

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0342

基于排水性能图谱的污水管网水力分析评估研究

蒋佩杭, 黄 标*, 刘甲春

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 排水管网过流能力对于评估其运行状况至关重要, 现有的在线流量监测成本普遍偏高. 本研究基于排水性能图谱提出了一种利用监测多个检查井液位以推求管网动态流量的新方法, 并应用于宁波某典型片区污水管网水力分析与模拟计算, 结果与暴雨洪水管理模型模拟输出数据进行对比, 表明流量监测结果最大误差不超过 5%, 间接推导得到水深结果最大误差不超过 8%. 基于排水性能图谱对影响该排水管网系统最大过流能力的瓶颈管段进行了诊断分析, 并提出描述管道内水流充满度的新参数, 以反映排水管网的负载情况. 基于排水性能图谱对排水管道系统进行非恒定流演算, 其中节点流量演算结果的最大相对误差为 5%, 节点水深演算结果的最大相对误差为 6%, 表明该方法具有较高准确性和效率.

关键词: 排水管网; 流量监测; 水力性能图; 水量性能图; 排水性能图谱; 非恒定流演算

中图分类号: TU992.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 06-0077-08

城市排水管网在线监测系统通过监测管网流量和液位, 对超警戒线的情况发出实时预警, 同时对排水管网可能出现的故障点进行快速判断与定位, 可显著提高故障处理的反应速度与城市排水系统管理水平^[1-2].

目前较普遍的流量监测方法建立在速度面积法基础上, 利用超声波流量计等设备对排水管道进行监测, 虽然监测结果较准确, 但流量计成本较高, 难以展开大范围的流量监测^[3-7].

Bakhmeteff^[8]提出了一种流量—液位关系曲线, 用来描述连接两个不同水位的水库之间棱柱形缓坡河道中的流量. 一系列不同恒定流量 Q 对应的曲线可统一绘制为一个通用图表, 该图表可给出河道在所有可能的上下游液位组合下的流量. Yen 等^[9]扩展了上述流量—液位关系曲线的概念, 提出了一种名为水力性能图(HPG)的通用方法, 以总结在渐变流(GVF)条件下不同恒定流量与河道两端水面高程之间的相关关系^[10]. HPG 由一组表示恒

定流量的曲线组成, 其中的每一条曲线被称为水力性能曲线(HPC), 表示给定河道一个恒定流量值时, 河道上游和下游的水位关系. Gibson 等^[11]和 González-Castro 等^[12]将以 HPG 近似表示的动量守恒方程与表示河道连续性方程的有限差分法进行耦合, 成功对河道非恒定流进行了模拟演算.

以往研究表明, 已知排水管网系统中所有节点的液位即可推算管网中各个管道的流量. 然而通常情况下排水管网系统中的节点数量非常庞大, 依靠所有节点的液位对整个排水管网进行流量监测需要较高的设备与人力维护成本^[13-15]. 因此, 本文旨在利用低成本压力传感器连续测量液位, 进而实现对流量动态变化的间接监测, 通过对排水管网液位与流量之间关系的深入研究, 基于排水管网中有限节点的液位数据, 推算管网中主要管道动态流量和未布置液位计节点的液位变化, 并应用该技术对宁波某典型片区排水管网系统的过流能力进行分析演算.

收稿日期: 2023-03-28.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.lg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY21E090003); 浙江省省属高校基本科研业务费专项(SJLZ2021004).

第一作者: 蒋佩杭(1997—), 男, 四川达州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 市政管网模拟与监测. E-mail: jiangpeihang6061@163.com

*通信作者: 黄标(1988—), 男, 河南郑州人, 博士/副教授, 主要研究方向: 城市水力学、市政管网模拟与监测. E-mail: huangbiao@nbu.edu.cn

1 研究方法对象

1.1 HPG 与水量性能图(VPG)构建

对于明渠非均匀恒定流, 上游水位、下游水位和流量之间的关系是非线性的, 其中水流深度在空间上的变化可以用回水微分方程来描述^[16]:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{1 - F^2}, \quad (1)$$

$$S_f = \frac{v^2 n^2}{K_n^2} R^{\frac{4}{3}}, \quad (2)$$

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD_m}}, \quad (3)$$

式中: h 为水流深度; x 为沿河道方向距离; S_0 为河道底坡坡度; S_f 为河道摩擦坡度; v 为水流流速; n 为曼宁系数; $K_n = 1$; R 为水力半径; g 为重力加速度; D_m 为平均水深。

从渐变流方程可以看出, 对于任何给定的上下游水深组合, 都可以唯一确定一个流量值。若给定管径 300 mm, 曼宁系数 0.012, 则基于上述方程构建的底坡类型为缓坡(坡度 0.1%, 管长 100 m)与陡坡(坡度 1%, 管长 10 m)时的 HPG 如图 1 所示。

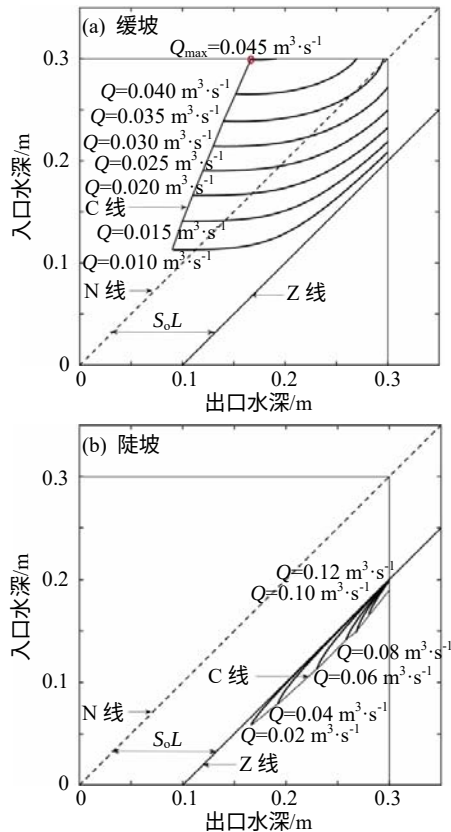


图 1 HPG 示例

对于有压流管道, 上游水位、下游水位和流量之间的关系满足方程:

$$Q = A_0 \sqrt{\frac{\Delta y \left(\frac{D}{4}\right)^{\frac{4}{3}}}{n^2 L}}, \quad (4)$$

式中: Q 为有压流管道中的流量; A_0 为管道横截面积; Δy 为管道上游与下游液位之差; D 为管道直径; L 为管道长度。

由于当水深接近管径时, 湿周的增加速率比过水断面面积快, 水流快速加压, 导致水深和储水体积发生数值振荡, 因此, 将 HPG 扩展到有压流时还需要进行特殊处理^[17]。当水深处于 $0.8D$ 到 $1.2D$ 的过渡区时, 对于给定的下游水深和流量存在两种可能的上游水深, 因此, 图 1 中的每一条 HPG 会分成两条曲线。而通过公式(4)将加压流纳入 HPG, 则可在过渡区内识别唯一上游水深。为解决明渠流(下游水深小于 $0.8D$)和加压流的 HPG 曲线之间的不连续性问题, 使用公式(4)计算下游深度为 $1.2D$ 时的所有恒定流量所对应的上游水深, 如图 2 所示, 80%满流与下游深度为 $1.2D$ 的有压流情况用直线连接作线性处理, 当水深和流量超过 120%的管道满流条件时, HPG 曲线遵循公式(4), 此后在同一流量下每增加一次下游水深, 只有一个上游水深与之对应。

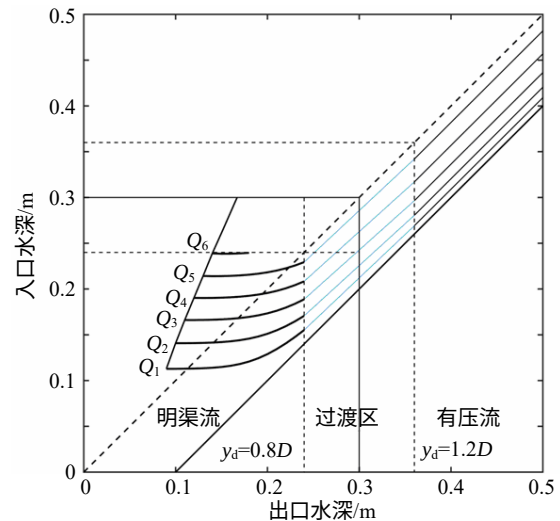


图 2 扩展至有压流工况的 HPG

Hoy 等^[18-19]为了避免繁琐的有限差分计算, 引入了 VPG 这一概念来反映质量守恒, 并且成功地利用 HPG 和 VPG 对河道准恒定流进行了演算。其

中, 准恒定流是指在一定计算时间步长范围内流量变化速率较慢的非恒定流, 而在模拟演算中可将每个计算时间步长内的流态视为恒定流处理, 进而在保证计算精度的同时大大减少计算量^[20-21]. 图3所示为图1缓坡管道所对应的VPG示例.

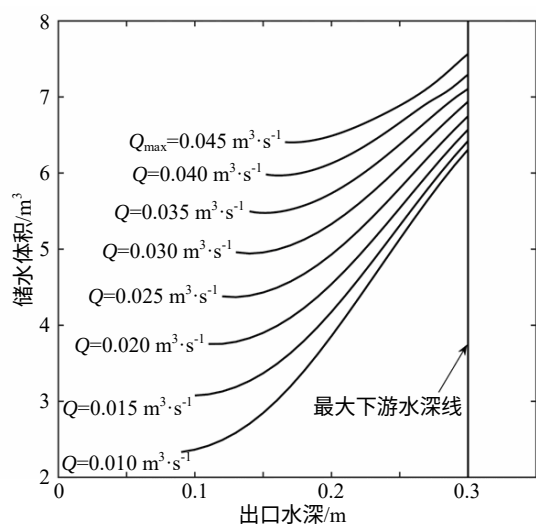


图3 VPG示例

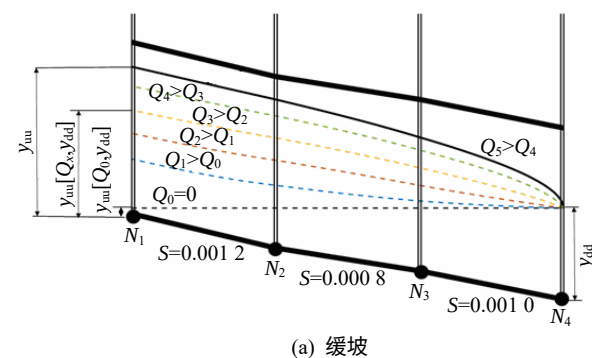
1.2 特殊管网组合工况下的管道流量及两端液位间接推测

根据前文所述, 对于已知基本物理参数的排水管网, 可绘制每一根管道的HPG, 当整个排水管网的每个节点都布置液位计后, 即可通过每根管道的HPG和管道上下游两端的液位对管道的流量进行动态监测.

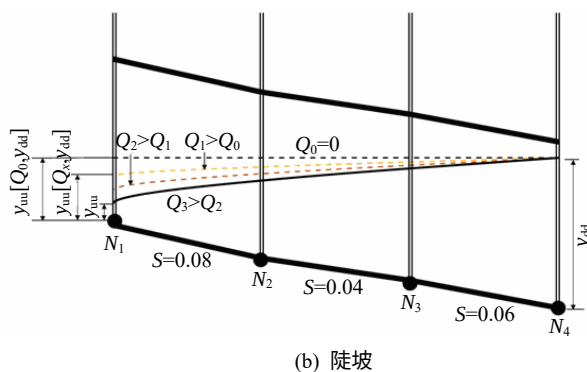
进一步, 根据缓坡HPG(图1(a))可知, 当管道的底坡类型为缓坡且管道下游水深 y_d 固定时, 管道上游水深 y_u 随着管道内流量的增加而单调递增. 因此, 对于由 n 个缓坡管道串联组成的简单管网组(图4(a)), 已知管道组最上游端水深 y_{uu} 与最下游端水深 y_{dd} 时, 即可唯一确定管道组中的流量 Q 和管道组中每个节点处的水深 y_x .

同理, 对于由 n 个陡坡管道串联组成的简单管网组(图4(b)), 若已知管道组最上游端管道水深 y_{uu} 与最下游端管道水深 y_{dd} , 也可唯一确定管道组中的流量 Q 和管道组中每个节点处的水深 y_x . 然而, 当不同底坡类型的管道进行串联组合时, 由于单根管道的上游水深在下游水深固定时随流量变化的单调性不同, 无法只通过上述条件得出相应结论.

因此, 当同类型底坡管道串联组合且中间没有其他分支管道汇流时, 可通过在管道组最上游端入口和最下游端出口布置液位计分别得到上游水深 y_{uu} 和下游水深 y_{dd} , 由此计算得到管道组平均流量 Q 以及管道组中每一个节点处的水深 y_x . 进而可对管网监测的液位计布置方案进行优化, 只保留关键节点的液位计, 利用建立在HPG基础上的算法对整个管网系统的流量和液位进行动态监测.



(a) 缓坡



(b) 陡坡

图4 串联管线水面线示意

1.3 研究案例

以宁波某典型片区的排水管网系统(图5)为研究对象, 该系统服务于包含45栋住宅楼在内的两个小区, 其南北跨度738 m, 东西跨度335 m, 总覆盖面积约为15 400 m². 该排水管网系统主要包括82个检查井节点、1个排水口节点和82根排水管道. 节点编号如图5所示, 其中节点1、7.1、10.1、13.1、17.1、21.1、28.1、32.1、70.1、59.1、52.1、52.2、42.1、42.2为该排水管网系统的14个主要入流口, 节点37为管网系统的排水口. 管道通过其上下游两端的节点定义, 如节点1和节点2之间的管道记为管道1-2. 该管网系统整体以自北向南、自西向东的流向完成排水过程, 主干管皆由管径

300 mm 的管段组成, 其中最小管段坡度为 0.02%, 最大管段坡度为 2.18%。将该排水管网系统结构作为案例建立在暴雨洪水管理模型(Storm Water Management Model, SWMM)软件中, 输入每根管道和每个节点的基本物理参数, 对 14 个主要入流口节点输入非恒定流量时间序列, 确定演算的时间步长和结果报告的时间间隔, 以动态波模型对管网系统进行模拟演算。演算完成后, 输出在任意时间点上每根管道的流量和每个节点的液位。以图 5 中绿色(浅色)标记处为液位计布置点, 以 SWMM 运行输出的节点液位作为本文基于 HPG 所提出的新监测方法(HPG 衍生法)的输入数据, 经过运算后得到管道内平均流量及未布置液位计处节点液位的理论结果。

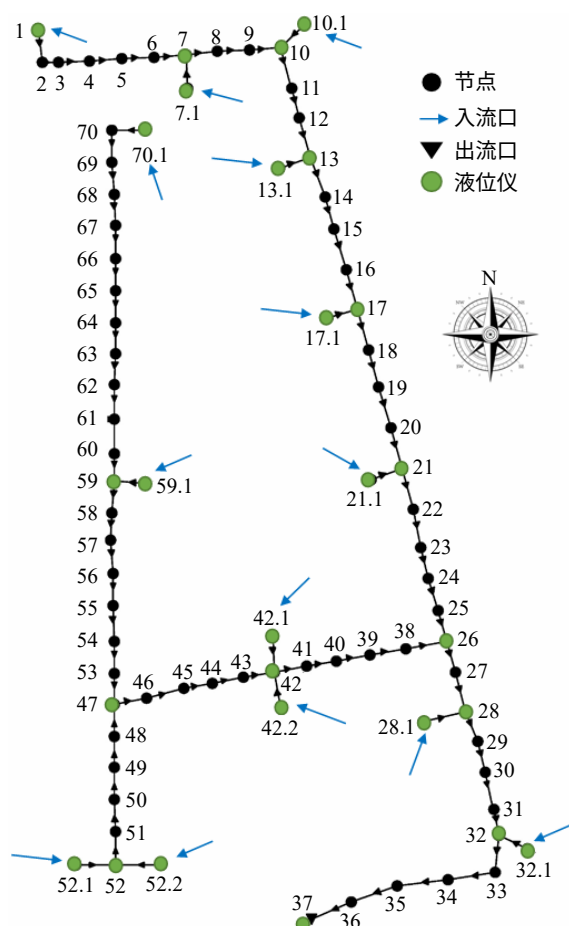


图5 宁波某片区排水管网拓扑及液位计布置方案

2 结果和讨论

2.1 流量及液位监测

将主干管线的 SWMM 模拟演算结果和基于

HPG 衍生法得到的结果进行对比, 部分流量和水深结果分别如图 6 和图 7 所示, 其中主要管道平均流量最大相对误差不超过 5%, 主要节点水深最大相对误差不超过 8%, 均表现出良好的一致性。

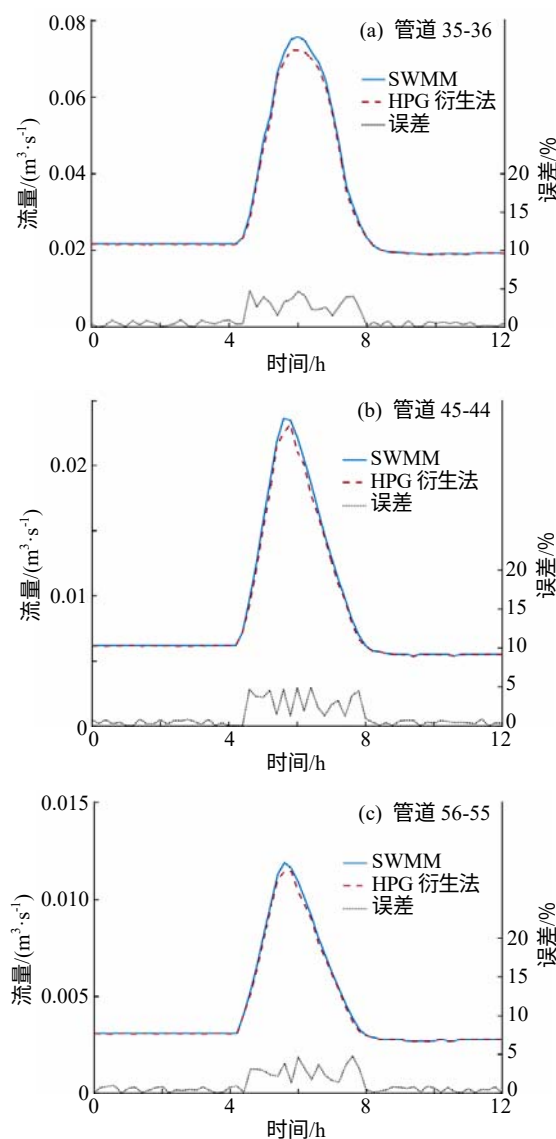
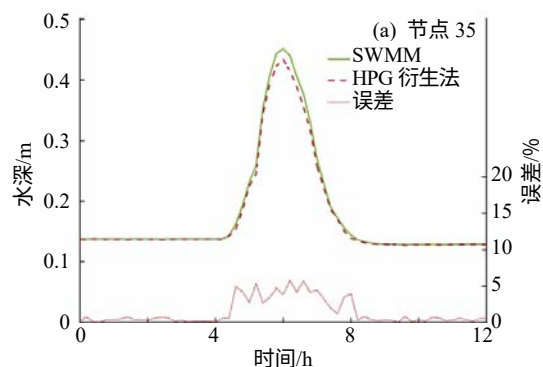


图6 管道流量结果对比



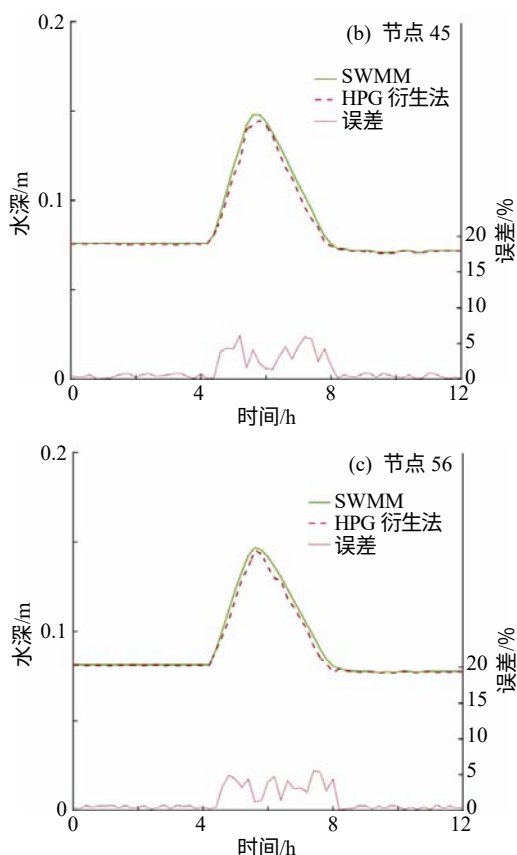


图7 节点水深结果对比

2.2 排水管网系统过流能力分析

2.2.1 管道负载状况分析

利用建立在 VPG 基础上的算法对管道内所承载水的体积进行计算,从而达到对管网系统中每根管道负载情况进行动态监测的目的,本文提出了一种描述管道内水流充满度的新参数 c_v , 其为管内水流体积与管道满流时所储存水体积的比值。以上述排水管网系统为例,利用 SWMM 模拟计算输出的节点液位作为该算法的输入数据,计算得到管道内的动态储水体积及充满度,管段 69-68 负载计算结果如图 8 所示。

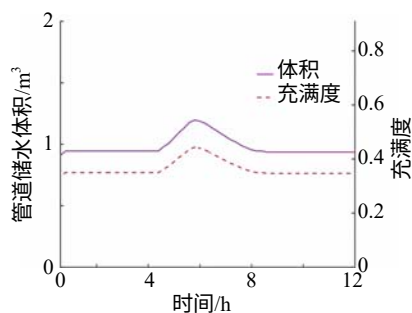


图8 管段 69-68 负载情况

2.2.2 瓶颈管段演算分析

图 9 为某一单根排水管道的过流能力示意, 其中: $Q_{a,max}$ 为管道内水流工况是明渠流时的最大流量; $Q_{n,max}$ 为管道内水流工况是恒定均匀流且刚好满管时的最大流量; $Q_{s,max}$ 为管道上游检查井发生溢流前临界点时的最大流量。基于管道的基本物理参数,可绘制出管道扩展至有压流工况下的 HPG (图 2)。因此,在排水管网系统中,确定每根管道的基本物理参数后便可以通过每根管道的 HPG 来确定每根管道的 $Q_{a,max}$ 、 $Q_{n,max}$ 、 $Q_{s,max}$,并以这 3 个值作为判定管道最大承载流量的基本参考值。

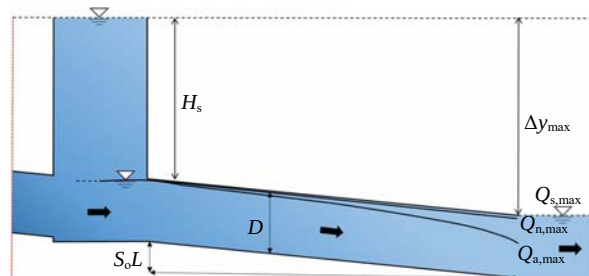


图9 单管过流能力示意

针对本文所研究的宁波某典型片区排水管网系统,按照上述方法,确定每根管道的 $Q_{a,max}$ 、 $Q_{n,max}$ 、 $Q_{s,max}$ 之后,分别以最下游排水口节点 37 自由出流和出口水深保持恒定且淹没深度分别为 0.1 m 为边界条件,代入不同流量值 Q_x 后,基于扩展至有压流下的 HPG 计算管网内水流水面线。当该管网系统内出现节点水深达到溢流临界点时,此时的流量值 Q_x 即为排水口在自由出流工况下所对应的管网系统最大承载流量,同时,最早达到溢流临界点的节点下游所对应的管道即为该管网系统的过流瓶颈管段。经计算后发现该管网系统在两种下游边界条件下,管道 31-32 皆最先达到最大流量值,故此排水管网系统的过流瓶颈管段为管道 31-32,最容易发生溢流的节点为节点 31。基于 SWMM 模型进行模拟分析,如图 10 所示,显示节点 31 的水深在所有节点中最先达到预设的临界值,故结果得到进一步验证。

通过对比以上结果可以发现,对于排水口在不同边界条件工况下对排水管网系统瓶颈管道及溢流风险节点的评估具有一致性,分析其根本原因,或是由于对于已经确定物理参数且不发生变

化的排水管网系统, 其中各个节点处液位的相对大小关系不随最下游出口处液位边界条件的变化而改变。

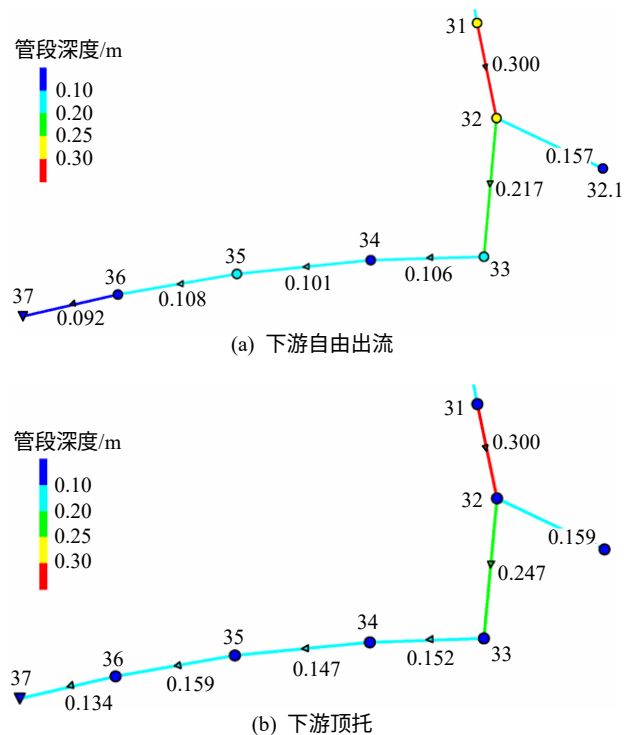


图 10 系统瓶颈管道过流情况

2.3 非恒定流演算分析

在 HPG 的基础上耦合 VPG 对非恒定流进行演算, 该方法称为 DPG 法. DPG 法通过各个水力组成要素将排水管道系统单独分为多个管道, 利用渐变流模型对每个管道的水力特性进行独立计算, 将计算结果作为原始数据存储, 并通过插值查表法访问, 其中每条管道预计算的水力特性包括 HPG 和 VPG. 由于 HPG 和 VPG 对于具有固定物理参数的排水管道都是唯一确定的, 因此, 在该演算方法中, HPG 和 VPG 可以用于不同边界条件的演算且不需要重新计算。

通过 MATLAB 软件编写代码, 将 DPG 演算法应用于本文所研究的宁波某典型片区排水管网系统, 其中管道参数和入流条件与前文相同, 以各入流口的入流时间序列及出口的液位—流量曲线作为边界条件。

以相同时间步长 Δt 通过 SWMM 和 DPG 法模拟演算后的结果如图 11~12 所示, 从图中可以看出, 通过 DPG 法演算的结果和 SWMM 直接输出得到

的结果具有高度一致性, 其中节点流量演算结果的最大相对误差为 5%, 节点水深演算结果的最大相对误差为 6%. 虽然通过两种方式演算出的结果之间的相对误差很小, 但是通过 DPG 法得到的流量和水深结果的最大误差都出现在峰值流量的时间附近, 分析造成这一现象的原因在于是否考虑到局部加速度项, 因为局部加速度项在流量突然增大或下降(即达到流量峰值附近)时对模拟演算的影响较明显, 而 DPG 法在演算中则选择忽略了这一项。

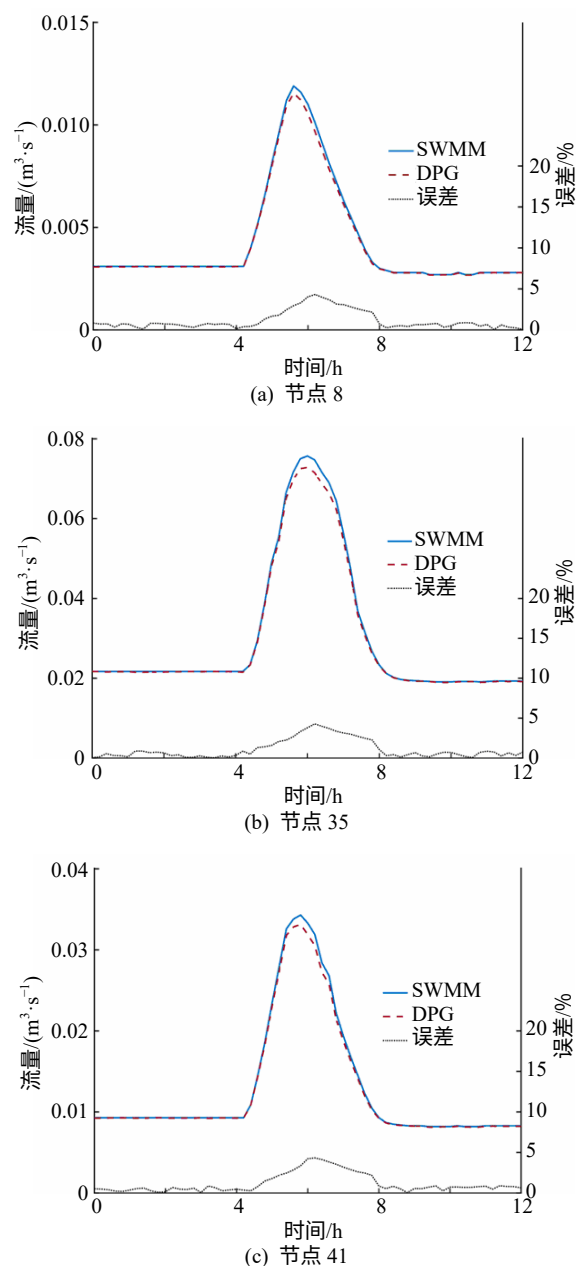


图 11 DPG 流量演算与 SWMM 模拟结果对比

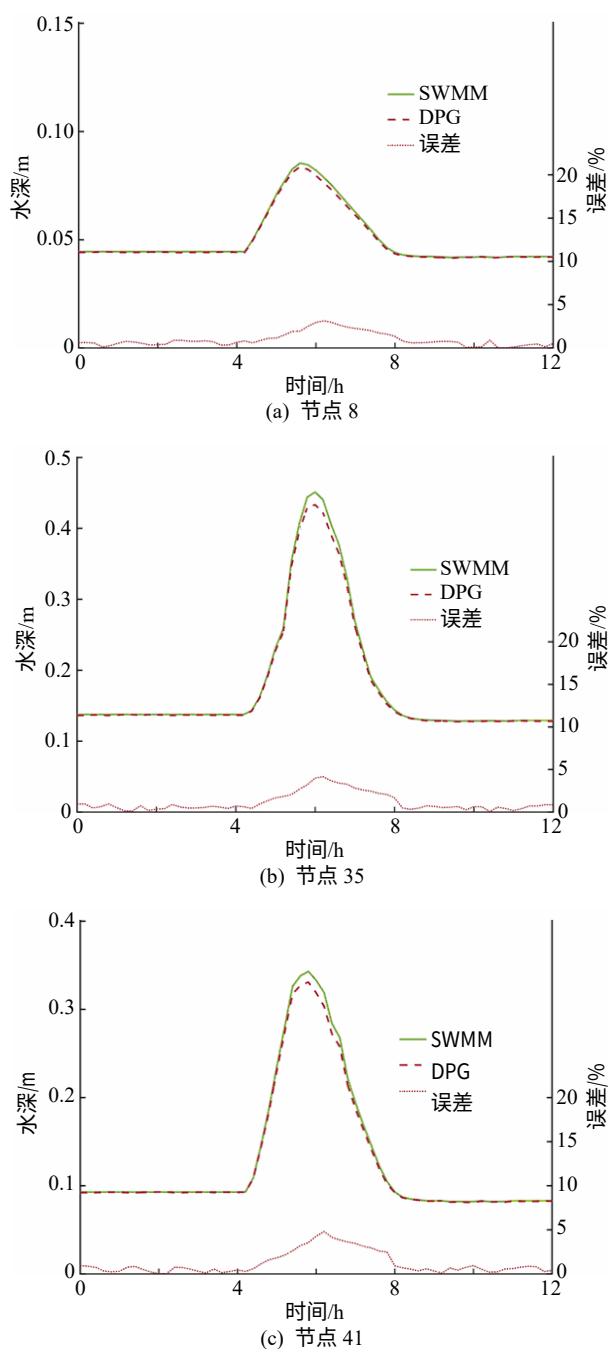


图12 DPG水深演算与SWMM模拟结果对比

3 结论

本研究提出了一种通过液位监测间接推算排水管网动态流量的方法,并对该方法的误差进行了评估,进一步基于排水性能图谱法对典型排水管网案例进行了演算分析,得到以下主要结论:

(1)通过本文所述方法监测得到的结果与SWMM模拟结果具有良好的一致性,其中流量监

测最大误差不超过5%,液位监测最大误差不超过8%。

(2)本文所研究的宁波某典型片区排水管网系统在出口自由出流情况下的过流瓶颈管道为管道31-32,最容易发生溢流的节点为节点31,可通过采取扩大管道31-32管径等措施提高该管网系统的最大过流能力。

(3)通过DPG法模拟演算的结果和SWMM模拟结果吻合较好,其中流量模拟演算结果的最大相对误差不超过5%,液位模拟演算结果的最大相对误差不超过6%,由于局部加速度项的原因所导致的误差最大的情况往往发生在流量峰值时间附近。

参考文献:

- [1] 邓玉莲. 城市排水管网状态和运行效能评估方法的研究与应用[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
- [2] 智国铮, 戴勇华, 马艳. 排水管网检测技术与分析方法研究进展[J]. 净水技术, 2021, 40(5):8-15.
- [3] 涂晓立, 杨道业, 陈静. 超声波多普勒流量计的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016(3):41-43.
- [4] 王东辉. 管道流量计在流量监测中的应用[J]. 给水排水, 2012, 38(S2):216-218.
- [5] 刘伟, 秦会斌. 基于时差法的双声道超声波水流量计[J]. 电子技术应用, 2023, 49(1):58-62.
- [6] 李国瑞, 王志豪, 刘康和. 城市排水系统地下管网排查技术探析及应用[J]. 湖南水利水电, 2022(5):10-14.
- [7] 陈兆丰, 万锦珍, 颜作涛, 等. 基于物联网技术的在线排水管网监测系统[J]. 物联网技术, 2022, 12(5):34-36.
- [8] Bakhmeteff B. Hydraulics of open channels[J]. Engineering Societies Monographs, 1932, 10(3/4):26-42.
- [9] Yen B C. Is hydraulics over-used or under-used in storm drainage?[J]. Water Science and Technology, 1994, 29(1/2): 53-61.
- [10] Yen B C, González-Castro J A. Open-channel capacity determination using hydraulic performance graph[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(2):112-122.
- [11] Gibson N L, Gifford-Miears C, Leon A S, et al. Efficient computation of unsteady flow in complex river systems with uncertain inputs[J]. International Journal of Computer Mathematics, 2014, 91(4):781-797.
- [12] González-Castro J A, Ansar M. Applicability of hydraulic performance graph for flow estimation in open channels [C]//World Water & Environmental Resources Congress 2003, Philadelphia, USA, 2003:1-8.

- [13] Schmidt A R. Analysis of stage-discharge relations for open-channel flows and their associated uncertainties[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002.
- [14] Rantz S E. Measurement and Computation of Streamflow [M]. Washington: United States Government Printing Office, 1982.
- [15] Schmidt A, Yen B. Stage-discharge relationship in open channels[C]//Proceedings of the 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics, 2001:81-87.
- [16] Chow V T, Maidment D R, Larry W M. Applied hydrology[J]. Journal of Engineering Education, 1962, 308:1959-1972.
- [17] Zimmer A, Schmidt A, Ostfeld A, et al. New method for the offline solution of pressurized and supercritical flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(9):935-948.
- [18] Hoy M A, Schmidt A R. Unsteady flow routing in sewers using hydraulic and volumetric performance graphs[C]//World Environmental and Water Resource Congress 2006, Omaha, USA, 2006:1-10.
- [19] Hoy M A. Unsteady flow routing using predetermined solutions to the equations for conservation of mass and momentum[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2005.
- [20] Leon A S, Valverde R, González-Castro J A. A robust, numerically efficient model for unsteady flow routing in topologically complex river networks[C]//World Environmental and Water Resources Congress 2012, Albuquerque, USA, 2012:1119-1128.
- [21] Katopodes N D. Review of non-hydrostatic free surface flows by Oscar Castro-Orgaz and Willi H. Hager[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 147(10): 07521001.

Hydraulic analysis for sewer networks using drainage performance graphs

JIANG Peihang, HUANG Biao, LIU Jiachun

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Assessing the performance of sewer networks is essential for their maintenance and management. However, the cost of existing online discharge monitoring is generally high. This study proposes a smart monitoring strategy for sewer networks that uses depth-only sensors. The method was applied to a typical sewer network in Ningbo, China, and the results were compared with those obtained from storm water management model. The maximum error of the discharge monitoring results did not exceed 5%, and the maximum error of the indirectly deduced water depth results did not exceed 8%, demonstrating the accuracy of the approach. The study also identified the bottleneck of the pipelines and manholes at the risk of overflow based on the drainage performance graph (DPG) method. To reflect the loading of the drainage network, a new coefficient describing the water flow filling degree in the pipeline was proposed. The DPG was used for flow routing in the sewer system, and the maximum relative error of the discharge simulation results was 5%, while the maximum relative error of the water depth simulation results was 6%. These results indicate that the DPG can be used with confidence for hydraulic modeling of sewer networks.

Key words: sewer network; discharge monitoring; hydraulic performance graph; volume performance graph; drainage performance graph; unsteady flow routing

(责任编辑 韩 超)