

# 数字孪生驱动的智能掘进设备 虚实交互控制方法

王 岩<sup>1,2,3</sup>, 寇浩楠<sup>1</sup>, 张旭辉<sup>1,2</sup>, 魏世睿<sup>1</sup>, 杨志伟<sup>1</sup>, 赵友军<sup>3</sup>

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省矿山机电装备智能检测与控制重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 西安煤矿机械有限公司, 陕西 西安 710032)

**摘要:** 针对当前煤矿智能快速掘进对设备智能控制的实时性与可靠性的双重需求, 提出了一种数字孪生驱动的智能掘进设备虚实交互控制方法, 该方法通过深度融合数字孪生模型的多维感知能力与物理控制系统的动态响应机制, 实现掘进物理实体与数字孪生体的智能协同控制. 首先, 建立由物理设备层、虚拟模型层、功能服务层、数据信息层和连接构成的智能掘进设备虚实交互控制框架, 实现跨域数据的完整交互链路; 进而提出由截割位姿感知智能体、成形质量评估智能体、控制效果优化智能体构成的多智能体协同决策模型, 通过多个智能体的协同工作机制实现跨域知识共享与优化决策; 基于智能掘进设备虚实交互控制状态的传递过程分析, 提出了融合物理端与虚拟端控制决策的设备虚实交互融合控制执行逻辑, 通过“状态对齐”、“演变预判”和“指令融合”等步骤, 降低虚实交互时延对融合控制决策的影响. 最后, 通过搭建系统试验平台对所提出的智能掘进设备虚实交互控制方法进行有效性验证.

**关键词:** 智能掘进; 数字孪生; 多智能体; 虚实交互; 融合控制逻辑

**中图分类号:** TD 421.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1964(2025)02-0330-13

## Virtual-physical interaction control method for intelligent cantilever roadheader driven by digital twin

WANG Yan<sup>1,2,3</sup>, KOU Haonan<sup>1</sup>, ZHANG Xuhui<sup>1,2</sup>, WEI Shirui<sup>1</sup>, YANG Zhiwei<sup>1</sup>, ZHAO Youjun<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Detection and Control, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 3. Xi'an Coal Mining Machinery Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China)

**Abstract:** In response to the dual requirements of real-time responsiveness and operational reliability for intelligent control in coal mine rapid tunneling systems, this paper proposed a digital twin-driven virtual-physical interaction control method that integrates the high-precision decision-making capability of virtual models with the rapid-response advantage of physical control mechanisms, establishing intelligent collaborative control between the tunneling physical entity and its digital twin counterpart. First, a hierarchical virtual-physical interactive control

**收稿日期:** 2024-11-29 **修回日期:** 2025-02-03 **DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumat.20240560

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52204176); 中国博士后科学基金面上项目(2023MD734221); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JQ-101)

**通信作者:** 张旭辉(1972—), 男, 陕西省宝鸡市人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事煤矿机电装备智能化、数字孪生驱动远程虚拟控制方面的研究.

**E-mail:** zhangxh@xuste.edu.cn **Tel:** 13363975328

**引用格式:** 王 岩, 寇浩楠, 张旭辉, 等. 数字孪生驱动的智能掘进设备虚实交互控制方法[J]. 中国矿业大学学报, 2025, 54(2): 330-342.

WANG Yan, KOU Haonan, ZHANG Xuhui, et al. Virtual-physical interaction control method for intelligent cantilever roadheader driven by digital twin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2025, 54(2): 330-342.

framework was constructed, consisting of physical equipment layer, virtual model layer, functional service layer, and data information layer, achieving complete cross-domain data interaction links. Subsequently, a multi-agent collaborative decision-making model was proposed, comprising cutting pose perception agent, shaping quality evaluation agent, and control optimization agent, which realized cross-domain knowledge sharing and optimized decisions through collaborative mechanisms. Based on the transmission process analysis of virtual-physical interactive control states, a fusion control execution logic integrating physical and virtual control decisions was developed. Through steps including "state alignment", "evolution prediction", and "command fusion", the impact of interactive time delay on control decision-making is effectively reduced. Finally, the effectiveness of the proposed method was validated through the construction of an experimental system platform.

**Key words:** intelligent tunneling; digital twin; virtual-physical interaction; multi-agent; fusion control logic

随着矿山物联网<sup>[1]</sup>、长距离高精度地质超前探测<sup>[2]</sup>、快速掘进机器人系统<sup>[3]</sup>等智能掘进技术的迅速发展,面向掘-支-锚-运并行作业的掘进成套装备技术不断突破,智能快速掘进成套装备研制进入了全新的发展阶段,并开展了大规模的试点应用<sup>[4]</sup>。智能掘进工作面管控系统通常采用巷道物理近程控制或地面虚拟远程控制模式。其中,巷道物理近程控制是在物理空间中通过多个工业实时控制系统实现设备间的协同控制,对决策实时性与突发状态应急处理能力要求较高;地面虚拟远程控制模式是在数字空间中面向巷道空间布置与全局走向精度等系统性的长周期控制决策模式,对掘进工作面内人员、设备、巷道及环境等全要素运行状态感知具有高度依赖性。由于掘进工作面传感数据采集、信号处理计算和网络通信延迟等原因导致的时延,数字空间与物理空间无法实现绝对的虚实信息决策同步,这些时延的累加可能会导致虚拟端的决策信息时效性降低,使得远程智能决策难以直接介入复杂地质条件下的掘进作业过程。

数字孪生体是连接数字空间与物理空间的重要媒介<sup>[5]</sup>,基于数字孪生体,研究掘进工作面数字空间与物理空间的交互模式对于解决物理近程控制与虚拟远程控制的有效融合具有重要的意义,为煤矿采掘装备的智能化发展提供了全新的视角和解决方案。国内外学者近年来积极将数字孪生技术应用到煤矿智能化领域,推动了采掘装备的远程智能控制与工作面智能管控的快速发展<sup>[6-7]</sup>。文献<sup>[8-10]</sup>明确了数字孪生智采工作面系统的概念、架构及构建方法,分析了智采工作面系统涉及的10项关键技术,构建了全域感知、边缘计算、数

据驱动和辅助决策的智慧矿山平台。文献<sup>[11-13]</sup>分析了智能化掘进数字孪生体成长经历的数字化、互动、先知、先觉和共智5个阶段,利用煤矿设备虚拟仿真与远程控制技术实现了人-虚拟模型-物理设备的交互协同控制,给出了数字孪生驱动掘进装备远程控制模型及技术体系。文献<sup>[14]</sup>提出了数字孪生理论指导下的综掘巷道并行施工技术流程与工艺体系。文献<sup>[15]</sup>提出了一种基于数字孪生技术的多元信息驱动智能化工作面三维可视化监控方法。文献<sup>[16]</sup>将ANSYS与Unity 3D软件进行了结合,以指导在虚拟环境下综采工作面支护监测与动态规划。针对掘进复杂系统难以建模与试验不足等问题,文献<sup>[17]</sup>提出了平行掘进系统的计算研究体系。文献<sup>[18]</sup>提出一种基于数字孪生技术的掘进工作面出风口风流智能调控系统,实现了物理实体与虚拟孪生体的映射交互。

煤矿巷道截割控制成形质量受到掘进机机身定位与截割头位姿测量的精度和稳定性<sup>[19]</sup>的影响,而掘进设备的工作巷道内路况复杂,地面凹凸不平,掘进机在截割过程中由于受动态载荷的影响,截割头会受到煤岩的反作用力产生截割振动<sup>[20]</sup>,导致掘进机机身偏移,截割头相对位置发生变化,造成掘进机的控制基准不断发生偏移,因此需要及时精准地获取掘进机状态并进行决策校准。同时,掘进机地面虚拟远程控制需要物理设备的实时数据来做出精准决策,数字空间的优势在于决策的精准性,但同时数据的实时性要求也会更高<sup>[21]</sup>。因此,在复杂地质条件下的掘进设备虚实交互控制工作过程中,如何有效克服数字空间的控制执行逻辑不同导致的虚实状态不同步,实现掘进工作面设备巷道物理近程控制与地面虚拟

远程控制的有效协同,是当前掘进工作面智能化控制面临的首要难题。

目前国内外学者针对虚实交互过程中物理空间与数字空间状态难以对齐的问题,提出了多种方法以减少其对虚实交互性能的影响。在提高通信速率方面,文献[11-13]将RS232、CAN、工业以太网等多种通信方式结合,构建了一个以数据库技术为核心的数据交互平台,确保了煤矿快速掘进智能机器人系统的数据传输与通信实时性。文献[22]对四足机器人的虚实交互特性进行了研究,分析了基于通信方案解决虚实交互控制的时延,为机器人的实时监测和控制优化提供了新的见解。在提升决策效率方面,文献[23]表明智采工作面虚实交互过程中存在的大量虚实数据交互延迟可能导致反向控制和错误决策,同时采用了基于知识引导的虚实空间信息主动管控机制来缓解时延的影响。文献[24]通过利用物理信息系统来保障信息交互能力,采用知识模型来解决数据拥堵问题,为智采工作面三机协同控制提供了数据交互保障。文献[25]通过建立网络选择算法模型提升了虚拟端工作性能,提高了车辆数字孪生的数据同步程度。在控制预测修正方面,文献[26]针对虚拟机器人与实际机器人工作状态不同步的问题,通过机器人的实时预测和状态在线修正,以保证虚拟仿真预测系统与机器人工作状态同步。文献[27]针对智能网联车虚实空间状态一致性的评估环境,将同步过程分解为跟踪周期和扩展周期,同时考虑到物理空间发送的状态和虚拟空间中的目标状态,提高了高延迟条件下的同步精度。文献[28]以形式化为重点,采用事件序列展示事件发展的动态同步机制,解决了物理和虚拟空间的数据实时连接和同步困难问题。

综上所述,国内外学者为融合虚实交互状态提供了有价值的参考。然而,这些方法大多集中在优化现有通信机制、提升数据处理和计算效率等方面,虽然在一定程度上缓解了时延问题,但并未解决数字空间与物理空间状态难以对齐的问题。因此,本文针对复杂地质条件下的掘进工作面设备虚实状态难以对齐的问题,搭建了数字孪生驱动的智能掘进设备虚实交互控制架构,在功能服务层构建了智能掘进设备虚实交互控制多智能体模型,研究了智能掘进设备虚实交互融合控制的执行逻辑,并面向悬臂式掘进机的巷道截割质量控制问题,设计了实验室环境下的数字孪生虚实交互融合控制方法应用实例,为解决掘进装备智

能化过程中的虚实交互融合控制难题提供了创新性的解决方案和技术思路。

## 1 数字孪生驱动的智能掘进设备虚实交互控制架构

智能掘进设备虚实交互控制的关键在于虚实状态同步程度和物理空间对数字空间决策的响应能力。在智能掘进设备虚实交互过程中,通过机械系统、液压系统、电气系统等物理执行设备完成巷道截割成形。同时,针对复杂地质条件下的“人-设备-环境”的动态耦合关系分析,在物理空间实现设备状态、巷道空间、环境信息的全要素感知。当物理设备处于异常工作状态时,基于数字空间的分析算法模型对设备当前工作运行状态进行实时监控与决策修正<sup>[29]</sup>,从而实现设备运行感知、状态判断预测和辅助决策控制<sup>[30]</sup>。本文以煤矿巷道掘进截割成形过程为应用场景,采用数字孪生技术搭建了面向智能掘进设备的虚实交互控制架构,主要由物理设备层、虚拟模型层、功能服务层、数据信息层和各部分间的连接组成<sup>[31]</sup>。智能掘进设备的虚实交互控制架构如图1所示。

图1中各个模块的作用为:

1)“物理设备层”是物理空间中掘进设备实体的集合,包括物理本体设备、电机控制部分、液压控制部分和物理传感部分的物理要素合集,可用来完成截割围岩耦合过程中的物理位姿感知、机身轨迹控制、回转抬升控制、截割转速控制。

2)“虚拟模型层”是数字空间中掘进数字孪生体模型,对应物理实体的传感数据驱动数字空间的数字孪生体模型,通过实时数据解算、运行状态解析、截割质量评价、截割行为预判和虚实状态对齐实现基于物理传感数据的设备空间姿态和截割轨迹实时动态描述。

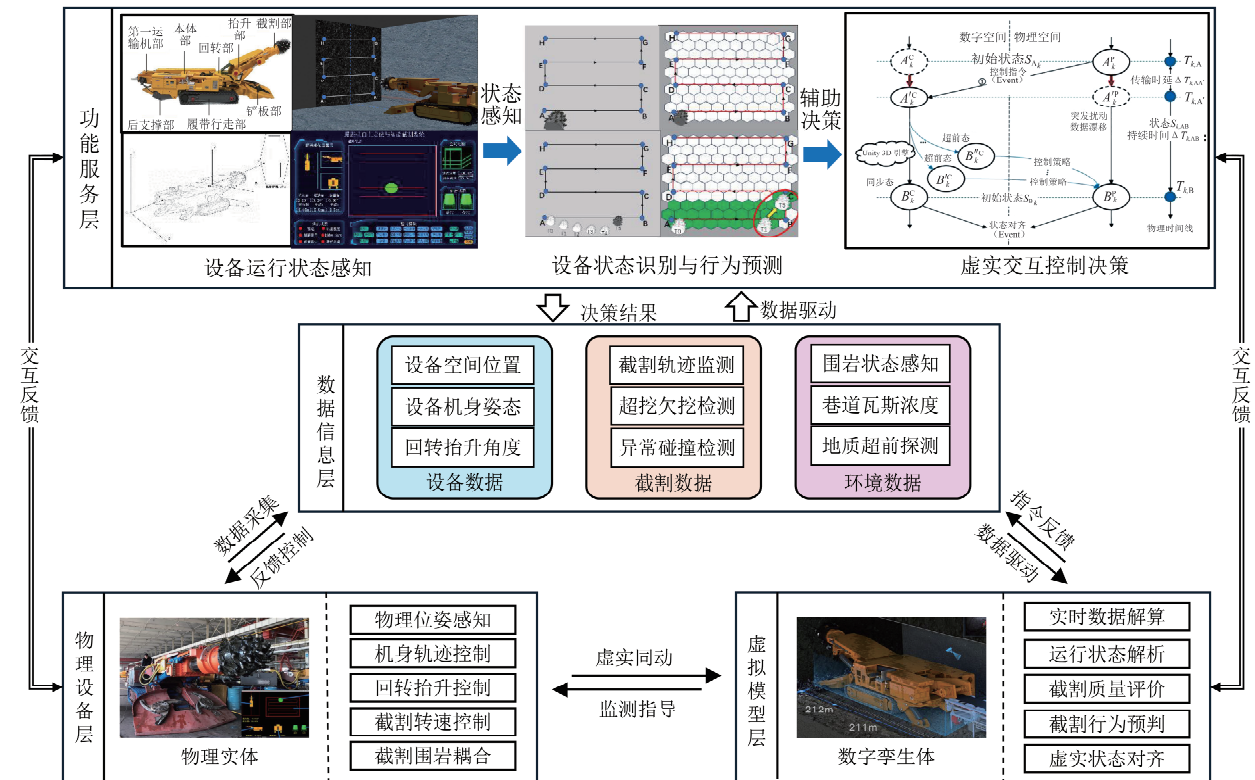
3)“功能服务层”是物理设备层与虚拟模型层交互反馈的具体实现,包括设备作业工艺分析、运行状态感知、异常状态判断、控制行为预测和虚拟远程辅助决策<sup>[32]</sup>等功能性服务。针对巷道截割成形质量控制,采用多智能体建模思路构建了设备运行状态感知、设备状态识别与行为预测和虚实交互控制决策等智能体模型。

4)“数据信息层”是物理空间的掘进设备作业过程中产生的数据集合,是驱动数字空间中的数字孪生体模型的关键,包括设备空间位置、机身姿态、回转抬升角度等设备数据;截割轨迹监测、超挖欠挖检测、异常碰撞检测等截割状态数据;围岩

状态感知、巷道瓦斯浓度、地质超前探测等环境数据。

5)“连接”实现了物理设备层、虚拟模型层、功能服务层和数据信息层之间的网络互联和数据互通,在数据信息层与物理设备层之间建立数据实时采集和反馈控制决策通道,在数据信息层和虚

拟模型层之间建立状态数据驱动和控制指令反馈传输通道,在数据信息层和功能服务层之间建立状态数据驱动和控制决策结果传输通道,在物理设备层、虚拟模型层、功能服务层三者之间建立交互反馈传输通道。各个功能模块的“连接”是智能掘进设备虚实交互控制的关键和瓶颈所在。



注： $A_k^P$  和  $B_k^P$  分别为设备  $k$  在物理空间的起始状态和目标状态； $A_k^C$  和  $B_k^C$  分别为设备  $k$  在数字空间的起始状态和目标状态； $T_{k,A}$  和  $T_{k,B}$  分别为起始状态和目标状态发生的时间戳信息； $S_{A_k} = \{A_k^P, A_k^C\}$ ,  $S_{B_k} = \{B_k^P, B_k^C\}$ 。

图 1 数字孪生驱动的智能掘进设备虚实交互控制架构  
Fig. 1 The architecture of virtual-real interactive control for cantilever roadheader

## 2 智能掘进设备虚实交互控制多智能体模型构建

针对巷道截割成形质量控制,采用多智能体建模方法设计智能掘进设备虚实交互控制功能服务模块,包括截割姿态感知智能体、截割成形质量评价智能体和虚实交互控制效果优化智能体。每个智能体分别负责掘进设备的运动状态感知、巷道截割质量评估和优化虚实交互控制效果。这些智能体通过信息交互实现协同工作,构成了智能掘进设备虚实交互控制的核心机制。图 2 给出了智能掘进设备虚实交互控制中的多智能体联合工作机制和运行状态数据处理过程,为后续虚实交互融合控制方法的实施奠定理论基础。在掘进设备虚实交互控制中,首先,通过截割姿态感知智能体实时监测掘进设备的工作状态,通过多源数据采

集模块实时获取掘进设备机身位姿信息,包括机身空间位置姿态数据  $\{x, y, z, \alpha, \beta, \gamma\}$ 、截割臂位姿数据  $\{\delta, \epsilon, D\}$ 、机身位移速度  $\{v_x, v_y, v_z\}$ 、机身位移加速度  $\{a_x, a_y, a_z\}$ 。经过初步数据滤波处理后,通过姿态解算得到截割头在巷道坐标系下的位置和姿态  $\{x_{30}, y_{30}, z_{30}, \alpha_{30}, \beta_{30}, \gamma_{30}\}$ ;其次,通过截割质量评价智能体实时评价截割轨迹质量。通过截割头轨迹规划坐标  $C_d(x_d, y_d, z_d)$  与实时坐标  $C_i(x_i, y_i, z_i)$  的计算对比,得到截割轨迹误差  $e_i$  和理论修正参数  $\{S_{x1}, S_{y1}, S_{z1}\}$ ;最后,虚实交互控制优化智能体根据时延,优化控制效果。通过掘进设备的机身位移加速度信息  $\{a_x, a_y, a_z\}$ ,确定偏移事件以及发生偏移事件的时间戳,根据偏移评估交互控制的时延  $\tau$ ,对控制参数扰动后的设备状态进行演变预测。同时,根据虚实交互控制策略的处理过程分析  $(Q_s(t) = G[i(t - \tau)] + d(\tau))$ ,具体

分析见式(5)),调整  $t$  时刻的控制决策输入  $i(t-\tau)$  为  $i(t)$ ,减少时延对虚实交互控制的影响  $d(\tau)$ ,得到更精准的截割臂姿态调整量  $Q_s(t)$ ,提高虚实交互控制过程  $G(i)$  的虚实同步性,由此得到优化修正参数  $\{S_{x2}, S_{y2}, S_{z2}\}$ . 根据预测的设备

状态和实际物理设备状态的虚实状态对齐结果,动态反馈调整优化修正参数,实现虚实决策融合.融合后的决策,通过 MQTT 协议传输至工业控制器,从而驱动液压系统完成截割头的位姿控制.

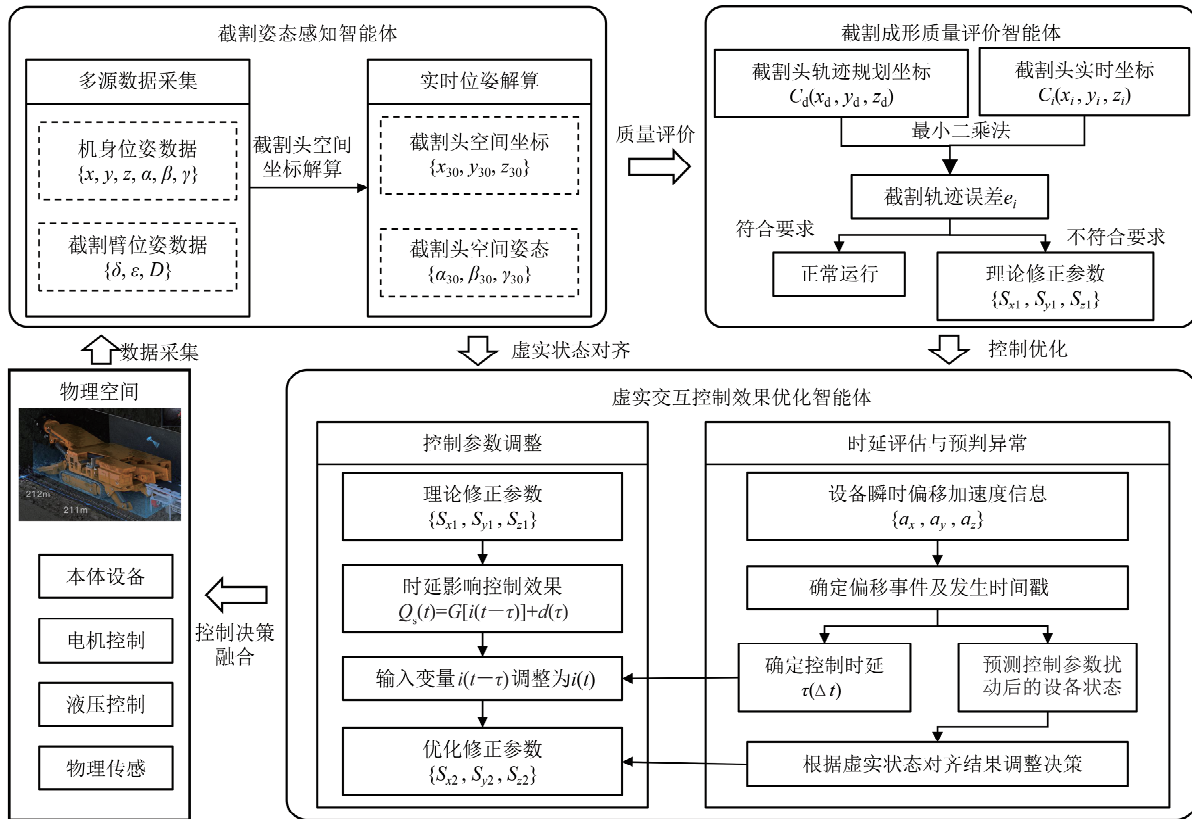


图 2 多智能体联合工作机制  
Fig. 2 Multi-agent collaborative working mechanism

### 2.1 智能掘进设备截割姿态感知智能体

截割姿态感知智能体通过机器人运动学关系分析建立截割头空间坐标与机身空间位姿及截割臂姿态的关系,将传感器获得的机身空间位姿数据和截割臂姿态数据解算为掘进机截割头的空间姿态坐标,并记录截割头坐标相应的时间戳信息.首先,在掘进数字空间中建立三维参考坐标系  $\{M_0\}$ . 其中,  $X$  轴方向为截割头伸长方向,  $Y$  轴方向为截割臂回转方向,  $Z$  轴方向为截割臂抬升方向,掘进机整机绕巷道坐标系  $X$  轴旋转的角度为掘进机翻滚角  $\alpha$ ,绕巷道坐标系  $Y$  轴旋转的角度为掘进机俯仰角  $\beta$ ,绕巷道坐标系  $Z$  轴旋转的角度为掘进机偏航角  $\gamma$ . 以掘进机截割臂回转中心为基准建立坐标系  $\{M_1\}$ ,以截割臂的 2 个旋转关节的中心为基准建立坐标系  $\{M_2\}$ ,以截割头中心为基准建立坐标系  $\{M_3\}$ ,所建立的坐标系符合右手定则,

如图 3 所示. 经过分析图中的坐标,解算截割头顶部中心位置相对于机身坐标的空间位置  $(X_0, Y_0, Z_0)$ ,如式(1)所示.

$$\begin{cases} X_0 = \cos \delta [L_1 + (L_2 + D) \cos \epsilon], \\ Y_0 = \sin \delta [L_1 + (L_2 + D) \cos \epsilon], \\ Z_0 = h_1 + (L_2 + D) \sin \epsilon + h_2 \cos \epsilon, \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $L_1, L_2, h_1, h_2$  为掘进机结构参数;  $\delta, \epsilon$  分别为截割臂的回转角度和抬升角度;  $D$  为截割头伸缩长度变化量,机身不发生偏移时截割头的位置坐标由  $\delta, \epsilon$  和  $D$  共同决定,当机身发生偏移,截割头的实时坐标  $C_i(x_i, y_i, z_i)$  则可通过欧拉角计算得出<sup>[33]</sup>. 综上,掘进机某时刻的机身位置与姿态可以用 6 个参数表示为  $\{x, y, z, \alpha, \beta, \gamma\}$ ,截割臂姿态可以用 3 个参数表示为  $\{\delta, \epsilon, D\}$ ,则掘进机在  $t$  时刻的整机机身位姿信息  $T_i$  可表示为  $T_i\{t, x, y, z, \alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, D\}$ .

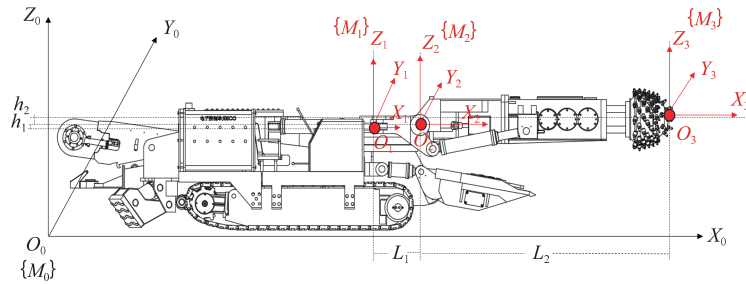


图3 掘进机机身坐标示意

Fig. 3 Coordinate systems of cantilever roadheader

## 2.2 智能掘进设备截割成形质量评价智能体

截割成形质量评价智能体通过计算巷道截割轨迹规划路径与实际截割路径的偏差评估巷道截割成形质量,进而给出截割头反馈控制决策,从而优化巷道截割轨迹控制精度。以掘进设备理论截割轨迹为参考,使用最小二乘法拟合测量数据,计算实际截割轨迹与设计轨迹之间的误差,从而评估截割成形质量:掘进机截割姿态感知智能体记录掘进机截割头中心的实际轨迹,在巷道截割路径上选择若干个测量点,记录每个点的三维坐标  $C_i(x_i, y_i, z_i)$ ,从巷道设计图纸中获取设计轨迹的坐标数据,记录与测量点对应的设计点的三维坐标  $C_d(x_d, y_d, z_d)$ ,确保实际点与设计点的数据

一一对应。基于对应关系,掘进机截割头中心点在每个方向上的每个点的误差为实际点与设计点之间的距离误差  $S$ ,同时指导掘进工作的实时修正,如式(2)所示。

$$\begin{cases} S_x = \sqrt{(x_i - x_d)^2}, \\ S_y = \sqrt{(y_i - y_d)^2}, \\ S_z = \sqrt{(z_i - z_d)^2}. \end{cases} \quad (2)$$

则第  $i$  点的误差  $e_i$  可表示为

$$e_i = \sqrt{(x_i - x_d)^2 + (y_i - y_d)^2 + (z_i - z_d)^2}. \quad (3)$$

设一条截割轨迹取  $n$  个点,则该条截割轨迹曲线的轨迹误差  $S_e$  为

$$S_e = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n [\sqrt{(x_i - x_d)^2 + (y_i - y_d)^2 + (z_i - z_d)^2}]^2. \quad (4)$$

因此,要提升截割工作的精准度,则需要使轨迹误差  $S_e$  变小。基于上述的截割质量评价方法,添加截割质量检测机制。在规划的截割头坐标中,考虑到正常的截割振动,截割头的空间工作轨迹存在少许重叠。以正常截割振动下的规划截割头工作区域重叠部分为最大标准  $S_{max}$ ,该值由设备数据和设备的动态特性确定。若截割头的误差超过  $S_{max}$ ,则判定为截割质量异常。通过质量扰动检测机制,判断是否需要在数字空间中进行决策修正,由于本文的篇幅有限,不讨论具体的规划轨迹细节,具体的决策修正思路在多智能体联合工作机制部分展现。

## 2.3 智能掘进设备控制效果优化智能体

控制效果优化智能体通过评估系统虚实交互控制的滞后性对控制决策的影响,优化截割臂姿

态的调整量。当掘进设备物理端的运行出现异常状态时,虚拟端根据接收到的信息,通过虚拟端智能体辅助决策控制,调整设备物理端的控制状态。在虚实交互控制系统中描述  $t$  时刻的虚实交互控制策略的处理过程,如式(5)所示。

$$Q_s(t) = G[i(t - \tau)] + d(\tau), \quad (5)$$

式中:输出变量  $Q_s(t)$  为截割臂姿态的调整量,包括回转角度调整量  $\Delta\delta$ 、抬升角度调整量  $\Delta\epsilon$  和截割头伸长调整量  $\Delta D$ ,虚实交互控制的目标是根据输入变量的变化调整这些参数,影响掘进设备的实际工作; $\tau$  为系统交互总时延,包括传感器感知时延、通信时延、虚拟端决策时延和物理端响应时延;输入变量  $i(t - \tau)$  为  $\tau$  时延前的掘进设备状态,具体为掘进机的位置与位姿信息,如式(6)所示。

$$T_i[t - \tau, x_{t-\tau}, y_{t-\tau}, z_{t-\tau}, \alpha_{t-\tau}, \beta_{t-\tau}, \gamma_{t-\tau}, \delta_{t-\tau}, \epsilon_{t-\tau}, D_{t-\tau}]. \quad (6)$$

这些变量反映了虚拟端根据过去的设备状态来决策的过程。 $G[i(t - \tau)]$  为系统函数,具体描述为掘进设备的物理设备层与虚拟模型层的虚实交互控制过程; $d(\tau)$  为时延导致的控制决策误差,反映时延对控制效果的影响程度,具体可以表示为

$$d(\tau) = k \cdot \tau \cdot |di/dt|, \quad (7)$$

式中: $k$  为误差系数,是一个与系统特性相关的常数; $|di/dt|$  为状态变化率,表示输入量  $i$  随时间  $t$  的变化速度。当系统状态变化变快( $|di/dt|$  增大)时,误差增大;当总时延  $\tau$  增大时,误差增大;当系

统稳定( $|di/dt|$ 接近0)时,误差较小。

煤矿井下智能掘进设备虚实交互控制是一个复杂的多系统协同过程,由于井下环境复杂多变,系统需要快速响应地质变化对设备控制的影响,这对控制决策的实时性要求极高,式(5)表明时延 $\tau$ 会导致决策信息滞后、控制精度降低,直接影响掘进安全和作业效率,因此需要进一步深入分析和优化虚实交互控制系统的时延问题。在实际工作过程中控制效果优化智能体通过实时的“虚实状态对齐”、偏移事件的“状态演变”分析和动态调整的“虚实决策融合”等机制对截割质量评价智能体的理论修正参数进行调整,以实现优化控制效果的目的。

### 3 智能掘进设备虚实交互融合控制执行逻辑

#### 3.1 智能掘进设备虚实交互控制状态传递过程分析

对智能掘进设备物理端的状态信息到达虚拟端的传递过程进行分析,如图4所示。设备从 $t_0$ 时刻开始运行, $t_1$ 时刻设备出现突发状况,随后 $t_2$ 时刻状况信息到达虚拟端,虚拟端在 $t_3$ 时刻完成决

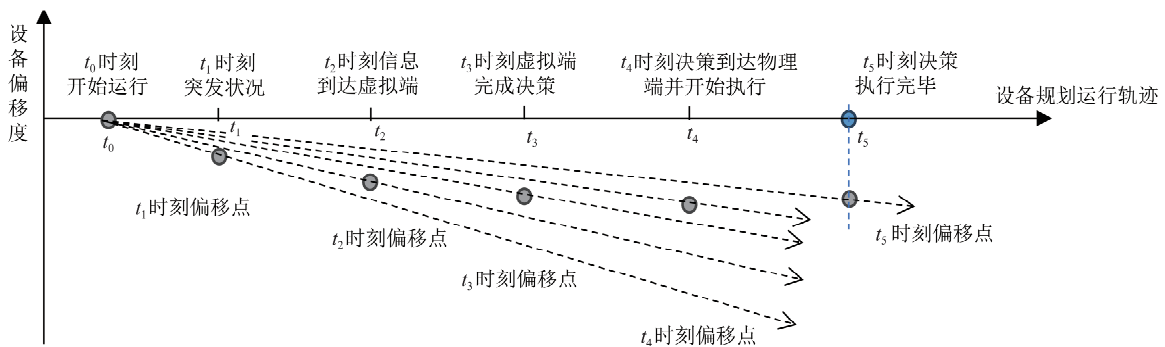


图4 智能掘进设备虚实交互控制过程中的运行状态传递

Fig. 4 Transmission of operational states in virtual-real interaction control for cantilever roadheader

#### 3.2 基于多智能体联合工作的设备虚实交互融合控制执行逻辑

针对一系列固有时延导致虚拟端的决策可靠性下降甚至无法使用的问题,基于多智能体联合工作机制,提出了融合物理端和虚拟端控制决策的设备虚实交互融合控制执行逻辑,通过“虚实状态对齐”、“时延评估状态预测”和“虚实决策融合”等步骤,降低虚实交互控制过程的固有时延对最终决策精准性和时效性的影响。图5给出了虚实交互融合控制的执行逻辑,其具体实施步骤如下:

步骤1:设备正常运行。工作启动后,物理控制逻辑开始执行,PLC进行周期性状态扫描,并根据

策, $t_4$ 时刻虚拟端生成的决策到达物理端并开始执行。然而,此时虚拟端生成的决策是针对 $t_1$ 时刻的信息,而在 $t_1 \sim t_4$ 区间内且未收到决策之前,物理端并没有停止持续偏移,这可能导致实际掘进工作的截割修正不精准和超挖欠挖情况的出现。在设备虚实交互控制过程中必须考虑数字孪生体与物理实体因控制逻辑不同导致的固有时延,才能发挥物理控制决策的实时性和虚拟控制的精准性优势,使设备在 $t_5$ 时刻虚拟决策执行完毕后达到预期轨迹。掘进设备运行状态信息到达虚拟端的过程中,掘进设备的物理状态(如空间位置、油缸伸缩长度、机械部件角度等)与异常发生时的状态有所不同,假设掘进设备初始的位置姿态信息为 $T_1[t_1, x_1, y_1, z_1, \alpha_1, \beta_1, \gamma_1, D_1]$ ,在虚实交互控制过程中,虚拟端接收到物理端的数据后,经过决策将决策信息传送到掘进机物理设备端,此时由于固有时延 $\Delta t$ 的影响,设备的状态信息由 $T_1$ 变为 $\Delta t$ 后的 $T_4[t_4, x_4, y_4, z_4, \alpha_4, \beta_4, \gamma_4, D_4]$ 。这可能会导致虚拟端决策的可靠性下降,甚至无法使用。因此,要实现精准的决策控制,就必须进一步研究虚实控制逻辑不同影响下的虚实交互控制方法。

预设的控制目标进行判断,若设备达到目标状态,则正常运行。

步骤2:判断异常与异常信息生成。当设备未达到目标状态时,判断控制状态是否异常。当状态异常时触发虚拟控制逻辑,记录物理端 $t_1$ 时刻的瞬时偏移度信息,同时确保物理端与虚拟端在 $t_1$ 时刻的状态信息同步对齐。

步骤3:时延评估。根据异常状态的偏移度信息,评估异常状态产生的 $t_1$ 时刻与物理端接收到虚拟端的决策时的 $t_4$ 时刻之间的时间差 $\Delta t$ 。

步骤4:由时延预判异常并决策。虚拟端智能体根据时延内物理端状态变化的幅度预测 $t_4$ 时刻

物理端的异常状态,并基于此预测异常状态进行决策.

步骤 5:虚实决策融合. 通过多次对比不同时刻下的物理端实际状态和虚拟端预判信息的符合程度,实时调整决策修正度.

步骤 6:决策生成与回归. 若未生成有效决策,则根据实时信息重新评估并调整执行逻辑. 判断融合后的控制决策是否使设备状态回归正常,若回归正常,则继续执行物理端控制逻辑;若未回归,则重新评估并调整决策.

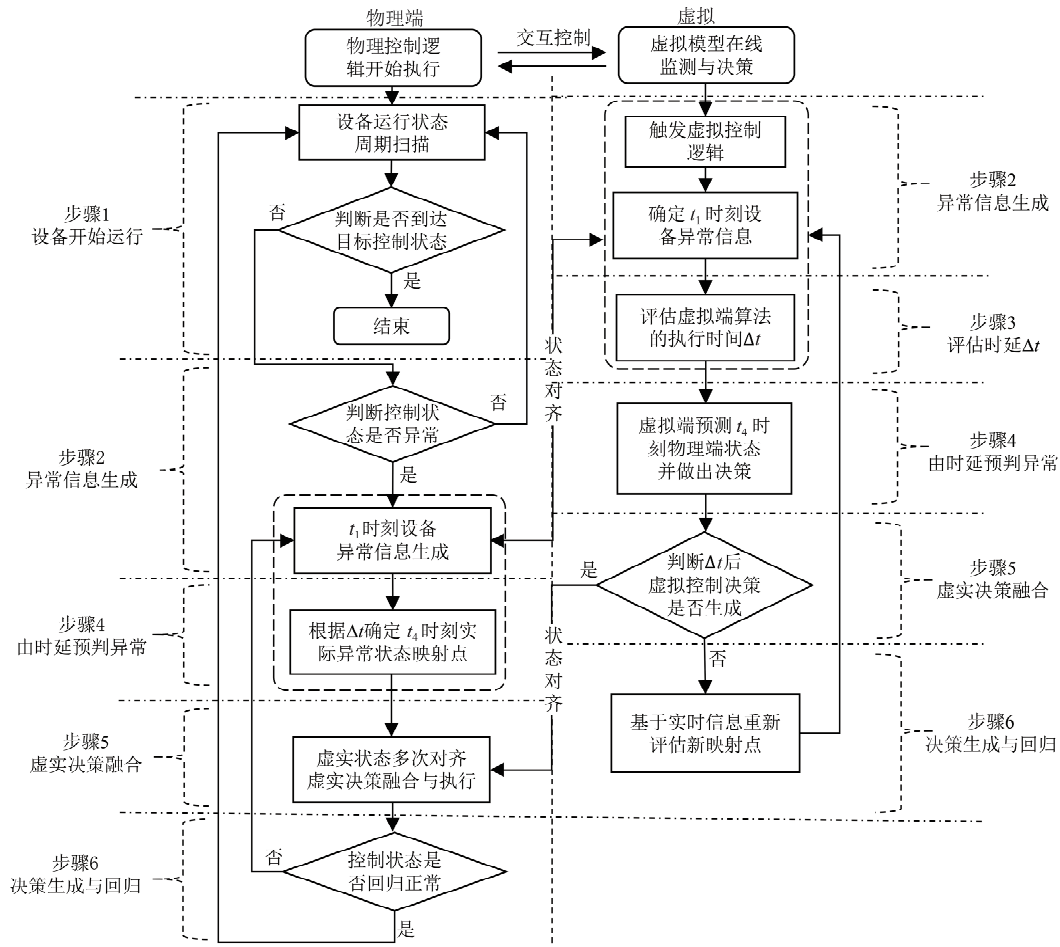


图 5 考虑时延特性的设备虚实交互融合控制执行逻辑

Fig. 5 Implementation logic of virtual-real interactive fusion control considering time-delay

## 4 面向巷道截割质量的设备虚实交互融合控制方法验证

### 4.1 设备虚实交互融合控制试验平台搭建

为了验证提出的智能掘进设备虚实交互融合控制方法,构建数字孪生掘进机系统试验平台,平台由物理试验平台和虚拟孪生平台组成,掘进机物理试验平台与数据采集处理过程如图 6 所示. 试验平台搭载的传感器主要有 BLG-250 型激光位移测距传感器、E6B2-CWZ5B 型旋转编码器、N100 型惯导等传感器,使用 Influx DB 数据库存储传感器信息,通过 MQTT 协议订阅主题接收数据. 采用 MCC118 采集卡实现物理试验平台实时状态数据的采集,物理平台通过工业控制器、电机、液压油缸等部件控制回转抬升油缸的伸缩,实现截割

臂空间姿态的控制. 表 1 给出了基于姿态感知智能体的掘进物理试验平台参数,其中  $L_1, L_2, h_1$  和  $h_2$  分别为掘进机机身坐标示意图(图 3)中的参数.

图 7 给出了数字孪生平台掘进设备与巷道围岩环境的构建可视化展示. 首先,根据真实煤层数据与 EBZ200 型掘进机尺寸信息,在三维建模软件中对掘进巷道以及悬臂式掘进机进行参数化设计、建模及装配. 其次,将模型的关键部件进行父子关系绑定,并根据真实煤岩与设备的色彩对模型进行贴图渲染. 最后,将处理好的模型导入虚拟孪生可视化界面中,通过掘进机关键部件的空间运动关系解算,在 Web 页面中展示掘进巷道与设备的关联关系.

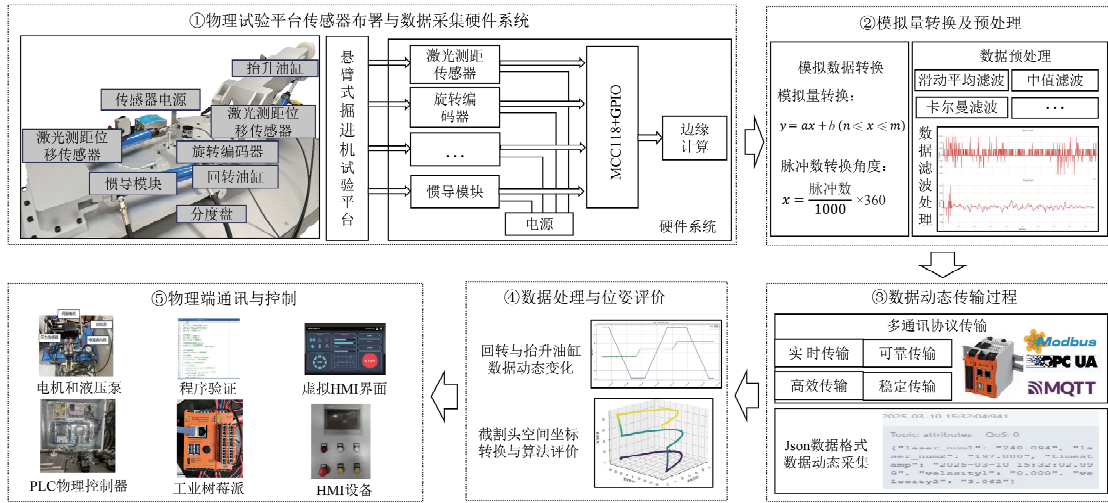


图 6 物理试验平台与数据采集处理过程

Fig. 6 Physical experimental platform and data acquisition and processing procedure

例如,针对悬臂式掘进机回转和抬升运动,通过控制回转角和抬升角的变化,计算回转台与截割臂的角度变化值,再利用 Three.js 对算法进行编程,实现掘进机的回转和抬升运动。最后,通过 Vue 端对掘进机的参数化控制进行展示,至此完成掘进工作面虚拟孪生平台的搭建。

在模拟截割过程中,虚拟孪生平台通过实时数据的处理和传输,对物理端的截割过程实现实时的感知、决策和控制优化,虚拟样机与物理样机

在不同截割位置同步动作如图 8 所示。

表 1 掘进机物理平台结构参数

Table 1 Structure parameters of the excavation machine physical experimental platform

| 结构参数   | 数值/mm | 结构参数  | 数值/mm |
|--------|-------|-------|-------|
| 机身长度   | 820   | $L_1$ | 130   |
| 机身宽度   | 400   | $L_2$ | 710   |
| 回转油缸行程 | 175   | $h_1$ | 73    |
| 抬升油缸行程 | 75    | $h_2$ | 23    |

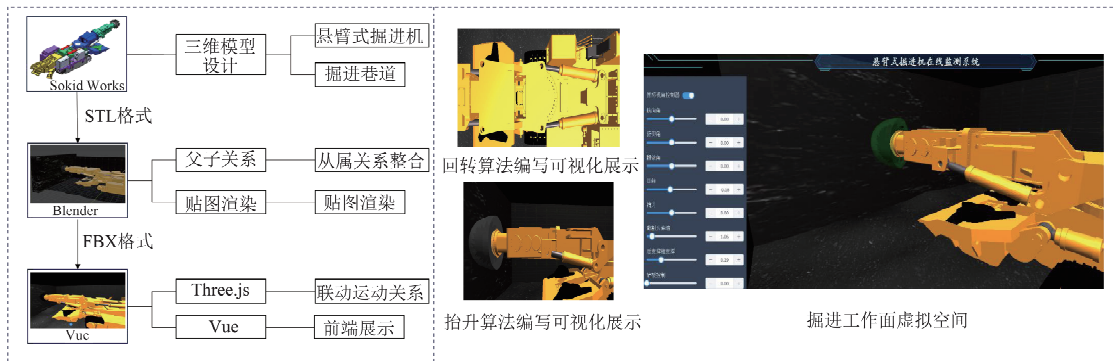


图 7 虚拟孪生平台搭建与控制效果实现

Fig. 7 Construction of virtual twin platform and realization of control effects

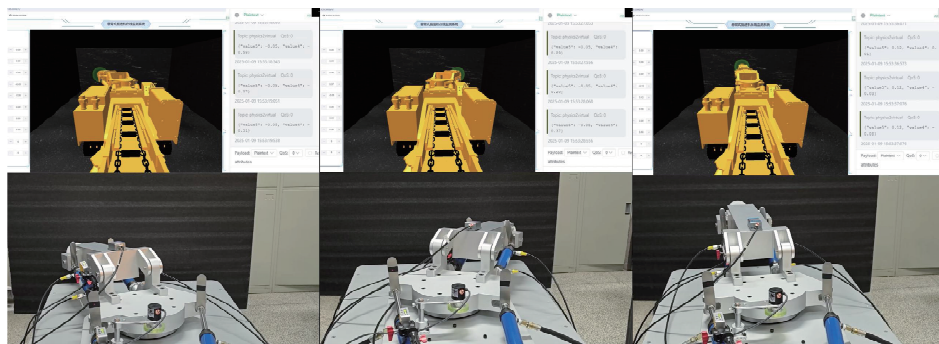


图 8 虚拟样机与物理样机在线同步动作展示

Fig. 8 Synchronous action display of virtual prototype and physical prototype

### 4.2 考虑时延特性的数字孪生虚实交互融合控制方法验证

试验过程如图 9 所示,具体为:物理掘进设备开机准备,其按照预定的截割路径运行,通过激光传感器、角编码器和惯导组成的物理感知模块实时获取设备姿态信息,实现截割状态监测;截割头移动至目标点,开始“S”形截割面的巷道截割工

作;当设备状态出现异常时,以设备发生突变的时间戳为设备状态对齐点,识别问题进行决策与响应的时延估算;根据发生突变前后时间戳的设备偏移量为偏移度预测物理端的状态并做出决策;在  $t_4$  时刻物理端的设备信息和虚拟端的预判信息进行二次对齐,根据二次对齐的结果进行虚实决策融合与执行。

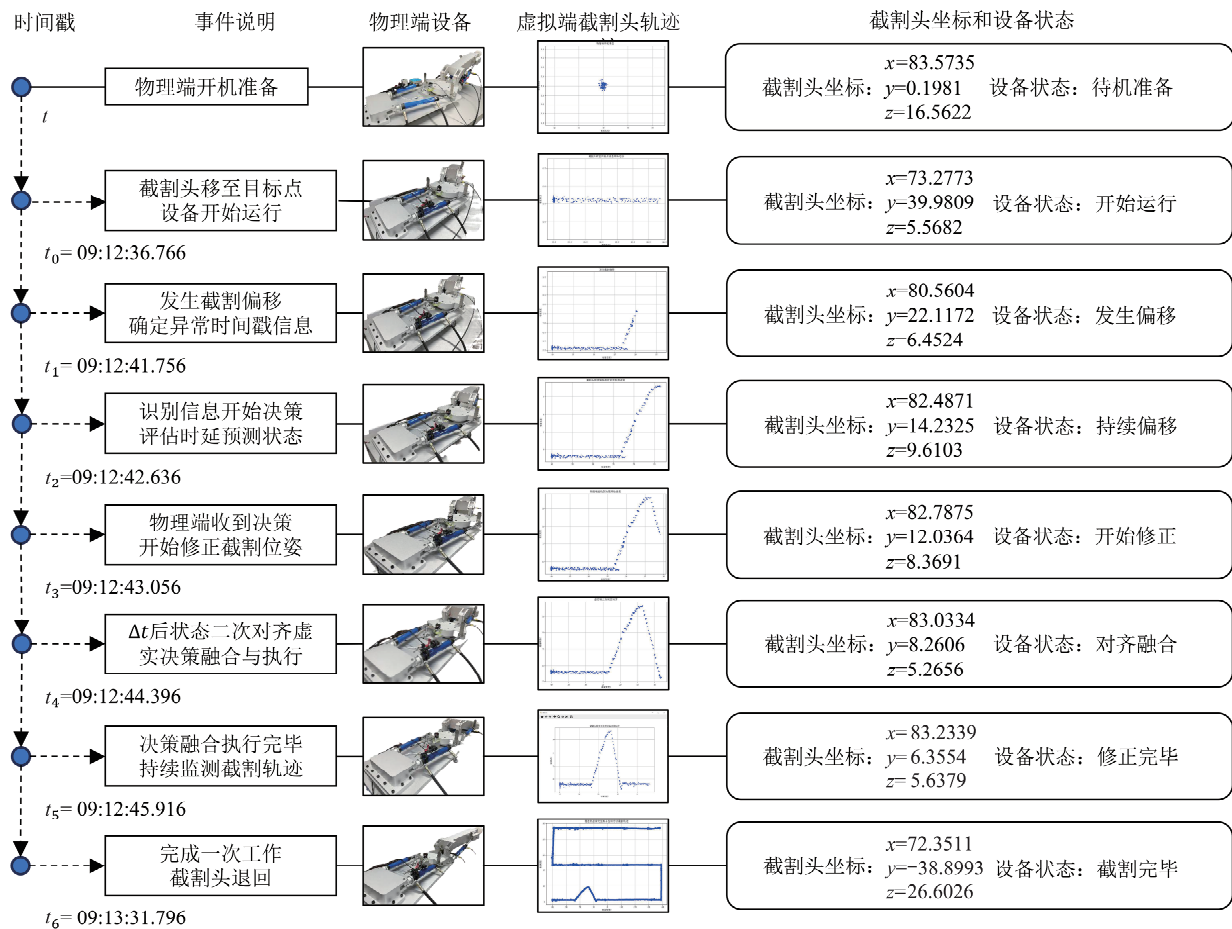


图 9 虚实交互融合控制方法的执行演化

Fig. 9 Implementation evolution of virtual-real interactive fusion control method

试验对比了相同工况条件下虚实交互控制方法与传统反馈控制方法在完成一次断面成形过程中的不同表现. 设置采样频率为 50 Hz,“截割俯仰偏移”试验采集了虚实交互融合控制方法的 3 768 个数据与传统反馈控制方法的 3 834 个数据;“截割水平偏移”试验采集了虚实交互融合控制方法的 3 612 个数据与传统反馈控制方法的 3 783 个数据,数据经过滑动平均滤波处理,具体截割轨迹生成表现如图 10 所示.

试验结果表明,传统反馈控制方法在截割发生偏移时,由于虚实交互控制存在时延问题,修正决策未考虑到物理端的持续偏移,导致决策效果不精准,需要等待下一轮决策进行调整,同时在水

平偏移的试验修正中还可能导致二次“超挖”现象的发生,产生安全问题;相比之下,虚实交互融合控制方法则通过“状态对齐”和“演变预判”机制,能够在偏移发生时准确地进行策略修正,提升了截割轨迹的精准度. 此外,通过“指令融合”,最后的轨迹修正也变得更加及时. 根据 2 组试验结果可知,传统控制方法的截割轨迹拟合度为 87.69%,虚实交互融合控制方法的截割轨迹拟合度提升至 93.35%,相对于常规方法,截割轨迹的拟合度提高了 6.45%. 这表明,虚实交互融合控制方法在提高截割精度和实时修正方面具有较为明显的优势.

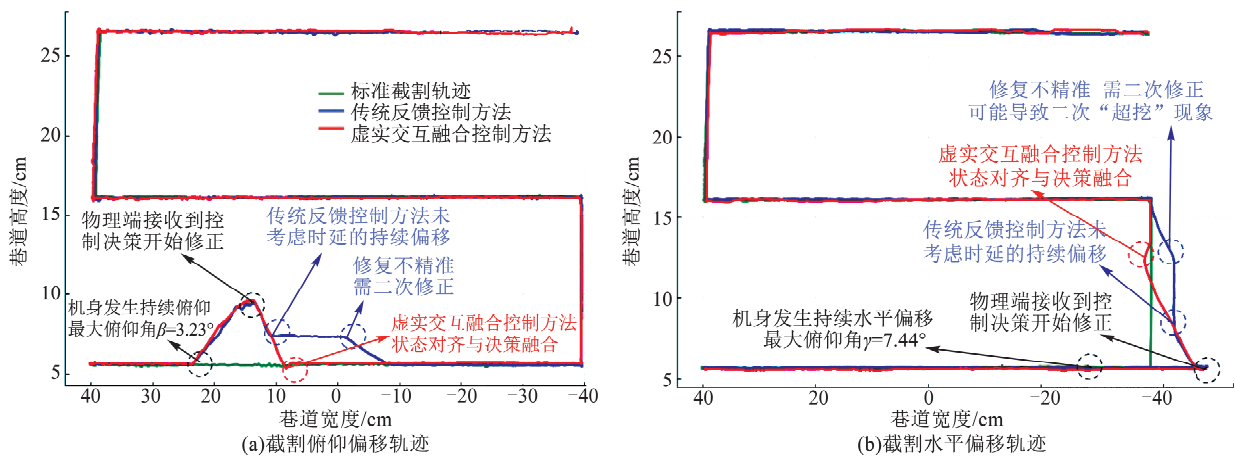


图10 截割偏移轨迹对比

Fig. 10 Comparison of cutting offset trajectories

## 5 结论

1) 提出了数字孪生驱动的智能掘进设备虚实交互控制架构,明确了物理设备层、虚拟模型层、功能服务层和数据信息层之间的连接关系,为智能掘进设备的协同控制提供了理论框架。

2) 构建了基于多智能体的智能掘进设备虚实交互控制模型,包括截割姿态感知智能体、截割成形质量评价智能体和虚实交互控制效果优化智能体,通过信息共享与联合工作,实现了控制决策的优化。

3) 提出了融合物理端和虚拟端控制决策的设备虚实交互融合控制执行逻辑,通过“状态对齐”、“演变预判”和“指令融合”等步骤,降低了虚实交互时延对融合控制决策的影响。

未来研究将进一步优化多智能体协同工作机制,提高信息共享效率和决策速度,以应对更复杂的掘进工况。探索深度学习等人工智能算法在虚实交互控制中的应用,提升控制系统的自适应能力和学习能力。

### 参考文献:

- [1] 袁亮,俞啸,丁恩杰,等. 矿山物联网人-机-环状态感知关键技术研究[J]. 通信学报, 2020, 41(2): 1-12.  
YUAN Liang, YU Xiao, DING Enjie, et al. Research on key technologies of human-machine-environment states perception in mine internet of things [J]. Journal on Communications, 2020, 41(2): 1-12.
- [2] 程建远,陆自清,蒋必辞,等. 煤矿巷道快速掘进的“长掘长探”技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 404-412.  
CHENG Jianyuan, LU Ziqing, JIANG Bici, et al. A

novel technology of “long excavation/long detection” for rapid excavation in coal mine roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 404-412.

- [3] 马宏伟,王世斌,毛清华,等. 煤矿巷道智能掘进关键共性技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 310-320.  
MA Hongwei, WANG Shibin, MAO Qinghua, et al. Key common technology of intelligent heading in coal mine roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 310-320.
- [4] 杨仁树,康一强,杨立云,等. 千米竖井硬岩全断面掘进机装备关键技术研用及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1162-1172.  
YANG Renshu, KANG Yiqiang, YANG Liyun, et al. Research and application of key technologies for full-face boring machine equipment for kilometer-level shafts with hard rock and its prospects [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1162-1172.
- [5] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.  
TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Exploration of digital twin and its application [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [6] 王国法,刘峰,孟祥军,等. 煤矿智能化(初级阶段)研究与实践[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 1-36.  
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Research and practice of intelligent coal mine (primary stage) [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 1-36.
- [7] 黄炳香,韩晓克,赵兴龙,等. 采动岩层多相多场耦合运动数字孪生方法构想[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(6): 1037-1052.  
HUANG Bingxiang, HAN Xiaoke, ZHAO Xinglong, et al. Research framework of digital twin construction

- method for mining induced strata movement under multiphase and multifield coupling [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2024, 53(6):1037-1052.
- [8] 葛世荣,张帆,王世博,等.数字孪生智采工作面技术架构研究[J].煤炭学报,2020,45(6):1925-1936.  
GE Shirong, ZHANG Fan, WANG Shibao, et al. Digital twin for smart coal mining workface: Technological frame and construction [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6):1925-1936.
- [9] 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.  
MIAO Bing, GE Shirong, GUO Yinan, et al. Construction of digital twin system for intelligent mining in coal mines [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(2):143-153.
- [10] 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.
- [11] 张超,张旭辉,毛清华,等.煤矿智能掘进机器人数字孪生系统研究及应用[J].西安科技大学学报,2020,40(5):813-822.  
ZHANG Chao, ZHANG Xuhui, MAO Qinghua, et al. Research and application of digital twin system for intelligent tunneling equipment in coal mine [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(5):813-822.
- [12] 张超,张旭辉,张楷鑫,等.数字孪生驱动掘进机远程自动截割控制技术[J].工矿自动化,2020,46(9):15-20.  
ZHANG Chao, ZHANG Xuhui, ZHANG Kaixin, et al. Digital twin driven remote automatic cutting control technology of roadheader [J]. Journal of Mine Automation, 2020, 46(9):15-20.
- [13] 张旭辉,杨文娟,薛旭升,等.煤矿远程智能掘进面临的挑战与研究进展[J].煤炭学报,2022,47(1):579-597.  
ZHANG Xuhui, YANG Wenjuan, XUE Xusheng, et al. Challenges and developing of the intelligent remote control on roadheaders in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1):579-597.
- [14] 吴淼,李瑞,王鹏江,等.基于数字孪生的综掘巷道并行工艺技术初步研究[J].煤炭学报,2020,45(增1):506-513.  
WU Miao, LI Rui, WANG Pengjiang, et al. Preliminary study on the parallel technology of fully mechanized roadway based on digital twin [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(Sup 1):506-513.
- [15] 迟焕磊,袁智,曹琰,等.基于数字孪生的智能化工作面三维监测技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(10):153-161.  
CHI Huanlei, YUAN Zhi, CAO Yan, et al. Study on digital twin-based smart fully-mechanized coal mining workface monitoring technology [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(10):153-161.
- [16] 洪飞.基于数字孪生和数据驱动的新型煤矿智能支护监控系统设计[J].煤矿现代化,2021,30(5):116-118.  
HONG Fei. Design of novel coal mine intelligent support monitoring system based on digital twin and data driven [J]. Coal Mine Modernization, 2021, 30(5):116-118.
- [17] 杨健健,葛世荣,王飞跃,等.平行掘进:基于ACP理论的掘-支-锚智能控制理论与关键技术[J].煤炭学报,2021,46(7):2100-2111.  
YANG Jianjian, GE Shirong, WANG Feiyue, et al. Parallel tunneling: Intelligent control and key technologies for tunneling, supporting and anchoring based on ACP theory [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(7):2100-2111.
- [18] 龚晓燕,雷可凡,吴群英,等.数字孪生驱动的掘进工作面出风口风流智能调控系统[J].煤炭学报,2021,46(4):1331-1340.  
GONG Xiaoyan, LEI Kefan, WU Qunying, et al. Digital twin driven airflow intelligent control system for the air outlet of heading face [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(4):1331-1340.
- [19] 杨文娟,张旭辉,张超,等.悬臂式掘进机器人巷道成形智能截割控制系统研究[J].工矿自动化,2019,45(9):40-46.  
YANG Wenjuan, ZHANG Xuhui, ZHANG Chao, et al. Research on intelligent cutting control system of roadway forming for cantilever driving robot [J]. Journal of Mine Automation, 2019, 45(9):40-46.
- [20] 谢苗,王贺,刘杰,等.基于振动模型的掘进机截割系统稳定性预测[J].振动、测试与诊断,2023,43(3):563-571.  
XIE Miao, WANG He, LIU Jie, et al. Stability prediction of road header cutting system based on vibration model [J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2023, 43(3):563-571.
- [21] 陶飞,马昕,戚庆林,等.数字孪生连接交互理论与关键技术[J].计算机集成制造系统,2023,29(1):1-10.  
TAO Fei, MA Xin, QI Qinglin, et al. Digital twin

- connection and interaction theory and key technologies [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(1): 1-10.
- [22] DOU Y H, WANG H J, WU B, et al. Research on the virtual-real interaction system and interaction characteristics of a single-leg of quadruped robots based on digital twin[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2024, 21(5): 2215-2231.
- [23] 郭一楠, 杨帆, 葛世荣, 等. 知识驱动的智采数字孪生主动管控模式[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(增1): 334-344.
- GUO Yinan, YANG Fan, GE Shirong, et al. Novel knowledge-driven active management and control scheme of smart coal mining face with digital twin [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48 (Sup 1): 334-344.
- [24] 尤秀松, 葛世荣, 郭一楠, 等. 智采工作面三机数字孪生驱动控制架构[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(7): 3265-3275.
- YOU Xiusong, GE Shirong, GUO Yinan, et al. Smart mining face three machine digital twin drive control architecture [J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(7): 3265-3275.
- [25] ZHENG J K, LUAN T H, ZHANG Y, et al. Data synchronization in vehicular digital twin network: A game theoretic approach [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(11): 7635-7647.
- [26] 胡凌燕, 史康柏, 张碧纯, 等. 在线修正虚拟仿真预测的遥操作机器人系统[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32(2): 247-254.
- HU Lingyan, SHI Kangbo, ZHANG Bichun, et al. On-line correction of virtual simulation prediction of teleoperated robot system [J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(2): 247-254.
- [27] QIU W Z, GUAN W S, CAI B G, et al. Heterogeneous data-based spatiotemporal trajectory synchronization for virtual-real interactive testing [J]. *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2023, 38(1): 49-66.
- [28] ABDOUNE F, CARDIN O, NOUIRI M, et al. Real-time field synchronization mechanism for digital twin manufacturing systems [J]. *IFAC-Papers on Line*, 2023, 56(2): 5649-5654.
- [29] 周高伟, 沙杰, 刘梦园, 等. 基于数字孪生的加工生产线虚实交互技术研究[J]. *机电工程*, 2024, 41(2): 337-344.
- ZHOU Gaowei, SHA Jie, LIU Mengyuan, et al. Research on virtual-real interaction technology of processing line based on digital twin [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2024, 41(2): 337-344.
- [30] 宋学官, 来孝楠, 何西旺, 等. 重大装备形性一体化数字孪生关键技术[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(10): 298-325.
- SONG Xueguan, LAI Xiaonan, HE Xiwang, et al. Key technology of physical integration of major equipment digital twin [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(10): 298-325.
- [31] 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. Digital twin five-dimensional model and ten fields of application [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1-18.
- [32] 王岩, 张旭辉, 曹现刚, 等. 掘进工作面数字孪生体构建与平行智能控制方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(增1): 384-394.
- WANG Yan, ZHANG Xuhui, CAO Xiangang, et al. Construction of digital twin and parallel intelligent control method for excavation face [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(Sup 1): 384-394.
- [33] 毛清华, 张旭辉, 马宏伟, 等. 多传感器信息的悬臂式掘进机空间位姿监测系统研究[J]. *煤炭科学技术*, 2018, 46(12): 41-47.
- MAO Qinghua, ZHANG Xuhui, MA Hongwei, et al. Study oil spatial position and posture monitoring system of boom-type roadheader based on multi sensor information [J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(12): 41-47.

(责任编辑 沈春妮 全腾)