



清水江白市枢纽—托口枢纽的变动段 航道设计最低通航水位研究*

南海龙¹, 乾东岳², 李明¹

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410008;
2. 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实验室, 天津 300456)

摘要: 山区性河流枢纽回水变动段航道因受上、下游枢纽调节以及工程整治方案等多因素影响, 水文条件复杂多变, 确定设计最低通航水位成为关键性难题。依托清水江白市至分水溪航道建设工程, 采用二维水流数值模拟方法, 确定了设计最低通航水位的关键数值, 并提出按 90% 通航保证率设计航道工程, 取分枯期和汛期两种最不利工况, 沿程水位下包线作为设计最低通航水位。研究成果解决了工程的关键问题, 可为同类工程建设提供科学依据。

关键词: 回水变动段; 设计最低通航水位; 数值模拟; 航道整治; 山区性河流

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0154-06

Design lowest navigable water level of channel in fluctuating section from Baishi hub to Tuokou hub on Qingshui River

NAN Hailong¹, QIAN Dongyue², LI Ming¹

(1. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410008, China;
2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Key Laboratory of
Engineering Sediment, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: Influenced by many factors, such as the regulation of upstream and downstream hubs and the project regulation scheme, the channel in the backwater fluctuating section of mountainous river hubs has complex and changeable hydrological conditions. Therefore, determining the design lowest navigable water level has become a key problem. Relying on the waterway construction project from Baishi to Fenshuixi of Qingshui River, the key values of the design lowest navigable water level are determined by a two-dimensional numerical simulation of water flow. It is proposed that the waterway project is designed according to 90% navigable guarantee rate, taking the two most unfavorable conditions of the dry season and the flood season and using the lower envelope of the water level along the route as the design lowest navigable water level. The research results have solved the key problem of the project and can provide a scientific basis for the construction of similar projects.

Keywords: backwater fluctuating section; design lowest navigable water level; numerical simulation; waterway regulation; mountainous river

1 工程概况

清水江白市至分水溪航道建设工程按Ⅳ级标准建设, 内容包括白市—分水溪 34 km 航道整

治^[1]。工程位于贵州省黔东南州天柱县, 上接白市枢纽, 下距托口枢纽 22.2 km。工程河段属于清水江下游(沅水上游), 具有典型的山区河流特征:

收稿日期: 2022-08-10

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB2600900)

作者简介: 南海龙 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口与航道设计工作。

洪峰暴涨暴落,流量与水位变幅较大,中水历时不长;枯水期水面比降沿程分布不均匀,流速沿程变化较大,变动回水段浅滩水面陡峭、水流湍急、比降较大、流速较快,常年回水段水面平缓、比降较小、流速较慢。研究河段河势平面表现为弯曲河段,弯道的上段河道较为宽浅(枢纽以下1 200 m内),河宽230~290 m,河道无明显深槽;弯道下段河道窄深,河宽100~170 m,河床剖面大致呈U形或V形。受上、下游枢纽调度影响,工程河段水文条件复杂多变,确定设计最低通航水位是工程建设的关键性难题。

2 已建枢纽运行情况

2.1 白市枢纽下泄流量

白市枢纽于2013年4月3台机组全部投产运行,2014年蓄水约至290.00 m,2015年达到设计正常蓄水位300.00 m,进入电站运行相对稳定期。汛期控制运行水位296.00 m(5月1日—7月20日),死水位294.00 m,水库总库容6.87亿m³,调节库容1.72亿m³,具有季调节性能。发电调度运行实际情况在每年的4月初腾空库容,根据入库流量确定泄水量,即来多少放多少。

根据白市枢纽2014—2018年逐时出库流量资料分析,具有阶段性小时零流量下泄情况,

枯水期(每年9—次年3月),小时零流量月平均天数为28~29 d;2016年9月—2017年3月,小时零流量月平均天数为29 d;2017年9月—2018年3月,小时零流量月平均天数为28 d;汛期(4—8月),2017年小时零流量月平均为3 d,2018年明显增加至26 d。从昼夜分布情况看,晚间小时零流量天数多于白天。

2.2 托口枢纽运行水位

托口枢纽于2014年2月下闸蓄水,同年3月首台机组并网发电,2017年蓄水至正常蓄水位约250.00 m,死水位235.00 m,限汛水位246.00 m。库区总库容13.84亿m³,调节库容6.15亿m³,具有不完全年调节性能。一般调度原则是以少弃

水为前提,尽可能维持在较高水头运行,增加发电量。2月下旬—3月下旬托口水库进入枯水期时逐渐消落,对下游其他梯级补水,提高梯级整体的保证电能。

根据托口枢纽2016—2018年坝前水位资料分为3个阶段:1)枯水期(每年9—次年3月),托口水库高水位运行,实测托口坝前最低日均水位244.00 m。2)消落期(3月底—4月初),托口坝前水位逐渐降低至238.00 m左右,同期白市水库进行汛前预泄。3)汛期(4—8月),洪峰均有“陡涨陡落”的暴雨洪水特性,主汛期(7月20日)后托口坝前水位降低并维持在246.00 m汛限水位附近。

3 计算模型及边界条件

3.1 基本方程

平面二维正交曲线坐标系下沿水深平均的紊流模型控制方程包括:

连续性方程:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial (H_u C_\eta)}{\partial \xi} + \frac{\partial (H_v C_\xi)}{\partial \eta} \right] = Q \quad (1)$$

水平方向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{C_\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\eta} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} + \frac{uv}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - gv = \\ - \frac{1}{\rho_0 C_\xi} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{C_\xi} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + \frac{uv}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - \frac{u^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} + gu = \\ - \frac{1}{\rho_0 C_\eta} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (3)$$

式中: u 、 v 、 ω 分别为 ξ 、 η 、 σ 方向的速度分量; t 为时间变量; H 为总水深; Q 为单位面积的水量变化值; g 为重力加速度; ρ_0 为水体密度; P_ξ 、 F_ξ 、 M_ξ 为 ξ 方向的静水压力梯度、紊动动量通量、动量的源(汇); P_η 、 F_η 、 M_η 为 η 方向的静水压力梯度、紊动动量通量、动量的源(汇); C_ξ 和 C_η 为坐标转换系数; v_v 为垂向紊动系数。

3.2 模型建立

依据基本方程建立二维水流数学模型,河段

范围为清水江白市枢纽坝址至分水溪间的 34.0 km 河段。为准确反映托口枢纽回水影响,将数学模型出口下延至托口枢纽坝前,全长 56.2 km。模型共划分 2 994×144 网格,并对航道整治重点滩段 12.0 km 进行网格加密,纵向网格长 1.4~58.7 m,平均网格长 16.8 m;横向网格宽 0.9~30.0 m,平均网格宽 6.2 m。模型网格划分见图 1。

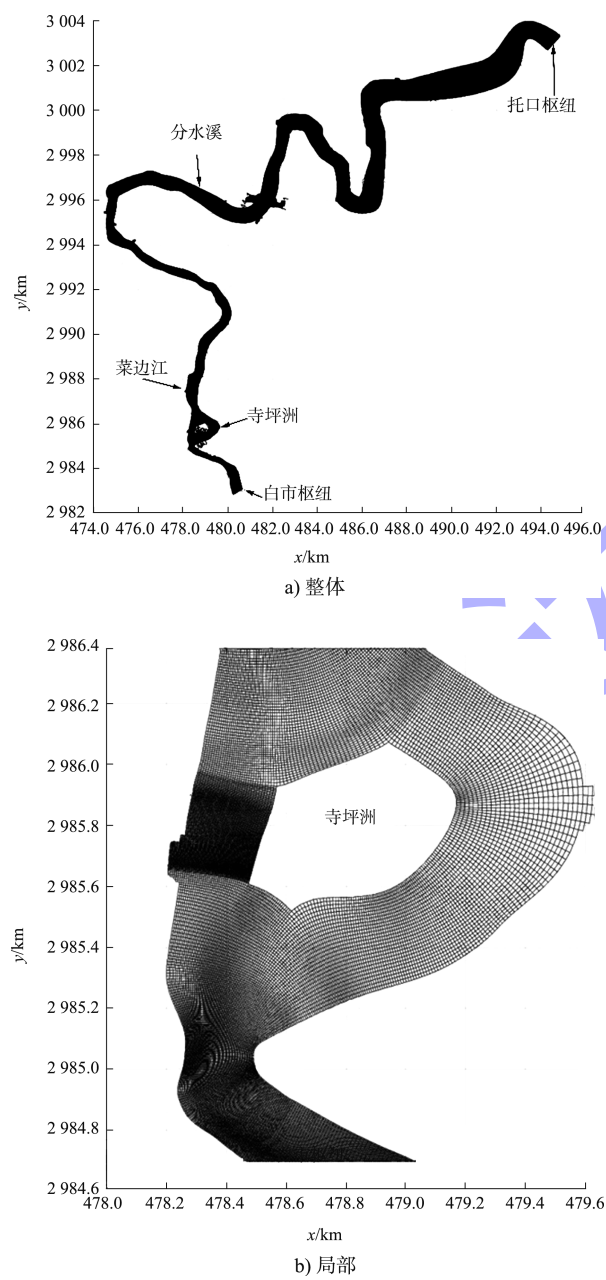


图 1 模型网格划分

采用 2017 年 4 月 7 日白市坝下至托口中水期水文测验数据对模型进行验证,各水尺及断面位置见图 2。验证时段白市水电站下泄流量 806 m³/s,

托口坝前水位 245.38 m。从表 1 沿程水尺水位实测值与计算值的对比,可知,水位误差均小于±0.10 m,满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》要求^[2]。



图 2 验证水尺断面位置

表 1 各水尺水位验证结果

水尺 编号	实测 水位/m	计算 水位/m	水位 误差/m	水尺 编号	实测 水位/m	计算 水位/m	水位 误差/m
1	248.25	248.27	0.02	15	245.46	245.48	0.02
2	247.10	247.11	0.01	16	245.44	245.47	0.02
3	246.69	246.68	-0.01	17	245.44	245.46	0.02
4	246.58	246.58	0.00	18	245.43	245.45	0.02
5	246.51	246.51	-0.01	19	245.43	245.45	0.02
6	246.35	246.36	0.01	20	245.43	245.44	0.01
7	246.20	246.15	-0.05	21	245.43	245.44	0.02
8	246.06	246.05	-0.01	22	245.42	245.43	0.01
9	245.85	245.90	0.05	23	245.42	245.42	0.00
10	245.82	245.89	0.07	24	245.42	245.42	0.00
11	245.75	245.73	-0.02	25	245.41	245.41	0.00
12	245.73	245.70	-0.02	26	245.41	245.41	0.00
13	245.69	245.68	-0.01	27	245.40	245.41	0.01
14	245.52	245.54	0.02				

3.3 边界条件

3.3.1 上边界流量

GB 50139—2014《内河通航标准》^[3] 6.1.2 条规定,当工程河段的水文条件受人类活动和自然因素影响发生明显变化时,应通过分析选取变化后有代表性的资料。6.4.1 条规定枢纽瞬时下泄流量不应小于原天然河流设计最低通航水位时的流量。白市枢纽现有通航建筑物为 50 t 垂直升船机,按 50 吨级船舶过坝设计。根据《白市电站工程可行性研究报告》^[4] 坝址处 1951—2002 年数据资料,采用综合历时曲线法计算 95% 保证率流量为 $65.2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。将此流量作为设计最低通航流量对应托口枢纽坝上 95% 保证率水位 238.00 m 组合工况推算,通过模型试验研究得出该组合工况下,整治河段最大水位降幅达 4.81 m,最大疏浚深度近 10 m,并形成长约 6.3 km 的连续水流归槽段,由于中、洪水船舶无法自航上滩等一系列碍航问题,采用开挖等传统整治方案难以将通航保证率提高到规范要求的 95%^[5]。因此选择白市枢纽与托口枢纽运行后实测资料结合分析,综合前文托口枢纽运行水位与白市枢纽下泄流量实际情况得出:

1) 枯水期托口坝前水位在 244.00 m 以上,白市水电站几乎每天存在零流量下泄时段。

2) 汛期托口坝前水位在 237.00~248.00 m 之间,白市零流量下泄且同期托口坝前水位低于 240.12 m 情况,仅 2018 年 5 月 22 日出现 1 次,持续 6 h。

3) 因枯水期托口坝前水位高于汛期,工程河段设计水位主要受汛期低水位控制。工程河段低水位存在两种极端情况:一是发生在汛期,托口坝前低水位与同频率白市下泄流量的组合;二是发生在枯水期,托口坝前高水位与白市出库流量为零的组合。

综上,上边界流量分为枯水期、汛期两个时段,枯水期考虑零流量下泄,选取 $0 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为上边界;汛期航道整治工程适当降低保证率选取 90%,流量为 $153.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为上边界,避免不必要的资源浪费。

3.3.2 下边界水位

由于托口枢纽建成时间较短,尚未进入正常运行期,下边界水位以托口枢纽设计与实测资料结合分析。《湖南沅水托口水电站可行性研究报告》^[6] 中采用 1951 年 1 月—2002 年 12 月共 52 a 旬径流资料进行长系列径流补偿调节计算,得出电站水位保证率曲线,枢纽坝前 95% 保证率水位为 238.00 m,90% 保证率水位为 242.50 m。而实测坝前日均水位资料表明,坝前 95% 保证率水位 240.12 m,明显高于设计阶段采用值。枯水期(每年 9 月—次年 3 月)水库高水位运行,实测坝前最低日均水位 244.00 m。因目前枢纽尚未进入正常运行期,为避免不必要的资源浪费,根据工程特点差异化选取设计最低通航水位边界条件,航道整治工程适当降低保证率,按 90% 保证率选取设计水位。

综上,下边界水位分为枯水期、汛期两个时段,枯水期依据实测资料,选取最低水位 244.00 m 作为下边界;汛期依据设计资料选取 90% 保证率水位 242.50 m 作为下边界。

4 计算工况

4.1 工况组合

不同时段水文数据分析结果差异较大,枯水期和汛期表现出完全不同的特性,推求设计水位的上下边界条件存在多种组合,见表 2。

表 2 计算工况组合

工况	时段	上边界流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	下边界 水位/m	备注
1	枯期 (9—次年 3 月)	0.0	244.00	零流量下泄实测 最低水位组合
2	汛期 (4—8 月)	153.5	242.50	90% 保证率组合

4.2 模型迭代试算

按照表 2 拟定工况组合,取各工况下包线作为设计最低通航水位。分别采用迭代试算的方式,通过二维水流数学模型试算沿程水面线,根据试算结果调整沿程开挖深度再次试算,直至达到满足航道内沿程水深 1.9 m 的要求,各代表断面位置见图 3。

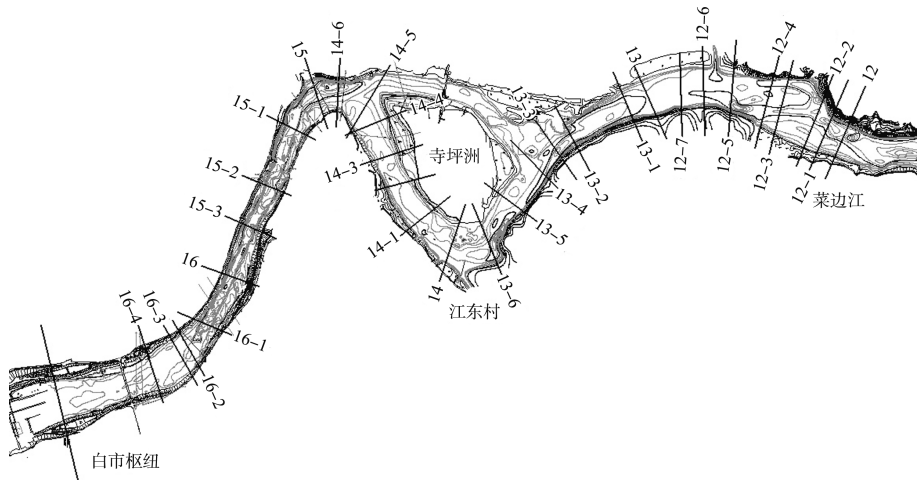


图 3 代表断面位置

4.3 计算结果

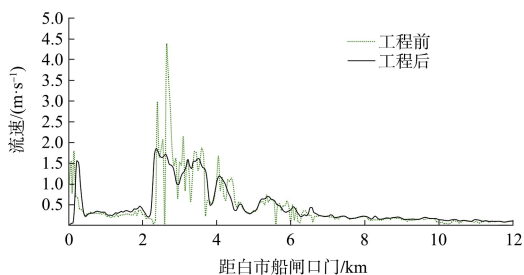
通过迭代试算得到航道内沿程水深满足 1.9 m 要求的设计最低通航水位，计算结果表明航道比降及流速总体呈沿程减小趋势，其中船闸口门区下游深槽水深可达 14.0 m 以上，比降及流速均较小。航道最大流速 1.68 m/s，发生在寺坪洲洲头（14-5 断面），相应局部比降 1.0‰；航道最大流

速较工程前降低 3.17 m/s，局部比降较工程前降低 13.1‰。菜边江处（12 断面）位于托口库区回水段，水位均为 242.50 m，主要受托口坝前水位控制；江东村附近（13-6 断面）疏浚至 244.00 m，疏浚底高程高于枯水水面线，不影响枯水河槽有效过水面积。沿程水深基本在 1.9 m 以上，其中寺坪洲洲头为航深控制河段，计算结果见表 3 及图 4。

表 3 设计最低通航水位工程前后对比

断面	设计最低通航水位/m				断面	设计最低通航水位/m			
	工况 1	工况 2	工程后	工程前		工况 1	工况 2	工程后	工程前
16-2	244.00	244.10	244.00	244.00	13-5	244.00	242.80	242.80	242.82
16-1	244.00	244.06	244.00	244.00	13-4	244.00	242.72	242.72	242.79
16	244.00	244.02	244.00	244.00	13-3	244.00	242.72	242.72	242.75
15-3	244.00	243.99	243.99	244.00	13-2	244.00	242.71	242.71	242.73
15-2	244.00	243.98	243.98	244.00	13-1	244.00	242.71	242.71	242.72
15-1	244.00	243.97	243.97	244.00	13	244.00	242.69	242.69	242.71
15	244.00	243.96	243.96	244.00	12-7	244.00	242.62	242.62	242.68
14-6	244.00	243.96	243.96	244.00	12-6	244.00	242.58	242.58	242.62
14-5	244.00	243.71	243.71	244.00	12-5	244.00	242.56	242.56	242.58
14-4	244.00	243.56	243.56	244.00	12-4	244.00	242.54	242.54	242.56
14-3	244.00	243.40	243.40	243.80	12-3	244.00	242.53	242.53	242.55
14-2	244.00	243.34	243.34	243.70	12-2	244.00	242.53	242.53	242.55
14-1	244.00	243.17	243.17	243.65	12-1	244.00	242.53	242.53	242.54
14	244.00	242.95	242.95	243.57	12	244.00	242.52	242.52	242.54
13-6	244.00	242.86	242.86	243.21					

注：“工况 1”“工况 2”为各工况实际计算值，“工程后”为工程实施后设计水位，“工程前”为现状设计水位。

图4 在 153.5 m³/s 流量下的航道沿程流速

5 结论

1)通过建立河段二维水流数学模型,进行工程前水流特性和设计方案计算,确定河段设计最低通航水位。

2)工程河段极端低水位可能出现在两种工况:一是发生在汛期,工程河段上游白市枢纽来流较大、下游托口枢纽处于低水位;二是发生在枯水期,上游白市枢纽零流量下泄、下游托口枢纽处于高水位。

3)提出航道工程按 90%通航保证率设计,分枯期和汛期两种最不利工况,沿程水位下包线作为设计最低通航水位。枯水期工况按白市零流量下泄、托口坝前水位 244.00 m 控制;汛期工况按白

市下泄流量 153.5 m³/s、托口坝前水位 242.50 m,推求沿程设计水位。

参考文献:

- [1] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 清水江白市至分水溪航道建设工程可行性研究报告[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 2017.
- [2] 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: 人民交通出版社有限公司, 2021.
- [3] 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.
- [4] 中南勘测设计研究院有限公司. 白市水电站可行性研究报告[R]. 长沙: 中南勘测设计研究院有限公司, 2005.
- [5] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 清水江白市至分水溪航道建设工程通托口库区回水变动段数学模型研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2018.
- [6] 中南勘测设计研究院有限公司. 湖南沅水托口水电站可行性研究报告[R]. 长沙: 中南勘测设计研究院有限公司, 2006.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 55 页)

- [2] KAMDE D K, PILLAI R G. Corrosion initiation mechanisms and service life estimation of concrete systems with fusion-bonded-epoxy (FBE) coated steel exposed to chlorides[J]. Construction and building materials, 2021, 277: 1-16.
- [3] 魏洁, 魏英华, 李京, 等. 带损伤环氧涂层钢筋在 Cl⁻ 和碳化耦合作用下的腐蚀行为[J]. 金属学报, 2020, 56(6): 885-897.
- [4] 汤雁冰, 徐云浦, 王迎飞, 等. 环氧涂层钢筋涂层破损情况的电化学阻抗研究[J]. 水运工程, 2015(5): 40-43, 50.
- [5] 张东方, 方翔, 范志宏, 等. 溴化锂改性导电砂浆的导电性能及其在腐蚀防护中的应用效果[J]. 腐蚀与防护,

2021, 42(5): 8-12.

- [6] 吴朝昀, 郝萧斌, 郝挺宇. 牺牲阳极的阴极保护在混凝土结构修复中应用综述[J]. 混凝土, 2022(5): 179-182.
- [7] 蔡伟成, 徐洲, 朱雅仙. 牺牲阳极在水泥砂浆中的电化学性能试验研究[J]. 混凝土, 2015(8): 123-126.
- [8] 张东方, 方翔, 范志宏, 等. 基于牺牲阳极法的 LiBr 改性砂浆性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(3): 24-26, 30.
- [9] 中交四航工程研究院有限公司, 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程结构耐久性设计标准: JTS 153—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

(本文编辑 王璁)