



乌江渡枢纽下游航道 二维非恒定流数学模型研究

张波, 李伯海, 刘晓菲

(交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 受上游乌江渡枢纽调峰影响, 乌江的乌江渡枢纽至漩塘河段水位陡涨陡落。建立乌江渡枢纽下游航道二维非恒定流数学模型, 验证了原型水位和流速分布, 计算了不同工况条件下乌江渡枢纽泄水波传播过程, 研究了乌江渡枢纽非恒定流下泄对下游航道的影

关键词: 枢纽; 航道; 非恒定流

中图分类号: U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0161-05

Two-dimensional unsteady flow model of waterway on the lower reaches of Wujiangdu hub

ZHANG Bo, LI Bo-hai, LIU Xiao-fei

(Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications, Tianjin Research Institute of
Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: Affected by the adjustment of Wujiangdu hub on the upper reaches, the stage between Wujiangdu hub and Xuantang changes abruptly. Establishing two-dimensional unsteady flow model of waterway on the lower reaches of Wujiangdu hub, we verify the prototype level and flow distribution, calculate the propagation process of unsteady flow wave under different working conditions, and study the impact of propagation of Wujiangdu hub unsteady flow on waterway of the lower reaches.

Key words: hub; waterway; unsteady flow

在河道上修建大量的水电站, 天然航道将越来越少, 受电站非恒定流影响的航道将越来越多。由于河道上游水电站不时地调节流量, 使河道中的水流流速、水深(或水位、流量)等随时间而改变, 从而形成了河道中的电站非恒定流。在河道上修建水电站, 由于上游电站调节, 增加或减少下泄流量, 在坝上形成逆落波或逆涨波, 沿水流相反的方向传播; 在坝下则形成顺涨波或顺落波, 沿水流的方向传播。电站非恒定流也是一种波动现象。河道中非恒定流波的传播依靠重

力的作用, 称为重力传播。

电站非恒定流的波动是由于电站的坝下流量和水位发生改变而形成, 它通过水流质点的位移而形成传播, 在波所及区域内, 引起当地流量和水位的改变。从而使得近坝段河段流量水位陡涨陡落, 对通航及港口运行带来很大隐患,

本文以乌江渡枢纽的运行调度产生的日调节非恒定流为研究对象, 通过建立二维非恒定流数学模型研究乌江渡枢纽非恒定流下泄对下游航道的影

收稿日期: 2011-12-19

作者简介: 张波(1979—), 男, 助理研究员, 主要从事港口航道工程及水流泥沙动力学的研究。

1 二维非恒定流数学模型建立及验证^[1-2]

1.1 数学模型的基本方程

1.1.1 正交曲线网格的生成

本文采用正交贴体曲线网格系统来克服边界复杂及计算域尺度悬殊所引起的困难,采用WILLEMS导出的正交曲线坐标方程作为转换方程:

$$\begin{cases} \alpha \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \gamma \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + J^2 \left(P \frac{\partial x}{\partial \xi} + Q \frac{\partial x}{\partial \eta} \right) = 0 \\ \alpha \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} + \gamma \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} + J^2 \left(P \frac{\partial y}{\partial \xi} + Q \frac{\partial y}{\partial \eta} \right) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\gamma=x_\xi^2+y_\xi^2$; $\alpha=x_\eta^2+y_\eta^2$; $J=x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi$ (为正交网格时, $J=\sqrt{\alpha\gamma}$); 并取 $C_\xi=\sqrt{\gamma}$, $C_\eta=\sqrt{\alpha}$, 表示正交曲线坐标系中的拉梅系数; P, Q 为调节因子, 本文采用按照势流理论建立 P, Q 形式; ξ, η 表示正交曲线坐标系中的坐标符号, 存在关系式

$$\begin{cases} \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{1}{J} \frac{\partial y}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{1}{J} \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \xi}{\partial y} = -\frac{1}{J} \frac{\partial x}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{1}{J} \frac{\partial x}{\partial \xi} \end{cases} \quad (2)$$

根据上述坐标变换原则及坐标转换方程将直角坐标系下的基本控制方程变换为正交曲线贴体坐标系下的基本控制方程。

1.1.2 正交曲线坐标系下水流数学模型的控制方程

水流连续方程为

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{c_\xi c_\eta} \frac{\partial (c_\eta u h)}{\partial \xi} + \frac{1}{c_\xi c_\eta} \frac{\partial (c_\xi v h)}{\partial \eta} = 0 \quad (3)$$

水流运动方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{c_\xi c_\eta} \frac{\partial (c_\eta u^2)}{\partial \xi} + \frac{1}{c_\xi c_\eta} \frac{\partial (c_\xi v u)}{\partial \eta} + \frac{1}{c_\xi c_\eta} \cdot \\ (uv \frac{\partial c_\xi}{\partial \eta} - v^2 \frac{\partial c_\eta}{\partial \xi}) = -g \frac{1}{c_\xi} \frac{\partial Z}{\partial \xi} + v_i \left(\frac{1}{c_\xi} \frac{\partial A}{\partial \xi} - \right. \\ \left. \frac{1}{c_\eta} \frac{\partial B}{\partial \eta} \right) - \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{\frac{4}{3}}} - M_u \quad (4) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{c_\xi c_\eta} \frac{\partial (c_\xi v^2)}{\partial \eta} + \frac{1}{c_\xi c_\eta} \frac{\partial (c_\eta u v)}{\partial \xi} + \\ \frac{1}{c_\xi c_\eta} (uv \frac{\partial c_\eta}{\partial \xi} - u^2 \frac{\partial c_\xi}{\partial \eta}) = -g \frac{1}{c_\eta} \frac{\partial Z}{\partial \eta} + \\ v_i \left(\frac{1}{c_\xi} \frac{\partial B}{\partial \xi} + \frac{1}{c_\eta} \frac{\partial A}{\partial \eta} \right) - \frac{v \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{\frac{4}{3}}} - M_v \quad (5) \end{aligned}$$

式中: M_u, M_v 为横向动量交换项, 引入此项可以考虑河道弯曲处环流对垂线平均流速的影响, 其表达式为:

$$M_u = \frac{1}{h C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \eta} (u \varphi C_\xi) + u \varphi \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - 2v \varphi \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right] \quad (6)$$

$$M_v = \frac{1}{h C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (u \varphi C_\eta) + u \varphi \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} + 2 \frac{\partial}{\partial \eta} (v \varphi C_\xi) \right] \quad (7)$$

式中: K_{Ts} 称为环流所引起的横向动量交换因子; R_η 为等 η 线曲率半径。

$$A = \frac{1}{c_\xi c_\eta} \left[\frac{\partial (u c_\eta)}{\partial \xi} + \frac{\partial (v c_\xi)}{\partial \eta} \right] \quad (8)$$

$$B = \frac{1}{c_\xi c_\eta} \left[\frac{\partial (u c_\eta)}{\partial \xi} - \frac{\partial (v c_\xi)}{\partial \eta} \right] \quad (9)$$

$$\varphi = K_{Ts} |u| h^2 / R_\eta \quad (10)$$

$$K_{Ts} = 5 \frac{\sqrt{g}}{K_c} - 156 \left(\frac{\sqrt{g}}{K_c} \right)^2 + 375 \left(\frac{\sqrt{g}}{K_c} \right)^3 \quad (11)$$

1.1.3 方程的离散及其数值解法

比较上述各方程, 可以发现它们的形式是相似的, 可以表达成通用的格式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \frac{1}{c_\xi c_\eta} \frac{\partial (c_\eta u \Psi)}{\partial \xi} + \frac{1}{c_\xi c_\eta} \frac{\partial (c_\xi v \Psi)}{\partial \eta} = \\ \frac{1}{c_\xi c_\eta} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\Gamma c_\eta}{c_\xi} \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} \right) + \frac{1}{c_\eta c_\xi} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{\Gamma c_\xi}{c_\eta} \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} \right) + S \end{aligned} \quad (12)$$

在数值计算时, 只需对上式编制一个通用的程序, 所有控制方程均可用此程序求解。

利用控制体积法离散控制方程。将计算区域划分成一系列连续但互不重合的控制体积, 每个控制体包含一个计算点, 然后微分方程在每一个控制体积上进行积分, 这样便可得到一个包含有一组网络结点处变量 Ψ 的离散化方程。水流方程组的求解采用SIMPLEC计算程式。

1.2 计算区域的选取及正交网格生成

计算区域选取从乌江铁路桥上游至漩塘(图1)共约45 km的河段。在该计算区域内布置3219×100个网格结点, 经正交变换后得到正交曲

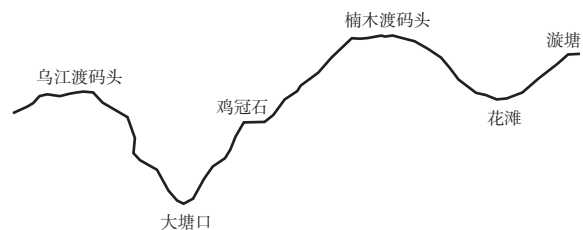


图1 计算河段

线网格,网格基本上保持正交。与正交曲线网格对应的新坐标系 (ζ, η) 下的区域为 $3\ 219 \times 100$ 的矩形网格,网格长 $10 \sim 20\text{ m}$,宽 $1 \sim 4\text{ m}$ 。

1.2 恒定流验证

2010年5—6月,研究河段沿程观测了不同流量级下的瞬时流量和水位,并对测流断面进行了流速分布观测。

1) 水位验证。

通过选取合适的糙率值,恒定流水位验证的偏差值一般在 5 cm 以内。

2) 流速验证。

研究河段观测了不同流量级下的流速分布,计算值与实测值的偏差值一般在 10% 以内。

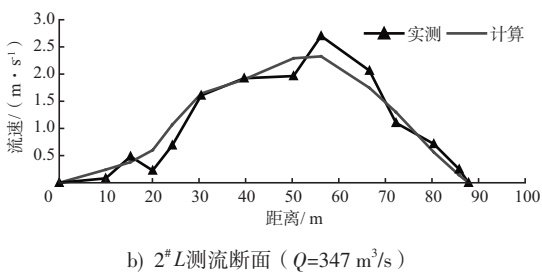
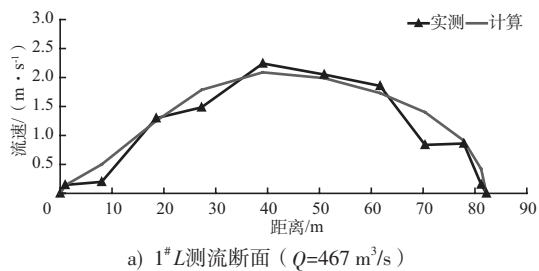


图2 流速分布验证

1.3 二维非恒定流数学模型验证

本河段设置了于龙洞、小滩、大塘口、鸡冠石、马蔚滩、大沙坝滩、花滩共7把固定水尺,逐时观测了近4 d的水位。

非恒定流上游入口流量采用乌江渡水文站的逐时水位换算的逐时流量值,出口水位采用漩塘水位。

非恒定流计算中,其糙率是由各区段两级恒定流计算的糙率内插求得,全河段糙率取值范围为 $0.022 \sim 0.056$ 。计算时间步长取 5 s 。从2010年4月12—14日期间,计算水位过程和实测吻合良好,水位计算差值均小于 0.1 m 。模型的验证满足

《内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程》等规范要求。表明建立的非恒定流数学模型可靠,可以用于各泄流方案的计算。

2 乌江渡枢纽泄水波传播计算^[3-4]

2.1 调度工况选取

根据构皮滩枢纽相关资料,乌江主汛期为6—7月,下游构皮滩防洪限制水位为 626.24 m ,死水位为 590.0 m ,由于构皮滩枢纽调度资料匮乏,无法明确具体的构皮滩枢纽坝前水位调度原则,只能推测构皮滩枢纽正常运行后的坝前水位调节过程为:1—5月为 630.0 m ;6—7月为 $590.0 \sim 626.24\text{ m}$;8—12月为 630.0 m 。但是近期根据观测,在遇到特枯水年时,构皮滩枢纽入库水量不足会发生蓄水不足的情况,以2010年为例,枯水期构皮滩枢纽的坝前水位仅维持在 590.0 m 左右,而到了汛期由于入库水量增加坝前水位才逐渐抬高,至2010年8月初升至 615.0 m 左右。

以最不利条件下计算,构皮滩死水位为 590.0 m ,此时本河段处于脱水状态,即不受到下游构皮滩回水影响,而漩塘以下河段处于构皮滩枢纽常年回水区,通航条件较好。本研究的下游尾门漩塘水位取为 590.0 m 。

根据2008年5月—2010年4月乌江渡水文站瞬时水位过程线,通过乌江渡水文站水位流量关系可推算出乌江渡水文站瞬时流量过程线。本次非恒定数学模型研究的主要内容是计算各典型调度过程下河道沿程水位变率、流速变率等对船舶航行、滩险和港口运行的不利影响。因此选取的调度工况应具有突变性,即流量变率较大。基于此原则,选取流量变率为小—大—小(调度工况1)和流量变率为大—小—大(调度工况2)两个代表过程。尾门水位采用构皮滩枢纽死水位 590.0 m 。乌江渡水文站调度工况逐时流量见表1。

2.2 调度工况1泄水波向下传播过程计算

乌江渡枢纽调度工况1泄水波向下传播过程中,波峰流量沿程逐渐减小,即沿程坦化。乌江渡枢纽波峰流量为 $758\text{ m}^3/\text{s}$;波峰传递到乌江渡码头时

表1 调度工况逐时流量 m^3/s

时间/h	调度工况1	调度工况2
0	45.7	695.0
1	45.0	692.5
2	45.0	597.5
3	45.7	457.5
4	45.0	178.2
5	111.0	114.0
6	732.4	115.5
7	757.6	124.6
8	452.5	351.6
9	269.9	439.1
10	66.2	547.5
11	48.5	647.5

间小于1 h, 乌江渡码头波峰流量为745 m^3/s ; 波峰传递到大塘口约1 h, 大塘口波峰流量为570 m^3/s ; 波峰传递到鸡冠石约1 h, 鸡冠石波峰流量为519 m^3/s ; 波峰传递到楠木渡码头约1 h, 楠木渡码头波峰流量为411 m^3/s ; 波峰传递到花滩约2 h, 花滩波峰流量为369 m^3/s ; 波峰传递到漩塘约3 h, 漩塘波峰流量为364 m^3/s 。

乌江渡枢纽调度工况1泄水波向下传播过程中, 波峰流量沿程逐渐减小, 流速值也呈现沿程逐渐减小态势, 流速峰值出现在乌江渡码头上游约300 m处, 流速峰值为3.5 m/s。

2.3 调度工况2泄水波向下传播过程

乌江渡枢纽调度工况2泄水波向下传播过程中, 波谷流量沿程逐渐增大, 即沿程坦化。乌江渡枢纽波谷流量为114 m^3/s ; 波谷传递到乌江渡码头约1 h, 乌江渡码头波谷流量为128 m^3/s ; 波谷传递到大塘口约2 h, 大塘口波谷流量为214 m^3/s ; 波谷传递到鸡冠石约3 h, 鸡冠石波谷流量为257 m^3/s ; 波谷传递到楠木渡码头约3 h, 楠木渡码头波谷流量为285 m^3/s ; 波谷传递到花滩约4 h, 花滩波谷流量为315 m^3/s ; 波谷传递到漩塘约4 h, 漩塘波谷流量为317 m^3/s 。

3 非恒定流条件下水流条件变化

3.1 乌江渡枢纽调度工况1

通过二维非恒定流计算, 重点河段的水位、流速、比降变率极值结果见表2, 流场结果见图3和4。

表2 调度工况1水流指标变率极值

位置	水位变率极值/ ($m \cdot h^{-1}$)	流速变率极值/ ($m \cdot s^{-1} \cdot h^{-1}$)	比降变率极值/ ($\% \cdot h^{-1}$)
乌江渡码头	4.09	2.61	0.19
大塘口	1.36	1.12	0.06
鸡冠石	2.08	1.58	0.09
楠木渡码头	1.70	0.81	0.07
花滩	0.44	0.32	0.01

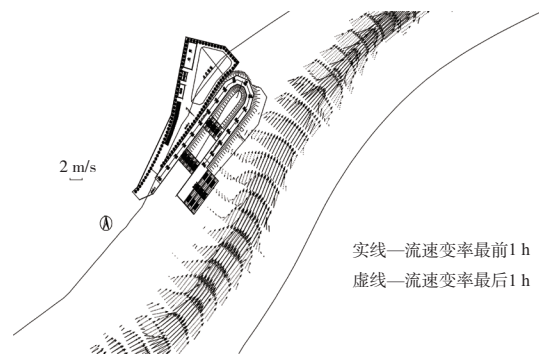


图3 调度工况1乌江渡码头流速变率最大前后时段流速变化

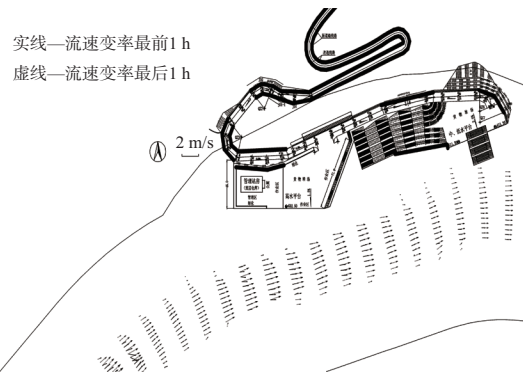


图4 调度工况1楠木渡码头流速变率最大前后时段流速变化

3.2 乌江渡枢纽调度工况2

通过二维非恒定流计算, 重点河段的水位、流速、比降变率极值结果见表3, 流场结果见图5和6。

表3 调度工况2水流指标变率极值

位置	水位变率极值/ ($m \cdot h^{-1}$)	流速变率极值/ ($m \cdot s^{-1} \cdot h^{-1}$)	比降变率极值/ ($\% \cdot h^{-1}$)
乌江渡码头	-1.93	-2.11	-0.09
大塘口	-0.61	-0.52	-0.02
鸡冠石	-1.79	-1.43	-0.08
楠木渡码头	-1.42	-0.32	-0.06
花滩	-0.41	-0.25	-0.01

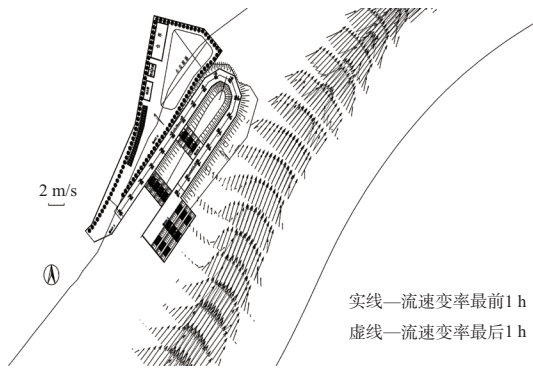


图5 调度工况2乌江渡码头流速变率最大前后时段流速变化

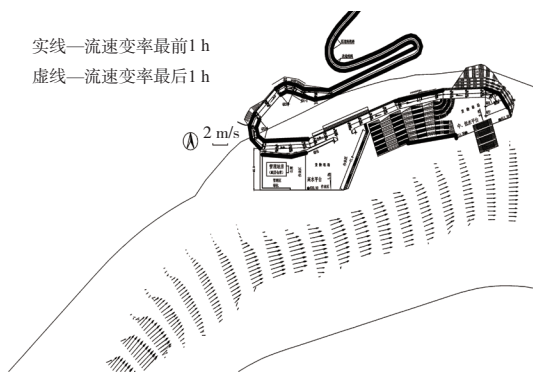


图6 调度工况2楠木渡码头流速变率最大前后时段流速变化

4 非恒定流影响下的通航条件

1) 码头水位变率极大。乌江渡码头是受乌江渡枢纽非恒定流调节影响最大的,调度工况1中,乌江渡码头的水位变率达到 4.09 m/h ,楠木渡码头水位变率也达到 1.70 m/h ,在此条件下,通航及停靠条件极差,特别是乌江渡码头极易发生海事,应尽量避免停靠作业。

2) 乌江渡码头流速变率极大。调度工况1中,乌江渡码头的流速变率达到 $2.61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,流速峰值为 3.5 m/s 。流速变率及流速值太大,会导致船舶进港及离港操控难度极大。楠木渡码头流速变率较大,船舶进港及离港操控有一定难度。

3) 除乌江渡码头外,全河段比降变化幅度不大,非恒定流比降变化对船舶通航、进港及离港影响不大。

4) 乌江渡枢纽日夜调度方式与通航的矛盾。夜间与白天流量变幅过大,根据现场调研分析,白天流量普遍较小,而白天正是需要通航的时间段;夜晚流量普遍较大,而夜晚的可视性差,通航条件差。建议通航管理部门与枢纽调度单位沟通,通航期在适当加大下泄流量的同时,流量调节过程也应平缓控制,以减少通航隐患。

5 结语

1) 乌江渡枢纽调度工况1和调度工况2的下泄流量都具有急变特点。调度工况1为小-大-小变化,调度工况2为大-小-大变化。从流量过程来看,调度工况1的流量峰值和调度工况2的流量谷值都具有沿程坦化的趋势,因此水位变率、流速变率、比降变率也普遍具有沿程减小的趋势。但是大塘口处由于河宽非常大的因素,即使流量变幅较大,其水位变率、流速变率、比降变率比下游还小。这说明相同条件下,过水断面越大,非恒定流对其影响越小。

2) 枢纽下游航道通航条件与上游来流条件密切相关,陡涨陡落的流量过程对于下游航道通航条件是不利的,应实时掌控上游来流条件,并对过往船只及时提醒,使之预留充分时间应对非恒定流影响。

参考文献:

- [1] JT/T 233—1998 内河航道与港口水流泥沙模拟技术规范[S].
- [2] 张瑞瑾.河流动力学[M].北京:中国工业出版社,1960.
- [3] 张波.遵义氧化铝厂乌江楠木渡取水口工程二维水流数值模拟研究报告[R].天津:交通部天津水运工程科学研究所,2008.
- [4] 张波.乌江构皮滩枢纽变动回水区二维非恒定流数学模型研究报告[R].天津:交通部天津水运工程科学研究所,2010.

(本文编辑 武亚庆)