



嘉陵江亭子口枢纽变动回水区 通航流量及保证率分析

谢玉杰¹, 余祥², 李家世¹, 何熙¹

(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: 按照《四川省内河航运发展规划》，嘉陵江川境内规划 14 个梯级，2030 年实现广元—昭化段达到Ⅳ级航道标准的目标，但是由于《长江流域综合规划》取消了嘉陵江水东坝枢纽，造成亭子口与上石盘枢纽之间水位不能衔接。亭子口电站设计水位变幅高达 20 m，导致库尾存在长约 28 km 的变动回水区，而该段航道天然来流量很小，仅通过航道整治不能达到规划的Ⅳ级航道标准。因此采用优良河段河相关系法，将整治后的滩险河床断面形态与优良河段建立特征流量下的河相关系，推求不同流量下整治滩险可能达到的稳定航深，从而找到工程河段满足Ⅳ级航道水深标准的最小流量。再根据水文站资料分析此流量出现的时间，结合亭子口电站特征水位回水里程，分航段研究通航保证率，提出亭子口库尾变动回水区达到规划的Ⅳ级航道的流量和保证率。

关键词: 航道整治；变动回水区；河相关系；通航流量；保证率

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0174-04

Analysis of navigable discharge and guarantee rate in fluctuating backwater area of the Jialing River Tingzikou project

XIE Yu-jie¹, YU Xiang², LI Jia-shi¹, HE Xi¹

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China;

2. Sichuan Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower, Chengdu 610072, China)

Abstract: According to the *Inland river navigation development plan of Sichuan Province*, there are 14 steps planned in the Jialing River, and the section from Guangyuan to Zhaohua will reach the Grade IV waterway standard by 2030. However, due to the *Comprehensive planning for the Yangtze River basin*, the Shuidong dam junction of the Jialing River was cancelled, the water level between Tingzikou and Shangshipan junction cannot be connected. The designed water level variation range of Tingzikou hydropower station is as high as 20 m, which results in a fluctuating backwater area of about 28 km at the end of the reservoir. The natural flow of this waterway section is very small, and the planned grade IV waterway cannot be achieved only through waterway regulation. Therefore, this paper adopts the method of good river section correlation to establish the river correlation under the characteristic flow between the beach dangerous riverbed after regulation section shape and the good river section, and infer the stable navigation depth that may be achieved by the beach dangerous riverbed regulation under different flows, so as to find the minimum flow of the engineering reach that meets the water depth standard of Class IV channel. Then the paper analyzes the time of occurrence of this flow based on the data from the hydrological station, combined with the characteristic water level backwater mileage of the Tingzikou Power Station, studies the navigation guarantee rate by segment, and proposes the flow rate and guarantee rate for the variable backwater area at the rear of the Tingzikou Reservoir to reach the planned level IV channel.

Keywords: waterway regulation; fluctuating backwater area; river correlation; navigable discharge; guarantee rate

收稿日期: 2020-05-06

作者简介: 谢玉杰(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事航道工程设计。

1 亭子口枢纽运行情况

亭子口水利枢纽工程位于四川省广元市苍溪县境内, 下距苍溪县城 15 km, 是嘉陵江干流开发中唯一的控制性工程。2014 年 5 月建成投产, 2019 年 6 月升船机启用, 标志着亭子口库区 150 km 航道正式建成。

亭子口电站调度原则为: 汛期 6 月下旬—8 月底控制兴利水位不超过防洪限制水位 447 m; 9 月初水库开始蓄水, 一般情况下, 9 月中、下旬可蓄至正常蓄水位 458 m; 10—12 月维持正常蓄水位运行; 1—4 月为供水期, 电站一般按保证出力发电, 正常情况下控制供水期末库水位不低于死水位 438 m; 当遭遇较丰年来水年份, 5—6 月运行水位较高, 要求 6 月中旬迫降库水位, 中旬末库水位降至防洪限制水位 447 m。亭子口坝前水位变化见图 1。

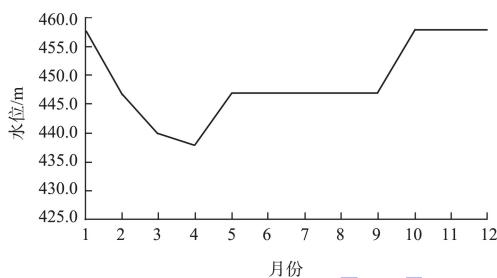


图 1 亭子口枢纽坝前水位变化

亭子口枢纽设计正常蓄水位 458 m 时, 回水末端距上石盘船闸下引航道 1.5 km; 汛期限制水位 447 m 时, 回水里程为 138 km, 回水末端至昭化(白龙江汇合口以下 3.5 km 处); 死水位 438 m 时, 回水里程 124 km, 回水末端至肖家河, 距上石盘船闸下引航道 28 km。亭子口回水情况见图 2。

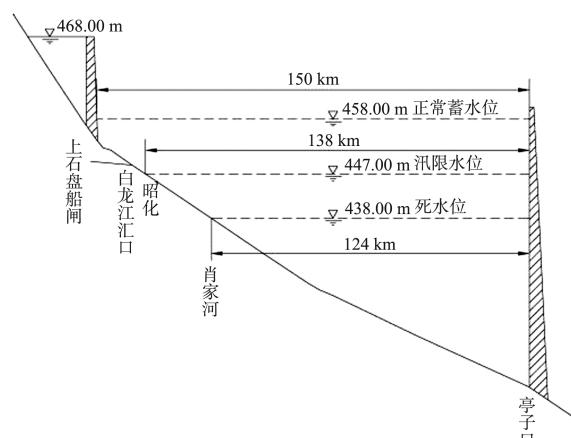


图 2 亭子口各级流量回水长度

按照《四川省内河航运发展规划(2001—2050)》, 嘉陵江川境内规划 14 个梯级, 2030 年实现广元—昭化段达到Ⅳ级航道标准, 但是由于水利部长江水利委员会编制的《长江流域综合规划》对原规划的嘉陵江梯级进行了调整, 取消了亭子口与上石盘之间的水东坝枢纽, 导致亭子口库尾长达 28 km 的变动回水区航道尺度达不到规划的Ⅳ级航道标准。

2 航道概况

亭子口枢纽坝前水位变幅达 20 m, 坎前水位变化导致库尾段存在 28 km 的变动回水区, 其中上石盘至白龙江汇合口长约 10 km, 白龙江汇合口至肖家河长约 18 km。该河段两岸地势平缓、台地较多, 洪枯水面差异大, 枯水河面宽仅 40 m, 洪水河宽可达 1 km, 河段内滩多水浅, 且受挖砂影响, 河床下切严重, 航道条件非常差。天然情况下, 白龙江汇合口以上多年历时保证率 95% 的流量仅为 $23.7 \text{ m}^3/\text{s}$, 白龙江汇合口以下多年历时保证率 95% 的流量为 $117 \text{ m}^3/\text{s}$, 河道流量非常小, 目前航道尺度为 $1.0 \text{ m} \times 30 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ (水深 \times 直线段宽度 \times 弯曲半径), 因此研究亭子口枢纽库尾 28 km 变动回水区的设计最小通航流量及保证率十分必要。

3 通航流量分析

3.1 基本思想

目前天然河流的设计最低通航水位确定方法较为成熟, 一般对多年水位资料采用综合历时曲线法和保证率频率法进行计算, 而变动回水区河段设计最低通航水位确定方法可供参考研究成果^[1-4]较少。

假定对整治河段采取一定的工程措施, 整治后的滩险在枯水期断面形态与优良河段的断面形态相近^[5]。根据河流动力学原理, 建立滩险河段与优良河段在某一特征流量下的河相关系, 然后据此河相关系, 假设某一较长河段航道整治前后, 河道断面通过的流量 Q 相等, 河床糙率 n 及平均

水面比降 J 保持不变。水流连续方程和均匀流方程式为：

$$Q = BHv \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{n} H^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式(1)和式(2)联解得：

$$Q = \frac{1}{n} B H^{\frac{5}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

由横断面河相关系式：

$$\frac{\sqrt{B}}{H} = \alpha H^\beta \quad (4)$$

可推出：

$$B = \alpha^2 H^{2\beta+2} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)，可得：

$$Q = \frac{1}{n} \alpha^2 H^{2\beta+\frac{11}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

对式(6)变换可得：

$$H = \left(\frac{nQ}{\alpha^2 J^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{2\beta+\frac{11}{3}}} \quad (7)$$

再根据断面平均水深 H 与航道水深 h 的相关性 $H = \eta h$ ，可求得冲积河流航道整治后可能达到最大稳定航深的计算公式：

$$h = \frac{H}{\eta} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{nQ}{\alpha^2 J^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{1}{2\beta+\frac{11}{3}}} \quad (8)$$

式中： Q 为流量 (m^3/s)； h 为航道标准水深 (m)； B 为水面宽 (m)； H 为断面平均水深 (m)； J 为枯水平均水面比降； n 为枯水河床糙率； α 、 β 、 η 为河相关系数。

3.2 河相关系分析

选取了亭子口库尾变动回水区优良河段共 27 个横断面。计算断面平均水深 H 和 \sqrt{B}/H ，将 H 与 \sqrt{B}/H 作为 (x, y) 散点坐标，点绘 $\sqrt{B}/H-H$ 的相关曲线，以幂函数形式拟合，则相关曲线方程为：

$$\frac{\sqrt{B}}{H} = \alpha H^\beta \quad (9)$$

式中： α 、 β 为待定系数。

分别选取 Q 为 200、250、300、350 m^3/s 共 4 级典型流量作为不同的设计流量，建立各级流量下优

良河段的河相关系，见图 3，其中 R^2 为相关系数。

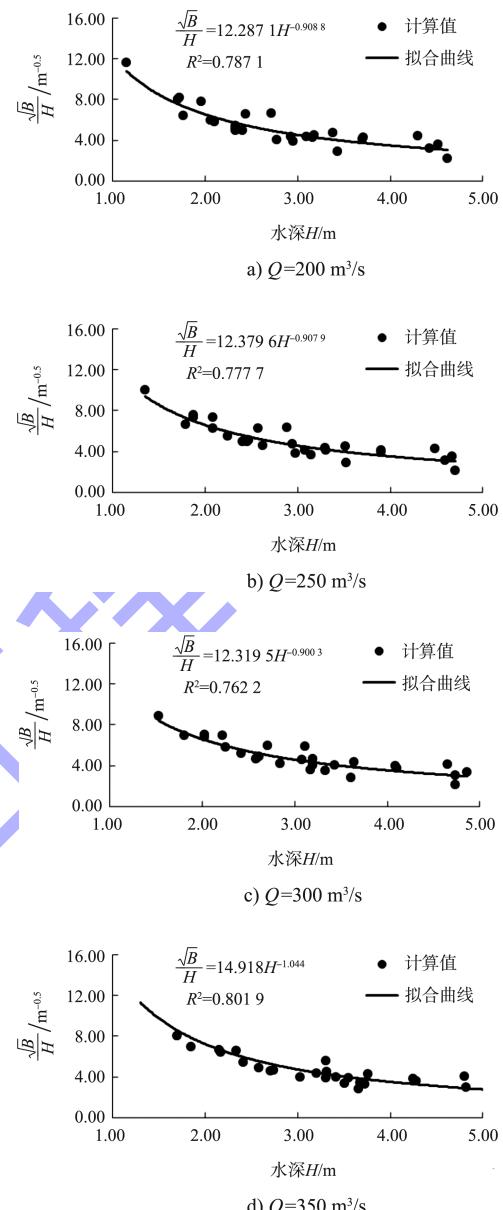


图 3 优良河段河相关系

目前实际求解水深修正系数 η 的方法是采用经验公式^[6]。根据《航道工程设计规范》的规定，估算时 η 的取值范围在 0.7~0.9^[7]。

4 稳定航深尺度估算

依据亭子口库尾 28 km 长河段二维平面数学模型在 Q 为 200、250、300、350 m^3/s 共 4 级典型流量下的计算成果，拟定亭子口库尾研究河段枯水期平均比降 $J=1\%$ ，河床糙率取值范围 n 为 0.030~0.040， $\eta=0.76$ ^[8]。

根据前述航道水深计算公式, 计算不同流量下河段通过整治后可能达到的稳定航深, 结果见表1。

表1 不同流量下整治后可能达到的稳定航深

$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	α	β	n	h/m
200	12.2871	-0.9088	0.030	1.49
			0.035	1.62
			0.040	1.74
250	12.3796	-0.9079	0.030	1.67
			0.035	1.81
			0.040	1.95
300	12.3195	-0.9003	0.030	1.84
			0.035	2.00
			0.040	2.15
350	14.9180	-1.0440	0.030	1.70
			0.035	1.87
			0.040	2.03

由表1可知, 嘉陵江亭子口库尾变动回水区要达到规划IV级航道1.6 m的最小航深, 所需最小流量为250 m^3/s 。

5 通航保证率分析

亭子口库尾28 km变动回水区, 白龙江汇合口以上约10 km河段流量由广元(新店子)站控制, 白龙江径流由三磊坝站控制, 汇合口以下18 km河段径流是由原来的亭子口站控制。根据上述水文站资料统计分析, 不低于250 m^3/s 流量时间见表2。

表2 日均流量时段

水文站	时段	小于250 m^3/s 流量的时间/d	总时间/d
广元站	1—4月	119.6	120.2
	5—9月	118.9	153.0
	10—12月	83.1	92.0
亭子口	1—4月	57.2	120.2
	5—9月	28.5	153.0
	10—12月	26.2	92.0

根据亭子口枢纽的运行方式以及亭子口水文站的流量情况, 1—4月亭子口枢纽坝前水位可能在438~458 m的任何一个值, 考虑最不利情况, 1—4月坝前水位按438.00 m, 5—9月坝前水位不低于447 m, 10—12月坝前水位维持在458.00 m。

5.1 上石盘至白龙江汇合口段

此段航道1—9月属天然航道, 航道水深受

河道来流量影响, 1—4月平均每年119.6 d低于250 m^3/s ; 5—9月平均每年118.9 d低于250 m^3/s ; 10—12月亭子口坝前水位维持在458 m, 枢纽回水至此段航道, 水深能够满足IV级航道要求。因此本段航道若以250 m^3/s 流量通过整治达到IV级航道, 其保证率至少可达到34.7%。

5.2 白龙江汇合口至昭化段

此段航道1—9月属天然航道, 航道水深受河道来流量影响, 1—4月平均每年57.2 d低于250 m^3/s ; 5—9月平均每年28.5 d低于250 m^3/s ; 10—12月亭子口坝前水位维持在458 m, 枢纽回水至此段航道, 水深能够满足IV级航道要求。因此本段航道以250 m^3/s 通过整治达到IV级航道, 其保证率至少可达到76.5%。

5.3 昭化至肖家河段

1—4月亭子口坝前水位为438 m时该段航道属天然航道, 航道水深受河道来流量影响, 平均每年57.2 d低于250 m^3/s ; 5—9月亭子口坝前水位维持在447 m以上, 10—12月份亭子口坝前水位维持在458 m, 即5—12月枢纽回水至此段航道, 水深能够满足IV级航道要求, 5—12月时间为245 d。因此本段航道以250 m^3/s 通过整治达到IV级航道, 其保证率至少可达到84.3%。

6 结论

1) 由于河道自然来流量较小, 亭子口枢纽库尾28 km变动回水区航道要达到规划的IV级航道标准须采取分时段降低保证率通航方案。

2) 通过建立亭子口库区库尾变动回水区的优良河段的河相关系, 对工程河段航道尺度开发潜能开展相关研究, 计算得到目前工程河段达到IV级航道1.6 m的最小航深所需设计流量为250 m^3/s 。

3) 通过水文站数据统计分析, 亭子口库尾变动回水区在设计流量250 m^3/s 时, 上石盘至白龙江汇合口段通航保证率至少可达到34.7%, 白龙江汇合口至昭化段通航保证率至少可达到76.5%, 昭化至肖家河段通航保证率至少可达到84.3%。