

选煤厂数智化转型的关键技术与实践路径

薛睿源, 苗云飞, 邢可新, 翟晓飞

陕西新能选煤技术有限公司 陕西西安

【摘要】针对传统选煤厂数据孤岛、智能决策薄弱及安全管控与生产控制协同不足的问题, 基于智慧选煤数智管控工程, 提出安全导向的数智化转型技术体系与实施路径。通过构建基础信息模型、专家算法模型和场景迭代模型, 融合 PLC、在线监测、视频与移动端数据, 形成设备健康预警、工艺智能控制、供配电五防校核及风险追溯等应用。工程验收表明, 设备故障诊断准确率达 93%, 日均停机时间减少 0.55 h, 智能停电平均操作时间缩短 40% 以上, 误操作风险显著降低, 同时精煤回收率提升 1.1%、介耗降低 16%。结果表明, 以数据治理为基础、以安全场景为牵引、以分级控制和持续迭代为保障的实践路径, 可提升选煤厂安全可靠运行与智能化管控水平。

【关键词】选煤厂; 数智化转型; 安全管控; 智能控制; 数字孪生; 预测性维护

【收稿日期】2026 年 3 月 5 日 **【出刊日期】**2026 年 8 月 24 日 **【DOI】**10.12208/j.ispm.20260019

Key technologies and practical path for digital-intelligent transformation of coal preparation plants

Ruiyuan Xue, Yunfei Miao, Kexin Xing, Xiaofei Zhai

Shaanxi Xinneng Coal Preparation Technology Co., Ltd. Xi'an, Shaanxi

【Abstract】To address data silos, weak intelligent decision-making and insufficient coordination between safety management and production control in conventional coal preparation plants, a safety-oriented technology system and implementation path for digital-intelligent transformation are proposed based on a smart coal-preparation engineering project. A basic information model, expert algorithm model and scenario-iteration model are constructed to integrate PLC, online monitoring, video and mobile data, supporting equipment-health warning, intelligent process control, five-prevention verification for power switching and risk traceability. Final acceptance reported 93% fault-diagnosis accuracy, a 0.55 h/day reduction in downtime, over 40% reduction in average switching-operation time, a significant decrease in misoperation risk, a 1.1% increase in clean-coal recovery and a 16% reduction in medium consumption. The results show that data governance, safety-scenario-driven construction, graded control and continuous iteration can improve both safe and reliable operation and intelligent management.

【Keywords】Coal preparation plant; Digital-intelligent transformation; Safety management; Intelligent control; Digital twin; Predictive maintenance

引言

选煤厂是煤炭生产系统中设备密集、工艺连续且人机交互频繁的重要环节。随着处理能力和系统复杂度增加, 传统依赖 PLC (Programmable Logic Controller) 集控、人工巡检和经验调节的运行方式在设备异常早期识别、跨系统风险联动、供配电操作追溯以及工艺波动处置等方面存在局限。现有研究表明, 选煤厂智能化建设已在关键生产环节智能控制、智能管理、数据标准化和智能决策方面取得进展, 但在线

仪表可靠性、系统稳定性、数据治理、后期运维和人才能力仍是制约高级智能化建设的共性问题^[1-2]。

矿山工业互联网、大数据治理、数字孪生及智能算法的发展, 为选煤厂由“自动化运行”向“状态可知、风险可判、控制可追溯”的数智化模式转变提供了技术条件^[3-5]。特别是对于《煤矿安全》关注的生产安全问题, 数智化建设不能仅以精煤回收率、介耗和管理效率作为目标, 还应将设备健康、供配电安全、人员少暴露、异常预警、权限管理和系统可

可靠性贯穿技术架构与实施全过程。

本文以智慧选煤数智管控一体化项目的研究报告和验收总结为主要工程依据, 梳理数智化转型中的数据融合、基础信息模型、专家算法、数字孪生、

设备健康、智能控制与安全保障等关键技术, 提出“诊断—建设—验证—迭代—推广”的实践路径, 并结合文家坡选煤厂应用结果分析其安全与生产效益, 如图 1 所示。

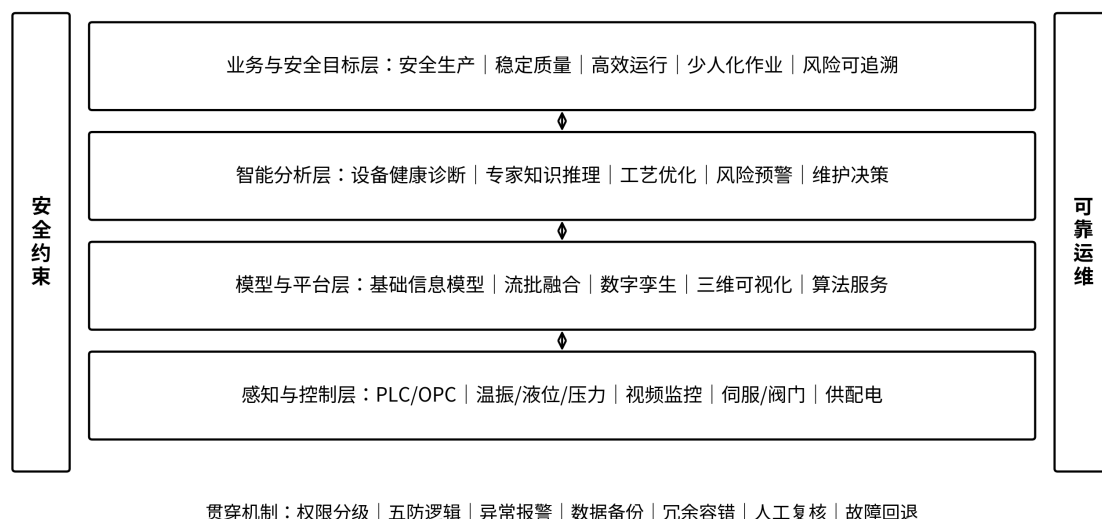


图 1 选煤厂数智化转型的安全导向关键技术体系

1 数智化转型的关键技术

1.1 多源数据融合与基础信息模型

数据互联是数智化转型的前提。项目实施前存在控制系统、视频系统、设备信息和管理数据相互分散的问题。项目通过 OPC (OLE for Process Control) 接口接入 PLC 实时数据, 利用物联网获取温振、温度、压力和液位等状态数据, 并汇聚视频、设备档案和管理信息, 通过数据清洗、标准化、格式转换、关联融合和流批融合形成统一数据服务。

基础信息模型建立后, 设备台账、运行变量、工艺隶属关系以及检修信息被归并到统一对象下。这样处理后, 各业务模块调用的是同一套设备身份和数据关系, 不需要再分别维护台账或重复配置接口。项目研究报告给出的结果为: 模型数据覆盖率超过 98%, 数据准确率超过 99%, 查询响应时间控制在 1.5s 以内。由此可见, 基础信息模型的作用并不限于三维展示, 它实际上承担了故障分析、风险提示和控制计算所需的数据组织工作。

在安全业务中, 数据是否“对得上”比数据是否“接得进来”更重要。实际建设时, 需要重点检查不同系统的时间基准、测点编号、报警状态和历史记录是否一致。若同一台设备在 PLC、监测平台和管

理系统中出现不同状态, 后续的联锁判断就可能失去依据。因此, 数据编码和接口规范应与安全规则同步设计, 并在系统运行过程中持续校验。

1.2 专家算法与设备健康预警

项目并未采用单一算法覆盖全部场景, 而是建立了由神经网络、多元线性回归、支持向量机、聚类方法和专家规则组成的算法库, 再依据业务问题选择相应模型。设备健康模块主要调用关键设备的温振、温度、压力以及历史故障数据, 先判断运行状态, 再结合已有故障模式和专家经验给出预警或检修建议。算法输出最终服务于维护安排, 而不是停留在模型精度展示层面^[6-7]。

从现场结果看, 设备管理方式由故障发生后的被动处理, 逐步转向按状态安排检修。项目验收时设备故障诊断准确率为 93%, 日均停机时间比改造前减少 0.55 h。对安全生产而言, 这一变化的价值还在于减少设备长期带病运行和突发停机, 进而降低人员临时进入现场抢修的频率。

对样本数量很少的异常以及操作规程中明确禁止的行为, 单靠数据模型并不稳妥。工程中更适合把模型和经验规则分开使用: 模型负责发现变化趋势和复杂特征, 规则负责检查硬性边界, 置信度不足或

后果较严重的情况仍由人员确认。这样可以避免将难以解释的模型结果直接转换为高风险控制动作。

1.3 数字孪生与风险可视化

数字孪生在智能矿山中的用途已经从单纯三维建模扩展到运行监测、维护分析和协同控制^[4-5]。本项目对三维模型进行了轻量化处理,并把实时数据、风险提示、维护记录和业务操作绑定到相应设备对象,使现场设备的变化能够同步反映到数字场景中。

在该厂的实际使用中,三维场景首先承担的是“找设备、找状态、找历史”的作用。某台设备出现报警后,值班人员可以直接调取对应位置的视频与运行信息,并继续查看检修记录;供配电、照明和主生产设备的状态也能够放在同一界面核对。目前项目中的孪生应用仍以运行监视和辅助研判为主。若后续增加工艺预测和控制策略仿真,更合适的做法是先在数字空间检验调整结果,再决定是否下发到现场。

1.4 智能控制与安全闭环

项目中的自动控制并不是把所有工艺交给同一种算法,而是按照设备特性分别处理。磁选机以雷达液位为主要反馈,由PID(Proportional-Integral-Derivative)配合专家规则调整分流箱开度;板框压滤机根据滤液流量、压力变化判断进料和卸料时机;原煤分选则同时参考灰分、粒度、旋流器压力和介质密度,计算分选密度后再调节补水阀、分流阀。现场信号、控制动作和设备反馈能够前后对应,才构

成真正可用的闭环。

但并非所有场景都适合完全自动化。工艺参数可以在约束范围内自动调整,也可以保留人工确认;设备健康分析更适合作为预警和检修依据;供配电操作则必须以确定性规则为底线。项目将保护状态、电缆接头温度和仪表数据接入数字化供配电系统,操作前由电子操作票和五防逻辑检查顺序,操作过程全程留痕。项目总结显示,智能停送电平均操作时间缩短40%以上,误操作风险明显下降。

1.5 网络、数据安全与系统可靠性

随着生产控制、视频、移动终端和算法服务逐步联网,平台故障也可能影响现场生产。项目为此配置万兆环网和无线覆盖,并在运行维护方案中提出权限控制、数据备份、冗余及恢复等要求。此类措施的目的不是单纯提高网络性能,而是保证某一通信链路或平台服务异常时,关键业务仍有继续运行或安全退出的条件。

选煤厂数智化建设因此有两类安全问题需要同时处理:一类是借助数字技术减少现场误操作、设备异常和人员暴露;另一类是数字系统自身出现异常后不能把风险继续传递到生产端。对停送电等关键操作,仍应保留本地PLC、固定联锁或人工操作等独立手段。平台、网络或算法出现故障时,系统可以退回这些既有控制方式,而不是继续依赖失效的信息链。(见表1)

表1 选煤厂数智化关键技术及其安全作用

技术内容	现场采用的做法	主要解决的问题	已确认结果
数据组织与基础信息模型	通过 OPC 和物联网汇集实时/历史数据,统一设备编号和数据含义	避免同一设备在不同系统中状态不一致,便于追溯	覆盖率>98%;准确率>99%
设备状态分析	温振、温度、压力等监测量与故障模型、专家经验共同判断	提前安排检修,减少突发故障和临时抢修	诊断准确率 93%;日均停机减少 0.55 h
数字孪生应用	轻量化三维模型绑定实时状态、风险提示和维护记录	快速定位设备,并把运行信息与空间位置对应	已实现设备状态与业务信息联动
工艺调节	PID 及关系模型根据在线变量调节阀门和运行参数	减少工艺波动及高频人工干预	精煤回收率+1.1%;介耗-16%
停送电管理	电子操作票、五防逻辑和过程记录共同约束操作	减少步骤遗漏和人为误操作	平均操作时间缩短 40%以上
平台与网络保障	万兆环网、权限管理、备份以及冗余/容错措施	平台异常时保留业务恢复或回退条件	核心页面响应<2 s;在线用户≥1000

2 数智化转型的实践路径

2.1 以安全风险和业务痛点开展现状诊断

项目启动阶段没有直接从设备采购或软件功能入手,而是先对工艺流程、设备运行和现有信息系

统逐项梳理。生产方面主要核查煤质变化、介耗、设备利用率以及参数调节中反复出现的问题;安全方面则重点看停送电、人工巡检、夜间作业、异常报警处置和信息系统故障等环节。把现场反复发生的问

题和对应风险列清楚后,再确定哪些场景优先实施。

这一步形成的结果应能够回答三个实际问题:现场缺什么数据,数据准备支持什么判断,判断结果最终允许做到哪一级控制。只需要掌握运行状态的场景可以停留在监测层;需要经验判断的场景提供分析结果或参数建议;只有控制边界、异常处理和回退条件均经过验证后,才适合进入自动执行。这样划分比单纯按设备数量安排建设任务更符合现场使用逻辑。

2.2 数据先行建设统一底座

项目技术路线先处理基础数据,再逐步增加模型和业务应用。实践中,这意味着设备编码、测点名称、计量单位、时间戳以及接口协议需要先统一,关键安全测点还要增加数据质量检查和异常标记。若底层数据关系没有理顺,后续增加算法数量并不能解决跨系统信息不一致的问题。

对既有系统进行改造时,宜优先利用标准接口读取数据,尽量不改动原有 PLC 安全连锁。新购设备则应在选型阶段明确数字接口、原始数据可获取性和远程诊断能力。这样既保留已有控制系统的安全边界,也能减少后续平台接入和接口改造的工作量。

2.3 场景牵引形成分级闭环

基础数据稳定以后,项目没有一次性铺开全部智能场景,而是先选择设备健康、磁选机液位、板框压滤、原煤分选、智能润滑、照明以及停送电等业务进行实施。这些场景分别对应设备、工艺、能源和电气安全问题,既能形成可量化成效,也便于验证不同类型的控制方式。

从控制风险看,可将场景区分为监测预警、辅助决策和自动控制三类。设备状态、视频监控等主要提供信息;检修建议和工艺参数推荐仍需人员参与判断;液位、压滤状态和部分阀门调节可以在条件满足时自动执行。自动化程度越高,对数据可信度、动作边界、人工接管以及故障回退的要求也越严格。

2.4 系统集成与安全验证同步开展

系统开发采用模块化方式逐项部署业务功能,接口和数据标准则统一管理。功能上线前除常规功能测试外,还进行了性能、压力和安全方面的检查;进入试运行后继续记录模型在不同工况下的表现以及现场人员对操作流程的反馈,并据此调整参数和流程。

因此,场景开发完成并不等于可以直接长期运行。实际验证至少要覆盖单项功能、跨系统联动、异常工况、权限与操作流程、系统压力和稳定性以及现场试运行。对涉及安全的控制场景,还应专门测试通信中断、数据缺失或模型不可用时系统会进入何种状态,确认人工接管和降级路径真实可用。

2.5 评价迭代与标准化推广

项目在验收后形成了可供后续改造参考的方案,同时提出继续完善系统集成、数据安全、可靠性、标准化和人才保障。现场运行也表明,数智化平台需要不断根据新数据和新工况调整,模型参数、业务流程和软件版本都可能发生变化,因此其建设更接近持续运维过程,而不是一次交付后长期不变的工程。(见表 2)

表 2 数智化转型各阶段的主要任务与安全控制点

阶段	实际工作内容	阶段结果	上线前需要确认
前期诊断	走查工艺、设备和现有系统,记录反复出现的运行与安全问题	问题清单及实施先后顺序	高风险作业、关键连锁、人工操作位置是否识别完整
数据整理	统一设备编号、测点、接口和数据含义,并检查数据质量	可供各应用共用的基础信息模型	时间是否同步、测点身份是否唯一、历史记录能否追溯
场景开发	按问题选算法并整理专家规则,完成诊断、预测或控制功能	可运行的业务场景	模型适用工况、规则边界和操作权限是否明确
系统接入	连接 PLC、视频、在线监测和移动端,与原系统共同运行	一体化业务平台	不能破坏原安全连锁;控制异常时必须要有回退方式
试运行	在正常和异常工况下测试功能、性能和操作流程,并整改发现的问题	测试记录、整改结果和现场反馈	人工接管、通信/数据异常以及恢复路径是否经过实测
长期运行与推广	依据运行数据调整模型和流程,形成可复用的建设与运维经验	版本记录、运维制度及推广方案	数据安全、冗余容错和持续评价机制是否落实

在其他选煤厂推广时,可以复用数据模型、接口规范和基本安全架构,但具体场景参数不能简单照搬。不同工艺流程、设备型号和管理制度会改变控制条件

和风险边界。较合理的做法是保留通用底座,再根据现场条件重新配置业务场景,从而避免平台能够运行却无法真正适应生产的问题,如图2所示。

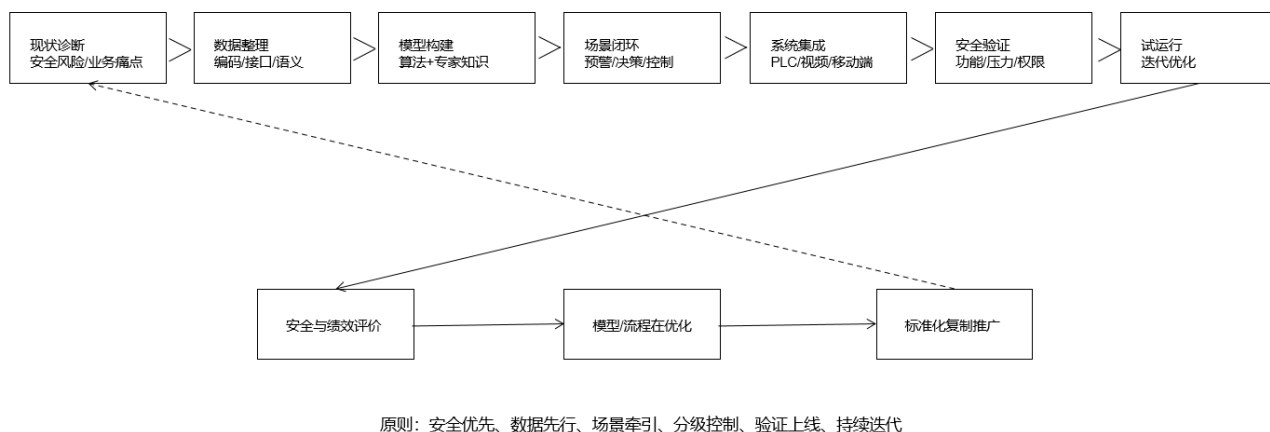


图2 选煤厂数智化转型实践路径

3 工程应用效果

3.1 设备与电气安全场景

工程投运后,设备健康模块持续接收关键设备运行信息,并把异常状态转化为检修提示。最终验收资料记录的故障诊断准确率为93%,日均停机时间较改造前减少0.55h。智能润滑则依据运行时长和设备状态控制供油,对堵油、低油位和低压力等异常单独报警。实际效果是部分例行点检和临时抢修被提前安排的维护所替代,人员进入设备区域处理突发问题的次数随之减少。

停送电业务的改造重点落在操作过程本身。移动终端接收操作任务后,电子操作票和五防逻辑先核对权限、设备状态和操作顺序,执行过程自动留存记录,完成后还可以追溯具体步骤。项目统计表明,平均操作时间缩短40%以上。这里的数字化作用主要是把原本依靠人工记忆和纸面核对的步骤固化到流程中,现场规程、硬联锁和必要的人工确认仍然保留。

3.2 生产稳定与人员少暴露

生产环节的变化主要体现在参数调节频率降低。原煤分选、磁选液位以及压滤控制接入在线数据后,部分调节由系统连续完成,不再依赖操作人员反复手动修正。最终验收中,精煤回收率提高1.1%,介耗下降16%,运维作业时间减少6%。此外,照明按区域和时段自动启停,并与视频监控配合,夜间巡

检条件得到改善;视频和移动终端也替代了一部分必须到现场完成的巡视。

这些指标与安全之间并不是简单的一一对应关系,但现场运行方式确实发生了变化。工艺波动减小后,临时调整和应急处置更少;设备异常能够提前发现后,突然停机造成的抢修需求下降;远程监测和自动调节替代一部分高频现场操作,也减少了人员进入设备密集区域的次数。因此,安全收益更多体现在长期运行中的风险暴露减少,而不是某一个单独的“安全分值”。

3.3 系统级成效与数据口径说明

项目最终验收采用的统一统计口径为:精煤回收率提高1.1%,介耗下降16%,日均停机时间减少0.55h,运维作业时间减少6%,设备故障诊断准确率93%,年直接经济效益341.9万元。平台运行方面,同时在线人数超过1000人,核心页面响应时间小于2s。上述数据分别对应生产、设备和系统运行效果,不宜相互换算为一个综合指标。

项目研究报告中还列有安全事故、粉尘以及照明能耗等阶段性统计。由于这些指标在最终总结材料中没有按照相同周期和统计方式再次确认,本文没有把它们并入最终验收成效,以免把不同阶段的数据放在一起比较。工程效果分析只使用最终总结已经确认,或在两份材料中能够明确对应的数值。

4 讨论

4.1 数智化转型应由“效率导向”升级为“安全—生产双目标”

仅用产量、回收率、节省人工或管理效率评价数智化项目,容易忽略安全运行发生的变化。对选煤厂而言,更值得在验收阶段记录的是:异常能提前多长时间发现,高风险操作是否减少,报警是否真正闭环,系统故障后能否降级,以及关键操作能否完整追溯。后续项目可据此补充预警提前量、误报率、高风险人工操作次数、异常闭环率、降级成功率等指标,使生产收益和安全收益分别得到验证^[8]。

4.2 从单点智能向跨系统风险协同演进

现有项目已经把设备健康、工艺控制、照明和停送电等场景分别做了智能化,但DCS(Distributed Control System)、PLC、ERP(Enterprise Resource Planning)、MES(Manufacturing Execution System)之间仍有进一步协同的空间。下一阶段的价值不一定来自继续增加应用数量,而可能来自不同系统对同一事件的共同响应。例如设备健康出现异常时,可同步查看当时生产负荷,并生成维修任务;夜间报警发生后,可联动照明、视频和移动端通知。要实现这种协同,首先需要统一事件定义和操作权限,否则系统连接得越多,判断反而越容易冲突。

4.3 数据安全与功能安全需同步设计

平台逐渐进入生产控制链后,错误数据、通信中断和权限配置不当都会产生实际后果。项目后续方案已经把加密、备份、权限、冗余和容错列为改进内容。对新的数智化改造而言,这些要求应与业务功能一起设计,在方案阶段就明确故障情况下哪些功能继续运行、哪些功能必须停止,而不是等平台建成以后再补充安全措施。

人工智能模型也应按风险分配权限。对于后果较轻、动作范围明确的场景,可以在充分验证后提高自动化程度;涉及供配电和其他安全关键操作时,模型更适合作为识别或建议工具。输入数据需要先做质量检查,输出结果必须受范围和规则约束,同时保留人工接管与固定联锁。这样即便模型精度因工况变化而下降,也不会直接突破原有保护边界。

5 结论

1) 该项目的实践表明,选煤厂数智化不是单独建设一个平台,而是先把分散数据和设备对象对应起来,再把诊断、孪生和控制功能嵌入具体业务。基础信息模型解决数据一致性问题,算法和控制功能

则需要在既有安全联锁范围内运行。

2) 从实施顺序看,先梳理现场问题和风险,再治理数据、开发场景、完成系统集成,最后通过异常工况和现场试运行检验控制边界,较符合工程实际。监测、辅助决策和自动控制不宜使用同一权限标准,自动化程度提高时,应同步增加人工接管和故障回退要求。

3) 最终验收中,设备故障诊断准确率达到93%,日均停机时间减少0.55 h,智能停送电平均操作时间缩短40%以上;生产侧精煤回收率提高1.1%,介耗下降16%。这些结果分别反映了设备维护、操作流程和生产控制的改善,也说明数智化改造的收益不仅体现在产量和成本指标上。

4) 后续建设的重点应从增加单点功能转向长期运行质量,包括跨系统事件联动、数据与功能安全、模型版本维护以及不同厂型之间的适配。项目评价也应更多采用持续运行数据,关注系统是否在较长周期内保持稳定、可回退并且全过程可追溯。

参考文献

- [1] 匡亚莉,王章国,王光辉,等.选煤厂智能化建设关键技术研究进展[J].选煤技术,2023,51(6):24-33.
- [2] 母长春,杨国峰.我国智能化选煤厂技术与展望[J].选煤技术,2024,52(3):1-8.
- [3] 申斌学.基于矿山工业互联网的选煤厂智能管控体系设计与关键技术[J].煤炭科学技术,2024,52(9):210-219.
- [4] 邢震.面向智能矿山的数字孪生技术研究进展[J].工矿自动化,2024,50(3):22-34,41.
- [5] 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.
- [6] 胡亚辉,赵国瑞,吴群英.面向煤矿智能化的5G关键技术研究[J].煤炭科学技术,2022,50(2):223-230.
- [7] 国家能源局.关于进一步加快煤矿智能化建设促进煤炭高质量发展的通知:国能发煤炭〔2024〕38号[EB/OL].2024-05-21.
- [8] 国家能源局.煤矿智能化标准体系建设指南:国能发科技〔2024〕18号[EB/OL].2024-03-13.

版权声明:©2026 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。

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



OPEN ACCESS