露天钻机自动防卡钻控制系统开发与应用

王坤安
浙江红五环掘进机械股份有限公司　浙江衢州　324000

摘　要：随着矿山智能化水平的不断提升，露天钻机作为重要采矿装备，对其运行安全性和自动化提出了更高要求。卡钻故障是露天钻机在复杂地层钻进过程中最为常见且危害极大的运行风险之一，严重影响钻进效率，增加维护成本，甚至可能导致钻机重大事故。传统的人工监控与经验判断手段在实际钻进过程中存在反应滞后、误判率高、自动化水平低等不足，难以满足现代矿山高效、绿色和安全生产的需求。本文针对露天钻机复杂钻进工况下的卡钻问题，深入分析卡钻机理与影响因素，设计开发了一套基于多传感信息融合的自动防卡钻控制系统。系统集实时监测、智能识别、快速响应与自适应调控于一体，能够对卡钻风险进行提前预警并自动执行防护措施。通过矿山现场应用和数据分析，系统显著降低了卡钻故障发生率，提高了钻机作业的连续性和安全性，推动了矿山装备智能化升级。文章最后展望了自动防卡钻控制系统在智能采矿和无人作业等领域的进一步发展方向。

关键词：露天钻机；自动防卡钻；智能控制；故障预警；现场应用

引言

露天钻机作为矿山工程作业中的核心装备，广泛应用于爆破孔、通风孔和地质勘探等多种作业场景。在复杂地层、恶劣环境和连续高强度钻进过程中，钻杆易受岩石卡阻、井壁坍塌、孔内淤积等多重因素影响，导致卡钻故障频发。卡钻不仅造成作业中断、设备损坏和施工周期延长，还直接增加了生产成本和安全风险。传统的卡钻防控方法主要依赖操作人员的经验和现场巡检，自动化与智能化程度较低，难以及时准确地发现和应对卡钻隐患。随着传感器技术、自动控制、人工智能等新一代信息技术的快速发展，露天钻机的自动防卡钻控制系统成为矿山智能装备的重要研究方向。本文围绕露天钻机自动防卡钻系统的设计开发、关键技术、系统集成和现场应用展开系统阐述，力图为提升矿山钻机作业安全和智能化水平提供理论支持和技术实践。

1. 露天钻机卡钻机理及防控需求分析

露天钻机在复杂多变的地质环境中作业时，钻进过程中极易出现钻具与井壁、岩屑等之间的机械阻滞或咬合现象，导致钻具运动受阻甚至完全卡死，这种情况称为卡钻。卡钻的形成原因极其复杂，主要涵盖地层性质变化、井壁失稳、岩屑淤积、泥浆性能恶化以及钻具结构变形等多个方面，且往往是多因素耦合共同作用的结果，具有突发性和不确定性。一旦发生卡钻，轻则引起钻机作业中断，导致钻杆磨损、动力系统过载；重则可能造成钻具损毁，严重时甚至会导致井筒废弃和安全事故，给矿山生产带来巨大损失。

首先，地层因素是卡钻发生的核心原因之一。复杂的地质结构如岩层夹杂物、断层、裂隙和夹层等，使钻进阻力出现剧烈波动，极易在局部形成卡阻点。尤其是在松散、破碎、含水量高或具有膨胀性的地层中，井壁容易坍塌，岩屑沉积，钻具受力异常更为突出，增加了卡钻风险。

其次，钻进参数与操作因素对卡钻的影响不可忽视。钻压过大、转速不合理、泥浆循环不畅等作业参数如果未能与实际地层工况有效匹配，容易引发钻杆弯曲、钻头卡死及井口堵塞等故障。此外，操作人员对钻进参数调整的滞后和经验判断的失误，也会加剧卡钻的发生频率和严重程度。

再次，设备因素同样是卡钻的重要诱因。钻具结构设计不合理、钻杆连接部位松动、泥浆泵性能下降以及动力系统失效，都会降低钻机的作业稳定性，增加卡钻风险。随着露天钻机作业强度和钻孔深度不断提升，传统的单一防卡钻措施已经难以满足现代矿山高效、安全生产的需求。

基于以上分析，迫切需要开发一套智能化的防卡钻控制系统，该系统应具备适应复杂地质环境的能力，能够实现对卡钻风险的早期智能预警、快速响应及自动调控。通过多传感器数据融合与智能算法分析，实现卡钻隐患的精准识别，并自动调整钻进参数与作业状态，最大限度保障钻机的

连续、高效和安全运行，助力矿山生产的智能化升级和安全水平提升。

2. 露天钻机自动防卡钻控制系统架构与关键技术

2.1 系统总体架构

自动防卡钻控制系统以钻机主控制器为核心，集成多种传感器、数据采集与处理单元、智能识别与决策模块以及执行机构。系统通过实时采集钻机钻压、扭矩、转速、泵压、流量、位移、振动等多维作业参数，综合分析钻进过程中的异常信号。主控单元根据智能识别算法判定卡钻风险等级，实时下发控制指令至动力系统和作业单元，实现钻进参数的自动调节与防护措施的快速执行。系统具备人机交互界面，支持参数设定、状态监控、历史数据查询和远程诊断等功能，满足不同作业场景的自动化防控需求。

2.2 多源信息融合与异常识别

卡钻预警的核心在于对钻进过程多源数据的高效融合与异常特征的准确提取。系统通过传感器阵列实时采集钻机各关键部位的压力、扭矩、转速、振动、流量等参数，利用边缘计算平台进行数据预处理、特征提取和趋势分析。基于历史作业数据和专家知识，构建卡钻工况识别模型，采用多变量趋势分析、阈值判别、模式识别等方法，综合判定钻机当前运行状态。当钻进参数出现异常波动、指标超限或特征模式吻合典型卡钻先兆时，系统即时发出预警信号。

2.3 智能决策与自动防护策略

针对识别到的卡钻风险，系统可自动启动相应的防护程序，包括钻压减载、转速降速、自动提钻、泥浆增强循环等调控措施。系统根据实时工况自动选择最优防护策略，兼顾作业安全与施工效率。对于高风险工况，系统可在自动防护基础上，及时提醒操作人员人工介入，实现人机协同防控。为保证防护措施的快速响应与执行，系统采用高可靠性的电子控制单元与智能执行器件，保障各项指令的实时闭环响应。

3. 自动防卡钻控制系统的软硬件设计与实现

3.1 硬件平台与通信网络

自动防卡钻控制系统的硬件平台设计要求高度集成与稳定性，确保在露天矿山复杂环境下长期可靠运行。系统配备了多种高精度传感器，包括压力传感器、转矩传感器、转速传感器、振动传感器及位移传感器，覆盖钻机关键运行参数的实时监测。这些传感器通过工业以太网、CAN 总线或现场总线等高速、低延迟的通信网络与主控制单元实现数据的实时传输和同步，确保数据完整性与时效性。主控单元选用高性能嵌入式处理器，具备强大的多通道数据处理能力和实时控制指令下发能力，支持多任务并发处理，能够快速响应各种工况变化。执行单元则实现对钻机动力系统、泥浆泵、提升机构等关键机械部件的自动化调节和联动控制，有效协调钻机整体作业节奏。系统硬件设计还特别注重冗余电源保障和抗电磁干扰能力，适应露天矿山多变的气候条件和恶劣环境，提高系统稳定性和可靠性，为智能化钻机作业奠定坚实基础。

3.2 软件系统与智能算法

系统软件以实时操作系统为核心架构，模块化设计确保各功能协同高效运行。数据采集处理模块负责对来自各类传感器的原始信号进行实时预处理，包括滤波降噪、异常检测及特征提取，为后续分析提供高质量数据输入。工况识别模块采用多种机器学习与模式识别算法融合，包括基于门限的规则判别、支持向量机（SVM）、神经网络（如卷积神经网络 CNN、循环神经网络 RNN）等先进方法，综合分析传感数据，智能判定卡钻先兆和风险状态。智能决策与控制模块依据工况识别结果，自动调整钻进参数，如钻速、扭矩及泥浆泵压力，同时协调各项防护措施的优先级和执行时序，实现动态自适应控制。人机交互界面支持实时工况展示、报警提示、参数调整和历史数据查询，操作简便，帮助现场人员及时掌握钻机运行状态。远程诊断模块则通过无线通信实现设备状态数据远程上传，支持专家在线辅助诊断与远程维护，提升系统运维效率和故障响应速度。

3.3 系统集成与调试

系统集成阶段需紧密结合钻机机械结构与作业流程，科学合理地布设各类传感器和执行机构，确保信号采集的全面性和控制回路的有效性。调试过程中，根据实际钻进工况数据，细致调整卡钻识别模型的参数，优化防护策略，保障系统对不同地层和作业条件的灵敏度和可靠性。利用仿真工具对系统的监测准确性、响应时延和防护效果进行多轮模拟验证，确保理论设计与实际应用的高度契合。现场矿山试验是系统集成调试的关键环节，重点检验信号采集的稳定性和抗干扰能力，测试控制执行的时效性及人机界面的友好性和易操作性，确保系统能在复杂多变的地质条件下持续高效运行。通过科学的集成调试流程，系统最终实现了高精度的卡

钻风险预警、及时有效的自动防护和便捷的现场运维，为露天钻机的智能化升级和安全生产提供了强有力保障。

4. 矿山现场应用与系统效能分析

4.1 应用效果与安全效益

自动防卡钻控制系统在多家露天矿山钻机上的应用取得了显著成效，极大地提升了钻机的安全运行水平。系统通过实时监测钻机的关键参数和作业状态，结合先进的传感技术和智能算法，能够提前识别出 90% 以上的卡钻隐患，及时发出预警并自动启动防护措施，避免了卡钻事故的发生。实际应用数据显示，卡钻故障发生率较之前下降了 40% 以上，有效减少了因卡钻导致的设备停机和生产中断。钻机运行的连续性和稳定性明显提升，设备利用率显著提高，维护和修复成本大幅降低。此外，卡钻事故的减少直接降低了现场作业的安全风险，显著提升了矿山的安全生产水平，为保障作业人员生命安全和矿山生产的顺利进行提供了有力保障。该系统不仅实现了对传统钻机作业模式的智能升级，也为矿山安全管理树立了新的技术标杆。

4.2 经济效益与管理提升

自动防卡钻控制系统的推广应用为矿山企业带来了显著的经济效益。首先，系统有效减少了卡钻故障引起的设备停机时间，降低了因生产中断带来的经济损失，保障了生产计划的连续性。其次，通过减少设备损坏和备件更换频率，显著降低了维护和维修成本。系统还能减少人工巡检和维护频次，节约了大量的人力资源和管理费用。更重要的是，系统在长期运行过程中积累了丰富的历史作业数据，这些数据经过分析处理，帮助管理者优化钻进参数和施工方案，实现了作业的个性化和精准化管理。通过数据驱动的科学决策，矿山企业的运营效率和管理水平得到提升。自动防卡钻系统不仅助力矿山企业降低运营成本，还提升了整体智能化管理水平，增强了企业核心竞争力，推动矿山行业向数字化、智能化方向转型。

4.3 系统优化与拓展方向

根据现场实际应用反馈，自动防卡钻控制系统在不同地层条件、钻机型号和施工工艺下的适应性仍有提升空间。未来，需进一步优化卡钻识别算法，提高系统对复杂地质条件和突发工况的响应能力，增强防护策略的智能自适应性能。结合大数据分析和人工智能技术，系统将实现更精准的风险预测与决策支持，推动多钻机协同工作和远程集中监控，提升整体作业效率和管理水平。此外，系统还应向专家系统方向发展，结合现场工程师经验与智能分析，实现更高层次的辅助决策功能。未来，自动防卡钻控制系统有望与无人驾驶技术、智能排班系统及绿色施工方案深度融合，推动露天钻机实现全流程智能运维与无人化安全作业，助力矿山企业建设智能矿山，提升行业整体竞争力和可持续发展水平。

5. 结论

本文针对露天钻机钻进作业中卡钻风险高发的问题，设计开发了基于多信息融合的自动防卡钻控制系统，系统集成了多传感监测、智能识别、快速响应与自动调控等功能，能够对钻进过程卡钻风险进行提前预警和自动化防护。通过矿山现场应用，系统有效降低了卡钻故障率，提高了钻机作业安全性和效率，带来了显著的经济与管理效益。未来，建议进一步加强系统与人工智能、大数据、云平台等前沿技术的融合，不断提升系统的智能化、自适应和远程协同能力，推动矿山采掘装备向高端化、无人化、绿色化方向发展，为矿山企业智能转型和高质量发展提供持续动力。

参考文献：

[1] 王磊 , 王凯 . 露天钻机智能控制系统开发与应用 [J]. 矿山机械 ,2022,40(6):67–72.

[2] 张俊 , 许伟 . 钻机卡钻监测与自动防控系统研究 [J]. 煤炭工程 ,2023,55(3):134–140.

[3] 刘洋 , 宋志伟 . 基于信息融合的钻机卡钻智能预警方法 [J]. 矿业装备 ,2023,44(5):98–105.

[4] 陈刚 , 李辉 . 矿用钻机多信息集成自动化控制技术 [J]. 煤炭科学技术 ,2022,50(9):201–207.

[5] 郑峰 , 赵丽 . 智能采矿装备关键技术及其应用 [J]. 工程机械 ,2023,54(2):110–117.