

城市雨水管网内非恒定流数值模拟与内涝风险预测模型构建

李旭涛

上海韵瓴新能源科技有限公司，上海

收稿日期：2025年10月23日；录用日期：2025年11月13日；发布日期：2025年12月9日

摘要

随着城市化进程的加快，城市雨水径流迅速汇入排水管网，使得非恒定流现象频发，城市内涝问题日趋严重。本文根据城市雨水管网非恒定流特性，建立高精度数值模拟方法，并在模拟结果基础上构建内涝风险预测模型，实现雨洪管网的动态响应和风险分布分析功能。以典型城市低洼区域为例进行验证，模型能够实现高风险节点和易涝区的准确识别，为管网优化设计、运行调度和防涝设施布局提供科学依据。研究结果对于提升城市排水系统的韧性，实现雨洪精细化管理具有重要的理论意义和应用价值。

关键词

雨水管网，非恒定流，数值模拟，内涝风险预测

Numerical Simulation of Unsteady Flow in Urban Stormwater Networks and Construction of a Waterlogging Risk Prediction Model

Xutao Li

Shanghai Yunling New Energy Technology Co., Ltd., Shanghai

Received: October 23, 2025; accepted: November 13, 2025; published: December 9, 2025

Abstract

With the acceleration of urbanization, urban stormwater runoff is rapidly entering the drainage network, resulting in frequent unsteady flow and increasingly serious urban waterlogging. This

paper establishes a high-precision numerical simulation method based on the unsteady flow characteristics of urban stormwater networks. Based on the simulation results, a waterlogging risk prediction model is constructed to analyze the dynamic response and risk distribution of stormwater networks. Validated using a typical low-lying urban area, the model accurately identifies high-risk nodes and flood-prone areas, providing a scientific basis for optimizing network design, operational scheduling, and the layout of flood control facilities. The results have important theoretical and practical significance for improving the resilience of urban drainage systems and achieving refined stormwater management.

Keywords

Stormwater Network, Unsteady Flow, Numerical Simulation, Waterlogging Risk Prediction

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市快速发展,城市地表硬化程度逐年增加,雨水径流迅速进入雨水管网,导致管网内普遍存在不稳定流速。国内相关研究主要针对局部节点和小规模管网的非恒定流模拟,对于大规模城市管网水力响应和内涝风险量化研究还比较薄弱。国外已将地理信息系统和数据驱动模型相结合的研究取得了一定的进展,但是对于管网调度与非恒定流的耦合分析仍然存在一定的不确定性。为此,本文构建大规模城市雨水管网非恒定流数值模型,构建基于多维风险指标的城市雨水管网积水预测模型,实现管网充盈、溢流和节点水位动态响应的高精度描述,为城市排水规划和防涝管理提供科学依据。

2. 城市雨水管网非恒定流理论基础

2.1. 非恒定流动力学原理

城市雨水管网中的流体运动具有高度的动态性,其流量、水位在时间上发生了急剧的变化,其水力计算依赖于圣维南方程来描述管道内的动量及连续性。圣维南方程以一维流动假设为基础,并结合管径、坡度和摩阻系数等因素,可以反映水流加速度、摩阻损失和压力变化等因素对流量分布的影响[1]。管网结构复杂,节点汇流和段间流耦合形成了强非线性的水力响应,局部水位过高或段充盈现象直接影响管网流态。为了描述管段内非恒定流动的动力学特性,采用一维圣维南方程来表示连续性和动量守恒:

$$\begin{aligned}\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= ql \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gQ \frac{|Q|}{KAR^{4/3}} &= 0\end{aligned}$$

其中, A 是管道截面积(m^2), Q 是流量(m^3/s), h 是水力坡降(m), R 是水力半径(m), K 是摩阻系数, ql 是管道单位长度入流($\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$), g 是重力加速度(m/s^2)。公式能描述降雨作用下管网流量与水位的动态关系,为非恒定流数值模拟提供了理论依据。非恒定流计算要求对边界条件、初始水位、入流波形等进行精细处理,通过时间步与空间离散保证数值稳定性,从而捕捉到降雨条件下管网的快速响应特性。管网管径变化、局部弯管、泵站运行等因素都会带来额外的能量损失,对流量波形和水位变化有显著影响,对模型的精度和全局一致性提出了更高的要求。

2.2. 雨水管网水力特性与内涝形成机理

城市雨水管网在降雨作用下表现出显著的时变水力响应,其流量、水位和压力过程主要由管径配置、坡降结构、节点布局和摩阻条件等因素共同决定[2]。由于长径比和节点汇流的非线性耦合作用,强降雨条件下流速波动和水位突降尤为突出,局部充盈和能量损失造成的水力滞流削弱了排涝能力。随着不透水率的提高,汇水集中加快,入流峰值前移,管网蓄滞能力急剧降低,形成溢流和倒灌风险。低洼地形、排水通道受限和泵站调度滞后等因素均可导致节点水位持续抬高,导致积水范围扩大。降雨强度、持续时间和入流曲线形态等因素决定着管网在峰值到来时的承载能力,坡降变化和局部能量损失的累积作用将进一步加剧管网失稳。管网结构和降雨特征叠加在一起,形成了具有明显空间差异的积水空间分布格局,是城市内涝形成的核心动力来源。

3. 城市雨水管网非恒定流数值模拟方法

3.1. 模型构建原则与假设

城市雨水管网非恒定流的数值模拟需要准确地描述管网的拓扑结构、流量汇集和边界条件。该模型以一维圣维南方程为核心,假设管道断面水力条件沿截面均匀分布,管网节点间流采用连续耦合的方法,可反映降雨条件下管段的充盈、溢流和水位波动特征。边界条件包括降雨入流波形、下游排涝能力和泵站调度策略等,其中初始条件以静态水位或历史水位为初始条件,以保证模拟初始阶段的管网状态更接近实际情况。将管网结构简化为关键节点与主管段组合,弱化次要支管对计算精度影响不大的次要支管,减少计算复杂性[3]。在参数设定方面,采用现场实测或历史调查的方法,确定了管道的管径、坡度和阻力系数,以保证所建立的模型能更好地反映实际的水力特性。该构建原则将在保证模拟精度的前提下,实现大规模管网非定常流动的快速求解,为后续内涝风险预测提供可靠的水力基础[4]。

3.2. 数值计算方法

采用有限体积方法对一维圣维南方程进行空间离散,按管径、流量梯度确定各节点长度 Δx 。时间积分采用隐式格式,迭代求解管段流量与节点水位,保证了在大径流梯度、快速变化的条件下数值稳定性。隐式方法允许较大时间步 Δt ,且满足 CFL 条件的限制相对宽松,适合复杂管网的非恒定流时间模拟,但需要通过矩阵求解增加计算量和迭代成本。公式如下:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{V + \sqrt{gH}}$$

其中, V 为管内流速、 H 为水深、 g 为重力加速度。采用曼宁公式对摩阻损失进行动态修正,在流态接近满管和半满管的情况下,用曼宁公式求出阻力系数,并根据流量和水深动态调节能损。达西 - 魏斯巴赫公式适用于全管径和紊流情况明显的管段,采用流态切换策略,即当管段流量接近满管、雷诺数较高或水深超出一定临界值时,切换至达西 - 魏斯巴赫公式,否则采用曼宁公式[5]。在切换过程中,采用连续插值的方法保证动量和能量守恒。节点间流量汇总采用连续耦合迭代方法,保证动量守恒和流量连续性。数值计算输出包括各节点水位、管段流量和充盈率,为非恒定流模拟与内涝风险预测提供高精度输入数据。

3.3. 模型验证与参数标定

模型验证主要依靠实测流量、水位和降雨数据,并将模拟结果与实际观测值进行比较,评价计算精度。常用评价指标包括均方根误差、纳什效率系数及最大水位误差,对管网摩阻系数、管径修正系数和

入流边界条件进行多次迭代优化，实现参数标定。以历史降雨事件为例，验证模型对不同降雨强度、降雨历时的适用性和鲁棒性。对比关键节点及易涝区水位变化，评价该模型预测局部充盈和溢流的能力[6]。在标定过程中，综合考虑管网测量误差、流量波动等不确定性因素，确定影响模型输出的主要参数，提高模拟结果的可靠性。参数标定和模型验证形成闭环，为非定常流动数值模拟提供科学依据，也可为城市内涝风险预测模型构建提供高精度水力数据支撑。

4. 城市内涝风险预测模型构建

4.1. 内涝风险指标体系设计

城市内涝风险的量化需要构建能够反映降雨事件、管网水力响应和易涝区特点的多维指标体系。指标包括降雨强度和持续时间、管网负荷率、节点水位超高速率、管段充盈率和低洼区积水深度等，综合考虑时间和空间的动态性。采用熵权法和层次分析法确定各指标的权重，从而保证了对内涝形成的影响因子的科学评估。在不同降雨事件条件下，管网节点流量峰值、水位变化等动态响应信息作为风险指数输入，提高了预测模型的针对性与精度[7]。将地理信息系统(GIS)技术与管网拓扑信息相结合，对易涝区进行空间定位，为洪涝灾害的分级与管理提供依据。表 1 给出了典型城市不同类型地区的汇流系数，可以用来确定管网节点入流的权重，也可以用来确定入流曲线的时间顺序。综合考虑管段充盈率、节点水位和积水深度等因素，构建多维风险评估指标，并对模型输出的节点水位、流量进行空间加权，实现以水力模型输出结果为基础的内涝风险综合评估。

Table 1. Comprehensive runoff coefficient of catchment area
表 1. 汇水区综合径流系数表

区域情况	不透水面积率/%	综合径流系数
建筑稠密的中心区	>70	0.6~0.8
建筑较密集的居住区	50~70	0.5~0.7
建筑较稀少的居住区	30~50	0.4~0.6
建筑很稀少的居住区	<30	0.3~0.5

4.2. 风险预测模型设计

构建以水力模型输出结果为基础的综合评价指标体系，将节点水位、管段充盈率、流量峰值和区域积水深度等非恒定流数值模拟结果相结合，构建多维内涝风险评价指标体系。采用熵权法与层次分析法综合确定各指标权重，以反映各指标对管网响应和积水发展的相对贡献[8]。模型采用多指标融合方法，实现时间序列水位响应与管段充盈动态的统一量化，实现不同降雨历时和强度条件下节点风险的动态评分。边界条件包括管网调度策略、泵站启停时间和溢流口容量等，使得预测结果与实际工况高度吻合。将指标归一化和累积赋权，生成各节点、各管段的风险指数，实现由局部水力响应向整体内涝风险的连续映射。输出结果可提供高风险节点、潜在溢流管段和低洼积水区域进行定量化风险评估，为城市排水设施优化、泵站调度调整和防涝决策提供科学依据。模型的结构兼顾非恒定流模拟精度和空间风险分布可解释性，实现城市排水管网风险管理由单一水力分析向综合风险评估转变。

4.3. 模型验证与评价

模型验证通过对历史内涝事件进行模拟和实际积水数据对比，评估预测准确性和空间分布的匹配性。主要评估指标为节点水位误差、溢流次数偏差和易涝区风险等级的准确性。对不同强度、时长降雨事件

的多案例研究，验证模型在极端降水和短时强降水中的适用性。通过敏感性分析，确定影响模型输出的关键参数，如摩阻系数、节点汇流比、降雨入流波形等，以指导模型的优化与参数修正[9]。验证结果可用于量化模式预报的准确性，并为该模式在不同地区的推广提供参考。

5. 案例应用分析

5.1. 研究区域概况

研究区位于某典型城市低洼区域，整体地势平缓，平均坡度小于 0.5%，地表不透水面积超过 65%，降雨径流快速流入管网系统。该地区排水管网全长 42.6 km，包括 312 个管段和 278 个节点，管径在 400~1500 mm 范围之内，管网密度 8.7 km/km²。系统设排洪泵站 3 个，设计排洪能力 12 m³/s。结合区域地理信息系统(GIS)数据，结合管网设计图和 5 个水位监测点的历史数据，建立符合实际工程应用背景的数值模型。该地区短时间强降雨条件下管段充盈和路面溢流频繁发生，具备内涝风险研究的典型性和代表性。

5.2. 非恒定流数值模拟结果分析

以圣维南方程组为基础，建立了一维非恒定流模型，并以该区域强降雨事件为典型情景，对其进行了模拟和验证。降雨过程持续 4 h，最大降雨强度 48 mm/h，重现期约为 5 年。模型选取 5 个实测水位监测点(N1、N3、N5、N7、N9)为验证对象，对模拟水位和实测数据的时序进行比较。采用综合径流系数法和过程线拟合方法对模型精度进行了评价。结果表明，各节点模拟的水位变化趋势与实测水位变化趋势一致，峰值时间误差在 10 min 以内，见表 2。

Table 2. Statistics of water level simulation errors at key nodes

表 2. 关键节点水位模拟误差统计

节点编号	监测点位置	最大水位观测值 (m)	最大水位模拟值 (m)	均方根误差 (m)	纳什效率 系数	峰值时间差 (min)
N1	中山路 - 解放街交汇	3.45	3.41	0.12	0.89	8
N3	文化广场东侧	4.28	4.22	0.15	0.86	6
N5	新城开发区	2.95	2.91	0.09	0.91	5
N7	老城区排水口	3.12	3.08	0.11	0.88	7
N9	工业园西区	2.78	2.75	0.08	0.92	4

其中，关键节点 N1 与 N3 对应的均方根误差分别为 0.12 m、0.15 m，纳什效率系数分别为 0.89、0.86；由于这两个节点处于复杂交汇区域，受上游来流和下游顶托共同作用的影响，水力条件更加复杂，导致模型在简化过程中存在一定的误差。结果表明，降雨峰值后，N5 节点出现短暂的水力回流现象，数值模拟结果与实测值吻合较好，回流时间误差小于 5 min。模拟结果表明，该区域的综合产流系数仅为 0.62，与研究区建筑较密集居住区的取值范围(0.5~0.7)基本吻合。模型能较好地模拟极端降雨情景下管网系统动力响应，并在关键节点处的水位模拟和逆流识别具有较高的精度和可靠性[10]。

5.3. 内涝风险预测结果分析

基于已验证的非恒定流模拟数据，结合节点水位、管段充盈率和区域积水深度等多维风险指标，构建内涝风险预测模型。模型输出显示，在降雨高峰期，节点 N1、N3、N5 节点的充盈率均在 90% 以上，其危险程度被判定为“高”。N1 节点的模拟水位最高值为 3.41 m，超出管顶标高 0.42 m；N3 节点水位

高达 4.22 m, 伴随溢流持续时间长达 25 min 以上。从空间分布来看, 低洼街区和管径不足地区内涝敏感, 这与历史记录相吻合。该预测模型量化了各节点在极端降雨下的风险等级, 为城市供水管网局部改造和泵站运行优化提供具体目标。

5.4. 管理与规划应用价值

案例分析结果可以为管网的优化设计及运行调度提供一定的科学依据。对高风险节点及溢流管区段进行识别, 有针对性地对泵站启停时序及排涝能力进行调整, 提高管网的整体响应速度。城市内涝风险图可以为城市规划部门确定重点内涝地区、优化道路排水设施及滞洪空间布局提供科学依据。将非恒定流模拟和风险预测结果集成到地理信息系统中, 实现对城市防洪减灾的动态监测和预警, 为防洪管理提供实时的决策支持。该方法也可以推广到其他城市地区, 以适应不同的地形、管网结构和降雨特性, 为城市排水系统韧性构建提供技术借鉴。

6. 结语

本文所建立的大规模城市雨水管网非恒定流数值模拟方法, 可以较准确地描述城市雨水管网的充盈、溢流以及节点水位的动态变化。通过融合多维风险指标, 建立城市内涝风险预测模型, 实现城市不同区域内涝风险的定量评估。案例研究显示, 高风险节点 N1、N3 的预测水位和观测值 RMSE 小于 0.15 m, 模型准确识别潜在溢流管段, 为泵站启停优化、排涝设施布局和排水调度等提供科学依据。非恒定流模拟和风险预测相结合, 能够有效支撑城市防洪管理, 实现从水力响应分析到内涝风险量化的全链条覆盖。此外, 模型仅限于一维管网水力模拟, 对二维地表径流过程的耦合不够充分, 在极端降雨条件下局部积水的预测存在较大不确定性。未来可引入实时数据同化技术和动态预报方法, 结合城市规划情景, 实现管网和地表动态变化的高精度联合分析。

参考文献

- [1] 郭亮, 孟昭辉, 孙志豪, 等. 基于城市内涝模拟的管网排水能力及内涝风险评估研究[J]. 给水排水, 2024, 60(7): 121-129.
- [2] 王成成. 基于 Infoworks ICM 模型的城市管网排水能力与内涝风险评估[J]. 绿色科技, 2024, 26(12): 274-280.
- [3] 石彦丽, 崔克, 何俊府, 等. 模型法研究分析调蓄水体对缓解城市内涝的贡献作用——以开封市为例[J]. 给水排水, 2023, 59(S2): 1-4, 12.
- [4] 张金萍, 陈蔚, 方宏远, 等. 郑州市新、老城区暴雨内涝灾害风险指标重要性分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(6): 59-63.
- [5] 刘媛媛, 刘业森, 郑敬伟, 等. BP神经网络和数值模型相结合的城市内涝预测方法研究[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 284-295.
- [6] 张玉伦, 贾能, 陈盛达. 基于数值模拟计算的大规模泵站排涝效果分析[J]. 水利建设与管理, 2022, 42(8): 21-26.
- [7] 席广朋, 何秋杭, 梅超, 等. 北京大兴国际机场雨水系统数值模拟与管理策略优化分析[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(10): 1-4, 14.
- [8] 巴振宁, 匡田, 梁建文, 等. 城市排水管网风险评估研究[J]. 市政技术, 2021, 39(1): 90-93.
- [9] 陆敏博, 王欢, 魏清福, 等. 平原河网城市雨水系统排水能力及内涝风险评估浅析[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 66-68, 73.
- [10] 王诗婧. 全过程内涝防治体系对缓解城市内涝的效果分析[J]. 环境工程, 2020, 38(4): 108-113.