



# 弯曲窄槽型河段多线船闸通航水流条件研究\*

王彪<sup>1,2</sup>, 何飞飞<sup>1</sup>, 王效远<sup>3</sup>, 徐进超<sup>4</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学, 江苏 南京 210029;

3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 4. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 当船闸下游引航道口门区位于河道的弯曲窄槽段时, 由于河道水深较浅、通航水流条件非常复杂, 不利于通航。依托京南枢纽二线船闸工程, 采用 1:100 整体物理模型, 对弯曲窄槽型河段多线船闸通航水流条件开展系列试验研究。结果表明: 1) 原枢纽平面布置方案存在缺陷, 下游引航道口门区水流条件易受弯道顶冲水流的影响, 弯道处断面束窄导致流速较大。2) 同时隔流堤高程太低, 会引起水流翻过隔流堤产生混乱水流的现象。提出改进措施: 1) 上游隔流堤高程应加高至 33.46 m, 下游隔流堤高程应加高至 32.58 m。2) 推荐增设隔流墙、调顺岸线, 同时开挖河床等。研究方案为京南枢纽二线船闸工程通航水流条件改善提供了技术支持。

**关键词:** 枢纽; 通航水流条件; 引航道口门区; 物理模型

**中图分类号:** U 641

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2021)04-0108-08

## Study on navigable flow conditions of multi-lane lock in curved narrow channel section

WANG Biao<sup>1,2</sup>, HE Fei-fei<sup>1</sup>, WANG Xiao-yuan<sup>3</sup>, XU Jin-chao<sup>4</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Hohai University, Nanjing 210029, China;

3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

4. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** When the downstream navigable entrance area is located in a curved narrow channel section, the water depth of the river is relatively shallow and the navigational flow conditions are very complicated, which is not conducive to navigation. Relying on the second-line ship lock project of Jingnan junction, a series of experimental studies have been carried out on the navigational flow conditions of the multi-lane lock in the curved narrow channel using a 1:100 overall physical model. The results show that: 1) The original junction layout plan has defects. The water flow conditions at the entrance of the downstream approach channel are easily affected by the water flow at the top of the bend, and the narrow cross-section leads to larger flow velocity. 2) At the same time, the separation dike's elevation is so low that it will cause water flow to overturn the separation dike and produce chaotic flow. The following improvement measures are proposed: 1) The elevation of the upstream separation dike should be increased to 33.46 m and the elevation of the downstream separation dike should be increased to 32.58 m. 2) It is recommended to add a partition wall, smoothen the shoreline, and excavate the riverbed. The research plan provides technical support for improving the navigable flow conditions of the second-line ship lock project of the Jingnan junction.

**Keywords:** junction; navigational flow condition; navigable entrance area; physical model

船闸是克服河流上建坝(或天然)形成的集中水位差的一种过船建筑物。多线船闸引航道口门

区通航水流条件一直是通航水力学研究重点, 多线船闸的并列布置及不当运行可能会埋下安全

收稿日期: 2020-07-13

\*基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401906)

作者简介: 王彪(1996—), 男, 硕士研究生, 从事通航水力学研究。

隐患<sup>[1-3]</sup>。弯曲窄槽型的“歪葫芦形”河道, 往往河道本身水流条件很差, 同时枢纽的运行会引起口门区大强度回流致使航行船舶(队)发生打旋、失控以致偏离航道。为保障船舶安全高效通过船闸, 《船闸总体设计规范》<sup>[4]</sup>和《内河通航标准》规定: 船闸引航道口门区纵向流速小于等于 2 m/s, 横向流速小于等于 0.3 m/s, 回流流速不大于 0.4 m/s, 引航道内宜为静水区。本文通过京南水利枢纽二线船闸整体水工模型试验, 分析弯曲收缩河段多线船闸口门区及连接段水流流态, 并提出改善措施。

1 工程概况

当前桂江水运受限于航道条件及通航建筑物规模等级, 主要以区段通航的小吨级船舶为主, 内河水运成本低、运能大的优势远未发挥, 对内河水运发展提出较为迫切的需求。目前京南水电站已建有 1 座Ⅶ级船闸, 已不能满足运量发展的需要和航道等级提升的需要。根据桂江目前货运量增长情况和中远期货运量预测, 提出兴建二线船闸方案。京南原一线船闸设计为Ⅶ级船闸, 闸室尺度为 80 m×12 m×1.5 m(长×宽×门槛水深), 一次通过 1+2×120 t 拖带船队。二线船闸设计初步确定其规模尺度按照通航 1 000 吨级船舶考虑, 船

闸级别为Ⅲ级, 有效尺度采用 190 m×23 m×4.8 m。船闸拟修建在一线船闸左侧, 上闸首与坝轴线齐平, 中心线与一线船闸中心线之间间距为 85 m。同时京南水利枢纽处于“歪葫芦形”河道上游水域, 下游河道有约 45°偏移, 窄槽段距离坝轴线约 500 m, 有河床下切, 存在地形突变, 恰好处在二线船闸口门区。地形见图 1。引航道布置方式为不对称型, 上下游靠船墩均布置于岸侧, 船舶进出闸方式均为曲线进闸、直线出闸。上游引航道底宽 50 m, 上游引航道与主航道连接处的转弯角为 13°, 转弯半径为 330 m; 上游靠船墩布置于岸侧, 船舶进出闸方式为曲线进闸、直线出闸, 为使导航墙具备良好的导航与调顺功能, 主导航墙以 1:6 的倾斜度向靠船墩侧扩宽至引航道宽度, 导航、调顺段长 129.6 m, 停泊段长 190 m, 共设 10 个靠船墩, 墩距 20 m; 上闸首长 40.5 m、宽 50 m, 闸室长 190 m, 下闸首长 38.5 m、宽 50 m; 下游靠船墩布置于岸侧, 船舶进出闸方式为曲线进闸、直线出闸, 为使导航墙具备良好的导航与调顺功能, 主导航墙以 1:6 的倾斜度向靠船墩侧扩宽至引航道宽度, 导航、调顺段长 129.6 m, 停泊段长 190 m, 共设 10 个靠船墩, 墩距 20 m; 下游引航道与主航道之间的转弯角为 67°, 转弯半径为 270 m。

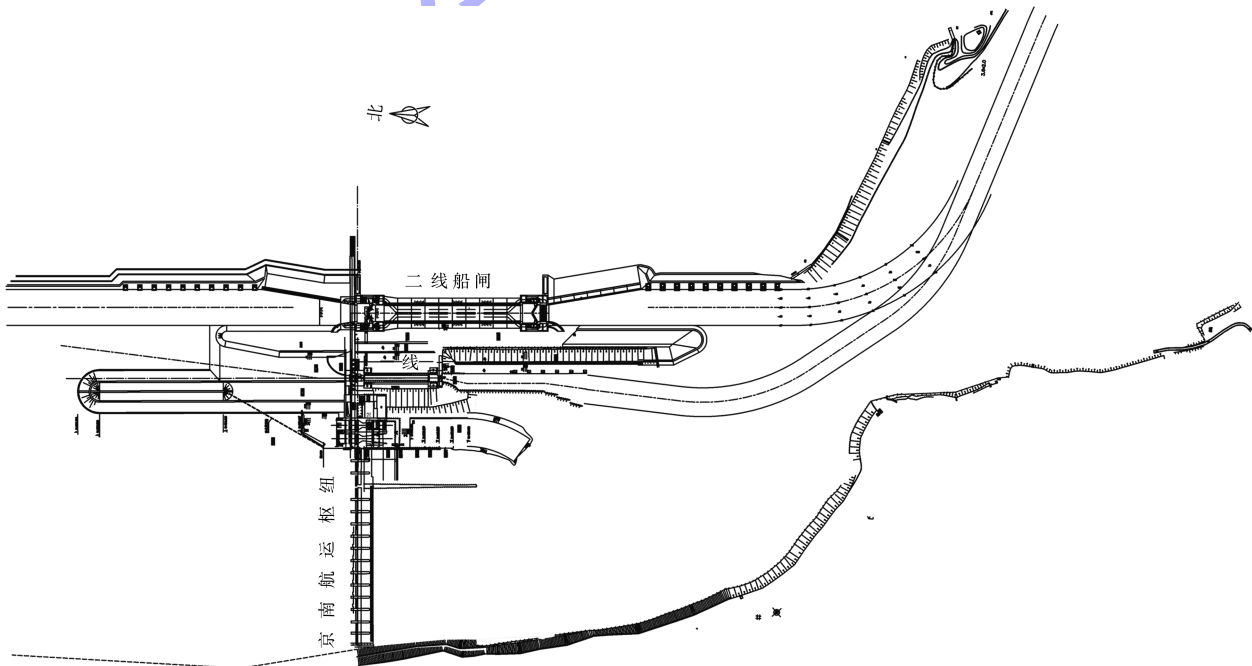


图 1 枢纽地形

京南二线船闸规模远超一线船闸，运行时易对一线船闸产生影响；京南水利枢纽以发电为主，为日调节水电站，电站运行、泄洪调度等对新建二线船闸上、下游引航道口门区通航水流条件产生一定的影响。前期进行二维数学模型计算，但是特殊的运行方式、布置形式和地形影响二维数模计算可靠性，考虑到京南枢纽的下游引航道口门区位于河道束窄处，地形突变剧烈，因此采用物理模型研究京南水利枢纽通航运行安全既必要又有意义。

2 模型试验设计与研究思路

2.1 试验概况

枢纽整体物理模型范围为：上游进口断面距坝轴线 1.9 km，下游出口断面距坝轴线 1.8 km，总长约 3.7 km。模型采用重力相似准则进行设计，整体模型设计为正态模型，几何比尺为 1:100。为了保证模型制作精度，制作地形时采用断面法，平面放样时采用三角网导线系统，同时使得三角形闭合误差不会超过 1'<sup>[5]</sup>。在模型中采用全站仪测定高程，断面安装高程的误差按照规定在 1 mm 以内。模型采用 2.15 的糙率比尺，通常平原河道糙率为 0.025~0.033，模型糙率应在 0.012~0.016，通过采用水泥砂浆抹面制作的模型表面可基本满足糙率相似要求。制作好的模型见图 2。



图 2 物理模型

模型上游来流量采用标准量水堰测控，通过水位计测量两侧河道各部位水位。试验中采用 ADV 三维流速测量系统测量引航道口门区的流速，

同时京南枢纽过闸标准船型船长分布在 40~88 m，故主要对距引航道出口 200 m 范围(即口门区)内水流条件进行测量。

为确保模型能够准确复演天然河道流态，采用中交水运规划设计院有限公司提供的河段流量为 7 060 m<sup>3</sup>/s 时的水面线资料，对模型进行了水面线率定。验证结果表明，下游河道物理模型试验结果与原型观测的水位差值均在 3 cm 以内，模型精度很高。

2.2 试验工况与研究思路

根据资料，二线船闸规划初期运行方式：枢纽最小通航流量为 60 m<sup>3</sup>/s，最大通航流量为 13 200 m<sup>3</sup>/s，且枢纽下泄流量在 2 330~5 200 m<sup>3</sup>/s 时，下游存在有洪水顶托和无洪水顶托两种情况。根据水位流量关系，结合枢纽的特征水位，设置研究工况，试验工况见表 1。前期数学模型试验发现，流量大幅变化，坝前水位大幅上涨，上引航道口门区水流平顺、流态较好，下引航道口门区在大部分工况符合规范。同时，地形上京南枢纽修建在一大角度弯曲河流上，河道呈“葫芦形”，枢纽下游约 500 m 处河道收窄、河床下凹且河流右岸凸出，根据设计数据与京南枢纽过闸标准船型船长判断，口门区恰好处于河道收缩段，导致在某些工况下，下引航道口门区流态复杂。因此在研究中对照数学模型计算结果，依照原设计方案，对所有工况下一、二线船闸上下游口门区水流条件进行物理模型试验研究。模型试验结果与数学模型计算结果规律性一致，即 2 480 m<sup>3</sup>/s(控泄)和最大通航流量 13 200 m<sup>3</sup>/s(敞泄)的情况下，下游水流条件最恶劣，无法满足通航要求。为改善下游口门区水流条件，需进行优化，考虑到物理模型优化过程繁琐及周期长等缺点，采取二维数学模型进行初步优化。同时考虑到一、二线船闸最高通航水位不同，故将 C-6、C-10 及 C-11 作为试验的控制工况，重点研究下游船闸引航道口门区的水流条件改善情况。

表 1 试验工况

工况	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	下游水位/m	坝前水位/m	电站运行方式	泄水闸运行方式	备注
C-1	60	15.58	30.13	单机发电	关闭	左侧机组发电
C-2	60	15.58	30.13	单机发电	关闭	右侧机组发电
C-3	351.1	17.21	30.13	单机满发	关闭	左侧机组发电
C-4	351.1	17.21	30.13	单机满发	关闭	右侧机组发电
C-5	702.2	17.89	30.13	满发	关闭	机组满发
C-6	2 480	20.05	30.13	电站关闭	控泄	无洪水顶托
C-7	2 480	22.31	30.13	电站关闭	控泄	有洪水顶托
C-8	5 200	23.13	27.13	电站关闭	控泄	无洪水顶托
C-9	5 200	25.07	27.13	电站关闭	控泄	有洪水顶托
C-10	7 060	26.03	27.13	电站关闭	敞泄	一线最高通航水位
C-11	13 200	30.58	31.46	电站关闭	敞泄	二线最高通航水位

3 原设计方案通航水流条件

3.1 上引航道口门区水流条件

在原设计方案下, 一线船闸口门区范围内纵向流速小于 0.5 m/s, 横向流速小于 0.3 m/s, 基本无回流, 通航水流条件满足要求; C-8~C-11 工况下, 上游坝前水位抬升, 最高达到 31.46 m(即二线船闸最高通航水位), 原设计隔流墙高为 31.00 m, 水流漫过隔流堤, 在二线船闸口门区形成表面横向冲流。C-8~C-10 工况下, 枢纽泄水 5 200~7 060 m<sup>3</sup>/s 时, 二线船闸口门区范围内出现的最大横向流速为 0.95 m/s, 最大纵向流速为 1.20 m/s; C-11 工况二线船闸口门区范围内出现的最大横向流速为 1.12 m/s, 最大纵向流速为 1.78 m/s, 流速超标, 流态恶劣, 不利于通航, 应当进行优化。

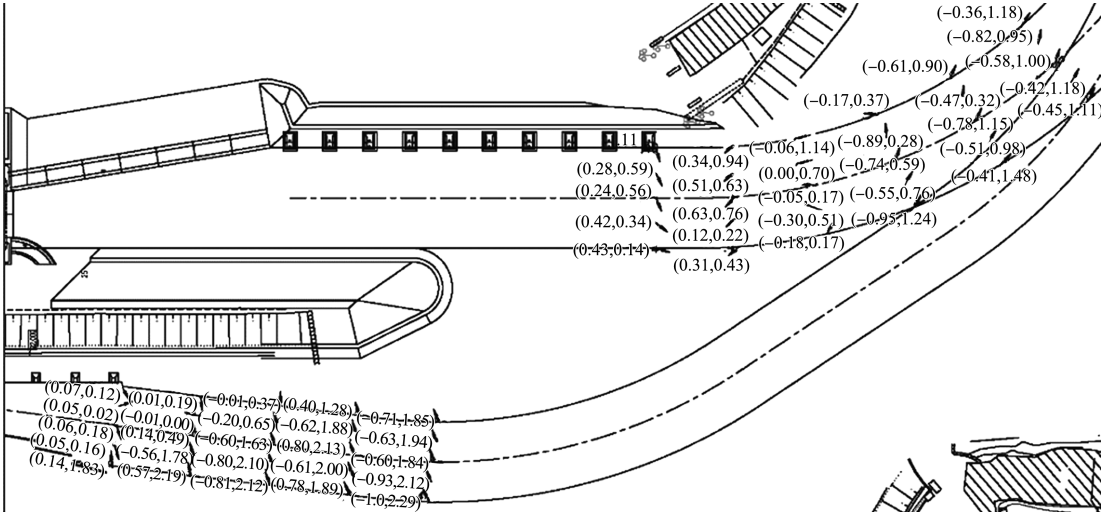
3.2 下引航道口门区水流条件

前期数学模型计算结果表明: 加建二线后, 一线船闸下游口门区通航水流条件优于原一线船闸下游口门区通航水流条件, 故在物理模型试验

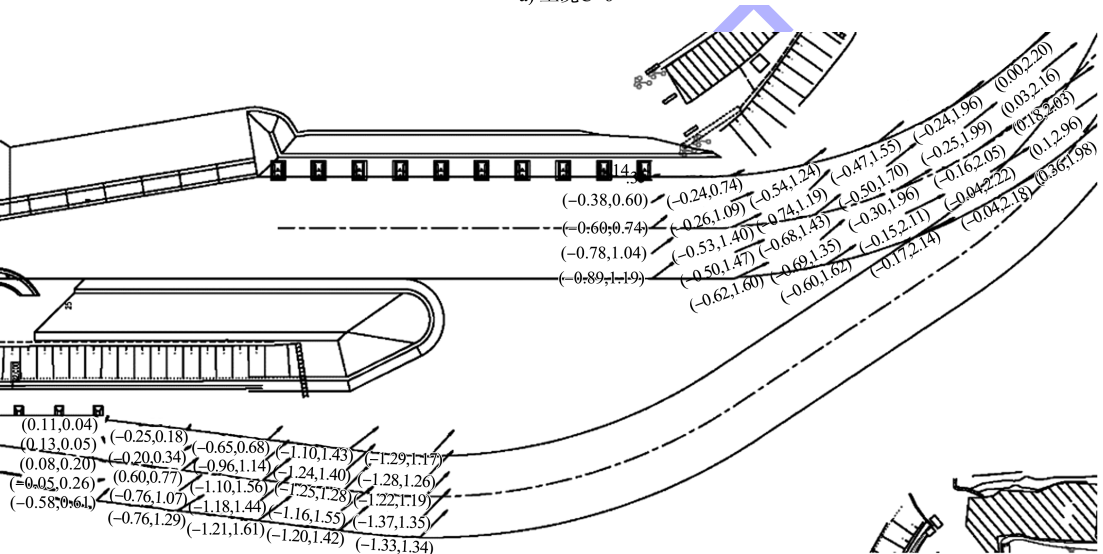
中重点关注二线船闸下游口门区通航水流条件, 兼顾一线船闸下游口门区水流条件。

物理模型试验结果与数学计算结果基本保持一致, 一、二线船闸间采用实体导流隔流堤, 二者引航道内水体相互独立、互不干扰, 水流条件满足通航要求, 有利于船舶进出闸室。但是物理模型试验表明: 原设计方案下, 二线船闸的兴建使一线船闸下游口门区易产生斜向流, 在控泄工况下一线船闸下游口门区存在大回流区域, 见图 3a); 在敞泄工况下, 横向流速超标, 见图 3b); 同时二线船闸下游口门区处于河道转弯, 此处河道收窄、河床下凹, 河流右岸凸出, 弯道处存在水流顶冲, 这导致大部分工况下二线船闸口门区通航条件不满足规范限值, 特别是在工况 C-11 下水流条件最为恶劣, 口门区范围内最大横向流速达到 1.91 m/s, 最大纵向流速达到 3.25 m/s, 见图 3c); 但是在低水位工况时电站尾水引起的水面波动不大, 无气泡漩涡。模型试验在原设计方案的基础上进行了优化研究。

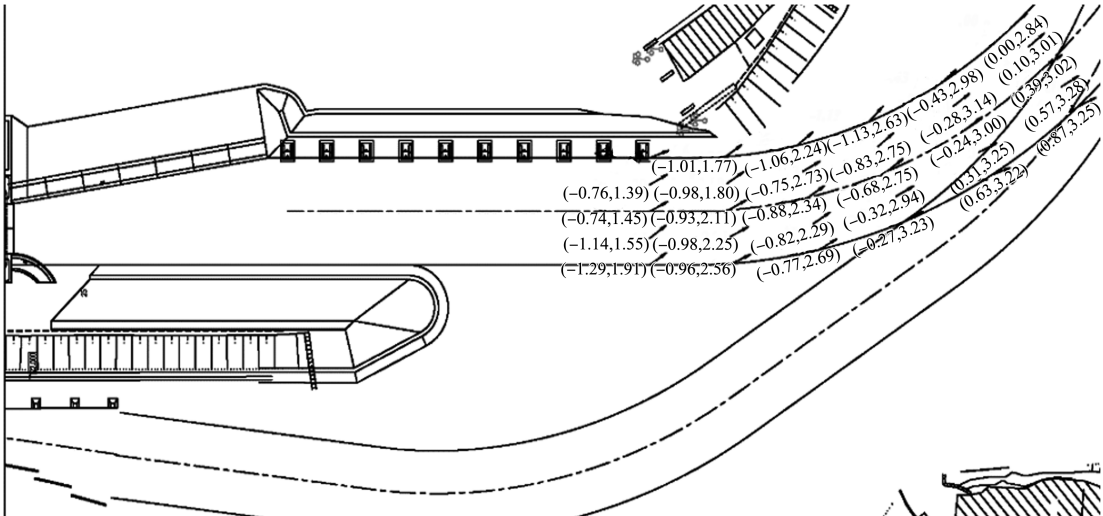




a) 工况C-6



b) 工况C-10



c) 工况C-11

注：左边数为该点横流速，右边数为该点纵流速。

图 3 原方案下游口门区流速分布 (单位: m/s)

4 引航道优化方案试验

在船闸工程中, 常见的改善水流条件措施有: 调整隔流堤长度与转角, 导航堤堤头与堤身开孔, 设置丁坝或潜丁坝, 局部地形开挖与平整, 调顺岸线等<sup>[6]</sup>。

4.1 上引航道口门区优化

依据数学模型推荐方案, 上游引航道加设了 140 m 导航墙, 物理模型研究发现, 水流流速超标的主要原因是隔流堤顶高程不足导致泄水闸前壅高水流漫过隔流堤, 水流在口门区产生横向流速, 形成较为恶劣的流态。故在原设计方案的基础上将隔流堤加高至 33.46 m 高程。从结果上看, 各工况下水力指标均满足《船闸总体设计规范》限值要求, 在 C-11 工况下, 枢纽泄水 13 200 m<sup>3</sup>/s 时, 上游水位为二线船闸最高通航水位, 该工况下一线船闸不通航。此工况下二线船闸口门区范围内出现的最大横向流速为 0.31 m/s, 最大纵向流速为 0.73 m/s, 口门区内基本无回流现象, 仅有个别点超标, 满足船只进出闸室需求。

4.2 下引航道口门区优化

在原设计方案中没有充分考虑兴建二线船闸对原一线船闸引航道口门区水流条件的影响; 水

流漫顶, 二线船闸口门区表面会出现较大的横向流速, 影响通航安全; 在口门区有大回流。依据数学模型推荐方案, 首先在物理模型中采取了以下 3 种措施: 1) 为避免一、二线船闸水流之间的相互影响, 特别是二线船闸对一线船闸下游口门区通航水流条件的影响, 在一、二线船闸引航道之间设置一道 135 m 实体不透空隔流墙, 与原一、二线隔流堤相连, 高程与原隔流堤同高, 均为 32.58 m。2) 考虑到隔流墙的影响, 将下游一线船闸口门区航道中心线向河道中心侧平移 8.5 m, 在距离下闸首 283 m 处以半径为 652 m 的圆弧与原下游航道顺接。3) 为减弱弯道顶冲水流的影响, 对图 4 所示条线填充区域进行开挖, 开挖高程见图 4。改造后物理模型试验结果表明此方案较原方案已有明显改善, 但是在 C-10~C-11 工况下(敞泄), 口门区部分区域横向流速仍超过《船闸总体设计规范》限值; 同时在 C-6 工况下(控泄), 口门区仍存在较大回流。通过观察发现该处存在深潭导致水流无法顺利归槽, 于是进一步对该地形突变处进行填埋整治, 对图 4 方格填充区域进行平整, 填高至 10 m 高程。

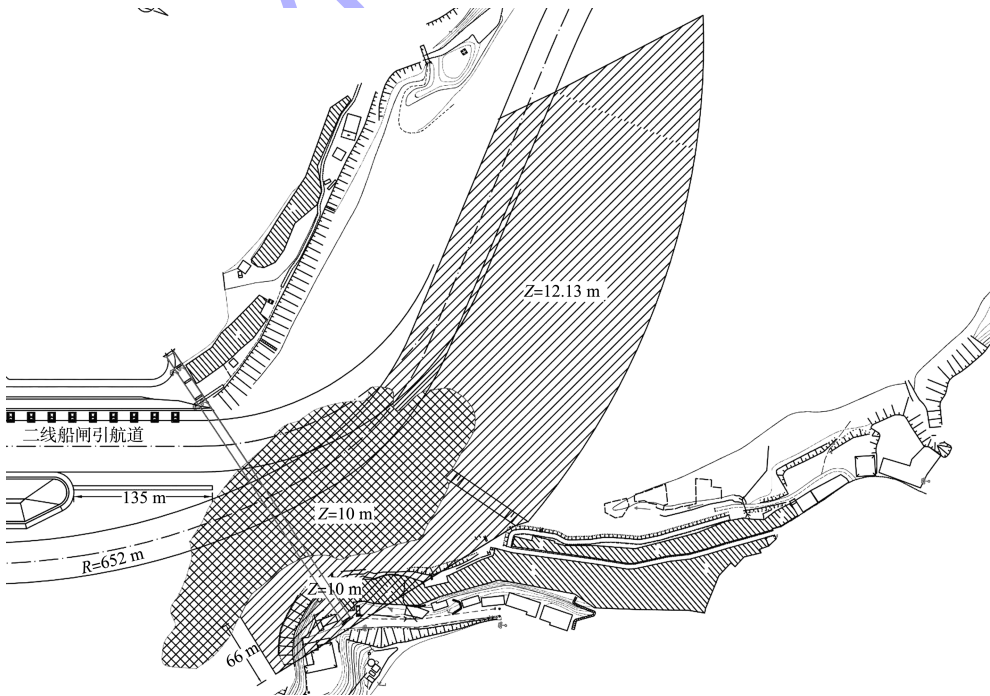
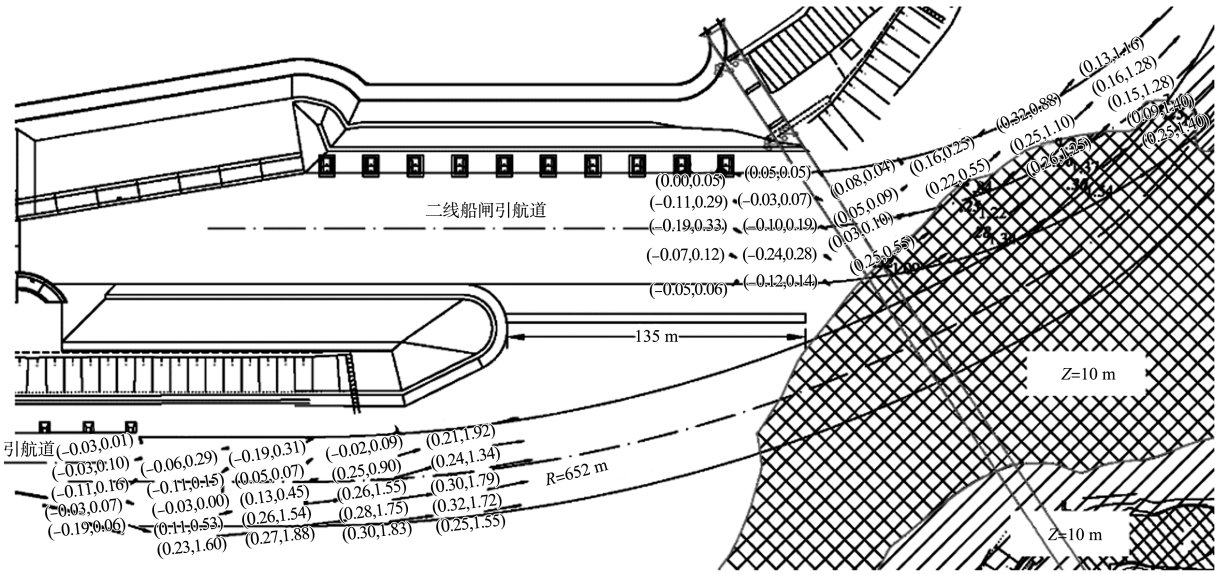


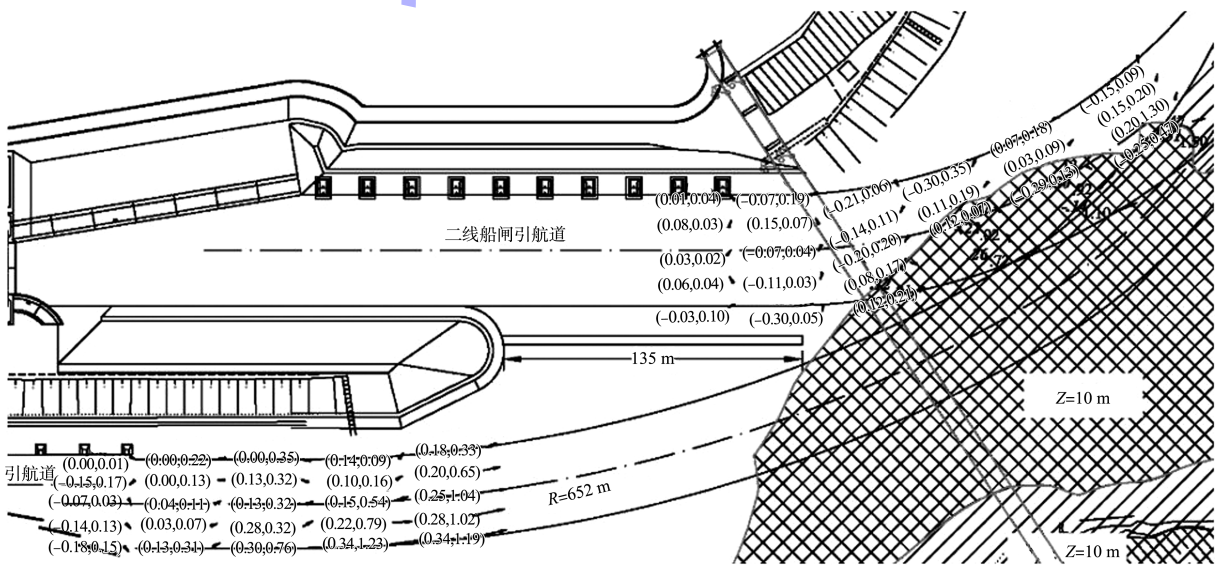
图 4 下游河道整治方案

进行以上优化措施后，对控制工况进行了重新试验。试验结果表明：在最终推荐方案下，C-6 工况下，枢纽泄水 2 480 m<sup>3</sup>/s，一线船闸下游口门区最大横向流速为 0.32 m/s、最大纵向流速为 1.88 m/s；二线船闸下游口门区最大横向流速为 0.60 m/s、最大纵向流速为 1.54 m/s，基本无回流，见图 5a)；C-10 工况下，枢纽泄水 7 060 m<sup>3</sup>/s，一线船闸下游口门区最大横向流速为 0.34 m/s、最大纵向流速为 1.76 m/s，二线船闸下游口门区最大

横向流速为 0.66 m/s、最大纵向流速为 1.50 m/s，仅有少数几个点流速超标，基本满足通航水流条件，见图 5b)；在 C-11(一线船闸不通航)工况下，二线船闸下游最大横向流速为 0.33 m/s、最大纵向流速为 2.33 m/s，仅有少数外围的几个点流速超标，基本满足通航水流条件，见图 5c)。进行地形平整后，控泄工况下口门区回流得到明显改善，说明平整下凹河床和拓宽窄槽型河道有利于缓解该区域的回流。



a) 工况C-6



b) 工况C-10



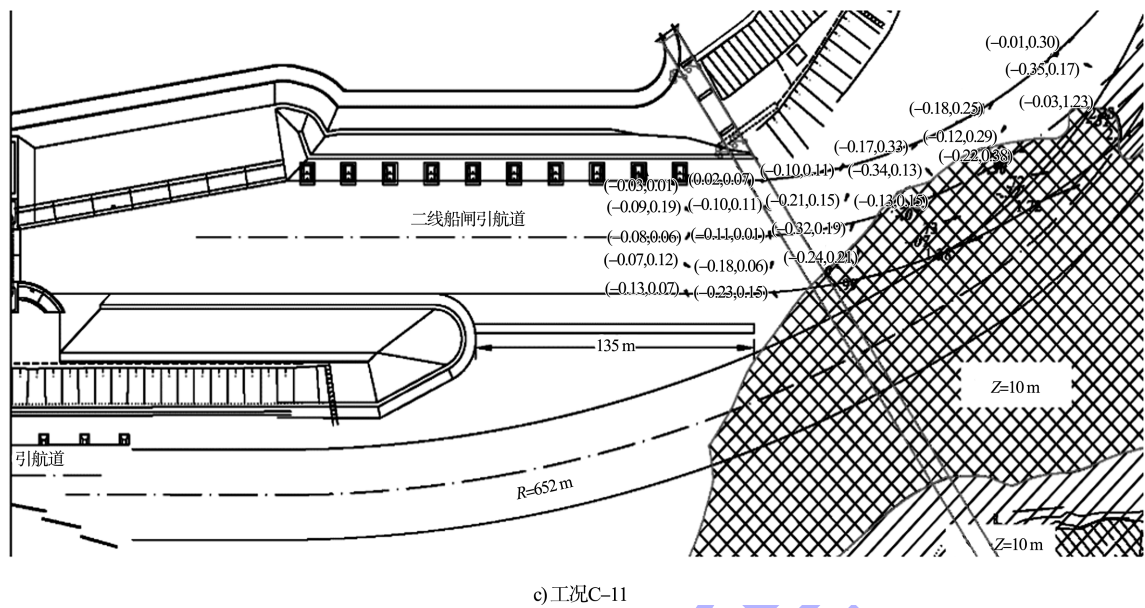


图 5 最终优化方案下游口门区流速分布 (单位: m/s)

5 结语

- 1) 京南枢纽一线船闸总体水流条件较好, 只需通过调整一线船闸下游航道线的方式即可满足设计要求。
- 2) 京南枢纽二线船闸引航道为避免出现水流翻过隔流堤产生混乱水流的现象, 提出上游隔流堤高程应加高至 33.46 m, 下游隔流堤高程应加高至 32.58 m。
- 3) 京南枢纽二线船闸下游引航道处于弯曲窄槽型河段上游, 口门区处于弯道水流顶冲位置, 同时受到河床过水断面束窄影响, 流速较大, 通航水流条件恶劣。开展了 3 种措施优化后的试验研究, 最终推荐增设隔流墙、调顺岸线, 同时开挖河床等综合措施, 为京南枢纽复线船闸工程通航水流条件改善提供了技术支持。
- 4) 一般枢纽应布置于顺直河道段, 由于受到多种条件影响, 一些枢纽布置于弯曲窄槽型河段, 水流条件复杂, 增设隔流墙、调整航线、调顺岸

线, 开挖河床等工程和非工程措施是改善此类复杂通航枢纽水流条件的有效措施。

参考文献:

[1] 刘中峰, 刘达, 黄本胜, 等. 孟洲坝枢纽二线船闸上引航道通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2019(1): 119-125.

[2] 赵家强, 于广年. 韩江东溪船闸通航水流条件优化试验研究[J]. 水运工程, 2019(10): 134-140.

[3] 周勤, 谢灵运, 马倩, 等. 古顶水利枢纽二线船闸下引航道布置物理模型试验研究[J]. 水运工程, 2019(6): 105-110.

[4] 中交水运规划设计院有限公司. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[5] 南京水利科学研究院. 水工(常规)模型试验规程: SL 155—1995[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.

[6] 程璐, 赵建钧, 辜晋德. S形弯曲河段低水头闸坝枢纽口门区通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2016(12): 106-112.

(本文编辑 武亚庆)