

城市排水管网监测点优化布置的研究与进展

郭效琛¹, 李萌², 赵冬泉², 杜鹏飞¹

(1. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 2. 北京清环智慧水务科技有限公司, 北京 100086)

摘要: 城市排水管网监测对于排水管网及城市雨洪管理具有重要意义。开展排水管网监测的主要目的,一方面是及时发现运行风险,提高对城市内涝或排水管网溢流的预警预报能力;另一方面是积累排水管网的长期动态运行状况数据,用于城市排水管网运行情况的评估与诊断。通过总结目前有关排水管网监测点优化布置的相关研究,结合给水管网优化选址的方法,将现有研究所用方法分为以统计学理论为基础和以运筹学理论为基础的两种方法,并分析了现有研究存在的不足,提出了今后排水管网监测点优化布置的可行思路,包括使用模型模拟技术、强化自动识别技术、对监测方案进行定量化评估等。

关键词: 城市排水管网; 监测点优化布置; 不足与改进

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)04-0026-06

Research and Progress on Optimal Layout of Monitoring Points in Urban Drainage Networks

GUO Xiao-chen¹, LI Meng², ZHAO Dong-quan², DU Peng-fei¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Tsinghuan Smart Water Tech Co. Ltd., Beijing 100086, China)

Abstract: Urban drainage network monitoring is of great significance to the drainage systems and urban stormwater management. The main purposes of the monitoring work include two aspects: on one hand, to timely detect the operation risk so that the capability of early warning and forecast of waterlogging and overflow can be improved; on the other hand, to accumulate the long-term dynamic operation status data of the drainage network, which can be used for the evaluation and diagnosis of urban drainage network operation. Through summarizing the relevant research on the optimized layout of monitoring stations in urban drainage network, combined with the methods of that in water distribution system, the existing research methods can generally be divided into two categories: statistical theory based method and operational theory based method. By analyzing the deficiencies of the current research, a feasible idea on optimized layout of monitoring stations in urban drainage network in the future is proposed, which includes the use of model simulation, strengthening the automatic identification, quantitative assessment of the monitoring scheme, etc.

Key words: urban drainage network; optimized layout of monitoring stations; deficiency and improvement

加强排水管网的监测,对保护排水设施、健全城市信息化管理具有重要意义^[1],在城市雨洪管理方面,更是保障城市水安全、减轻城市防洪压力、缓解水资源短缺以及改善水环境质量的关键环节^[2],监测技术在排水管网运行管理中应发挥更为积极与重要的作用^[3]。2014年,住建部提出建设海绵城市,加强对城市雨洪的管理;2015年又进一步提出了海绵城市考核评估办法,在海绵城市建设、管理与评估的背景下,对城市排水管网监测工作提出了进一步的要求。随着互联网及大数据的应用,对排水管网的管理提出了新的要求,智慧排水应当做到信息化、实时监控、智能化^[4],其基础是进行排水管网的有效监测。

目前已有不少研究着眼于排水管网监测方面,主要集中于排水管网信息管理及系统的设计,王美秋^[5]以地理信息系统(GIS)为基本框架,进行了排水管网地理信息系统设计、在线监测(SCADA)以及管网数学模型的设计;允爽等^[6]对城市内涝实时监测系统进行了研究,利用布置在检查井中的终端监测器,获得各监测点在暴雨发生时的实际水深,再结合GIS系统,使各点淹没情况在计算机上可动态显示;宋霄^[7]对城市排水管道的液位监测进行了研究,设计完成了可对水位进行实时监测的系统;何嘉莉^[8]针对城市内涝的特点,提出了城市内涝在线监控与信息服务数字化系统的设计方案,开发了一套城市内涝在线监控与信息服务数字化系统的软件;王言之^[9]以物联网技术为基础,开发设计了排水管网的实时监控系統。

在排水管网监测方面,除了建立在线监测系统,解决实现排水管网信息化技术方面的问题,另一个关键点在于监测点位的优化与布置。与所有监测类似,由于人力、物力、财力等都有限,监测点的布置目标是利用尽可能少的监测点,能全面反映被监测对象的相关信息^[10]。但目前的研究对排水管网监测点布置及优化的研究非常有限。袁景冬^[11]以城市排水管网水力建模为主要研究内容,涉及到了监测点优化布置的部分内容,但也提到国内外对排水管网系统上的监测点进行优化布置的研究还未见诸报端。国外有一些学者利用不同方法对该问题进行了一定的探讨,但也指出在该领域的研究非常有限,技术方法体系不完善,缺少方案的定量化分析手段,而无法为城市排水管网的实际监测提供足够的

理论支持^[12]。

以排水管网监测本身的特点为基础,介绍了目前有关排水管网监测点优化布置的研究进展。首先对排水管网监测点布置的需求与原则进行分析;然后结合给水管网监测点优化布置的研究,总结了排水管网监测点优化布置的方法;最后讨论了现有研究的不足,并对未来排水管网监测点优化布置研究进行了展望。

1 排水管网监测的目的

对排水管网进行监测的目的主要包括两大类,第一类是及时发现运行风险,辅助城市内涝或排水管网溢流时间的预警预报,第二类是积累排水管网的长期动态运行状况数据,用于城市排水管网运行情况的评估与诊断。针对不同的监测目的,在监测点布置时会有不同的侧重。

1.1 以城市内涝预警为目的

受近年来气候变化的影响,暴雨的频率及强度呈显著增加的趋势,城市化背景下,硬质化地面的比例不断提升,使得“逢雨必涝”、“逢暴雨必瘫”、“城市看海”成为常态。对排水管网进行监测,则可以随时了解城市各区域的积水情况,从而能及时预警,确保城市居民的生命及财产安全。但监测点位置如果布设不够合理,不仅会导致监测工作前功尽弃、浪费人力物力,还会对城市内涝管理及决策起到错误导向^[8]。

以及时发现运行风险为目的对排水管网进行监测时,主要关注水量方面的信息,以监测节点液位和流量为主。在监测点布置时主要考虑的原则包括:根据历史暴雨中实际内涝情况对监测点布置进行整体统一规划,保障代表性和均匀性;以现有排水管网设计方案为依据,在相对标高较高且确定不发生内涝的地段可适当减少布点,而在重点路段和内涝严重区域加强监测;监测设备可安装在内涝点路边和附近检查井内。

由于城市内涝问题主要跟城市降雨相关,监测时段主要关注降雨情况,尤其是大暴雨条件下城市排水管网的运行情况。

1.2 以了解排水管网运行状态为目的

在城市“智慧排水”概念提出后,对排水管网的监测已不仅局限于暴雨时期对城市内涝的预警,而是将排水管网的监测常态化,在管网中选择最具代表性的节点,通过监测这些节点的情况,尽可能全面

掌握整个管网的运行状态。为全面了解管网运行状态,不仅需要关注水量方面的信息,还需要综合考虑水质情况。

目前我国大部分城市缺少长时间的排水管网连续监测数据,不能客观分析排水管网的入流渗入情况,不能量化分析雨污混流比例,不能客观分析污水厂进水浓度低的症结所在。对排水管网进行长时间连续在线监测,可为排水管网评估诊断及污水厂运行能力提升提供有力的支撑数据,是保障排水管网及污水处理厂正常运行的有效手段^[13]。在降雨情况下,需要对不同降雨强度下的排水管网运行情况进行全面监测,了解管网运行负荷变化,量化分析因降雨导致的外来水增加比例,对水质的监测则可更加全面掌握城市非点源污染情况。

2 排水管网监测点优化布置的方法

针对不同的监测目的,所采用的方法与最终的点位选址会有一定差异。目前国内外专门针对排水管网监测点优化布置的研究相对有限,根据理论依据的不同,现有优化方法可大致分为两类:一类是以统计学理论为基础;另一类是以运筹学理论为基础。

2.1 以统计学理论为基础进行优化

国内对排水管网监测点优化布置的研究,大多以统计学理论为基础,核心是通过识别节点间相关性进行聚类,从而优化监测点。袁景冬^[11]利用模糊聚类 and 动态贴近度两种方法对排水管网监测点进行了优化布置,并对两种方法所得结果进行了对比。秦礼琦^[14]利用模糊聚类分析法优化了GZ市某排水区域的排水干管上的监测点。敖培等^[15]同样基于聚类的思想,在模糊C均值(FCM)聚类算法中引入细菌觅食算法(BFO),通过BFO求得最优解作为FCM算法的初始聚类中心,然后利用FCM算法优化初始聚类中心,从而求得全局最优解。

虽然在排水管网领域利用统计学思想进行监测点优化布置的研究有限,但聚类分析在给水管网监测点优化布置中已有广泛应用。周书葵等^[16]利用聚类分析的思想,结合配水管网拓扑结构图论模型,提出了能够反映城市供水管网中节点流量变化的压力监测点优化选址方法。黄廷林等^[17]针对给水管网测压点的优化布置,提出影响系数的概念,并采用模糊聚类法对影响系数进行分析。戴一明^[18]基于Kmeans聚类法对给水管网水压监测点进行了优化布置。

利用聚类分析的思想对管网监测点进行优化布置的过程主要是确定衡量节点相关性的指标,然后对节点间该指标的相近程度进行衡量并根据相关性的进行聚类,最后根据聚类结果选择每一类中的代表性节点,如图1所示。

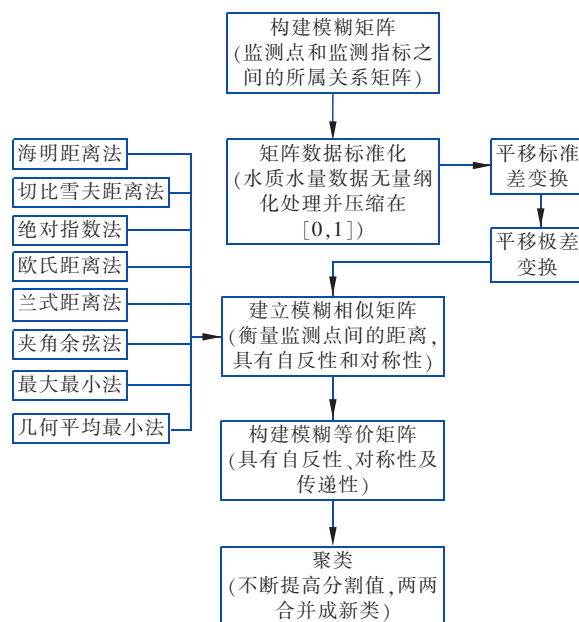


图1 基于模糊聚类法优化管网监测点流程

Fig.1 Optimization process of pipe system monitoring stations based on fuzzy clustering method

以统计学理论为基础进行管网监测点的优化布置,主要是从数据相似性的角度来反映节点间的关系。随着在线监测设备及监测平台的应用,监测所得数据量显著增加,以统计学理论为基础的优化方法更容易与大数据相结合,从数据的角度出发对管网拓扑结构进行认识。

2.2 以运筹学理论为基础进行优化

国外一些学者利用运筹学中的多目标规划模型对排水管网监测点的优化布置进行了研究。Fattoruso等^[19]将模型精度最大化和监测成本最小化作为规划目标,对液体比重计的监测位置进行了优化,监测主要针对城市内涝的预警。Banik等^[20]针对排水管网中水质监测点的优化进行研究,在多目标规划模型下,利用遗传算法进行求解,确定水质最优监测点。

相比于排水管网,给水管网监测点优化布置的研究要系统很多,有不少也综合运用了运筹学优化的思想。刘书明等^[21]提出了反映管网节点水量和

节点压力变化的节点覆盖水量和节点相关水压的多目标遗传算法,该方法可用于城镇大规模实际管网中,与现有的布设原则有较高的匹配度,可有效消除人为因素的影响,提高监测点优化选址的效率。同样利用多目标规划的方法,刘书明等^[22]还以探测到的不同污染事件的时段区间冗余度最小化和污染事件探测概率最大化为目标对水质监测点的优化选址进行了探索。Pinzinger等^[23]利用整数规划模型,应用遗传算法进行求解,对给水管网监测点进行了优化布置。

与基于统计学方法相比,以运筹学理论为基础对节点进行优化布置,更便于加入对不确定性的考虑与探讨。受降雨强度、场次降雨时间间隔等因素影响,排水管网各节点水量及水质都会有明显差异;而且我国目前多为雨污合流制,污水的排放也会对管网的水量水质产生明显影响。因此,在对排水管网监测点进行优化布置的过程中,需充分考虑不确定性的问题。

3 研究问题与展望

3.1 现有研究的不足

目前关于排水管网监测点优化布置的研究十分有限,优化布置方法主要借鉴给水管网领域,但排水管网与给水管网有着明显差别,给水管网属于有压流,可通过对水压的监测了解信息,而排水管网则不行。我国大多数城市排水管网存在雨污混流的情况,也进一步导致了排水管网的复杂性。

本文总结了排水管网监测点优化布置的两个主要目的,即:城市内涝预警和运行动态把控;在方法学上主要是借鉴给水管网,优化布置方法大致可分为以统计学理论为基础和以运筹学理论为基础两类。目前对排水管网监测点布置研究仍有明显不足,在一定程度上制约了对排水系统信息化的管理。

① 监测点优化的数据来源依赖于实际监测数据,信息量有限。目前国内研究主要依赖于实际监测数据,如以某天的监测数据为依据,选择最大流量、最小流量及COD作为指标,再进行一定的数据处理,作为衡量节点间相关性的依据^[14]。这样得到的优化结果只能说对某一天的排水或降雨情景适用。排水管网监测点一旦确定,将是一个长期获取数据量的过程,节点的代表性需要具有一定的广泛性,在不同情景下都能作为代表性监测点。

② 监测点的布置与优化依赖于人为判断,主

观性强。利用统计学方法对节点进行聚类分析的研究中,虽然设置了聚类原则,但很大程度上仍依赖于人为的判断,相关性的识别仅为辅助作用,更多依赖于人工对管网拓扑结构的分析与认识,监测点最终布置结果受人为因素影响较大。

③ 无法对大规模城市排水管网进行监测点的优化与布置。已有研究中的优化对象是现有监测点,如敖培等以某市23个排水干管监测点为研究对象进行进一步的优化与布置^[15],对于目前未被监测的节点则不作为研究对象。一方面,现有监测点未必是最优的监测布置方案;另一方面,对于尚未开展排水监测的区域,这一优化布置方法将无法进行应用。

3.2 研究展望

针对目前研究的不足,以基于统计学理论进行监测点优化布置的方法为基础,提出今后排水管网监测点优化布置的可行思路,如图2所示。该思路充分利用模型加强对多情景下排水管网运行状况的模拟,减少主观布点不确定性的影响,实现监测点的自动识别及监测方案的定量化评估。但是,图2所示的整体思路仅为排水管网监测点优化布置的基础,其中还有很多关键问题有待于进一步的研究:①充分利用排水模型进行模拟,获取不同情景下的数据。国外的一些研究中,用到了SWMM模型进行模拟^[12,19,20],而不仅局限于实际监测数据,这样为得到不同情景下管网运行状态提供了可能,尤其是一些极端降雨条件,在实际监测中可能存在缺失数据,但可通过模型模拟的方法进行补充分析。②将每个节点相关监测指标的数据在时间尺度上进行综合分析。在进行节点相关性分析时,不仅局限于最大水量或最小水量等单个数据,而可以用一场降雨期内,各节点的流量变化曲线来作为研究对象。每个节点的信息将概括为一条时间序列,通过对各时间序列的分析,来筛选代表性节点,将更加充分体现出节点的信息。③减少对人为判断的依赖,强化排水管网监测点的自动识别。对排水管网开展监测不仅是排水信息化管理的必要环节,也是对我国目前海绵城市建设效果定量化评估的主要数据来源。减少人为主观判断,能够更加客观地评估各城市海绵城市建设效果。④加强对排水管网监测点布置方案定量化评估的研究。目前的研究主要针对如何进行监测点的优化布置,得到一套监测方案,但对于得到的监测

如何进行量化评估还未开展研究,无法量化评估监测方案的优劣^[24,25]。

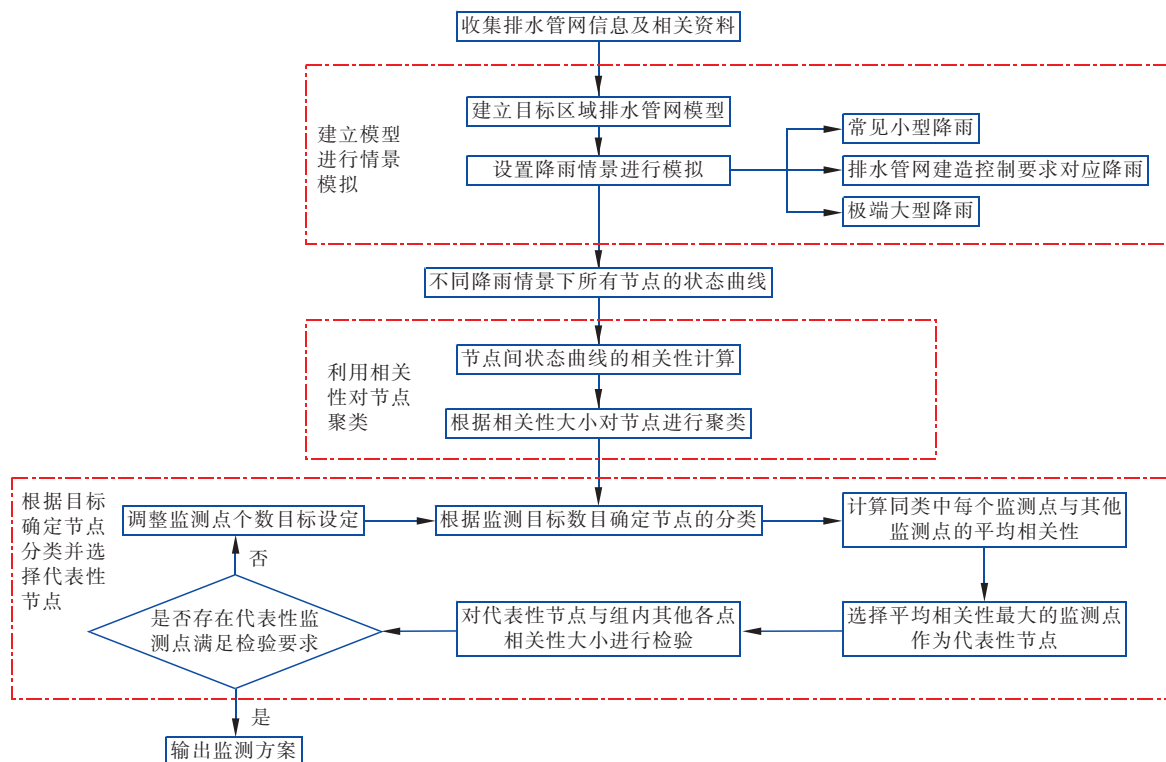


图2 排水管网监测点优化布置方法

Fig. 2 Optimized layout method of drainage network monitoring stations

4 结语

随着城市化进程的加快,在城市排水管理中需充分关注城市排水管网监测的问题。城市内涝预警和运行动态把控是开展排水管网监测的两个主要目的。目前对排水管网监测点进行筛选优化的方法主要可分为以统计学理论为基础和以运筹学理论为基础。但目前的研究都有限,存在明显不足,如:依赖于实际监测数据,信息量不足;对工作人员的主观判断有较强依赖性;对于大规模管网监测点的筛选优化不适用。今后排水管网监测点优化布置问题应充分利用模型的模拟,将各节点信息在时间尺度上进行分析,尽可能减少人为主观判断的影响,并加强对监测方案的量化评估。

参考文献:

- [1] 段军,宋鹏飞. MSDF 在城市排水管网监测系统中的应用研究[J]. 土木建筑工程信息技术,2010,(2):73-77.
- [2] 赵冬泉,邢薇,佟庆远,等. 基于数字排水技术的城市雨洪控制方案设计与评估[J]. 中国给水排水,2010,26(16):74-77.
- [3] 赵冬泉,王浩正,陈吉宁,等. 监测技术在排水管网运行管理中的应用及分析[J]. 中国给水排水,2012,28(8):11-14.
- [4] 刘琪. 基于物联网技术的排水管网信息管理系统[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [5] 王美秋. 排水管网信息管理系统设计[D]. 上海:同济大学,2007.
- [6] 允爽,刘志强,李娜. 城市内涝实时监测系统初探[J]. 防灾科技学院学报,2009,11(3):38-41.
- [7] 宋霄. 城市排水管道液位监测系统研究[D]. 济南:山东大学,2013.
- [8] 何嘉莉. 城市内涝在线监控与信息服务数字化系统设计及监测点优化布置研究[D]. 广州:华南理工大学,2014.
- [9] 王言之. 基于物联网的排水监控系统规划与设计[D]. 青岛:山东科技大学,2014.
- [10] 郭小青. 贴度法优化城市内河水水质监测点[J]. 科技通报,2005,21(3):360-363.
- [11] 袁景冬. 城市排水管网水力建模及其监测点优化布置研究[D]. 长沙:湖南大学,2010.
- [12] Lee J. Determination of optimal water quality monitoring

- points in sewer systems using entropy theory[J]. *Entropy*, 2013, 15(9): 3419–3434.
- [13] 李翊君. 杭州市某污水管网水质在线监测系统的设计[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(4): 49–52.
- [14] 秦礼琦. 聚类分析在优化排水管网监测点中的应用[J]. *贵州大学学报: 自然科学版*, 2013, 30(2): 123–125.
- [15] 敖培, 李明, 杨百顺, 等. 基于 BFO–FCM 聚类算法的排水管网监测点优化[J]. *科技创新导报*, 2015, (10): 86–86.
- [16] 周书葵, 许仕荣, 柳建祥. 城市供水 SCADA 系统管网流量监测点优化选址研究[J]. *湖南工业大学学报*, 2005, 19(4): 118–121.
- [17] 黄廷林, 丛海兵. 给水管网测压点优化布置的模糊聚类法[J]. *中国给水排水*, 2001, 17(11): 50–52.
- [18] 戴一明. 基于 Kmeans 聚类法的供水管网水压监测点优化布置[J]. *建筑安全*, 2014, 29(8): 74–77.
- [19] Fattoruso G, Agresta A, Guarnieri G, *et al.* Optimal sensors placement for flood forecasting modelling[J]. *Procedia Eng*, 2015, 119: 927–936.
- [20] Banik B K, Alfonso L, Torres A S, *et al.* Optimal placement of water quality monitoring stations in sewer systems: An information theory approach [J]. *Procedia Eng*, 2015, 119: 1308–1317.
- [21] 刘书明, 王欢欢, 徐鹏, 等. 多目标大规模供水管网监测点的优化选址[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2013, 53(1): 78–83.
- [22] 刘书明, 吴雪, 欧阳乐岩. 基于污染源反追踪的水质监测点优化选址[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2013, 41(5): 742–745.
- [23] Pinzinger R, Deuerlein J, Wolters A, *et al.* Alternative approaches for solving the sensor placement problem in large networks[A]. *Water Distribution System Analysis Symposium Conference*[C]. California: ASCE, 2011.
- [24] Bierman P, Lewis M, Ostendorf B, *et al.* A review of methods for analysing spatial and temporal patterns in coastal water quality[J]. *Ecol Indic*, 2011, 11(1): 103–114.
- [25] Strobl R O, Robillard P D. Network design for water quality monitoring of surface freshwaters: A review[J]. *J Environ Manage*, 2008, 87(4): 639–648.



作者简介: 郭效琛(1992–), 女, 山西太原人, 博士研究生, 研究方向为城市雨洪管理。

E-mail: guoxiaochen_92@163.com

收稿日期: 2017–06–17

推行节水灌溉方式和节水技术, 提高农业用水效率