



## 基于数字孪生的液压支架群跟机工艺虚拟调试方法

李娟莉 郭清杰 高波 边强 王冬波

### 引用本文:

李娟莉, 郭清杰, 高波, 等. 基于数字孪生的液压支架群跟机工艺虚拟调试方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 197–205.  
LI Juanli, GUO Qingjie, GAO Bo. Virtual debugging method of hydraulic support group following machine process based on digital twin[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 197–205.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1210>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 综采工作面煤层装备联合虚拟仿真技术构想与实践

Technical conception and practice of joint virtual simulation for coal seam and equipment in fully-mechanized coal mining face  
煤炭科学技术. 2019(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/879ab5fb-87cb-4dd1-9d16-277e5258e99c>

#### 虚拟现实技术在煤矿领域的研究现状及展望

Research status and prospect of virtual reality technology in field of coal mine  
煤炭科学技术. 2019(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b493c5f1-43b8-4242-a9e7-7a84bd67b3b9>

#### 考虑销轴间隙的液压支架运动虚拟仿真方法

Virtual simulation method of hydraulic support motion considering pin shaft clearance  
煤炭科学技术. 2021, 49(2): 186–193 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.022>

#### 基于真实煤层环境的液压支架运动虚拟仿真方法

Virtual simulation method of hydraulic support movement based on real coal seam environment  
煤炭科学技术. 2020, 48(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/dc641a2c-efa4-4016-a4a1-f45d9ce46520>

#### 基于工业元宇宙的综采工作面虚实融合运行模式初步探索

Preliminary research on the operation mode of virtual-real integration in fully-mechanized mining face based on industrial metaverse  
煤炭科学技术. 2023, 51(10): 266–279 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1864>

#### 悬臂式掘进机远程虚拟操控系统研究

Research on Remote Virtual Control System of Cantilever Roadheader  
煤炭科学技术. 2020, 48(11): 44–51 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/79b43aa8-1ba4-4080-8fa2-ab7b504a2f3d>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李娟莉, 郭清杰, 高 波, 等. 基于数字孪生的液压支架群跟机工艺虚拟调试方法[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(6): 197–205.

LI Juanli, GUO Qingjie, GAO Bo, *et al.* Virtual debugging method of hydraulic support group following machine process based on digital twin[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(6): 197–205.

## 基于数字孪生的液压支架群跟机工艺虚拟调试方法

李娟莉<sup>1,2</sup>, 郭清杰<sup>1,2</sup>, 高 波<sup>3</sup>, 边 强<sup>4</sup>, 王冬波<sup>4</sup>

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024; 2. 煤矿综采装备山西省重点实验室, 山西 太原 030024; 3. 山西科达自控股份有限公司, 山西 太原 030006; 4. 晋能控股煤业集团 同忻煤矿山西有限公司, 山西 大同 037000)

**摘 要:** 针对物理综采工作面“三机”跟机自动化工艺参数调试周期长, 费用成本高, 以及工作环境搭建困难等问题, 基于数字孪生技术, 研究了液压支架群跟机行为工艺虚拟调试关键技术。首先基于现代建模技术构建了 1:1 构综采“三机”孪生体, 利用虚拟现实引擎对综采“三机”运动单元进行了虚拟重构和虚拟仿真; 然后基于现代设计理论, 依据“三机”协同原则实现了跟机自动化过程中的不同参数配置, 建立了采煤工艺的支架行为工艺决策模型和支运装备直线度协同控制模型, 并在虚拟场景中对决策模型进行预演; 最后利用 TCP 协议建立了虚实交互通道, 通过半实物仿真试验对决策模型进行了验证。结果表明: 虚拟场景在执行采煤工艺时可对物理工作面场景进行精准复现, 通过支架群行为决策模型可提前对液压支架工艺行为进行决策规划, 通过反向控制试验可对支架控制器进行实时虚实交互, 有望克服井下调试环境阻碍, 对综采“三机”电液控程序的合理制定与修正提供参考价值。

**关键词:** 虚拟现实; 虚拟调试; 液压支架群; “三机”协同; 行为决策

**中图分类号:** TD171

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-2336(2024)06-0197-09

### Virtual debugging method of hydraulic support group following machine process based on digital twin

LI Juanli<sup>1,2</sup>, GUO Qingjie<sup>1,2</sup>, GAO Bo<sup>3</sup>, BIAN Qiang<sup>4</sup>, WANG Dongbo<sup>4</sup>

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Key Laboratory of Fully Mechanized Coal Mining Equipment of Shanxi Province, Taiyuan 030024, China; 3. Shanxi Keda Automatic Control Co., Ltd., Taiyuan 030006, China; 4. Jinneng Holding Coal Industry Group Tongxin Mining Shanxi Co., Ltd., Datong 037000, China)

**Abstract:** In view of the problems such as long period of automatic process parameter debugging, high cost and difficult construction of working environment, the key technology of virtual process debugging of hydraulic support group process is studied based on digital twin technology. Firstly, based on modern modeling technology, a 1:1 twin of three fully-mechanized mining machines was constructed, and virtual reconstruction and simulation of the three mechanized mining machines were carried out by virtual reality engine. Then, based on the modern design theory and the principle of three-machine collaboration, different parameters in the automatic process of the following machine are configured, and the decision-making model of the support behavior of the coal mining process is established, and the decision-making model is rehearsed in the virtual scene. Finally, the virtual and real interaction channel is established by TCP protocol, and the decision model is verified by semi-physical simulation experiment. The results show that the virtual scene can accurately reproduce the physical working face scene in the implementation of coal mining technology, the support group behavior decision model can be used to make decision planning of the hydraulic support process behavior in advance, and the real-time virtual-real interaction of the support controller can be carried out through the reverse control experiment. It is expected to overcome the obstacles of underground commissioning environment and provide useful reference value for the reasonable formulation and revision of hydraulic control program of the third mechanized mining machine.

收稿日期: 2023-08-24

责任编辑: 周子博

DOI: 10.12438/cst.2023-1210

基金项目: 山西省基础研究计划面上资助项目 (202303021211044); 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”资助项目 (202101020101021)

作者简介: 李娟莉 (1979—), 女, 山西寿阳人, 教授, 博士。E-mail: lijuanli@tyut.edu.cn

**Key words:** virtual reality; virtual debugging; hydraulic support group; three machine collaboration of fully-mechanized mining equipment; behavior decisions

## 0 引言

煤炭工业高质量发展与智慧矿山的建立密不可分<sup>[1-3]</sup>。随着国家政策的引导和工业 4.0 的发展,推动矿山智能化建设是响应国家号召数字化绿色化协同转型的重要举措,数字孪生技术是不可或缺的一部分<sup>[4-6]</sup>。数字孪生是实现物理信息融合的重要手段,虚拟现实技术与智能协同控制技术在矿山机械方面已经快速应用并取得重多进步<sup>[7-8]</sup>。数字孪生智采工作面涵盖物理场景、数字场景以及数据信息交互模块等要素,已在智慧矿山等工业领域中孕育出大量新技术和新模式,将大幅加深与推动智能制造与工业互联网融合与发展<sup>[9-10]</sup>。

由于综采“三机”井下工作煤层环境复杂、设备众多、工艺流程繁琐等原因,物理工作面对跟机自动化电液控程序调试难度巨大或者为保证生产根本无法进行调试。通过虚拟现实技术对工作面进行虚拟重构并结合支架跟机行为决策模型对不同工艺参数进行预演仿真,可以很好地克服以上不足。从而指导实际电液控程序进行修补与完善。

雷晓荣等<sup>[11]</sup>运用数字孪生技术构建了高精度、高保真的煤层地质环境和综采设备模型并实现了实时数据驱动的物理工作面与虚拟场景之间的同步映射。刘清等<sup>[12]</sup>针对采煤工作面数字孪生模型单一,对“三机”耦合模型分析较少的问题,提出了综采“三机”数字孪生协同建模方法。采用智能体建模方法建立“三机”协同智能体,并采用离散事件建模方法构建“三机”协同工艺模型,建立“三机”协同工艺时序表。王学文等<sup>[13]</sup>针对虚拟场景的综采装备数字模型构建、虚实交互、数字模型驱动三大基础问题,提出了面向综采工作面的实时虚拟监测方法,对综采“三机”装备联合协同规划,构建实时信息“虚实融合”通道等手段提高虚拟仿真的可靠性。Hengbo Shi 等<sup>[14]</sup>针对综采工作面工作效率低、策略制定与评价困难的问题,建立了“三机”协同开采液压支架子跟踪数学模型,实现了“三机”协调运行。李娟莉等<sup>[15]</sup>针对综采装备可视化数据监测中数据量大而导致单台主机性能消耗大而无法完成传感器数据处理等复杂任务问题。提出并实现了基于实时运行数据驱动的分布式液压支架群虚拟检测方法,减小主机内存运行压力提高了数据监测的稳定性。李亚飞等<sup>[16]</sup>

针对液压支架电液控制系统可靠性差,设备维护困难等问题,设计了液压支架控制程序,更改程序中不同参数对控制器、动力系统控制,提高物理工作面的安全性与高效性。郭向阳等<sup>[17]</sup>提出数字孪生的智慧煤矿安全管控平台理念设计并构建了监测信息管理、风险综合研判、风险管控决策专家库和安全风险综合展现 4 个子系统来提高煤矿安全管控水平。苗丙等<sup>[18]</sup>为实现综采工作面的全面感知、采煤装备信息实时互联、工艺分析决策、行为自主学习、环境动态预测以及“三机”装备协同控制,建立了数字孪生智采工作面系统的整体框架。

上述研究虽然对虚拟综采装备的数字模型以及工作面的架构进行了研究,但缺少进一步对孪生体装配方法和综采“三机”各运动单元的协同运动关系决策逻辑分析<sup>[19]</sup>以及虚实交互的方法分析。针对以上不足,基于数字孪生技术通过物理引擎对运动单元进行仿真装配;通过虚拟感知技术对液压支架群动作进行参数化分析并建立工艺行为决策模型,并通过上位机对物理电液控进行反向控制。为综采“三机”行为参数化协同配置,以及模拟参数变量验证提供了新思路。

## 1 液压支架群调试系统框架

液压支架群调试系统主要包括物理样机模型,煤层虚拟环境和虚拟调试控制 3 部分。主要为物理样机模型,根据 CAD 图纸对样机模型进行三维建模,读取真实煤层顶底板数据构建煤层,再对物理样机电液控程序进行克隆;虚拟场景,在虚拟场景中设置 GUI 人机交互界面,利用底层脚本对虚拟模型进行驱动,使虚拟样机产生相应的工艺动作;虚拟调试,在虚拟场景中设置不同煤层环境条件进行仿真,采集虚拟传感器数值对数据分析运算来分析程序中存在的错误,以及指导综采现场液压支架位姿调整,支运装备直线度调整等。液压支架群电液控制系统的虚拟调试与决策如图 1 所示。

## 2 综采工作面液压支架群虚拟重构

以某矿采煤工作面为研究对象,为放顶煤工作面,现场如图 2 所示,该工作面配置见表 1。根据真实场景中的的装备型号以及数量配置以 1:1 比例,对虚拟场景进行构建。



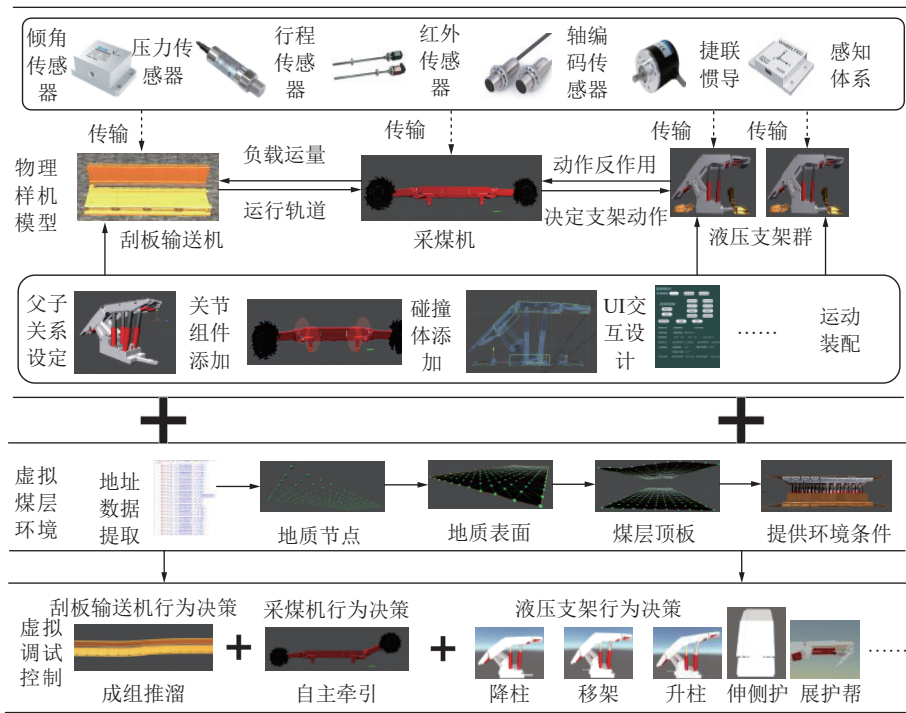


图 1 液压支架群电液控虚拟调试技术框架

Fig.1 Hydraulic support group electrohydraulic control virtual debugging technology frame



图 2 综采工作面现场

Fig.2 Site of fully-mechanized mining face

表 1 工作面设备配置

Table 1 Equipment configuration of fully-mechanized mining face

| 装备类型     | 型号               | 数量  |
|----------|------------------|-----|
| 端头支架     | ZTZ20000/28.5/42 | 1   |
| 过渡支架(机头) | ZF13000/27.5/42H | 5   |
| 过渡支架(机尾) | ZF13000/27.5/42H | 4   |
| 中部支架     | ZF15000/27.5/42  | 108 |
| 前部刮板输送机  | JT AFC1050       | 1   |
| 后部刮板输送机  | JT AFC1050       | 1   |
| 转载机      | JBSL600          | 1   |
| 破碎机      | JCRSH400         | 1   |
| 带式输送机    | DSJ140/3×630     | 1   |
| 采煤机      | Eickhoff SL-500  | 1   |

基于物理引擎的虚拟综采装备场景构建主要包括基于物理引擎构建装配孪生体和虚拟综采装备仿真运动与控制两大步骤,其构建过程如图 3 所示。

综采工作面虚拟预演场景如图 4 所示。通过虚拟重构、虚拟传感体系装配、以及 UGUI 人机界面交互设计等,保证虚拟预演场景的精准性与高保真性,方便对接下来跟机行为决策行为进行预演。

3 复杂环境下支架群行为决策模型构建

支架群自协同是无人化开采的核心技术<sup>[20]</sup>,在生产环境复杂和设备众多的工作条件下,综采“三机”必须精准无误配合,及时对所做工艺动作进行准确无误决策。自动控制下支架行为决策主要由采煤机运行参数决定,物理工作面通过红外对射传感器对采煤机位置进行共享,支架通过对采煤机位置进行感知,对本身支架动作进行决策。

3.1 液压支架群工艺决策分析

经现场考察,首先对工作面采煤工艺进行分析,见表 2。放煤工艺要求为:推刮板输送机与放煤互不影响,放煤须在移架之后,过渡支架偶尔会放煤。放煤时支架成组动作(尾梁交错微幅摆动),动作完成后尾梁恢复初始位置。成组放煤目的是减小漏斗效应,防止煤层结构坍塌破坏,减少落入刮板输送机槽的矸石数量,提高放顶煤工作效率,其跟机行为如

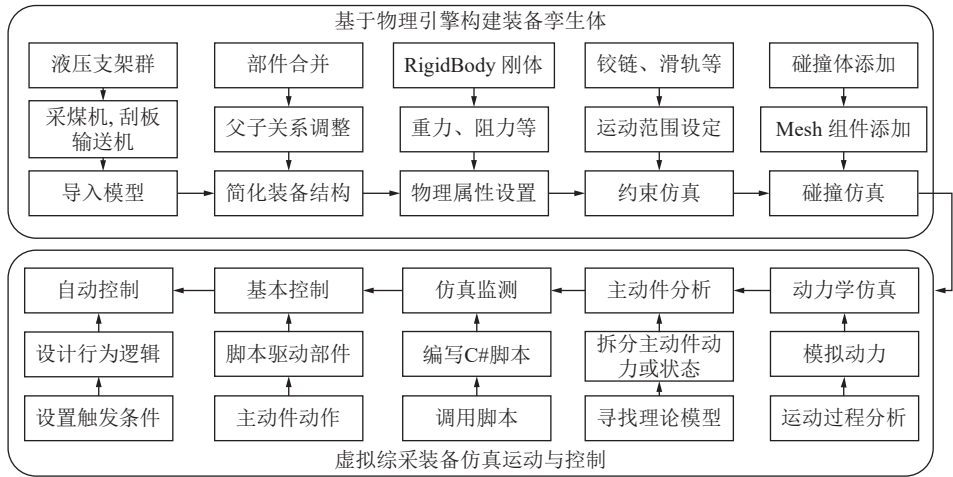


图3 虚拟综采场景构建过程  
Fig.3 Construction process of virtual full-mechanized mining scene

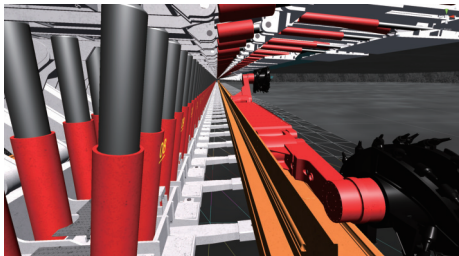


图4 综采工作面虚拟预演场景  
Fig.4 Virtual rehearsal scene of fully-mechanized mining face

图5所示。

3.2 建立液压支架群工艺动作决策数学模型

液压支架、刮板输送机以采煤机的位置与速度为动作依据为采煤机的状态进行做出决策反应，综采“三机”通过协同配合完成生产目标。液压支架跟

表2 采煤工艺流程  
Table 2 Coal mining process flow

| 工艺序号 | 执行工艺                  | 工艺序号 | 执行工艺                |
|------|-----------------------|------|---------------------|
| 01   | (一刀开始)采煤机行走           | 07   | 采煤机前后滚筒下放           |
| 02   | 后滚筒后1~2支架降移升          | 08   | 采煤机来回扫地2~3次         |
| 03   | 执行降移升后，伸缩梁伸且打开护帮板     | 09   | 斜切进刀割三角煤(留出刮板输送机空间) |
| 04   | 成组推刮板输送机(后滚筒超过约10台支架) | 10   | 采煤机前后滚筒下放           |
| 05   | 成组放煤(成组推刮板输送机后的支架)    | 11   | 采煤机来回扫地2~3次         |
| 06   | 采煤机行至支架尾部             | 12   | 调整前后滚筒高度(准备下一刀)     |

机行为时各主要动作时间见表3。  
为方便分析对以下决策相关变量进行分析，对

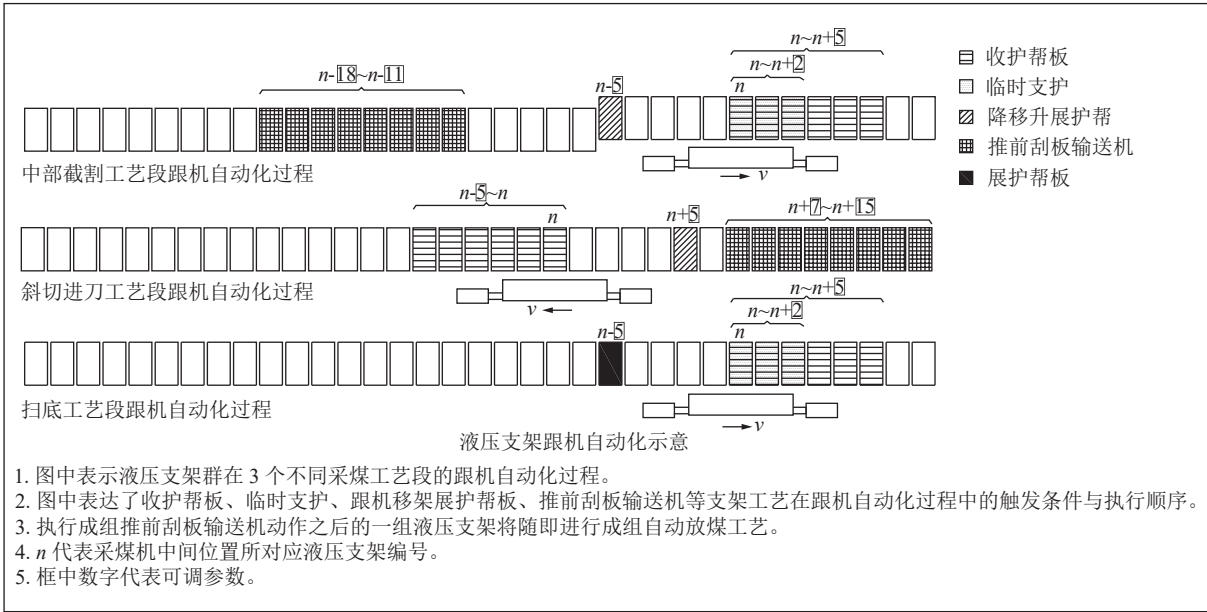


表3 液压支架动作时间符号  
Table 3 Hydraulic support action time symbol

| 动作        | 符号    | 动作           | 符号    |
|-----------|-------|--------------|-------|
| 液压支架收护帮   | $t_1$ | 液压支架升柱       | $t_5$ |
| 液压支架伸缩梁伸出 | $t_2$ | 液压支架展护帮      | $t_6$ |
| 液压支架降柱    | $t_3$ | 液压支架成组推刮板输送机 | $t_7$ |
| 液压支架拉架    | $t_4$ | —            | —     |

下列用到变量进行定义,采煤机速度 $v_h$ ;红外对射传感器监测到的采煤机对应液压支架位置架号 $i$ ;液压支架垂直于推进方向的宽度 $d$ ;相邻液压支架的间垂直于推进方向的平均距离为定值 $\Delta d$ 。以上所需变量均可在虚拟场景中精准获取。

1) 液压支架收护帮板架号决策。液压支架护帮板与采煤机配合条件为在前滚筒在不割到支架的前提下尽量减少煤壁的暴露面积。设采煤机截割滚筒与液压支架护帮板在沿采煤机行走方向上的安全距离设为 $L_s$ ;则采煤机前滚筒与液压支架护帮板之间的安全距离所包含的支架数为 $\Delta n$ ,如式(1)所示。

$$\Delta n = \frac{L_s - (\Delta n - 1)\Delta d}{d} \quad (1)$$

当采煤机与护帮板配合临界运行速度 $v_h \leq \frac{(d + \Delta d)}{t_1}$ 时,则支架收护帮的频率为 $f_h = \frac{v_h}{(d + \Delta d)}$ ,设此时收护帮板的架号为 $N_a$ ,如式(2)所示。

$$N_a = i + \Delta n + 1 \quad (2)$$

当采煤机与护帮板配合临界运行速度 $v_h > \frac{(d + \Delta d)}{t_1}$ 时,则采煤机经过一台支架式发出的收护帮频率为 $f_h = \frac{v_h t_1}{(d + \Delta d)}$ ,则设此时收护帮板的架号为 $N_a$ ,如式(3)所示。

$$N_a = \{x | i + \Delta n + 1 \leq x \leq i + \Delta n + f_h + 1, x \in Z\} \quad (3)$$

2) 液压支架临时支护架号决策。为保证煤层顶板的稳定性与完整性,防止前滚筒截割过后煤层顶板出现煤块垮落,需要对支架伸缩梁需要进行临时支护工艺保证煤层顶板结构的完整性。设采煤机截割滚筒与液压支架护帮板在沿采煤机行走方向上的安全距离设为 $L_1$ ;则采煤机前滚筒与液压支架护帮板之间的安全距离所包含的支架数为 $\Delta l$ ,如式(4)所示。

$$\Delta l = \frac{L_1 - (\Delta l - 1)\Delta d}{d} \quad (4)$$

当采煤机与护帮板配合临界运行速度 $v_1 \leq \frac{(d + \Delta d)}{t_2}$ 时,则支架收护帮的频率为 $f_1 = \frac{v_1}{(d + \Delta d)}$ ,设此时收护帮板的架号为 $N_l$ ,如式(5)所示。

$$N_l = i + \Delta n + 1 \quad (5)$$

当采煤机与护帮板配合临界运行速度 $v_1 > \frac{(d + \Delta d)}{t_2}$ 时,则采煤机经过一台支架式发出的收护帮频率为 $f_1 = \frac{v_1 t_2}{(d + \Delta d)}$ ,则设此时收护帮板的架号为 $N_l$ ,如式(6)所示。

$$N_l = \{x | i + \Delta l + 1 \leq x \leq i + \Delta l + f_1 + 1, x \in Z\} \quad (6)$$

3) 液压支架跟机架号决策。液压支架架身与采煤机的配合条件为在后滚筒不截割到支架的前提下尽量减少煤层直接顶的暴露面积。设采煤机后滚筒与液压支架跟机间隔数为。

当采煤机与架身配合小于临界运行速度 $v_g \leq \frac{(d + \Delta d)}{t_3 + t_4 + t_5 + t_6}$ 时,则支架移架频率为 $f_g = \frac{t_3 + t_4 + t_5 + t_6}{(d + \Delta d)}$ ,设此时跟机架号为 $N_g$ ,如式(7)所示。

$$N_g = i - \Delta m - 1 \quad (7)$$

当采煤机与架身配合大于临界运行速度 $v_g > \frac{(d + \Delta d)}{t_3 + t_4 + t_5 + t_6}$ 时,则支架移架频率为 $f_g = \frac{v_g (t_3 + t_4 + t_5 + t_6)}{(d + \Delta d)}$ ,设此时跟机架号为 $N_g$ ,如式(8)所示。

$$N_g = \{x | i - \Delta m - 1 \leq x \leq i + \Delta m + f_g - 1, x \in Z\} \quad (8)$$

4) 液压支架推刮板输送机架号决策。液压支架在跟机自动化时执行成组推刮板输送机,根据综采工作面“三直一平两畅通”标准,工作溜平直,即工作溜在一水平面内,工作溜成一直线;除遇到地质构造随之变化外。设支架总数为 $n$ ,支架成组推刮板输送机架数为 $\Delta b$ ,推刮板输送机间隔为 $\Delta p$ ,为保证工作溜平直即保证两次成组推刮板输送机连接处的平直度,当在执行第 $i (i \geq 1)$ 次推刮板输送机时第 $i - 1$ 次推刮板输送机的最后一台支架参与第 $i$ 组推刮板输送机工艺,则支架推刮板输送机次数 $N_p = \frac{n - \Delta p}{\Delta b - 2} - 1$ ,当达到推刮板输送机条件 $i \geq 6 + \Delta b + (\Delta b - 2)j + \Delta p$ , ( $j = 1, 2, 3, \dots, N_p$ )时,液压支架成组推刮板输送机架号为 $N_{ap}$ ,如式(9)所示。

$$N_{ap} = \{x | i - \Delta p - (\Delta b - 1) - 1 \leq x \leq i - \Delta p - 1, x \in Z\} \quad (9)$$

5) 液压支架放煤架号决策。由于人工的操作的缺陷不规范,不标准,容易提前放空顶煤产生漏斗,为杜绝顶煤超前放空,导致顶板破碎形成“拱”形,放煤工艺应在推刮板输送机工艺之后。为实现精准放煤,每组支架中奇数架先行动作,完成之后偶数架在继续动作,按照此顺序,依此往复,直至放完。放煤架号与推刮板输送机架号相同且放煤工艺紧跟随推

刮板输送机工艺之后,液压支架成组放煤架号 $N_{af}$ ,如式(10)和(11)所示。

第一轮放煤

$$N_{af} = \{x | i - \Delta p - (\Delta b - 1) - 1 \leq x \leq i - \Delta p - 1, x \in Z\} \\ \text{且 } N_{af} \in \{x | x = 2n + 1, n \in Z\}$$

(10)

第二轮放煤

$$N_{af} = \{x | i - \Delta p - (\Delta b - 1) - 1 \leq x \leq i - \Delta p - 1, x \in Z\} \\ \text{且 } N_{af} \in \{x | x = 2n, n \in Z\}$$

(11)

### 3.3 支运装备直线度协同控制决策数学模型构建

根据在进行液压支架推刮板输送机架号决策所提到的综采工作面质量管理标准,中部支架与刮板输送机的直线度是否达标对综采工作面质量有着重大影响。因为支架推杆在执行推刮板输送机工艺为成组动作,所以各个推杆的具体推移量为定值,不能够对各个推杆进行精细把控;而移架工艺为单台支架控制动作,因此在支架工作过程只能通过调节支架的直线度来控制刮板输送机的直线度。刮板输送

机的直线度由支架的直线度决定,支运装备推进过程如图6所示。

曲线 $YL_n$ 代表液压支架当前第 $n$ 刀实际轨迹,双点划线 $Ym_n$ 代表时的预测目标直线, $\beta_n$ 代表当前直线度, $YD_n$ 代表当前支架最滞后点, $YZ_n$ 代表支架滞后点所在直线,工作面的推进步距为 $H$ ,即第 $n+1$ 刀预测目标直线 $Ym_{n+1} = YZ_n + H$ ,第 $i$ 台支架的移架补偿量为 $\Delta x_i$ ,则第 $i$ 台支架的拉架量 $y_i = H - \Delta x_i$ ,由此保证液压支架与刮板输送机中部槽的直线度。

## 4 系统决策预演与半实物集成控制

### 4.1 液压支架群仿真工艺决策系统实现

为验证决策模型的可靠性与准确性,在虚拟场景中对决策模型进行预演。利用C#脚本,导入并调用动态数据库,将液压支架群工艺决策数学模型植入代码,在虚拟场景中添加不同物理组件与UI交互组件,通过传感器对综采“三机”进行实时监测感知,对其物理引擎进行控制。通过控制采煤机的运

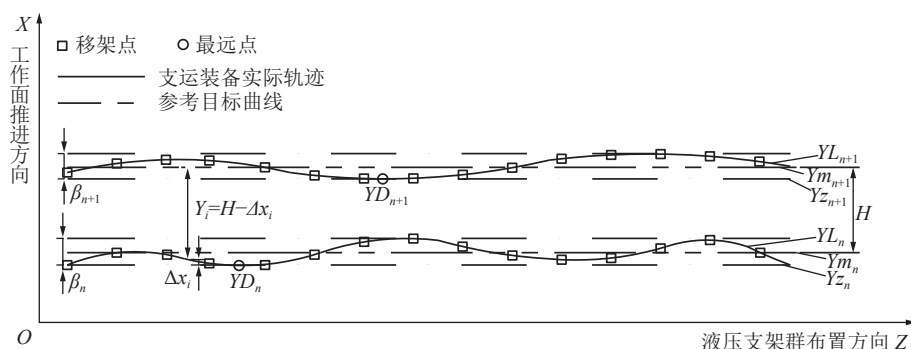


图6 综采支运装备推进示意

Fig.6 Schematic of fully-mechanized mining support and transport equipment

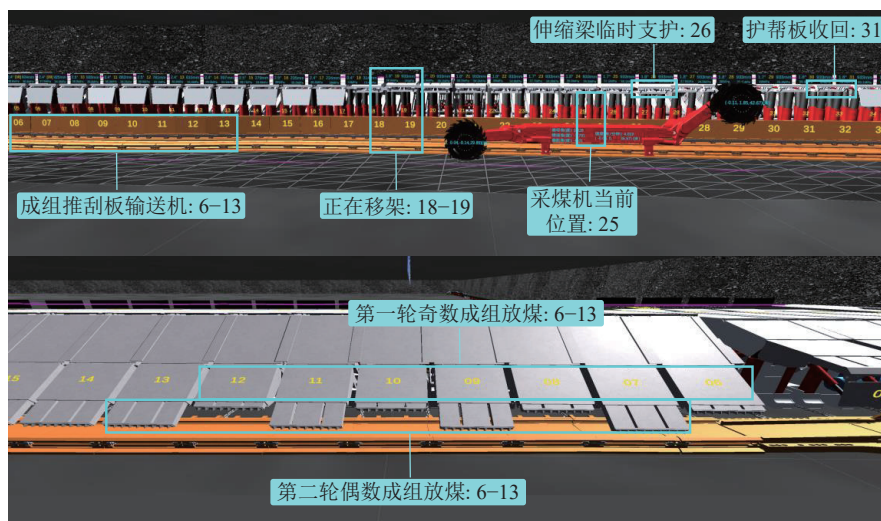


图7 跟机行为决策预演场景

Fig.7 Follow the machine automated behavior decision rehearsal scenario



行速度与位置来对支架群工艺动作进行仿真决策来验证决策结果的可靠度与准确性。其虚拟预演场景如图7所示。

根据矿上提供8311工作面作业规程,液压支架跟采煤机行走方向宽度 $d = 1.55$  m、相邻液压支架间的平均距离初始值 $\Delta d = 0.2$  m;采煤机机身中心位置与护帮板的安全距离 $L_s = 8.7$  m、采煤机机身中心位置与支架跟机安全距离 $L_g = 8.5$  m、采煤机机身中心位置与护帮板的安全距离 $L_l = 1$  m;支架执行收护帮板和伸伸缩梁的动作时长为 $t_1 = t_2 = 3$  s、支架降移时间 $t_3 + t_4 + t_5 + t_6 = 30$  s、成组推刮板输送机时间 $t_7 = 7$  s;以跟机速度 $v_h = 4$  m/min进行分析。

1)收护帮板工艺支架号。护帮板与采煤机的安全支架间隔支架数目为

$$\Delta n = \frac{L_s + \Delta d}{d + \Delta d} = \frac{8.7 + 0.2}{1.55 + 0.2} \approx 5$$

执行收护帮板的跟机临界速度为

$$v_1 = \frac{d + \Delta d}{t_1} = \frac{(1.55 + 0.2) \times 60}{3} = 35 \text{ m/min}$$

则 $v_h < v_1$ ,则收护帮频率为

$$f_h = \frac{v_h}{d + \Delta d} = \frac{4/60}{1.55 + 0.2} \approx 0.038 < 1$$

支架发出的收护帮指令的频率小于1,收护帮板的支架数量为1,当采煤机行驶至第25台支架时,则收护帮板架号为

$$N_a = i + \Delta n + 1 = 25 + 5 + 1 = 31$$

2)临时支护工艺架号决策。伸缩梁与采煤机的安全支架间隔支架数目为

$$\Delta l = \frac{L_l + \Delta d}{d + \Delta d} = \frac{1 + 0.2}{1.55 + 0.2} \approx 1$$

执行伸伸缩梁的跟机临界速度为

$$v_2 = \frac{d + \Delta d}{t_2} = \frac{(1.55 + 0.2) \times 60}{3} = 35 \text{ m/min}$$

则 $v_h < v_1$ ,则伸伸缩梁频率为

$$f_h = \frac{v_h}{d + \Delta d} = \frac{4/60}{1.55 + 0.2} \approx 0.038 < 1$$

支架发出的伸伸缩梁指令的频率小于1,伸伸缩梁的支架数量为1,当采煤机行驶至第36台支架时,则伸伸缩梁架号为:

$$N_l = i + \Delta l + 1 = 25 + 1 + 1 = 27$$

3)支架跟机工艺决策。同理,与收护帮板和临时支护工艺一样,支架跟机与采煤机间隔的安全支架间隔支架数目为 $\Delta m \approx 5$ ,跟机的临界速度 $v_3 = 3.5$  m/min;采煤机速度大于跟机的临界速度,支架发出的跟机指令频率 $f_g = 1.14$ ,因为 $1 < f_g < 2$ 所以

跟机架数为2,当采煤机行驶至25台支架时,跟机架号为 $N_g = \{x | 18 \leq x \leq 19, x \in Z\}$ 。

4)液压支架推刮板输送机工艺决策。6号至113号支架为中间支架,即中部支架总数为 $n = 108$ ,成组推刮板输送机架数 $\Delta b = 8$ ,推刮板输送机间隔为 $\Delta p = 10$ 架。

推刮板输送机次数为

$$N_p = \frac{n - \Delta p}{\Delta b - 2} - 1 = \frac{113 - 6 + 1 - 10}{8 - 2} - 1 \approx 15$$

执行推刮板输送机工艺时的采煤机临界速度为

$$v_4 = \frac{6 \times 1.55 + 5 \times 1 \times 0.2}{7} \approx 1.47 \text{ m/s} = 88.3 \text{ m/min}$$

可得, $v_h = 4$  m/min  $< v_3$ ,  $f_g < 1$ ,因此采煤机在此跟机速度下,执行推刮板输送机为1组。

当执行推刮板输送机时采煤机位置支架号为

$$i \geq 6 + 8 + (8 - 2) \times j + 10, (j = 0, 1, 2 \dots N_p)$$

液压支架执行推刮板输送机架号为

$$N_{ap} = \{x | 6 \leq x \leq 13, x \in Z\}$$

5)液压支架放煤架号决策

第一轮放煤架号:

$$N_{af} = \{x | 6 \leq x \leq 13, x \in Z\} \text{ 且}$$

$$N_{af} \in \{x | x = 2n + 1, n \in Z\}$$

第二轮放煤架号:

$$N_{af} = \{x | 6 \leq x \leq 13, x \in Z\} \text{ 且}$$

$$N_{af} \in \{x | x = 2n, n \in Z\}$$

在决策模型中分别对跟机速度4、8 m/min,采煤机牵引方向均为上行,对液压支架跟机自动化决策数学模型进行测试。由于支架数量较大,为方便统计与汇总,从第一次执行成组推刮板输送机动作左右进行统计,单位为架号。统计结果见表4和表5,其分别表示采煤机运行至对应架号时,不同支架所对应的执行工艺,“—”表示不执行。

经在虚拟场景中进行仿真预演测试,在跟机自动化过程中液压支架群可以通过各种传感器配合依据采煤机的位置与姿态及时且准确的进行工艺决策,各运动单元决策结果的可靠性与准确性可以保证。

#### 4.2 支运装备直线度协同控制实现

如图8所示,直线为液压支架群和刮板输送机当前拟合轨迹,虚线为支架与刮板输送机下一刀目标拟合轨迹。在虚拟场景中获取支架液压支架群底座的局部坐标,运用LineRender技术为液压支架群拟合轨迹,求解当前支架群直线度、当前支架最滞点以及下一刀预测理想轨迹,在设定好下一刀目标直线度与步长确定的情况下即可计算出各支架在执行移架工艺时的具体移架量。



表4 采煤机速度为4 m/min支架工艺架号

Table 4 Shearer speed is 4 meters per minute support process frame number

| 支架工艺架号 |          |       |          |        |               |               |
|--------|----------|-------|----------|--------|---------------|---------------|
| 采煤机    | 收护临时帮板支护 | 支架降移升 | 成组推刮板输送机 | 第一轮放煤  | 第二轮放煤         |               |
| 24     | 30       | 26    | 17—18    | —      | —             | —             |
| 25     | 31       | 27    | 18—19    | 6—13   | 6,8,10,12     | 7,9,11,13     |
| 26     | 32       | 28    | 19—20    | —      | —             | —             |
| 27     | 33       | 29    | 20—21    | —      | —             | —             |
| 28     | 34       | 30    | 21—22    | —      | —             | —             |
| 29     | 35       | 31    | 22—23    | —      | —             | —             |
| 30     | 36       | 32    | 23—24    | —      | —             | —             |
| 31     | 37       | 33    | 24—25    | 12—19  | 12,14,16,18   | 13,15,17,19   |
| 32     | 38       | 34    | 25—26    | —      | —             | —             |
| ...    | ...      | ...   | ...      | ...    | ...           | ...           |
| 114    | 120      | 116   | 107—108  | —      | —             | —             |
| 115    | 121      | 117   | 108—109  | 96-103 | 96,98,100,102 | 97,99,101,103 |
| 116    | 122      | 118   | 109—110  | —      | —             | —             |

表5 采煤机速度为8 m/min支架工艺架号

Table 5 Shearer speed is 8 meters per minute support process frame number

| 支架工艺架号 |          |       |          |        |               |               |
|--------|----------|-------|----------|--------|---------------|---------------|
| 采煤机    | 收护临时帮板支护 | 支架降移升 | 成组推刮板输送机 | 第一轮放煤  | 第二轮放煤         |               |
| 24     | 30       | 26    | 16—18    | —      | —             | —             |
| 25     | 31       | 27    | 17—19    | 6—13   | 6,8,10,12     | 7,9,11,13     |
| 26     | 32       | 28    | 18—20    | —      | —             | —             |
| 27     | 33       | 29    | 19—21    | —      | —             | —             |
| 28     | 34       | 30    | 20—22    | —      | —             | —             |
| 29     | 35       | 31    | 21—23    | —      | —             | —             |
| 30     | 36       | 32    | 22—24    | —      | —             | —             |
| 31     | 37       | 33    | 23—25    | 12—19  | 12,14,16,18   | 13,15,17,19   |
| 32     | 38       | 34    | 24—26    | —      | —             | —             |
| ...    | ...      | ...   | ...      | ...    | ...           | ...           |
| 114    | 120      | 116   | 106—108  | —      | —             | —             |
| 115    | 121      | 117   | 107—109  | 96—103 | 96,98,100,102 | 97,99,101,103 |
| 116    | 122      | 118   | 109—110  | —      | —             | —             |

在设定好支架群直线度范围后,通过虚拟预演场景中实时地监测与计算各个支架的移架量,当达到合理预期范围内时则系统进行移架工艺停止决策,以保证液压支架群的预期直线度,进而保证刮板输送机的直线度。

4.3 液压支架群反向控制实现

上位机连接工业以太网通过 TCP 协议与液压支架电液控制器进行实时通信,上位机底虚拟场景层代码使用 CAN 总 CAN 邻两种方式将控制内容通过

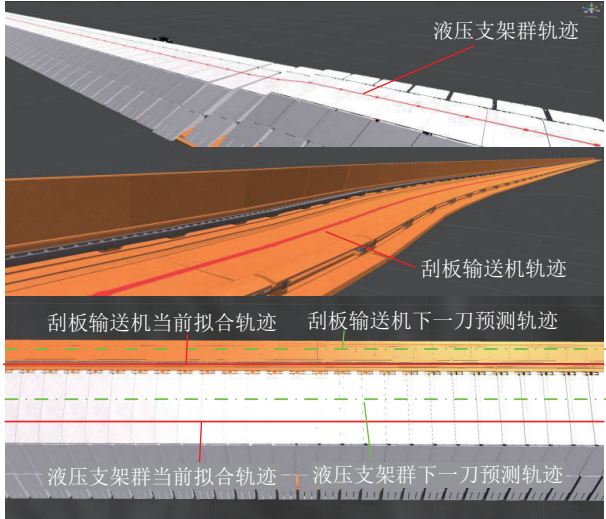


图8 采煤支运装备协同控制

Fig.8 Cooperative control of fully-mechanized mining support and transportation equipment

指令点表形式发送发送至内网,电液控制器读取内网接收到的点表字符串对液压支架工艺动作进行实时控制。测试现场以 33 台物理支架电液控制器与一台采煤机控制器为试验样机进行现场测试,测试现场布置如图 9 所示。

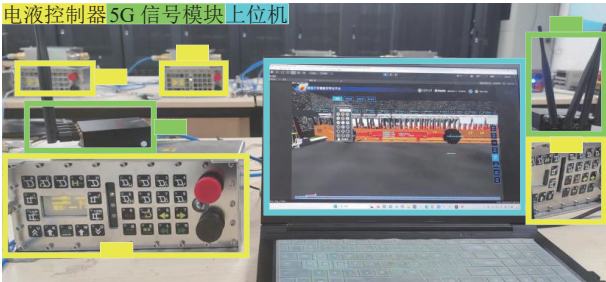


图9 液压支架群反向控制现场

Fig.9 Hydraulic support group reverse control site

经实物验证,液压支架电液控制器可在 0.1 s 内对接收上位机发送的控制信息并对接收的信息。

5 结 论

1)基于物理引擎对虚拟场景进行装配及关键组件的添加,使虚拟运动单元可以忠实反应物理场景运动单元的运动关系。

2)在虚拟场景中对液压支架群行为决策模型进行参数化预演与调试,根据综采“三机”配合条件可得出具体不同工艺架号,对物理综采“三机”电液控制程序的制定具有重要参考意义。

3)对支架与刮板输送机的相互作用过程与状态进行分析,在预演场景中以保证支架群与刮板输送机的直线度为目标对移架工艺时的具体移架量进行决策,保证工作面质量要求。

4)上位机利用通讯协议进行反向控制,液压支架电液控制器可在0.1 s内对接收上位机发送的控制信息并对接收的信息及时作出相应反应,保证了反向控制的实时性与准确性。

#### 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 王国法, 杜毅博, 徐亚军, 等. 中国煤炭开采技术及装备50年发展与创新实践—纪念《煤炭科学技术》创刊50周年[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 1-18.  
WANG Guofa, DU Yibo, XU Yajun, *et al.* Development and innovation practice of China coal mining technology and equipment for 50 years: Commemorate the 50th anniversary of the publication of Coal Science and Technology[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 1-18.
- [3] 王国法, 庞义辉, 任怀伟. 智慧矿山技术体系研究与发展路径[J]. 金属矿山, 2022(5): 1-9.  
WANG Guofa, PANG Yihui, HUAI Renwei. Research and development path of smart mine technology system[J]. Metal Mine, 2022(5): 1-9.
- [4] Okol'nishnikov V V, Ordin A A, Rudometov S V, *et al.* Development of a digital model of mining face of coal mine[J]. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2022, 57(6): 659-667.
- [5] 王自亭, 黄佳强, 张建军, 等. 智能矿山建设实践[J]. 创新世界周刊, 2023(3): 63-67.  
WANG Ziting, HUANG Jiaqiang, ZHANG Jianjun, *et al.* Intelligent mine construction practice[J]. Innovation World Weekly, 2023(3): 63-67.
- [6] 鞠建华, 韩见, 鞠方略. 中国智能矿山发展趋势与路径分析[J]. 中国矿业, 2023, 32(5): 1-7.  
JU Jianhua, HAN Jian, JU Fanglue. Development trend and path analysis of intelligent mines in China[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(5): 1-7.
- [7] 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.* Theory and key technologies of digital twin connection and interaction[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(1): 1-10.
- [8] 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与运行模式[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.
- [9] 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. Digital twin for smart coal mining workplace: Technological frame and construction[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1925-1936.
- [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] 雷晓荣, 李明星, 岳辉, 等. 透明工作面数字孪生系统关键技术及实现[J]. 智能矿山, 2022, 3(7): 50-56.  
LEI Xiaorong, LI Mingxing, YUE Hui, *et al.* Key technology and realization of digital twin system of transparent working face[J]. Journal of Intelligent Mine, 2022, 3(7): 50-56.
- [12] 刘清, 张龙, 李天越, 等. 综采工作面“三机”数字孪生及协同建模方法[J]. 工矿自动化, 2023, 49(2): 47-55.  
LIU Qing, ZHANG Long, LI Tianyue, *et al.* A three machine digital twin and collaborative modeling method for fully mechanized working face[J]. Industry and Mine Automation, 2023, 49(2): 47-55.
- [13] 王学文, 谢嘉成, 郝尚清, 等. 智能化综采工作面实时虚拟监测方法与关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1984-1996.  
WANG Xuewen, XIE Jiacheng, HAO Shangqing, *et al.* Key technologies of real-time virtual monitoring method for an intelligent fully mechanized coal-mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1984-1996.
- [14] HENGBO SHI, JIACHENG XIE, XUEWEN WANG, *et al.* An operation optimization method of a fully mechanized coal mining face based on semi-physical virtual simulation[J]. 国际煤炭科学技术学报(英文版), 2020, 7(1): 147-163.
- [15] 李娟莉, 李梦辉, 谢嘉成, 等. 分布式实时运行数据驱动的液压支架群虚拟监测关键技术[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(10): 1023-1033.  
LI Juanli, LI Menghui, XIE Jiacheng, *et al.* Key technologies of virtual monitoring driven by distributed real-time running data for hydraulic support group[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(10): 1023-1033.
- [16] 李亚飞. 液压支架电液控制系统的设计与调试[J]. 机械管理开发, 2020, 35(12): 227-228, 252.  
LI Yafei. Research on the intelligent control system of suspension density in heavy medium sorting process of coal preparation plant[J]. Mechanical Management and Development, 2020, 35(12): 227-228, 252.
- [17] 郭向阳, 于亮亮, 吴卫兵, 等. 基于数字孪生的智慧煤矿安全管控平台研究[J]. 能源技术与管理, 2022, 47(4): 134-136.
- [18] 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.
- [19] 任怀伟, 王国法, 赵国瑞, 等. 智慧煤矿信息逻辑模型及开采系统决策控制方法[J]. 煤炭学报, 2019, 44(9): 2923-2935.  
HUAI Renwei, WANG Guofa, ZHAO Guorui, *et al.* Smart coal mine logic model and decision control method of mining system[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(9): 2923-2935.
- [20] 付翔, 王然风, 赵阳升. 液压支架群跟机推进行为的智能决策模型[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2065-2077.  
FU Xiang, WANG Ranfeng, ZHAO Yangsheng. Intelligent decision making model on the of hydraulic supports group advancing behavior to follow shearer[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2065-2077.