



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

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. doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.10.021

CHI Huanlei, YUAN Zhi, CAO Yan, *et al.* Study on digital twin-based smart fully-mechanized coal mining workplace monitoring technology [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 (10): 153 - 161. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.10.021

基于数字孪生的智能化工作面三维监测技术研究

迟焕磊,袁 智,曹 琰,胡登高,宋振铎

(中国煤矿机械装备有限责任公司 装备研究院,北京 100011)

摘 要:针对智能化工作面设备运行数据监控、视频监控存在的不足,结合智能化工作面成套设备状态实时监控需求,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。分析了当前煤矿工作面设备监控、视频监控以及三维可视化等存在的问题,系统阐述了将数字孪生技术应用于智能化生产过程监控的可行性、设计思路、技术路线与关键技术。对工作面煤机设备传感器配套、数字孪生三维监测系统架构、设备精准建模、工作面数字孪生体搭建、模型数据驱动算法、实时数据采集、运行数据管理分析、人机交互界面设计等进行了详细介绍。基于鄂尔多斯中煤某矿大采高智能化工作面,开发了一套工作面数字孪生三维监测系统,内嵌了三维展示、数据监控与开采工艺仿真功能模块,集成了设备传感器数据、生产运行控制数据、历史数据、人员定位数据以及相关的派生数据等,实现对工作面成套设备的实时三维动态监测、数据和模型三维融合展示、设备异常状态诊断预警、工况和生产数据分析管理以及自动化开采工艺虚拟仿真等。实践应用证明,该系统能够直观再现和精准描述设备状态,对工作面设备运行数据和生产数据提供系统性管理,提高了监测的效果。

关键词:数字孪生;三维可视化监测;智能化开采;综采工作面

中图分类号:TD82,9;TP391.9

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)10-0153-09

Study on digital twin-based smart fully-mechanized coal mining workplace monitoring technology

CHI Huanlei, YUAN Zhi, CAO Yan, HU Denggao, SONG Zhenduo

(China Coal Equipment Research Institute, China National Coal Mining Equipment Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: In view of the shortcomings of equipment operation data monitoring and video monitoring of the intelligent working face, combined with the requirements of real-time monitoring of the state of the complete set of equipment of the intelligent working face, a multi-information-driven intelligent working face 3D visualization monitoring method based on digital twin technology was proposed. The existing problems of equipment monitoring, video monitoring and three-dimensional visualization of coal mining face were analyzed, and the feasibility, design ideas, technical routes and key technologies of applying digital twin technology to intelligent production process monitoring were systematically explained. The equipment sensor supporting of coal mining machine, digital twin three-dimensional monitoring system architecture, precise equipment modeling, digital twin construction of working face, model data-driven algorithm, real-time data collection, operation data management analysis, human-computer interaction interface design, etc. were carried out as well. Based on the large mining height intelligent working face of a mine in China Coal Ordos Energy Chemical Co., Ltd., a set of digital twin 3D monitoring system for the working face has been developed, which is embedded with 3D display, data monitoring and mining process simulation function modules, and integrates equipment sensor data and production operation control data, historical data, personnel positioning data and related derived data, etc., in order to realize real-time three-dimensional dynamic monitoring of complete sets of equipment on the working face, three-dimensional fusion display of data and models, diagnosis and early warning of equipment abnormal conditions, analysis and management of working conditions and production data, and automated mining process virtual simulation, etc. Practical applications have

收稿日期:2021-01-24;责任编辑:郭 鑫

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801809)

作者简介:迟焕磊(1984—),男,山东潍坊人,工程师,硕士。E-mail:275759985@qq.com

proved that the system can intuitively reproduce and accurately describe the equipment status, provide systematic management of the operating data and production data of the working face equipment, and improve the monitoring effect.

Key words: digital twin; data fusion; three-dimensional visualization monitoring; intelligent mining; fully-mechanized mining face

0 引言

随着供给侧结构性改革深化推进,我国煤炭工业已经由高速增长阶段转向高质量发展阶段。基于数字化矿山基础,应用新一代信息技术、智能制造技术和人工智能技术建设智能化矿山,实现煤炭安全、智能、高效、绿色开采和清洁高效利用,成为现代煤矿发展的必由之路^[1-3]。近年来,物联网(Internet of Things, IoT)、大数据(Big Data, BD)、人工智能(Artificial Intelligence, AI)、移动互联网等技术快速发展,通过信息技术与制造业深度融合,实现生产制造物理空间与信息虚拟空间交互共融的信息物理系统(Cyber-Physical Systems, CPS)、数字孪生(Digital Twin, DT)技术等成为智能制造和复杂系统生产控制领域的研究热点,生产过程从传统制造的“人-物理系统”的二元体系关系转变为智能制造的“人-信息-物理系统”三元体系关系。^[4-7]国内煤炭行业正在大力开展智能化建设,顺应新一代信息技术与煤炭工业深度融合的新形势和新特征,以物联网、大数据、人工智能以及数字孪生技术提升煤矿智能化开采水平,成为推动煤矿智能化转型升级的重要途径。

智能煤矿建设的核心是煤炭智能化开采,基本单元是综采综掘工作面。其中,智能感知、智能决策和智能控制是煤炭智能开采的三要素^[2-3]。当前煤矿智能化开采是在工作面各单机设备自动化功能的基础上,以采煤机自动化记忆截割割煤为中心,通过集中控制系统控制采煤机、液压支架、刮板输送机等成套设备协同联动,进而实现煤炭开采工艺的程序化自动运行。由于煤层地质复杂多变,工作面采、支、运等设备众多,在开采过程中需要实时根据煤层变化、设备状态、故障情况等进行设备自动调整、成套设备联动调整或远程人工干预。全面的环境工况和设备状态感知是工作面成套设备协同控制的基础,决定了智能化开采的适应性和可靠性,也是目前制约国内已建成的智能化工作面常态化生产的关键因素^[6,12]。长壁综采工作面存在长条布置、空间狭小、设备众多、光线不足、煤尘大、动态推进等特点,目前国内已建成的智能化工作面监测方式主要包括数据监测和视频监测2种^[5],存在以下问题:①可见光视频监控。设备状态、工作面环境主要采用可见光视频方式进行监测,是目前工作面智能化开采远

程干预最主要的辅助途径。但工作面工况复杂多变,环境恶劣,受环境低照度、高粉尘以及设备拥挤、动态移动等影响,可见光视频监控及图像识别存在监控死角、视频不连续、视频质量低等问题,导致很多时候处于“盲采”状态,严重制约了煤炭智能化开采的效率,且存在安全隐患。此外,视频画面不能像数据一样对环境情况和设备状态进行精确数学描述,无法为远程人工干预调整提供准确参考。②传感器、故障信息和控制等数据监测。传感器数据主要用于控制和设备的故障保护,但主要采用参数集、数据图表或二维组态的形式进行展示,与设备实体没有深度融合,表现形式单一,不便于现场采煤工人的使用。

基于上述问题,多源信息驱动的三维场景实时再现成为煤炭智能开采核心技术的研究方向和热点,其关键技术主要包括装备的三维及物理仿真、成套装备的物理与运动约束关系、综采装备与围岩之间的几何及运动约束,以及在传感器等多元信息综合驱动下的工作面环境与设备状态的三维场景实时再现等^[2,6,8-13]。由于涉及设备原理、配套设计、生产工艺、监测数据、三维虚拟展示等跨领域的限制,还存在以下5点问题:①三维模型并未建立在以设备机械设计数据的基础上,建模精度、准确度不足以支撑对设备物理状态的全面展示;②设备基础监控数据众多,仅对数据进行了简单的信息集成,缺乏依据面向使用对象的不同而对数据进行处理分析;③虚拟场景三维模型与设备数据信息未进行动态融合,模型三维可视化与数据信息展示多处于割裂状态;④数据驱动的三维模型动作是建立在预设模型动画基础上的三维展示,缺乏从底层机械运动原理层面进行设备动作数据驱动;⑤研究主要集中于从物理空间到虚拟空间的单向映射展示,对监控系统、控制系统的反馈没有深入开发和应用,缺乏从场景再现、数据可视化到决策推演、系统优化的闭环反馈。目前三维场景实时再现技术在煤炭行业的应用大多局限于地理信息(Geographic Information System, GIS)数据三维可视化、采煤工艺三维虚拟仿真培训以及人员设备定位三维可视化等方面,缺乏与实际生产系统的有效结合和对数据的管理分析,面向智能化开采的应用较少^[6-9,11]。

数字孪生技术(DT)是一种实现物理空间向信息空间数字化模型映射的关键技术,利用布置在物

理空间的传感器数据,借助于高速通讯,通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段,实现对物理实体的建模、数据分析和仿真模拟,并通过虚实交互接口为控制系统提供决策支撑^[4,14-16]。将数字孪生技术、虚拟现实技术与工作面智能化开采控制相结合,通过实时交互、数据驱动三维场景再现、数据三维融合展示、智能分析、仿真验证等,对工作面现场生产设备、开采工艺流程、生产要素进行实时、精确、全面的展示、分析和监控,可提高智能化工作面的监控质量和智能化控制水平^[9-11]。

1 基于数字孪生的工作面多元信息数据驱动三维监控技术

1.1 工作面数字孪生三维监测技术设计

基于生产工艺流程数字孪生技术,面向工作面

煤机设备的空间姿态、生产控制需求,以数字化方式在虚拟环境中对工作面环境和成套设备进行实时、精确、动态的三维映射和工况数据融合展示,为工作面智能化生产提供更直观、更全面、更精确的可视化监控方式。同时,在数据分析的基础上,数字孪生监测系统可以集成面向生产运行工况监测的数据监测功能、基于机械约束和成套设备配套关系约束等的设备异常状态诊断报警功能,以及基于工作面三维建模和数字驱动的设备控制功能和开采工艺虚拟仿真测试功能,提升智能化工作面的监测水平。面向智能化开采工作面监控需求的数字孪生三维监测技术的设计思路,如图 1 所示。

相较于控制数据、设备工况以及生产管理所采用的数据监测方式,数字孪生三维监测技术通过数

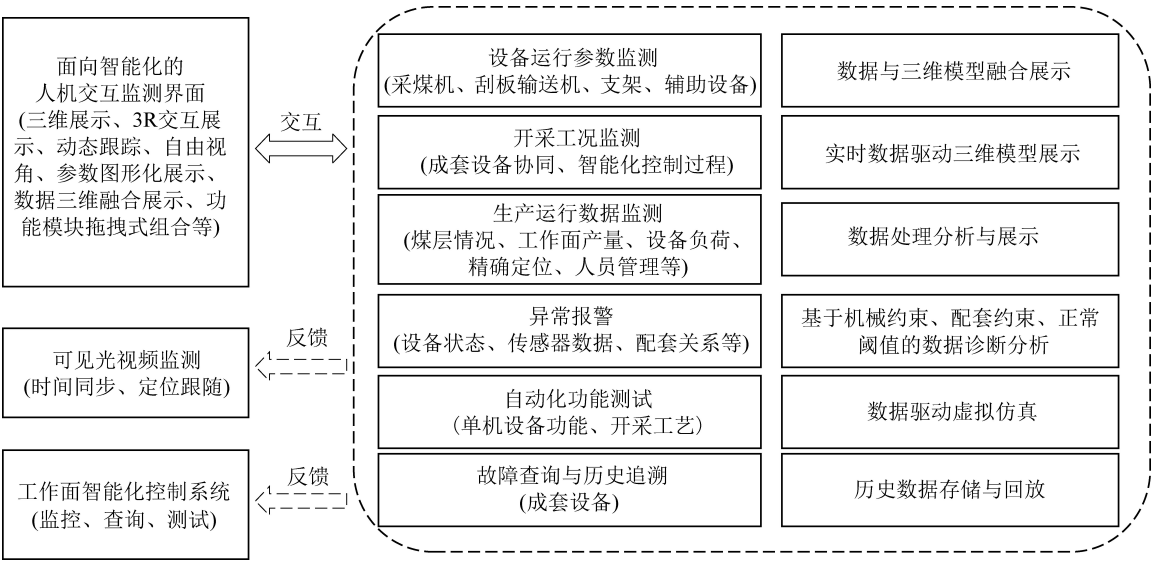


图 1 工作面数字孪生三维监测技术设计思路

Fig.1 Definitio design method of digital twin smart coal mining face monitoring technology

据驱动实现工作面开采过程数据的可视化,更为直观、形象和高效。相较于视频监控方式,数组孪生三维监测技术以实时数据与虚拟空间三维模型融合的方式进行展示,数据与物理对象结合度更密切、全面和准确,能够为控制操作提供准确的参考依据。同时,基于数字孪生技术仿真分析概念,工作面数字孪生三维监测技术可以集成数据分析功能,包括统计分析、传感器数据异常分析、设备姿态异常分析、开采工艺异常分析以及参数图形化展示等。此外,通过与可见光视频监测系统进行时间同步和位置跟随展示,可以快速实现对异常位置设备和工况的视频观察;通过与集中控制系统的通讯,将数据异常分析结果告知集控系统,可以为控制调整决策提供支撑。

1.2 工作面数字孪生监测系统架构

基于数字孪生技术的工作面多元信息数据驱动三维监控系统,从工作面设备、配套传感器与控制系统获取基础设计数据和实时驱动数据,进行建模和分析处理,通过三维虚拟展示技术进行展示和人机交互,并将分析结果反馈给工作面集控系统、视频监测系统等设备进行设备控制,形成闭环系统,组成如图 2 所示,主要由 4 个部分组成:①物理实体即工作面成套设备;②虚拟实体即虚拟空间工作面成套设备数字孪生体;③服务数据即现场信息,包括实时的设备空间姿态数据、运行工况数据、控制指令数据、历史数据等;④辅助对象即控制决策系统,包括智能化工作面集控、视频监视系统等第三方监测监控系统。具体关系为:工作面成套设备(物理实体)是被监控

的对象;虚拟实体是基于物理实体基础信息,包括设备机械设计数据、工作面成套设备配套数据、工作面地质环境数据等建立的工作面模型,是工作面在三维虚拟空间的映射,即工作面数字孪生体;服务数据是从工作面设备传感器、控制系统控制等获取的能够表述设备姿态、工况状态和工艺动作的数据,实现

对虚拟空间三维模型的动作驱动和工况数据动态展示;辅助对象是数字孪生三维监测系统的服务对象。通过虚拟交互接口,数字孪生三维监测系统与可见光视频监控系统形成时间同步的相互验证监测,并将分析结果和异常报警信息告知工作面集控系统。

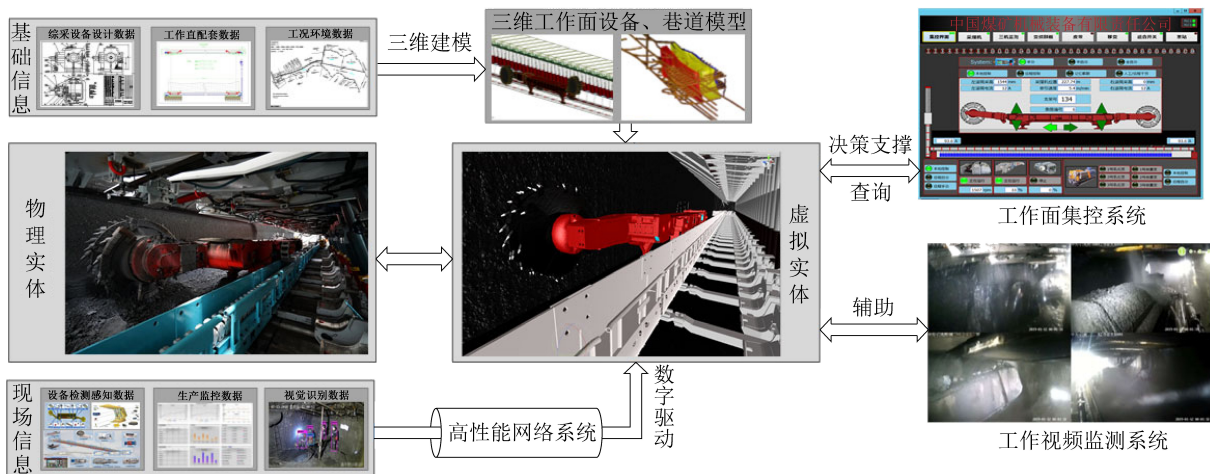


图2 工作面数字孪生三维监测技术系统组成

Fig.2 Composition of digital twin smart coal mining face monitoring technology

1.3 工作面数字孪生三维监测关键技术

工作面数字孪生三维监测系统的核心是工作面数字孪生体的三维虚拟展示,关键是精准数字模型和实时数据驱动。将数字孪生三维监测技术用于工作面智能化开采生产实时监控,需要解决以下6点关键技术。

1) 高仿真度,高保真度的煤机设备三维模型是构建数字孪生体的关键。作为工作面成套设备在虚拟空间的映射,工作面数字孪生体的设备模型需要具有高精度、高保真度,要在几何结构上与设备实体一致,同时能够模拟设备的时空状态、动作和功能等,从而真实再现设备的物理状态并进行模拟仿真,满足实际生产监控的要求。

2) 全面、准确、实时的工作面和设备感知数据是数字孪生动态响应模拟的基础。数字孪生体的所有功能均基于数据驱动,包括设备模型的姿态描述、动作驱动、监测数据等。智能化工作面设备需要依据模型数据驱动需求和监控需求配套相应的传感器,并具备高精度、高可靠性和实时性的特征。

3) 基于机械约束的设备模型动作数据驱动算法是工作面数字孪生体的难题。不同于三维模拟的预设动画展示,数字孪生体所有的设备及其部件的状态和动作都是基于实时数据驱动。数字孪生体高保真模型基于机械设计数据进行建模,模型的动作以设备结构件为单元,而实际中不可能在所有的煤

机结构件上安装传感器,因此数据驱动需要在必要的传感器驱动数据、煤机设备的机械结构、工作原理和控制信息、空间位姿数据信息等基础上进行数据驱动算法研究。

4) 实时监测与状态诊断是数字孪生监测系统的核心功能。工作面设备监测数据众多,使用数据与三维模型融合的监测展示方式需要对数据进行特征提取、处理,依据控制需求进行筛选和展示;基于设备机械约束、成套设备配套关系约束、传感器数据正常阈值约束等的设备状态异常诊断也需要结合设备机械设计、原理、采煤工艺等进行开发。

5) 非结构化的工况环境动态展示是工作面数字孪生三维监测的难点。工作面的煤层情况、顶底板情况、煤壁等随着开采生产始终处于动态变化之中,进行工作面生产数字孪生三维监测,需要针对监测的对象,结合设备状态与环境的关系进行推演和简化处理,以达到设备监测和为控制提供支撑的目的。如采煤机采高和空间三维姿态与煤层和俯仰采变化关系、液压支架姿态与煤壁和顶底板的变化关系等。

6) 面向智能化开采控制需求的人机交互设计是数字孪生监测的特点。区别于传统开采模式下以故障保护和查询为主的设备监控,面向智能化开采的工况监测更多的是为智能化开采控制、人工远程

干预服务。智能化开采控制系统和干预人员需要对设备的姿态、状态和工作面环境实时全面掌控。依据智能化控制需求,数字孪生三维监测系统人机交互设计需要同时兼顾状态监测、故障检测和控制监测等多个方面。

此外,工作面数字孪生三维监测需要与设备和控制系统有高实时性的数据交互、高置信度模拟仿真等技术条件为支撑。

2 智能化工作面数字孪生三维监测系统设计

针对智能化采煤机工作面的监控特点和需求,

基于生产工艺流程数字孪生技术,结合三维虚拟展示技术,设计开发以实现工作面成套设备实时三维展示、工况数据三维实景融合、运行数据监测管理、异常状态报警为主要功能的面向智能化开采辅助控制的监控系统。

2.1 系统架构设计

在工作面数字孪生三维监测系统中,数据驱动贯穿始终,依据数据从采集到应用展示,可设计为现场层、边缘层、平台层和应用层的 4 层模型架构,依次实现数据采集、数据传输和处理、数据分析和功能设计、人机交互等功能^[17-18]。工作面数字孪生三维监测系统平台架构如图 3 所示。

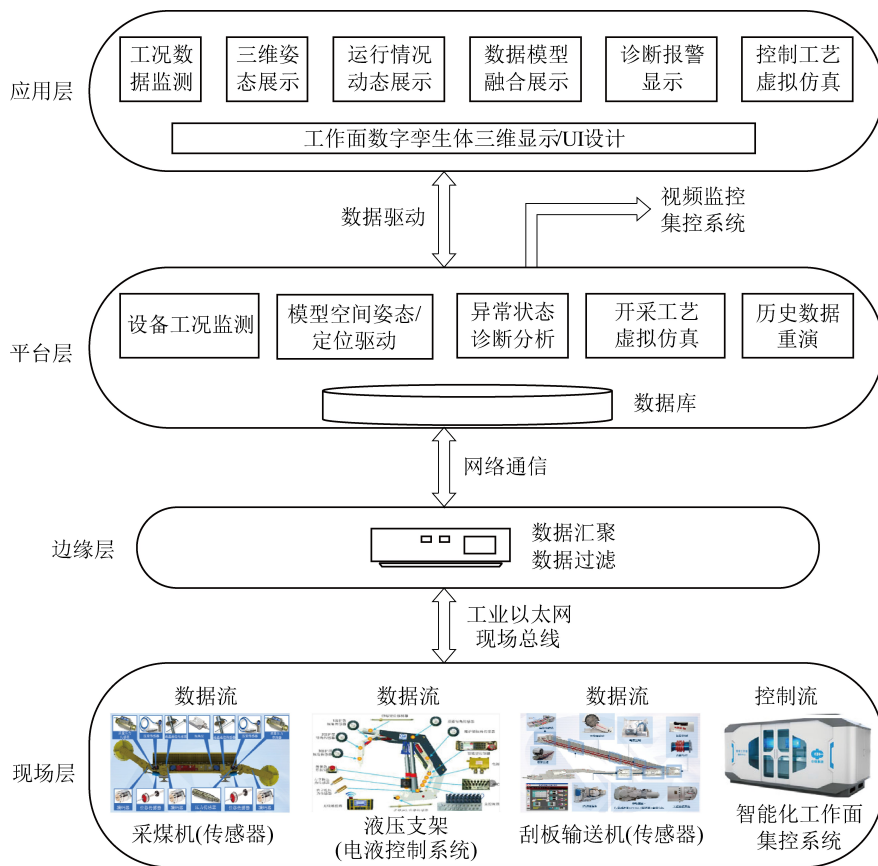


图 3 工作面数字孪生三维监测系统平台架构

Fig.3 Platform architecture of digital twin smart coal mining face monitoring system

2.2 数据采集与功能设计实现

1) 数据采集设计实现。数据是链接工作面生产现场实体与监控系统虚拟空间的桥梁,是数字孪生监测平台的基础。数据采集主要通过设备上的可靠传感器和控制系统获取,由现场层和边缘层实现。现场层设备既是数字孪生体映射的物理实体和监控对象,同时又是系统的数据来源。区别于现有设备为控制和保护需求而配备的各种传感器,数字孪生三维监测系统设备传感器还需要包括设备空间姿态传感器,为模型在虚拟空间的

三维定位、姿态展示和运动展示提供驱动数据。工作面设备众多,每个设备配套的传感器数量较多,同时所有的数据需要实时在线监测,为减轻系统传输和计算压力,同时在硬件实现上简化系统,提高系统灵活性,设计开发边缘节点对现场采集的数据进行数据汇聚和过滤,提取有效数据传输给上层平台进行数据处理。边缘节点终端通过现场总线、工业以太网等通信方式与各设备传感器、控制器、工作面智能化集控系统通信获取数据,进行处理和归档,并以网络通信的方式传送给数字

孪生监测系统数据库存储。

2) 三维虚拟展示功能设计。三维虚拟展示是数字孪生监测系统的最主要的展示方式,不同于一般的三维虚拟展示,数字孪生三维虚拟展示是基于精准模型和实时数据驱动的对设备真实物理状态和动作的映射,其动作单元以设备结构件模型为基础,以机械约束关系为纽带,以实时数据驱动模型空间坐标数据变化为途径进行展示。对于工作面的智能化设备,需要从空间物理状态和功能信息状态 2 个维度进行模型描述,对应各设备的展示内容分 2 种,一类是空间状态的变动,一类是自动化功能的变动,驱动数据分别对应传感器数据、历史数据、系统控制数据^[19]。空间状态通过模型三维动作进行展示,自动化功能通过声光电等多种途径进行展示,2 种展示内容均可采用实时参数与模型融合并以弹窗的方式进行详细数据查询。工作面成套设备主要展示内容见表 1。

表 1 三维可视化监测
Table 1 3D visualization monitoring

项目	展示内容	备注
采煤机	上电/停机	信号/数据
	滚筒旋转	动作/数据
	摇臂升降	动作/数据
	牵引行走	动作/数据
液压支架	立柱压力	模型数据
	立柱升降	动作/数据
	护帮板收合	动作/数据
	推移缸伸收	动作/数据
	支护高度	状态/数据
刮板输送机	工况数据	模型参数
	设备启停	信号/数据
	(链)	动作/数据
其他设备	转载机、破碎机、输送机	姿态数据
		工况数据
生产工况	煤流	模拟/数据
	开采煤层	曲线/数据
	工作面直线度	曲线/数据

3) 工况监测与异常诊断功能设计。数字孪生三维监测系统是基于数据驱动的工作面监控和数据管理平台。异常状态分析诊断是数字孪生监测系统的一个重要分析功能,区别于传统的工况监测,数字孪生三维监测能够依据设备的机械约束、配套约束和机械原理等对设备的姿态异常情况进行监测诊断,为工作面调整、视频定位查看提供参考。数字孪生三维监测系统异常状态诊断逻辑示例见表 2。

表 2 工作面数字孪生三维监测系统异常状态诊断逻辑

Table 2 Abnormal state analysis method for digital twin coal mining face monitoring system

异常状态	内容	诊断逻辑
运行监测故障	设备电压、电流、	逻辑运算 超限报警
	负载等电气参数监测	
	温度、压力、液位等	
	运行参数监测	
姿态异常	传感器故障	机械约束判断 超限提示状态
	中部槽搭接角度、 支架结构件搭接情况等	
工况状态异常	支架邻架(或区段)	工作面环境异
	高度落差超限、采煤	常(冒顶)报警
	机空间姿态突变	煤壁偏帮报警

2.3 数字孪生三维监测应用平台开发

数字孪生三维监测应用平台面向使用者,通过三维模型展示、数据和模型融合展示、参数监控等方式,在虚拟空间中再现工作面设备的空间姿态、工况数据和分析结果,并通过交互方式为生产人员提供监控辅助。应用平台开发主要包括设备精准建模、搭建工作面环境、设备数据驱动算法开发、UI 交互设计等 3 个方面。

1) 煤机设备精准三维建模与工作面数字孪生体搭建。精准的数字模型是数字孪生的关键。基于数字孪生的三维监测系统,三维模型根据实际设备的机械设计数据 1 : 1 制作,并按照工作面实际配套情况搭建工作面。工作面设备的初始坐标为世界原点,对应工作面设备开切眼处的初始推进 0 点设置。三维模型依据采煤机、刮板输送机中部槽及传动部、转载机、破碎机、液压支架等设备的机械设计数据,利用 Autodesk Inventor、Solidworks、PRO/E 等设计软件进行三维建模。基于展示效果逼真度和运算需求,需要对机械设计模型进行一定的简化处理,并使用 Photoshop、3D MAX 等软件进行贴图制作、展 UV 贴图和光影效果烘培处理等,形成可供数据驱动的三维模型,供 Unreal Engine、Unity Pro 等模型驱动引擎软件使用,进行三维可视化监控平台开发。工作面数字孪生体由各单机设备模型配套搭建。根据工作面配套情况,包括刮板机、转载机、破碎机“三机”配套,采煤机牵与刮板机配套,液压支架推移杆与刮板机连接耳配套,液压支架端头架、过渡支架、中间支架布置方案等,在三维模型驱动引擎软件中组建工作面,形成可数据驱动动态展示的工作面成套设备数字孪生体。煤机设备建模与工作面数字孪生体搭建流程如图 4 所示。

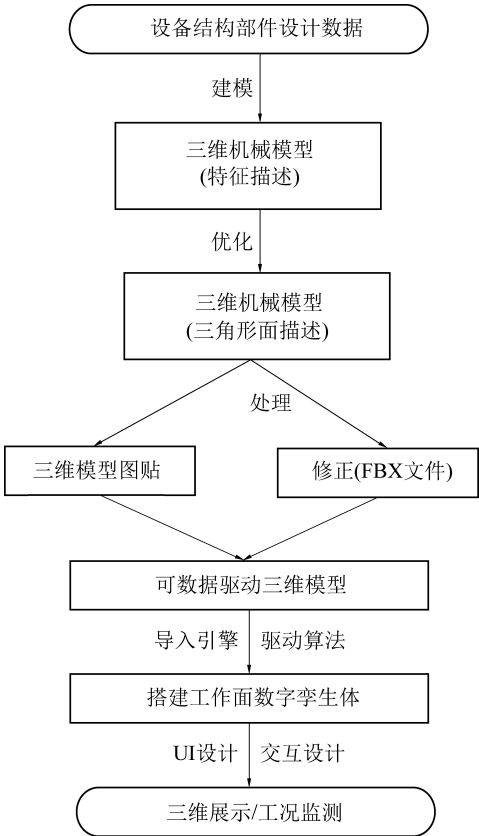


图 4 设备机建模与工作面搭建流程
Fig.4 3D modeling design process

2)数据驱动算法开发。虚拟环境中所有设备的姿态、动作、空间定位以及成套设备的配套情况等基于数据驱动,数据获取解析后,依据设备机械约束、结构件运动轨迹、设备控制指令、运动速度和时间等,计算各个设备及结构件的运动参数,形成模型姿态和动作数据,驱动模型在三维空间中的姿态和动作^[12,21]。

数字孪生三维监测系统采集的数据在驱动模型之前需要进行处理,包括对传输不确定性、实时性和有效性的分析处理。煤矿井下设备众多,工况恶劣,干扰源较多,经常存在数据传输时延、数据丢失、传感器故障等情况,导致获取的驱动数据出现异常或错误。如果使用这些错误数据驱动模型,会导致模型处于错误的空间坐标和姿态,使三维展示失败。因此,数字孪生三维展示监测系统模型驱动算法需要具有驱动数据约束算法判断和预测算法。对于获取的数据,依据单机设备机械约束关系、成套设备配套关系以及相邻设备的相同参数变化趋势、控制工艺等,判断数据是否正常。若数据偏离正常值超过合理阈值,则认为是传感器数据异常,模型仍依据原状态进行展示,并提示数据异常。通常,若当前驱动点没有数据或者数据无变化,则认为设备状态未发生变化,不对数据和模型状态进行更新。这同样适

用于对数据缺失情况的处理,即可采用理想化补全的方式对缺失的数据进行预测。

3)面向智能化开采的监测系统界面设计。工作面数字孪生三维监测系统人机交互界面 UI 设计,需要根据工作面智能化开采的需求、人员操作习惯等进行设计,为生产控制人员提供必要、直观、快捷的监控信息。工作面智能化开采,重点是对采煤机记忆截割、液压支架跟机动作、放顶煤液压支架后部放煤工序、刮板机成组推溜,以及采煤机滚筒与支架护帮板干涉等的监测,相应的 UI 设计也需要依据此进行重点设计,包括重点设备展示、重点区域展示、工艺监测展示以及工作面采高(煤层曲线)等,并根据设备在工作面的定位情况设计相应的跟随视角等。通过三维可视化相机交互可以在三维虚拟环境中对设备进行详细场景和数据的展示,包括移动、旋转、缩放等。面向智能化开采的数字孪生三维监测系统界面 UI 设计内容如图 5 所示。

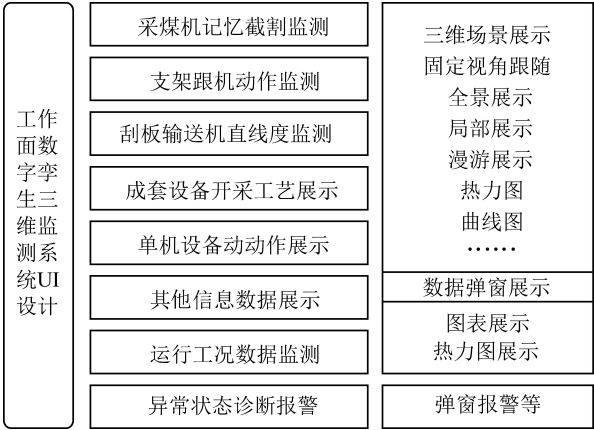


图 5 工作面数字孪生系统 UI 设计

Fig.5 UI design of digital twin smart mining face monitoring system

3 应用实践

基于数字孪生的智能化工作面三维可视化监测技术,结合智能化采煤机工作面少人开采监控需求,以鄂尔多斯地区中煤集团某矿大采高智能化工作面为基础对象,开发了智能化综采工作面数字孪生三维监测系统^[21],监测对象包括 MG900/2550-GWD 型采煤机、ZY15000/27/55D 型电液控制成套液压支架、SGZ1250/3×1000 型刮板输送机,以及 SZZ1350/525 转载机和 PCM525 破碎机等工作面生产设备。工作面数字孪生三维监测系统数字以设备的机械设计数据为基础进行建模和优化处理,并按照工作面设备实际配套和布置搭建了工作面数字孪生体。系统以工作面智能化集控中心为基础进行实时数据采集,通过数据驱动实现了对井下大采高工

作面成套设备的实时动态三维模型展示监测。系统内嵌了工况数据综合管理系统,集成了设备传感器数据、生产运行控制数据和历史数据、工作面顶板压力数据、人员定位数据等,通过对采集数据的整合、分析和三维情景融合,能够三维展示设备的运行状态、异常情况报警信息、工作面压力热力图、人

员信息,以及生产负荷、产量等生产数据。该三维监测系统与工作面视频监测系统进行时间同步,能够对工作面进行视频-三维虚拟辅助监测。CME智能化工作面数字孪生三维监测系统监控界面如图6所示。

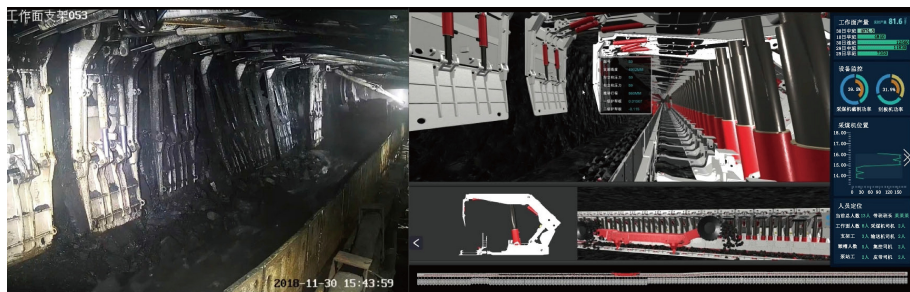


图6 CME数字孪生智能化工作面三维监测系统

Fig.6 CME digital twin smart coal mining workface monitoring system

该系统实现了对设备空间姿态、运行工况数据、工作面开采环境、生产及人员等的实时动态、全面的数据化展示,与视频监测系统同步配合,有效提高了智能化工作面的监测效果。

4 结 论

1)数字孪生三维监测技术为智能化工作面生产监控、设备监测提供了全新的思路。智能化开采是基于数据驱动的自动化控制生产流程,工作面数字孪生监测技术建立在数据驱动的基础上,能够为智能化开采控制和人工远程干预提供全流程、全要素的数据监测信息,同时能够解决低照度、煤尘和视频监控死角等问题,为实现透明工作面提供了实现方法。

2)基于数字孪生技术的仿真分析,为设备异常物理状态诊断以及自动化工艺仿真提供了方向性和技术性的思路。基于设备的机械约束、配套关系、控制逻辑等,可以对设备空间姿态数据进行分析,诊断设备姿态是否处于异常状态,为控制调整提供参考。基于数据驱动,可以对智能化集控系统的控制工艺进行仿真分析,降低调试成本并提高效率。

3)数字孪生三维监测技术通过三维动态虚拟展示、数据和模型三维融合展示、曲线图表等多种途径,为监控人员提供逼真、直观、全面和高效的监控信息。根据监控需求不同,可以针对性地进行UI设计开发,包括现场控制层、生产管理层等,能够灵活满足不同层级的监测需求。数据是数字孪生监测技术的基础,生产控制是数字孪生的服务对象,数字孪生监测技术应建立从现场设备、数字孪生、控制系统

最后反馈至现场设备的闭环系统,才能发挥价值。目前,工作面数字孪生三维监测技术在设备配套传感器方面还需要进一步完善,对工作面集控系统的反馈控制方面需要进一步的研究和应用开发。煤矿智能化开采是一个不断发展的过程,随着数字孪生技术与智能化开采技术的深入结合,逐步解决关键技术瓶颈并发掘应用价值,数字孪生监测技术能够实现煤矿智能化工作面透明开采提供有效的手段。

参考文献(References):

- [1] 王国法,王 虹,任怀伟,等. 智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J]. 煤炭学报,2018,43(2):295-305.
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295-305.
- [2] 王国法,杜毅博. 智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J]. 煤炭科学技术,2019,47(1):1-10.
WANG Guofa, DU YiBo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 1-10.
- [3] 王国法,刘 峰,庞义辉,等. 煤矿智能化煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J]. 煤炭学报,2019,44(2):349-357.
WANG Guofa, LIU Feng, PANG Yihui, et al. Coal mine intellectualization; the coal technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 349-357.
- [4] 杨林瑶,陈思远,王 晓,等. 数字孪生与平行系统:发展现状、对比及展望[J]. 自动化学报,2019,45(11):2001-2031.
YANG Linyao, CHEN Siyuan, WANG Xiao, et al. Digital twins and parallel systems: state of the art, comparisons and prospect[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [5] 李洪洋,魏慕恒,黄 洁,等. 信息物理系统技术综述[J]. 自动化学报,2019,45(1):37-50.

- LI Hongyang, WEI Muheng, HUANG Jie, *et al.* Survey on cyber-physical systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45 (1): 37-50.
- [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 on intelligent coal mine construction (primary stage) [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(8): 1-36.
- [7] 赵浩然, 刘检华, 熊辉, 等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1432-1443.
- ZHAO Haoran, LIU Jianhua, XIONG Hui, *et al.* 3D visualization real-time monitoring method for digital twin workshop [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(6): 1432-1443.
- [8] 李扬, 杨天鸿, 刘洪磊, 等. 大安山煤矿三维可视化系统的建立及安全检测分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(2): 277-283.
- LI Yang, YANG Tianhong, LIU Honglei, *et al.* Construction and safety monitoring analysis of 3D visualization system for Da'an shan coal mine [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014, 31(2): 277-283.
- [9] 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.
- [10] 葛世荣, 王忠宾, 王世博. 互联网+采煤机智能化关键技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(7): 1-9.
- GE Shirong, WANG Zhongbin, WANG Shibao. Study on key technology of internet plus intelligent coal shearer [J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(7): 1-9.
- [11] 张旭辉, 王妙云, 张雨萌, 等. 数据驱动下的工业设备虚拟仿真与远程操控技术研究[J]. *重型机械*, 2018(5): 14-17.
- ZHANG Xuhui, WANG Miaoyun, ZHANG Yumeng, *et al.* Virtual simulation and remote control technology with data-driven for industrial Equipment [J]. *Heavy Machinery*, 2018(5): 14-17.
- [12] 谢嘉成. VR环境下综采工作面“三机”监测与动态规划方法研究[D]. 山西: 太原理工大学, 2018: 21-90.
- [13] 徐雪战, 孟祥瑞, 何叶荣, 等. 基于三维可视化与虚拟仿真技术的综采工作面生产仿真研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2014, 10(1): 26-32.
- XU Xuezhan, MENG Xiangrui, HE Yerong, *et al.* Research on virtual simulation of full mechanized mining face production based on three-dimensional visualization and virtual simulation [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2014, 10(1): 26-32.
- [14] 戴晟, 赵昱, 于勇, 等. 数字化产品定义发展趋势: 从样机到孪生[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2018, 30(8): 1554-1562.
- DAI Sheng, ZHAO Gang, YU Yong, *et al.* Trend of digital product definition: from mock-up to twin [J]. *Journal of Computer-Aid Design & Computer Graphics*, 2018, 30(8): 1554-1562.
- [15] 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.* Digital twin and its potential application exploration [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(1): 1-18.
- [16] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(11): 4-13.
- LIU Datong, GUO Kai, WANG Benkuan, *et al.* Summary and perspective survey on digital twin technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(11): 4-13.
- [17] 柳林燕, 杜宏祥, 汪惠芬, 等. 车间生产过程数字孪生系统构建及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1536-1545.
- LIU Linyan, DU Hongxiang, WANG Huifen, *et al.* Construction and application of digital twin system for production process in workshop [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(6): 1536-1545.
- [18] 周有城, 武春龙, 孙建广, 等. 面向智能产品的数字孪生体功能模型构建方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1392-1404.
- ZHOU Youcheng, WU Chunlong, SUN Jianguang, *et al.* Function model construction method based on digital twin for intelligent products [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(6): 1392-1404.
- [19] 韩菲娟, 任芳, 谢嘉成, 等. 综采工作面三机虚拟仿真系统设计与关键技术研究[J]. *机械设计与制造*, 2019(8): 184-187.
- HAN Feijuan, REN Fang, XIE Jiacheng, *et al.* Design and key technologies of virtual simulation system for three machines in fully mechanized coal mining face [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2019(8): 184-187.
- [20] 韩菲娟. 基于Unity 3D的综采工作面“三机”虚拟仿真系统[D]. 太原: 太原理工大学, 2015: 15-82.
- [21] 高风瞩. 基于Unity 3D的综采工作面全景虚拟现实漫游系统的设计与实现[D]. 太原: 太原理工大学, 2015: 19-53.