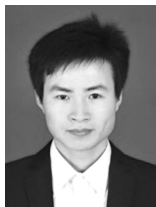


· 通道及通航建筑物 ·

高坝枢纽新建通航建筑物轴线及通航条件研究



李明¹, 王能¹, 章日红², 乾东岳²

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410008;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 针对山区已建高坝枢纽新建通航建筑物轴线布置受河道窄、水头高、电站泄流及已有建筑物影响等条件限制的问题, 依托贵州清水江白市水电站枢纽新建通航建筑物工程, 采用 1:100 正态整体水工模型与自航遥控船模相结合的技术手段, 对多条轴线布置方案进行通航水流条件及船舶航行操控研究与优化。试验结果表明, 右岸轴线布置方案通航水流条件及船舶航行状态均较好, 为推荐方案。研究成果解决了工程关键问题, 可供类似已建高坝水利枢纽新建或扩建通航建筑物工程参考借鉴。

关键词: 高坝枢纽; 通航建筑物; 轴线; 通航条件

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0098-09

Study on the axis and navigation conditions of newly-built navigable buildings in high dam junction

LI Ming¹, WANG Neng¹, ZHANG Ri-hong², QIAN Dong-yue²

(1. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co. Ltd, Hunan, Changsha 410200, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Key Laboratory of Engineering Sediment, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: The axis layout of the newly-built navigation buildings of the built high dam junction in mountainous area is limited by conditions such as the narrow river channel, high water heads, the discharge of power station, and existing buildings. In view of the problems, based on the new navigation building project of Baishi hydropower station in Qingshui River, Guizhou Province, using the technical means of 1:100 normal integral hydraulic model and self navigation remote control ship model, the navigation water flow conditions and ship navigation research and optimization of the multiple axis layout schemes are carried out. The test results show that the navigable flow condition and ship navigation state of the right bank axis layout scheme are good, which is the recommended scheme. The research results have solved the key problems of the project, which can be used for reference for the new or expanded navigation building projects of similar high dam water conservancy projects.

Keywords: high dam junction; navigation structures; axis; navigation conditions

1 工程概况

白市电站枢纽坝址位于贵州省黔东南州天柱县白市镇上游约 2.8 km 处, 坝高 68 m, 为典型山区高坝水利枢纽。该枢纽是国家高等级航道沅水

干流上游清水江的最后一个梯级, 清水江是贵州省规划的主要出省水运通道之一。为充分利用枢纽库区航运条件, 促进黔东南州沿江地区经济社会发展和少数民族地区共同繁荣, 实现《全国内

河航道与港口布局规划》的规划目标,贵州省提出了新建白市水电站枢纽 500 吨级通航设施的要求。通航建筑物拟采用单级船闸,闸室有效尺度为 140 m×12 m×4.0 m(长×宽×槛上水深),设计通过能力为 290 万 t/a(单向),船闸轴线的选择及通航水流条件是本工程首要解决的关键问题^[1]。

2 已有建筑物及可选轴线分析

白市水电站位于单一河道,坝址河床内已有建筑物从左至右依次为:左岸非溢流坝、50 t 垂直升船机、溢流坝、电站厂房及右岸非溢流坝。左右两岸紧邻连片高山,山体内部布置有坝体灌浆廊道,没有预留 500 吨级通航建筑物位置,见图 1。



图1 白市大坝枢纽现状

现有 50 t 升船机承船厢尺寸为 20 m×7.5 m(长×宽),采用门式起重机起吊过坝,总提升高度为 61 m,升船机墩柱中心轨距 12.0 m、净宽 8.5 m,不满足 500 吨级承船箱的净距至少为 12~14 m 的要求,且升船机右侧紧邻溢流坝,左侧为非溢流坝,下游部分墩柱基础与坝体结构连为一体,故

无法对原升船机进行升级改造,原升船机位置也不具备改建通航设施的条件。因此,根据枢纽已有建筑物布置及实际地形条件,通航建筑物轴线可布置在电站左、右岸或左岸非溢流坝段,拟选轴线方案从左至右依次为左岸远坝线位、左岸线位、左岸非溢流坝线位和右岸线位(图 2)。

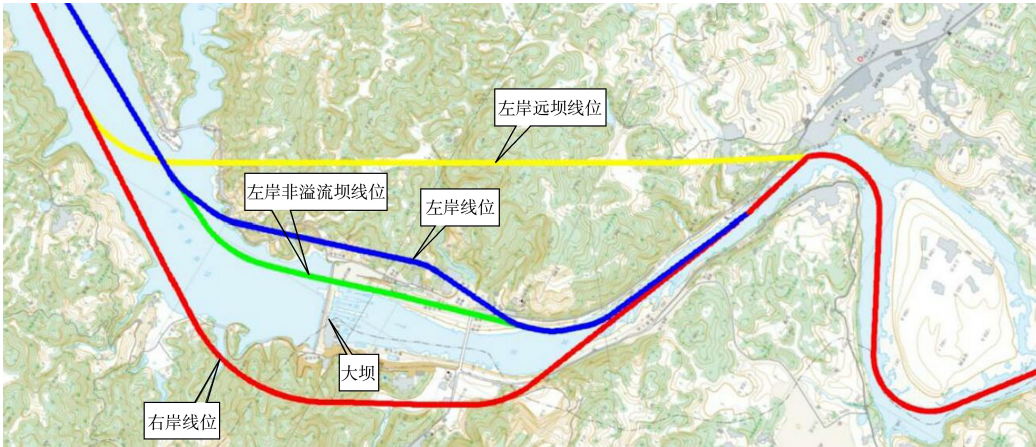


图2 通航建筑物轴线方案

3 轴线比选研究

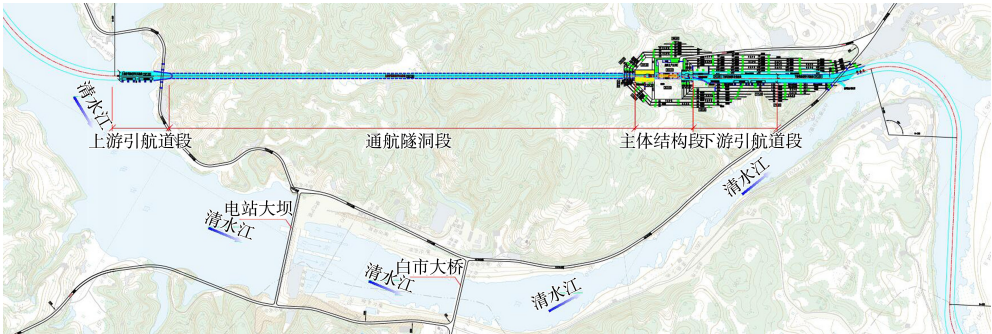
3.1 比选原则

根据通航建筑物级别规模、枢纽布置现状和自然条件等，按下列原则对轴线进行全面分析和综合比选：1) 妥善处理与电站现有水工建筑物的关系，使枢纽总体布置协调^[2]；2) 确保进出船舶（队）航行及停泊安全^[3]；3) 考虑施工场地布置的影响，确保施工期枢纽已有建构筑物的安全及正常运行；4) 尽量选择地形、地质条件较好的线位，减少征地拆迁和土石方量，降低工程造价；

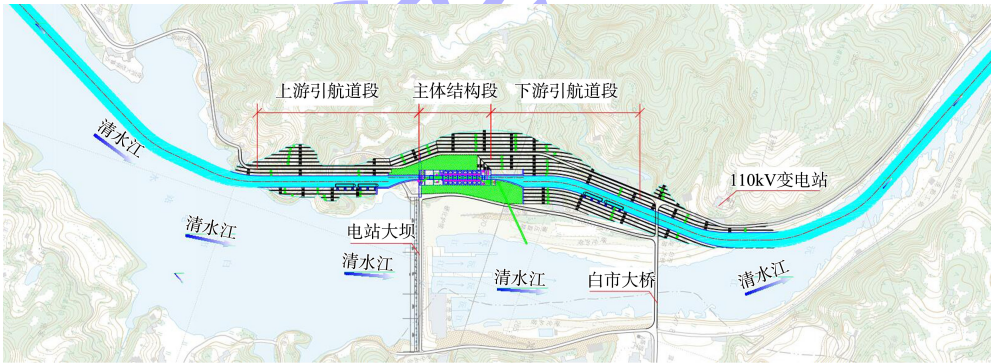
5) 有利于通航设施的管理和运营；6) 有利于环境保护和环境改善，贯彻水资源综合利用的原则^[4]。

3.2 综合比选

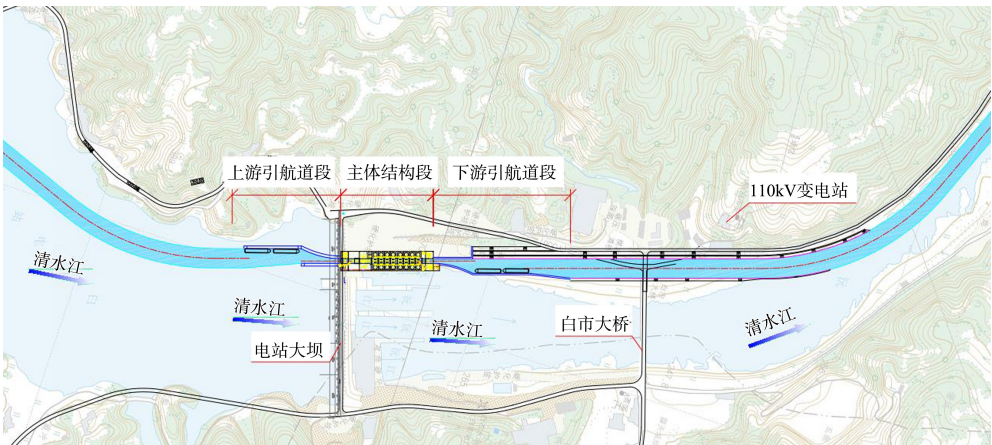
根据拟定的轴线比选方案进行通航建筑物总体布置(图 3)，并对各方案从工程施工对大坝结构安全及电站运行的影响、上下游引航道通航水流条件、施工技术难度、土石方开挖量和征地拆迁等多因素进行综合比选分析(表 1)，最终推荐对右岸线位和左岸线位进行通航水流条件研究以确定最优轴线方案。



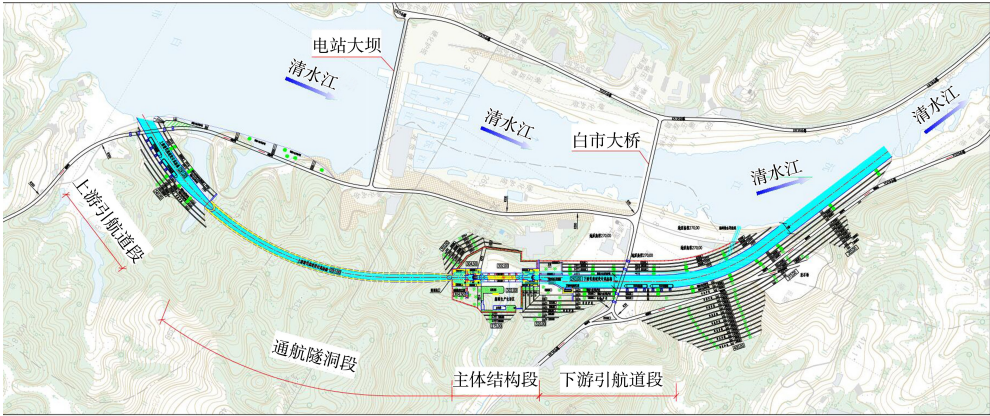
a) 左岸远坝线位



b) 左岸线位



c) 左岸非溢流坝线位



d) 右岸线位

图 3 通航建筑物总体布置

表 1 轴线综合对比分析

线位方案	优点	缺点
左岸远坝线位	1. 分散布置,不影响电站运行; 2. 施工围堰简单	1. 有 2.4 km 长通航隧洞; 2. 下引航道航道出口紧接 90°急弯,通航条件较差; 3. 下游明挖段村落多,征地拆迁量最大; 4. 土石方量最大,弃碴困难; 5. 工程投资最大
左岸线位	1. 分散布置,不影响电站运行; 2. 无通航隧洞; 3. 施工围堰简单	1. 岩石高边坡开挖难度大; 2. 上、下引航道均为连续弯道,通航水流条件差; 3. 征地拆迁较多; 4. 土石方量大,弃碴困难
左岸非溢流坝线位	1. 无通航隧洞; 2. 土石方工程量最小	1. 集中布置,施工对电站运行管理及大坝结构安全影响大; 2. 上、下引航道受大坝泄流影响大,通航条件较差; 3. 施工技术复杂,风险高
右岸线位	1. 分散布置,不影响电站运行管理; 2. 上、下引航道通航条件最好; 3. 施工围堰简单	1. 有 460 m 通航隧洞; 2. 征地拆迁需与电站单位协调

4 通航水流条件研究

采用 1:100 正态整体水工模型与自航遥控船模相结合的技术手段,对左、右岸轴线布置方案通航水流条件进行全面的试验研究,提出了优化改善措施,并从通航水流条件、船舶航行操控等方

面进行全面的比较^[5]。

4.1 试验工况流量级与水位流量关系

模型选取了 101.4、364、1 092、2 500、3 900 m³/s 共 5 级流量工况进行通航水流条件试验(表 2),水位与流量关系见图 4。

表 2 试验工况流量特征

流量/(m ³ ·s ⁻¹)	白市枢纽坝前控制水位/m	托口枢纽坝前控制水位/m	尾门水位/m	备注
101.4	300	238	240.38	泄水闸关闭、电站 1 台机组发电(枯水流量)
364.0	300	238	242.35	泄水闸关闭、电站 1 台机组发电(枯水流量)
1 092.0	300	238	245.40	泄水闸关闭、电站 3 台机组发电(中水流量)
2 500.0	300	246	247.67	电站与泄水闸联合运行(洪水流量)
3 900.0	300	246	249.87	3 a 洪水流量(设计最大通航流量)

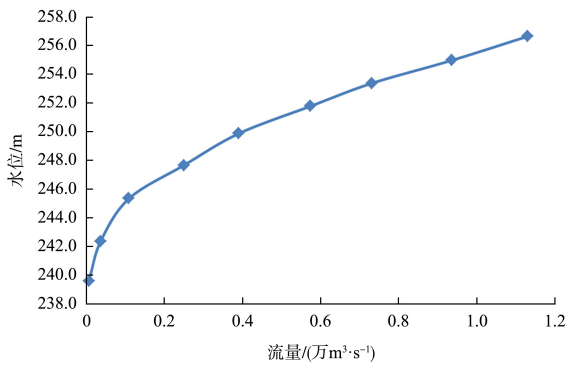


图 4 模型水位与流量关系

4.2 通航水流试验

上游引航道位于库区，各级流量下左右岸轴线方案口门区及连接段基本为静水，通航水流条件良好；试验重点对设计方案的下游口门区及连接段航道进行分析与优化，优化措施包括调整口门区导流墩布置、隔水墙长度及连接段开挖区范围调整等。试验结果表明，口门区内水流条件右岸方案相对较好，左岸方案在各级流量下均存在回流；连接段在中枯水流量($Q \leq 1\,092\text{ m}^3/\text{s}$)下右岸方案水流条件优于左岸方案，洪水流量($Q \geq 2\,500\text{ m}^3/\text{s}$)下，由于左岸方案口门区连接段位于缓流区，水流条件优于右岸方案。

1) 流量 $Q=364\text{ m}^3/\text{s}$ ，电站开启 1 台机组发电。

左岸轴线方案：河道主流沿左岸开挖区下行，口门区及连接段内有小范围、低强度的回流，水流流速小，口门区内水流横向流速及回流流速均不超过 0.3 m/s ，水流条件良好，满足规范要求，连接段内右侧局部水域横流较大 (0.5 m/s)，对船舶安全航行有一定影响，应谨慎驾驶，见图 5a)。

右岸轴线方案：河道主流沿右岸深槽下行，口门区及连接段内有小范围、低强度的回流，水流流速小，水流横向流速及回流流速均不超过 0.3 m/s ，水流条件良好，满足规范要求，见图 5b)。

2) $Q=3\,900\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下，电站开启 3 台机组发电，泄水闸开启 6 孔控泄。

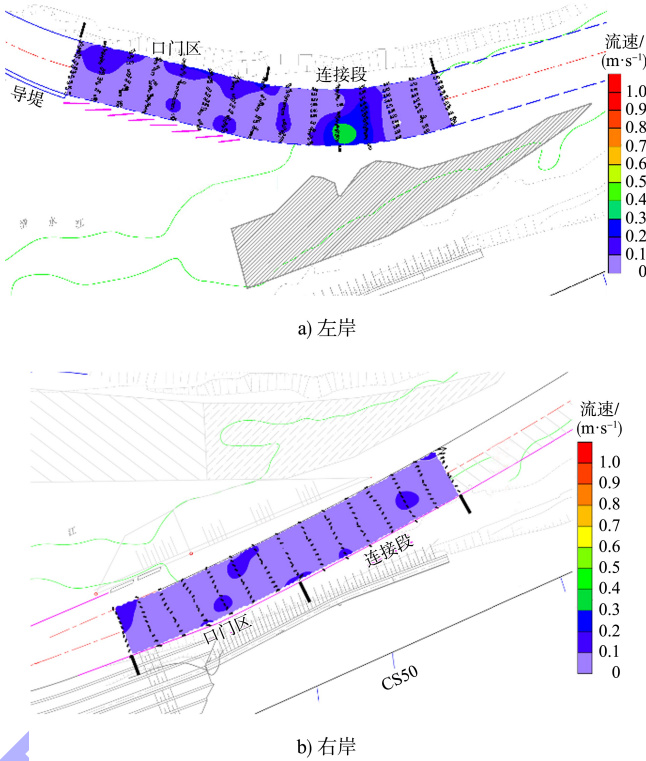
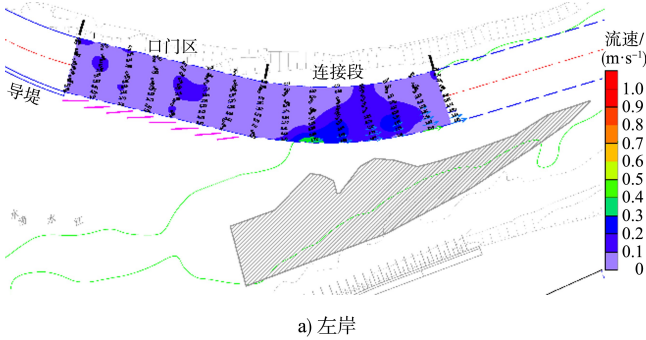


图 5 $Q=364\text{ m}^3/\text{s}$ 时口门区及连接段通航水流流速分布

左岸轴线方案：该流量下，口门区右侧水流流速增大，在口门区内形成低强度的回流，回流流速不超过 0.3 m/s ，满足规范要求；连接段上段靠河心侧局部水域横向流速超过 0.3 m/s ，见图 9a)。

右岸轴线方案：口门区左侧抛填区流速增大，水流越过抛填区后在口门区左侧形成斜流，口门区内末端左侧局部水域横向流速在 $0.3\sim 0.4\text{ m/s}$ ；口门区内纵向流速最大为 1.1 m/s ，横向流速及纵向流速基本满足规范要求。连接段水域水流流速基本不超过 0.3 m/s ，末端左侧斜流较强，且与航道轴线形成 15° 左右夹角，在约 $50\text{ m} \times 25\text{ m}$ (长 \times 宽) 水域范围内横向流速超过 0.6 m/s ，其他水域均不超过 0.6 m/s ，总体水流条件较好，见图 9b)。



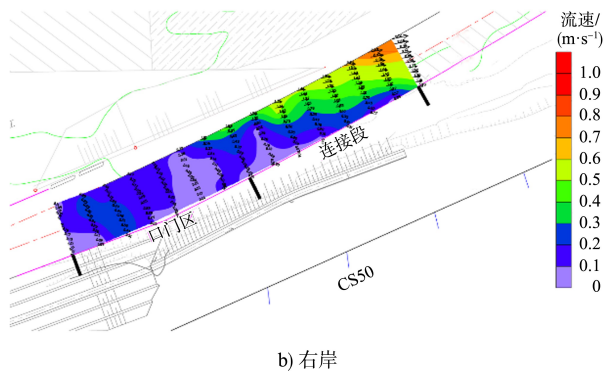


图 6 $Q=3\,900\text{ m}^3/\text{s}$ 口门区及连接段通航水流流速分布

4.3 船舶模拟试验

试验代表船型为 500 吨级机动货船，主尺度为

55 m×10.6 m×1.6 m（型长×型宽×满载吃水），船舶模型几何比尺采用 $\lambda_L=100$ ，船模尺度为 0.55 m×0.106 m×0.016 m，满足几何相似和重力相似条件。

自航船舶试验表明，左岸方案口门区连接段布置在凸岸，通视性较差，同时中枯水流量下连接段末端存在较强斜流，难以通过较为经济的工程措施加以改善，船舶操控相对困难。考虑洪水时间较短，从整体时段通航条件考虑，枯水期通航水流条件较好的右岸方案优于左岸方案。因此，对右岸方案进行了多工况的船舶航行试验，各工况下船舶航行参数见表 3。

表 3 船舶航行参数

流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	航向	静水航速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	航段位置/m	舵角/($^\circ$)	漂角/($^\circ$)	对岸航速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
364	下行	3.50	-400~-200	16.67	-7.72	2.19
			-200~0	19.26	5.79	2.73
			0~100	18.78	5.28	2.95
			100~200	13.53	-6.09	2.70
			200~300	18.18	-4.09	2.75
			300~400	16.27	6.25	2.78
			400~600	22.60	13.30	3.26
			600~800	26.72	7.85	4.01
			800~1 000	25.47	9.60	4.18
	上行	3.50	1 000~1 200	21.07	6.38	3.80
			-400~-200	13.15	-8.75	2.06
			-200~0	20.44	-10.00	2.11
			0~100	19.07	-5.60	2.24
			100~200	19.58	-5.03	1.92
			200~300	19.13	7.69	1.91
			300~400	17.46	-16.98	1.35
			400~600	23.35	-10.69	1.30
			600~800	17.82	-9.34	1.29
1 090	下行	3.50	800~1 000	13.63	-8.91	1.32
			1 000~1 200	18.96	-7.74	1.47
			-400~-200	14.96	-8.69	1.75
			-200~0	12.96	6.79	2.48
			0~100	17.14	7.33	2.68
			100~200	11.19	-6.75	2.75
			200~300	20.38	5.15	2.72
			300~400	-17.42	12.27	2.71
			400~600	26.40	16.28	3.41
			600~800	20.56	12.76	4.28
			800~1 000	25.70	7.48	4.44
			1 000~1 200	12.26	5.25	4.56

续表 3

流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	航向	静水航速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	航段位置/m	舵角/($^{\circ}$)	漂角/($^{\circ}$)	对岸航速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1 090	上行	4.50	-400~-200	17.79	-4.27	2.58
			-200~0	19.37	-8.44	3.03
			0~100	16.27	-4.27	3.27
			100~200	12.42	4.56	3.27
			200~300	-9.99	-5.74	3.05
			300~400	20.48	-12.37	2.23
			400~600	22.70	-13.14	1.77
			600~800	17.18	-12.43	1.68
			800~1 000	13.82	-4.67	1.86
			1 000~1 200	17.56	-10.96	1.87
2 500	下行	3.50	-400~-200	-17.65	-6.90	1.86
			-200~0	23.00	-8.10	2.59
			0~100	15.24	4.76	3.20
			100~200	14.99	-6.71	3.50
			200~300	24.45	-5.04	3.54
			300~400	21.43	18.67	3.71
			400~600	25.16	15.62	4.54
			600~800	-24.28	9.08	6.01
			800~1 000	27.07	12.57	6.51
			1 000~1 200	-16.12	-4.66	6.51
	上行	5.00	-400~-200	-16.37	-5.49	2.96
			-200~0	18.13	-8.65	3.54
			0~100	11.86	-4.98	3.90
			100~200	14.49	3.49	3.42
			200~300	-19.19	-9.33	2.82
			300~400	22.32	-15.16	2.51
			400~600	24.94	-14.61	1.17
			600~800	18.77	-8.58	1.04
			800~1 000	17.29	10.81	1.47
			1 000~1 200	-18.58	-8.38	1.43
3 900	下行	4.00	-400~-200	10.11	-5.90	1.70
			-200~0	16.11	6.53	2.41
			0~100	14.69	8.89	2.70
			100~200	19.66	-4.90	2.66
			200~300	11.82	8.73	2.82
			300~400	25.62	17.89	3.05
			400~600	22.97	18.84	4.49
			600~800	21.78	10.64	6.18
			800~1 000	18.64	9.19	6.18
			1 000~1 200	10.31	-4.84	6.66
	上行	5.00	-400~-200	-12.63	-6.46	2.95
			-200~0	22.52	-11.61	3.31
			0~100	18.54	-5.13	3.47
			100~200	-15.00	-7.17	3.10
			200~300	-13.94	-9.40	2.74
			300~400	18.42	-22.62	1.57
			400~600	19.00	-15.07	1.12
			600~800	-17.44	-11.65	1.41
			800~1 000	19.33	-9.29	2.06
			1 000~1 200	-17.03	-12.56	1.91

4.3.1 流量 $Q=364\text{ m}^3/\text{s}$ (枯水工况)

下行: 船舶以 3.5 m/s 航速下行至口门区段航道时, 船模航行时漂角最大时为 5.28° , 调整航态所需舵角最大为 18.78° 。船舶通过连接段航道所需舵角最大为 18.18° , 航行时漂角最大时为 -6.09° 。船模行至距船闸下游口门约 400 m 处时, 受斜流影响, 船模航行时漂角最大时为 13.3° , 最大操 22.6° 舵角便可顺利通过, 见图 7a)。

上行: 船舶以 3.5 m/s 航速上行至距口门 400 m 处时, 漂角最大时为 -16.98° , 进入连接段后, 船舶航行中所需舵角最大为 19.58° , 漂角最大为 7.69° , 船舶经过口门区段航道所需舵角最大为 19.07° , 漂角最大时为 -5.60° , 见图 7b)。

该流量级工况下, 船闸下游口门区及连接段船舶上下行所需操作的舵角和航行漂角均较小, 船舶航行条件较好。

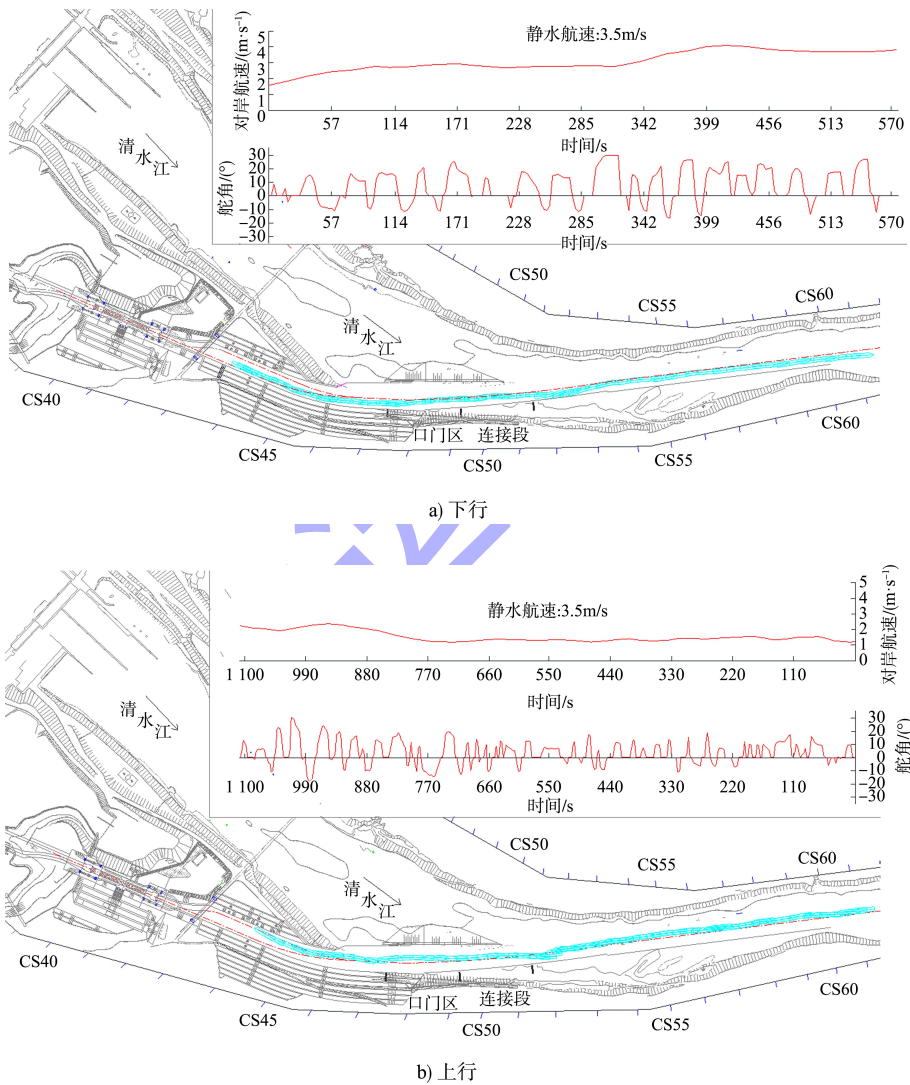


图 7 $Q=364\text{ m}^3/\text{s}$ 时船舶航态

4.3.2 流量 $Q=3\,900\text{ m}^3/\text{s}$ (洪水工况)

下行: 船舶以 4.0 m/s 航速下行, 通过口门区段航道时, 船舶最大漂角为 8.89° , 调整航态所需舵角最大为 14.69° 。船舶行至距口门约 250 m 时, 受横流影响, 船舶向右漂移, 漂角最大为 8.73° , 船舶最大需操 19.66° 舵角调整航态。船舶行至距

口门 400 m , 受主流汇流影响, 向右漂移, 漂角最大时为 18.84° , 最大需操 25.62° 舵角调整航态, 见图 8a)。

上行: 船舶以 5.0 m/s 航速沿岸边缓流区上行至距口门 $300\sim 500\text{ m}$ 处时, 需长时间操 19° 舵角顶流航行, 且须缓慢调整至设计航线内, 航行过

程中，受主流作用，漂角最大为 -22.62° ，船舶进入口门区段航道后，漂角最大为 -7.17° ，调整航

态所需舵角最大为 18.54° ，见图 8b)。

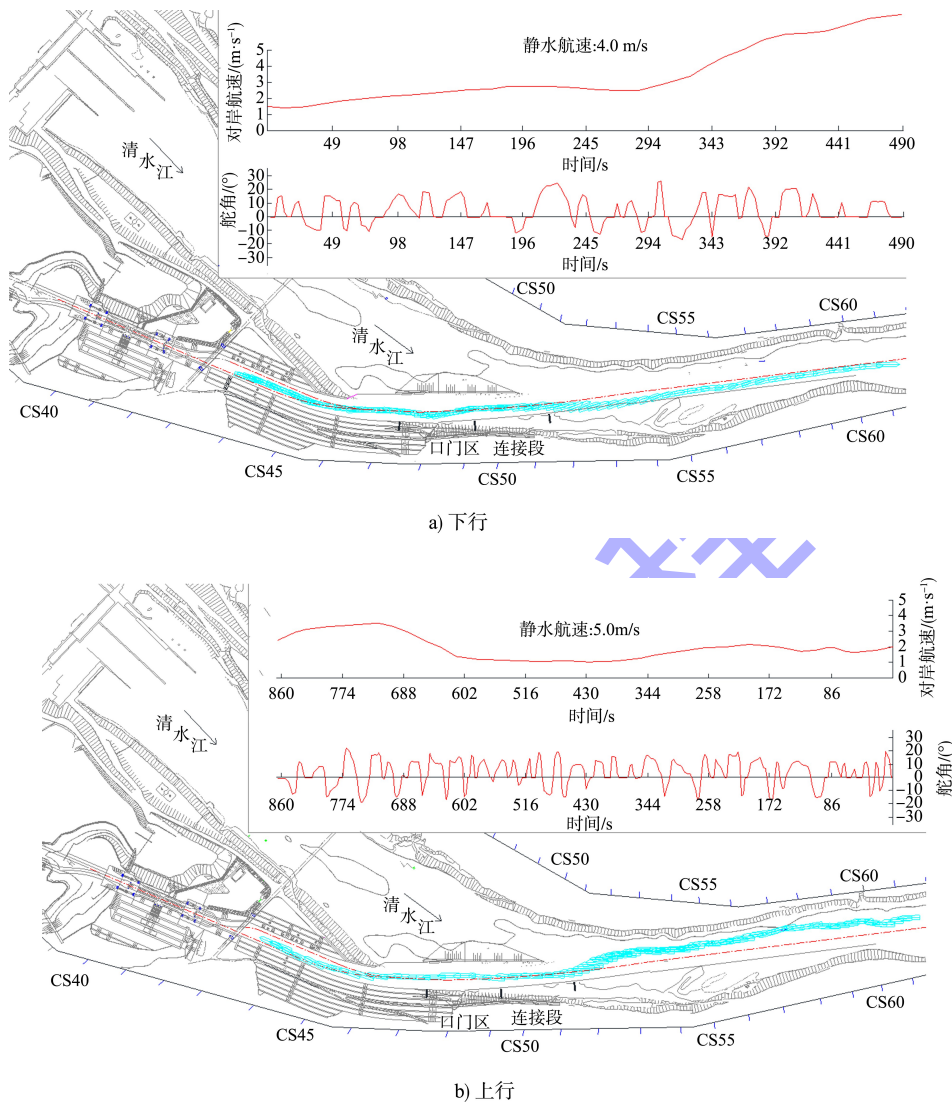


图 8 $Q = 3\,900\text{ m}^3/\text{s}$ 时船舶航态

该流量级工况下，船闸下游口门区船舶上下行所需操作的舵角和航行漂角均较小，船舶航行条件较好；但连接段受横流影响，下行调整航态最大舵角达到 25.62° ，最大漂角 18.84° ，上行需长时间使用大舵角(19°)，最大漂角为 -22.62° ，船舶航行条件较差。

综上，船闸下游口门区在枯水及洪水工况下船舶航行状态均较好；连接段在枯水情况下船舶航行状态较好，在洪水情况时上下行舵角及漂角均较大，航行状态较差，应谨慎驾驶。考虑到本河段洪水时间较短，推荐的右岸方案船舶航行基

本满足要求。

5 结论

1) 通航水流条件试验表明：口门区及连接段通航水流条件右岸方案优于左岸轴线方案，左岸方案在各级流量下均存在回流，且中枯水流量下连接段局部横流较大，右岸方案仅在历时较短的洪水流量下存在横流。

2) 船舶模拟试验表明：左岸方案下游口门区连接段位于凸岸，船舶通视性差；右岸方案口门区及连接段在中枯水流量下，船舶航行状态较好，洪水流量时需要操纵大舵角，应谨慎驾驶。