



韩庄双线船闸下游引航道水力特性模拟研究*

齐庆辉, 曲红玲, 东培华, 刘 勇

(江苏省交通规划设计院股份有限公司, 江苏省水运工程技术研究中心, 江苏 南京 210014)

摘要: 京杭运河韩庄一线、复线船闸共用引航道, 船闸灌、泄水过程中形成非恒定流, 水流十分复杂。为确保引航道内船舶航行和停泊安全, 采用 MIKE21 水动力模型对船闸上下游不同水位组合情况下引航道复杂非恒定流进行深入研究, 模拟计算引航道、靠船墩、口门区纵向流速、横向流速及环流分布情况。研究表明: 泄洪条件下韩庄一线、复线船闸不满足通航要求; 针对泄洪期存在的水力学问题, 提出了有效工程措施——格栅及局部疏浚。

关键词: 船闸; 下游引航道; 非恒定流; 数值模拟

中国分类号: U 617. 6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)09-0117-06

Flow characteristics simulation of double-paralleling-lane locks' lower approach channel

QI Qing-hui, QU Hong-ling, DONG Pei-hua, LIU Yong

(Jiangsu Technology Research Center for Water Transport Engineering,

Jiangsu Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: The Hanzhuang line and twin-lane locks use the same lower approach channel and produce complex unsteady flow in filling and draining water. To ensure that the ships' safe sailing and berthing, we probe into the complex unsteady flow of lower approach channel in different upstream and downstream level combinations by MIKE21 hydrodynamic model, simulating the distribution of the longitudinal velocity, the lateral velocity and the circulation flow. The result shows that Hanzhuang line and the twin-lane locks don't meet the navigation requirements during the flood period. In view of the hydraulics problems of flood period, we put forward the effective engineering measures using grille and local dredging.

Keywords: navigation lock; lower approach channel; unsteady flow; numerical simulation

船闸是用以保证船舶顺利通过航道上集中水位落差的厢形水工建筑物, 广泛应用于河流和运河上。船闸灌泄水时下游引航道内流态十分复杂, 尤其并列布置的双线船闸共用下游引航道时, 船闸不同的运行方式及河道泄洪都会在下游引航道内产生复杂的水流结构及水位波动变化, 对船舶航行、停泊及闸门自身安全都有较大影响。陈汉宝等^[1]建立微山二线船闸通航水流条件数学模型, 进行不同重现期的数值推算, 研究泄洪和船闸调

水对通航安全的影响。黄伦超等^[2]通过数学模型方法, 研究双线船闸错开泄水相对时间要求和旁侧泄水流量比例等对下游引航道流态的影响。崔冬等^[3]采用一二维耦合数学模型, 对大治河双线船闸布置的合理性进行分析。

韩庄拟建复线船闸与韩庄船闸共用引航道, 在船闸灌泄水、南水北调及丰水期节制闸泄洪过程中下游引航道产生复杂的非恒定流, 影响船舶航行及停泊安全^[4]。本文建立韩庄船闸二维水流

收稿日期: 2014-12-12

*基金项目: 江苏交通运输科研项目 (2011Y01)

作者简介: 齐庆辉 (1985—), 男, 工程师, 从事港口、航道及近海工程数值模拟研究工作。

数学模型,研究不同运行水位组合下船闸下游引航道内产生的水流流态、横流、环流等水动力要素及反向水头对闸门安全的影响;研究双线船闸在节制闸泄洪或南水北调抽水对下游引航道流态的影响,并针对泄洪期存在的水力学特点,提出有效的工程改善措施。

1 工程概况

京杭运河是山东省内河航道总体规划“一干多支”格局的核心,作为山东连接苏、浙、沪等发达省市的重要通道。近年来,随着水路运输量显著上升,超过了现有单线船闸的通过能力,迫切需要建设复线船闸缓解运输压力。拟建韩庄复线船闸为Ⅱ级标准船闸,主尺度为 230 m×23 m×5 m (有效长度×宽×门槛水深),最大设计船型为 1+2×2 000 t 顶推船队,单向通过能力为 2 900 万 t。下游引航道采用“直线进闸,曲线出闸”布置方式,主导航墙为直线,长度为 160 m,停泊段长 500 m。

2 数学模型

2.1 控制方程

本文采用 MIKE21 二维水流模型,基于二维平面不可压缩雷诺平均纳维埃-斯托克斯 (Navier-Stokes) 浅水方程,在 $h = \eta + d$ 范围内对连续方程和动量方程进行积分,得到下列二维深度平均浅水方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (1)$$

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \cdot \frac{\partial p_a}{\partial x} -$$

$$\frac{gh^2}{2\rho_0} \cdot \frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{xx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_sS \quad (2)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} = -f\bar{u}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \cdot \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \cdot \frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_sS \quad (3)$$

式中: t 为时间; η 为潮面高程; d 为静水深度; $h = \eta + d$ 为总水深; $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 为深度平均流速 x 、 y 方向的分量, $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 可按下式计算:

$$\begin{cases} h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \\ h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \end{cases} \quad (4)$$

式中: S 为源汇项; f 为科氏力系数; g 为重力加速度; ρ 为水密度; ρ_0 为基准水密度; s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 为辐射应力张量分量; T_{ij} 为水质点侧向应力,包括黏滞摩擦力、紊流摩擦力、对流力等。

由于《船闸总体设计规范》和《船闸输水系统设计规范》主要针对船闸下游引航道表面流速提出明确要求,因此本文中纵向、横向流速值已换算为水体表面流速。

2.2 模型研究范围

数学模型计算范围为韩庄节制闸—京福高速大桥下游 3 km 处,全程约 8.6 km。上游控制边界有韩庄节制闸、老运河节制闸、南水北调提水站、一线船闸、复线船闸,采用流量控制;下游边界采用水位控制。模型采用非结构化网格(图 1),网格节点数为 44 770 个,三角单元个数为 87 463 个,相邻网格节点最大间距为 15 m,最小间距为 5 m。

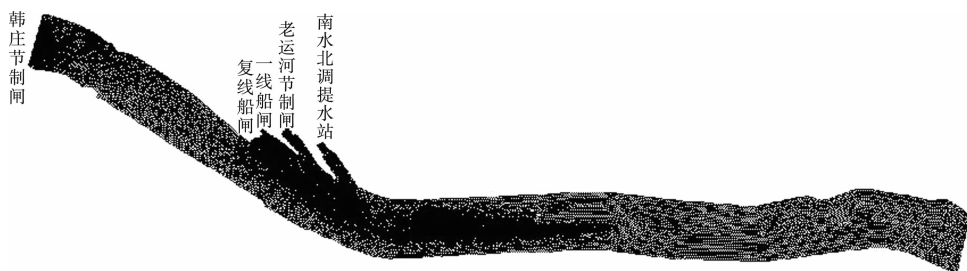
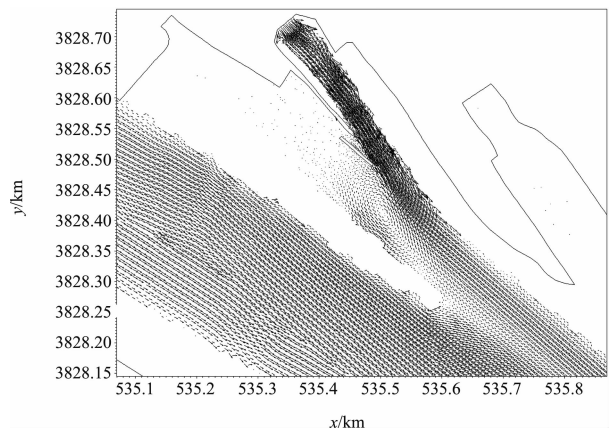


图 1 数学模型计算域网格布置

2.3 模型参数取值及合理性分析

根据该河段已有研究^[5], 韩庄船闸引航道及相关河道糙率取 0.025 ~ 0.04; 紊动黏性系数取 0.01 m²/s; 计算时间步长取 5 s。

现状条件下, 韩庄节制闸泄洪 800 m³/s 时船闸限制通航, 根据节制闸调水资料, 选取韩庄节制闸泄洪 832 m³/s、老运河闸泄洪 231 m³/s, 韩庄节制闸闸下水位 31.35 m 为条件, 计算分析韩庄船闸现状条件下游引航道水流条件。研究得到, 韩庄船闸主航道与老运河交汇处形成了明显的回流圈, 回流强度为 0.5 ~ 0.7 m/s (图 2), 不满足《船闸总体设计规范》中口门区回流速度不大于 0.4 m/s 的要求, 这与目前韩庄一线船闸在韩庄节制闸泄洪 800 m³/s 时限制通航的实际运营情况基本相符。



注: 韩庄节制闸泄洪 832 m³/s、老运河闸泄洪 231 m³/s。

图 2 韩庄现有船闸泄洪期间流场分布

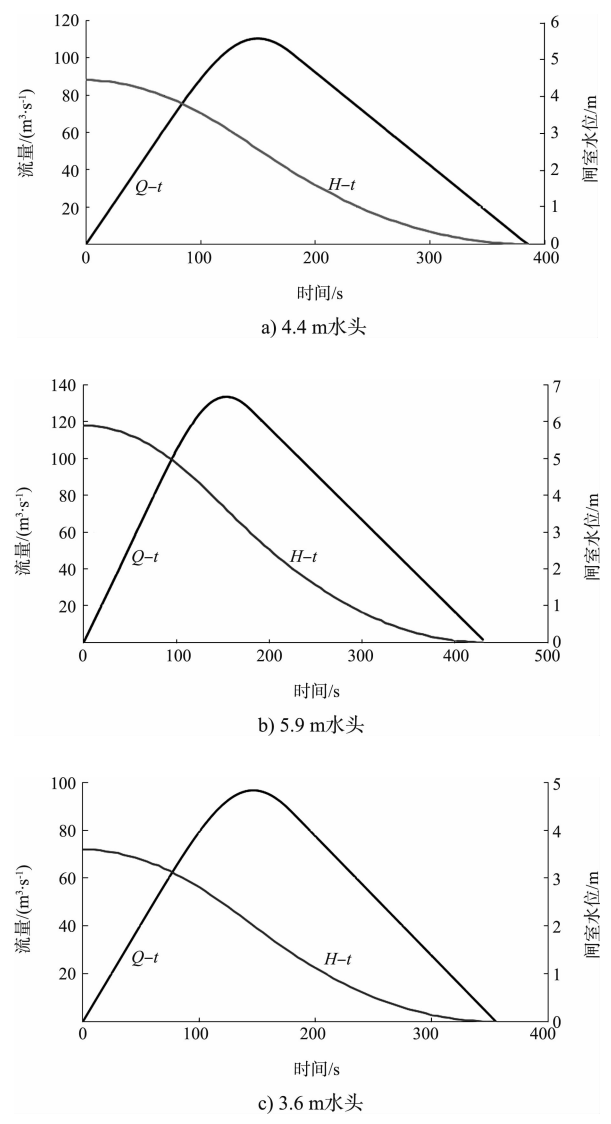
3 韩庄两线船闸水力特性及研究工况

本研究中, 韩庄两线船闸水力特性相同。韩庄上下游水位组合情况为: 1) 上游正常挡水位 33.0 m, 下游近期最低通航水位 28.6 m, 水位差 4.4 m, 最大流量为 110.45 m³/s。2) 上游正常挡水位 33.0 m, 下游远期最低通航水位 29.4 m, 水位差 3.6 m, 最大流量为 96.67 m³/s。3) 最大水头差组合, 上游水位 35.8 m, 下游水位 29.9 m, 水位差 5.9 m, 最大流量为 133.53 m³/s。4) 最高通航水位 (20 a 一遇洪水) 组合, 上游水位 35.8 m, 下游水位 34.63 m, 水位差 1.17 m, 最大流量为

51.76 m³/s。船闸下游开边界水位过程由船闸闸下水位反算得到。图 3 为韩庄船闸泄流过程曲线。

表 1 计算工况组合

工况	序号	上下游水位/m	控制边界流量情况/ (m ³ ·s ⁻¹)	泄水船闸
1	1-1	33.0 ~ 28.6	南水北调抽水流量为 125 其它为 0	一线船闸
	1-2			复线船闸
	1-3			两线船闸
2	2-1	33.0 ~ 29.4	南水北调抽水流量为 125 其它 0	一线船闸
	2-2			复线船闸
	2-3			两线船闸
3	3-1	35.8 ~ 29.9	全部为 0	一线船闸
	3-2			复线船闸
	3-3			两线船闸
4	4-1	35.8 ~ 34.63	韩庄节制闸 3 100 老运河节制闸 500 其它 0	一线船闸
	4-2			复线船闸
	4-3			两线船闸



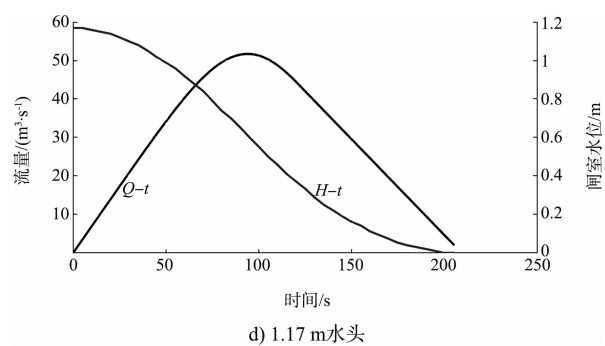


图 3 韩庄船闸泄流过程线

4 计算结果分析

为计算分析不同工况组合条件下韩庄双线船闸下游引航道的水流条件，记录了韩庄复线船闸闸下测点 1、韩庄一线船闸闸下测点 20 的水位波动情况；记录了下游引航道中心线（点 2、点 21）、靠船墩前沿（点 3 ~ 11，点 22 ~ 24）、口门区航道中心线（点 12 ~ 17，点 25 ~ 30）、口外区航道中心线（点 18 ~ 19）等典型位置的水流及流态变化情况，测点布置见图 4。

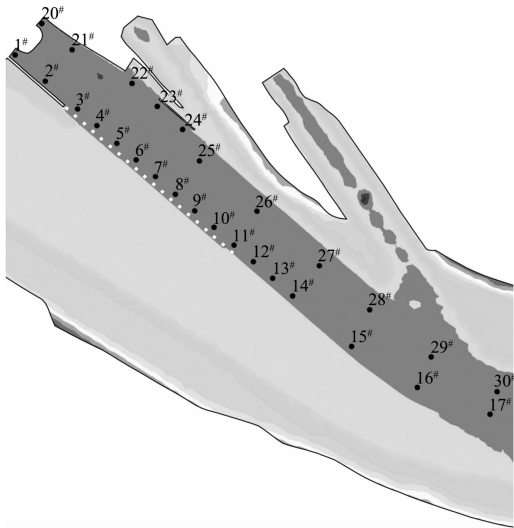


图 4 典型位置测点布置

4.1 水位波动

船闸泄水过程产生非恒定流，在下游引航道内产生相应的非恒定水流运动，下游引航道内水位随水波的传递产生上升或下降运动。由于下游引航道较短距离内与韩庄运河交汇，水道展宽，船闸泄水时的非恒定流在下闸首处产生的反射波不是很强。工况 1 船闸上下游水位差 4.4 m，泄水最大流量

110.45 m³/s，产生的最大反向水头为 0.08 m；工况 2 船闸上下游水位差 3.6 m，泄水最大流量 96.67 m³/s，产生的最大反向水头为 0.06 m；工况 3 船闸上下游水位差 5.9 m，泄水最大流量 133.53 m³/s，产生的最大反向水头为 0.07 m；工况 4 船闸上下游水头差 1.17 m，泄水最大流量为 51.76 m³/s，泄水过程中产生的最大反向水头仅为 0.02 m。

4 种水位组合情况下，一线船闸、复线船闸下闸首人字门处产生的最大水位波动为 0.08 m，满足 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》中对反向水头不宜大于 0.25 m 的要求。最大水位波动情况（工况 1）见图 5。

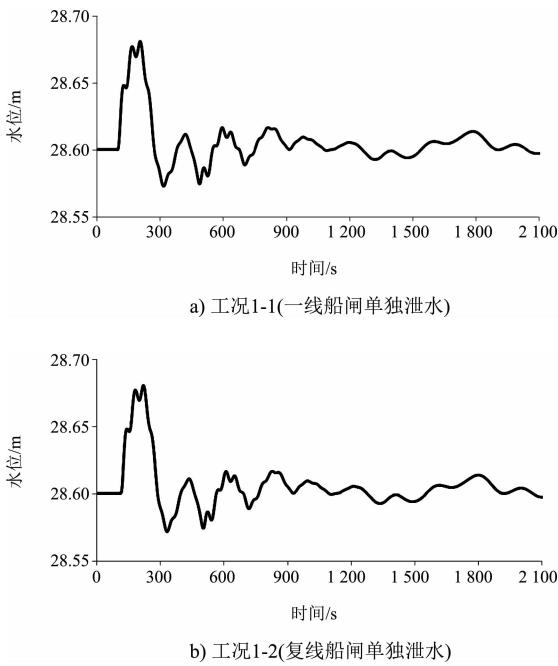


图 5 韩庄一线、复线船闸下闸首水位波动情况

4.2 流速及流态

工况 1、2、3 情况下，一线船闸和复线船闸下游引航道中心线纵向流速最大值为分别为 0.52、0.62 m/s，满足《船闸输水系统设计规范》中低于 0.8 ~ 1.0 m/s 的要求；一线船闸和复线船闸靠船墩前沿纵向流速最大值分别为 0.36、0.49 m/s，满足《船闸总体设计规范》中制动段和停泊段水面最大纵向流速不大于 0.5 m/s 的要求；一线船闸和复线船闸口门区航道中心线纵向流速最大值分别为 0.25、0.22 m/s，满足《船闸总体设计规范》中口门区水面纵向流速不大于 2 m/s 的要求。引航

道内大部分流态良好, 主流基本沿船舶航行方向。
工况 1 下游引航道流场见图 6。

泄洪条件下 (工况 4), 复线船闸靠船墩前沿线纵向流速最大值为 0.96 m/s, 不满足《船闸总体设计规范》中制动段和停泊段水面最大纵向流速不大于 0.5 m/s 的要求。

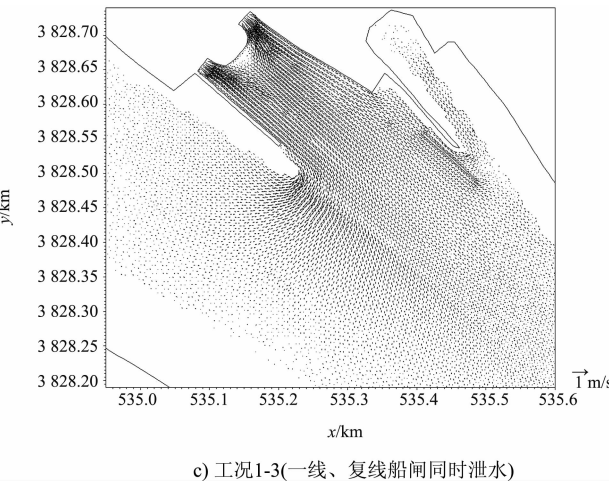
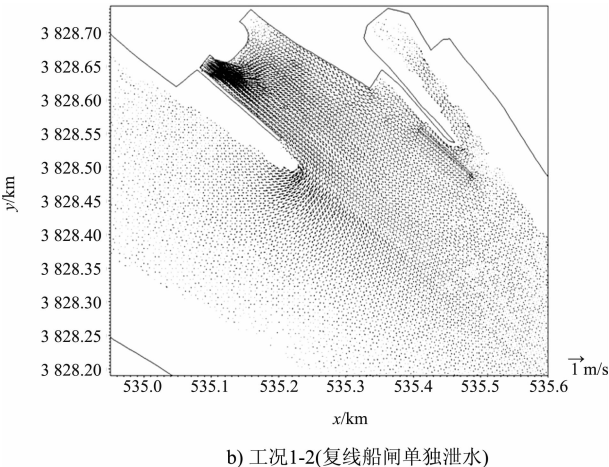
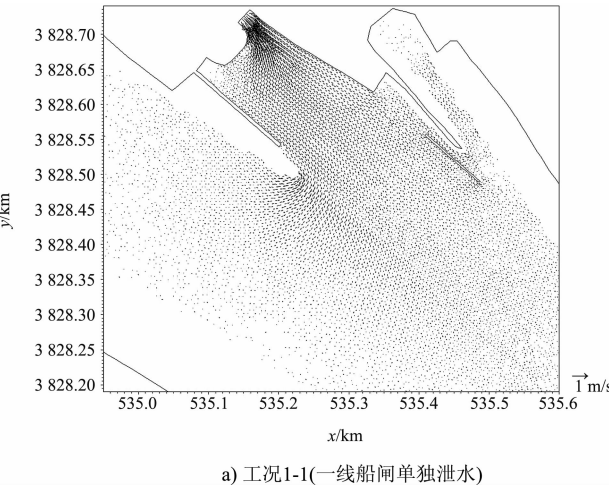


图 6 工况 1 一线、复线船闸下游引航道流场

4.3 引航道横流

工况 1、2、3 情况下, 一线船闸和复线船闸靠船墩前沿线横向流速最大值分别为 0.04、0.15 m/s, 基本满足《船闸总体设计规范》中制动段和停泊段的水面横向流速值不大于 0.15 m/s 的要求; 一线船闸和复线船闸口门区横向流速最大值分别为 0.12、0.04 m/s, 满足《船闸总体设计规范》中口门区水面横向流速值不大于 0.30 m/s 的要求。

工况 4 情况下, 一线船闸和复线船闸靠船墩前沿线横向流速最大值分别为 0.16、0.37 m/s (表 2), 均不满足《船闸总体设计规范》中制动段和停泊段的横向流速值不大于 0.15 m/s 的要求。

表 2 复线船闸下游引航道横流最大值 m/s			
靠船墩	工况		
	4-1	4-2	4-3
点 3	0.06	0.06	0.09
点 4	0.20	0.20	0.23
点 5	0.29	0.29	0.31
点 6	0.32	0.32	0.33
点 7	0.37	0.37	0.37
点 8	0.30	0.30	0.31
点 9	0.25	0.25	0.25
点 10	0.20	0.20	0.20
点 11	0.18	0.18	0.18

4.4 泄洪条件下改善措施

针对设计最高通航水位对应的泄洪流量 (20 a 一遇洪水), 采取有效的工程措施保证泄洪条件下船舶能够正常通航 (图 7)。一般情况下, 设置具有一定阻水作用的格栅是减小靠船墩前沿线横流、纵流常用的有效工程措施; 但由于该水文条件下洪水流量较大, 韩庄节制闸泄洪 3 100 m³/s, 老运河闸泄洪 500 m³/s, 仅仅设置格栅下游引航道水流条件不能满足规范相关要求。本研究采用的工程措施为: 复线靠船墩头部设置 350 m 格栅且同时按照下游引航道设计底高程对韩庄运河进行局部疏浚挖深, 改善下游引航道水动力条件, 工程位置见图 7。

工程后: 由于格栅的阻水和韩庄运河疏浚区域的分流作用, 工程后水流改善效果明显。韩庄一线船闸和复线船闸下游引航道水流归顺, 引航

道内大部分流态良好；泄洪条件下产生的回流圈基本消失，下游引航道纵向流速、横向流速值均能够满足《船闸总体设计规范》要求。

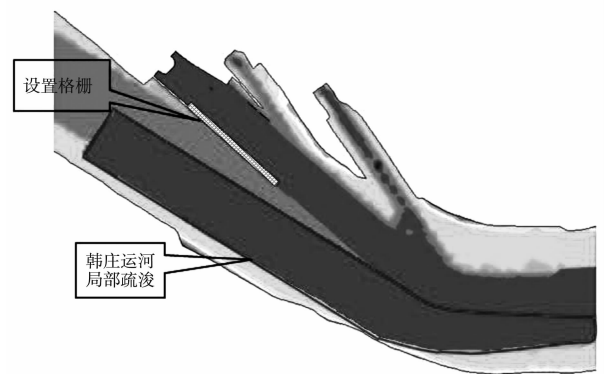


图 7 工程改善措施

1) 纵向流速：靠船墩前沿线纵向流速最大值为 0.49 m/s，满足《船闸总体设计规范》中制动段和停泊段水面最大纵向流速不大于 0.5 m/s 的要求；口门区纵向流速最大值为 1.66 m/s，满足《船闸总体设计规范》中口门区纵向流速不大于 2 m/s 的要求。

2) 横向流速：靠船墩前沿线横向流速最大值为 0.15 m/s，基本满足《船闸总体设计规范》中制动段和停泊段水面最大横向流速不大于 0.15 m/s 的要求。口门区横向流速最大值为 0.29 m/s，满足《船闸总体设计规范》中口门区纵向流速不大于 0.3 m/s 的要求。

5 结语

1) 韩庄船闸下游引航道在较短距离内与京杭运河交汇，水道展宽，船闸泄水时非恒定流在下

闸首处产生的反射波不是很强。4 种典型水位组合条件下，一线船闸和复线船闸下闸首人字门处产生的最大水位波动为 0.08 m，均满足规范中反向水头不大于 0.25 m 的要求。

2) 前 3 种水位组合条件下，下游引航道水动力条件较好，引航道、靠船墩、口门区横向流速与纵向流速值满足相关规范要求，过闸船舶（队）可以顺利通航。

3) 最高通航水位条件下（20 a 一遇洪水），下游引航道水流流态不满足规范要求，建议增加复线靠船墩前增加格栅，同时局部浚深韩庄运河，充分利用格栅的阻水作用及局部浚深河道的分流作用，确保泄洪时满足船舶通航要求。

参考文献：

[1] 陈汉宝, 鄢洪青, 郑宝友. 微山二线船闸通航水流条件数学模型[J]. 水道港口, 2002, 23(3): 111-115.

[2] 黄伦超, 李珊, 游涛, 等. 双线船闸共用下游引航道水流特性及其影响[J]. 交通科学与工程, 2012, 28(4): 37-44.

[3] 崔冬, 刘新成, 潘丽红. 一、二维耦合数学模型在水利枢纽通航水流条件研究中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(1): 35-39.

[4] 中交水运规划设计院有限公司. 京杭运河微山南至峰城段复线船闸工程工可报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2013.

[5] 时延庆, 曾光, 郑喜东. 韩庄运河韩庄至台儿庄河段糙率分析[J]. 山东水利, 2010(4): 26-28.

(本文编辑 武亚庆)

征订通知

2016 年《水运工程》杂志征订工作已经开始，订阅方式请登录《水运工程》杂志社官方网站：www.sygc.com.cn，首页下载中心下载 2016 年《水运工程》征订通知单，有关要求和反馈信息一应俱全。