



高坝库区和变动回水区 设计最低通航水位的确定

陈婷婷, 周玉洁, 赵江, 于丽伟

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川成都610017)

摘要: 传统的库区设计最低通航水位的计算方法主要对流量进行统计, 按保证率计算入库流量与坝前水位相组合, 但该方法没有考虑电站的调度方案。以金沙江向家坝库区为例, 针对向家坝电站的调度方案不同, 高坝库区坝前水位差较大, 统一用保证率流量和坝前水位组合方案不符合实际情况, 进行设计最低通航水位的研究。以实际坝前水位和流量的组合为依据, 通过4种方法推求高坝库区及变动回水区设计最低通航水位, 并进行对比。结果表明, 考虑向家坝坝前水位与入库流量的组合可以更好地确定变动回水区的工程规模, 符合实际情况, 达到节约成本的目的。

关键词: 设计最低通航水位; 保证率; 调度方案; 高坝库区

中图分类号: U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0080-05

Determination of lowest navigable water level design in high dam reservoir areas and fluctuating backwater areas

CHEN Ting-ting, ZHOU Yu-jie, ZHAO Jiang, YU Li-wei

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: Traditional calculation methods for designing the lowest navigable water level in reservoir areas mainly count discharge and calculate the inflow discharge according to guaranteed rate and water level in front of dams. However, these methods fail to consider the dispatching scheme of power stations. Taking Xiangjiaba Reservoir area in Jinsha River as an example, this paper analyzes problems that Xiangjiaba power station has different dispatching schemes, the water level difference in front of dams of high dam reservoir areas is large, and schemes using both guaranteed rate discharge and water level in front of dams are not suitable for the actual situation. Then, the paper studies the lowest navigable water level design. Based on the actual water level and discharge in front of dams, the paper calculates the lowest navigable water level in high dam reservoir areas and fluctuating backwater areas by four methods and compares the calculation results. The results show that the project scale in fluctuating backwater areas can be better determined by considering both water level and inflow discharge in Xiangjiaba Reservoir area, which is in line with the actual situation and can reduce cost.

Keywords: lowest navigable water level design; guarantee rate; dispatching scheme; high dam reservoir areas

金沙江是四川省西部唯一一条东西向大河, 水力资源丰富, 金沙江攀枝花—水富段共规划有观音岩、金沙、银江、乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝7个梯级, 各规划梯级特别是向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德4个巨型水电枢纽建成蓄

水后, 库区水深、河宽条件极其优良, 航运发展潜力巨大。金沙江下段规划的乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝4个梯级均为高坝大库, 最大坝高分别为265、289、278、162 m, 4个梯级建成后将分别形成200、183、194、157 km的深水库区

航道^[1], 可见高坝方案在金沙江流域已屡见不鲜。

向家坝枢纽是金沙江规划的最下游梯级, 位于金沙江下游河段四川叙州区与云南省水富县交界处, 下距水富县城区 1.5 km、宜宾市区 33 km, 上距在建的溪洛渡电站 157 km, 蓄水后形成库区 156.6 km, 枢纽正常蓄水位 380.0 m, 死水位 370.0 m, 防洪汛限水位 370.0 m。枢纽于 2012 年 10 月上旬下闸蓄水, 2013 年 9 月水库水位从 370.0 m 蓄水至正常蓄水位 380.0 m。向家坝水电站在正常蓄水位 380.0 m 运行时, 库区回水至溪洛渡形成近 157 km 的深水航道, 原山区河流的通航条件将得到极大改善。但向家坝库尾段航道受溪洛渡和向家坝非恒定流影响较为明显, 航道条件较差。本文以向家坝库区为例, 分析研究位于高坝库区内常年回水区和变动回水区航道的设计通航水位的推求方法。与传统的设计最低通航水位推求方法^[2-4]不同, 本文以向家坝实际运行方式为基础, 通过坝前实际运行水位与相应流量组合, 研究坝前水位与上游溪洛渡枢纽坝下水位的推求方法。

1 工程概况

向家坝枢纽工程蓄水后航道水深、水流条件大为改善, 原河段的急、浅、险滩受水库蓄水而淹没消失, 库区干流水深明显加大, 坝前水位为 370.0~380.0 m 时, 对应水深 40~140 m, 流速从原来的 3.0 m/s 以上降为 0.5 m/s 以内, 但库尾变动回水区内航段仍存在弯曲半径不满足通航要求、航宽偏窄、通视条件差、航槽附近暗礁孤石尚存的问题; 中、洪水期坝前 370.0 m 运行时库尾段存在流速大、流态紊乱的河段。根据规划, 金沙江雅砻江汇合口—水富 744 km 航道规划为Ⅲ级及以上。但向家坝库尾段航道受溪洛渡和向家坝非恒定流影响较为明显, 该段航道水位小时变幅最高达 5 m, 日变幅最高达 8 m, 导致向家坝库尾段约 25 km 航道在溪洛渡枢纽 8 000 m³/s 流量以上时禁航。

2 通航水域的确定

2.1 向家坝坝前水位综合历时曲线

本文收集了向家坝电站 2013-05-04—2018-10-31T02:00、08:00、14:00、20:00 的水位, 从而计算每日平均水位。其中 2013-05-04—2013-07-04 是向家坝未达到蓄水要求的时段, 为了准确统计向家坝蓄水完成后的水位综合历时曲线, 在总的数据系列中去掉了该段时间的数据, 从而得到向家坝蓄水完成后的逐年不同保证率下的水位, 结果见表 1。可以看出, 向家坝在 2013 年 10 月—2021 年 9 月各保证率下的水位呈波动变化, 总体来说变幅不大。溪洛渡在 2013 年 10 月—2021 年 9 月各保证率下的上游水位有波动明显, 坝下水位 2 a 内波动在 2 m 左右。

表 1 2013-10-1—2021-9-30 向家坝坝前不同保证率下的水位及流量

保证率 $P/\%$	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	水位/m
70	2 460	373.90
75	2 310	374.18
80	2 170	373.55
85	1 980	373.00
90	1 790	372.42
95	1 500	371.77
98	1 200	371.29

2.2 向家坝库区和变动回水区的划分

根据向家坝和溪洛渡 2013-05-04—2018-10-31 坝前和坝下的水位及入库流量, 建立以向家坝坝前水位为参数的溪洛渡坝下观测处水位-流量关系曲线, 见图 1^[5]。

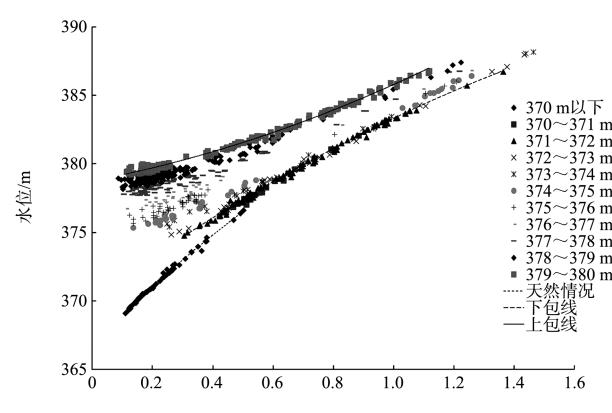


图 1 向家坝坝前水位影响的溪洛渡坝下水位-流量关系曲线

由图 1 可知, 当向家坝坝前水位低于 370.0 m 时, 水位-流量关系曲线呈单一曲线, 溪洛渡坝附近不受库区回水的影响, 此时数据对应时间为 2013-05-04—2013-07-04, 为向家坝还未完全蓄水时的天然情况。当向家坝坝前水位低于 376.0 m 时, 水位-流量关系曲线呈单一曲线, 大河湾码头附近不受库区回水的影响, 河道已恢复天然情况; 当向家坝坝前水位高于 376.0 m、入库流量小于 4 000 m³/s 时, 大河湾附近河段受坝前水位影响较大, 入库流量大于 4 000 m³/s 时, 水位-流量关系曲线呈单一曲线, 此时入库流量的影响大于坝前水位的影响。因此向家坝坝前水位为 376.0 m 时, 回水末端在大河湾附近。大河湾码头距溪洛渡坝址约 5.5 km, 向家坝正常蓄水位 380.0 m 回水至坝址下游, 376.0 m 回水至大河湾码头附近, 按照该河段的相似性可粗略推定向家坝 370.0 m 回水末端大约在大河湾下游 8.5 km 处, 即在瓦屋码头附近。因此向家坝枢纽的变动回水段约为 14 km。

3 航道等级的确定

向家坝—溪洛渡航道属川滇两省界河航道, 流经区域多为高山峡谷, 蓄水前河段狭窄、滩险众多、流态复杂, 通航条件较差, 航道等级低, 通航保障率低。溪洛渡—水富段落差 79.6 m, 平均比降 0.55‰, 向家坝蓄水前新市镇以上枯水河宽 60~100 m, 新市镇以下枯水河宽 80~120 m, 河段礁石多、槽窄而弯、洪枯水位变幅大, 具有典型的山区河流特征。向家坝蓄水后, 研究河段河宽 120~1 000 m, 最大水面宽达 1.5 km。但变动回水区即库尾存在个别碍航滩险外, 金沙江溪洛渡—水富(四川宜宾段)河段基本可达到Ⅲ级航道标准。

4 设计最低通航水位

4.1 传统设计最低通航水位的推求

本工程采用多年历时保证率 98% 的入库流量 1 200 m³/s 与相应的坝前消落水位 370.0 m 组合, 根据一维水面线成果, 汛期限制水位和死水位均为 370.0 m 时回水的成果, 计算得出的回水曲线作为沿程的设计最低通航水位。

4.2 根据向家坝分期运行情况推求的设计最低通航水位

根据向家坝水库特性和金沙江径流、洪水特性, 综合考虑发电、防洪、排沙及与溪洛渡水库运行方式协调等因素拟定的调度原则为: 汛期 6 月中旬—9 月上旬按汛期限制水位 370.0 m 运行, 9 月中旬开始蓄水, 9 月底蓄至正常蓄水位 380.0 m; 10—12 月一般维持在正常蓄水位或附近运行; 12 月下旬—6 月上旬为供水期, 一般在 4、5 月来水较丰时回蓄部分库容, 至 6 月上旬末水库水位降至 370.0 m。结合 2013—2021 年向家坝日均坝前水位及对应流量, 统计该分级流量下各级水位出现的百分比, 见图 2。

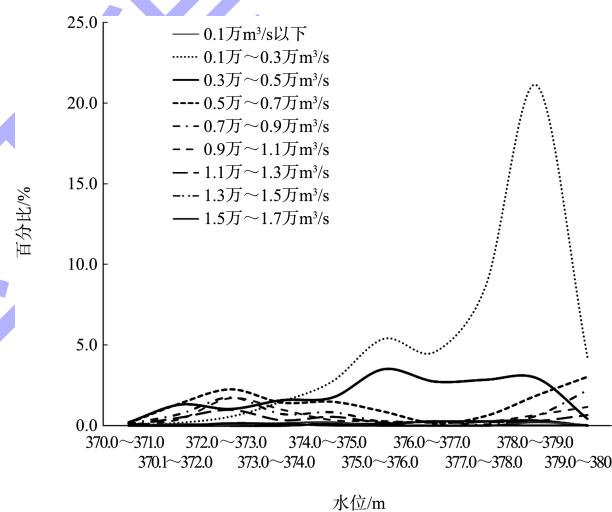


图 2 2013—2021 年工程河段各级流量-水位百分比

根据 2013—2018 年工程河段各级流量-水位实际运行情况, 可见向家坝多年历时保证率 98% 的入库流量 1 200 m³/s 与相应的坝前消落水位 370.0 m 组合没有出现过, 因 1 200 m³/s 流量多出现在非汛期, 而 370.0 m 出现在汛期, 因此该设计水位的确定符合《内河通航标准》^[6], 但是在一定程度上不符合实际运行情况。通过该统计值可知, 全年出现次数最多为流量 2 000~3 000 m³/s 对应坝前水位 378.0~379.0 m 的情况。根据向家坝坝前水位及流量分布可以看出, 在 1 000~5 000 m³/s 入库流量下, 坝前水位在 370.0~374.0 m 会出现部分空缺区域, 见图 3, 这部分区域代表实际运行中不会出现的情况。

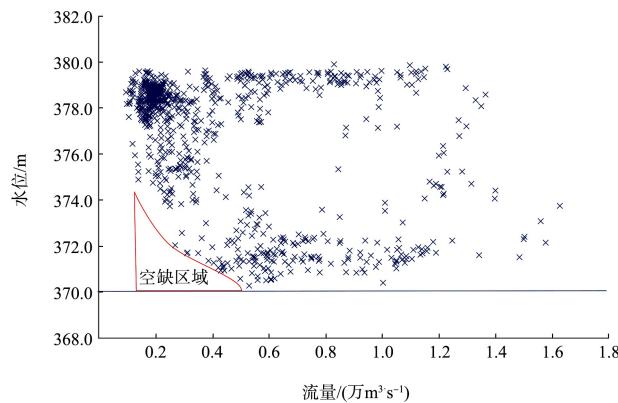


图 3 向家坝坝前水位-流量分布

由于向家坝的运行方式, 根据月份进行调度, 根据非汛期情况下向家坝运行方式综合确定库区航道更符合实际情况。据统计, 向家坝在 2013—2021 年非汛期(10 月—次年 5 月) 坝前各不同保证率下的水位见表 2, 向家坝坝前水位全年保证率曲线和非汛期保证率曲线见图 4。

表 2 2013—2021 年非汛期不同保证率下的向家坝坝前水位

保证率 $P/\%$	80	85	90	95	98
坝前水位/m	375.8	375.3	374.8	374.0	373.2

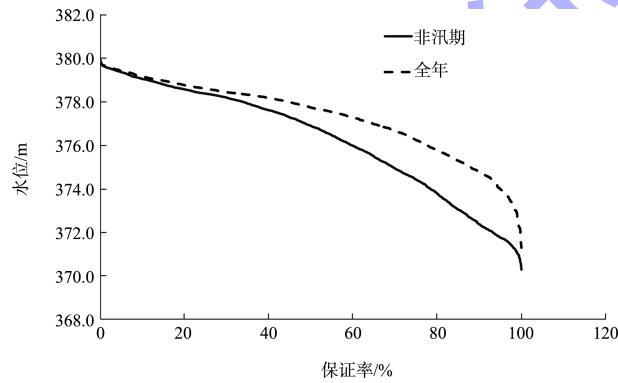


图 4 向家坝坝前水位综合历时曲线

根据非汛期向家坝坝前水位的统计值, 保证率 98% 的水位为 373.2 m, 考虑到常年库区和变动回水区设计水位衔接问题, 向家坝坝前水位为 373.2 m 时, 根据非汛期溪洛渡坝下水位的统计值, 溪洛渡坝下保证率 98% 的水位为 375.0 m。可根据水面线计算, 或者根据溪洛渡坝下水尺相关得到变动回水段的设计最低通航水位。

同时根据筛选出的溪洛渡坝下在向家坝坝前

373.0~374.0 m 时的水位-流量关系曲线(图 5), 反查得溪洛渡坝下 375.0 m 对应的流量为 2 000 m^3/s 。

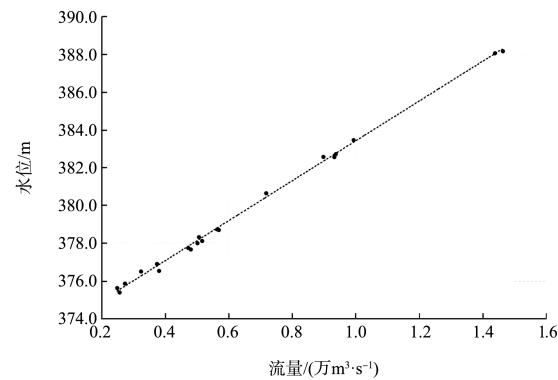


图 5 受向家坝顶托(坝前 373.0~374.0 m) 溪洛渡坝下水位-流量关系曲线

4.3 根据实际通航流量确定的设计最低通航水位

根据现场实地调查可知, 向家坝库尾段航道受溪洛渡和向家坝非恒定流影响较为明显, 该段航道水位小时变幅最高约达 5 m, 日变幅最高约达 8 m, 导致向家坝库尾段约 25 km 航道在溪洛渡枢纽 8 000 m^3/s 流量以上时禁航。据统计, 在 2013—2021 年, 去除 8 000 m^3/s 以上流量后, 向家坝入库综合历时保证率流量见表 3。

表 3 2013-10-01—2021-09-30 向家坝不同保证率下的入库流量

保证率 $P/\%$	80	85	90	95	98
入库流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	2 040	1 890	1 740	1 680	1 580

根据向家坝坝前水位-流量分布的边界线(图 3), 查得向家坝保证率 98% 入库流量 1 580 m^3/s 对应坝前水位为 373.6 m, 根据筛选出的溪洛渡坝下在向家坝坝前 373.0~374.0 m 时的水位-流量关系曲线, 溪洛渡坝下最低水位为 374.6 m。

4.4 根据向家坝坝前保证率水位确定的设计最低通航水位

非汛期向家坝坝前水位的统计值, 保证率 98% 的水位为 371.3 m(表 1)。根据向家坝坝前水位-流量分布的边界线, 查得向家坝坝前水位为 371.3 m 对应入库流量 3 000 m^3/s , 根据筛选出的溪洛渡坝下在向家坝坝前 371.0~372.0 m 时的水位-流量关系曲线(图 6), 溪洛渡坝下最低水位为 374.7 m。

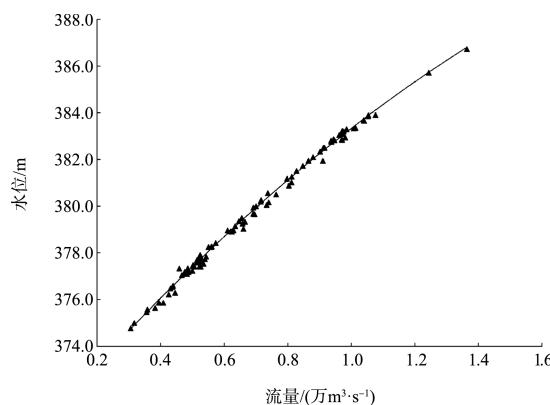


图 6 受向家坝顶托(坝前 371.0~372.0 m)
溪洛渡坝下水位-流量关系曲线

受库尾滩段左右两岸地形地势及项目总投资所限, 比较 4 种方法的结果, 实际通航流量确定的设计最低通航水位可以更好地确定变动回水区的工程规模, 同时考虑了向家坝坝前水位与入库流量的组合, 符合实际情况, 达成节约成本的目的。

5 结语

1) 山区河流高坝大库建成后, 形成了长距离深水库区航道, 由于坝前水位变幅较大, 因此对高坝库区航道形成较大的水位变幅, 须开展库区航道通航水域确定、航道等级论证以及航运规划等相关工作。

(上接第 79 页)

参考文献:

- [1] 水电水利规划设计总院.水电工程施工导流设计规范: NB/T 35041—2014[S].北京:中国电力出版社, 2015.
- [2] 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 达州市水利电力建筑勘察设计院.渠江风洞子航运工程初步设计[R].成都:四川省交通勘察设计研究院有限公司, 达州市水利电力建筑勘察设计院, 2021.
- [3] 交通运输部天津水运工程科学研究所.渠江风洞子枢纽施工导流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工程泥沙交通行业重点

2) 库区航道设计最低通航水位应区分常年回水区和变动回水区, 常年回水区的设计最低通航水位应取梯级最低运行水位(死水位), 而变动回水区的设计最低通航水位需要根据航道整治工程措施可行性、航道整治工程投资、通航保证率以及航道通过能力等进行综合分析确定。

3) 高坝库区较长, 应结合高坝枢纽的实际运行情况进行设计最低通航水位的分析确定, 同时应结合库区设计水位标准和衔接问题, 同时考虑变动回水区实际通航流量及滩险整治情况对变动回水区确定设计最低通航水位。

参考文献:

- [1] 刘晓帆, 陈婷婷, 何熙, 等.库区支流通航水域及设计通航水位的确定方法[J].水运工程, 2020(12): 136-140.
- [2] 徐军辉, 邓伟.梯级电站变动回水区设计最低通航水位确定方法[J].水运工程, 2020(4): 109-114.
- [3] 贡炳生, 蔡国正, 张贤明.论天然河流设计最低通航水位两种确定方法的矛盾与统一[J].水运工程, 2009(1): 161-166.
- [4] 闵朝斌.关于最低通航设计水位计算方法的研究[J].水运工程, 2002(1): 29-33.
- [5] 吴林.金沙江向家坝库区航道定级研究[J].中国水运(下半月), 2021, 21(4): 14-15.
- [6] 长江航道局.内河通航标准: GB 50139—2014[S].北京:中国计划出版社, 2014.

(本文编辑 王璁)

实验室, 2021.

- [4] 交通运输部天津水运工程科学研究所.水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S].北京:人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [5] 交通运输部天津水运工程科学研究所.通航建筑物水力学模拟技术规程: JTJ/T 235—2003[S].北京:人民交通出版社, 2004.
- [6] 王哲鑫, 杨子宇, 聂鹏.沙坪一级水电站施工导流束窄河道冲刷防护试验研究[J].水电能源科学, 2022, 40(1): 112-115, 119.

(本文编辑 王传瑜)