

城市雨水管理

基于SWMM的城市排水管网瓶颈分析与改造评价

唐炉亮¹, 胡锦涛程¹, 刘章¹, 杨治国², 李清泉¹

(1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉珞珈德毅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430223)

摘要: 旧城区地下排水管网由于建设年代久远、管网设计不合理或对降雨预估不足,在遇到高强度暴雨时容易发生排水不畅而出现内涝灾害。为此,提出一种基于暴雨径流管理模型(SWMM)的城市地下排水管网瓶颈分析与改造评价方法,该方法首先通过模拟降雨水文水力过程,对地下排水管网的瓶颈管道进行有效探测,然后提出一种面向改造期望的瓶颈管道改造迭代模型,对瓶颈管道进行分步改造,并对改造管网排水能力的提升进行评价。同时,采用ArcGIS Engine和C#语言研发了城市地下排水管网瓶颈分析与改造评价平台,验证了该方法的可行性。

关键词: 城市排水管网; SWMM模型; 瓶颈管道; 改造评估

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)21-0112-06

Bottleneck Analysis and Reform Evaluation of Urban Underground Drainage Pipe Network Based on SWMM

TANG Lu-liang¹, HU Jin-cheng¹, LIU Zhang¹, YANG Zhi-guo², LI Qing-quan¹

(1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Wuhan LuoJia Deyi Technology Co. Ltd., Wuhan 430223, China)

Abstract: As the underground drainage pipe network in the old urban area has been built for a long time, and the pipe network design is not reasonable or the rainfall intensity is underestimated, the underground drainage pipe networks are subject to clogging in the face of intensive rainfall which has led to frequent flooding disasters in recent years. In view of this, a bottleneck analysis and reform evaluation method for the urban underground drainage pipe network was proposed based on the storm water management model (SWMM). The method firstly simulated the hydrological and hydraulic processes of the rainfall for effective detecting the bottleneck pipe of the underground drainage pipe network. Then, an expectation-oriented iterative model was proposed to identify the stepwise reform plan of the bottleneck pipes and evaluate the improvement of drainage capacity. Meanwhile, the bottleneck analysis and reform evaluation platform of urban underground drainage pipe network was developed by using the ArcGIS Engine and C# language, which verified the feasibility of the method.

Key words: urban drainage pipe network; SWMM; bottleneck pipe; reform evaluation

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0503600、2016YFE0200400); 国家自然科学基金资助项目(41671442、41571430)

近年来一方面由于气候变化异常,暴雨等极端天气频发;另一方面随着经济快速发展,城市大范围建设开发,破坏了原有的排水系统,使得城市的地下排水管道远达不到排水要求^[1],频繁出现内涝灾害。因此对城市地下排水管网系统进行管网瓶颈管段分析与管网改造评价十分必要。

在国外发达国家已经广泛使用一些模型软件如SWMM、InfoWorks CS、Mike Urban等进行水力建模以辅助解决排水问题^[2],国内专家也对解决排水问题进行了一些尝试^[3,4]。其中,SWMM模型是应用较广泛的数学模型,常常用于城市排水能力的评估,而且国内已有专家学者利用SWMM进行了构建排水系统模型的尝试和实践^[5,6],证明了SWMM良好的精度和可靠性。但是现有研究没有提出有针对性的瓶颈管道分析与改造方法,也缺乏优化后的管网排水能力的定量评价。为此,笔者通过集成GIS与SWMM模型,提出一种地下排水管网瓶颈管道的探测分析方法,面向管网改造期望构建了一种瓶颈管道分步改造迭代模型,对改造管网排水能力提升进行定量评价,并采用ArcGIS Engine和C#语言研发了城市地下排水管网瓶颈分析与改造评价系统,验证了该方法的可行性。

1 排水管网瓶颈分析与改造评价方法

本研究集成GIS与SWMM水文水动力模型,构建了城市地下排水管网瓶颈分析与改造评价方法,以探测分析出不同降雨情景下的瓶颈管道,并提出面向改造期望的改造迭代模型,计算出瓶颈管道的分步改造步骤,最后根据管道负荷情况进行排水能力评价。方法路线如图1所示。

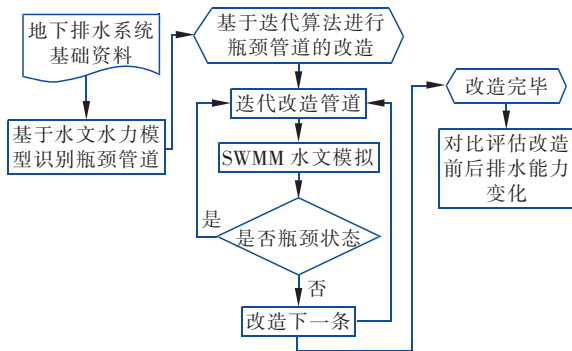


图1 排水管网瓶颈分析与改造评价方法路线

Fig.1 Method route of bottleneck analysis and reform evaluation of urban drainage pipe network

1.1 瓶颈管道的提出

本研究将瓶颈管道定义为降雨过程中的满流管道。管道中的水流状态能反映管道的负载能力,通过分析管网中的水流状态可以研究区域内管网的排水能力^[4]。现状管道在降雨设计重现期下运行的水位高度与管径的比值称为充满度,定义如下:

$$A_i = W_i / D_i \quad (1)$$

式中: A_i 为管道*i*的充满度即能力值; W_i 为管道*i*的水位高度; D_i 为管道*i*的直径。在设计重现期下,若 $A_i < 1$,则管道设计能力达标;若 $A_i = 1$,则排水管道处于满流状态。在降雨过程中,一些区域的管网由于建设年代久远、设计不合理或对降雨预估不足,会导致排水管道处于满管压力流状态,排水管道内的水从检查井溢出,达到一定程度时造成城市内涝。本研究将瓶颈管道定义为降雨过程中充满度达到1的满流管道,这些满流管道所在区域是积水和内涝灾害的高发地点。针对这些管道进行合理的优化改造,可以减少暴雨带来的不利影响。

1.2 瓶颈管道的识别

1.2.1 排水管网系统概化

地下排水管网系统布局十分复杂,包含了诸多排水要素。为便于建模分析,按照宏观等效和小误差原则对地下排水管网系统进行概化处理^[7]。考虑到降雨—地表产汇流—管道排水的整个过程,将地下排水管网系统概化为3类数据:节点数据、线性数据和面状数据,其中,节点数据是管线交叉点、端点或大流量出入点的抽象形式,主要包含进水点、排放点等;线性数据是排水管段,功能是输送水量;面状数据是城市的子汇水区域,是水体流经的地表范围。结合上述3类数据的特征,对研究区域的管网进行合理概化,将管网的节点概化为点,将管段概化为线,将城市汇水区概化为面,汇流区内有一个出水口,所有汇水区出水口连接在节点和排水管道所组成的排水网络中,最终概化出包含有点、线、面要素的排水管网系统。

1.2.2 基于SWMM模型识别瓶颈管道

要检测瓶颈管道,需要在一定降雨强度下分析排水管段的运行状况,依据《室外排水设计规范》,设计暴雨资料一般包括设计暴雨量和设计暴雨过程,设计暴雨量可通过暴雨强度公式进行计算,设计暴雨过程可采用芝加哥降雨模型。本研究采用SWMM模型模拟降雨和排水过程,利用SWMM模型

进行水文水力模拟识别瓶颈管道的流程见图2。

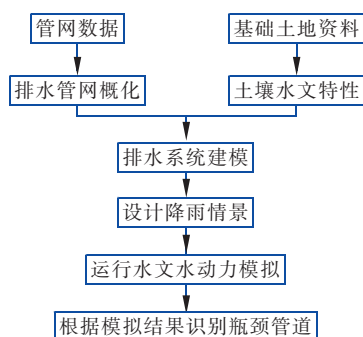


图2 瓶颈识别流程

Fig. 2 Flow chart of bottleneck identification

利用已有管网资料和土地资料概化排水系统后,再对排水系统要素的水文水力属性参数取值。水文水力属性参数要求较高,一般可通过现场调查、相关文献调研、试验测量等方式获得。完成排水系统建模后,利用暴雨强度公式和芝加哥雨型设计降雨情景,然后进行水文水力模拟。SWMM 模型提供了计算引擎 SWMM Engine,利用该引擎可完成整个水文水力模拟过程^[8]。当面对大面积建模区域时,城市排水管道结构复杂、信息量大,本研究基于 ArcGIS Engine 二次开发计算生成模拟所需的属性和参数,快速准确。首先利用建模基础资料生成模型工程文件,然后通过计算引擎进行模拟计算,得到二进制的结果文件,最后对结果文件进行解读,得到排水管道随时间变化的能力值。在模型计算结束后,统计在降雨过程中达到满流状态的管道,即排水管网系统中的瓶颈管道。本研究在实施过程中对 SWMM 计算引擎的输入文件和接口函数进行了进一步的封装,集成路线如图3所示。

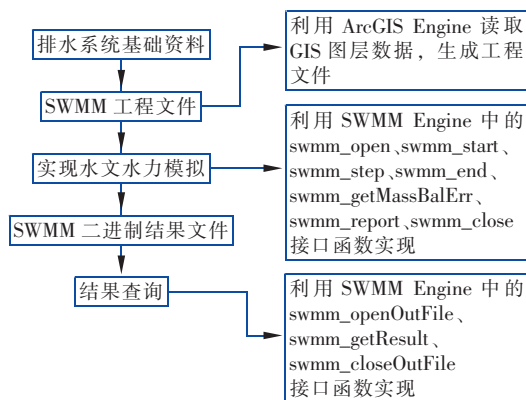


图3 GIS 与 SWMM 的集成

Fig. 3 Integration of GIS and SWMM

1.3 面向管网改造期望的分步改造迭代模型

由于排水管网系统建设不合理,市政部门常常需要对多条瓶颈管道进行改造,但每条管道的改造都会导致整个排水管网系统结构发生变化,可能出现第一工期改造的瓶颈管道因为若干工期后的改造而再次出现瓶颈状态。为了解决此问题,本研究基于水文水力模拟结果,提出了面向管网改造期望的瓶颈管道分步改造迭代模型。该模型构建了改造期望 $h\%$,其意义是改造完当前管道后,至少再改造原始瓶颈管道数量的 $h\%$ 后才允许已被改造的当前管道再次出现瓶颈状态。若研究区域内排水管网系统一共有 sum 条排水管道,经过管网系统建模和水文水力模拟之后,得到 d 条瓶颈管道。现若改造其中 n 条瓶颈管道,改造期望为 $h\%$,分步改造迭代模型如图4所示。

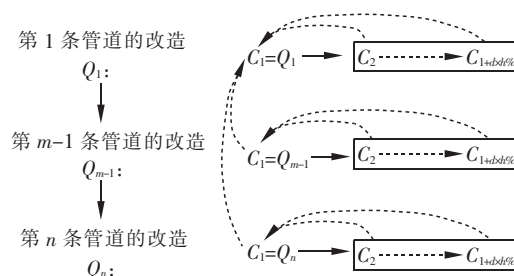


图4 基于迭代算法的多条瓶颈管道改造

Fig. 4 Reform of multiple bottleneck pipes based on iterative algorithm

具体的瓶颈管道改造算法步骤如下:

- ① 将当前改造的瓶颈管道记为 Q_m , m 的初始值取为 1。
- ② 将 Q_m 改造至非瓶颈状态,获得改造后的排水管网系统,将改造后的 Q_m 记为 C_1 。
- ③ 对 Q_m 进行期望预测,进行第 k 个管道的假设预测改造, k 的初始值取 2,具体步骤如下: a. 识别第 $k-1$ 次改造后的排水管网系统中的瓶颈管道,若无瓶颈管道,执行步骤 d; 否则,改造下一条瓶颈管道,并将该改造管道记为 C_k 。 b. 识别已改造的所有管道 $C_1 \sim C_{k-1}$ 是否为瓶颈管道,将其中的瓶颈管道均改造至非瓶颈状态,然后执行步骤 c; 若所有管道 $C_1 \sim C_{k-1}$ 均识别为非瓶颈管道,则执行步骤 d。 c. 识别 C_k 是否为瓶颈管道,若是,将 C_k 改造至非瓶颈状态,然后执行步骤 b; 否则执行步骤 d。 d. 判断当前的 k 值是否达到 $1 + d \times h\%$,若达到,执行步骤 ④; 否则,令 $k+1$,重复执行步骤 ③。
- ④ 否则,令 $k+1$,重复执行步骤 ③。

④ 检测已改造的 $Q_1 \sim Q_m$ 是否存在瓶颈管道,若存在,将其中的瓶颈管道均改造至非瓶颈状态;若不存在,结束对 Q_m 的改造,当前 Q_m 的状态即 Q_m 的改造结果。若 m 的值达到 n 则整个改造过程结束;否则,令 $m+1$,重复执行步骤①。

1.4 管网排水能力提升定量评价

为了对改造前后的排水管网系统进行科学的评价,本研究基于改造前后的瓶颈管道比例来评价地下管网改造前后的排水能力变化,分析改造后管网排水能力的提升情况。首先设定 P 年一遇的重现期降雨情景条件,在降雨过程中,非瓶颈管道中的水体能够顺利排走,若非瓶颈管道长度为 L ,整个排水管网总长度为 S ,则该排水管网满足 P 年一遇的管道比例为 $Q = (L/S) \times 100\%$ 。分别计算改造前、后满足 P 年一遇的排水管道所占比例 Q_1 和 Q_2 ,若 $Q_2 > Q_1$,则改造后地下排水管网系统的排水能力得到了提升。

2 试验与比较

2.1 试验

本研究集成 SWMM Engine 与 ArcGIS Engine,采用 C#语言研发了城市地下排水管网瓶颈分析与评价改造平台(见图5),以验证上述排水管网瓶颈分析与改造评价方法。

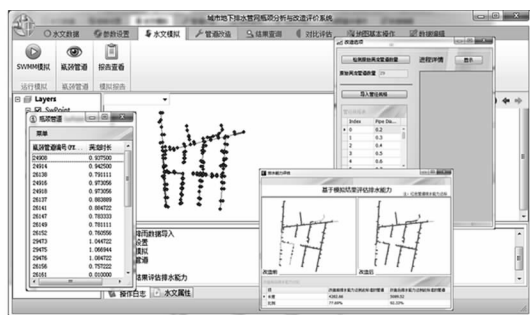


图5 城市地下排水管网瓶颈分析与改造评价平台

Fig. 5 Bottleneck analysis and reform evaluation platform for urban underground drainage pipe network

以某区域为研究对象,采用该区域的地下管线普查数据,对整个区域排水管网的几何拓扑结构进行概化。该排水管网包含 197 条管道、197 个节点和 1 个出水口(见图6),其中,管道管径为 300~800 mm。利用排水管网瓶颈分析与改造评价方法,探测分析不同重现期降雨情景下的瓶颈管道,面向改造期望分步改造瓶颈管道,然后对改造前后的排水能力进行评价。

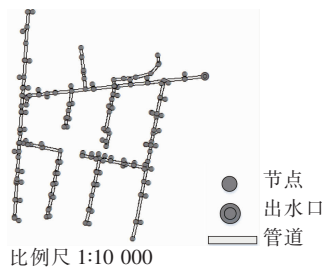


图6 研究区域的排水管网分布

Fig. 6 Distribution of drainage pipe network in study area

基于研究区的排水管网分布划分子汇水区,根据已有的管网普查资料、SWMM 模型使用手册建议的取值,确定排水管网系统对象的水文水力属性值。该区域的暴雨强度公式为:

$$q = \frac{2\,889(1+0.9\lg P)}{(t+10)^{0.88}} \quad (2)$$

式中: q 为平均降雨强度, $L/(s \cdot \text{hm}^2)$; t 为降雨历时, min; P 为设计重现期, 年。

选取雨峰系数为 0.417 的 2 h 降雨情景,利用该区域暴雨强度公式并结合芝加哥雨型分别设计 0.25、0.33、0.5、1 年一遇的降雨,推导出该降雨情景下的暴雨强度过程线。

在模型成功构建的基础上,模拟分析不同重现期降雨条件下的瓶颈管道分布,结果见图7。

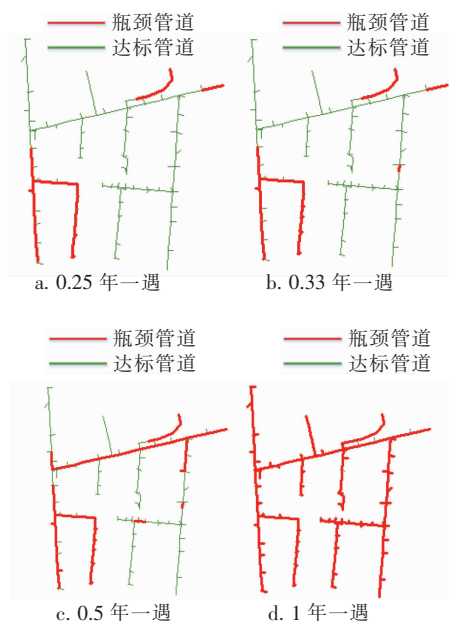


图7 不同降雨重现期下瓶颈管道的分布

Fig. 7 Distribution of bottleneck pipes at different rainfall return periods

在 0.25、0.33、0.5、1 年一遇的降雨条件下,研

究区域的瓶颈管道分别为29、36、60、186根;达标管道长度分别为4 287、4 153、3 083、114 m,占比分别为77.69%、76.47%、58.02%、1.86%。可见,随着降雨强度的增大,地表径流增多,管网输送的雨水量相应增多,瓶颈管道数量增多,对地下排水管网系统的要求更高;现状管网排水能力较弱,难以满足1年一遇的降雨要求。

以0.25年一遇的降雨情景为例,对瓶颈管道进行改造。在改造期望率为10%的条件下,通过增大管径的方式改造满流时间较长的管道直到其达到非瓶颈状态,利用城市地下排水管网瓶颈分析与改造评价平台,分析得到ID编号为29478、24916、24918、29476、24914、24908、24911的管道需要被依次改造。这7根管道在改造前的管径分别为0.3、0.6、0.6、0.3、0.6、0.5、0.6 m,改造后管径分别为1.1、3、1.5、0.7、1.2、1、0.9 m。根据水文水力模拟结果,改造前后该区域的排水能力对比见图8。经过改造,瓶颈管道从原来的29根降至9根,达标管道总长由原来的4 283 m增至5 090 m,占比由77.69%增至92.33%,说明改造后排水管网系统的排水能力得到了有效提升。

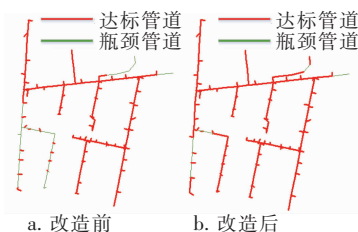


图8 改造前后排水能力对比

Fig. 8 Comparison of drainage capacity before and after reform

2.2 与国内外其他方法的对比

本研究通过集成GIS与SWMM水文水力模型,构建了城市地下排水管网瓶颈分析与改造评价方法,能够探测分析出不同降雨情景下的瓶颈管道,并提出了面向改造期望的改造迭代模型,可计算出瓶颈管道的分步改造步骤,最后根据管道负荷情况进行排水能力评价。该方法与现有的其他排水管网系统分析方法的差异主要体现在水文水力计算方法、管道改造决策、排水系统运行现状评估等方面,对比内容如表1所示。可以看出,现有的排水系统分析方法对管道改造及评估缺乏综合的定量解决方法,而本研究提出的方法,作为有益尝试,可以为排

水管网系统的改造提供决策依据。

表1 不同排水管网分析方法的比较

Tab. 1 Comparison of drainage pipe network analysis methods

项 目	水文水力计算方法	管网改造决策	排水系统运行现状评估
Mike Urban	EPANET 模型	人工调整	根据漫溢情况评估
基于图论原理的城市排水管网模型	图论网络模型	无	通过比较雨水网络图的最小割与最大流进行评估
InfoWorks CS	多种水动力模型集成	人工调整	根据漫溢情况评估
本研究方法	暴雨径流管理模型	面向期望改造的分步改造迭代模型	根据管道负荷情况进行定量的对比评估

3 结论

目前我国采用推理法设计雨水管网,容易产生较大误差,而采用较精确的数字模拟技术规划设计、改造雨水管网是治理城市内涝的有效途径。本研究通过集成GIS与SWMM模型,构建了城市地下排水管网瓶颈分析与改造评价方法,并采用ArcGIS Engine和C#语言研发了城市地下排水管网瓶颈分析与改造评价平台,验证了该方法的可行性。通过与其他排水管网分析方法进行比较发现,该方法对瓶颈管道的分析针对性更强,功能更加丰富。今后,本研究将进一步研究不同雨型下的排水管网运行状况差异;结合排水监测传感器进行模型校验;对优化方案进行经济可行性分析;将单一的工程技术与水生态基础设施建设结合,利用海绵城市对传统排水系统减负。

参考文献:

- [1] 谢映霞. 城市排水与内涝灾害防治规划相关问题研究[J]. 中国给水排水, 2013, 29(17): 105-108.
Xie Yingxia. Urban drainage and waterlogging disaster prevention planning [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(17): 105-108 (in Chinese).
- [2] Lee K S, Cho W S, Hwang J W, et al. Numerical simulation for reducing the flood damage of green park using MIKE URBAN [J]. Inter J Control Autom, 2015, 8(1): 37-54.
- [3] 毛云峰, 王红武, 高原, 等. 基于InfoWorks CS软件的上海市某排水系统运行现状评估[J]. 给水排水, 2013, 39(12): 111-114.

- Mao Yunfeng, Wang Hongwu, Gao Yuan, *et al.* Operation assessment of a drainage system in Shanghai based on InfoWorks CS[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2013, 39(12): 111 – 114 (in Chinese).
- [4] 薛偲琦, 张瑛, 李一平, 等. 基于 SWMM 的南京市内秦淮河中段管网排水能力分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(5): 169 – 173.
- Xue Siqi, Zhang Ying, Li Yiping, *et al.* Analysis of drainage capacity of midway network in Qinhuai River of Nanjing based on SWMM[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2014, 25(5): 169 – 173 (in Chinese).
- [5] 赵冬泉, 陈吉宁, 佟庆远, 等. 基于 GIS 构建 SWMM 城市排水管网模型[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(7): 88 – 91.
- Zhao Dongquan, Chen Jining, Tong Qingyuan, *et al.* Construction of SWMM urban drainage network model based on GIS[J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(7): 88 – 91 (in Chinese).
- [6] 黄国如, 黄维, 张灵敏, 等. 基于 GIS 和 SWMM 模型的城市暴雨积水模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(4): 1 – 6.
- Huang Guoru, Huang Wei, Zhang Lingmin, *et al.* Simulation of rainstorm waterlogging in urban areas based on GIS and SWMM model[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(4): 1 – 6 (in Chinese).
- [7] 严煦世, 刘遂庆. 给水排水管网系统[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Yan Xushi, Liu Suiqing. *Water Supply and Drainage Pipe Network System* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014 (in Chinese).
- [8] 刘德儿, 袁显贵, 兰小机, 等. SWMM 模型与 GIS 组件的无缝耦合及应用[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(1): 106 – 111.
- Liu De'er, Yuan Xiangui, Lan Xiaoji, *et al.* Seamless integration and use of SWMM model and GIS components [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(1): 106 – 111 (in Chinese).



作者简介:唐炉亮(1973 –), 男, 湖南湘潭人, 博士, 珞珈学者特聘教授、博士生导师, 主要从事时空 GIS、时空大数据获取与知识挖掘、测绘技术应用等研究。

E-mail: tll@whu.edu.cn

收稿日期: 2018 – 04 – 03

