



煤炭科学技术

煤炭科学研究院 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

基于数字孪生的倾斜采场装备力学行为测控研究

解盘石 杨航 伍永平 黄宝发 林伟典 易磊磊

引用本文:

解盘石, 杨航, 伍永平, 等. 基于数字孪生的倾斜采场装备力学行为测控研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 259–271.
XIE Panshi, YANG Hang, WU Yongping. Investigation into the monitoring and control of mechanical dynamics in inclined mining equipment utilizing digital twin technology[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 259–271.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0011>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于数字孪生的智能化工作面三维监测技术研究

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

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 153–161 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b530b9b9-7037-4cdb-8cde-3eebc6693924>

基于Unity3D的工作面液压支架群组空间支护姿态数字孪生重构方法

Digital twin reconstruction method of group spatial support pose for hydraulic support of working face based on Unity3D

煤炭科学技术. 2024, 52(11): 74–88 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1819>

智慧矿山数字孪生技术研究综述

Research summary on digital twin technology for smart mines

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/3a06c655-8805-44cc-a5a9-53f238a7fd37>

基于数字孪生的液压支架群跟机工艺虚拟调试方法

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

煤炭科学技术. 2024, 52(6): 197–205 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1210>

矿井提升系统数字孪生快速建模方法研究

Digital twin rapid construction method of a mining hoisting system

煤炭科学技术. 2023, 51(9): 219–230 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-1321>

6~10 m厚煤层超大采高液压支架及其工作面系统自适应智能耦合控制

Adaptive intelligent coupling control of hydraulic support and working face system for 610 m super high mining in thick coal seams

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 276–288 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1692>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

解盘石, 杨 航, 伍永平, 等. 基于数字孪生的倾斜采场装备力学行为测控研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(12): 259–271.

XIE Panshi, YANG Hang, WU Yongping, *et al.* Investigation into the monitoring and control of mechanical dynamics in inclined mining equipment utilizing digital twin technology[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(12): 259–271.

基于数字孪生的倾斜采场装备力学行为测控研究

解盘石^{1,2}, 杨 航^{1,2}, 伍永平^{1,2}, 黄宝发^{1,2}, 林伟典^{1,2}, 易磊磊³

(1. 西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安科技大学 西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

3. 四川川煤华荣能源有限责任公司, 四川 攀枝花 617014)

摘 要: 智能化开采是我国大倾角、急倾斜等难采煤炭资源安全高效开采的必由之路。基于数字孪生的大比例物理模拟实验是解决重力-倾角效应下煤岩与装备多维多尺度力学行为与智能控制的有效途径。详细阐述了基于数字孪生技术的大比例采煤工作面物理模拟系统的设计框架、结构特点和测试/检测模式, 能够实现采煤过程的数据可视化、人机强交互和工艺自优化等功能。针对传统液压支架在实时监测、预测性维护、设计优化及物理模拟方面所面临的挑战, 构建了以液压支架为基础、以数字孪生技术为核心的姿态感知与仿真系统, 利用 SolidWorks、Maya 和 Unity3D 等软件构建液压支架的数字孪生模型, 并通过部署多种姿态感知传感器, 采集实体液压支架的姿态数据和受载信息, 实现数字孪生模型与实体之间的高精度姿态同步与实时反馈。通过对采集数据的分析处理, 从而实现虚拟与现实的映射。最后通过多功能可变角大比例“支架-围岩”系统物理仿真平台进行多倾角下的系统可靠性及稳定性测试, 验证了系统的可行性和有效性。

关键词: 难采煤层; 数字孪生; 智能化开采; 液压支架; 姿态感知; 模拟仿真

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)12-0259-13

Investigation into the monitoring and control of mechanical dynamics in inclined mining equipment utilizing digital twin technology

XIE Panshi^{1,2}, YANG Hang^{1,2}, WU Yongping^{1,2}, HUANG Baofa^{1,2}, LIN Weidian^{1,2}, YI Leilei³

(1. School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Western Mine Exploitation and Hazard Prevention Ministry of Education, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 3. Sichuan Chuan Coal Huarong Energy Co., Ltd., Panzhihua 617014, China)

Abstract: Intelligent mining represents a critical path for the safe and efficient extraction of challenging coal resources, particularly those with steep and extreme inclinations, in China. Large-scale physical simulations leveraging digital twin technology are pivotal in addressing the intricate mechanical behaviors of coal and rock, as well as the intelligent control challenges posed by gravity and inclination effects. This study comprehensively delineates the design framework, structural features, and testing/detection methodologies of a large-scale coal mining face physical simulation system empowered by digital twin technology. This system facilitates data visualization, robust human-machine interaction, and process self-optimization during mining operations. Addressing the challenges traditional hydraulic supports encounter in areas such as real-time monitoring, predictive maintenance, design optimization, and physical modeling, a posture perception and simulation system was developed. This system, grounded in hydraulic support and digital twin technology, employs software like SolidWorks, Maya, and Unity3D to create digital twin models of hydraulic supports. Through the integration of various posture perception sensors, it gathers posture and load data from the physical hydraulic supports. This setup enables precise posture alignment and immediate feedback between the digital twins and their physical counterparts. The system's mapping between virtual and real domains is achieved

收稿日期: 2024-01-03

策划编辑: 常 琛

责任编辑: 李雅楠

DOI: 10.12438/cst.2024-0011

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52174126, 52104147); 陕西省杰出青年科学基金资助项目 (2023-JC-JQ-42)

作者简介: 解盘石 (1981—), 男, 陕西咸阳人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: 29720919@qq.com

通讯作者: 杨 航 (1999—), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生。E-mail: 1183776916@qq.com

through detailed analysis and processing of the gathered data. Ultimately, the feasibility and efficacy of this system are corroborated through a multi-functional, variable-angle large-scale "support-surrounding rock" system physical simulation platform. This platform conducts reliability and stability tests under various inclination conditions, validating the system's operational capabilities.

Key words: difficult mining coal seams; digital twin; intelligent mining; hydraulic support; posture sensing; analog simulation

0 引言

以煤炭为主的能源结构是我国长期不变的基本国情,煤炭在我国能源结构和国民经济中仍将扮演重要的压舱石角色^[1-2]。中国煤炭资源储量虽仅位列世界第四,但作为世界最大的煤炭生产国、消费国、进口国,决定着我国的煤炭资源开发必须兼顾赋存条件简单与复杂煤层,即“易采”与“难采”并行。长期以来,赋存倾角是衡量煤层复杂难采程度的重要指标之一,大于 35°的大倾角、急倾斜煤层便是典型的复杂难采煤层。大倾角、急倾斜煤层探明储量中约 2/3 是气煤、肥煤、焦煤、瘦煤和无烟煤等稀缺煤炭资源,在四川、贵州、新疆、甘肃、宁夏、安徽、河北、黑龙江等省区广泛赋存,是国际公认的难采煤层,其安全高效开采是保障国家能源安全和区域经济社会高质量发展亟待解决的重大工程问题。此外,大倾角、急倾斜煤层也是典型的复杂地质条件煤层,该类煤层智能开采是我国煤炭工业“十四五”10 项重大技术创新示范之一^[3]。大倾角、急倾斜等稀缺难采煤炭资源无人、智能开采的理论与技术突破具有重要的理论意义和现实需求。

数字孪生技术,作为一种革命性的新兴智能制造技术,已经引起了全球范围内政府、产业界及学术界的广泛关注和深入研究^[4-6]。随着数字化转型的加速,该技术因其在精确模拟、预测和优化现实世界中的物理对象和系统方面的能力,被认为是推动技术进步的关键^[7-8]。在工业 4.0 等先进制造模式中,数字孪生技术对实现更高级别的智能化生产和工厂管理至关重要^[9-12]。以矿山智能化建设为例,在智能开采领域,谢嘉成等^[13-15]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,实现了生产系统的最优化和装备的协同开采。葛世荣等^[16-19]提出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所涉及的 10 项关键技术。丁华等^[20-22]提出了数字孪生与深度学习融合驱动的采煤机健康状态预测方法,通过构建数字孪生体,实现了采煤机健康状态的虚拟可视化展示和预测分析。李娟莉等^[23-24]提出了基于数字孪生的综采工作面生产系统,利用虚拟仿真技术实现了采煤机截割路径规划和不同综采工艺的预演评价,并在虚

拟环境中实时监测综采装备的运行状态。在智能化转型的核心,数字孪生技术正在重塑行业进化的新纪元。它不仅促进了数字化和智能化的深度融合,而且为实现绿色可持续发展目标铺就了道路。通过精确模拟实体环境,数字孪生为各领域提供了前所未有的见解和优化能力,加速了产业的数字网络化转型,成为推动现代经济社会向更高效、更环保方向发展的关键技术^[25-28]。

伍永平^[29-31]等研究表明:重力-倾角效应下,采动煤岩与装备的控制问题具有跨尺度、多维度、多目标的特点。在实际生产现场,不论是新型工艺试验还是装备优化,都面临巨大的难度和危险性。因此,基于数字孪生的采动煤岩与装备物理模拟实验方法,在物理模型中还原人-机-环境系统,开展可重复、可视化、低成本的新型开采方法与工艺优化、装备创新与优化物理实验,为定制工作面生产工艺、装备以及智能化控制系统提供了科学支撑,在大倾角和急倾斜煤层的智能开采方面发挥了重要作用。

笔者在数字孪生技术的理论和应用基础上,设计并开发了一种大比例采煤工作面物理模拟系统(以下简称智采工作面数字孪生系统)。该系统通过数字孪生技术实现了采煤工作面的虚实映射,并以液压支架为重点,构建了液压支架姿态感知与仿真系统,该系统以数字孪生技术为核心,能够实时监测和展示液压支架的姿态数据和受载信息。笔者详细阐述了该系统的设计思路、结构特点和测试/检测模式,并利用多功能可变角大比例“支架-围岩”系统物理仿真平台对系统在不同倾角下的可靠性和稳定性进行了测试,可为数字孪生技术在稀缺难采煤炭资源智能化开采提供科学与技术支撑。

1 大比例物理模拟智采工作面数字孪生系统研究

笔者所述和开发的系统均依托于西部富油煤绿色低碳开发国家重点实验室(筹)(以下简称西部富油煤实验室)中的多功能可变角大比例“支架-围岩”系统物理模拟与仿真实验平台(以下简称多功能可变角大比例实验平台),以及以某矿机生产厂商的支架为原型,按照几何相似比 1:5 研制 2 台适用于大倾角采场的掩护式液压支架,能够在不同倾角、采高和

顶板条件下精确模拟液压支架的工作状态和性能表现。

1.1 智采工作面数字孪生系统设计框架

智采工作面数字孪生系统利用数字化技术创建采煤工作面的高精度虚拟模型,系统的核心在于其

能够对整个采煤工作面及其内部设备进行全面且实时的监测,并且能提供高度仿真的操作环境,以实现对工作面的精确实时控制。系统的建立主要由物理信息系统、服务终端、网络协同和云端监测 4 部分组成^[7-8],如图 1 所示。

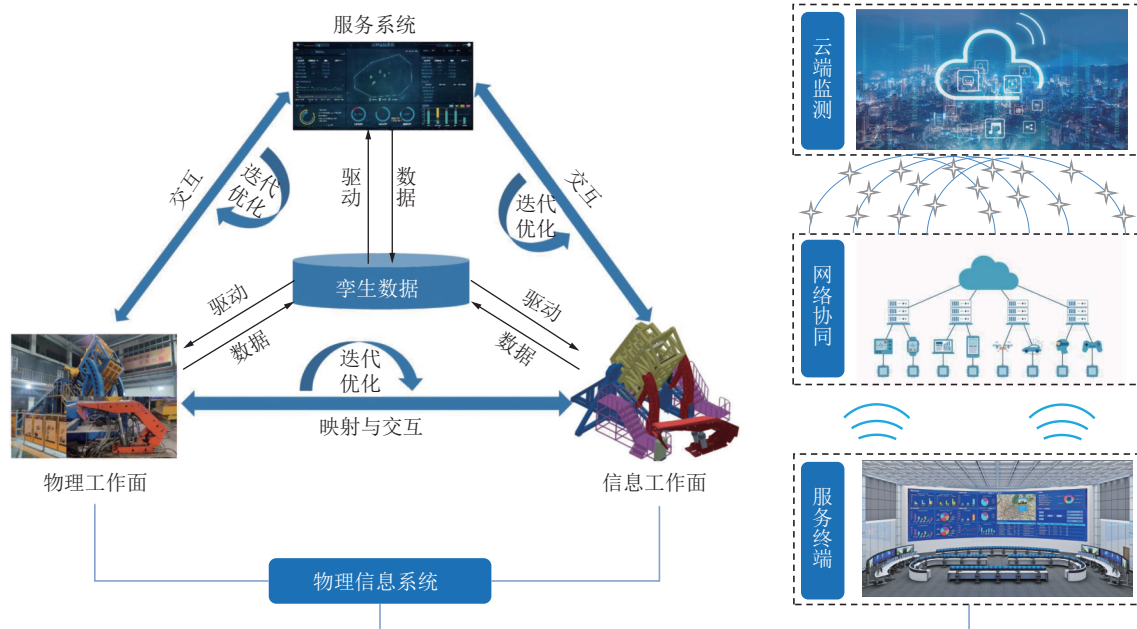


图 1 智采工作面数字孪生系统设计框架

Fig.1 Intelligent mining working face digital twin system framework

在物理信息系统中,物理工作面是系统的基石,是客观存在的实体,其基础架构由众多传感器组成,这些传感器部署于物理实体之上,负责实时监测环境数据和设备的运行状态;信息工作面是系统的核心,是物理工作面的数字化影像,可以实时同步物理工作面中各实体的运动状态和数据信息,并利用模拟、分析、优化和预测等功能对其进行智能管理;服务系统是系统的中枢,集成了控制、维护和优化等各类信息,可以提供稳定运行、智能管控和可靠运维服务。孪生数据是系统的驱动,融合了多视角、多维度数据,包括系统中所有设备的参数信息、采集数据、外界环境数据和运行优化数据等。以上 4 部分通过各类通信单元实现两两连接,达到物理信息系统的全面互联互通。

服务终端是数字孪生系统的用户界面,用于展示系统功能和结果,如三维可视化、数据分析等,并接收用户输入和反馈,实现与系统的交互和控制。网络协同指的是数字孪生系统的通信和协作机制,主要依赖于物联网、云计算等技术,可以实现系统内外的高速数据传输和处理,信息共享和协同决策,能够提高系统的效率、可靠性、安全性和隐私性。云端

监测指的是数字孪生系统的远程管理和优化功能,依赖于人工智能等技术,可以对系统和终端产生的海量数据进行挖掘、分析和学习,构建和更新数字模型,实现对采煤工作面的动态仿真和智能优化,也可以根据不同用户的需求,提供定制化的服务和解决方案。

与传统方法相比,智采工作面数字孪生系统能够通过数据挖掘和智能分析,详细模拟监测采煤过程中的各种运行状态和潜在风险,并提出相应的预警和应对方案,能有效提升采煤的安全性和稳定性,实现采煤过程的智能调控、自动适应和协作优化,从而提高采煤的效率和质量,为采煤的设计、优化、维护和管理提供了科学依据和技术支持,是未来采煤发展的重要方向。

1.2 智采工作面数字孪生系统测试/检测

数字孪生测试/检测模式是一种基于数字孪生技术的新型测试/检测方法。测试/检测是对被测对象状态参量的测量,是保证生产质量和效率的重要手段。传统的测试/检测模式通常需要在物理空间中进行,存在耗时、耗能、不准确等问题。数字孪生测试/检测模式则利用虚拟空间中的高保真度测试系统和

被测对象模型,实现物理和虚拟空间的数据交互和仿真,反映生产过程全生命周期状态。这种模式具有以下特点:

1)高效性。数字孪生测试/检测模式可以在虚拟空间中快速、准确地进行多种测试/检测场景的模拟,避免了物理空间中的时间和空间限制,提高了测试/检测效率。

2)智能性。数字孪生测试/检测模式可以利用数

据管理和自主决策技术,实现对测试/检测数据的智能分析、处理和优化,提供更有价值的信息和建议。

3)可靠性。数字孪生测试/检测模式可以利用高保真度的测试系统和被测对象模型,实现对物理空间中的真实情况的精确映射和预测,提高了测试/检测结果的可信度。

智采工作面数字孪生系统的测试/检测模式如图2所示,主要分为以下3个步骤:

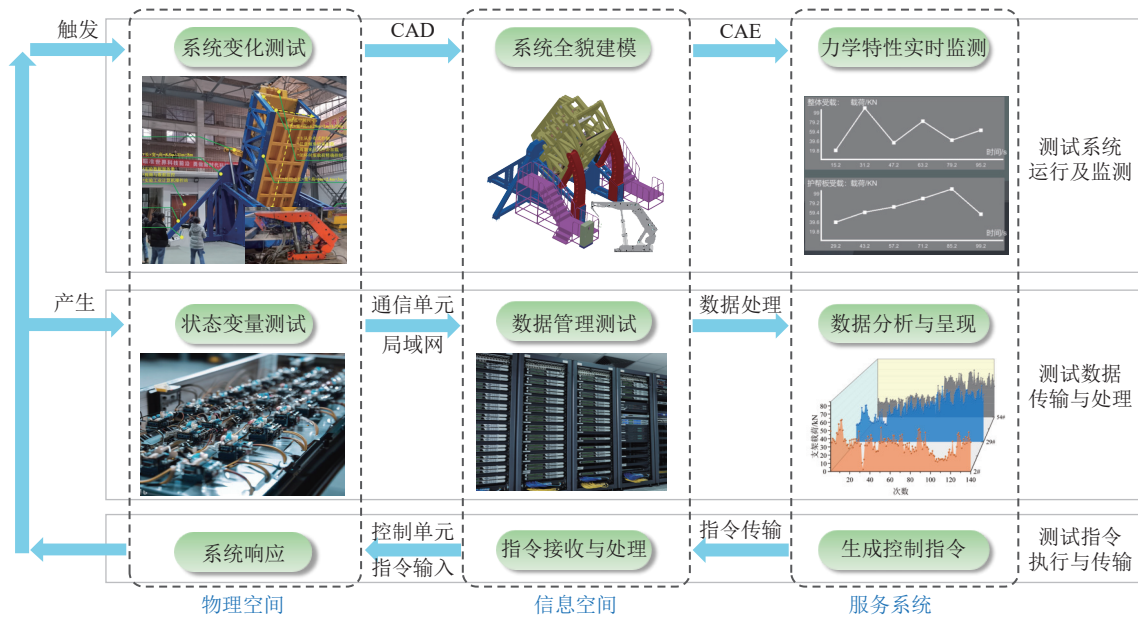


图2 数字孪生测试/检测模式

Fig.2 Digital twin testing/detection mode

1)测试指令执行与传输。负责检验数字孪生系统与物理工作面之间的信息交互是否正常,包括指令下发、数据采集、状态反馈等。测试指令生成的方式主要有模拟仿真指令和人工操作指令2种。测试指令执行与传输的目的是保证数字孪生系统与物理工作面之间的通信质量和实时性。

2)测试数据传输与处理。负责检验数字孪生系统对采集到的数据是否进行有效的存储、分析和展示,包括数据压缩、加密、传输、解析、处理、可视化等。测试的方法有2种,一种是通过对比原始数据和处理后的数据的一致性和准确性,另一种是通过评估数据处理的效率和效果。测试数据传输与处理的目的是保证数字孪生系统对数据的完整性和可靠性。

3)测试系统运行及监测。负责检验数字孪生系统对物理工作面的运行状态和性能进行有效的监测、评估和优化,包括运行参数、故障诊断、预警预测、调度控制等。测试的方法有2种,一种是通过对比数字孪生模型和物理工作面的运行情况 and 结果,另一种是通过观察数字孪生系统对异常情况和优化需

求所作出的响应和处理。测试系统运行及监测的目的是保证数字孪生系统对物理工作面的智能化和优化效率。

数字孪生测试/检测模式可以实现对煤矿生产过程的实时监测、模拟和优化,具有广泛的煤矿智能化应用价值,主要体现在以下3个方面:

1)提高安全性。通过实时监测、模拟、仿真和人工智能算法,获取煤矿运行信息,可以预警煤矿突发事件,避免事故。

2)提高工作效率。基于数字孪生测试/检测模式,可以实现对煤矿全流程和全生命周期的数据交互和仿真,反映生产过程全生命周期状态。可以优化和协同管理采掘、运输、选煤等环节,提高资源和生产效率。

3)降低维护成本。数字孪生测试/检测模式可以利用虚拟空间中的测试系统和模型,实现物理和虚拟空间的数据交互和仿真。避免了物理空间的时间和空间限制,降低了测试/检测的耗时、耗能和不准确

2 液压支架姿态感知与仿真系统框架

在对智采工作面数字孪生系统的设计框架及其测试/检测模式进行深入分析之后,笔者研究进一步聚焦于系统中的核心组成之一:液压支架姿态感知与仿真系统。通过选取液压支架作为研究的核心载体,利用数字孪生技术构建其信息“实体”,进而搭建起液压支架姿态感知与仿真系统,实现对“支架-围岩”系统的精确感知与高效仿真,系统整体框架如图3所示。

系统的运行包含多个关键模块, 以实现物理空间与信息空间之间的无缝连接与互动。物理空间作为系统的起点, 通过实时监测模块持续采集各类传感器在物理空间内产生的数据。随后, 通过物联网通信, 这些数据被传送至信息空间, 并存储在 SQL 孪生数据库中。SQL 孪生数据库中的数据被用作孪生建模模块的基础, 借助 SolidWorks、Maya 和 Unity3D 等软件工具, 对液压支架进行三维建模、渲染和动作编程, 实现在信息空间中精确还原物理空间中的液压支架, 并通过 C#脚本组件实现与物理空间的映射交互。最后, 系统借助数据可视化模块, 驱动液压支架与其孪生体进行真实映射和实时互动, 并对孪生数据进行分析 and 展示。

2.1 三维实验平台及物理液压支架实体

系统开发基于西部富油煤实验室内的多功能可变角大比例实验平台。该平台分为外框架和内框架2个部分。外框架尺寸为长 8.5 m, 宽 11 m, 高 8 m。内框架的尺寸则为长 4.28 m, 宽 2 m, 高 1.35 m, 如

图 4 所示。平台的内框架设计支持 $0^{\circ} \sim 67^{\circ}$ 的倾角调整, 既可无级可调, 也具备有级锁定功能。此外, 平台配备了 4 组液压系统, 用于实现铅垂方向的同步或异步加载。

实验平台适用于不同埋藏条件下的煤层开采环境,能够模拟 $0^{\circ} \sim 67^{\circ}$ 倾角的工作面物理状态,动态监测液压支架的姿态和受载情况,适用于进行采场采煤工艺实验、顶底板施载与受载控制实验,以及大比例支架模型(1:5)的支架与围岩空间相互作用动态模拟实验。

平台还具备对模型内框架空间中的煤岩体或支架进行动态及静态可控加载的功能。内置的加载控制 PLC 系统,通过比例伺服阀和压力传感器组成的力闭环系统,实现对液压缸输出力的精确控制。该平台满足内框架空间煤岩体或支架加载的需求,最大加载压力可达 0.2 MPa,支持各加载点的单独、组合定值或周期性模拟加载,以及冲击模拟加载。实验台的具体参数详见表 1。

笔者以某矿机厂商支架为原型,以几何相似比1:5研制了2台适用于大倾角采场的掩护式液压支架,支架容重相似比 $\alpha\gamma=\gamma p/\gamma m=1$,强度相似比 $\alpha\sigma=\sigma p/\sigma m=\alpha\alpha\gamma=5$,外力相似比 $\alpha F=\alpha\sigma\alpha l^2=125$,设计完成的支架实体如图5所示,具体参数见表2。

2.2 液压支架姿态解析

复杂难采煤层的地质条件变化频繁,导致围岩变形和矿压显现较为剧烈,液压支架与围岩之间存在复杂的相互作用,显著影响着液压支架的稳定性

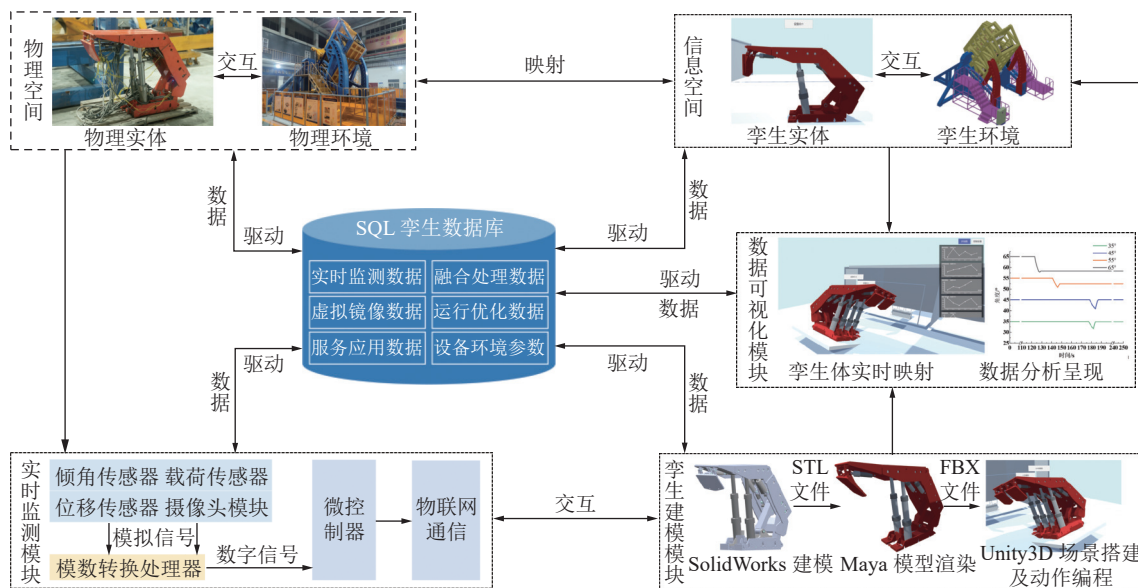


图3 液压支架姿态感知与仿真系统框架

Fig.3 Hydraulic support positional awareness and simulation system framework

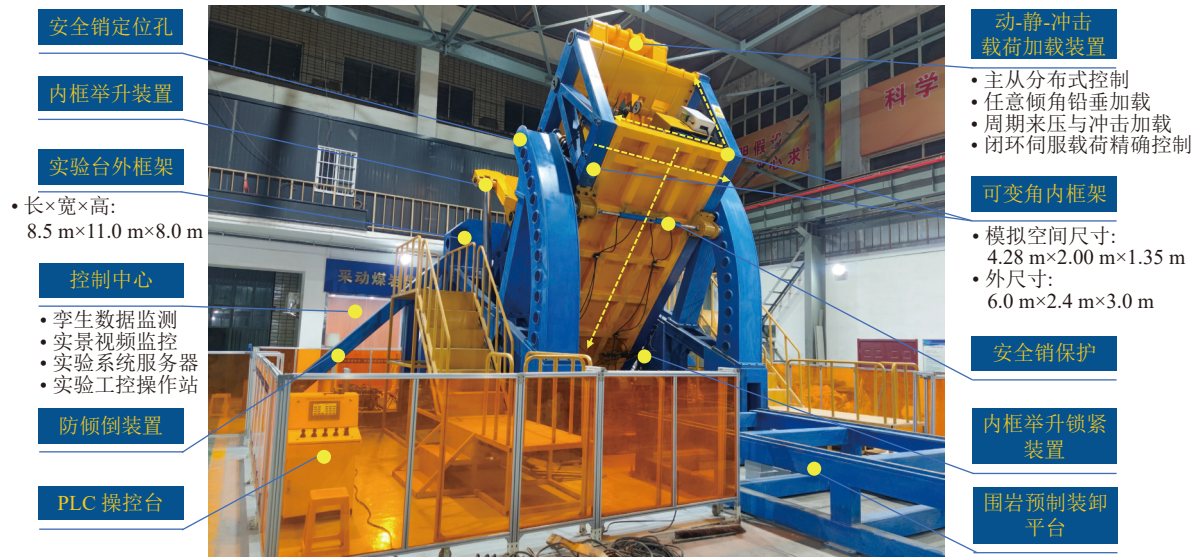


图 4 大比例“支架-围岩”系统物理模拟与仿真实验平台

Fig.4 Large-scale physical modeling and simulation platform for the “support-surrounding rock” system

表 1 实验平台参数

Table 1 Experimental platform parameters

参数	数值
外框架长宽高	11 m×8.5 m×7.5 m
内框架长宽高	4.2 m×2.4 m×1.7 m
内框架倾角范围	0°~67°无级可调
加载液压缸行程	200 mm
竖向、侧向加载压力	0~0.2 MPa
加载压力传感器量程	35 t

表 2 液压支架参数

Table 2 Hydraulic support parameters

支架类型	实体支架	模型支架
支架高度/mm	2 200~4 500	440~900
额定工作阻力/kN	7 000	56
额定初撑力/kN	5 066	40.528
支架宽度/mm	1 680~1 880	336~376
适应工作面倾角/(°)	≤60	≤67
泵站压力/MPa	31.5	6.3

和可靠性。因此,精确掌握液压支架姿态的变化对于优化结构参数、提升其智能化水平和降低故障率等方面极为重要。通过对液压支架姿态的深入解析,可以优化倾角传感器的布置,确保收集到的数据具有高度的准确性和可靠性。此外,姿态解析为构建液压支架的数字孪生体提供了坚实基础,确保数字模型能够精确反映液压支架在实际操作中的动态变化及行为特征,从而显著提高整个系统的监测、分析和预测能力。

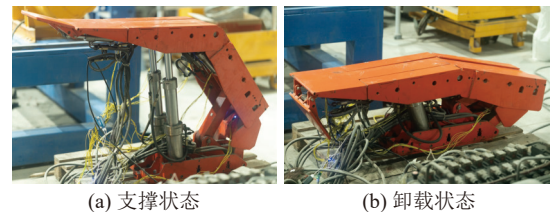


图 5 液压支架模型实体

Fig.5 Hydraulic support model entity

液压支架的姿态变化主要由其内部的液压缸控制。通过调节液压缸杆的伸缩长度,可以精准地调整支架的姿态。液压支架剖面如图 6 所示。

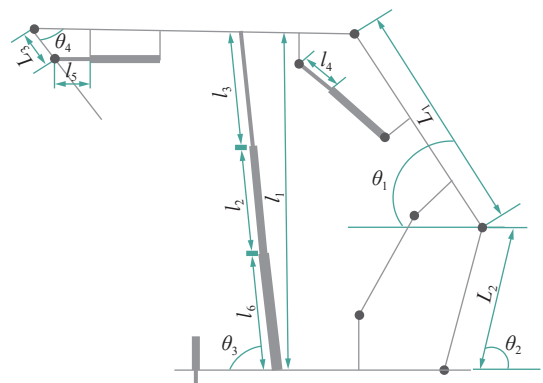


图 6 液压支架剖面

Fig.6 Hydraulic support cross-sectional schematic

在液压支架的升降过程中,以底座为基准,液压支架延伸出第一级立柱到最大行程,随后延伸二级立柱至最高位置。在此升降过程中顶梁高度 l_1 的变化量:

$$l_1 = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

式中: l_1 为顶梁与底座间高度差, m; L_1 为掩护梁长度,

定值, m ; θ_1 为掩护梁与底座平面夹角, ($^\circ$); L_2 为四连杆中后连杆长度, 定值, m ; θ_2 为后连杆与底座平面夹角, ($^\circ$).

二级立柱伸缩位移 l_3 变化量如式 (2) 所示: (一级立柱以底座立柱为父物体, 可用长度表示支架实时状态, 下同)

$$l_3 = l_1 / \sin \theta_3 - l_6 - l_2 \quad (2)$$

式中: l_3 为二级立柱伸缩位移, m ; θ_3 为立柱与底座夹角, 定值, m ; l_6 为底座立柱长度, 定值, m ; l_2 为一级立柱伸缩位移, 在 l_3 伸出时为定值, m .

一级立柱高度 l_2 变化量:

$$l_2 = l_1 / \sin \theta_3 - l_6 \quad (3)$$

护帮板是液压支架的重要部件, 关系到煤壁稳定和人员安全。护帮板的运动由液压缸控制, 其与液压缸的活塞杆相连, 液压油驱动活塞杆伸缩, 使护帮板绕铰接处旋转。护帮板相连的活塞杆伸缩位移 l_5 变化量:

$$l_5 = \begin{cases} |L_3 \cos \theta_4|, \theta < \frac{\pi}{2} \\ L_3 \sin \theta_4, \theta \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: L_3 为护帮板与顶梁铰接处到护帮板与活塞杆铰接处距离, 定值; θ_4 为顶梁与护帮板的夹角。

3 系统实现的关键技术

3.1 基于嵌入式微控制器开发的实时监测技术

在系统的实现过程中, 物理空间中的液压支架实体是实现孪生模型映射的起点。通过 STM32 控制器采集液压支架实体上的多维姿态感知传感器的数据, 对数据进行融合和处理, 再通过 ESP8266 无线通信模块上传至信息空间中进行姿态解析并保存在孪生数据库中, 实现液压支架实体与孪生模型的映射。物理液压支架实体的数据采集流程如图 7 所示。

3.1.1 液压支架姿态数据采集

姿态检测最初用于检测航空、导弹和卫星等载体的空间位置、姿态角和运动状态。计算机视觉和机器学习技术的发展使得姿态检测也能应用于人体活动分析、人机交互和视频监控等领域。姿态检测的目标是确定物体在空间中的取向和位置, 这就需要计算载体坐标系与地理坐标系之间的旋转矩阵和平移向量。载体坐标系不同于日常中使用的地球坐标系和地理坐标系, 如图 8a 所示, 地球坐标系是以地球球心为原点, Z 轴沿地球自转轴方向, X 、 Y 轴在赤道平面内的坐标系, 地理坐标系原点是运载体所

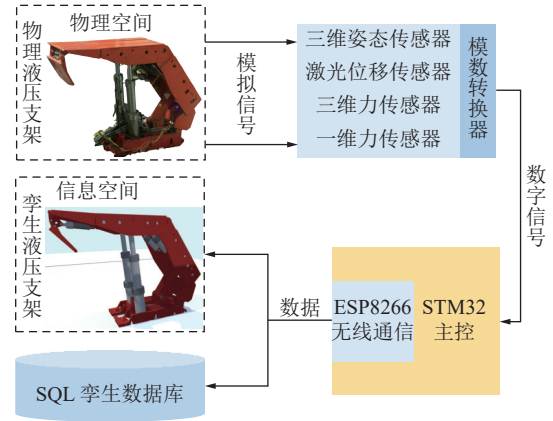


图 7 数据采集流程

Fig.7 Data collection flowchart

在的点, 通常在地球表面, Z 轴沿当前地理垂线的方向 (重力加速度方向), X 、 Y 轴沿当地经纬线的切线方向。载体坐标系是以运载体的质心为原点, 一般根据运载体自身结构方向构成坐标系, Z 轴指向载体顶部, Y 轴指向载体头部, X 轴沿载体两侧, 如图 8b 所示。简而言之, 姿态就是“载体坐标系”与“地理坐标系”之间的转换关系。

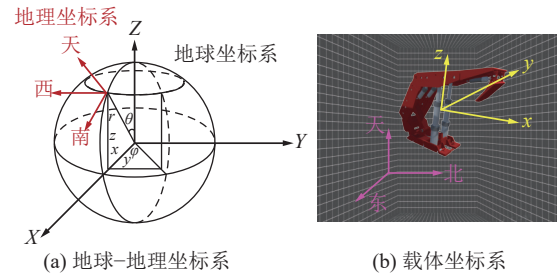


图 8 地球-地理-载体坐标系转换

Fig.8 Earth-Geographic-Carrier coordinate system transformation diagram

旋转矩阵通常用欧拉角表示, 它由偏航角 (yaw)、俯仰角 (pitch) 和横滚角 (roll) 3 个角度组成, 描述刚体在三维空间中的姿态。如图 9 所示, 俯仰角表示物体绕 X 轴旋转变, 横滚角表示物体绕 Y 轴旋转变, 偏航角表示物体绕 Z 轴旋转变。俯仰角表示支架工作时的姿态变化, 偏航角和横滚角可以反映支架是否存在倾倒、滑移和翻转等失稳现象。

为实现对液压支架姿态角的精确测量和实时采集, 根据式 (1)~式 (4), 需要采集的姿态角数据涉及护帮板、顶梁、掩护梁和四连杆 4 个部位, 采集位置如图 10 所示。

理论上, 加速度计、陀螺仪或磁力计等设备都可以用于采集姿态角, 然而, 单一使用加速度计、陀螺仪或磁力计都存在一定的局限性和缺陷。加速度计

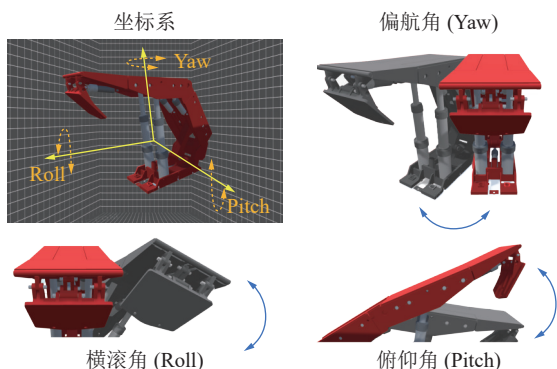


图 9 三维空间中的欧拉姿态角

Fig.9 Euler attitude angles in three-dimensional space

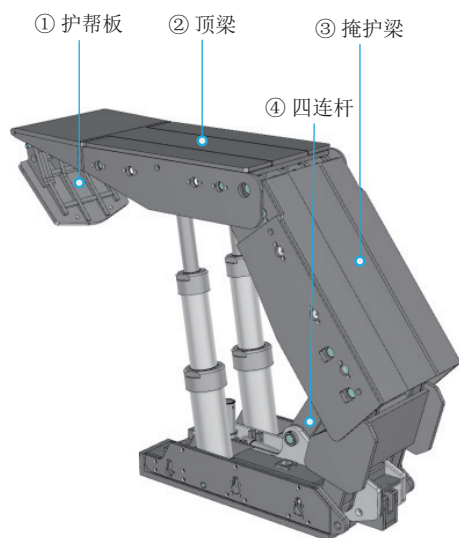


图 10 姿态角采集位置示意

Fig.10 Schematic of attitude angle measurement locations

只能在静态或近似静态的情况下测量倾角,因为它只依赖于重力加速度的投影,如果存在外部加速度(如移动、振动等),则会引入误差。陀螺仪可以测量角速度,从而推算出倾角,但会受到零点漂移、温度变化、噪声等因素的影响,导致累积误差。磁力计的实际测量噪声一般也比较大,而且在许多环境下还会存在磁场干扰,从而导致直接使用磁力计计算出来的偏航角存在大量误差而不可用。因此,本系统选用融合了三轴加速度计和三轴陀螺仪的 MPU6050 6 轴姿态传感器,可以同时提供 6 个自由度的姿态数据,有效地减小陀螺仪在静止时产生的累计误差和加速度计在运动时产生的运动误差,从而提高测量的精度和稳定性。

首先,MPU6050 的 DMP 库会定时从内部寄存器中读取陀螺仪和加速度计的原始数据,分别表示为 g_x 、 g_y 、 g_z 、 a_x 、 a_y 、 a_z 。随后,DMP 库会根据设置的量程和灵敏度,将原始数据转换为实际的物理量,即角速度和加速度, x 轴角速度转换公式为:

$$\omega_x = \frac{F_{SR,g} \times A_{DC,x}}{32768} \quad (5)$$

式中: ω_x 为 x 轴角速度, $(^\circ)/s$; $F_{SR,g}$ 为陀螺仪量程, $(^\circ)/s$; $A_{DC,x}$ 为 x 轴角速度原始数据,即 g_x , $(^\circ)/s$ 。

x 轴加速度转换公式为:

$$a_x = \frac{F_{SR,a} \times A_{DC,x}}{32768} \quad (6)$$

式中: a_x 为 x 轴加速度, m/s^2 ; $F_{SR,a}$ 为加速度计量程, m/s^2 ; $A_{DC,x}$ 为 x 轴加速度原始数据,即 a_x , m/s^2 。

下一步,利用滤波和数据融合算法对采集的数据进行滤波和数据融合,对加速度计和陀螺仪的数据进行加权平均,生成四元数表示的姿态数据,最后将四元数转换为欧拉角输出,四元数与欧拉角间的转换如式 (7) 所示。

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan \left[\frac{2(xy + mn)}{1 - 2(y^2 + m^2)} \right] \\ \arcsin[2(xm - yn)] \\ \arctan \left[\frac{2(ym + xn)}{x^2 + y^2 - m^2 - n^2} \right] \end{bmatrix} \times \frac{180}{\pi} \quad (7)$$

式中: φ 为偏航角, $(^\circ)$; θ 为俯仰角, $(^\circ)$; ψ 为横滚角, $(^\circ)$; 四元数 $q = (m, n, x, y)$ 。

液压支架的姿态数据除相应部件的姿态角信息以外,还包含顶梁侧护板、掩护梁侧护板和底调梁 3 个部位的位移信息,采集位置如图 11 所示。

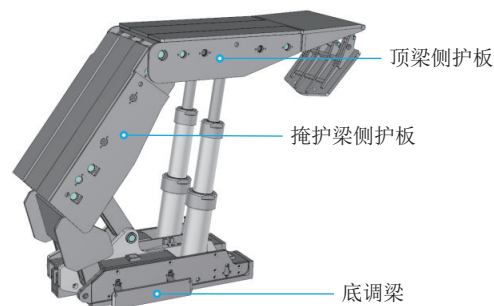


图 11 位移采集位置

Fig.11 Schematic of displacement measurement locations

位移采集选用由意法半导体(ST)公司开发的、采用第二代 FlightSense™技术的 VL53L0X 激光测距传感器,能够实现高精度、低功耗和强抗干扰的绝对距离测量,并且不受目标大小、颜色和反射率影响,有效减少环境光干扰。

如图 12 所示,VL53L0X 位移数据采集基于飞行时间测距(ToF)技术,使用垂直腔面发射激光器(VCSEL)发射出激光,激光碰到障碍物后反射回来被 VL53L0X 内部的单光子雪崩二极管(SPAD)阵列接收,然后通过测量激光在空气中的传播时间,进而得

到距离。

通过采集液压支架的姿态数据,可以实时确定液压支架的姿态变化。根据变化的趋势和幅度,可以判断液压支架是否存在倾斜、下沉、滑移等异常情况,及时采取相应的措施,保证液压支架的安全稳定运行。并且通过对姿态数据的分析处理,可以计算出液压支架的工作阻力、工作阻力系数和工作阻力平衡度等参数,以评估支架的工作效率和工作负荷,为液压支架的优化设计和合理配置提供依据。

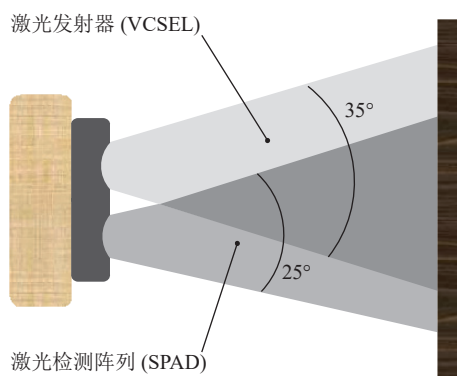


图 12 位移采集原理

Fig.12 Principles of displacement measurement

3.1.2 液压支架载荷数据采集

在大倾角煤层走向长壁工作面中,由于倾斜砌体结构的独特运动特性,采场支架受到顶板的影响方式与传统情况有所不同。如图 13 所示,可以将砌体对支架的影响分解为 6 种基本的接触作用类型,深入了解和分析这些接触作用类型是实现液压支架的自适应支护以及对顶板灾害进行提前预测和预警的关键步骤。因此,获取支架顶梁和掩护梁的载荷数据对于确保采煤作业的安全性和高效性至关重要。

如图 14 所示,液压支架顶梁在倾角状态下,主要受到来自倾向方向的摩擦力 F_x 和垂直于液压支架自身的压力 F_y ,分别反映了顶梁与煤层之间的接触状态和顶梁与支架之间的传力情况。

通过监测 F_x 和 F_y 的变化,可以及时了解液压支架受载的分布和变化,从而及时调整支架的位置和压力。因此,本系统中选择在液压支架顶梁上布置 6 组三维力传感器,以同时监测顶梁在倾向和垂直于自身方向上的受载情况,并选用一维力传感器监测液压支架掩护梁的受载分布,力传感器布置如图 15 所示。

3.2 基于 Unity3D 的孪生体建模

孪生体建模采用 Unity3D 软件,实现液压支架物理实体与虚拟模型的对接和融合,具体步骤如下。

首先,通过 SolidWorks 软件,基于液压支架运动

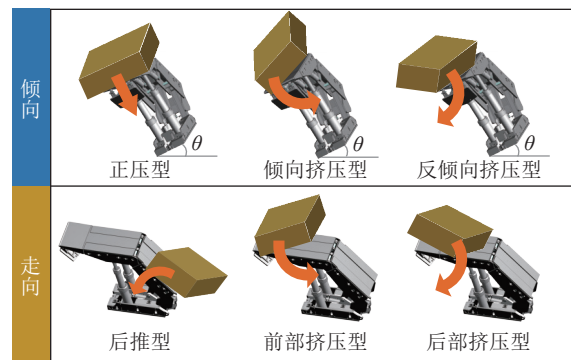


图 13 砌体结构与支架接触类型

Fig.13 Types of contact between masonry structures and supports

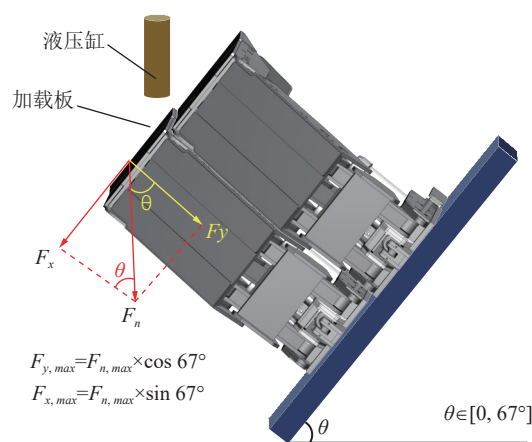


图 14 液压支架顶梁受载示例

Fig.14 Example of load-bearing by the top beam of hydraulic support

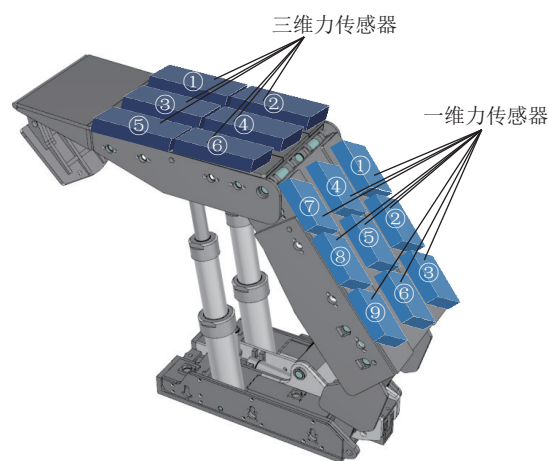


图 15 力传感器布置

Fig.15 Schematic of force sensor layout

姿态解析,构建包括机械结构和液压系统的三维实体模型,模型设定了运动副,定义了运动参数和约束条件,并在检验模型准确性和精度后,针对误差或不一致进行调整,调整完成后将模型转换为 STL 接口文件。

随后,将模型 STL 接口文件导入 Maya,调整其材质、纹理、光照和阴影,模拟支架的表面特征和光效,同时进行动画设计以模拟运动过程和状态变化,优化渲染和动画效果,增强其真实感和美观度。

最后,在 Unity3D 中构建虚拟场景以模拟工作

环境,并设定其背景、光照和音效,随后使用 C#脚本实现液压支架动作编程和液压系统参数控制,同时设置传感器和通信模块以实现数据交换和信息传递,确保模型与物理液压支架的实时互动。液压支架孪生体模型构建过程如图 16 所示。

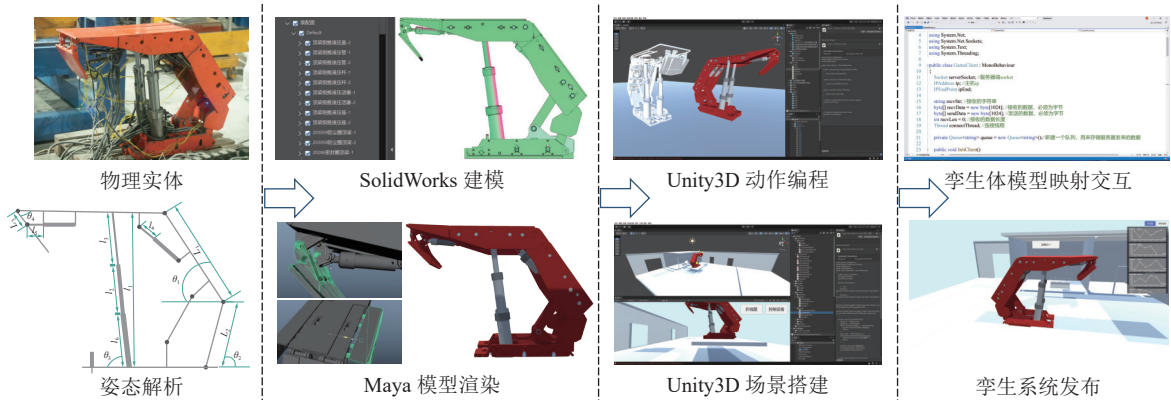


图 16 液压支架孪生体建模
Fig.16 Digital twin modeling of hydraulic support

3.3 服务系统搭建

液压支架姿态感知与仿真系统中的服务系统主要包含 3 个功能模块,分别为用户模块、数据模块和数据展示模块,每个功能模块下又划分 2 个独立子模块。

用户模块包含用户登录和用户设置。系统会为不同的用户分配单独的数据库,方便分析实验数据。用户设置可以编辑用户是否为管理员,管理员可以查看和编辑所有用户的数据,普通用户仅可查看和修改自己的数据。

数据模块负责数据接收和数据存储。数据接收模块通过协议的端口读取传感器采集的数据,保证系统有效处理,具体实现流程如图 17 所示。

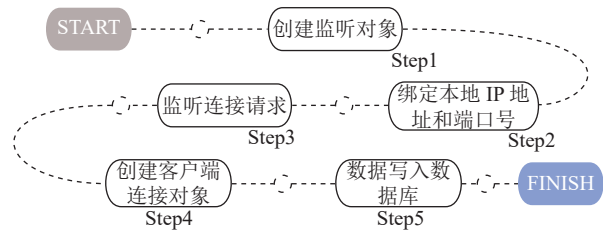


图 17 数据接收模块实现流程
Fig.17 Data reception module implementation flowchart

数据存储模块将数据经过孪生系统筛选和处理后存储到云数据库,方便后续分析和应用。数据库文件包含多类数据表,各个数据表通过用户 ID 建立联系。

数据展示模块包括数据匹配与数据可视化功能,

数据匹配是指将姿态数据与相应的液压支架部件进行匹配,数据可视化是指对孪生数据进行处理后输入模型,实现实体—模型液压支架的虚实互映,如图 18 所示。

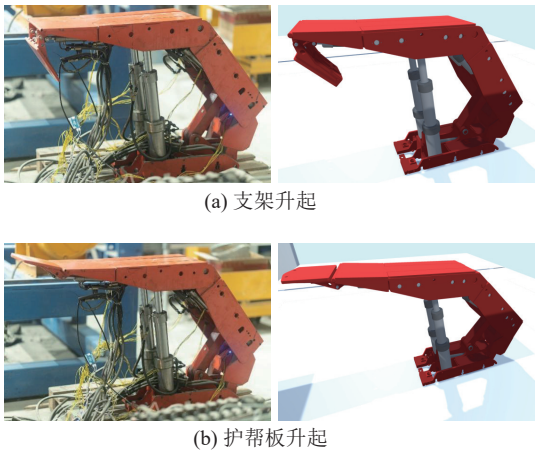


图 18 实体—模型液压支架 1:1 映射
Fig.18 Entity-model hydraulic support 1:1 mapping

4 现场应用

为验证液压支架姿态感知与仿真系统在实际工作环境中的性能,以太平煤矿 3121 大采高工作面为应用场景,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,依托多功能可变角大比例实验台进行实验。实验开始前,对实验台加载板和液压支架的力传感器进行校准,以保证数据的一致性和可信度。实验中,先在实验台内部

布置顶板与底板，然后升起液压支架，使实验台与“支架-围岩”组成的系统充分接触，在给定静载荷 $F_n = 100\text{ kN}$ 的条件下，将实验台倾角从 0° 依次加载至 35° 、 45° 和 55° ，以此为例进行孪生系统性能验证。限于文章篇幅，实验数据仅展示实验台倾角变化、支架倾角变化、支架顶梁力传感器正向受力 $F_{y1} \sim F_{y6}$ ，以及实验台正向加载力 F_y ，共选取 30 组数据做对比分析，见图 19、表 3。

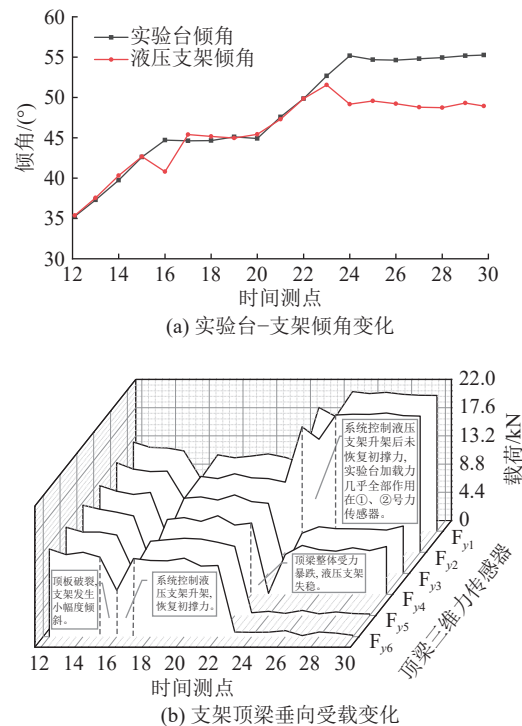


图 19 实验数据可视化图表(部分)

Fig.19 Experimental data visualization charts (partial)

表 3 中，加载力 F_y 为实验台加载板施加于液压支架顶梁垂向的力，相对误差为顶梁力传感器测得的垂向加载合力与实验台垂向加载力之间的差距。对比分析表明，在 0° 、 $0^\circ \sim 35^\circ$ 、 35° 、 $35^\circ \sim 40^\circ$ 的加载过程中，液压支架与实验台基本同步，未发生失稳现象，且顶梁传感器测力与实验台加载力基本一致，相对误差小于 1.50%。

如图 19 所示，在实验台从 40° 加载至 45° 的过程中，顶梁受力骤减，支架发生小幅度倾斜， 45° 后恢复正常。系统孪生模型和现场监控显示，实验台加载过程中，预制顶板破裂，系统控制液压支架升架恢复初撑力。在实验台从 45° 加载至 55° 的过程中，顶梁 3 号~6 号传感器数据降至零值，顶梁整体受力暴跌，液压支架失稳，系统控制液压支架升架后未恢复初撑力。

实验结果验证了液压支架姿态感知与仿真系统

表 3 孪生系统实时监测中各项数据变化
Table 3 Data variations in real-time monitoring of the twin system

测点	实验台 倾角/(°)	支架倾角/(°)	加载力 F_y/kN	$\sum_{i=1}^6 F_{y,i}/\text{kN}$	相对 误差/%
1	0.49	0.75	99.68	100.35	0.67
2	0.46	0.50	99.64	99.34	0.31
3	0.01	0.64	100.31	99.59	0.72
4	0.61	0.26	100.39	101.15	0.76
5	0.65	0.65	100.18	101.30	1.13
6	14.93	14.58	96.73	96.99	0.27
7	24.74	25.45	90.13	90.01	0.13
8	34.72	34.51	81.83	82.54	0.87
9	35.42	34.72	82.12	82.53	0.49
10	34.65	34.62	81.97	81.80	0.21
11	35.14	34.57	82.28	82.07	0.26
12	35.25	35.36	81.82	81.08	0.91
13	37.31	37.57	78.84	79.23	0.49
14	39.74	40.32	76.60	77.61	1.33

在模拟倾斜采场环境中的可靠性和有效性。系统在多变的倾角条件下能够保持稳定和精确的姿态控制，证明了其在智能化采煤领域的应用潜力。

5 结 论

1) 针对当前复杂煤层的智采工作面常态化运行难题，阐明了大比例采煤工作面相似模拟系统的设计框架、结构特征及测试/检测模式，并详细分析智采工作面过程中的关键技术和要点，从而实现对复杂地质条件下煤层开采的高效模拟。

2) 通过剖析液压支架姿态变化及其与围岩的关系，建立了一种以液压支架为基础、以数字孪生技术为核心的姿态感知与仿真系统，能够通过数字模型真实地、实时地反映液压支架实体的力学行为，与物理测试结果误差很小或者没有误差，可用于验证一些已有的结论或者探索新方法新工艺新装备的力学响应。

3) 后续研究团队将侧重于基于实验测试结果进一步开发实验平台姿态感知与仿真系统、液压支架姿态控制与自适应调节系统等，以期实现在复杂煤层条件下的高效矿山作业管理和安全运行。

参考文献(References):

[1] 谢和平, 王金华, 王国法, 等. 煤炭革命新理念与煤炭科技发展构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1187-1197.

- XIE Heping, WANG Jinhua, WANG Guofa, et al. New ideas of coal revolution and layout of coal science and technology development[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(5): 1187-1197.
- [2] 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.
- [3] 伍永平, 负东风, 解盘石, 等. 大倾角煤层长壁综采: 进展、实践、科学问题[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 24-34.
- WU Yongping, YUN Dongfeng, XIE Panshi, et al. Progress, practice and scientific issues in steeply dipping coal seams fully-mechanized mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 24-34.
- [4] GRIEVES M. Intelligent digital twins and the development and management of complex systems[J]. *Digital Twin*, 2022, 2: 8.
- [5] ZHANG M, TAO F, HUANG B Q, et al. Digital twin data: methods and key technologies[J]. *Digital Twin*, 2022, 1: 2.
- [6] MERKLE L, SEGURA A S, TORBEN GRUMMEL J, et al. Architecture of a digital twin for enabling digital services for battery systems[C]//2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS). Taipei, China. IEEE, 2019: 155-160.
- [7] 张旭辉, 吕欣媛, 王甜, 等. 数字孪生驱动的掘进机器人决策控制系统研究[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(7): 36-49.
- ZHANG Xuhui, LYU Xinyuan, WANG Tian, et al. Research on decision control system of tunneling robot driven by digital twin[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 36-49.
- [8] 王忠鑫, 辛凤阳, 宋波, 等. 论露天煤矿智能化建设总体设计[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(2): 37-46.
- WANG Zhongxin, XIN Fengyang, SONG Bo, et al. Overall design of intelligent construction in open pit coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(2): 37-46.
- [9] 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.
- [10] Soni R, Bhatia M, Singh T. Digital twin: intersection of mind and machine[J]. *International Journal of Computational Intelligence and IoT*, 2019, 2(3): 667-670.
- [11] DAVID J, LOBOV A, LANZ M. Attaining learning objectives by ontological reasoning using digital twins[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 31: 349-355.
- [12] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(1): 1-15.
- TAO Fei, ZHANG He, QI Qinglin, et al. Theory of digital twin modeling and its application[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(1): 1-15.
- [13] 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.
- [14] 张帆, 李闯, 李昊, 等. 面向智能矿山与新工科的数字孪生技术研究[J]. *工矿自动化*, 2020, 46(5): 15-20.
- ZHANG Fan, LI Chuang, LI Hao, et al. Research on digital twin technology for smart mine and new engineering discipline[J]. *Industry and Mine Automation*, 2020, 46(5): 15-20.
- [15] 王学文, 刘曙光, 王雪松, 等. AR/VR融合驱动的综采工作面智能监控关键技术研究及试验[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 969-985.
- WANG Xuewen, LIU Shuguang, WANG Xuesong, et al. Research and test on key technologies of intelligent monitoring and control driven by AR/VR for fully mechanized coal-mining face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 969-985.
- [16] 葛世荣, 王世博, 管增伦, 等. 数字孪生—应对智能化综采工作面技术挑战[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(7): 1-12.
- GE Shirong, WANG Shibo, GUAN Zenglun, et al. Digital twin: meeting the technical challenges of intelligent fully mechanized working face[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(7): 1-12.
- [17] 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.
- [18] 阮锴焱, 寇子明, 王彦栋, 等. 矿井提升系统数字孪生快速建模方法研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(9): 219-230.
- RUAN Kaiyi, KOU Ziming, WANG Yandong, et al. Digital twin rapid construction method of a mining hoisting system[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(9): 219-230.
- [19] 路正雄, 郭卫, 张帆, 等. 基于数据驱动的综采装备协同控制系统架构及关键技术[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 195-205.
- LU Zhengxiong, GUO Wei, ZHANG Fan, et al. Collaborative control system architecture and key technologies of fully-mechanized mining equipment based on data drive[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 195-205.
- [20] 丁华, 杨亮亮, 杨兆建, 等. 数字孪生与深度学习融合驱动的采煤机健康状态预测[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(7): 815-823.
- DING Hua, YANG Liangliang, YANG Zhaojian, et al. Health prediction of shearers driven by digital twin and deep learning[J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(7): 815-823.
- [21] 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 workplace monitoring technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(10): 153-161.
- [22] 丁恩杰, 俞啸, 廖玉波, 等. 基于物联网的矿山机械设备状态智能感知与诊断[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2308-2319.
- DING Enjie, YU Xiao, LIAO Yubo, et al. Key technology of mine equipment state perception and online diagnosis under Internet of Things[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2308-2319.

- [23] 李娟莉, 沈宏达, 谢嘉成, 等. 基于数字孪生的综采工作面工业虚拟服务系统[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 445–455.
LI Juanli, SHEN Hongda, XIE Jiacheng, et al. Development of industrial virtual service system for fully mechanized mining face based on digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 445–455.
- [24] 李娟莉, 姜朔, 谢嘉成, 等. 基于采煤机截割路径的动态三维地质模型构建方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 706–712.
LI Juanli, JIANG Shuo, XIE Jiacheng, et al. Construction method of the dynamic 3-D geological model based on shearer cutting path[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2021, 42(5): 706–712.
- [25] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital twin in industry: state-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 15(4): 2405–2415.
- [26] 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. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1–18.
- [27] 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.
- [28] 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): 1–10.
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): 1–10.
- [29] 伍永平, 闫壮壮, 罗生虎, 等. 煤岩组合体应力传递与强度特征倾角效应[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 105–116.
WU Yongping, YAN Zhuangzhuang, LUO Shenghu, et al. Dip effect of stress transfer and structural instability mechanism of coal-rock combination[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 105–116.
- [30] 伍永平, 汤业鹏, 解盘石, 等. 含煤线夹矸岩体力学特性及变形破坏特征的数值实验[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(6): 1198–1209.
WU Yongping, TANG Yepeng, XIE Panshi, et al. Numerical experimental study on mechanical properties and deformation and failure characteristics of the dirt band rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6): 1198–1209.
- [31] 伍永平, 解盘石, 负东风, 等. 大倾角层状采动煤岩体重力-倾角效应与岩层控制[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 100–113.
WU Yongping, XIE Panshi, YUN Dongfeng, et al. Gravity-dip effect and strata control in mining of the steeply dipping coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 100–113.