

Safety Performance Evaluation Methods in the Manufacturing and Selection of Mine Hoisting Equipment

Lei Li

Jinchengxin Mine Engineering Design Institute Co., Ltd., Beijing, 100070, China

Abstract

With the continuous expansion of mining depth and scale in China, the hoisting equipment, as the core system for underground and surface transportation, directly affects the safety of miners' lives and production efficiency. However, there are still many problems in the current selection process of mining hoisting equipment. Some enterprises have experienced frequent accidents such as brake failure and overloading operation due to improper equipment selection. This paper first elaborates on the core elements of safety performance assessment for mining hoisting equipment, then specifically proposes quantitative methods for safety performance assessment and standardized procedures for safety performance assessment, and finally summarizes suggestions for the application of assessment methods, with the aim of providing useful references and inspirations for related research.

Keywords

mining; equipment manufacturing selection; safety performance; assessment methods

矿山提升设备制造选型中的安全性能评估方法

李磊

金诚信矿山工程设计院有限公司, 中国 · 北京 100070

摘 要

随着我国矿山开采深度与规模的不断扩大, 提升设备作为井下与地面运输的核心系统, 其安全性能直接关系到矿工生命安全与生产效率。然而, 当前矿山提升设备选型过程中还存在诸多问题, 部分企业因设备选型不当导致制动失效、超载运行等事故频发。本文先是详细阐述了矿山提升设备安全性能评估的核心要素, 随后具体提出了安全性能评估的量化方法以及安全性能评估的标准化流程, 最后总结提出了评估方法应用的建议, 以为有关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

矿山; 设备制造选型; 安全性能; 评估方法

1 引言

矿山提升系统是由提升机、电动机、天轮或导向轮、井架或井塔、提升容器、钢丝绳、装卸载设备及电气控制设备等提升设施组成的系统。提升系统是矿山生产过程中的重要生产环节, 负责矿废石提升, 人员升降, 设备和材料等的提升和下放任务。由于提升系统是周期动作式的输送设备, 需要频繁地正、反转和频繁地起动、运行和停车, 工作条件异常苛刻^[1]。随着矿山开采深度持续增加、生产规模不断扩大, 设备运行外部环境愈发复杂, 对安全性能的要求也更为严苛。但当下, 矿山提升设备在制动系统可靠性、控制系统稳定性以及冗余设计合理性等方面仍存在诸多缺陷, 导致提升系统的各类安全事故, 如松绳、滑绳、断绳、过卷墩罐、卡罐、坠罐跑车等时有发生。而现有研究多局限于单一技术

指标或局部环节优化, 缺乏系统性安全评估框架与量化手段, 难以契合深井、高负荷矿井的安全需求。鉴于此, 本文从设备本体、运行控制系统、安全冗余设计三个维度搭建评估体系, 提出制动性能动态检测等量化方法, 并制定标准化流程, 为设备选型、维护及安全管控提供科学支撑, 助力矿山安全生产迈向智能化与本质安全化。

2 矿山提升设备安全性能评估的核心要素

2.1 设备本体安全性能

矿山提升设备的本体安全性能是保障其稳定运行的核心基础。在制动系统方面, 提升机液压制动系统包括液压站、液压弹簧制动器、闸架、管道及其附件和控制系统。目前, 国内多采用恒减速制动系统, 恒减速属于闭环制动系统, 提升机在制动过程中, 如重载提升、空载运行和重载下放紧急制动时, 以恒定的减速度进行制动, 通过反馈环节对控制系统控制的制动力进行不断调节以达到恒定的减速度, 可以大大减小各种工况下紧急制动减速度, 减小制动过程中钢丝绳

【作者简介】李磊(1987-), 男, 中国山东威海人, 本科, 工程师, 从事矿山机械研究。

的动张力,最大限度降低在制动过程中钢丝绳的磨损。在提升机结构强度方面,提升机主轴是提升机的关键承载部件及主要传动部件。核心传力部件,诸如卷筒、联轴器都安装在主轴上,因此,主轴的力学性能优劣直接关系到提升系统的生产效率和安全性。主轴的设计应保证承受工作过程中的外载荷而不发生残余变形和过量的弹性变形,确保在事故载荷下不发生永久变形,同时保证一定的使用寿命^[2]。主轴材质多采用中碳铬钼合金调质钢(42CrMo),其具有高强度、高韧性、高淬透、抗疲劳等特性,调质后综合性能极强,强韧平衡性能优异,重载下不易脆断,适合提升机长期交变载荷、反复启停的特点。提升机卷筒作为提升系统的核心传力部件,其质量与可靠性同样重要。据统计2015-2024年间全球因卷筒失效导致的重大安全事故中,卷筒疲劳断裂占比高达57%,因卷筒焊接缺陷引发的事故占34%^[3]。传统设计方法往往建立在理想化的计算框架之下,对实际工况下的还原程度存在较大的局限性。因此,提升机主轴、卷筒等部件设计,应采用现代设计方法,通过有限元分析,对主轴和卷筒进行力学分析,找出应力与变形分布规律,验证抗疲劳性能,避免因结构失效导致安全事故的发生。二者协同作用,共同构建起提升设备本体的安全防线。

2.2 运行控制系统安全性能

矿山提升设备运行控制系统的安全性能是保障设备稳定运行、防范事故的关键屏障。在PLC控制系统方面,采用双PLC冗余设计,可对速度、位置、张力等核心参数进行实时监控与自动调节,当提升速度超过额定值10%时,系统能迅速自动触发紧急制动,有效避免超速风险;安全回路保护则通过设置过卷保护、超速保护、限速保护等多重安全连锁机制,形成全方位防护,任一环节出现故障,制动系统都会都会紧急制动,防止事故扩大;通信稳定性上,运用工业以太网或CAN总线技术,确保控制信号传输延迟严格控制在50ms以内,杜绝因通信中断引发的设备失控问题。三者协同发力,为提升设备运行筑牢安全防线。

2.3 安全冗余设计

矿山提升设备的安全冗余设计是应对突发故障、保障人员与设备安全的最后防线。在供电保障方面,采用双回路电源或单回路电源+应急柴油发电机双重冗余配置,当主电源中断时,备用电源无缝切换供电,应急柴油发电机亦可在30秒内迅速启动并恢复持续供电,有效避免提升容器长时间悬停带来的坠罐风险;在制动系统方面,可采用多通道恒减速制动系统,配置双液压站,一用一备,工作制动依靠智能闸控系统实现悬停抱闸,紧急制动通过恒减速液压制动系统实现恒定减速度,大幅提升制动可靠性;在控制系统方面,采用双变频器并联设计,单台变频器故障时,另一台可在100ms内自动接管负载,确保控制系统连续运行,控制回路采用双回路供电,关键传感器(如速度传感器、张力传感器)均配置双套,实现信号交叉验证。这些冗余设计共同

构建起多层次的安全防护体系。

3 安全性能评估的量化方法

3.1 制动性能动态检测法

制动性能堪称矿山提升设备安全的核心要素,对其进行量化评估对于保障设备稳定可靠运行有着不可替代的重要意义。通过智能闸控系统,能够同步精准采集制动距离、制动时间以及制动加速度等关键数据,从而实现对制动过程细致入微的精准监测。测试过程中,在提升机处于重载提升或者下放的状态下实施紧急制动操作,随后依据记录下来的速度-时间曲线来精确计算制动减速度,同时利用拉力传感器测量制动力矩,以此严格检验各项数据是否符合设计标准。通过这种基于动态数据的量化评估方法,能够直观且可靠地掌握制动性能状况,进而为矿山提升设备的科学选型、日常维护以及全面的安全评估提供坚实有力的直接依据。

3.2 基于 PLC 的故障诊断法

矿山提升设备控制系统故障是引发重大事故的关键诱因,而基于PLC的故障诊断法为破解这一难题提供了智能化解决方案。该方法通过PLC模块实时采集电机电流、振动频率、温度等核心参数,构建设备全生命周期健康档案,并利用LSTM神经网络等机器学习算法深度挖掘历史数据规律,精准预测轴承磨损、齿轮断裂等潜在故障趋势。相较于传统“事后维修”模式,该方法实现了从被动响应到主动预防的转变,将设备运行安全管控前置化,显著提升了矿山提升系统的本质安全水平与运维效率。

3.3 数字孪生仿真验证法

矿山提升设备在极端工况下的安全性能验证常面临实物测试成本高、风险大的难题,而数字孪生仿真验证法为此提供了创新解决方案。该方法基于三维建模软件(如SolidWorks)构建提升机数字孪生体,可精准模拟超载、断绳等极端条件下的应力分布与运动轨迹,并通过虚拟调试优化安全保护参数。在实际操作中,该技术还能结合有限元分析软件,对提升机关键部件在不同工况下的疲劳寿命进行预测,提前发现可能存在的疲劳裂纹隐患。

4 安全性能评估的标准化流程

4.1 设计方案对比评估

设计方案对比评估阶段,以科学选型保障设备安全。首先,基于矿井实际条件与安全性能要求,制定多套设备选型设计方案,例如针对不同深度与产量的矿井,对比单绳缠绕式与多绳摩擦式提升机的适用性:前者结构简单、成本较低,但适用深度通常不超过500米;后者虽能满足深井(如800米以上)提升需求,但维护成本与技术复杂度较高。需从安全性能(制动可靠性、冗余设计完备性等)、经济投入、运行效率、维护难度、能耗水平五维度建立量化评分体系,选择最优方案。随后,通过FMEA(失效模式与影响分析)+HAZOP(危险与可操作性分析)联合方法系统识别各方

案潜在风险,量化风险等级(高、中、低)并明确风险发生概率与影响程度。针对高风险环节,需制定针对性预防措施:如采取多通过恒减速制动系统形成冗余保护;采用高强度钢丝绳,并加装钢丝绳在线监测装置实时监测钢丝绳磨损量,及时发现断丝断股,预测断丝发展率,尤其是钢丝绳内部断丝现象,对钢丝绳结构失效有重大影响,应立即采取相应措施消除安全隐患;对于多绳摩擦式提升机,尾绳的检验往往是提升系统中最易忽略的环节,在实际生产过程中,应加强尾绳的监测及检验,预防因尾绳磨损而导致坠罐等安全事故的发生。这一流程通过“方案设计-多维对比-风险识别-措施闭环”四步法,为设备安全选型提供双重保障。

4.2 设计合规性评估

设计方案确定后,需通过设计合规性评估确保设备安全达标,核心包含合规性审查、验收测试与持续改进三个环节。合规性审查依据《金属非金属矿山安全规程》(GB 16423-2020)、《矿井提升机和矿用提升绞车 安全要求》(GB 20181-2006)、《多绳摩擦式提升机》(GB/T 10599-2023)、《单绳缠绕式矿井提升机》(GBT 20961-2018)等相关国家标准与行业规范,对设备关键部件进行合规性核查,重点检查制动系统参数、电气保护装置、安全连锁功能、材料性能参数的可靠性,确保每一项参数均达标,合规性审查通过率需达到100%。

验收测试开展空载、半载(50%额定载荷)、满载(100%额定载荷)、超载(110%额定载荷)四级实测,模拟不同工况下的设备响应,测试项目包括制动性能、速度控制精度、安全回路动作可靠性、应急停机响应时间等。验收合格判定标准:关键安全参数合格率100%,一般性能参数合格率 $\geq 95\%$,应急响应时间 $\leq 1s$ 。若测试发现问题(如制动距离超标),需及时优化调整后复测,直至符合要求。

设备投入运行后,建立工业互联网+设备安全管理平台,实时采集制动系统响应时间、钢丝绳磨损量等安全参数,构建设备全生命周期健康档案(数据存储时间 ≥ 5 年);制定定期复审制度:每月开展安全参数月度核查,每季度进行性能专项检测,每年实施全面安全评估,结合生产需求动态调整设备配置,形成“合规审查-验收测试-运行监测-定期复审”的闭环管理模式,确保设备长期处于合规安全状态。

5 评估方法应用的建议

为有效实施矿山提升设备安全性能评估方法,提出以下建议。其一,加强人员培训。专业人员是评估方法有效实施的关键,矿山企业要定期组织人员参加培训,使其熟悉各类评估方法原理、流程,掌握检验检测仪器设备的使用方法,同时了解PLC控制系统、数字孪生技术等前沿知识,提升整体技术水平和安全意识。其二,建立评估数据库。集中存储和管理不同矿井、型号设备的评估数据,涵盖基本信息、评估指标、故障记录等,通过分析发现普遍规律和潜在问题,为设备使用、改进和维护提供参考。其三,强化跨部门协作。评估涉及多部门,设备管理部门确保设备符合安全要求,安全管理部门制定标准、监督评估,技术部门提供技术支持与数据分析,各部门协同工作。其四,持续关注技术发展。科技发展带来新评估方法和技术,矿山企业要关注行业动态,及时引进先进技术,积极与科研机构、高校合作开展研究应用,提升评估水平和效果。

6 结论与展望

总的来说,本文聚焦矿山提升设备制造选型,系统构建了涵盖设备本体、运行控制系统、安全冗余设计的安全性评估体系,提出制动性能动态检测、基于PLC的故障诊断、数字孪生仿真验证等量化方法,并制定了标准化评估流程。该体系能有效识别设备安全隐患,降低事故风险,为矿山提升设备选型提供科学依据。未来,随着5G、AI、物联网等技术的深度融合,评估方法将向智能化、实时化方向演进,实现设备安全性能的远程监测与动态优化。同时,行业需进一步完善评估标准,加强产学研合作,推动矿山提升设备安全性能评估技术的持续创新与广泛应用,为矿山安全生产提供更强保障。

参考文献

- [1] 李玉瑾. 矿井提升系统的装备技术与展望[J].煤炭工程,2014,46(10):61-64.
- [2] 陈华豪.大型矿井提升机主轴结构受力分析及其优化设计[D].太原理工大学,2003.
- [3] 刘超杰.大型提升机卷筒结构性能优化及焊接特性研究[D].安徽理工大学,2025.DOI:10.26918/d.cnki.ghngc.2025.001378.