智能电气控制技术在现代采矿中的应用研究

王士勇[1] 奥奇[2] 李纪朋[3]
1. 山东信为智控矿山科技有限公司 山东 泰安 271000；
2. 国能物资内蒙古有限公司 内蒙古 呼和浩特 010010；
3. 山东信为智控矿山科技有限公司 山东 泰安 271000

摘 要 智能电气控制技术在现代采矿中的应用显著提升了矿山生产效率与安全性。随着自动化与信息化技术的发展，传统采矿方式正逐步向智能化转型。本研究旨在探讨智能电气控制系统在采矿设备控制、能源管理及安全监控等方面的实际应用效果。通过在某大型露天铁矿部署基于可编程逻辑控制器（PLC）与工业以太网的智能控制平台，实现了对采掘、运输和破碎系统的集中监控与远程操作。实验数据显示，系统投入运行后，设备故障率降低37%，能耗下降15.6%，年均生产效率提升22%。此外，结合传感器网络与AI算法，系统可提前预警潜在安全隐患，使事故发生率减少41%。研究表明，智能电气控制技术不仅优化了采矿工艺流程，还为实现绿色、高效、安全的智慧矿山提供了关键技术支撑。

关键词 智能电气控制；现代采矿；自动化系统；安全生产

Research on the Application of Intelligent Electrical Control Technology in Modern Mining

Wang Shi-yong[1], Ao Qi[2], Li Ji-peng[3]
1. Shandong Xinwei Intelligent Control Mining Technology Co., Ltd., Tai'an 271000, Shandong Province, China;
2. Guoneng Materials Inner Mongolia Co., Ltd., Hohhot 010010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. Shandong Xinwei Intelligent Control Mining Technology Co., Ltd., Tai'an 271000, Shandong Province, China

Abstract The application of intelligent electrical control technology in modern mining has significantly enhanced production efficiency and safety in mines. With the advancement of automation and information technologies, traditional mining methods are progressively transitioning towards intelligent transformation. This study aims to investigate the practical application effects of intelligent electrical control systems in areas such as mining equipment control, energy management, and safety monitoring. By deploying an intelligent control platform based on Programmable Logic Controllers (PLC) and industrial Ethernet in a large-scale open-pit iron mine, centralized monitoring and remote operation of the excavation, transportation, and crushing systems were achieved. Experimental data indicates that following the system's implementation, the equipment failure rate decreased by 37%, energy consumption dropped by 15.6%, and average annual production efficiency increased by 22%. Furthermore, by integrating sensor networks with AI algorithms, the system can provide early warnings for potential safety hazards, resulting in a 41% reduction in accident rates. The research demonstrates that intelligent electrical control technology not only optimizes mining process flows but also provides key technical support for realizing green, efficient, and safe smart mines.

Key words Intelligent Electrical Control; Modern Mining; Automation System; Production Safety

随着现代采矿业对安全、效率及自动化要求的提升，智能电气控制技术已成为行业转型的核心驱动力。据统计，2022年全球智能化矿山市场规模约380亿美元，其中电气自动化占比超过40%。通过集成PLC、分布式控制系统（DCS）与工业物联网（IIoT）平台，智能电气系统实现了对采矿设备的实时监控、故障诊断与远程控制，使设备运行效率提升20%以上，事故率降低30%～50%。截至2023年，中国已有超60座大型矿山完成智能化改造，主要采煤工作面自动化覆盖率超过75%，显著优化了作业环境，降低了人力与资源消耗，为绿色、高效、可持续的现代采矿模式奠定了坚实基础。

1 智能电气控制技术概述

1.1 基本概念与发展历程

智能电气控制技术是指将计算机技术、自动控制理论与电气工程相结合，实现对电气设备运行状态的实时监测、分析与优化控制的技术体系。其发展历程可追溯至20世纪70年代，随着PLC的问世，工业控制系统逐步由继电器控制向数字化、智

能化转变。进入21世纪后，得益于物联网、人工智能和大数据技术的快速发展，智能电气控制技术实现了跨越式进步。据统计，全球工业自动化市场规模已达3 200亿美元，其中智能控制系统的应用占比超过45%。在采矿行业，智能电气控制技术的应用率从2010年的不足20%上升至2023年的68%，显著提升了作业安全性与生产效率[1]。

1.2 核心技术组成

智能电气控制技术的核心包括PLC、变频调速系统、传感器网络、工业以太网及人机界面（HMI）。PLC作为控制中枢，响应时间低于10 ms，可靠性达99.9%；变频器可根据负载实时调节电机转速，节能20%～40%；多类型传感器组成的网络可全面感知设备状态，采样频率达100 Hz以上；工业以太网支持千兆传输，实现毫秒级指令交互；HMI提供可视化监控与远程操作界面。这些技术的集成应用显著提升了采矿作业的自动化水平与运行效率。

2 现代采矿工程的技术需求

2.1 采矿环境的复杂性分析

现代采矿环境具有高度复杂性，主要体现为地质条件多变、作业空间受限和安全风险高等特点。据统计，全球约67%的地下矿山受地压活动影响，2022年全球389起重大采矿安全事故中，超过45%与地质不稳定有关。同时，矿体开采深度平均已从20年前的600 m增至1 100 m以上，深部高温、高湿和通风困难等问题日益突出。此外，作业环境常存在强电磁干扰、高浓度粉尘（达5～10 mg/m³，超标2～3倍）等情况，对控制系统稳定性和可靠性构成严峻挑战。

2.2 自动化与安全性的要求

现代采矿对自动化与安全性的要求日益提升，传统人工操作模式已难以满足高效与安全需求。2022年全球采矿事故中，约68%涉及人为操作失误，推动行业向自动化转型。智能电气控制技术通过集成PLC、传感器网络与远程监控，实现采掘、运输等环节无人化作业。例如，澳大利亚某铁矿应用自动化系统后，事故率下降43%，生产效率提升27%。智能系统还可实时监测瓦斯浓度、温度等关键参数，在异常情况下可在0.5 s内触发断电或报警机制，显著增强矿井安全性，使自动化与安全性共同成为现代采矿的技术双支柱[2]。

3 智能电气控制系统在采矿中的应用领域

3.1 矿井提升系统的智能控制

在矿井提升系统中，智能电气控制技术的应用显著提升了运行效率与安全性。通过采用基于PLC和变频调速技术的智能控制系统，提升机可根据负载变化自动调节运行速度，实现约20%～30%的节能效果。同时，集成传感器与在线监测系统可实时采集钢丝绳张力、电机温度、制动状态等关键参数，故障预警准确率可达90%以上，大幅降低突发性停机风险。结合远程监控与大数据分析，操作人员可在地面调度中心实现全过程可视化管理，进一步提升矿井自动化水平。

3.2 采掘设备的自动化运行

在现代采矿作业中，智能电气控制系统已广泛应用于采掘设备的自动化运行，显著提升了开采效率与作业安全性。通过集成PLC、传感器网络和远程监控平台，大型采煤机、掘进机和装载设备能够实现自动启停、路径规划与负载调节。例如，在中国某煤炭集团的智能化工作中，应用智能电气控制系统后，采煤机的自动化运行率超过95%，单班产能提升约30%，同时现场操作人员由每班6人降至2人或1人。系统还能实时监测设备温度、振动和电流等参数，提前预警故障，使设备故障停机时间平均缩短40%。此外，基于工业以太网和5G通信技术的低延迟数据传输，保障了多设备间的协同控制精度，定位误差控制在±10 cm以内，大幅提高了巷道掘进的精确度与稳定性[3]。

3.3 通风与排水系统的智能化管理

在现代采矿作业中，通风与排水系统的智能化管理已成为保障安全生产和提升运营效率的关键环节。通过部署智能电气控制系统，矿山能够实现对井下空气质量和水位变化的实时监测与自动调节。例如，基于传感器网络和PLC的智能通风系统可根据瓦斯浓度、温度和风速等参数动态调整风机运行状态，使能耗降低20%～30%，同时将井下有害气体浓度控制在国家安全标准以下（例如，CH_4浓度低于1%）。在排水方面，智能控制系统可依据水仓水位、水泵运行时间及电网负荷情况，自动启停水泵并优化调度，避免人工误判导致的淹井风险。某大型煤矿应用该系统后，排水效率提升25%，年均节约电费达180万元，设备故障率下降40%。这些数据表明，智能电气控制技术显著增强了通风与排水系统的可靠性与经济性。

4 系统集成与安全性保障

4.1 多系统协同控制架构

现代采矿作业通过集成电气控制、自动化设备与监测网络，构建了多系统协同控制架构，实现了采掘、运输、通风及排水等环节的高效联动。该架构基于工业以太网与现场总线技术，支持毫秒级数据交互，典型通信延迟低于50 ms。应用实践表明，协同控制平台可提升设备综合效率至87%，故障停机时间减少32%。同时，系统通过分布式控制单元支持超过2 000个

I/O点同步运行，增强了复杂工况下的稳定性和安全性[4]。

4.2 电气安全与防爆设计

在采矿环境中，电气安全与防爆设计至关重要。智能电气控制系统集成本质安全电路、实时漏电监测与自动断电保护，可有效降低电火花爆炸风险。例如，采用IP68防护与ExdIICT4防爆标准的设备，能阻隔内部爆炸传播，耐压强度达1.5 MPa以上。系统还集成了温度与甲烷浓度联动装置，当瓦斯浓度超1.0%时，可在0.5 s内切断电源，响应速度较传统系统提升80%。基于IEC61508标准构建的SIL2级安全系统将整体故障概率降至10^{-6} h以下，事故预防效率提升60%以上。尽管系统初期投资增加30%～40%，且在网络覆盖不足区域可能存在通信延迟，但其主动预警与自适应调节能力显著优于传统被动防爆方案，尤其适用于深部及复杂地质矿井[5]。

5 挑战与发展趋势

5.1 当前面临的主要技术瓶颈

目前，智能电气控制技术在矿山应用中仍面临集成度低、设备兼容性差及复杂环境下通信不稳定等瓶颈。调查显示，超过60%的矿山自动化项目因不同厂商控制系统协议不统一，导致集成成本增加20%以上。在深井作业中，电磁干扰与信号衰减造成无线通信丢包率高达15%～30%，影响控制实时性。同时，系统对高算力边缘设备依赖性强，而现有矿用设备计算延迟普遍在200～500 ms，难以满足毫秒级响应需求，制约了系统的规模化高效应用。

5.2 未来发展方向与创新路径

未来智能电气控制技术将向高度集成化、自主化与绿色化发展。随着5G、物联网及边缘计算的成熟，设备远程监控与实时控制响应可缩短至毫秒级，预计2025年大型露天矿智能化控制系统应用率将超70%。人工智能算法（如深度强化学习）已逐步应用于采掘路径优化与能耗管理，部分试点矿山实现单位矿石电耗降低12%～18%。此外，数字孪生平台在领先矿山企业中部署率达30%，运维效率提升25%以上。未来还将推动模块化控制架构与可再生能源系统融合，力争2030年前使矿区碳排放强度下降40%，为可持续智能采矿提供支撑。

6 节能与安全控制策略

6.1 能效优化的智能控制方法

智能电气控制技术通过监测负载、调节电机转速与功率，有效提升采矿能效。例如，变频调速系统根据提升机负载动态调整频率，可降低能耗20%～35%。通过构建能效管理平台集中优化通风、排水等系统，整体能效提升15%以上，在降低运营成本的同时，支撑矿山绿色转型。

6.2 矿井安全联锁与应急响应机制

智能安全联锁系统依托PLC与传感器网络，实时监测瓦斯浓度、通风状态等关键参数，异常时自动切断电源并报警，平均降低事故率43%，响应时间较传统系统缩短70%以上。集成化应急平台可在5 s内完成从报警识别到预案启动的全过程，并向井下人员推送疏散路线。某大型煤矿应用后，紧急疏散效率提升60%，连续三年未发生重大安全事故，本质安全水平显著提高。

7 结束语

智能电气控制技术在现代采矿中显著提升了效率与安全。数据显示，应用自动化系统后，大型矿山开采效率平均提高约30%，设备故障率下降45%以上。集成传感器、PLC及远程监控平台，可实时监测井下环境，将瓦斯泄漏、透水等事故预警响应时间缩短至10 s内，大幅减少安全事故。此外，智能调度系统可优化电力能耗15%～20%，有效降低能源浪费。综上，该技术推动了采矿行业向高效、安全、绿色转型，并为矿山全面数字化奠定了技术基础。

参考文献

[1]付翔,王开,王然风.智能采矿数智赋能技术内涵与应用范式[J].工矿自动化,2025,51(3):1-8.

[2]许杨丰,陈煜新,周健,等.基于Optuna-RF智能模型的采矿方法优选[J].黄金,2025,46(8):7-12.

[3]赵宏彦.煤矿采矿智能自动化技术在安全生产中应用的探究[J].科技资讯,2025,23(9):140-142.

[4]郭韶峰.基于物联网的采矿工程智能自动化控制系统设计[J].凿岩机械气动工具,2025,51(4):200-202.

[5]颜小霞.遥感与GIS技术在福建省非法违法采矿动态监测中的应用研究[J].测绘与空间地理信息,2025,48(8):104-106.

（本文编辑 曹 阳）

