

瓯江三溪口航电枢纽引航道布置优化试验研究

李艳富, 杨宇, 韩昌海, 李君

(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 水利部水科学与水工程重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 三溪口枢纽位于多湾河段连接处, 引航道及口门区水流条件复杂, 上游半开敞式引航道受枢纽泄流影响较大, 下游引航道受下游45°弯道和小支流影响较大。通过枢纽整体水力学模型试验分析了引航道口门区的通航水流条件, 并给出了优化布置方案。枢纽泄洪水库动水对上游引航道内水流干扰大, 通过对比分析提出了保证通航安全的枢纽泄洪调度建议。通过合理疏浚河道凸岸滩地, 并适当调整引航道布置长度和角度, 有效地改善了下游引航道口门区的通航水流条件。

关键词: 三溪口枢纽; 弯道凸岸; 引航道; 口门区; 通航水流条件

中图分类号: U641.2⁺11

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)02-0089-06

在多湾河道兴建航电枢纽工程, 难点之一是保证引航道口门区及连接段的通航水流条件良好。在弯道或入汇水流影响下, 口门区出现斜流或不稳定流影响通航安全。基于现行规范^[1], 具有山区河流特点的曲线引航道布置型式被广泛应用^[2], 同时导流墩^[3-4]、导航墙开孔^[5]、丁潜坝等措施有效地改善了通航水流条件^[6-7]。三溪口航电枢纽是瓯江干流规划的下游梯级水电工程, 该枢纽建成运行后将发挥重要的发电和航运效益。枢纽泄水闸坝和通航建筑物集中布置于多湾河段连接处, 上游引航道采用半开敞型式, 引航道及口门区水流条件受泄水闸泄水影响大, 下游引航道口门区处于凸岸边滩外侧, 其下游河道呈45°弯道, 口门区水流条件难以达到通航规范要求, 此外, 汛期右岸有一小支流进入下游引航道内干扰通航, 由此可见, 三溪口枢纽引航道口门区及连接段水流条件复杂, 需要研究论证: (1) 泄洪闸运行对半开敞式上游引航道通航的影响; (2) 弯道凸岸引航道布置方案; (3) 汛期右岸小支流对下游引航道口门区的影响, 以解决三溪口枢纽通航。本文的研究成果对类似工程具有重要的借鉴意义。

1 工程概况

瓯江是浙江南部重要水道, 其干流河段共规划5个梯级电站, 航道等级为IV级。三溪口枢纽是第4个梯级, 以发电为主, 兼有航运和防洪等综合效益。枢纽从左到右依次为电站厂房、12孔深槽泄洪闸、10孔浅滩泄洪闸以及船闸等建筑物。通航建筑物为500t级单线单级船闸, 闸室有效尺度为210m×23m×3.5m(长×宽×门槛水深)。上游引航道采用半开敞直线型式, 调顺段、停泊段以及口门区位于水域较为开阔的库区, 靠近泄水闸坝侧采用短导航隔水墙, 靠岸侧采用分层柱梁透水式导航架。下游引航道位于河道凸岸, 采用限制性直线布置形式, 口门区位于主河道收缩且45°转弯区, 靠岸侧引航墙与凸岸边滩间为小支流泄流道, 三溪口枢纽布置如图1所示。

上游通航水位为正常蓄水位18.0m, 电站机组满发流量为1227m³/s, 发电余水量通过逐级开启泄洪闸均匀泄洪。通过上游引航道通航水流试验确定最大通航流量。根据规范标准, 引航道口门区流速需满足: 纵向流速≤2m/s, 横向流速≤0.3m/s, 回流流速≤0.4m/s; 引航道导航段和调顺段宜为静水区, 制动段和停

收稿日期: 2013-08-20

作者简介: 李艳富(1983-), 女, 黑龙江鹤岗人, 工程师, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: yfli@nhri.cn

泊段的水面最大纵向流速 ≤ 0.5 m/s,横向流速 ≤ 0.15 m/s;当引航道内难以避免出现取排水设施,应保证设施不得占用引航道尺度。

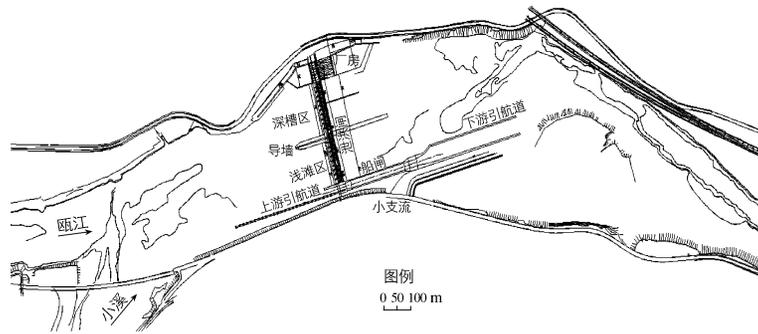


图 1 三溪口枢纽总体布置

Fig. 1 General layout of Sanxikou hydroproject

2 模型设计

采用比尺为 1 : 100 的正态模型,满足重力相似准则。试验模拟范围充分反映工程段河道流态,上下游预留足够的流态过渡段以保证上下游口门区水流流速分布的相似性。模型上游安装量水堰测量控制枢纽流量,采用标准测针读取上下游水位,精度为 0.1 mm,误差为 ± 0.05 mm。采用南京水利科学研究院自行研制的光电式旋桨流速仪测量流速,起动流速为 1 cm/s,仪器型号 LS-II、精度为 0.01 cm/s,误差为 ± 0.01 cm/s。

3 上游引航道通航试验

上游引航道处于较为宽阔的库区,采用半开敞直线型式,导航段、调顺段和停泊段沿岸呈直线布置,引航道中心线与坝轴线垂直。引航道直线段长度满足规范要求,相关研究^[8]表明该布置方案可使船闸尽早地转向驶入宽广的水域,常年洪水流量下可安全通航。临河侧设置 50 m 短导航隔墙(大于 1 倍船长),靠岸侧设置分层柱梁透水式导航架,长 400 m 且平行于航道中心线,其下部重力式挡墙结构顶高程为 12.0 m,上部导航架顶高程为 20.0 m。可见通航水位 18.0 m 处于透水式导航架结构区,该结构起着削弱回流和斜流等作用,并可减弱由库区动水带来的水位波动^[4,9]。

上游引航道口门区位于小溪支流入汇口下游 400 m 处。入汇水流易干扰口门区水流流态,此外,泄水闸泄水时,动水牵引引航道内静水波动,因此对上游引航道及口门区的水流流速特征进行了试验研究。试验流量选取电站满发流量 1 227 m³/s 以及 2 000, 2 500, 3 000, 3 500 m³/s 几组来流量,上游通航水位为 18.0 m。枢纽泄洪通过逐级开启泄洪闸均匀泄洪,并分为深槽泄水闸开启、浅槽和深槽泄水闸组合泄水两种方式。在保证通航流量最大化和通航安全的前提下,确定适宜的枢纽泄洪调度,以及根据安全通航水流条件要求确定枢纽最大通航流量。

由表 1 可见,当流量小于 2 000 m³/s 时,小溪无来流,电站满发余洪量通过深槽泄水闸泄洪,右侧浅滩库区水流平缓,引航道及口门区的各项流速指标都满足通航要求。随着流量增加到 2 500 m³/s 时,深槽泄水闸泄水量增加,对右侧浅滩库区静水的拖曳作用加强,使得引航道停泊段出现横向流速,口门区的横向和纵向流速增加,各项流速指标仍满足通航要求。

当流量为 3 000 m³/s,电站满发余洪量仅通过深槽泄水闸泄洪时,受坝址上游弯道影响,库区出现大面积平缓回流区(图 2),同时受小溪入流对引航道口门区斜流作用,引航道及口门区的横向流速增加,但仍满足通航要求。当流量增加到 3 500 m³/s,深槽泄水闸增加开度泄洪,此时停泊段最大横向流速为 0.14 m/s,引航道导航段和调顺段局部出现不稳定流速,不满足通航要求。

表1 上游引航道及口门区最大流速测量值

Tab.1 Experimental results of the maximum flow velocities in the entrance area and the upper approach

流量/(m ³ ·s ⁻¹)		电站过流/ (m ³ ·s ⁻¹)	泄水闸 开启方式	最大流速测量值/(m·s ⁻¹)								
干流	小溪支流			导航段和调顺段			停泊段			口门区		
				横向	纵向	回流	横向	纵向	回流	横向	纵向	回流
1 227	0	1 227	关闭	0	0	0	0	0.18	0	0.13	0.35	0
2 000	0	1 227	深槽区 1#-6#孔	0	0	0	0	0.24	0	0.16	0.52	0
2 500	0	1 227	深槽区 1#-5#孔	0	0	0	0.02	0.26	0	0.18	0.68	0
2 010	990	1 227	深槽区 1#-12#孔	0	0	0	0.03	0.28	0	0.26	0.69	0
			浅滩区 13#-18#孔	0.02	0.04	0	0	0.40	0	0.30	0.70	0
2 500	1 030	1 227	深槽区 1#-12#孔	0	0	0.04	0.14	0	0.09	0.24	0.80	0
			浅滩区 13#-22#孔	0	0.27	0.09	0	0.45	0	0.20	0.81	0

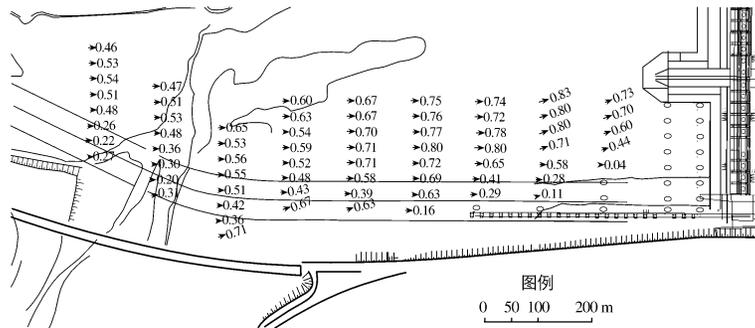


图2 流量为 3 000 m³/s 电站满发深槽泄水闸开启时引航道及口门区流速分布(单位: m/s)

Fig.2 Velocity distribution along the upper approach and its entrance area under the condition of 3 000 m³/s discharge of the deep drainage sluice only (unit: m/s)

当流量为 3 000 m³/s, 电站满发余洪量通过深槽泄水闸和浅滩泄水闸下泄时, 浅滩库区处于动水区, 对引航道内静水的牵引作用明显, 导航段内水体开始流动, 当浅滩左侧泄水闸部分开启时, 导航段出现 0.02 m/s 横向流速, 当浅滩泄水闸全部开启时, 导航段出现 0.09 m/s 回流流速, 均不满足通航要求。

综上所述, 在满足瓯江梯级航电开发项目通航要求条件下, 建议最大通航流量为 3 000 m³/s。在通航条件下枢纽泄洪调度以增加深槽泄水闸开度为主, 以减少枢纽泄洪对上游引航道通航影响。为了保证船舶安全, 航线要与小溪入汇口保持足够的安全距离, 并设置禁航标志。

4 下游引航道通航试验

4.1 原设计方案口门区通航水流条件

下游引航道布置于弯道凸岸, 采用限制性直线型布置型式, 导航段、调顺段和停泊段沿岸呈直线布置, 引航道中心线与坝轴线垂直(图 1)。引航道直线距离为 460 m, 引航道宽度为 50 m, 底板高程为 3 m。引航道口门区位于近 45° 弯道顶部, 航线与河道主流夹角较大, 会出现大面积斜流影响通航安全。口门区水流条件复杂是山区河道航电枢纽引航道布置的常见问题, 需根据工程自身问题提出合理方案和措施以保证通航安全^[9-10]。此外, 本工程属于在建工程, 引航道受到汛期右岸小支流影响, 通过引航道外开挖过水导渠使支流水流沿引航道导墙外流动(图 1), 不影响引航道。引航道口门区距离枢纽较远, 枢纽泄洪方式对下游引航道及口门区水流影响较小。

针对上述问题, 对下游引航道及口门区的水流流速特征进行了试验研究, 试验流量选取 2 500 m³/s, 暂

不考虑右岸支流来流。由流速测量结果可知,引航道口门区局部回流流速达到 0.4 m/s , 横向流速普遍大于 0.3 m/s , 最大值可达 0.7 m/s , 远远超出通航安全流速值。经分析, 直线引航道口门区处于河流弯道顶部, 航道中心线与河道主流的夹角过大是造成口门区大范围横向流速超标的主要原因, 应通过调整引航道航线或口门区位置, 减小口门区内主流与航线的夹角, 以达到改善口门区水流条件的目的。

4.2 优化方案布置试验

针对原方案存在的问题从改变航线和口门区位置入手提出修改方案, 试验流量选择为最大通航流量 $3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。3种修改方案见图3, 各方案下流速测量结果见表2。

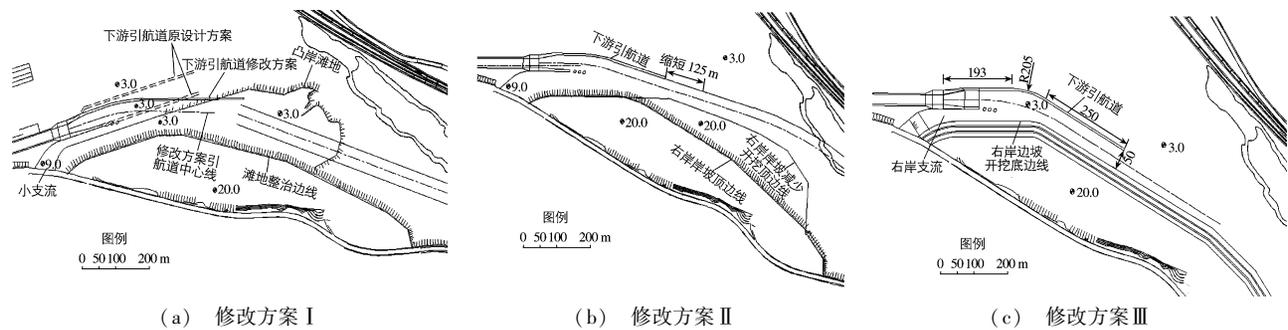


图3 下游引航道修改方案

Fig. 3 Improved schemes of the lower approach

表2 下游引航道口门区500 m范围内的流速

Tab. 2 Experimental results of the maximum flow velocities in the entrance area of the lower approach

方案	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	横向流速		纵向流速		回流流速	
		最大值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	超标比例	最大值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	超标比例	最大值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	超标比例
原方案	2 500	0.73	51.9%	2.25	11.1%	0.41	3.7%
修改方案 I	3 000	0.28	0	1.03	0	0.65	14.8%
修改方案 II	3 000	0.45	25.9%	2.30	25.9%	0.47	3.7%
修改方案 III	3 000	0.25	0	1.12	0	0.31	0

修改方案 I 中, 疏浚河道凸岸边滩, 拓宽河道宽度, 并将直线型引航道改变为曲线型引航道, 这样引航道和航线在经疏浚后的边滩上靠近右岸布置(图3(a))。该修改方案中口门区航线与河道主流夹角减小至 22° , 满足安全范围 $20^\circ \sim 25^\circ$ 的要求^[12-13]。流速测量结果表明, 河道凸岸开挖方案大大增加了河道水流的过水断面, 口门区范围内的河道水流均匀下泄, 横向流速大大减小, 满足安全通航要求, 但在口门区范围内出现大面积回流区, 航道右边线上的回流流速达 0.65 m/s (图3(a)), 超过通航水流条件要求。

在修改方案 I 的基础上, 缩短引航道停泊段长度, 并减少右岸滩地开挖量; 修改方案 II 如图3(b)所示, 该方案中引航道口门区的回流区面积减小, 回流流速减小, 但横向流速达 0.45 m/s , 纵向流速达 2.3 m/s , 仍不满足通航要求。

从优化口门区位置和引航道角度入手提出修改方案 III(推荐方案), 保持修改方案 I 的河道凸岸滩地疏浚方案; 将引航道顺向经疏浚的凸岸岸坡布置, 并保证引航道内调顺段具有足够宽度, 引航道直线段长度设为 193 m (约3~4倍船长), 接 98 m 圆弧(约2倍船长), 半径为 205 m , 转弯角度为 27° , 再接直线型停泊段; 停泊段长度为 250 m (约4~5倍船长), 保证足以压缩口门区回流范围; 调整停泊段导流墙角度, 进一步减小引航道与河道主流方向夹角至 8° ; 靠近右岸一侧采用 100 m 长导航墙(约2倍船长), 堤头设置多个消能墩, 右岸支流不影响引航道导航段和调顺段水流条件, 修改方案 III 如图3(c)所示。该方案中口门区水流条件明显改善, 口门区水流平顺, 且与河道主流方向基本一致, 回流流速和横向流速均很小, 最大回流流速值和最大横向流速值为 0.31 和 0.14 m/s , 最大纵向流速为 1.92 m/s , 满足通航水流条件要求。

综合修改方案试验结果可知,若引航道口门区处于近 45° 弯道顶部,通过合理疏浚整治河道凸岸滩地,将河道拓宽至足够宽度以减小河道水流转弯角度,进而避免口门区范围内出现斜流导致横向流速超标;此外,适当调整引航道导墙长度和角度,使得引航道导墙顺向河道主流,可大大减小回流范围和回流流速,使得口门区流速满足通航要求。

4.3 右岸支流对引航道及口门区水流的影响

现行规范^[1]规定,应避免引航道内布置排水设施,但本枢纽工程属于在建工程,为免受汛期右岸小支流影响,对下游引航道最终修改方案开展右岸支流影响试验。支流导渠中心线与引航道导航段中心线平行,导渠出口为引航道调顺段,入汇水流与引航道内的水流夹角较小,并设置3个消能墩以减弱水流影响。试验流量选定为上游来流 $1\,227, 2\,000$ 和 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$,并根据流域资料设定右岸支流为 $0, 60, 120$ 和 $180\text{ m}^3/\text{s}$,其中最大流量 $180\text{ m}^3/\text{s}$ 为该支流区间百年一遇同频洪水,重现期远高于最大通航流量重现期。

试验结果表明,上游来流 $1\,227\text{ m}^3/\text{s}$ 时引航道内水深为 4.99 m ,当支流流量不大于 $60\text{ m}^3/\text{s}$ 时,引航道和口门区的水流满足通航要求,随着支流流量超过 $120\text{ m}^3/\text{s}$,支流进入引航道的流量增加,对引航道内的静水干扰增强,引航道停泊段出现回流,纵向流速超过 0.5 m/s ,不满足通航要求;值得一提的是,支流流量 $120\text{ m}^3/\text{s}$ 的重现期远高于上游来流量 $1\,227\text{ m}^3/\text{s}$ 的重现期,因此在小流量低水位条件下,受支流流量影响的引航道水流条件满足通航要求;上游来流 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时引航道内水深为 5.87 m ,当右岸支流流量超过 $180\text{ m}^3/\text{s}$ 时,引航道停泊段出现回流和横向流速,纵向流速普遍大于 0.5 m/s ,不满足通航要求;上游来流 $3\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时引航道内水深 7.0 m ,水深明显增加,当右岸支流来流增加到 $180\text{ m}^3/\text{s}$ 时,对引航道内静水的干扰作用较弱,水流条件满足通航要求。综上所述,下游引航道最终修改方案能够满足最大通航流量的通航要求。此外,建议采取适当的保护或警示措施,保证船舶安全进出下游引航道。

5 结 语

(1)半开敞上引航道受枢纽泄水闸运行调度影响较大,水库动水范围对引航道内水流干扰程度不同,通过不同运行调度方式对比试验,表明在通航条件下枢纽泄洪调度以深槽泄水闸增加开度为主,以减少枢纽泄洪对上游引航道通航影响。

(2)当引航道口门区处于弯道顶部,通过合理疏浚河道凸岸滩地,拓宽河道至足够宽度,进而大大缩小航线与河道主流夹角,并适当调整引航道导墙长度和角度,使得口门区流速满足通航要求。

(3)当无法避免引航道内出现支流入汇情况,若引航道内水深足够,可通过合理布置支流导渠和引航道以及消能墩等结构,保证引航道及口门区水流条件满足通航要求。

参 考 文 献:

- [1] JTJ 305-2001, 船闸总体设计规范[S]. (JTJ 305-2001, Code for master design of shiplocks [S]. (in Chinese))
- [2] 郑宝友, 戈龙仔, 周华兴. 对《船闸总体设计规范》中引航道布置及尺度的讨论[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 44-48. (ZHENG Bao-you, GE Long-zai, ZHOU Hua-xing. Discussion on layout and dimension of approach channel in "Code for Master Design of Shiplocks" [J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(4): 44-48. (in Chinese))
- [3] 魏晶, 宋根才, 蒋峰. 郁江老口枢纽船闸布置与通航水流条件分析[J]. 西部交通科技, 2012(8): 144-146. (WEI Xiao, SONG Gen-cai, JIANG Feng. Analysis of shiplock arrangement and navigation flow condition at Yujiang Laokou hinge [J]. Western China Communication Science & Technology, 2012(8): 144-146. (in Chinese))
- [4] 彭伟. 弯曲河段船闸引航道通航水流条件及改善措施研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010. (PENG Wei. Research and improving on flow conditions at the entrance of approach channel of curved reach [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2010. (in Chinese))
- [5] 郝品正, 李军, 徐国兵. 微弯分汊河段航电枢纽总体布置与通航条件优化试验研究[J]. 水运工程, 2004(11): 66-69. (HAO Pin-zheng, LI Jun, XU Guo-bing. General layout and experimental study on navigable condition optimization of

- navigation-power junction at slightly curved braided reach[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2004(11): 66-69. (in Chinese))
- [6] 张亮, 卢启超. 船闸引航道口门区通航水流条件改善措施的综述[J]. *科技信息*, 2009(25): 387-388. (ZHANG Liang, LU Qi-chao. Review on improving measures for navigable flow condition at the entrance of approach channel[J]. *Science & Technology Information*, 2009(25): 387-388. (in Chinese))
- [7] 周华兴, 郑宝友. 船闸引航道口门区通航水流条件改善措施[J]. *水道港口*, 2002(2): 81-86. (ZHOU Hua-xing, ZHENG Bao-you. Improving measures for navigable flow condition at the entrance of approaching channel[J]. *Journal of Waterway and Harbour*, 2002(2): 81-86. (in Chinese))
- [8] 刘彦. 山区河流渠化枢纽总体布置综合研究[R]. 成都: 四川省交通厅内河勘察设计研究所, 2003. (LIU Yan. Comprehensive study on general layout of mountainous rivers and drainage of the hub[R]. Chengdu: Sichuan Communications Surveying & Design Institute, 2003. (in Chinese))
- [9] 于广年. 改善周口船闸通航水流条件研究[J]. *中国水运*, 2012(1): 156-158. (YU Guang-nian. Study on the improvement of navigable flow condition of Zhoukou ship lock[J]. *China Water Transport*, 2012(1): 156-158. (in Chinese))
- [10] 李金合, 郑宝友, 周华兴. 那吉航运枢纽左岸船闸通航水流条件试验研究[J]. *水道港口*, 2002(4): 262-267. (LI Jin-he, ZHENG Bao-you, ZHOU Hua-xing. Study on flow condition for the left bank lock of Naji shipping-junction[J]. *Journal of Waterway and Harbour*, 2002(4): 262-267. (in Chinese))
- [11] 赵志舟, 徐红, 彭凯. 乌江银盘电站下游引航道布置及口门区通航条件研究[J]. *水运工程*, 2008(3): 82-86. (ZHAO Zhi-zhou, XU Hong, PENG Kai. Arrangement of downstream approach channel and navigation condition in the entrance area of Yinpan Power Station on the Wujiang River[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2008(3): 82-86. (in Chinese))
- [12] 李焱, 郑宝友, 卢文蕾, 等. 引航道与河流主航道的夹角对通航条件影响试验[J]. *水道港口*, 2009, 30(1): 42-48. (LI Yan, ZHENG Bao-you, LU Wen-lei, et al. Test on navigation condition influenced by the angle between approach channel and main channel[J]. *Journal of Waterway and Harbour*, 2009, 30(1): 42-48. (in Chinese))
- [13] 卢文蕾. 船闸口门区与连接段为弯道时的通航条件[J]. *水运工程*, 2009(10): 107-111, 117. (LU Wen-lei. Navigation condition when entrance area and connecting segment of lock are in bend[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2009(10): 107-111, 117. (in Chinese))

Optimal experiments of layout of an approach channel for Sanxikou navigable power project

LI Yan-fu, YANG Yu, HAN Chang-hai, LI Jun

(*State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Key Laboratory of Navigation Structures, Key Laboratory of Water Science and Engineering of Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*)

Abstract: Sanxikou navigable power project is located at the river junction of two river bends. The flow pattern along the entrance area of the upper approach channel is disturbed by the dynamic water in the reservoir near the curved or braided reaches, and the river bend and the inflow of a small tributary disturb the flow pattern in the entrance area of the lower approach channel. In this study, the navigable flow conditions in the approach channel and its entrance area have been analyzed through the hydraulic model tests. Based on the contrastive analysis of experiment results, suggestions for the flood release of the navigable power project for safe navigation are made. Reasonably dredging the convex bank along the channel and regulating the length and angle of the approach channel can effectively improve the navigable flow conditions at the entrance area of the lower approach channel of Sanxikou navigable power project. The optimized management and measures to improve the shipping problems of the lower approach channel are given. These research results have important reference values for the similar projects in the future.

Key words: Sanxikou navigable power project; meandering river channel; approach channel; entrance area of approach channel; navigation condition