

哈尔滨市城市内涝监测预警系统建设^{*}

景学义¹, 刘宇飞¹, 王永波¹, 沈彦燕², 张少锋¹, 陶国辉¹

(1. 哈尔滨市气象台, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001)

摘要: 简要介绍了哈尔滨市城市内涝监测预警系统的主要组成部分、核心技术及理论基础、重要应用价值及意义, 并通过在一次强降水实例中的检验, 证明该系统具有较高的精确度。在系统核心环节——积水仿真模型的建立中, 该项目突破了传统规则网格的划分法, 而是根据城市地形地貌特点独创了无结构不规则网格技术。此外, 仿真模型中对排水工程设施进行了数字概化, 首次实现了地面积水与管道水体模拟之间的结合; 初步解决了哈尔滨特有的陆地泵排水模拟问题; 将监测雨量信息和数值天气预报信息带入仿真模型, 实现了气象学与水文学的结合。通过运行该系统, 可以提高对积水预报的准确度。

关键词: 暴雨内涝; 仿真计算; 模拟; 概化; 专题数据库; 哈尔滨

中图分类号: P333.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2009)01-0054-04

0 引言

哈尔滨市暴雨发生的突发性, 局地性比较强, 强降水过程极易引起城市积涝, 从而给城市交通等带来不利影响。建立哈尔滨市暴雨内涝监测预警系统, 能够实现城市积涝的动态监测和预报, 增强了气象服务的能力。

哈尔滨市暴雨内涝监测预警系统集成雨量监测采集(资料前处理)、积水仿真计算、结果显示为一体(结果后处理), 其核心部分是以二维不恒定流理论为基础建立的仿真模型。该模型以 FORTRAN 语言编写的程序为载体, 以气象信息和空间地理信息为初始条件, 以城市地表与明渠河道水流运动为模拟对象, 通过计算得出结论, 各种空间信息的处理均以 ArcView GIS 软件为平台。模型中首次实现了地面积水模拟与管道水体模拟之间的结合, 反映了降雨量分布、产汇流原理、地面流、河道明渠流、堰流、跌水、管网有压流、管道无压流、有压流到无压流过渡过程, 以及地面向管道中泄流或从管道向地面涌水现象等多种工程情况及其相互连接问题, 是一个复杂的微观流域模型。模型参数的调试采用了实时动态校正技术, 可应用于验证和预报计算。

1 资料的前期处理

1.1 气象信息的表述

模型中引用的气象信息有 T213 数值预报产品、雷达监测雨量信息、自动站监测雨量信息、值班员主观预报 4 项。

(1) T213 数值预报产品是由中国气象局开发的 T213 数值预报模式计算而生成的一系列气象预报产品。产品中包含多种气象要素的预报结果, 其中包括降水量要素。产品具有高精度度, 时间分辨率达到 3 h, 空间分辨率达到 $1^\circ \times 1^\circ$ (以经纬度坐标标注)。

(2) 雷达监测雨量信息是多普勒雷达根据探测到的雷达回波强度按照 Z-R 关系反演的降水强度并随时间积分得到的累积降水量。目前哈尔滨的雷达可以提供估算的 1 h 累积降雨量, 采样间隔为 6 min。我们将 1 h 累积降水资料转换为以经纬度为坐标, 并对该资料进行时间处理, 得到 6 min 的累积降水资料。

(3) 自动雨量站监测的降水信息是由分布在城市不同地区的自动雨量站监测的实况降雨资料, 在本系统中这类资料的采样间隔是 60 min。

(4) 主观预报的降水信息是由预报员在每天值班过程中发布的降水预报信息。对于模式运行则

* 收稿日期: 2008-06-26

基金项目: 哈尔滨市科技攻关项目(2006AA9cs180)

作者简介: 景学义(1965-), 男, 黑龙江哈尔滨市人, 高级工程师, 主要从事气象预报工作. E-mail: gw3721@sohu.com

需要细化为间隔 3 h 的降水预报资料。

以上各类降水资料统称为自然降水信息。模型中对这类信息用网格面雨量表征。

1.2 空间地理信息和工程信息(排水系统)的表述

城市积水情况除了自然降水量有直接关系外,还与城市中建筑物分布、地形地势分布、河流分布、排水设施布置等许多因素有关,因此模型必须考虑这些因素的影响。首先要按照模型计算的需要,在 ArcView GIS 平台上对以上所有空间信息进行概化,即将这些客观的事物抽象成一系列数据库——以数字化的形式表现它们的特征(以下称为属性)。

(1) 对城市地形地物的概化

城市地形复杂,河流、街区、公园等下垫面的类型和面积不同,各种建筑物、工程设施的分布以及对暴雨产生的径流影响又很大。为了更好地反应真实情况,仿真模型根据地形、地物特点,充分考虑积水区分布,依据下垫面属性尽可能相同的原则,采用了无结构不规则网格^[1,2,3]作为计算单元,将网格设计为三边形、四边形、五边形三种,网格各边定义成通道。仿真模型在网格中心处计算水位 H (即积水深度),在通道上计算流量。每个节点都有经纬度坐标,通过节点可以得知网格、通道所在位置。网格、通道节点构成仿真模型的基本属性数据专题。

(2) 对城市排水系统设施的概化

排水系统包括排水管网、泵、闸等,它们对城市暴雨内涝现象有很大的影响。城市排水管网纵横复杂,如果完整地模拟实际的复杂管网水流的运动,则模型信息量和计算量巨大,仿真模型计算速度也会减慢。因此,实际的排水管网,必须针对具体划分的网格单元进行合理的概化,以减少模型的计算难度,同时,可以使排水管网水流的计算和地面网格单元的计算结合起来同步进行^[4]。将网格单元分为含管网和不含管网两种。对于含管网的网格单元,将所包含的排水管道均概化为经过网格形心,因此周边的通道与相邻的含管道的网格单元相连。

在排水系统中,泵站、闸门和淹没出流管道都起着重要的排水作用。为此我们设含有排水泵站、闸门、临时泵站、淹没出流管道的网格(与一、二级河道或区域边界相联)为管网排水出口,并给出概化的排水能力。

(3) 概化结果

所有网格的划分以及各类专题数据库的加工

都在 ArcView GIS 软件平台上进行。在本系统中,受水文方面资料的限制,只对道里、道外、南岗、平房、香坊 5 个区以及松北区的太阳岛进行了模拟计算。全部计算区域共划分了不规则网格 2 326 个,形成计算通道 5 067 个,节点 2 741 个;哈尔滨市的泵站均为陆地泵,向一、二级河道抽排地面和管道内的积水,积水多时直接开闸门向河道泄流,泵和闸共存,向一级河道排水,共计 5 个;何家沟、马家沟、信义沟 3 条二级河道对市区内排水调蓄起到重要作用,因此将其概化为 3 条特殊通道。网格划分结果如图 1。

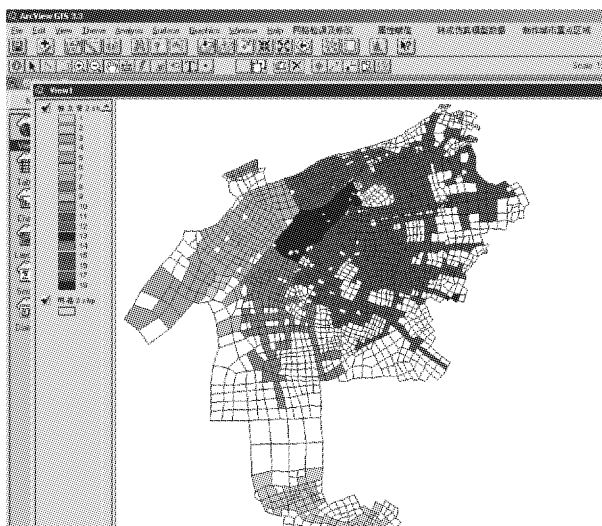


图 1 哈尔滨市城市积水模型

考虑到 ArcView GIS 的短处是对各种信息的加工处理能力较低,因此后续的计算环节采用计算能力较强的 FORTRAN 语言编程。本系统中设计了一系列程序来实现将专题数据库中的数据转换成 FORTRAN 语言能够识别的数据。

2 建立仿真计算模型

该模型的理论基础是平面二维非恒定流^[5]的基本方程。同时,针对小于离散网格尺度的排水渠涌或河道,在二维模型中结合采用了一维明渠非恒定流方程的算法。

(1) 二维非恒定流基本方程

$$\text{连续方程: } \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q; \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0; \quad (3)$$

式中: H 为水深; Z 为水位, $Z = Z_0 + H$, Z_0 为底高程; q 为源汇项, 包括有效降雨量和排水强度两项; M 、 N 分别为 x 、 y 方向上的单宽流量, 且 $M = Hu$, $N = Hv$; u 、 v 分别为流速在 x 、 y 方向上的分量; n 为糙率; g 为重力加速度。

(2) 一维非恒定流基本控制方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial l} = -gAS_f, \quad (4)$$

式中: Q 为截面流量; A 为计算断面的过水面积; S_f 为摩阻坡降, 由曼宁公式可得:

$$S_f = \frac{U^2 n^2}{R^{4/3}} = \frac{n^2 Q |Q|}{A^2 R^{4/3}}.$$

(3) 宽顶堰溢流公式

$$Q = m\sigma_s \sqrt{2g} H^{3/2}, \quad (5)$$

式中: Q_j 为堰顶单宽流量; m 为宽顶堰溢流系数; σ_s 为淹没系数; H_j 为堰顶上游水位。

根据以上基本方程, 采取面雨量差值^[6]、方程的离散^[7,8]等数学方法, 应用 FORTRAN 语言编写一系列程序, 形成该系统的核心部分——仿真计算模型。

3 模型调试和验证

暴雨造成的洪涝灾害严重程度, 通常可以用最大积水深度和积水历时来衡量。因此, 模型的调试的方法, 就是选择不同的暴雨个例作为降雨边界条件, 代入模型中进行计算, 将模型的计算结果和实测结果进行比较, 分析两者的绝对误差及误差分布特征。通过分析误差的分布特征及产生的原因, 修正数据, 改进计算方法, 使模型的计算值与实测值之间的误差不断减小^[9]。

本项目选择 2006 年 7 月 10 ~ 11 日的大 - 暴雨个例, 对模型进行调试。

2006 年 7 月 10 日夜间到 11 日白天哈尔滨市普降大雨, 局部降暴雨。当时哈尔滨市有 4 个雨量观测站有观测记录, 省气象台观测站从 05 时 ~ 13 时, 降雨量为 51.1 mm, 农科院观测站从 06 时 ~ 13 时, 降雨量为 13.9 mm, 中医学院观测站从 11 日 08 时 ~ 12 日 08 时, 降雨量为 16 mm, 平房观测站从 11 日 08 时 ~ 12 日 08 时, 降雨量为 24 mm。造成了严重的内涝灾害。市区低洼处最大

积水深度达到 1.0 m。

根据哈尔滨市排水公司提供的资料, 当市区出现内涝时, 按照操作要求, 增加机排能力, 排除积水。因此模型的初始条件为: 一级河道松花江的水位为 1.0 m; 二级河道的水位为 0.1 m; 管道内基本腾空; 所有排水泵站、闸门均开启。

由于没有积水历时的详细资料, 故只对最大积水深度进行调试。模拟计算结果和积水实况分布图略。结果显示模拟计算积水区的分布与实况相比总体上还是比较接近的。

4 积水深度的模拟误差产生的原因

(1) 城市降水空间分布不均 城市短历时暴雨往往在空间分布上存在较大变化。当日哈尔滨市运行正常的自动雨量站只有 4 个(现在已增加到了 11 个)且分布不均, 难以细致反映降雨的空间分布特征。

(2) 模型网格误差 模型网格大小的设计主要考虑市区街道、建筑物和地形分布。但考虑到模拟计算稳定性和计算时间的要求, 网格尺度不能过小。网格尺度大, 该区域的地形高程通常取地势的平均值, 而计算水深值不能反映出局部低洼点的实际积水深度。

(3) 排水管网参数化误差 城市排水管网是由支、干管网组成的非常复杂的树枝状系统, 管道间水体流动主要由管道坡度决定, 管道的间距主要由市区道路的分布决定, 因此管道的分布间距远远小于网格的尺度。由于仿真模型中每个网格都包含几条支管或几条支管与干管, 管道参数就成为概化值, 从而影响计算的精度。

(4) 积水观测误差 实测积水时人们往往在最深测量水深, 这种局部积水深度, 往往不能代表整个网格的积水深度。

5 结论

建立了哈尔滨市城市积涝预警系统, 并对哈尔滨市 2006 年 7 月 10 ~ 11 日大到暴雨过程引起的城市积涝进行了验证。验证结果表明: 城市暴雨内涝仿真模拟系统的模拟结果是可靠、可信的, 说明该系统具有良好的适用性和精确度。该系统还有待在今后的实际应用中不断调试完善, 相信会取得更好的效果。

参考文献:

- [1] 韩素芹, 夏祥鳌, 黎贞发, 等. 天津市城区暴雨涝动态仿真模拟系统[J]. 灾害学, 2001, 16(1): 18-22.
- [2] 陈志远, 赵思键, 陈建文. 基于 GIS 的汕头市水灾信息系统[J]. 灾害学, 2003, 18(1): 77-81.
- [3] 谭维炎. 计算浅水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [4] 仇劲卫, 李娜, 程晓陶, 夏祥鳌, 等. 天津市城区暴雨涝仿真模拟系统[J]. 水利学报, 2000, 6(11): 34-42.
- [5] 汪德罐. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989.
- [6] 吴江航, 韩庆书. 计算流体力学理论方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 138-157.
- [7] 景思睿, 张鸣远. 流体力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [8] 蔡亦钢. 流体传输动力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990.
- [9] LI Daming, ZHANG Hongping, LI Bing-fei, et al. BASIC THEORY AND MATHEMATICAL MODELING URBAN RAINSTORM WATER LOGGING [J]. 水动力学研究与进展(b 辑), 2004, 16(1): 142-179.

Construction of the Urban Waterlogging Monitoring and Forecasting System of Harbin City

Jing Xueyi¹, Liu Yufei¹, Wang Yongbo¹, Shen Yanyan²,
Zhang Shaofeng¹ and Tao Guohui¹

(1. Bureau of Meteorology of Harbin City, Harbin 150080, China;

2. Center of Weapon-testing of Baichen, Baicheng 137001, China)

Abstract: The main components urban waterlogging monitoring and forecasting system of Harbin city, including the key technology, theoretical basis, practical value and its importance are described briefly. The test of this system in a real case of a heavy rainfall proves the high accuracy of the system. In establishing the simulation model of urban waterlogging, the core component of the system, a created structureless irregular grid technology is adopted in accordance with the geographical feature of the city, in stead of the traditional regular grid method. In the simulation model, the sewerage works facilities are digitalized. It is the first to combine the surface water with the simulation of water in pipelines. The problem of simulating bumping drainage is preliminarily solved in Harbin. Using rainfall information and numerical weather forecast information in the simulation model actualizes the combination of meteorology with hydrology. Application of system can improve the accuracy of waterlogging prediction.

Key words: urban waterlogging; simulation computation; simulation; digitization; special database; Harbin