



大水位变幅水库回水变动区码头通航水流条件研究

叶成华¹, 朱本飞¹, 王云莉², 谢灵运², 张绍培², 许伟², 周家渝²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 重庆交通大学, 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 针对大水位变幅影响下的水库变动回水区码头前沿通航水流条件问题, 以在建的白鹤滩水电站坝址下游白石滩翻坝码头为例, 通过二维水动力数值模拟研究方法, 对大水位变幅水位进行分级, 开展白石滩翻坝码头通航水流条件的影响研究, 得出码头最高通航流量与分级水位呈线性的关系: 码头前沿水位越高通航水流条件越好, 当码头河段水位 ≥ 585 m时, 在各级流量下码头前沿通航水域水流条件均满足船舶安全停靠和通航的要求, 说明码头按照建成后在较高水位期间运行的设计方案是可行的。

关键词: 山区河流; 变动回水区; 大水位变幅; 码头; 通航水流条件

中图分类号: U 653.3⁺²

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0039-07

Study on navigable flow conditions of wharf in backwater fluctuation area of reservoir with large stage fluctuation

YE Cheng-hua¹, ZHU Ben-fei¹, WANG Yun-li², XIE Ling-yun², ZHANG Shao-pei², XU Wei², ZHOU Jia-yu²

(1. PowerChina Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou 311122, China;

2. Southwest Hydraulic Institute for Waterways, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: For the navigable water flow conditions at the front of the wharf in the backwater area of the reservoir under the influence of large stage fluctuations, we take Baishitan wharf being built in downstream of the Baihetan Hydropower Station as an example to study the navigable flow conditions of the Baishitan wharf by grading the water levels for the large stage fluctuation and adopting the method of two-dimensional hydrodynamic numerical simulation. As a result, the linear relationship between the highest navigable flow of the wharf and the graded water level is obtained: the higher the water level in the front of the wharf, the better the navigable flow conditions. When the water level of the wharf reaches 585 m or more, the water flow conditions at all discharges of the navigable water area in the front of the wharf meet the requirements for safe docking and navigation of ships. The results indicate that the design plan of the wharf to operate during the higher water level after completion is feasible.

Keywords: mountainous river; backwater fluctuation area of reservoir; large stage fluctuation; wharf; navigable flow condition

梯级开发作为大中型河流的开发方式之一, 能充分利用西南山区河流大落差, 最大限度地开发河流的水能资源, 同时改善河道通航水流条件。我国西南地区水能资源丰富, 但西南山区多为山地峡谷, 河谷狭窄, 坡面陡峻, 河床比降大, 水

流条件复杂。在西南山区长江上游河段大部分梯级开发中, 由于河道较窄, 枢纽上、下游水位落差较大, 布置过坝通航建筑物难度较大, 一般未建有通航建筑物, 使得河流原有的水路运输方式被迫中断, 导致大量运输船舶无法过坝通航, 只

能实现各个水库间进行区间通航，通航水流条件改善后的水路运输优势没有得到充分发挥。为此，在枢纽坝址上、下游附近修建翻坝码头是当前技术条件下最为行之有效的解决办法。目前在建的枢纽高坝大库较多，运行过程中库区最大年水位变幅高达 60 m，再加上枢纽水电站调峰和大坝泄洪作用，完全改变了天然河道的水流运动规律，使得回水变动区的水位过程既具有下游枢纽运行水位的年度长时段内大水位变幅变动特性，又具有由于上游枢纽电站日调节和大坝泄流引起的非恒定流特性，给翻坝码头的选址、设计、建设和运营造成较大困难^[1-2]。

通航水流条件是码头建设是否可行的重要因素，主要包括码头前沿水域流速、流态、水深以及水位变幅等。针对山区河流具有 60 m 大变幅的水库变动回水区内码头通航水流条件，国内外目前尚无专项研究。本文以金沙江白鹤滩水电站下游白石滩翻坝码头为例，主要考虑下游溪洛渡调度运行的影响，通过二维水动力数学模型模拟，分级研究大水位变幅下通航水流条件，并借鉴已有研究成果^[3]，提出白石滩码头最高通航流量与码头水位的关系，为码头设计的合理优化提供科学依据，亦可为今后山区河流大水位回水变动区码头的通航水流条件研究提供参考。

1 项目概况

金沙江下游干流河谷多为山地峡谷，河长 768 km，平均比降 0.93‰，区间流域面积 21.4 万 km²。河段分四级开发，从下至上已建和在建的水利枢纽

有向家坝水电站、溪洛渡水电站、白鹤滩水电站和乌东德水电站，均为高坝大库。白石滩翻坝码头坝址上距白鹤滩水电站坝址约 19.4 m，下距溪洛渡水库坝址约 174.6 km，处于溪洛渡水库回水变动区下段，码头通航水流条件一方面受上游白鹤滩水电站日调节和大坝泄洪非恒定流的影响；另一方面受下游溪洛渡水库运行坝前水位的影响。溪洛渡水库正常蓄水位 600 m，死水位 540 m，库容 115.7 亿 m³。工程河段河势见图 1。白石滩码头港区位于金沙江左岸，布置 3 个散货出口泊位，分为高、低两级作业平台，从上游至下游平台高程分别为 595、605 m，每级作业平台适应 10 m 水位差，布置 3 个出口泊位，平台长 315 m、宽 25 m（图 2）。码头设计代表船型为 3 000 吨级散货船，尺寸为 88 m×16.3 m×2.6 m（长×宽×吃水）。港区河段为内河 I 级航道标准，设计洪水期重现期为 20 a 一遇洪水标准。



图 1 工程河段河势

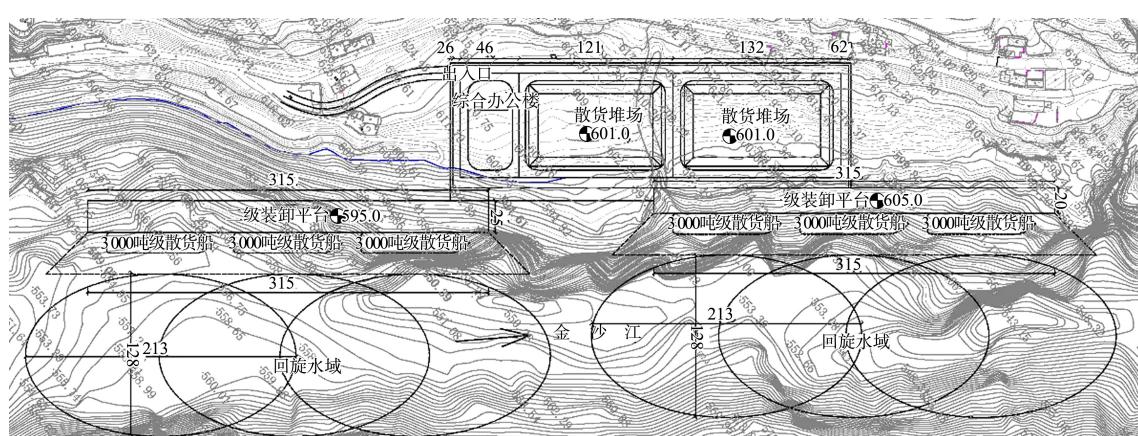


图 2 码头平面布置（高程：m，尺寸：m）

由于溪洛渡水库坝前年运行水位变幅较大, 实测回水变动区河段最大流速可达4~5 m/s, 码头前沿水流条件极其复杂。因此有必要对翻坝码头通航水流条件开展专题研究, 分析码头设计方案水位变幅适应性, 为码头优化设计提供参考。

2 二维水流数学模型的建立

2.1 控制方程

采用平面二维浅水方程^[4]作为水流的计算控制方程。

水流连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

水流运动方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

式中: z 为基准面以上的水位: $z = H + Z_b$ (Z_b 为床面高程); H 为水深; u 、 v 分别为流速在 x 、 y 方向上的分量; τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为河床床面切应力沿 x 、 y 方向上的分量; ϵ_{xx} 、 ϵ_{xy} 、 ϵ_{yx} 为紊动黏滞系数; ρ 为流体密度; g 为重力加速度。

2.2 计算范围及网格设置

模型模拟范围为白石滩港址以上 1.6 km 至白石滩港址以下 2.0 km, 全长 4.4 km。采用三角形+四边形耦合网格, 网格最小尺度 15 m², 网格最大尺度 100 m², 共划分网格 75 238 个。港址所在河段进行网格局部加密, 加密网格最大尺度不超过 15 m²。

2.3 边界条件

模型闭边界采用干湿判别的动边界。上边界为流量边界, 下边界为水位边界。

2.4 模型验证

对数学模型进行水面线验证和断面流速验证(图 3), 验证河段左、右岸实测水位与计算水位

差值在-0.02~0.04 m 范围内, 全段水位偏差不超过±0.05 m, 水位验证成果较好, 符合规范要求^[5]。各断面实测与计算流速验证基本一致, 主流带范围基本相同。从流速验证对比看, 各断面实测与计算流速大小偏差范围基本在 10% 以内。

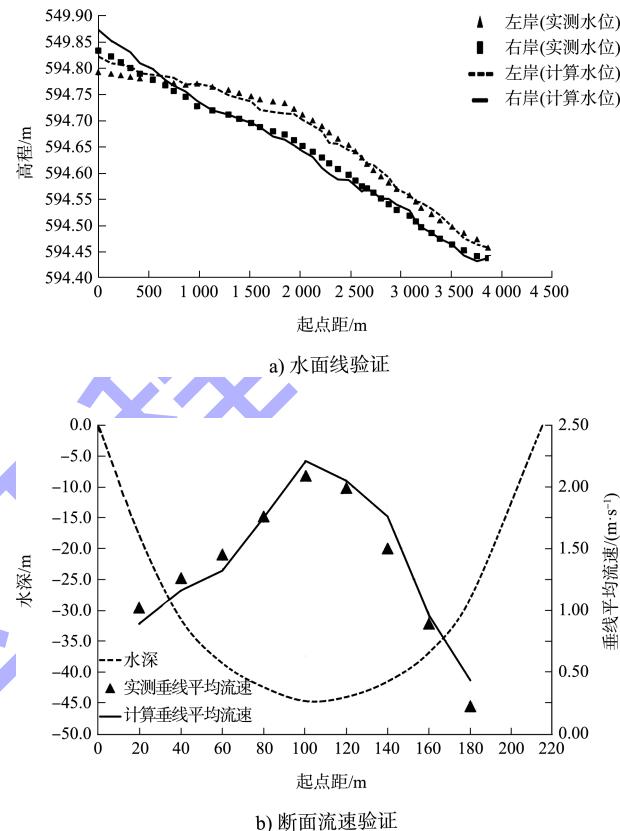


图 3 模型验证

2.5 试验计算条件

根据下游溪洛渡水库调度运行方式以及上游白鹤滩大坝泄洪及水电站日调节下泄流量特征, 全面研究不同特征流量与水位组合条件下, 码头前沿停泊及回旋水域水流条件。因此本文计算了 6 级水位(溪洛渡坝前对应水位分别为 550、560、570、580、590 和 600 m, 采用溪洛渡坝前至白鹤滩坝下长河段一维水流模型推算得到), 每级水位对应的流量在 658(白鹤滩水电站下泄最小流量)~25 300 m³/s(20 a 一遇洪水)之间进行组合, 以找到每级水位对应最大通航流量为目的, 最后得到的计算共计 31 组, 见表 1。

表 1 计算工况

工况	流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	溪洛渡坝前水位/m	备注
1	1 260		5、6月枯水年电站最小下泄流量
2	2 500	540 (死水位)	中间流量
3	3 000		中间流量
4	1 260		5、6月枯水年电站最小下泄流量
5	6 324	550	丰水年电站最大下泄流量
6	15 500		2 a—遇洪水($P=50\%$)
7	1 260		4~7月枯水年电站最小下泄流量
8	8 376	560	4~7月电站最大下泄流量
9	15 500		2 a—遇洪水($P=50\%$)
10	700		2、3、4、5、7月枯水年电站最小下泄流量
11	8 376		2、3、4、7月电站最大下泄流量
12	15 500	570	2 a—遇洪水($P=50\%$)
13	19 700		5 a—遇洪水($P=20\%$)
14	22 700		10 a—遇洪水($P=10\%$)
15	658		1、3、8、9枯水年最小下泄流量
16	8 481		1、3、8、9月电站最大下泄流量
17	15 500	580	2 a—遇洪水($P=50\%$)
18	19 700		5 a—遇洪水($P=20\%$)
19	22 700		10 a—遇洪水($P=10\%$)
20	25 300		20 a—遇洪水($P=5\%$)
21	658		1、2、9月电站最小下泄流量
22	8 397		1、2、9月电站最大下泄流量
23	15 500	590	2 a—遇洪水($P=50\%$)
24	19 700		5 a—遇洪水($P=20\%$)
25	22 700		10 a—遇洪水($P=10\%$)
26	25 300		20 a—遇洪水($P=5\%$)
27	8 397		9、10月电站最大下泄流量
28	15 500		2 a—遇洪水($P=50\%$)
29	19 700	600	5 a—遇洪水($P=20\%$)
30	22 700		10 a—遇洪水($P=10\%$)
31	25 300		20 a—遇洪水($P=5\%$)

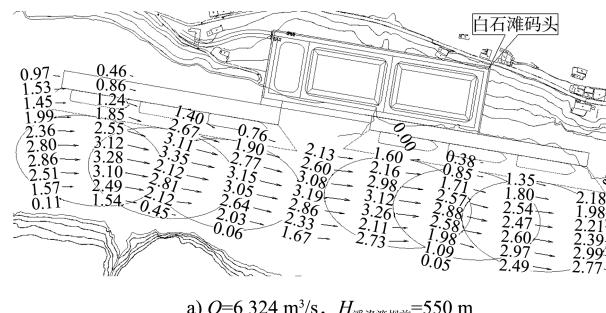
3 码头前沿通航水流条件分析

3.1 流速

已有实船试验研究表明,当码头前沿回旋水域流速大于3 m/s时,码头河段上、下行船舶进出港将比较困难。因此,本项目以3.0 m/s水流流速作为码头前沿水域分级水位最高通航流量的判别标准,即在同一坝前水位下,当遭遇某一上游来流量时码头前沿水域略超过3 m/s时,则认为此流量为该级水位下的最高通航流量限值。码头前沿水域包括停泊水域和回旋水域,水域划分标准依

据JTS 166—2020《河港总体设计规范》。

各级水位流量工况下,白石滩码头前沿水域分级水位对应最高通航流量流场分布见图4。



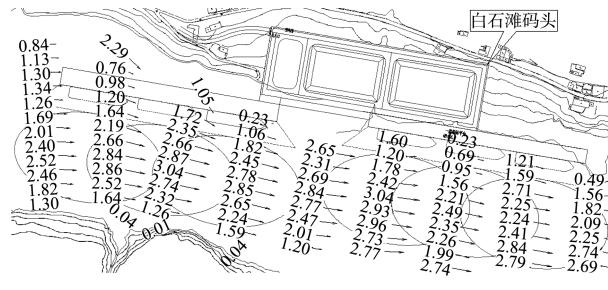
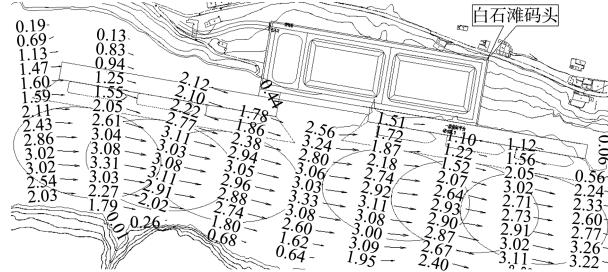
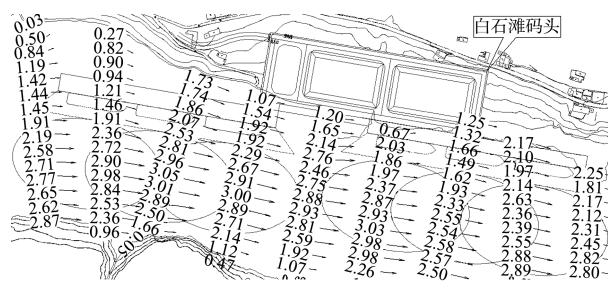
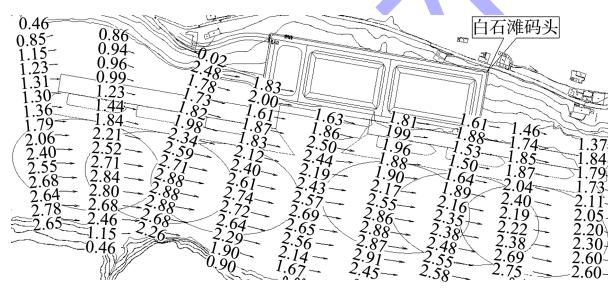
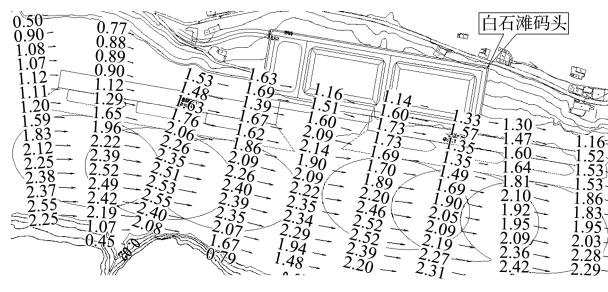
b) $Q=8\ 376\ m^3/s$, $H_{\text{溪洛渡坝前}}=560\ m$ c) $Q=15\ 500\ m^3/s$, $H_{\text{溪洛渡坝前}}=570\ m$ d) $Q=19\ 700\ m^3/s$, $H_{\text{溪洛渡坝前}}=580\ m$ e) $Q=25\ 300\ m^3/s$, $H_{\text{溪洛渡坝前}}=590\ m$ f) $Q=25\ 300\ m^3/s$, $H_{\text{溪洛渡坝前}}=600\ m$

图 4 白石滩码头前沿流场分布 (单位: m/s)

计算结果表明, 当溪洛渡坝前水位为 550 m、上游来流 $Q=1\ 260\ m^3/s$ 时, 码头前沿水域最大流速达到 1.84 m/s, 水流集中于河道主槽; 来流增大至 $Q=6\ 324\ m^3/s$ 时, 码头前沿回旋区域最大流速相应增大至 3.15 m/s, 流速普遍在 1.6~2.9 m/s 范围内, 水流流速已处于临界状态; 来流增大至 15 500 m³/s 时, 码头前沿回旋区域最大流速相应增大至 4.10 m/s, 区域内流速普遍超过 3 m/s, 水流条件较差。可见, 溪洛渡坝前水位 550 m、来流 6 324 m³/s 可作为该水位条件下通航流量的上限。

当溪洛渡坝前水位为 560 m、来流为 8 376 m³/s 时码头前沿水域最大流速为 3.04 m/s, 流量 8 376 m³/s 可以作为该水位条件下通航流量上限值; 当溪洛渡坝前水位为 570 m 时, 码头河段水面逐渐平缓, 当来流增大至 2 a 一遇洪水流量 $Q=15\ 500\ m^3/s$ 时, 码头前沿回旋区域最大流速相应增大至 3.11 m/s, 流速普遍在 2.05~2.90 m/s 范围内, 该级流量可作为该水位条件下通航流量的上限; 当溪洛渡坝前水位为 580 m 时, 码头前沿通航水流条件得到明显改善, 通航流量的上限增加至 5 a 一遇洪水流量 $Q=19\ 700\ m^3/s$; 当溪洛渡坝前水位为 590~600 m 时, 码头前沿通航水流条件得到极大改善, 当上游来流为 20 a 一遇洪水流量 25 300 m³/s 时, 码头前沿水流最大流速为 2.88 m/s 左右, 最大通航流量已达到规范规定的Ⅲ级航道码头 20 a 一遇设计标准, 并有一定的富余。

白石滩翻坝码头的各级坝前水位与最高通航流量关系如图 5 所示。从图 5 可看出, 在水位 560 m 和 580 m 处出现了拐点: 水位 560 m 拐点说明白石滩码头河段水位 560 m 以下河道流速运动规律属于天然河道运动规律, 不受下游溪洛渡水库运行调度方式的影响; 而水位 590 m 拐点说明水位高于 590 m 的最大通航流量还有进一步提升的空间。水位 560~590 m 之间, 水位与最高通航流量基本呈线性关系, 随着坝前水位的抬高, 码头前沿水流条件改善效果明显, 最高通航流量明显增加。

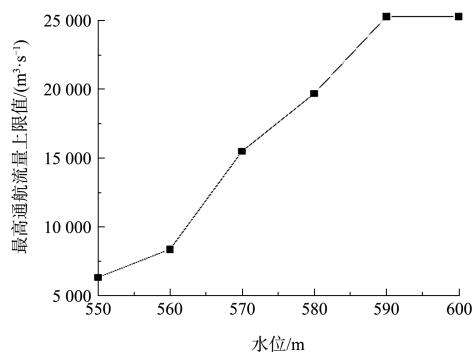


图 5 坝前水位与翻坝码头前沿水域最高通航流量上限的关系

3.2 水深

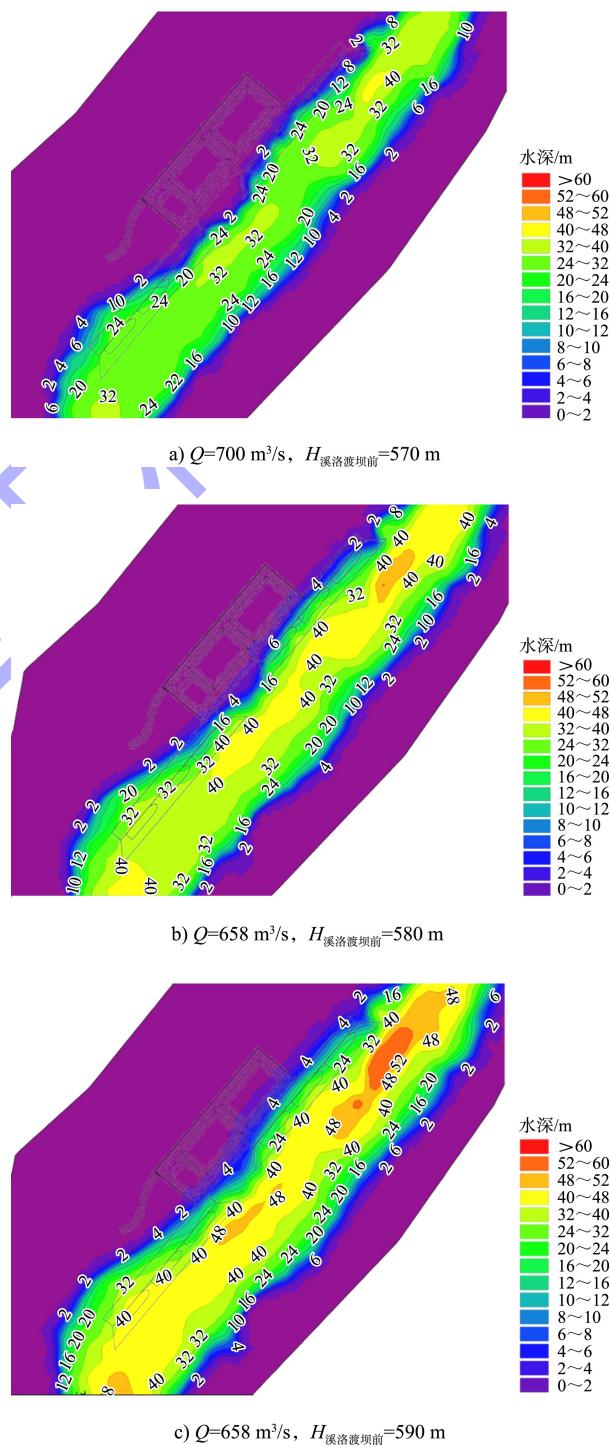
白石滩港址处于溪洛渡回水变动区下段，在较高水位时(>560 m)，码头前沿水深受溪洛渡水电站调度运行方式影响较为明显；溪洛渡坝前按低水位运行时，江面较窄，码头前沿水深不受下游溪洛渡水库运行方式的影响。

当溪洛渡坝前水位在 550~560 m，上游来流流量较低($700\sim1260$ m³/s)时，白石滩港址河段水面线收窄，一级装卸平台前沿水深不足2 m，二级装卸平台前沿水深部分达到10 m，部分水深仍不足2 m；当上游来流流量增大时，河段整体水面提升，一级装卸平台前沿部分水域水深仍不足2 m，二级装卸平台前沿水深基本达到4~24 m，水深较为充裕，但码头前沿河段水面宽度较窄，符合船舶航深条件的江面宽度仅为85~95 m，远不能够满足回旋区域宽度要求。

当溪洛渡水电站运行水位逐渐提升时，港址河段水面逐渐展宽，码头前沿水深加大，码头前沿水域通航水流条件得到逐渐改善。当溪洛渡坝前水位为570 m时，各级流量下，一级装卸平台前沿水深达到4~32 m，二级装卸平台前沿水深达到16~32 m，水深充裕。该水位条件下符合船舶航深条件的河宽达到135~140 m，基本满足回旋区域宽度要求。

当溪洛渡坝前水位为580~600 m时，随着水

位的进一步升高，平台前沿水深进一步加深，一级装卸平台前沿水深基本在20 m以上，二级装卸平台前沿水深基本在30 m以上，水深充裕。同时河段水面宽阔，满足回旋区域平面尺寸要求。白石滩码头前沿航深见图6。



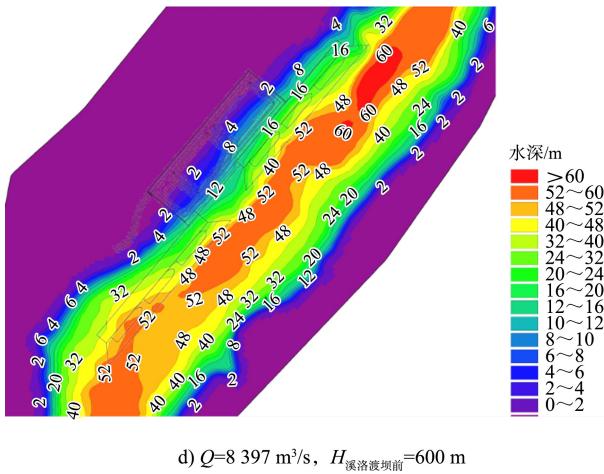


图 6 白石滩码头前沿航深

3.3 码头设计方案水位变幅适应性

根据上述结果分析, 当溪洛渡坝前水位为 550~560 m 时, 白石滩码头河段属于天然河道, 各级流量下, 江面较窄, 流速较大, 码头前沿船舶作业水深不足, 最大通航流量较小, 码头前沿水域通航水流条件不满足规范设计要求; 当溪洛渡坝前水位为 570~580 m 时, 码头河段已处于溪洛渡回水影响范围, 各级流量下, 码头前沿水域水深富余, 最大通航流量提高至 2~5 a 一遇洪水流量, 通航水流条件得到明显改善; 当溪洛渡坝前水位为 590~600 m 时, 各级流量下, 码头前沿水域水深富余, 最大航流量已略超过 20 a 一遇洪水流量, 通航水流条件得到较大改善, 完全满足 III 级航道码头设计规范要求。

根据白石滩码头设计方案, 码头最低通航水位为 585 m, 即当白石滩码头河段水位 $\geq 585 \text{ m}$ 时, 设计要求最高通航流量达到 20 a 一遇洪水流量, 与数模计算成果基本一致, 说明设计方案对码头河段的大水位变幅适应性较好。

4 结论

1) 白石滩翻坝码头处于溪洛渡水库回水变动区下段, 码头通航水位条件既受白鹤滩水电站日调节和大坝泄洪非恒定流的影响, 又受下游溪洛

渡水库坝前运行水位的影响, 而溪洛渡水库年度最大水位变幅达 60 m, 码头河段通航水流条件较为复杂, 因此采用研究分级水位对应通航水流条件的方法进行码头河段通航水流条件的研究方法是正确的。

2) 白石滩码头河段水位受下游溪洛渡坝前运行影响时段内, 其各级水位对应最高通航流量与水位基本呈线性关系, 随着坝前水位的抬高, 码头前沿水流条件改善效果明显, 最高通航流量明显增加。

3) 设计方案码头最低通航水位为 585 m, 和计算分析结果基本一致, 即当码头河段水位 $\geq 585 \text{ m}$, 码头通航条件可满足最高通航流量为 20 a 一遇洪水流量的设计要求。

4) 白石滩码头河段通航水流条件还受上游白鹤滩水电站日调节和大坝泄洪引起的非恒定流影响, 因此下一步开展白鹤滩日调节和大坝泄洪非恒定流对白石滩码头的通航条件影响研究, 从非恒定流引起白石滩码头的水位日变幅、小时变率等水位变化特征参数的角度分析码头设计方案的合理性。

参考文献:

- [1] 汤益佳, 沈莉.白鹤滩水电站翻坝运输方案研究[J].海峡科技与产业, 2017(12): 138-140.
- [2] 徐甜, 汪文诚, 周侃.大水位差大件运输码头平面布置特点及难点[J].武汉勘察设计, 2014(4): 37-40.
- [3] 重庆西南水运工程科学研究所.金沙江向家坝水电站正常运行期非恒定流对下游航道条件影响长河段物理模型试验研究报告[R].重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2017.
- [4] 杨国录.河流数学模型[M].北京: 海洋出版社, 1993.
- [5] 交通部天津水运工程科学研究所.内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程: JTS/T 231-4—2018[S].北京: 人民交通出版社, 1999.