

基于 GIS 的城市排水管网模型拓扑规则检查和处理

赵冬泉^{1,2} 陈吉宁¹ 佟庆远² 王浩正² 曹尚兵² 盛 政²

(1 清华大学环境科学与工程系,北京 100084; 2 北京清华城市规划设计研究院,北京 100084)

摘要 构建城市排水管网模型可以辅助解决与城市排水系统相关的水量与水质问题。城市排水系统各要素间存在复杂的拓扑关系,通常构建城市排水系统模拟模型需要对排水系统要素之间的拓扑关系进行检查和修正。对于较大规模的城市排水系统建模,检查和修正排水系统要素之间的拓扑关系将是一项繁琐的工作。以城市排水系统模拟中常用的 SWMM 模型为例,借助 GIS 的空间分析功能开发了城市排水系统模拟中基于规则的拓扑检查和处理的方法,并在澳门半岛排水系统建模中得到了应用。该方法利用 GIS 可视化表达要素之间的拓扑关系并可快速对拓扑错误进行定位和修正,保证了模型中空间数据的完整性、一致性和连通性,同时通过系统集成可以提高排水模型构建的效率和模拟的准确性。

关键词 排水管网 拓扑 检查 处理 GIS SWMM

Inspection and modification of GIS based topological relationships in urban drainage modeling

Zhao Dongquan^{1,2}, Chen Jining¹, Tong Qingyuan², Wang Haozheng²,

Cao Shangbing², Sheng Zheng²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Urban Planning & Design Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Constructing urban drainage network model can help to solve the quantity and quality problems associated in urban resource management. Complex topological relationships exist among hydrological objects of urban drainage simulation models. It is a huge but necessary job to inspect and modify the topological relations among these objects, especially on large-scale drainage network model construction. The rule based inspection and modification method of these topological relationships using spatial analysis functions of GIS were developed to facility this process. Storm Water Management Model (SWMM), one of the most popular urban drainage simulation models was selected to construct urban drainage network model of Macao. This method can display the topological relationships among elements on maps to make them viewable based on GIS, and locate the topological mistakes rapidly and modify them. This procedure can ensure the integrality and consistency of spatial data of urban drainage models, and improve the efficiency and accuracy of model construction through system integration.

Keywords: Drainage network; Topology; Inspection; Modification; GIS; SWMM

无控制的降雨—径流过程会对城市水体造成不利影响,尤其是受到初期地表径流中含有的大量污染

物的影响。利用数学模型进行模拟是研究城市洪水及非点源污染的产生和输移规律的有效手段^[1~3]。

由于城市地表特征的复杂性,利用降雨径流模型进行城市排水管网模拟时需要大量的空间数据^[4],这些空间数据通过一定的空间相互关系构成了城市排水系统的传输骨架。在实际建模中,现有的排水管网数据大多没有构建拓扑关系,所以将现有数据导入模型时,往往存在不符合城市排水系统各要素之间特定关系的数据,将影响建模效率和管网模拟的准确性。而 GIS 技术的快速发展为高效处理排水管网中的相互特定关系提供了强有力的技术支持^[5]。在城市排水系统模拟中涉及到的汇水区、城市排水管道、检查井以及一些其他排水构筑物之间的特定关系可以利用 GIS 提供的拓扑规则建立,并利用拓扑处理功能进行有效的管理。本文以美国环境保护局开发的暴雨管理模型——SWMM 为例,分析了城市排水系统模拟中各空间要素间的拓扑关系,描述了利用 GIS 进行城市排水管网模型拓扑规则检查和处理的方法。

1 SWMM 简介

SWMM 是美国环境保护局于 20 世纪 70 年代开发的暴雨管理模型,该模型可以解决与城市降雨—径流相关的水量与水质的模拟问题^[6]。SWMM 可以模拟完整的城市排水过程的水力和水质现象,包括地表产流、地表汇流、污染物累计与冲刷和排水管网输送等城市排水过程。SWMM 对数据输入时间间隔可以是任意的,输出的结果也可以是任意的整数步长,而且对于计算区域的面积大小和土地类型也没有限制,所以是一个通用性很好的城市排水系统模拟模型。SWMM 在国外排水系统的模拟已经得到了广泛的应用,国内也有少数城市开始尝试通过构建 SWMM 模型来管理城市管网系统^[7,8]。

SWMM 采用圣维南方程 (Saint - Venant Equation) 来描述水流在城市管网体系 (包括明渠和管道) 中的输移^[9],由以下两个方程构成。

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_l \quad (1)$$

$$\text{动量方程} \quad \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = S_0 - S_f \quad (2)$$

式中 Q ——流量;

A ——过水断面的面积;

t ——时间;

q_l ——单位长度旁侧入流量;

g ——重力加速度;

v ——平均流速;

h ——水深;

S_0 ——底坡;

S_f ——摩阻坡度。

根据实际管网的特征和模拟的需要,SWMM 提供了三种管网输移模式:稳定波方程 (Steady flow routing)、运动波方程 (Kinematic wave routing) 和动态波方程 (Dynamic wave routing) 来求解圣维南方程。稳定波方程描述最简单的管网输移模式,它假定在每一个计算步长内流动状态是稳定的、单一的。运动波计算模式忽略了圣维南方程中的惯性项和压力项进行简化求解。运动波允许水流随管道进行时空变化。动态波方程求解完整的圣维南方程组,因此会产生理论上最精确的结果。动态波可以模拟任何常见的管网系统,包括多种形式的分水器 and 环状管网。

2 研究方法

拓扑是反映空间要素和要素类之间关系的数据模型或格式。利用拓扑规则可以指定要素类中的要素之间有何种空间关系,或者多个不同要素类中的要素之间的空间关系。GIS 是以地理空间数据库为基础,在计算机软硬件的支持下,对空间相关数据进行采集、管理、操作、分析、模拟和显示,并采用地理模型分析方法,适时提供多种空间和动态的地理信息,为地理研究和地理决策服务而建立起来的计算机技术系统^[10]。

本研究利用 GIS 中的拓扑工具处理 SWMM 中水文要素之间的空间关系,并将该方法与 SWMM 集成到一个平台,该方法的工作流程如图 1 所示。

2.1 拓扑规则建立

城市排水系统由管道、节点和汇水区等要素组成,这些要素之间通过一定的拓扑关系有机结合在一起。管道、节点和汇水区都具有一定的空间特征,因此这些要素之间需要满足通用的空间拓扑关系。同时,由于一般排水模型都是由地表汇流过程和管道输移系统组成,SWMM 分别使用非线性水库模型和圣维南方程组来模拟这两个过程,并通过一定的假设简化来求解方程组。对于不同的假设条件 SWMM 管网输移有三种求解模式 (稳定流,运动波

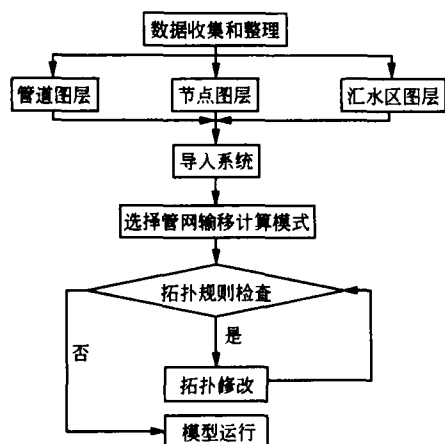


图1 城市排水模拟拓扑规则检查与修正工作流程

和动态波),由于三种模式对模型中管网系统的要求不同,因此模型要素之间除了要满足以上规则之外,还需满足特定模式下的不同拓扑规则。

通过总结,本研究建立的通用空间拓扑规则主要包括:①管网系统中代表各管道的线段的起点和终点必须为节点图层中的某个点元素;②节点图层中的点元素必须为排水管道图层中线段的起点或终点;③同类型的要素图形之间不能重叠;④出水口节点有且仅有一个连接;⑤分流器节点必须有且仅有两个下游连接。以上规则对三种管网输移模式都适用,属于通用规则。

SWMM 中特定模式下的不同拓扑规则包括:①在稳定流和运动波模式下,管道节点(分流器除外)最多只能为一段下游连接的上游节点;②在稳定流和运动波模式下,一个调节连接(孔、堰和出口)只能作为集水节点的下游连接;③稳定流和运动波模式中不能存在环状管网;④在稳定流和运动波模式下,上游管道管底高程要大于下游管道管底高程;⑤在动态波模式下,管网系统至少应有一个出水口节点。这些规则只需要满足其对应的计算模式,而计算模式的选择根据管网结构(环状网、树状网等)和计算精度要求由模型工程师主观选择。

2.2 GIS 中拓扑规则检查与处理

在 SWMM 中,部分拓扑错误在运行错误的提示文件中以属性错误(Property error)的形式出现,但有些表示空间属性的拓扑错误在 SWMM 中无法显示,如节点是否重合、汇水区边界是否重合等。而

利用 GIS 工具,可以改进 SWMM 的拓扑检查功能,使得 SWMM 特性错误以外的其他拓扑错误也可以被快速查找并定位。

利用 GIS 系统的空间分析和处理功能,可以方便地对不符合拓扑规则的错误进行修正。但是 SWMM 中很多属性检查是 GIS 本身不提供的,需要借助定制开发的方法实现。如运动波模式只能模拟管道坡度为正值时的管网系统,因此需要对管道的上、下游节点的管底高程进行比较,寻找所有不符合规则的管道,并定位进行修改。

因此,只有将 GIS 本身的拓扑检查功能和 SWMM 需要的相关属性检查功能集成,才能对排水系统各要素之间的拓扑关系进行全面的检查和修正,从而保证排水管网符合模型模拟的要求。

2.3 功能集成

本研究开发了排水管网拓扑规则检查和修正工具,系统框架如图 2 所示。系统集成 GIS 拓扑分析、修正编辑、要素属性检查与 SWMM,通过该集成环境用户可以进行 SWMM 的构建和模拟。由于 SWMM 中所有可能出现的拓扑错误都已经分类集成到该系统中,用户只需要对所需检查的拓扑关系进行选择,系统会自动对空间数据进行检查,并显示发现的错误要素列表。通过选中列表中不符合拓扑规则的要素,图形界面可以放大到该要素并突出显示。然后用户可以通过对周围管道的查询和分析来修正该要素的错误。在系统中,结合 SWMM 空间要素的特征利用 GIS 设计开发了要素类型转换、重复要素删除、管道反向、节点移动等拓扑修改工具,提高了要素错误修正的便捷性。

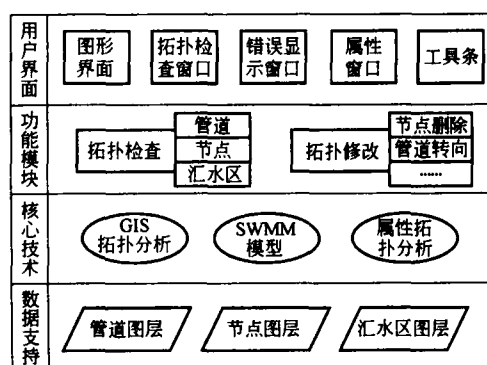


图2 城市排水系统模拟拓扑规则检查和修正工具框架

3 案例研究

将该集成工具在澳门半岛排水管网建模中进行了实际应用。澳门半岛面积约 8.7 km²,商住混合区是其主要功能区。澳门半岛内共有排水管道 11 414 根,全长 306.5 km,其中合流制管道 3 060 根,总长 67.3 km;雨水渠 4 448 根,总长 127 km;污水管 3 216 根,总长 87.1 km;截流管 662 根,总长 23.8 km,其余为压力管。

澳门半岛的排水系统结构复杂,如果手动识别和修正管网之间的拓扑关系将是一项繁重的任务。用本研究开发的集成工具可以检查到上百个错误并进行快速定位和修正,图 3 即为典型的节点有多条下游管道错误的实例,有 3 根管道与出错节点相连,通过分析发现,对图中的 3 号管道进行反向操作即可修正此错误。

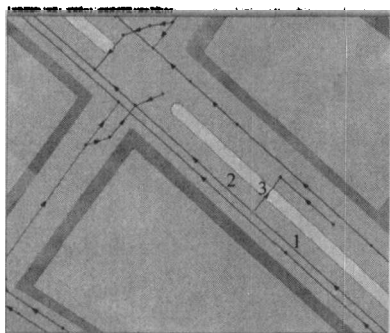


图 3 澳门半岛典型管网拓扑错误实例

4 结论

本研究以 SWMM 为例构建了城市排水系统各要素之间的拓扑规则,改进了 SWMM 中拓扑错误的检查功能,开发了基于 GIS 的城市排水系统模拟空间拓扑关系检查和修正工具,该工具具有以下优点:①通过分类,便于用户理解管网体系的拓扑关系;②简化了排水系统中拓扑错误的检查及修正过程;③优化了 SWMM 中对要素属性的修改;④可以快速定位到错误要素并进行编辑,尤其对于大规模管网系统更加适用。

该集成系统在澳门半岛排水模型的构建过程的应用中得到了检验,证明了该系统的便捷性和准确性。同时,本文提到的基于 GIS 的拓扑规则检查和修正方法对其他分布式水文模型有借鉴意义。

参考文献

- 1 李怀恩,沈晋. 非点源污染数学模型. 西安:西北工业大学出版社, 1996
- 2 官莹,阮晓红,胡晓东. 我国城市地表水环境非点源污染的研究进展. 中国给水排水, 2003, 19(3):21~23
- 3 Kyung-sook C, James E B. Parameters estimation for urban runoff modeling. Urban Water, 2002, 4:31~41
- 4 Greene R, Agbenowosi N, Loganathan G V. GIS - based approach to sewer system design. Journal of Surveying Engineering, 1999, 125(1):36~57
- 5 He C S, Croley II T E. Application of a distributed large basin runoff model in the Great Lakes basin. Control Engineering Practice, 2007, 15(8):1 001~1 011
- 6 Metcalf and Eddy Inc. Storm water management model, Final Report. U. S. Environmental Protection Agency, Water Quality Office, Water Pollution Control Research Series, Washington DC, 1971
- 7 董欣,陈吉宁,赵冬泉. SWMM 模型在城市排水系统规划中的应用. 给水排水, 2006, 32(5):106~109
- 8 刘俊,郭亮辉,张建涛,等. 基于 SWMM 模拟上海市区排水及地面淹水过程. 中国给水排水, 2006, 22(21):64~70
- 9 Peterson E W, Wicks C M. Assessing the importance of conduit geometry and physical parameters in karst systems using the storm water management model(SWMM). Journal of Hydrology, 2006, 329 (1-2):294~305
- 10 张超,陈丙威,邬伦. 地理信息系统. 北京:高等教育出版社, 1995

✉ E-mail: zdq01@mails. tsinghua. edu. cn

收稿日期:2007-08-17

修回日期:2007-11-09

苏州污水排放要达国内最高标准

2003 年以来,苏州市已经投资 60 亿元左右,形成了防洪、挡潮、除涝、供水、治污、灌溉和水生态等工程体系。2008 年还要投资近 11 亿元,主要用于城市供水、排水、河道、防汛等方面。2008 年苏州将对市区 7 座污水处理厂进行全面提标改造,排放标准从一级 B 提高到一级 A,达到国内最高标准,接近再生水景观水,预计年底可以完成。从“一级 B”到“一级 A”将是一个很大的跨越。

同时,为预防太湖蓝藻再度暴发,苏州市水利局启动了供水水源应急工程,从西塘河引进长江水,6 月底将完工,作为非常时期的供水水源。