



枢纽实际调度运行下赣江石虎塘枢纽— 峡江枢纽间河段水文特征参数研究

陈孝建, 张楠, 杨涛, 彭芬

(江西省港航设计院有限公司, 江西 南昌 330200)

摘要: 在赣江石虎塘枢纽—峡江枢纽两坝间的长河段, 因峡江枢纽库区防护问题, 近年来枢纽坝上实际运行水位远低于设计运行水位, 导致两坝间河段水位整体降低, 进而引发诸多问题, 如两坝间大多涉水工程因设计阶段设计水位选取偏差导致运营期无法正常使用等。采用长河段一维数值模拟方法, 根据峡江枢纽实际调度运行方案, 对洪中枯期多级特征流量及峡江枢纽对应坝前实际运行水位组合下河道水面线进行计算; 对两坝间河段沿程水位、河道比降进行计算分析, 并选取各组回水曲线上、下包络线作为研究河段现阶段沿程设计参考水位。研究成果可为研究河段涉水工程设计提供水文特征参考资料。

关键词: 库区防护; 一维数值模拟; 设计水位; 河道比降

中图分类号: U612; TV551

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0131-06

Hydrological characteristic parameters from Shihutang junction to Xiajiang junction of Ganjiang River under actual operation of junction

CHEN Xiaojian, ZHANG Nan, YANG Tao, PENG Fen

(Jiangxi Port & Waterway Design Institute Co., Ltd., Nanchang 330200, China)

Abstract: In the long river section between the two dams of Shihutang junction and Xiajiang junction in Ganjiang River, due to the protection of the reservoir area of Xiajiang junction, the actual operating water level on the dam of the junction is far lower than the designed operating water level in recent years, resulting in the overall reduction of the water level in the river section between the two dams and leading to many problems, such as the failure of normal use of most wading projects between the two dams due to the deviation of the designed water level selection at the design stage. Using the one-dimensional numerical simulation method of the long river section, this paper calculates the river water surface profile under the combination of the multi-level characteristic flow in the flood and dry season and the actual operating water level in front of the dam corresponding to Xiajiang junction according to the actual operation scheme of Xiajiang junction. Then, it calculates and analyzes the water level along the river section between the two dams and the channel gradient and selects the upper and lower envelope lines of each group of backwater curves as the reference water level for the design of the river section at this stage. The research results of this project can provide hydrological characteristics reference data for the design of wading projects in the studied river section.

Keywords: reservoir area protection; one-dimensional numerical simulation; designed water level; channel gradient

收稿日期: 2023-01-29

作者简介: 陈孝建 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计和研究工作。

江西省拥有丰富的河流水资源,近年来,省内水利枢纽和高等级航道建设方兴未艾,由枢纽调度引发的两坝间河道的通航问题也备受关注。如赣江中游石虎塘枢纽至峡江枢纽两坝间河段,由于两枢纽隶属不同业主,管理模式上尚未统一,枢纽间未进行联合调度,且受峡江枢纽库区防护等问题,近年来峡江枢纽未按设计特征水位运行,一定程度上影响了两坝间河道的通航条件、港口码头作业及航运设施的正常使用等。因此,针对石虎塘枢纽及峡江枢纽实际调度运行方式,开展两坝间水文特征参数及通航水流条件研究,对两坝间涉水工程的设计及正常运营、推进江西省水运高质量发展具有重要意义。

近年来,相关学者针对两坝间河道通航水流条件进行过大量的研究工作,研究方法主要有物理模型试验和数值模拟。数值模拟根据计算需求的不同,采用一维、二维和三维模型。张绪进等^[1]采用水工物理模型试验方法,对向家坝电站在典型调度运行方式下坝下游长河段的水流条件进行了试验分析。杨忠勇等^[2]建立了三峡—葛洲坝两坝间河段的一维河道水动力学解析模型,求解上下游边界流量共同驱动下的河道水动力特征。朱军政等^[3]采用二维水动力数学模型,对浦阳江航道在受上游径流洪峰流量和下游潮水顶托影响下设计最高通航水位进行计算分析。黄明海等^[4]建立了三峡—葛洲坝两坝间通航水流三维数学模型,分析三峡电站不同开启时间和不同开启流量下坝下典型河段水面比降、表面流速产生的影响及变化规律。本文意在探讨由于峡江枢纽未按设计特征水位运行导致两坝间河段水位整体降低而带来的一系列通航问题,采用一维数学模型方法能够更加高效地研究河段沿程水位、河道比降等,研究方法及思路旨在为类似项目提供参考。

1 工程概况

1.1 枢纽概况

1.1.1 枢纽设计基本参数

赣江石虎塘航电枢纽和峡江水利枢纽均位于

赣江中游,是赣江赣州—湖口河段 8 个规划梯级中的第 3、4 梯级。石虎塘枢纽与峡江枢纽主要工程设计水位与水文特征见表 1。

表 1 石虎塘枢纽与峡江枢纽主要工程设计水位与水文特征

枢纽	项目	水位/m		相应流量
		坝上	坝下	
石虎塘	最高通航水位	57.72	57.58	14 800 m ³ /s,10 a 一遇流量
		52.04	—	4 700 m ³ /s,拉闸流量
	最低通航水位	—	45.66	205 m ³ /s,保证率 P = 95%流量
	正常蓄水位	56.5	—	—
	死水位	56.2	—	—
	多年平均流量	1 160 m ³ /s		
峡江	最高通航水位	46.0	44.1	19 700 m ³ /s,20 a 一遇流量
		42.7	—	敞泄洪水时 5 a 一遇设计洪峰流量
	低通航水位	—	30.3	221 m ³ /s,保证率 P = 98%流量
	正常蓄水位	46.0	—	—
	死水位	44.0	—	—
	多年平均流量	1 640 m ³ /s		

1.1.2 峡江枢纽设计运行调度方式

根据《江西省峡江水利枢纽工程初步设计报告》^[5],峡江水利枢纽调度运行方案为:

1) 当坝址流量小于等于防洪与兴利运行分界流量 5 000 m³/s(吉安站流量为 4 730 m³/s)时,峡江水利枢纽坝前水位控制在正常蓄水位(46.0 m)至死水位(44.0 m)之间运行,进行径流调节。

2) 当峡江坝址来流量在 5 000~20 000 m³/s 时,峡江枢纽采取降低坝前水位运行并对坝前水位以动态控制方式调度,峡江水库不同来水流量与相应动态控制坝前水位范围关系见表 2。

表 2 峡江水库不同来水流量与相应动态控制坝前水位范围关系

峡江坝址流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	吉安站流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	动态控制坝前 水位/m
5 000~9 000	4 730~8 590	46.0~45.2
9 000~12 000	8 590~11 480	45.2~44.4
12 000~14 500	11 480~13 890	44.4~43.8
14 500~20 000	13 890~19 190	敞泄洪水

1.2 已有航道整治工程概况

赣江石虎塘航电枢纽—峡江水利枢纽两坝间河段全长 95 km, 其间有孤江、禾水和恩江汇入。该航段为江西省重要航段、国家高等级航道, 流经城市吉安市为长江中游城市群重要成员, 航运对吉安及周边城市建设、经济发展等具有不可估量的作用。河段整体呈南北走向, 河势弯曲, 河床地形由江心洲、边滩、深槽和浅滩组成, 河床质为沙夹卵砾石或卵砾石河床, 全河段岸线多为沙壤土组成, 河段整体断面形态多为 U 形。

工程河段历史上进行过多次航道整治工程, 先后实施了赣江(吉安—樟树)Ⅵ级、Ⅴ级航道整治工程。2013 年, 峡江枢纽下闸蓄水, 库区河段已基本达到Ⅲ级航道通航标准, 但由于峡江枢纽未按规划设计水位运行, 造成石虎塘坝下游形成长约 13 km 的非衔接段。2017 年 6 月, 赣江石虎塘—神岗山河段 27.5 kmⅢ级航道整治工程开工建设, 航道设计尺度为 2.2 m×60 m×480 m(航深×航宽×弯曲半径), 对应石虎塘枢纽下泄流量 205 m³/s、峡江枢纽按发电消落水位 45.4 m 运行。该工程于 2019 年 12 月通过交工验收, 整治工程实施后, 工程河段通航水流条件明显改善, 沿程滩段出现的局部陡比降显著减缓, 航道大流速区、横流得以缓解。之后, 因受无序采砂及峡江水利枢纽库区

防护等影响, 河段枯水位降落仍然较为显著, 出现不同程度航深、船闸门槛水深不足的情况, 降低了现阶段Ⅲ级航道的通航保证率。

1.3 存在问题

受峡江水利枢纽库区防护问题, 近年来峡江枢纽未按设计阶段的调度运行方案运行。本文收集了 2016 年 1 月—2021 年 5 月石虎塘枢纽下泄流量与峡江枢纽坝上实际运行水位, 绘制石虎塘枢纽下泄流量与峡江枢纽实际运行水位过程线见图 1。由图可知, 近年来峡江枢纽枯水期坝上运行水位多维持在 43.5~44.5 m, 远低于枢纽设计正常蓄水位 46 m, 汛前枢纽腾库容时期坝前水位更是降低至 42.5~43.1 m, 较枢纽设计死水位 44 m 降低 0.9~1.8 m。上述情况导致两坝间大多涉水工程在设计阶段选用的设计水位与实际不符, 进而严重影响了工程建成运营后在低水位下的正常使用。如两坝间大多码头在低水位时存在船舶无法靠泊的情况; 赣江石虎塘—神岗山河段Ⅲ级航道整治在设计阶段采用的是峡江发电消落水位 45.4 m, 远高于峡江枢纽枯水期坝上运行水位, 致使工程交工验收后河道内仍存在航深不足的情况, 整治效果不佳。因此, 亟需重新对两坝间水文特征参数进行分析, 为现阶段峡江枢纽未按正常设计调度方案运行下两坝间的涉水工程提供水文特征参考资料。

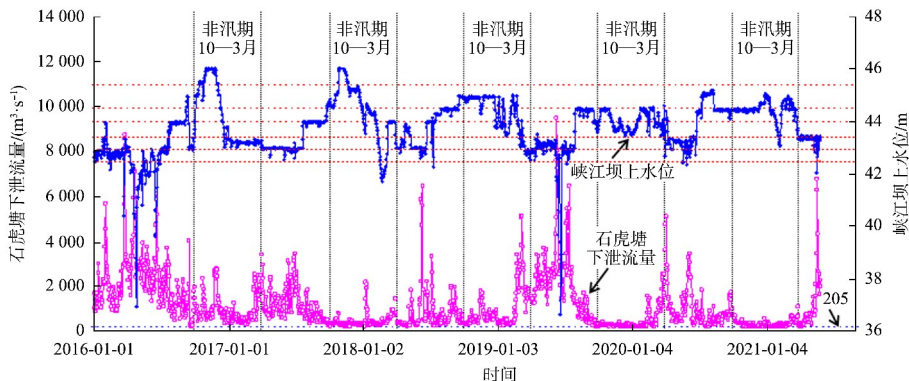


图 1 石虎塘枢纽下泄流量与峡江枢纽运行水位过程线

2 数学模型建立及验证

2.1 一维水流数学模型的建立

根据 2021 年 8 月实测的工程河段水下地形资料,建立工程河段长约 95 km 的一维水流数学模型。根据工程河段河势条件及河道特性,

模型计算区域共布置 87 个主断面,断面平均间距 1.1 km,最小间距 359 m。此外,在河段间有丁坝或桥墩等阻水建筑物时,则在建筑物处插入 1 个子断面。模型计算范围及计算断面位置见图 2。

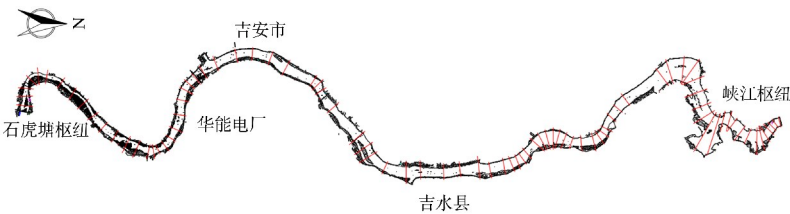


图 2 模型计算范围及计算断面位置

2.2 数学模型验证

数学模型水位验证分别采用 2021 年 5 月、2020 年 9 月和 2021 年 1 月洪、中、枯 3 级流量条件下的水文观测资料进行验证。观测期间,河道内来流量和水位较稳定,因此模型采用恒定流验

证。水位观测点位置及验证成果如表 3 所示,从表中可以看出,各测站的水位计算值与实测值误差范围在±0.03 m 以内,符合模拟要求,表明模型糙率选取合理,模型基本能够反映河道水面线特征。

表 3 水位验证结果

水尺 编号	坝下 里程/km	水位/m								
		$Q=263\text{ m}^3/\text{s}$			$Q=882\text{ m}^3/\text{s}$			$Q=6\,771\text{ m}^3/\text{s}$		
		实测值	计算值	差值	实测值	计算值	差值	实测值	计算值	差值
1 [#]	2.08	44.68	44.69	0.01	46.58	46.61	0.03	48.45	49.46	0.01
2 [#]	11.91	44.31	44.29	-0.02	46.34	46.34	0.00	46.21	47.19	0.02
3 [#]	23.41	44.21	44.24	0.03	45.86	45.85	-0.01	45.92	46.92	0.00
4 [#]	39.92	44.19	44.21	0.02	45.58	45.56	-0.02	45.69	45.71	0.02
5 [#]	54.38	44.15	44.18	0.03	45.44	44.47	0.03	45.37	45.40	0.03
6 [#]	63.58	44.09	44.07	-0.02	45.32	45.34	0.02	45.01	44.98	-0.03
7 [#]	82.91	43.93	43.92	-0.01	45.08	45.09	0.01	44.50	44.48	-0.02

3 两坝间特征水位参数

3.1 计算条件选取

本文意在分析峡江枢纽在未按设计运行水位调度下两坝间长河段的特征水位、河道比降等参数,根据《港口与航道水文规范》^[6]中有关分析枢纽上游设计通航水位的规范条款,本次数模计算选取 6 个特征流量级,其中模型下边界(峡江坝上水位)根据近年来石虎塘枢纽下泄流量情况对应峡江枢纽实际坝上运行水位确定,见图 1。最大通航流量 14 800 m³/s 时,峡江枢纽敞泄,数模下边界由峡江水文站水位流量关系得到。数模计算工况见表 4。

表 4 数模计算工况

工况	流量特征	石虎塘枢纽 下泄流量 $Q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	模型出 口水位 H/m	备注
1	设计流量	205	44.4	峡江枢纽常年蓄水位
2	整治流量	940	43.0/44.4	-
3	6 台机组流量	2 362	43.0	峡江枢纽近年常见低水位
4	电站停机流量	4 700	42.5/43.0	-
5	泄水闸敞泄 流量	8 000	42.5	峡江枢纽近年常见低水位
6	最高通航流量	14 800	41.0	20 a 一遇洪水流量,敞泄

3.2 计算结果分析

3.2.1 沿程水面线及比降

经计算, 各工况下石虎塘枢纽至峡江枢纽间

河段沿程水面线和比降变化如图 3 所示, 各工况下工程河段平均水面比降如表 5 所示。

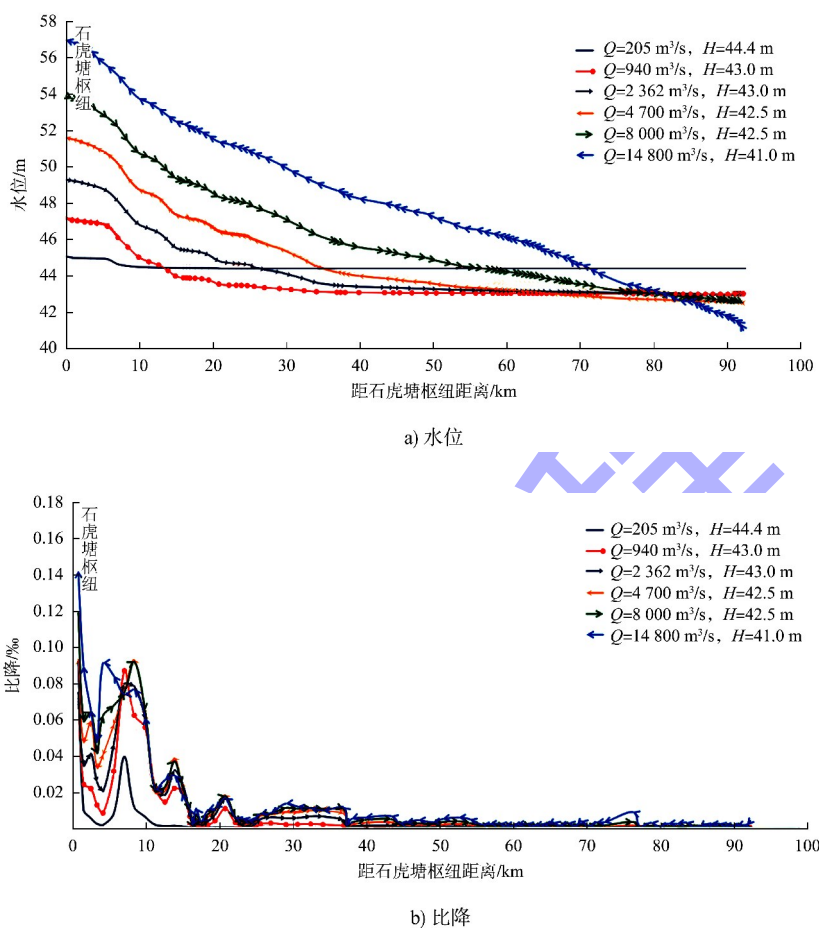


图 3 各级流量下沿程水位和比降变化

表 5 各工况下工程河段平均水面比降

工况	平均水面比降/‰	备注
1	0.01	$Q=205 \text{ m}^3/\text{s}$, $H=44.4 \text{ m}$
2	0.04	$Q=940 \text{ m}^3/\text{s}$, $H=43.0 \text{ m}$
	0.03	$Q=940 \text{ m}^3/\text{s}$, $H=44.4 \text{ m}$
3	0.07	$Q=2362 \text{ m}^3/\text{s}$, $H=43.0 \text{ m}$
4	0.10	$Q=4700 \text{ m}^3/\text{s}$, $H=42.5 \text{ m}$
	0.09	$Q=4700 \text{ m}^3/\text{s}$, $H=43.0 \text{ m}$
5	0.12	$Q=8000 \text{ m}^3/\text{s}$, $H=41.0 \text{ m}$
6	0.17	$Q=14800 \text{ m}^3/\text{s}$, $H=42.5 \text{ m}$

由图 3 可知, 石虎塘枢纽下泄流量 205 ~ 14 800 m^3/s 条件下, 两坝间水位变化范围在 41.00~56.97 m; 各工况条件下, 工程河段平均水面比降在 0.01‰~0.17‰。随着石虎塘枢纽下泄流量的增大, 水面平均比降逐渐增大; 下泄流量相同时, 峡江枢纽运行水位越低, 水面平均比降

越大; 峡江枢纽运行水位相同时, 随着下泄流量的增大, 水面平均比降逐渐增大。

不同工况下, 河段沿程比降较大的区域集中分布在石虎塘枢纽坝下游 10 km 河段范围内, 该河段有 2 处比较明显的大比降卡口区, 一是在坝下游河段, 在设计流量 (205 m^3/s) 下, 水位落差 0.42 m, 比降 0.079‰, 且随着石虎塘枢纽下泄流量的增大, 该处比降逐渐增大, 各工况下坝下游河段最大比降出现在最高通航流量 (14 800 m^3/s), 达 0.17‰, 其次为泄洪敞泄流量, 达 0.12‰; 二是在坝下游 6~8 km 河道范围内, 往往出现第 2 个比降高峰, 各工况下水位落差在 0.31~0.88 m, 比降在 0.04‰~0.09‰。此外, 工程河段各滩段平均比降一般不超过 0.1‰。

3.2.2 现阶段河段沿程水位分析

峡江枢纽建库以来坝上运行水位资料显示, 2018—2021 年间, 因峡江枢纽库区防护问题, 枢纽枯水期坝上运行水位远低于设计运行水位。经统计, 出现运行水位高于发电消落水位 45.4 m 以上运行天数为 0 d。这一现象使得两坝间大多涉水工程在设计阶段因设计水位选取偏差, 致使工程建成运营后在枯水期使用困难。

本文根据石虎塘枢纽下泄流量及相关水文分析资料, 选取了多级特征流量, 并根据峡江枢纽实际调度运行方案, 计算峡江枢纽坝前不同运行水位组合下两坝间河段回水曲线(图 3)。提取各组计算回水曲线成果的上、下包络线, 分别作为研究河段现阶段未按设计调度方案运行下的沿程最高、最低水位, 如图 4 所示。

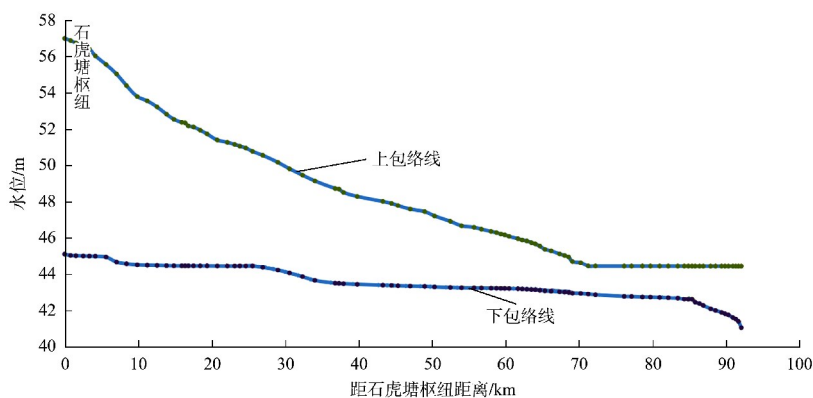


图 4 设计通航水位上、下包络线

4 结论

1) 本项目研究河段为赣江石虎塘枢纽至峡江枢纽间河段, 近年来, 受峡江水利枢纽库区防护问题, 峡江枢纽枯水期坝上运行水位多维持在 43.5~44.5 m, 远低于枢纽设计正常蓄水位 46 m, 坝前最低运行水位降低至 42.5~43.1 m, 较枢纽设计死水位 44 m 降低 0.9~1.8 m。带来诸如两坝间大多涉水工程因设计阶段设计水位选取偏差, 运营期无法正常使用等一系列通航问题。

2) 项目采用一维数值模拟方法, 根据石虎塘下泄流量资料及相关水文分析资料, 结合峡江枢纽实际调度运行方案, 对洪中枯期共 6 级特征流量及峡江枢纽对应坝前实际运行水位组合下河道水面线进行了计算, 对沿程水位及比降变化特征进行分析。经计算, 各流量级下, 两坝间河道水位变化范围在 41.00~56.97 m, 平均水面比降在 0.01‰~0.17‰, 最大局部河段水位落差在 0.88 m。

3) 根据《港口与航道水文规范》中相关规定, 选取各组回水曲线上、下包络线分别作为现阶段

研究河段沿程最高、最低水位, 经计算, 两坝间现阶段河道沿程最高设计水位在 44.40~56.97 m, 最低设计水位在 41.00~45.06 m。

参考文献:

- [1] 张绪进, 胡真真, 刘亚辉, 等. 向家坝水电站日调节非恒定流的传播特征研究[J]. 水道港口, 2015, 36(5): 414-418.
- [2] 杨忠勇, 钱门亮, 纪道斌, 等. 三峡和葛洲坝两坝间河道本征波特征分析[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2021, 36(1): 121-130.
- [3] 朱军政, 刘冰. 浦阳江航道设计最高通航水位计算分析[J]. 水运工程, 2022(6): 145-149.
- [4] 黄明海, 李飞, 史德亮, 等. 三峡电站流量变率对两坝间通航水流影响的三维计算分析[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(7): 48-52.
- [5] 江西省水利规划设计院. 江西省峡江水利枢纽工程初步设计报告[R]. 江西: 江西省水利规划设计院. 2010.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.

(本文编辑 王传瑜)