

# 城市暴雨管理数字化解决方案

赵冬泉<sup>1,2</sup>, 王浩正<sup>1</sup>, 盛政<sup>1</sup>, 佟庆远<sup>1</sup>, 李王峰<sup>1</sup>, 陈吉宁<sup>2</sup>

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

**摘要:** 近年来,我国城市的局地性暴雨事件频发且来势猛、速度快、历时短、难以准确预报,常造成较严重的突发性洪涝灾害,对城市的正常运转带来较大影响。基于目前国内应对城市暴雨溢流等问题信息化管理手段的欠缺,在对国内外普遍采用的城市暴雨管理理论和技术进行总结分析的基础上开发了城市排水管网数字化管理与模拟分析平台(DigitaWater),介绍了基于该平台技术的城市暴雨管理数字化解决方案,包括辅助雨水管网日常养护、防洪预案制定、雨洪调控方案以及雨水管网改造方案的分析与评估等方面。

**关键词:** 数字排水; DigitaWater; 暴雨管理; 防洪预案; 雨洪调控; 管网改造

**中图分类号:** TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000 - 4602(2008)20 - 0015 - 05

## Discussion on Digital Solutions for Urban Storm Management

ZHAO Dong-quan<sup>1,2</sup>, WANG Hao-zheng<sup>1</sup>, SHENG Zheng<sup>1</sup>, TONG Qing-yuan<sup>1</sup>,  
LI Wang-feng<sup>1</sup>, CHEN Ji-ning<sup>2</sup>

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

**Abstract:** The urban storm events become more and more frequent during these years in China. They come quickly and violently, and are difficult to be forecasted due to short duration. The flood and waterlogging disasters are often caused, and the normal urban operation is heavily influenced. Aimed at the deficiency of information technologies on urban storm flooding management in China, the DigitaWater, a platform for digital management and simulation urban drainage network was developed on the basis of analyzing the urban storm management theories and technologies widely used at home and abroad. The digital solutions of urban storm management based on the DigitaWater are introduced, including assistance to routine maintenance of rainwater drainage system, establishment of flood control plan, analysis and evaluation of storm flood regulation scheme and reconstruction scheme of rainwater drainage system and so on.

**Key words:** digital drainage; DigitaWater; storm management; flood control plan; storm flood regulation; system reconstruction

2008年入夏以来,我国很多城市(包括广州、东莞、桂林、柳州等)遭到突发性暴雨袭击,造成严重的城市洪涝灾害,对社会秩序、城市功能、环境与资源等造成不同程度的破坏,给人民生活、经济社会发

展和城市的正常运转带来较大影响。面对越来越频繁的城市暴雨洪灾,一个重要的问题摆在了城市的管理者面前:当5年、10年甚至50年一遇的暴雨袭来时,会对城市造成什么影响,我们将如何应对?而

现行的依靠纸质图纸简单直观分析和降雨时人工巡查的手段已经显得苍白无力。

实际上,计算机技术的发展,包括 GIS 技术、数学模型等的发展为解决上述问题提供了技术基础。早在 20 世纪 60 年代初期,有学者就已在城市排水系统模拟方面进行了研究和开发,并出现了大量统计模型、机理模型及管理规划模型,而真正标志着城市排水系统计算机建模开端的是 1969 年—1971 年由美国环保局 (USEPA) 资助开发的暴雨管理模型 (Storm Water Management Model, 简称 SWMM), 该模型自开发后得到了广泛应用<sup>[1~3]</sup>, 且一直在不断地更新中, 目前已经发展到 SWMM 5.0 版本。在国内, 20 世纪 70 年代同济大学的杨钦就将计算机技术引入到给水管网的计算中, 使大规模的管网计算和优化成为可能, 但遗憾的是并没有建立类似国外 SWMM 那样可以全面模拟城市排水系统的大型计算模型。另外一方面, 对于大量复杂空间数据的管理、查询和分析技术也得到了迅速发展和广泛应用。20 世纪 60 年代初, 加拿大的 Roger E. Tomlinson 和美国的 Duane F. Marble 在不同方面、从不同角度提出了地理信息系统 (GIS) 概念以来, 其含义与应用正在不断扩大, 目前 GIS 已成功地应用到包括资源管理、自动制图、设施管理、城市规划等一百多个领域。

由于城市排水管网是一个复杂的、具有隐藏性和随机特征的大型网络系统, 单独依靠传统的数学模型或数据库信息系统无法实现复杂大型排水管网的网络特性分析、水力特征模拟与可视化以及相关排水业务的快速分析和评估。在实际管理过程中, 由于很多排水管网的事事故处理需要及时应对, 这就对城市排水管理数字化平台的可视性、现势性和便捷性提出了要求。基于以上问题, 在对国内外排水管理先进经验进行总结和研究的的基础上, 采用国际上流行的排水管网计算原理 (SWMM) 作为系统的核心计算引擎, 结合国内实际应用需求, 设计开发了集“排水管网动态模拟计算功能与 GIS 空间管理分析功能”于一体的城市排水系统数字化管理平台 (DigitWater)。该平台可为城市暴雨导致的一系列问题提供数字化解决方案, 包括雨水管网日常养护预案的制定与评估、防洪应急预案的制定与现势分析、雨水管网改造方案的分析与评估以及城市暴雨积水预报等。

## 1 国内外暴雨管理技术的发展和应

基于环境保护的目的, 人们提出了可持续发展 (Sustainable Development) 的理念。近些年来, 针对城市雨污水收集系统老化及更新过程中面临的挑战, 美国的相关管理和研究人员提出了水资源可持续的城市市政 (Sustainable Infrastructure for Water and Wastewater) 概念。如何维护城市雨水排除系统的可持续发展, 保障降雨径流过程中城市的安全, 成为一个全球范围内的研究热点。目前各国的研究者已经作了大量相关研究和技术创新, 主要有以下几个方面。

### 1.1 在线监测技术

监测技术是人们了解排水管网排水负荷现状的重要手段, 由于现有管网人工监测采样方法存在数据量小、不连续、时间滞后等缺陷, 对进行及时的分析、调查、判断及预警和应急处理带来很大的不便。随着远程传感、计算机技术的发展, 为了弥补传统人工巡检方式在即时性、全局性、连续性和人为误差等方面存在的弊端, 越来越多的城市开始建立排水管网在线监测管理系统。通过对管网 24 h 运行状况数据的实时采集和监控, 可为决策者提供早期的报警信息, 对排水管网设施的运行情况及水文水质变化状况作出迅速、正确的反应。

但是, 城市排水管网结构复杂, 隐蔽性强, 如果没有完整、准确的管网数据库与管理分析系统, 在监测数据发生异常或者突变后无法对异常点的上、下游进行网络查询分析, 也就无法发现问题的产生原因及影响区域, 使得监测数据的应用效果大打折扣。我国目前对于管道的实时监测数据的应用大都处于简单分析和预警的水平, 造成了决策迟缓或只能对相对范围较小的区域实施比较有效的管理。

而如果将该技术与 GIS 管理分析技术、管网动态模拟技术合理整合, 不仅可以通过对排水管网的网络特征分析, 筛选出需要安装在线监测设备的管网薄弱节点或者重要节点, 合理利用和分配有限的硬件资源, 而且可以通过动态模拟技术有效使用实时监测数据, 通过有限节点的监测数据对整个管网的运行状况和排水负荷进行现势性分析, 辅助进行排水管网的科学化管理和及时应对紧急事件。

### 1.2 雨水径流调节技术

城市的发展导致大量不透水地表的形成, 严重破坏了天然水循环, 一方面容易形成高峰值的径流,

增加城市发生溢流和水浸的风险;另一方面,也阻断了降雨对地下水的补给通道,造成城市地下水位的不断降低,威胁城市的生态环境安全。基于城市雨洪调节和污染控制的目的,美国环保部门总结和颁布了一套暴雨径流最佳控制措施(Best Management Practice,简称 BMP)。BMP 措施包括工程、非工程措施,其中非工程性措施包括法律法规措施、污染源控制等,工程性措施包括植被控制、滞留池控制、渗滤系统等。国外的相关实践证明 BMP 是一套较为有效的径流控制措施。在 BMP 的基础上,从 20 世纪 90 年代开始,美国又开始研究建立基于源头控制的多点微观暴雨洪水控制策略——“低影响开发”(Low Impact Development,简称 LD)。

“低影响开发”策略的实施也包含两种措施:

结构性措施,包含湿地、生物滞留池、雨水收集槽、植被过滤带(塘、洼地)等。

非结构性措施,例如将街道和建筑合理布局以增大植被和可透水性沙地的面积。LD 不同于传统意义上的疏导和流域级别,是利用大型设施管理径流,这些基于源头控制的设计策略包含有另一种形式的暴雨管理实践,即这种系统控制能减少暴雨径流集中管理的需要。LD 模式在发达国家的暴雨管理中被广泛接受,而且制定了专门的设计标准。

尽管人们普遍接受了 BMP 和 LD 的概念和方法,但在实际管理中的应用推广却一直很缓慢,这主要是由于缺乏行之有效的径流调节工程设计和评估工具,人们无法科学地设计调节工程中各种措施的实施范围,无法科学评估各种措施实施后的效果以及对排水系统的影响。而只有利用暴雨径流模拟技术,才能科学计算和评估工程措施(改进或实施后)对暴雨径流规律和排水系统的影响,从而为径流调节工程措施的实施提供科学的数据依据。同时,径流调节工程的广泛应用也需要在暴雨径流计算模型的基础上进行二次开发,为工程人员和设计人员提供简单便捷的径流调节工程设计和评估软件,降低模型的应用难度,提高设计工具的普及性,从而推动径流调节技术的推广和应用。

### 1.3 管道检测技术

在我国,城市建设的日新月异导致了排水管网系统的新旧层次突出,部分建设年代久远的管网已接近老化而急需修复。管道修复首先需要对管道的现状进行评价,以确定合理的修复位置,这就需要

到管道检测技术。目前国际上通行的排水管道检测方法有三类:实地勘测(Field Reconnaissance)、管道内检测(Internal Inspection)和管道外检测(External Inspection)<sup>[4]</sup>。在实际检测过程中,可以根据现场条件选择相应的检测技术。随着管道老化等原因导致的管道损害复杂性的增加,国外的管道检测工程师在大量实践中已认识到 CCTV 等检测技术的局限性,如传统的检测评估技术对于压力管道的适用性不强和各种单一检测技术的局限性等。对此,研究者作了大量工作,主要集中在以下两个方面:

先进检测技术的结合使用。由于传统的排水管道检测方法只能检测管道衬里的缺陷,而无法探测到管道内部由于  $H_2S$  气体等腐蚀造成的穿孔等管道缺陷,日本学者将数字扫描和评价系统(Digital Scanning and Evaluation Technology,简称 DSET)机器人和透地雷达(GPR)结合使用,分析了使用 PVC 衬里的水泥管的缺陷情况<sup>[5]</sup>。DSET 可以提供高清晰的管道内壁图像,GPR 可以提供人眼无法看到的管道几何形变和其他结构变化。虽然 DSET 技术和 GPR 技术在实际应用中取得了很好的效果,但由于雷达检测设备尺寸的限制,目前还只能在大管径(750~900 mm)管道中使用,且只在水泥砌成的 PVC 衬里的管道中有过成功案例。

计算机技术和 GIS 技术的发展,为城市排水系统的管理带来了先进的技术支持。国外部分城市已开始将排水管道检测项目中利用 GIS 技术构建集“数据储存、结果显示和查询分析”于一体的系统,如美国俄亥俄州哥伦布市开发的管道修复自动决策支持系统。该系统集成了 GIS、计算机技术与 CCTV 技术,为解决占地面积约为 2 023  $hm^2$  的地下管道的渗透和入流以及管道堵塞问题提供决策支持。

国内关于排水管道检测和评估的相关技术研究尚在起步阶段。我国从 20 世纪 90 年代中期开始,逐渐从国外进口相关检测设备,但由于使用的单位多集中在城市管理部门,排水管道的检测和评估往往遵循由管龄、管道所在地区等简单规则制定的排水管道普查周期表。显然,该方法没有考虑到水流对管道内部的冲击、地下水渗入等其他影响因素,普查周期的选择缺乏一定的科学性且工作量大,与国外的相关研究和应用水平还有一定的差距。

## 2 暴雨管理数字化解决方案

城市暴雨管理技术的发展推动了城市水资源的

可持续发展,改善了城市居民的生活环境。但是传统依靠工程手段的方法由于缺乏有效的管理和评估手段以及快速的预警和预报机制,已经遇到了发展瓶颈。只有依靠数字化的手段才能推动先进管理手段的广泛实施,提高暴雨管理的数字化水平。

数字排水 (DigitalWater)平台采用国际上流行的排水管网计算原理作为系统的核心计算引擎,将排水管网动态模拟计算功能和 GIS空间管理分析功能紧密集成,并为相应硬件支撑平台、网络体系、在线监测体系和管网检测技术的应用提供了接口,可方便地模拟各种城市雨水调节方案,为城市暴雨管理的一系列问题提供数字化解决方案。

2.1 城市防洪预案的制定和应急管理

城市防洪预案编制的目的是确保城市防汛安全,提高对暴雨洪水、防汛突发公共事件应急快速反应和处置能力,减轻灾害损失,维护人民生命财产安全,构建“集中领导、统一指挥、结构完整、功能全面、反应灵敏、运转高效”的防汛应急体系。应急预案的制定就是为了应对暴雨发生时管网溢流导致的种种问题。而实际上,由于缺乏有效的管网水力分析工具,我国目前的防洪应急预案中还没有对各种降雨情景下排水管网的整体运行状况和排水负荷进行科学的分析,在遇到暴雨时的应急管理往往手忙脚乱,实际应急处理效果并不明显。

排水数字化技术在城市排涝防洪应急预案制定中主要有两个作用:通过对不同降雨情景下城市排水系统的溢流状况进行动态分析,为应急预案中的指挥调度、抢险救灾提供数据支持。如分析特定区域内管网能承受的最大暴雨强度,分析不同暴雨情景下的积水点的位置、积水退去时间、应急排水的去向选择、排水泵站开车台数等。为应急预案中的统一管理、部门联动甚至公众参与提供技术支撑平台,通过软、硬件技术的结合将应急管理中的各种信息汇总、筛选并可直观反映到大屏幕上,便于快速制定决策方案。因此,通过数字化手段的有效实施,可以为排水应急管理提供科学的技术支持。

先进的城市排水管网应急管理离不开在线监测体系,利用管网在线数据采集设备,可以实时获取管网的排水负荷和当前运行状况,如排水泵站开车情况、流量大小、积水深度等,并以专题地图、监测图像及数据图表等形式给予直观显示。实时监测数据可以用来对模型参数进行验证,以获取更符合真实情况

的模型参数,从而进行更准确的模拟和预报。同时,利用排水管网的上、下游网络连接关系,可以通过自动监测数据判断关键点流量是否发生异常,发出相应的预警信息,并通过对该点的上、下游分析获得造成该异常的可能上游位置和下游受影响区域。通过以上技术手段,各级排水管理部门可在第一时间获取预警信息,通过分析发现异常产生原因,并派出专业人员进行及时处理,以免发生更大的危害。

在发生暴雨时,提前预知城市积水情况对于积水的排除和人们的出行具有重要意义。在 DigitalWater平台中只要输入气象预报的雨量情况,利用数学模型进行分析计算,就可以知道城市中哪些区域可能出现积水情况、积水深度及排除积水所需时间,并在第一时间通知相关应急处理部门及早做好准备,必要时启动相应级别的防汛预案,及时制定分洪方案和进行泵站调度。在 DigitalWater平台中,一旦建立了该地区的排水管网计算模型,就可以利用在线监测数据和管网更新改造数据不断进行完善和优化,使模型总能比较真实地反映整个排水管网的排水规律和负荷变化情况,从而辅助决策人员进行动态模拟分析,如计算不同降雨强度、不同雨型、不同持续时间下,排水管网的排水负荷动态变化情况、积水和溢流情况等;计算不同分洪方案、不同泵站调度方案下,排水管网的排水负荷的差异变化,为管网升级改造、布局优化提供计算和评估平台。

2.2 雨洪控制工程的设计和评估

图 1 为某小区内雨水滞留池设计方案纵断面评估示意图。应用排水管理数字化系统可以方便地对不同雨洪控制工程进行设计与评估,有利于提高雨洪控制工程设计与评估工作的科学性。

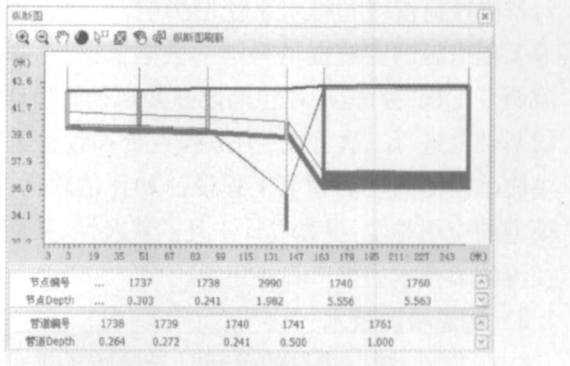


图 1 某小区内雨水滞留池设计方案纵断面评估示意

Fig 1 Evaluation of cross-section for rainwater storage tank in a residential area

DigitaWater 平台中集成的排水管网计算模型,可以完整地模拟降雨过程中雨水在各种不同透水特征和坡度特征的地表的汇集过程和管道、明渠、自然排水沟等的水力/水质变化,可对复杂管道连接和相关排水设施(如泵站、蓄水池和处理设备等)进行模拟计算,甚至可以计算回水影响、逆流等复杂排水情况。因此对于各种城市雨洪控制措施,包括植被控制、滞留池控制、渗滤系统都可以进行模拟分析,是各种 BMP 措施和 LD 措施的行之有效的辅助设计工具。

### 2.3 管网维护、升级改造方案的设计和评估

管网老化是世界各地的排水管理者普遍遇到的问题,也是城市发展的必然。由于排水管网的老化造成的管道破裂、渗漏等问题会导致难以预料的风险,对管网系统进行维护与升级改造是目前解决管网老化等问题常用的手段。但是如何根据排水现状、城市总体规划及城市的地形特征科学地确定管网改造方案是目前简单调查手段难以做到的。

数字化技术利用管网模型对城市排水管网内的水流特征在现状和规划情景下进行动态仿真模拟,可以全面掌握管网的负荷特征。溢流(Flooding)与过载(Surcharge)是雨水管渠工作的不同水力状态。欧洲管渠设计标准 EN752 将过载定义为:重力流管渠中,雨污水处于压力流,但尚未溢出地面造成洪灾的水力状况;溢流则定义为:污水或径流不能进入排水管渠,从而滞留于地面或进入建筑物的状况。总之,溢流和过载都是排水系统设计中应该避免的<sup>[6]</sup>。所以,管网系统改造工程中应考虑合理分配和利用现有雨水管网系统的排水能力,将负荷尽量在区域内“均匀化”。当管网改造方案设计完成后,还可对改造后的情景进行模拟以分析改造后排除系统的工作状况和改造对整个雨水管网运行状况的影响。

同时,排水管网管理系统可以结合管网的内窥检测设备,做到检测资料与管网平面图和三维视图的同步显示和结合网络连通性关系进行相应的分析,并可利用这些检测资料的信息更新模型的相关参数,从而充分利用管道检测数据;数字排水的模拟技术可以获取各个管道、检查井的各种水力数据(包括流量、水深、流速、充满度、溢流量、水头、弗劳德数等),通过长时间序列的模拟分析,全面反映管道的长期运行状况,为合理选择管道检测位置和制

定科学合理的管道养护方案提供数据支持,改变了依据管龄、管道所在地区等简单规则制定排水管道普查表的现状。综上所述,数字化技术为管道的维护、升级、改造等一系列的日常管理提供了科学化的分析和评估手段。

### 3 结论和展望

通过数字化管理,可以解决城市暴雨管理中缺乏科学的分析工具、缺乏自动化管理手段、缺乏对突发事件的处理能力等问题。DigitaWater 平台通过对 GIS 技术、相关排水模型的集成开发,实现了对复杂地下排水管网的快速建模和对管网水动力学特征的动态仿真模拟,为在线监测设备、管道检测设备等硬件获得数据进行有效、及时的分析提供了网络分析和模拟计算的平台,改变了我国目前多数排水管理信息系统中没有模型分析或只使用简单模型现状,有助于提升我国的排水数字化管理水平。同时, DigitaWater 平台的开发模式和动态模拟分析的思想对其他复杂管网的管理和分析具有一定的借鉴意义。

### 参考文献:

- [1] Campbell CW, Sullivan SM. Simulating time-varying curve flow and water levels using the Storm Water Management Model[J]. Eng Geol, 2002, 65(8): 133 - 139.
- [2] Zaghboul N A, Abu Kiefa M A. Neural network solution of inverse parameters used in the sensitivity-calibration analyses of the SWMM model simulations[J]. Adv Eng Software, 2001, 32(7): 587 - 595.
- [3] Burian S J, Streit G E, McPherson T N, et al. Modeling the atmospheric deposition and stormwater washoff of nitrogen compounds[J]. Environ Modell Software, 2001, 16: 467 - 479.
- [4] Ratliff A. An overview of current and developing technologies for pipe condition assessment[A]. ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction[C]. USA: Maryland, 2003.
- [5] Koo D H, Ariaratnam S T. Innovative method for assessment of underground sewer pipe condition[J]. Automation in Construction, 2006, 15(4): 479 - 488.
- [6] Schmitt T G, Thomas M, Ettrich N. Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems[J]. J Hydrol, 2004, 299: 300 - 311.

电话: 13520137233

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

收稿日期: 2008 - 07 - 16