



岷江—横江洪水顶托 对向家坝水电站通航影响研究^{*}

潘 增¹, 毕明亮¹, 陈忠贤¹, 赵 强², 朱 俊¹, 夏德锋¹

(1. 中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心, 湖北 宜昌 443100;

2. 三峡物资招标管理有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 通航为向家坝水电站功能之一。为发挥电站通航效益, 明确电站适宜通航水流条件, 前期通过实船试航试验初步确定电站最大通航流量不超 8 500 m³/s, 且最大泄洪流量不超 2 200 m³/s 双控标准。然而, 在近年船舶通航实际调度中发现, 向家坝水电站通航水流条件除受下泄流量影响以外, 还受下游岷江、横江洪水顶托作用影响。通过建立向家坝—泸州一维非恒定流模型, 模拟当汛期向家坝水电站依次按 4 000 m³/s 至 8 000 m³/s 各级流量恒定出库时, 分别遭遇岷江、横江 5~100 a 一遇不同典型年洪水顶托后, 向家坝水文站水位日变幅、小时变幅情况。得出当遭遇岷江 50 a 一遇、横江 100 a 一遇洪水顶托时, 向家坝水文站最大水位小时变幅分别达 0.55、1.19 m/h, 最大水位日变幅分别达 7.59、6.87 m/d; 且仅当遭遇岷江、横江 5~10 a 一遇部分工况洪水顶托时, 向家坝水文站水位满足小时变幅不超过 1 m/h、日变幅不超过 3 m/d 双控要求, 其余工况下水位变幅均超标准。研究成果可为后续向家坝水电站通航调度提供参考。

关键词: 向家坝通航; 洪水顶托; 水流条件; 一维非恒定流模型

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0137-08

Navigation impact of Minjiang and Hengjiang flood jacking on Xiangjiaba Hydropower Station

PAN Zeng¹, BI Minliang¹, CHENG Zhongxian¹, ZHAO Qiang², ZHU Jun¹, XIA Defeng¹

(1. River Basin Hub Administration, China Three Gorges Corporation, Yichang 443100, China;

2. Three Gorges Material Tendering Management Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: Navigation is one of the functions of Xiangjiaba Hydropower Station. To give full play to the navigation benefits of the power station and clarify the suitable navigation flow conditions for the power station, the maximum navigation flow of the power station was preliminarily determined to be not more than 8 500 m³/s and the maximum flood discharge is not more than 2 200 m³/s dual-control standard through the full-scale ship trial navigation tests in the early stage. However, in recent years, it has been found that the navigation flow conditions of Xiangjiaba Hydropower Station are not only affected by the discharge flow, but also affected by the flood jacking effect of the downstream Minjiang and Hengjiang rivers. By establishing a one-dimensional unsteady flow model from Xiangjiaba to Luzhou, this paper simulates the daily and hourly variation of water level at Xiangjiaba Hydropower Station after encountering different typical annual frequency floods of Minjiang River and Hengjiang River with 5-100 years return periods during the flood season, when the flow rate of Xiangjiaba Hydropower Station is constant

收稿日期: 2023-04-04

^{*}基金项目: 中国长江三峡集团有限公司员工科研项目 (NBYG202300610)

作者简介: 潘增 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事水库调度和通航管理工作。

通讯作者: 毕明亮 (1980—), 男, 高级工程师, 从事向家坝枢纽运行管理工作。E-mail: 294891714@qq.com

at various levels from 4 000 m³/s to 8 000 m³/s, respectively. It is calculated that when encountering the 50-year flood of Minjiang River and the 100-year flood of Hengjiang River, the hourly variation amplitude of the maximum water level at Xiangjiaba Hydrological Station is 0.55 m/h and 1.19 m/h respectively, and the daily variation amplitude of the maximum water level is 7.59 m/d and 6.87 m/d respectively. In addition, only when encountering the flood jacking of Minjiang River and Hengjiang River with a return period of 5-10 years, the water level of Xiangjiaba Hydrological Station meets the dual control requirements of no more than 1 m/h and no more than 3 m/d, and the water level variation under other conditions exceeds the standard. The research results can provide a reference for the navigation dispatching of Xiangjiaba Hydropower Station in the future.

Keywords: Xiangjiaba navigation; flood jacking; water flow conditions; one-dimensional unsteady flow model

1 研究背景

向家坝水电站是金沙江下游江段 4 个梯级电站的最末一个梯级,工程以发电为主,同时改善航运条件,兼顾防洪、灌溉,并具有对溪洛渡水电站进行反调节等作用。根据向家坝水电站升船机建设进度情况,2018 年 5 月 26 日,向家坝水电站升船机进入试通航,为充分发挥向家坝水电站通航效益,中国长江三峡集团有限公司陆续组织开展了各流量级实船试航试验^[1],最终确定向家坝水电站通航流量标准即《宜宾市地方海事局 昭通市地方海事局航行通告》^[2]中的要求:向家坝升船机 1 000 吨级标准船型最大通航流量为 8 500 m³/s,枢纽泄洪流量不超过 2 200 m³/s,500 t 重载标准船型最大通航流量为 7 500 m³/s,枢纽泄洪流量不超过 1 000 m³/s。同时,根据交通运输部批复的《金沙江向家坝水电站升船机运行期(初期)航运调度方案》^[3]要求,向家坝水电站实际通航调度运行时,下游水位暂按最大日变幅不超过 3 m/d 控制,最大小时变幅按不超过 1 m/h 控制。

按照向家坝水电站防洪要求,汛期当金沙江或下游川江河段干流及横江、岷江、嘉陵江、乌江等支流区域发生洪水时,向溪梯级水库将联合运用以调节向家坝水电站出库流量,达到保护川江河段沿岸宜宾、重庆等城区防洪安全目的;同时,根据向家坝水电站调峰需要,电站实际运行中出力及对应下泄流量变化频繁,统计向家坝水电站自 2012 年底投产发电以来日出库流量发现,受防洪及电网调峰需要,向家坝日平均出库流量常年在 1 700~14 000 m³/s 范围内变化。此外,有

关研究表明^[4],向家坝水电站出库流量在满足通航情况下,出库流量每变化 800~1 000 m³/s,下游水位变化约 1 m;并且下游支流横江来流超过 300 m³/s 或岷江来流超过 7 000 m³/s 时,将顶托向家坝下游水位^[5]。同步地,通过对向家坝水电站升船机开展的实船试航试验和试通航以来积累的实测数据分析,发现向家坝水电站下游河道水流条件除受电站出库流量影响外,还受下游岷江、横江支流洪水顶托作用影响。因此,向家坝水电站下游水位同时受电站防洪、调峰、下游洪水顶托等多方面影响,水流条件复杂多变。

根据向家坝水电站升船机下游通航水位变幅要求,结合向家坝水电站下游水位受电站调度运行、下游支流来水顶托等多重因素影响特点,存在当岷江、横江发生洪水时,即使向家坝水电站出库流量满足下泄流量要求,但受岷江、横江洪水顶托影响,使得向家坝水文站水位变幅超标准,致使向家坝水电站无法通航的可能性。例如:2020-08-15—2020-08-21 岷江大洪水期间,为减轻下游宜宾—重庆城区防洪压力,向家坝水电站出库流量由 11 000 m³/s 逐步减少并维持至 4 100 m³/s 左右,符合向家坝水电站通航流量要求;然而,受岷江洪水顶托影响,2020-08-18T05:00:00—2020-08-19T02:00:00 向家坝水文站日内水位由 273.3 m 增长至 277.8 m,水位日变幅达到 4.5 m,不符合下游通航水位日变幅要求。

因此,为充分发挥向家坝升船机过机效益,科学有效应对岷江、横江洪水顶托对向家坝水电站通航影响,有必要开展针对性研究。本文通过

建立向家坝—泸州—维非恒定流模型, 定量分析岷江、横江不同频率洪水对向家坝水电站下游水位顶托影响。旨在为岷江、横江洪水期间向家坝水电站通航调度减缓措施的研究、运用提供参考。

2 岷江、横江典型年频率洪水计算

岷江是长江上游左岸重要的一级支流, 流域面积 13.54 万 km², 距离向家坝水电站坝址约 33 km, 最下游控制站为高场站, 流域洪水主要集中在 6—9 月, 主要由流域内大渡河、青衣江以及岷江中下游区域暴雨组成。横江是金沙江右岸的一条主要支流, 流域面积 1.50 万 km², 距离向家坝水电站坝址约 3.5 km, 最下游控制站为横江站, 流域洪水主要集中在 6—9 月, 主要由流域内关河、牛街河以及下游干流区域暴雨组成。岷江、横江、向家坝水电站以及相关站点位置关系见图 1。



图 1 研究区各站点水系位置关系

根据岷江、横江流域暴雨特点, 结合岷江流域高场站 1953—2022 年 70 a、横江流域横江站 1957—2022 年 66 a 实测长序列流量过程资料和岷江 1917、1931 年, 横江 1844、1892、1931 年历史洪水调查资料, 选取岷江流域内以岷江干流来水为主的 1959 年、以大渡河来水为主的 1961 年、以青衣江来水为主的 1966 年、以全流域来水的 1981、2020 年为典型年; 选取横江流域内以牛街河来水为主 2007 年、以关河来水为主的 2013 年、以全流域来水的 2008、2017 年为典型年。在对岷江、横江长序列实测洪水资料还原计算后, 通过对历史洪水资料进行插补延长, 分别对岷江流域

高场站、横江流域横江站进行洪峰、洪量进行频率分析计算, 求得高场、横江站各频率洪峰流量和 1、3、7 d 洪量部分成果, 见表 1、2。

表 1 两场站不同洪量相关系数

站点	洪量	C_v	模比系数 C_v/C_s
高场站	洪峰流量	0.37	4.0
	1 d 洪量	0.40	4.0
	3 d 洪量	0.38	4.0
	7 d 洪量	0.31	4.0
横江站	洪峰流量	0.55	4.0
	1 d 洪量	0.46	4.0
	3 d 洪量	0.40	4.0
	7 d 洪量	0.35	3.0

注: C_v 为变差系数, C_s 为偏态系数。

表 2 两场站不同频率洪量设计值

站点	频率 $p/\%$	洪峰流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	1 d 洪量/ 亿 m^3	3 d 洪量/ 亿 m^3	7 d 洪量/ 亿 m^3
高场站	1	47 500	34.4	74.0	119.0
	2	42 300	30.8	66.7	109.0
	5	35 500	26.1	56.8	95.6
	10	30 300	22.4	49.1	84.9
	20	25 000	18.5	41.1	73.5
横江站	1	11 300	6.3	11.4	16.8
	2	9 820	5.5	10.2	15.4
	5	7 840	4.6	8.6	13.5
	10	6 360	3.8	7.4	11.9
	20	4 900	3.1	6.1	10.2

对比岷江高场站参数与水利水电规划总院编制的《长江上游干流四川段防洪治理工程可行性研究报告》^[6]中有关成果, 结论基本一致, 按此推算高场站 2020 年“8·18 洪水”还原流量为 40 600 m³/s, 重现期 40~50 a, 与徐高洪等^[7]研究结论一致; 对比横江站参数与横江站附近张窝水电站可研阶段的设计洪水成果, 结论基本一致。因此, 本文推求的岷江、横江频率洪水参数可靠。

将选取的高场站 5 个典型年、横江站 4 个典型年洪水按上述推求的高场站、横江站洪水参数进行同倍比放大, 即可得出岷江、横江各典型年 5、10、20、50、100 a 一遇频率洪水过程。岷江流域高场站 2020 年、横江流域 2017 年等部分典型年频率洪水过程见图 2。

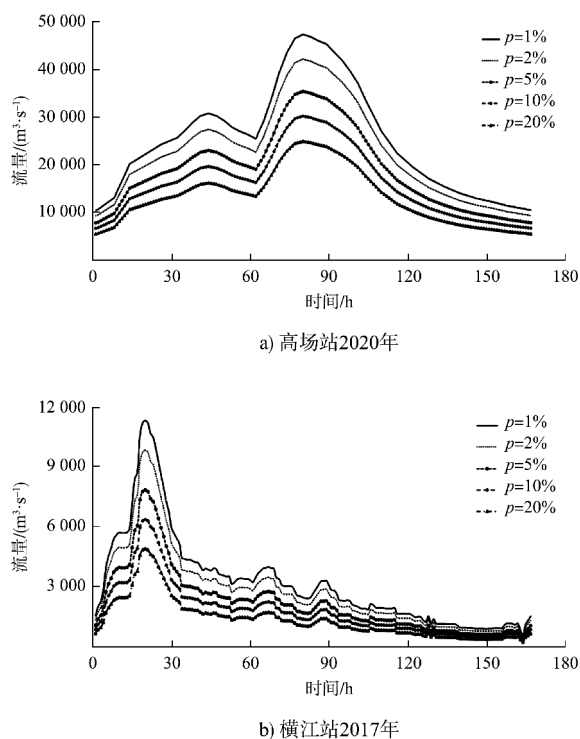


图2 岷江流域各频率洪水过程线

同步对照分析高场水文站和横江水文站 66 a 实测径流系列中洪峰出现时间,高场站和横江站同时发生 2 a 以上洪水概率不足 10%,岷江、横江流域同时发生较大洪水概率较低。因此,分析岷江、横江洪水顶托对向家坝通航影响时,仅考虑单条支流洪水影响即可。

3 研究区非恒定流模型构建

向家坝下游河道水位除受电站下泄流量以及下游岷江、横江洪水顶托作用影响外,还受河床变化影响,潘增等^[8]对向家坝水电站下游河床变化对河道水位影响进行了定量分析,得出因向家坝水电站下游河床下切,使得相同出库流量条件下,以 2015 年河道地形模拟求得的向家坝水文站汛期、枯期平均水位分别较 2017 年河道地形模拟水位低约 0.25 m 和 0.15 m。为减少研究区河道地形变化对计算结果影响,本文以干流向家坝—泸州区间的支流岷江、横江区段最新地形或固定断面为基础数据进行建模。

3.1 控制方程

向家坝水电站下游河段属于山区型河道,其一维非恒定流数学模型可表达为求解圣维南方程组的动量方程和连续性方程^[9-12]:

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

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 为水流方向水平距离, m ; q 为侧向入流, m^3/s ; α 为动量校正系数; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为水位, m ; C 为谢才系数, $\text{m}^{0.5}/\text{s}$; R 为水力半径, m 。

3.2 模型建立

根据前期有关研究成果,向家坝水电站出库造成的下游非恒定流最远影响至合江段附近^[13-15],为减少向家坝水电站出流对模型下边界影响,结合研究区现有地形、河道断面资料,选择以向家坝坝址—泸州站约 165 km 为模型干流计算范围,高场水文站—岷江河口约 28 km 为支流岷江计算范围,横江水文站—横江河口约 13 km 为支流横江计算范围;其中,研究区干流向家坝—宜宾河段以 2020 年 1:2 000 实测地形资料,宜宾—泸州以 2019 年 1:2 000 实测河道断面资料,支流岷江高场站—岷江河口、横江横江站—横江河口以 2021 年实测河段断面资料为基础进行处理。根据河道走势及变化情况,干支流各断面间隔 100~2 700 m 不等,最终确定向家坝—泸州干流区域模型断面共计 302 个,高场站—岷江河口区域模型断面共计 127 个,横江站—横江河口区域模型断面共计 39 个。模型断面分布如图 3 所示,模型上边界为向家坝坝址处,输入条件为向家坝出库流量过程;下边界为泸州水位站处,输出条件为泸州站水位流量关系;支流岷江、横江分别以高场站、横江站为侧边界,输入条件为岷江、横江对应流量过程。

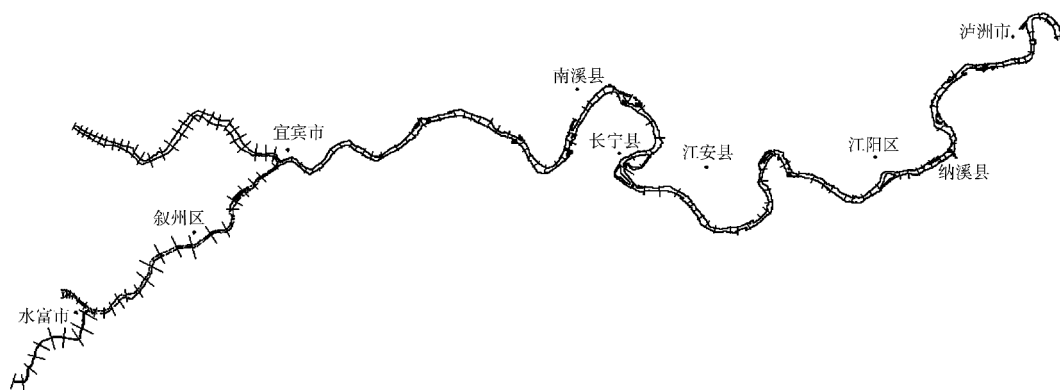
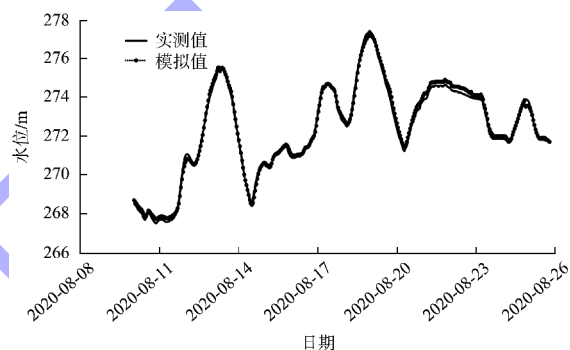


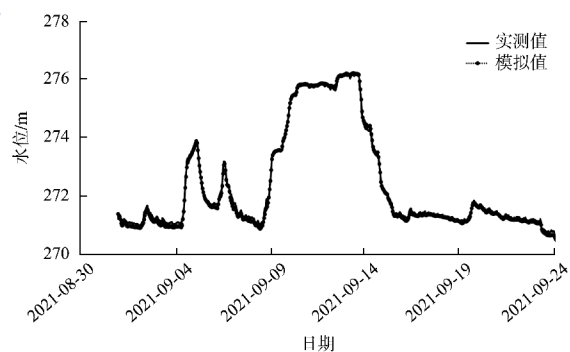
图 3 向家坝—泸州一维非恒定流断面布设

3.3 模型参数率定与验证

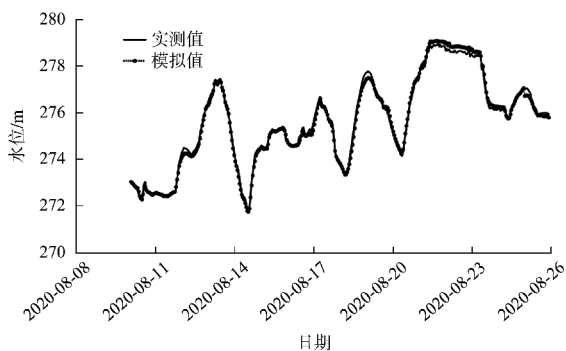
岷江、横江洪水对向家坝下游河道水位顶托作用显现于汛期, 根据研究区各站点实测水位、流量数据特点, 选取 2020 年 8 月实测数据为率定期, 2021 年 9 月、2022 年 6 月为参数验证期, 并以研究区向家坝站、三块石、普安、大雪滩、宜宾、李庄、横江、高场等区间站点实测数据进行校核验证。模型模拟计算时, 根据研究区各验证站点位置关系分段设置河床糙率, 并按率定期、验证期各站点实际水位过程分别赋予低、中、高水位 3 个区间糙率, 经率定计算, 干流河段糙率分别在 $0.035 \sim 0.064$ 、 $0.031 \sim 0.060$ 、 $0.028 \sim 0.060$, 支流岷江河段糙率分别在 $0.034 \sim 0.060$ 、 $0.034 \sim 0.060$ 、 $0.035 \sim 0.060$, 支流横江河段糙率分别在 $0.027 \sim 0.040$ 、 $0.030 \sim 0.040$ 、 $0.034 \sim 0.045$, 干支流河道糙率关系总体呈横江、岷江、干流逐步增大趋势。部分站点水位模拟值对比见图 4, 各监测站点水位平均误差统计见表 3。



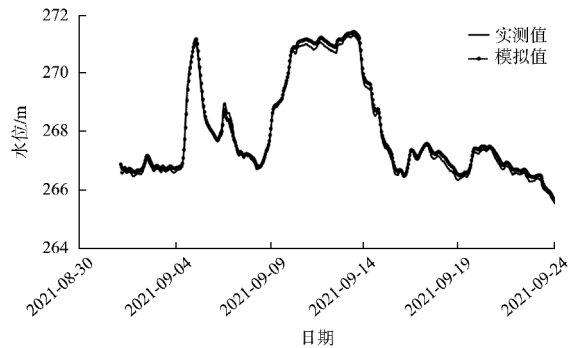
b) 2020 年率定期普安站



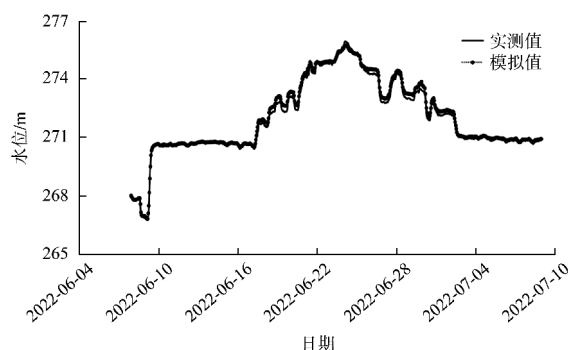
c) 2021 年验证期向家坝站



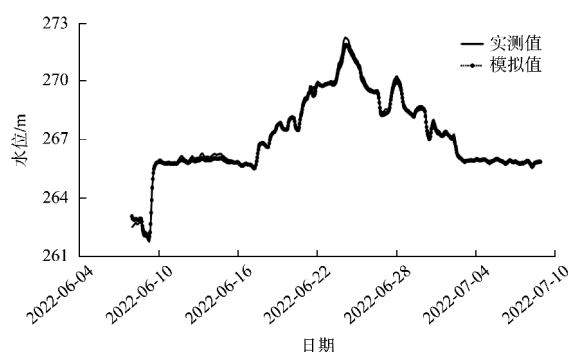
a) 2020 年率定期向家坝站



d) 2021 年验证期普安站



e) 2022年验证期向家坝站



f) 2022年验证期普安站

图4 部分站点水位模拟值对比

表3 各监测站水位模拟平均误差

监测 站点	平均误差/m		
	2020 年率定期	2021 年验证期	2022 年验证期
向家坝	0.12	0.08	0.12
三块石	0.13	0.05	0.13
普安	0.15	0.08	0.11
大雪滩	0.16	0.15	0.14
宜宾	0.14	0.09	0.19
李庄	0.19	0.10	0.19
高场	0.19	0.09	0.16
横江	0.20	0.12	0.06

根据表3向家坝—李庄区间干支流各监测站点2020—2022年汛期平均模拟误差统计情况以及图4向家坝、普安站长序列实测值与模拟值对比情况可知,各站点水位模拟误差集中在0.1 m附近,且模拟水位过程均能较好地反映各站点水位随时间变化过程。考虑模型地形、参数设置及河网概化误差,认为建立的向家坝—横江—岷江一维非恒定流模型能够较好地模拟干支流河道洪水演进情况,模型可靠。

4 岷江、横江洪水顶托影响分析

4.1 工况拟定

4.1.1 工况制定原则

根据《金沙江向家坝水电站水库运用与电站运行调度规程(试行)》以及前期可研阶段有关成果,向家坝水电站调度优先级为,汛期航运调度服从防洪调度,航运调度与发电调度相互协调。其中关于防洪要求为,以宜宾市区防洪标准达到50 a一遇为目标,向家坝、溪洛渡梯级水库联合防洪调度时,以控制李庄流量不超过 $51\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 作为向家坝水库防洪调度方式;关于下游通航运行水位要求为,按照《宜宾市地方海事局 昭通市地方海事局航行通告》规定,向家坝水电站升船机1 000吨级标准船型船舶,暂以电站出库 $8\,500\text{ m}^3/\text{s}$ (枢纽泄洪不超过 $2\,200\text{ m}^3/\text{s}$)为最大通航流量。

岷江、横江流域暴雨集中于6—9月,查询向家坝水电站升船机试通航以来同期电站最小日均出流在 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 附近。结合向家坝下游防洪、通航要求,拟定工况时,向家坝初始出库流量应在 $4\,000\sim 8\,500\text{ m}^3/\text{s}$,且向家坝、横江、岷江合成流量不超过 $51\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

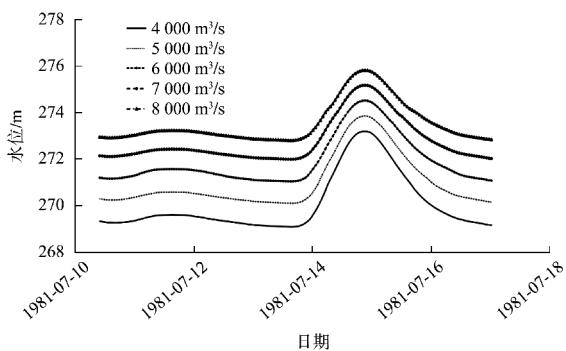
4.1.2 拟定工况方案确定

按照上述工况制定原则,在分析向家坝水电站分别遭遇岷江、横江5~100 a一遇不同典型年洪水过程时,模型上边界可分别以向家坝水电站 $4\,000$ 、 $5\,000$ 、 $6\,000$ 、 $7\,000$ 、 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 等5个恒定流量级出库作为输入,下边界以泸州站水位流量关系为输出;岷江侧边界分别以高场站1959、1961、1966、1983、2020年5个典型年的5~100 a一遇洪水过程作为输入,侧边界横江站以对应实测流量过程为输入;横江侧边界分别以横江站2007、2008、2013、2017年4个典型年的5~100 a一遇洪水过程作为输入,侧边界高场站以对应实测流量过程为输入。将向家坝各级出库流量和岷江、横江各典型年不同频率过程进行组合,在判断向家坝、横江、岷江洪峰组合流量与电站防洪要求符合性后,最终确定191种组合工况。

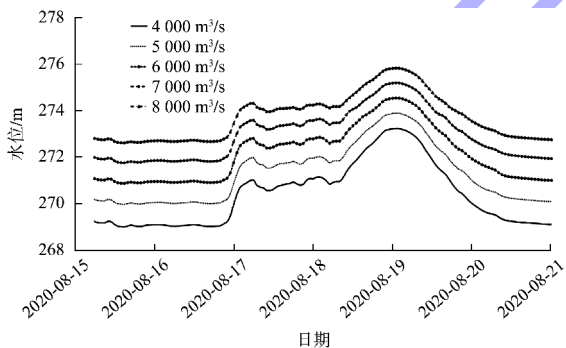
4.2 洪水顶托影响计算及分析

4.2.1 拟定工况计算

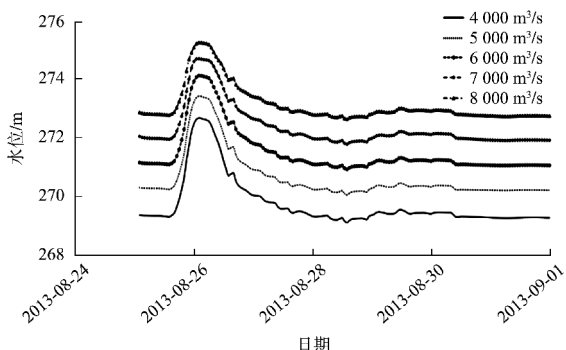
采用建立的研究区一维非恒定流模型,分别对拟定的191种组合工况进行模拟计算,即可得出向家坝水电站按4 000~8 000 m³/s恒定出库时,遭遇岷江、横江各典型年不同频率洪水后,向家坝水文站水位变化过程情况。图5为向家坝水电站遭遇岷江、横江部分典型年的5 a一遇洪水后,下游向家坝水文站水位变化过程情况。



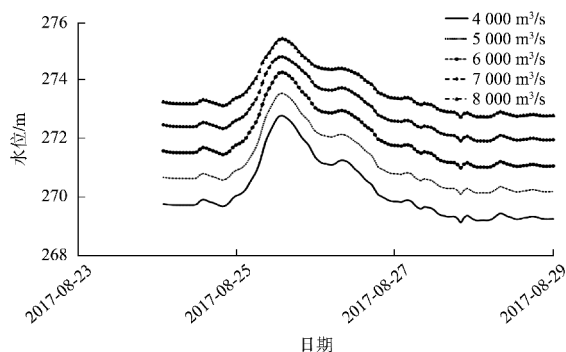
a) 岷江1981年



b) 岷江2020年



c) 横江2013年



d) 横江2017年

图5 向家坝站遭遇部分典型年5 a一遇洪水水位变化过程

4.2.2 结果分析

统计向家坝水电站遭遇岷江、横江各典型年不同频率洪水的组合工况计算结果,分析向家坝水文站对应的最大水位小时变幅、最大水位日变幅情况,得出结论如下:

1) 向家坝水电站遭遇岷江各典型年不同频率洪水后,下游最大水位小时变幅均在1 m/h标准内,其中最大水位小时变幅为0.55 m/h,对应工况为向家坝水电站恒定4 000 m³/s出库、遭遇岷江2020年典型年50 a一遇洪水;最大水位日变幅除部分典型年的5 a一遇洪水工况满足3 m/d标准外,其余工况下均超3 m/d标准,最大可达7.59 m/d,对应工况为向家坝水电站恒定4 000 m³/s出库、遭遇岷江1981年典型年50 a一遇洪水。

2) 向家坝水电站遭遇横江各典型年不同频率洪水后,下游最大水位小时变幅除部分典型年100 a一遇洪水工况超1 m/h标准外,其余工况下均在1 m/h标准内,最大可达1.19 m/h,对应工况为向家坝水电站恒定4 000 m³/s出库、遭遇横江2008年典型年100 a一遇洪水;最大水位日变幅除部分典型年的5 a一遇设计洪水工况满足3 m/d标准外,其余工况下均超3 m/d标准,最大可达6.87 m/d,对应工况为向家坝水电站恒定4 000 m³/s出库、遭遇岷江2008年典型年100 a一遇洪水。

5 结论与建议

1) 向家坝水电站恒定流量出库时, 遭遇岷江或横江 5 a 一遇及以上洪水后, 下游向家坝水文站时内、日内水位变化均明显增大。其中由岷江洪水顶托造成的下游水位最大小时变幅、日变幅分别为 0.55 m/h 和 7.59 m/d, 分别对应向家坝水电站按 4 000 m³/s 恒定出库、遭遇 2020 年和 1981 年 2 个典型年的 50 a 一遇洪水过程工况; 由横江洪水顶托造成的下游水位最大小时变幅、日变幅分别为 1.19 m/h 和 6.87 m/d, 对应向家坝水电站按 4 000 m³/s 恒定出库、遭遇 2008 年典型年的 100 a 一遇洪水过程工况。

2) 向家坝水电站恒定流量出库时, 遭遇岷江或横江 5~10 a 一遇洪水顶托后, 大概率造成下游水位日变幅超 3 m/d 的要求; 遭遇岷江或横江 10 a 一遇及以上洪水顶托后, 必定造成下游水位日变幅超 3 m/d 的要求。基本不满足电站下游通航水位日变幅控制要求。

3) 向家坝水电站恒定流量出库时, 无论遭遇岷江何种频率洪水顶托, 均不会造成下游水位小时变幅超 1 m/d 要求, 且除遭遇横江 100 a 一遇等少数洪水工况外, 其余工况均不会造成下游水位小时变幅超 1 m/d 要求。基本满足电站下游通航水位小时变幅控制要求。

4) 鉴于向家坝水电站下游水位同时受电站防洪、调峰及下游岷江、横江洪水顶托等多重因素影响, 实际运行中电站出库流量变化频繁, 与文中假定的向家坝恒定流量出库存在出入, 且根据本次研究的岷江、横江 5 a 及以上洪水大概率造成电站下游水位日变幅超 3 m/d 的控制要求。因此, 建议后续针对性开展以向家坝水电站实际出库流量为基础, 岷江、横江 5 a 及以下中小洪水对向家坝水电站通航影响及调度减缓措施研究。

参考文献:

[1] 高策, 孙志峰, 张春光. 金沙江向家坝升船机实船试航

研究[J]. 水运工程, 2023(1): 82-87.

- [2] 宜宾市地方海事局, 昭通市地方海事局. 宜宾市地方海事局 昭通市地方海事局航行通告[宜市海通字[2019] 27 号][Z]. 宜宾: 宜宾市地方海事局, 2019.
- [3] 交通运输部. 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[交办水函[2020]1534 号][Z]. 北京: 交通运输部, 2020.
- [4] 中南勘测设计研究院. 金沙江向家坝水电站正常运行期非恒定流对下游航运影响及调度方式研究专题报告[R]. 长沙: 中南勘测设计研究院, 2017.
- [5] 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.
- [6] 水利水电规划设计总院. 长江上游干流四川段防洪治理工程可行性研究报告[R]. 北京: 水利水电规划设计总院, 2016.
- [7] 徐高洪, 邵骏, 郭卫. 2020 年长江上游控制性水文站洪水重现期分析[J]. 人民长江, 2020, 51(12): 94-97, 103.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE 11: A Modeling System for Rivers and Channels Reference Manual[R]. Copenhagen: DHI, 2004.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.

(本文编辑 王传瑜)