

“智慧矿山数字孪生与虚拟现实技术”专题

编者按: 煤炭行业数字化、智能化发展是实现煤炭工业高质量发展的强大动力。然而,传统的数字矿山等概念不足以体现新一代数字技术应用的趋势。当前,数字孪生技术日趋成为工业界的应用热点,被认为是推动企业数字化转型快速有效的通用技术。在矿山领域引入数字孪生技术,能够推动煤炭行业向真正的智能化方向转变,为探索可持续发展的智慧矿山建设提供新的思路。为促进数字孪生与虚拟现实技术在矿山领域的应用研究,《工矿自动化》编辑部于2023年第2期组织出版“智慧矿山数字孪生与虚拟现实技术”专题。在专题刊出之际,衷心感谢各位专家学者的大力支持!

文章编号: 1671-251X(2023)02-0023-09

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022120050

基于工业互联网的智能矿山灾害数字孪生研究

邢震^{1,2}, 韩安^{1,2}, 陈晓晶^{1,2}, 陈海舰^{1,2}, 沈毅^{1,2}

(1. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015;

2. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015)

摘要: 煤矿灾害综合管控是智能矿山建设进程中需要重点解决的难题,借助数字孪生技术实现煤矿灾害的常态化管控是智能矿山建设的必然要求。从数字孪生内涵及本质出发,分析了数字孪生认识规律,并结合煤矿灾害数字孪生数据交互流程,提出了数字孪生技术在煤矿灾害研究中的应用模式:通过煤矿井下灾害监测传感器等设备进行实时监测,将监测数据通过边缘通信模块、云端通信模块上传至云端;数字孪生数值仿真软件部署在云端,利用传感器上传的监测数据作为初始条件参数、边界条件参数、效果验证参数,经过实时仿真分析,通过不断试错,寻求最佳的优化参数及解决方案;当技术手段在孪生世界应用成熟后,可用于对虚拟实体的最佳参数、解决方案等进行分析、判断、决策,并下发决策指令至井下执行器,控制灾害防治装备动作。从灾害监测方案优化、灾害预演及避灾路线精准规划、灾后救援方案制订及事故调查3个方面探讨了数字孪生赋能灾害预测性管控的实际应用。以工业互联网“云-管-边-端”架构为基础,构建了煤矿灾害数字孪生服务体系,并分析了面向矿山灾害的数字孪生关键技术,包括煤矿灾害智能感知和执行装备、煤矿灾害仿真软件、共性支撑技术,以期数字孪生赋能智能矿山建设提供参考。

关键词: 智能矿山; 煤矿灾害; 数字孪生; 工业互联网; 灾害预测性管控

中图分类号: TD67

文献标志码: A

Research on intelligent mine disaster digital twin based on industrial Internet

XING Zhen^{1,2}, HAN An^{1,2}, CHEN Xiaojing^{1,2}, CHEN Haijian^{1,2}, SHEN Yi^{1,2}

(1. CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China;

2. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: The comprehensive control of coal mine disasters is a key problem to be solved in the process of intelligent mine construction. It is an inevitable requirement for the construction of intelligent mines to realize the normalization control of coal mine disasters with the help of digital twin technology. Based on the connotation and essence of the digital twin, this paper analyzes the recognition rule of the digital twin and puts forward the

收稿日期: 2022-12-16; 修回日期: 2023-02-01; 责任编辑: 胡娴。

基金项目: 江苏省科技成果转化专项项目(BA2022040-2022); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2021-TD-ZD004); 天地(常州)自动化股份有限公司科研项目(2022TY2004)。

作者简介: 邢震(1987—), 男, 山东临沂人, 副研究员, 硕士, 研究方向为智能矿山及生产调度协同管控技术, E-mail: 694826672@qq.com。

引用格式: 邢震, 韩安, 陈晓晶, 等. 基于工业互联网的智能矿山灾害数字孪生研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(2): 23-30, 55.

XING Zhen, HAN An, CHEN Xiaojing, et al. Research on intelligent mine disaster digital twin based on industrial Internet[J].

Journal of Mine Automation, 2023, 49(2): 23-30, 55.



扫码移动阅读

application mode of digital twin technology in coal mine disaster research combining with data interactive process of mine disaster digital twin. Real-time monitoring is carried out by coal mine underground disaster monitoring sensor. The monitoring data is uploaded to the cloud through the edge communication module and cloud communication module. The digital twin numerical simulation software is deployed in the cloud. The monitoring data uploaded by the sensor is used as the initial condition parameter, boundary condition parameter and effect verification parameter. The best optimization parameters and solutions are sought through real-time simulation analysis and continuous trial and error. When the technical means are mature in the twin world, they can be used to analyze, judge and make decisions on the best parameters and solutions for virtual entities. The decision instructions can be sent to underground actuators to control the action of disaster prevention equipment. This paper discusses the practical application of digital twin enabling disaster predictive management and control from three aspects: disaster monitoring scheme optimization, disaster rehearsal and precise planning of disaster avoidance route, and post-disaster rescue scheme formulation and accident investigation. Based on the "cloud-pipe-edge-end" architecture of the industrial Internet, the digital twin service system for coal mine disasters is constructed. The key technologies of digital twin for mine disasters are analyzed. The technologies include intelligent sensing and execution equipment for coal mine disasters, simulation software for coal mine disasters and common support technologies. It is expected to provide reference for the construction of digital twin-enabling intelligent mines.

Key words: intelligent mine; coal mine disaster; digital twin; industrial Internet; disaster predictive control

0 引言

我国大部分矿区煤炭地质赋存条件复杂,开采过程中难免受到水害、火灾、瓦斯事故、尘害、顶板灾害等常见灾害的威胁^[1-2],深部开采矿区还受到冲击地压^[3-4]、热害^[5]等多种灾害的困扰。为减少灾害事故的发生,煤炭科技工作者对各种灾害规律开展了大量研究,研究方法通常包括小尺寸相似模拟实验、矿井级全尺寸实验、真实灾害事故调研、数值模拟仿真等。小尺寸相似模拟实验通常是用于局部重点区域灾害研究,误差大且无法从矿井全局的高度对灾害关联性进行研究^[6-7]。矿井级全尺寸实验场地相对较少,由于客观原因,实验矿井模型设计难以符合煤矿井下现场实际巷道分布情况,可开展的实验形式和内容受局限^[8-9]。煤矿真实灾害数据可通过调查获取,通过分析研究积累经验教训,但煤矿灾害往往具有突发性,有时还会产生次生灾害,通过复现的方式进行重复性研究是不现实的^[10-11]。数值模拟仿真研究可根据不同灾害特点,利用不同的工业软件对不同区域乃至全矿井的灾害进行大量重复仿真实验,但只能进行静态仿真实验,不能实现灾害态势的实时展现及动态预测^[12-13]。

2020 年国家能源局等八部委联合发布《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》^[14-15]以来,以云计算、大数据、工业互联网、人工智能算法、5G 通信、边缘计算、新型低功耗智能传感器等共性支撑技术为基础的数字孪生技术在煤炭行业快速发展及应

用,使得数据的实时获取、瞬时传输、快速计算、智能决策等成为了现实,克服了数值模拟应用于灾害仿真研究的缺陷。数字孪生作为煤矿灾害研究及预测的有效手段,可实现灾害态势的实时展现,提供实时、快捷的智能化服务。为充分发挥数字孪生技术在煤矿灾害研究中的优势,赋能智能矿山建设,本文从数字孪生内涵及其在煤矿灾害研究中的应用模式入手,深入探讨其应用方向及关键支撑技术,为煤矿灾害的重复性、低成本研究提供新思路。

1 数字孪生内涵及其在煤矿灾害研究中的应用模式

数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、设备运行历史数据等,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程,通过对物理实体的力、热、声、光、电、磁等多物理量的实时动态仿真,降低方案优化、参数调整、预测诊断等措施的试错成本^[16-17]。

数字孪生以物理实体作为参照,通过三维建模技术,在以计算机为载体的虚拟世界中构建虚拟实体,并通过数据交互技术实现现实世界与虚拟世界的双向数据交互。陶飞等^[18]提出了包括物理实体、虚拟实体、孪生数据、连接、服务的数字孪生五维模型(图 1),为数字孪生技术应用于实践提供了具体思路。在煤矿灾害研究中,以矿山灾害物理实体为基础建立数字孪生体,并将工业互联网作为连接通道,将工业软件及智能算法作为服务端,形成完整的数

字孪生模型。基于数字孪生技术,科技人员或管理人员可以通过虚拟世界实现低成本的认识、控制、预测并改造现实世界。

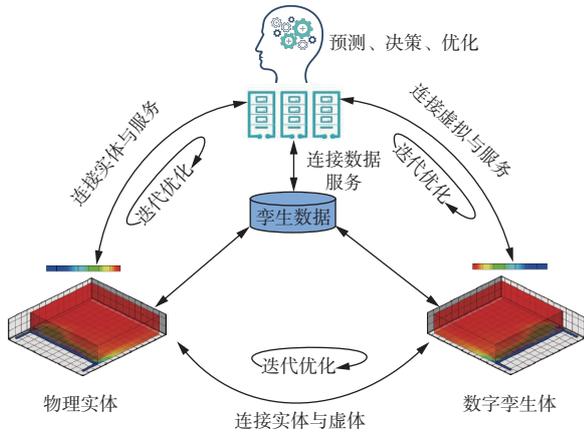


图1 数字孪生五维模型

Fig. 1 Five dimensional model of digital twin

数字孪生认识规律如图2所示。根据积累的现

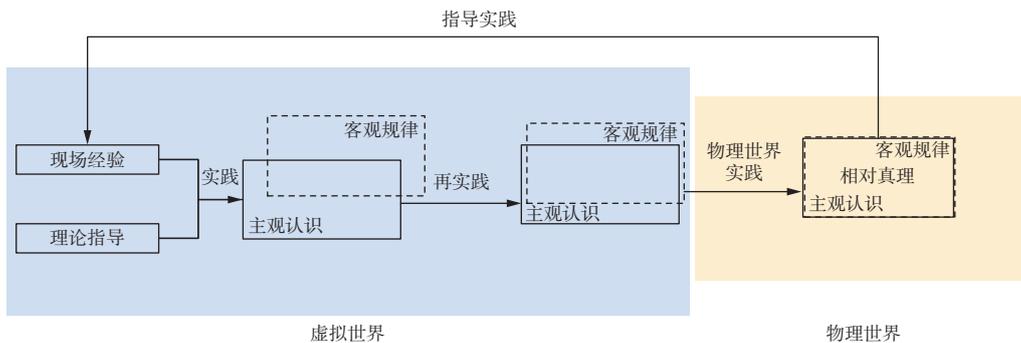


图2 数字孪生认识规律

Fig. 2 Recognition rule of digital twin

煤矿灾害数字孪生数据交互流程如图3所示。通过煤矿井下灾害监测传感器等设备进行实时监测,将监测数据(如CO浓度、CH₄浓度、O₂浓度、风速、粉尘浓度、顶板压力等环境参数及风门风窗状态、烟雾传感器状态、洒水装置状态、灌浆注氮装备状态、通风机运行状态等设备状态数据)通过边缘通信模块、云端通信模块上传至云端。数字孪生数值仿真软件部署在云端,利用传感器上传的监测数据作为初始条件参数、边界条件参数、效果验证参数,经过实时仿真分析,通过不断试错,寻求最佳的优化参数及解决方案。当技术手段在孪生世界应用成熟后,对虚拟实体的最佳参数、解决方案等进行分析、判断、决策,并下发决策指令至井下执行器,控制灾害防治装备动作。

2 数字孪生赋能灾害预测性管控

《智能化示范煤矿验收管理办法(试行)》中明确

场经验及理论知识,在虚拟世界数字孪生体中不断优化参数、仿真计算等,经过实践→认识→再实践→再认识等一系列过程,将不合理的推断、决策、低级错误等暴露在数字孪生体中,经云端决策中心分析判断后,将最佳数字孪生测试方案移植于煤矿井下现实物理世界中,从而大大降低灾害研究及治理的风险,降低灾害研究及治理的时间、空间及容错成本,提高灾害管理、预防及治理的成功率。

煤矿灾害规律实验研究具有风险大、成本高的特点,数字孪生技术出现之前,由于受到技术水平的限制,对灾害的预防和治理等研究、实践过程往往需要付出高昂的代价。数字孪生技术的应用让煤矿灾害研究变得简单易行,在计算机技术的辅助下,科技人员在研究、预防、治理灾害之前,可在孪生世界中低成本、重复性地预演数据的采集与分析、设备故障的预测与诊断、灾害的预防与治理、避灾路线的设计与规划等。

要求智能矿山建设要实现灾害综合防控^[19]。借助数字孪生技术,通过构建物理模型、仿真模型、数据模型,实现矿井物理实体与孪生体的虚实映射及数据交互,可为灾害综合防控提供技术支撑。

2.1 灾害监测方案优化

煤矿属于信息不完全的灰色系统,灾害影响因素众多,且由于煤矿生产需要考虑经济效益,这就要求灾害的监测、治理等方案在满足既定目标的前提下尽可能降低成本。以采空区瓦斯治理中高位抽采巷(简称高抽巷)的参数设计为例,高抽巷在煤层中的最佳高度、抽采口的最佳位置、最佳抽采负压等关键参数直接决定了瓦斯抽采效果。高抽巷掘进成本高、风险大,若参数设计不合理,可能引起负面效果,若抽采负压过大,会加大采空区漏风强度,从而引起煤自燃,若出现明火,甚至可能引起瓦斯爆炸,这就要求高抽巷必须一次性完成开掘,因此参数设计的合理性至关重要。

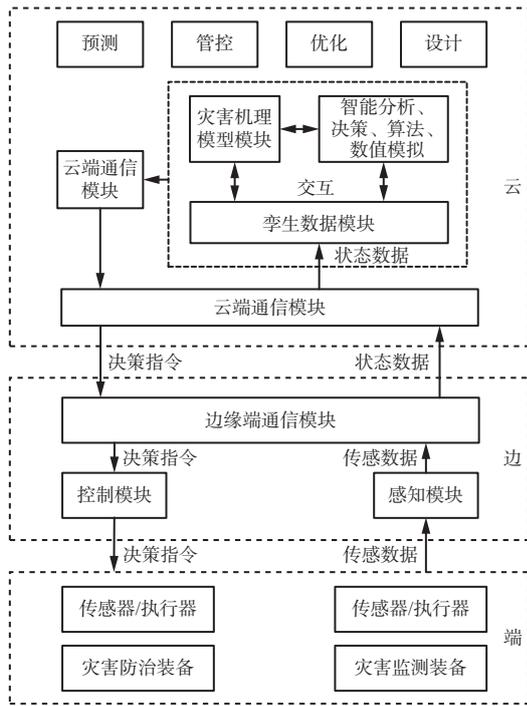


图 3 煤矿灾害数字孪生数据交互流程

Fig. 3 Digital twin data interaction process of coal mine disaster

高抽巷参数设计通常是依据煤矿现场技术人员的经验实现,不可避免会有一定偏差。数字孪生技术有助于快速求得最优解,煤矿技术人员可在虚拟的数字孪生体中任意重复性地试验不同参数,从而更快、更直观地确定最佳设计方案。以静态数值模拟条件下高抽巷设计为例,通过数值模拟的方式可直观分析采空区内瓦斯与氧气浓度分布规律,确定最佳抽采效果下的高抽巷位置、负压等参数^[20]。同样,对于煤矿火灾、水害、地质灾害等,由于涉及的区域广,受成本及监测技术水平的制约,测点数目有限,如何利用有限的测点覆盖更多的监测区域,更高效地实现灾害监测,是科研人员面临的难题。通过数字孪生技术,在数字孪生体中可视化展现灾害各项关键参数的分布规律,在矿井物理世界中针对性地对重点区域布设传感装置,从而能够以最低成本实现危险区域的有效监测。

2.2 灾害预演及避灾路线精准规划

煤矿日常需要对人员集中的生产作业重点区域、事故频发的危险区域等进行灾害预防性管理和维护,例如:易发生顶板冒落事故的综采工作面、掘进工作面,断面较大的 T 型巷道交叉口;易发生瓦斯、煤尘爆炸的掘进工作面、电气设备硐室、井下各转载点;易发生煤自燃的采空区、盲巷、废弃巷道;易发生外因火灾事故的机电硐室,防爆开关硐室,地面副井口及运输巷道机头、机尾滚筒和托辊;易发

生突水事故的老窑、处于断层、破碎带的掘进工作面等。

数字孪生技术赋能灾害预演,在数字孪生体中实现对重点及危险区域事故的常态化预测,在事故发生之前采取防范措施,将事后补救转变为事前预防,可有效降低事故发生概率。同时,通过数字孪生体预先研究各危险区域的灾害规律,如火灾时烟气流动规律、瓦斯爆炸时有害气体蔓延规律、水灾时水流流动规律等,规划各危险区域不同灾害时期的精准避灾路线,形成应急预案,借助虚拟现实(Virtual Reality, VR)、增强现实(Augmented Reality, AR)及混合现实(Mixed Reality, MR)等技术培训煤矿井下人员,通过计算机生成的多种感官数据,身临其境地感受虚拟世界中灾害发生时所处的环境及所蕴含的信息,从而提升受培训人员在数字孪生体中的体验及参与感,将其对灾害的感性认识提升至理性认识,指导其在遇到灾害时的避灾实践,最大程度减少人员伤亡和经济损失。

2.3 灾后救援方案制订及事故调查

随着政府监察监管力度不断加强,煤矿智能采掘装备、应急救援装备、灾害监测监控及防控技术、灾害机理及智能分析算法等逐步发展,结合煤矿管理能力、人员素质等各方面的日益进步,近年来煤炭安全生产形势明显稳定向好,煤炭生产百万吨死亡率持续降低,然而各类事故发生总量和人员伤亡数量依然较大,特别是重特大灾害事故时有发生,严重危害井下作业人员的生命安全。

煤矿发生灾害后需第一时间进行现场救援及事故调查。事故调查一方面是为了查清事故缘由,另一方面是为了积累事故经验教训,避免再次发生类似事故。然而,由于煤矿事故具有突发性,且事故现场容易发生次生灾害,传统的救援方案及事故分析方法主要采用现场勘查的方式,对事故的记录及分析局限于文档和图纸等常规形式,导致事故分析缺乏全面性和直观性,现场救援及事故调查难度及风险大^[21]。应用数字孪生技术,在虚拟世界中将地面各监控系统历史数据作为输入条件,高度还原事故发生的整个过程,并直观显示灾后现场状况,通过实时数据预演模拟发生次生灾害的可能性、波及范围,可为现场救援方案及灾后事故调查提供有力保障。

3 煤矿灾害数字孪生架构及关键技术

煤矿灾害具有突发性和严重性,数字孪生应用于煤矿灾害首先要解决的是数据的大量感知、瞬时传输、快速计算等问题,传统的网络架构模式无法支

撑灾害数据孪生应用,因此,本文提出了基于工业互联网“云-管-边-端”架构的数字孪生基础模式,为煤矿灾害数字孪生应用提供数据保障。

3.1 基于工业互联网的煤矿灾害数字孪生服务体系

数据是数字孪生中虚拟世界与物理世界交互的核心,以智能矿山信息基础设施建设中“云-管-边-端”架构为基石的数据采集、数据传输、数据存储、数据处理、数据分析、智能决策、控制指令下发等为

数字孪生应用提供了技术支撑。基于工业互联网架构的数字孪生服务体系^[22-25]包括感知控制层、边缘计算层、网络传输层、平台层及应用服务层,如图4所示。感知控制层实现数据采集及决策指令执行;边缘计算层分担云计算算力,实现边缘侧算法、快速判断、决策及控制;网络传输层实现数据的上传下达;平台层实现数据存储、处理;应用服务层实现数字孪生的数值仿真、决策分析等。



图4 基于工业互联网“云-管-边-端”架构的数字孪生服务体系

Fig. 4 Digital twin service system based on industrial Internet "cloud-pipe-edge-end" architecture

3.2 面向矿山灾害的数字孪生关键技术

与煤矿采、掘、运等环节数字孪生应用有所不同的是,面向灾害的数字孪生关键技术有一定特殊性,例如采、掘、运等环节的数据感知装备通常是部署于工作面等操作空间,而灾害数字孪生涉及的感知装备通常部署于如采空区、煤层钻孔等人员无法进入的空间,对传感装备的供电、通信、故障诊断等提出更高要求;不同专业的仿真软件要求不同,采、掘、运等环节的仿真软件侧重于机械力学、装备协同过程仿真等,而灾害数字孪生仿真软件侧重于流体力学、岩石力学等。

1) 煤矿灾害智能感知和执行装备。不同于传统工业领域,煤矿井下巷道空间狭长、潮湿,采空区易

爆、易燃、易受砸等特殊作业环境决定了灾害监测及执行装备的特殊性。感知及执行装备作为数字孪生技术的神经末梢,承担了数据采集、交互及末端执行的功能。数据的准确性及数据测点数量直接影响顶层数字孪生体模型的精度及分析决策结果的有效性,传统的井下传感器大多是点式部署,数量非常有限,远远满足不了数字孪生数据采集及交互需求,研究煤矿灾害智能、低成本、分布式感知装备迫在眉睫。以采空区自然发火监测为例,工作面推进过程中,采空区内进/回风巷、开切眼、终采线等区域及放顶煤开采工作面中部区域等均有不同程度的遗煤,采空区全域都有自燃风险。《煤矿安全规程》规定的常规监测手段是束管监测,通常1个采空区只布置

数个甚至 1 个测点。光纤测温技术采用分布式测量,可预先布置在采空区“两道”实现巷道沿线监测,测点数量有了很大提升,但对于采空区三维立体大面积危险区域,测点数量仍无法支撑数字孪生分析决策需求。因此需要研制低成本、小尺寸、低能耗的传感器^[26-27],以及基于超声波、瞬变电磁^[28]等技术的三维监测传感装备,实现火灾监测区域高密度网格化监测、全方位立体化覆盖。

2) 煤矿灾害仿真软件。数字孪生是以仿真软件为内核的多物理场动态数值模拟。仿真软件包括工业领域通用仿真软件和煤矿行业专用仿真软件。工业领域通用仿真软件包括应用于火灾、粉尘、瓦斯、水害、通风等流体仿真领域的 ANSYS FLUENT^[29],可耦合气体流场、温度场、电场、磁场等多物理场的 Comsol Multiphics^[30],适用于矿压、岩石、地质等三维结构受力特性模拟和塑性流动分析的 FLAC^{3D}^[31]。通用灾害仿真软件具有适用范围广、算法成熟稳定、仿真结果精度高、可视化效果好等优点,但其应用于煤矿灾害数字孪生时存在以下问题:① 只能实现静态仿真,根据物理实体建立三维模型后,可配置一组固定参数进行模拟,若要在计算过程中更改参数,需要重新计算,往往耗时较长,尽管可通过 UDF 编程的方式实现部分参数的动态变化,但功能仍然有限,无法满足大批量参数变化的需求。② 缺少煤矿灾害专用模型库、算法库、组件库,模型建立难度大,需要用自定义编程的方式适应煤矿灾害特殊场景需求。③ 只适合小区域仿真,不适合全矿井级大范围仿真,三维场模拟需要大量时间和巨大算力作为保障。

煤炭行业专用仿真软件包括全矿井外因火灾仿真软件 MFIRE^[32]、矿井三维通风仿真软件 VENTSIM^[33]等,具有适合全矿井级仿真、计算时间短等优点,然而也面临一些问题,如计算时间短是以牺牲各物理量的详细分布规律为代价的,忽略了区域巷道内部流体的运动过程,不能反映详细的仿真过程及结果,无法实现三维可视化,算法准确性及稳定性有待提升等,因此不能满足数字孪生的需求。综上,结合通用仿真软件的优点,完善煤炭行业专用仿真软件功能,实现实时动态仿真,是实现煤矿数字孪生的必经之路。

研发仿真软件的同时,也需要优化实时仿真方案。尽管煤矿数字孪生技术的发展方向是全面感知,但毕竟计算机资源是有限的,这就要求将有限的资源合理分配至不同的区域、设备等目标。要坚持两点论和重点论的统一,对于危险程度、变化幅度比

较大的区域(如采空区、工作面等),要重点倾斜资源,加大网格划分密度;对于危险程度小的区域,要统筹兼顾,在适当分配资源的同时防止低概率事故发生。为了进一步满足煤矿数字孪生的高实时性要求,针对灾害发生概率较大的地点,可在计算资源充裕时预先进行计算,并将结果存储于云平台,一旦发生灾害,可直接调取云平台中的计算结果,从而大大缩短实时计算时间。

3) 共性支撑技术。煤矿灾害往往突发性强、后果严重,应用数字孪生技术解决煤矿灾害问题时需要交互的数据量极大,对时效性要求极高,因此缺少不了共性技术的支撑。随着智能感知装备数据呈指数级爆炸增长,边缘计算设备承担了数据的预处理及常规分析功能^[34]:一方面,实现原始数据的过滤功能,将关键、有效、异常状态等数据上传至云端进一步分析,有效降低数据传输压力及云端计算压力;另一方面,通过边缘层灾害分析模型对常规、低风险等级的灾害进行分析判断,并采取控制策略,实现就地控制。5G 通信技术具有高速率、低时延、大连接和高可靠等特点,可满足物理实体海量多源异构数据的上传需求及虚拟实体数据的下发需求,有效实现多系统之间低时延的互联互通,保障虚实数据交互^[35]。大数据平台可用于多模态数据的集成、治理、计算、存储及管理,并基于煤矿灾害数据融合分析与信息建模,为顶层数字孪生应用提供高质量数据资产^[36]。云计算分布式共享与按需调整自服务的模式满足数字孪生系统实时动态存储、仿真、运行的需求,通过云计算服务器端预置的数字孪生仿真工具,可实现不同灾害不同状态下的实时动态仿真及预测。另外,结合边缘协同计算技术及云端决策分析算法,根据灾害仿真结果,可实现灾害防治方案、设计方案、优化方案等的智能执行。

数字孪生技术应用于智能矿山灾害预警及综合防控时有以下要求:① 数据采集、传输、计算的瞬时性。事故的突发性要求数字孪生系统实时完成数据的采集、传输及仿真计算等过程,若传输、计算等速度跟不上,将会导致数字孪生系统灾害状态迟滞于物理世界,无法起到灾害预警的效果。② 智能决策算法的准确性。不同于采、掘、运等生产系统优化算法,数字孪生系统对智能决策算法的准确性要求极高。智能决策算法有误将直接导致对灾害的误判,从而影响对灾害的预测及防治。

4 结语

分析了数字孪生的内涵及其认识规律,针对煤

矿灾害研究及治理风险大、成本高的特点,提出了数字孪生在煤矿灾害研究中的应用模式。基于工业互联网“云-管-边-端”架构,构建了煤矿灾害数字孪生服务体系。工业互联网为数字孪生提供了数据来源保障、数据有效传输通道、数据处理机制、数据计算平台、数据分析算法、决策指令下发通道,基于实时动态仿真的数字孪生技术,实现物理实体中难以复现或成本、后果不可接受的重复性测试,并将虚拟实验结果转换为优化方案,将预测结果应用于物理世界,实现矿井灾害预测预警及自主防控,从根本上减少灾害发生,为智能矿山建设提供技术支持。

参考文献(References):

- [1] 王国法, 庞义辉, 李爽, 等. 基于煤矿时空多源信息感知的智能管控闭环体系[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(4): 1-11.
WANG Guofa, PANG Yihui, LI Shuang, et al. Intelligent safety closed-loop management and control system based on multi-source information perception in coal mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(4): 1-11.
- [2] 张庆华, 马国龙. 我国煤矿重大灾害预警技术现状及智能化发展展望[J]. 智能矿山, 2020, 1(1): 52-62.
ZHANG Qinghua, MA Guolong. Status and intelligent development prospect of coal mine major disaster early-warning technology in China[J]. Journal of Intelligent Mine, 2020, 1(1): 52-62.
- [3] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 716-725.
YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 716-725.
- [4] 窦林名, 田鑫元, 曹安业, 等. 我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 152-171.
DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171.
- [5] 王文婕, 张淑含. 深部开采矿井地热能开发与热害协同防治技术[J]. 煤炭与化工, 2022, 45(9): 87-90.
WANG Wenjie, ZHANG Shuhan. Cooperative prevention and control technology of geothermal energy development and thermal damage in deep mining mines[J]. Coal and Chemical Industry, 2022, 45(9): 87-90.
- [6] 姜涛, 崔崱, 刘国磊, 等. 通风和开口形状对地下硐室火灾影响的实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(2): 67-72.
JIANG Tao, CUI Yu, LIU Guolei, et al. Experimental study on influence of ventilation and opening shape on underground chamber fire[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(2): 67-72.
- [7] 景国勋, 吴昱楼, 郭绍帅, 等. 障碍物对瓦斯煤尘爆炸火焰传播规律的影响[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(9): 99-104.
JING Guoxun, WU Yulou, GUO Shaoshuai, et al. Influence of obstacle on flame propagation laws of gas and coal dust explosion[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(9): 99-104.
- [8] 李晴, 康建宏, 周福宝, 等. 全尺寸巷/隧道火灾风烟流温度预测模型与验证[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(8): 5-12.
LI Qing, KANG Jianhong, ZHOU Fubao, et al. Prediction model and verification of smoke flow temperature in full-scale roadway/tunnel fires[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(8): 5-12.
- [9] 姚勇征, 张文明, 吴兵, 等. 巷道火灾对通风系统影响的全尺寸实验与模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(4): 709-715.
YAO Yongzheng, ZHANG Wenming, WU Bing, et al. Full-scale experimental and simulation study of the influences of laneway fire on ventilation system[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 709-715.
- [10] 胡晓伟. 矿井安全应急救援体系存在问题分析及完善措施[J]. 中国矿山工程, 2020, 49(6): 64-66.
HU Xiaowei. Problems analysis and improvement measures of mine safety emergency rescue system[J]. China Mine Engineering, 2020, 49(6): 64-66.
- [11] 郭军, 蔡国斌, 郑学召, 等. 矿井热动力灾害及救援安全性判定研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 116-122.
GUO Jun, CAI Guobin, ZHENG Xuezhao, et al. Research status and prospect of mine thermal disaster and rescue safety judgement[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 116-122.
- [12] 邢震. 浅埋厚煤层地表漏风对采空区煤自燃影响数值模拟研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(2): 80-87, 103.
XING Zhen. Numerical simulation study on the influence of surface air leakage in shallow thick coal seam on coal spontaneous combustion in goaf[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(2): 80-87, 103.
- [13] 邢震. 特厚煤层自燃关键参数现场观测及动态数值模拟研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(2): 111-115.
XING Zhen. In-situ observation and dynamic numerical simulation research on the key parameters of extra-thick coal seam spontaneous combustion[J]. Coal Engineering, 2020, 52(2): 111-115.
- [14] 王国法. 煤矿智能化最新技术进展与问题探讨[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 1-27.

- WANG Guofa. New technological progress of coal mine intelligence and its problems[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 1-27.
- [15] 王国法, 任怀伟, 赵国瑞, 等. 煤矿智能化十大“痛点”解析及对策[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(6): 1-11.
- WANG Guofa, REN Huaiwei, ZHAO Guorui, et al. Analysis and countermeasures of ten 'pain points' of intelligent coal mine[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(6): 1-11.
- [16] 郎为民, 马卫国, 赵卓萍, 等. 数字孪生系统构成研究[J]. *电信快报*, 2022(9): 1-5.
- LANG Weimin, MA Weiguo, ZHAO Zhuoping, et al. Research on the composition of digital twin system[J]. *Telecommunications Information*, 2022(9): 1-5.
- [17] 陶飞, 马昕, 胡天亮, 等. 数字孪生标准体系[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(10): 2405-2418.
- TAO Fei, MA Xin, HU Tianliang, et al. Research on digital twin standard system[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(10): 2405-2418.
- [18] 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.
- TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1-18.
- [19] 李爽, 贺超, 薛广哲. 以双重预防机制实现智能矿山愿景用灾害综合防治系统保障智能矿山安全[J]. *智能矿山*, 2022, 3(6): 87-92.
- LI Shuang, HE Chao, XUE Guangzhe. Realize the vision of intelligent mine with dual prevention mechanism and ensure the safety of intelligent mine with comprehensive disaster prevention system[J]. *Journal of Intelligent Mine*, 2022, 3(6): 87-92.
- [20] 邢震. 高瓦斯矿井采空区瓦斯与煤自燃耦合规律研究[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(3): 6-11, 20.
- XING Zhen. Research on coupling law of gas and coal spontaneous combustion in goaf of high gas mine[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(3): 6-11, 20.
- [21] 李雷雷, 丁晓文, 梁跃强, 等. 基于灾区环境的矿井瓦斯爆炸事故应急救援方法研究[J]. *煤矿安全*, 2022, 53(1): 237-242.
- LI Leilei, DING Xiaowen, LIANG Yueqiang, et al. Emergency rescue method based on disaster area environment of gas explosion in underground coal mines[J]. *Safety in Coal Mines*, 2022, 53(1): 237-242.
- [22] 郎为民, 田尚保, 李宇鸽, 等. 数字孪生技术架构研究[J]. *电信快报*, 2022(8): 1-6.
- LANG Weimin, TIAN Shangbao, LI Yuge, et al. Research on the technical architecture of digital twin[J]. *Telecommunications Information*, 2022(8): 1-6.
- [23] 葛世荣, 王世博, 管增伦, 等. 数字孪生——应对智能化综采工作面技术挑战[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(7): 1-12.
- GE Shirong, WANG Shibo, GUAN Zenglun, et al. Digital twin: meeting the technical challenges of intelligent fully mechanized working face[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(7): 1-12.
- [24] 丁恩杰, 俞啸, 夏冰, 等. 矿山信息化发展及以数字孪生为核心的智慧矿山关键技术[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 564-578.
- DING Enjie, YU Xiao, XIA Bing, et al. Development of mine informatization and key technologies of intelligent mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(1): 564-578.
- [25] 张帆, 葛世荣, 李闯. 智慧矿山数字孪生技术研究综述[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 168-176.
- ZHANG Fan, GE Shirong, LI Chuang. Research summary on digital twin technology for smart mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 168-176.
- [26] 孟峰, 张磊, 赵子未, 等. 基于物联网的智能传感器技术及其应用[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(增刊1): 48-50.
- MENG Feng, ZHANG Lei, ZHAO Ziwei, et al. Application of intelligent sensor technology based on Internet of things[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(S1): 48-50.
- [27] 程晓涵, 李宗吾, 谢秉沁, 等. 基于MEMS技术的矿用无线传感采集系统设计[J]. *煤炭工程*, 2022, 54(3): 26-32.
- CHENG Xiaohan, LI Zongwu, XIE Bingqin, et al. MEMS technology-based mine wireless sensor acquisition system[J]. *Coal Engineering*, 2022, 54(3): 26-32.
- [28] 田忠斌, 马玉龙, 李貅, 等. 煤层采空区内煤层气储气构造半航空瞬变电磁探测——以沁水煤田为例[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(11): 4495-4503.
- TIAN Zhongbin, MA Yulong, LI Xiu, et al. A method for detecting coalbed methane gas storage structure in coal goaf: a case in Qinshui Coal Field in Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(11): 4495-4503.
- [29] 邢震. 综放工作面采空区自燃危险区域监测技术及应用研究[J]. *煤炭工程*, 2017, 49(11): 130-132, 137.
- XING Zhen. Research on monitoring technology for danger zone of spontaneous combustion in goaf of fully-mechanized top-coal caving face[J]. *Coal Engineering*, 2017, 49(11): 130-132, 137.
- [30] 董洪凯. 区域瓦斯抽采空白带耦合模拟研究[J]. *煤炭技术*, 2016, 35(8): 216-218.
- DONG Hongkai. Coupling simulation study on local gas drainage blank tape[J]. *Coal Technology*, 2016, 35(8): 216-218.