

煤矿井下掘进工作面数字孪生系统构建及设备联动控制研究

徐桂军

上海创力集团股份有限公司 上海 201700

摘 要：针对煤矿井下掘进工作面设备协同程度低、后配套系统联动响应滞后等问题，提出了一种基于五维数字孪生架构的掘进工作面数字孪生系统。系统融合物联网、虚拟现实与数字孪生技术，构建了掘进机、二运转载机、自移机尾及可伸缩带式输送机的精细化三维模型，建立了设备间时空关联与联动控制规则库。通过 PLC 参数矩阵映射与 MQTT 协议实现虚实数据同步，开发了基于状态机的设备联动控制引擎，实现了截割-转载-运输-延伸的协同作业。工业应用表明，系统联动响应延迟低于 500ms，截割轨迹偏差标准差降至 4.7cm，设备协同效率提升 15% 以上，为煤矿智能化掘进提供了技术支持。

关键词：数字孪生；掘进工作面；设备联动

引言：煤矿掘进工作面是煤炭开采的首要环节，其智能化水平直接影响矿井生产接续与安全高效开采。当前，我国煤矿掘进作业普遍面临地质条件复杂、设备智能化程度低、多机协同困难等挑战，特别是掘进机与后配套设备之间缺乏有效的联动控制机制，导致效率低下、劳动强度大、安全隐患突出。数字孪生技术为掘进工作面智能化升级提供了新路径。国内外学者在煤矿数字孪生领域开展了大量研究，但多集中于综采工作面，针对掘进工作面后配套设备联动控制的研究仍显不足。本文针对多设备协同作业需求，构建涵盖掘进机及后配套设备的数字孪生系统，重点研究设备间联动控制机制与虚实同步技术，为煤矿智能化快速掘进提供参考。

1 掘进工作面数字孪生系统架构

1.1 五维架构设计

服务层 (Service System)				
远程监控	故障预测	工艺优化	虚拟培训	决策支持
虚拟模型层 (Virtual Model)				
几何模型	物理模型	行为模型	规则模型	纹理映射
数据层 (Digital Twin Data)				
实时数据	历史数据	机理数据	专家知识	仿真数据
连接层 (Connection)				
OPC UA	MQTT	工业以太网	5G 专网	数据总线
物理实体层 (Physical Entity)				
掘进机	二运皮带	自移机尾	主皮带机	辅助设备

图 1 掘进工作面数字孪生系统五维架构图

借鉴数字孪生五维模型理论（如上图 1 所示），结合

掘进工作面实际工况，构建包含物理实体层、虚拟模型层、孪生数据层、连接交互层、功能服务层的五维系统架构。物理实体层包括悬臂式掘进机、二运转载机（跨骑式或履带式）、迈步式自移机尾、可伸缩带式输送机及辅助作业设备。通过部署惯性导航系统、激光测距传感器、油缸位移传感器、煤流负荷监测装置等，实现设备位姿、工况参数、环境信息的全面感知。

虚拟模型层构建涵盖几何、物理、行为、规则的四维模型体系。几何模型基于 CAD 图纸与激光点云数据建立 1:1 精确模型，包含掘进机截割部 27 个部件级建模；物理模型模拟截割载荷、液压系统动态响应、煤流运动特性；行为模型定义设备状态转移逻辑；规则模型封装设备联动控制策略与安全约束。孪生数据层整合实时监测数据、历史运行数据、设备机理数据、专家知识数据与仿真预测数据，构建多源异构数据融合中心，支持设备健康状态评估与剩余寿命预测。连接交互层采用“PLC+MQTT+5G”的异构网络架构，通过 OPC UA 协议实现 PLC 与边缘计算节点通信，利用 MQTT 协议与 EMQX 消息中间件实现低延迟数据传输，借助 5G 专网保障井下大带宽、低时延通信需求。功能服务层提供远程监控、虚拟仿真、联动控制、故障预警、工艺优化五大核心服务，支持“地面远程操控 + 井下无人值守”的作业模式^[1]。

1.2 设备联动拓扑结构

掘进工作面设备遵循“截割主导、转载衔接、运输跟随、机尾自适应”的联动逻辑。系统采用主从控制架构（如下图 2 所示）：掘进机作为主控设备，根据截割

工况与推进位移触发联动指令；二运转载机实时响应掘进机煤流输出，监测跨装信号与负荷状态；自移机尾依据掘进机推进距离自动执行迈步前移程序；可伸缩带式输送机根据煤流负荷智能调速，并与自移机尾保持张力协同。设备间通过时空关联矩阵建立耦合关系，定义动作时序约束与状态依赖规则，确保多设备协同作业的时序正确性与空间一致性。

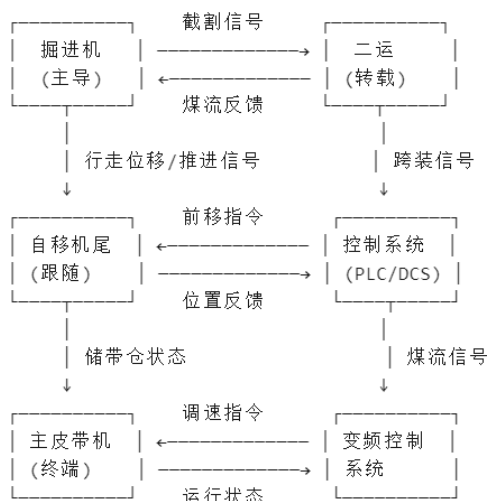


图2 掘进工作面设备联动拓扑结构图

2 掘进工作面关键设备数字孪生建模

2.1 掘进机精细化建模

掘进机数字模型采用层级化建模策略，划分为整机级、系统级、部件级、零件级四个层次。整机级模型定义设备全局位姿与运动学参数；系统级模型涵盖截割、行走、装载、运输、液压五大系统；部件级模型实现截割头、截割臂、回转台、行走履带等关键部件的精细化表达；零件级模型聚焦截齿、轴承、密封件等易损件的磨损状态监测^[2]。截割部模型集成截割轨迹规划算法，融合惯性导航与全站仪数据实现三维位姿精准感知，开发基于实时点云反馈的动态模板修正算法，实现每推进1m模板更新周期不超过0.5s。行走部模型模拟履带接地比压与滑转率，建立巷道底板附着系数与行走阻力的映射关系。

2.2 二运转载机建模

二运转载机作为掘进机与主运输系统的衔接设备，其数字孪生模型重点模拟跨装状态检测与煤流负荷监测。模型实时采集皮带秤数据与煤流开关信号，建立跨装煤量与皮带机调速的关联规则。当检测到跨装信号时自动触发主皮带机增速指令，当煤流中断时执行顺煤流延时停机程序，避免重载启动。

2.3 自移机尾动态建模

自移机尾是实现快速掘进的关键装备，其数字孪生模型精确模拟迈步式自移机构的运动学特性。模型定义四阶段动作循环：支撑缸抬升、推移缸推进、支撑缸下降、推移缸收回。通过油缸位移传感器实时反馈，实现虚拟模型与物理设备的动作同步。模型集成自动调向算法，监测机尾与皮带中心线的横向偏移量，当偏移超过设定阈值时触发液压调向系统执行纠偏动作。储带仓模型动态计算剩余皮带长度，与机尾前移距离进行匹配校验，确保皮带张力恒定。

2.4 可伸缩带式输送机建模

可伸缩带式输送机模型建立机架伸缩、皮带张紧、托辊组状态的关联模型。采用智能调速控制策略，根据煤流负荷实时调节电机频率，实现煤多快转、煤少慢转的节能运行。模型与自移机尾建立搭接关系约束，监测搭接长度与偏转角，预警搭接失效风险。

3 掘进工作面多设备联动控制机制

3.1 设备联动规则库构建

基于状态机理论建立设备联动控制引擎，定义设备状态集合、触发事件、转移条件与执行动作。联动规则库包含三级规则：安全级规则（急停联锁、故障保护）、工艺级规则（启停顺序、速度匹配）、优化级规则（能耗优化、寿命均衡）。截割-转载联动要求掘进机截割启动前二运皮带提前30s启动，截割停止后二运延时60s停机；推进-移尾联动规定掘进机累计推进7-10m时触发自移机尾自动前移，步距0.5-1.0m并与推进速度自适应匹配；煤流-调速联动设定煤流负荷增加20%时主皮带机频率提升5%，空载持续120s时顺煤流停机；故障-停机联动要求设备故障时逆煤流方向依次停机，急停触发时全线立即停止^[3]。

3.2 设备联动控制流程

设备联动控制遵循“状态感知-规则匹配-指令下发-执行反馈”的闭环流程。状态感知阶段，传感器实时采集截割电流、推进位移、煤流负荷、油缸位移、皮带转速等参数，经边缘节点预处理后上传孪生数据层。规则匹配阶段，控制引擎根据设备状态与历史数据匹配规则库触发条件，采用优先级机制确保安全级优先于工艺级、工艺级优先于优化级。指令下发阶段，控制引擎生成联动指令，通过MQTT协议下发至PLC控制器。执行反馈阶段，设备执行指令后将结果与状态变化实时反馈，形成闭环控制，执行失败时自动执行故障保护程序。

3.3 多机协同安全联锁机制

为确保多设备协同作业安全，建立三级安全联锁机制。一级联锁为设备级，单设备关键参数超限时执行本地保护动作，如截割电机过载时自动降速或停机。二级联锁为工序级，上下游设备建立联锁关系，二运停机时掘进机截割自动停止，皮带机停机时二运自动停止，形成逆煤流方向顺序联锁。三级联锁为系统级，全线设备建立紧急停机联锁，在关键位置设置急停按钮，任一急停触发时全线设备在 200ms 内完成紧急停机，虚拟模型同步显示故障位置。安全联锁与孪生模型实时联动，可提前模拟联锁触发响应，验证联锁逻辑正确性。

3.4 虚实同步映射技术

建立 PLC 参数矩阵与虚拟模型属性的双向映射表，实现物理设备与数字孪生体的实时同步。参数映射表涵盖位姿数据（坐标、姿态角、截割头位置）、状态数据（启停状态、工作模式、故障代码）、工况数据（电流、压力、温度、振动）、控制数据（速度给定、位移指令）。采用“变化触发+周期刷新”混合同步策略，关键参数采用变化触发实时推送，一般参数以 1-5Hz 周期刷新，有效降低通信负载。通过时间戳对齐与数据缓存技术解决网络延迟导致的时序错位，系统联动响应延迟控制在 380ms 以内。开发数据质量校验算法，采用滑动窗口滤波与卡尔曼滤波相结合，保障孪生模型驱动数据的可靠性。

3.5 联动控制性能优化策略

针对复杂工况下的联动控制需求，设计三大优化策略。预测性协同控制基于历史运行数据与掘进工艺规律建立设备状态预测模型，当掘进机推进接近移尾阈值时提前向自移机尾发送预备指令，有效缩短响应时间。自适应参数整定根据巷道地质条件与设备磨损状态动态调整联动规则参数，硬岩截割时延长二运延时停机时间，软岩截割时缩短延时，避免空载能耗^[4]。多目标优化协调在保证安全与工艺前提下，平衡掘进效率、设备寿命与能耗指标，通过遗传算法优化联动规则参数组合，实现系统整体性能最优。

4 系统实现与应用验证

4.1 系统开发环境

数字孪生系统采用 Unity3D 引擎开发三维可视化场景，利用 C# 脚本实现设备行为逻辑与联动控制算法。数据通信层部署 EMQX 消息中间件，支持 MQTT 协议接入。数据库采用 InfluxDB 时序数据库，存储高频监测数据；采用 MySQL 关系数据库，存储设备档案与维护记录。

4.2 工程应用效果

系统在山西焦煤集团西铭矿 1104 掘进工作面进行工业试验，界面展示图如图 3 所示，连续 30 天测试结果表明：截割轨迹偏差标准差由传统模式的 18.3cm 降至 4.7cm，断面成型合格率从 67.5% 提升至 92.8%；设备联动响应延迟平均 380ms，满足实时控制需求；掘进效率提高 10%-15%，作业人员与迎头距离超过 100m，实现了“远程集中控制+模型驱动”的无人化作业模式^[5]。



图 3 数字孪生系统界面展示图

结束语

本文针对煤矿井下掘进工作面多设备协同作业难题，构建了基于五维架构的数字孪生系统，实现了掘进机、二运转载机、自移尾及可伸缩带式输送机的精细化建模与联动控制。未来将进一步探索数字孪生体与物理设备的深度双向交互，推动掘进工艺自主优化与预测性维护技术发展。

参考文献

- [1] 苗丙, 葛世荣, 郭一楠, 等. 煤矿数字孪生智采工作面系统构建 [J]. 矿业科学学报, 2022, 7(2): 143-153.
- [2] 张旭辉, 吕欣媛, 王甜, 等. 数字孪生驱动的掘进机器人决策控制系统研究 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 36-49.
- [3] 王皓宇. 煤矿综采工作面两巷数字孪生系统的研发与应用 [J]. 智能矿山, 2025, 6(4): 60-65.
- [4] 张铁聪, 陈华州, 赵俊杰, 等. 基于数字孪生技术的煤矿掘进机自动截割方法研究 [J]. 中国煤炭, 2024, 50(1): 93-100.
- [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.