



基于物理模型试验的船闸上游引航道 通航水流条件研究*

肖颜松¹, 孙倩², 谢春航², 张文武³, 张信³, 袁浩⁴

(1. 重庆交通大学 航运与船舶工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074;

3. 中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051;

4. 重庆交通大学, 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400074)

摘要: 某航电枢纽对弯曲河道裁弯取直, 其上游引航道与主流斜交角度大, 导致船舶进出引航道存在较大安全隐患, 针对上述问题, 通过工程整体物理模型试验, 对上游引航道及其连接段的通航水流条件进行研究。试验结果表明, 原方案上游引航道口门区及连接段横向流速指标明显超过规范要求, 后续采取工程措施对上游引航道进行优化, 以改善其通航水流条件。经多方案优化比选, 分析上游引航道及其连接段在不同措施下的水流结构与流速分布规律, 确定了包括局部开挖、调整船闸横向位置以及优化引航道导向段、长度与宽度等综合措施, 将原方案横向流速峰值由 0.61 m/s 降至 0.28 m/s, 大幅改善了上游引航道及其连接段的通航水流条件, 提升了船舶通航安全性。相关研究成果可为类似工程提供参考。

关键词: 船闸; 上游引航道; 通航水流条件; 物理模型试验

中图分类号: U61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0153-06

Navigation flow conditions in upstream approach channel of ship lock based on physical model tests

XIAO Yansong¹, SUN Qian², XIE Chunhang², ZHANG Wenwu³, ZHANG Xin³, YUAN Hao⁴

(1. School of Shipping and Naval Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. PowerChina Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China;

4. Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Following the straightening of a curved river channel at a navigation-power hub, the upstream approach channel formed a large oblique angle with the main stream, which posed significant safety risks to vessel passage. To address this issue, an integrated engineering physical model is developed to systematically investigate the navigational flow conditions in the upstream approach channel and its connecting section. Experimental results show that under the original design scheme, the transverse flow velocities in the entrance zone and connecting section of the upstream approach channel substantially exceeds the limits stipulated in relevant standards. This necessitated the implementation of engineering modifications to optimize the flow conditions. Through comparative analysis of multiple proposed schemes, the study examines the flow structures and velocity distribution patterns of the upstream approach channel and its connecting section under different intervention measures. An integrated set of measures is identified, including localized excavation, lateral repositioning of the lock, and optimization

收稿日期: 2025-09-24 录用日期: 2025-12-12

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206104); 华能集团科技项目(HNKJ22-H107)

作者简介: 肖颜松(2005—), 男, 研究方向为通航水力学。

通信作者: 袁浩(1989—), 男, 博士, 研究员, 从事高速水力学和通航水力学研究工作。E-mail: yuanhao@cqjtu.edu.cn

of the guidance segment geometry, length, and width of the approach channel. These modifications effectively reduce the peak transverse flow velocity from 0.61 m/s in the original scheme to 0.28 m/s, significantly enhancing the navigational flow conditions in the upstream approach channel and its connecting section, thereby improving vessel navigation safety. The methodology and findings may provide valuable reference for similar engineering projects.

Keywords: ship lock; upstream approach channel; navigation flow conditions; physical model test

通航建筑物引航道位于泄水建筑物附近,受枢纽运行(如泄洪、发电)下泄非恒定流及复杂地形边界影响,往往会在引航道口门区及其连接段形成复杂多变的三维水流结构。这些水流现象包括:横向流速过大、回流范围及强度大、泡漩水强烈、水面比降陡峻等,会对船舶安全航行构成威胁。船舶易在引航道口门区发生航迹偏移、失控、甚至碰撞导航墙等事故,轻则延误通航时间、降低通航效率,重则威胁人民的生命安全。因此,优化引航道通航水流条件是保障船舶安全通航的重要途径。

目前,围绕引航道口门区通航水流条件,通过物理模型试验和数值模拟等手段,诸多学者开展了广泛研究,从而优化水流结构、改善通航水流条件。在物理模型方面,程璐等^[1]通过修改引航道隔墙形式、增设潜丁坝和局部地形开挖等整流措施,有效减小了位于S形弯曲河道段的船闸引航道口门区流速;胡亮亮等^[2]对比有、无隔流堤以及隔流堤布置形式研究下游引航道口门区流速分布的差异,得出透空隔流堤明显改善弯道处的横流及回流;李艳等^[3]通过优化船闸进出航线、局部开挖弯道凸嘴及河道措施,较大地改善了多线船闸下游引航道的通航水流条件。在数值模拟方面,陈明等^[4]基于二维数值模拟,通过设置透空式隔流堤、导流墩及增加导流堤长度等方法,改善布置于急弯河段的通航建筑物口门区的航行水流流态;付旭辉等^[5]通过数值模拟,提出“喇叭”式入口与透水式隔流堤相结合的治理措施,以改善包营枢纽引航道流态;帅志斌等^[6]采用数学模型与物理模型试验手段,通过航线优化、凸岸切滩等措施进行导流调整,以减小引航道口门区横向流速。综上所述,为优化引航道口门区的

船舶航行水流条件,前人提出了局部地形开挖、布设潜坝、导流堤(墩)及隔流堤等措施^[7-10]。但是各个工程水流、地形、枢纽布置形式均不同,所采取的优化措施需结合工程实际情况进行开展。

鉴于该研究中航电枢纽航道呈“几”字形走向且弯曲度较大,致使船闸布置难度较高,引航道口门区及其连接段的通航水流条件往往较为恶劣,威胁船舶航行安全。为此,研究通过整体物理模型试验,探究上游引航道布置方式对口门区及连接段流场特性的影响,以改善船舶通航水流条件。相关研究成果可为类似工程提供参考。

1 试验方案设计与验证

航电枢纽整体平面布置见图1。该枢纽布置于弯曲河段,对原有河道裁弯取直,于左岸滩地开挖修建船闸,船闸上、下游引航道与主航道通过圆弧段平稳过渡,泄洪闸位于右侧主河道。由于弯道斜向水流与口门区静动水交换的双重影响,致使引航道口门区横向流速较大,对船舶航行安全构成不利影响。

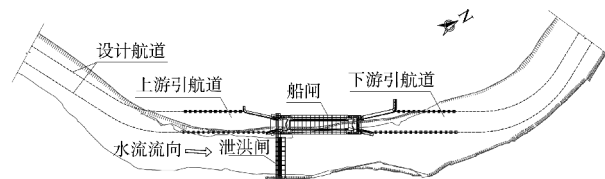


图1 枢纽平面布置

Fig. 1 Hub layout plan

枢纽所在河段弯曲度较大,物理模型需准确复现该河段的实际河势特征,并在枢纽上、下游保留足够长的河道,以确保水流运动相似。综合考虑工程河段河势特征、试验场地等因素,模型

上、下游边界分别位于枢纽布置的转弯段上、下游, 最终确定模型试验的范围为枢纽上游 2.5 km 至下游 1.8 km, 模型上、下游边界与枢纽间的距离足够长, 枢纽的修建不会对模型上、下游边界的水流条件产生影响, 选用几何比尺为 1:80 的正态物理模型。选取通航条件下具有代表性的 3 种流量, 模型边界见表 1, 试验过程中, 采用矩形薄壁堰控制模型进口流量, 翻板闸门控制模型尾部水位高度, 测针测量沿程水位, 及运用声学多普勒流速仪 (acoustic Doppler velocimeter, ADV) 测定重点关注区域的流速分布。

表 1 试验条件
Tab. 1 Test conditions

序号	进口流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	尾门 水位/m	枢纽运行方式
1	650	35.99	4 [#] 、5 [#] 、6 [#] 泄水闸开 2 m
2	1 110	37.41	2 [#] 、4 [#] ~6 [#] 、8 [#] 泄水闸开 2 m
3	1 350	37.98	1 [#] 、3 [#] 泄水闸开 0.9 m, 2 [#] 、4 [#] ~6 [#] 、8 [#] 泄水闸开 2 m

在物理模型河道左右两岸对称安装 10 对水尺, 基于未建枢纽工况下流量 $Q=220 m^3/s$ 时的原型实测水位, 与物理模型对应测点水位相对比, 以论证物理模型试验水流的相似性, 见图 2。由图可知, 模型两岸测量水位与原型观测水位变化趋势一致, 两者吻合较好, 除单点误差为 $-0.06 m$ 外, 其余测点误差在 $\pm 0.04 m$ 范围内, 符合通航模型试验规范的精度要求。

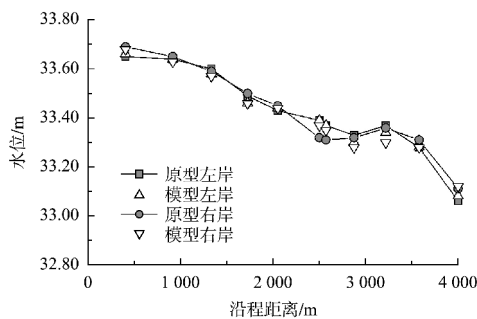


图 2 原型实测水位与模型观测水位对比 ($Q=220 m^3/s$)
Fig. 2 Comparison between prototype measured water level and model observed water level ($Q=220 m^3/s$)

为便于定量分析上游引航道不同修改方案对流场的影响, 将枢纽横向轴线确定为 0-0 断面, 在

上游引航道、口门区及连接段桩号为 0+175~0+745 (总长 570 m) 航道内布置 14 个流速测量断面, 见图 3。

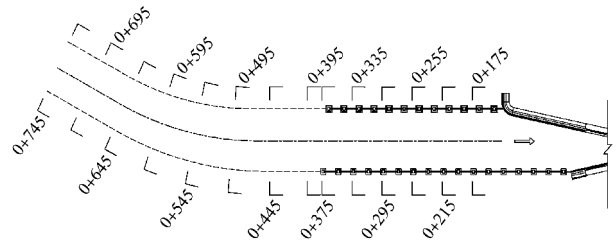


图 3 上游引航道及连接段测量断面布置 (单位:m)
Fig. 3 Layout of measurement cross-sections in the upstream approach channel and connection section (unit:m)

2 船闸上游引航道通航水流条件试验研究

2.1 原方案

船闸上游主导航墙兼做调顺段, 其沿船闸纵轴方向的投影长度为 141 m。上游引航道底高程 32.5 m、宽 70 m, 停泊段长 230 m, 靠船墩布设于岸侧, 共设置 12 个, 间距为 20 m。引航道与泄水闸通过分水墙分隔。上游辅导航墙长 50 m, 采用 1:5 的直线与分水墙衔接。上游分水墙长 330 m, 平行于船闸纵轴线布置, 运用部分透空的墩板式结构。引航道与主航道通过半径为 400 m 的圆弧平顺衔接。原方案模型试验布置见图 4。

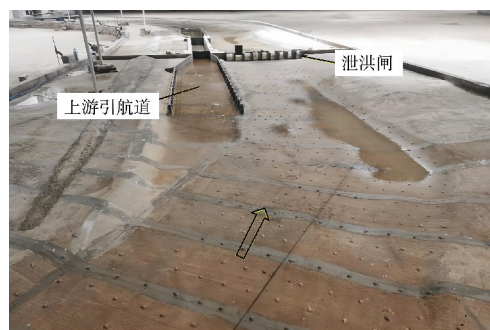


图 4 原方案模型试验布置
Fig. 4 Original model test layout

最大通航流量为 $1 350 m^3/s$ 时, 原方案上游引航道、口门区及连接段的流场见图 5。自 0+745 断面至 0+495 断面, 流速自上游向下游呈减小趋势, 引航道内的流速在隔流堤作用下骤减, 并在

口门区附近出现逆时针的漩涡。受弯道和坝体下泄影响, 0+545 断面和上游区域的水流流向全部转向主河槽。随着水流趋近隔流堤, 其分流与隔流效果愈加显著。当 $Q=1\,350\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 在 0+745、0+495、0+395 及 0+175 断面, 横向流速峰值分别为 0.31、0.60、0.10 和 0.01 m/s, 纵向流速峰值分别为 1.47、1.08、0.47 和 0.02 m/s。当 $Q=650$ 、1 110、1 350 m^3/s 时, 上游引航道流速峰值统计见表 2。当 $Q=650\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 未观测到有回流发生; 当 $Q=1\,110$ 、1 350 m^3/s 时, 回流流速峰值达

0.17、0.19 m/s。原方案上游引航道口门区及连接段横向流速最大为 0.61 m/s, 明显超过规范^[11-12]要求, 因此后续对上游引航道进行优化, 以改善其通航水流条件。

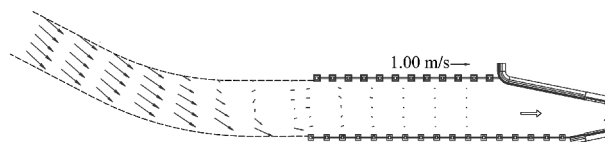


图 5 原方案上游引航道流场分布 ($Q=1\,350\text{ m}^3/\text{s}$)
Fig. 5 Flow field distribution in the upstream approach channel of the original scheme ($Q=1,350\text{ m}^3/\text{s}$)

表 2 各方案流速峰值统计
Tab. 2 Statistics of peak flow velocity for each scheme

方案	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	横向流速峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		纵向流速峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		引航道回流流速 峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
		引航道制动段及停泊段	引航道口门区及连接段	引航道制动段及停泊段	引航道口门区及连接段	
原方案	650	0.01	0.35	0.09	0.92	0
	1 110	0.08	0.57	0.15	1.54	0.17
	1 350	0.10	0.61	0.19	1.69	0.19
修改 方案 1	650	0.01	0.33	0.09	0.89	0
	1 110	0.09	0.43	0.25	1.51	0
	1 350	0.16	0.55	0.29	1.64	0
修改 方案 2	650	0.03	0.32	0.10	0.91	0.05
	1 110	0.08	0.54	0.20	1.54	0.07
	1 350	0.12	0.68	0.24	1.67	0.10
修改 方案 3	650	0.03	0.29	0.20	0.88	0
	1 110	0.15	0.49	0.25	1.52	0
	1 350	0.16	0.65	0.26	1.63	0
修改 方案 4	650	0.03	0.22	0.06	0.74	0
	1 110	0.07	0.28	0.17	1.31	0
	1 350	0.11	0.36	0.22	1.46	0
修改 方案 5	650	0.02	0.18	0.05	0.70	0
	1 110	0.06	0.24	0.14	0.91	0
	1 350	0.10	0.28	0.10	1.14	0

2.2 修改方案 1

针对原方案横向流速明显超标, 分析原因为受河道左岸凸嘴挑流影响, 导致水流流向与航道走向夹角较大, 致使船闸上游引航道口门区横向流速明显过大。因此修改方案 1 对上游引航道口门区左岸凸嘴实施疏浚扩挖, 减小口门区及连接段航槽与水流方向的夹角, 增加引航道口门区过流面积; 同时, 调整口门区及连接段航槽布置, 较原方案将直线段缩短 44.5 m, 开挖航槽向左岸整体平移 20 m。

修改后上游引航道口门区及连接段的流速分布规律与原方案类似。在各流量工况下, 流态较为平稳, 未观察到乱流、泡漩或回流等不良流态。与原方案相比, 修改方案 1 口门区及连接段的横向流速峰值由 0.61 m/s 降至 0.55 m/s, 仍高于规范的限值要求。

2.3 修改方案 2

修改方案 2 在修改方案 1 基础上, 将上游引航道隔流堤延长 60 m, 以此探究隔流堤长度的影响。

由试验结果可知(表2),当加长上游引航道隔流堤后,因隔流堤的延长进一步缩窄了口门区范围河道断面宽度,阻碍了河道主流向右岸流动,加剧隔流堤头部绕流作用,导致水流条件恶化;同时出现了回流流速,当 $Q=650、1\ 110、1\ 350\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,引航道口门区及连接段的回流流速峰值为0.05、0.07、0.10 m/s。

2.4 修改方案3

为减小隔流堤的阻水作用,修改方案3拟在修改方案1基础上,于上游引航道隔流堤头部外侧布置5个宽2 m、长14.6 m的导流墩,以此探究导流墩的设置对口门区通航水流流速的影响。

试验结果表明,与修改方案2加长隔流堤相比,修改方案3设置导流墩后引航道内制动段回流强度有所增加,横向流速稍微下降,但整体仍然大于修改方案1。

综合上述4个方案可知,导致船闸上游引航道横流流速超标的根本原因在于:引航道口门区及连接段过流面积较小,且枢纽蓄水期坝址上游河段整体流速仍较高;库区近坝段河道主流由左岸过渡到右岸经泄水闸下泄,而船闸布置于坝址左岸滩地,库区下行船舶需向左转进入船闸,导致船舶与水流方向之间的交角过大,进而导致横向流速超标。因此,该枢纽船闸上游引航道通航水流条件受枢纽布置与该段河势条件限制,难以通过设置导流建筑物进行改善,在不改变枢纽布置的前提下,后续试验研究将从改变边界条件角度进行优化。

2.5 修改方案4

修改方案4在方案1的基础上,对库区引航道口门区及连接段河道右岸河道按底高程32.5 m进行疏浚。该措施旨在扩大河道过流面积,降低库区整体流速,同时通过调整右岸岸线,促使上游左岸侧主流提前向右岸扩散。

由试验成果可知,采取疏浚河道两岸并调整航道布置的措施后,在上游来流量 $Q \leq 1\ 110\ \text{m}^3/\text{s}$,

泄水闸控制下泄的各流量下,上游引航道、口门区及连接段的纵、横向流速均在规范允许范围内,说明对两岸的疏浚、扩挖可有效减小因口门区布置于弯道导致的横流过大问题。但是,随着流量的增大,在上游来流量 $Q=1\ 350\ \text{m}^3/\text{s}$ 、泄水闸控制下泄的情况下,受河势条件影响,船闸上游引航道口门区依然有部分测点横向流速不符合规范要求。

2.6 修改方案5

上述修改方案模型试验成果表明,在不延长引航道隔流堤的前提下,上游引航通航水流条件无法满足规范对制动段流速指标的要求;然而,延长隔流堤又会缩窄口门区所在断面河道宽度,加剧隔流堤头部绕流作用,致使该区域横向流速显著超出允许范围。因此,对上游引航道隔流堤进行延长,同时船闸向左岸平移布置,调整隔流堤角度,尽可能减小隔流堤占用的河道断面,扩大口门区断面过流面积。

经对多个修改方案进行试验后,修改方案5针对原方案做如下调整:1)船闸整体向左岸平移15 m,以此减小船闸所占用的河道断面宽度;2)船闸上游引航道中心线向左岸偏移 4° ,以减小隔流堤对河道主流的阻碍;3)上游引航道隔流堤延长120 m,令制动段位于隔流堤遮蔽区域内;4)上游引航道及制动段、口门区疏浚高程降至32 m,同时对坝址上游500~900 m之间约100 m宽范围进行疏浚,疏浚高程为29 m,疏浚区域上断面采用1:10的缓坡与天然河道顺接,扩大口门区过流面积;5)调整口门区航槽布置,口门区宽度由70 m增至80 m。

修改方案5在 $Q=1\ 350\ \text{m}^3/\text{s}$ 上游引航道流场分布见图6。在不同流量条件下($Q=650、1\ 110、1\ 350\ \text{m}^3/\text{s}$),上游引航道制动段、停泊段的横向流速峰值分别为0.02、0.06、0.10 m/s,纵向流速峰值为0.05、0.14、0.10 m/s;引航道口门区及连接段横向流速峰值分别为0.18、0.24、0.28 m/s,纵向流速峰值为0.70、0.91、1.14 m/s,满足规范要求。

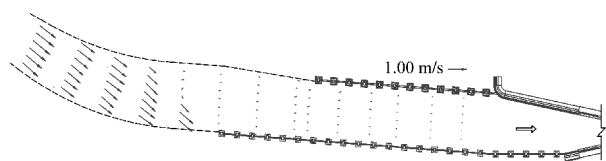


图6 修改方案5上游引航道流场分布($Q=1\,350\text{ m}^3/\text{s}$)

Fig. 6 Flow field distribution in the upstream approach channel for revised scheme 5($Q=1,350\text{ m}^3/\text{s}$)

3 结语

1) 模型试验结果表明,原方案受引航道与河道主流方向斜交角度较大的影响,口门区水流横向流速显著偏高,其峰值达到 0.61 m/s ,同时在该区域容易形成大范围回流,船舶进出引航道存在较大安全隐患。

2) 不同修改方案下的模型试验结果表明,各方案引航道、口门区及连接段纵向流速差异较小,横向流速是制约船舶通航安全的主要因素。

3) 修改方案5的上游引航道口门区通航水流条件基本满足要求,纵、横向流速峰值分别为 1.14 和 0.28 m/s ,上游引航道口门区航行条件得到有效改善。

参考文献:

- [1] 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.
CHENG L, ZHAO J J, GU J D. Navigation condition at entrance of approach channel of low-head hydro-junction in S-shaped curved river[J]. Port & waterway engineering, 2016(12): 106-112.
- [2] 胡亮亮,谭家万,袁浩. 基于隔流堤的下游引航道通航水流条件优化[J]. 水运工程, 2022(5): 72-77.
HU L L, TAN J W, YUAN H. Optimization of navigable flow conditions of downstream entrance channel with separation levee [J]. Port & waterway engineering, 2022(5): 72-77.
- [3] 李艳,黄军,刘洋,等. 长洲五线船闸下引航道通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2024(10): 104-109.
LI Y, HUANG J, LIU Y, et al. Experimental research on navigation flow conditions in downstream approach channel of Changzhou fifth-line ship lock [J]. Port &

waterway engineering, 2024(10): 104-109.

- [4] 陈明,李初民,王多银,等. 左江山秀船闸改扩建工程引航道通航水流条件[J]. 水运工程, 2021(11): 66-73.
CHEN M, LI R M, WANG D Y, et al. Navigation flow conditions in approach channel of reconstruction and extension project for Shanxiu ship lock located in the Zuojiang River [J]. Port & waterway engineering, 2021(11): 66-73.
- [5] 付旭辉,张波,杜洪源,等. 白河包营枢纽船闸上引航道口门区通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2025(4): 106-113, 126.
FU X H, ZHANG B, DU H Y, et al. Navigable flow conditions at entrance area of upper approach channel of Baoying junction ship lock on Baihe River [J]. Port & waterway engineering, 2025(4): 106-113, 126.
- [6] 帅志斌,陈莹颖,马海涛. 某船闸上游引航道通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2025(2): 135-141, 202.
SHUAI Z B, CHEN Y Y, MA H T. Navigational flow conditions in upstream approach channel of a ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2025(2): 135-141, 202.
- [7] 郑星伟,张铭,范洪浩,等. 小溪滩枢纽下游导流堤布置及形式优化[J]. 水运工程, 2018(9): 96-100, 118.
ZHENG X W, ZHANG M, FAN H H, et al. Layout and optimization of diversion embankment in lower reaches of Xiaoxitan hub [J]. Port & waterway engineering, 2018(9): 96-100, 118.
- [8] 祁永升,许光祥,许锡宾,等. 湘江近尾洲二线船闸下游引航道口门区通航水流条件改善措施[J]. 水运工程, 2021(3): 126-131.
QI Y S, XU G X, XU X B, et al. Measures of improving navigable flow conditions in entrance area of downstream approach channel of Jinweizhou second-line ship lock in the Xiangjiang River [J]. Port & waterway engineering, 2021(3): 126-131.
- [9] 刘晓平,徐大彬,李祥,等. 大源渡下游口门区通航水流条件改善措施试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2016, 13(1): 56-61.
LIU X P, XU D B, LI X, et al. Experimental research on improvement measures of navigable flow condition at downstream entrance area of Dayuandu navigation [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (natural science), 2016, 13(1): 56-61.