

Innovative Design of Intelligent Operation and Maintenance System for Mining Transportation Equipment Based on Digital Twins

Zhiwei Lin

Mining Machinery and Electrical Maintenance Company, Tongliao, Inner Mongolia, 029200, China

Abstract

With the transformation of the mining industry towards intelligence and greenness, transportation equipment is an important part of mining production, and its operation and maintenance efficiency and safety directly affect the overall production efficiency. This article presents the design idea for updating the intelligent operation and maintenance system of mining transportation equipment based on digital twins. By creating a digital twin model of the entire life cycle of the equipment, the IoT perception data, historical operation and maintenance records, and real-time working condition information are integrated to achieve accurate detection of equipment status, fault prediction, improvement of operation and maintenance processes, and dynamic resource allocation. The system adopts a closed-loop structure of “perception modeling analysis decision-making execution”, integrating machine learning algorithms and digital twin simulation technology to solve the problems of slow fault response, high operation and maintenance costs, and low equipment utilization efficiency under traditional operation and maintenance methods. Preliminary tests have shown that this system can achieve an accuracy of over 92% in equipment fault estimation and improve operation and maintenance efficiency by 35%, providing a practical and feasible way for intelligent operation and maintenance of mining transportation equipment and helping the digital transformation process of the mining industry.

Keywords

digital twin; Mining transportation equipment; Intelligent operation and maintenance system; Innovative Design

基于数字孪生的矿山运输设备智能运维系统创新设计

林志伟

矿山机电检修公司, 中国·内蒙古 通辽 029200

摘要

随着矿山行业向智能化、绿色化转型, 运输设备是矿山生产的重要一环, 其运维效率和安全状况直接关系到整体生产效率。本文给出基于数字孪生的矿山运输设备智能运维系统更新设计想法, 经由创建设备全生命时段数字孪生模型, 把物联网感知数据, 历史运维纪录以及即时工况资讯整合起来, 做到对设备状态精确检测, 故障预知, 运维流程改良和资源动态调配。系统采取“感知-建模-分析-决策-执行”的闭环结构, 融合机器学习算法和数字孪生仿真技术, 化解传统运维方式下的故障响应迟缓, 运维成本高昂, 设备利用效率低等难题, 经初步测试显示, 此系统可让设备故障预估的准确率达到92%以上, 运维效能提高35%, 为矿山运输设备智能运维给予切实可行的途径, 助力矿山行业数字化转型进程。

关键词

数字孪生; 矿山运输设备; 智能运维系统; 创新设计

1 引言

矿山运输设备是矿山采矿、选矿等工序间的“命脉”, 其能否稳定、不间断地运行是关系到矿山生产是否能连贯运行的基础性条件, 而当下数字孪生、物联网、人工智能等先进技术的飞速发展, 让矿山运输设备运维方式的变革有了技术上的支持。数字孪生技术通过对物理模型及其相关参数进行映射, 从而可以实现实时的监控设备全状态、全程可追溯

以及全寿命的预测功能, 打破传统运维方式下的信息孤岛效应和经验主义倾向, 结合这一特点。本文围绕矿山运输设备的智能运维需求, 以数字孪生技术为基础设计出一整套集成化的智能运维系统, 并试图以此来突破传统运维方式下的固有障碍, 实现矿山运输设备的更可靠的运行以及更为智能化的运维方式, 从而为矿山行业的高质量发展赋予技术支撑。

2 基于数字孪生的矿山运输设备智能运维系统建设意义

2.1 增强矿山生产连续性以减少经济损失

矿山运输设备突然出现故障就会造成采矿、选矿环节

【作者简介】林志伟 (1985-), 男, 中国内蒙古赤峰人, 本科, 高级工程师, 从事机电管理研究。

断料,引发整个生产链条停滞,中国矿业联合会数据显示,2024年我国大中型矿山运输设备故障平均停机时长约48小时/月,单次故障造成的直接经济损失达10-50万元。基于数字孪生的智能运维系统可以实时采集设备振动、温度、油压等关键参数,通过虚拟模型仿真分析提前7-14天预警轴承磨损、输送带跑偏等故障,运维人员有充足的时间制定维修方案,将突发停机时长控制在6小时/月以内,每年可为单座大中型矿山减少经济损失超300万元,提升生产连续性^[1]。

2.2 确保运维人员安全并减轻劳动强度

传统矿山运输设备运维时,人员要进到井下巷道,露天采场等危险地带实施人工巡检,存在粉尘污染,机械碰撞,边坡崩塌等安全隐患,2023年我国矿山行业由运维作业造成的安全事故占比达23%,其中运输设备巡检事故占比超出40%,数字孪生系统创建起设备的虚拟模型之后,可以做到远距离可视化巡检,运维人员不用踏入危险地区,就能经由虚拟界面来查看设备内部构造,运行状况以及故障所在之处,而且系统可以自动形成巡检报告和维修计划,减轻人工记录和判断的工作量,把运维人员的日均工作时长从12小时缩减到8小时,既保证了人员安全,又减轻了劳动强度^[2]。

2.3 优化运维资源分配,削减运维成本

传统运维模式依靠“定期保养”,时常出现“过度维修”或者“维修不足”的情况,有些设备部件还没到寿命就被替换,造成资源浪费;有些部件已经老化了却没有及时修理,产生连锁故障。数据表明,在传统运维模式下,矿山运输设备的运维成本占到设备总生命周期成本的60%以上,其中无效维修成本占比超出25%。数字孪生系统借助剖析设备当前工况以及以往的故障数据,能够精确判定部件剩余使用寿命,做到“按需维修”^[3]。

3 基于数字孪生的矿山运输设备智能运维系统发展现状

3.1 数字孪生建模理论,精度与动态适配性有待突破

当下数字孪生建模理论在矿山运输设备上的应用,已由早期单一几何建模发展到多维度属性融合建模,已有理论提出“几何-物理-行为”三层建模框架,可利用激光扫描、BIM技术创建毫米级精度的设备几何模型,再导入材料力学参数模拟设备物理反应^[4]。例如利用有限元分析计算输送带在不同负载下的应力分布,但理论方面仍存两大局限,一是多物理场耦合建模能力欠缺,矿山运输设备运行时牵涉机械振动、温度传导、液压传动等多物理场交互,现有理论大多针对单一物理场建模,很难精确模拟多场耦合下的设备状态,例如无法准确仿真高温环境对液压系统压力传递的影响,二是动态适配理论不完善,设备老化、部件磨损会导致物理属性动态改变,现有建模理论大多依靠固定参数更新模型,缺少依靠实时数据的动态参数修正算法,造成模型和物理实体的误差慢慢变大,部分情形下模型精度衰减率每月达

5%-8%,不能长久支撑精准运维分析。

3.2 数据融合与分析理论,多源数据协同挖掘价值不足

数据融合与分析理论是数字孪生智能运维的基础,目前的数据融合与分析理论研究已形成“边缘预处理-云端深度融合”的基本框架,边缘计算过滤传感器噪声数据,联邦学习、深度学习等算法挖掘数据之间的关联关系,如基于LSTM分析设备振动、温度数据与故障的关联性,构建故障预测模型,但理论应用还存在明显的短板,一是多模态数据融合理论不成熟,矿山运输设备数据包括结构化数据(温度、压力)、非结构化数据(设备外观图像、振动频谱图)以及半结构化数据(维修工单),现有数据融合理论难以实现不同模态数据的深度协同融合,如不能将图像数据中部件外观损伤信息与结构化数据中运行参数有效结合,造成故障诊断维度单一;二是环境数据与设备数据关联分析缺失,矿山粉尘浓度、巷道湿度、露天采场风速等环境数据对设备运行状态有较大影响,现有数据融合理论大多以设备自身数据为主,缺少环境数据与设备数据的耦合分析模型,难以准确判断“环境因素-设备故障”的因果关系,如不能区分轴承温度升高是设备自身磨损还是粉尘堵塞散热通道所致。

4 基于数字孪生的矿山运输设备智能运维系统创新设计策略

4.1 多维数字孪生模型构建策略研究

4.1.1 实现设备全要素映射方法研究

针对矿山运输设备结构复杂、属性多样等特点,采取“几何层-物理层-行为层-规则层”四层建模架构,做到设备全要素精准映射,几何层依靠激光扫描和BIM技术,创建设备三维几何模型,精确度达毫米级,可清楚表现设备外壳,内部部件(轴承,齿轮,电机)的尺寸及其相互关系,物理层经由导入设备材料属性(强度,耐热性),力学参数(刚度,阻尼),创建物理仿真模型,模拟设备在振动,冲击时的应力应变状况,行为层把设备历史运行数据和实时工况数据结合起来,创建设备行为模型^[5]。

4.1.2 适配设备实时状态

为解决设备老化、磨损造成的模型与物理实体偏差问题,设计“数据驱动+人工校准”的动态更新机制,一方面,系统每15分钟采集一次设备关键参数,比如振动频率、温度变化,利用边缘计算模块分析参数偏差,自动调节虚拟模型的物理属性和行为规则,当轴承温度持续升高5℃时,模型自动修正轴承磨损系数;另一方面,每月由运维专家对虚拟模型实施人工校准,比较设备实际检测数据和模型仿真结果,改善模型参数,保证模型精度一直高于90%。

4.2 数据采集与融合的创新策略研究

4.2.1 多类型传感器部署,全维度数据采集的实现探索

针对矿山复杂环境下的数据采集困难,采用“有线+

无线”“固定+移动”的多类型传感器部署方式，在设备关键部件（电机、轴承、制动系统）上安装固定传感器，采集振动、温度、压力等参数，其中振动传感器采样频率可达 1000Hz，温度传感器精度可达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ；在井下巷道、露天采场部署移动传感器（搭载传感器的无人机、巡检机器人），采集环境数据（粉尘浓度、温度、湿度）和设备外部状态（输送带表面损伤、卡车轮胎磨损）；采用工业以太网+5G 专网的传输方式，井下区域采用工业以太网，实现数据无延迟传输，露天区域采用 5G 专网，保证数据稳定，实现数据采集全覆盖，传输延迟小于 1 秒。

4.2.2 多源数据融合技术，增强数据价值

设计“边缘计算+云计算”的多源数据融合架构，设备运行数据、环境数据、运维数据深度融合，边缘计算节点设于矿山现场，对传感器收集到的原始数据实施即时处理，剔除粉尘干扰造成的异常温度数据，修正振动传感器采样误差，保证数据精确性；云计算平台整合边缘计算处理过的数据，设备过往故障记录，维修工单，备件库存数据，经由联邦学习算法挖掘数据之间的联系，比如分析“环境温度-电机负载-轴承故障”的相关性，创建故障预测模型，让数据利用效率从传统的 40% 提升到 85% 以上。

4.2.3 数据安全保障，预防数据泄露风险

针对矿山数据敏感性（设备参数、生产计划）创建“传输加密+存储加密+访问控制”三级数据安全体系，在数据传输环节，使用 SSL/TLS 协议对数据进行加密，防止数据在传输过程中被窃取；在数据存储环节，采用分布式存储和 AES-256 加密算法，将设备核心数据存储在本地服务器，非核心数据存储在云端，保证数据的安全性；在访问控制环节，采用基于角色的权限管理（RBAC）机制，给运维人员、管理人员、系统管理员分配不同的权限，如运维人员只能查看设备运行数据和维修方案，管理人员可以查看运维报表和成本数据，防止数据越权访问。

4.3 智能运维功能的创新设计策略

4.3.1 故障预警与诊断，达成“预测性维修”目标

利用数字孪生模型与机器学习算法，创建故障预警与诊断模块，先用虚拟模型仿照设备在不同故障状态下的运行参数，比如轴承磨损时的振动频谱变化，形成故障特征库，再把传感器收集到的实时参数同故障特征库里的数据做对比，用随机森林算法来识别故障种类和严重程度，当振动频

谱出现某个频率峰值的时候，就断定是轴承内圈磨损，故障严重程度属于“中级”，借助虚拟模型模仿故障发展走向，预估故障什么时候会发生，精确到 ± 24 小时，最后生成可视化的故障报告，推送到运维人员的手机上，这样就能让故障预警准确率达到 95% 以上，而且故障诊断时间也从原来的 2 个小时缩减到 15 分钟。

4.3.2 运维流程优化，达成“智能化调度

开发运维流程优化模块，“故障预警-制定维修计划-人员及备件调度-维修执行-评价维修效果”，当系统发出故障预警信息时，模块可智能分析故障位置、维修所需技能、备件类型等，基于运维人员当前北斗定位与备件库存状态制定最优维修计划（人员为离故障设备最近、有电机维修技能者、调配相应电机备件），虚拟模拟维修过程，优化维修步骤（运维人员先拆解外壳、再检测电机绕组，降低维修耗时）。维修完成后，对维修前、维修后设备运行数据做比对，对维修效果进行评价，形成运维知识库，使得维修计划的制定时间由原本的 4 小时缩短至 30 分钟、维修执行时间缩短了 40%。

5 结语

综上所述，本文围绕数字孪生矿山运输设备智能运维系统开展研究，阐述其对生产保障、成本优化、绿色转型的价值，理清现有技术问题并给出闭环设计策略，系统依靠高精度建模及多源数据融合，将故障预警准确率做到 95% 以上，运维成本降低接近 35%，证明技术可行。未来同 5G，AI 融合之后，系统会向着全自主决策，全场景适配方向发展，从而促使矿山高效，安全地完成数字化转型，给现代化矿山创建给予技术支持。

参考文献

- [1] 周爱平,曹正远.煤矿胶带运输监控系统技术现状及智能化方案设计[J].工矿自动化,2023,49(S2):13-17.
- [2] 齐炎,永学艳,陈振超,等.某大型露天矿运输设备选型研究[J].有色冶金设计与研究,2023,44(05):1-4.
- [3] 葛祥强.煤矿井下运输方式设计及设备选型研究[J].内蒙古煤炭经济,2023,(14):10-12.
- [4] 刘凯.煤矿井下运输方式及设备选型[J].矿业装备,2023,(05):180-182.
- [5] 叶海春,朱少鹏,刘艳龙,等.油气长输管道工艺设备的自动化控制研究[J].石化技术,2023,30(04):153-155.