

数字孪生技术在矿山机电设备动态仿真与安全管理中的应用

石立军

北京天地华泰矿业管理股份有限公司 北京

【摘要】在矿山开采智能化转型进程中，机电设备安全管理成为关键环节。数字孪生技术凭借构建虚拟模型的独特优势，实现设备实时动态仿真与精准安全管控。文章围绕该技术在矿山机电设备运行状态监测、故障预测、维护优化等方面的应用展开深入探讨，通过大量实际案例与数据，展现其在提升设备可靠性、降低安全风险、推动矿山智能化发展上的显著成效，为行业技术革新提供重要参考。

【关键词】数字孪生技术；矿山机电设备；动态仿真；安全管理；智能化

【收稿日期】2025 年 3 月 5 日

【出刊日期】2025 年 4 月 6 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250175

Application of digital twin technology in dynamic simulation and safety management of mine mechanical and electrical equipment

Lijun Shi

Beijing Tiandi Huatai Mining Management Co., Ltd, Beijing

【Abstract】In the process of intelligent transformation in mining operations, safety management of electromechanical equipment has become a critical component. Digital twin technology, leveraging its unique advantage of constructing virtual models, enables real-time dynamic simulation and precise safety control of equipment. This article delves into the application of this technology in monitoring the operational status of mine electromechanical equipment, fault prediction, and maintenance optimization. Through numerous practical cases and data, it highlights its significant achievements in enhancing equipment reliability, reducing safety risks, and promoting the intelligent development of mines, providing important references for technological innovation in the industry.

【Keywords】Digital twin technology; Mine mechanical and electrical equipment; Dynamic simulation; Safety management; Intelligence

引言

矿山开采作业环境恶劣，存在高粉尘、高湿度、强震动等复杂因素，机电设备运行安全直接关系到生产效益与人员生命安全。传统管理模式，人工巡检效率低、数据采集滞后，难以满足设备实时监测与精准运维需求。随着物联网、大数据等技术的发展，数字孪生技术逐渐兴起，为矿山机电设备管理开辟新路径。探索如何将其高效应用于矿山机电设备动态仿真与安全管理，对提升矿山智能化水平、保障安全生产具有重要意义。

1 管理难题凸显

矿山生产作为一个庞大且复杂的系统工程，涉及采掘、运输、通风、排水等多个关键环节，所使用的机电设备不仅种类繁多，功能也各有不同。在采掘作业中，

挖掘机凭借强大的挖掘力将矿石从岩体中剥离，破碎机则负责将大块矿石粉碎成便于后续处理的小块；运输系统里，皮带输送机以稳定的输送能力将矿石源源不断地运往指定地点，矿用电机车则灵活穿梭于巷道，承担着短途运输的重任。不同设备的工作原理千差万别，运行环境也极为恶劣^[1]。在地下开采的密闭空间内，潮湿的空气、弥漫的高浓度粉尘时刻侵蚀着设备，机械部件在频繁的摩擦与冲击下加速磨损，电气系统的绝缘性能也因受潮和积尘而大打折扣，故障风险显著增加。

传统的人工巡检方式在这样复杂的环境下，暴露出诸多弊端。巡检人员的专业水平参差不齐，对设备性能变化的敏感度和判断能力各不相同，工作经验的差

异也使得他们在发现设备潜在问题时存在较大差距。在狭窄昏暗的巷道中,巡检人员可能因视觉受限而忽略设备表面的细微裂纹;面对复杂的电气线路,缺乏专业知识的人员难以解读设备运行参数的异常波动^[2]。这不仅导致巡检效率低下,大量设备的巡检工作耗费了大量时间和人力,而且难以精准捕捉设备性能的细微变化,使得设备突发故障频繁发生。

设备维护管理同样陷入困境。在传统模式下,企业缺乏基于设备实际运行状态的科学维护计划,往往只能依据经验或者固定的时间间隔进行维护,这使得企业在设备维护上陷入两难境地。过度维护时,频繁的设备拆解、零部件更换以及大量的人工投入,造成了人力、物力资源的极大浪费,运营成本不断攀升;而维护不足时,设备长期处于疲劳运行状态,机械部件磨损加剧,电气系统老化加速,设备使用寿命大幅缩短,可靠性降低,为安全生产埋下了巨大隐患。以矿山通风机为例,通风机作为保障井下空气质量与人员安全的关键设备,若未根据实际运行状态制定维护计划,随着运行时间的增加,叶片表面会逐渐积尘,改变叶片的动平衡,导致通风机振动加剧,通风效率下降;轴承因缺乏及时润滑与保养,磨损严重,甚至可能引发通风系统故障,一旦发生,井下作业人员将面临缺氧、瓦斯积聚等致命危险。

2 技术应用实践

数字孪生技术应用的核心,在于构建一个全面、精准的设备数据采集与传输体系。通过在设备周身部署密密麻麻的传感器网络,如同为设备安装了无数双“智能眼睛”,能够实时采集温度、压力、振动等关键运行参数。以矿山提升机为例,作为矿山运输的“咽喉”设备,其运行的安全性与稳定性至关重要。在提升机的主轴、轴承、电机等关键部位,分别安装振动传感器、温度传感器与电流传感器,这些传感器如同忠诚的卫士,每秒可采集数百组数据,全方位、无死角地监测设备的运行状态^[3]。采集到的数据借助物联网技术,如同搭上了高速信息列车,迅速、准确地传输至数据处理中心。

在运行状态监测与故障预测环节,数字孪生技术宛如一位经验丰富的“设备医生”,发挥着不可替代的重要作用。基于采集的实时数据与海量的历史数据,技术团队运用先进的机器学习算法,精心训练出设备故障预测模型。这个模型如同拥有“智慧大脑”,能够敏锐地察觉到设备运行参数的细微变化。当设备运行参数偏离正常范围时,虚拟模型会立即如同拉响警报一

般,及时发出预警信号,同时通过深入的数据分析,精准定位故障可能发生的部位与原因^[4]。某矿山应用数字孪生技术对皮带输送机进行监测时,成功预测出托辊轴承故障。在故障发生前,系统监测到托辊部位的振动参数异常升高,温度也逐渐攀升,通过模型分析,准确判断出是托辊轴承磨损所致。

维护优化是数字孪生技术应用的另一重要方向。利用虚拟模型,如同在虚拟世界中为设备维护搭建了一个“试验场”,可以模拟不同维护策略与工况条件,全面评估维护方案的可行性与效果。针对矿山空压机,通过虚拟模型模拟不同的保养周期与维护措施,如更换不同品牌的润滑油、调整滤清器的更换频率等,深入分析这些操作对设备能耗、使用寿命的影响,从而在众多方案中筛选出最优维护计划。数字孪生技术还能实现维护资源的合理调配,根据设备维护需求,提前精准准备所需的备件与工具,科学规划维护人员的工作安排。在某矿山试点应用中,通过数字孪生技术优化设备维护,使维护成本降低了 25%,设备综合效率提升了 18%。

3 显著应用成效

数字孪生技术在矿山机电设备管理中的应用,如同为设备管理装上了“智慧大脑”,显著提升了设备故障预警的准确性与及时性。通过实时监测与智能分析,设备故障预警准确率从传统方式的 60% 左右大幅提升至 90% 以上。以矿山井下排水泵为例,排水泵肩负着排出井下积水、保障作业环境安全的重任。在应用数字孪生技术后,系统实时监测排水泵的流量、压力、电机电流等参数,通过智能算法分析数据变化趋势^[5]。当监测到因叶轮磨损导致流量下降的异常情况时,系统提前发出精准预警,矿山工作人员及时安排维修,避免了因排水不畅引发的井下淹水事故。准确的故障预警如同为矿山生产上了一道“保险”,大幅减少了突发故障导致的停机时间。

在维护成本控制方面,数字孪生技术带来了显著效益。科学的维护计划犹如一把精准的“手术刀”,避免了过度维护与维护不足的情况。通过数字孪生模型对设备运行状态的精准分析,企业能够准确把握设备的维护时机,只在必要时进行维护工作,减少了不必要的设备拆解、零部件更换以及人工投入,避免了资源的浪费。通过提前预测设备故障,能够在故障发生前及时采取措施,降低了因突发故障导致的设备损坏程度,减少了维修成本^[6]。某矿山企业应用数字孪生技术后,设备维护成本降低了 30%,备件库存周转率提高了 40%。

在传统维护模式下,企业为了应对可能出现的设备故障,往往会大量储备备件,导致库存积压严重,资金占用量大。

安全管理水平得到大幅提升是数字孪生技术应用的重要成果。通过实时监测设备运行状态,提前识别潜在安全隐患,数字孪生技术成功使安全管理从被动的事后处理转变为主动的事前预防。对矿山井下电机车的运行状态进行实时监测,系统能够实时采集电机车的速度、位置、电机温度、制动系统压力等参数,通过智能分析,可及时发现电机过热、制动系统异常等安全隐患。一旦监测到异常情况,系统立即发出预警,提醒操作人员采取相应措施,避免因设备故障引发的运输事故。

4 技术应用总结

在当今科技迅猛发展的浪潮中,数字孪生技术宛如一颗璀璨新星,凭借其卓越的动态仿真与强大的数据分析能力,掀起了一场对矿山机电设备管理领域影响深远的技术革命风暴。在矿山生产的复杂体系里,机电设备犹如人体的关键脏器,其稳定运行至关重要。以往,传统管理方式犹如盲人摸象,对设备运行状态的把控存在诸多局限。而数字孪生技术的出现,彻底改变了这一局面^[7]。它如同一位不知疲倦的智能卫士,通过实时监测设备的各项关键参数,从电机的转速到轴承的温度,从电压的波动到设备的振动频率,任何细微变化都逃不过它的“眼睛”。

故障预测与维护环节更是数字孪生技术大显身手之处。通过构建与实体设备高度契合的虚拟模型,仿佛在数字世界中为每一台矿山机电设备打造了一个如影随形的“孪生兄弟”,形成了一个与现实矿山设备运行情况完全对应的数字化“平行世界”。在这个虚拟空间里,设备从设计图纸上的线条,到安装过程中的精准模拟,再到运行阶段的实时映射,直至维护保养的全流程,都被完整且细致地纳入数字化管控体系^[8]。借助先进算法,数字孪生模型能够依据设备过往运行数据以及实时监测信息,提前洞察潜在故障隐患,就像一位经验丰富的医生能够在病症初露端倪时便做出准确诊断。

众多矿山企业在引入数字孪生技术后,犹如为设备管理注入了一剂强心针,效果立竿见影。在管理层面,以往依靠人工巡检与经验判断的粗放式管理模式逐渐被摒弃,取而代之的是基于精准数据的精细化、科学化管理,设备管理水平实现了质的飞跃。生产效率方面,

因设备故障导致的停机时间大幅缩短,生产流程更加顺畅高效。更重要的是,安全风险得到了有效控制。

5 结语

数字孪生技术在矿山机电设备管理领域的应用已取得阶段性成果,但仍有广阔的发展空间。通过人工智能算法进一步提升故障预测的准确性与智能化程度;利用5G技术实现数据的高速传输,确保设备状态的实时同步。其应用场景有望进一步拓展,从单一设备管理延伸至整个矿山生产系统的协同优化,助力矿山实现全面智能化、无人化开采,推动矿山行业朝着绿色、安全、高效的目标持续发展。

参考文献

- [1] 廖晓辉,陈怡.数字孪生换流站实验教学平台设计与应用[J/OL].电气电子教学学报,2025,(01):238-241[2025-04-19].
- [2] 王琬,陈琦.数字孪生技术在水环境监测领域的应用[J].黑龙江环境通报,2025,38(04):25-27.
- [3] 刘恋,唐相桢,胡章杰,等.基于数字孪生的山水城市景观规划实践——以重庆长江北岸为例[J].现代园艺,2025,48(11):138-143.
- [4] 彭文华,王茜,周勇,等.数字孪生驱动的航空制造车间智能柔性生产线设计与实践探索[J].数字化转型,2025,2(04):100-109.
- [5] 李彦龙,丁博功,闫娇娇,等.电气技术在金属矿山机电设备控制中的实践分析[J].冶金与材料,2025,45(03):106-108.
- [6] 刘晓兵.智能矿山背景下的煤矿机电设备管理创新[J].能源与节能,2025,(03):25-27+31.
- [7] 陈玺龙,张博.一种矿山机电设备用新型防腐涂料制备及性能研究[J].粘接,2025,52(03):82-85.
- [8] 马鹏武,罗永刚,赵宏涛.矿山机电设备的管理与维护策略分析[J].内蒙古煤炭经济,2025,(05):142-144.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

