

深部矿井机电设备运行稳定性优化研究

韩少龙

宁夏王洼煤业有限公司 宁夏 固原 756000

摘要: 深部矿井恶劣耦合工况易引发机电设备多类型失稳故障, 严重制约矿井安全生产与高效开采。本文分析深部矿井设备运行工况特征、核心设备运行特性及失稳机理, 从设备本体、运行状态、环境运维维度构建稳定性评价体系, 采用组合赋权与模糊综合评价法完成模型搭建及验证。针对性提出设备结构、运行控制、运维管理多维优化策略, 有效提升深部机电设备运行稳定性, 为矿井安全运维提供技术支持。

关键词: 深部矿井; 机电设备运行; 稳定性优化

引言: 随着煤炭开采深度持续增加, 深部矿井高地温、高湿度、高负载等复杂工况凸显, 机电设备失稳故障频发, 故障率与故障演化复杂度远高于浅部矿井, 严重影响矿井开采效率与生产安全。当前相关优化方案适配性不足, 难以适配深部多工况耦合的运行环境。基于此, 本文探究设备失稳核心机理, 构建科学评价体系, 制定系统性优化策略, 旨在解决深部设备运行失稳难题, 保障矿井长效安全稳定运行。

1 深部矿井机电设备运行工况及失稳机理分析

1.1 深部矿井特殊开采工况特征

(1) 环境工况特征: 深部矿井存在高地温、高湿度、高粉尘、高瓦斯、强腐蚀的恶劣环境。高地温会加速设备零部件老化、降低润滑效能; 高湿度易引发设备金属锈蚀、电气受潮; 高粉尘会堵塞设备散热与传动结构, 加剧磨损; 高瓦斯提升设备电火花引爆风险; 井下酸性水体与气体形成的腐蚀环境, 持续侵蚀设备壳体与精密构件。(2) 运行工况特征: 深部机电设备长期处于重载、连续运行状态, 且启停频繁、受力分布不均。深部开采深度大、运输距离长, 设备恒定负载偏高, 长期连续作业无充足休整时间。同时, 井下地质扰动、巷道变形会挤压设备安装基座, 造成设备偏移、固定结构松动, 严重干扰设备正常运行姿态与作业精度^[1]。(3) 工况耦合影响规律: 多种恶劣工况并非独立作用, 而是形成耦合叠加效应。多因素耦合会大幅提升设备运行动态负荷, 加快零部件损耗速率, 打破设备稳定运行状态, 使设备故障发生概率显著提升, 且故障演化速度更快、隐蔽性更强, 大幅增加设备运维难度。

1.2 深部核心机电设备类型及运行特性

(1) 提升运输设备: 提升机、皮带及刮板输送机为核心运输设备, 深部开采中设备运输负载大、传动系统受力波动频繁, 链条、皮带等传动部件损耗严重, 易出

现打滑、卡顿、输送效率下降等问题, 长期重载运行易引发传动系统疲劳损伤。(2) 通风排水设备: 通风机、排水泵需适配深部高风阻、高水压工况, 运行能耗远高于浅部矿井。长期高压运行易导致叶轮磨损、管路堵塞, 出现风压、水压不足问题, 存在设备停机、排水通风失效的失稳隐患。(3) 供电及控制设备: 变压器、开关柜、变频器等设备受深部高温、潮湿环境影响显著, 设备绝缘层易老化破损, 绝缘性能下降。同时环境干扰易造成设备控制精度偏移、运行稳定性降低, 频发电压波动、控制失灵等问题。

1.3 机电设备典型失稳类型及机理

(1) 机械结构失稳: 受恶劣工况与长期重载影响, 设备零部件持续磨损、产生疲劳应力, 逐步引发疲劳断裂、传动偏移、螺栓松动等故障。故障呈渐进式演化, 初期微小损伤不断累积, 最终导致设备机械结构失效。(2) 电气系统失稳: 井下高温、潮湿、粉尘环境会加速线路老化、破坏设备绝缘结构, 引发漏电、短路问题。同时工况波动易造成电压不稳、变频失控, 井下复杂环境的电磁干扰还会导致信号传输异常, 诱发电气系统失稳^[2]。(3) 运行管控失稳: 属于人为管理类失稳, 主要由运维巡检不到位、设备运行参数设置不合理导致。加之矿井故障预警系统滞后、运维管理制度不完善, 无法及时发现并处理设备隐患, 致使小故障持续恶化, 引发设备整体失稳。

2 深部矿井机电设备运行稳定性评价体系构建

2.1 稳定性评价指标选取原则与依据

(1) 指标选取原则: 本文结合深部矿井复杂开采环境与机电设备运行特性, 确立五项核心选取原则。科学性原则依托设备失稳机理与力学、电气运行规律选取指标, 保证评价逻辑严谨; 针对性原则聚焦深部高地温、高负载、多耦合恶劣工况, 规避浅部矿井评价指标的通

用性局限；系统性原则兼顾设备本体、运行状态、环境运维多维度，形成完整评价体系；可量化原则筛选可通过现场监测、仪器检测、数据统计获取的指标，保障数据可采集；实用性原则贴合矿井现场运维管理需求，简化指标体系，适配工程实际应用场景。（2）指标筛选依据：指标筛选以深部矿井特殊工况特征和设备失稳机理为核心依据，优先选取能反映设备机械、电气、运维失稳特征的关键指标。同时结合煤矿机电设备安全运行行业标准、技术规范，参考矿井长期现场运维监测数据、设备故障统计资料，剔除关联性弱、数据无法获取、内容重叠的无效指标，通过层层筛选优化，保留具备代表性、精准性的核心评价指标，保障指标体系贴合深部设备运行实际。

2.2 稳定性评价指标体系搭建

（1）设备本体指标：该指标是评判设备稳定运行的基础核心，直接反映设备自身健康状态。主要包含设备结构完好度、零部件磨损率、电气绝缘性能、设备服役年限四项关键内容，可精准体现设备机械结构完整性、电气系统安全性及老化损耗程度，是规避设备结构性、基础性失稳的核心评价依据。（2）运行状态指标：作为动态核心评价指标，实时反映设备作业过程中的运行稳定性。涵盖运行负载波动、转速稳定性、能耗损耗、故障频次、启停可靠性等内容，能够动态监测设备重载运行、频繁启停过程中的工况变化，精准捕捉设备运行异常、性能衰减等动态失稳前兆。（3）环境与运维指标：属于辅助保障性评价指标，聚焦外部环境与人为管理对设备运行的影响。包含运行环境温湿度、粉尘浓度等环境参数，以及巡检频次、维保质量、故障处置效率等运维参数，可有效衡量恶劣环境与运维管理疏漏引发的设备失稳风险，完善评价体系的全面性^[3]。

2.3 评价指标权重确定与评价模型构建

（1）指标权重计算：为解决单一赋值方法主观误差大的问题，本文采用层次分析法结合熵权法的组合赋权方式。通过层次分析法完成各级指标主观权重的初步确定，依托专家经验梳理指标层级关联；再利用熵权法基于现场实测数据修正权重，弱化主观人为干扰，精准量化各指标对设备运行稳定性的影响程度，大幅提升权重赋值的科学性与准确性。（2）稳定性评价模型构建：基于模糊综合评价法构建适配深部矿井的机电设备稳定性分级评价模型。结合各指标量化标准与权重系数，整合多维度评价数据，将设备运行状态划分为稳定、基本稳定、失稳临界、失稳四个等级，清晰界定不同工况下设备的稳定状态，实现设备运行稳定性的量化分级评价。

（3）模型验证：依托目标深部矿井机电设备的现场监测数据、故障台账、运维记录等实测数据，对构建的评价模型进行实例校验。通过对比模型评价结果与设备实际运行状态，修正模型参数缺陷，验证模型在复杂深部工况下的精准度、适用性与可靠性，确保模型可用于现场设备稳定性评估工作。

3 深部矿井机电设备运行稳定性优化策略

3.1 设备本体结构与性能优化

（1）核心零部件优化：针对深部矿井高地温、高腐蚀、高磨损及交变载荷引发的零部件疲劳损伤、锈蚀断裂等突出问题，从材质升级与结构改良两方面开展优化工作。优先选用高强度、耐低温疲劳、耐腐蚀的新型合金材料替换传统零部件材质，提升核心构件的环境适配性。同时结合深部设备重载受力特征，优化齿轮、轴承、传动链条、叶轮等关键部件的结构参数，改进应力集中部位的结构造型，降低交变荷载带来的疲劳损耗，从根本上提升设备耐磨、耐高温、抗腐蚀与抗疲劳性能，延长设备核心零部件服役周期。（2）电气系统优化：针对深部矿井潮湿、粉尘、电磁干扰复杂环境引发的电气线路老化、绝缘失效、电压波动、信号紊乱等失稳问题，实施全方位电气系统优化。合理规划井下电控线路布局，简化冗余线路，规范线路敷设方式，避免线路挤压、受潮、磨损。升级高压、低压设备绝缘防护套件，更换老化破损绝缘层，提升电气设备防潮、防尘、绝缘防护能力。同步加装稳压装置与滤波设备，有效抑制井下电磁干扰，稳定供电电压，解决电压骤升骤降、变频信号干扰等问题，保障电气系统持续稳定运行^[4]。

（3）设备防护结构优化：基于深部矿井多恶劣工况耦合特征，针对性优化设备整体防护结构。为各类机电设备设计一体化防尘防护壳体，封堵设备散热、传动缝隙，杜绝高粉尘侵入设备内部造成堵塞与磨损。优化设备防潮密封结构，采用高强度密封材质对设备接线腔、传动腔进行密封处理，阻断潮湿水汽侵入通道。配套加装被动式降温散热结构与辅助散热装置，改善高地温环境下设备散热条件，降低高温导致的设备性能衰减、部件老化速率，最大限度削弱恶劣环境对设备运行的负面影响。

3.2 设备运行参数与控制策略优化

（1）运行参数匹配优化：深部矿井负载波动大、运行工况复杂，设备固定参数难以适配动态工况，易引发过载损耗与运行失稳。基于深部开采实际负载特征、巷道条件、运输及通风排水需求，对设备运行核心参数进行精细化匹配优化。合理调整设备运行转速、额定负载阈值、工作压力、启停间隔时间等关键参数，摒弃浅部

矿井通用参数标准,根据深部工况实现参数动态适配,避免设备长期满负荷、超负荷运行,实现设备轻量化、平稳化、高效化运行,降低无效能耗与机械损耗。(2)智能控制策略优化:为解决设备负载波动剧烈、人工调控滞后的问题,引入现代化智能控制技术优化设备运行逻辑。全面推广变频调速控制技术,根据实时工况自动调节设备运行功率与转速,规避恒定转速运行带来的能耗浪费与载荷冲击。搭载自适应调控系统,实时采集设备负载、温度、能耗等运行数据,自动修正运行控制参数,实现设备运行状态的动态自适应调节,有效降低负载突变引发的设备卡顿、传动失稳、电气过载等风险,提升设备运行可控性与稳定性。(3)多设备协同运行优化:深部矿井机电设备数量多、联动性强,多设备运行时序混乱易造成系统负载叠加、运行失稳。针对提升、运输、通风、排水等关联设备,优化整体联动运行逻辑,重新规划设备启停时序与协同工作模式。规避多台大功率设备同时启停、同步满载运行的工况,均衡矿井供电系统与机械运行负载,解决设备运行干涉、负载峰值叠加、系统压力过大等问题,实现井下机电设备集群协同、有序、稳定运行,提升整套系统的运行可靠性^[5]。

3.3 运维管理体系优化

(1)巡检维保机制优化:结合深部设备故障演化规律与工况特点,建立差异化、精细化巡检维保制度。摒弃统一化维保模式,根据设备类型、服役年限、失稳风险等级,划分巡检频次与维保重点,对提升、排水、供电等核心设备加密巡检频次。制定定期维保与按需检修相结合的运维方案,定期开展设备除尘、除锈、紧固、润滑、绝缘检测等常规维保工作,针对监测发现的隐患问题开展针对性按需检修,提前排查设备机械、电气隐患,从源头降低设备失稳故障发生率。(2)故障预警体系优化:依托物联网与在线监测技术,搭建深部矿井机电设备专属运行监测与故障预警体系。在设备关键部位加装温度、振动、压力、电流等传感监测模块,实时采

集设备运行状态数据,实现设备运行全过程动态监测。通过数据分析模型对设备损耗、异常波动、性能衰减趋势进行预判,精准识别潜在失稳隐患,自动发出预警信号,实现故障隐患早发现、早研判、早处置,彻底解决传统运维故障发现滞后、处置被动的问题。(3)人员管理与技能优化:完善矿井机电运维岗位责任制度,明确各岗位人员操作、巡检、维保、故障处置职责,细化工作标准,杜绝运维疏漏。针对深部矿井恶劣工况与设备复杂运行特性,开展专项技能培训,重点强化工作人员对深部设备失稳机理、智能调控设备操作、隐患排查、故障应急处置等专业技能。同时建立考核机制,倒逼运维人员提升专业素养与责任意识,全面提升深部矿井机电设备运维管理专业化水平,保障设备长期稳定安全运行。

结束语

本文系统剖析深部矿井机电设备失稳机理,搭建多维度稳定性评价体系,从设备性能、运行控制、运维管理三方面形成完整的优化方案,可有效改善设备运行工况、降低故障发生率。研究成果精准适配深部矿井复杂开采环境,弥补了传统运维与优化方式的短板,可为深部矿井机电设备稳定运行、安全管控及智能化运维提供重要的理论参考与工程实践依据。

参考文献

- [1]杨成友.机电一体化在深部矿井采掘设备中的应用与稳定性优化[J].煤炭技术,2024,43(10):98-101.
- [2]王浩宇.深部高地应力环境下矿井机电设备振动特性及稳定性控制研究[J].工矿自动化,2023,49(8):112-117.
- [3]李建军,张磊.深部矿井机电设备故障诱因分析及运行稳定性提升技术[J].煤炭工程,2022,54(11):189-193.
- [4]张阳,李超,符立梅,等.基于物联网技术的煤矿机电设备运行状态智能监测系统研究与应用[J].中国煤炭,2025,51(7):164-169.
- [5]巩师鑫.深部复杂环境工作面液压支架压力-位姿融合分析技术[J].工矿自动化,2025,51(1):71-77.