



白鹤滩枢纽变动回水区设计最低通航水位的确定

陈婷婷¹, 杨 涛²

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017;
2. 四川省水利水电勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 以金沙江白鹤滩库区为例, 对于老君滩滩王所在的变动回水段河床比降大, 无法采用整治措施达到规划航道等级的要求, 传统的用保证率流量和坝前水位组合方案不符合实际航运要求及通航情况。探讨采用类比溪洛渡运行的方法, 并考虑白鹤滩回水及整治措施的影响, 综合确定设计最低通航水位。同时对天然情况和整治措施后的通航保证率分段计算, 以供航道整治决策。

关键词: 设计最低通航水位; 通航保证率; 类比法; 变动回水区

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0134-05

Determination of lowest design navigable water level in fluctuating backwater area of Baihetan multipurpose dam project

CHEN Tingting¹, YANG Tao²

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute, Chengdu 610017, China;
2. Sichuan Water Resources and Hydroelectric Investigation & Design Institute, Chengdu 610072, China)

Abstract: Taking Baihetan Reservoir area of Jinsha River as an example, for the fluctuating backwater section of Laojuntan, the river bed gradient is large, and the regulation measures can not be adopted to meet the requirements of the planned waterway grade. The traditional combination scheme of guaranteed discharge and water level in front of dam does not accord with the actual shipping requirements and navigation conditions. The method of simulating the operation of Xiluodu is discussed, and the design minimum navigable water level is determined comprehensively considering the influence of backwater of Baihetan and the regulation measures. At the same time, the natural condition and the navigation guarantee rate after the regulation measures are calculated in sections for the navigation channel regulation decision.

Keywords: lowest design navigable water level; traffic guarantee rate; analogism; fluctuating backwater area

设计最低通航水位是航道工程规划建设中的重要技术参数, 对于枢纽航道, 一般根据保证率流量和坝前水位组合方案计算设计最低通航水位^[1]。然而, 随着采砂、航道开挖、枢纽运行等人类活动的影响, 设计最低通航水位的确定面临

较大困难, 多因素影响下的设计最低通航水位计算问题越来越受到关注^[2]。刘晓帆等^[3]研究了库区支流通航水域及设计通航水位的确定方法。徐军辉等^[4]研究了梯级电站变动回水区设计最低通航水位确定方法。贡炳生等^[5]论证了天然河流设

收稿日期: 2022-11-16

作者简介: 陈婷婷 (1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计及水文学的研究。

计最低通航水位 2 种确定方法的矛盾与统一。然而, 针对无枢纽实际运行资料情况下枢纽变动回水河段的设计最低通航水位研究还较少。

1 工程概况

金沙江地处长江干流上游, 流经青、藏、川、滇 4 省区, 全长 2 326 km。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, 该段航道比降大、险滩多、流态复杂等天然不足状况将得以彻底改变, 形成与三峡相当的库区深水航道, 可常年通行 5 000 吨级船舶。

白鹤滩水电站位于金沙江下游四川省宁南县和云南省巧家县境内, 上接乌东德梯级, 距离乌东德水电站 176.9 km, 下邻溪洛渡梯级, 距离溪洛渡水电站 194 km, 控制流域面积 43.03 万 km², 占金沙江流域面积的 91.0%。工程建设内容见图 1。

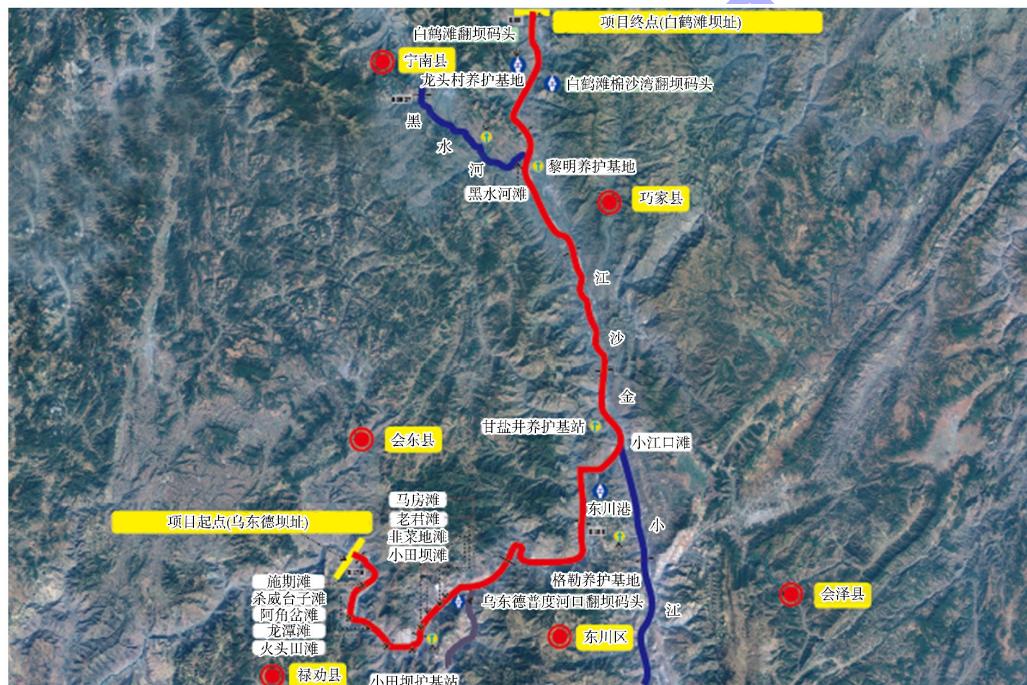


图 1 工程建设内容

2 通航水域及航道等级的确定

金沙江干流是典型的山区河流, 平面上迂回曲折, 断面上呈典型 V 形峡谷河床, 天然河道时滩多流急, 通航条件较差。下游白鹤滩水库初步蓄水后, 常年库区河段水深较大, 水流平缓, 通航条件大幅改善; 但在变动回水区河段通航条件受白鹤滩坝前水位影响, 坎前死水位运行时, 河道通航条件改善有限, 与天然情况相似。因此变动回水区的整治标准是本次整治规模的控制性因素。通过一维水面线计算得出金沙江干流回水变

动区(普渡河口上游 4 km)以上游河段在死水位时不受白鹤滩电站回水影响, 恢复天然河道特性。

金沙江攀枝花—水富是四川省地区重要航道, 规划攀枝花—大沙坝 63 km 为Ⅳ级航道, 大沙坝—水富 723 km 为Ⅲ级航道; 推荐金沙江攀枝花—水富段航道为Ⅲ级通航标准, 考虑到满足经济社会发展并适度超前、与水富—重庆段航道尺度衔接及提升金沙江航运竞争力的需要等因素, 在技术可行、经济合理的前提下, 航道规划标准可考虑定为Ⅱ级。金沙江干流常年库区按照内河Ⅰ(3)级

双向航道标准, 航道尺度 $4.0\text{ m} \times 135\text{ m} \times 670\text{ m}$ (水深 \times 宽度 \times 弯曲半径), 通航保证率 98%; 金沙江干流变动回水区 (K142.5—K166.5) 按照内河 III-(3) 级双向航道标准, 航道尺度 $3.0\text{ m} \times 60\text{ m} \times 480\text{ m}$ 。根据白鹤滩枢纽运行方式及河道地形分段确定通航保证率, 其中禄劝小田坝以下河段整治后通航保证率不低于 78.03%。

3 设计最低通航水位

3.1 计算思路

传统的设计水位计算方法为一定保证率计算的入库流量与坝前水位相组合入库流量与坝前水位组合保证率的计算方法, 后期有结合电站实际运行情况的水位推求方法。但由于白鹤滩电站于 2021 年 4 月开始蓄水, 目前仅运行 1 a 时间, 因此白鹤滩的坝前运行水位还未达到正式运行状态, 且蓄水状态下 1 a 时间的坝前水位情况不能反映白鹤滩正式运行多年情况, 因此采用传统的设计水位计算方法不符合该段航道的实际情况。白鹤滩电站为高坝大库, 坎前水位最大变幅为 60 m。白鹤滩库尾变动回水区长度约 32 km, 比降较大, 是本次研究的重点区域, 而坝前水位的变幅对白鹤滩库尾变动回水段的回水长度有很大影响。目前根据白鹤滩电站的理论运行方式无法得知白鹤滩实际运行坝前水位的情况, 设计水位推求的思路拟根据白鹤滩上下游水文站及电站情况进行综合联动研究分析。

3.1.1 白鹤滩与溪洛渡的类比关系

1) 溪洛渡水电站水库正常蓄水位 600 m, 防洪限制水位 560 m, 死水位 540 m, 调节库容 64.6 亿 m^3 , 防洪库容 46.5 亿 m^3 , 装机容量 12.6 GW, 具有不完全年调节能力。白鹤滩水电站正常蓄水位 825 m (1985 国家高程), 防洪限制水位 785 m, 死水位 765 m, 装机容量 16.0 GW, 调节库容 104.36 亿 m^3 , 水库具有年调节能力。水库防洪库容 75 亿 m^3 , 防洪库容采取分期预留、逐步蓄水的运行方式。

白鹤滩与溪洛渡同为金沙江上下两级高坝大

库, 最大坝前水位变幅均为 60 m, 白鹤滩的调节库区与装机容量均大于溪洛渡, 且溪洛渡为白鹤滩下一级电站, 白鹤滩水电站与上下游梯级水电站水力联系紧密, 各梯级电站运行调度相互影响, 白鹤滩水电站的运行调度应符合梯级联合调度要求。因此可以认为, 溪洛渡的坝前水位变幅可以反映白鹤滩坝前水位变幅, 用溪洛渡坝前水位变幅类比白鹤滩坝前水位变幅是合理且偏保守的。

2) 采用 2 种方法得出白鹤滩坝前水位保证率曲线 (图 2)。①根据白鹤滩水电站年内旬平均水位值统计白鹤滩水电站旬水位保证率; ②类比溪洛渡运行水位计算结果, 白鹤滩和溪洛渡电站的正常蓄水位和死水位之间的水位变幅均为 60 m, 以此为类比水位增加值, 得到以溪洛渡坝前水位为基础的白鹤滩坝前水位值。运用溪洛渡坝前水位统计值类比白鹤滩坝前水位值。根据溪洛渡坝前 2013—2018 年日均水位成果, 统计溪洛渡水电站水位保证率。

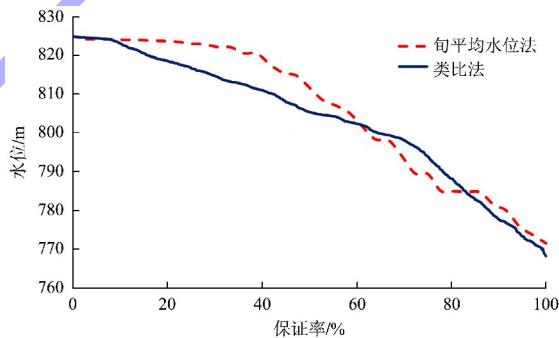


图 2 白鹤滩坝前水位保证率曲线

根据 2 种方法所得结果可以看出, 用类比溪洛渡水位计算方法比旬平均水位综合历时曲线法保证率偏高。由于现阶段白鹤滩电站正处于蓄水阶段, 旬平均水位计算方法以电站运行理论值为基础, 且无法精确到日均数据, 溪洛渡的类比值以多年实际运行水位为基础。因此采用类比计算方法推求的水位为白鹤滩坝前水位。

3.1.2 设计流量的选定

类比溪洛渡各特征水位对应出现月份的最小流量, 内插得到白鹤滩坝前水位为汛限水位 785 m 对应月份的最小流量为 $921\text{ m}^3/\text{s}$, 保证率 98% 的

流量为 $1250 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.2 天然情况下的设计水位及保证率

白鹤滩库尾航道是本次航道工程的重点航段。在该航段中, 老君滩位居滩王, 在本次工程河段中形成卡口。老君滩的整治规模决定了该航道工程规模和投资造价, 因此老君滩航道条件的改善情况为本次整治的重点。

根据坝前各特征水位的回水成果, 保证率98%流量与坝前水位为白鹤滩死水位 765 m 时白鹤滩回水位置为普渡河口上游约 4 km , 对应航道里程约 142 km , 白鹤滩回水未达到老君滩。根据一维和二维数模计算结果, 此时老君滩未处于白鹤滩回水范围内, 水面比降约为 17% , 水面流速约为 4.5 m/s 。老君滩在白鹤滩坝前汛限水位 785 m 时, 回水可覆盖老君滩部分河段, 通航条件得到一定改善, 水面比降为 3.4% , 水面流速约为 4.2 m/s , 能否通过整治措施达到 III 级航道标准需要结合数模分析进行上滩指标的分析和验证。

3.3 航道整治后的设计水位及保证率

1) 根据 GB 50139—2014《内河通航标准》规定, 并考虑工程河段水文特性和白鹤滩水库运行调度情况, 本工程采用多年历时保证率入库流量与相应的坝前各级水位组合计算得出的回水曲线作为沿程各点的设计最低通航水位。

根据前述对老君滩滩段航道条件的分析, 库尾航道有几处卡口位置的比降和流速较大, 无法通过航道整治措施达到设计航道标准。结合库尾航道的航运需求, 同时考虑使航运建设辐射到更多地区, 本阶段根据整段航道情况分成 4 段考虑, 分别为:

①航道里程 142 km 以下河段位于白鹤滩常年回水区, 因此以全年保证率 98% 流量对应坝前水位 765 m 为组合, 航道里程 142 km 以下回水曲线为该段航道的设计最低通航水位。

②航道里程 $142 \sim 150 \text{ km}$ 为重点整治滩段, 包括老君滩和小田坝滩, 拟以白鹤滩汛限水位 795 m 与出现月份的最小流量为组合, 此时的回水曲线为该段航道的设计最低通航水位。同时通过数学模型验证, 为满足更多时段达到 III 级航道标准, 选取能采用整治措施达到 III 级航道通航条件的坝

前 $785 \sim 795 \text{ m}$ 水位与对应的流量为组合, 提高通航保证率, 综合确定该段的设计最低通航水位。

③航道里程 $150 \sim 156 \text{ km}$ 河段, 天然情况下水面比降和流速都较大, 采用工程措施达到 III 级航道标准代价较大, 且该段航道附近无乡镇及规划岸线, 航运需求较小。航道里程 $150 \sim 156 \text{ km}$ 河段以坝前水位 805 m 对应各水位出现月份的最小流量为组合。

④航道里程 $156 \sim 171.9 \text{ km}$ 河段以坝前水位 815 m 对应各水位出现月份的最小流量为组合, 分段考虑。

2) 对于②航段即航道里程 $142 \sim 150 \text{ km}$, 根据一维及二维数模试算计算成果, 能通过采取整治措施达到 III 级航道通航标准的组合为①白鹤滩坝前 $785 \sim 786 \text{ m}$, 对应流量 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下; ②白鹤滩坝前 $786 \sim 789 \text{ m}$, 对应流量 $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下; ③白鹤滩坝前 $790 \sim 795 \text{ m}$, 对应流量 $6000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下组合; ④白鹤滩坝前 795 m 。3) 白鹤滩枢纽水位的保证率可类比溪洛渡坝前水位进行分析, 航道里程 $142 \sim 150 \text{ km}$ 河段当坝前水位为汛限水位 795 m 时, 保证率损失 25.88% , 全年损失天数为 94 d 。航道里程 $150 \sim 156 \text{ km}$ 河段当坝前水位为 800 m 时, 保证率损失 35.65% , 全年损失天数为 130 d 。航道里程 $156 \sim 171.9 \text{ km}$ 以上河段当坝前水位为 815 m 时, 保证率损失 70.83% , 全年损失天数为 259 d 。

4) 根据以上对②航段即航道里程 $142 \sim 150 \text{ km}$ 能达到 III 级航道对应情况的分析, 各水位和流量组合对应的天数见图 3。

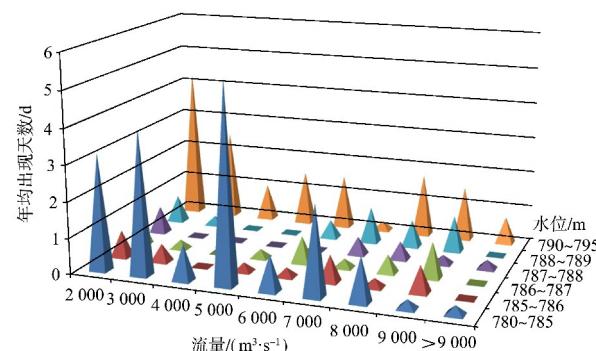


图 3 坝前水位对应不同流量级组合出现的天数

通过一维及二维数模计算结果, 航道里程 142~150 km 在前 3 种情况下可以通过整治措施达到 III 级航道标准, 每年共 14.25 d, 可在原坝前 795 m 的情况下增加 3.91% 的保证率, 加上原有 74.12% 的保证率, 可以达到 78.03% 的保证率, 通航总天数为 285 d。

3.4 合理性分析

根据规范规定, 设计最低通航水位应以全年保证率 98% 流量对应坝前水位 765 m 为组合, 计算沿程水面线为该段航道的设计最低通航水位。但对于库尾航道, 本次整治的重点航段位于白鹤滩的变动回水段, 天然水流条件较差。在白鹤滩 765 m 回水范围以外的航道段流速较大(最大约 4.93 m/s), 水面比降较大(最大约 25.1‰), 通过整治措施无法达到 III 级航道的标准或者需要花费很大代价达到本就运量需求较小的通航要求, 具有较小的性价比。根据类比法和整治措施后确定的设计最低通航水位既解决了航道尺度的问题, 又符合实际运行情况, 对于白鹤滩库区航道合理可行。

4 结语

1) 枢纽变动回水段的设计水位需要综合航道的实际情况、运量需求, 库尾滩段通航条件综合

(上接第 95 页)

- [10] 曹民雄, 蔡国正, 王秀红. 边滩水沙运动特点及护滩建筑物破坏机理研究 [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008.
- [11] 刘怀汉, 付中敏, 陈婧, 等. 长江中游航道整治建筑物护滩带稳定性研究 [C]//中国水利学会青年科技工作委员会. 中国水利学会第三届青年科技论坛论文集. 郑州: 黄河水利出版社, 2007: 300-304.
- [12] 汪求顺. 近岸海床细泥沙输移及冲刷防护研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [13] 贾晓, 伍文俊, 吴华林, 等. 长江中下游洲滩守护工程概化模型试验研究 [J]. 水运工程, 2012(2): 123-127.
- [14] 魏祥龙. 航道工程边滩守护软体排变形机理与监测预警方法研究 [D]. 成都: 四川大学, 2022.
- [15] 徐雪鸿, 魏祥龙, 杨涵苑, 等. 软体排鼓包变形应变响

考虑。针对缺乏白鹤滩实际运行资料的问题, 采用类比法分析溪洛渡实际运行情况得到白鹤滩的类比运行水位。

2) 本文选取不同坝前水位和相应流量的不同组合, 考虑不同航段对应不同流量组合为基础, 计算不同航段的通航保证率, 满足不同航段在不同时段达到 III 级航道标准的要求。

3) 本文采用类比法在现有资料不足的情况下, 符合实际航道整治的条件和实际问题, 为同类工程提供了依据。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王永兴, 张明, 覃昌佩, 等. 柳江Ⅱ级航道设计最低通航水位推求 [J]. 水道港口, 2022, 43(4): 489-493.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.

(本文编辑 王传瑜)

应特征及识别方法研究 [J]. 水电能源科学, 2023, 41(4): 147-150.

- [16] 重庆交通大学. 内河航道整治建筑物模拟技术规程: JTS/T 231-8—2018 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [17] 卢毅, 于军, 龚绪龙, 等. 基于 BOFDA 的地面塌陷变形分布式监测模型试验研究 [J]. 高校地质学报, 2018, 24(5): 778-786.
- [18] 王德洋, 朱鸿鹄, 吴海颖, 等. 地层塌陷作用下埋地管道光纤监测试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1125-1131.
- [19] 韦超, 朱鸿鹄, 高宇新, 等. 地面塌陷分布式光纤感测模型试验研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(9): 2443-2456.

(本文编辑 王璁)