基于数字孪生的煤矿掘进工作面智能管控系统构建研究

刘坤 郝志强

陕西陕煤韩城矿业公司象山矿井，中国·陕西 韩城 715400

摘要：煤矿掘进作业环境复杂，井下人员面临瓦斯、顶板、粉尘等多种风险，传统掘进方式在远程监控和设备协同方面存在不足。数字孪生技术通过构建与物理工作面相对应的虚拟模型，实现两者之间的数据交互和状态映射，为掘进工作面管控提供了新的技术路径。本文讨论了该技术在远程可视化、施工仿真预判和多装备协同方面的作用，从三维模型分级构建、多源数据融合、仿真推演模块开发和虚实联动闭环机制四个方面提出系统构建思路。从已有矿井应用情况看，该系统在减少井下作业人员、提前识别安全隐患方面显示出一定效果，在模型精度和数据实时性方面仍有改进空间。

关键词：数字孪生；煤矿掘进工作面；智能管控；虚实映射；多源数据融合

Research on Construction of Intelligent Management and Control System for Coal Mine Heading Face Based on Digital Twin

Liu Kun, Hao Zhiqiang

Xiangshan Mine of Shaanxi Shaanxi Coal Hancheng Mining Company, China Shaanxi Hancheng 715400

Abstract: The operating environment of coal mine heading operations is complex, and underground personnel are confronted with multiple risks including gas, roof hazards and dust. Traditional heading methods have inherent shortcomings in remote monitoring and equipment collaboration. By building a virtual model corresponding to the physical working face, digital twin technology enables data interaction and state mapping between the virtual and physical entities, providing a new technical path for the management and control of heading faces. This paper discusses the functions of this technology in remote visualization, construction simulation prediction and multi-equipment coordination, and proposes system construction frameworks from four aspects: hierarchical construction of 3D models, multi-source data fusion, development of simulation deduction modules, and closed-loop mechanism of virtual-real linkage. Practical applications in existing coal mines show that the system has achieved certain effects in reducing underground workers and identifying potential safety hazards in advance, while there is still room for improvement in model accuracy and real-time data performance.

Keywords: Digital twin; Coal mine heading face; Intelligent management and control; Virtual-real mapping; Multi-source data fusion

0 引言

巷道掘进是煤矿开采的先行工序，掘进速度和安全状况影响矿井的采掘衔接。我国多数井工矿井地质条件较为复杂，掘进工作面空间狭窄、设备密集，作业过程中受瓦斯涌出、顶板来压和地质构造变化等因素影响较大。长期以来，掘进作业主要依靠现场操作人员经验判断和手动控制，地面管理人员难以及时掌握井下实时状态，设备之间的数据也相对独立。近年来，不少矿井开始推进智能化改造，引入远程监控和自动截割等技术，但虚拟场景与物理设备之间的同步映射还不够充分。数字孪生技术能够在虚拟空间中复现物理工作面的运行状态，并支持反向控制和仿真推演，为解决上述问题提供了可能。

1 数字孪生技术概述

数字孪生的概念最早由美国学者在飞行器健康管理领域提出，基本思路是为物理实体建立一个与之对应的数字化模型，通过实时数据驱动模型运行，使模型反映实体的状态和变化过程。与单纯的三维可视化建模不同，数字孪生强调物理空间与虚拟空间之间的双向映射：物理实体上的传感器数据持续传入虚拟模型，更新模型的几何形状、运动姿态和运行参数；技术人员也可在虚拟模型上操作和仿真，将指令下发到物理实体执行。这种双向交互使虚拟模型不只是展示工具，而成为参与管控的环节[1]。

从系统的组成结构来看，数字孪生主要分为物理实体、虚拟模型、数据连接和应用服务四个部分。物理实体

就是现场实际运转的设备及其所处的作业环境，需要在关键位置安装传感器和数据采集装置，以此获取设备运行状态和环境参数的实时数据；虚拟模型是和物理实体一一匹配的三维数字化镜像，包含几何形态模型、物理属性参数以及设备运行的行为规则；数据连接负责在物理实体和虚拟模型之间传递数据，具体涵盖通信网络、数据传输协议和时序数据库等技术支撑；应用服务则对接各类实际业务场景，能够提供可视化监控、仿真推演和决策支持等功能。各个部分通过数据传输通道串联起来，形成一套完整的运行闭环[2]。

在煤矿掘进场景中，数字孪生的应用对象涵盖掘进机、锚杆钻机、转载机等单机设备，还包括巷道断面、支护结构和作业环境。已有研究将物理工作面、数字工作面、数据信息交互和控制驱动系统作为系统的四个组成部分，分别承担数据采集、建模分析、数据沟通和指令下发的功能[3]，为掘进工作面数字孪生系统的搭建提供了参考。

2 数字孪生在煤矿掘进工作面智能管控系统构建中的应用价值

2.1 工作面远程可视化管控，降低井下作业风险

掘进工作面位于井下最前端，作业环境中存在瓦斯超限、顶板掉矸和粉尘浓度高等问题，现场操作人员长期暴露在风险环境中。传统监控方式以视频画面和传感器报警为主，管理人员只能看到局部画面和孤立数据，难以形成对工作面整体状态的判断。数字孪生系统将掘进机、锚杆钻机、转载设备和巷道环境整合到同一个三维场景中，地面集控中心操作人员可通过虚拟模型观察设备位置、姿态和运行参数，了解截割头的作业轨迹和巷道成型情况[4]。

从已有的工程应用情况来看，采用 Unity 等三维引擎搭建的掘进机数字孪生集控系统，能够实时采集设备的运行姿态数据，并同步映射到虚拟模型中显示。操作人员在地面即可掌握设备的实时运动状态，有效减少了井下现场的值守人员数量。部分矿井还将人员定位系统接入孪生模型，在三维场景中标注出作业人员的所在位置，当人员进入危险区域时，系统会自动给出预警提示。这种可视化管控方式，降低了人员在高风险环境中的暴露时长，也便于管理人员统筹调配各工序的作业安排。

2.2 施工仿真超前预判，提升灾害主动防控能力

掘进过程中可能遇到的地质构造变化、瓦斯涌出和顶板来压等情况往往具有突发性，传统灾害应对多以事后处置为主，预警手段有限。数字孪生系统可在虚拟模型中复现工作面当前的地质条件和设备状态，结合历史数据对后续掘进过程进行仿真推演，预判可能出现的风险。

已有研究构建了基于人—机—环系统耦合的多灾种风险判别模型，利用 Transformer 时序模型对瓦斯、顶板和突水等风险进行预测，并结合 YOLOv5 和长短时记忆网络对人员违章行为进行视频识别。在陕煤集团柠条塔煤矿的应用中，该平台对主要风险的预警准确率达到 92% 以上，人员违章识别准确率超过 85%[5]，说明仿真推演在风险提前识别方面具有一定作用。

从实际操作看，仿真推演模块可以在虚拟环境中模拟不同截割参数下的巷道成型效果和围岩受力变化，帮助技术人员提前调整作业方案。当传感器监测到瓦斯浓度或围岩位移出现异常趋势时，系统在模型上标注风险区域并给出处置建议，使风险应对从被动响应向提前防范转变。

2.3 多装备协同优化，提高掘进施工作业效率

掘进工作面是一条由多台设备组成的作业线，掘进机负责破岩，锚杆钻机负责支护，转载机和胶带输送机负责出煤。各道工序衔接不畅时容易出现设备等待或工序冲突。传统模式下各设备由不同班组分别操作，协同效率受人员配合程度影响较大。

数字孪生系统在虚拟场景中统一呈现各设备的运行状态和位置关系，可为多装备协同调度提供依据。已有研究设计了盾体式临时支护与横轴式掘进机配合的智能掘进机器人系统，通过数字孪生平台实现掘、支、运平行作业的协同控制，在小保当矿业有限公司的应用表明，系统能够适应复杂地质条件下多设备的平行作业需求。

从协同方式看，地面集控中心可根据掘进进度和设备状态，在虚拟模型上预先安排各设备的作业时序，避免掘进机与锚杆钻机在同一区域同时作业造成干涉。系统还可根据截割参数和出煤量变化，自动调整转载机和输送机的运行速度，减少空转和待机时间，在一定程度上缩短工序间的等待时间。

3 数字孪生赋能煤矿掘进工作面智能管控系统构建的策略

3.1 分级构建掘进工作面三维孪生模型，保证虚实映射精度

三维模型是数字孪生系统的基础。掘进工作面的建模对象包括巷道围岩、支护结构、掘进机本体、附属设备和作业环境，不同对象对模型精度要求不同。如果所有对象按同一精度建模，会导致数据量过大、系统运行缓慢；如果精度不足，则无法反映设备姿态和巷道变形细节。因此需要采用分级建模的思路。

具体做法上，可以将模型分为三个层级。第一层级是整体场景模型，反映巷道走向、断面形状和设备整体布置，用于宏观监控和人员定位，精度要求相对较低。第二层级是设备级模型，针对掘进机、锚杆钻机等主要设备，需还原截割头、臂架、行走机构等关键部件的几何形状和运动关系，使虚拟模型复现设备姿态变化。第三层级是部件级模型，针对传感器布置点、液压油缸和关键连接部位，根据需要建立局部精细模型，用于设备状态监测和故障分析。

模型的几何数据可通过三维激光扫描和设备 CAD 图纸获取。实际建模中需考虑井下巷道随掘进不断延伸的特点，模型不能一次建成后固定不变，应根据掘进进度动态更新。已有实践表明，三维建模的速度和精度受算力限制，在配置较高的工作站上运行时模型刷新实时性较好。此外，模型与物理设备之间需建立参数映射规则，将传感器采集的电流、压力、位移等数据对应到虚拟模型的相应位置，使模型随设备运行同步变化。

3.2 搭建多源异构数据融合底座，破除各系统数据孤岛

掘进工作面的运行数据来自多个系统，包括设备 PLC 控制系统、环境安全监控系统、人员定位系统、视频监控系统和地质探测系统等。这些系统往往由不同厂商提供，数据格式和通信协议各不相同，如果没有统一的数据通道，数字孪生模型就无法获取完整的实时数据。

搭建数据融合底座，首先需解决通信接入问题。井下巷道延伸距离长、空间封闭，传统有线通信和 4G 网络在传输高清视频和大量传感器数据时带宽不足。目前较多矿井采用 5G 与 F5G 工业光网协同的方式，5G 负责移动设备和无线传感器的数据接入，F5G 承担长距离骨干传输，通信设备均做防爆防尘处理。在数据协议方面，可采用 MQTT 等轻量级消息传输协议，配合 EMQX 等消息中间件，实现设备数据的稳定接入和分发。

数据融合还需要对不同来源的数据进行清洗和对齐。传感器数据存在噪声和异常值，需经过滤波和校验后写入时序数据库。时间戳不统一是常见问题，各系统采样频率不同，需要在数据接入时进行时间对齐，使同一时刻的设备状态、环境参数和人员位置对应起来。融合后的数据按统一标准存入数据平台，供孪生模型调用和上层分析使用。

从实际效果看，统一数据底座打通了各系统之间的数据壁垒，管理人员在孪生场景中即可获得综合信息，不必在多个平台之间切换。但数据融合涉及多厂商设备的接口开放，需要协调设备供应方配合，周期往往较长。

3.3 开发面向掘进场景的仿真推演模块，实现风险智能预警

仿真推演是数字孪生系统区别于普通三维可视化平台的重要功能。在掘进场景中，仿真推演主要服务于两个目的：一是作业方案的预先模拟，二是安全风险的提前预警。

作业方案模拟方面，技术人员可在虚拟模型上设定截割路径、掘进速度和支护参数，观察模拟结果中巷道成型断面是否符合设计要求，围岩位移是否在允许范围内，各设备运行是否存在干涉。这种模拟无需在井下实际试操作，可在正式作业前发现方案中的问题，减少现场调整次数。已有研究将参数矩阵映射规则和故障原因分析表引入系统，通过比对实时数据与预设规则识别设备异常。

风险预警方面，需结合环境监测数据和地质信息建立预测模型。掘进工作面的主要风险包括瓦斯涌出、顶板变形、突水和设备故障等，不同风险的监测指标和预警阈值不同。系统可根据历史数据训练时序预测模型，对瓦斯浓度趋势和围岩位移变化进行预判，预测值接近阈值时提前发出预警。预警信息在孪生场景中标注显示，同时关联相应的应急预案，方便值班人员快速判断和处置。

需要注意的是，仿真推演和风险预警的效果依赖于数据质量和模型训练样本。井下地质条件变化较大，将在一个矿井训练的预测模型照搬到另一个矿井时准确率可能下降，因此模型需根据具体矿井数据持续调整，预警阈值也应结合现场情况标定。

3.4 构建虚实联动闭环管控机制，推进掘进装备协同智能调度

数字孪生系统的最终目的是支持管控决策，而不只是展示数据。虚实联动意味着虚拟模型与物理设备之间形成闭环：物理状态映射到虚拟模型，虚拟分析结果反过来指导物理设备运行。

在单机层面，虚实联动可实现远程遥控。操作人员在地面集控中心通过虚拟模型观察设备状态，发出截割、行走和支护等指令，指令通过通信网络传输到井下设备控制系统执行，设备运行参数再传回虚拟模型更新状态。这种方式要求通信延迟控制在较低水平，否则远程操作实时性会受到影响。已有应用表明，基于同步通信的远程操控系统能使操作人员在地面实时监控设备姿态，降低对现场操作经验的依赖。

在多机协同层面，虚实联动需要建立调度规则。掘进作业线包含掘进机、锚杆钻机、转载机、输送机和通风除尘设备等，各设备之间存在工序衔接关系。系统可根据掘

进进度、截割参数和出煤量，在虚拟模型中推演各设备的最佳运行时序，下发协同控制指令，实现多设备联动闭锁和同步作业。例如掘进机完成一个截割循环后，系统通知锚杆钻机进入作业区域，同时调整转载机速度配合出煤，避免设备在空间上发生干涉。

4 结语

从已有研究和工程实践来看，数字孪生为远程可视化监控、施工仿真预判和多装备协同调度提供了技术支撑，在减少井下作业人员和提前识别安全隐患方面显示出积极作用。系统构建需要从三维模型分级、多源数据融合、仿真推演模块和虚实联动机制几个方面着手，逐步实现物理工作面与虚拟模型之间的数据交互和状态映射。同时也应看到，该技术在煤矿掘进领域的应用仍处于探索阶段。模型精度与运行效率的平衡、不同矿井地质条件下预测模型的适应性、多厂商设备的数据接口开放等问题还需在实践中继续摸索，后续可结合具体矿井的装备配置和地质条件持续优化。

参考文献：

[1] 孙志萧. 基于数字孪生的智能掘进工作面三维场景再现技术的组建与应用[J]. 科技视界，2024(15): 72-73.

[2] 曹誉. 数字孪生控制系统在煤矿掘进机的应用[J]. 煤矿机械，2024, 45(1): 179-181.

[3] 刘甲磊. 智能化技术在煤矿掘进中的应用研究[J]. 中国设备工程，2026(5 下): 33-35.

[4] 夏同强，崔怡琳，邹增信等. 煤矿掘进安全风险智能管控关键技术与工程应用[J/OL]. 煤炭科学技术，2026.

[5] 蔡兴旺，裴耀强，杨继华等. 煤矿掘进机系统数字孪生技术研究[J]. 系统仿真学报，2024, 36(10): 2455-2468.