

白垢枢纽新建二线船闸通航条件研究

洪坤辉, 吴腾, 刘磊

(河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏南京 210098, Email:hongkunhui@hhu.edu.cn)

摘要: 引航道内流态稳定性是船只能否安全、快捷过闸的重要因素之一, 其流态极易受到上游河道水流和发电站泄水的影响, 产生横向水流。本研究通过建立二维数学模型, 计算在洪枯时期上游来水和发电站泄水的 5 种工况下, 新建白垢船闸引航道内水流流态的变化, 并对比同等工况下旧船闸水流流态, 分析论证新船闸设计的合理性, 以及最佳通航水流条件, 并指出设计的不足之处。结果表明: 对比于旧船闸, 新船闸在水流稳定性、过闸效率、安全等都有稳定的提升。当上游来水和发电站泄水量超过 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 部分航道纵流速超过 0.3 m/s , 不满足通航条件, 建议白垢枢纽船闸停止通航, 当流量较小时, 引航道 4 断面处横向流速处于较大数值范围, 对通航产生不利影响, 建议 4 断面附近引航道进一步设计改进。

关键词: 船闸; 数学模型; 引航道; 横向流速

1 引言

随着经济和船舶技术的飞速发展, 水运量大幅度增加, 应时代潮流发展, 出现了一批大型货轮, 而一些早年间修建的枢纽, 由于技术、经济、建造标准等原因, 原有船闸不能满足当下船舶过闸要求, 在原有船闸的基础上改建船闸的情况大量出现, 改建船闸的设计与布置通常会受各种因素制约, 使得引航道内水流条件相对较为复杂, 其内水流条件好坏直接关系到船舶是否能安全过闸, 因此对改建后船闸引航道内水流的流态都必须进行专题的研究。新白垢枢纽就是在原有船闸基础上改建的工程, 白垢枢纽位于山区峡谷段, 距离西江河口 45 km , 由于船闸上游引航道发电站第一车间和第二车间机组泄水发电影响, 致使引航道内横流严重, 船舶不能正常通航, 运河进口处左侧存在凸嘴, 更加恶化了白垢枢纽船闸的通行条件, 使得白垢船闸基本处于报废状态。根据规划, 新建白垢船闸位于桂坑运河下游端, 上游引航道布置连接于桂坑运河, 设计引航道宽 40 m , 船闸有效尺度为 $180 \text{ m} \times 23 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ 。同时在桂坑运河进口切除左侧凸嘴, 减小与上游来流方向交角, 使桂坑运河与上游航道平顺连接, 并加大桂坑运河的弯曲半径, 拓宽航道底宽达 40 m , 使得桂坑运河最小弯曲半径为 270 m 。

新船闸设计是否合理, 引航道内流态如何变化, 船只最佳安全通航流量范围又是多少呢? 学者们提出了不同的解决方法, 整体定床模型实验^[1]和二维、三维水流模型实验^[2]是分析引航道内流态的重要研究手段。如徐进超、宣国祥^[3]的船闸模实物模型实验, 通过实验监

测引航道内的流态变化, 崔冬、刘新成等^[4]在水利枢纽中运用一二维数学模型来计算分析引航道内流态变化, 叶海桃^[5]数学模型和物理模型一起验证船闸区域水流流态变化, 但上述只分析了最大来流量时, 引航道内流态变化, 并未就洪枯水期间上游来流量和水电站的泄流量的共同影响下, 对引航道内流态的影响及整段航道内的流态变化, 因此本文通过建立白垢枢纽局部河段二维数学模型, 采用有限元网格剖分的形式, 计算航道在洪枯水期间电站泄流情况下五种工况时新船闸航道内横、纵水流变化, 并通过对比新旧白垢船闸上下游引航道内流场变化, 从流态的稳定性、水流通航条件等方面研究新建白垢船闸布置的合理性。同时探究航道安全通航范围和某些工况下航道内出现的极端水流位置, 为船只安全过闸和白垢枢纽的优化提供一定的促进作用。

2 模型的建立及验证

2.1 基本方程^[6]

水流连续方程:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

水流运动方程:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = fV - g \frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -fU - g \frac{\partial Z}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

式中: U 、 V 分别为垂线平均流速在 x 、 y 方向上的分量; Z 为水位; H 、 ρ 分别为垂线水深和水密度; ν_t 为紊流黏滞性系数; τ_x 、 τ_y 分别为底部切应力在 x 、 y 方向上的分量; f 为柯氏力系数, $f = 2W \sin \Phi$, W 为地球自转角速度, Φ 为地理纬度。

2.2 平面二维水流运动数学模型验证

本模型采用三角形网格剖分计算域, 上游段三角形网格节点数为 3734 个, 三角形个数为 6774 个, 相邻网格节点最大间距为 20m, 最小间距为 10m, 下游段三角形网格节点数为 3704 个, 三角形个数为 6797 个, 相邻网格节点间距为 20m, 为此将整个模型沿大冲大坝、白垢(桂坑)电站以及原有船闸分为上下游两段分开模拟计算。全段模型选取 6 个测流断面, 其中上游段 4 个测流验证断面(1 断面、2 断面、3 断面、6 断面), 下游段 2 个测流验证断面(4 断面、5 断面)。各测流验证断面位置见图 1。模型计算边界条件上游给定流量, 下游给定水位, 河床糙率初步选为 0.01~0.10。

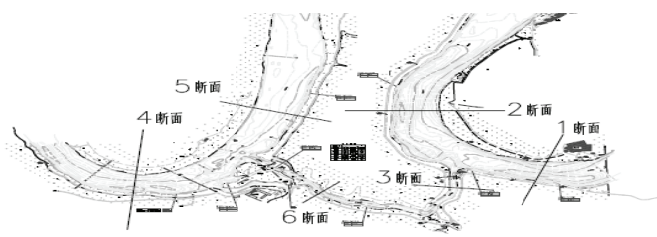


图1 白坨枢纽河段测流断面验证位置

2.2.1. 水位验证

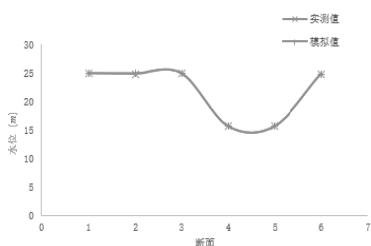


图2 测流断面实测水位与计算水位对比

根据 2011 年 12 月 24—25 日进行的白坨河段水文测验, 分别得到上文中 6 个河道断面处的实际水深, 并利用建立的二维水流运动数学模型计算出相应点处的水位值, 具体对比结果如图 2 所示. 可以发现, 实测值与计算值所绘曲线基本重合, 其中 1、6 断面实测值和计算值相同 2、3、4、5 断面实测值与计算值误差在 0.09 以内, 说明此二维模型拟合准确度较高, 因此二维水流模型可适用于白坨枢纽模拟。

2.2.2 流速流向验证

根据 2011 年 12 月 24—25 日水文测验同步进行的 6 个断面流速测量资料, 分别把 6 个测量断面等均分, 以测点与左岸的距离为横坐标, 相应点处的水流流速为纵坐标绘制直角坐标系, 根据资料利用建立的二维流速运动数学模型算出对应位置的水流流速, 为了便于对比, 将同一断面的实测值与模拟值绘制在同一坐标系中, 结果见图 3。

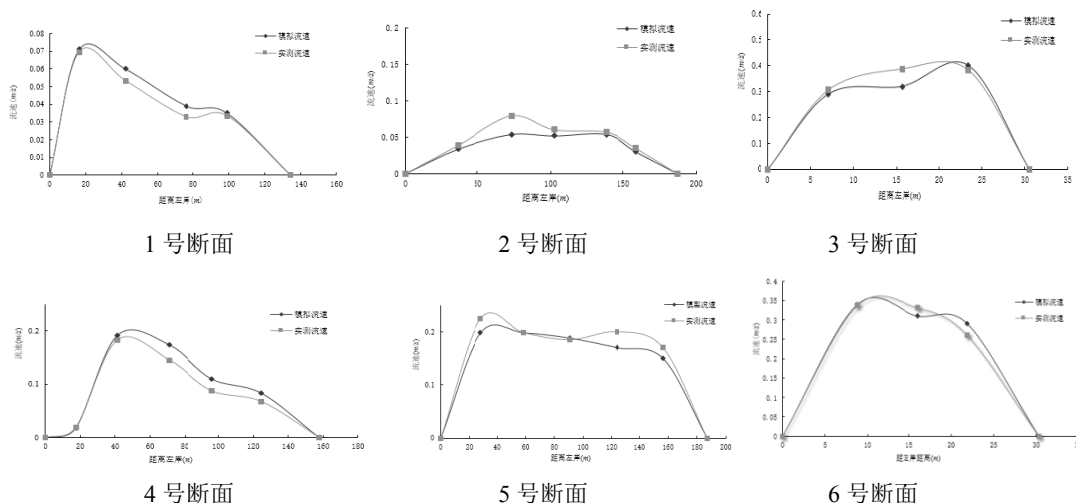


图3 白坨枢纽局部二维数学模型流速分布验证

由图 3 可以发现,断面 1 的平均流速是最大的,1 断面处于河段上游弯曲段,同时此处的河道宽略小于其它处的河道宽,所以流速分布大于其他断面,对比 1 断面实测值和模拟值可以发现,断面流速最大处在距离左岸 20m 位置,当距离左岸距离小于 20m 时,实测值与模拟值吻合度为 100%,距离在 20~100m 范围内模拟流速大于实测流速,距离大于 100m 时,实测值与模拟值再次重合,实测流量与模拟流量最大差值为 0.005。2 断面在距离左岸 40~130m 范围内,实测值大于模拟值,在 70m 处差值最大,其余处实测流速等于模拟流速,实测流量与模拟流量最大差值为 0.05。3 断面在 7~23m 范围内,实测流速大于模拟流速,其它位置差值较小可以忽略,实测流量与模拟流量最大差值为 0.1。4 断面 48m 之前实测流速等于模拟流速,大于 48m 时,实测流速小于模拟流速,实测流量与模拟流量最大差值为 0.03。5 断面 0~53m 范围内,实测流速大于模拟流速,53~85m 范围内,实测流速等于模拟流速,85m 以后,实测流速大于模拟流速,实测流量与模拟流量最大差值为 0.03。6 断面实测流速与模拟流速重合度较高,基本吻合。过水文站的断面数模计算测流断面流速分布与实测流速分布一致,流速大小变化相符,流速验证吻合较好。通过以上水位及流速的验证,可见建立的白垢河段二维数学模型符合局部河段的流场实际,能够反映不同条件下白垢河段的实际水位与流速变化情况。通过以上分析可以发现,断面数模计算测流断面流速分布与实测流速分布基本一致,流速大小变化相符,流速验证吻合较好,可见建立的白垢河段二维数学模型符合局部河段的流场实际,能够反映不同条件下白垢河段的实际水位与流速变化情况。

3 不同工况下新旧枢纽对比研究

3.1 不同工况水流条件

白垢水利枢纽河段二维水流模型,其边界控制条件由水库调节及运行方式决定。根据上游来水流量的洪中枯变化,选择白垢水电站的 5 种运行工况,具体运行如下:当来流量为 $150\text{m}^3/\text{s}$ 时,安排桂坑电站第一发电车间或第二发电车间泄水发电,下泄流量为 $60\text{m}^3/\text{s}$,其余流量由大冲电站泄水通过,控制大冲大坝上游水位为 23.95m;当来流量 $300\text{m}^3/\text{s}$ 时,安排桂坑电站第一发电车间、第二发电车间同时泄水发电,下泄流量为 $113\text{m}^3/\text{s}$,其余流量由大冲电站泄水通过,控制大冲大坝上游水位仍为 23.95m;当来流量为 $500\text{m}^3/\text{s}$ 、 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $1500\text{m}^3/\text{s}$ 级时,均安排桂坑电站第一发电车间和第二发电车间同时泄水发电,其余流量由大冲电站泄水通过,控制大冲大坝上游水位分别为 23.5m、23.0m、23.0m (表 1)。

表 1 白垢水利枢纽河段二维水流模型计算工况

工况	上游来水流量(m^3/s)	机组安排(台)	上游控制水位 (m)
工况一	150	1	23.95
工况二	300	2-6	23.95
工况三	500	6	23.5
工况四	1000	6	23.0
工况五	1500	1-6	23.0

白坨枢纽二线船闸规划航道上选取 5 个特征断面进行测量, 分别在上游航道新开运河进口选择 1 断面、原运河进口过渡段选择 2、3 断面、上游引航道进口段选择 4 断面、下游引航道出口段选择 5 断面, 断面等间距选择六个测点, 点间距为 6m, 从右岸起依次编号 1~6, 测流断面布置位置见图 4。

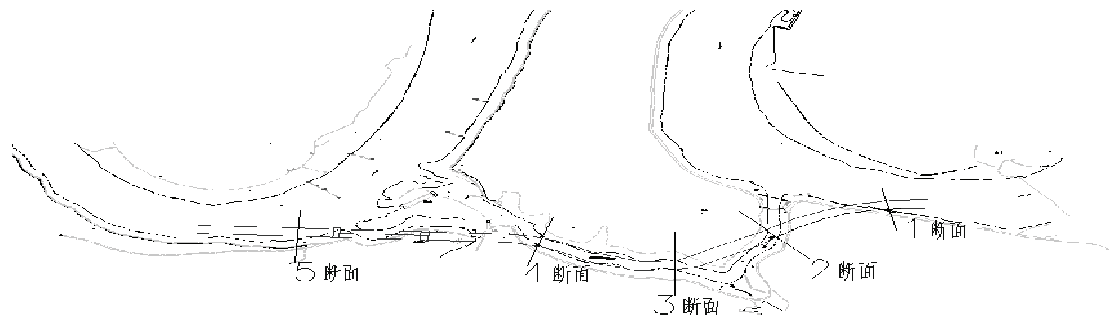


图 4 白坨枢纽二线船闸上下游引航道沿线测流断面布置

3.2 验证新旧枢纽的流态变化

根据文中建立的平面二维水流运动数学模型, 计算出不同工况下, 新建二线船闸航道内 5 个测量断面上水流流速模拟值。图 5 折线分别表示在 5 种不同的工况下, 5 个监测断面上新船闸的流速模拟值和旧船闸的流速实测值对比情况。

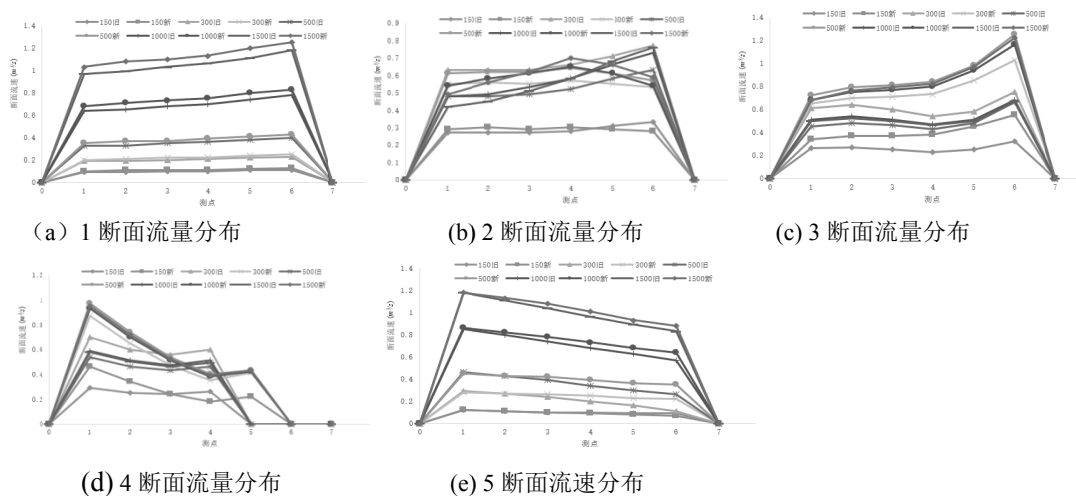


图 5 不同下泄流量下新旧船闸五个测量断面的流速分布

由图 5 可知, 航道内水流速度随着上游来流量的增大而增大, 特别是当上游泄流量增大到 $500\text{m}^3/\text{s}$ 时, 航道内流速有一个较大幅度的增加, 对于 1 断面, 当来流量为 $150\sim 1500\text{m}^3/\text{s}$ 时, 新航道流速由 0.11m/s 增加到 1.10m/s 左右, 同时可以发现新旧航道 1 断面上流速折线图较为接近, 因此新旧枢纽航道在 1 断面水流流态基本一致。在同等流量条件下, 对比新旧枢纽引航道 2 断面, 新航道左岸流速要小于旧航道同位置水流流速, 表明新航道在 2

断面附近水流流态较旧航道更加稳定。在 3 断面上,新航道左岸水流流速与旧航道最大差值仅为 $0.48\text{m}^3/\text{s}$,这是由于新航道在此处有一个微弯,4 断面新旧航道流速分布最大差值也仅为 $0.43\text{m}^3/\text{s}$,变化值在合理范围内。船闸下游引航道出口的 5 断面,位于贺江弯道主流位置,新旧航道流速变化基本同 1# 断面一致,断面流速由 0.11m/s 增加到 1.10m/s 左右,新航道断面右侧流速稍有增大。通过新旧航道的断面流速对比可知,相较于旧航道,新航道 1、5 断面流速基本保持不变,3、4 断面流速有小幅度的增长,2 断面水流流态比旧航道更为稳定,因此白坵枢纽新建二线船闸在提高船舶过闸能力的同时,水流流态并未发生较大的改变,船闸引航道水流稳定性较好,有利于船只过闸。但当上游泄流流量为 $500\text{m}^3/\text{s}$,新航道流速值相较于 $300\text{m}^3/\text{s}$ 时有一个大幅度的增加,其值与上游泄流量为 $1000\text{m}^3/\text{s}$ 、 $1500\text{m}^3/\text{s}$ 时各相应断面流速接近,对于这个问题,应当引起重视。

3.3 新枢纽最佳通航范围研究

将断面上各测点的流速折算成垂直于新航道轴线的流速(图 6),可以发现随着流量的增大,新航道内横向水流的波动也越大,由于航道内横向水流对船舶安全航行有较大的影响且航道内纵水流不能超过 0.3m/s 时^[7-8],当来流量为 $150\text{m}^3/\text{s}$ 时,1、2、3、5 断面纵向流速在 0.15m/s 附近波动,波动值为 0.04m/s ,4 号断面纵流速波动较大,最大纵流速为 0.24m/s ,最小为 0m/s ,纵流速由右岸向左岸依次递减,当来流量为 $300\text{m}^3/\text{s}$ 时,4 断面纵向流速分布极为不均匀,最大波动幅度为 0.45m/s ,断面右侧约五分之一宽度航道纵流速超过 0.3m/s ,剩余四个断面纵流速大小在 0.1m/s 附近波动,当流量为 $500\text{m}^3/\text{s}$,4 断面纵向流速分布不均匀,最大波动幅度为 0.5m/s ,断面右侧约二分之一宽度航道纵流速超过 0.3m/s ,剩余四个断面纵流速大小在 0.15m/s 附近波动,当流量为 $1000\text{m}^3/\text{s}$,2、3 断面纵流速在 0.05m/s 附近波动,1 断面纵流速均超过 0.3m/s ,4、5 断面右岸部分河道纵流速超过 0.3m/s ,此时船舶通航已经收到威胁应当停航,当流量为 $1500\text{m}^3/\text{s}$ 时,1、5 断面纵流速均超过 0.3m/s ,4 断面右侧一半河道超过 0.3m/s ,2、3 断面纵流速在 0.1 附近波动,此时应当禁止船舶过闸,有上述可得出新船闸船舶安全过闸条件,当上游流量大于 $1000\text{m}^3/\text{s}$,为了船舶的安全航行,船闸应立刻禁止通航,由于 1 唯一口门处,水流流态受上游河道影响较为复杂^[9],为了航行安全,应当再次优化 1 和 5 附近的河道,使得河道水面更加稳定。4 对水流量的变化较为敏感,当流量较大 4 断面右侧在水流量较小时,纵流速依然保持在一个较高流速,因此应当对 4 断面可能存在一定的设计问题,应当进行重新规划,以保证船舶安全过闸。

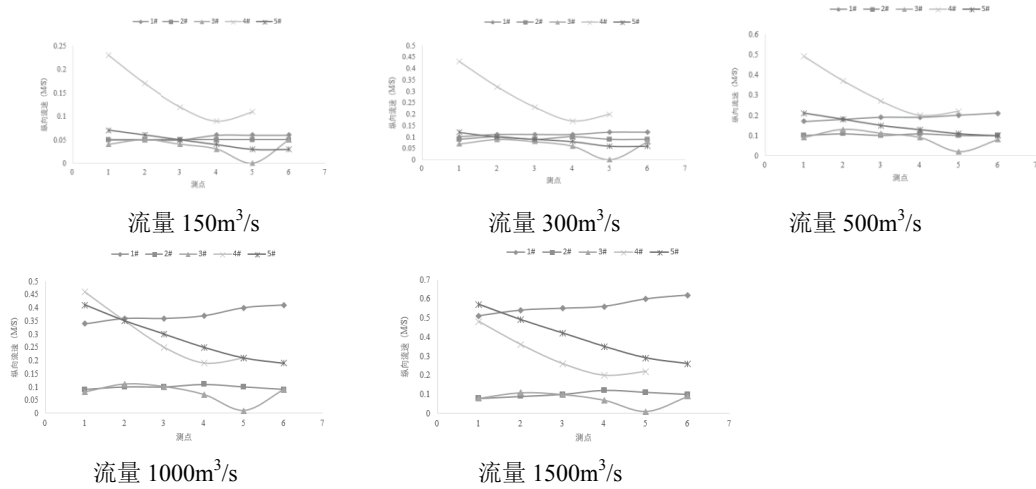


图 6 工程后航道内不同泄流量各断面横向流速

4 结语

通过数学模型计算对比表明,新枢纽在提高船舶通航能力、效率、稳定性的同时,新航道内水流流态依然保持在一个较为安全的范围内,在五种不同泄流量的工况下,当泄流量超过 1000 m³/s 时,部分航道纵流速超过 0.3m/s,因此为了船舶的安全,当上游流量超过 1000 m³/s 时建议白垢船闸停航。在计算过程中,无论上游泄流量为多少,4 断面的纵流速波动均较大,其中最大波动出现泄流量为 500 m³/s 时,大小为 0.5m/s,为了船舶的航行安全,建议对该断面附近航道进行重新规划。

致谢

本研究得到了国家重点研发计划(2016YFC0402506),特此感谢。

参考文献

- 1 苏特爱兰,罗佩金.水工建筑与河流工程的物理模型试验[J].水利水电快报,1998(03):5-8.
- 2 Leedertes J J. A Water Quality Simulation Model for Well-Mixed Estuaries and Coastal Seas [M] . Santa Monica:Rand, 1970
- 3 徐进超,宣国祥,刘本芹,黄岳,祝龙.贵港二线船闸下引航道物理模型试验研究[J].水利水运工程学报,2017(06):9-13.
- 4 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(01):35-39.
- 5 叶海桃. 船闸引航道口门区流态的模型研究[D].南京:河海大学,2007
- 6 吴腾,秦杰,丁坚. 引航道与泄洪河道交汇区安全通航研究: 第二十七届全国水动力学研讨会, 中国江苏

南京, 2015[C].

- 7 吴腾, 秦杰, 王东英. 引航道与泄洪河道交汇区流态及航道安全措施研究: 第十七届中国海洋(岸)工程学术讨论会, 中国广西南宁, 2015[C]
- 8 吴志龙, 陶桂兰, 吴腾. 贺江航道通航水深问题研究[J]. 水运工程, 2013(02):95-98
- 9 周代鑫. 水利枢纽船闸引航道口门区流态改善措施[J]. 人民珠江, 1997(05):29-31.

Study on navigation conditions of newly built second-line ship locks in the Baigou hub

HONG Kun-hui, WU Teng, LIU Lei

(Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing
210098, China. Email: hongkunhui@hhu.edu.cn)

Abstract : The stability of fluid pattern in the approach channel is one of the important factors for the safe and fast crossing of the lock. The flow pattern is easily affected by the upstream river flow and the discharge of the power station, resulting in cross flow. This paper establishes a mathematical model to calculate the changes of water flow conditions in the new channel under the five conditions of the upstream water and power station discharge in the flood season, and compares with the flow pattern of the old ship lock under the same working conditions, and analyzes and demonstrates the new channel. Rationality and propose corresponding measures. The results show that compared with the old ship lock, there is a steady improvement in water flow stability, gate efficiency and safety. When the upstream water supply and power station discharge exceeds $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, the cross flow 's velocity of some channels exceeds 0.3 m/s , which does not meet the navigation conditions. It is recommended that the Baigou 's ship locks stop sailing. When the flow rate is small, the cross flow 's velocity of the 4 section of the approach channel is in a large range. It is recommended to further improve the approach channel near the 4 section.

Key words: Ship lock; mathematical model; approach channel; lateral flow rate