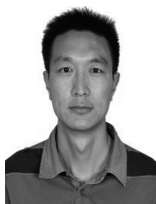


· 航道及通航建筑物 ·



白鹤滩蓄水期向家坝控泄对下游航道影响分析*

毕明亮, 潘 增, 邢 龙, 唐玉川, 陈忠贤, 孙志峰

(中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 基于最新河道断面资料, 建立向家坝—泸州的一维非恒定流模型, 定量分析白鹤滩水库蓄水期间, 在保证正常通航情况下向家坝水电站的最小通航流量和对应日调节出库流量方案。按横江 $70 \text{ m}^3/\text{s}$ 、岷江 $700 \text{ m}^3/\text{s}$ 恒定侧向入流, 向家坝水电站按不同量级出库情况模拟, 计算沿程各断面水位, 求出向家坝下游最低通航水位 265.8 m 对应流量约为 $1\,520 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据电站日调峰运行规律, 通过白天加大下泄流量按 $1\,700 \text{ m}^3/\text{s}$ 恒定出库, 夜间减少至 $1\,520 \text{ m}^3/\text{s}$, 得出最大水位变幅为 0.31 m , 对下游船舶影响较小, 按 $1\,700 \text{ m}^3/\text{s}$ 下泄时可较 $1\,520 \text{ m}^3/\text{s}$ 时扩宽对应 2.5 m 水深宽度约 20 m , 该方式能适当缓解翻坝转运船舶的减载压力。

关键词: 白鹤滩水库蓄水; 一维非恒定流; 下泄流量; 出库调度

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0081-07

Influence of Xiangjiaba discharge control on downstream channel during impoundment period of Baihetan

BI Ming-liang, PAN Zeng, XING Long, TANG Yu-chuan, CHEN Zhong-xian, SUN Zhi-feng

(China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China)

Abstract: With the latest river section data, we build a one-dimensional unsteady flow model of the Xiangjiaba-Luzhou reach, and analyze quantitatively the scheme of the minimum navigable flow and corresponding daily-regulated outflow for the Xiangjiaba Hydropower Station under ensured normal navigation during the impoundment period of the Baihetan Reservoir. Specifically, with assumed steady lateral inflow from Hengjiang River ($70 \text{ m}^3/\text{s}$) and Minjiang River ($700 \text{ m}^3/\text{s}$), we simulate the outflow from the Xiangjiaba Hydropower Station at different orders of magnitude and calculate the water level at each section along the way. The lowest navigable water level in the downstream below Xiangjiaba obtained is 265.8 m , and the corresponding flow is about $1\,520 \text{ m}^3/\text{s}$. Then, according to the daily peak shaving operation law of the station, the discharge flow is increased to a steady outflow of $1\,700 \text{ m}^3/\text{s}$ during the day and reduced to $1\,520 \text{ m}^3/\text{s}$ at night. As a result, the maximum water level variation is 0.31 m , which has little impact on the downstream ships. When the discharge flow is $1\,700 \text{ m}^3/\text{s}$, the width of 2.5 m water depth can be widened by about 20 m on that under the discharge flow of $1\,520 \text{ m}^3/\text{s}$. This method can alleviate the load reduction pressure on cross-dam transportation ships.

Keywords: Baihetan reservoir impoundment; one-dimensional unsteady flow; discharge flow; outbound scheduling

白鹤滩水电站开发任务是以发电为主, 兼顾防洪、航运, 并促进地方经济社会发展^[1]的巨型水电工程。根据白鹤滩水电站发电计划安排, 电

站于 2021 年 4 月初下闸蓄水, 5 月底蓄至 760 m , 对应蓄水量 77.35 亿 m^3 , 7 月 1 日实现首批机组投产发电, 经对电站坝址历史同期入库径流分析

收稿日期: 2021-06-16

*基金项目: 中国长江三峡集团有限公司员工科研項目(WWKY-2021-0223)

作者简介: 毕明亮(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水电枢纽运行管理。

测算,仅靠拦蓄坝址天然入库径流无法满足电站蓄水要求。根据白鹤滩水电站批复蓄水计划^[2],白鹤滩蓄水须考虑上游雅砻江梯级及乌东德水库,下游溪洛渡、向家坝水库配合运用,且最小下泄流量不低于下游河段最小生态承载基流。溪洛渡水库库尾上接白鹤滩水电站,《金沙江白鹤滩水电站水库蓄水论证专题报告》^[3]指出,当溪洛渡水库水位高于 580 m 时,库尾尾水可衔接至白鹤滩坝址;《白鹤滩水电站环境影响报告书》批复意见^[4]要求,溪洛渡梯级水库衔接时,白鹤滩最小下泄流量为 $1\ 160\ \text{m}^3/\text{s}$,不衔接时最小下泄流量为 $640\ \text{m}^3/\text{s}$ 。向家坝水库作为溪洛渡水电站反调节水库,3—5 月期间基本维持出入库平衡状态;为最大限度配合白鹤滩蓄水,2021 年 3—5 月,在满足向家坝水电站下游过机船舶正常航行情况下,溪洛渡、向家坝水电站须逐步减少下泄流量,以实现尽可能延长溪洛渡 580 m 以上衔接库水位时间的目的。

本文在结合前期有关研究成果的基础上,利用最新地形数据,建立了向家坝—泸州河段一维非恒定流数学模型,模拟计算向家坝水电站下游最低通航水位对应最小下泄流量,并根据向家坝水电站实际日调节出库流量运行特点,制定对应日调节出库流量方案,初步分析白鹤滩蓄水期间向家坝水电站控泄对下游航道的影响,可为白鹤滩蓄水期或向家坝水电站特枯年份的出库调度提供参考。

1 向家坝下游航道及水流条件概况

1.1 航道概况

水富—宜宾是长江航道的上游延伸段,为 V 级航道并按 IV 级标准维护,规划航道等级为Ⅲ级,匹配设计的向家坝升船机为 IV 级航道标准。“十一五”期间,通过对宜宾—重庆 30 余处碍航险滩整治处理,目前已达到Ⅲ级标准,维护尺度为 $2.7\ \text{m} \times 50\ \text{m} \times 560\ \text{m}$ (水深×航宽×弯曲半径,下同),保证率为 98%,航道维护等级、航标配布类别均为一类^[5]。叙渝航道实行分月维护尺度,分别按

12—4 月的 $2.7\ \text{m} \times 50\ \text{m} \times 560\ \text{m}$ 、5 和 11 月的 $3.2\ \text{m} \times 60\ \text{m} \times 600\ \text{m}$ 、6 和 10 月的 $3.5\ \text{m} \times 60\ \text{m} \times 600\ \text{m}$ 、7—9 月的 $3.7\ \text{m} \times 80\ \text{m} \times 700\ \text{m}$ 执行^[6]。2017 年起,叙渝航道维护尺度进一步提升,最低航道水深由 2.7 m 提升至 2.9 m,为全力配合白鹤滩蓄水,白鹤滩蓄水期间,交通运输部长江航务管理局临时调整叙渝航道最低通航水位至 2.7 m,对应宜宾合江门水位 257.27 m。

1.2 河道非恒定流特征

向家坝水电站是金沙江下游河段规划的最末一个梯级,下游约 3.5 和 31.5 km 处有横江和岷江两条支流汇入。文献[7-10]的研究结果表明,电站日调节产生的非恒定流使下游河道水位变幅、流速、流态等较天然条件均变化巨大,且叙泸段水流条件受向家坝水电站日调节、岷江来水共同影响,波幅、波形与向家坝水电站下泄调节过程符合度更高,并随着传播距离增加而衰减,至合江波形基本完全坦化;电站满发运行时调峰、切机等会引起下游河道水位剧烈变化,并呈以下规律:切机台数越多,下游水位变幅越剧烈,需补水量越大,时间越短,当切机台数超过 2 台时,水位变幅将超过航运允许水位最大时变幅。

2 向家坝下游非恒定流数学模型构建

《金沙江向家坝水电站水库运用和电站运行调度规程(试行)》^[11]规定,向家坝水电站下游最低通航水位为 265.8 m,相应流量为 $1\ 200\ \text{m}^3/\text{s}$ 。实际上,电站下游水位受横江、岷江顶托,河道冲刷下切等因素影响,最低通航水位相应流量呈持续上升趋势,吴垠等^[12]采用长系列法,结合 2009—2012 年整编资料分析岷江、横江来水对向家坝下游水位顶托影响,得出岷江、横江来水与下游河道水位顶托呈正相关关系,来水越大,顶托量越大,反之越小;刘勇等^[13]采用保证频率法、反推流量法、天然入汇分配法等分析向家坝电站最小下泄流量为 $1\ 296\ \text{m}^3/\text{s}$;潘增等^[14]采用一维非恒定流模型定量分析向家坝水电站相同出库流量条件下,得出 2015—2017 年期间河床下切使向家坝

专用水文站汛期、枯期平均水位分别下降了 0.25、0.15 m。

鉴于向家坝水电站下游最低通航水位对应最小下泄流量受岷江、横江来水和地形冲刷影响, 且呈持续发展变化趋势。本文以最新地形测量数据, 向家坝—宜宾江段采用 2020 年 1:2 000 实测地形数据, 宜宾—泸州江段采用 2019 年实测固定断面数据建立向家坝—泸州—维非恒定流数学模型。

2.1 控制方程

山区一维非恒流运动过程遵循圣维南方程组原理, 具体可表述为求解圣维南方程组连续性方程和动量方程, 形式如下^[15-18]:

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2 AR} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: A 为过流断面面积(m^2); t 为时间(s); Q 为流量(m^3/s); x 为水流方向的水平距离(m); q 为单位河长侧向入流流量(m^3/s); α 为动量校正系数; h 为水位(m); C 为谢才系数($\text{m}^{0.5}/\text{s}$); R 为水力半径(m)。

2.2 计算范围与边界条件

王立杰等^[19]的研究结果表明, 向家坝水电站日调节非恒定流最远影响至合江段, 结合电站下游沿程站点分布和实测地形数据情况, 本次计算河段范围为向家坝坝址—泸州水位站, 计算河段全场约 165 km。坝址—宜宾河段以 2020 年 1:2 000 实测地形数据为基础, 以 200 m 间隔剖取典型代表断面; 宜宾—泸州河段采用 2019 年实测河道断面数据, 断面间距根据沿程河床走势间隔 500 ~ 2 700 m 不等, 模型断面总计 302 个, 河道断面地形资料良好, 能较好反映河道沿程变化情况。计算断面分布情况如图 1 所示。

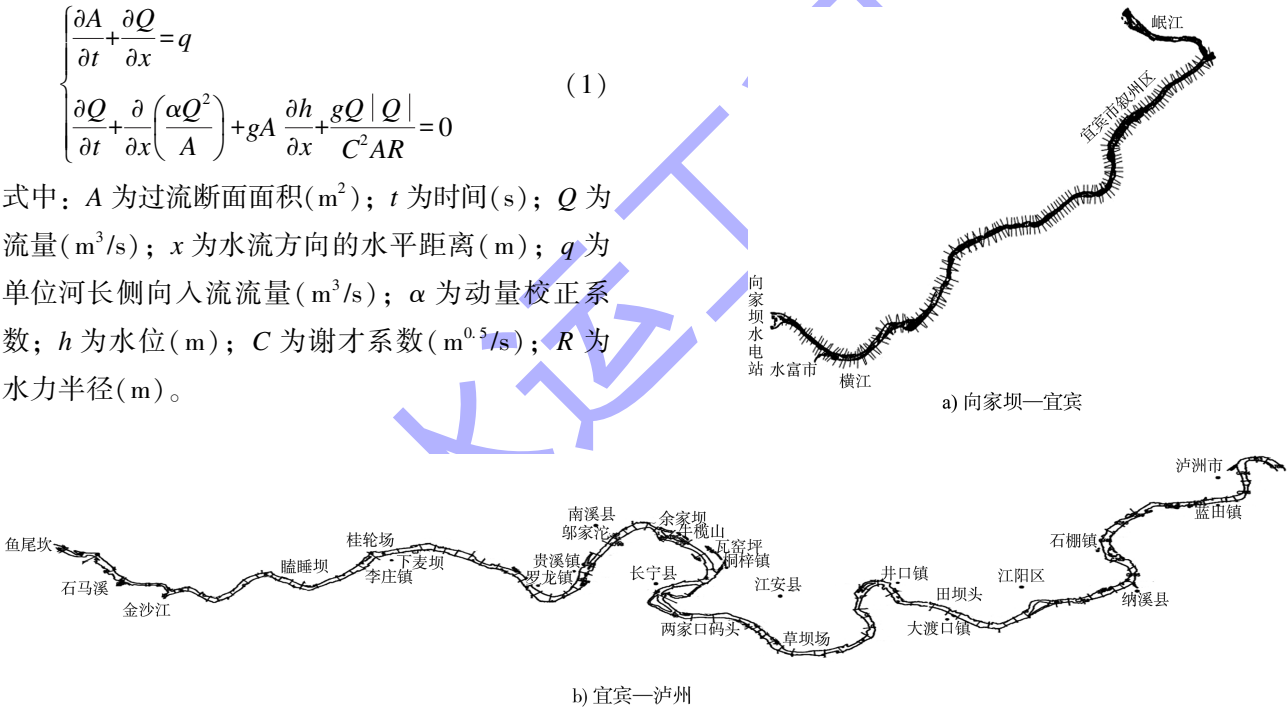


图 1 向家坝—泸州一维非恒定流断面布设

由图 1 可看出, 模型上边界为向家坝坝址处, 并以日调节出库流量过程为控制条件, 下边界为泸州水位站处, 并以水位流量关系为控制条件; 模型考虑岷江、横江、沱江河口处侧向流量汇入, 并以入汇流量过程作为控制条件。

2.3 模型率定与验证

模型参数准确性是模型能否真实反映非恒定流演进过程的关键, 向家坝水电站配合白鹤滩蓄水调节时段为 3—5 月, 处于枯水期。本文旨在探索向家坝水电站在此期间减少下泄流量对下游河

道航运影响。向家坝调节出库流量影响范围主要集中在 水富—宜宾江段, 对 宜宾—泸州江段影响较小。因此, 选取同期 2020 年最枯时段 2—3 月, 2021 年最枯时段 2 月长系列实测水位、流量数据进行参数率定, 并以沿程向家坝、三块石、普安、大雪滩、宜宾、沙坪、李庄等站点实测数据进行参数率定。

根据向家坝—泸州区间各验证站点位置关系分段设置河床糙率, 并按率定、验证期各站点实际水位过程分别赋予高、中、低水位 3 个区间糙

率, 经率定计算河段低、中、高水位糙率值分别介于 0.043~0.069、0.037~0.062、0.036~0.060, 河床糙率总体呈低水位高于中水位、中水位高于高水位趋势。向家坝站和普安站率定期和验证期水位对比见图 2、3。可以看出, 在率定期 2020 年 2—4 月, 向家坝站和普安站实测水位与模拟值对比良好, 向家坝站在率定期模拟最大误差为 0.334 m, 普安站在率定期模拟最大误差为 0.296 m; 验证期的时间选择为 2021 年 2—3 月, 向家坝站在验证期模拟最大误差为 0.391 m, 普安站在率定期模拟最大误差为 0.424 m。

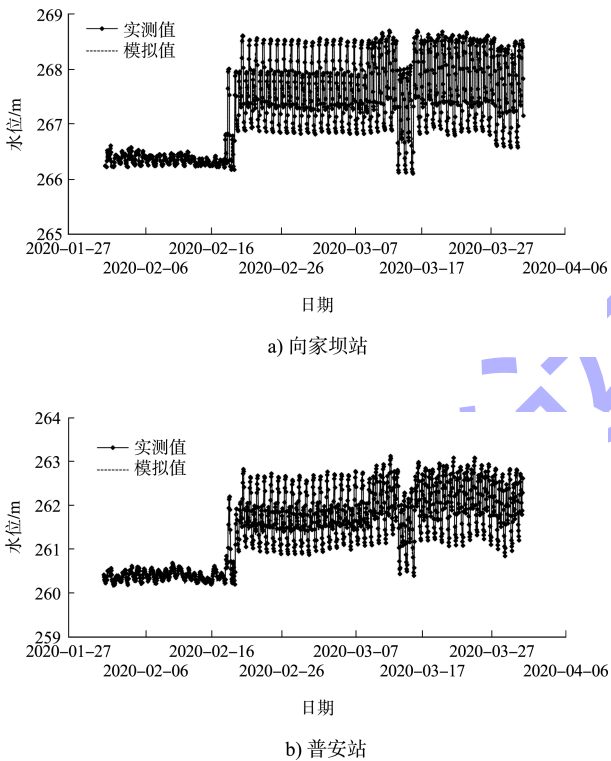


图 2 率定期模拟结果

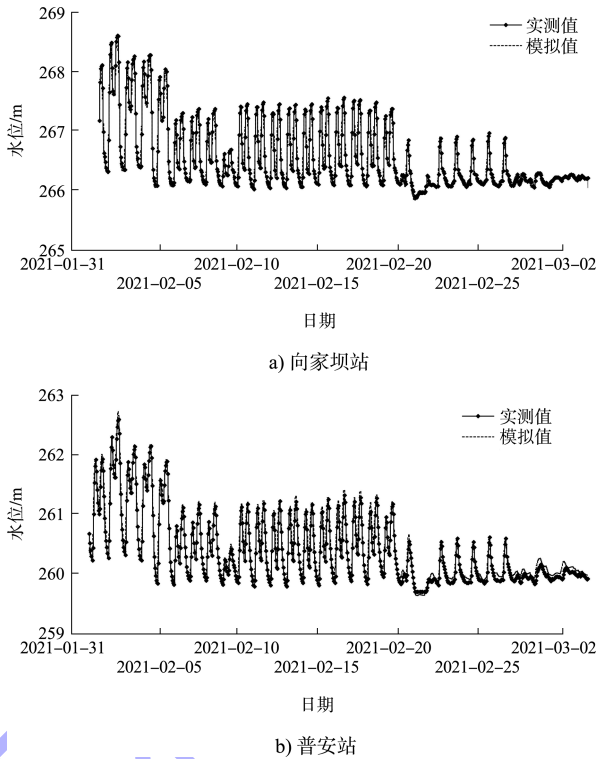


图 3 验证期模拟结果

向家坝—李庄各监测站点 2020、2021 年枯水期最枯时段平均模拟误差见表 1, 结合图 2、3 的长系列模拟结果可知, 各监测站模拟平均误差随水流演进呈增大趋势, 即下游水位站点的模拟平均误差大于上游模拟站点平均误差, 在宜宾站平均误差达到最大值, 最大值不足 0.2 m, 相比于该处水深而言, 误差占比较小。分析原因可能是受到河道断面地形、河道断面布设以及河网概化等原因的影响。总体而言, 除极少数点水位突变情况外, 其他时间以及站点水位误差基本满足要求, 因此可以认为向家坝—泸州—维非恒定流数学模型模拟效果较好, 满足计算精度要求。

表 1 各监测站水位模拟平均误差

阶段	水位模拟平均误差/m						
	向家坝	三块石	普安	大雪滩	宜宾	沙坪	李庄
率定期	0.063	0.050	0.064	0.089	0.185	0.136	0.119
验证期	0.064	0.061	0.096	0.081	0.168	0.100	0.084

3 向家坝控泄非恒定流模拟与分析

3.1 工况拟定

3.1.1 工况制定原则

向家坝水电站以发电为主, 制定电站出库流

量计划时, 原则上应以发电需求为主, 王永强等^[20]基于此提出向家坝水电站枯水期可兼顾下游航运要求的发电运行方式。本文则是基于白鹤滩水库蓄水期各有关部门批复的有关溪洛渡、向家

坝水库调度要求, 即溪向水电站应在满足自身发电、通航等正常需求前提下, 逐步减少下泄流量配合白鹤滩水库蓄水。《金沙江向家坝水电站水库运用和电站运行调度规程(试行)》规定, 电站运行初期下游升船机最低通航水位为 265.8 m, 日调峰运行时下游水位最大日变幅暂按不超过 4.5 m/d 控制; 经对向家坝水电站下游通航水流条件进一步研究论证, 交通运输部办公厅关于《金沙江向家坝水电站升船机运行期(初期)航运调度方案》的复函^[21]规定, 正常情况下, 电站下游水位最大日变幅按不超过 3 m/d 控制, 最大小时变幅按不超过 1 m/h 控制, 特殊情况下, 电站下游最大日变幅按不超过 4.5 m/d 控制。本文按有关部委最新批复蓄水要求和向家坝水电站航运调度规定原则执行, 优化白鹤滩蓄水期间向家坝水电站出库调度方式。

3.1.2 边界条件拟定

叙渝航段航道等级为Ⅲ级, 维护尺度为 2.7 m×50 m×560 m, 保证率为 98%。横江、岷江支流入汇流量按相同 98% 保证率考虑, 通过对向家坝水电站投产运行后的横江、岷江同期 3—5 月径流系列分析测算, 支流横江 98% 保证率对应流量为 70 m³/s, 支流岷江 98% 保证率对应流量为 700 m³/s。向家坝水电站下游实际航运调度运行及文献[12]的结果表明, 下游航运除受电站日调节形成的非恒定流影响外, 还受岷江非恒定流洪水顶托影响。因此, 本文横江入汇流量按恒定 70 m³/s 考虑, 岷江入汇流量按恒定 700 m³/s 和同期遭遇典型洪水两种工况考虑。

《金沙江向家坝水电站水库运用和电站运行调度规程(试行)》规定, 下游升船机最低通航水位为 265.8 m, 相应流量为 1 200 m³/s。文献[14]的结果表明, 向家坝水电站最低通航水位对应最小下泄流量受河床冲刷影响, 呈持续发展变化趋势; 为满足下游通航需求, 向家坝水电站实际运行过程中, 按最小下泄流量不低于 1 700 m³/s 控制。本文分别按恒定 1 700、1 600、1 500、1 400、1 300、1 200 m³/s 逐级递减假定向家坝出库流量。

事实上, 水富—宜宾江段行驶船只, 除过机船舶外, 存在部分翻坝转运船舶。若持续按研究确定的最小下泄流量下泄, 可能导致翻坝船舶减载, 对下游航运造成不利影响。本文在确定最小下泄流量后, 根据电站日调峰运行规律, 通过白天加大下泄按 1 700 m³/s 恒定下泄, 夜间减少下泄按最小通航流量出流, 对向家坝出库流量进行优化。数值模型恒定输入流量以及优化方案输入流量随时间变化过程线见图 4, 优化方案在白天时段按照 1 700 m³/s 恒定下泄, 夜间按照最小通航流量进行下泄。支流岷江流量输入过程线见图 5, 即按照 700 m³/s 流量恒定下泄和按照同期典型遭遇过程下泄两个方案进行研究计算。

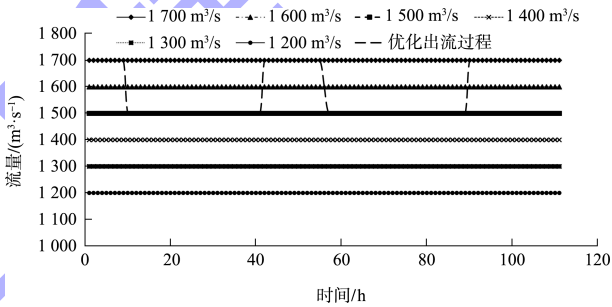


图 4 向家坝水电站拟定出库流量工况

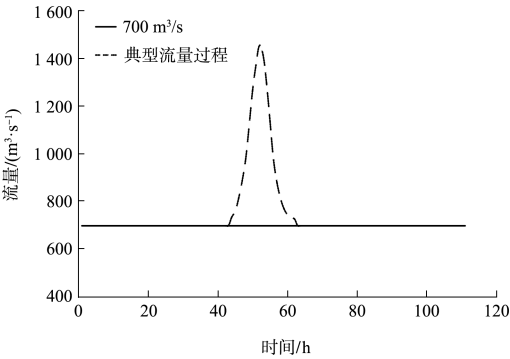


图 5 岷江拟定侧向入汇流量工况

3.2 结果分析

3.2.1 拟定工况下游河道非恒定流特征分析

通过对向家坝水电站各级恒定出流, 支流横江 70 m³/s、支流岷江 700 m³/s 恒定侧向入流工况模拟计算, 得出向家坝、三块石、普安、大雪滩、宜宾、沙坪、李庄各站点稳定计算水位如图 6 所示。

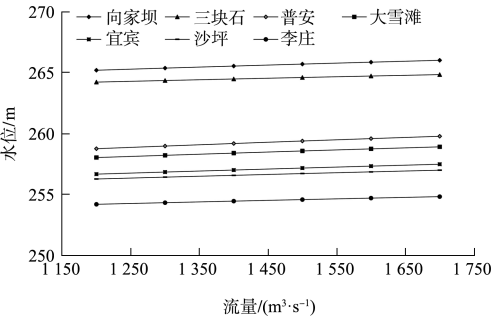


图 6 向家坝各级出流工况下沿程站点水位

由图 6 可看出，各监测站点水位与向家坝出库流量呈明显线性关系，即出库流量越大，水位越高；向家坝下游最低通航水位 265.8 m 对应流量约为 1 520 m³/s；且当向家坝水电站按 1 520 m³/s 出库流量稳定下泄时，宜宾合江门水位约 257.30 m，高于零点水位 257.27 m。因此，向家坝水电站最低通航流量约为 1 520 m³/s。

为减缓因电站减少下泄对翻坝转运船舶的影响。根据拟定工况，夜间接确定的最小通航流量下泄，白天按 1 700 m³/s 下泄，支流横江按恒定 70 m³/s 汇入，支流岷江按恒定 700 m³/s 和向家坝加大下泄时遭遇岷江典型流量过程两种工况汇入。计算得出沿程各监测站点水位变化过程如图 7 所示。

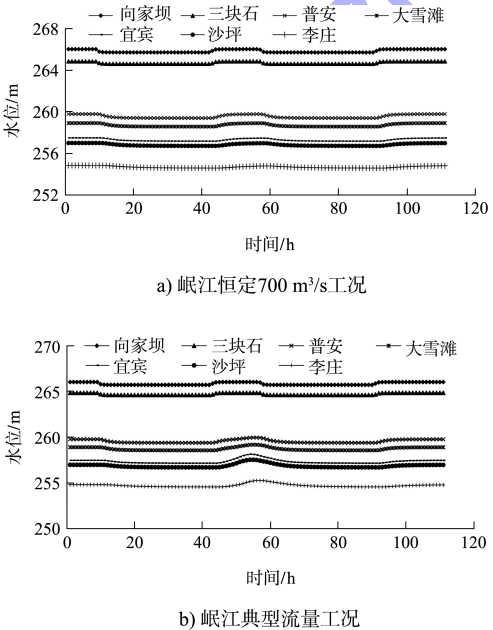


图 7 向家坝水电站调节出库后沿程监测电站水位变化情况

由图 7 可看出，当向家坝水电站按白天加大下泄，夜间减少下泄方式调节出库流量时，向家

坝下游最大水位变幅为 0.31 m；电站调峰引起的水波波峰前缘大约 2 h 后传播至合江门，并且整个起涨过程可持续大约 16 h，期间合江门最大水位日变幅约 0.3 m，对下游船舶影响较小。当电站调峰遭遇岷江典型流量过程时，合江门上下游附近水域受岷江来水作用顶托明显，最大可致使合江门接近 1 m 水位的日变幅，对下游船舶航行存在一定影响，船舶可根据向家坝、岷江来水情况在水富港或宜宾港靠泊。

3.2.2 沿程断面最小航道宽度分析

水富—宜宾江段是长江航道的上游延伸段，属 IV 级航道，规划航道等级为Ⅲ级，宜宾—重庆江段属Ⅲ级航道。本文按最高等级Ⅲ级进行分析，根据《长江干流通航标准》^[22]对长江干线航道尺度要求，Ⅲ级航道吃水在 2.4~3.0 m，对于 1 000 吨级升船机过机船舶，航宽不小于 80 m。目前，向家坝升船机实际过机吃水按 2.2 m 控制，并按不低于 0.3 m 富余水深考虑；通过对向家坝水电站最小下泄流量工况下，沿程断面 2.5 m 水深宽度统计分析发现，除下游烧瓦沱码头附近水域对应的 2.5 m 水深航道宽度接近 80 m 外，其余断面水深宽度均满足过机船舶航行需要。

通过对烧瓦沱码头上下游水域水下地形研究分析发现，该区域河道属于宽浅型河道，电站白天按 1 700 m³/s 下泄时，对应水位约 263.85 m，可较最小计算通航流量 1 520 m³/s 对应的水位 263.6 m 抬升约 0.25 m，可扩宽对应 2.5 m 水深宽度约 20 m，能适当缓解翻坝转运船舶减载压力。烧瓦沱码头附近水域最窄断面水深宽度见图 8。

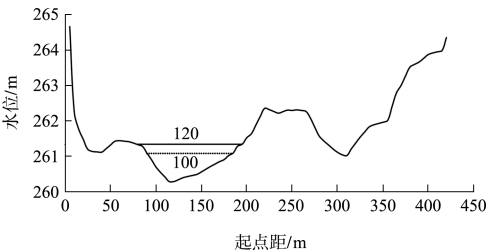


图 8 烧瓦沱码头水域断面水深宽度

4 结论

1) 通过模拟计算向家坝水电站 1 700 m³/s 逐

级递减至 1 200 m³/s 各级出库流量下游河道水位情况, 初步明确电站下游最低通航水位 265.8 m 对应下泄流量为 1 520 m³/s。

2) 根据向家坝水电站运行特点, 制定了电站日调节出库方案, 可适当缓解白鹤滩蓄水期向家坝翻坝转运船舶积压情况, 并可为向家坝水电站特枯年份时电站通航出库调度提供参考。

3) 向家坝水电站按最小通航流量下泄时, 水富—宜宾段航道变化明显, 电站运行单位应及时向有关人员通报水情信息; 同时, 为避免船舶发生搁浅、触礁等事故, 建议行业主管部门及时调整航标位置, 并在烧瓦沱等险滩水域安排经验丰富船长提供驾引指导。

参考文献:

[1] 华东勘测设计研究院. 中国长江三峡集团有限公司. 金沙江白鹤滩水电站水库运用与电站运行调度规程(试行)[R]. 北京: 中国长江三峡集团有限公司, 2021.

[2] 水利部长江水利委员会. 关于《金沙江白鹤滩水电站蓄水计划和调度方案》的批复: 长水资管[2020]656号[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2020.

[3] 华东勘测设计院. 金沙江白鹤滩水电站水库蓄水论证专题报告[R]. 杭州: 华东勘测设计研究院, 2018.

[4] 生态环境部. 关于《白鹤滩水电站环境影响报告书》批复意见: 环审[2015]240号[R]. 北京: 生态环境部, 2015.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 杜思材, 胡江, 薛飞龙, 等. 金沙江宜宾段非恒定流过程及传播特性[J]. 水运工程, 2017(10): 166-170.

[8] 薛飞龙, 胡江, 杜思材, 等. 叙泸段河道非恒定流作用下水力参数的变化[J]. 水运工程, 2017(10): 142-148.

[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] 顾莉, 王立杰, 周小飞, 等. 向家坝水电站切机非恒定流对干流航运影响研究[J]. 水力发电, 2021, 47(1): 107-110.

[11] 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)[R]. 北京: 中国长江三峡集团有限公司, 2011.

[12] 吴垠, 张亮, 同斌, 等. 岷、横江来水对向家坝水文站顶托影响分析[J]. 人民长江, 2014, 45(12): 59-61.

[13] 刘勇, 张毅. 满足通航标准条件下电站最小下泄流量计算与分析[J]. 水运工程, 2015(1): 134-138, 144.

[14] 潘增, 陈忠贤, 范向军, 等. 向家坝水电站下游河道变化对枢纽运行影响研究[J]. 人民长江, 2020, 51(S2): 320-324.

[15] 陈德敏, 何建京, 陈鸣. 天然河道洪水演进数值模拟及动态可视化研究[J]. 人民长江, 2012, 43(2): 54-57.

[16] 潘增, 闫宝伟, 于雨, 等. 考虑长江回水影响的举水危险流量研究[J]. 人民长江, 2018, 49(1): 19-22.

[17] 王领元. 丹麦 MIKE11 水动力模块在河网模拟计算中的应用研究[J]. 中国水运(学术版), 2007, 7(2): 106-107.

[18] Danish Hydraulic Institute. MIKE 11: a modeling system for rivers and channels reference manual[R]. Copenhagen: Danish Hydraulic Institute, 2004.

[19] 王立杰, 孙莉. 金沙江向家坝水电站正常运行期坝址—泸州江段一维非恒定流计算分析报告[R]. 长沙: 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 2017.

[20] 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.

[21] 交通运输部. 关于《金沙江向家坝水电站升船机运行期(初期)航运调度方案》的复函: 交办水函[2020]1534号[R]. 北京: 交通运输部, 2020.

[22] 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司. 长江干线通航标准: JTS 180-4—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.