

无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析

王欢欢¹, 刘书明^{1*}, 姜帅², 孟凡琳¹, 白璐¹

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 北京市大兴区水务局, 北京 102628)

摘要: 近些年, 无负压供水设备作为新型供水模式, 在城市二次供水管网中广泛使用。本研究针对无负压供水对整个管网的影响并不明确的现状, 分析了无负压供水模式对管网供水安全的影响, 利用管网水力学模型, 提出了一种无负压供水状态下的管网水力学模拟方法, 应用该方法建立了一种用以确定管网可承受安装无负压供水设备的最大节点数的方法, 将此方法应用于两个算例管网, 其结果表明算例管网中分别有 67%、89% 的节点不适合安装无负压供水设备。该方法简单实用, 推荐在管网设计与规划中使用, 以提高管网供水安全性。

关键词: 二次供水; 无负压供水; 水力模拟; 节点压力; 安全评价

中图分类号: TU991.33 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0163-06

Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility

WANG Huan-huan¹, LIU Shu-ming¹, JIANG Shuai², MENG Fan-lin¹, BAI Lu¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Daxing Water Resources Bureau, Beijing 102628, China)

Abstract: In the last few decades, anti-negative pressure facility (ANPF) has been emerged as a revolutionary approach for sloving the pollution in the Second Water Supply System (SWSS) in China. This study analyzed implications of the safety in SWSS with ANPF, utilizing the water distribution network hydraulic model. A method of hydraulic simulation and security assessment was presented which was able to reflect the number and location of nodes that can be installed in ANPF. Benchmark results through two instance networks showed that 67% and 89% of nodes in each network did not fit the ANPFs for installation. The simple and pratical algorithm was recommended in the water distribution network design and planing in order to increase the security of SWSS.

Key words: secondary water supply system, anti-negative pressure facility, hydraulic simulation, node's pressure, safety assessment

随着城市建设的加快, 高层建筑的日益增多, 二次供水设施已成为城市供水管网建设中不可缺少的一部分。二次供水设施从最早的水塔供水, 发展到无负压(管网叠压式)供水方式, 先后经历了四代供水方式, 其分别为水塔供水、楼顶水池供水、变频调速供水及无负压(管网叠压式)供水^[1]。采用无负压供水设备与市政供水管网直接串接, 变二次供水为一次直接供水到户, 不用建水池、水箱。无负压供水设施作为一种给水增压新设备, 不仅比普通变频调速供水设施更节能, 而且可有效避免市政管网水质二次污染^[2]。然而作为从管网中直接供水方式, 无负压(管网叠压式)供水方式存在供水可靠性不高、技术不成熟等缺点, 与此同时, 无负压供水设备产品质量参差不齐, 如果不加限制地允许无负压供水设备在市政管网中取水, 很有可能使管网超过其承受能力, 直接威胁供水安全^[3,4]。

无负压供水设备是在变频恒压供水设备上发展起来的, 真空消除器是无负压供水设备的核心装置, 依靠它消除管网节点的负压, 从而不影响用户用水,

保护管网与设备, 达到市政供水的要求^[5]。然而, 无负压供水设备的原理并未保证除安装无负压供水设备的节点外的压力变化能够符合市政管网的供水要求, 可能导致当市政管网中安装无负压供水设备时会对管网其他节点造成压力不足甚至负压的情况出现。

针对上述问题, 部分研究学者指出使用无负压供水设备的吸水管管径应比接入管的管径至少小两级或者两级以上, 或者不大于接入管管径的 1/3^[6], Tian 等^[7]利用 AHP(层次分析方法)比较了二次供水的多种方式, 分析了无负压供水设施的系统影响。但 AHP 作为一种主观程度很高的分析算法, 其应用结果并未显示管网的整体性能。王芳群^[8]等研究了基于管网水力计算的无负压供水的模拟与预测, 利

收稿日期: 2012-03-02; 修订日期: 2012-07-06

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07425-006)

作者简介: 王欢欢(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市供水系统模拟与优化, E-mail: huanhuanwang2010@163.com

* 通讯联系人, E-mail: shumingliu@tsinghua.edu.cn

用 Flowmaster 软件,模拟无负压泵站瞬态与稳态分析,得到管网的局部压力区域分布情况。Wu 等^[9]和 Smith 等^[10]提出二次供水系统的消毒的生物影响和二次供水灌溉的应用。目前,对城市二次供水的水质污染影响、水质保障和二次供水技术的比选研究较多^[11~21],但针对特定二次供水方式模拟与评价的研究较少^[22]。大部分学者均未从水力模拟角度来考虑无负压供水设施对于整个管网节点的压力影响。从实际情况得知,无负压供水设备从管网中超量取水、运行异常等均有可能导致泵站上游、临近用户和下游用户局部供水不足甚至管网负压事故。

为确定具体二次供水方式的特征,细化对比新型供水方式的评价,本研究利用 EPANET 软件模拟安装有有负压供水设备的城市供水管网(无负压供水管网)的运行情况,并根据其节点压力结果,对管网中安装无负压供水设备的节点(无负压供水节点)需水量模式进行修正,再次模拟管网水力运行情况,进而得到无负压供水模式可能影响的管网中其他的节点,评价此无负压供水节点对管网整体性能的影响程度,并将该方法应用至两个算例管网,以期为我国二次供水方式选取提供参考。

1 材料与方法

1.1 无负压供水管网模拟与评价方法

模拟无负压供水管网需要先建立一个普通的管网模型,利用水力方程求解,进行管网普通的水力模拟。其具体求解的水力方程为:

节点连续方程:

$$\sum Aq + Q = 0 \quad (1)$$

管网能量平衡方程:

$$lh = 0 \quad (2)$$

管段压降方程组:

$$h = sq^n \quad (3)$$

式中 A 为节点连接的衔接矩阵(联系矩阵); Q 为管网系统的节点流量; q 为管网系统中连接节点的管段流量; l 为管段回路矩阵; h 为管网系统中管段水头损失; s 为管网系统中的管段摩阻。

依据上述水力方程组进行求解,得到管网水力模拟结果,即各个节点和管段的基本属性值,如节点的压力,管段的流量与流速等。

无负压供水设备的水力特性是:管网水进入稳流罐,排出空气,水充满后,真空消除器关闭。当管网的压力满足用户需求时,供水系统通过旁通止回阀直接向用户供水,当压力不满足需求时,压力信号

就会反馈到控制器,水泵根据用水量的大小自动调节转速恒压供水。用水高峰时,当管网用水量小于水泵流量时,稳流罐内的水作为补充,仍然可以正常供水。空气由真空消除器进入稳流罐,破换真空环境,确保管网不产生负压。当管网停水时,造成稳流罐液位急速下降,其探测信号反馈给变频控制器,水泵自动停机。当夜间小流量且水压不满足要求时,气压罐贮存并释放能量,避免水泵频繁启动。

根据无负压供水设备的运行原理,可以将其设备模拟简化成安装无负压供水设备的节点不出现负压来实现。如果供水系统在无负压供水节点濒临出现负压时,则修改节点需水量模型下此时间点的用水量为零,然后重新进行水力计算,直至模拟运行时间结束,无负压供水节点正常供水且不出现负压为止,从而实现对无负压供水设备的模拟。在无负压供水节点用水量模式的影响条件下计算管网中其余节点的压力和流量。在模拟过程中,考虑到无负压供水系统中泵站的吸水管路和压水管路的水头损失及由开停泵所造成的水锤等因素的损失,均通过改变无负压供水节点的需水量模式来模拟一个单独的无负压供水设备。若是多个相连节点均设置无负压供水节点,则不在前期考虑其相互作用对管网水力计算的影响,仅考虑其水力模拟后各自对管网节点的压力影响。此种方法既可以简化无负压供水设备的模拟细节,又突出无负压供水设备的核心特点。具体模拟方法流程为见图 1。

无负压供水设备的模拟对城市供水管网的压力分布有着重要影响,当管网中安装无负压供水设备后,在用水高峰期时,管网压力会随之降低,甚至可能在管网其他节点可以出现负压。是否符合无负压供水设备核心特点的模拟是判断其模拟结果正确与否的关键因素。当节点安装无负压供水设备后,在管网任何运行工况下其安装节点都不出现负压。在即将出现负压时,其节点供水进行调整,使本节点不出现负压为调整标准,调整整个管网供水压力以满足此标准。

在无负压供水管网系统模拟时,当管网中除无负压供水节点外有其他节点在模拟运行时刻出现了压力大范围波动、节点负压,则此无负压供水节点不适合安装无负压供水设备,称此节点为敏感节点。在此位置设置无负压供水节点时需仔细衡量水力影响且避免安装无负压供水设备。当管网节点在设置无负压供水节点模拟前后其压力变化值不超过 20% 时且管网中其余节点没有负压产生,则可认为

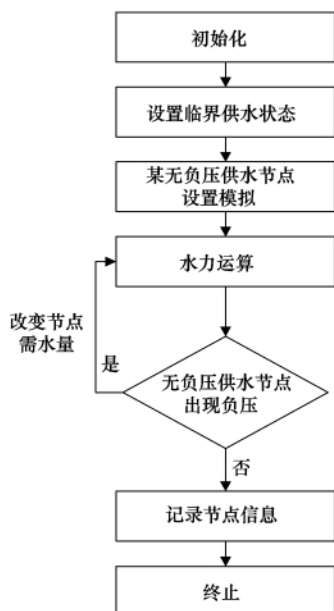


图1 无负压供水管网系统模拟方法流程

Fig. 1 Flow chart of simulation for SWSS with ANPF

此无负压供水节点可安装无负压供水设施,称此节点为不敏感节点.在此位置设置无负压供水节点时只需考虑其稳流补偿罐容积、居住小区供水管接管点的最低正常水压等条件即可.当将管网中所有节点均历遍安装一次无负压供水设备后,可得到此管网中无负压供水节点的适宜安装位置与不适合位置和节点压力列表.根据影响节点数、节点压力变化范围与管段流向变化,确定无负压供水节点对管网的影响程度,列出管网中敏感节点列表.具体评价方法流程见图2.

在某一管网中利用此方法得到该管网中的敏感节点列表,与现存的无负压供水设备安装数量进行对比,即可得到此管网的无负压供水设施安装是否已经过于拥挤,导致管网不能正常供水、满足用户需求,得到管网中是否具有安装无负压供水设备的能力,提高管网的安全供水,避免管网中出现压力不足甚至负压情况.因此为了满足管网中水量和水压要求,在管网中安装无负压供水设施之前需进行模拟比较,确定其安装的可行性与影响程度,以保证用户用水的安全可靠性.

此评价方法利用水力学原理和软件模拟相结合,基于管网整体性能影响,统计衡量节点的压力变化,得到敏感节点列表,计算无负压供水管网系统的无负压供水影响程度.在管网规划与设计时,可靠实用,可提高管网供水安全性,为决策者提供用力工具.

1.2 研究区域

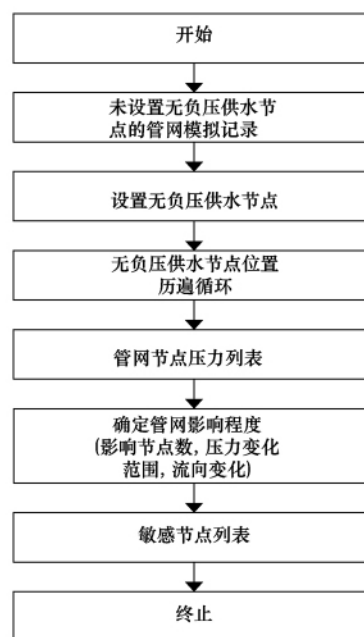


图2 无负压供水管网系统评价方法流程

Fig. 2 Flow chart of evaluation for SWSS with ANPF

EPANET 中的示例(算例)管网是进行管网模拟与分析算法研究的常用算例.本研究中采用其中的两个管网来进行模拟算法的正确性验证和性能评价.

Net1 管网中有 2 个水源(1 个水池, 1 个水库), 9 个用水节点, 12 条管线, 1 个水泵(图3); Net3 管网中有 5 个水源(3 个水池, 2 个水库), 92 个用水节点, 117 条管线, 2 个水泵(图4).两个管网中,各个用水节点上都已有节点需水模式,且假设管网节点

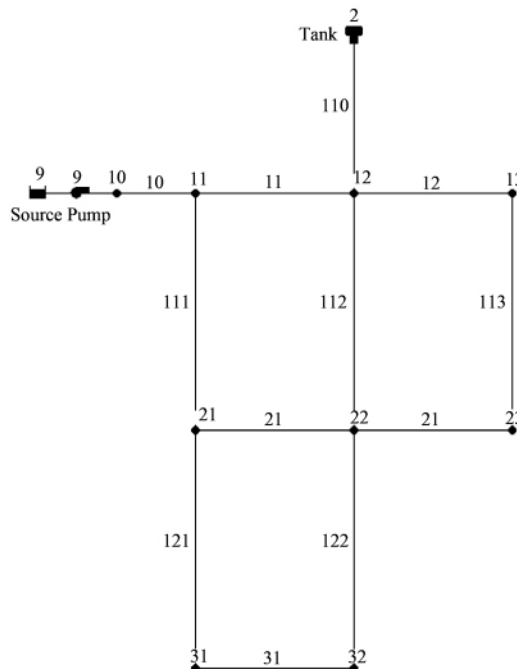


图3 EPANET 的管网 1

Fig. 3 Schematic diagram of Net1 in EPANET

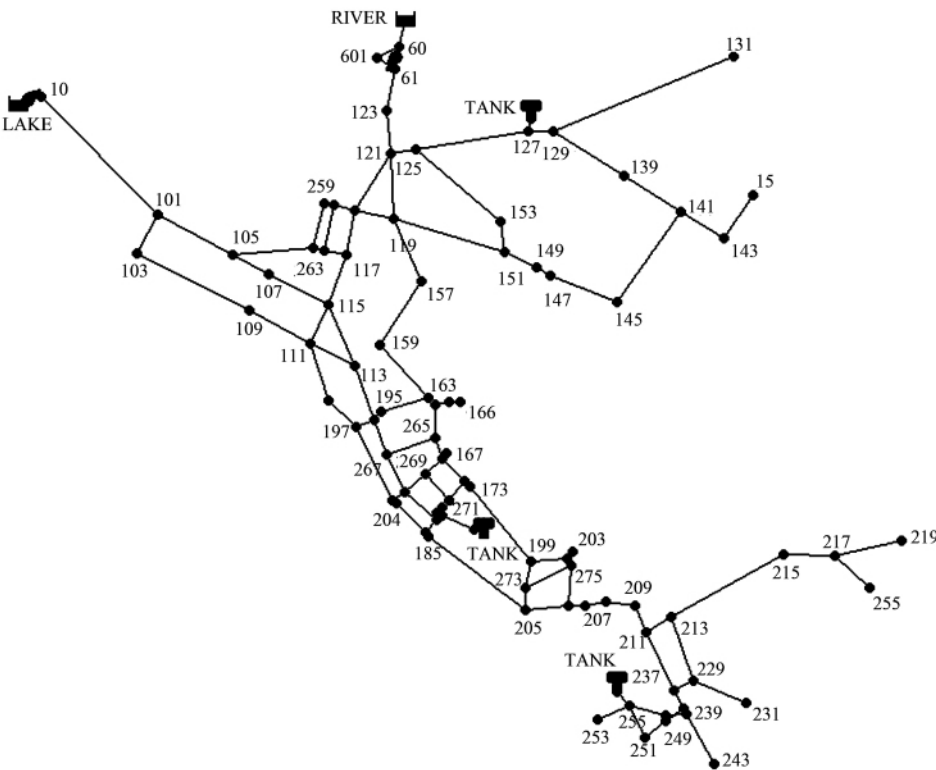


图 4 EPANET 的管网 3

Fig. 4 Schematic diagram of Net3 in EPANET

均可安装无负压供水设备,各条线路上都有已用给水管道,水力模拟时间步长为 1 h,无负压供水模拟时间精度为 1 s,模拟时长为 24 h.

1.3 分析方法及数据处理

本研究应用 EPANET 软件平台模拟管网水力学,从管网整体性能评价出发,利用管网中其他节点的压力变化来评价无负压供水节点的影响. EPANET 是一款由美国环境保护署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)国家风险管理研究所主持开发的进行管网水力、水质模拟分析的开源软件包^[23 24]. 该计算引擎的核心是梯度算法(Todini-Pilati 算法)^[25],可同时求解节点压力和

管线流量. 相比于其他正向问题算法具有一定的优势^[26]. 本研究利用 Matlab 软件环境编写模拟程序进行求解.

2 结果与讨论

利用上述提出的无负压供水管网系统的模拟和评价方法,将管网 1 和管网 3 算例管网均设置成可以安装无负压供水设备的管网,在各个节点上依次利用无负压供水设备模拟方法,修改节点属性,检查其是否符合无负压设备的安装要求且满足非敏感性节点的条件,即按照图 1 与图 2 所示的流程图进行管网的模拟与评价. 其运算结果见表 1.

表 1 管网 1 与管网 3(部分)无负压供水节点影响列表

Table 1 Affected nodes list of SWSS with ANPF in Net1 and Net3

管网 1			管网 3(部分)		
无负压供水节点编号	其余节点压力影响情况	可能影响节点	无负压供水节点编号	其余节点压力影响情况	可能影响节点
10	是	11、21、23	15	是	143、141、145 等
11	是	10、12	117	是	119、121、120 等
12	是	21、11	125	是	125、153、127 等
13	否		193	是	195、113、267 等
21	是	10、22	207	是	205、275、184 等
22	是	10、21、12、32	225	否	
23	是	10、12、13	231	否	
31	否		239	是	241、247、249 等
32	否		243	否	

2.1 无负压供水设备对管网模拟的影响

由运行结果得知管网 1 中,有 6 个节点安装无负压供水设备时会对管网其他节点造成负压影响,即约 67% 节点不适合安装无负压供水设备;管网 3 中,有 82 个节点安装无负压供水设备时会对管网其他节点造成负压影响,即约 89% 节点不适合安装无负压供水设备. 通过修改无负压供水节点位置和逐步增加无负压供水节点数量后,得到:管网 1 中承受安装无负压供水节点的最大数量为 3 个节点,管网 3 中承受安装无负压供水节点的最大数量为 9 个节点.

2.2 无负压供水设备对管网安全评价的影响

在管网 1 中,节点 10 与 12 受无负压供水设备影响程度最大,其位置为敏感节点且在管网运行中为易出现负压的节点;在管网末端处(如节点 31、32)受无负压供水节点的影响程度最小且在其节点上安装无负压供水设备后不会导致管网其余节点出现异常情况,说明此管网在管网末端处有很大的可扩展能力,冗余能力程度高. 在管网 3 中,由于部分管网末端(如节点 25、231、243、166)输水距离长,节点需水量小,在其位置上安装无负压供水设备时均对管网其余节点影响较小;在多条管网段交汇处(如节点 125、193、239)由于其节点连接管段较多,输水距离较短,在其位置上安装无负压供水设备后管网压力变化范围大,导致管网中多个节点在不同时刻均出现负压,对管网影响程度较大.

结果显示,两个管网中,无负压供水节点的影响范围均为上游用户、临近用户(多为平行节点)和下游局部用户. 在管网模拟中,无负压供水节点会导致上述影响范围供水不足以至管网多处负压事故,与实际情况相符. 因此在管网安装无负压供水设备时需要提前进行管网模拟评价,以减少不必要的损失.

3 结论

(1) 无负压供水管网模型的 EPANET 水力模拟能够分析无负压供水设备运行对此节点的上游和临近管网节点的影响,分析是否可能存在供水压力不足的现象,预测对管网节点其他用户的水压影响程度.

(2) 基于管网整体性能的无负压供水设备模拟从水力学计算的角度验证了无负压供水设备在管网中的压力影响,因此在设计和规划阶段,需进行无负压供水设施对整个管网运行的安全性论证,尤其是

水力计算模拟;在运行阶段需加强管理,保证无负压泵站下游、上游及其整体管网运行安全. 管网中干管上使用无负压供水设备需有规划,做到合理的水量分配.

(3) 无负压供水设备的实际运行情况较为复杂,此模型中没有考虑多节点无负压供水设备的相互影响,如果在多个节点中设置无负压供水设备的相互影响,模型的精度还有进一步提高的可能性. 此模拟方法目前仅在两个算例管网中进行应用,还需其在实际大型管网中进行研究与应用,进一步提高其算法的可靠度、应用的广泛度.

参考文献:

- [1] 李世英. 直接式管网叠压供水与传统供水方式的比较[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2002, 28(5): 441-443.
- [2] 谢中良. 无负压二次供水方式探析[J]. 湘潭师范学院学报(自然科学版), 2009, 31(3): 64-65.
- [3] 马成环. 无负压给水设备及管网准用的技术条件[J]. 给水排水, 2005, 31(7): 81-84.
- [4] 刘忠. 谈管网叠压(无负压)给水设备的正确应用[J]. 给水排水, 2007, 33(6): 87-90.
- [5] Pretner A. Optimizing and controlling water supply system: Athens Pilot Project [A]. In: Proceedings of the European Water Resources Association Conference [C]. 1997, 9: 439-444.
- [6] 樊建军, 魏晓安, 王峰. 管网叠压供水技术存在的主要问题及解决途径[J]. 中国给水排水, 2006, 22(22): 39-42.
- [7] Tian Y M, Si Y J, Li H, et al. Evaluation and optimization of secondary water supply system renovation [J]. Journal of Zhejiang University Science, 2007, 8(9): 1488-1494.
- [8] 王芳群, 宋顺林, 李岚, 等. 基于管网水力计算的无负压系统供水不足的预测分析[J]. 节水灌溉, 2010, (11): 37-45.
- [9] Wu Q, Zheng Y, Zhao C Y, et al. Research on the distribution of bacterium in secondary water-supply systems [A]. In: Proceedings of the 2010 4th International Conference Bioinformatics and Biomedical Engineering (ICBBE) [C]. Chengdu: IEEE, 2010. 1-4.
- [10] Smith S W. Secondary water systems for landscape irrigation: issues and opportunities [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2009, 23(2-3): 125-129.
- [11] 舒青松. 给水管网与二次供水系统的水质研究及运行维护和改造[J]. 给水排水, 2010, 26(1): 98-101.
- [12] 俞海霞, 张德跃, 陈豪. 二次供水水质的保障措施[J]. 中国给水排水, 2009, 25(2): 84-86.
- [13] Li Y F, Zhang X N, Chen W T. Analysis of the energy efficiency of frequency-changing water supply by secondary pressurizing in residence community [J]. Advanced Materials Research, 2011, 243-249: 4778-4782.
- [14] 王洋, 牛璋彬, 张晓健, 等. 水源更换对给水管网水质的影响研究[J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2275-2279.

- [15] 侯金霞,刘遂庆,信昆仑,等. 镇江市供水管网二次增压节能技术方案分析[J]. 中国给水排水,2008,24(20): 82-85.
- [16] 尤博文,严斌,魏炜. 南京市二次供水 SCADA 系统的设计与运行[J]. 中国给水排水,2011,27(4): 50-53.
- [17] 孙坚伟,吕娅琼,周云,等. 上海市二次供水水质现状调查研究[J]. 给水排水,2009,35(8): 9-12.
- [18] 朱鹏利,陈听学. 绍兴市高层住宅二次供水设施的方案选择与技术标准[J]. 中国给水排水,2011,27(22): 42-44.
- [19] 沈亚辉,周良法. 二次供水技术及方案比选[J]. 中国给水排水,2007,13(18): 55-58.
- [20] 白晓慧,张明德,贾程慎. 上海某黄浦江原水供水系统中主要致嗅物质的迁移规律分析[J]. 环境科学,2011,32(1): 120-124.
- [21] 承明华,陈晓东,周明浩. 60 起管网及二次供水污染事故分析[J]. 环境与健康,2002,19(1): 91-93.
- [22] 李一凡,郑应文. 二次供水系统用水模型与抽水策略[J]. 福州大学学报(自然科学版),2002,30(1): 63-65.
- [23] Rossman L A. EPANET 2 User's Manual[M]. Cincinnati, OH: National Risk Management Research Laboratory Office of Research and Development U. S. Environmental Protection Agency,2000.
- [24] Walski T M, Chase D V, Savic D A, et al. Advanced water distribution modeling and management [M]. USA: Bentley Institute Press,2007. 181-218.
- [25] Simpson A, Elhay S. A framework for alternative formulations of the pipe network equations[A]. In: Proceedings of 11th Annual Symposium on Water Distribution Systems Analysis[C]. Kansas City USA: ASCE Press,2009. 137-151.
- [26] Savic D A, Banyard J K. Water distribution systems[M]. USA: Institution of Civil Engineers Publishing,2011. 145-169.