



# 北江濠里枢纽上游引航道 通航水流条件试验研究\*

王云莉<sup>1</sup>, 孙国栋<sup>1</sup>, 李艳<sup>1</sup>, 向美焘<sup>1</sup>, 吴成龙<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 西南水运工程科学研究所, 内河航道整治技术交通行业重点实验室, 重庆 400016;  
2. 青岛理工大学 工程质量检测鉴定中心, 山东 青岛 266033)

**摘要:** 濠里枢纽原有航道等级偏低, 不满足目前货运增长的要求, 因此需要对原有船闸进行扩建来提高航运能力, 将在一线船闸右岸新建二线船闸。为保证一、二线船闸口门区有利于通航的良好水流条件, 建立了整体定床物理模型, 研究引航道导墙长度及布置形式对口门区及引航道内水流条件的影响。模型试验结果表明, 在所有修改方案中, 修改方案Ⅱ(一、二线船闸分开布置, 二线船闸外导墙 375 m, 堤头段开孔) 较好, 其一线船闸上引航道通航条件基本不变, 二线船闸口门区通航水流条件较好, 较好地改善了上游口门区及连接段的斜流、回流等不利流态。

**关键词:** 二线船闸; 上引航道; 口门区; 通航条件

中图分类号: U 612.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)04-0105-08

## Experimental research on navigation flow conditions in upper approach channel of Beijiang Mengli hydro-junction

WANG Yun-li<sup>1</sup>, SUN Guo-dong<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, XIANG Mei-tao<sup>1</sup>, WU Cheng-long<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Inland Waterway Regulation Engineering, Ministry of Transport, PRC,

Southwest Hydraulic Institute for Waterways, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

2. Center for Engineering Test and Appraisal, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

**Abstract:** The low waterway grade of Mengli hydro-junction is not able to meet the requirement of the current freight growth. So, it is necessary to build the second-line shiplock on the right bank of the first-line shiplock to increase the shipping capacity. The overall fixed-bed model is established to study the effect of the guide wall length and the layout form on the flow conditions in the entrance area and the approach channel. According to the model test results, the navigation flow conditions of the modified scheme II, with the separately arranged first and second-line shiplocks, the guide wall length of 375 m and the holes in the wall head, are best among all the modified schemes: the navigation conditions of second-line shiplock are improved while the ones of the first-line shiplock almost keep unchanged, and the unfavorable flow conditions in the entrance area and connecting section are improved.

**Keywords:** second-line shiplock; upper approach channel; entrance area; navigation condition

北江是连接粤北与珠三角地区的纽带, 对沿江两岸的发展作用巨大。近年来, 随着沿岸经济的发展, 大宗货运需求增加迅猛, 对航道等级提出了更高的要求, 但北江整体航道等级低、通航条件不足, 不能满足通航需求。为此, 有关部门

提出到 2020 年将北江航道提高至Ⅲ级航道标准, 通行千吨级船舶。其中, 乌石—三水河口河段航道整治工程已通过试验论证, 并已进入施工图设计阶段, 许多学者对此进行了大量试验探究<sup>[1-3]</sup>。为进一步打通整个北江干流千吨级航道, 还需对

收稿日期: 2015-09-26

\*基金项目: 内河航道整治技术交通行业重点实验室开放基金项目 (NHHD-201512)

作者简介: 王云莉 (1974—), 女, 博士, 副研究员, 从事水利水运工程专业方向的研究。

其上游余下的韶关—乌石 41 km 河段开展航道整治,包括孟洲坝、濠里 2 座水利枢纽改扩建工程及坝下游浅滩段的航道整治等。其中,濠里枢纽二线船闸工程是北江(韶关—乌石河段)航道整治工程的重点。鉴于濠里枢纽二线船闸是在枢纽整体已建成条件下进行的改扩建,且一、二线船闸均布置于右岸,其工程的布置及与枢纽的相互关系和通航条件极为复杂。本文通过濠里整体水利枢纽定床模型试验,对濠里枢纽二线船闸改扩建方案上游引航道通航水力学条件进行了研究,并对上游引航道口门区及连接段的通航水力学问

题提出了合理有效的整改措施。

## 1 河道概况

### 1.1 枢纽概况

濠里枢纽位于北江中上游河段的广东省曲江县境内,为北江干流四级开发方案的第二级,是一座集发电、航运于一体的水利枢纽。枢纽上距孟洲坝水电站 26 km,下距英德市白石窑水电站 43 km,濠里枢纽上游航道受孟洲坝枢纽运行的影响,水流结构复杂。该河段地理位置如图 1 所示。

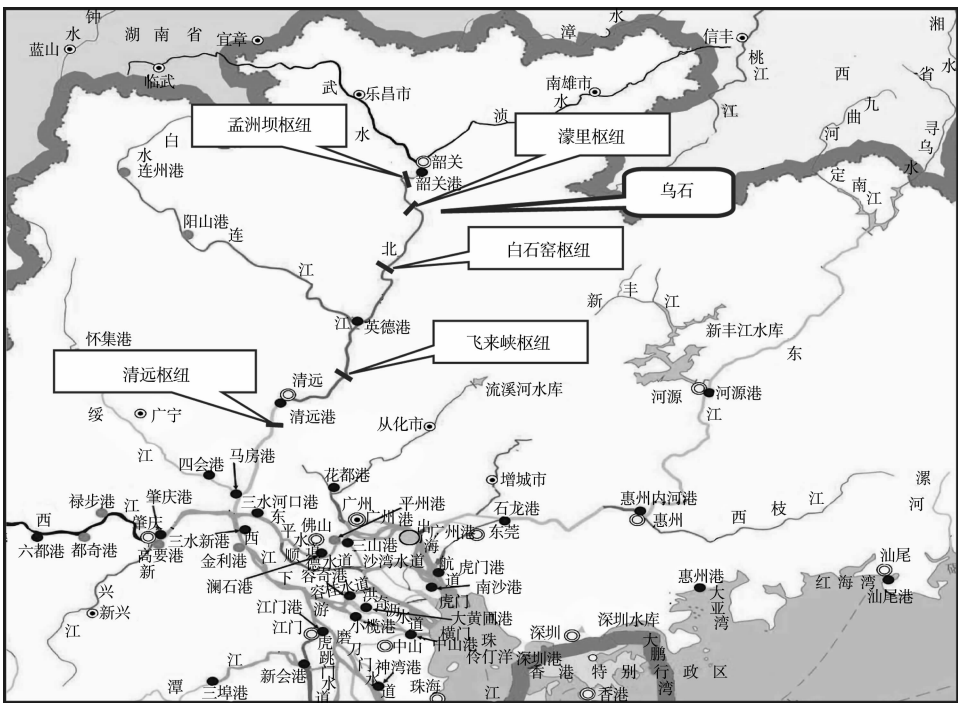


图 1 北江濠里枢纽地理位置

濠里枢纽的主要建筑物从左至右依次为:左岸土坝、电站厂房、13 孔泄水闸、船闸及右岸联接坝段。电站厂房位于河道左岸,右邻泄水闸,总装机容量 50 MW。主要建筑物为 3 级建筑物,按 50 a 一遇洪水设计,对应流量为  $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。枢纽已建的一线船闸等级为 V 级,闸室有效尺度  $140\text{ m} \times 14\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ (长  $\times$  宽  $\times$  门槛水深),可通行 300 吨级船舶。上游正常蓄水位 45.82 m,多年平均流量  $526\text{ m}^3/\text{s}$ ,枢纽最大通航流量  $Q = 3\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 。上引航道右侧主导航墙总长约 205.8 m,包括约 23.4 m 的扩展段和 182.4 m 的直线段;左侧副导

航墙总长约 122 m,包括 80 m 长的直线段和 42 m 的圆弧段,上引航道宽 33 m,底高程 38.82 m<sup>[4]</sup>。随着北江沿线经济的发展,已建船闸等级低、尺度小、设备简陋,已不能满足规划的 III 级航道标准和货运需求,修建二线船闸势在必行。

### 1.2 通航标准

濠里枢纽二线船闸及坝下游航道整治工程实施后,航道等级将提高到 III 级,通行 1 000 吨级船舶,通航保证率 98%。航道尺度为  $2.5\text{ m} \times 60\text{ m} \times 330\text{ m}$ (水深  $\times$  直线段宽度(双线 a)  $\times$  弯曲半径),设计代表船型为 1 000 吨级内河干货船,

尺度为 67.5 m × 10.8 m × 2.0 ~ 2.2 m (长 × 宽 × 吃水), 1 000 吨级多用途集装箱船, 尺度为 49.9 m × 12.8 m × 2.2 m。

按照 GB 50139—2004 《内河通航标准》<sup>[5]</sup> 和 JTJ 305—2001 《船闸总体设计规范》<sup>[6]</sup> 的规定, 山区河流Ⅲ级航道上的船闸设计最大通航流量可采用 10a 一遇洪水流量 ( $Q = 7\,730\text{ m}^3/\text{s}$ ), 上游最高通航水位取坝上 10 a 一遇洪水水位 (46.01 m) 与正常蓄水位 (45.82 m) 的高值 46.01 m, 最低通航水位为 41.32 m。口门区最大纵向流速不超过 2 m/s, 横向流速不超过 0.3 m/s, 回流流速不超过 0.4 m/s (纵向流速、横向流速是表面流速); 船闸引航道导航和调顺段内宜为静水区, 制动段和停泊段的水面最大纵向流速  $\leq 0.5\text{ m/s}$ 、横向流速  $\leq 0.15\text{ m/s}$ 。引航道导航段、调顺段、制动段和停泊段水流流速限值与Ⅲ级航道上的船闸要求相同。

## 2 模型设计与验证

模型河道范围应能充分反映工程所在河段的河势特征, 并在其上、下游预留足够长的调整过渡段, 以满足试验河段水流条件相似的要求。由于濠里枢纽所在河段河道微弯, 平面型态略呈“S”型, 坝址位于两弯道之间的顺直过渡段 (图 2)。为保证模型几何相似, 阻力相似和水流运动相似, 并考虑试验场地大小、供水能力及船模试验等相关因素, 决定选用几何比尺  $\lambda_L = \lambda_h = 100$  的正态模型, 模型范围从坝轴线上游约 4.0 km 开始至坝轴线下游约 4.0 km 为止, 模拟原型河道约 8.0 km。本模型按重力相似准则进行设计, 选定定床模型比尺如表 1 所示。

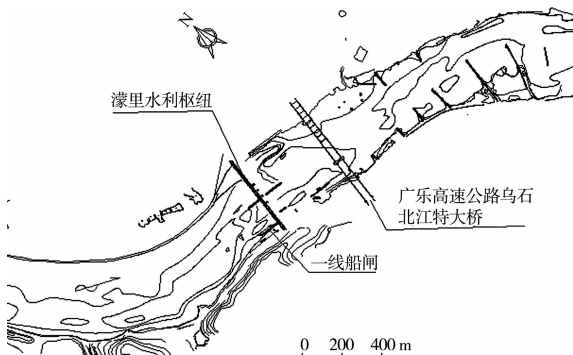


图 2 濠里枢纽二线船闸物理模型试验研究范围

表 1 北江濠里枢纽整体水工模型试验比尺

平面比尺 $\lambda_L$	垂直比尺 $\lambda_h$	流速比尺 $\lambda_v$	流量比尺 $\lambda_Q$	糙率比尺 $\lambda_n$	时间比尺 $\lambda_t$
100	100	10	100 000	2.15	10

模型建成后, 根据现场实测资料, 对瞬时水面线、流向及流速分布、典型位置水位流量关系等进行了验证。验证结果表明: 模型河道与原型河道各水尺水位相差在  $\pm 0.05\text{ m}$  以内, 水位流量关系基本合理。因此, 模型与原型具有较好的相似性, 满足相关规范的要求。

## 3 定床模型试验

### 3.1 设计方案

#### 3.1.1 平面布置情况

濠里枢纽二线船闸扩建工程按Ⅲ级标准设计, 船闸有效尺度 220 m × 23 m × 4.5 m, 可通行 1 000 吨级船舶。平面布置如图 3 所示。根据河道地形条件, 拟将二线船闸布置于一线船闸的右岸岸边, 两闸轴线相距 80 m, 二线船闸的建设不影响一线船闸的相关建筑物和船舶进出闸航行条件。二线船闸上引航道宽 50 m, 底高程 36.82 m。上游引航道右导航墙为总长为 563.8 m 的主导航墙, 包括 148.8 m 的直线导航段和 415 m 的靠泊段, 顶高程为 48.51 m。左侧副导航墙采用半径为 52.73 m、中心角 49° 的圆弧扩展段, 后接长为 160 m 的直线导航段, 副导航墙 (兼作隔流堤) 总长约 224.5 m, 顶高程为 47.2 m, 与一线船闸右侧导航墙齐平。

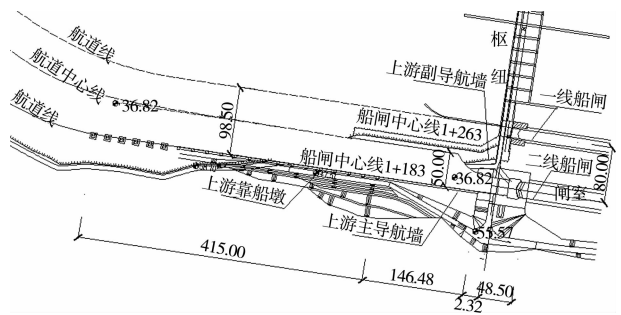


图 3 濠里二线船闸上引航道设计方案平面布置 (单位: m)

#### 3.1.2 通航水力学试验

设计方案下, 二线船闸上引航道的流速变化情况统计如下。

表2 二线船闸上引航道设计方案最大流速变化

m/s

断面位置	流速	工况			
		$Q=1\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ , 枯期 枢纽运行分级流量, $H_{\text{坝前}}=44.32\ \text{m}$	$Q=2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$ , 枢纽敞泄分界流量, $H_{\text{坝前}}=44.32\ \text{m}$	$Q=2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$ , 枢纽 敞泄分界流量, 全闸敞泄	$Q=4\ 910\ \text{m}^3/\text{s}$ , 2 a一遇, 敞泄
口门区	VU5' (外导墙堤头)	纵向流速 0.20	0.40	0.38	0.58
		横向流速 0.14	0.30	0.26	0.41
	VU7' (堤头上游 100 m)	纵向流速 0.44	0.73	1.04	1.31
		横向流速 0.06	0.20	0.28	0.35
	VU8' (堤头上游 150 m)	纵向流速 0.42	0.78	1.13	1.33
		横向流速 0.04	0.17	0.20	0.36
连接段	VU9' (堤头上游 200 m)	纵向流速 0.43	0.94	1.37	1.77
		横向流速 0.02	0.20	0.12	0.31
	VU10' (堤头上游 250 m)	纵向流速 0.51	0.95	1.50	1.81
		横向流速 0.01	0.08	0.08	0.16

1) 水库壅水运行时上引航道的通航水流条件。

在  $Q=1\ 500、2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $H_{\text{坝前}}=44.32\ \text{m}$ ) 时, 二线船闸口门区最大纵向流速分别为 0.44、0.78 m/s, 最大横向流速分别为 0.14、0.30 m/s, 口门区内无泡水、回流等不良流态。上游连接段最大纵向流速分别为 0.51、0.95 m/s, 最大横向流速分别为 0.02、0.20 m/s。从水流指标条件上看, 二线船闸上引航道口门区及上游连接段的水流条件满足船舶安全进出闸的要求。

2) 全闸开启敞泄洪水时上引航道的通航水流条件。

在上游来流量  $Q=2\ 760、4\ 910\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $P=50\%$ ), 电站停机、全闸敞泄洪水时, 口门区最大纵向流速分别为 1.13、1.33 m/s, 最大横向流速分别为 0.28、0.41 m/s, 无回流。从水流指标条件上看, 除堤头附近个别点横向流速略为超标外, 二线船闸上引航道口门区各项流速指标满足要求。上游连接段最大纵向流速分别为 1.50、1.81 m/s, 最大横向流速分别为 0.12、0.31 m/s, 无回流。

需要特别指出的是, 该方案二线船闸建成后, 在  $Q>1\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $H_{\text{坝前}}=44.32\ \text{m}$ ) 情况下, 由于二线船闸外导墙较短, 受大坝泄流和二线船闸外导墙堤头绕流的影响, 一线船闸口门附近几乎为横流所覆盖。其中, 在  $Q=2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $H_{\text{坝前}}=44.32\ \text{m}$ ) 时, 一线船闸口门区的最大横向流速达

到 0.75 m/s, 且存在回流、泡漩等不良流态, 恶化了原一线船闸的通航条件。同时, 在二线船闸右侧停泊区上游约 180 m 的范围内, 纵向流速达到约 1 m/s 左右, 超过了规范<sup>[6]</sup>允许限值(0.5 m/s), 不能满足安全靠泊待闸的要求。

可知, 设计方案在各级中小流量、水库保持正常蓄水运行时, 一、二线船闸上引航道口门区的流速小, 满足安全通航要求; 当  $Q>1\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$  时, 受大坝泄流和二线船闸外导墙堤头绕流的影响, 一线船闸上引航道口门区几乎为横流所覆盖, 二线船闸上引航道口门附近横流亦较大, 不能满足船舶在上引航道口门区安全通航的要求, 且此时二线船闸右导墙靠泊段暴露于动水之中, 流速大, 船舶靠泊存在安全隐患, 需要进一步优化调整。

### 3.2 一、二线船闸共用上引航道方案(修改方案I)

由于设计方案在船闸外导墙堤头附近产生了较明显的绕流及横流, 通航条件较差, 不能安全通航。因此, 修改方案 I 拟优先从调整分水隔墙的长度入手, 在减小口门区横流和绕流的同时, 减少二线船闸建设对一线船闸的影响, 并适当兼顾改善一线船闸通航水流条件。

#### 3.2.1 平面布置

方案 I 是在设计方案的基础上, 取消一线船

闸上引航道外导航墙的圆弧段, 取消设计方案一、二线船闸的分隔墙直线段, 保留其圆弧拓宽段, 将原一线船闸外导航墙直线段由 80 m 增加至 304 m (约 4.5 倍代表船型船长度), 以减小在洪水

期枢纽泄流及外导墙绕流的影响, 改善上引航道口门区外侧的通航水流条件, 一、二线船闸共用上引航道宽 98.5 m, 引航道底高程采用二线船闸上引航道底高程 36.82 m。平面布置如图 4 所示。

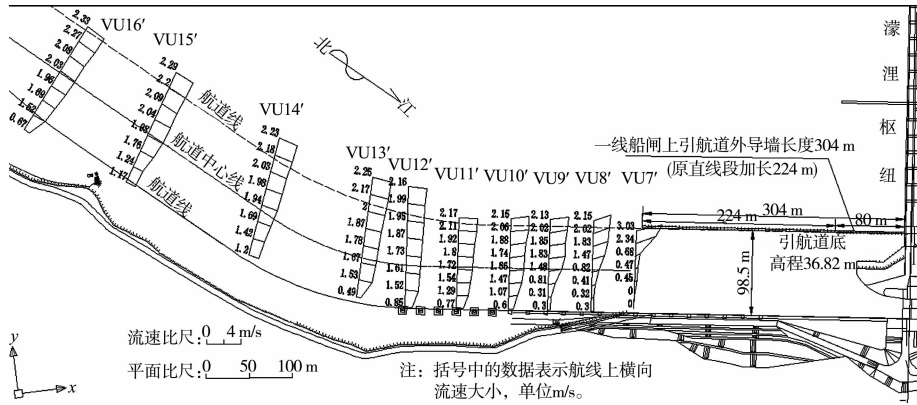


图4 修改方案 I 船闸上引航道平面布置及  $Q=6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$  时流速分布

### 3.2.2 通航水力学试验

试验实测了在  $Q=2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $H_{\text{坝前}}=44.32\ \text{m}$ )、 $2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$  (全闸敞泄)、 $4\ 910\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $P=50\%$ )、 $6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $P=20\%$ ) 3 级流量 4 种工况下的通航水流条件。在按正常蓄水位运行的各级流量情况下, 修改方案 I 流速均较小, 通航水流条件更加良好; 当流量增至  $2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$ 、坝前水位 44.32 m 运行时, 口门区内的最大纵、横向流速分别减至 0.93、0.58 m/s, 口门内横向流速超标区域已缩至外导墙堤头上游内侧长 60 m、宽 20 m 的区域, 对进出一线船闸的船舶航行安全影响进一步减小。而对于进出二线船闸的船舶, 各项流速指标均达到规范要求, 能安全进出船闸。连接段最大纵、横向流速分别为 1.02、0.08 m/s。右侧停泊区上段最大纵横向流速分别为 0.76、0.04 m/s, 流速超标区发生在右侧停泊区上段长约 60 m 的范围。

当上游来流量分别达到  $2\ 760$ 、 $4910$  和  $6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$  (图 4)、泄洪闸开启敞泄洪水时, 上引航道口门区内最大纵向流速分别为 1.52、1.78、2.94 m/s, 最大横向流速分别达到 0.92、0.82、0.73 m/s, 无回流。在外导墙堤头上游内侧长约 60 m、宽约 30 m 的范围内横向流速指标严重超标, 而上引航道口门区中心线以内纵横向流速较小, 满足船舶安全进出

闸的要求。实测上游连接段最大纵向流速分别为 1.64、1.95、2.11 m/s, 最大横向流速分别达到 0.10、0.27、0.28 m/s, 无回流。右侧停泊区上段最大纵向流速分别为 1.15、1.38、1.52 m/s, 最大横向流速分别达到 0.06、0.12、0.13 m/s, 流速超标区发生在右侧停泊区上段 60~100 m 的范围。

上述结果表明: 修改方案 I 中, 当水库按正常蓄水位运行时, 上引航道口门区纵横向流速小, 口门区内无回流, 其各项流速指标均满足规范要求; 当流量增加到  $2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$  以上时, 受枢纽泄流和外导墙堤头绕流的影响, 上引航道口门区外侧横向流速逐渐增大, 超过了规范要求; 而上引航道口门区内侧水流平缓, 纵横向流速小, 满足安全通航要求。随着流量的增大, 口门区及连接段的纵横向流速有进一步加大的趋势。与设计方案相比, 修改方案 I 的横向流速值与超标范围均有所减小, 修改方案 I 相对较优。

### 3.3 一、二线船闸分用上引航道方案(修改方案II)

#### 3.3.1 平面布置

考虑到方案 I 外导航墙处于深水库区, 施工难度和工程投资均较大, 对河道行洪影响较大的情况, 试验仍按原设计思路, 以解决二线船闸上引航道口门区的通航水流条件为主要目标, 基本

不影响或不改变一线船闸现状为条件, 修改方案II将一、二线船闸上引航道各自分开布置, 并在加长的外导航墙上段开孔, 试验对外导航墙上段开孔数量、位置、孔口尺度及孔轴线与导航墙交角等进行了多方案比选。修改方案II对二线船闸上引航道外导航墙上段长约100 m的范围设置8个导流透空孔, 孔口宽2.7 m、高4 m、孔底高程36.82 m, 顶高程40.82 m, 与导墙直线段夹角约27°, 相邻孔中心间距12 m。开孔段墙体采用插板式隔流墙的

形式, 各开孔插板通过直径2.5 m的灌注桩基础进行连接。二线船闸上引航道外导墙总长375 m, 与此同时, 在上游右岸弯道附近设置块石回填护坡, 一方面可适当调顺上游弯道处的水流方向, 另一方面又可减少二线船闸开山石渣弃方问题。方案II的上游右岸河湾块石护坡段长约500 m, 坡比1:2.5, 分两级进行回填, 中间设置2 m宽的马路, 第一级回填顶高程43.12 m, 第二级回填顶高程47.5 m。平面布置如图5所示。

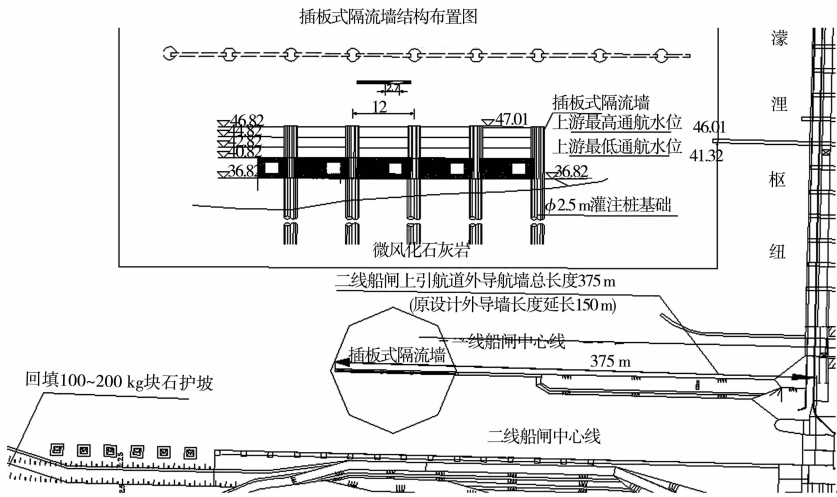


图5 修改方案II濠里二线船闸上引航道平面布置

### 3.3.2 通航水力学试验

1) 修改方案II对二线船闸通航的影响分析。

方案II实测了流量  $Q = 2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $H_{\text{坝前}} = 44.32\ \text{m}$ )、 $2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$  (全闸敞泄)、 $4\ 910\ \text{m}^3/\text{s}$

( $P = 50\%$ )、 $6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $P = 20\%$ ) 和  $7\ 730\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $P = 10\%$ ) 共5级流量6种工况, 上引航道口门区的通航水流条件, 典型工况流速分布见图6。

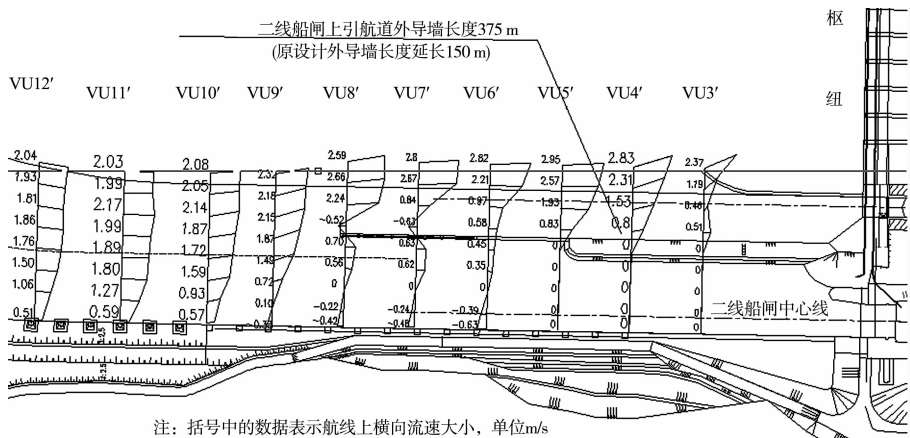


图6 修改方案II船闸上引航道口门区  $Q = 7\ 730\ \text{m}^3/\text{s}$  时流速分布

试验表明:枯水期来流量较小、水库蓄水位高时,一、二线船闸上引航道口门区的通航水流条件均较好。在来流量为  $Q = 2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$ , 水库按汛限水位 44.32 m 运行时,二线船闸上引航道内基本为静水,上引航道口门区的最大纵向流速为 0.91 m/s,最大横向流速为 0.22 m/s,无回流。此时,二线船闸上引航道及口门区的通航水流条件完全满足船舶安全进出闸的要求。

在上游来流量  $Q = 2\ 760$ 、 $4\ 910$  ( $P = 50\%$ ) 和  $6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $P = 20\%$ )、泄洪闸全部开启敞泄洪水时,二线船闸上引航道右导墙边壁有弱小回流,最大回流分别为 0.26、0.39 和 0.43 m/s;二线船闸上引航道口门区的最大纵向流速分别为 1.57、1.82 和 1.92 m/s,最大横向流速分别为 0.37、0.44 和 0.48 m/s。此时,除二线船闸上引航道外堤头附近个别点横向流速略大外,其余流速指标均满足规范要求。右侧停泊区上游最大纵向流速分别为 1.05、1.22 和 1.37 m/s,最大横向流速分别为 0、0.08 和 0.10 m/s,纵向流速超标区域为右侧停泊区上段 60~100 m 的范围。

当流量增加到  $Q = 7\ 730\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $P = 10\%$ ) 时,在二线船闸上引航道右导墙的边壁回流进一步增大,其最大回流为 0.63 m/s;二线船闸上引航道口门区的最大纵向流速增加到 1.99 m/s、最大横向流速增加到 0.64 m/s,横向水流主要集中在二

线船闸上引航道口门附近,其流速值超标较多,将给进出二线船闸的船舶安全带来风险。右侧停泊区上游最大纵、横向流速分别为 1.27、0.19 m/s,纵向流速超标区域为右侧停泊区上段长约 100 m 的范围。

综合上述试验分析结果,在上游来流量  $Q \leq 6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $P = 20\%$ ) 时,二线船闸上引航道及口门区的各项流速指标基本满足规范要求(个别点略有超标);当  $Q > 6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$  以后,二线船闸上引航道口门区外导墙堤头附近横流超标较多,船舶进出船闸存在一定的安全风险。右侧停泊区上段 60~100 m 的范围不满足船舶安全靠泊的要求。与设计方案及方案 I 相比,方案 II 二线船闸通航条件更优,船舶安全靠泊的长度更长。

## 2) 修改方案 II 对一线船闸通航的影响分析。

如前所述,修改方案 II 为一、二线船闸上引航道各自分开布置方案,该方案二线船闸上引航道系开挖上游右岸山体而成,其外导航墙基本位于原一线船闸的右岸岸边,外导墙总长达 375 m,一线船闸上引航道口门区的外部条件基本未变,上游右岸河湾块石护坡(长约 500 m)的修建,对一线船闸上引航道口门区的通航水流条件的改善亦会带来一定的好处。

二线船闸修改方案 II 实施前后一线船闸上引航道口门区纵横向流速变化见表 3。

表 3 一线船闸上引航道口门区纵横向流速变化

		工况				m/s
断面位置	流速	$Q = 1\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ (工程后)	$Q = 2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$ (工程后)	$Q = 1\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ (流速变化值)	$Q = 2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$ (流速变化值)	
(外导墙堤头)	纵向流速	0.30~0.52	0.26~0.40	-(0.01~0.02)	+(0.03~0.04)	
	横向流速	0.06~0.15	0.00~0.34	+(0.01~0.02)	+(0.00~0.02)	
口门区 (堤头上游 50 m)	纵向流速	0.25~0.59	0.50~1.12	+(0.02~0.03)	+(0.03~0.09)	
	横向流速	0.05~0.12	0.03~0.23	-(0.00~0.02)	+(0.03~0.05)	
(堤头上游 100 m)	纵向流速	0.49~0.66	0.56~1.12	-(0.01~0.02)	+(0.00~0.01)	
	横向流速	0.09~0.16	0.03~0.16	+(0.00~0.01)	-(0.07~0.10)	

根据在多级中小流量情况下的试验,上游库区及已建一线船闸上引航道口门区的通航水流条件仍较好。从表 3 可知,当流量达到敞泄分界流量  $Q = 2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$  ( $H_{\text{坝前}} = 44.32\ \text{m}$ ) 时,一线船闸

上引航道口门区的最大纵、横向流速分别为 1.12、0.34 m/s,最大流速位于一线船闸外导墙堤头附近,口门区内无回流,其通航条件与现状情况基本一致。说明方案 II 中,一线船闸上引航道的通

航条件基本保持不变。

### 3.3.3 船模试验

修改方案Ⅱ中,在上游来流量 $Q \geq 6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,二线船闸上引航道口门区外导墙堤头附近及停泊段的个别区域流速略有超标,为保证通航安全,开展了船模试验。

本次模型试验采用船型为1 000吨级机动货驳,其尺度为 $85.0\ \text{m} \times 10.5\ \text{m} \times 2.0\ \text{m}$ (总长 $\times$ 型宽 $\times$ 设计吃水),排水量为1 000 t;船模尺度为 $85.0\ \text{cm} \times 10.5\ \text{cm} \times 2.0\ \text{cm}$ ,船模排水量为1 000 g。自航船模比尺与水工模型比尺一致,均为1:100的正态,静水航速与舵角均与实船相似。试验航段为上引航道口门区及连接段,试验段长约1 100 m。

#### 1) 修改方案Ⅱ船舶出闸上行情况。

二线船闸在 $Q = 2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$ (枢纽控泄)、 $Q = 2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$ (全闸敞泄)、 $Q = 4\ 910\ \text{m}^3/\text{s}$ (全闸敞泄)和 $Q = 6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$ (全闸敞泄)时,船舶出闸上行平均航程分别为1 036、1 039、1 026和1 076 m,最大舵角分别为 $15.85^\circ$ 、 $17.38^\circ$ 、 $19.38^\circ$ 和 $21.48^\circ$ ,最大漂角分别为 $5.32^\circ$ 、 $8.63^\circ$ 、 $9.28^\circ$ 和 $10.19^\circ$ ,最小航速分别为3.68、2.87、2.82和2.79 m/s,航行时间分别为4.05、5.22、5.22和5.59 min,平均航速分别为4.27、3.32、3.28和3.21 m/s。

#### 2) 修改方案Ⅱ船舶下行进闸情况。

二线船闸在 $Q = 2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$ (闸门控泄)、 $Q = 2\ 760\ \text{m}^3/\text{s}$ (全闸敞泄)、 $Q = 4\ 910\ \text{m}^3/\text{s}$ (全闸敞泄)和 $Q = 6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$ (全闸敞泄)时,船舶出闸下行平均航程分别为1 039、1 027、1 037和1 046 m,最大舵角分别为 $16.40^\circ$ 、 $17.61^\circ$ 、 $19.11^\circ$ 和 $20.04^\circ$ ,最大漂角分别为 $8.05^\circ$ 、 $9.07^\circ$ 、 $9.49^\circ$ 和 $10.18^\circ$ ,最大航速分别为5.09、5.50、5.74和6.06 m/s,航行时间分别为3.52、3.30、3.18和3.03 min,平均航速分别为4.93、5.19、5.43和5.75 m/s。

#### 3) 修改方案Ⅱ船模试验成果。

在上述各级通航流量下,船舶上行、下行的最大舵角和最大漂角均是随流量增加而加大,说明船舶航行难度随流量的加大而加大。但最大舵角均未超过船模试验舵角安全限值( $25^\circ$ ),最小航速均明

显优于船模试验最低航速安全限值( $0.4\ \text{m/s}$ ),均能满足安全通航条件。因此,只要操纵得当,1 000 t机动驳均可安全自航通过二线船闸上引航道口门区及连接段,仅在 $Q = 6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$ (全闸敞泄)时上下行最大舵角在 $20^\circ$ 以上,航行难度相对较大。综合上下游船模试验成果,在 $Q \leq 6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$ (全闸敞泄)时,推荐方案总体满足1 000 t自航船的通航条件。因此,综合上、下游航道的通航条件,建议 $Q = 6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$ 为最高限制通航流量。

## 4 结语

濠里枢纽二线船闸工程是在枢纽整体已建成条件下进行的改扩建,其船闸均布置于右岸、上引航道口门区处于“S”弯道过渡段附近,工程的布置与通航水流条件较为复杂。通过物理模型试验和船模试验对比分析可知:采用上引航道分开布置,并在加长的外导航墙上段开孔的方案(修改方案Ⅱ)能较好地满足试验要求,通航条件较好,改善了设计方案与修改方案Ⅰ中上游口门区及连接段的斜流、回流等不利流态,并且施工难度和工程投资均较小,建议作为推荐方案。充分考虑濠里通航建筑物的远景通过能力,采取 $6\ 630\ \text{m}^3/\text{s}$ 作为设计最高通航流量较为合理。

## 参考文献:

- [1] 杨明远,杨武,郁达,等.北江千吨级航道整治研究:Ⅱ二维数学模型与整治河段通航水流条件分析[J].交通科学与工程,2013,29(4):66-72.
- [2] 谢凌峰,罗敬思.北江航道整治工程及效果分析[J].水运工程,2002(8):49-53.
- [3] 张绪进,程小龙,王云莉.北江白石窑水利枢纽下游引航道通航水力学试验研究[J].水运工程,2014(3):119-124.
- [4] 张绪进,王云莉,李艳.北江(韶关至乌石)航道工程濠里枢纽二线船闸整体定床模型试验研究报告[R].重庆:重庆西南水运工程科学研究所,2014.
- [5] GB 50139—2004 内河通航标准[S].
- [6] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范[S].