叙渝段部分河段航标维护、控制河段维护造成影响,加大航道维护难度。受向家坝水电站日调节影响,坝下游河段10余处信号台、20余处过河河段、100多座航标将受到不同程度影响,加大了航道维护难度。

参考文献:

[1] 中南勘测设计研究院.金沙江向家坝水电站水库运用和电站运行调度规程(试行)[S].中国长江三峡集团公司向家坝指挥部,2011.

[2] 长江重庆航运工程勘察设计院.向家坝水电站日调节条件下长江上游叙渝段航道维护方案研究[R].重庆:长江重庆航运工程勘察设计院,2015.  
[3] 中华人民共和国交通运输部.交通运输部办公室关于《金沙江向家坝水电站升船机完建期航运调度方案》的复函[厅水便[2013]125号][Z].北京:中华人民共和国交通运输部,2013.  
[4] 长江航运规划设计研究院,武汉大学,长江重庆航运工程勘察设计院.水富至江阴设计水位修订[R].武汉:长江航运规划设计研究院,2013.  
[5] 长江重庆航运工程勘察设计院.溪洛渡、向家坝水库蓄水及电站运行长江干线上游河段航道维护保障需求研究[R].重庆:长江重庆航运工程勘察设计院,2013.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第107页)

4 结语

1) 枞阳小港近年来3.3 m深槽贯通,深槽平面总体稳定,拟建船闸位于左汊中段,深槽稳定,太子矶左汊枞阳小港具备开通航道的条件,实施引江济淮通航工程与长江连通是可行的。

2) 进出通航工程的航道轴线方案为:进出船闸的航线采用上游方向的船舶统一从枞阳小港上口进出,下游方向的船舶统一从枞阳小港下口进出,实行各自靠右航行。

3) 连通航道为顺沿枞阳小港3.3 m深槽走向布置的河心航道,最小航宽维持在80 m,弯道段航道适当放宽。枞阳小港上口航道左侧界限与长江主航道270#白浮相连;右侧界限与长江主航道269#白浮相连。枞阳小港下口航道左侧界限与长江主航道262#白灯船相连;右侧界限与长江主航道263#白浮相连。

4) 兼顾船型2 000吨级货船所需航道水深3.6 m,由于3.6 m深槽在枞阳小港上口段和下口段的卡口位置不能贯通,为保证船舶安全航行,

建议对枞阳小港几处卡口位置进行适当疏浚,并设置警示标志标示浅区位置。

5) 建议进一步开展临时停泊区设置研究,解决船舶、船队临时停泊区问题。

参考文献:

[1] 许乐华,裴金林,杨建东,等.引江济淮通航工程与长江主航道连通可行性分析及航道、航线布置研究[R].武汉:长江航道规划设计研究院,2015.  
[2] 许乐华,胡鹏,杨建东,等.引江济淮工程对长江干线航道条件与通航安全影响评价报告[R].武汉:长江航道规划设计研究院,2015.  
[3] 标准定额研究所.GB 50139—2014内河通航标准[S].北京:中国计划出版社,2014.  
[4] 李昱.长江下游宝塔水道下段扬子专用航道双向通航航道调整方案研究[J].水运工程,2013(12):103-108.  
[5] 周俊波,李君涛.引江济淮通航工程进口段平面布置及通航条件优化[J].水运工程,2012(1):153-157.

(本文编辑 郭雪珍)