

# 智采工作面三机数字孪生驱动控制架构

尤秀松<sup>1</sup>, 葛世荣<sup>1,2</sup>, 郭一楠<sup>1,2</sup>, 苗丙<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)机械与电气工程学院, 北京 100083; 2. 煤矿智能化与机器人创新应用应急管理部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为了进一步提高煤矿综采设备智能控制水平, 实现智采工作面常态化运行, 提出基于数字孪生智采工作面驱动控制的相关概念和系统架构。智采工作面数字孪生系统由物理设备、虚拟孪生体、虚实交互模型组成, 通过数字化方法建立与实体设备相映射的虚拟模型, 来达到综采设备在作业过程中虚实交互、智能决策、精准控制和动态演化的目的。阐述智采工作面常态化运行要求和采煤机、液压支架和刮板输送机的相关控制难点。提出了智采工作面单机数字孪生驱动控制架构, 包括机理模型、控制模型、孪生数据模型和数字孪生模型同步与演化等要素; 研究数字孪生虚实交互方法, 利用信息物理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, 为智采工作面数字孪生控制系统的虚实交互提供实时性。提出智采工作面数字孪生驱动的三机协同控制方法, 包括三机关联关系、智能采煤控制、智能支护控制与智能运输控制。最后以矿山数字孪生实际应用为例, 通过建立相关模型和设计相关实验方案, 对数字孪生智能控制进行验证。通过展开数字孪生智能控制架构、模式等理论研究, 旨在解决目前综采工作面存在的环境感知程度低、设备预测精度差和人工干预强度大等问题, 实现在复杂环境条件下设备的自适应控制与人机交互, 为煤矿智能化建设提供借鉴意义。

**关键词:** 数字孪生; 智采工作面; 三机协同控制; 信息交互; 常态化运行

中图分类号: TD67 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)07-3265-11

## Digital twin-driven control construction for three machines of smart coal mining face

YOU Xiusong<sup>1</sup>, GE Shirong<sup>1,2</sup>, GUO Yinan<sup>1,2</sup>, MIAO Bing<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Mining Robotics, Ministry of Emergency Management, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to further improve the intelligent control level of fully mechanized mining equipment in coal mines and achieve the normalized operation of intelligent mining face, this paper proposes the related concepts and system architecture of intelligent mining face driving control based on digital twin. The digital twin system of intelligent mining face is composed of physical equipment, virtual twin and virtual and real interaction model. The virtual model mapped with physical equipment is established by digital method to achieve the purpose of virtual and real interaction, intelligent decision, accurate control and dynamic evolution in fully mechanized mining equipment during operation. The paper expounds the normal operation requirements of intelligent mining face and related control difficulties of shearer, hydraulic support and scraper conveyor, and proposes the single-machine digital twin driving control architecture of smart mining face, including mechanism model, control model, twin data model and digital twin model synchronization and evolution. The method

收稿日期: 2023-05-31 修回日期: 2023-09-13 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0684

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4703701); 国家自然科学基金资助项目(61973305); 高等学校学科创新引智计划资助项目(B21014)

作者简介: 尤秀松(1996—), 男, 黑龙江鸡西人, 博士研究生。E-mail: 17801093161@163.com

引用格式: 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. Digital twin-driven control construction for three machines of smart coal mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3265-3275.



移动阅读

of digital twin virtual-real interaction is described, the Cyber-Physical System is used to guarantee the information interaction ability, and the knowledge model is used to solve the data congestion problem, which provides a real-time virtual-real interaction for the digital twin control system of intelligent mining face. A three-machine cooperative control method driven by the digital twin of intelligent mining face is proposed, including three-machine correlation, intelligent coal mining control, intelligent support control and intelligent transportation control. Finally, taking the practical application of digital twin in mines as an example, the intelligent control of digital twin is verified by establishing the relevant model and designing the relevant experiment scheme. By carrying out theoretical research on digital twin intelligent control architecture and mode, the paper aims to solve the current problems of low environmental perception, poor equipment prediction accuracy and high manual intervention intensity in fully mechanized mining face, realize an adaptive control and human-computer interaction of equipment under complex environmental conditions, and provide a reference for the intelligent construction of coal mines.

**Key words:** digital twin; smart coal mining workforce; three machines collaboration control; information interaction; normalized operation

煤矿智能化开采是我国煤炭企业数字化转型之路,已成为我国大力推动的煤矿技术发展方向。采煤工作面作为煤矿开采的主要场景,生产环境恶劣、设备众多且关联性强,其智能化程度也成为制约煤矿智能化建设的瓶颈。特别是采煤工作面装备常态化运行逐步成为煤矿智能化发展的重要目标之一。葛世荣等<sup>[1]</sup>提出基于工作面单机智能化、集群自主化和远程智能管控技术的智能化综采工作面(简称智采工作面)技术体系和系统架构。目前,我国建成煤矿智采工作面 1 043 个,智掘工作面 1 277 个。智采工作面远程驾驶舱已实现关键工序的控制和设备群状态的可视化监控,但是,生产工序的全流程智能安全决策和设备群的全生命周期运维管控仍依赖操作人员的在环参与。由此,在工业互联网基础上,引入数字孪生驱动的先控制理论,对实现煤炭智能化安全高效开采至关重要。

数字孪生(Digital Twin, DT)以数字化方法创建物理实体的虚拟模型,构建虚拟孪生体与物理实体的数字交互模式,实现以虚控实的智能运维,为煤矿智能化常态运行提供了新路径。葛世荣等<sup>[1]</sup>率先提出数字孪生智采工作面的技术架构及关键技术,指出数字孪生智采工作面是一个数据可视化、人机强交互、工艺自优化的高逼真采煤工作面三维镜像场景,包括物理工作面、数字工作面和数据信息交互等 3 个部分。王飞跃<sup>[2]</sup>提出平行智能理论,构建的平行矿山体系为物理系统和虚拟系统的交互联动与平行执行提供了实现基础。张帆等<sup>[3]</sup>将数字孪生与平行智能理论相融合,构建了数字孪生矿山框架,能更好地应对煤炭开采过程中的环境不确定性和设备群多样性。进而,构建了物理模型、仿真模型、机理模型和数据模型相互耦合的矿山数字孪生演化理论模型,分析了矿山数字

孪生系统与物理系统的同步映射与协同演化机制<sup>[4]</sup>。郭一楠等<sup>[5]</sup>构建了智采工作面五维数字孪生模型,并建立了知识引导的虚实空间信息主动管控机制,为决策控制服务提供高效可靠的信息保障。谢嘉成等<sup>[6]</sup>提出了一种基于数字孪生的综采工作面生产系统设计与运行模式,实现全要素、全流程、全数据的集成和融合,以达到生产系统最优配置和装备协同安全高效开采的目的。

上述智采工作面数字孪生的研究聚焦于系统框架构建和虚实数据的协同演化方式,缺乏智采工作面三机虚实协调控制的深入分析。由此,笔者通过分析智采工作面三机控制的难点,提出一种新型的数字孪生驱动协同优化控制框架,并剖析其核心关键技术,为实现智采工作面的“信息可见、轨迹可循、状态可查”提供高效的决策控制机制,并确保其常态化运行提供技术支撑。在智采工作面数字孪生架构中,采煤工作面的设备群管控不仅是传统的设备状态监测与启停式粗放型控制,而是在信息-物理系统基础上,充分考虑采煤工作面的环境动态变化,依据人-机-环 3 者的交互耦合特性,融合数据、知识、模型、计算在内的新型优化决策控制架构,从而实现设备群的高效协同运行和单机的最佳状态控制,协同优化采煤、支护和运输 3 道工序。综上,智采工作面数字孪生驱动控制的核心在于:“以虚控实、虚实融合”为主线,以设备(群)的状态监测、预测、评估、决策和控制为服务核心,实现更加精细、安全、稳定的设备运行决策与安全管控,为煤炭智能化开采提供更加完备可行的理论与技术支撑。

## 1 智采工作面装备常态化运行

从 20 世纪 50 年代起,煤炭开采装备技术经历了 5 次变革,如图 1 所示。

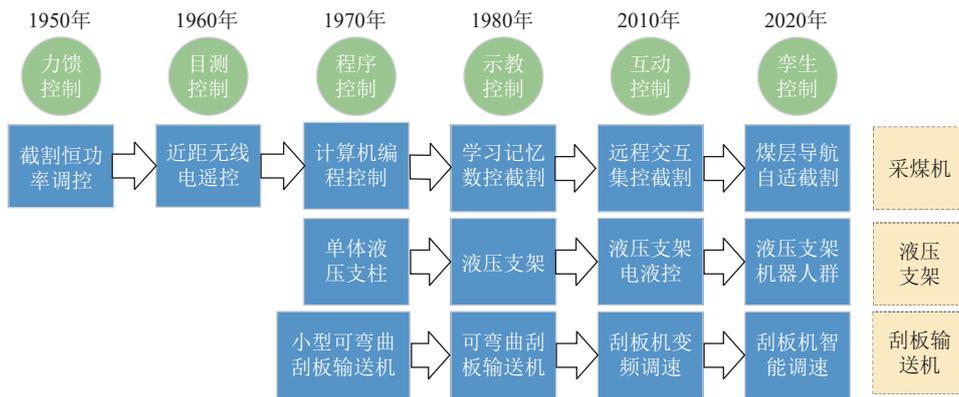


图 1 综采三机发展历程

Fig.1 Development of three machines in fully mechanized mining

1.1 常态化运行概念

智采工作面常态运行是指采煤机、刮板输送机、液压支架等装备在实现智能控制状态下得以长时间稳定运行。智能化常态运行率  $r$  为工作面智能化最大连续稳定运行时间 ( $\bar{t}_z$ ) 占全部生产时间 ( $t$ ) 的比率, 是衡量智能化常态程度的定量指标, 即

$$r = \bar{t}_z / t \tag{1}$$

$$\bar{t}_z = \max \{t_{zi}\}, i = 1, 2, \dots, N \tag{2}$$

式中,  $t_{zi}$  为智采工作面多段常态化运行时间;  $i$  为智采工作面截割刀数;  $N$  为智采工作面截割到第  $N$  刀。

当煤矿智采工作面的智能化常态运行率超过 80%, 才能认为实现了智能化运行。影响智采工作面常态化率的主要因素包括智能装备完整性、系统性、可靠性、互联性、持续性。由此, 采煤机、液压支架和刮板输送机不仅要实现高效的单机控制, 还需要自主感知生产环境的变化, 主动调整设备动作和参数, 实现三机设备的协同, 为智采工作面常态化运行提供保障。

采煤机自主感知开采地质体和环境, 驱动滚筒旋转并破碎煤壁。根据煤层硬度变化、煤矸分布状况, 实时调节滚筒转速、牵引速度和摇臂高度等核心控制变量, 延长截齿使用寿命, 减小故障率, 提高煤炭生产效率; 在支护过程中, 液压支架与采煤机存在耦合关联, 根据采煤机牵引速度的实时作业状态, 液压支架按序进行伸/收护帮板、移架等动作, 防止采煤机损伤护帮板, 保证工作面在推进过程中的及时支护; 在运输过程中, 刮板输送机与采煤机存在耦合关系, 刮板输送机根据采煤机的截割深度, 自主调节煤块的运输速率。通过上述综采三机的高效协调控制, 保证智采工作面的设备实现“采-支-运”的连续可靠、安全高效生产。

1.2 智采工作面常态化运行难点

煤炭开采过程中, 煤层赋层条件复杂多变且存在

差异, 综采三机的设备参数往往难以及时匹配调整, 对智采工作面常态化运行造成阻碍。综采三机动作驱动方式及其影响因素见表 1。

表 1 综采三机动作及其驱动方式

Table 1 Actions and driving mode of three equipment in fully mechanized mining

设备	控制动作	驱动元件	影响因素
采煤机	滚筒转速	电机	煤矸分布情况
	牵引调速	电机	齿轮啮合程度
	滚筒调高	液压阀	煤岩界面
液压支架	移架	液压阀	采煤机截割深度
	推溜	液压阀	销耳间隙
刮板输送机	链条运输	电机	煤流变化

(1) 采煤机。采煤机作为智采工作面主要的割煤设备, 调高、调速和截割是其核心控制问题, 也是影响装备智能化发展的最直接要素。

采煤机调高部件包含滚筒、摇臂、调高油缸和液压控制回路, 通过电液伺服系统, 合理调节调高油缸, 实现采煤机截割高度的自动控制<sup>[7-8]</sup>。显然, 影响调高控制精度的主要因素是摇臂和滚筒自重, 以及滚筒截割作业时所受到的冲击载荷作用。由于煤岩识别技术的限制, 煤岩界面曲线难以及时获取, 导致当前采煤机调高仍需人工操作。采煤机牵引部由牵引电机、动力传动系统和行走系统组成。可变速牵引电机产生的动力, 经传动系统的平行轴齿轮和行星齿轮, 驱动行走系统<sup>[9-10]</sup>。采煤机截割部件主要由截割电机、齿轮传动系统和滚筒组成。截割电机通过多级平行轴齿轮和行星轮, 驱动滚筒旋转破碎煤壁<sup>[11-13]</sup>。截割过程中, 煤层顶部和煤层中含有硬度较高的矸石等, 导致滚筒的冲击载荷波动较大, 使采煤机滚筒截齿频繁更换, 且控制鲁棒性要求较高。

(2) 液压支架。液压支架作为智采工作面的支护设备, 对煤矿安全生产起着至关重要的作用。其控制

核心在于: 支架与采煤机、刮板输送机之间的彼此协同, 以及液压支架支撑力与支护位姿控制。

智采工作面通过三机协同配合可提高采煤效率, 但是智采工作面各个设备通常独立控制, 缺乏其关联模型和统一控制框架。液压支架支撑力对顶板稳定具有重要作用。恰当的支撑力可以减少顶板离层、端面破碎度和煤壁片帮, 有利于提高支护系统刚度, 减少顶/底板移近量<sup>[14-15]</sup>。支架支撑力控制通常采用手动操纵阀或电磁换向阀的先导控制, 其开环特性难以满足支架初撑力自主适应顶板的需求。

(3) 刮板输送机。刮板输送机作为智采工作面的运输设备, 主要作用是运输煤块。其控制核心在于刮板输送机张力控制、电机功率控制和推溜调直控制。

刮板输送机张力系统是由链条和刮板组成, 用于在运煤过程中克服地面的摩擦阻力<sup>[16-17]</sup>。长时间运行和重载会拉长链条, 降低刮板输送机系统的作用力, 导致设备出现危险事故, 因此有必要实时调节刮板输送机张力。刮板输送机驱动部由 2 个异步电动机组成, 2 个电机之间的功率分配不均, 易造成过载和欠载<sup>[18-20]</sup>。随着采煤机截割刀数的增加及工作面的持续推进, 受其销耳间隙<sup>[21-22]</sup>的影响, 刮板输送机可能产生弯曲, 因此推溜调直控制是确保采煤机正常工作的前提。

## 2 智采工作面单机数字孪生驱动控制架构

数字孪生为智采工作面实现常态化运行提供了

一个新的思路。数字孪生系统包含虚拟孪生体与物理实体。其中, 物理实体包括开采地质体和设备, 虚拟孪生体包括工作面煤层环境、地质构造和设备的虚拟镜像。设备作为主体控制单元, 需要完成可靠的单体动作和高效的群体协同。通过 2 者双向映射与信息交互, 完成状态变化的实时感知与分析、场景 3D 虚拟现实、故障诊断预测、迭代优化分析、全生命周期管理和设备智能控制。

智采工作面虚拟孪生体与现实物理实体之间存在交互映射关系。虚拟孪生体通过对采煤工作面设备(工艺)的仿真建模、设备(群)状态可视化和虚拟控制, 根据物理实体运行状态的实时采集数据, 生成相应的模型表达, 并评估和预测其运行安全性与稳定性, 决策其控制模式, 形成合理的控制策略与参数, 指导物理实体的实时运行, 并加以可视化追踪, 实现以虚控实的目的。其中, 仿真部分包含模型建立、模型同步、模型演化、多场景模拟、多维度和多时空仿真等。控制部分通过模型同步和模型演化, 实现对物理实体的及时、准确映射, 自适应生成控制策略, 并决策控制参数, 对实际生产进行指导决策。状态可视化用于实时显示当前设备(群)的运行状态和模型参数, 为仿真建模提供直观表示。物理实体根据虚拟孪生体的控制指令, 实施相关设备(群)的动作, 并收集传感器获得的感知数据, 传递给数字孪生系统的数据平台, 用于更新虚拟孪生体模型, 其控制架构如图 2 所示。

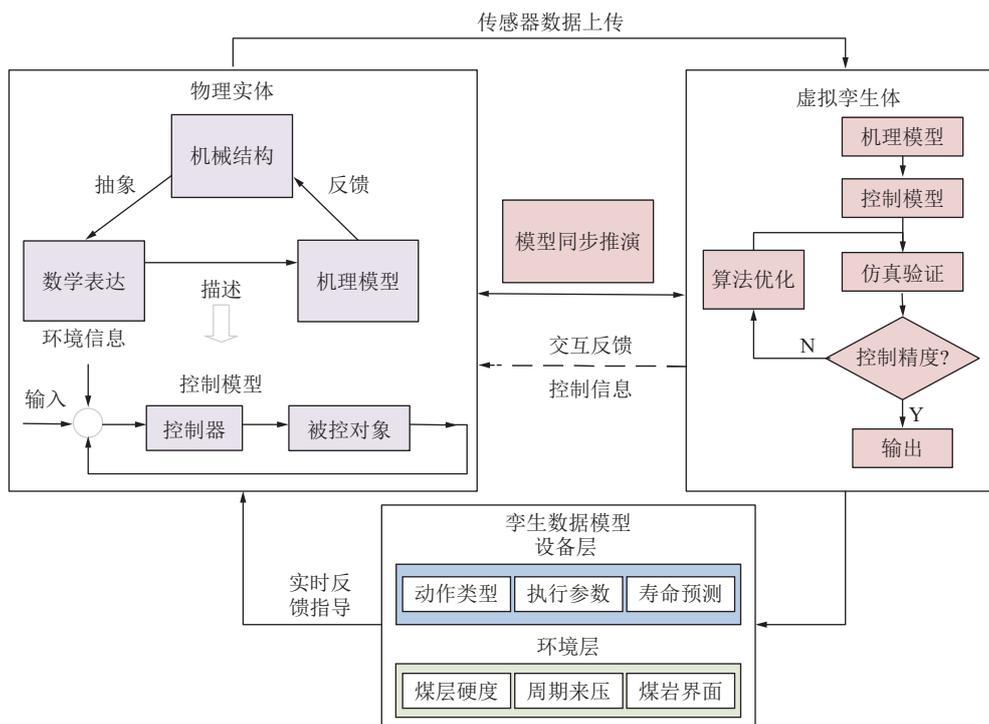


图 2 智采工作面数字孪生控制架构

Fig.2 Digital twin-driven control architecture of fully mechanized mining face

## 2.1 数字孪生系统模型构建

### 2.1.1 机理模型构建

机理模型通过对矿井工作面的物理组成、结构分布和运行过程建模,以及对智采工作面的历史数据、衍生数据和仿真数据等多源异构数据的融合与分析,实现对矿井工作面生产过程的逻辑描述和智能决策。一方面,基于组成要素和结构分布,对智采工作面静态环境并加以描述;另一方面,利用运动学等手段实现智采工作面装备的动态分析。

以采煤机牵引部为例,为满足采煤机稳定运行需求,根据采煤机的负载状况,结合电力拖动方程,有

$$T_m - T_L = J \frac{dn}{dt} \quad (3)$$

式中,  $T_m$ 、 $T_L$  分别为电磁转矩和负载转矩;  $J$  为转动惯量,  $J = GD^2/375$ ,  $G$  为采煤机重力,  $D$  为电动机转动直径;  $n$  为转速。

对于内牵引采煤机,其所受阻力  $f_n$  为

$$f_n = f \left( G \cos \alpha + \sum_{z=1}^2 P_{pz} \right) + \sum_{z=1}^2 P_{Nz} + G \sin \alpha \quad (4)$$

式中,  $f_n$  为内牵引采煤机所受阻力;  $f$  为阻力模型函数;  $\alpha$  为工作面倾角;  $P_{pz}$  为前/后滚筒截割阻力引起的摩擦力;  $\sum_{z=1}^2 P_{Nz}$  为前/后滚筒推进阻力之和;  $G \sin \alpha$  为自身下滑力;  $f \left( G \cos \alpha + \sum_{z=1}^2 P_{pz} \right)$  为采煤机自重和滚筒截割阻力引起的摩擦力。

由于采煤机滚筒截割引起的摩擦力与牵引速度成正比关系,记  $T$  为采煤机牵引力,则有

$$f \left( G \cos \alpha + \sum_{z=1}^2 P_{pz} \right) = \eta v_q T \quad (5)$$

式中,  $\eta$  为比例系数;  $v_q$  为牵引速度。

$$\sum_{z=1}^2 P_{Nz} = \frac{\lambda N_H \eta_j H}{n D_c D_c} \quad (6)$$

其中,  $\lambda$  为前/后滚筒总推进阻力与滚筒截割受力的倍数;  $N_H$  为驱动滚筒电动机的额定功率;  $\eta_j$  为截割部总机械传动效率;  $D_c$  采煤机滚筒直径;  $H$  为采煤机截割高度。选择采煤机位移  $x$ 、牵引速度  $v_q$  作为系统的状态变量,记为  $\mathbf{X} = [x_1, x_2]^T = [x, v_q]^T$ , 则采煤机位移可表示为

$$f(x) = \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{T}{m_s} - \frac{\eta T x_2}{m_s} - \frac{\lambda N_H \eta_j H}{m_s n D_c^2} - g \sin \alpha \\ y = x_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $m_s$  为采煤机质量;  $g$  为重力加速度;  $y$  为控制输出。

上述采煤机牵引部机理模型,为后续数字孪生驱动控制提供了理论分析基础。

### 2.1.2 控制模型构建

面向虚拟孪生体,构建多工况下智采设备的预测控制模型。在确定系统输入/输出和控制策略后,引入稳定性分析理论,判定控制系统稳定性,确保控制方法的合理性。根据工作面开采环境和综采三机设备特性,借助迁移学习等方法,辅助决策设备下一时刻的控制动作。

以采煤机位移的滑模控制为例,记  $f(x)$  为牵引部位非线性项;  $b$  为调节系数;  $u(t)$  为控制输入;  $E(t)$  为未知干扰,则有

$$\ddot{x} = f(x) + bu(t) + E(t) \quad (8)$$

假设  $e$  为跟踪误差,  $e = x_d - x$ ,  $x_d$  为参考位移,设计滑模函数  $s$  为

$$s = \dot{e} + ce, \quad c > 0 \quad (9)$$

其中,  $c$  为滑模面的比例参数,滑模控制器的输入  $u$  记为

$$u = \frac{1}{b} \left[ -f(x) + \ddot{x}_d + c\dot{e} + k_p s + K(t) \operatorname{sgn}(s) \right] \quad (10)$$

式中,  $k_p$  为比例系数,且  $k_p > 0$ ;  $K(t) = \max |E(t)|$  为切换增益。

选取 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s(\ddot{e} + c\dot{e}) = s(\ddot{x}_d - \ddot{x} + c\dot{e}) = \\ &= s(\ddot{x}_d - f(x) - bu - E(t) + c\dot{e}) \end{aligned} \quad (12)$$

代入式(10),得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s \left\{ (\ddot{x}_d - f(x) - [-f(x) + \ddot{x}_d + c\dot{e} + k_p s + \right. \\ &= s \left[ -k_p s - K(t) \operatorname{sgn}(s) - E(t) \right] = \\ &= -k_p s^2 - K(t) |s| - E(t) s \leq -k_p s^2 \end{aligned} \quad (13)$$

由于  $\dot{V} < 0$ , 所以该控制系统是稳定的。

### 2.1.3 孪生数据模型

孪生数据的来源主要包含 2 类: 其一是传感器采集获得的综采三机设备历史运行数据; 其二是利用机器学习方法,推理得到的设备状态仿真数据。不同来源的数据互为补充,为综采三机设备状态解析、故障预警等运维信息提供指导,进而,对实时决策控制、动作同步等提供实现基础。

### 2.1.4 模型同步与演化

为实现模型同步,需要首先将物理实体进行要素

信息提取,利用地面高分辨率三维地震、煤矿井下槽波地震与电磁法探测技术,得到相应的钻探信息、地质构造和煤岩分布等信息,实现矿井环境地质的透明化;利用有限元分析法求解物理实体设备的载荷分布和运动状态,得到机理模型的结构参数、几何特征、运动规律等信息。

将物理实体的上述信息要素与孪生数据相结合,形成虚拟孪生体,与物理实体构成同步映射,确保虚拟孪生体与物理实体在时间域和空间域的一致性。进一步,建立采煤生产过程中的虚拟演化机制,虚拟孪生体依据工作面当前生产环境,自主设计运行规则和生产模式,并通过模型推理演化预测未来的场景工况,生成设备动作序列。

## 2.2 智采工作面数字孪生信息交互模型

受工业互联网通信技术的限制,虚拟孪生体与物理实体信号传输存在时间差和延时性高的问题,导致数字孪生系统出现时间与空间的错乱。数字孪生系统需要考虑数据有效性,合理调整数据上传速度,保证物理实体设备和虚拟孪生体在时间域、空间域的一致性。

通过引入知识模型和信息物理系统提高信息交互程度。知识模型在矿井互联网系统下自动屏蔽误差较大数据,并上传有效状态变量,实现数据清洗和预处理;信息物理系统面向数字孪生系统中感知模块、通信模块和控制模块的解耦机制,构建相关约束条件,优化3者的交互方式,实现对“人-机-环”的坐标位置、设备状态和环境信息等要素的精准感知与快速传输。

### 2.2.1 基于知识模型的多源数据拥堵控制

智采工作面的孪生数据是作为连接物理世界和虚拟世界的媒介,也是实现虚实交互的基础。早期的TCP网络协议环境简单,网络时延较高,交换机缓存被长数据流占满,使短数据流被迫排队等待,进而产生高时延导致数据拥堵<sup>[23]</sup>。而数字孪生知识模型需要感知数据堵塞信息,调整优化边缘端数据发送指令和云端接收指令。当物理实体部分的交换机队列长度超过其缓存数据量的最高阈值时,知识模型会对优先级较高的数据类型增添相应标志,并通知虚拟孪生体接收端网络发生了堵塞;接收端在回复的串口报文中通知发送方,提高数据发送速率,同时减小优先级较低的数据类型的发送速率。

数字孪生系统采用知识模型来合理划分数据流的优先级,改善流量传输效果。其目的在于调节不同数据流的传输速度,对不同数据类型的传输速度优化,减少流量完成时间,最大程度满足优先级较高的数据流,提高网络资源利用率等,从而保证物理实体和虚拟空间动作一致性,为虚拟空间对物理实体的自主决

策和物理实体对虚拟空间的动态反馈提供基础。

### 2.2.2 基于信息物理系统的虚实交互控制

在智采工作面数字孪生系统中,“物质-能量-信息”多能流转换存在于物理设备(群)和虚拟孪生体(体)内部和彼此的关联耦合中。如图3所示,物质流、能量流和信息流覆盖整个数字孪生系统,在孪生过程中,信息物理系统实现虚实交互与信息传递,通过揭示智采工作面各类设备运行规律和作业流程,提升智采工作面的数据同步和交互能力。

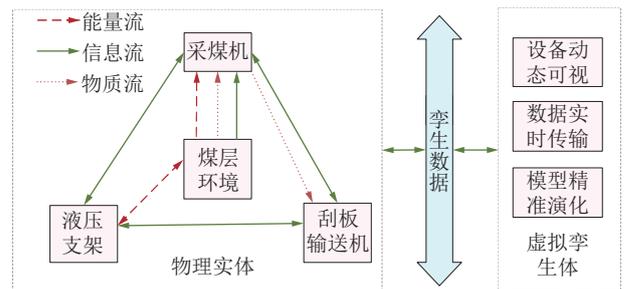


图3 数字孪生系统信息交互

Fig.3 Information interaction of digital twin system

信息物理系统中的物质流依次描述煤块从截割、破碎至运输的不同状态,主要覆盖采煤机与刮板输送机两类设备,以及相应的智采工作面作业工艺流程及煤量变化,为生产任务指标提供参考。能量流描述智采工作面三机设备在生产中的能量转化关系,主要涉及采煤机与液压支架2类设备,包含采煤机截割煤块的动能模型、液压支架支撑力与围岩应力之间的力耦合模型等。信息流覆盖整个数字孪生系统,包括孪生数据与物理实体、虚拟孪生体之间的数据交互,以及孪生数据内部的数据流迁移。随着智采工作面的推进,物质流、能量流和信息流在生产作业过程中衍生流动,完成采煤作业工艺的迭代与映射,实现虚拟孪生体与物理设备的同步与演化。

## 3 智采工作面三机数字孪生协同控制

### 3.1 三机协同关联关系

根据智采工作面三机设备的动作类型,按照生产工艺和运行逻辑,将三机设备动作进行关联匹配,判断关联关系的强弱程度。

以采煤机截割为例,智采工作面三机关系如图4所示。

图4中,左侧为液压支架动作类型,右侧为刮板输送机动作类型,中间为采煤机动作类型,连线表明3者动作存在关联关系。采煤机截割作业会引起液压支架和刮板输送机的动作参数变化,实现步骤如下:

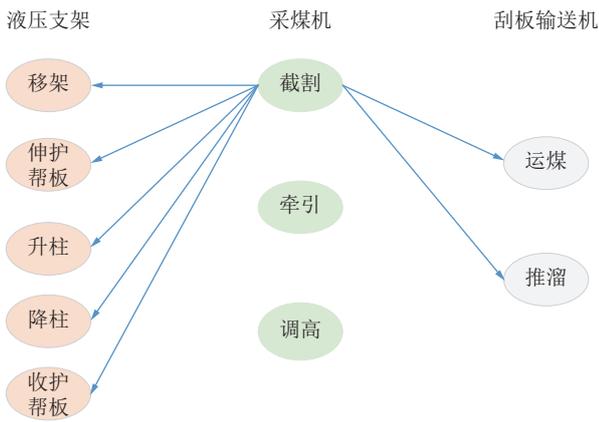


图 4 智采工作面三机关系

Fig.4 Relationship of three equipment in fully mechanized mining face

(1) 提取各个设备的关联要素。

采煤机截割会对液压支架和刮板输送机的动作产生关联影响。按照层次分析法, 液压支架层包括“移架”“伸护帮板”“收护帮板”“升柱”和“降柱”; 刮板输送机层包括“运煤”和“推溜”。

(2) 构造判断矩阵。

对上述关联要素进行匹配, 建立“采煤机截割”动作与液压支架、刮板输送机相应动作之间的判断矩阵, 见表 2。分别将液压支架动作、刮板输送机动作作为判断矩阵的行和列, 每个元素代表其与“采煤机截割”的关联程度。

表 2 采煤机截割的判断矩阵

Table 2 Judgment matrix of the shearer cutting

采煤机截割	运煤	推溜
移架	1.00	2.0
升柱	0.45	1.5
伸护帮板	0.25	1.0
降柱	0.45	1.5
收护帮板	5.00	8.0

矩阵权重表征重要性程度, 其含义见表 3, 数值越大, 关联性程度越强。例如, “5”表示“采煤机截割”动作对液压支架“收伸护帮”的关联度比刮板输送机“运煤”关联度更高。

(3) 计算权向量。

为得到各个设备动作的具体权重, 将以上定性判断得到的矩阵量化为

$$W_{ik} = \frac{\sqrt[m]{\prod_{j=1}^m A_{qj}}}{\sum_{q=1}^m \sqrt[m]{\prod_{q=1}^m A_{qj}}} \quad (14)$$

其中,  $k(k=1,2, \dots, t_p)$  为第  $k$  个采煤机动作, 第  $k$  个采

表 3 重要性程度含义

Table 3 Meaning of importance degree

标度	$A_{qj}(q \neq j)$
1	表示元素 $q$ 与元素 $j$ 相比, 2 者同样重要
3	表示元素 $q$ 与元素 $j$ 相比, 前者略重要
5	表示元素 $q$ 与元素 $j$ 相比, 前者明显重要
7	表示元素 $q$ 与元素 $j$ 相比, 前者非常重要
9	表示元素 $q$ 与元素 $j$ 相比, 前者极其重要
2/4/6/8	位于上述判断的中间值
< 1	表示元素 $q$ 与元素 $j$ 相比, 后者更重要

煤机动作中有  $m$  个液压支架动作相关联, 判断矩阵为  $m \times m$  方阵; 矩阵中元素记为  $A_{qj}(q, j=1, 2, \dots, m)$ ,  $q$  为行数,  $j$  为列数;  $W_{qk}$  为第  $q$  个液压支架动作与第  $k$  个采煤机动作的权重。

以液压支架动作“移架”为例进行说明。通过定性判断列出了采煤机“截割”和液压支架“移架”的判断矩阵表,  $k=1$ , 并代入式 (14) 计算出第  $i$  个刮板输送机动作的权重  $W_{i1}$ 。

(4) 判断矩阵的一致性检验。

为最大程度提高结果的可靠性, 对计算结果进行一致性检验。

$$I_C = \frac{\lambda_{\max} - n_g}{n_g - 1} \quad (15)$$

$$I_R = \frac{1}{m} \sum_{q=1}^m I_{Cq} \quad (16)$$

$$R_C = \frac{I_C}{I_R} \quad (17)$$

其中,  $\lambda_{\max}$  为判断矩阵的最大特征值;  $n_g$  为一致矩阵的最大特征值<sup>[24]</sup>。一致性指标  $I_C$  的取值越小, 一致性越大, 逻辑不自洽程度越小。进一步, 引入随机一致性指标  $I_R$  和一致性比率  $R_C$ 。其中,  $R_C$  用于判断矩阵是否满足一致性检验, 从而判断矩阵是否可以用于智采工作面三机建模。

### 3.2 数字孪生驱动的三机协同控制

安装在煤炭开采工作面各装备部件中的压力、振动、位移等传感器, 其采集信号通过 CAN 总线传输至相应的控制器。进一步, 经过数据清洗与治理, 上传至数字孪生虚拟平台, 为知识模型更新与三机协同控制提供数据支持。

#### 3.2.1 智采工作面智能采煤控制

图 5 给出了智采工作面采煤机控制方案, 在截割作业过程中, 智采工作面数字孪生系统根据感知的煤岩变化和地质环境等信息, 作为调高控制系统的输入, 随着煤岩界面曲线, 自适应调整采煤机滚筒高度。虚拟孪生体根据当前的截割状态判断煤岩信息, 将第 1

刀煤岩信息进行汇总分析,绘制煤岩截割曲线,并在后续的截割进刀过程中,根据受力变化,实时调整截

割曲线。通过多次迭代更新,构建数字孪生截割导航地图,为后续的采煤机控制提供理论基础。

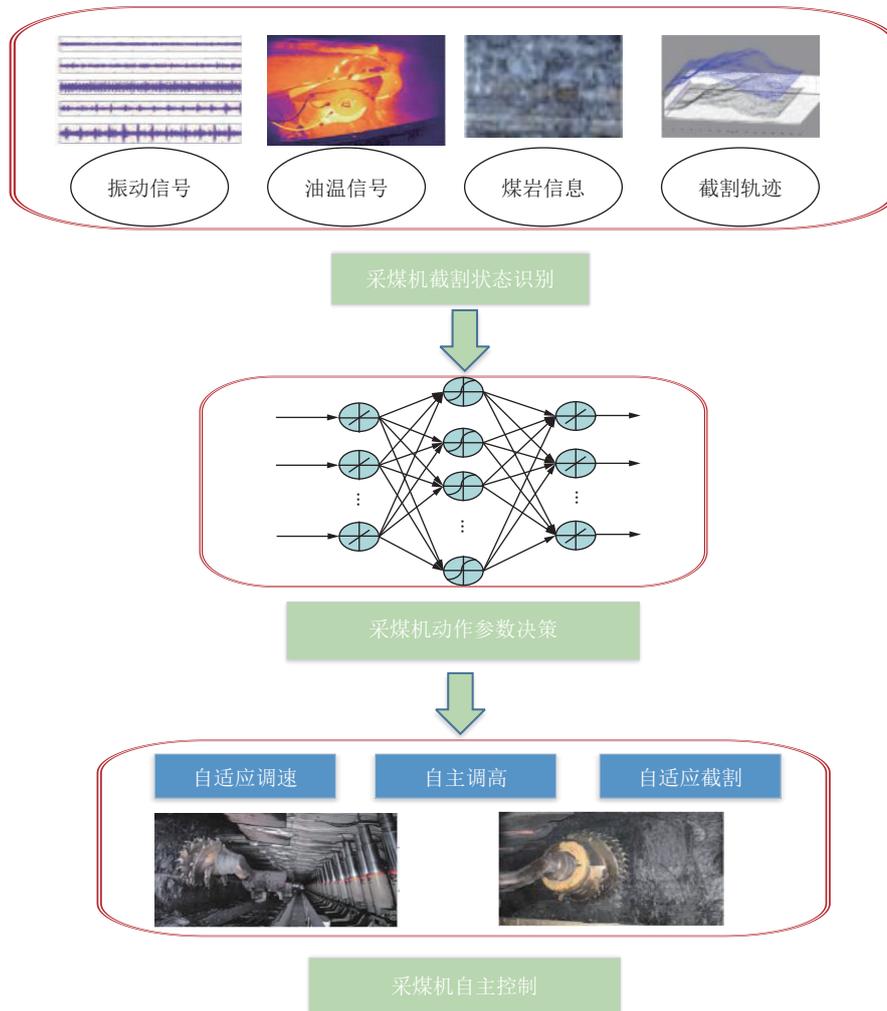


图5 智采工作面采煤机控制方案

Fig.5 Control strategy of shearer for smart coal mining workplace

当采煤机在截割作业时,需要考虑环境工况的变化,自适应调整截割转速和牵引速度。虚拟孪生体通过分析采煤机与环境的耦合关系,建立多输入多输出的采煤机截割-牵引控制系统,将采煤机牵引部、滚筒截割部和齿轮传动部联合建模。通过采集滚筒截齿受力和电机电流数据,结合当前煤矸变化分布,调节截割转速和牵引速度的期望设定;根据截齿受力、滚筒承受载荷、油温信号和振动信号等能量信息,通过模型仿真反演获得截割力、截割载荷的孪生数据,对物理实体进行有效的指导预测,实现滚筒转速和牵引速度自适应调整<sup>[24]</sup>。

### 3.2.2 智采工作面智能支护控制

图6给出了智采工作面液压支架控制方案。在支护作业过程中,智采工作面数字孪生系统需要感知顶板压力的变化,通过研究围岩压力与支架受力关系,建立智采工作面顶板与液压支架护帮板之间的关联

关系。将支架顶板应力作为控制系统输入,当突发外界干扰(如冲击地压)时,将支架支撑受力、周期来压、顶板的状态及破碎程度等环境信息作为扰动因子,虚拟孪生体通过模型仿真分析,得到泵站出口压力和支架动作参数等孪生数据,对液压支架物理实体的支撑力进行预测控制,实现在矿压扰动状态下支架支撑力自适应调节。

液压支架群组控制是根据开采环境,自主设计智采工作面工艺流程,自适应调整液压支架设备状态,实现液压支架伸/收护帮、降架、移架、升架等动作的自主规划,确保采煤机与液压支架互不干涉、协同配合<sup>[25]</sup>。

### 3.2.3 智采工作面智能运输控制

图7给出了智采工作面刮板输送机控制方案。在运输作业中,智采工作面数字孪生系统需要感知刮板输送机的实时载荷变化。由于刮板输送机的链条

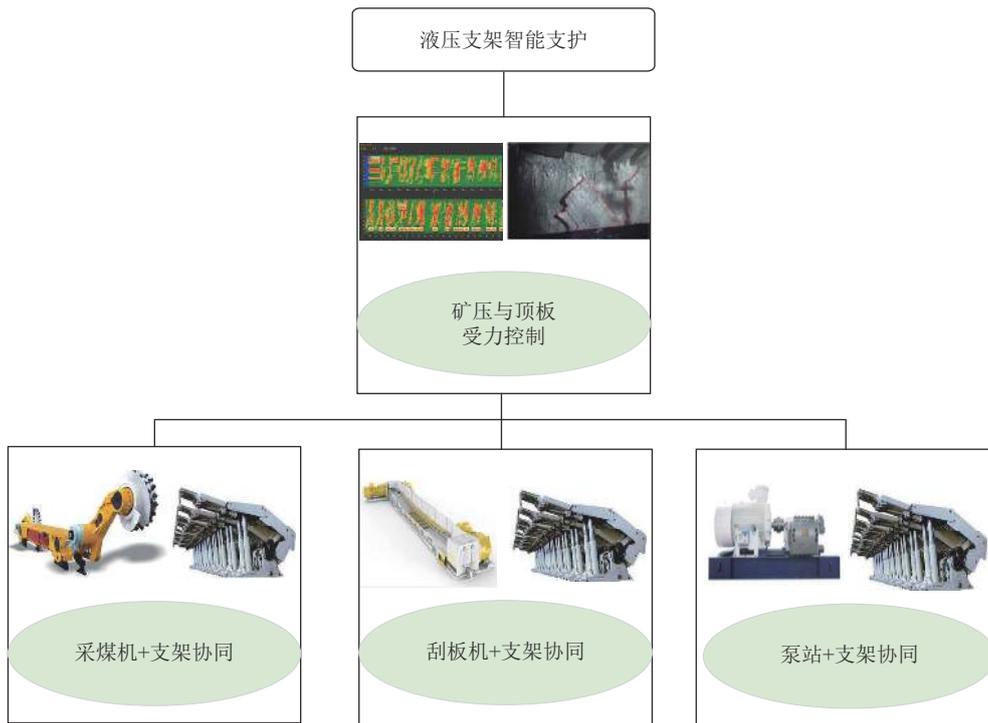


图 6 智采工作面液压支架控制方案

Fig.6 Control strategy of hydraulic support for smart coal mining workforce

负载在运煤作业过程中突变较大, 研究链条张力与涡轮距离的关联关系, 建立多输入多输出刮板输送机链条控制系统。通过在链轮之间采集链条的位移、张力、负载变化, 以及电机电流变化等信息, 根据煤流速度、电机负载, 实现对链轮的相对距离和电机的预测控制, 确保在不同煤流速度下链条张力的自适应调节<sup>[26]</sup>。

若偏差较大, 修正量可作为孪生数据下发到各个支架, 用于驱动液压支架进行二次移架调整。

#### 4 实例验证

以神东柳塔煤矿作为智采工作面数字孪生控制的应用场景, 结合矿井地质信息、煤岩分布信息、设备状态信息及设备子部件的设计参数, 利用 Unity3D 软件, 构建与物理世界相匹配的虚拟孪生体。通过虚拟孪生体对物理实体实现远程决策与预测控制, 物理实体通过传感器将各项数据反馈至虚拟孪生体, 实现状态解析。

数字孪生建模软件采用 SolidWorks 软件, 使用 3Dmax 进一步渲染, 并导入到 Unity3D 中, 采用 C# 语言编写相关接口程序进行数据信息传递, 并对搭建的模型展开适用性分析。利用传感器监测物理设备的动作参数, 将此类数据作为控制指令上传至虚拟孪生体, 进而实现虚实同步。

智采工作面数字孪生系统核心关注其同步性和可预测性, 演化实例如图 8 所示。虚拟孪生体可完全显示物理实体的运维状态, 包括设备运行状态数字孪生, 生产工艺数字孪生, 采煤环境迭代数字孪生, 对实际生产达到完全复现; 虚拟孪生体可对设备当前运行状态和生产工艺进行决策控制, 利用智能算法生成指令, 并下发到物理实体中, 上述智采工作面数字孪

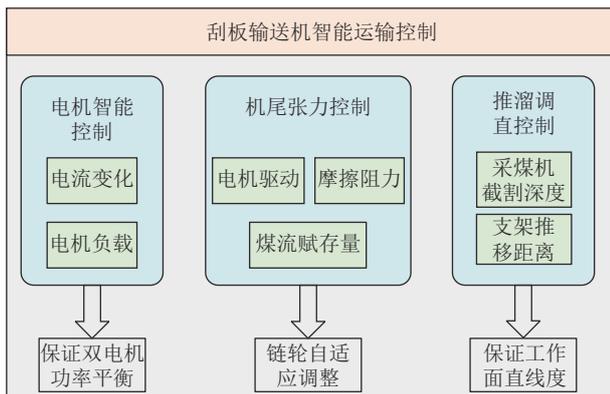


图 7 智采工作面刮板输送机控制方案

Fig.7 Control strategy of scraper conveyor for smart coal mining workforce

通常, 智采工作面的弯曲程度可以按照级数划分。当达到一定偏移差时, 需进行二次移架调整。智采工作面数字孪生系统将偏移误差、刮板输送机中部槽状态作为输入, 采煤机截割深度、刮板输送机的推溜距离等信息作为反馈。虚拟孪生体将未来刀割煤后的推移形状作为修正目标, 与当前推移轨迹相比较,

生不仅实现了远程可视化监控,结合仿真分析得到的孪生数据,解决了设备在生产过程中的决策控制问题。

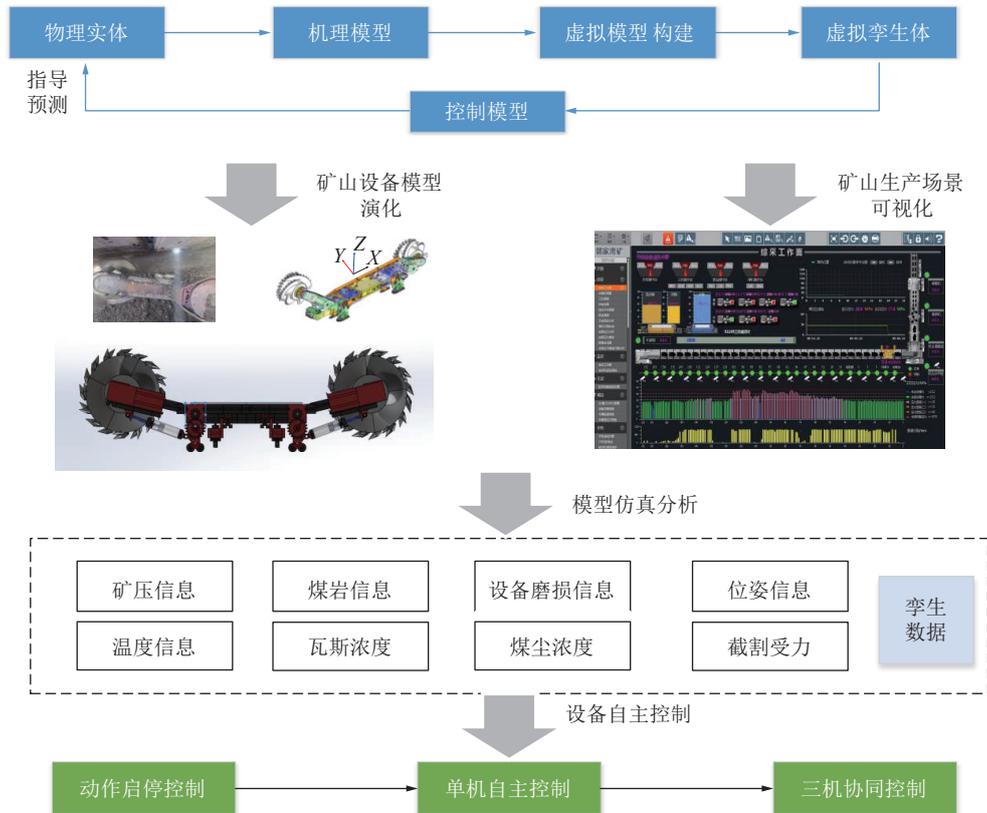


图8 智采工作面数字孪生协同控制演化实例

Fig.8 An example of intelligent mining face digital twin cooperative control

## 5 结 论

(1) 针对当前智采工作面常态化运行难点,提出了机理模型、控制模型、孪生数据模型同步与演化的控制架构,保证单机设备的虚实同步。

(2) 针对物理实体与虚拟孪生体在信息交互过程中存在不一致的问题。通过建立知识模型优化数据传输速度,利用信息物理系统提高虚实交互程度,保证两者在时间域与空间域的数据同步和信息一致。

(3) 通过剖析采煤机与液压支架、刮板输送机之间的动作关联影响,提出智采工作面三机协同关联控制机制,实现合理有效的“以虚控实”。

尽管研究团队在智采工作面数字孪生领域提出了相关控制架构,但由于透明地质、煤岩识别、设备状态预测等技术尚未完全突破,与传统的控制相比,在以后的研究中需要结合地质构造信息、设备异常状态信息等,为智采工作面的智能控制与运维管理提供反馈。

### 参考文献(References):

[1] 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, ZHNAG Fan, WANG Shibo, et al. Digital twin for smart coal mining workplace: Technological frame and construction[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1925-1936.

[2] 王飞跃.平行控制与数字孪生:经典控制理论的回顾与重铸[J].智能科学与技术学报,2020,2(3):293-300.

WANG Feiyue. Parallel control and digital twins: control theory revisited and reshaped[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2020, 2(3): 293-300.

[3] 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.

[4] 张帆,葛世荣.矿山数字孪生构建方法与演化机理[J].煤炭学报,2023,48(1):510-522.

ZHANG Fan, GE Shirong. Construction method and evolution mechanism of mine digital twins[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 510-522.

[5] 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(S1):334-344.

GUO Yanan, YANG Fan, GE Shirong, et al. Knowledge-driven digital twin active management and control mode of intelligent mining[J].

- Journal of China Coal Society, 2023, 48(S1): 334–344.
- [6] 谢嘉成, 王学文, 杨兆建. 基于数字孪生的综采工作面生产系统设计及运行模式[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1381–1391.  
XIE Jiacheng, WANG Xuewen, YANG Zhaojian. Design and operation mode of production system of fully mechanized coal mining face based on digital twin theory[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1381–1391.
- [7] YANG T M, XIONG S B. Neural network based online self-learning adaptive PID control for automatic ranging cutting height of shearer[C]//Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Beijing: IEEE, 2002: 857–859.
- [8] 王雅东, 赵丽娟, 张美晨. 采煤机自适应调高控制策略[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3505–3522.  
WANG Yadong, ZHAO Lijuan, ZHANG Meichen. Research on self-adaptive height adjustment control strategy of shearer[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3505–3522.
- [9] LI Xiaohuo, HU Yantao, CHI Qingdi, et al. Constant power speed-adjusting of shearer cutting motor by single neuron self-adaptive PID controlling[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 190: 856–859.
- [10] 葛帅帅, 秦大同, 胡明辉. 突变工况下滚筒式采煤机调速控制策略研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2569–2578.  
GE Shuaishuai, QIN Datong, HU Minghui. Research on drum shearer speed control strategies under impact conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2569–2578.
- [11] 葛帅帅, 秦大同, 胡明辉, 等. 基于自抗扰转矩补偿的采煤机截割传动系统动载荷主动控制[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 31–40.  
GE Shuaishuai, QIN Datong, HU Minghui, et al. Active control on dynamic loads of the drum shearer cutting transmission system based on active disturbance rejection torque compensation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(15): 31–40.
- [12] TAN C, XU R, WANG Z, et al. An improved genetic fuzzy logic control method to reduce the enlargement of coal floor deformation in shearer memory cutting process[J]. Comput Intell Neurosci, 2016, 2016: 3973627.
- [13] LIU Y G, HOU L L, QIN D T, et al. Self-adaptive control of shearer based on cutting resistance recognition[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9): 3553–3561.
- [14] LI X, ZHU Y H, ZHENG H, et al. Adaptive sliding mode control for hydraulic support robot based on reaching law[C]//2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Honolulu, HI, USA. IEEE, 2017: 914–919.
- [15] GUO Y N, ZHANG Z, LIU Q Y, et al. Decoupling-based adaptive sliding-mode synchro-position control for a dual-cylinder driven hydraulic support with different pipelines[J]. ISA Transactions, 2022, 123: 357–371.
- [16] SHI J G, MAO J, WEI X H. Research on dynamic tension control theory for heavy scraper conveyor[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 34-35: 1956–1960.
- [17] WANG H J, ZHANG Q, XIE F. Dynamic tension test and intelligent coordinated control system of a heavy scraper conveyor[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(7): 871–877.
- [18] LU E, LI W, YANG X F, et al. Composite sliding mode control of a permanent magnet direct-driven system for a mining scraper conveyor[J]. IEEE Access, 2017, 5: 22399–22408.
- [19] 毛君, 曹昊, 谢苗, 等. 刮板输送机双机变频驱动功率平衡控制研究[J]. 控制工程, 2017, 24(12): 2520–2525.  
MAO Jun, CAO Hao, XIE Miao, et al. Research of power balance control for double-motor frequency-conversion drive of scraper conveyors[J]. Control Engineering of China, 2017, 24(12): 2520–2525.
- [20] JU J Y, LI W, WANG Y Q, et al. Dynamics and nonlinear feedback control for torsional vibration bifurcation in main transmission system of scraper conveyor direct-driven by high-power PMSM[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 93(2): 307–321.
- [21] 李森. 基于惯性导航的工作面直线度测控与定位技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 169–174.  
LI Sen. Measurement & control and localisation for fully-mechanized working face alignment based on inertial navigation[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 169–174.
- [22] ZHAO Shuanfeng, ZHAO Jiaojiao, LU Zhengxiong, et al. Data-driven cooperative control model of shearer-scraper conveyor based on rough set theory[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 811648.
- [23] GUO Y N, HUANG Y, GE S R, et al. Low-carbon routing based on improved artificial bee colony algorithm for electric trackless rubber-tired vehicles[J]. Complex System Modeling and Simulation, 2023, 3(3): 169–190.
- [24] 丁黎, 夏水斌, 魏伟, 等. 数据与知识融合的电能表故障关联模型研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 206–211.  
DING Li, XIA Shuibin, WEI Wei, et al. Research on electric energy meter fault correlation model based on data and knowledge fusion[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 206–211.
- [25] 赵丽娟, 王雅东, 张美晨, 等. 复杂煤层条件下采煤机自适应截割控制策略[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 541–563.  
ZHAO Lijuan, WANG Yadong, ZHANG Meichen, et al. Research on self-adaptive cutting control strategy of shearer in complex coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 541–563.
- [26] 牛剑峰. 综采液压支架跟机自动化智能化控制系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 85–91.  
NIU Jianfeng. Study on automatic and intelligent following control system of hydraulic powered support in fully-mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 85–91.
- [27] 董立红. 基于卡尔曼滤波的刮板输送机张力控制系统[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(4): 186–190.  
DONG Lihong. Tension control system of scraper conveyor based on Kalman filter[J]. Computer Engineering & Science, 2013, 35(4): 186–190.