

东苕溪防洪决策支持系统

胡昌伟¹ 苑希民¹ 陈革强² 程晓陶¹ 谢放³

(1. 中国水利水电科学研究院 北京 100038 ; 2. 浙江省水文局 浙江 杭州 310009 ;
3. 浙江省水利水电勘测设计院 浙江 杭州 310002)

摘要 :东苕溪流域上游源短流急 ,建有多座水库 ,中游有若干常备与非常蓄滞洪区 ,防洪问题相当复杂。建立基于流域模型模拟计算的决策支持系统 ,提出一种多模型协同计算的新方法 ,开发了连接上游水文模型和下游河道一维模型及蓄滞洪区零维、二维模型的组建式流域模型 ,对流域洪水演进及调度方案进行模拟仿真。东苕溪防洪决策支持系统采用 B/S 与 C/S 相结合的体系结构 ,综合运用 GIS、分布式数据库、三维可视化等技术建立了信息服务平台 ,在此基础上纳入模型库与方案库 ,实现了数据接收入库、模拟计算、方案生成与展示、存储管理、方案比较的无缝对接。

关键词 防洪决策 实时优化 流域模型 防汛调度 东苕溪

中图分类号 :P333.2 文献标识码 :B 文章编号 :1006-764X(2008)S1-0137-04

苕溪流域位于浙江省杭嘉湖平原西部 ,为浙江省八大水系之一 ,流域面积为 2 265.1 km² ,山丘占 88% ,平原占 12%。其中 ,东苕溪主流长 151.4 km ,河宽 100 ~ 600 m ,流量 100 ~ 1 000 m³/s^[1-2] ,上游属山溪性河流 ,源短流急 ,洪水期间流速一般可达 3 ~ 4 m/s^[1]。中下游河道渐趋平缓 ,余杭至湖州河段河道比降约为 1/20 000 ,当上游若干支流洪水下泄时 ,中下游河道排泄不畅造成山区向平原过渡带水位迅速抬高^[3]。为了保障杭州市与杭嘉湖平原的防洪安全 ,东苕溪干流上游建有多座水库 ,中游设有若干常备与非常蓄滞洪区。如何通过优化调度发挥已有防洪工程体系的最大效益是目前亟待解决的问题^[4-7]。东苕溪防洪问题相当复杂 ,仅靠经验难以进行决策 ,需要通过技术手段予以辅助^[8]。

1 系统结构与流程

在东苕溪防洪决策支持系统研发中 ,通过创建多模型协同计算方法连接上游水文模型和下游河道一维模型及蓄滞洪区零维、二维模型 ,从而形成组建式流域模型 ,能够对流域的洪水演进及调度方案进行模拟仿真 ,并对计算结果进行分析比较。系统采用 B/S 与 C/S 相结合的体系结构 ,综合运用 GIS、分布式数据库、三维可视化等技术建立信息服务平台 ,在此基础上纳入模型库与方案库 ,实现数据接收入

库、模拟计算、方案生成、方案展示、存储管理、方案比较的无缝对接。系统不仅具备较强的计算模拟能力 ,使用户能清楚地把握调度措施的影响和差异 ,而且具有良好的灵活性、可扩展性与易用性 ,可为防洪决策提供有力的技术支持。

系统包括防汛信息服务、洪水预报与调度仿真、调度方案展示、调度方案优化、防汛会商与值班管理、防汛调度信息专用数据库等子系统(图 1) ,各子系统的功能如下 :

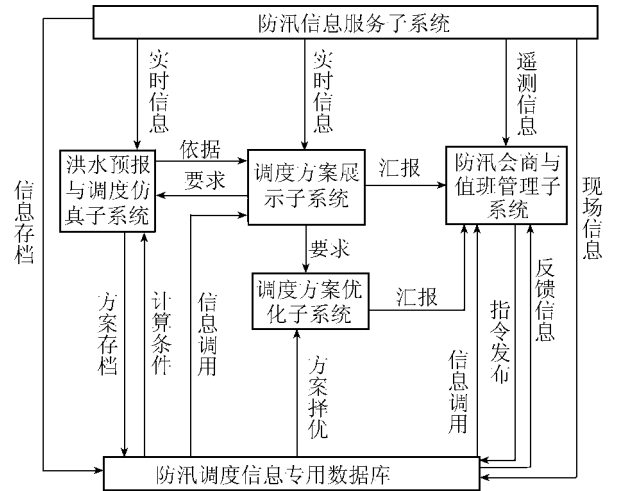


图 1 系统流程示意图

a. 防汛信息服务子系统。该子系统为防汛值班业务人员提供各种防汛基础信息的接收、分析、处

理、数据库存储等基本功能。

b. 洪水预报与调度仿真子系统。该子系统为防汛专业技术人员提供洪水实时预报与调度方案的仿真模型。其功能包括：①仿真模型计算初始条件与边界条件的前处理；②模型运行的控制；③模型运行的动态图像显示；④模型运行中分洪区调度的控制；⑤利用实测信息修正模型计算的边界条件和初始条件；⑥模型计算结果的分析与后处理，包括特征值的提取、图形显示与存档管理等。

c. 调度方案优化子系统。该子系统为防汛专家与技术人员调整调度方案提供各种必备的分析工具软件和快速修改的平台。主要是以防汛人员习惯的方式展现实时水雨情信息和计算结果，用户能够快速切换多个方案，并在其基础上调整水库控制和蓄洪区运用，在试算中快速逼近较优方案集。

d. 调度方案展示子系统。该子系统为防汛专家与技术人员进行方案管理提供依据，可以用二维或三维的方式展示已有的方案。

e. 防汛会商与值班管理子系统。该子系统可以把各部门的会商材料分门别类地汇总起来，便于管理、调用和展示。

f. 防汛调度信息专用数据库。该数据库是为东苕溪防洪决策支持系统服务的专用数据库，管理的对象包括各种调度预案、雨情、水情、工情、险情、灾情、防洪实时调度过程信息、典型历史水灾与调度案例等。

2 洪水模拟仿真

系统的计算域从上游青山水库到下游德清大闸，包括 2 条支流，即中苕溪和北苕溪。中游的 7 个蓄滞洪区分别是南湖、北湖、上南湖、潘阪、张堰、澄清和永建。计算域的水系概化图如图 2 所示。

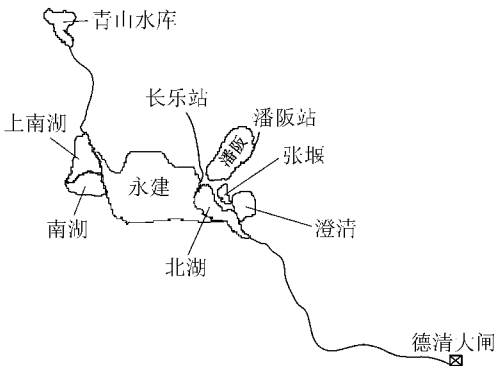


图 2 水系概化图

系统采用流域模型进行模拟演算。上边界采用青山水库现有的成熟调度规则，根据浙江省水文局的预报给出其泄流过程。长乐和潘阪站流量通过水文模型计算给出，下边界采用水位或者水位~流量

关系。

流域洪水由河道模型和蓄滞洪区模型联合计算模拟，这 2 个模型都经过了长期的运用实践，比较成熟。

2.1 河道模型

河道模型为普林斯曼四点隐式差分格式，基于如下的基本方程：

$$\frac{\partial A_0}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A_0} \right) + g A_0 \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right) + g A_0 S_f - u_0 q_0 = 0 \tag{2}$$

河道模型的离散方法可以由式(3)~(5)表示：

$$f = \alpha [\phi f_{i+1}^{n+1} + (1 - \phi) f_i^{n+1}] + (1 - \phi) [\theta f_{i+1}^n + (1 - \theta) f_i^n] \tag{3}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} [\alpha (f_{i+1}^{n+1} - f_i^{n+1}) + (1 - \theta) (f_{i+1}^n - f_i^n)] \tag{4}$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} [\alpha (f_{i+1}^{n+1} - f_{i+1}^n) + (1 - \phi) (f_i^{n+1} - f_i^n)] \tag{5}$$

式中： A_0 为河道过水面积； Q 为流量； q_0 为河道的侧向来流量； t 为时间； x 为沿水流方向的水平坐标； α 为动量修正系数； z 为水位； g 为重力加速度； S_f 为摩阻坡降； u_0 为侧向来流在河道方向的流速； f 为任意函数； θ 为时间加权因子， $0 \leq \theta \leq 1$ ； ϕ 为空间加权因子， $0 \leq \phi \leq 1$ ；上标 n 为时段； Δx 为断面间距； i 为断面号； Δt 为时间步长。

认为模型中同一个节点连接的河道首尾断面的水位是相等的（都等于节点水位），河道交叉处都比较小，容水量不大，可以认为各节点的进出流量平衡。因此，对于节点 m 在时间步长 $n + 1$ 时的节点连续方程可以写为

$$Q_m^{n+1} + \sum_{j=1}^{I(m)} Q_{m,j}^{n+1} = 0 \quad m = 1, 2, \dots, M_0 \tag{6}$$

式中 $I(m)$ 为连接到节点 m 的河段数； M_0 为节点总数。

模型里将漫堤交换的水量看作一维模型的旁侧流，其值为负。流出的水量采用侧堰公式计算：

$$Q = cb \sqrt{2g} H_0^{3/2} \tag{7}$$

$$b = \frac{B}{C} \left[F \left(\frac{h_2}{E_{s2}} \frac{P}{E_{s2}} \right) - F \left(\frac{h_1}{E_{s1}} \frac{P}{E_{s1}} \right) \right] \tag{8}$$

$$F \left(\frac{h}{E_s} \frac{P}{E_s} \right) = \frac{2E_s - 3P}{E_s - P} \sqrt{\frac{E_s - h}{h - P}} - 3 \arctan \sqrt{\frac{E_s - h}{h - P}} \tag{9}$$

式中： c 为侧堰系数； H_0 为侧堰两端堰顶水头的平均值； B 为河渠宽度； E_s 为断面单位能量； C 为流量

系数,可取正堰流量系数乘以 0.95 ; h 为堰上水位 ; P 为堰高。

2.2 蓄滞洪区模型

蓄滞洪区模型基于如下方程 :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \tag{10}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\alpha (uM)}{\partial x} + \frac{\alpha (vM)}{\partial y} + gH \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{\frac{1}{3}}} = 0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\alpha (uN)}{\partial x} + \frac{\alpha (vN)}{\partial y} + gH \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{\frac{1}{3}}} = 0 \tag{12}$$

式中 : H 为水深 ; M, N 分别为 x, y 方向的垂向平均单宽流量 ; q 为源汇项 ; u, v 分别为垂向平均流速在 x, y 方向的分量 ; g 为重力加速度 ; z 为水位 ; n 为曼宁糙率系数。

蓄滞洪区的洪水计算模型采用无结构不规则网格,可以较好地适应地形变化,能够考虑河道、河堤、闸、泵、地表不透水面积的影响,并可计算降雨的过程。为了达到既简化计算方法、提高模型运算速度,又保证基本控制方程的守恒性、稳定性和较高的计算精度,此模型在基本状态变量的离散化布置方式上,借鉴了体积积分形式的显式有限差分法的优点,在网格的形心计算水深,在网格周边的通道上计算垂向平均单宽流量^[9]。将式(10)网格积分可以得到

$$A \frac{\partial H}{\partial t} + \oint_l Q dl = Aq \tag{13}$$

离散形式为

$$H_i^{T+2D_T} = H_i^T + \frac{2D_T}{A_i} \sum_{k=1}^K Q_{ik}^{T+D_T} + 2D_T q^{T+D_T} \tag{14}$$

式中 : A 为网格面积 ; l 为通道长度 ; Q_k 为各边平均单宽流速的垂向分量 ; D_T 为时间步长 ; k 为通道编号 ; K 为通道总数。

2.3 多模型协同计算

流域模型需要对河道和蓄滞洪区进行耦合的同步模拟计算,但上述 2 个模型是不同团队在不同开发时间和不同语言环境下研制的 2 个独立程序,因此首要面临的问题就是如何将它们联合起来进行协同计算。传统的方法是把其中一个程序拆散为子函数,然后移植到另一个程序中,通过调用子函数来实现联合的目标。这种移植方法是相当繁琐而且耗时的,并且较难保证修改后模型的正确性。笔者提出了一种多模型协同计算的新方法,在有无源代码的情况下都能够使用,方法的核心原理类似于现在的

COM 编程标准,也就是尽量使用原有模型并尽可能少做修改。该方法的优点是 :①降低了复杂度并极大地减少了工作量 ;②即使模型使用不同语言编制也无需将模型翻译到统一语言 ;③不关心模型的内部细节 ;④在没有源代码的情况下仍然能够实施 ;⑤更多数量模型的协同也类似,可以按需要对不同蓄滞洪区采用不同的模型。

对于没有掌握源程序的可执行程序级别连接,需要解决控制代码注入、进程挂起/恢复、控制变量地址搜索、内存监控、Windows 异常处理函数定制挂接、等待与同步等关键技术,其流程如图 3 所示。

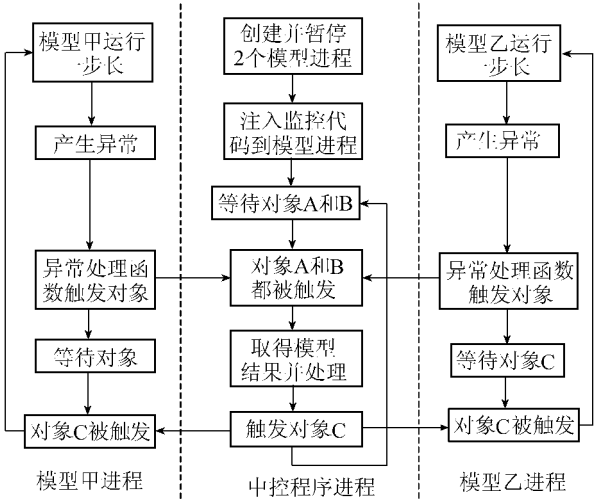


图 3 流程机理

3 方案展示与优化

洪水模拟模型的仿真计算结果大都是以内部方式存储的文本数据,包含了全部的结果信息,而这其中很大一部分是防汛调度所不关心的,并且一般调度人员也难以直接读懂这些文本数据。系统需要对存入数据库的仿真计算结果进行提取和处理,将防汛调度关心的数据以曲线图和数据表格的形式展现,并在三维平台上加以全方位的表现,用户能像操作一般三维场景一样进行旋转、缩放、平移等操作。蓄滞洪区的调度运用则以程序化的描述字符串表达蓄滞洪区的名称、开启时间、分洪水量、关闭时间等信息,洪水的演进以实时演算三维动画形式表现。在调度方案展示的基础上,系统进一步对方案进行优化,通过数据的无缝对接达到调度方案的快速试算逼近,并可在模拟过程中通过动态交互调整控制阈值和程式化搜索达到一定的优化目标。方案优化与展示界面见图 4。

4 模型校验

系统模拟流域内 3 d 的洪水演进情况所需的时

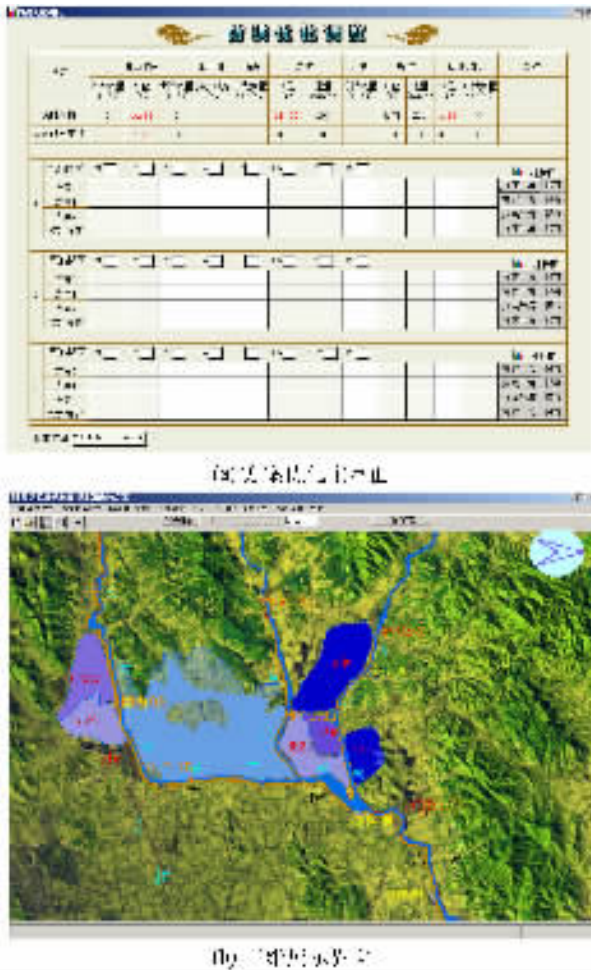


图4 方案优化与展示界面

间大约为 1.5 min(在普通奔腾四 PC 上)。系统的预见期约为上游汇流时间加上水库下游河道演进传播至中游的时间,基本在 20 h 左右。

模型用 1999 年洪水的实测数据进行校验,将余杭站和瓶窑站的计算值与实测值进行比较,其结果如图 5 所示。从图 5 可以看到,由于缺乏实时初始条件,模拟过程与实测时间序列最大误差(约 0.5 m)出现在模型启动计算阶段,此后的误差比较小,不大于 0.2 m,系统的计算结果对于决策者具有一定的参考价值。

5 结 语

东苕溪防洪决策支持系统采用先进的系统设计理念,应用前沿的信息技术,并研发了一、二维水动力学耦合计算模型和洪水实时预报模型,通过模型系统的有机结合与模块之间的综合集成,实现了东苕溪防汛决策的信息服务、预警控制、预测预报、方案模拟计算、洪水优化调度、调度方案三维展示、防汛会商管理等功能。系统使用 ARCGIS 平台建立东苕溪流域三维场景,在此基础上完成洪水仿真方案

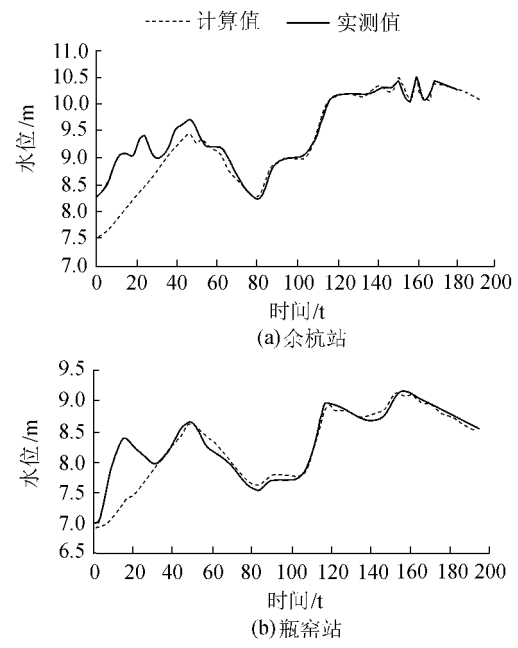


图5 余杭站与瓶窑站计算值与实测值比较的三维实时演算展示。系统的接口、界面、分布式设计以及会商与值班系统都较大地提升了系统的实用性和扩展性。

同时,该系统集东苕河流域上游洪水预报、水库调度、河道洪水演进、蓄滞洪区和非常蓄滞洪区运用于一体,实现了东苕河流域德清大闸以上洪水的总体控制与统一调度,是建设流域防洪减灾模型体系之示范,具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 浙江省水利水电勘测设计院. 苕流域综合规划报告[R]. 杭州: 浙江省水利水电勘测设计院, 1999.
- [2] 林伟波. 基于 B/S 与 C/S 相结合的闸门自动调度系统[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(2): 59-61.
- [3] 于雅萍. 潘家口水库水情和雨情收发报系统设计[J]. 水利水电科技进展, 1999, 19(4): 67-68.
- [4] 丁志雄. 基于组件技术的防洪决策支持系统开发[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(3): 19-21.
- [5] 陶涛, 朱廷举, 纪昌明. 洪灾风险管理决策支持系统的总体设计与构思[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(1): 6-8.
- [6] 黄振平, 朱元生. 降水预测在防洪决策风险分析中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(3): 7-10.
- [7] 刘文俊. 东苕河流域水管理计算机系统设计及实现[J]. 水利水电科技进展, 1999, 19(4): 64-66.
- [8] 胡四一. 防洪决策支持系统的开发和应用[J]. 水利水电科技进展, 1997, 17(6): 2-7.
- [9] 程晓陶. 黄河滩区洪涝分析及对策研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1999.

(收稿日期 2008-01-04 编辑 骆超)