



明渠交汇口水流浅水二维数学模型研究

岳志远, 刘怀汉, 李有为, 闫 军, 付中敏

(长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011)

摘要: 针对明渠交汇口缓流流动特性, 建立基于高性能有限体积数值方法、具有二阶精度的非恒定浅水二维水流数学模型。基本控制方程采用浅水二维水流方程; 采用能够有效捕捉激波的高性能有限体积方法离散控制方程; 采用了隐式方法处理阻力项, 从而保证了模型的稳定性。采用非结构三角形网格系离散计算区域。最后, 应用实测资料对两种模型进行了验证比较, 结果表明该模型可模拟明渠交汇口基本流动特性, 显示了对天然河流广阔的应用前景。

关键词: 数学模型; 非结构网格; 明渠交汇口; 分离区

中图分类号: TV 91

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)10-0074-03

Shallow water two-dimensional numerical simulation of open channel influx

YUE Zhi-yuan, LIU Huai-han, LI You-wei, YAN Jun, FU Zhong-min

(Changjiang Waterway Institute of Planning, Design and Research, Wuhan 430011, China)

Abstract: This paper presents a high-resolution two-dimensional finite-volume numerical model with two-order accuracy for flow characteristics at open channel junction. The governing equations of the model comprise the shallow water equations with bed slope and resistance source. A high-resolution numerical method governing equations, which may accurately capture shocks, is adopted. To alleviate the problems associated with numerical instabilities due to small water depths near a wet/dry boundary, the friction source terms are treated in a fully implicit way. Finally, the measured data for open channel junction is used in the present model. Results indicate that present model may well simulate the flow characteristics at open channel junction.

Key words: mathematical model; unstructured grid; open channel influx; separation zone

干支流交汇处水流的相互掺混顶托导致交汇口附近流场、水深等水力要素随空间变化, 形成了许多独特的水力特性。一般来说, 交汇河段沿主流方向可分为3个区, 分别是分离区(回流区、涡漩区)、过渡区和远区(分离区和过渡区又合称为近区)。如图1^[1]所示, 图中 Q_u , Q_b , Q_d 分别为主流、支流及汇流流量。当支流进入主渠后, 由于附壁效应及主流的挤压, 支流向近岸弯曲, 最后重新附着近岸, 因而在汇流口侧下游附近形成分离区, 而外部水流收缩, 形成折向主槽外侧边壁收缩区。分离区的存在势必给环境及水利工程带来许多问题, 如分离区内污染物滞流、交汇河段泥

沙淤积、河床演变、水渠过流能力和局部能量损失等。此外, 由于干支流相互混掺顶托, 交汇口上游干支流水面局部隆起, 形成壅水区域, 流量与水位不再呈单一对应关系。试验及理论分析结果表明, 给定交汇角及交汇河段尺寸时, 流量比 $R_Q=Q_u/Q_d$ 对交汇口的水力特性具有显著的影响。

由于交汇口附近河渠局部形态和干支渠来流水力条件等众多影响因素使得其水力现象极为复杂, 以往主要通过试验方法来研究明渠交汇水流特性。近年来, 随着数值计算方法的发展和对交汇口水流运动结构认识的加深, 数值模拟方法通过改变参数对各影响因素间的相互关系及相对重

收稿日期: 2012-07-26

作者简介: 岳志远(1982—), 男, 博士, 主要从事河流泥沙动力学研究。

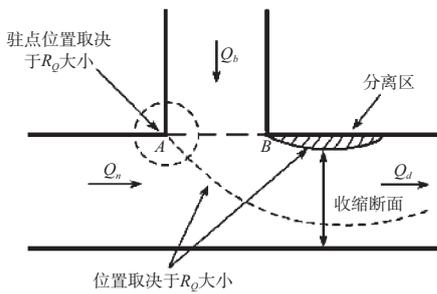


图1 交汇口流动示意图

要性进行系统的研究分析，因而成为另一种较为有效的研究手段。特别是原本应用于空气动力学领域的Godunov型高性能有限体积方法被用于求解浅水动力学方程，据此发展了大量的水流数学模型^[2]。

本文基于非结构网格系统建立了非恒定浅水二维水流数学模型^[3]。基本控制方程采用浅水二维水流方程，采用能够有效捕捉激波HLLC近似黎曼算子求解界面通量，并通过对界面两侧的变量重构使模型具有二阶精度；将地形高程定义在各单元节点上，相应地，单元间地形连续变化，结合处理底坡的DFB方法，在遵守了严格物理意义的基础上，保证了模型的和谐性；采用了隐式方法处理阻力项，进一步保证了模型的稳定性。最后，应用一系列算例系统地检验模型性能。

1 基本控制方程

基本控制方程采用浅水二维动力学方程，可以表述为如下的守恒形式：

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huv \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + gh^2/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_b + \mathbf{S}_f = \begin{bmatrix} 0 \\ ghS_{bx} \\ ghS_{by} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} \\ -ghS_{fy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： t 为时间； x 和 y 为空间坐标； h 为水深； u 和 v 为 x 和 y 方向的水流流速； g 为重力加速度，取 9.8 m/s^2 ； \mathbf{U} 为守恒量向量； \mathbf{F} 和 \mathbf{G} 为 x 和 y 方向的通量向量； \mathbf{S} 为源项向量； $S_{bx} = -\partial z_b / \partial x$ ， $S_{by} = -\partial z_b / \partial y$ 分别为 x 和 y 方向的地形坡度， z_b 为河床高程； $S_{fx} = n^2 u \sqrt{(u^2 + v^2)} / h^{4/3}$ ， $S_{fy} = n^2 v \sqrt{(u^2 + v^2)} / h^{4/3}$ ，分别为 x 和 y 方向的阻力坡度， n 为Manning糙率系数。

2 数值离散格式

模型的数值离散格式，包括方程离散、通量计算、源项计算、时间步长选取原则、边界条件处理等的详尽描述可以参考文献[3]。此外，文献[3]中还采用多个典型的国际经典算例对本文模型和谐性、精度、稳定性等进行系统的检验。

3 明渠交汇口水流模拟

应用上述模型针对直角交汇水流进行数值计算并与量测资料进行比较，见图2^[1]，坐标原点取在交汇口上游支渠侧底部，其中 $x^* = x/W$ ， $y^* = y/W$ ， W 为明渠水槽宽度。总流量 $Q_d = 1.699 \text{ m}^3/\text{s}$ 。采用3 702个网格单元离散计算区域（图3），计算时间步长约为 0.003 s 。本文仅给出流量比 $R_Q = 0.25$ 工况下的流速矢量、流线、自由水面和水深沿程变化的试验结果及本文模型计算结果，如图4~7所示。

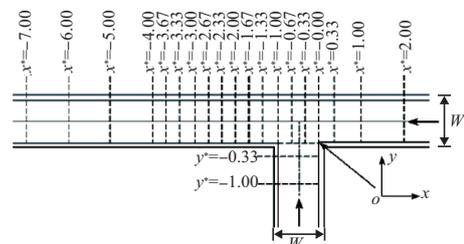


图2 试验水槽及测点布置

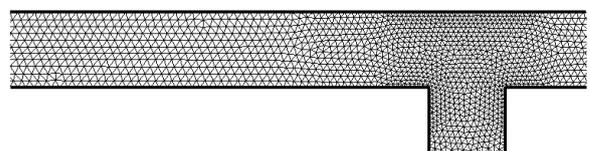


图3 模型计算网格

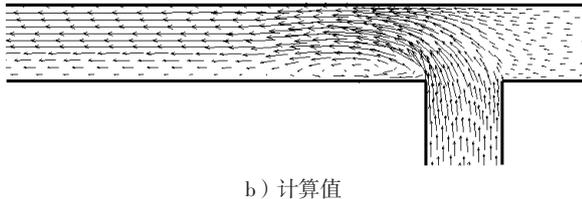
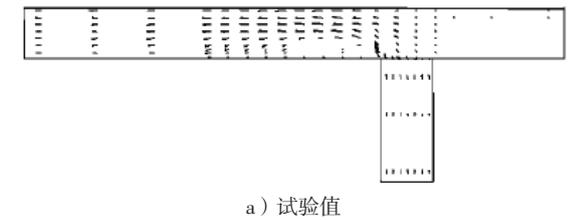


图4 计算及试验流场比较

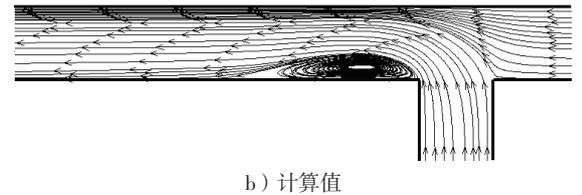
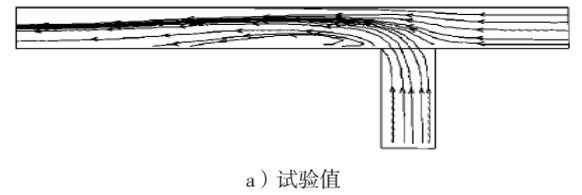


图5 计算及试验流线比较

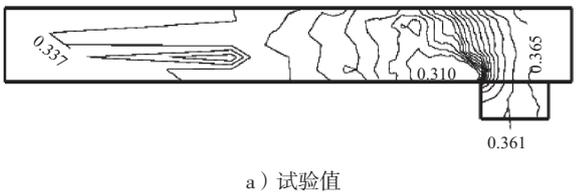


图6 计算及试验自由水面等值线比较

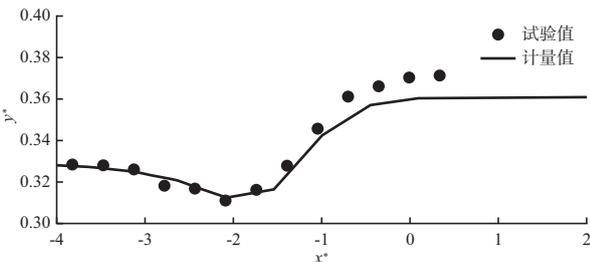


图7 主槽中心线处计算及试验水面线比较

通过对比图4~6可以看出, 计算与实测的流速矢量、流线、自由水面等值线分布具有较好的相似性, 定性上表明本文模型能够较好地模拟明渠交叉口水流特性。定量上, 计算与实测水面线也基本相符(图7)。此外, 表1对比了计算与实测分离区尺寸, 可以看出, 与现有模型相比, 本文模型分离区尺寸更接近于实测值, 其中 L 和 W 分别为分离区最外部流线沿 x 向长度、沿 y 方向的最大距离。

表1 分离区尺寸的试验及本文模型计算结果比较

试验		本文模型			
L/W	B/W	L/W		B/W	
		计算值/m	误差/%	计算值/m	误差/%
2.4	0.4	2.74	14.12	0.35	-12.5

4 结论

本文应用平面二维浅水动力数学模型研究明渠交汇口水流特性。为了更好地适应复杂的实际边界情况, 采用非结构三角网格系剖分计算区域; 采用HLLC近似黎曼算子求解界面通量, 结合对界面变量的数据重构, 模型具有二阶精度, 可以有效而准确地捕捉复杂的水流变化过程; 采用了隐式方法处理阻力项, 进一步保证了模型的稳定性。

应用实测资料对本模型进行检验, 结果表明, 本模型能够较准确地模拟明渠交汇口的基本流动特性, 可以用于模拟天然河流交汇口水流问题, 具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 赵升伟, 茅泽育, 罗日升, 等. 等宽明渠交汇口水流数值计算[J]. 河海大学学报, 2005, 33(5): 494-499.
- [2] Yue Z Y, Cao Z X, Li X, et al. Two-dimensional coupled mathematical modeling of fluvial processes with intense sediment transport and rapid bed evolution [J]. Science in China Series G: Physical, Mechanics & Astronomy, 2008, 51(9): 1 427-1 438.
- [3] 岳志远, 曹志先, 李有为, 等. 基于非结构网格的非恒定浅水二维有限体积数学模型研究 [J]. 水动力学研究与进展, 2011, 26(3): 359-367.

(本文编辑 武亚庆)