

基于数字孪生技术的城市洪涝灾害评估与预警系统分析

李 强

(中国航天科工飞航技术研究院, 北京 100074)

摘 要: 针对现有城市洪涝灾害评估与预警系统感知与动态响应能力不足、决策实时性差等问题, 基于数字孪生技术提出了包含物理城市、虚拟城市、智能服务、孪生数据、虚实交互 5 个模块的城市数字孪生体模型, 并分析了城市洪涝灾害评估与预警数字孪生系统. 从 5 个模块的基础组成、功能要点 2 个维度对系统架构进行了解释, 以可视化表达、数据驱动模型及虚实交互的智能闭环控制为框架分析了系统的技术架构, 从数字模型建设、数据融合、场景模拟、分析决策 4 个角度展示了系统的建设过程. 基于城市数字孪生体模型的城市洪涝灾害评估与预警系统能够实现城市洪涝灾害的自动监测预警、实时智能指挥调度等功能.

关键词: 数字孪生; 城市数字孪生体模型; 系统架构; 技术架构; 城市洪涝灾害; 评估与预警系统

中图分类号: TP 319

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037 (2022) 05 - 0476 - 10

doi: 10. 11936/bjutxb2020090015

Analysis of the Evaluation and Pre-warning System of the Urban Flood Disaster Based on the Digital Twin Technology

LI Qiang

(HIWING Technology Academy of CASIC, Beijing 100074, China)

Abstract: To solve the problems of poor ability in perception and dynamic response, and slow action in decision-making for the evaluating and pre-warning system of the urban flood disaster, a digital twin city model including five modules of Physical Entity, Virtual Entity, Services, Digital Twin Data, and Connection was developed based on the digital twin technology. The evaluating and pre-warning system based on the digital twin city model of the urban flood disaster was analyzed as follows: the system framework was interpreted by describing the basic components and the functions of the five modules; focusing on three key technologies of the visual representation, the data-driven model, and the intelligent closed-loop control in virtual-real interaction, the technical framework of the digital twin city was analyzed; the construction method of the system was illustrated from four processes of constructing the digital model, integrating data, simulating scenario, and making decision. The evaluating and pre-warning system based on the digital twin city model of the urban flood disaster can perform the functions of monitoring and warning automatically, commanding and dispatching timely and intelligently.

Key words: digital twin; digital twin city model; system framework; technical framework; urban flood disaster; evaluation and pre-warning system

收稿日期: 2020-09-24; 修回日期: 2021-02-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0805007); 中国航天科工集团有限公司资助项目(2020-M-4)

作者简介: 李 强(1989—), 男, 高级工程师, 主要从事信息集成方面的研究, E-mail: ts.lee@foxmail.com

数字孪生技术是由物联网、大数据和信息物理系统等技术发展而来的一种系统分析技术,其通过建立实体系统的多维、多时空、多尺度、多物理量的动态虚拟模型,利用传感系统实时感知实体运行状态,并利用仿真手段模拟实体模型在不同环境中的属性、行为、规则^[1-5],实现对物理世界运行状态的映射并达到事故预警、资源优化、决策指挥等^[6]功能。城市具有系统复杂度高、子系统耦合性强的特点,城市的物理要素、社会要素和网络要素共同支撑城市的各种应用与服务^[7],其中由建筑、道路、自然景观等模块组成的物理要素是城市的基础,由政府、组织和居民等层级关系组成的社会要素影响着城市运行,而网络要素利用信息流实现城市互联互通。数字孪生技术在城市中的应用将涉及城市顶层设计、规划、建设、运营、安全、民生等各个方面^[8]。数字孪生技术是物理世界的真实映射,是未来城市数字化、智能化发展的关键技术之一,其在城市洪涝灾害评估与预警中的应用能够实现城市洪涝灾害监测、预警与应急决策的互动,提升城市洪涝灾害防治水平。

将数字孪生技术应用于城市洪涝灾害防治中,研究利用三维动态建模、仿真推演等技术构建具备城市洪涝灾害评估、预演与防治能力的城市洪涝灾害防治数字孪生体,可以为城市洪涝灾害的评估与防治提出理论基础与解决方案,指导建设集雨情监测、洪涝灾害评估、灾害防治模拟及预警于一体的城市洪涝灾害评估与预警系统。

1 数字孪生技术及城市数字孪生体模型

1.1 数字孪生技术

数字孪生最初是 Grieves 等^[9]于2003年在美国密歇根大学产品生命周期管理课上提出的,他们使用“与物理产品等价的虚拟数字化表达”表述数字孪生的思想,并在随后逐步演变为“镜像的空间模型”(2003—2005年)和“信息镜像模型”(2006—2010年)等,这些思想被认为是数字孪生的雏形^[5]。2011年,美国空军研究实验室第1次明确提出了数字孪生体的概念;2012年,Glaessgen 等^[10]提出了数字孪生的三维模型,其使用物理实体、虚拟实体、信息交互接口三部分来镜像物理空间与数字空间的孪生关系,强调数字孪生的结构组成;其后,陶飞等^[11-14]提出了五维模型,其使用物理层、模型层、数据层、服务层、应用层来描述系统在物理空间与数字空间的孪生与相互作用关系,更加注重其应用与服

务。数字孪生五维模型将物理空间环境与人物、人际、人机关系等实体空间全要素信息融合,体现了物理空间与数字空间之间的界限和联系,反映虚实融合、以虚控实的控制过程。因此,五维数字孪生模型注重应用与服务的特性使其更加符合数字化发展的未来技术方向。

当前,数字孪生技术正被应用到工业产品与流程设计、制造、服务与运维等各个阶段^[2, 4, 14-15],大幅度推动工业产品全生命周期管理、生产效率提升与产品质量改进的技术变革。然而,不可否认,目前的数字孪生技术应用尚处于起步阶段,并且绝大部分工作集中于系统简单、流程规则、模式固定的工业生产领域^[16]。

1.2 城市数字孪生体

城市数字孪生体的底层逻辑是对城市本质的深层次认知^[8]。通过梳理城市的物理、社会、网络要素关系,城市数字孪生体可以将城市要素汇聚,支撑城市各种服务应用。基于数字孪生五维模型,本文提出了城市数字孪生体模型,如图1所示。

城市数字孪生体是由物理城市、虚拟城市、智能服务、孪生数据、虚实交互五维模型组成。物理城市是城市数字孪生模型准确分析与有效维护的基础,根据功能及结构,可以分为单元级、系统级和复杂系统级3个层次;虚拟城市包括几何模型、物理模型、行为模型和规则模型等,这些模型能从多时间尺度、多空间尺度对不同层次的物理实体进行精准映射;孪生数据包含物理城市、虚拟城市、虚实交互、智能服务所产生的各类数据集;虚实交互通过嵌入式系统、数据采集卡、通信协议、数据融合等实现城市数字孪生各组成部分信息的互联互通;智能服务是指对数字孪生应用所需各类数据、模型、算法、仿真、结果进行封装形成的洪涝灾害评估与预警、公共安全服务、交通管理等城市应用与服务。

1.3 城市数字孪生体建设及应用

城市数字孪生体的应用可延伸到城市规划、建设、运营的方方面面,进而实现城市运行效率与管理质量的大幅度提升。具体而言,在规划阶段,城市数字孪生体整合城乡、土地、环境、水系、市政、交通、能源、通信、产业等规划数据,实现城市总体规划、控制性详细规划、各专项规划的动态监管、集成可视和冲突检测;在建设阶段,城市数字孪生体可实现对工程项目设计、施工到竣工全过程的项目进度、成本、质量、安全、绿色施工、劳务的数字化综合监管,确保重大工程项目按时、高质、安全交付;在运营阶段,

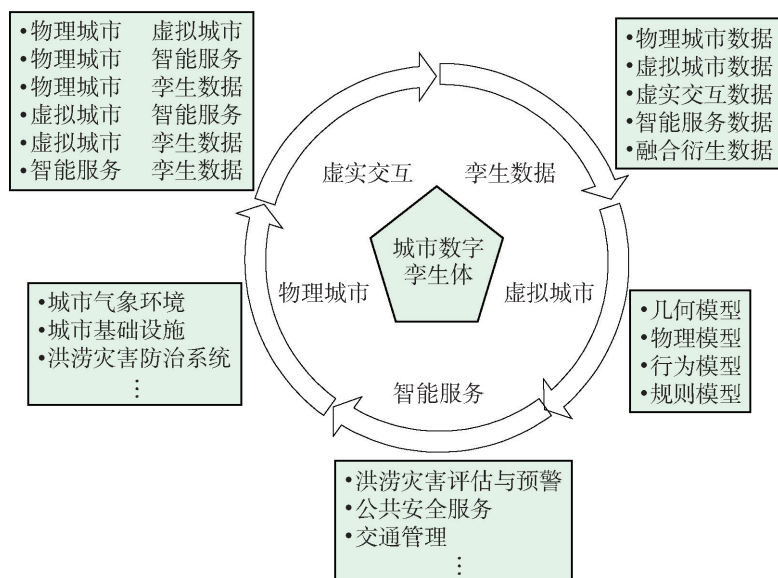


图1 城市数字孪生体模型

Fig. 1 Model of the city digital twin

城市数字孪生体可实现对城市基础设施、地下空间、能源系统、生态环境、道路交通等运行状况的实时监测与预测性维护、决策推演及综合防灾的快速响应和应急处置能力,让城市运行更稳定、安全、高效^[17]。

城市数字孪生体的建设可依托地理信息系统、建筑信息模型、物联网等技术建立城市数字信息模型,实现对城市地理实体数据、规划数据、城市建筑数据、市政设施数据、城市物联感知数据以及产业经济、社会民生、政务服务、交通出行等应用数据的多元异构集成,满足城市精准映射和虚实交互的功能。由此导致城市数字孪生体的建设存在城市全空间信息获取难、多源异构数据精准融合难、地理实体要素智能化提取难、按需结构化模型重建难等技术瓶颈,需要发展空-天-地-地下立体化城市空间全息数据采集、多源异构城市空间信息高精度融合、城市全息要素结构与语义信息智能提取、城市场景结构化语义模型按需重建等多项核心技术^[18]。

有研究者提出,城市数字孪生体建设分为4个阶段^[19]:1)对城市现状进行精准、全面、动态映射的现状孪生;2)从历史数据中学习、分析、识别、总结并发现城市运行规律的学习孪生;3)人工监督下模拟不同环境背景下发展情景的模拟孪生;4)最终通过实时数据接入与人工智能自动决策的自主孪生。现阶段,数字孪生技术在城市规划、建设、管理、运营领域的开发与应用还处于模拟孪生阶段,尚无

法实现城市数字孪生的自主孪生。值得一提的是,英国国家基础设施委员会于2017年12月发布了《数据的公共利益报告》,提出创建一个国家基础设施数字孪生体。受该计划支持,Lu等^[20]对剑桥大学的西剑桥区构建了含有数据获取层、传输层、数字建模和数据补充层、数据/模型整合层、应用层的五维结构模型的城市数字孪生体动态演示系统和动态决策支持系统的体系结构,将建筑信息模型、建筑管理数据、空间管理数据、基于物联网的实时传感器数据、资产注册数据与资产标签平台的系统集成,实现了城市数字孪生体的智能数据查询、智能优化决策等功能。该案例对物理城市感知、虚拟城市建模、数据集成及服务进行了描述,仍然没有涉及仿真模拟相关工作,但是,在目前数字孪生应用尚处于理论阶段的背景下,上述相关工作属于城市数字孪生的现状孪生阶段。

当前,城市建设领域的数字孪生技术研发尚处于探索阶段,以城市信息模型(city information model, CIM)为应用形式的城市数字孪生产品平台逐步被推广,主要包括 Skyline^[21-30]、Smart World Pro^[31]、World Wind^[32]、Virtualcity SYSTEM^[33]、City Eye^[34]、鸿城 CIM 平台^[35]等。然而,值得注意的是, CIM 是数字孪生技术的初级应用,在物理城市与虚拟城市之间的虚实双向交互仍不能达到数字孪生城市的应用需求^[36]。

城市是由不同功能和结构的子系统组成的有机整体,构建面向单元级、系统级和复杂系统级的分层

明晰、系统联动的城市数字孪生体,可以从不同角度反映城市运行状态,符合现阶段城市数字孪生体的建设现状。与城市数字孪生体的建设相比,城市洪涝灾害评估与预警数字孪生系统的建设无须形成复杂的全空间城市信息模型,其精度相对低、层次简单的地理实体数据集成在现阶段具有更好的技术可行性。

2 城市洪涝灾害评估与预警数字孪生系统分析

城市洪涝灾害评估与预警数字孪生系统的虚拟城市模型是以物理城市的数字化模型为基础,利用物理城市中信息采集终端和信息传输介质,将城市洪涝灾害相关信息实时反馈到虚拟城市,并利用虚拟城市中的数据处理、模拟分析等系统,实现对物理城市中灾害的评估与预警,达到物理城市与虚拟城市间的精准映射和虚实交互。本文梳理和总结面向城市洪涝灾害评估与预警的城市数字孪生体研究与建设典型案例,提出基于数字孪生的城市洪涝灾害评估与预警系统构建方案。

2.1 研究现状

针对城市洪涝灾害评估与预警,美国、日本等国家先后建立了基于地理信息系统 (geographic information system, GIS) 技术、暴雨洪水管理模型 (storm water management model, SWMM) 的城市洪涝灾害评估与预警系统^[37-43];国内,上海^[42]、北京^[43]、南京^[44]等城市也都建立了包含气象仿真、雨水监测和防汛预警决策支持等功能的系统。然而,由于气象仿真、洪涝模拟和基础设施数据孤立分布,共享效率低,并且缺乏有效的应急预案与动态分析手段,现有的城市洪涝灾害评估与预警系统效果有限,存在感知与动态响应能力不足、决策实时性差等问题^[45]。目前,针对基于数字孪生技术的城市洪涝灾害评估与预警,许多研究者做了大量的基础性工作。Zaalberg 等^[46]利用三维模拟方法,对城市洪涝灾害效果进行仿真,探讨了基于三维可视化技术的洪涝灾害模拟方法对提高居民应对洪涝风险能力的效果。Qiu 等^[47]开发了一套涵盖城市洪涝灾害全过程管理的灾害管理系统,将环境模型与灾难相关的数据组合,构建合适的工作流模型,并在系统中自动载入合适的数据集,以三维可视化和数据挖掘的方法提高灾害数据的可解释性和灾害防治决策过程的有效性,有效减少传统管理技术中耗时长、操作不可靠的问题。Van Ackere 等^[48]开发了一种基于 WebGIS

方法的洪涝灾害评估方法,利用三维可视化方法动态展示洪涝灾害演变过程及基础设施破坏过程,由此实现了城市基础设施灾害的预警功能。Macchione 等^[49]利用虚拟和增强现实技术,采用一维或二维水力建模方法对城市洪涝灾害进行三维模拟和仿真,编制洪水灾害和洪水风险图,构建了在三维虚拟现实环境中表示二维水力模拟结果的工作流程,实现了城市洪涝灾害的系统评估。此外,基于三维虚拟现实技术,Lai 等^[50]、Zhang 等^[51]、Liang 等^[52]、Liu 等^[53]、Leskens 等^[54]、Breuer 等^[55]也都对洪涝灾害进行了分析,以此实现洪涝灾害评估与预警。但是,必须指出的是,上述研究工作仅仅是利用三维展示技术展示城市洪涝灾害,并基于人的经验实现城市洪涝灾害的评估与预警,严格来讲尚不属于城市数字孪生体的应用范畴。

2.2 系统架构

作为城市数字孪生体的子系统,城市洪涝灾害评估与预警系统亦包含物理城市、虚拟城市、智能服务、孪生数据、虚实交互 5 个维度^[13]。图 2 展示了城市洪涝灾害评估与预警数字孪生系统的模型组成。

1) 物理城市

作为物理城市的子系统,洪涝灾害评估与预警系统是一个包含城市气象环境、城市基础设施、城市洪涝灾害防治系统等集成系统。通过在城市天空、地面、地下、河道等各层面的传感器布设,建设针对雨情、建筑物、河道、地下管线等的单元级感知体系,实现对城市基础设施要素信息的数据采集与监测。在此基础上,打通城市洪涝相关气象、基础设施、洪涝防治相关要素的界限,建立涵盖城市洪涝全要素的系统级感知体系,实现对城市洪涝灾害状态的充分感知和动态监测。在城市数字孪生体构建过程中,城市信息模型的构建及实时运行数据获取是构建高精度数字孪生体的基础,城市资产管理系统 (包含实景三维建模、建筑信息模型等) 及全域部署的智能感知体系 (包含传感器、通信、计算、电源单元组成的传感器网络) 是该过程的前提。

2) 虚拟城市

针对城市洪涝灾害评估与预警,参照物理城市分层模型,建立涵盖几何模型、物理模型、行为模型、规则模型和模拟结果等的多时间尺度、多空间尺度的城市洪涝灾害评估与预警孪生模型;将城市不同要素分解为不同的数据组织,并构建统一的逻辑结构,降低数据组织的难度;通过数据可视化综合、关

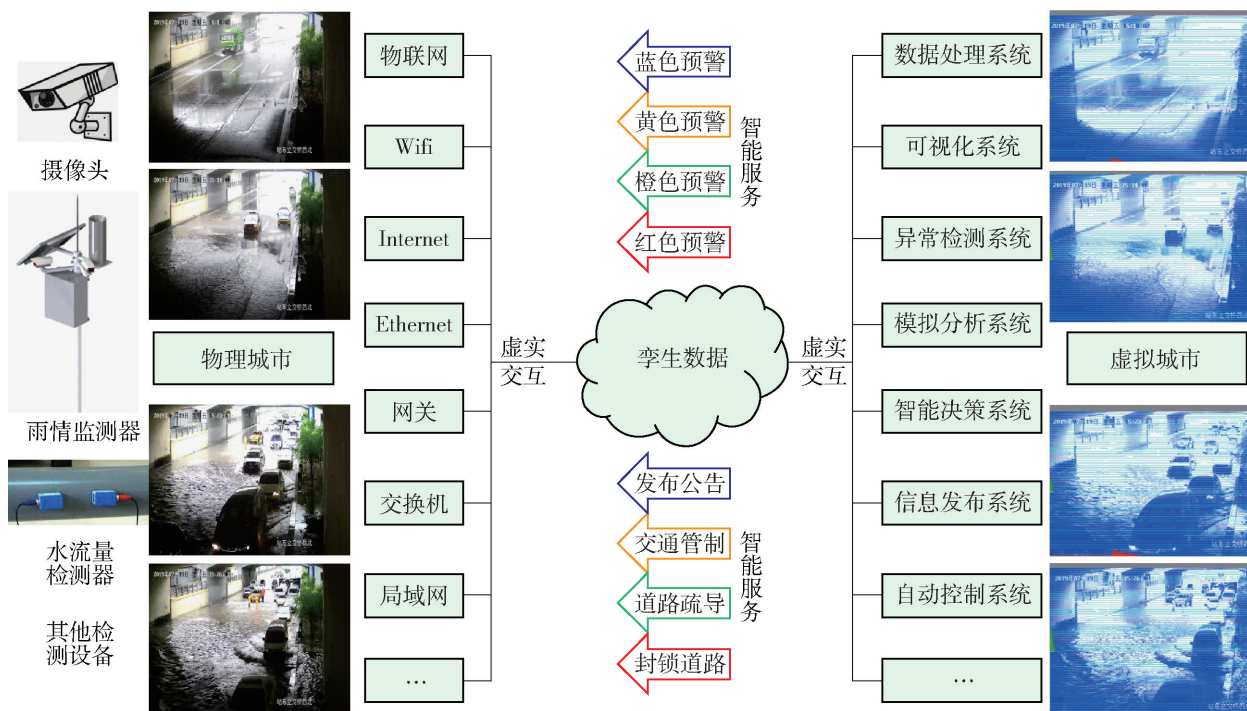


图2 城市洪涝灾害评估与预警数字孪生系统组成模型

Fig.2 Digital twin model of the evaluation and pre-warning system of urban flood disaster

联各要素数据,将与城市洪涝安全相关的数据进行剖析,从城市要素的几何参数、组合关系、物理属性、内部运行机制、历史规律等角度对物理城市进行描述,生成一个综合的城市概况,满足城市洪涝灾害评估与预警的信息需求;综合城市洪涝灾害相关全域数据信息,并采用数值模拟方法,如计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)仿真,实现孪生模型的自增长、自学习、自演化,并具备实时判断、评估、优化及预测能力。虚拟城市的运行及孪生模型演化需要物理城市实时感知数据的驱动及强大的快速数值模拟系统支撑,这对城市数字孪生体的数据治理和虚拟交互性能及数值模拟系统提出了严峻的挑战。

3) 智能服务

在城市洪涝灾害评估与预警中,城市数字孪生体将物理城市、虚拟城市、孪生数据、虚实交互融合成为虚实交互的有机体,并提供全景信息支持;通过持续收集、组织和分析物理城市和虚拟城市中的数据,利用智能分析手段预测城市洪涝灾害发生发展趋势。

4) 孪生数据

孪生数据是驱动数字孪生体运行的基础。在城市洪涝灾害评估与预警系统中,物理城市数据、虚拟城市数据、智能服务数据、虚实交互数据等汇聚成为

孪生数据,驱动数字孪生城市发展和优化。城市孪生数据具有数据量大、数据结构复杂、数据增长迅速的特点,数据标准化采集、数据治理、高通量计算存储是支撑城市数字孪生体运行,实现城市洪涝灾害实时评估与预警的关键。

5) 虚实交互

利用各种传感器、嵌入式系统、数据采集卡等对物理实体的实时动作、行为和状态进行采集,实现物理城市在数字空间的精准映射与可视化,虚拟城市中洪涝模拟程序的快速启动,数字空间中各种数字模型的实时更新、信息反馈,以及物理城市的服务功能,都需要依托物理城市与虚拟城市间的虚实交互。保证虚实交互的双向通信、互联互通,不同模块间的通信协议规范,数据库接口的标准化与模块化是城市数字孪生体建设的关键。

基于城市数字孪生体模型的城市洪涝灾害评估与预警系统能够实现城市洪涝灾害的监测预警、应急响应、指挥调度、风险管理等服务功能的自主运行。然而,数字孪生技术远未成熟,面向城市洪涝灾害评估与预警的城市数字孪生体建设尚处于初级阶段,还有许多问题需要解决,包括缺乏系统的数字孪生理论/技术支撑和应用准则指导^[13]、没有成熟的数字孪生软件支撑其深度应用^[56]、数字孪生应用优势尚未凸显^[12]等。

2.3 技术架构

在分析数字孪生城市五维模型系统框架的基础上,本文综合现有城市数字孪生体建设案例,总结了

基于数字孪生的城市洪涝灾害评估与预警系统建设的
技术架构,如图 3 所示.

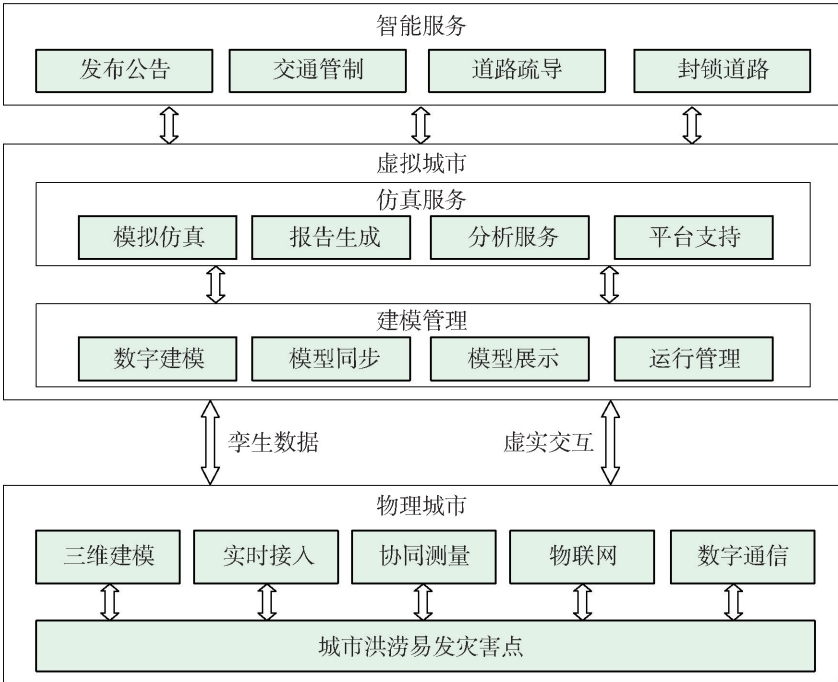


图 3 城市洪涝灾害评估与预警数字孪生系统建设技术架构
Fig. 3 Technology framework in constructing the digital twin model of the
evaluation and pre-warning system of urban flood disaster

在基于数字孪生的城市洪涝灾害评估与预警系统建设的
技术架构中,物理城市模块主要涉及实时感知技术,高精度物理城市三维几何建模技术,实时接入与协同测量技术,物联网、工业互联网技术,实时智能监测与优化控制技术等;虚拟城市模块主要涉及建模与可视化技术,数据清洗、融合与管理技术,数据存储、组织、交换、共享、挖掘和应用技术,多维多尺度数据可视化技术,虚拟现实与增强现实技术,城市运行与服务功能建模、仿真运行及验证技术等;城市智能服务模块主要涉及城市资产管理与运维技术,面向洪涝、交通等各项公共服务的城市运维数值模拟技术,异构多源数据通信与发布技术,人工智能技术,城市运维优化技术,智能决策与优化控制技术,平台系统运维技术,业务中台、数据中台构建技术等;孪生数据模块主要涉及物理城市、虚拟城市、城市智能服务、虚实交互等业务中产生的多源、异构、多模态数据治理、数据清洗、数据融合、数据存储与封装技术,大数据技术,区块链技术,服务器远程管理技术等;虚拟交互模块主要涉及物理城市、虚拟城市、城市智能服务、孪生数据之间的多源、异构、多模态数据的结构化集群存储与管理技术,GIS 空

间技术,仿真技术,人脸、语音、生物识别技术,人机界面交互技术等.

城市数字孪生体通过三维建模、物联感知、仿真模拟等技术的联合应用,实现了城市要素的可视化表达、数据驱动模型及虚实交互的智能闭环控制应用模式,为建设具备城市洪涝灾害预测预警、应急响应、实时指挥调度决策和风险管理功能的信息化综合平台,建立城市暴雨、洪涝立体监测技术体系,提高城市洪涝安全评估与预警能力,提供理论与技术基础.

2.4 建设方法

基于三维动态建模、仿真推演等技术的联合应用,构建在真实环境下具备城市洪涝灾害评估与防治模型预演能力的全域数字虚拟映像的城市洪涝灾害防治数字孪生体,将城市洪涝灾害防治技术和数字孪生技术深度融合,可以提出城市洪涝灾害评估与防治解决方案.

具体而言,基于数字孪生技术的城市洪涝灾害评估与预警系统是通过建立面向城市洪涝灾害相关的城市空间实体数据模型,融合集成以摄像头和雨情监测器等相关多源异构实时数据,智能化提取城

市洪涝灾害特征信息并驱动城市洪涝灾害场景模拟分析决策系统,通过信息系统自动提供城市洪涝灾害预警服务。

其具体过程包含:

1) 在面向城市洪涝灾害相关的城市空间实体数据模型建设中,主要建设实景三维数字模型,包括利用无人机航测、激光雷达、倾斜摄影等测绘信息技术刻画空间几何模型、拓扑图和语义等特征,实现城市三维地图的精细化表达。

2) 在融合集成以摄像头和雨情监测器等相关多源异构实时数据中,依托城市三维实景模型,匹配城市物联感知层实时感测城市洪涝灾害监测数据,包含雨量、排水、车流量等信息,实现全景细节追踪和态势感知。

3) 在智能化提取城市洪涝灾害特征信息并驱动城市洪涝灾害场景模拟分析决策系统中,利用实时监测数据特征信息驱动灾害模拟分析系统,通过物理城市的实时数据接入,驱动智能分析系统实现物理城市和虚拟城市间的统一联动、快速分析、模型科学决策、智能精准执行,形成虚实对应、相互映射、协同交互的衍生系统。

4) 基于上述过程,利用信息系统自动提供城市洪涝灾害预警服务,能够对城市洪涝灾害的发生与突变做到及时有效控制,实现对城市洪涝灾害的预警与灾害预防联动指挥。

因此,城市数字孪生体的建设与应用需要全域感知、模型构建、数据通信、数值模拟等技术的全面提升。可以预见,城市数字孪生体的建设是一项实现周期长、技术瓶颈多、协同范围大的跨专业、跨行业、复杂度极高的系统工程。

3 结论

1) 数字孪生技术是城市数字化、智能化建设的重要支撑之一。城市数字孪生体通过数据全域标识、状态精准感知、数据实时分析、模型科学决策、智能精准执行,形成虚实对应、相互映射、协同交互的衍生系统,支撑城市实体全要素的数字化和虚拟化、城市全状态的实时化和可视化、城市管理的决策协同化和智能化,实现城市的模拟、监控、诊断、预测和控制,解决城市规划、建设、运行、管理、服务的复杂性和不确定性。

2) 基于数字孪生技术的城市洪涝灾害评估与预警系统,将物理城市进行分层分析,建立涵盖物理城市、虚拟城市、智能服务、孪生数据、虚实交互 5 个

维度的城市洪涝灾害评估与预警系统,可以推动城市数字孪生体在洪涝灾害评估与预警中的综合应用。然而,由于城市数字孪生体复杂性高、软硬件及计算能力不足,面向城市洪涝灾害评估与预警的城市数字孪生体建设远未成熟。

3) 与城市数字孪生体的建设相比,城市洪涝灾害评估与预警数字孪生系统的建设在现阶段具有更好的技术可行性。基于数字孪生技术,本文提出了城市数字孪生体模型,并分析了基于数字孪生技术的城市洪涝灾害评估与预警系统的系统架构、技术架构和建设路径,研究成果可作为未来城市洪涝灾害评估与预警系统建设的理论基础。

参考文献:

- [1] TAO F, ZHANG M, NEE A. Digital twin driven smart manufacturing[M]. Amsterdam: Elsevier, 2019: 3-28.
- [2] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(1): 1-9.
TAO F, ZHANG M, CHENG J F, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2017, 23(1): 1-9. (in Chinese)
- [3] TAO F, CHENG J, QI Q, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9/10/11/12): 3563-3576.
- [4] TAO F, ZHANG M. Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing[J]. IEEE Access, 2017, 5: 20418-20427.
- [5] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768.
ZHUANG C B, LIU J H, XIONG H, et al. Connotation, architecture, and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2017, 23(4): 753-768. (in Chinese)
- [6] 田丰, 杨军. 城市大脑: 探索“数字孪生城市”[EB/OL]. [2018-07-09]. <https://developer.aliyun.com/article/727011>.
TIAN F, YANG J. Urban brain: exploring “digital twin”[EB/OL]. [2018-07-09]. <https://developer.aliyun.com/article/727011>. (in Chinese)
- [7] MA Y, LI G, XIE H, et al. City profile: using smart data to create digital urban spaces[C]//ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Göttingen, Germany: Copernicus GmbH, 2018:

- 75-82.
- [8] 周瑜, 刘春成. 雄安新区建设数字孪生城市的逻辑与创新[J]. 城市发展研究, 2018, 25(10): 66-73.
- ZHOU Y, LIU C C. The logic and innovation of building digital twin city in Xiong'an new area [J]. Urban Development Studies, 2018, 25 (10): 66-73. (in Chinese)
- [9] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]. Cham: Springer International Publishing, 2017: 85-113.
- [10] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and U. S. air force vehicles [C] // Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston: AIAA, 2012: 1-14.
- [11] 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.
- TAO F, LIU W R, LIU J H, et al. Digitaltwin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24 (1): 1-18. (in Chinese)
- [12] TAO F, MENG Z, LIU Y, et al. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment [J]. Cirp Annals-manufacturing Technology, 2018, 67(1): 169-172.
- [13] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 5-22.
- TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 5-22. (in Chinese)
- [14] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603-1611.
- TAO F, CHENG Y, CHENG J F, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603-1611. (in Chinese)
- [15] TAO F, SUI F, LIU A, et al. Digital twin-driven product design framework[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(12): 3935-3953.
- [16] LU Y, LIU C, KEVIN I, et al. Digitaltwin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues [J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2020, 61: 101837.
- [17] 孙喜庆. 数字孪生城市助力新型智慧城市建设[N/OL]. 中国建设报, 2019-07-29 (6) [2019-07-29]. <http://www.chinajsb.cn/html/201907/29/4349.html>.
- SUN X Q. Digitaltwin develop new smart cities[N/OL]. China Construction News, 2019-07-29 (6) [2019-07-29]. <http://www.chinajsb.cn/html/201907/29/4349.html>. (in Chinese)
- [18] 顾建祥, 杨必胜, 董震, 等. 面向数字孪生城市的智能化全息测绘[J]. 测绘通报, 2020(6): 134-140.
- GU J X, YANG B S, DONG Z, et al. Intelligent perfect-information surveying and mapping for digital twin cities [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(6): 134-140. (in Chinese)
- [19] 陈龙. 数字孪生: 为城市和你创建一个虚拟副本[EB/OL]. [2019-06-08]. <https://www.jiemian.com/article/3199226.html>.
- CHEN L. Digital twin: create a virtual copy to the city and people[EB/OL]. [2019-06-08]. <https://www.jiemian.com/article/3199226.html>. (in Chinese)
- [20] LU V Q, PARLIKAD A K, WOODALL P, et al. Developing a dynamic digital twin at a building level: using cambridge campus as case study[C] // International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC): Driving Data-informed Decision-making. Westminster: ICE Publishing, 2019: 67-75.
- [21] 王卫东, 赵伟山, 李治明. 基于 Skyline 城市三维地下管线管理系统的设计与实现[J]. 矿山测量, 2018, 46(4): 120-123.
- WANG W D, ZHAO W S, LI Z M. Design and implementation of 3D urban underground pipeline management information system based on skyline [J]. Mine Surveying, 2018, 46(4): 120-123. (in Chinese)
- [22] 龚俊, 朱庆, 眭海刚, 等. 从 CAD 模型到数码城市 GIS 模型的若干问题[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(3): 64-68.
- GONG J, ZHU Q, SUI H G, et al. Key issues for data transformation from CAD to GIS[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(3): 64-68. (in Chinese)
- [23] PEACHAVANISH R, KARIMI H A, AKINCI B, et al. An onto-logical engineering approach for integrating CAD and GIS in support of infrastructure management [J]. Advanced Engineering Informatics, 2006, 20(1): 71-88.
- [24] PU S, ZLATANOVA S. Integration of GIS and CAD at DBMS level[J]. Proceedings of UDMS, 2006, 6(9): 61-71.
- [25] BADHRUDEEN M, NARANJO N, MOHAVEDI A, et

- al. Machine learning based tool for identifying errors in CAD to GIS converted data [M] // Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2020: 1185-1190.
- [26] ISIKDAG U, ZLATANOVA S. Towards defining a framework for automatic generation of buildings in city GML using building information models [M] // Berlin: Springer, 2009: 79-96.
- [27] PADSALA R, COORS V. Conceptualizing, managing and developing: a Web based 3D city information model for urban energy demand simulation [C] // Eurographics Workshop on Urban Data Modelling and Visualization (2015). Groningen: Eurographics Workshop on Urban Data Modelling and Visualization, 2015: 37-42.
- [28] 张子坤, 王万鹏, 李新锋, 等. 基于 Skyline 的大型厂区三维地理信息系统建设[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(2): 98-100, 105.
ZHANG Z K, WANG W P, LI X F, et al. The construction of 3D geo-information system of large scale factory based on the Skyline software [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017, 40(2): 98-100, 105. (in Chinese)
- [29] 彭雷, 汤圣君, 刘铭崑, 等. BIM 与 GIS 集成的建筑物间距规划审批方法 [J]. 地理信息世界, 2016, 23(2): 32-37.
PENG L, TANG S J, LIU M W, et al. Building interval planning approval approach of BIM and GIS integration [J]. Geomatics World, 2016, 23(2): 32-37. (in Chinese)
- [30] 潘发, 李启发. 基于 Skline 的三维城市系统探讨[J]. 青海科技, 2011(6): 47-49.
PAN F, LI Q F. Analysis to the 3D city system based on the Skline software [J]. Qinghai Technology, 2011(6): 47-49. (in Chinese)
- [31] VAN DER VEEN E M A. Smart world: an online platform for international dissemination of Amsterdam's smart solutions [EB/OL]. [2015-04-29]. <http://www.dissertation.com/abstracts/1246301>.
- [32] 曹国, 高光林, 丘衍航, 等. 基于 World Wind 平台的建筑信息模型在 GIS 中的应用 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2013, 5(5): 114-118.
CAO G, GAO G L, QIU Y H, et al. Application in GIS of building information model based on World Wind platform [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2013, 5(5): 114-118. (in Chinese)
- [33] PLUCIENNIK T. Generating roads structure of a virtual city for GIS systems testing [J]. Studia Informatica, 2011, 32(2B): 43-54.
- [34] 杨宝明. 班联数城 CIM 软件平台城市之眼 (CityEye) [EB/OL]. [2020-01-04]. <http://citylinker.com/product/view>.
YANG B M. The Banlianshucheng's CityEye of CIM software [EB/OL]. [2020-01-04]. <http://citylinker.com/product/view>. (in Chinese)
- [35] 王晓军. 鸿城 CIM 平台 [EB/OL]. [2020-01-04]. http://www.dpinfo.com.cn/single_article-53.html.
WANG X J. The Hongcheng's CIM software [EB/OL]. [2020-01-04]. http://www.dpinfo.com.cn/single_article-53.html. (in Chinese)
- [36] 许镇, 吴莹莹, 郝新田, 等. CIM 研究综述 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2020, 12(3): 1-7.
XU Z, WU Y Y, HAO X T, et al. Review of CIM research [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2020, 12(3): 1-7. (in Chinese)
- [37] ZOPPOU C. Review of urban storm water models [J]. Environmental Modelling & Software, 2001, 16(3): 195-231.
- [38] DAVIES J W. Urban stormwater management planning with analytical probabilistic models [J]. Urban Water, 2000, 2(4): 363.
- [39] DJOKIC D, MAIDMENT D R. Application of GIS network routines for water flow and transport [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1993, 119(2): 229-245.
- [40] HSU M H, CHEN S H, CHANG T J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system [J]. Journal of Hydrology, 2000, 234(1/2): 21-37.
- [41] PENG S, FU Y Z, ZHAO X H. Integration of USEPA WASP model in a GIS platform [J]. Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics & Engineering, 2010, 11(12): 1015-1024.
- [42] YU D. Parallelization of a two-dimensional flood inundation model based on domain decomposition [J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(8): 935-945.
- [43] 孙永尚, 刘扬, 赵军合, 等. 北京市内涝积水监测预警系统设计与实现 [J]. 地理空间信息, 2015, 13(4): 117-119.
SUN Y S, LIU Y, ZHAO J H, et al. Design and implementation of Beijing stagnant water monitoring and alarm system [J]. Geospatial Information, 2015, 13(4): 117-119. (in Chinese)
- [44] 陈扬. 基于 GIS 的南京市暴雨积涝预警系统研究 [J]. 市政技术, 2013, 1(1): 31-35.

- CHEN Y. Research of rainstorm water-logging forewarning system based on GIS for Nanjing[J]. Water Supply and Drainage Engineering, 2013, 1(1): 31-35. (in Chinese)
- [45] 杨晶晶. 济南市雨水监测预警系统研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- YANG J J. Study and application of monitoring and early warning system for rain in Jinan[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [46] ZAALBERG R, MIDDEN C J H. Living behind dikes; mimicking flooding experiences[J]. Risk Analsis, 2013, 33(5): 866-876.
- [47] QIU L, DU Z, ZHU Q, et al. An integrated flood management system based on linking environmental models and disaster-related data [J]. Environmental Modelling & Software, 2017, 91: 111-126.
- [48] VAN ACKERE S, GLAS H, BEULLENS J, et al. Development of a 3D dynamic flood Web GIS visualisation tool[J]. International Journal of Safety and Security English, 2016, 6(3): 560-569.
- [49] MACCHIONE F, COSTABILE P, COSTANZO C, et al. Moving to 3-D flood hazard maps for enhancing risk communication [J]. Environmental Modelling & Software, 2019, 111: 510-522.
- [50] LAI J S, CHANG W Y, CHAN Y C, et al. Development of a 3D virtual environment for improving public participation; case study-the Yuansantze flood diversion works project [J]. Advance Engineering Informatics, 2011, 25(2): 208-223.
- [51] ZHANG S H, XIA Z X, WANG T W. A real-time interactive simulation framework for watershed decision making using numerical models and virtual environment [J]. Journal of Hydrology, 2013, 493(24): 95-104.
- [52] LIANG J, GONG J, LI Y. Realistic rendering for physically based shallow water simulation in virtual geographic environments (VGEs) [J]. Annals of GIS, 2015, 21(4): 301-312.
- [53] LIU X J, ZHONG D H, TONG D W, et al. Dynamic visualisation of storm surge flood routing based on three-dimensional numerical simulation [J]. Journal of Flood Risk Management, 2018, 11: S729-S749.
- [54] LESKENS J G, KEHL C, TUTENEL T, et al. An interactive simulation and visualization tool for flood analysis usable for practitioners [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2017, 22(2): 307-324.
- [55] BREUER R, SEWILAM H, NACKEN H, et al. Exploring the application of a flood risk management serious game platform [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(2): 93.
- [56] TAO F, QI Q L. Make more digital twins[J]. Nature, 2019, 573(7775): 490-491.

(责任编辑 梁 洁)