

煤矿钻机数字孪生系统建模设计

孙宏强¹ 赵晓琛¹ 张有弛² 丁梓炫¹ 赵郑涛¹ 张庆一¹ 王凯¹

1. 石家庄学院 机电学院, 中国·河北 石家庄 050035

2. 河北科技大学 电气工程学院, 中国·河北 石家庄 050091

摘要: 煤炭作为我国主体能源, 其高效安全开采对保障能源安全具有重要意义。针对煤矿开采环境复杂、劳动力短缺及安全风险高等问题, 将数字孪生技术应用于煤矿钻机, 构建虚实映射、实时交互的煤矿钻机数字孪生系统。通过传感器网络采集钻机运行数据, 结合三维建模与仿真技术, 实现钻机状态监控、故障预测、远程操控与智能决策。详细阐述了钻机结构组成、工作原理、关键机构设计及建模过程, 并基于 SolidWorks 平台完成了钻机模型的构建与装配验证, 以提升钻机智能化水平, 助力煤矿实现少人化、高效化与安全生产。

关键词: 数字孪生; 煤矿钻机; 三维建模; 钻机智能化; 煤矿少人化

Modeling and Design of a Digital Twin System for Coal Mine Drilling Rigs

Sun Hongqiang¹, Zhao Xiaochen¹, Zhang Youchi², Ding Zixuan¹, Zhao Zhengtao¹, Zhang Qingyi¹, Wang Kai¹

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shijiazhuang University, China Hebei Shijiazhuang 050035

2. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, China Hebei Shijiazhuang 050091

Abstract: As a primary energy source in China, coal plays a crucial role in ensuring energy security, and its efficient and safe extraction is very important. To address issues like the complex mining environment, labor shortages, and high safety risks, digital twin technology is applied to coal mine drilling rigs to create a digital twin system that allows a real-to-virtual mapping and real-time interaction. Using a sensor network to collect rig operation data, combined with 3D modeling and simulation technology, this system enables rig status monitoring, fault prediction, remote control, and intelligent decision-making. The paper details the rig's structural components, working principles, key mechanism designs, and the modeling process. The rig model was built and assembly-verified using the SolidWorks platform to improve its intelligence level, helping mines achieve fewer personnel operation, greater efficiency, and safer production.

Keywords: Digital twin; Coal mine drilling rig; 3D modeling; Rig intelligence; Reduced-personnel coal mining

0 引言

我国能源资源呈现“富煤、贫油、少气”的特征, 煤炭作为国家主体能源, 是保障能源安全的核心支柱, 同时带动电力、钢铁、化工等产业发展, 为国民经济增长提供重要支撑^[1]。但煤矿井下开采环境复杂, 存在瓦斯爆炸、透水、顶板坍塌等诸多安全风险, 加之新生代从业意愿偏低, 行业劳动力短缺问题日益突出。推行少人化智能生产, 能够有效减少井下作业人员, 缓解用工压力, 规避人员伤亡风险, 是煤炭行业安全高效发展的必然趋势, 而依托自动化、智能化设备系统是实现少人化开采的核心途径。

数字孪生技术历经思想萌芽、概念确立、技术探索阶段, 自 2020 年起进入融合规模化发展阶段, 应用场景从航空航天、高端制造, 逐步拓展至能源、智慧城市、医疗等多个领域^[2]。目前该技术已从理论概念转化为成熟落地方案, 成为各行业数字化转型的核心支撑与战略性基础设施。

随着矿山智能化建设持续推进, 数字孪生在煤矿领域

的应用愈发广泛^[3]。现有研究已验证其应用价值, 刘亚等依托数字孪生技术, 实现煤矿综采工作面虚实场景实时交互, 可对设备运行状态进行监测、预测与优化调控, 赋能安全生产^[4]。在矿用设备研究中, 曾庆良等基于 Unity3D 搭建液压支架群组数字孪生环境, 开发数据驱动的可视化运维系统^[5]; 李爽等将三维可视化技术融入煤矿安全管控平台; 王国法、曹现刚等则构建了煤炭智能开采技术体系与设备智能化运维框架^[6]。

将数字孪生技术与煤矿钻机结合, 可实现虚拟模型与设备实际运行状态的实时同步交互, 有效提升钻机智能化水平, 在提高开采效率、保障作业安全、优化设备运维等方面发挥重要作用, 能够助力煤矿行业数字化转型升级, 全面提升行业核心竞争力。

1 煤矿钻机数字孪生系统

煤矿钻机数字孪生系统通过在煤矿钻机的关键机械结构和设备上布设传感器网络, 实时采集温度、位移、振动、

压力等参数,通过钻机控制系统上传数据^[7]。孪生数字模型根据钻机实际运行数据,利用三维建模软件搭建几何模型,通过交互软件构建数字孪生模型,实时反映钻机的运行状态、性能指标和故障情况。数字孪生技术可以实时仿真钻机的关键动作过程,为远程操作人员提供准确的钻机工况信息,使其能够下发正确的作业指令,提高远程操作的准确性和高效性。通过分析实时数据,数字孪生系统能够识别并预测潜在的故障风险,提前进行预警,帮助工作人员及时采取维护和修复措施,避免生产中断和事故的发生,降低设备维护成本。

煤矿钻机数字孪生系统主要包括数据采集、数据传输、数据存储与处理、孪生模型、可视化交互和应用决策等几层结构,如图1所示。

数据采集层是实际的设备或系统,通过安装在物理设备上的传感器、控制器等获取其状态数据并接受控制指令。

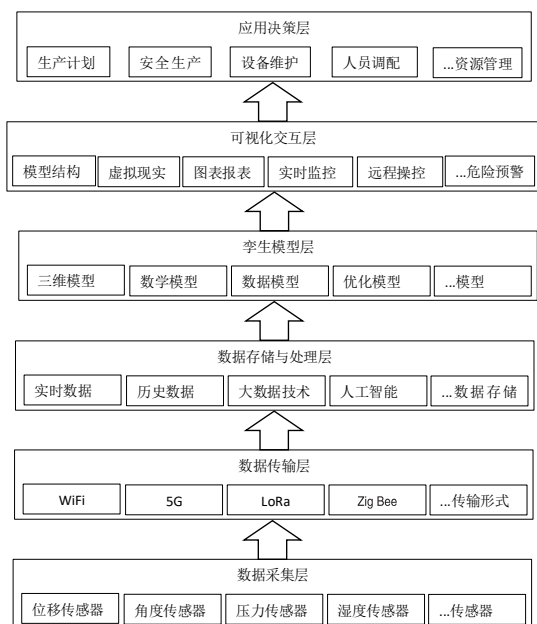


图1 煤矿钻机数字孪生系统结构图

数据传输层负责将物理实体的实时数据传输到数字孪生模型,并将模型反馈指令发送给物理实体,主要依赖各种工业物联网技术,包括各类通信技术、通信协议和网络架构。

数据存储与处理层核心功能是负责实时数据与历史数据的存储与管理,并利用大数据技术对这两类数据进行高效处理。要求系统架构能够支持高并发、低延迟的实时数据处理,同时也能实现对海量历史数据的可靠存储与快速查询分析,从而确保整个数据层面的高性能、可扩展性和数据安全。

孪生模型层:构建物理实体的数字化模型,包括几何

模型、物理模型和行为模型等。该层是数字孪生的核心,用于在虚拟空间中再现实体的结构与功能。

可视化交互层:基于虚拟模型提供各种功能服务,如实时监控、状态评估、故障预测、优化决策等。用户通过可视化界面或应用程序与数字孪生交互,获取分析结果和执行控制操作。

应用决策层作为系统的核心指挥中枢,其功能在于综合利用下层提供的数据与分析结果,对生产运营的多个关键领域进行智能决策与统筹管理,具体涵盖生产计划的制定与优化、安全生产的监控与保障、设备维护的预测与调度、人员的合理调配以及企业资源的高效管理,旨在全面提升运营效率与智能化水平。

上述各层相互协同,形成一个闭环的数字孪生系统,实现物理世界与数字世界的双向映射与交互。由于煤矿钻机数字孪生系统比较庞大,本文主要围绕钻机的结构设计和数字孪生模型创建进行展开。

2 煤矿钻机结构组成与工作原理

煤矿钻机主要用于煤矿井下钻进瓦斯抽(排)放孔,注水灭火孔,煤层注水孔、放顶卸压孔、地质勘探孔及其它工程孔。适用于岩石硬度系数 $f \leq 10$ 的各种煤层和岩层。钻机能独立行走,原地转弯,要求巷道断面 $> 8.5\text{m}^2$,高度 $> 2.4\text{m}$,宽度 $> 3.5\text{m}$ 。

2.1 煤矿钻机主要结构

煤矿钻机主要由操作台、泵站、动力旋转机构、夹持器、导轨组件、钻机底盘和行走机构以及液压动力系统、稳固装置、电气系统、操作控制系统及钻具组成,如图2所示。

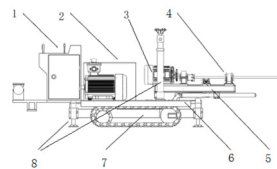


图2 煤矿钻机总体结构

(1)操作台(2)泵站(3)动力旋转机构(4)夹持器(5)导轨组件(6)钻机底盘(7)行走机构(8)支撑立柱

操作台是钻机的控制中心。操作台置于钻机上,方便操作人员坐在钻机上操作。操作台由各种控制阀、仪表及管件组成,通过操控手柄控制组合阀实现钻机的回转、给进、起拔与卡盘、夹持器的联动等功能。

泵站主要包括动力源系统、液压油存储及处理系统、液压泵组件及连接组件。动力源系统由电机和双联轴向柱

塞泵组成,它是泵站的核心部件。液压油存储及处理系统包括冷却器、吸油过滤器、回油过滤器、油箱。液压泵组件及连接组件包括保护和控制液压系统的溢流阀、安全阀及连接管路。工作时电机转动,带动主副泵,此时油箱液压油经过吸油过滤器进入泵,经泵做功使低压变高压,经过液压泵组件及连接组件带动钻车工作。

动力旋转机构由液压马达、减速箱、卡盘、滑动固定座组成。液压马达通过减速箱减速,达到钻杆所需要的扭矩与转速。滑动固定座承载马达及减速箱在导轨上前后移动,底部与导轨内部的推进油缸连接。动力头的旋转马达采用变量马达,通过调整马达尾部的调节手轮改变动力头的转速。为同时满足卡紧圆钻杆和三棱钻杆,卡盘采用机械卡盘,可卡紧不同直径的钻杆,在使用过程中更换钻杆直径时可不更换卡瓦。

夹持器固定在进给装置机身的前端,用于夹持孔内钻具,还可配合回转器实现机械拧卸钻杆。夹持器由两端的两个油缸组成,利用其活塞推力作用夹紧钻杆,反转卸杆时夹持可靠且不打滑。卡瓦安装在卡瓦座上,靠挡边及挡板实现轴向固定。将大端挡板上的固定螺栓去掉,可从一侧取出卡瓦,达到快速更换卡瓦的目的。

导轨组件包括导轨、推进油缸。导轨组件是钻车承上启下的部件,上托动力头、前夹持器,下接立柱、调角油缸、前斜支撑,是钻机钻孔质量的保证。推进油缸的伸缩给动力回转机构前后移动的动力,以便控制钻杆的钻进和后退。为了符合现场实际工况的需要,油缸采用反装方式,实现启拔力大于推进力。把前后横托梁的铰接套和调角油缸连接耳与导轨分开,把导轨旋转 $\pm 180^\circ$ 即可实现钻孔的 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 度仰俯角布置。通过观察导轨前段 180° 角度仪,可调节打钻倾角。

钻机底盘由机架、承载盘、底盘支撑机构组成。机架由优质钢板焊接而成框架式结构,强度高,是行走机构成为整体的连接部分。通过四根支撑油缸承受整机重量及立柱垂直支撑压力的主要部件;承载盘是导轨调角、支撑、旋转的载体;在打钻时,通过观察 360° 角度仪可调节大盘旋转角度,靠四根支撑油缸支撑起整个钻车,在立柱油缸的作用下钻机底盘和回转盘接触,增加钻机支撑的稳定性能,减少转盘回转支撑轴承受力,延长设备的使用寿命。

2.2 煤矿钻机工作原理

工作时,推动行走机构操作手柄,钻机前进到需要钻孔作业的合适位置后,恢复手柄于零位,停止行走。操控底板支撑油缸手柄,使前后底板支撑立柱油缸升起,然后

操作顶板支撑立柱油缸,支撑立柱同时打开,稳定支撑钻机。将安装好钻头的首根钻杆通过前端准星及夹持器放好。再操作回转支撑手柄将导轨旋转到需要打孔的方向。操作角度调节油缸手柄,调整好要求打孔的仰俯角,并锁紧斜撑抱箍螺栓。

控制动力回转机构的操控手柄,旋转马达正向旋转,再控制导轨组件上的前进手柄,油缸推动钻具和回转机构同时前进,实现边旋转边直线移动的钻孔动作。一根钻杆快要完全钻进时,停止前进和旋转,操作夹持器控制手柄将钻杆夹紧,回转机构和直线移动退回起始位置,加装一根新钻杆,与第一根钻杆连接,然后重复上述动作,完成打孔。

3 煤矿钻机主要结构设计及数字建模

煤矿钻机三维建模是实现钻机数字化、智能化管控的核心基础,为后续仿真分析、远程控制、故障诊断等应用提供数字载体。为了构建与物理钻机 1:1 匹配、细节精准、可实时交互的虚拟模型,特参考了某钻机厂家的一款钻机,其技术指标如表 1 所示。

表 1 煤矿钻机技术指标

项目	参数
整机重量	1200kg
钻孔深度	350mm
掘进速度	快进速度 $V_{快}=18\text{m/min}$, 工进速度 $V_{工}=8.5\text{m/min}$
钻杆长度	800mm
钻孔直径	30mm
系统工作压力	20MPa
油泵电机功率	55kW
钻杆回转(正/反)	$-180^\circ \sim 180^\circ$

基于上述技术指标,选取几个对钻机钻孔比较重要的结构进行设计并建模,围绕“几何精准性、物理真实性、数据关联性”三大核心要求,分阶段、分模块推进,采用模块化结构设计,具有结构紧凑、体积窄小,拆装方便、快速满足不同系列不同型号系列化的特点。

3.1 行走机构设计

煤矿钻机行走机构(履带式)由多个关键部分协同构成,其上安装车架、上下稳固立柱装置和履带机构组。履带式移动机构由履带、行走减速机、驱动轮、行走架、支重轮、托链轮、张紧装置、引导轮等组成,确保钻车在井下复杂地形稳定前行,如图 3 所示。

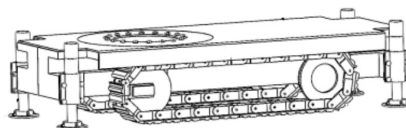


图 3 行走机构

3.2 支撑立柱结构设计

该钻机在作业前需要放下前后稳固装置用作支撑,作业后将支腿收起,为保证作业安全,油路中由两个液控单向阀组成液压锁,可以确保支腿停可靠锁住。支撑立柱共设置四根稳固油缸,可有效减少工作时由于振动造成的钻机移位、开孔位置变化等事故,并可避免钻车振动对人员和设备造成的伤害。

支撑立柱包括上支撑和下稳固两部分。上支撑稳固装置在钻机机身前方两侧向上布置,由油缸、连接杆和柱帽组成,油缸为单活塞杆伸缩式油缸,两杆之间通过组件连接增加结构强度。支撑座与钻机旋转机构通过高强度螺栓稳固连接,其材质为高强度铸钢,能承受较大的压力和冲击力。上稳固装置采用高强度合金钢锻造而成,内部设计有加强筋结构,以提升整体强度和刚性。现场打钻时,油缸伸出可使柱帽顶住上壁稳固钻机,如图4所示。

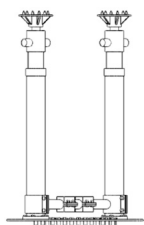


图4 上稳固装置

下支撑稳固组件也称为防侧翻组件,安置在钻机四角,钻机行走时收起,不干涉钻机前进,现场钻孔时向外伸出,支柱伸出增大钻机支撑面积,提高稳固性。同时,在机身前后两端安装有辅助支撑油缸,打钻时油缸可分别伸出顶住隧道底部,用于提高钻机工作时的稳固性,如图5所示。

3.3 旋转机构设计

旋转机构包含旋转支承、旋转平台、减速机、齿轮副、液压管路、制动器、传感器以及相关连接部件,其中回转支承采用交叉滚子轴承形式,履带底盘与车体平台通过过渡板完成对接。车体平台与回转平台以箱式焊接结构实现构建,有助于提高整体的紧凑性与刚性水平,车体平台通过回转支承轴承同回转平台建立联接,这种情况下对较大轴向力、径向力和倾覆力矩的情况时表现出良好的应对性,从而一定程度上确保旋转平台具备平稳运转的状态特性。

旋转平台可以在顺时针 90° ~逆时针 90° 范围内旋转,在车身不动的前提下让工作平台旋转工作,各管路连接部位均采用密封性能良好的接头,防止液压油泄漏。制动器选用液压制动器,安装在减速机输出轴上,当需要停

止旋转时,液压控制系统向制动器施加压力,使制动片抱紧制动盘,实现可靠制动,保障作业安全。在旋转到指定角度后可以进行锁死保证钻车作业时的稳定性。旋转平台可以在旋转平台采用优质碳素结构钢制作,经焊接和机械加工,保证平面度和安装精度,为其他作业部件提供可靠的安装基础,旋转机构示意如图6所示。

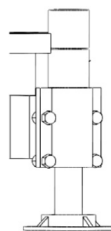


图5 下稳固装置

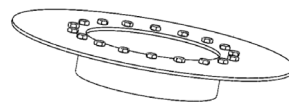


图6 旋转机构示意图

3.4 导轨组件设计

导轨组件用于实现钻机的进给,采用组合油缸式进给机构,主要由液压油缸、导轨、滑板、钻头安装座、液压泵站、控制阀组和传感器构成。组合油缸式进给机构结构简单、可靠性高,和液压马达相比,具有传动效率高的优势。

导轨由高强度耐磨钢材制造,固定在钻车主体上为滑板提供稳定的导向,以保障进给方向具备可观的直线度,滑板靠滑块跟导轨连通,能在导轨上面趋于平滑地动作,其本身选用了铝合金材质,在缩减整备重量同时保证了一定强度。

滑板前端安置了钻头安装座,用于固定安装钻头。液压油缸在进给机构中扮演重要动力部件,采用的是单活塞杆双作用油缸的结构方案,其缸体选用高强度无缝钢管制造而成,活塞杆表面镀铬处理,提升耐磨特性以及改善抗腐蚀性能,油缸的一侧与钻车主体铰接起来,另一端则直接连接到了滑板上。

液压油一旦流入无杆腔,活塞杆就向外伸展,顺势推动滑板带动钻头往前运行,而当液压油流进有杆腔后,活塞杆则会进行缩回操作,这样来回运动便可完成钻头前进和退回的过程。

液压泵选用齿轮泵,具有结构简单、工作可靠、流量稳定的特点。钻杆夹持器的作用是支撑钻杆,为钻杆提供导向,在换钻杆时将钻杆夹紧,防止钻杆滑出,必要时可与动力头配合实现钻杆的拧紧或拆卸,导轨组件结构示意图如图7所示。

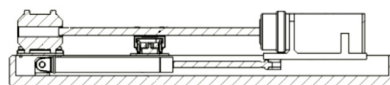


图7 导轨组件结构示意图

3.5 煤矿钻机孪生建模

能够进行三维模型创建的软件有很多，考虑后续需要与数字孪生技术结合应用，对常用的几款建模软件进行了一下对比，如表 2 所示。

表 2 建模软件数字孪生应用性能比较

软件名称	定位	数字孪生建模应用角色	优势	劣势
SolidWorks	机械 CAD 设计	创建高精度物理实体模型	参数化设计、工程关联性、制造数据精准	可视化与动画能力弱、不适合大型场景
UG NX	高端产品工程	创建复杂系统的高精度产品模型	全流程解决方案、处理复杂装配能力强	学习曲线陡峭、成本高、同样需要配合可视化工具
3ds Max	三维建模、动画和渲染	为可视化环节创建轻量化、高逼真度模型	极致视觉效果、强大多边形建模和动画	非参数化、工程数据关联性弱
Unity 3D	实时 3D 开发平台	数字孪生的最终集成、仿真与交互平台	强大的实时渲染、物理交互、VR/AR 支持	不擅长创建精密工程模型、依赖外部模型导入

通过这几种软件的各项对比，选用 SolidWorks 软件进行建模。建好模型后再导入 Unity 3D 软件进行渲染和与物理设备进行数据连接，创建好的钻机三维模型如图 8 所示。

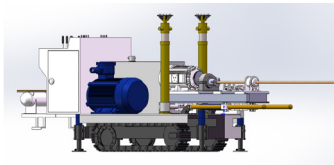


图 8 煤矿钻机数字孪生三维模型

4 煤矿钻机孪生模型装配检查

为了提高设计的效率和装配的精确度，在 SolidWorks 装配环境中，通过对钻机各零部件添加精准配合，确保装配体无过约束和欠约束，考虑到数字孪生模型主要复现真实钻机的动作的主要动作，利用 SolidWorks 软件中的装配视图中评估干涉检查模块对该煤矿钻机数字孪生装配模型进行了碰撞干涉检查，结果如图 9 所示。

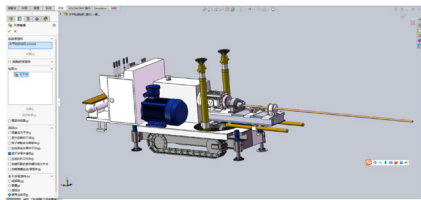


图 9 装配碰撞检查

通过仿真，钻机各零部件设计结构合理，尺寸精准，无装配干涉和冲突，完全复现了煤矿钻机的物理模型。

5 结语

参考数字孪生系统的组成设计了数据采集、传输、存储与处理、孪生模型、可视化交互及应用决策六层结构的数字孪生系统架构，以实现物理钻机与虚拟模型的双向实时交互。

调研煤矿钻机的工作原理，设计了煤矿钻机的具体结构：操作台、泵站、动力旋转机构、夹持器、导轨组件等，为后续建模提供理论基础。

基于真实钻机技术参数，对行走机构、支撑立柱、旋转机构和导轨组件等关键部件进行结构设计，并使用 SolidWorks 完成高精度三维建模，并通过装配干涉检查，验证数字孪生模型结构合理，运动可靠。

数字孪生模型的创建为数字孪生系统迈出了坚实的一步，下一步与物理实体结合进行联调，并根据调试过程进行模型优化，直至数字孪生系统软、硬件协调同步，为煤矿设备智能升级打下坚实基础。

参考文献：

[1] 国家能源局. 新时代的中国能源发展白皮书[R]. 北京：国务院新闻办公室，2020.

[2] Tao F, Zhang H, Liu A, et al. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2405-2415.

[3] 王国法，任怀伟，赵国瑞等. 智慧煤矿数字孪生技术架构与实现方法[J]. 煤炭学报，2022, 47(1): 1-15.

[4] 曹艳丽，王俊澎，徐兴强等. 基于 Map1eSim 的液压支架数字孪生体建模与分析[J]. 机械设计与研究，2025,8.

[5] 自健华，袁逸萍，肖鹿等. 基于数字孪生的矿用带式输送机智能监测，平台研究与实现[J/OL]. 机床与液压，网络首发日期：2025-10-29.

[6] 刘永，王海舰，李首滨. 基于数字孪生的液压支架群虚拟监测系统研究[J]. 煤炭科学技术，2021, 49(6): 200-207.

[7] 张旭刚，张强，王学文等. 基于 SolidWorks 与 Unity3D 的采煤机数字孪生系统研究[J]. 机械设计与制造，2023(3): 1-5.

基金项目：石家庄市科技计划项目：煤矿钻机数字孪生技术研究，项目编号：241080045A；石家庄学院 2025 年大学生创新训练计划项目：钢渣碳固化设备设计研究，项目编号：202510102010；石家庄农业机器人智能感知重点实验室。

作者简介：孙宏强（1977-），男，河北石家庄人，硕士，副教授，研究方向：主要从事机电一体化研究。