



那吉枢纽库区航道整治效果分析

刘 臣

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 根据那吉枢纽库区水位纵向分布和航道治理工程特征, 建立了库尾河段数学模型。依据施工设计阶段、竣工验收阶段相关资料以及竣工3 a后治理河段实测地形资料, 结合数学模型计算成果, 对库区航道治理效果进行了分析。分析表明: 施工位置与设计相符; 竣工后航道水深、航宽、曲率半径等指标满足航道设计尺度要求; 与设计施工地形相比, 竣工3 a后, 开挖位置未发生淤积现象, 航行水域非开挖区河床高程低于航槽设计底高程。综合分析, 工程整治效果达到航道设计目标。

关键词: 枢纽库区; 数学模型; 航道尺度; 通航水流条件

中图分类号: U 617.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0151-05

Channel regulation effect for reservoir reach of Naji junction

LIU Chen

(Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Based on characteristics of longitudinal water level and channel regulation project in reservoir reach of Naji junction, this paper establishes the orthogonal curve two-dimensional current mathematical model for the reservoir tail reach, and analyzes the channel regulation effect for the reservoir reach according to materials of the design stage, acceptance stage and topography after 3 years of completion, as well as the calculation results by mathematical model. The analysis shows that construction site is consistent with the design; the channel dimension and curvature radius of the waterway conform to the design dimensions' requirement; no siltation occurs 3 years after completion, and the elevation of the unexcavated area is lower than that of the excavated area. In a word, the channel regulation effect meets the design goal.

Key words: reservoir reach of junction; mathematical model; channel dimension; navigation flow condition

根据交通部令2008年第1号《航道工程竣工验收管理办法》, 航道整治工程验收包括对“整治效果的评价”。航道整治工程的效果主要包括工程前后设计水位变化、航道尺度、通航水流条件等。对于一般河段, 工程后航道设计水位、水流条件的观测, 容易取得与工程前或设计指标相对应的实测数据, 可进行设计指标的工程前后对比。然而, 对于库区航道, 由于受枢纽蓄水调度影响, 航道设计流量、水位与工程前已发生了本质变化, 如工程前设计低水位对应的为设计最小流量, 而蓄水后, 小流量为蓄水期, 枢纽处于高

水位运行期, 即小流量对应的是高水位, 因此蓄水后, 已观测不到小流量、低水位情况, 这样工程前后对应水位、流速的比较是很困难的。本文采用“依据施工设计阶段、竣工验收阶段相关技术文件资料以及工程运行3 a后实测地形资料, 结合数学模型计算”的方法, 对那吉库区航道整治工程效果进行分析, 可供相关库区航道整治工程效果评估提供借鉴参考。

1 工程概况

那吉航运枢纽位于广西百色市境内右江河

收稿日期: 2012-04-11

作者简介: 刘臣(1964—), 男, 研究员, 从事港口和航道设计与研究。

道上，是百色水利枢纽的反调节水库。那吉枢纽是一座以航运为主、结合发电、兼有其他效益的水资源综合利用工程，库区航道上起百色澄碧河

口、下至那吉枢纽坝址，河道总长40.6 km，工程自2008年竣工至2011年竣工交付使用，已历时3 a（图1）。



图1 那吉枢纽库区河段河势

1.1 整治标准

那吉库区澄碧河口—那吉枢纽航道建设标准为Ⅲ级双线。设计船型为2×1 000 t分节驳船队（内河通航标准船型），船型尺度为160 m×10.8 m×2.0 m（总长×型宽×设计吃水），航道的具体尺度为2.4 m×60 m×480 m（水深×双线航宽×弯曲半径）。

1.2 枢纽调度方式

枢纽调度方式见表1，最大通航流量3 450 m³/s；坝址处正常蓄水位115 m，通航最低水位109.4 m。

表1 那吉枢纽运行方式

入库流量/(m ³ ·s ⁻¹)	水库运行水位/m
Q ≤ 800	115
800 < Q ≤ 1 170	114
1 170 < Q ≤ 1 350	113
1 350 < Q ≤ 2 670	110.5
2 670 < Q ≤ 3 450	109.4 ~ 110.5
Q > 3 450	按泄洪曲线泄洪

1.3 设计水位沿程变化

设计水位沿程变化见图2，最低设计水位，江坝村上游为库区死水位14.4 m；最高设计水位，江

坝村下游水位平缓，比降很小。江坝村河段基本为库区回水变动区和常年回水区分界河段。

1.4 整治措施

那吉库区澄碧河口—那吉枢纽航道，共对欢喜石、小横榄、大横榄、旧航标站、杨屋、平迈村、江坝村对岸凸嘴、荷叶洲和公萎滩9个滩险进行了治理。整治措施基本为炸礁和疏浚，并建示位标40座、M10浆砌片石基座（导航标志）1处、侧面标2座。

2 库尾河段数学模型建立与率定

库区澄碧河河口至江坝村弯道河段为那吉枢纽库尾河段，河段长11 km。该河段最高通航水位基本按天然水面线控制，最低通航水位114.4 m为库区死水位。主要治理河段中的欢喜石、小横榄、大横榄、旧航标站、杨屋、平迈村、江坝村等7地均处于该河段，只有荷叶洲、公萎滩两滩未在此河段，是库区最易出现影响船舶安全航行的河段，建模地形为施工图设计采用的CAD地形资料。

研究建立的模型为正交曲线二维水流运动数学模型，模型水平坐标为(ξ, η)网格，水流运动方程^[1-2]如下。

水流连续方程：

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

水流平面动量方程：

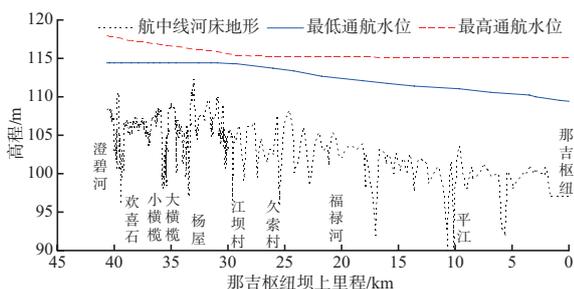


图2 库区设计水位沿程变化

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi} u \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{1}{C_\eta} u \frac{\partial u}{\partial \eta} - \frac{v^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} + \frac{uv}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - fv = -\frac{1}{\rho_0 C_\xi} P_\xi + F_\xi + M_\xi \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi} u \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} - \frac{uv}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} + \frac{u^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} + fu = -\frac{1}{\rho_0 C_\eta} P_\eta + F_\eta + M_\eta \quad (3)$$

式中： u 和 v 分别是 ξ 和 η 方向水深平均流速分量（m/s）； f 是柯氏力； F_ξ 和 F_η 分别是 ξ 和 η 方向的应力梯度； P_ξ 和 P_η 分别是 ξ 和 η 方向的压力力梯度； M_ξ 和 M_η 分别是源(汇)在 ξ 和 η 方向的动量分量； v_r 是垂向黏性系数； Q 是源(汇)项； C_ξ 和 C_η 分别是坐标转换系数。

模型建成后，依据施工图设计本河段最大通航流量与最高通航水位（图2）对模型进行了率定，水位最大偏差0.068 m，平均偏差0.025 m，河段曼宁糙率介于0.025 ~ 0.035。

3 数模计算流量与水位的确

3.1 设计最高通航水位与最大通航流量

根据《内河通航标准》^[3]，“枢纽通航建筑物上游设计最高通航水位应采用枢纽正常蓄水位或设计挡水位（对应航道等级）的洪水重现期计算的水位中的高值”。由图2可见，江坝村下游为枢纽正常蓄水位15.0 m控制河段；江坝村上游为设计最大流量3 450 m³/s（10 a）作用河段，即江坝村上游水位与流量3 450 m³/s匹配，为此采用此水位、流量分析江坝村上游设计最高通航水位时通航水流特征。

3.2 设计最低通航水位与最小通航流量

图3为库区河段水位和流量关系曲线。当来流量小于 Q_0 时，库区水位为正常蓄水位；当来流量大于 Q_0 后，坝前水位开始下降；至来流量上升到 Q_{min} 后，受河道自然特性控制，坝前水位对河段

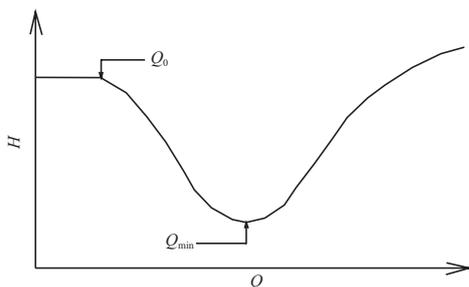


图3 库区河段水位与流量关系

水位影响基本消失，河段水位开始上升， Q_{min} 即为库区最低通航水位时流量，根据那吉枢纽调度方式，那吉库尾河段 Q_{min} 取1 350 m³/s。

4 航道整治效果分析

4.1 弯曲河段航道设计尺度分析

那吉库区航道设计尺度为2.4 m × 60 m × 480 m（水深 × 航宽 × 曲率半径），治理河段中欢喜石、旧航标站上游凸嘴、荷叶洲处于弯道或弯道衔接段，三段河段航道曲率半径分别为330 m，330 m，400 m，小于480 m，根据《航道整治工程技术规范》^[4]，航道需进行加宽设计，加宽值按式（4）和（5）计算，表2为三滩按公式计算成果。

$$B_2 = \Delta B + B_1 \quad (4)$$

$$\Delta B = L^2 / (2R + B_1) \quad (5)$$

式中： B_1 为直线段设计宽度； B_2 为弯曲段加宽后宽度； R 为弯曲半径； L 为顶推船队长度。

表2 航宽加宽计算

河段	B_1 /m	ΔB /m	B_2 /m	R /m	L /m
欢喜石	95	35	60	330	160
旧航标站	95	35	60	330	160
荷叶洲	90	30	60	400	160

图4为旧航标站上游凸嘴施工位置示意（本文仅就此处工程进行说明性分析）。旧航标站滩段位于旧航标站急弯的上游，旧航标站急弯航道曲率半径为330 m。该滩段碍航主要原因是不能满足航道设计尺度2.4 m × 60 m × 480 m（水深 × 航宽 × 曲率半径）中的曲率半径480 m的要求，设计根据急弯上游的地形特征，采取航道向右拓宽35 m的工程措施，有效改善了船舶进、出弯

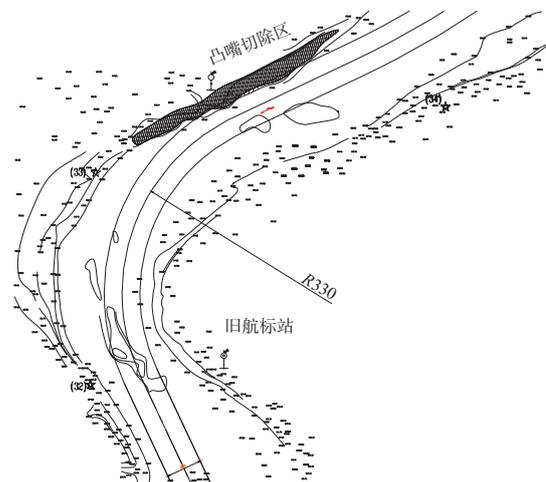


图4 旧航标站河段工程布置

道的航行水域尺度，拓宽后航道航行条件满足规范要求。

4.2 水流条件分析

1) 水位。

表3为水位计算成果，根据设计与施工文件，河床欢喜石为礁石、大横榄碍航区有礁石、江坝村凸嘴为基岩，碍航处疏浚底高程位于设计水位下3.0 m，富裕水深0.6 m；小横榄、旧航标站凸嘴、杨屋、平迈村河段河床为卵石夹砂，碍航疏浚底高程位于设计水位下2.6 m，富裕水深0.2 m。由表可见，清除碍航地形后，设计最低通航水位时水位最大降落为0.05 m，小于施工最小富裕水深0.2 m，工程竣工后航道尺度满足设计要求。

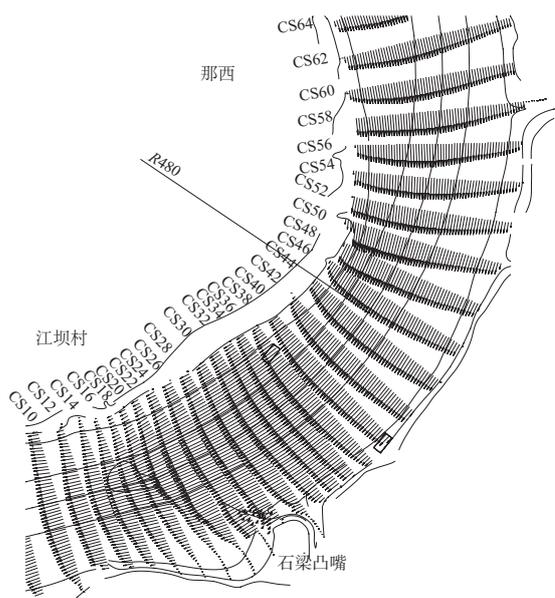
表3 工程前后计算水位变化

河段位置	设计最低通航水位/m		
	工程前	工程后	变化
欢喜石	114.45	114.40	-0.05
小横榄	114.45	114.40	-0.05
大横榄	114.44	114.40	-0.04
旧航标站	114.45	114.40	-0.05
杨屋	114.41	114.40	-0.01
平迈村	114.41	114.40	-0.01
江坝村	114.30	114.29	-0.01

2) 流速。

水流流速大小与流态是衡量航道通航水流条件优劣的重要指标。工程河段江坝村因石梁凸嘴深入河道威胁行船安全，图5为设计高水位时工程前后流场，表4为工程前后航中线流速。

工程前水流直冲石梁凸嘴，在凸嘴挑流作用下，凸嘴处局部水流流速突增，其中航中线最大



b) 工程后

图5 工程前后流场

表4 工程前后航中线流速

断面	设计最低通航水位				说明
	设计低水位		设计高水位		
	工程前	工程后	工程前	工程后	
CS 35	1.17	1.16	2.62	2.61	
CS 30	1.23	1.19	2.69	2.64	
CS 28	1.23	1.16	2.67	2.58	工
CS 26	1.28	1.17	2.72	2.59	程
CS 24	1.34	1.19	2.83	2.63	河
CS 22	1.40	1.23	2.96	2.73	段
CS 20	1.01	0.87	2.19	2.02	
CS 15	0.89	0.82	2.14	2.00	
CS 10	0.95	0.91	2.24	2.13	

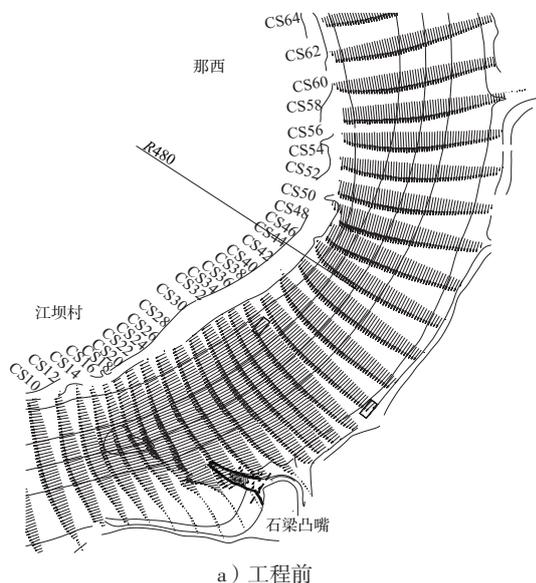
流速设计低水位时为1.40 m/s、设计高水位时为2.96 m/s；凸嘴前部水流挤压航槽水流，且在凸嘴下游形成回流区。由于流速大、流态差，在洪水期下行船舶在此河段易发生“打枪”^[5-6]事故、上行船舶自航上滩困难。

切除石梁凸嘴后，航槽左侧适航宽度扩大到65 m。石梁凸嘴上下游局部水流流速突变、挤压航槽水流等不良流态基本消除，凸嘴下游回流区也基本消失，航行水域宽阔，水流流线光滑平顺，航道区附近水流流向基本平行于航道走向，水流流态良好；航中线最大流速，设计低水位时由1.40 m/s减小到1.23 m/s，减小0.17 m/s；设计高水位时由2.96 m/s减小到2.73 m/s，减小0.23 m/s。

上述数据表明，工程后威胁通航安全的不良流态消失、流速减小，航行水流条件改善明显。

4.3 地形变化与航深分析

图6为部分施工河段设计、竣工与竣工3 a后

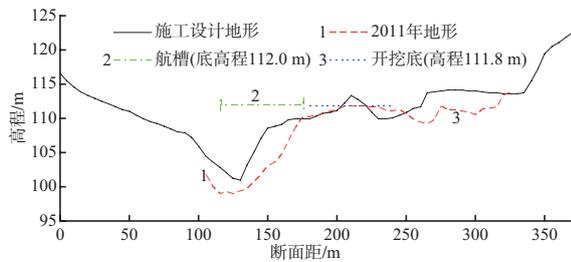


a) 工程前

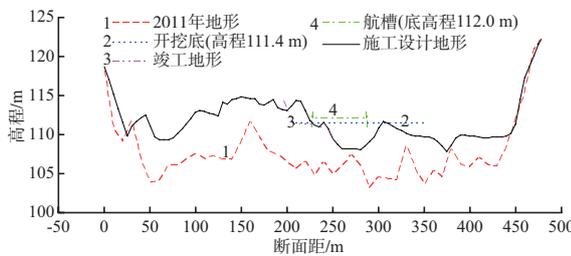
断面地形。由图可见：

1) 设计施工地形、竣工地形显示，开挖位置与设计相符，挖后地形高程均低于设计开挖底高程，施工达到设计要求。

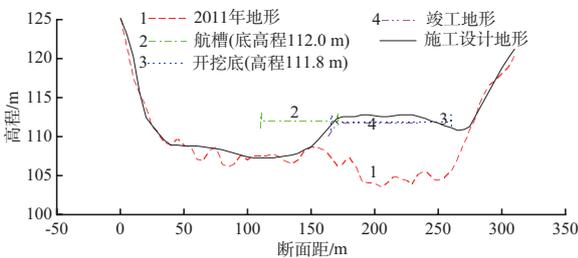
2) 设计施工地形、2011年大断面地形显示，



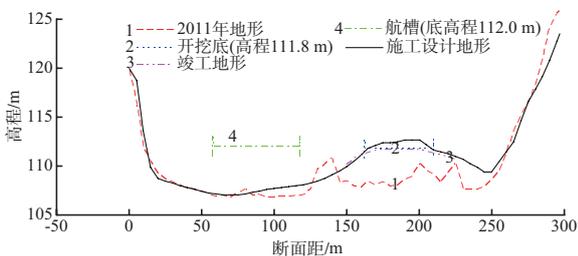
a) 小横榄



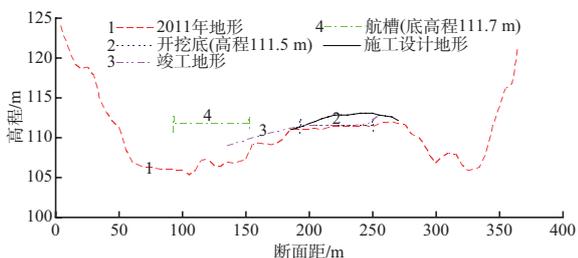
b) 大横榄



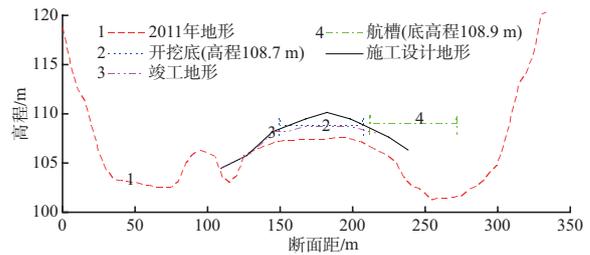
c) 杨屋



d) 平迈村



e) 荷叶洲



f) 公娄滩

图6 地形变化断面

河道边坡稳定，多年基本无变化。

3) 航行水域水深满足通航要求。与设计施工地形相比，开挖位置地形2011年高程或大幅降低、或微幅冲刷，未发生淤积；航行水域非开挖区河床高程低于航槽设计底高程，满足通航水深要求，达到航道设计目标。

5 结论

1) 按设计施工，竣工后航道水深、航宽、曲率半径等指标满足Ⅲ级航道设计尺度要求。

2) 竣工资料表明，施工位置与设计相符，施工达到设计要求。

3) 数学模型计算成果显示，工程河段工程后航行水域宽阔、水流流线光滑平顺，航道区附近水流流向基本平行于航道走向，无不良流态，航行水流条件改善明显。

4) 竣工3 a后航行水域水深满足通航要求。与设计施工地形相比，开挖位置地形2011年高程或大幅降低、或表现为微幅冲刷，未发生淤积；航行水域非开挖区河床高程低于航槽设计底高程，满足通航水深要求，达到航道设计目标。

参考文献：

[1] 刘臣, 闫建英, 王绪亭. 天津临港产业区潮流模拟与方通物流码头通航本质安全分析[J]. 水运工程, 2011(11):125-128.

[2] 刘臣, 闫建英, 李君涛, 等. 湘江土谷塘航电枢纽车江坝址通航水流条件分析[J]. 水道港口, 2011,32(6):418-422.

[3] GBJ 139—2004 内河通航标准[S].

[4] JTJ 312—2003 航道整治工程技术规范[S].

[5] 山区航道整治[M]. 北京: 人民交通出版社, 1975.

[6] 廖国平. 石滩整治[M]. 贵阳: 贵州教育出版社, 1997.

(本文编辑 武亚庆)