

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230156

连续弯道间航运枢纽泄流能力模型试验研究

纪穗颖^{1a,1b}, 肖 钦², 王建中³, 范红霞³, 陶爱峰^{1a,1b}

(1. 河海大学 a. 海岸灾害及防护教育部重点实验室; b. 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;
2. 江西省港口集团有限公司, 江西 南昌 330006; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 拟建龙尾洲枢纽是一座以航运为主, 兼顾防洪、水资源和水生态环境保护的低水头航运枢纽工程。坝址上下游各有 2 个连续弯道, 坝址所在顺直段也较短, 河道边界条件不利于工程后顺畅泄洪。为优化并论证拟建该枢纽总体布置方案的可行性, 采用比尺为 1:80 的整体水工物理模型, 在水动力验证相似的基础上, 对枢纽泄流能力进行试验研究, 揭示了典型洪水条件下原设计方案的泄水闸过流分布和流量分配特征, 阐明了原方案的不足及相应优化思路, 提出了切除边滩的改善措施。通过优化方案试验, 验证了泄流能力可以满足设计要求。研究结果可为本项目设计及类似工程提供参考。

关键词: 连续弯道; 航运枢纽; 泄流能力; 物理模型

中图分类号: TV652; TV135.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0095-04

1 概况

袁河为赣江主要支流之一, 河流大致自西向东流经萍乡市的芦溪县、宜春市的袁州区、新余市的分宜县、渝水区, 于樟树市的张家山镇荷湖馆汇入赣江。袁河流域河道蜿蜒曲折, 支流众多。芦溪以上山口岩段河道穿行于崇山峻岭间, 河面狭窄, 中下游河道逐渐开阔, 河宽为 100~300 m。新余以下平原宽广, 河面开阔, 洪水容易漫滩, 中高水位可以通航。袁河属雨洪式河流, 洪水由暴雨形成, 基本遵循山区河流暴涨暴落的特性, 洪水一般发生在 3 月下旬~7 月上旬, 年最大洪水多出现在 5~6 月。根据上游江口水库 1950~2017 年共 68 年实测入库洪水资料, 江口水库历年最大洪峰流量 4 370 m³/s, 发生在 1995 年 6 月 27 日。拟建龙尾洲航运枢纽工程在新余市新溪乡龙尾洲村附近, 近坝河段边界条件十分复杂, 不利于工程布置和工程后河道顺畅泄洪。拟建工程河段长 5 km, 河宽 260~960 m, 自上而下由新余大桥桥区弯道、兰溪洲洲尾弯道、龙尾洲顺直段、龙尾洲洲尾弯道、下洲弯道等 4 个弯道段和 1 个顺直段组成, 拟建坝址顺直段长度仅有 1.1 km, 其间自上而下分别有依附右岸的邹家洲、龙尾洲、任家洲,

依附左岸的兰溪洲、新江洲, 另有兰溪咀、楼下咀和任家咀等 3 个挑流凸咀, 拟建工程河段河势图见图 1。拟建龙尾洲航运枢纽包含船闸、泄水闸、

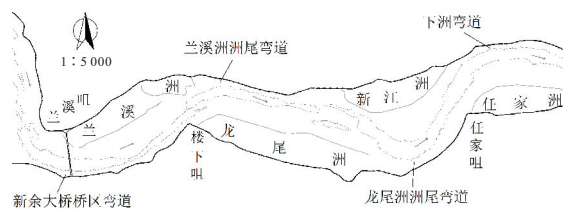


图 1 拟建工程河段河势图

Fig. 1 River regime of proposed project

鱼道、连接坝段等建筑物。坝轴线总长约 430 m, 从左到右依次布置连接坝段(鱼道穿越连接坝段)、泄水闸、连接坝段、船闸、连接坝段。初步方案具体布置见图 2。枢纽泄水建筑物由 10 孔闸组成, 由左岸到右岸依次为 #1~#10 孔。闸顶高程 39.50 m。结合泄流能力、河床高程及地质等

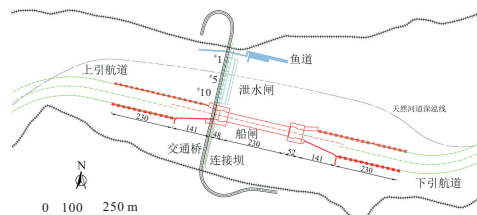


图 2 龙尾洲枢纽初步方案平面布置示意图

Fig. 2 Layout sketch of the design scheme

收稿日期: 2023-02-08, 修回日期: 2023-03-10

作者简介: 纪穗颖(1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向为河口海岸及近海工程水动力环境, E-mail: jhy@hhu.edu.cn

通讯作者: 范红霞(1981-), 女, 正高级工程师, 研究方向为河流动力学与工程泥沙, E-mail: hxfan@nhri.cn

情况,对泄水闸堰型采用宽顶堰型式。泄水闸总宽度 169.5 m,每孔宽 17.0 m(闸孔净宽 14.0 m),闸室顺河长度 24.15 m。本工程具有汛期洪水流量大、上下游水位差小的特点,泄水闸选用底流消能形式。现有研究^[1-2]表明,大部分水利枢纽坝址河段为宽浅型河道,顺直段较长,而有关连续弯道这种复杂边界条件的工程案例和泄流能力研究较少,且大多数针对枢纽泄流能力的研究只考虑了上下游水位差,过闸流量分配特征及流场分析不够详尽。对此,本文依托袁河航道提升工程中的龙尾洲航运枢纽,针对工程坝址上下游各有两个连续弯道、坝址所在龙尾洲顺直段也较短的复杂边界,采用比尺为 1:80 的整体水工物理模型,在水动力验证相似的基础上,对枢纽泄流能力进行试验研究,揭示了典型洪水条件下原设计方案的泄水闸过流断面流速分布、闸孔流量分配、壅水等水力特征,阐明了原方案的不足,通过优化方案试验,提出了满足校核洪水泄流能力的改善措施,研究成果可支撑该项目设计,并可供类似工程参考。

2 物理模型设计与验证

2.1 模型设计

根据研究目标与试验内容,选择物理模型几何比尺 1:80,模拟范围上起枢纽轴线以上 2.6 km、下至枢纽轴线以下 2.4 km,模拟天然河道长度 5.0 km,包含上下游四个弯道。水工模型不仅需要满足几何条件相似,还必须满足水流运动动力相似。根据水流运动方程,模型满足的相似条件为重力相似和阻力相似,模型比尺汇总见表 1。

表 1 龙尾洲枢纽整体物理模型比尺汇总

Tab. 1 Scale summary of integral physical model

比尺名称	符号	数值	比尺名称	符号	数值
平面比尺	λ_L	80	流量比尺	λ_Q	57 216
垂直比尺	λ_H	80	糙率比尺	λ_n	1:2.08
水流流速比尺	λ_v	8.94			

2.2 水动力验证

采用洪中枯三级流量 3 330、1 490、298 m³/s 现场水文测验资料进行水面线验证,并对坝址及坝址上、下游 1.2 km 的 3 个断面进行流速分布验证。经调试,模型水面线和天然水面线误差在 ±0.04 m 以内,模型断面流速分布形态及主流位置与天然情况一致,相差值基本在 ±0.10 m/s 以内,满足规范^[3]要求,可以复演龙尾洲枢纽所在河段河道水流运动并开展工程方案试验。

3 初步布置方案枢纽泄流能力试验

3.1 试验目的与条件

洪水期 10 孔泄水闸全开泄洪,根据规范^[3],设计时要求满足百年一遇洪水调节时坝上、下水位差不大于 0.20 m 的泄流能力。为此,对比试验袁河发生 2 年一遇、枯水围堰 10 年一遇、10、20、50、100、300 年一遇等不同频率洪水条件时,初步布置方案及上下游航道开挖工况下泄水闸全开时的泄流能力。

3.2 试验结果与分析

3.2.1 洪水过闸水位差特征

试验坝上、下水位差值见表 2。20、50 年一遇洪水条件下坝上、下游水位差分别为 0.17、0.21 m,泄水闸的初步方案设计规模仅能够满足 20 年一遇以下各级频率洪水泄洪要求,但 50、100、300 年一遇来流条件无法满足。

表 2 初步方案泄水闸坝上、下游水位差统计表

Tab. 2 Statistical table of water level difference between upstream and downstream of dam

序号	流量特征 / (m ³ · s ⁻¹)	坝上水位/m	坝下水位/m	水位差值/m	泄流能力
1	1 590(2 年一遇)	31.89	31.80	0.09	满足要求
2	2 030(枯水 10 年一遇)	33.00	32.89	0.11	满足要求
3	2 760(10 年一遇)	34.20	34.07	0.13	满足要求
4	3 410(20 年一遇)	35.26	35.09	0.17	满足要求
5	3 810(50 年一遇)	35.87	35.66	0.21	不满足
6	4 270(100 年一遇)	36.51	36.26	0.25	不满足
7	4 960(300 年一遇)	37.40	37.11	0.29	不满足

3.2.2 流速分布与过闸流量分配特征

初步方案坝轴线断面 10 孔泄水闸中心垂线平均流速分布见图 3,平面流场变化(50 年一遇流量 3 810 m³/s)见图 4,过闸流量分配柱状图见图 5。试验结果表明:①工程后洪水水流行近泄水闸上游 50 m 时,主流动力轴线位于与下游[#]4~[#]5

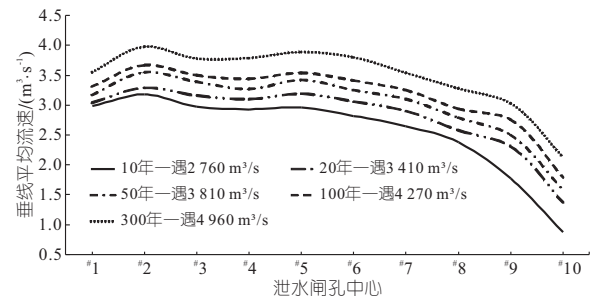


图 3 初步方案坝轴线断面 10 孔泄水闸中心垂线平均流速分布图

Fig. 3 Average vertical flow velocity distribution of 10-hole discharge sluice center on dam axis section of the design scheme

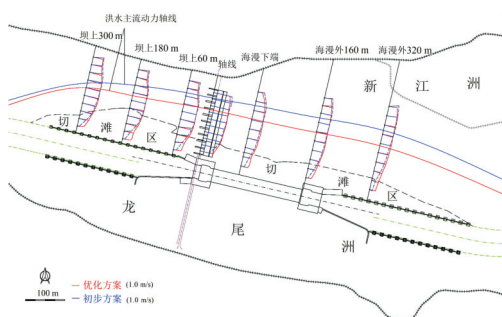


图 4 初步方案及优化方案坝轴线附近平面流场变化图($Q=3\ 810\ \text{m}^3/\text{s}$)

Fig. 4 Flow field in design scheme and optimized scheme($Q=3\ 810\ \text{m}^3/\text{s}$)

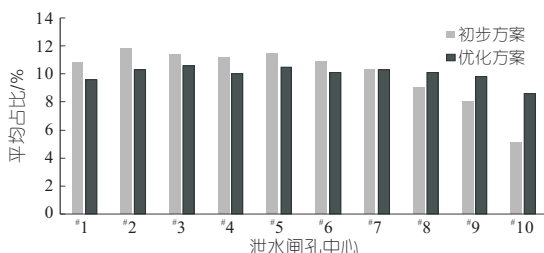


图 5 初步方案及优化方案坝轴线断面 10 孔泄水闸过闸流量分配占比柱状图

Fig. 5 Cylindrical diagram of flow distribution ratio in design scheme and optimized scheme

孔对齐的位置,居泄洪断面中偏左,各级洪水频率条件下最大表面流速分别为 2.85、2.94、3.07、3.16、3.32 m/s,流向为右偏 $1^\circ\sim 5^\circ$,与工程前来流方向右偏 $1^\circ\sim 3^\circ$ 相比,主流流向略向右偏但入流角尚在基本合理范围内。②坝上游有两个连续弯道(新余大桥桥区弯道、兰溪洲洲尾弯道),其对上游流场的影响主要在于促使主流靠凹岸下行,沿程动力轴线弯曲,断面上流速分布不均;坝下游有两个连续弯道(龙尾洲洲尾弯道、下洲弯道),其对下游流场的影响主要体现在凸岸新江洲大边滩挤压水流,使得下泄水流趋直困难,直接顶冲任家咀,加大了防洪压力。③经水闸、船闸及河床边界约束后,工程附近流场结构发生了变化,闸位断面流速分布作出了相应调整。因闸墩束窄了过流断面,闸孔间水流集中,流速显著增大。枯水围堰 10 年一遇、10、20、50、100、300 年一遇等不同频率洪水条件下,过闸最大流速均位于 #2 孔,最大垂线平均流速依次为 3.18、3.29、3.55、3.67、3.98 m/s;过闸最小流速均位于 #10 孔,最大垂线平均流速依次为 0.87、1.37、1.58、1.79、2.13 m/s。说明过闸断面上流速分布不均匀,主流偏左过闸,呈现左强右弱的特征。④#1~#10 闸孔不同频率洪水条件下过闸流量的平均占比依次为 10.8%、11.8%、11.4%、11.2%、11.5%、10.9%、

10.3%、9.0%、8.0%、5.1%。右侧 #2~#5 闸孔过闸流量相对较大,#2 最大;左侧 #8~#10 孔过闸流量相对较小,#10 最小。左侧 5 孔过流量占比为 56.7%,右侧 5 孔过流量占比为 43.3%,这与上游来流主流位置及右侧闸孔上下游边滩地形较高有关。

综上所述,龙尾洲枢纽初步方案过闸主流呈现左强右弱的特征,泄水闸的初步方案设计规模仅能够满足 20 年一遇各级频率洪水泄洪要求,泄流能力有待优化提升。

4 优化方案枢纽泄流能力试验

4.1 优化思路及工程措施

原方案试验结果表明,主流动力轴线偏左的原因之一是上游楼下咀突咀和船闸闸墙挑流,另一个原因是泄水闸 #8~#10 孔上下游船闸隔流墙外侧留存的龙尾洲边滩较大(高 5 m,宽 50~90 m,长 1 080 m),缩窄了河道,增加了河道阻力,挤压水流左偏,不利于行洪。因此,在楼下咀突咀无法切除(临近大堤)的情况下,从疏通行洪通道、扩大行洪断面、减小行洪阻力、调整断面流速均匀分布的角度出发,采取切滩优化措施,达到改善过闸流量分配占比、提升泄流能力的目的。

将初步方案中泄水闸 #8~#10 孔上下游船闸隔流墙外侧留存的龙尾洲边滩切除,切滩量约 $15\times 10^4\ \text{m}^3$,上下游行洪断面面积扩大大约 12%。具体切滩部位参见图 4。

4.2 优化效果

4.2.1 洪水过闸水位差特征

实施优化措施后,2 年一遇流量 $1\ 590\ \text{m}^3/\text{s}\sim 100$ 年一遇流量 $4\ 270\ \text{m}^3/\text{s}$ 条件下,枢纽上下游水位差为 0.06~0.20 m,仅 300 年一遇流量 $4\ 960\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,枢纽上下游水位差为 0.25 m。可见优化后枢纽上下游水位差减小,泄水闸的优化方案设计规模已能满足 100 年一遇以下各级频率洪水泄洪的工程设计要求,优化效果明显。

4.2.2 流速分布和过闸流量分配特征

优化方案坝轴线断面 10 孔泄水闸中心垂线平均流速分布见图 6,优化前后平面流场变化图(50 年一遇流量 $3\ 810\ \text{m}^3/\text{s}$)见图 4,过闸流量分配柱状图见图 5。结果表明:①闸墙外切滩后,坝上下游流场发生了较明显变化,主要体现在上下游近坝段主流动力轴线位置右移,主流线趋于顺直;优化前切滩区为缓流区,切滩后流速明显增大,泄洪通道趋向顺畅。②优化方案切滩后,过闸

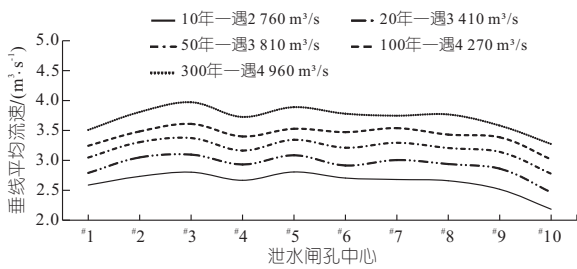


图 6 优化方案坝轴线断面 10 孔泄水闸中心垂线平均流速分布图

Fig. 6 Average vertical flow velocity distribution of 10-hole discharge sluice center on dam axis section of optimized scheme

水流场结构随之变化,主流位置和闸位断面流速分布也作出相应调整。不同频率洪水条件下,过闸主流均位于#3孔,最大垂线平均流速依次为 2.80、3.10、3.37、3.61、3.97 m/s;过闸最小流速仍位于右侧边#10孔,最小垂线平均流速依次为 2.18、2.47、2.78、3.02、3.27 m/s,而左侧边孔#1孔垂线平均流速依次为 2.59、2.79、3.05、3.24、3.51 m/s。说明优化后主流向中部移动,过闸断面上流速分布趋势向相对均匀作调整。③优化后#1~#10闸孔不同频率洪水条件下过闸流量的平均占比依次为 9.6%、10.3%、10.6%、10.0%、10.5%、10.1%、10.3%、10.1%、9.8%、8.6%。过闸流量最大孔位已由初步方案的右侧#2调整至#3孔;左侧5孔过闸流量占比为 51%,右侧5孔过闸流量占比为 49%,优化后两侧过闸行洪流量分配较为接近。

综上所述,龙尾洲枢纽优化方案过闸断面流速分布及过闸流量分配向相对均匀调整,泄水闸

优化方案设计规模已能够满足 100 年一遇各级频率洪水泄洪的设计要求,泄流能力得到有效提升,优化效果明显。

5 结论

a. 初步方案断面上流速分布不均匀、泄流能力差的主要原因为坝上下游有 4 个连续弯道和 3 个凸咀,使得主流靠凹岸下行,沿程动力轴线弯曲,下泄水流难以趋直,加大了防洪压力;泄水闸右侧上下游闸墙外留存的边滩较高,缩窄了河道,增加了河道阻力,挤压水流左偏,导致行洪通道不畅。

b. 采取切除边滩的优化工程措施后,主流位置向中部移动,过水断面面积增大,过闸断面上流速分布相对均匀,两侧行洪过闸流量分配较为接近,泄流能力得到有效提升,优化效果明显,说明优化思路准确,在无法采取其他措施的情况下,通过切滩改善泄流能力可行。试验结果可为该项目的方案布置提供支撑,并可供类似工程参考。

参考文献:

[1] 黄智敏,付波,陆汉柱,等. 高陂水电站上游进水渠水力特性试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(3):135-138,142.
 [2] 沈立群,陈雷. 碾盘山水电枢纽通航条件优化模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(7):61-66.
 [3] 中华人民共和国交通运输部. 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, 2021.

Model Test Study on Discharge Capacity of Hydro-junction Between Continuous Bends

JI Hui-ying^{1a,1b}, XIAO Qin², WANG Jian-zhong³, FAN Hong-xia³, TAO Ai-feng^{1a,1b}

(1a. Key Laboratory of Coastal Disaster and Protection, Ministry of Education; 1b. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangxi Port Group Co., Ltd., Nanchang 330006, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The proposed Longweizhou junction is a low-head hydro-junction project that focuses on navigation, flood control, water resources, and protection of the aquatic ecological environment. There are two continuous bends upstream and downstream of the dam site, and the straight section where the dam site is located is also short, so the river boundary conditions are not conducive to smooth flood discharge after the project. To demonstrate and optimize the general layout of the proposed hydro-junction, an integrated hydraulic-physical model with a scale of 1 : 80 was adopted. On the basis of hydrodynamic similarity verification, a detailed experimental study was conducted on the discharge capacity of the hydro-junction, revealing the characteristics of flow velocity distribution and flow distribution in the original design scheme under typical flood conditions, clarifying the shortcomings of the original scheme and corresponding optimization ideas, putting forward the measure of cutting the side beach to improve discharge capacity. The optimized scheme test verified that the discharge capacity could meet the design requirements. The research results may serve as reference for the design of this project and other similar projects.

Key words: continuous bends; hydro-junction; discharge capacity; physical model