

中文引用格式:陈涛,张辉,黄丽达,等. 应急指挥 S3DA2 框架与应急数字孪生战场关键技术[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(10): 205–212.

英文引用格式:CHEN Tao, ZHANG Hui, HUANG Lida, et al. S3DA2 framework for emergency command system and key technologies of emergency digital twin battlefield [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 205–212.

应急指挥 S3DA2 框架与应急数字孪生 战场关键技术*

陈涛¹研究员, 张辉^{**2}高级工程师, 黄丽达¹助理研究员,
田冉冉²工程师, 闫小丽²工程师

(1 清华大学 安全科学学院, 北京 100084; 2 北京辰安科技股份有限公司, 北京 100094)

中图分类号: X959

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1646

资助项目: 中国工程院战略研究与咨询项目(2023-JB-08); 十三五国家重点研发计划项目(2018YFC0823706)。

【摘要】 为解决我国应急指挥救援体系中存在的层级割裂、数据与决策脱节及动态适应性不足等问题, 聚焦一体化框架构建与数字孪生技术应用, 提出 4 层级(应急指挥中心、现场指挥部、救援队伍、救援单兵)-5 步骤(感知、模拟、谋划、决策、行动)通用模型, 并进一步将其拓展为感知-模拟-谋划-决策-行动(S3DA2)框架, 同时, 推导得出最小化成本的最优决策公式; 基于该框架, 构建“应急数字孪生战场”技术体系, 涵盖多源数据融合、孪生建模、流固耦合/人工智能混合仿真和多目标决策优化等; 以 2024 年洞庭湖团洲垸堤防决口事件为验证场景, 开发流固耦合-多智能体救援模拟器, 实现物理场景与虚拟仿真的实时映射闭环。结果表明: 该模型将决口扩张误差控制在 10% 以内, 将封堵时长由 82 h 缩短至 52 h, 石料需求预测为 $5.9 \times 10^4 \text{ m}^3$, 与实测结果一致。

【关键词】 应急指挥; 感知-模拟-谋划-决策-行动(S3DA2)框架; 数字孪生战场; 关键技术; 4 层级模型; 5 步骤模型

S3DA2 framework for emergency command system and key technologies of emergency digital twin battlefield

CHEN Tao¹, ZHANG Hui², HUANG Lida¹, TIAN Ranran², YAN Xiaoli²

(1 School of Safety Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2 Beijing Global Safety Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: To remedy the fragmented command tiers, a weak data-to-decision link and poor dynamic adaptability, which have long limited the effectiveness of China's emergency-response system, an integrated framework based on digital-twin technology was investigated. A generic four-tier, five-step model—comprising an emergency-command center, on-site command post, rescue teams and individual rescuers, together with the steps Sense, Simulate, Strategize, Decide and Act—was established and extended to the S3DA2 framework. A cost-minimization formula for optimal decision making was derived. Building on this framework, an emergency digital-twin battlefield technology system was established,

* 文章编号: 1003-3033(2025)10-0205-08; 收稿日期: 2025-05-18; 修稿日期: 2025-07-10

** 通信作者: 张辉(1987—), 男, 河南登封人, 博士, 高级工程师, 主要从事应急指挥理论、应急管理信息化建设、突发事件应急救援情景推演、大语言模型创新应用等方面的工作。E-mail: hndfzhanghui@qq.com。

encompassing multi-source data fusion, twin modelling, fluid-solid-coupled/artificial intelligence hybrid simulation and multi-objective decision optimization. A fluid-solid coupling, multi-agent rescue simulator was developed and validated with the 2024 Tuanzhou Dyke breach on Dongting Lake, enabling a real-time closed loop between the physical scene and its virtual replica. Results show that breach-width predictions deviate by less than 10%, total sealing time is reduced from 82 h to 52 h, and the estimated rock-fill demand of $5.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ matches field measurements.

Keywords: emergency command; sense-simulate-strategize-decide-act (S3DA2) framework; digital twin battlefield; key technologies; four-tier model; five-step model

0 引言

应急指挥救援作为突发事件处置的核心,其效能直接关系到人民生命财产安全与社会稳定^[1-2]。2018年,应急管理部的成立,标志着我国综合应急管理范式的确立^[3-4],2023年,国家消防救援局组建推动了救援专业化转型^[5],2024年,《中共中央关于进一步全面深化改革推进中国式现代化的决定》^[6]明确提出,构建新型应急指挥机制的战略需求。但当前应急指挥领域存在双重挑战:传统体系的“层级断裂”与“虚实脱节”难以满足巨灾场景下跨部门、跨层级的协同需求;无人机、数字孪生等新技术应用碎片化,未形成体系化效能提升路径。因此,研究新型应急指挥模式对应急管理现代化进程及公共安全具有重要理论与实践价值。

目前,在指控理论、智能感知、机器学习与数字孪生技术快速发展的背景下,国内外已展开多维度的应急指挥创新实践。军事领域指挥控制理论演进为提升应急指挥效能提供了重要启示,从指挥与控制(Command and Control, C2)到指挥自动化系统(Command, Control, Communication, Computer, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance, C4ISR)的演变揭示了技术融合驱动指挥体系变革的规律^[7-8],而观察-定位-决策-行动(Observe, Orient, Decide, Act, OODA)循环^[9]、筹划-准备-执行-评估(Planning, Readiness, Execution, Assessment, PREA)环^[10]等模型则凸显了动态反馈机制的核心价值。在技术驱动层面,国际实践表明:新技术正重塑应急指挥范式,美国 Hazus(灾害损失评估软件)系统通过灾害损失预测优化资源调度^[11-12];日本福岛核事故中无人机辐射检测实现风险精准感知^[13-14];新冠疫情期间,多国利用人工智能流行病模型重构应急决策流程^[15-16]。数字孪生技术的突破为应急指挥体系重构提供了新范式,其通过构建物理实体的数字化镜像支持复杂系统的实时仿真与反向控

制^[17-19],已在智能制造、智慧城市等领域取得显著成效。军事领域提出的数字孪生战场概念^[20-21],更实现了作战要素的全域感知与战争过程的平行推演,并延伸到了应急指挥领域^[22]。

尽管上述工作显著推动了局部效能提升,仍存在3大缺口:一是缺乏贯通战略—战术—执行的统一跨层级指挥框架;二是物理救援行动与数字推演未形成实时闭环;三是感知、仿真、优化等关键技术各自为战,难以体系化集成。

鉴于此,笔者拟提出新的应急指挥框架与数字孪生战场理论,构建4层级模型,设计5步骤模型,确立感知-模拟-谋划-决策-行动(Sense-Simulate-Strategize-Decide-Act, S3DA2)框架,首创应急数字孪生战场技术体系,通过“物理实体-数字模型-仿真推演-智能决策”的全链路融合,推动应急指挥从“经验驱动”向“计算驱动”转型。

1 应急指挥 S3DA2 框架构建

1.1 中国应急指挥救援体制 4 层级模型

应急指挥救援体制通过整合各类应急指挥机构与规范应急指挥流程,保障突发事件的高效响应。中国应急指挥救援体制4层级模型如图1所示。各层级职能如下:

- 1) 应急指挥中心层。该层级包括国家级和地方法级应急指挥中心,主要负责制定应急战略、统筹资源协调和跨域力量调度。突发事件发生后,依据事件类型和规模启动对应应急指挥机构,为现场指挥部提供战略级支撑。
- 2) 现场指挥部层。作为突发事件现场救援的核心指挥枢纽,承担战术指挥职责,具体包括制定救援方案、调度一线救援力量、协调现场任务分工,并根据实际需求向应急指挥中心申请支援。通常情况下,单一突发事件对应1个现场指挥部,若灾害波及范围较广,可设立多个现场指挥部协同运作。
- 3) 救援队伍层。该层级由受现场指挥部直接

调度的各救援队伍构成,主要负责执行现场救援方案。各队伍根据指挥部部署完成任务分配、人员与设备投入及跨队伍协作,并定期向现场指挥部汇报进展,按需申请支援。

4) 救援单兵层。作为最基层执行单元,由具体救援人员组成,承担现场具体救援任务。单兵隶属于特定救援队伍,执行任务过程中可依据现场指令

与实际情况开展协作。

相较于传统的突发事件指挥体系 (Incident Command System, ICS) 模型,该 4 层级模型的显著差异在于增设应急指挥中心层,有效强化现场指挥与后方支持的联动机制,更适配复杂和跨区域灾害场景的应对需求。

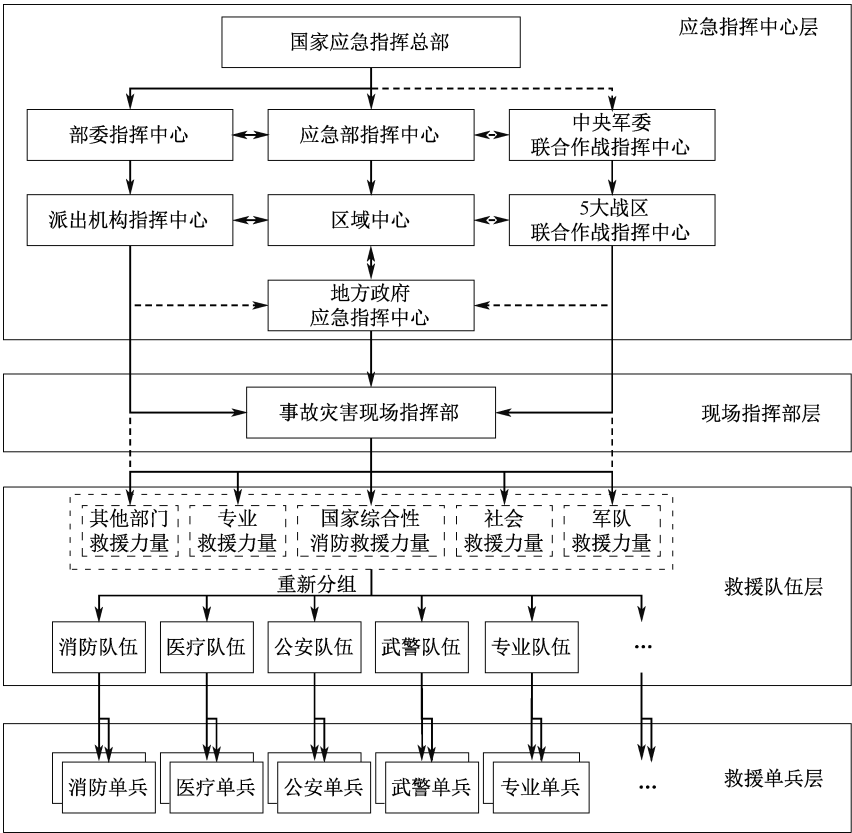


图 1 中国应急指挥救援体制 4 层级模型

Fig. 1 Four-tier model of China's emergency command and rescue system

1.2 应急指挥救援 5 步骤模型

图 2 为应急指挥救援 5 步骤模型及其相互关系,各步骤通过动态闭环联动支撑应急指挥救援的高效运行,具体如下:

- 1) 感知。作为应急指挥的基础环节,通过卫星遥感、传感器、物联网等技术手段实时采集现场多维数据,包括灾害类型、环境参数、人员状态等,构建对灾害现场的全景认知。
- 2) 模拟。基于感知数据,运用数学建模、物理仿真、人工智能等技术,动态模拟灾害演化与救援过程,输出灾害发生与救援行动的模拟结果,为后续方案制定提供依据。
- 3) 谋划。现场指挥部专家依据模拟结果,针对不同救援目标制定多套备选方案,涵盖行动流程、人

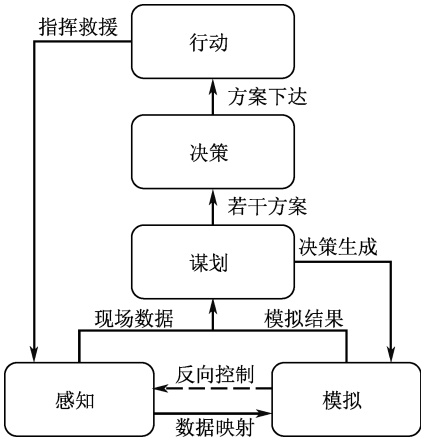


图 2 应急指挥救援 5 步骤模型及其相互关系

Fig. 2 Relationship of five-step model in emergency command and rescue

员调度和物资配置等要素,并通过模拟推演评估各方案的潜在效果。

4) 决策。指挥官综合考虑现场情况、模拟结果及应急资源等,确定最优救援方案,形成指导行动的指令,并可根据现场动态调整决策内容。

5) 行动。救援队伍依据决策指令执行具体救援任务,其行动结果将反馈至感知环节,形成“感知-模拟-谋划-决策-行动”的闭环迭代。

1.3 应急指挥 S3DA2 框架结构

S3DA2 框架是基于 4 层级模型和 5 个关键步骤构建的综合应急指挥模型,可提升应急指挥精确性,助力复杂场景下的快速响应。

该框架中,感知、模拟、谋划 3 步构成基础流程 S3,突发事件现场指挥部的救援决策与行动,以及后方应急指挥中心的增援决策和行动共同构成后续环节 DA2。

应急指挥救援 S3DA2 框架如图 3 所示,该框架

通过多层次、多环节协同实现高效救援。

1) 突发事件现场。作为应急指挥核心,包括现场指挥部层、救援队伍层和救援单兵层。通过感知收集灾害现场多维数据,利用模拟构建灾害演化模型,再经谋划制定救援方案,最后由决策环节依据模拟结果指挥现场救援力量实施救援。

2) 应急指挥中心与现场指挥部的协作。应急指挥中心负责制定战略决策,为现场指挥部的战术指挥提供支持。通过多次模拟和决策,生成总体战略并传达给现场指挥部。

3) 增援决策与实施。若现场指挥部预估救援力量不足,可向应急指挥中心申请增援。应急指挥中心经决策后生成增援方案,调度外部增援力量投入现场。

1.4 S3DA2 框架的公式化表达

为量化描述 S3DA2 框架的运行机制,通过公式化表达刻画从现场数据采集到决策执行的闭环过

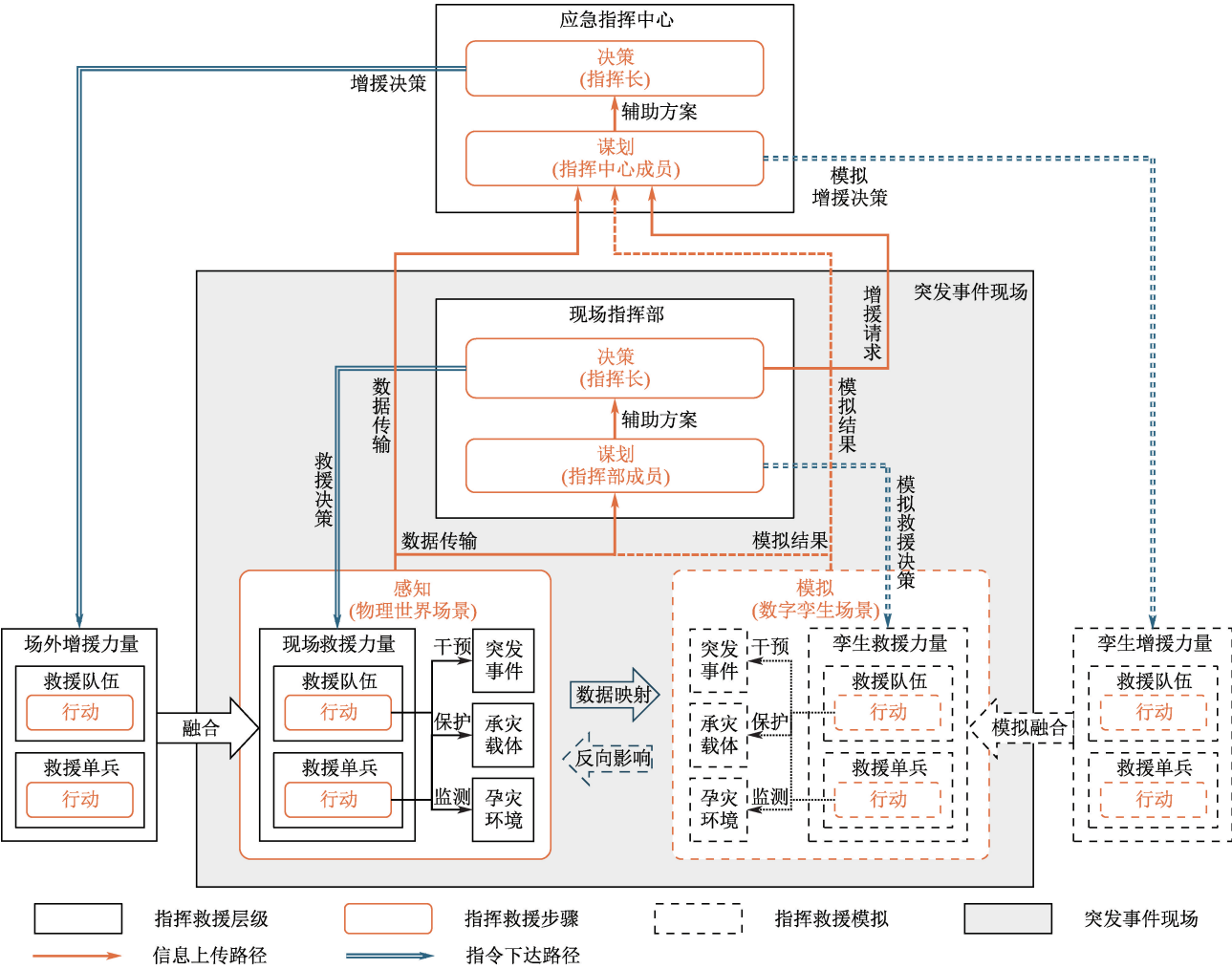


图 3 Emergency command and rescue S3DA2 framework

程。该框架的流程分为基础流程(S3)和救援/增援反馈流程(DA2)2 部分。其中,基础流程通过“感知-模拟-谋划”的级联处理现场信息的实时整合,后续救援/增援反馈流程则通过决策和行动的闭环完成动态调整。

框架对数据的实时处理过程可通过级联函数表示为:

$$F(E(t)) = (\text{Strategize} \circ \text{Simulate} \circ \text{Sense})(E(t)) \quad (1)$$

式中: $E(t)$ 为时刻 t 采集的现场数据;Strategize 为谋划算子,多目标优化预测结果,形成若干可行救援方案; $\circ$ 为函数复合;Simulate 为仿真算子,在数字孪生模型中驱动多物理-多智能体仿真,得到灾害演化预测集;Sense 为感知算子,将原始数据转换为结构化、时间-空间对齐的现场状态向量 $D(t)$ 。式(1)依次完成数据感知、仿真模拟和方案谋划,输出时刻 t 的综合应急信息。

为描述应急响应周期内的信息累积效果,采用时间积分将各时刻处理结果整合为全局状态 Q :

$$Q = \int_{t_0}^T F(E(t)) \, dt \quad (2)$$

式中: Q 为系统在 $[t_0, T]$ 时间段内对现场信息的综合处理和累积状态,反映从应急启动到时刻 T 的灾害演化与策略汇总结果,为后续最优决策提供全局信息; t_0 为应急响应开始时刻; T 为当前评估时刻。

决策过程采用成本最小化的优化表达,即在决策空间 D 中选取使成本函数最小的最优决策 d^* :

$$d^* = \underset{d \in D}{\operatorname{argmin}} \operatorname{Cost}(Q, d) \quad (3)$$

式中: $\operatorname{Cost}(Q, d)$ 为全局应急状态 Q 下选择决策 d 的综合成本(含风险、损失及其他不确定性成本)。最优决策 d^* 通过行动函数 $\operatorname{Act}(d^*)$ 转化为现场指令和增援行动。

式(1)—式(3)直观体现了 S3DA2 框架的核心逻辑,即通过级联函数实现实时数据的多层次处理,利用时间积分构建全局认知,最终以最优决策实现动态反馈与闭环控制,为系统性能的定量分析、流程优化及救援效率提升提供理论工具和决策支撑。

2 应急数字孪生战场概念与关键技术

2.1 应急数字孪生战场的概念与内涵

S3DA2 框架基于应急管理实际需求,构建了完整的应急指挥闭环流程,不仅能实现“单兵-救援队伍-现场指挥部-应急指挥中心”的 4 层级协同,更

在流程设计中深度融入数字孪生技术的核心要素与特征^[17]。

1) 物理世界到虚拟世界的映射。通过感知阶段获取真实场景数据,在模拟阶段于虚拟空间构建数字孪生体。

2) 实时同步与反馈。数字孪生体的更新与真实世界事件保持同步,且虚拟仿真结果可反向指导现实中的决策与行动。

3) 多层级协同与闭环优化。谋划、决策和行动构成完整反馈回路,每一次循环均能依据新信息修正方案。

基于上述特征,提出“应急数字孪生战场”概念:应急数字孪生战场是基于数字孪生、物联网、人工智能与仿真技术构建的智能应急响应平台,覆盖从微观救援单兵到宏观指挥中心的全层级,通过将数字孪生技术全面应用于应急管理领域,形成从微观到宏观、从数据采集到决策执行的全链条支撑体系。其主要目标包括实时态势感知,依托卫星遥感、传感器、无人机、社交媒体等多源数据采集手段,对现场及周边环境实施持续监测;动态仿真与推演,将物理实体与灾害场景建模至虚拟世界,开展多物理、多尺度耦合仿真,预测未来发展趋势;协同决策支持,在战略层、战术层、执行层间构建高效信息流转与决策闭环,辅助指挥机构精准决策;资源优化与增援,基于仿真结果与优化算法,制定多目标资源调度与增援方案;持续反馈与进化,将救援行动结果回传至虚拟模型进行修正,形成“物理-数字”世界的持续迭代进化。

从层级维度看,数字孪生战场在微观(单兵状态感知与作业行动)、中观(救援队伍协同作战与动态决策)和宏观(现场指挥部和指挥中心全局态势感知与战略决策)3 个层面分别发挥不同价值。相较于传统应急系统仅停留在数据展示与信息传递的局限,应急数字孪生战场更强调深度仿真与智能决策,助力应急管理部门从“事后响应”向“事中精准指挥”与“事前预判防范”转型。

2.2 应急数字孪生战场关键技术

应急数字孪生战场以实现多源数据融合、虚拟仿真模拟以及实时决策支持为目标,其系统架构通常可划分为数据层、模型层、仿真层、决策层与应用层,各层相互衔接,共同支撑应急指挥全流程。与传统应急系统的核心差异在于其突出“高精度灾害建模与实时仿真”的技术重心。

应急数字孪生战场的关键技术见表 1。通过技

术集成与协同,数字孪生战场可高精度刻画灾害现场,并基于实时数据动态优化模拟及决策方案,形成“感知-模拟-谋划-决策-行动”的闭环管理机制。

应急数字孪生战场融合 S3DA2 框架的闭环指挥流程与数字孪生技术的实时仿真能力,突破数据采集至决策执行的全流程瓶颈。微观层面为单兵提供个性化决策支持,中观层面提升救援队伍协同与动态调度效率,宏观层面支撑指挥中心全局态势掌控与资源统筹。通过多源数据融合、高精度建模、并

行仿真和智能决策优化,显著提升应急管理体系的响应速度与救援效能。

以 2024 年洞庭湖团洲垸特大型堤防决口为验证场景,研发流固耦合-多智能体救援模拟器验证体系有效性。结果表明:模型对决口扩张及水位演变的预测误差均低于 10%;救援第 22 h 执行驳船投料最优方案后,封堵总时长由 83 h 缩短至 52 h,总时长 79 h 与实测 77 h 的偏差小于 3%,石料需求量精确估算为 $5.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[23]。

表 1 应急数字孪生战场的关键技术

Table 1 Key technologies of emergency digital twin battlefield

关键技术点	主要内容	价值与应用	主要挑战	实现路径
多源数据融合	传感器、卫星、无人机、社交媒体等异构数据采集; 数据清洗、标注、时空对齐; 统一数据标准与接口协议	消除数据孤岛,形成统一的现场态势; 提升数据可用性,为仿真与决策提供高质量输入	异构数据格式多,难以实时对齐; 大规模数据传输与存储成本高	建立跨平台的数据接入协议(如基于开源标准或应用程序编程接口); 采用边缘计算来降低中心节点负载,并利用中间件实现实时数据流处理
数字孪生建模	构建灾害场景下的物理实体模型(地形、水文、建筑物等); 救援力量建模(队伍、单兵、装备); 多物理场耦合与多尺度嵌套	提供真实世界的虚拟镜像,准确反映灾害及救援要素; 支撑多场景、多阶段的应急推演	如何平衡模型精度与计算开销; 动态建模的实时更新机制	开发轻量化模型库,结合物理方程和机器学习方法,保证既有足够精度又能实时更新; 迁移学习历史案例,快速适配新场景
实时仿真与推演	动力学仿真(流体力学、结构力学等); 数据驱动预测模型(人工智能算法); 混合仿真引擎(并行、分布式计算)	预测灾害演化,辅助决策提前干预; 评估不同救援方案的执行效果	高并发、高精度的计算资源需求; 不确定性场景的模拟算法复杂度高	将物理方程(如流体力学)与数据驱动模型(如深度学习预测)相结合; 利用并行计算框架(图形处理单元、云计算)支撑高强度运算,并通过事件驱动的方式动态更新场景
决策优化与多目标调度	综合考虑人员安全、救援效率、资源消耗等多目标; 运用整数线性规划、强化学习等优化算法; 动态更新决策参数,持续迭代	提高救援方案的科学性与可行性; 支撑快速增援、资源最优配置	多目标、多约束下的算法复杂度; 快速响应灾情变化并实时更新决策	应用多目标优化算法(如强化学习、遗传算法等),结合实时反馈机制不断迭代; 综合评估资源调度、增援时机、疏散方案,以快速响应现场变化
跨层级协同与信息共享	指挥中心与现场指挥部、救援队伍之间的高效沟通; 标准化接口与权限管理; 多端协同(PC端、移动端、可穿戴设备)	减少指令滞后,提升应急响应速度; 保证决策信息从上至下、从下至上双向畅通	复杂网络环境下的通信稳定性; 不同部门、不同平台间的数据互操作	完善组织协同、标准化接口、安全防护等管理机制,确保系统在大规模、多部门联动的应急场景中稳定运行

未来,随着边缘计算、5G/6G 网络、云-边协同等技术的发展,应急数字孪生战场将在城市内涝、重大火灾、核生化事故等复杂场景中深化应用。同时,需关注数据安全与隐私保护、跨部门协同标准统一、大规模算力支撑等挑战,通过不断完善系统架构和管理机制,最终实现对重大突发事件的全局掌控与快速应对。

3 结 论

1) S3DA2 决策闭环得出的基于成本最小化的最优决策公式,可用于救援方案的实时量化计算,为应急指挥从“经验驱动”向“计算驱动”转型提供了理论与技术基础。

2) 2024 年洞庭湖决口案例验证结果表明:模

型的决口扩张预测误差控制在 10% 以内,封堵时长由 82 h 缩短至 52 h,石料需求估算值 $5.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 与实际用量高度吻合,证明了该模型的科学性和有效性。

3) 未来工作将沿“科学-技术-工程”三维主线推进:科学层面深化 S3DA2 在应急 C2 理论中的普适机制,构建跨尺度、跨灾种语义体系,提供复杂救

援场景统一范式;技术层面聚焦数字孪生战场瓶颈,突破多灾种耦合仿真、云-边协同算力调度及可解释人工智能决策等关键技术,形成模块化工具链;工程层面面向城市内涝、山洪泥石流及大型综合演习等多元场景示范应用,完善跨部门数据标准与共享机制,推动数字孪生战场从样机验证迈向规模化部署。

参 考 文 献

[1] 范维澄. 国家突发公共事件应急管理中科学问题的思考和建议[J]. 中国科学基金, 2007(2): 71-76.
FAN Weicheng. Advisement and suggestion to scientific problems of emergency management for public incidents[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2007(2): 71-76.

[2] 李辉, 付宏, 刘光宇. 突发事件应急指挥决策分析框架研究述评[J]. 情报工程, 2020, 6(2): 12-20.
LI Hui, FU Hong, LIU Guangyu. Review on the analysis framework of emergency command decision-making[J]. Technology Intelligence Engineering, 2020, 6(2): 12-20.

[3] 新华社. 国务院机构改革方案[EB/OL]. (2018-03-17). https://www.gov.cn/xinwen/2018-03/17/content_5275116.htm.

[4] 新华社. 构建统一指挥、权责一致、权威高效的应急管理体系: 专家谈组建应急管理部[EB/OL]. (2018-04-16). https://www.gov.cn/zhengce/2018-04/16/content_5282939.htm.

[5] 中国机构编制网. 中共中央办公厅 国务院办公厅关于调整应急管理部职责机构编制的通知[EB/OL]. (2023-10-31). https://www.gov.cn/zhengce/202310/content_6912954.htm.

[6] 新华社. 中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定[EB/OL]. (2024-07-21). https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6963770.htm.

[7] U. S. Joint Chiefs of Staff. Department of defense dictionary of military and associated terms[R], 2010.

[8] 王飞跃. 指控 5.0: 平行时代的智能指挥与控制体系[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 107-120.
WANG Feiyue. CC 5.0: intelligent command and control systems in the parallel age[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(1): 107-120.

[9] GRANT T, KOOTER B. Comparing OODA & other models as operational view C2 architecture topic: C4ISR/C2 architecture[C]. ICCRTS 2005, 2005: 1-14.

[10] 阳东升, 李强, 刘玉超, 等. 宏观尺度 C2 过程机理: PREA 环理论模型修订及应用[J]. 指挥与控制学报, 2022, 8(4): 389-401.
YANG Dongsheng, LI Qiang, LIU Yuchao, et al. Macro-scale C2 process mechanism: revision and application of theory model of PREA loop[J]. Journal of Command and Control, 2022, 8(4): 389-401.

[11] REMO J W F, PINTER N. HAZUS-MH earthquake modeling in the central USA[J]. Natural Hazards, 2012, 63(2): 1 055-1 081.

[12] YILDIRIM E, DEMIR I. An integrated web framework for HAZUS-MH flood loss estimation analysis[J]. Natural Hazards, 2019, 99(1): 275-286.

[13] LI Tao, HU Haitao. Development of the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in emergency rescue in China[J]. Risk Management and Healthcare Policy, 2021, 14: 4 293-4 299.

[14] ZHOU Lei, WU Xianhua, XU Zeshui, et al. Emergency decision making for natural disasters: an overview[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2018, 27: 567-576.

[15] BRAGAZZI N L, DAI Haijiang, DAMIANI G, et al. How big data and artificial intelligence can help better manage the COVID-19 pandemic[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(9): 1-8.

[16] 郁建兴, 陈韶晖. 从技术赋能到系统重塑: 数字时代的应急管理体制机制创新[J]. 浙江社会科学, 2022(5): 66-75, 157.
YU Jianxing, CHEN Shaohui. From technology empowerment to system reconstruction: innovation of emergency management institution and mechanism in the digital era[J]. Zhejiang Social Sciences, 2022(5): 66-75, 157.

[17] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(11): 2 001–2 031.
YANG Linyao, CHEN Siyuan, WANG Xiao, et al. Digital twins and parallel systems: state of the art, comparisons and prospect[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(11): 2 001–2 031.

[18] JONES D, SNIDER C, NASSEHI A, et al. Characterising the digital twin: a systematic literature review[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2020, 29: 36–52.

[19] 孙殿阁. 基于数字孪生技术的民用机场安全管理系统构建[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增 1): 222–227.
SUN Dian'ge. Research on the construction of civil airport safety management system based on digital twin technology[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(S1): 222–227.

[20] 吴云超, 傅琛, 张宁馨. 面向数字孪生战场的智能体建模框架构建[J]. 指挥信息系统与技术, 2022, 13(4): 19–25, 31.
WU Yunchao, FU Chen, ZHANG Ningxin. Construction of agent modeling framework for digital twin battlefield[J]. Command Information System and Technology, 2022, 13(4): 19–25, 31.

[21] 邓烨, 奉祁林, 赵健. 数字孪生战场建设探讨[J]. 防护工程, 2020, 42(3): 58–64.
DENG Ye, FENG Qilin, ZHAO Jian. Discussion on construction of digital twin battlefield[J]. Protective Engineering, 2020, 42(3): 58–64.

[22] 杨继星, 房玉东, 边路, 等. 应急救援数字化战场体系研究与应用探索[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(10): 240–246.
YANG Jixing, FANG Yudong, BIAN Lu, et al. Research and application exploration of digital battlefield system for emergency rescue[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(10): 240–246.

[23] 田冉冉, 张辉, 闫小丽, 等. 基于流固耦合与多智能体的堤防决口应急响应仿真研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(3): 5–12.
TIAN Ranran, ZHANG Hui, YAN Xiaoli, et al. Simulation study on emergency response of dike breach based on fluid-solid coupling and multi-agent system[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, 21(3): 5–12.

作者简介: 陈涛 (1978—), 男, 山东邹城人, 博士, 研究员, 主要从事公共安全应急理论、应急平台技术、城市灾害模拟、卫生应急管理、特种场所安全监测技术等方面的研究。E-mail: chentao. b@ tsinghua. edu. cn。