

# 预案演练场景迭代的数字技术伺服逻辑

李瑞昌 王 勇\*

**[内容提要]** 应急预案演练有实地演练和桌面演练两种基本方式,共同支撑起了第一代预案演练场景构建。实地演练属于实战演练,现实感强,但场景布设有限;桌面演练带有虚拟演练属性,具有场景设计灵活的优点,但缺乏实战感。这种现象被称为“预案演练困境”。基于传统信息技术生成的数字化预案推演作为第二代预案演练场景也未能满足既可灵活设计又保证强现实感的演练需求。新兴数字技术集成的复杂数字孪生体支撑着第三代虚实融合演练场景。随着数字技术迭代升级,复杂数字孪生体伺服预案演练的场景要素结构化能力不断增强,虚拟演练与实地场景相互赋能、持续交互、有机融合,共同推动预案演练提质增效,不断地提高预案演练水平。

**[关键词]** 应急预案, 预案演练, 场景迭代, 复杂数字孪生体, 虚实融合

**[Abstract]** There have been two basic approaches to emergency plans: tabletop exercises and field exercises. They support the first-generation of planning exercise scenario together. Tabletop exercises carry the attributes of virtual exercises, which have the advantage of more scenario design, but lack a sense of real-world; Field exercises are practical exercises with a strong sense of reality, but with limited scenario deployment. As the second-generation scenario, the digital planning exercise based on traditional information technology also fails to meet the demand. The complex digital twins is driving the iteration of planning exercise scenarios into the third-generation virtual-reality fusion scenarios. With the iteration and upgrading of the digital twins technology, the ability of the complex digital twins service emergency planning exercise scenario element structuring continues to grow. The mutual empowerment and continuous interaction of virtual exercises and field scenarios, working together to promote the iterative updating of the planning exercise, continuously improve the level of planning exercise.

**[Key Words]** emergency plans, emergency planning exercise, scenario evolution, complex digital twins, virtual-real fusion

\* 李瑞昌, 复旦大学国际关系与公共事务学院教授、博士生导师、公共行政系主任; 王勇, 复旦大学国际关系与公共事务学院博士研究生。

## 一、引言

应急预案是开展应急管理工作的政策工具，预案体系是应对突发事件的基本依据，而预案演练则是检验应急预案实用性的重要手段。2005年以来，我国已形成从国家总体预案到专项预案、部门预案、地方政府及部门预案、企事业单位预案和重大活动预案的应急预案体系。习近平总书记在主持中央政治局第十九次集体学习时强调，要加强应急预案管理，健全应急预案体系，落实各环节责任和措施。预案演练也作为预案管理工作的重要内容成为一项专业性的应急管理活动，优化预案演练方式是加强应急预案管理和健全应急预案体系的基本路径。

理论界和实务部门针对应急预案演练的准备工作、实施方案和评价体系已进行了相当多的研究和探索，形成了实地演练和桌面演练两种基本的预案演练类型，并推广应用。然而，在实践中，应急预案演练是以静态的行政层级和部门分工为基准开展的，演练流程同质化、复制化问题严重，演练内容缺乏针对性、相互衔接不足以及缺乏可操作性等（刘霞、严晓，2011）；桌面演练往往沦为“纸上谈兵”，实地演练也常常变成“假唱假练”，预案演练陷入脱实向虚的困境。

为什么会出现预案演练困境呢？诸多学者认为，应急预案的实用性不足是其原因。为此，一些研究者提出了增强预案的可操作性、加强预案演练规划等管理活动以及构建数字化预案等方案措施。但是，这些措施仍未被证明是有效办法。应急预案的实用性不足是其表象，现实中预案演练场景由于很难同时具备桌面演练的多元化场景设计和实地演练的现实感，导致预案演练场景与突发事件演化的实际场景不匹配，对管理者应急处置的指导作用有限，才是其根本原因。为什么预案演练要强调“场景”呢？“场景”不仅是数字时代的创新驱动，也是应急管理实践的重要抓手。以场景构建为起点，凝练预案演练的场景问题，

识别演练场景的管理需求,才能真正提升预案演练的实际效果,同时也能够倒逼前沿数字技术的研发(尹西明等,2024)。

在场景迭代的需求驱动下,复杂数字孪生体(Complex Digital Twins)的兴起正为解决预案演练场景与突发事件实际场景不匹配提供技术支撑。作为一个数字技术生态体系,复杂数字孪生体中应用了信息化、大数据、人工智能、区块链和 Web3.0 等多项技术,也交叉集成了扩展现实技术(XR)、多端交互技术、数字孪生技术等新兴技术,并随着这一系列数字技术迭代升级而不断实现功能优化。从本质上来看,复杂数字孪生体构建起了一个既平行于现实世界又独立于现实世界的虚拟空间,具有融合共生的特质。总而言之,复杂数字孪生体是技术与治理的又一次融合创新,并有望成为未来城市发展的新模式(魏勇、吕聪敏,2020)。

在数字化浪潮下,不仅支撑复杂数字孪生体的数字孪生、人工智能、区块链等众多技术已普遍应用,而且数字孪生体自身应用也已遍及经济和社会的诸多领域。在公共安全领域,数字孪生体所集成的技术被应用在应急业务之中,如实时风险监测预警、沉浸式应急管理培训等(牛广利等,2023),被用于改善应急工具的治理效能。实务部门积极探索运用 5G、物联网、数字孪生等复杂数字孪生体相关底层技术优化应急预案演练工作(李琛亮等,2022),虽取得初步成果,但缺乏理论研究。2024 年 1 月国务院办公厅印发的《突发事件应急预案管理办法》中也明确提出“要注重运用信息化数字化智能化技术,推进应急预案管理理念、模式、手段、方法等创新”。那么,以复杂数字孪生体为代表的数字技术能够将桌面演练的多元化场景设计和实地演练的现实感强的优势结合起来吗?或者说,复杂数字孪生体能否牵引匹配突发事件演化实际场景的预案演练场景吗?进而言之,以复杂数字孪生体为代表的数字技术何以服务应急预案桌面演练和实地演练的有机融合,从而破解预案演练困境,完善应急准备理论,这是本文所要讨论的问题。

## 二、文献综述和分析框架建构

### (一) 文献综述

针对预案演练困境,现有研究从三个方面进行了成因分析。

一是预案演练场景设计的“单调化”。现有预案制定时,场景设计往往基于已发生的事件或者现实场景,且基本采用单个场景,而较少采用多种场景叠加的复杂场景构造。换句话说,现有预案演练(尤其是实地演练)的场景是经验性场景而非想象性场景,是单灾种、线性关系的场景而非全灾种、复杂关系的场景,且对风险的分类分级、监测预警、应急恢复、舆情应对等方面缺少具体的规定,缺少对具体应急场景的风险源辨识和应急联动规定(张再生、孙雪松,2019)。总之,预案演练的场景设计呈现“单调化”。

二是预案演练操作流程的“脚本化”。应急预案的实地演练经常存在预设的“脚本”,使得应急演练场景的紧急性降低。突发事件发生后往往“牵一发而动全身”,超出脚本演练的场景预设,导致应急预案演练难以适应预案应用的需求。然而,桌面演练虽操作方便、形式灵活、预设场景多元,但在模拟操作时缺少“真实感”,降低了演练效果。

三是预案演练主体参与的“松散化”。实践中的预案演练往往是以某专项小组的名义组织相对有限的职能部门进行演练。随着社会经济的日益复杂和紧密联系,不同系统的风险往往会叠加耦合形成系统性风险(李智超,2022)。突发事件一旦发生并演化,往往牵连多个地区、多个部门,面对系统性风险,单一部门的单一应急预案由于缺少统一的管理行动逻辑和知识术语表达,会极大降低应急处突效率。如何破解预案演练困境成为学界及实务部门面临的共同难题。既有的学理研究主张从组织和技术两个路径出发优化应急预案管理模式。组织路径主要从体制、机制和法制三个方面优化预案演练模式,如构建预案演练主体的交互合作机制、沟通协调机制(肖文涛、许强龙,2016;倪慧芸、

姚晓晖,2019),基于情景构建方法优化预案演练(王永明,2019)等。技术路径主张借助数字技术优化应急演练,综合利用数字信息技术、地理信息技术、图像显示技术、仿真模拟设计等现代技术手段,实现预案脱离传统文本形式的可视化和可操作化。例如,通过整合应急信息,搭建基础数据平台以及应用灾害数字孪生体构建应急预案演练系统(陈超、闫艳,2021)等。但是,这些方案依然只是在提高现有的单个预案的演练效果而非预案演练模式的总体优化。

一方面,组织视角的研究大多聚焦于预案演练,尤其是实地演练中的组织分工与协作等体制机制问题,虽然也有对预案演练的情景构建展开研究,但“事件—任务—行动(评估)”模式下的情景构建方法也只是对未来突发场景简单的类比与想象,未能从根本上解决演练场景预设单一与突发事件演化场景多变之间的矛盾。另一方面,现有较为成熟的数字化应急预案演练系统依托可扩展标记语言(XML)技术、本体模型、Petri网(一种可视化的建模工具)等(黄卫东等,2022),虽已经摆脱了文本形式桌面推演的限制,并开发出针对非常规突发事件情景演化的层次网络型结构,但其演练场景仍然是以传统桌面演练已有案例库为基础进行的预设,未能真正实现实时追踪与还原突发事件现实时空场景,同样不能从根本上破解预案演练困境。

实践中,我国应急管理已开始应用物联网、数字孪生、人工智能等数字技术优化预案演练。例如,基于数字孪生技术的防洪应急演练优化,通过结合预演结果对比分析,综合考虑并制定调度预案,在洪水演进过程中实时、快速下发调度指令等。这些理念、理论及举措的创新在一定程度上缓解了实践中预案演练的部分问题,尽管并未形成一个完美的方案,但是为继续探索和尝试提供了先例。正是在这种意义上,集成了数字孪生、人工智能等技术的复杂数字孪生体为整合桌面演练和实地演练的各自优势、破解预案演练困境提供了一个新的思路。

## (二) 分析框架的建构

预案演练是应急管理行动过程的“预演”呈现,规定了突发事件发

生后由谁处置、如何处置、任务分工和行动过程,本质上是对不同突发事件场景下相关主体应急管理行动的规范。预案演练规定和呈现了应急处置的责任主体及其行动过程,而管理活动需要基于现实情况开展,若现实中突发事件的演化超出了预演情境,管理者可能会束手无策或者无法“灵活”决策,预案演练的效果会大打折扣。因此,破解预案演练困境的关键步骤是能够使预案演练的场景实时最大程度贴合实战中突发事件的演化情景,既能够实现演练场景设计的灵活性、多样性,也能够实现演练全过程贴合真实情景,整合桌面演练和实地演练优势,为管理者提供有效参考。那么,如何才能以突发事件演化的真实情景为基准构建预案演练场景呢?

现实中,突发事件发生后,其释放的能量随着时间的演进以不同形式对物理空间的不同位置造成冲击,导致不同程度的人财损失。在不同的时间节点上,突发事件演化带来的连锁反应也存在差异(季学伟等,2009)。当前,城市系统愈加复杂,城市的大规模体量、高人口流动性,使得突发事件演化具有非线性、连锁性、联动性和放大性等新特征,时空场景不断演化,以上特征在河南郑州“7·20”特大暴雨灾害中均有体现<sup>①</sup>。总体来看,突发事件的场景演化特征正在从单灾种转向多灾种、影响范围从局部区域转向跨区域,这其中涉及的人(Manpower)、地(Area)、物(Object)、事(Event)、环(Environment)等场景要素愈加耦合复杂。信息论创始人、美国数学家克劳德·香农(Claude Shannon)将信息定义为“减少偶然性和不确定性之物”,可以提高认知主体对不确定环境的适应能力(詹姆斯·格雷克,2013),要想降低突发事件发生的概率,则需要更多结构化的场景要素信息。因此,将突发事件场景要素结构化,实时、全面地呈现突发事件的演化信息,是进行有效预案演练的基础,也是破解预案演练困境的重要环节。

在早期应急管理实践中,实地演练和桌面演练仅作为单独的演练

---

<sup>①</sup> 《河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告》,中华人民共和国应急管理部官网,<https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsdcbg/2022dcbg>。

方案,往往适用于单一和局部的演练场景,即第一代预案演练场景。随着信息技术的发展,较为成熟的数字化应急预案演练平台开发了一系列预案演练数据模型,一定程度上建构了相对丰富的预案演练场景,管理者借助计算机中的桌面演练方案指挥实地演练,形成第二代预案演练场景。第二代预案演练场景虽初步实现了部分实地数据信息与计算机虚拟建模的结合,构建出一系列常见的、典型的演练场景,但是其本质上是将纷繁复杂的“静态”纸质预案数据化,呈现媒介仍然是二维平面,未解决计算机平台中预案演练场景“真实性”不足的问题。基于此,首先,可以承接现存的数字化应急预案,在已有仿真模拟技术发展成熟的基础上,通过空间建模等技术将突发事件时空场景进一步多元化、具象化,综合利用以虚拟现实技术(VR)为代表的扩展现实技术实现场景交互的沉浸式效果。其次,基于数字孪生技术,可以将现实空间中结构化场景要素信息统合起来,实时映射到复杂数字孪生体虚拟平台上,并保持信息的动态更新。再次,基于区块链、知识图谱和人工智能技术,依据不同的预案情境设置的运行程序,将预案演练场景涉及的众多管理主体连接起来。最后,可以根据突发事件动态演化调整预案运行流程,实现预案演练的持续优化。一旦传感器接收到现实中突发事件演化的信号,便可以在复杂数字孪生体中即时更新场景信息。同样,在日常进行预案演练时,可以通过改变参数设置不同的突发事件时空场景,相关应急管理主体可以在复杂数字孪生体中进行演练,整个过程由数字系统进行信息的实时追踪记录,便于开展预案的绩效评估和持续改进。至此,复杂数字孪生体将桌面演练和实地演练的优势整合起来,实现预案演练的全面数字化,建立起以突发事件演化实际情境为基础的、虚实融合的第三代预案演练场景。

相比第一代和第二代预案演练场景,基于复杂数字孪生体构建的虚实融合演练场景有两大优势。在复杂数字孪生体中,一方面,运用仿真模拟技术构建更精细化、更具象化的预演场景,动态模拟生成实时的行动方案,既继承了桌面演练灵活、多变的优势又保留了实地演练现实感强、可视化的优点。另一方面,运用孪生引擎和孪生服务技术,数字

预演场景牵引和赋能实地演练,实现虚实融合演练。因此,借助一系列技术手段解决传统预案演练中场景单一等问题,建构起多灾种、复杂关系的演练场景。复杂数字孪生体可通过传感器的实时映射,整合最新情报信息形成“真实”场景,展示出实地演练现实感强的优势。

总体来看,随着数字技术迭代升级,实地演练场景的结构化要素可以无缝隙映射到虚拟平台的复杂数字孪生体之中,并可在其中调整参数进行预案演练。由此,复杂数字孪生体整合了桌面演练与实地演练优势,服务预案虚实融合演练,实现演练场景迭代,破解预案演练困境,如图 1 所示。

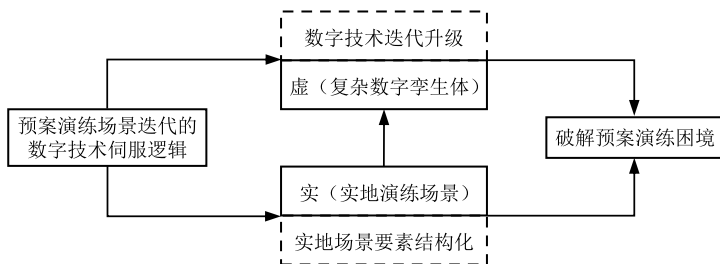


图 1 预案演练场景迭代的数字技术伺服逻辑的分析框架

资料来源:作者自制。

### 三、复杂数字孪生体服务预案虚实融合演练的进程

(一) 复杂数字孪生体服务预案虚实融合演练场景构建的机理

复杂数字孪生体要破解预案演练困境,核心就在于为预案虚实融合演练场景构建提供服务,即实地场景要素结构化与复杂数字孪生体的技术迭代升级一同破解预案演练困境。一方面,从“数字技术迭代升级”的单一路径来看,数字化预案演练平台随数字技术迭代而升级,优

化预案场景构建。正如前文提到,虽然预案文本已经数字化在虚拟平台上,实现预案文本即时检索与典型场景搭建,甚至可设置多元化的虚拟场景,但是设计的推演场景往往脱离实战条件,无法单独破解预案演练的困境。另一方面,从“实地场景要素结构化”的单一路径来看,将实战演练中时间、地点、环境等结构化并予以控制,且将突发事件静态化后,尽管实战演练流程比较顺畅,但是预案演练的内容与现实突发事件场景不匹配,实战演练成为实验室演练,也无法单独破解预案演练困境。于是,除了上述两条单一路径外,通过借助数字孪生体的引擎和服务功能,增加实地场景信息进入复杂数字孪生体和孪生体指令信息指挥实地演练的叠加路径,从而形成数字技术服务预案虚实融合演练的场景,共同致力于破解预案演练困境。

## (二) 复杂数字孪生体牵引预案虚实融合演练的演进形态

基于前述分析框架,真正破解预案演练困境并非仅靠虚拟平台的复杂数字孪生体本身或者仅掌握实地演练场景的要素演化规律就能够实现,而是要将实地演练场景要素结构化并映射至复杂数字孪生体平台,借助数字技术不断地迭代升级,构建预案虚实融合演练场景,弥补传统桌面演练和实地演练分割的缺陷,提升现实应急管理演练效能。

在现阶段,应用地理信息技术、全球定位技术、遥感技术、仿真模拟技术等数字技术集成的预案演练模拟平台已较为成熟。进入复杂数字孪生体服务预案虚实融合演练形态的过程中,底层的技术生态将主导其发展历程,一般会经历数字原生、数字孪生和数字融生三个主要阶段(孟庆国等,2022)。在不同的阶段,扩展现实、数字孪生、人工智能、区块链等数字技术不断叠加、融合和迭代,持续增强复杂数字孪生体的牵引服务能力。从最初的计算机终端平台,到发展成熟的复杂数字孪生体,演练场景设计越来越复杂,虚实交互也越来越通畅,数字技术的牵引服务作用不断增强,最后实现预案虚实演练的高度融合和无缝联动。同时,从应急处突的行动过程来看,管理者可以利用复杂数字孪生体,掌握突发事件实时演化的场景信息,针对性地优化预案演练的基本流

程,建构起基于突发事件演化的虚实融合演练场景。

就实地场景结构化水平高低和虚拟平台技术集成度高低而言,可归纳出数字技术服务预案虚实融合演练的四种理想形态,即传统数字化技术服务预案演练、数字原生服务预案演练、数字孪生服务预案演练和数字融生服务预案演练,如图 2 所示。

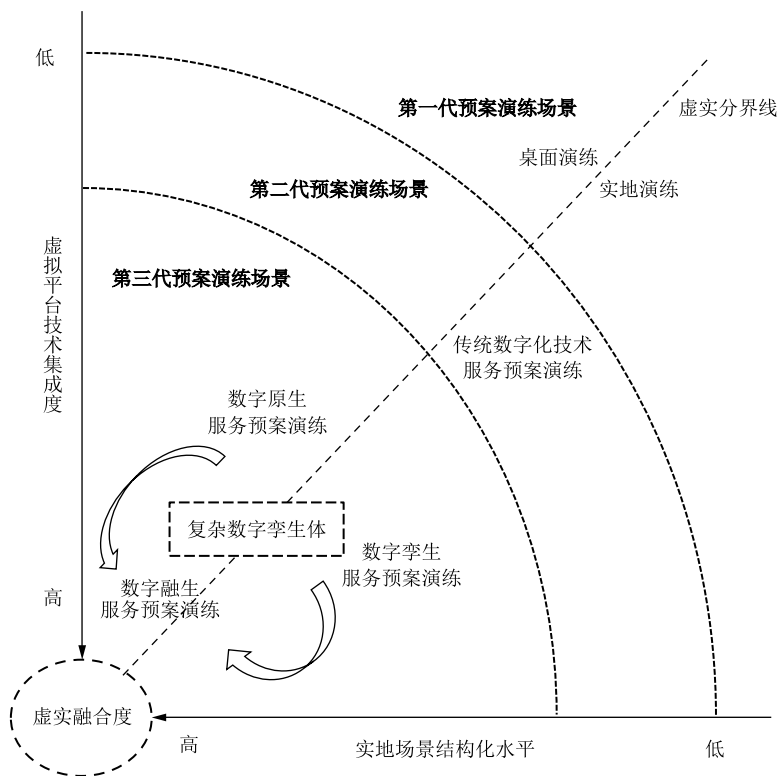


图 2 数字技术伺服预案演练场景迭代的形态演进

资料来源:作者自制。

### 1. 传统数字化技术伺服预案演练场景构建

针对文本形式应急预案内容冗长、检索低效等问题,数字化预案可应用可扩展标记语言技术、Petri 网理论以及三维仿真技术、地理信息技术等,赋能应急预案多媒体表达,构建情景模型、知识检索机制以及

知识推送机制,改善文本形式应急预案优化困难、表现形式单一等问题。在此基础上,依托计算机平台初步建构预案演练功能模块进行应急演练,初步形成所谓的计算机桌面演练模式。这标志着预案演练场景突破了桌面演练和实地演练完全分割的第一代预案演练场景,升级为传统数字化技术服务预案演练的第二代场景。这一阶段的数字化应急预案,虽然在情景构建、表现形式、底层运用逻辑方面对文本形式应急预案进行了重要突破,但是其呈现实地演练场景的精细度、即时性、表现力仍存在缺陷。首先,引发突发事件的风险隐患往往无法全部用肉眼简单识别,且依托遥感、摄像头、全球定位系统等技术追踪的场景精细度不足以支撑决策者全面把握突发事件的诱因,且摄像头呈现的碎片化微观场景不利于决策者对整体场景的把握。其次,由于算法和算力的限制,全球定位系统、遥感、摄像头所传输的数据存在时滞,无法对实地场景即时映射。最后,基于传统数字化技术的预案演练呈现载体是计算机终端平台,场景构建以仿真动画为主,其展示形式为二维平面,场景表现力、沉浸感与现实场景仍存有差距。因此,传统数字化技术服务预案演练未能让演练场景贴合真实情境,其实践应用效果有待提升。

## 2. 数字原生伺服预案虚实融合演练场景构建

以扩展现实和人工智能技术为代表的交互与展示技术的发展成熟和广泛应用,标志着复杂数字孪生体的虚实融合进入了数字原生阶段。数字原生是指在虚拟平台或空间中产生的活动影响现实空间中的管理行动的过程。在复杂数字孪生体中,演练场景在虚拟平台中构建完成后,管理者需要基于扩展现实技术才能接收复杂数字孪生体中预案演练的场景信息。未来,随着技术升级迭代,人机交互可能会形成以脑机接口为代表的终极形态。实践中,脑机接口技术(BCI)已经在人工耳蜗(田杰铭、程时伟,2022)、医疗康复(Sean et al., 2023)等领域得到研究和应用,并在进一步发展。有了交互手段之后,更为重要的是展示虚拟平台中结构化的复杂现实场景,而人工智能正是赋能复杂数字孪生体内容生成的关键支撑技术。其中最典型的人工智能技术就是生成对

抗网络(GAN)和计算机视觉(CV)中的2D转3D技术,比如GANverse3D。生成对抗网络可以赋能复杂数字孪生体内容创造,计算机视觉能够加速3D视觉内容生成。生成结构化演练场景后,在人工智能强化学习算法的支持下,培养目标类智能和模拟类智能时空场景模型,可分别用于突发事件场景识别匹配和场景模型的不断改进优化。这一阶段预案演练场景得到了极大丰富,在强化学习算法的支持下,可以为现实中管理者提供更全面、准确、灵活的行动参考。但是,由于这一阶段的演练场景基本是在虚拟平台搭建,基本是已经设定好的、固定的虚拟场景,仍然无法实现让预案演练场景根据实地的现实情境生成这一需求。

### 3. 数字孪生伺服预案虚实融合演练场景构建

数字孪生技术是复杂数字孪生体形成的关键技术和数字底座,其在应急管理领域广泛应用也标志着数字技术进入了复杂数字孪生体虚实融合发展的关键阶段。随着虚拟样机、信息物理系统(CPS)和数字线程等技术理念的拓展应用,数字孪生技术逐渐发展成熟。通过遥感遥测、传感器等统一数据接口,将现实空间的风险隐患状态、突发事件物理场、应急资源存量流量等诸数据要素在虚拟平台进行全生命周期映射,同时利用更加成熟的交互和展示技术,叠加呈现预案演练场景。数字孪生服务预案演练通常是基于数字孪生技术平台进行的,技术平台不仅需要收集各种数据的汇聚渠道,还需要构建大量标准化数据模型,并在此基础上开发预案演练的业务功能模块,服务于现实中的应急管理活动。随着数字孪生体的广泛分布和在关键区域的集中布局,能够更加准确和迅速地捕捉现实中的结构化场景要素(李瑞昌、唐雲,2022),管理者可以随时调取突发事件影响范围内的不同区域、发生后不同时段的相关信息,作为预案演练的场景数据支撑。在这一阶段,基于数字孪生体的预案演练叠加了前两个阶段的一系列技术手段,将现实空间中的演练场景数据实时映射到虚拟平台,形成虚实映射的演练场景,初步实现了桌面演练和实地演练的融合,基本可以满足多灾种、跨区域突发事件的演练场景要求。

目前,数字孪生体伺服预案演练在应急实践中,尤其是在水利调度模拟中已经取得了重要进展。以数字孪生黄河为例,2022年5月黄河水利委员会印发《数字孪生黄河建设规划(2022—2025)》,构建具有预报、预警、预演、预案功能的数字孪生黄河。目前数字孪生黄河已经建设完成黄河下游的L2级数据底板,初步搭建起了小花间、马渡段等区域典型三维场景,并自主研发了数字孪生模拟仿真引擎。基于数字孪生平台,可以模拟洪水灾害场景,并在此基础上明确现有抗洪工程的薄弱环节,以便做好应急准备工作。

#### 4. 数字融生伺服预案虚实融合演练场景构建

在数字融生阶段,区块链技术的深度应用解决了预案演练中参与主体的数字身份确认和主体间信息即时传递的两大难题,从而为打通现实空间和虚拟空间、实现生物人和虚拟人(或数字人)之间的交互提供了媒介。区块链本质上是创建分布式数字账簿的数字机制,可用于构建复杂数字孪生体的身份系统和价值系统。首先,数字融生服务预案演练的一个重要环节是确认演练主体在复杂数字孪生体中的数字化身份。区块链技术为不同的预案演练主体提供了可信的数字身份,且可以分为虚拟数字人身份和虚拟原生人身份两种基本类型(王文喜等,2022)。虚拟数字人身份是指现实空间中客观存在的管理人员在虚拟平台中的映射,如预案演练时规定的应急处置小组的总指挥长A,在复杂数字孪生体中则对应虚拟数字人A,其职责也为统筹指挥;预案演练时规定的某项工作的执行者B,在复杂数字孪生体中对应虚拟数字人B,其职责同样为执行这一项工作。而虚拟原生人身份是指现实空间中并不存在,为了预案演练需要所构建出来的系统NPC(Non-player Character),以辅助达成应急预案演练业务。由此,预案演练的指令信息可以传递到不同虚拟数字人端口,虚拟数字人对应的现实中的管理者可以在现实空间展开工作,同时可以将相关现场工作信息通过交互技术即时反馈给虚拟平台,为预案演练的实时开展提供语料信息。

其次,区块链的去中心化自治组织(DAO)的出现正在重塑应急管理组织架构体系,促进组织结构“扁平化”(赵星等,2022),提升应对

突发事件时的协调能力和行动效率。对于预案演练来说,基于区块链的去中心化组织可以将演练活动中分散的政府部门和相关企事业单位连接起来,打通“同源异构”的应急管理数据,改变传统自上而下的信息传递模式,一旦发生突发事件,在与复杂数字孪生体中的预案演练场景匹配完成后,预案规定的行动指令便通过区块链迅速传递到相关主体并可以即时作出反应。在实践中,我国已有地方开始布局区块链,如河南省近日印发了《河南省人民政府办公厅关于印发“河南链”建设实施方案(2023—2025年)的通知》,拓展“区块链+政务服务”“区块链+政务数据共享”等应用场景,统筹跨层级、跨地域、跨系统、跨部门、跨业务数据的互联互通。<sup>①</sup>由此看来,未来区块链在复杂数字孪生体中会有更多应用场景。总体来看,借助区块链技术与人机交互技术,复杂数字孪生体将预案演练参与主体的数字身份确认并连接起来,实现了预案指令的即时触发,现实空间和虚拟空间达成无缝衔接与虚实融合,标志着复杂数字孪生体服务预案演练进入数字融生阶段,预案演练场景迭代为第三代预案演练场景。

最后,在数字融生阶段,预案演练可以脱离现实中的时间、空间、资源、主体等限制,通过调整参数构建多种虚拟原生人身份和突发事件演化场景并形成应急预案库,一旦现实中发生非常规突发事件,复杂数字孪生体中已有的相似场景预案则会为现实中的管理者提供决策参考。基于前三个阶段所叠加的多项关键数字技术,预案场景要素进一步结构化,如表1所示,现实中的管理活动与虚拟平台实现高度融合和无缝联动。预案演练活动在内的诸多预案管理业务已不分虚实,利用复杂数字孪生体可以轻松追踪和推演多灾种、跨区域、灾害风险链式反应等突发事件场景,辅助应急救援、资源调度等相关决策,并不断优化预案管理。

表1 复杂数字孪生体关键技术对预案演练场景要素的结构化作用

<sup>①</sup> 《河南省人民政府办公厅关于印发“河南链”建设实施方案(2023—2025年)的通知》,河南省人民政府官网,<https://www.henan.gov.cn/2023/03-28/2715211.html>。

场景要素 技术变量	人 (Manpower)	地 (Area)	物 (Object)	事 (Event)	环 (Environment)
XML	行动描述	要素集成	信息编码	语义分析	数据缺乏
XR(AR) + AI	智能仿真	多元化生成	丰富化受限	情景预设	场景单一
数字孪生	动态感知	全景式映射	精准识别	持续追踪	全生命周期映射
区块链	人际交互	即时交互	数据同构	动态反馈	数据信任

资料来源:作者自制。

在传统数字化技术服务预案演练场景中,可扩展标记语言作为核心技术,可以在打通文本数据格式的基础上搭建大量案例库,集成实地演练场景的多要素信息,但由于技术限制,对环境数据的追踪收集较为困难;在数字原生服务预案演练场景中,虚拟现实技术和人工智能技术可以为实地演练场景构建提供技术支撑,各要素收集与呈现的丰富化程度得到提升,但由于此阶段的场景多为预先设置固定的场景,在模拟复杂、动态的预案演练场景时,其环境要素数据支撑不足;数字孪生技术则凭借其持续追踪和全生命周期映射能力初步实现了实地演练场景的要素结构化;到了数字融生服务预案演练场景阶段,区块链技术解决了数据异构、数据信任的问题,使得生物人与虚拟人、虚拟人和虚拟人之间的交互行动能够随时随地进行,在集成和叠加前三个阶段技术的基础上,实现对多灾种、跨区域事件时空场景的万物智联。

### (三) 总结

总体来看,以上四个形态之间的关系具有一定的层次性,传统数字化预案演练既是第二代场景,也是虚实融合演练的萌芽阶段,数字原生、数字孪生则标志着预案演练进入第三代场景,并属于虚实融合演练的发展阶段,数字融生则属于高级阶段。在实践中,这几个阶段也会不断叠加、共同发展,如表 2 所示。在复杂数字孪生体发展成熟后,不仅能够实现桌面演练和实地演练的深度融合,并且会从时空、主体和功能三个维度改变预案演练场景构建。一是“超越时空”,重塑时间和空间观念。管理者可以借助数字人身份对预案演练活动的时间参数进行设置或调整,切分出不同时间段上的预案情境;还可以通过深度学习和知

识图谱技术,针对某一应急场景进行未来海量场景的预测和模拟实验,形成不同的演练场景和相应的应急方案。二是映射主体,推进多元主体共同参与。在复杂数字孪生体中,现实世界中预案演练的相关参与主体和单位均可以数字人的身份加入进来,共同参与预案演练活动,减少实地演练成本。专家和公众也能够实时提出自己的建议和需求,实现多元主体的共同参与和知识生产。三是拓展功能,优化预案管理业务体系。在复杂数字孪生体中可以保证演练与培训沉浸感和真实感,提升管理者应急处突的实战能力。在演练过程中,所有责任主体数字人的行动过程均会被系统记录,并在演练培训结束后进行绩效评价。在此过程中,还可以通过设置专门的观摩区域,接入公众数字人,为观众带来沉浸式的自救互救应急知识科普等。

表 2 三代预案演练场景比较

预案演练场景	关键性技术	数字技术集成度	实地场景结构化	虚实融合	场景需求满足
第一代	无数字技术支撑	桌面与实地演练分割	场景要素单一化	无融合	单灾种、局部区域
第二代	XML、Petri 网等	技术集成有限	场景要素丰富化	低水平融合	有限灾种、范围区域
第三代	复杂数字孪生体	多项技术高度集成	场景要素结构化	高水平融合	多灾种、跨区域

资料来源:作者自制。

总之,预案演练场景的形态演进与迭代升级呈现了一个渐进的虚实融合过程。在这个过程中,预案演练逐渐摆脱传统桌面推演与实地演练相分离的模式,转向基于突发事件现实场景的桌面推演与实地演练相融合的模式,克服传统预案演练在实践中“纸上谈兵”和“假唱假练”的问题,破解预案演练困境。

## 四、适用范围及约束条件

在未来理想状态下,城市中的社区、学校、产业园区等诸多场景,均可以在复杂数字孪生体的支撑下成为服务预案演练的现实情境。在大量城市场景成为复杂数字孪生体的一部分后,通过系统的联结、融合、集成,可以最终构建起具有复杂自适应性的数字孪生城市(周瑜、刘春成,2018),应急管理将成为其中的一个重要板块。但从目前的技术发展水平和研究情况来看,作为前沿且仍未成形的复杂数字孪生体具有一定的适用范围,实现理想中的效果还存在诸多限制条件。

### (一) 适用范围

其一,复杂数字孪生体侧重于预案演练的线上开展,现实空间中实际的风险隐患排查、应急救援等工作仍需要具体的组织机构或管理部门实地开展。目前来看,管理者无法通过复杂数字孪生体本身直接改造现实世界。随着“三化”改造的推进,以及未来工业元宇宙的建成,在自动化救援机器人、智能化控制系统(高艳丽等,2019)等数字基础设施建设并发展成熟时,管理者可以在线上控制中心下达相关操控指令,配合复杂数字孪生体进行线上线下协同完成风险排查和应急处置等工作,实现更高水平的智能化虚实融合。

其二,现实组织体系的变化将会影响复杂数字孪生体的发展形态。在本文所分析的虚实融合过程中,虚拟空间的信息处理过程会赋能现实空间中管理部门的行动过程,而复杂数字孪生体中去中心化组织的布局将会加速这种行动过程。但是,技术的应用最终是为了服务于现实的管理需求,弥补现有组织体系下组织无法解决的问题和遇到的管理困境,若现实中的组织结构先于复杂数字孪生体建设发生大的变化并解决了当下的管理难题,将会影响复杂数字孪生体的建设和发展情况。

其三,本文提出的复杂数字孪生体虚实融合逻辑适用于相关技术

稳步发展的趋势和环境,若未来出现重大颠覆性技术,或某一阶段的底层技术取得巨大突破,复杂数字孪生体服务预案虚实融合演练的发展进程可能会发生变化。我们已经处于技术大爆炸的时代,大量现代科技的发展速度相比以前更加迅速。物联网、大数据、云计算、人工智能、3D 打印、人机交互、区块链等一系列技术的发展,为新的技术治理形态提供了多种可能。在技术集中爆发式发展的背景下,若未来出现颠覆性技术,将对复杂数字孪生体本身的存在或建设产生重大影响。

## (二) 约束条件

其一,复杂数字孪生体的映射范围受制于传感器等底层基础设施的覆盖范围。数字孪生体在现实中具体场景的布局是复杂数字孪生体建设的现实物质基础。数字孪生体单体化的粒度也是复杂数字孪生体建设成效的重要影响因素。从目前数字孪生单体化技术水平来看,单体化的工作量巨大,自动化程度相对较低。同时,不同行业对数字孪生体单体化的需求差异较大,单体化的技术能力和不同行业需求多变之间产生矛盾,仍缺少统一的标准。

其二,复杂数字孪生体要达到数字融生的实际效果还需要沉浸式人机交互技术以及人工智能算法的重大突破。目前的人机交互技术水平离实现数字融生阶段的效果还有距离。当前的人机交互主要依靠扩展现实等相关设备,存在长期佩戴的舒适度较差、设备成本较高不易携带等问题,也无法实现理想中的人机交互效果。未来,还需要加强对视网膜投影技术、光场显示技术等感知交互技术的研究开发。同时,复杂数字孪生体虚拟平台的建设需要依靠机器学习、深度学习、强化学习等人工智能算法的支撑,并利用计算机视觉、智能语音、自然语言处理技术产生贴近现实世界的视听效果(张智敏等,2020),对数据带宽的要求非常高。目前无论是硬件水平还是算法和算力水平均无法实现理想中的建设要求,仍需要加快研究与开发。

其三,复杂数字孪生体中数字要素与现实物理要素的完全对应、输入和输出的模型格式统一还存在技术层面的约束。预案虚实融合演练涉及诸多政府管理部门和企事业单位,需要汇集不同行业的相关管理

信息、现实物理信息等。从目前的技术水平来看,将不同行业或领域信息映射至虚拟空间并转化为格式统一的数据还存在较大的融合转化难度。以安全生产领域的数据转化为例,企业的“人、机、料、法、环”现实物理信息和风险隐患信息转化为格式统一的数据存在困难(李瑞昌、王勇,2023)。同时,虚拟平台和现实空间中的数据信息交互需要跨越不同的算法模型、不同类型的技术设备、不同的交互方式,“人、机、物”的互联需要异构网络融合,但目前未有统一的技术标准。未来要实现复杂数字孪生体的按需组网、虚实融合,还需要加强统一技术和管理标准建设。

## 五、结 论

以复杂数字孪生体为代表的数字技术伺服预案虚实融合演练,标志着预案演练进入第三代虚实融合场景。在以静态组织结构为基础的预案体系下,预案演练陷入了桌面推演和实地演练割裂的困境,场景建构不能满足多灾种、跨区域、灾害风险链式反应等突发事件场景需求。然而,应用了数字孪生、人工智能、区块链、沉浸式人机交互等数字技术的复杂数字孪生体的出现,及其在应急管理领域的广泛布局与深度应用,正在改变着现有预案演练场景构建。因此,本文以复杂数字孪生体为代表的数字技术应用为研究对象,提出预案演练场景迭代的技术服务逻辑。通过数字技术的集成升级,生成贴合现实、动态灵活、丰富多元的演练场景,管理者可基于复杂数字孪生体平台有针对性地开展应急演练,真正发挥预案演练指导突发事件应急处置的作用。当然,数字孪生体毕竟还未在现实中大规模、成建制地建成,本文是基于当前技术发展的基本趋势和正在进行的应急管理实践,总结提出的破解预案演练困境,完善应急准备的理论方案。凯文·凯利(Kevin Kelly)曾在《失控》中提出“涌现”这一概念,即认为众多个体的集合会涌现出超越个体特征的某些更高级的特征,数字技术的发展也是如此。展望未来,

随着复杂数字孪生体的逐渐建成和更多技术在应急管理领域的深度应用,数字技术服务预案虚实融合演练值得进一步观察和研究。

## 参考文献

陈超、闫艳:《应用灾害数字孪生体的应急预案演练系统》,《中国安全科学学报》2021年第7期。

高艳丽、陈才等:《数字孪生城市:虚实融合开启智慧之门》,人民邮电出版社2019年版。

黄卫东、曹杰、盛昭瀚:《数字化应急预案情景表示与动态生成机制研究》,科学出版社2022年版。

季学伟、翁文国、赵前胜:《突发事件链的定量风险分析方法》,《清华大学学报(自然科学版)》2009年第11期。

李琛亮、刘国庆、杨光等:《基于“四预”的永定河洪水预报调度系统研究与应用》,《水利水运工程学报》2022年第6期。

李瑞昌、唐雲:《数字孪生体牵引应急管理过程整合:行进中的探索》,《中国行政管理》2022年第10期。

李瑞昌、王勇:《政府安全监管责任前置的“技术牵引”机理探究》,《北京航空航天大学学报(社会科学版)》2023年第1期。

李智超:《从突发事件到系统风险:城市级联灾害的形成与治理》,《行政论坛》2022年第6期。

刘霞、严晓:《我国应急管理“一案三制”建设:挑战与重构》,《政治学研究》2011年第1期。

孟庆国、严妍、赵国栋:《政务元宇宙》,中译出版社2022年版。

倪慧荟、姚晓晖:《面向应急演练的智能“训—练—考”一体化系统设计》,《科技促进发展》2019年第10期。

牛广利、李天畅、杨恒玲等:《数字孪生水利工程安全智能分析预警技术研究及应用》,《长江科学院院报》2023年第3期。

田杰铭、程时伟:《VR环境下运动想象脑电分类算法及脑机交互应用》,《小型微型计算机系统》2022年第10期。

王文喜、周芳、万月亮等:《元宇宙技术综述》,《工程科学学报》2022年第4

期。

王永明:《基于情景构建的应急预案体系优化策略及方法》,《中国安全生产科学技术》2019年第8期。

魏勇、吕聪敏:《利用复杂自适应系统理论探索数字孪生智能城市的发展模式》,《电子世界》2020年第9期。

肖文涛、许强龙:《基层政府应急预案管理:困境与出路》,《理论探讨》2016年第1期。

尹西明、钱雅婷、武沛琦等:《场景驱动科技成果转化:理论逻辑与过程机理》,《科学学研究》2024年第11期。

[美]詹姆斯·格雷克:《信息简史》,高博译,人民邮电出版社2013年版。

张再生、孙雪松:《基层应急管理:现实绩效、制度困境与优化路径》,《南京社会科学》2019年第10期。

张智敏、石飞飞、万月亮等:《人工智能在军事对抗中的应用进展》,《工程科学学报》2020年第9期。

赵星、乔利利、叶鹰:《元宇宙研究与应用综述》,《信息资源管理学报》2022年第4期。

周瑜、刘春成:《雄安新区建设数字孪生城市的逻辑与创新》,《城市发展研究》2018年第10期。

Sean L. M. et al.(2023). A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control. *Nature*, 620(7976).