

· 航道及通航建筑物 ·



左江山秀船闸扩能工程和 下游梯级门槛水深匹配性分析*

黄国勋¹, 高成岩², 王效远²

(1. 广西壮族自治区交通运输厅 广西 南宁 530012; 2. 中交水运规划设计院有限公司 北京 100007)

摘要: 为系统优化左江山秀船闸扩能工程与下游梯级枢纽的门槛水深匹配性, 提出基于连续梯级水位分析的门槛水深设计方法。通过分析西江干线多年水文实测数据, 构建了包含水位历时、门槛水深响应关系的多维度分析模型。研究表明: 1) 老口库区航道水深提升具有显著非线性特征, 可通过相对较小代价即能将航道提升至 5 000 吨级; 2) 西江干线丰水期门槛水深 7.29 m 与山秀原设计丰水期门槛水深 6.31 m 存在 0.98 m 动态差值, 形成“丰水期通航瓶颈效应”。建议将门槛水深由 5.80 m 增至 6.50 m, 以匹配下游枢纽门槛水深, 避免通航瓶颈。研究成果可为类似枢纽群门槛水深协同设计提供可量化的技术路径。

关键词: 船闸; 门槛水深; 通航水位

中图分类号: U612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0073-06

Matching between expansion project of Shanxiu Ship Lock in Zuojiang River and threshold water depth of downstream cascade

HUANG Guoxun¹, GAO Chengyan², WANG Xiaoyuan²

(1. Transportation Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530012, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: To optimize the matching of threshold water depth between the expansion project of Shanxiu Ship Lock in Zuojiang River and threshold water depth of downstream cascade, this study proposes a threshold water depth design method based on continuous cascade water level analysis. By analyzing the multi-year hydrological measurement data of the main line of the Xijiang River, a multi-dimensional analytical model including water level duration and response relationships of threshold water depth is constructed. The research shows that: 1) The water depth improvement in the Laokou reservoir area exhibits significant nonlinear characteristics, and the channel can be improved to the 5,000-ton class at a relatively low cost. 2) There is a dynamic difference of 0.98 m between the threshold water depth of 7.29 m during the wet season of the Xijiang trunk line and the originally designed threshold water depth of 6.31 m during the wet season of Shanxiu, forming a “navigation bottleneck effect during the wet season”. Therefore, it is recommended to increase the threshold water depth from 5.8 to 6.5 m to match the downstream hub threshold water depth and avoid navigation bottlenecks. The research results can provide a quantifiable technical path for collaborative design of threshold water depth in similar hub groups.

Keywords: ship lock; threshold water depth; navigation water level

左江是珠江流域西江水系的主要支流, 在广西境内流经龙州、崇左、扶绥、南宁等市县, 在南宁宋村附近与右江汇合后称为邕江, 是西江航

运干线的上段和起点。左江山秀水电站位于左江下游河段, 距离下游崇左市扶绥县约 14 km, 距离南宁市约 90 km, 是一座以发电为主、兼顾航运、

收稿日期: 2025-03-10

*基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2023YFC3206101)

作者简介: 黄国勋(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为水运工程规划与管理。

灌溉等综合效益的水利水电工程。左江山秀船闸扩能工程是在山秀水电站一线船闸左侧新建二线船闸,二线船闸原设计按Ⅲ级船闸(兼顾通航 2 000 吨级单船)设计,闸室有效尺度为 235 m×23 m×5.8 m (有效长度×有效宽度×门槛水深)^[1]。

目前国内针对“船舶过闸时所需的最小门槛水深”的研究还没有形成系统性的成果^[2],在工程实践中规范的规定并未得到全面的理解和执行^[3]。门槛水深是船闸高效运营的核心参数,其变化通过安全风险、通航能力、建造成本等多维度影响整体效率^[4],科学管理水深条件是提升船闸经济性和可靠性的关键^[5-10]。

本文通过分析西江干线、左江及平陆运河^[11-12]通航水深,对比不同航道的水深特征与运行条件,研究左江提升为 3 000 吨级和 5 000 吨级航道时门槛水深匹配性,并初步计算了提升左江船闸门槛水深的工程投资,揭示不同吨级航道升级对水深需求的非线性影响规律。研究成果直接应用于左江航道升级工程,并为类似连续梯级航道的门槛水深设计提供技术参考,避免“一刀切”式水深标准导致的资源浪费或通航瓶颈。

1 工程概况

左江山秀水电站是左江综合利用规划中的第 3 个梯级,是一个以发电为主,兼顾航运、电灌、旅游等综合效益的水利枢纽工程,工程地理位置见图 1。电站坝址以上流域面积 2.956 2 万 km²,多年平均流量 600 m³/s,多年平均径流量为 189.3 亿 m³。山秀水库正常蓄水位 86.50 m,死水位 86.00 m,总库容为 6.063 亿 m³。根据山秀水电站工程初步设计报告,其水库运行方式为:

1) 枯水期,当入库流量小于或等于电站引用流量 837 m³/s(1 台机 279 m³/s,2 台机 558 m³/s)时,坝前水位按正常蓄水位 86.50 m 与死水位 86.00 m 之间运行,上游来水用于电站发电。

2) 洪水期,当上游来流量 $Q \leq 2\,410$ m³/s 时,按电站综合利用需要,坝前水位维持在正常蓄水位 86.50 m 与死水位 86.00 m 之间运行;当 $2\,410 < Q \leq 5\,000$ m³/s 时,逐步降低库水位,坝前水位维持在 86.50~84.00 m 之间运行;当 $Q > 5\,000$ m³/s 时,电站净水头已小于机组最低运行水头 3.50 m,机组停止运行,敞开全部闸门泄洪,以减轻上游库区淹没影响,库水位恢复至天然状态。近年来山秀水位洪水水位统计见表 1。



图 1 山秀船闸地理位置

Fig. 1 Geographic location of Shanxiu Ship Lock

表 1 近年山秀水电站洪水天数
Tab. 1 Flood days at Shanxiu Hydropower Station in recent years

年份	洪水天数/d					
	$Q \geq 2\,410\text{ m}^3/\text{s}$	$Q \geq 5\,000\text{ m}^3/\text{s}$	$Q \geq 5\,380\text{ m}^3/\text{s}$	$Q \geq 6\,390\text{ m}^3/\text{s}$	$Q \geq 7\,440\text{ m}^3/\text{s}$	$Q \geq 8\,790\text{ m}^3/\text{s}$
2007	1	0	0	0	0	0
2008	62	40	28	16	8	3
2009	3	0	0	0	0	0
2010	3	0	0	0	0	0
2011	7	0	0	0	0	0
2012	24	8	5	3	1	0
2013	19	6	3	1	0	0
2014	35	24	16	9	4	0
2015	14	4	2	0	0	0
2016	8	0	0	0	0	0
2017	7	0	0	0	0	0
2018	19	4	2	0	0	0
小计/d	202	86	56	29	13	3
平均天数/d	16.8	7.2	4.7	2.4	1.1	0.3

2 山秀枢纽与下游梯级门槛水深匹配性分析

2.1 最低通航水位

山秀枢纽下游水位与其下游老口枢纽的上游蓄水水位密切相关, 目前老口枢纽已正常蓄水(死水位 75.00 m, 实际统计发现存在低于 75.00 m 情况), 山秀枢纽—宋村三江口航道已成为老口库区的优良航道, 山秀枢纽下游水位主要受老口枢纽的蓄水和运行水位的影响。在计算最低通航水位时, 采用老口死水位+最小通航流量(98% $Q=71.3\text{ m}^3/\text{s}$)和老口降低运行水位+相应流量(98% $Q=1\,749\text{ m}^3/\text{s}$)的最小值。

老口上游逐日水位过程见图 2, 老口实际运行中, 存在水位低于死水位 75.00 m 的情况, 75.00 m 保证率约为 92%。同期山秀下游水位见图 3, 发现虽然老口水位低于 75.00 m, 但由于沿线来流, 山秀下游水位均在 75.00 m 以上, 因此山秀下游最低通航水位宜取 75.00 m。

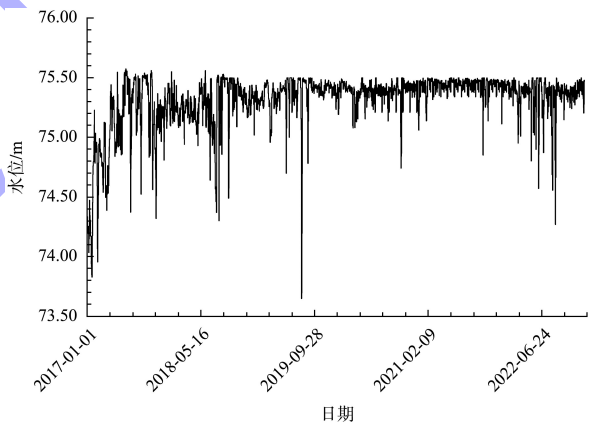


图 2 老口枢纽上游逐日水位过程
Fig. 2 Daily water level hydrograph at Laokou Hub upstream

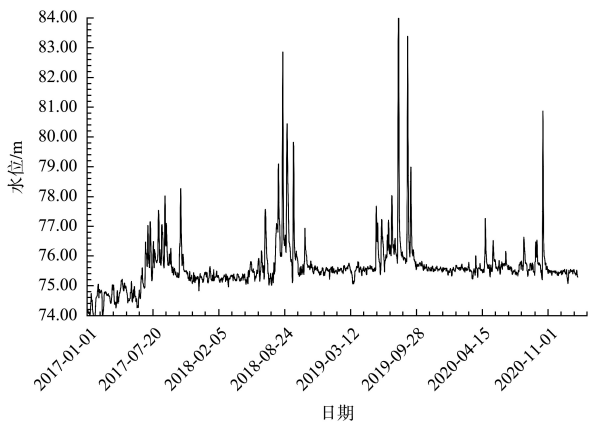


图 3 山秀枢纽下游逐日水位过程
Fig. 3 Daily water level hydrograph at Shanxiu Hub downstream

2.2 水位及流量保证率

老口枢纽蓄水后,山秀枢纽的水位及流量保证率见表 2。由表 2 可知,山秀枢纽来流全年不均,丰水期来流量大且时间短,全年 50%保证率流量 $289\text{ m}^3/\text{s}$,90%保证率流量 $106\text{ m}^3/\text{s}$,流量增长相对较小。全年 50%保证率水位仅比最低通航水位高 0.51 m ,丰水期 80%保证率水位比最低通航水位高 0.42 m 。在丰水期,山秀下游门槛及航道实际水深提升有限。

表 2 山秀近年来水位及流量保证率
Tab. 2 Water level and flow guarantee rate of Shanxiu Hub in recent years

保证率/ %	全年下游 水位/m	全年出库流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	丰水期(5—10月) 水位/m
10	76.26	1 290	—
20	75.82	743	—
50	75.51	289	75.71
80	75.25	139	75.42
90	75.00	106	75.16

2.3 西江干线船闸门槛水深匹配性分析

考虑老口枢纽蓄水后,统计分析西江干线^[13]及左江航道各枢纽船闸实际门槛水深,相关结果见表 3。若山秀设计最小门槛水深按照 5.80 m 设计,山秀上游实际门槛水深 50%保证率将达到 8.92 m ,超过 8.00 m 的保证率大于 98%,与西江干线门槛水深基本匹配,但下游门槛水深小于西江干线及老口门槛水深。在丰水期,现状西江干线船闸门槛水深为 7.29 m ($P=50\%$ 保证率),与左江老口枢纽现状下游存在 0.40 m 缺口,与山秀枢纽下游存在 0.98 m 缺口,存在丰水期门槛水深不匹配的情况。

表 3 西江航运干线船闸 50%水位保证率下的门槛水深

Tab. 3 Threshold water depth of Xijiang navigation trunkline ship locks under 50% water level guarantee rate

枢纽	设计最低 通航水位/m	设计最小 门槛水深/m	50%水位保证率 下的门槛水深/m
山秀枢纽上游	83.00	5.80	8.92
山秀枢纽下游	75.00	5.80	6.31
老口枢纽上游	72.00	3.50	6.89
老口枢纽下游	61.00	4.00	10.15
邕宁枢纽上游	65.28	5.80	—
邕宁枢纽下游	58.76	5.80	—

续表3

枢纽	设计最低 通航水位/m	设计最小 门槛水深/m	50%水位保证率 下的门槛水深/m
西津枢纽上游	57.76	5.80	9.60
西津枢纽下游	42.74	5.80	7.29
贵港枢纽上游	41.24	5.80	7.59
贵港枢纽下游	29.23	5.80	8.78
桂平枢纽上游	28.74	5.60	7.67
桂平枢纽下游	20.14	5.60	9.22
长洲枢纽上游	18.74	5.80	7.48
长洲枢纽下游	1.40	5.80	11.87
平陆运河船闸	—	8.00	—

3 山秀至老口区间航道水深分析

3.1 左江航道规划及现状通航条件

根据广西壮族自治区内河航道与港口布局规划,崇左江州区冲塘—宋村三江口,现状为Ⅲ级航道,2035 年规划为Ⅲ级及以上。

近年来,广西内河 1 000 吨级以上船舶不断增加,船舶设计吃水 $\geq 3.00\text{ m}$,这些船舶即使是在航道条件较好的航段,也有时因超航道维护水深航行而发生触礁搁浅事故,影响附近水域的通航环境。山秀—老口区间航道考虑 1 000 吨级船舶吃水较深的实际情况,为了保证满载吃水 $\geq 3.00\text{ m}$ 的船舶亦能安全通航,航槽开挖时增加水深 0.50 m ;同时考虑航道维护的需要,航槽开挖时另增加备淤水深 0.30 m ,因此航道水深 $H=3.00\text{ m}$,航道维护水深为 3.50 m ,航道开挖水深为 3.80 m 。

老口库区最低通航水位统计见表 4,K63 段之后航道最低通航水位按照 75.00 m 设计,全年保证率 50%航道实际水深大约为 4.01 m (此时山秀下游门槛水深 6.31 m),丰水期 80%水深为 3.92 m (此时山秀下游门槛水深 6.22 m),丰水期基本可通行 3 000 吨级船舶。

表 4 左江老口库区沿程设计最低通航水位

Tab. 4 Designed minimum navigable water level along course of Laokou reservoir area in Zuojiang River

断面位置	断面桩号	设计最低通航水位/m
宋村三江口	k0+000	72.20
下楞狮子头	k16+350	72.90
细滩	k21+560	73.10
小鱼影滩	k26+000	73.20
那琴滩	k28+310	73.30

续表4

断面位置	断面桩号	设计最低通航水位/m
观音圩滩	k32+480	73.50
将军滩	k35+080	73.70
鸡窝滩	K40+300	73.90
龙头滩	k43+780	74.10
凤庄	k46+320	74.30
亲腰江	k50+320	74.40
那宽滩	k54+700	74.60
鬼叫沙滩	k56+240	74.60
锦就洲滩	k59+100	74.90
金鸡岩滩	k60+620	74.90
扶绥滩	k63+000	75.00
下洞	k66+100	75.00
驮屯	k71+120	75.00
那勒滩	k71+970	75.00
百梗滩	k73+440	75.00
绞杯滩	k74+680	75.00
牛皮滩	k76+000	75.00
岂桑作业区	k78+640	75.00
赖楞滩	k79+750	75.00
山秀下引航道口门	k80+370	75.00

3.2 3 000 吨级航道时匹配性分析

按 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[14]确定船闸门槛最小水深,计算公式:

$$H \geq 1.6T \quad (1)$$

式中: H 为门槛最小水深, m; T 为 2 000 吨级货船满载时的最大吃水, m, $T=3.60$ m。即 $H \geq 5.76$ m, 按计算山秀二线船闸上游门槛水深取 5.80 m。

若山秀—老口区间航道未来按照 3 000 吨级整治, 按照 3 000 吨级船舶吃水 3.60 m 考虑, 航道水深约 4.10 m, 此时门槛水深 5.80 m, 门槛水深可满足 3 000 吨级船舶全年通航。提升为 3 000 吨级后, 全年保证率 50% 航道实际水深大约为 4.61 m (此时山秀下游门槛水深 6.31 m), 丰水期 80% 水深为 4.52 m (此时山秀下游门槛水深 6.22 m), 可通航船舶最大吃水约 4.00 m, 门槛水深可满足船舶安全通航需求。

3.3 5 000 吨级航道时匹配性分析

若山秀至老口区间航道未来按照 5 000 吨级整治, 按照 5 000 t 船舶吃水 4.80~5.00 m 考虑, 此时航道水深约 5.60 m, 此时门槛水深 5.80 m, 船闸最大可通航船舶吃水约 4.60 m, 不能满足全年

通航 5 000 吨级船舶要求。全年保证率 50% 的门槛水深为 6.31 m, 可通航船舶最大吃水为 4.85 m, 基本可满足 5 000 吨级船舶通航需求。

要满足全年 5 000 吨级船舶安全通航, 门槛水深需要由 5.80 m 调整为 6.50 m, 增加 0.70 m。根据老口—山秀区间航道地形(Ⅲ级整治后), 初步匡算航道水深增加 2.00 m, 通航水深 5.50 m, 航道疏浚量约 200 万 m^3 (未考虑转弯半径加大等因素)。在工程投资增加代价不大的情况下, 山秀下游门槛水深按 6.50 m 设计, 可增强广西左江山秀船闸扩能工程与下游梯级门槛水深匹配性, 有效衔接平陆运河。

4 结论

1) 西江来流丰枯不均, 西江干线船闸丰水期门槛水深提升较多, 但是山秀、老口船闸位于西江支线, 丰水期门槛水深提升较小, 同时山秀—老口段丰水期航道水深提升也较小。从全线来看, 山秀枢纽下游 50% 水位保证率下的门槛水深为 6.31 m 和老口枢纽上游并不匹配, 可通航船舶吃水为 4.85 m。

2) 山秀下游至西江航道为Ⅲ级航道, 通航 1 000 吨级船舶, 航道尺度为宽 60 m、水深 3 m, 弯曲半径 480 m。在 50% 水位保证率下的航道水深为 4.01 m, 可通航最大船舶吃水接近 3 000 吨级, 在此情况下航道水深是通航瓶颈。

左江航道可利用水深与最小水深相比增加不多, 但航道最小水深增加的难度不大(未考虑转弯半径加大等因素约 200 万 m^3 疏浚量), 航道可通过较小代价进行提等升级, 船闸做为永久性建筑应留有富余。

3) 目前西江干线下游已建枢纽设计门槛水深基本为 5.80 m, 干线丰水期水量大, 可达 7.30 m 以上。山秀枢纽原设计最小门槛水深为 5.80 m, 丰水期可达 6.50 m, 山秀枢纽门槛水深与西江干线丰水期船闸门槛水深并不匹配, 门槛水深设计应具有前瞻性和良好的匹配性。

4) 山秀下游门槛水深取 6.50 m 设计, 可增强广西左江山秀船闸扩能工程与下游梯级门槛水

深匹配性,有效衔接平陆运河。

参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院有限公司. 广西左江山秀船闸扩能工程施工图设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2024.
- CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Construction drawing design for the expansion project of the Left River Shanxiu Ship Lock in Guangxi[R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2024.
- [2] 吴澎. 船闸的门槛水深(一): 规范相关规定解读[J]. 水运工程, 2023(6): 92-95.
- WU P. Water depth on sill of locks, part 1: relevant stipulations in Chinese Code [J]. Port & waterway engineering, 2023(6): 92-95.
- [3] 吴澎. 船闸的门槛水深(二): 船舶过闸所需的最小门槛水深[J]. 水运工程, 2023(7): 101-104, 119.
- WU P. Water depth on sill of locks, part 2: minimum water depth on sill for vessels passing through locks[J]. Port & waterway engineering, 2023(7): 101-104, 119.
- [4] 宁武. 广西西江航运资源开发利用的实践及启示[J]. 水运工程, 2023(1): 103-110.
- NING W. Practice and enlightenment of development and utilization of Xijiang shipping resources in Guangxi [J]. Port & waterway engineering, 2023(1): 103-110.
- [5] 程梦瑶. 三峡船闸通过能力评价与影响因子研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- CHENG M Y. Evaluation of lock capacity of the Three Gorges Ship Lock and study on influencing factors [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [6] 曹凤帅, 黄瑶. 船闸门槛水深研究进展[J]. 水道港口, 2018, 39(2): 162-166.
- CAO F S, HUANG Y. Research progress on water depth above ship lock sill[J]. Journal of waterway and harbor, 2018, 39(2): 162-166.
- [7] 高成岩, 程建中, 蔡翠苏, 等. 平陆运河水资源论证[J]. 水运工程, 2024(11): 8-12, 47.
- GAO C Y, CHENG J Z, CAI C S, et al. Water resources assessment for Pinglu Canal [J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 8-12, 47.
- [8] 王卫标, 曾剑, 谢东风. 一种基于实际水深的通航保证率计算方法: 以钱塘江河口七堡段为例[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(9): 1-4, 22.
- WANG W B, ZENG J, XIE D F. A calculation method for cumulative frequency below low tidal level of navigation based on real water depth: taking Qibao section of Qiantang Estuary as example[J]. Journal of Yangtze River scientific research institute, 2016, 33(9): 1-4, 22.
- [9] 齐俊麟. 三峡升船机建设运行及三峡水运新通道建设研究[J]. 中国水运, 2017(17): 6-7.
- QI J L. Construction and operation of ship lift in Three Gorges and the construction of new waterway in Three Gorges[J]. China water transport, 2017(17): 6-7.
- [10] 刘磊, 原贺军. 复线船闸工程航道通航条件影响评价重点[J]. 工程与建设, 2021, 35(6): 1213-1215.
- LIU L, YUAN H J. Key points of impact assessment on navigation conditions of channel of double track ship lock project[J]. Engineering and construction, 2021, 35(6): 1213-1215.
- [11] 刘宁. 以平陆运河为牵引的西部陆海新通道水运体系和联运模式研究[J]. 水利水运工程学报, 2025(1): 1-15.
- LIU N. Research on the waterway system and intermodal transport model of the New Western Land-Sea Corridor driven by the Pinglu Canal [J]. Hydro-science and engineering, 2025(1): 1-15.
- [12] 刘可, 王劼耘. 牢牢把握历史观、系统观、实践观, 高标准高质量建设平陆运河[J]. 水运工程, 2024(7): 1-5.
- LIU K, WANG J Y. Building Pinglu Canal with high-standards and high-quality, complying with perspectives of history, system and practice [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 1-5.
- [13] 中交水运规划设计院有限公司. 西部陆海新通道(平陆)运河通航技术标准与通航船型研究专[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2020.
- CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Study on navigation technical standards and vessel types for the Pinglu Canal of the new western land-sea corridor [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2020.
- [14] 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- Code for master design of shiplocks: JTJ 305-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2001.

(本文编辑 赵娟)