

驾驭式洪水演进模型在蓄滞洪区联合防洪中的应用

李大鸣¹, 王志超¹, 李杨杨¹, 王 笑¹, 张建中², 刘江侠²

(1. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;

2. 水利部海河水利委员会科技咨询中心, 天津 300170)

摘要: 基于一、二维非恒定流基本控制方程, 建立了蓄滞洪区洪水演进数学模型。模型采用具有旁侧出流的河网独立计算的一、二维多口门嵌套衔接模式, 将一维河道嵌套于二维分洪区中。通过混合编译方法实现了该模型的可视化驾驭功能。介绍了驾驭式模型的基本结构, 讨论了该模型混合编译的不同实现方法的优缺点, 提出了在保留计算模型独立性和完整性前提下具有通用性的可视化驾驭模型快捷建立方法。结合历史洪水资料, 模拟了永定河蓄滞洪区百年一遇洪水演进过程。实现了模拟过程中对各分洪区口门开关和堤埝突发决口事件的监控。

关键词: 驾驭式; 洪水演进; 蓄滞洪区; 联合调度

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2016)10-1084-09

Research on Steering Flood Routing Model and Its Application in Flood Combined-Regulation in Detention Basin

Li Daming¹, Wang Zhichao¹, Li Yangyang¹, Wang Xiao¹, Zhang Jianzhong², Liu Jiangxia²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Haihe Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources Science and Technology Consultation, Tianjin Consultation Center, Tianjin 300170, China)

Abstract: A steering detention basin flood routing model is established based on the one-dimensional and two-dimensional non-invariableness flow control equation. Flood multi-entrances nested mode is proposed and used to couple the independent one-dimensional river mesh to two-dimensional flood-diversion area mesh. The model's major structure is introduced, and its visualization and steering function is realized by mixed language programming method of Visual-Basic (VB) and Fortran. Then several different mixed programming methods with their merits and faults are discussed. Moreover a fast method to set up visual steering model with its independence, integrity, and universality is introduced. At last, by referring to the historical investigation data of the worst flood during the past 100 years, flood routing process in Yongding River detention basin is simulated with status of diversion entrances and dikes under steered.

Keywords: steering mode; flood routing; flood detention basin; combined regulation

蓄滞洪区是我国江河防洪体系的重要组成部分, 在防洪减灾中发挥着重要的、不可替代的作用。然而, 近年来随着社会经济的发展和城市建设的需要, 大量的蓄滞洪区正不断地被开发利用, 使得蓄滞洪区防洪形势也日渐复杂化。因此, 加强蓄滞洪区洪水演进规律的研究, 是正确发挥蓄滞洪区防洪功能的关键。洪水演进数学模型不仅是非工程措施的重要组成部分, 同时也是研究和掌握当前形势下蓄滞洪区洪

水演进规律的重要方法之一。

对于洪水演进数学模型理论, 国内外专家都已进行了大量研究。早在 1967 年 Liggett 等^[1]便利用显示差分格式和矩形网格建立了二维洪水演进模型。1988 年 Akanbi 等^[2]使用有限元法模拟洪水波在干河床上的演进。而后刘树坤等^[3]用有结构网格对小清河分洪区洪水演进进行了模拟。王船海等^[4]将一维、二维模型相结合, 采用直角坐标下非均匀矩形网

收稿日期: 2014-09-03; 修回日期: 2015-04-03.

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体基金资助项目(51021004); 河北省水利科研计划资助项目(HS2007-43).

作者简介: 李大鸣(1957—), 男, 博士, 教授.

通讯作者: 李大鸣, lidaming@tju.edu.cn.

格的控制体积法模拟流域洪水. Caleffi 等^[5]采用二维浅水方程对 Toce 河的洪水演进进行了模拟. 李云等^[6]采用剖开算子法建立了一、二维洪水演进嵌套数学模型, 应用于淮河临淮岗洪水控制工程. 解以扬等^[7]基于平面二维非恒定流的方程和无结构不规则网格划分技术, 模拟了城市暴雨内涝积水过程. 李大鸣等^[8-9]采用有限体积方法建立了适应河道、滞洪区等复杂情况的洪水演进一、二维衔接数学模型, 并模拟了大清河滞洪区五洼联合调度方案. 然而目前大多数洪水演进数学模型均是对计算结果做处理分析, 很难实时地可视化观测和人为地控制运算过程.

科学计算可视化 (visualization in scientific computing) 作为一门综合性的交叉学科, 是利用图形处理技术和界面交互手段等使研究人员对模拟过程有着更为直观的认识. 自从 1987 年 McCormick 等^[10]正式提出了科学计算可视化这一概念以来, 便一直备受研究者们关注, 如今更是已涉及到水利^[6-7,9,11]、气象^[7,12]等研究领域. 根据模拟和显示的关系, 科学计算可视化可以分为后处理式、跟踪式和驾驭式 3 大类. 其中: 后处理式是将科学计算和可视化分为两个独立阶段, 两者之间不存在任何交互, 仅仅针对计算结果做可视化处理; 跟踪式是在科学计算的同时实时显示相关结果, 可以监视模拟整个过程; 驾驭式在前者的基础上加入了干涉和控制功能, 根据需要可以实时监控模拟过程. 当前洪水演进数学模型的研究均侧重于处理式和跟踪式, 而针对驾驭式模型并将其应用于实际工程当中的研究却很少. 特别是针对类似于蓄滞洪区间洪水联合调度的较复杂情况, 驾驭式模型不仅方便了相关人员对洪水演进过程的监控, 而且提高了洪水风险的预报和防洪调度方案的决策效率. 本文主要通过混合编译方法^[13]建立驾驭式洪水演进模型, 并实现了对永定河蓄滞洪区百年一遇洪水演进过程的驾驭式模拟.

1 模型理论

1.1 一维非恒定流基本方程

连续方程

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q}{B} \quad (1)$$

运动方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \left(gA - \frac{BQ^2}{A^2}\right) \frac{\partial Z}{\partial x} + 2 \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} = \\ \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} - g \frac{|Q|Q}{AC^2R} + \frac{Q}{A} q \end{aligned} \quad (2)$$

式中: Z 为水深; t 为时间坐标; B 为模化宽度; Q 为流量; x 为沿程断面坐标; q 为旁侧出流单宽流量; g 为重力加速度; A 为计算断面的过水面积; C 为谢才系数; R 为水力半径.

1.2 二维非恒定流基本方程

连续方程

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (3)$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} + \\ gh \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} + \\ gh \frac{\partial Z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: H 为水位; $Z = Z_0 + H$, Z_0 为底高程; q 为源汇项; M 、 N 分别为 x 、 y 方向上的单宽流量, $M = Hu$, $N = Hv$; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的平均流速; n 为糙率.

1.3 一、二维模型衔接

蓄滞洪区和河道是通过分洪口门联结在一起的, 一、二维模型衔接模式采用一维旁侧出流流量等于二维模型边界流量, 一、二维水位差确定堰流流量、方向的方法交替叠代计算, 达到一、二维衔接模型联解的目的. 衔接口门计算条件为

$$\begin{cases} Q_r^{T+dt} = Q_j^T \\ Q_j^{T+dt} = \varepsilon \sigma_s m \sqrt{2g} (H_j^{3/2})_r^T \end{cases} \quad (6)$$

式中: Q_j 为一维旁侧出流流量; Q_r 为二维模型边界流量; H_j 为衔接断面上游的堰上水头; ε 为侧收缩系数; σ_s 为淹没系数; T 为起算时刻.

一维进行独立求解, 提高河道计算精度, 通过河道旁侧出流条件为二维蓄滞洪区模型提供入流条件, 当口门打开后分洪区内水位升高超过河道水位及对应口门的底坎高程时, 水流自蓄滞洪区回流入河道. 采用的一维河道嵌套平面二维洪水演进模型稳定性好, 能实现一、二维模型的真实耦合, 可在一维、二维模型的交界面 (比如蓄滞洪区口门) 实时交换动态信息.

2 模型基本实现方法

驾驭式模型可以使得研究人员能够快捷有效地检测和控制整个数值模拟过程. 该方法要求模型具

备的良好的可视化功能、方便的界面操作以及灵活的数据交换能力. 数值运算过程中模型的参数、数据和运算进度等可以任由外界控制而又不影响数值运算的进行, 无疑为模型的使用提供极大的便利.

2.1 驾驭式模型结构

类似于一般具有可视化功能的洪水演进模型^[6,9], 驾驭式模型包含了可视化界面和运算程序两部分, 分别如图 1 中 A 和 B 所示. 不同的是一般可视化洪水演进模型在初始化运行之后界面部分 A 便只能被动地接收运算部分 B 的结果, 很难再进一步更新或者修改初始化条件. 本文所提出的驾驭式洪水演进模型在界面部分 A 中包含了监控界面 a1 和控制模块 a2, 运算部分 B 则包含了模型计算程序 b1、数据接收程序 b2 和结果输出程序 b3. 在模型运算过程中监控界面 a1 的指令可以通过控制模块 a2 直接作用于运算部分 B. 为了避免运算过程中参数突变可能带来的计算紊乱, 模块 a2 所传递的数据并不会直接作用于程序 b1 而是先到达程序 b2 中, 当程序 b1 进入下一步运算时会根据命令自动导入程序 b2 中的数据. 最后程序 b1 运算的结果通过程序 b3 的处理后会返回给监控界面 a1.

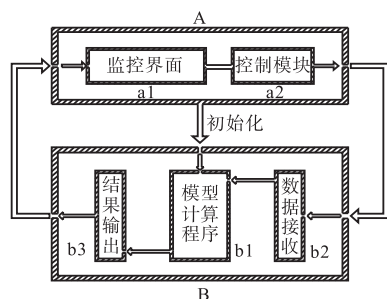


图 1 驾驭式模型整体结构

Fig.1 Overall structure of the steering model

2.2 模型编译方法

图 1 界面部分 A 和运算部分 B 分别由 Visual Basic (VB) 和 Fortran 语言编写. 因为功能强大且使用便捷的 VB 语言与作为世界上运算效率最高的 Fortran 语言相结合可以更加充分地发挥二者的优势. 目前以上两种计算机语言常用的混合编译方法有两种: ①在两者间都可以通过“SHELL”或“SYSTEMQQ”等语句相互调用可执行程序; ②通过调用动态链接库 (DLL) 来实现. 其中, 前者在使用上较为简单但很难实现数据的直接交换. 相比之下后者具有更好的灵活性、高效性和稳定性, 并被广泛采用^[12]. 在 VB/ Fortran 混合编译程序中主程序常常是 VB 程序. 编译过程中无论是声明变量、程序命名

还是堆栈的使用和过程之间的变量传递等等都必须满足一定的约束条件, 相关混合编译详细信息可以参考文献[12]以及 Fortran 编译器使用说明. 此外程序中反复用到并且需要记录数据的变量应当定义在模块中. 因为被 VB 调用的 Fortran 子过程内部变量会受到生命周期限制, 而定义在模块中的变量会被保存在内存中并供后续使用.

混合编译方法中通过调用动态链接库 (DLL) 来实现驾驭式洪水演进模型的方式有两种. 方式 1, 如图 2 所示, 直接将模型的运算部分 B (Fortran 代码) 中的主程序 C 改编为子程序并加入动态连接 (DLL) 控制语句. 界面部分 A (VB 代码) 通过向主程序 C 传递控制变量来监控运算部分 B. 方式 2, 如图 3 所示, 将原模型的运算部分 B 中的主程序 C 改编入界面部分 A 当中, 而计算子程序 D 则写入多个 DLL 文件并被主程序 C 调用.

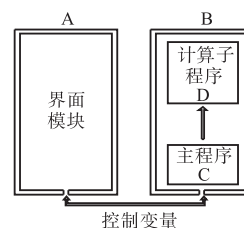


图 2 直接调用

Fig.2 Directly link

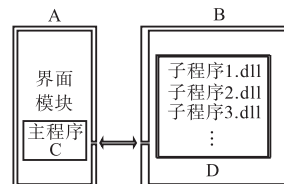


图 3 分块调用

Fig.3 Respectively link

两种方式中, 方式 1 的优点在于: 几乎只修改部分主程序语句, 极大地保留了运算部分 B 计算程序的完整性, 因而更容易实现; 针对不同运算部分 B, 只需修改接口函数, 使得界面部分 A 具有通用性. 但是 A 对 B 的监控需要依靠传递变量来实现, 从而一定程度上影响了运行效率. 此外使用方式 1 时通常需注意看两个问题: ①当 DLL 文件中程序运算量较大时, 界面部分 A 直接调用该 DLL 文件容易导致主线程的阻塞, 应考虑新建子线程来完成调用. 早期的 VB6.0 版本自身并不支持多线程操作, 需要调用 CreateThread、TerminateThread、SuspendThread、ResumeThread 等 API 函数, 来分别实现线程的创建、结束、挂起和激活等功能. 而 VB.net 在线程操作方

面则具有更好的灵活性和稳定性。②由于界面部分 A 仅在初始时访问运算部分 B 并且需通过监控变量来实现可视化驾驭,所以建议将监控变量储存于模块中以便界面部分 A 和运算部分 B 都有可以自由访问。方式 2 的优点是包括主程序 C 在内以及其中的数据变量和控制语句编写入界面部分 A,使得模型在运算效率和稳定性方面都优于方式 1。但是方式 2 需要对运算部分 B 改动较大,不仅需要抽离、改编主程序 C 和原有数据变量,计算子程序 D 也要编入多个 DLL 文件中。

3 模型在永定河蓄滞洪区的应用

3.1 永定河蓄滞洪区概况

1939 年发生 50 年一遇大洪水的永定河自梁各

庄改道,形成了现在的永定河蓄滞洪区(见图 4)。蓄滞洪区上起梁各庄,下至屈家店,总长度 73 km,圈维面积 522 km²,内部包含北小埝、南小埝、北前卫埝、南前卫埝、北围埝和南围埝等多道小埝。区内小埝将蓄滞洪区分隔成 4 个区域共计 9 个部分。由于永定河蓄滞洪区中低标准洪水以河道行洪为主,所以本文模型采用一、二维嵌套计算模式。依据现有地形资料,西张务以及下游河道防洪能力有限,当行洪流量大于 500 m³/s 时,洪水将出槽形成具有二维性质的漫流,所以永定河至西张务以上河段采用一维河道模型,而西张务以下则采用二维蓄滞洪区模型。一维河道入流边界为永定河蓄滞洪区进口梁各庄断面上游的洪水过程线,出流边界为西张务水位流量关系。二维模型中入流边界为西张务水位流量关系,出流边界为屈家店枢纽水位流量关系。

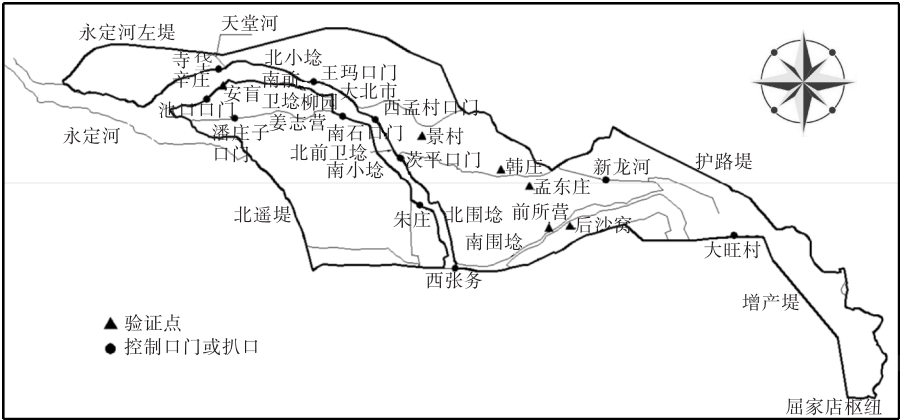


图 4 永定河蓄滞洪区示意
Fig.4 Schematic diagram of Yongding River flood detention basin

3.2 模型验证

为了验证数学模型的可靠性,需要将模拟结果与永定河泛区历史上发生洪水的淹没水深和历时数据进行对比。据查 1950 年、1952 年、1956 年和 1963 年永定河泛区均遭遇过较大洪水,但有记录资料的仅有 1956 年,所以采用 1956 年型洪水在永定河泛区的演进情况对模型进行验证。根据 1956 年永定河蓄滞洪区洪水过程资料,在模型中设置 5 处分洪口门用以描述现实中的 5 处扒口,其中王玛口门和南石口门分别与“大北市”和“姜志营”位于相同堤段上较为

接近的位置。池口口门所在堤埝不变,位置向下游调整至“琥珀营”与“柳园”中间。1956 年北围堰以下堤埝尚未形成,下游淹成一片,没有决口位置可查,计算中在北前卫埝、北围埝分别设置西孟口门、茨平口门两处分洪口门。验证模型口门的控制参数见表 1,可以看出分洪时水面基本在堤顶下 0.2 m 处,考虑到王玛口门处经过多次维修加固,堤顶高程提高较大,因此该口门扒口水位偏低;口门决口宽度取为 500 m,池口口门对应于柳园和琥珀营两处决口位置,所以决口宽度取为 700 m。

表 1 验证模型分洪口门的控制参数
Tab.1 Control parameters of flood diversion gates in verification model

分洪口门	所在堤埝	调查决口位置	堤顶高程/m	扒口水位/m	底坎高程/m	扒口高度/m	扒口宽度/m
王玛	北小埝	大北市	19.20	18.30	17.70	0.60	500
池口	南前卫埝	琥珀营、柳园	18.80	18.60	17.60	1.00	700
南石	南小埝	姜志营	17.50	17.30	16.50	0.80	500
西孟	北前卫埝	军芦村一带	16.70	16.50	15.90	0.60	500
茨平	北围埝	—	15.40	15.20	14.40	0.80	500

注:基准为黄海高程。

1956 年永定河蓄滞洪区路口断面(梁各庄)的洪水过程线、西张务水位流量关系以及屈家店枢纽水位流量关系分别如图 5~7 所示。

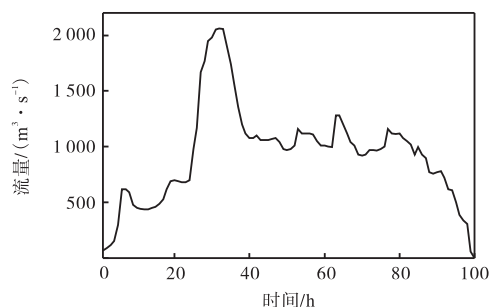


图 5 1956 年梁各庄的洪水过程线

Fig.5 Flood hyetograph of Lianggezhuang in 1956

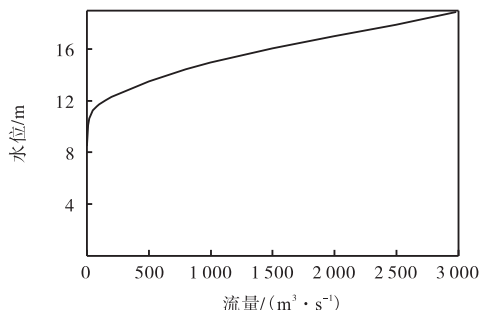


图 6 西张务水位流量关系曲线

Fig.6 Rating curve between water level and discharge on Xizhangwu section

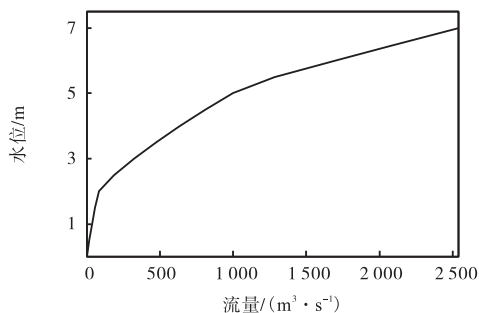


图 7 屈家店枢纽水位流量关系曲线

Fig.7 Rating curve between water lever and discharge on Qujiadian section

表 2 展示了蓄滞洪区内 6 个验证点处的实测资料和模拟结果. 验证点的地理位置如图 4 所示. 其中, 由于 1956 年屈家店枢纽中永定新河闸尚未建造, 所以相同水位下当前的屈家店枢纽可出流流量大于 1956 年. 因此, 采用现状下的水位流量关系进行计算, 蓄滞洪区中的洪水自河道下泄较多, 导致蓄滞洪区内模拟得到的水位偏低, 这与表 2 中情况基本相符。

由洪水调查报告可知, 洪水进入泛区后, 大北市

首先决口, 随后琥珀营与柳园决口, 在洪水进入泛区后的第 8 h 姜志营村东北角决口. 模型计算结果与调查结果的决口顺序一致, 决口时间相接近, 王玛口门、池口口门与南石口门分别于第 5.35 h、5.46 h 和 10.18 h 决口。

表 2 验证点处的实测资料和模拟结果

Tab.2 Measured data and simulation results of verification points

序号	验证点名称	调查水位/m	模拟水位/m	水位误差/m	相对误差/m
1	安育	22.4	22.18	-0.22	-0.96
2	前所营	11.2	11.06	-0.14	-1.26
3	后沙窝	11.2	11.34	0.14	1.25
4	孟东庄	11.4	11.09	-0.31	-2.75
5	韩庄	12.7	12.80	0.10	0.81
6	景村	15.6	15.07	-0.53	-3.40

现今蓄滞洪区地形与 1956 年相比没有太大变化, 但是其中的堤埝在这 50 多年来进行了多次加高、连片, 并且屈家店枢纽于 1969 年建成了永定新河闸, 改变了枢纽的水位流量关系. 因此, 现状下的计算过程与当年的实测过程不可能完全一致, 本计算结果从决口时间、决口顺序、洪水传播时间和特征点水位来看都是比较合理的, 模型具有较高的可信度, 可以用于预测、模拟不同来水情况下永定河蓄滞洪区内洪水的演进情况。

3.3 驾驭式模拟的初始条件

在驾驭式模拟中, 采用洪水频率控制入流条件, 口门宽度和位置根据永定河蓄滞洪区洪水调度预案进行修改. 考虑蓄滞洪区的分区运用, 各小埝上共计规划安排了 6 个固定分洪口门. 包括北围埝上的茨平口门、北前卫埝上的西孟村口门、南前卫埝上的池口口门、南小埝上的南石口门和潘庄子口门、北小埝上的王玛口门. 驾驭式模拟除了口门按照防洪规划预案进行设置以及来流过程采用梁各庄 100 年一遇洪水过程(见图 8)外, 其余均与模型验证中的条件相同。

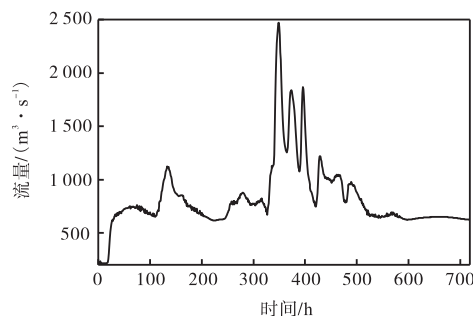


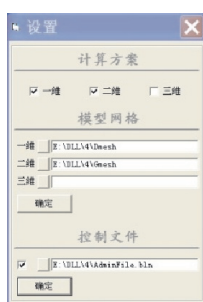
图 8 梁各庄 100 年一遇洪水过程

Fig.8 Hyetograph of the worst flood during the past 100 years in Lianggezhuang section

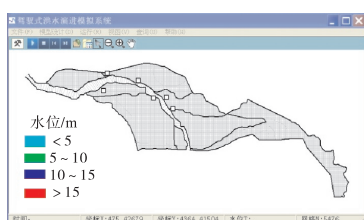
3.4 驾驭式模拟

模型运行前首先需要初始设置计算方案并导入相应数据, 见图 9(a). 本文模拟选用一、二维嵌套数学模型, 控制文件中包含的是蓄滞洪区口门信息. 导入网格和控制文件后模型界面会生成计算网格平面图并且标记上口门控件, 见图 9(b). 模型界面菜单栏中模型设计下拉菜单内可以完成指定模型边界条件、设定工程方案等操作.

模拟过程中, 各时刻水位分布以及口门开启情况



(a) 初始设置



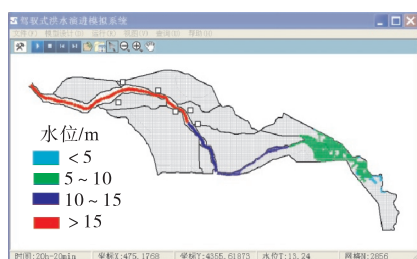
(b) 界面设置

图 9 模型初始设计

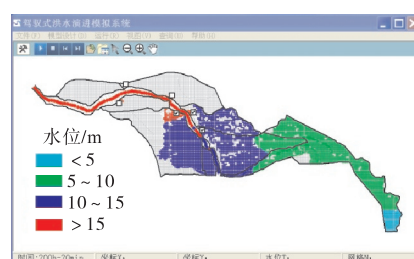
Fig.9 Initial design of model

如图 10 所示. 在一维河道入流后, 首先在西张务与二维蓄滞洪区衔接, 二维蓄滞洪区从无水干河床起算, 随着时间发展, 河道洪水向下游演进; 28.25 h 时, 茨平口门首先达到最高水位 15.419 m, 然后朱村水位达到围垸顶高程, 在朱村至西张务间前卫垸以西过流, 龙河右岸水位达到分洪水位. 55.88 h 时, 西孟村口门达到最高水位 16.700 m; 351.48 h 时, 池口口门最高水位 22.080 m; 55.87 h, 南石口门达到最高水位 17.830 m, 河道洪水向各区分洪. 在 334 ~ 335 h, 天堂河旁的河道水位超过了寺堡辛庄分洪口门分洪水位, 开始向永定河左岸、天堂河右岸高地的寺堡辛庄分洪区分洪. 在 339 ~ 340 h 之间, 潘庄子口门启用, 王玛口门随即打开, 至此蓄滞洪区全面启用. 至 700 h 左右, 淹没范围大幅减小. 王玛分洪区洪水经西孟村分洪区、茨平分洪区向龙河分洪口附近退水; 潘庄子分洪区经南石分洪区、朱庄-西张务附近断面汇流至河道, 并与二维模型衔接, 与茨平分洪区洪水汇合后, 向屈家店闸汇流.

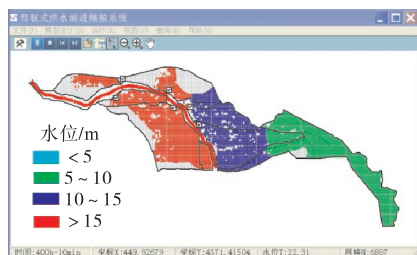
图 11 为口门监控界面, 当口门水位达到分洪水位时界面中会在该栏以红色标示, 此外该界面也提供了口门的开启和关闭功能. 如图 11 中显示某一时刻南石、茨平和西孟村口门均已开启; 池口、寺堡辛庄和王玛口门正处于关闭状态; 而王玛和茨平口门水位正达到或已超过分洪水位. 图 12 为通道查询界面, 可以实现查询和编辑对应通道的高程, 以及改变边界入流条件等功能. 对于河堤的决口以及堤垸的溃塌均可以通过修改该界面中通道的高程来实现模拟.



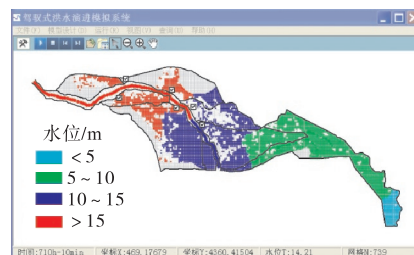
(a) 第 20 时 20 分



(b) 第 200 时 20 分



(c) 第 400 时 10 分



(d) 第 710 时 10 分

图 10 各时刻水位分布以及口门开启情况

Fig.10 Water level distribution and diversion entrance open state at each time

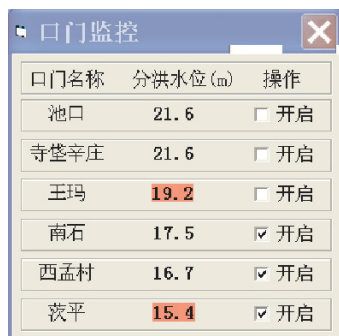


图 11 口门监控界面

Fig.11 Control interface about water gate

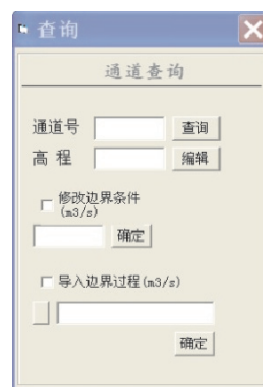


图 12 通道查询界面

Fig.12 Inquiring interface about pass

3.5 驾驭式洪水演进模型基本结构

驾驭式洪水演进模型基本结构如图 13 所示,模

型的主要部分包含控制界面和计算程序两大部分.

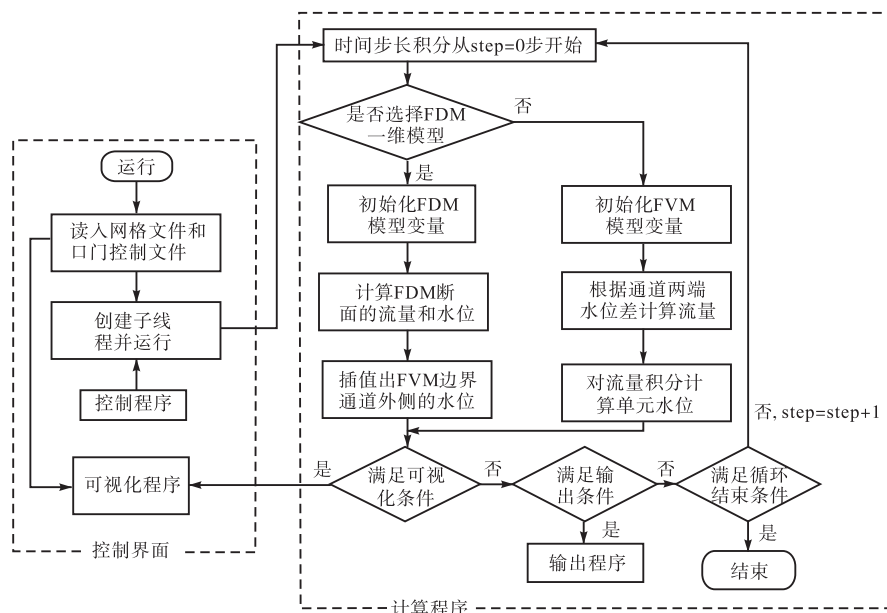


图 13 模型基本结构示意图

Fig.13 Schematic diagram of basic construction of model

3.5.1 控制界面和计算程序的运行顺序

(1) 运行程序.

(2) 读入网格文件和口门控制文件,其中网格文件包含网格的点线面关系以及形心、面积和高程等信息;口门控制文件中包含有口门的通道号和通道的边界条件(一维 FDM 模型的边界条件作为特殊口门包含在口门控制文件中).

(3) 执行程序,创建子线程并调用计算程序.

(4) 控制程序,可以对子线程进行暂停、恢复、结束等操作;通过控制变量的传递可以对单元和通道的高程和边界条件等信息进行编辑.

(5) 可视化程序,用于显示和分析计算结果.

(6) 时间步长积分,为计算程序的主循环程序.

(7) 时间积分同步,通过时间积分间隔来运行 FDM 一维模型和 FVM 二维模型程序;其中 $istep$ 为积分步数, kt 为一维模型与二维模型的时间间隔.

(8) 初始化一维模型变量,当满足一维运行条件时首先需要对一维模型变量进行初始化;根据二维模型的初始条件确定一维模型的旁侧出流流量.

(9) 计算出一维模型的断面流量和水位.

(10) 插值出二维模型边界通道外侧的水位.

(11) 初始化二维模型变量,当满足二维运行条

件时首先需要对二维模型变量进行初始化。

(12) 根据二维模型中通道两端的水位差确定通道的流量; 这里面的流量包含了一维模型旁侧出流的流量。

(13) 对单元的通道流量积分得到当前时刻的单元水位。

(14) 判断是否满足可视化条件; 是, 则运行可视化程序。

(15) 判断是否满足输出条件; 是, 则运行输出程序。

(16) 判断是否满足循环条件; 是, 则继续运行。否, 则结束程序。

3.5.2 VB 中关于线程的操作

线程控制的 API 函数如下:

```
Private Declare Function CreateThread Lib "kernel32" (ByVal lpThreadAttributes As Any, ByVal dwStackSize As Long, ByVal lpStartAddress As Long, lpParameter As Any, ByVal dwCreationFlags As Long, lpThreadId As Long) As Long
```

```
Private Declare Function TerminateThread Lib "kernel32" (ByVal hThread As Long, ByVal dwExitCode As Long) As Long
```

```
Private Declare Function SuspendThread Lib "kernel32" (ByVal hThread As Long) As Long
```

```
Private Declare Function ResumeThread Lib "kernel32" (ByVal hThread As Long) As Long
```

控制界面中的创建并且运行线程代码如下:

```
MCTh = mtho. CreateNewThread (AddressOf MCalculation)
```

控制界面中的声明动态链接函数以及通过线程调用的函数如下:

```
Public Declare Sub MHH Lib "mhh.dll" (WZC As Long, NKT As Long, Ncell As Long, Depth As Double, ADN As Long, Adch As Long)
```

```
Public Function MCalculation()
```

```
Call MHH (Mstep, NKT, Ncell, Depth(1), ADN, Adch(1, 1))
```

```
End Function
```

计算程序中的声明动态链接函数以及接收控制变量的代码如下:

```
subroutine mhh (Mstep, NKT, Ncell, Depth, ADN, Adch)
```

```
!DEC$ ATTRIBUTES DLLEXPORT :: mhh
```

```
use head
```

```
integer(4) :: mstep, nkt, ncell, adn
```

```
INTEGER(4) :: adch(2, adn)
```

```
real(8) :: depth(ncell)
```

```
:
```

本文由于篇幅限制, 以及对程序合作开发人员知识产权的尊重, 不能将所有代码完全公布。若是有意从事相关问题研究或者对本文细节描述上有疑问的

单位和人员, 欢迎与通讯作者进行更多交流。

4 结 语

本文基于一、二维非恒定流控制方程, 建立了具有旁侧出流河网与多口门嵌套衔接的计算模式。从理论方面较好地解决了河道和蓄滞洪区间多口门分洪的联合调度问题。混合编译方法可以在极大地保留模型计算效率的同时, 实现模型的可视化驾驭功能, 从而在计算方面实现模拟过程中对各分洪区口门开关和堤埝突发决口等事件的监控。此外, 文中所述两种模型编译方法各具优劣, 但皆可作为建立驾驭式模型的参考, 特别是在已有 Fortran 语言模型的基础上, 为快速实现可视化驾驭式模型提供了便利条件。将驾驭式洪水演进模型应用于实际工程当中, 不仅实现了对洪水演进模拟过程的监控, 提高了洪水风险的预报和调度方案的制定效率, 也为应对河道溃坝等突发事件的方案决策提供了良好助力。

参考文献:

- [1] Liggett J A, Woolhiser D A. Difference solutions of the shallow-water equation [J]. *J Engng Mech Div, ASCE*, 1967, 93(2): 39-71.
- [2] Akanbi A A, Katopodes N D. Model for flood propagation on initially dry land [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988, 114(7): 689-706.
- [3] 刘树坤, 李小佩, 李士功, 等. 小清河分洪区洪水演进的数值模拟[J]. *水科学进展*, 1991, 2(3): 188-192.
Liu Shukun, Li Xiaopei, Li Shigong, et al. Numerical simulation of flood routing in the Xiaoqinghe flood plain [J]. *Advances in Water Science*, 1991, 2(3): 188-192 (in Chinese).
- [4] 王船海, 李光炽. 流域洪水模拟[J]. *水利学报*, 1996(3): 44-50.
Wang Chuanhai, Li Guangchi. The modeling of basin flood [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996(3): 44-50 (in Chinese).
- [5] Caleffi V, Valiani A, Zanni A. Finite volume method for simulating extreme flood events in natural channels [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2003, 41(2): 167-177.
- [6] 李云, 范子武, 吴时强, 等. 大型行蓄洪区洪水演进数值模拟与三维可视化技术[J]. *水利学报*, 2005, 36(10): 1158-1164.

- Li Yun, Fan Ziwu, Wu Shiqiang, et al. Numerical simulation and 3D visualization of flood propagation in large-scale detention basins [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(10): 1158-1164 (in Chinese).
- [7] 解以扬, 李大鸣, 李培彦, 等. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 384-390.
- Xie Yiyang, Li Daming, Li Peiyan, et al. Research and application of the mathematical model for urban rainstorm water logging[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(3): 384-390 (in Chinese).
- [8] 李大鸣, 林毅, 徐亚男, 等. 河道、滞洪区洪水演进数学模型[J]. 天津大学学报, 2009, 42(1): 47-55.
- Li Daming, Lin Yi, Xu Ya'nan, et al. Numerical model of flood propagation of rivers and flood detention basin[J]. *Journal of Tianjin University*, 2009, 42(1): 47-55 (in Chinese).
- [9] 李大鸣, 林毅, 周志华. 蓄滞洪区洪水演进一、二维数值仿真及其在洼淀联合调度中的应用[J]. 中国工程科学, 2010, 12(3): 82-89.
- Li Daming, Lin Yi, Zhou Zhihua. Research on 1D and 2D numerical simulation of flood routing and its application of combined-regulation in detention basin [J]. *Engineering Sciences*, 2010, 12(3): 82-89 (in Chinese).
- [10] McCormick B H, Defanti T A, Brown M D, et al. Visualization in scientific computing—A synopsis[J]. *Computer Graphics & Applications IEEE*, 1987, 7(7): 61-70.
- [11] 周振红, 杨国录, 周洞汝. 基于组件的水力数值模拟可视化系统[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 9-13.
- Zhou Zhenhong, Yang Guolu, Zhou Dongru. Numerical hydraulic modeling visualization system based on software component [J]. *Advances in Water Science*, 2002, 13(1): 9-13 (in Chinese).
- [12] 李旭东, 孙济洲, 张凯. 基于 AVS/Express 的气象数据可视化系统[J]. 天津大学学报, 2009, 42(4): 357-361.
- Li Xudong, Sun Jizhou, Zhang Kai. Meteorological data visualization system using AVS/Express[J]. *Journal of Tianjin University*, 2009, 42(4): 357-361 (in Chinese).
- [13] 彭国伦. Fortran95 程序设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 381-383.
- Peng Guolun. *Fortran95 Program Design* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 381-383 (in Chinese).

(责任编辑: 樊素英)