

# 数字孪生技术在城市排水系统中的进展与挑战

葛水金<sup>1</sup>, 宋雪<sup>1,2</sup>, 樊雪莲<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海万朗水务科技集团有限公司, 上海

<sup>2</sup>上海市水务局, 供排水管网系统数字化应用工程技术研究中心, 上海

收稿日期: 2024年12月2日; 录用日期: 2025年1月3日; 发布日期: 2025年1月15日

## 摘要

在城市化快速发展的背景下, 城市排水系统面临着极端天气引发的洪涝、水资源供需矛盾和水环境污染等前所未有的挑战。数字孪生技术, 作为一种融合了物联网、大数据、人工智能等前沿技术的创新手段, 通过构建物理实体的精确数字副本, 为城市水安全保障提供了全新的视角和解决方案。本文概述了数字孪生技术在城市排水系统中的多方面应用进展, 分析了其在防洪减灾、水资源管理、水生态保护及水利工程智能化等方面的实际应用现状, 并重点探讨了实时监测、模拟仿真、预测预警和决策支持等关键技术如何提升排水系统的效率和应对能力。最后, 文章对未来发展趋势进行了展望, 强调了技术创新、跨学科合作和政策支持对未来数字孪生技术发展的重要性。随着技术的不断进步, 数字孪生技术将在城市排水系统中扮演更加关键的角色, 提供更高效、智能的水安全保障解决方案。

## 关键词

数字孪生, 排水系统, 城市水安全, 应用进展, 挑战与展望

# Advances and Challenges of Digital Twin Technology in Urban Drainage Systems

Shuijin Ge<sup>1</sup>, Xue Song<sup>1,2</sup>, Xuelian Fan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Van-Long Water Technology Co., LTD, Shanghai

<sup>2</sup>Engineering Research Center of Digitalized Application for Water Supply and Drainage Pipeline Network System, Shanghai Water Authority, Shanghai

Received: Dec. 2<sup>nd</sup>, 2024; accepted: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2025; published: Jan. 15<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Against the backdrop of urbanization, urban drainage systems are facing unprecedented challenges

文章引用: 葛水金, 宋雪, 樊雪莲. 数字孪生技术在城市排水系统中的进展与挑战[J]. 可持续发展, 2025, 15(1): 46-54.  
DOI: 10.12677/sd.2025.151007

such as flooding, contradictions in water supply and demand, water environmental pollution, and so on. Digital twin technology, as an innovative approach which integrates cutting-edge technologies like Internet of Things, big data, and artificial intelligence, provides a new perspective and solution for urban water safety by constructing an exact digital replica of physical entities. In this paper, the advances of digital twin technology in urban drainage systems were discussed. Especially the actual applications in flooding disaster early warning, water resource management, water ecological protection, and the intelligent management of water conservancy projects were analyzed. This paper also focused on how key technologies such as real-time monitoring, simulation, predictive warning, and decision support can enhance the efficiency and response capabilities of drainage systems. Finally, the article looks forward to future development trends, emphasizing the importance of technological innovation, interdisciplinary cooperation, and policy support for the future development of digital twin technology. With continuous technological advancements, digital twin technology will play a more critical role in urban drainage systems, offering more efficient and intelligent solutions for water safety.

## Keywords

Digital Twin, Drainage System, Urban Water Safety, Application Advances, Challenges and Prospects

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

城市化进程的不断推进带来了一系列复杂的环境问题，尤其是在城市排水系统管理方面。城市排水系统不仅要应对日常的污水排放，还要面对极端天气条件下的洪水威胁。随着气候变化的不确定性增加，城市排水系统的设计和运营面临着更高的要求，需要更加智能、灵活的解决方案来应对这些挑战[1]。

数字孪生技术的出现为城市排水系统的智能化管理提供了新的思路。该技术通过创建与实际排水系统对应的虚拟模型，实现对系统状态的实时监控、分析和预测。这不仅有助于优化日常运营，还能在极端天气事件中提供关键决策支持，从而提高城市的韧性和可持续性[2]。

数字孪生技术，起源于 2002 年，由 Michael Grieves 博士提出，最初用于制造业中的产品全生命周期管理[3][4]。它是一种集成多物理、多尺度、多学科属性的技术手段，具有实时同步、忠实映射、高保真度的特性，能够实现物理世界与信息世界的交互与融合[5]。数字孪生技术的核心在于其互操作性、可扩展性、实时性、保真性和闭环性，这些特点使其在智能制造、航空航天、电力、城市管理等多个领域展现出巨大应用潜力[6][7]。

本文综述了数字孪生技术在城市排水系统中的应用进展，探讨了其在提升城市水安全保障中的作用，并分析了当前的应用现状和面临的挑战。本文首先介绍了数字孪生技术的基本概念和核心组成，为读者提供了必要的技术背景。随后，详细讨论了数字孪生技术在城市排水系统中的应用进展，包括实时监测、模拟仿真、预测预警和决策支持等关键技术。此外，本文还分析了数字孪生技术在防洪减灾、水资源管理和污水系统运行提质增效等方面的应用现状，并探讨了具体的实践案例。

在挑战部分，本文指出了数字孪生技术在排水系统应用中面临的主要问题，包括数据采集的准确性、模型的复杂性、实时性要求以及跨学科合作的难度，并提出了可能的解决策略。最后，对数字孪生技术

的未来发展趋势进行了展望，强调了持续技术创新和政策支持的重要性[2] [8]。

## 2. 数字孪生技术基础

数字孪生技术是一种集成了多个前沿技术的创新应用，其基础构建在物联网(IoT)、大数据、云计算和人工智能(AI)等核心组成部分之上，这些技术共同实现了物理世界与数字世界的无缝对接和实时交互。

### 2.1. 数字孪生技术定义

数字孪生技术指的是创建一个物理实体或系统的精确虚拟副本，这个虚拟副本能够实时接收来自其对应实体的数据，以便于对实体进行监控、分析和预测。数字孪生技术的应用不仅可以提高系统的运行效率，还能在极端天气事件中提供关键的决策支持，从而提高城市的韧性和可持续性[9] [10]。

### 2.2. 数字孪生技术的核心组成与最新进展

1) 物联网(IoT): 物联网技术通过传感器、设备、网络及云平台，实现物理世界与数字世界的深度融合。物联网设备产生的数据经由消息队列(如 MQTT)传输至云端，这些数据为数字孪生提供了实时的状态信息和环境参数，是实现实时监控和精准预测的基础。随着物联网协议(如 OPC UA、DDS)的发展，跨平台、跨行业的互操作性将进一步增强，实现了设备互联和数据采集的标准化[11] [12]。

2) 大数据: 大数据技术用于存储、处理和分析来自物联网设备的海量数据，为数字孪生的准确性和可靠性提供了保障。通过大数据平台(如 Apache Kafka、Spark)对孪生体数据进行清洗、聚合与分析，可以提取有价值的信息，以解释和预测现实事件的结果和过程。大数据与 AI 的结合，使得数字孪生能够处理更大规模的数据集，提高了预测准确性和决策效率[13] [14]。

3) 云计算: 云计算提供了必要的计算资源和存储能力，使得数字孪生可以在云端进行部署和运行，实现了资源的弹性扩展和按需使用。云计算的分布式计算和云渲染技术加强了孪生世界的还原度和辅助决策能力。云计算的发展，特别是边缘计算的兴起，使得数据处理更加接近数据源，减少了延迟，提高了响应速度[15] [16]。

4) 人工智能(AI): 人工智能技术，尤其是机器学习和深度学习，为数字孪生的预测和决策提供了智能支持。AI 通过智能匹配最佳算法，自动执行数据准备、分析、融合，对孪生数据进行深度知识挖掘，从而生成各类型服务。AI 在数字孪生中的应用正在扩展，包括使用 AI 来优化模型构建、自动化数据同步、增强人机交互等。AI 的加持使数字孪生能够更准确地模拟物理实体的行为，提供更深入的分析和更智能的决策支持[17] [18]。

### 2.3. 数字孪生技术的发展历史简介

数字孪生技术的发展历史可以概括为以下几个阶段[19]-[21]:

1) 技术积累期: 在 21 世纪前，二维绘图工具以及仿真技术的出现成为数字孪生发展的必要条件。这一时期，CAD、CAE、CAM 等计算机建模、模拟仿真技术迅猛发展，并在制造业领域开始广泛应用，从产品设计发展到工程设计和工艺设计等，通过建模软件来设计产品外观、仿真软件来模拟产品性能，成为该时期发展的主要目的及形态。

2) 概念发展期: 2000~2015 年，业界以航空及军事领域为代表提出了一些列数字孪生的基本概念。2002 年，Michael Grieves 博士在美国制造工程协会管理论坛上首次提出了数字孪生的概念，最初用于描述产品全生命周期管理中的物理产品和数字信息的集成。随后，美国国家航空航天局(NASA)在《建模、仿真、信息技术和处理》和《材料、结构、机械系统和制造》两份技术路线图中正式开始使用数字孪生(Digital Twin)这一名称。

3) 应用爆发期：近年来，随着物联网、大数据、云计算和人工智能等新一代信息技术的发展，数字孪生技术的实施已逐渐成为可能，并开始被广泛应用于多个行业。数字孪生技术的应用逐渐从封闭空间小微场景，向开放空间大中型场景转变，从数字孪生零件、产品、车间，走向数字孪生楼宇、园区、城市等大尺度范围。

### 3. 数字孪生技术在城市排水系统中的应用与实践

数字孪生技术在城市排水系统中的应用是城市规划和管理领域的一项创新实践。通过构建排水系统的数字孪生模型，管理者能够在虚拟环境中对排水系统进行监控、分析和优化，从而提高系统的运行效率和应对极端天气事件的能力。

#### 3.1. 应用进展

数字孪生技术在城市排水系统中的应用进展主要体现在以下几个方面：

1) 实时监测与数据采集：通过在排水系统的关键节点安装传感器，实时收集水位、流速、水质等数据，为数字孪生模型提供动态输入。这些数据使得管理者能够实时监控排水系统的状态，及时发现并处理问题[1] [22] [23]。

2) 模拟仿真与虚拟建模：利用数字孪生技术，可以创建排水系统的高精度虚拟模型。通过模拟不同的降雨情景和排水条件，管理者能够在不影响实际系统的情况下，测试不同的管理和调度策略[24] [25]。

3) 预测预警与风险评估：结合大数据分析和人工智能算法，数字孪生模型能够预测排水系统在极端天气事件下的行为，为洪水预警和风险评估提供科学依据[26]。这有助于提前采取预防措施，减少洪涝灾害的损失[27]。

4) 决策支持与优化控制：数字孪生模型可以作为决策支持工具，帮助管理者评估不同的管理和调度策略，优化排水系统的运行。通过模拟各种可能的运营情况，管理者能够选择最佳的操作策略，提高系统的运行效率[28]。

#### 3.2. 应用现状

数字孪生技术在城市排水系统中的应用现状涵盖了多个关键领域：

1) 防洪减灾：数字孪生技术被用于模拟和预测城市洪水情景，评估防洪措施的有效性。通过模拟不同的洪水情景，管理者能够制定更有效的防洪策略和应急响应计划。例如，Samuel Park 等人开发了一个城市雨洪建模的参与式框架，结合了开源软件、虚拟现实、最小可行产品和游戏化组件，让公民参与建模过程的每个阶段，从输入数据准备，到水文模型构建，再到模型验证和实验，针对韩国江南地区反复发生的雨洪灾害进行了案例研究，展示了基于网络的交互式众包平台对利用社区参与和当地知识的实际影响[29]。此外，Manocha 等人通过构建真实环境的数字孪生模型，实现了对洪涝灾害的实时监测和精确预警，研究表明，数字孪生技术在洪涝灾害的各个阶段都展示了显著的优势，包括快速反应、实时监测、准确预警和有效应对等方面[30]。

2) 减少溢流污染：数字孪生模型有助于优化污水处理过程，减少暴雨期间的溢流污染。通过模拟降雨和污水流量，管理者能够更好地平衡处理能力和需求，减少未经处理的污水直接排入水体，从而保护水环境。Aijie Wang 等人在《Engineering》上发表的综述文章中阐明了数字孪生的基本要素，并研究了数字孪生在废水处理工程领域的变革潜力，重点介绍了数字孪生在废水处理厂和污水网络中的应用，包括硬件和软件方面[31]。此外，M. Matin Saddiqi 等人在《Wiley Interdisciplinary Reviews: Water》上发表的评论文章探讨了联合下水道溢流的智能管理，评估了适用于 CSO 管理的模型，并介绍了包括 AI、GIS、

遥感等技术在内的智能 CSO 和雨水管理背景下的研究, 这些技术可以作为智能城市和数字孪生概念的一部分集成到 CSO 和雨水管理中, 以构建具有气候适应能力的基础设施和服务[32]。

3) 污水系统运行提质增效: 数字孪生技术可以用于监控和优化污水处理过程。通过实时监测和模拟污水处理厂的运行, 管理者能够提高处理效率, 减少能源消耗和环境污染。例如, Liu Wentao 等人的研究提供了数字孪生在废水处理厂(WWTP)和污水网络、硬件(即设施和管道、水质和活性污泥传感器、水动力学和功耗)和软件(即基于知识的以及数据驱动模型、机械模型、混合双胞胎、控制方法和物联网)的应用案例[33]。另外, Komulainen 等人在挪威 Veas 废水处理厂中对使用数字孪生技术的应用做了深入研究, 基于高/中保真度的过程模拟器构建数字孪生模拟器, 并考虑加入 DCS 模拟器以增加现实的 DCS 功能[34]。

4) 排水系统调度优化与管理: 数字孪生技术在排水系统调度优化和管理方面的应用, 涉及到对排水网络的实时监控、模拟和优化调度。通过构建排水网络的数字孪生模型, 可以实现对排水系统的全貌感知和动态模拟, 从而为排水系统的调度和管理提供科学依据。例如, 朱思宇等人在《水利水运工程学报》上发表的研究表明, 基于数字孪生的智慧水利框架体系能够实现多元数据集成可视化、运行态势感知、综合分析研判、应急联动处置等功能, 为推进智慧水利建设、构建数字孪生流域提供参考[35]。

## 4. 数字孪生技术面临的挑战 and 对策

### 4.1. 面临的调整

数字孪生技术在城市排水系统中的应用虽然具有巨大的潜力和价值, 但在实际推广和应用过程中仍面临诸多挑战。这些挑战主要体现在以下几个方面:

#### 1) 技术成熟度与集成难度

数字孪生技术涉及多个领域的技术集成, 包括物联网、大数据、云计算、人工智能等。目前, 这些技术的成熟度参差不齐, 且在集成过程中存在较大的难度。例如, 物联网技术在数据采集和传输的稳定性、实时性方面仍需进一步提升。此外, 数字孪生模型的精确构建与融合、虚拟模型的自主更新与可靠评估等技术挑战也亟待解决[36]。Fuller 等人在其研究中提到, 数字孪生技术在构建物联网方面需要投入大量的传感器、建立通信信道、建设信息化平台, 都需要在原有设备的基础上, 投入大量的资本进行设备更新和优化[37]。

#### 2) 数据采集与处理挑战

数字孪生技术依赖于大量的实时数据输入, 这些数据的采集、传输、处理和分析是实现数字孪生功能的基础。然而, 数据采集的准确性、完整性和实时性难以保证, 尤其是在复杂的城市排水系统中, 数据的获取和处理更是面临挑战。此外, 数据的整合和分析需要高效的计算能力, 这对于现有的计算资源和算法提出了更高的要求。何兆成等人在其研究中指出, 复杂工业系统和复杂装备数据价值较低, 这限制了数字孪生技术的应用和发展[38]。

#### 3) 安全与隐私保护

随着数字孪生技术的应用, 大量的数据流动和存储带来了安全和隐私保护的问题[39]。城市排水系统涉及的数据不仅包括基础设施的运行数据, 还可能涉及公民的个人隐私。因此, 如何确保数据的安全, 防止数据泄露和滥用, 是数字孪生技术应用中必须考虑的问题[40]。

#### 4) 标准化与互操作性

数字孪生技术的应用需要跨领域、跨平台的协作, 这就要求有一套统一的标准化体系来确保不同系统和设备之间的互操作性。目前, 数字孪生技术尚未形成统一的行业标准, 这在一定程度上限制了技术

的快速发展和广泛应用。黄海松等人在其研究中提到，数字孪生技术在技术发展初期，需要尽快完善术语、通用架构等基础共性标准，形成统一的话语体系和规范性指导框架[41][42]。

#### 5) 成本与投资回报

数字孪生技术的开发和实施需要较大的初期投资，包括硬件设备、软件开发、人员培训等。此外，数字孪生系统的维护和升级也需要持续的投入。因此，如何平衡初期投资与长期回报，是推广数字孪生技术时必须考虑的经济因素[43]。

## 4.2. 应对策略与建议

针对上述诸多调整，可以从以下几个方面进行应对：

#### 1) 推动跨学科研究

推动跨学科研究，加强产学研合作，共同推动技术创新和集成方案的优化。加大对关键技术如物联网、大数据、云计算和人工智能的投入，以加速技术成熟度的提升。同时推动行业标准化组织制定数字孪生技术的相关标准，促进不同系统和设备之间的互操作性，降低集成成本[41]。

#### 2) 高效处理算法研发

开发更高效的数据处理算法，提升大数据处理能力，确保数据的实时性和分析的准确性。在这方面，李超科等在其研究中探讨了计算机大数据分析及云计算网络技术的发展。朱培佩等则研究了基于云计算的大数据分析优化技术，从并行处理技术，存储与访问技术两个方面探究大数据分析流程优化技术[44]。全海金和何映思针对基于云计算的大数据信息处理技术进行了深入研究，为提升数据处理算法的效率和大数据的处理能力提供了理论基础和技术支持[45]。这些研究对于确保数据的实时性和分析的准确性具有重要意义。通过这些研究，高效的数据处理算法和大数据处理能力的提升，是实现数字孪生技术在城市排水系统中应用的关键。

#### 3) 数据安全政策和隐私保护措施

制定严格的数据安全政策和隐私保护措施，加强对敏感数据的加密和访问控制，以防止数据泄露和滥用。并且结合区块链等新技术，建立更加有效可靠的隐私保护措施。王家玲等人在其研究中提到了数字孪生中的隐私保护问题，并提出了一种基于区块链的隐私保护技术[46]。

#### 4) 政策与法规支持

政策与法规的支持对于数字孪生技术在城市排水系统中的应用也是至关重要的，能够为数字孪生技术的发展提供法规保障，包括数据管理、知识产权保护等方面。同时通过政策激励和财政补贴，降低企业初期投资压力。同时，开展成本效益分析，明确数字孪生技术的投资回报路径。中国信息通信研究院在其发布的《数字孪生城市白皮书》中强调了政策在数字孪生技术应用从整体战略框架向系统性落地推进中的作用，特别是在数字孪生城市建设方面，政策部署范围更广、内容更深、力度更大[47]。通过这些政策和经济分析，可以看出政策与法规的支持对于推动数字孪生技术的发展和具有重要作用。

## 5. 数字孪生技术的未来发展与展望

数字孪生技术作为一种新兴的技术手段，其在城市排水系统中的应用前景广阔，同时也面临着快速发展的机遇。未来，数字孪生技术的发展将主要集中在以下几个方面：

#### 1) 更加精准的建模能力

随着人工智能和机器学习技术的发展，数字孪生技术的建模能力将更加精准，能够更好地反映物理对象或系统的实际情况。这将使得数字孪生模型在模拟和预测排水系统行为时更加可靠，从而为决策提供更有力的支持。

## 2) 更加智能的数据处理与分析能力

未来，数字孪生技术将借助更加先进的数据处理和分析算法，实现对海量数据的快速处理和分析，提高预测和优化精度。这将使得管理者能够更有效地监控排水系统的状态，及时响应各种情况，提高系统的运行效率。

## 3) 更加广泛的应用领域

随着数字孪生技术的不断成熟和完善，其应用领域将越来越广泛。目前，数字孪生技术已经在智能制造、智慧城市、医疗健康等领域展现出巨大的应用潜力。预计未来，数字孪生技术将在能源、农业等更多领域发挥重要作用，推动这些行业的数字化转型。

## 4) 更加高效的协同能力

未来，数字孪生技术将更好地实现不同领域之间的协同工作，通过数据共享和信息交流等方式，提高各行业的工作效率和协同能力。这将有助于打破信息孤岛，实现资源的最优配置，提升整个社会的运行效率。

## 5) 政策支持与法规建设

从政策层面来看，数字孪生已经成为各国推进经济社会数字化进程的重要抓手。中国在“十四五”规划中明确提出要“探索建设数字孪生城市”，为数字孪生技术的发展提供了国家战略指引。未来，随着政策的进一步支持和法规的完善，数字孪生技术的发展将得到更有力的保障。

## 6) 技术创新与产业生态构建

技术创新是推动数字孪生技术发展的核心动力。未来，需要持续加强数字孪生技术的研发，推动新技术的创新应用。同时，构建协同共赢、开源创新的数字孪生产业生态，促进物理世界和数字世界的深度融合，驱动更多行业对数字孪生的应用，推动技术的发展，助力各行业加速向数字化转型。

总之，数字孪生技术作为一种新兴的技术手段，具有广泛的应用前景和发展潜力。未来，随着技术的不断进步和应用领域的不断拓展，数字孪生技术将为各行各业的发展带来更多的机遇和挑战，在不久的将来，数字孪生技术将成为推动各行业数字化转型的重要力量。

## 6. 结论

本文综述了数字孪生技术在城市排水系统中的应用进展，分析了其在城市水安全保障中的应用现状，并探讨了具体的实践案例，同时指出了当前面临的挑战并对未来发展趋势进行了展望。

1) 技术融合与创新：数字孪生技术通过集成物联网、大数据、云计算和人工智能等前沿技术，为城市排水系统的智能化管理提供了新的解决方案。这些技术的融合创新，使得数字孪生模型能够实现对排水系统的全面感知、智能分析和精准调控。

2) 应用潜力巨大：数字孪生技术在城市排水系统中的应用展现出巨大的潜力。它不仅可以提高排水系统的监测和预警能力，减少洪涝灾害带来的损失，还可以优化水资源的分配和使用，提高污水处理的效率和质量。

3) 挑战与机遇并存：尽管数字孪生技术在城市排水系统中的应用前景广阔，但也面临着技术成熟度、数据采集与处理、安全与隐私保护、标准化与互操作性、成本与投资回报以及政策与法规支持等方面的挑战。这些挑战需要政府、企业、研究机构和社会各界的共同努力和协作来克服。

4) 未来发展可期：随着技术的不断进步和应用领域的不断拓展，数字孪生技术将为城市排水系统的规划、建设和管理提供更加高效和智能的解决方案。未来，数字孪生技术有望在更多领域发挥重要作用，推动各行业的数字化转型。

5) 研究的局限性与未来研究方向：本文的研究主要基于现有的文献和案例分析，可能存在一定的局

限性。未来的研究可以进一步深入探讨数字孪生技术在不同类型城市排水系统中的应用效果，以及如何更好地解决技术集成、数据安全等问题。

综上所述，数字孪生技术在城市排水系统中的应用具有重要的现实意义和广阔的发展前景。随着技术的不断发展和完善，数字孪生技术将在未来的城市排水系统中发挥更大的作用，为城市水安全保障提供更加高效和智能的解决方案。同时也应关注数字孪生技术发展中可能遇到的问题，并采取相应的措施来解决这些问题，以促进数字孪生技术的健康发展。

## 参考文献

- [1] 徐军, 连雄伟. 数字孪生在城市排水体系中的应用研究[J]. 数据中心建设, 2022(12): 25-31.
- [2] 陈国标. 基于数字孪生技术的九江城市智慧水务平台设计与实现[J]. 人民珠江, 2022, 43(6): 86-93.
- [3] 张以晓. 论数字孪生技术与智慧水利建设[J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50(7): 180-183.
- [4] Boschert, S., Heinrich, C. and Rosen, R. (2018) Next Generation Digital Twin: An Ecosystem for Mechatronic Systems? *IFAC-PapersOnLine*, **52**, 265-270.
- [5] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 1-10.
- [6] Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E., Qiao, Y., Murray, N. and Devine, D. (2021) Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation*, **4**, Article 36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>
- [7] 刘青, 刘滨, 王冠, 等. 数字孪生的模型, 问题与进展研究[J]. 河北科技大学学报, 2019, 40(1): 67-78.
- [8] 封顺天, 张东, 张舒, 等. 数字孪生城市开启城市数字化转型新篇章[J]. 信息通信技术与政策, 2020, 46(3): 9-15.
- [9] Al-Sehrawy, R., Kumar, B. and Watson, R. (2021) A Digital Twin Uses Classification System for Urban Planning & City Infrastructure Management. *Journal of Information Technology in Construction*, **26**, 832-862. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.045>
- [10] Tzachor, A., Sabri, S., Richards, C.E., Rajabifard, A. and Acuto, M. (2022) Potential and Limitations of Digital Twins to Achieve the Sustainable Development Goals. *Nature Sustainability*, **5**, 822-829. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00923-7>
- [11] 王松岳, 陈凤琴, 朱照远. 数字孪生技术在智慧水利建设中的应用[J]. 山东水利, 2023(9): 13-14.
- [12] 马士玲. 物联网技术在智慧城市建设中的应用[J]. 物联网技术, 2012, 2(2): 3.
- [13] 崔雷. 数字孪生技术在现代化水利工程中的应用[J]. 科技与创新, 2023(22): 143-145, 148.
- [14] Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H. and Sui, F. (2017) Digital Twin-Driven Product Design, Manufacturing and Service with Big Data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **94**, 3563-3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- [15] Rathore, M.M., Shah, S.A., Shukla, D., Bentafat, E. and Bakiras, S. (2021) The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities. *IEEE Access*, **9**, 32030-32052. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3060863>
- [16] 付强. 云计算与边缘计算协同发展的相关探讨[J]. 中国设备工程, 2022(12): 218-220.
- [17] Groshev, M., Guimarães, C., Martín-Pérez, J. and de la Oliva, A. (2021) Toward Intelligent Cyber-Physical Systems: Digital Twin Meets Artificial Intelligence. *IEEE Communications Magazine*, **59**, 14-20. <https://doi.org/10.1109/mcom.001.2001237>
- [18] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
- [19] 于勇, 范胜廷, 彭关伟, 等. 数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨[J]. 航空制造技术, 2017(7): 41-45.
- [20] Hu, W., Zhang, T., Deng, X., Liu, Z. and Tan, J. (2021) Digital Twin: A State-Of-The-Art Review of Its Enabling Technologies, Applications and Challenges. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, **2**, 1-34. <https://doi.org/10.1108/jimse-12-2020-010>
- [21] Wang, Z. (2020) Digital Twin Technology. In: Bányai, T. and De Felice, A.P.F., Eds., *Industry 4.0—Impact on Intelligent Logistics and Manufacturing*, Intech Open, 95-114. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80974>
- [22] 凌勇. 基于物联网的城市排水管线在线监测系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2013.
- [23] Pedersen, A.N., Borup, M., Brink-Kjær, A., Christiansen, L.E. and Mikkelsen, P.S. (2021) Living and Prototyping Digital Twins for Urban Water Systems: Towards Multi-Purpose Value Creation Using Models and Sensors. *Water*, **13**, Article 592. <https://doi.org/10.3390/w13050592>

- [24] Kim, M. and Bartos, M. (2024) A Digital Twin Model for Contaminant Fate and Transport in Urban and Natural Drainage Networks with Online State Estimation. *Environmental Modelling & Software*, **171**, Article ID: 105868. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105868>
- [25] Bartos, M. and Kerkez, B. (2021) Pipedream: An Interactive Digital Twin Model for Natural and Urban Drainage Systems. *Environmental Modelling & Software*, **144**, Article ID: 105120. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105120>
- [26] Sharifi, A., Tarlani Beris, A., Sharifzadeh Javidi, A., Nouri, M., Gholizadeh Lonbar, A. and Ahmadi, M. (2024) Application of Artificial Intelligence in Digital Twin Models for Stormwater Infrastructure Systems in Smart Cities. *Advanced Engineering Informatics*, **61**, Article ID: 102485. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102485>
- [27] Roudbari, N.S., Punekar, S.R., Patterson, Z., Eicker, U. and Poullis, C. (2024) From Data to Action in Flood Forecasting Leveraging Graph Neural Networks and Digital Twin Visualization. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 18571. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68857-y>
- [28] Thakur, S. (2024) Based on Digital Twin Technology, an Early Warning System and Strategy for Predicting Urban Waterlogging. In: Anand, A., Sardana, A., Kumar, A., Mohapatra, S.K. and Gupta, S., Eds., *Simulation Techniques of Digital Twin in Real-Time Applications: Design Modeling and Implementation*, Wiley, 301-318.
- [29] Park, S., Kim, J., Kim, Y. and Kang, J. (2024) Participatory Framework for Urban Pluvial Flood Modeling in the Digital Twin Era. *Sustainable Cities and Society*, **108**, Article ID: 105496. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105496>
- [30] Manocha, A., Sood, S.K. and Bhatia, M. (2024) Digital Twin-Assisted Fuzzy Logic-Inspired Intelligent Approach for Flood Prediction. *IEEE Sensors Journal*. <https://doi.org/10.1109/jsen.2023.3322535>
- [31] Wang, A., Li, H., He, Z., Tao, Y., Wang, H., Yang, M., et al. (2024) Digital Twins for Wastewater Treatment: A Technical Review. *Engineering*, **36**, 21-35. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.04.012>
- [32] Saddiqi, M.M., Zhao, W., Cotterill, S. and Dereli, R.K. (2023) Smart Management of Combined Sewer Overflows: From an Ancient Technology to Artificial Intelligence. *WIREs Water*, **10**, e1635. <https://doi.org/10.1002/wat2.1635>
- [33] Liu, W., He, S., Mou, J., Xue, T., Chen, H. and Xiong, W. (2023) Digital Twins-Based Process Monitoring for Wastewater Treatment Processes. *Reliability Engineering & System Safety*, **238**, Article ID: 109416. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109416>
- [34] Komulainen, T. and Johansen, H. (2022) Possible Concepts for Digital Twin Simulator for WWTP. *Linköping Electronic Conference Proceedings*, 21-23 September 2021, 398-404. <https://doi.org/10.3384/ecp21185398>
- [35] 朱思宇, 杨红卫, 尹桂平, 等. 基于数字孪生的智慧水利框架体系研究[J]. 水利水运工程学报, 2023(3): 68-74.
- [36] Botín-Sanabria, D.M., Mihaita, A., Peimbert-García, R.E., Ramírez-Moreno, M.A., Ramírez-Mendoza, R.A. and Lozoya-Santos, J.d.J. (2022) Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*, **14**, Article 1335. <https://doi.org/10.3390/rs14061335>
- [37] Fuller, A., Fan, Z., Day, C. and Barlow, C. (2020) Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, **8**, 108952-108971. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998358>
- [38] He, Y., Guo, J. and Zheng, X. (2018) From Surveillance to Digital Twin: Challenges and Recent Advances of Signal Processing for Industrial Internet of Things. *IEEE Signal Processing Magazine*, **35**, 120-129. <https://doi.org/10.1109/msp.2018.2842228>
- [39] 陈婉玲, 刘青松, 林洁群. 浅析人工智能在数字孪生城市中的应用[J]. 信息通信技术与政策, 2020, 46(3): 16-19.
- [40] 周博. 基于数字孪生技术的智慧水利应用研究[J]. 水利电力技术与应用, 2024, 6(2): 197-199.
- [41] 李贽. 智慧城市数字孪生技术应用探索及标准化研究[J]. 信息技术与标准化, 2021(10): 13-19.
- [42] da Silva Mendonça, R., de Oliveira Lins, S., de Bessa, I.V., de Carvalho Ayres, F.A., de Medeiros, R.L.P. and de Lucena, V.F. (2022) Digital Twin Applications: A Survey of Recent Advances and Challenges. *Processes*, **10**, Article 744. <https://doi.org/10.3390/pr10040744>
- [43] Rasheed, A., San, O. and Kvamsdal, T. (2019) Digital Twin: Values, challenges and Enablers from a Modeling Perspective. *IEEE Access*, **8**, 21980-22012.
- [44] 朱培佩. 基于云计算的大数据分析优化技术研究[J]. 现代信息科技, 2019, 3(14): 69-70, 73.
- [45] 全海金, 何映思. 基于云计算的大数据信息处理技术研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(24): 118-124.
- [46] 王家玲, 查道懂, 张春梅. 基于区块链的数字孪生图书馆管理与服务模式研究[J]. 新世纪图书馆, 2023(5): 63-69.
- [47] 数字孪生城市白皮书[EB/OL]. <https://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202401/P020240326602142432204.pdf>, 2024-10-18.