

基于数字孪生的矿山井下变电所电气系统可视化运维研究

徐 翔

华电煤业集团数智技术有限公司 北京 100088

【摘 要】：矿山井下变电所是矿山供电网络的核心枢纽，承担着井下电能输送、分配与安全调控的核心职能，其稳定运行是矿山安全生产、连续作业的基础保障。井下特殊作业环境让电气设备长期处于复杂工况，高温高湿、粉尘堆积与电磁干扰叠加作用，极易滋生各类隐蔽性较强的隐性运行隐患，长期积累易引发设备故障与供电异常。传统人工巡检、经验判断与事后抢修的运维模式，存在监测盲区大、隐患识别滞后、运维管控粗放等问题，难以适配现代矿山智能化精细运维需求。本文引入数字孪生技术，依托虚实融合、数据驱动、智能映射的核心特性，开展井下变电所电气系统可视化运维体系研究，搭建适配井下复杂工况的智能运维体系。研究表明，数字孪生技术可有效弥补传统运维短板，提升电气运维精准度与安全性，推动运维模式由被动处置向主动预判转型，为矿山井下电气智能化升级与安全生产优化提供理论与实践参考，对矿山智能运维体系建设具备重要研究价值。

【关键词】：数字孪生；矿山井下变电所；电气系统；可视化运维；智能监测；故障预警

DOI:10.12417/2811-0536.26.08.066

引言

矿山智能化建设持续深化，井下电气设备集成度与运行复杂度不断提升，对供电稳定性与运维精细化水平提出更高要求。井下空间封闭、环境恶劣，粉尘、潮湿、电磁干扰等因素长期作用于电气设备，极易诱发电气设备绝缘老化、线路损耗加剧与各类隐性故障，常规巡检难以全面排查细微隐患，无法捕捉设备早期异常状态。传统人工巡检、事后处置的运维模式存在明显滞后性与主观性，无法实现设备全时段状态管控，易引发供电中断与安全事故，制约矿山高效安全生产。数字孪生技术可实现物理设备与虚拟模型双向实时映射，具备状态复刻、数据同步、仿真推演与智能预判能力，可有效革新传统运维模式。本文结合井下变电所运维实际痛点，搭建数字孪生可视化运维体系，为井下电气智能运维发展提供新思路，助力矿山电气运维数字化转型升级。

1 数字孪生矿山井下变电所电气系统架构设计

1.1 井下电气多源数据采集与传输方案

数据是数字孪生系统虚实映射与智能运维的核心基础，稳定全面的数据采集与传输体系，是保障可视化运维系统正常运行的前提条件。矿山井下变电所电气系统结构复杂、设备类型多样，高低压配电设备、变压设备与保护装置协同运行，运行过程中产生多维度异构数据，涵盖设备运行参数、本体状态、环境监测及运维业务数据，共同反映电气系统整体健康状态。为实现全域感知，需搭建适配井下恶劣工况的数据采集体系，依托智能感知终端全天候采集设备与环境核

心数据。结合井下电磁干扰强、信号复杂的特性，选用高稳定性通信方式搭建双向传输网络，保障数据低延迟上传与指令稳定下发，规避数据丢包、错乱等问题，为模型映射、状态分析与智能运维提供可靠数据支撑^[1]，保障整套系统长期稳定可靠运行，从源头保障孪生映射数据的真实性与连续性，为后续智能分析筑牢数据根基。

1.2 三维一体数字孪生体构建逻辑

矿山井下变电所电气系统数字孪生体并非简单设备外观复刻，是融合几何形态、物理规则、行为规则的三维一体化数字化实体，可全方位还原设备静态结构与动态运行特性。几何维度依托现场布局、设备参数与线路结构，精准复刻场地、设备与线路空间关系，保证虚实场景高度契合。物理维度结合设备运行机理，植入电气、热力、负荷约束规则，建立参数与运行状态的对应关系。行为维度依据设备控制逻辑与保护机制，搭建动态行为规则，模拟各类运行与故障工况。通过三维一体构建逻辑，实现虚拟模型对物理实体全维度精准映射，能够完整还原设备全工况运行状态，形成完整的数字孪生体系，实现物理实体与虚拟模型的深度融合联动，切实满足智能运维的基础建模需求，保障虚实交互的完整性与准确性。

1.3 可视化运维平台整体功能分层架构

结合矿山井下电气运维实际业务与核心需求，遵循安全稳定、兼容拓展、实用高效的原则，搭建分层模块化的可视化运维平台架构，形成完整闭环运维体系。平台自下而上分为数据感知层、数据处理层、孪

生建模层与可视化应用层，各层级分工明确、联动协同、互不干扰。数据感知层负责现场数据采集与预处理，捕捉设备与环境状态信息；数据处理层完成数据清洗、融合与规整，统一数据标准；孪生建模层依托标准化数据驱动模型实时同步更新；可视化应用层面向运维人员，集成监测、风控、故障处置等核心功能。分层架构实现数据、模型、业务深度融合，便于后续功能迭代，适配矿山智能运维长期发展需求，具备极强的工程适配性与拓展性，能够适配不同规模矿山变电所的运维改造场景，通用性与实用性极强。

2 数字孪生模型构建与可视化实现

2.1 井下变电所高精度几何模型搭建

高精度几何模型是井下电气三维可视化的核心载体，模型精度直接决定虚拟场景还原效果与运维监测准确性。本文依托现场勘测数据、设备图纸与场地布局资料，对变电所场地结构、高低压设备、变压装置、电缆线路及附属设施开展全场景精细化建模。建模中严格把控设备比例、空间位置与线路走向，同时优化模型结构，剔除冗余面片，避免渲染卡顿、加载延迟等问题。完成单体建模后结合现场实际布局完成场景拼接校准，修正空间偏差与结构误差，构建精准流畅的三维几何场景，为多物理场耦合、状态映射与可视化交互奠定坚实基础^[2]，保障虚拟场景与现场工况高度统一，为后续智能运维功能落地提供精准场景支撑，保障可视化展示的真实性与专业性。

2.2 电气设备多物理场耦合映射建立

单纯几何模型仅能还原设备外观与空间布局，无法体现设备内部运行状态与动态参数变化，难以满足精细化智能运维的核心需求。为此本文搭建多物理场耦合映射机制，实现虚实设备运行状态深度绑定。结合井下电气设备运行特性，融合电气、热力、机械多维度物理特征，将设备电气、温度、振动等动态数据与虚拟模型精准绑定，建立标准化映射规则，实时同步设备负荷、温度、参数偏移等动态变化。同时纳入井下温湿度、粉尘、电磁干扰等外部因素，还原真实工况运行规律，精准反映设备实时健康状态与潜在损耗问题，全方位复刻设备真实运行工况，有效弥补传统静态建模的应用短板，大幅提升模型动态感知能力。

2.3 轻量化三维可视化场景渲染呈现

为适配矿山运维终端运行条件，保障可视化系统高效稳定运行，采用轻量化渲染技术实现井下场景与设备状态三维可视化呈现。井下设备繁多、结构复杂、数据更新频繁，对渲染性能与画面流畅度要求较高，

通过分级渲染、动态加载、场景精简等轻量化手段，降低算力消耗，提升场景加载与刷新效率。优化后场景支持漫游、缩放、细节查询、多视角切换等交互功能，全方位展示变电所布局与设备状态。依托实时数据驱动，设备异常可自动高亮变色预警，直观提示异常点位与类型，实现二维监测向三维全景可视化监测的升级^[3]，极大提升运维人员的作业便捷性，降低井下远程运维的操作难度，适配矿山现场智能化作业需求。

3 基于数字孪生的可视化运维功能实现

3.1 全域实时状态监测功能

实时状态监测是可视化运维体系的核心基础功能，依托虚实同步机制实现井下电气系统全设备、全参数动态管控。系统持续采集设备运行与现场环境数据，规整处理后实时驱动孪生模型更新，保证虚实设备运行状态高度同步无偏差。运维人员可通过三维界面直观查看设备参数、运行状态与线路负荷，全面掌握变电所运行态势，解决传统运维数据零散、感知片面、存在盲区的问题。系统支持历史数据存储与趋势回溯，可精准捕捉细微异常波动，实现电气系统全时段精细化无死角管控，彻底改变传统粗放式监测模式，构建全天候不间断的设备状态感知体系，全面提升设备运行监测的精细化水平。

3.2 智能化故障预警与隐患识别功能

依托数字孪生数据积累与多物理场耦合分析能力，结合井下电气设备故障特征，搭建智能化故障预警与隐患识别体系，推动运维模式向主动预判转型。系统整合设备历史运行数据、典型故障案例与实时监测数据，构建适配复杂工况的故障判别模型，可精准识别过载、参数异常、绝缘老化、线路故障等各类隐患。系统可提前捕捉异常趋势，分级推送预警信息，定位故障点位与类型，辅助运维人员提前处置隐患，有效降低电气故障发生率，保障矿山供电系统稳定运行^[4]。从根源上减少突发性供电故障带来的生产停滞与安全隐患，大幅提升供电保障能力，实现隐患早发现、早处置、零事故的运维目标，筑牢矿山供电安全防线。

3.3 全场景模拟推演与智能辅助决策功能

模拟推演与智能辅助决策是数字孪生运维的核心优势，可有效规避现场高危操作风险，提升运维决策规范性。依托高精度孪生模型，系统可脱离物理现场完成负荷调整、设备启停、故障复现、工况调试等虚拟推演工作。运维人员可提前预演运维方案、模拟故

障处置流程,预判操作影响,规避盲目操作带来的安全隐患。系统结合推演结果与实时数据,为设备运维、隐患处置、负荷调控提供智能建议,形成仿真验证、数据支撑的闭环运维模式,大幅提升井下电气运维精准性与专业性,为运维决策提供可靠技术支撑,有效规避人工经验决策的局限性,提升运维决策科学性。

4 应用效果分析与总结展望

4.1 系统整体应用成效分析

将本文设计的数字孪生可视化运维系统应用于井下变电所实际场景,可有效破解传统电气运维痛点,具备显著应用价值。系统依托三维全景可视化监测,消除人工巡检盲区,大幅提升设备状态感知的全面性与精准性。智能预警体系可提前识别隐性隐患,减少突发电气故障,降低安全事故概率,保障供电系统持续稳定运行。同时虚拟推演功能可替代高危现场实操演练,提升运维人员应急处置能力,有效规避井下作业安全风险,全面提升电气运维安全等级^[5],为矿山安全生产筑牢技术屏障,具备极高的现场推广价值与行业借鉴意义,可广泛应用于各类矿山井下供电运维场景。

4.2 运维效率与故障处置能力提升效果

相较于传统人工运维模式,数字孪生可视化运维系统可简化运维流程、压缩故障处置时长,显著提升运维效率。传统故障排查需人工下井逐段检测,流程繁琐、耗时较长,极易造成矿山生产停滞与经济损失。本系统可自动完成故障定位、类型判别与风险提示,运维人员可快速锁定故障点位,大幅缩短排查处置时间。同时系统实现运维工作数字化、智能化,替代大

量重复性人工作业,降低运维成本与劳动强度,推动电气运维向精细化、智能化管理转型,全面提升矿山供电运维管理水平与生产经济效益,为矿山降本增效提供有力支撑。

4.3 研究总结与未来发展展望

本文围绕井下变电所电气可视化运维需求,完成数字孪生系统架构设计、模型构建、功能开发与应用验证,搭建了适配井下复杂工况的智能运维体系。研究梳理了数据采集、孪生建模、轻量化渲染、智能运维落地的完整技术路径,有效解决传统运维感知滞后、盲区较多、处置低效等问题,证实了技术融合的工程应用价值。未来可优化耦合算法、提升预测精度,融合前沿技术拓展运维功能,完善数字孪生运维体系,推动井下电气运维智能化升级,助力矿山智能转型与高质量发展,为行业同类研究与工程应用提供重要参考依据,持续赋能矿山智能化建设。

5 结语

矿山井下变电所电气运维是矿山安全生产的核心环节,传统粗放运维模式已无法适配智能化矿山建设需求。数字孪生技术凭借虚实融合、数据驱动的优势,有效破解传统运维痛点,为智能可视化运维提供全新路径。本文完成数字孪生运维系统设计与功能落地,验证了系统优化运维模式、提升效率、规避风险的显著价值。持续深化技术融合、迭代优化系统体系,可有效夯实电气安全运维基础,推动矿山运维体系全面升级,助力矿山安全高效的智能化高质量发展,对矿山智能运维标准化、规模化发展具有深远意义,具备良好的推广与研究前景。

参考文献:

- [1] 宋玉.矿山井下保护接地设计[J].矿业工程,2020,18(01):67-68.
- [2] 朱争荣.矿山井下电网的三大保护的探究[J].世界有色金属,2018,(12):290-291.
- [3] 石桢.白布煤矿矿井输变电系统的探讨[J].山西煤炭管理干部学院学报,2014,27(04):38-39+45.
- [4] 郑永州,韩思源,王春建,姚书海.煤矿新型供电保护测控系统的应用[J].矿山机械,2009,37(16):19-22.
- [5] 刘玉宁,翁联志.煤矿井下变电所漏电声光信号装置[J].煤矿安全,1984,(09):28-30+44.