

# 孪生应急：数字孪生赋能应急管理的新范式\*

王秉<sup>1,2,3</sup> 徐方廷<sup>1,2,3</sup> 曹春秀<sup>1,2,3</sup>

- 中南大学资源与安全工程学院 长沙 410083;
- 中南大学安全理论创新与促进研究中心 长沙 410083;
- 中南大学安全科学与应急管理研究中心 长沙 410083)

**摘要:**[研究目的]在当今数智时代,数字孪生技术是推动应急管理变革发展的主要数智技术之一,开展孪生应急管理研究意义重大。[研究方法]首先,界定孪生应急的概念,并探讨孪生应急的特征和要素范畴。在此基础上,分析孪生应急的运行机制。最后,分析孪生应急的应用场景。[研究结论]研究表明,孪生应急包括物理实体、虚拟实体、服务、数据和连接5大基本要素,可分为风险态势感知、应急信息储存、虚实空间交互、应急数据处理和应急管理服务5大功能模块,在虚实交互、动态反馈的数字孪生流程演变中,实现风险态势实时监测、异常数据自动告警、应急资源协同调度、应急预案模拟演练和应急管理决策辅助。

**关键词:**应急管理;数字孪生;孪生应急;数智技术

中图分类号:G350;X91

文献标识码:A

文章编号:1002-1965(2023)11-0147-06

引用格式:王秉,徐方廷,曹春秀.孪生应急:数字孪生赋能应急管理的新范式[J].情报杂志,2023,42(11):147-152.

DOI:10.3969/j.issn.1002-1965.2023.11.022

## Twin Emergency: A New Paradigm for Digital Twin Enabling Emergency Management

Wang Bing<sup>1,2,3</sup> Xu Fangting<sup>1,2,3</sup> Cao Chunxiu<sup>1,2,3</sup>

- School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083;
- Safety & Security Theory Innovation and Promotion Center, Central South University, Changsha 410083;
- Safety & Security Science and Emergency Management Center, Central South University, Changsha 410083)

**Abstract:**[Research purpose]In today's data-intelligence era, digital twin technology is one of the main potential data-intelligence technologies to promote the reform and development of emergency management. Therefore, it is of great significance to carry out twin emergency research. [Research method] Firstly, this study defined the concept of twin emergency, and discussed its characteristics and elements. On this basis, this paper analyzed the operating mechanism of twin emergency. Finally, this article illustrated the application scenarios of twin emergency. [Research conclusion] The research showed that twin emergency has five basic elements, including physical entity, virtual entity, service, data and connection. Its functional modules can be divided into 1 risk situational awareness, emergency information storage, virtual-real space interaction, emergency data processing, and emergency management service. In the evolution of digital twin with virtual-real interaction and dynamic feedback, it realizes real-time monitoring of risk situation, automatic alarm of abnormal data, coordinated dispatch of emergency resources, simulation drill of emergency plan, and decision aid of emergency management.

**Key words:** emergency management; digital twin; twin emergency; data-intelligence technology

## 0 引言

在当今数智时代,数智技术正在赋能各领域发生

大变革和大发展<sup>[1]</sup>。在这样的背景下,物联网、大数据、人工智能与数字孪生等数智技术深度嵌入应急管理场景,驱动应急管理研究和实践范式发生巨大变革。

收稿日期:2022-11-15

修回日期:2023-01-30

基金项目:2022年国家社会科学基金重大项目“数智赋能推进国家安全体系和能力现代化研究”(编号:22ZDA121)研究成果。

作者简介:王秉,男,1991年生,博士,教授,博士生导师,研究方向:国家安全学、安全信息学、安全情报学等;徐方廷,女,1998年生,硕士研究生,研究方向:数智赋能应急管理;曹春秀,女,1999年生,硕士研究生,研究方向:安全情报学。

其中,数字孪生凭借其虚实交互、精准映射与全域感知等特性,可有效解决传统应急管理中的风险预警迟钝、应急信息壁垒和多元主体应急协同不足等现实弊病,被认为是赋能应急管理范式变革的潜在重要数智技术之一<sup>[2-4]</sup>。目前,学界针对数字孪生技术在应急管理领域的应用已开展一些有益探索,已有相关研究主要集中在基于数字孪生技术的突发事件风险辨识<sup>[5-6]</sup>、应急预案制定<sup>[7-8]</sup>和应急演练培训等微观层面,尚未提炼出具有普适性的孪生应急概念,对孪生应急机制研究不足。因此,数字孪生如何嵌入并赋能应急管理?数字孪生以何路径和手段革新应急管理范式? 这些问题理应引起学界和实务界的关注和深究。鉴于此,本文提出孪生应急概念,并分析它的内涵、运行机制与可能应用场景,以期为孪生应急理论研究和实践发展提供有益参考,助力数智赋能应急管理范式变革和效能提升。

## 1 孪生应急的概念及内涵

### 1.1 概念提出

数字孪生因全生命周期管理理论而起,并随数智技术发展而兴,其本质是信息建模,强调通过物理模型、传感器和历史数据等信息资源,集成多学科、多物理与多尺度属性,对实体对象的形态特征、功能性能与运作机理等进行整体抽象,从而在虚拟空间中建立起与物理实体完全等价的数字孪生体,实现对物理实体全生命周期的全息感知、实时监控和业务协同等功能<sup>[9-10]</sup>。

孪生应急是数字孪生技术在应急管理领域的创新应用,通过构建与突发事件真实场景能够完全映射和实时交互的数字孪生模型,实现对突发事件应急管理全周期、全要素与全方位的虚拟化、数字化与智慧化,进而实现应急管理精准化、精细化与循证化。从系统视角看,孪生应急是一个复杂巨系统,包括物理空间中人员、机器与设备等实体要素和虚拟空间中的数据、模型与算法等非实体要素,二者不断交互产生自适应行为,由此形成孪生应急的复杂适应性,主要体现在突发事件风险辨识与评估、风险态势预测与预警,以及应急预案推演与优化等方面。

### 1.2 主要特征

孪生应急既是将数字孪生引入应急管理后迭代升级的产物,亦是信息交互变革下的数智化应急管理诉求,既具有数字孪生技术的共性,又具有应急管理的特征<sup>[11]</sup>,强调通过真实场景和虚拟模型的双向映射、实时交互与动态反馈,使应急管理主体能够在突发事件发展演化的同时,全面辨识风险并精准预测态势,预演并验证应急管理可能影响,并由此动态调整应急预案,

使突发事件损失最小化和应急管理效能最大化。概括而言,孪生应急具有写实性、自主性和预测性 3 大特征,具体解释如下:

a. 写实性,主要体现在对应急管理全要素的精准映射。借助模拟仿真技术与 3R(VR、AR 与 MR)技术等,对物理空间中的应急管理要素进行全面数字化建模,在虚拟空间中还原真实应急场景。借助传感技术与标识技术等,实时采集、处理和储存环境中支撑应急管理决策的各类数据,并随突发事件演化实时更新数据。

b. 自主性,主要体现在自动辨识风险和自主应急决策方面。与传统执行预先设定好的应急管理动作的“自动化应急”不同,孪生应急基于对突发事件态势的感知和理解,自动辨识风险要素并对应急管理情况作出反映,无需预先配置数据环境,具有极高的适应性和灵活性。

c. 预测性,主要体现在对应急预案的迭代优化。借助机器学习和深度学习等人工智能算法模型,基于实时数据对突发事件真实应急场景进行仿真模拟,并将结果反馈作用至物理空间中的应急管理要素,在虚实空间的不断交互中实现应急预案的迭代优化与完善。

### 1.3 要素范畴

结合应急管理基本要素和陶飞等<sup>[12]</sup>提出的数字孪生五维模型,提出孪生应急的 5 大基本要素(如图 1 所示),即应急管理物理实体、应急管理虚拟实体、应急管理数据、应急管理服务和各部分间的连接,具体解释见表 1。可见,孪生应急是上述 5 大要素的一个集合体。

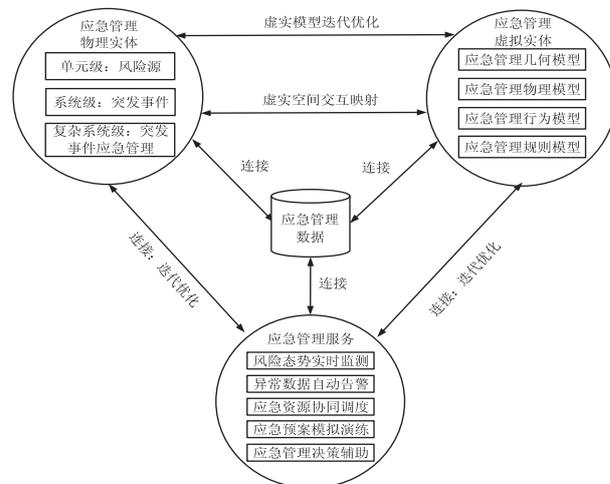


图 1 孪生应急的 5 大基本要素

## 2 孪生应急的运行机制

### 2.1 总体机制

根据孪生应急的基本要素及其相互间的逻辑关

系,提出孪生应急的总体运行机制,如图 2 所示。在图 2 中,根据“仿真建模—泛在连接—虚实映射—迭代优化”的内在逻辑,通过构建应急管理孪生体优化现实空间中的应急管理要素与流程,实现应急管理效能最

大化。图 2 所构建的框架可帮助应急决策者认知突发事件应急管理的内在机制,辅助其提高建模的准确性,从而不断提高虚拟模型仿真的孪生性和有限性。

表 1 孪生应急的基本要素内涵

要素名称	内涵解释
应急管理物理实体	应急管理物理实体是构建孪生应急要素模型的基础,包括单元级、系统级和复杂系统级 3 个功能层级 <sup>[13]</sup> 。其中,影响未来突发事件的风险源是应急管理的微观对象(单元级);不同风险源相互作用形成突发事件,是应急管理的中观对象(系统级);应急管理全周期涉及应急管理主体(应急决策者、应急管理者和教育培训人员等)、应急管理客体(突发事件、风险源、应急物资等)、应急管理手段(包括技术手段和制度手段)和应急管理目标,是应急管理的宏观对象(复杂系统级)
应急管理虚拟实体	应急管理虚拟实体是应急管理物理实体在虚拟空间中的忠诚数字化镜像,包括应急管理几何模型、应急管理物理模型、应急管理行为模型和应急管理规则模型 4 部分 <sup>[12,14]</sup> 。其中,应急管理几何模型描述应急管理应急管理物理实体的位置、形状和尺寸大小等几何属性;应急管理物理模型将应急管理物理实体的几何属性和物理属性同时考虑在内,反映风险要素的内部结构及突发事件的演化机理;应急管理行为模型响应外界风险作用,对不同阶段的应急管理行为进行实时仿真;应急管理规则模型是对已有应急管理法律法规与规章制度等显性规则进行建模,并通过深度学习算法挖掘如应急管理专家经验等隐性规则,使孪生应急模型具有风险评估、应急预案优化与风险态势预测等功能
应急管理服务	应急管理服务是对开展应急管理所需的一切应急管理要素进行封装处理,在应急管理数据驱动和连接保障下,基于时间、空间与指标等多个维度,提供风险预测实时监测、异常数据自动告警、应急资源协同调度、应急预案模拟演练和应急管理决策辅助等服务。可智能化查看、筛选与分析突发事件数据信息,并根据应急管理事项紧急程度进行自动分级,保障重要应急管理事项优先处理,为突发事件应急管理提供决策支持,提高突发事件应急管理效率和能力
应急管理数据	应急管理数据是孪生应急体的网络末梢、电子元器件与多元社会主体有机交互的产物,也是孪生应急的底层逻辑和核心驱动。从结构上看,应急管理数据主要有结构化、半结构化和非结构化 3 种。其中,半结构化和非结构化数据凭借其多维、实时和异质的特征成为孪生应急模型的主要数据支撑。从内容上看,应急管理数据包括应急管理物理实体数据、应急管理虚拟实体数据、应急管理服务数据、应急管理连接数据及前面四者的融合数据,随物联网和互联网对应急管理数据的实时采集,不断更新和迭代优化应急管理数据,共同构成孪生应急的数据环境
各部分间连接	保障上述各要素之间实施有效的应急管理数据传输和互融 <sup>[15]</sup> 。通过将孪生应急各要素联系起来,实现虚实交互迭代优化,主要体现在:第一,由实向虚,借助大数据、物联网、增强现实和模拟仿真等技术,实现风险要素、管理规则与行为特征等的忠诚复刻和精准映射化;第二,以虚治实,通过对各要素间进行深度分析,研判风险预测,并对应急管理规划与服务等进行迭代优化与实时引导

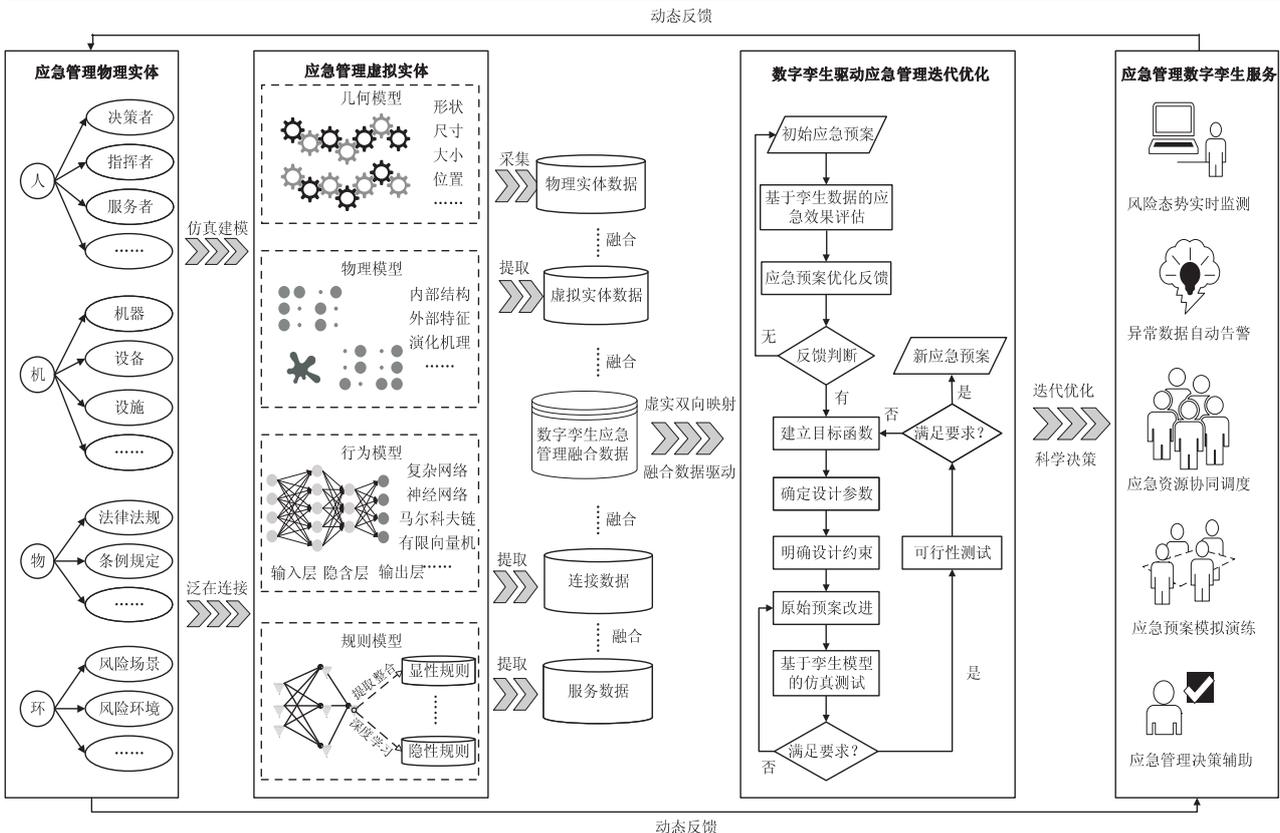


图 2 孪生应急的总体运行机制

a. 仿真建模,对应急管理要素的数字化重构。将物理世界中应急管理所涉及的一切人(即应急管理主体,如应急管理决策者、指挥者与服务者等)、机(即应急管理载体,如机器、设备与设施等)、物(即应急管理客体,主要指风险源或突发事件)和环(即风险环境)等要素模型化、虚拟化与数字化,建立成计算机和网络能够感知、识别、处理和分析的全息数字模型,如应急管理几何模型、物理模型、行为模型和规则模型等。

b. 泛在连接,在物理实体与虚拟实体间建立关联和数据交换。物联网是实现泛在连接的核心技术,通过物联网、传感器和监控设备等,实时采集突发事件基础数据,作为应急管理虚拟模型运行的新初始值和新边界值。其中,高带宽技术支持海量信息同步传输,降低非必要时延;云储存中心在区块链基础的支持下,可实时获取、储存和分析应急管理数据,为智慧应急管理和服务提供数据支撑。

c. 虚实映射,在大数据处理技术支持下,融合采集和提取得到的应急管理物理实体数据、虚拟实体数据、连接数据与服务数据等,实现物理实体和虚拟实体间

的实时映射与数据流动,实现从虚拟化到数字化再到镜像化的过程。同时,利用各类高精度的映射算法、边缘计算算法和 5G 通信等技术,实现应急管理场景的虚实融合和智慧运行,体现孪生应急的可交互性。

d. 迭代优化,基于时间、空间、效率、性能和成本等约束条件,在大数据、云计算和区块链等数智技术和机器学习、神经网络等算法驱动下,实现不同级别孪生体的自运行和自优化。其中,单元级孪生体内部各元器件间的数据率先实现共享,进而通过自主学习形成更大规模的智慧应急管理孪生体,实现与虚实空间完全同步的共生、共治和共演化。

## 2.2 功能机制

为全面展现孪生应急的功能属性,结合应急管理业务流程<sup>[16-17]</sup>,将孪生应急划分为风险态势感知、应急信息储存、虚实空间交互、应急数据处理和应急管理服务 5 大功能模块,不同模块的基本功能和交互对象不同,具体解释见表 2。基于此,运用数字孪生思想表达各模块间的交互关系,见图 3。

表 2 孪生应急功能机制的构成模块

模块名称	基本功能	交互对象
风险态势感知模块	采集现实环境中的风险数据,感知并研判突发事件风险态势	应急管理物理实体、应急信息储存模块
应急信息储存模块	储存有应急管理物理实体信息和虚拟孪生体的建模信息,辅助孪生应急模型的迭代优化和功能实现	风险态势感知模块 应急管理虚拟实体
虚实空间交互模块	采集内外部的孪生应急数据,并将其传输至分析模块	应急管理物理实体、应急管理虚拟实体
应急信息处理模块	接受、分析与挖掘一切孪生应急数据,从中提取并储存应急管理物理实体信息和虚拟孪生体的建模信息,辅助孪生应急模型的迭代优化和功能实现	虚实空间交互模块 应急管理服务模块
应急管理服务模块	执行应急管理决策指令,实现应急管理功能输出,并通过实践应用提出数字孪生模型优化建议,将优化指令反馈作用于现实应急场景	应急管理服务模块 应急管理物理实体

a. 风险态势感知模块,是孪生应急体系的基础支撑。传统突发事件应急场景中的物理传感器存在风险自主辨识和处理能力弱、体积和功耗较大、移动和维护困难等功能缺陷,导致其仅能满足局部应急管理需要,难以实现全生命周期应急管理。风险态势感知模块将物理传感器、监控设备、红外线、RFID 与 WiFi/ZIG-BEE 节点等多端智慧传感设备连接起来,实时采集突发事件场景中的结构化和非结构化应急管理数据。此外,在物联网、大数据和 5G 通信等技术支持下,结合地理物流系统采集突发事件舆情信息,并根据应急调控指令内容,开展新一轮的风险态势感知工作。

b. 应急信息储存模块,是孪生应急的“信息仓库”。由于突发事件的不确定性、复杂性和衍生性,海量异构的风险信息不断涌现,呈现多主体和分散化的特点。因此,对多类(如音频、图片和文字等)、多源(包括应急管理部门、机构组织与社会大众等)突发事

件信息进行采集并储存,形成支持应急管理与决策的应急信息云储存中心至关重要。应急信息云储存中心可为整个孪生应急体系运行提供数据支撑,可实现应急管理物理实体数据、应急管理虚拟实体数据、应急管理服务数据、应急管理连接数据及其以上四类数据的融合数据的海量储存与高速调用。

c. 虚实空间交互模块,是沟通物理空间与虚拟空间的“绿色通道”。通过集成温度、湿度、光线、压力与动作感知等感知技术<sup>[3]</sup>,为相关人员复现突发事件真实场景提供技术支撑,通过构建突发事件虚拟场景,支持应急管理虚拟漫游,为应急管理决策者提供风险信息、应急资源信息与应急服务信息等,方便其快速定位风险位置和应急管理进程。此外,还可借助增强现实技术,完成智能终端、操作界面与门户网站间的切换交互,支持决策者实时查看应急管理历史数据和实时数据,支持历史应急情况重演和远程资源调配。

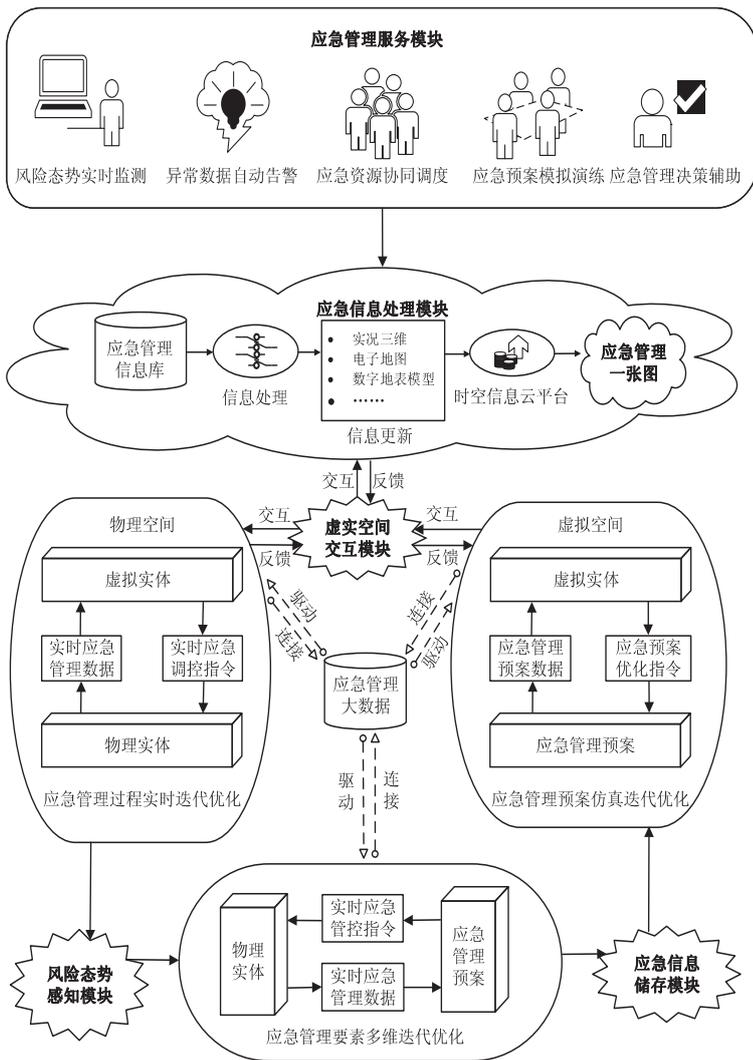


图 3 孪生应急的内在功能机制

d. 应急信息处理模块,为精细化应急管理提供“数字底座”。信息处理主要是对含有突发事件发生时间和地点的非空间地理信息空间进行空间化处理,生成含有经纬度坐标的时空数据,在地理空间信息技术的支持下完成突发事件实况三维、电子地图和数字地表模型等的信息更新,进而形成孪生应急信息库,并将处理后的应急管理信息反馈至终端人员,为智慧应急提供多尺度、精细化的辅助决策支持。

e. 应急管理服务模块,面向实际的应急管理需求并提供相应的功能。主要应用形式有:突发事件专题地图,一图掌控风险要素和应急资源的空间分布,为风险辨识、物资调配和抢险救灾等应急活动提供科学依据;风险隐患“一张图”,探索并实现如矿山、发电厂、学校和科研单位等应急重点单位的风险辨识评估,按照风险等级生成风险四色图,可直观了解区域风险要素信息和应急管理分级情况;应急响应“e 键通”,打破应急管理部门桎梏,连通各职能部门间的数据孤岛,通过数字孪生应急平台进行双向实时音视频交流,满足突发事件现场实时通信的应急要求,使应急响应工作

部署更加准确。

### 3 孪生应急的应用场景分析

第一,应急管理战略规划与部署。在数字孪生驱动下,整合现实场景中的所有应急管理数据信息、应急管理规划行为和应急管理需求等相关信息资源,通过孪生应急模型对虚拟应急管理规划进行模拟,动态研判执行效果,预测分析应急管理战略的实施情况,从而对规划的科学性、合理性和可行性进行监管评估,实现应急管理战略规划的最优化决策。

第二,突发事件态势感知与推演。应急管理强调同步关注信息、物理和社会三元空间的风险要素<sup>[18]</sup>,实时感知突发事件风险态势,这就需在多元孪生大数据的驱动下,根据应急管理孪生模型构建多模态、高保真与精细化的应急管理智慧大脑,通过“物理-信息-社会”三元空间的作用与交互<sup>[19]</sup>,智能预测突发事件整体态势,发现复杂风险环境下的突发事件演变规律及风险要素间的潜在关联与多元应急主体隐性规则,形成全方位风险态势感知、全周期应急管理和全要素应急协同的孪生应急模式。

第三,应急演练模拟仿真与灾后重建。孪生应急可对突发事件应急管理全要素、全业务和全过程进行精准映射和模拟仿真,通过事先设置的阈值驱动相关主体按照应急预案中的既定角色和功能步骤开展演练,并对整个演练过程中的人员协同情况、物资调配情况与预案执行情况等进行评估与优化<sup>[20]</sup>。此外,通过 GPS、智能物联感知和三维测绘技术,真实还原突发事件现场环境,为突发事件恢复与重建提供了参考依据和数据保障。

第四,应急指挥与教育培训。数字孪生应急管理模型可模拟突发事件真实情形,提供沉浸式和情境化的突发事件情景体验,实现远程应急智慧和全息化教育培训。应急指挥人员、参训人员和体验者等可通过增强现实装备连接突发事件孪生体,远程感受突发事件现场,通过手势交互、语言交互和远程标注等<sup>[21]</sup>手段进行实时通信,让应急信息传递可感可知,重塑应急知识传统形式。此外,通过分析文本、语音、录像和三维标注等反馈信息,可进一步优化应急预案,不断更新应急管理知识库。

#### 4 结束语

数字孪生为重塑应急管理基本逻辑提供了良好契机,为应急管理范式变革提供了技术路径。本文所提出的孪生应急是应急管理的未来发展方向,致力于实现应急数据的有效整合、应急主体的多元协同和虚实世界的同步应急,赋能全周期智慧应急。与传统应急管理范式相比,孪生应急在风险态势实时监测、异常数据自动告警、应急资源协同调度、应急预案模拟演练和应急管理决策辅助等方面具有明显优势。孪生应急作为一个由新兴技术驱动的新构想,孪生应急的探索实践才刚刚开始,其在发展过程中必然会面临到伦理道德、隐私保护与数据安全等诸多问题和争议。未来,需继续探索孪生应急的内在机理、运行逻辑和赋能路径等,丰富孪生应急理论,并结合实例检验孪生应急理论的科学性和可行性。此外,还应配合组织结构调整、制度政策变革、技术升级创新以及强烈的革新信念,实现孪生应急的美好愿景,充分发挥数字孪生技术在应急管理数智化进程中的重要作用。

#### 参考文献

- [1] 王 秉. 数智赋能推进国家安全体系和能力现代化:一个研究框架[J]. 情报理论与实践, 2022, 45(12): 1-7.
- [2] 罗椅民. 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): 1-18.
- [3] 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.
- [4] Nikolakis N, Maratos V, Makris S. A cyber physical system (CPS) approach for safe human-robot collaboration in a shared workplace[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 56(4): 233-243.
- [5] Ham Y, Kim J. Participatory sensing and digital twin city: Updating virtual city models for enhanced risk-Informed decision-making[J]. Journal of Management in Engineering, 2020, 36(3): 4020005. 1-4020005. 12.
- [6] Hoque M A, Davidson C. Design and implementation of an IoT-based smart home security system[J]. Applied Sciences, 2019, 7(2): 85-92.
- [7] Chen J, Wang L, Li X, et al. Research on a lift car collision avoidance strategy for a circulatory multipath elevator based on digital twins[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1884(1): 012033(6pp).
- [8] 刘占省, 张安山, 王文思, 等. 数字孪生驱动的冬奥场馆消防安全动态疏散方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 962-971.
- [9] 张文光, 阚宗峰. 创新煤矿应急预案演练模式提升应急救援处置能力[J]. 产业与科技论坛, 2016, 15(15): 214-215.
- [10] Park K T, Lee J, Kim H J, et al. Digital twin-based cyber physical production system architectural framework for personalized production[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(5): 1787-1810.
- [11] Negri E, Fumagalli L, Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems[J]. Procedia Manuf, 2017(11): 939-948.
- [12] 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): 1-18.
- [13] 马 捷, 李 璐, 耿寒冰, 等. 智慧居家养老服务三级应急响应信息协同体系构建[J]. 图书情报工作, 2019, 63(15): 33-43.
- [14] 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.
- [15] Tao F, Zhang M, Liu Y, et al. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment[J]. Cirp Annals, 2018, 67(1): 169-172.
- [16] 王 宁, 王延章. 应急管理体系及其业务流程研究[J]. 公共管理学报, 2007(2): 94-99.
- [17] Zheng H, Feng Y, Zhang Z, et al. Research on intelligent product conceptual design based on cognitive process[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 230(12): 2060-2072.
- [18] 王 秉. 安全4.0时代的重大安全科学问题展望[J]. 灾害学, 2022, 37(2): 6-11.
- [19] 徐方廷, 黄 锐, 王 秉. 三元空间融合视阈下的安全态势感知模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(11): 5-11.
- [20] 王 璐, 张兴旺. 面向全周期管理的数字孪生图书馆理论模型、运行机理与体系构建研究[J]. 图书与情报, 2020, (5): 86-95.
- [21] 陈 超, 闫 艳. 应用灾害数字孪生体的应急预案演练系统[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(7): 90-96.

(责编/校对: 贺小利)