

三峡区间入库洪水实时预报系统研究

王船海, 郭丽君, 芮孝芳, 孔凡哲

(河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 三峡区间的数字流域水系模型采用基于格网型的数字高程模型坡面流模拟方法和处理“洼地”的最短流程法构建, 并以新安江模型为基础建立具有诸多特点的三峡区间流域水文模型; 以水动力学理论为基础建立考虑水利工程影响的河川型水库洪水演进模型, 并实现这两者的有机耦合。在 GIS 平台上, 将三峡区间流域水文模型、库区洪水演进模型和流域水系生成模型在底层集成, 研制了功能先进和完善的三峡水库实时洪水预报系统。该系统已安装在三峡总公司梯级水库调度中心, 投入试运行。

关键词: 三峡; 入库水量; 洪水演算模型; 地理信息系统; 实时洪水预报

中图分类号: P338.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2003)06-677-05

长江三峡工程于 2003 年开始蓄水, 同时第一台机组开始发电。随着水库蓄水位的逐步抬高, 三峡大坝以上水域将逐步变深、变宽, 回水末端不断上溯, 淹没面积不断扩大。被淹没的面积将由原来的陆地变成水面, 库区将由原来的河道变成河川型水库。这些情况的改变, 必将影响到三峡区间面积的产汇流规律和库区的洪水运动规律。本文采用数字高程模型与新安江模型相结合的方法建立三峡区间流域水文模型, 采用水动力学方法建立三峡库区洪水演进模型, 在地理信息系统(GIS)支撑下, 集成为三峡水库实时洪水预报系统。

1 流域水系生成模型(WDN GM)

构建流域洪水预报模型时, 要求确定子流域面积、子河段汇流长度及雨量站权重等前处理工作, 往往占用大量时间, 且手工计算精度不高, 当雨量站数量、位置发生变化, 要求雨量站及其权重作相应的调整时, 更是如此。此外, 目前常用的按雨量站权重划分单元流域的方法, 也存在明显的不合理之处。

采用 O' Callaghan 和 Mark^[1]提出的基于格网型 DEM 的坡面流模拟方法, 建立了三峡区间数字流域水系模型^[2], 具体步骤如下:

(1) 网格型数据的获取 利用 GIS 软件将地面高程信息数字化, 并将其转化为规则格网型 DEM 数据。

(2) 网格点方向阵的生成 计算网格点高程与其相邻 8 个网格点的高程坡度, 根据最大坡度原则, 确定当前网格点的流向, 并以 1, 2, 3, ..., 8 予以标注(图 1)。在计算坡度时应考虑网格单元长宽尺寸的不同。

由于在实际地形中存在洼地, DEM 的网格精度与高程精度也有限制, 总会有一些网格点与其四周的高程相平或比其低, 从而无法标注出网格点流向, 这就是所谓的“洼地”问题。对洼地的处理, 一直是流域水系生成模型中的难题。现有的处理方法主要是填洼法^[2]、平滑处理法^[1]和根据实际水系修正网格点高程^[3]等方法, 这些方法由于要对地形数据进行修改或需要其它附加信息, 仍会产生一些不合理的方向阵。采用最短流程法解决确定洼地单元的流向问题。

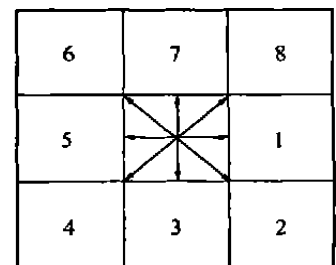


图 1 网格点流向阵信息图
Fig. 1 Flow direction in a grid

收稿日期: 2002-10-08; 修订日期: 2002-11-30

作者简介: 王船海(1963-), 男, 江苏海安人, 河海大学副教授, 主要从事计算水力学、水文水资源及地理信息系统等研究。E-mail: wmengyin@publicl.ptt.js.cn

(3) 最短流程法的基本思路 洼地处理的关键是如何确定洼地单元的流向。在处理洼地单元的流向时,以洼地单元到流域出口单元的流程最短或流出时间最小为原则,该原则物理意义明确,且与正常单元流向生成的原则(最大坡度原则)的物理概念相一致。该思路无需其它附加信息,所生成的洼地流向合理。有关最短流程法的详细方法将另文介绍。

(4) 网格点上的累积阵的生成 累积阵反映了从网格点上流出的汇流面积。计算汇流面积时,应考虑经纬度的不同和网格单元面积的不同,在计算区域较大时,可以提高计算精度。

(5) 流域水系生成 利用上述生成的网格点方向阵与累积矩阵,并给定流域最小面积阈值,可生成各子流域分水线、流域水系及水系之间的拓扑结构,作为构造流域水文模型的基础。

开发的可视化流域水系生成系统能自动生成子流域水系,进行河流分级,子区域的分解与合并以及根据水文站位置划分子流域等。与GIS相结合还可自动生成雨量站的泰森(Thiessen)多边形,自动计算各雨量站的权重,并能自动生成流域水文模型的拓扑结构,给出每个子流域的河道长度、河道平均坡度、坡面平均流程长、坡面平均坡度和平均地面高程等信息。

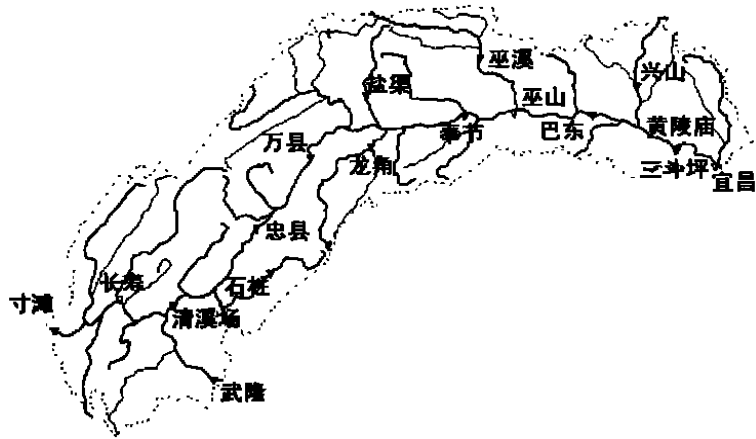


图2 流域水系模型生成的三峡区间水系图

Fig. 2 Drainage network in the Three Gorges watershed generated by the WDNGM

三峡区间数字流域水系的生成,采用了1/25万的地理信息数据(国家测绘局制作)。利用可视化流域水系生成系统,分析了不同网格精度对生成的数字流域水系的影响。通过比较网格间隔为6与9所生成的三峡区间数字流域水系发现,6的成果与实际较为吻合。图2为生成的三峡区间水系图,它与实际水系的形状基本一致。生成的流域面积一般是有误差的,其误差的大小与DEM数据源精度有关。例如,当采用6网格间隔时,由1/25万的地理信息数据生成的三峡区间流域面积为55103 km²,比实际面积偏大4.5%。在建立三峡区间流域水文模型时还应对由流域水系生成系统所生成的子流域的面积进行校正。

2 流域水文模型

新安江模型^[4]是概念性流域水文模型,它适用于湿润地区以蓄满产流为主的流域。在我国广大湿润地区普遍使用,精度较高。三峡区间,气候温和湿润,植被良好,表土疏松浅薄,透水性较强。岩石多为砂岩、灰岩和页岩,喀斯特发育程度一般,具有使用新安江模型的自然条件。三峡区间流域水文模型以该模型为基础,结合所开发的流域水系生成系统建成。其主要特点如下:

(1) 自动按照天然分水线划分子流(区)域,并自动按照要求生成具有完整拓扑结构的流域水文模型;较好地解决了传统上采用按雨量站划分单元面积带来的缺陷,所建立的三峡区间流域水文模型的拓扑结构与参数不因雨量站位置和数目而发生改变。图3为利用流域水系模型系统所生成的三峡区间子流域分布图。

(2) 利用流域水系生成模型,可获得每个子流域的面积、河道长度、河道平均坡度、坡面平均流程长度及坡面平均坡度等地形地貌特征参数。为无资料地区模型参数的移植提供依据,并为进一步研究建立分布式流域水文模型打下基础。

(3) 利用可视化的流域水系生成系统,根据雨量站的地理位置自动确定其在子流域面雨量计算中的权重。

(4) 借助流域水系生成模型,将集中式分段马斯京根(Muskingum)法计算模式,改进为更合理的沿程分布

式分段马斯京根法计算模式。

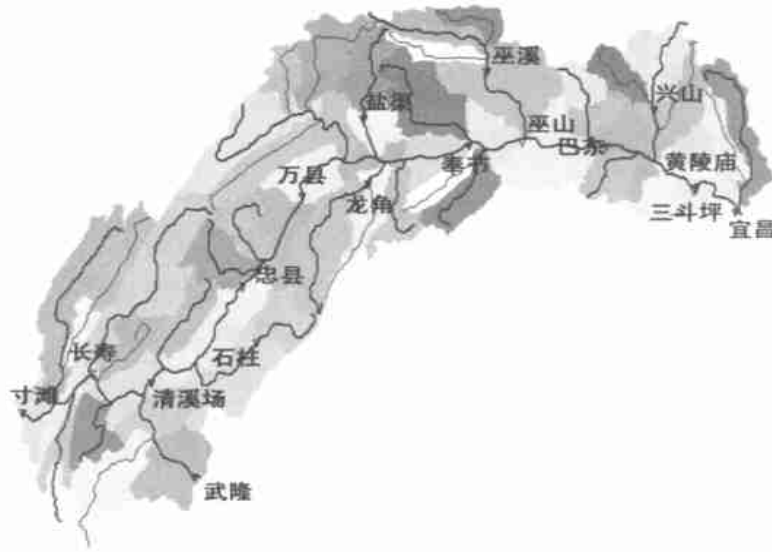


图3 三峡区间子流域分布

Fig. 3 Sub-watershed in the Three Gorges watershed generated by the WDNM

3 洪水演进模型

建成后的三峡水库是一典型的河川型水库，洪水演进计算若采用马斯京根法，则精度不能满足要求；水库调洪演算若采用静库容调洪演算法则无法满足防洪预报调度要求。需要采用水动力学方法建立三峡库区的洪水演进模型，以考虑动库容对库区调洪演算的影响和水库蓄水过程中模型参数的变化问题。

3.1 模型的建立

三峡库区河网由寸滩至三峡坝址的长江干流及沿程汇入的支流组成。拟采用数值求解圣维南方程组的方法建立三峡库区洪水演进模型。具体的求解方法见文献[5]。

3.2 边界条件处理

在模拟计算条件下，边界条件一般为寸滩、武隆流量过程和区间实测流量过程或流域水文模型计算出的流量过程，坝址处则采用坝前水位作为边界条件。这样在模拟计算过程中可以计算出库区的水面线及出库流量随时间变化过程，借助于计算结果与实测资料的拟合来率定模型参数。

在实时洪水计算过程中，原则上也可以采用上述模拟计算时的边界条件，这样的处理效果并不太好，主要是没有充分利用已有的实测水位来对模型当前预测状态量进行校正。本模型在实时洪水计算时，引进动态边界条件的概念进行处理。在预报时间以前，寸滩、武隆及坝址处的水位已经发生，它们由自动水情测报系统获得。此时的边界条件为寸滩、武隆及坝址处的实测水位或流量过程和流域水文模型计算出的入流过程；在预报时间以后的预测调度计算中，边界条件为寸滩、武隆预报流量过程和区间流域水文模型计算出的流量过程，坝址处则采用调度决策的放水过程或调度要求控制的坝上水位过程。

实时洪水预报时，边界条件均采用预报数据，由于预报数据存在误差，必须对误差进行实时校正，否则误差会积累起来，使预报结果的误差越来越大。通过实时校正，使得当前预报与决策时刻所模拟的流域内水情工情与实际情况吻合，以期提高预报决策的精度。

(1) 实时水情校正 主要是校正流域内的实测水位站的水位，使得计算水位与实际水位吻合。此时分两种情况处理：一是水位测点在计算区域的边界处，此时利用该实测水位作为边界条件，以达到实时校正的目的。

预报时该边界采用预报流量作为边界条件。二是水位测点位于计算区域的内部，此时可以调整该测点附近的流域水文模型计算的入流过程，以反映河道水流的顶托影响，达到实时校正的目的。

(2) 实时工情校正 主要校正流域内过水建筑物的实际过流过程，如：利用三峡水库及库区内其它水利枢纽的实际放水过程重新进行模拟计算，使得在预报调度时刻模拟的流域内工情与实际情况吻合。

4 洪水演进模型与流域水文模型的耦合

三峡区间入库洪水预报模型中，区间流域水文模型与库区河道洪水演进模型相互耦合。三峡库区的河道洪水演进模型计算的范围主要为长江干流寸滩至宜昌和乌江武隆至入江口河段。洪水演进计算时，在寸滩、宜昌或三峡坝址、武隆和区间的一些支流均要提供作为边界条件的流量或水位过程。由于寸滩与武隆两处受三峡水库建库后的回水影响较小，因此它们的预报入流过程可直接作为流量边界条件。对于区间流域水文模型所预报的流量过程，则应分以下两种情况作为边界条件加入到洪水演进模型：

(1) 集中入流处理模式 主要处理区间较大支流流入到库区河道的流量过程，其入流点是在该支流与长江交汇的河口段。河道洪水演进模型在概化时要在该处设置节点，以便预报的入流过程在该节点集中加入。

(2) 沿程旁侧入流处理模式 长江干流与乌江两岸除上述较大支流外的沿程产流区域，入流过程可视为沿程分布式加入到长江干流或乌江中，在这些子流域的入流过程加入到河道洪水演进模型时，需将子流域中相应最小产汇流单元计算的坡面汇流过程直接加入，无需经过水文模型中的分段马斯京根法计算后再加入，否则河道汇流就会重复计算。

三峡水库建成后由于水库水位抬高对区间流域水文模型参数的影响，主要表现在如下两个方面：一是由于库水位的抬高，使得汇入长江干流的区间支流洪水从原来基本上不受长江干流洪水顶托而变为受长江干流洪水顶托，处理顶托影响的方法见文献[5]。二是由于三峡水库库水位的抬高，库区水面面积相应增加，直接产流面积也相应增加，采取洪水演进模型与库区的水文模型耦合的方法解决，在水文模型计算时，可以实时动态地从动力学模型中自动获取每一个最小产汇流单元中的直接产流面积，较好地解决了由于三峡水库库水位的抬高直接产流面积相应增加的问题。

5 三峡水库实时洪水预报系统

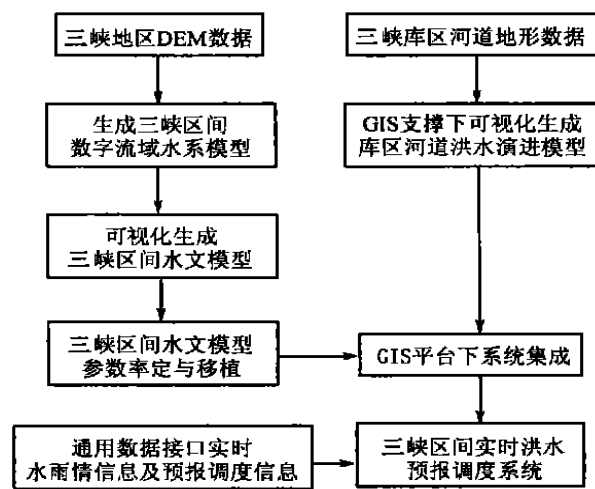


图4 系统流程图
Fig. 4 Flow chart of the study system

三峡库区实时洪水预报系统以三峡区间流域水文模型、库区河道洪水演进模型及流域水系生成模型为核心，结合GIS技术、数据库技术及其它最新的信息处理技术开发而成。该系统目前已安装在三峡总公司梯级水库调度中心，投入试运行。

在GIS平台支撑下，将三峡区间流域水文模型、库区洪水演进模型及流域水系生成模型在系统底层进行一体化集成，实现了集实时水情、雨情信息、洪水预报调度、防洪分析决策于一体的综合平台(图4)。该系统的主要特点与功能为：

- (1) 采用最新的软件集成技术，支持客户/服务(C/S)结构的网络运行模式。
- (2) 可同时采用多种手段(自动、半自动及人工)获取系统运行所需的多种信息源(实时水情、雨情信息、工情信息、降雨预报信息、洪水预报调度等信息)。这些外部接口的支持

可以根据外部环境, 随时进行定制修改。

(3) 在 GIS 平台支撑下, 可以动态显示实时水情、雨情、工情等信息, 在电子地图上查询任何时段的实测与预报水情信息, 并在线定制查询分析界面。

(4) 在防洪预报调度计算过程中可在线可视化动态显示预报调度成果, 为实时调度决策提供良好的支持。

(5) 系统将 GIS、三峡区间流域水文模型、库区洪水演进模型及流域水系生成模型在底层实现源代码级的集成, 使得区间流域水文模型、库区洪水演进模型的建立以及它们的集成等均实现了可视化与自动化。

(6) 目前所建系统采用三峡水库蓄水前的资料, 精度还需进一步提高, 模型参数还需做必要的调整, 这就要求系统有着很强的适应性。系统提供了强大的二次开发能力。

参考文献:

- [1] O'Callaghan F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 1984, 28:323 - 344.
- [2] Martz W, Garbrecht J. Numerical definition of drainage network and subcatchment areas from digital elevation models[J]. *Computers and Geosciences*, 1992, 18(6):747 - 761.
- [3] 李本纲, 陶澍. 用数字高程模型进行地表径流模拟中的几个问题[J]. *水土保持通报*, 2000, 20(3):47 - 49.
- [4] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京:水利电力出版社, 1984.106 - 130.
- [5] 王船海, 李光焱. 流域洪水模拟[J]. *水利学报*, 1996(3):44 - 50.

Study on real-time flood forecasting system for the Three Gorges Reservoir

WANG Chuan-hai, GUO Li-jun, RUI Xiao-fang, KONG Fan-zhe

(*College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: A watershed drainage network generation model (WDRGM) is developed in the Three Gorges watershed on the basis of the hillslope flow modeling approach and the shortest flow course method for 'filling sink', using the digital elevation model (DEM). The Xinanjiang model is improved for development of a watershed hydrological model characterizing the Three Gorges watershed. Based on the hydraulic dynamic theory, a flood routing model of the river channel pattern reservoir in the Three Gorges, considering the water project operation influences, is established and fully coupled with the watershed hydrologic model. On the GIS platform, a real-time flood forecasting system is developed by integrating the watershed hydrological model, the flood routing model and the WDRGM in the Three Gorges watershed, which its functions are advanced and complete. This system has been installed and test operated by the reservoir control center of Three Gorges Company.

Key words: Three Gorges; reservoir inflow; flood routing model; GIS; real-time flood forecasting