

# 城市防洪减灾数字孪生技术研究及应用

雷斯越

重庆对外经贸学院，重庆市合川区，401520；

**摘要：**在城市化进程不断加速的背景下，城市安全正遭受来自极端天气所引发洪涝灾害的严重威胁。传统防洪体系的运行主要依赖于物理监测设施以及凭借人工经验来做出判断，在面对灾害动态演化时便暴露出诸如响应滞后、信息断层等诸多局限性。而数字孪生技术对物联网的感知层、云计算平台以及可视化交互界面进行有效整合，形成了一套全周期的解决方案，此方案涵盖了灾前的预测环节、灾中的调控环节以及灾后的评估环节。这种虚实联动的技术范式正在重塑城市韧性建设方法论，为构建新型智慧防洪体系奠定基础。

**关键词：**城市防洪减灾；数字孪生技术；应用研究

**DOI：**10.69979/3060-8767.25.03.048

## 1 引言

全球气候变化使得城市极端降雨事件频繁发生，传统以工程防御为主导的防洪模式应对复合型灾害风险已变得十分困难。当下的防洪系统存在较为明显的监测盲区，多部门之间的数据呈现出割裂状态，应急预案在灵活性方面存在明显不足，所以迫切需要引入新型的技术手段来提升应对灾害的能力。数字孪生技术有着虚实映射、实时交互这样的特性，为解决这些问题开拓出了新的路径。本文聚焦在该技术于防洪减灾领域所具备的应用机理以及实施策略上，致力于探索构建起一个能够覆盖监测预警、工程优化、应急指挥的智能决策平台。文章着重对三维建模、实时数据融合、情景推演等关键技术展开解析，探究它们怎样突破传统防洪体系在时空方面的限制，进而形成一种更具前瞻性的灾害防控机制。

## 2 城市防洪减灾与数字孪生技术概述

### 2.1 城市防洪减灾的重要性

密集人口聚集与复合型基础设施的快速扩张使城市面对洪涝灾害时呈现出更高脆弱性，传统自然生态系统的滞洪调蓄功能在钢筋混凝土构筑的现代空间中逐渐消退，硬化化地面覆盖面积持续扩大导致雨水渗透效率下降，而地下管网系统的承载能力与极端天气事件的频发趋势形成显著矛盾。突发性强降雨引发的内涝不仅威胁交通干线、电力供应等城市生命线工程，更可能触发连锁反应造成商业活动停滞、物资供应链断裂乃至公共卫生事件，暴雨期间低洼区域居民紧急转移安置问题考验着基层应急管理体系的响应效能。历史经验表明，

城市水灾造成的经济损失往往超越直接财产损毁范畴，长期积累的社会秩序紊乱与公众安全感缺失将对城市运行产生深远影响。面对气候不确定性增强与土地开发强度提升的双重压力，构建多维度协同防御机制成为现代城市治理的必然选择，需要在工程建设与生态韧性提升之间寻求动态平衡，同时强化风险预警精度与社区自救能力，将灾害防御理念融入城市规划全周期管理框架。

### 2.2 数字孪生技术的原理

数字孪生技术，是指综合利用传感器、物联网、虚拟现实、人工智能等技术，对真实世界中物理对象的特征、行为、运行过程及性能进行描述与建模的方法。该技术的核心在于建立物理实体与虚拟模型之间的动态双向映射机制，其运行逻辑依赖于传感器实时采集物理实体的多维状态参数，经由高速通信网络传输至云端平台进行数据清洗与特征提取，进而驱动虚拟模型完成同步迭代更新。物理空间的实体属性、环境变量及交互行为被抽象为可计算的数字特征，在虚拟空间中通过参数化建模形成具备物理规律约束的仿真系统，该系统的实时运算能力支持对实体状态的多维度解析与潜在趋势推演。技术实现层面依赖边缘计算设备对海量异构数据进行分布式处理，结合云计算资源完成复杂工况下的并行仿真计算，最终通过可视化界面呈现多尺度分析结果，为操作者提供涵盖设备级、系统级到城市级的立体决策支持<sup>[1]</sup>。

### 2.3 数字孪生技术在城市防洪减灾中的优势

数字孪生技术构建的虚拟镜像系统能够与实体防

洪设施形成全天候数据同步,实时映射降雨量、水位波动及管网负荷状态的变化轨迹,这种动态交互特性突破了传统监测手段的时空限制,使得灾害演化过程在虚拟空间中获高精度还原。物理实体与数字模型的双向反馈机制赋予系统自主优化能力,当传感器捕捉到局部区域排水异常时,虚拟引擎可立即启动多线程运算,模拟不同降水强度下的管网承压阈值与地表径流路径,提前预判内涝风险等级并生成应对预案。多维数据融合分析功能打通气象、地质、工程等多领域信息壁垒,将碎片化监测数据转化为具备时空连续性的灾害推演图谱,决策者能够直观识别城市低洼地带、排水瓶颈区域与应急资源分布的空间关联。跨平台协同机制支持水利、市政、交通等部门在统一数字界面共享实时汛情,三维可视化模型将复杂的流体力学方程转化为可操作的动态水位模拟,大幅降低多部门联合调度的沟通成本与响应延迟。

### 3 当前城市防洪减灾存在的问题

城市防洪体系在应对极端天气事件时暴露出基础设施设计标准与灾害演变趋势之间的适配性矛盾,部分区域排水管网布局难以匹配高强度降水形成的瞬时径流量,管网淤塞与维护盲区的叠加效应削弱了整体排涝效能。不同管理部门间的信息壁垒导致风险预判与应急响应存在协调断层,气象预警数据与市政调度系统尚未形成深度联动的决策闭环,跨区域洪水演进模拟的精度受限于基础地理信息的更新频率。防洪工程与生态保护措施的协同性有待深化,硬化河岸改造虽提升泄洪能力却压缩了水体自净空间,人工干预与自然水文循环的平衡关系在快速城市化进程中面临重构挑战。社区层面的防灾韧性建设尚未形成常态化机制,居民风险意识培养与应急预案演练多停留在文件传达层面,基层物资储备体系与专业救援力量配置难以满足复杂灾情下的多元化需求,自救互救能力培育需要更具针对性的场景化设计<sup>[2]</sup>。

## 4 城市防洪减灾数字孪生技术的应用路径

### 4.1 基于数字孪生的城市防洪减灾系统架构设计

城市防洪减灾系统的数字孪生架构由感知层、数据层与应用层构成多级联动体系,感知层部署的智能传感设备持续采集河道流量、地下管网压力及地表积水深度等关键参数,这些实时信息经加密传输至云端数据中枢完成清洗与结构化存储。数据层采用分布式计算框架对

海量异构数据进行时空对齐处理,基于地理信息系统构建三维城市水文模型,标准化数据接口使气象预报、历史灾情与工程参数能够无缝嵌入动态仿真环境。应用层依托可视化交互平台将抽象数据转化为可操作的防洪决策方案,工程师可调取任意时间节点的水位模拟曲线与管网负荷热力图,结合机器学习算法预判不同降水场景下的风险传导路径,动态生成泵站调度指令与人员疏散路线。模块化设计理念贯穿整个架构,各子系统既能独立运行维护又可快速集成扩展,当新增防汛设施或调整排水路径时,虚拟模型通过参数化工具自动更新拓扑关系与水力计算规则。权限管理机制为不同职能部门划定数据访问层级,水利部门侧重分析河道行洪能力,市政单位聚焦管网负载均衡,而应急管理部门则掌握跨区域资源调配权限,三维沙盘界面成为多方协同指挥的公共操作空间。

### 4.2 数字孪生技术在洪水监测与预警中的应用

在构建城市防洪减灾的技术框架时,云端计算平台将历史水文记录与实时监测值输入水动力模型,基于流体力学原理推演不同降雨情景下的淹没范围与积水深度,三维可视化界面直观呈现洪水在道路交叉口、地铁出入口等城市脆弱点的演进过程,预警阈值触发机制依据预设的临界参数自动生成分级响应建议。动态预警系统与市政管理平台建立双向通信通道,当模拟结果显示特定区域可能超过承灾能力时,系统自动匹配预设的应急资源分布图并生成多套人员疏散路线优化方案,决策者可结合实时交通流量数据在虚拟环境中预演不同调度策略的干预效果。物理实体与数字模型之间的实时交互机制持续校准模型精度,暴雨过程中新获取的监测数据不断反哺至计算引擎,形成滚动更新的预测闭环,这种迭代优化模式有效消解了传统静态模型在复杂城市环境中的适应性偏差<sup>[3]</sup>。

### 4.3 数字孪生技术在防洪工程设计与优化中的应用

工程师依托三维建模平台将地形高程、土壤渗透系数与既有排水设施参数转化为可计算的数字资产,地形特征通过点云扫描技术生成毫米级精度的地表模型,河道走向与管网布局则采用参数化设计工具进行动态调整。仿真模型导入历史降雨强度与水文观测数据后,自动执行不同重现期暴雨情景下的地表径流模拟,实时显

示水流在道路、绿地与建筑群中的渗透、蓄滞与排泄过程,当预设的堤防高度或泵站排水量无法满足极端工况需求时,系统触发预警并推送结构优化建议。设计迭代过程中,工程师可随时修改地下管径尺寸或调整调蓄池位置,虚拟模型同步更新流体力学计算结果与工程成本核算清单,机器学习算法根据过往灾害案例库对设计方案进行脆弱性评估,识别出易被忽视的排水瓶颈或地质沉降隐患。施工前的虚拟验证环节允许对混凝土强度、护坡坡度等关键参数进行多维度测试,暴雨冲击下的结构变形趋势与材料疲劳寿命以可视化形式呈现,设计团队可对比不同材料组合在50年使用周期内的维护成本与防灾效能,择优确定兼具经济性与安全性的工程实施方案。

#### 4.4 数字孪生技术在城市排水系统中的应用

运维团队借助激光扫描与管道机器人获取管径尺寸、淤积厚度与接口老化程度等细节参数,将这些物理特征转化为可动态更新的三维可视化模型。雨季来临前,模型自动加载气象部门发布的降水概率分布图,结合管段过流能力与检查井分布密度,模拟不同雨强下管网满流状态与地表溢流点位的空间关联,提前锁定易发生倒灌或冒溢的薄弱节点。日常巡检中,工作人员通过移动终端调取实时水位、流速监测数据与模型预测值进行交叉比对,当传感器检测到某段管道流量异常激增时,系统触发溯源分析功能追溯上游汇水区边界与泵站运行状态,快速定位树根侵入或垃圾堵塞造成的过水断面缩小问题<sup>[4]</sup>。养护计划制定环节,模型基于管道材质寿命曲线与历年清淤记录生成维护优先级列表,结合道路通行状况为高压冲洗车规划最优作业路线,同步推送施工期间需临时启用的备用排水路径。

#### 4.5 数字孪生技术在应急响应与救援中的应用

数字孪生技术驱动的应急指挥平台整合实时汛情监测与多源信息流,救援人员借助三维可视化界面追踪内涝热点的动态演变,卫星遥感数据与地面传感器传回的积水深度、流速信息在虚拟空间中自动生成带有时间戳的风险扩散图谱,为现场救援提供立体导航。指挥中心调取历史相似灾情案例库进行模式匹配,结合当前地形变形量与排水设施运行状态,快速生成淹没范围预测

模型与人员受困概率分布图,救援队伍依据实时更新的热力图调整冲锋舟行进路线与物资投放优先级。通信模块打通应急广播、移动终端与社交媒体渠道,受灾居民可通过定位标签上报险情位置,平台自动校验信息真实性后将其转化为虚拟空间中的动态事件标记,救援力量据此动态调整网格化搜救方案。灾后复盘阶段,平台自动生成事件时间轴与操作记录,重点标注响应延迟环节与设备故障节点,为优化应急预案提供迭代依据。

### 5 结语

数字孪生技术通过构建城市水文系统的数字镜像,显著提升了防洪决策的科学性与时效性,该技术凭借多尺度建模能力能够精准地对地表径流动态予以捕捉,借助数据同化算法可有效地把气象预报与实时监测信息相融合,其三维可视化界面还为跨部门协同提供了直观的决策支持。就当下数字孪生技术在应用过程中所存在的诸如模型精度不足、数据更新延迟等问题,建议加强倾斜摄影与BIM技术的融合应用,建立起标准化的数据交换协议,并且对边缘计算节点部署加以完善,以提升响应速度。

#### 参考文献

- [1] 宋利祥,张炜,田兆伟,等.西枝江流域数字孪生与防洪“四预”体系建设与探讨[J].中国防汛抗旱,2022,32(07):12-18.
- [2] 梅传贵,余丽华,倪凯军,等.基于数字孪生的周公宅水库防洪“四预”系统构建与应用[J].水利信息化,2023,(01):23-28+32.
- [3] 李毅,黄诗峰,臧文斌,等.基于虚拟地理环境的数字孪生流域防洪应用技术探讨[J].遥感学报,2024,28(05):1330-1339.
- [4] 骆寒菁,黄清烜,叶斌彬,等.数字孪生九龙江北溪流域防洪“四预”应用[J].水利信息化,2024,(05):8-15.

作者简介:雷斯越(1998-),女,汉族,重庆市涪陵区,硕士研究生,助教,图像处理。重庆对外经贸学院,重庆市合川区,401520