

煤矿斜井提升机变频调速系统节能优化研究

张 涛

永煤集团股份有限公司新桥煤矿 河南 商丘 476600

摘 要：煤矿斜井提升机作为矿井运输的核心设备，其变频调速系统的能耗问题直接影响煤矿生产的经济性与环保性。本研究针对变频调速系统在节能应用中存在的设备选型不合理、控制策略不完善、电网谐波影响大及维护管理不足等问题，从科学选型、控制算法优化、谐波治理、维护管理强化及智能监测技术应用等方面提出节能优化策略。研究表明，通过系统性优化可显著降低提升机能耗，减少设备损耗，推动煤矿绿色高效发展，为煤矿提升系统的节能改造提供理论与实践参考。

关键词：煤矿斜井；提升机变频调速；系统节能优化；研究

引言：在煤矿生产中，斜井提升机承担着物料运输与人员升降的重要任务，其能耗占矿井总能耗的较大比例。随着“双碳”目标推进及煤矿智能化发展，变频调速系统因调速精准、运行稳定等优势被广泛应用，但实际运行中仍面临节能潜力未充分释放的问题。当前，设备选型与工况匹配度不足、传统控制策略动态适应性差、谐波污染导致电能浪费及维护管理滞后等问题，制约着提升系统的能效提升。因此，深入研究变频调速系统的节能优化路径，对降低煤矿生产成本、延长设备寿命、推进绿色矿山建设具有重要的现实意义。

1 煤矿斜井提升机变频调速系统节能的意义

1.1 降低生产成本

煤矿斜井提升机传统调速方式下，电机频繁启停、速度调节粗放，导致电能大量浪费。采用变频调速系统后，可根据实际负载精准调节电机转速，实现功率按需输出。例如，空载或轻载运行时，系统自动降低输出频率，减少电机功率消耗。实践数据显示，相较于传统系统，变频调速能使提升机能耗降低15%-30%。以年运行8000小时计算，单台设备每年可节省电费数十万元。此外，能耗降低使得冷却系统、供电设备的负荷同步减少，进一步降低辅助设施的运行成本，显著提升企业经济效益。

1.2 减少设备损耗

传统提升机工频启动时，电机启动电流可达额定电流的4-7倍，不仅会导致电机绕组发热、绝缘老化，还会对减速机、钢丝绳等机械部件造成剧烈冲击，增加设备故障风险。变频调速系统采用软启动技术，将启动电流控制在额定电流的1.5倍以内，有效避免电流骤变对电气元件的损伤。同时，系统平滑的速度调节功能，大幅降低机械部件的启停冲击，减少齿轮磨损、轴承疲劳等问

题。某煤矿实际应用数据显示，变频调速系统使电机故障率下降40%，钢丝绳更换周期延长50%，年均减少设备维护成本20万元以上，显著提升设备使用寿命与生产连续性。

1.3 推动绿色发展

在国家“双碳”目标的战略背景下，煤矿行业绿色转型需求迫切。斜井提升机作为高耗能设备，其变频调速系统的节能优化是实现低碳生产的关键。通过降低电能消耗，单台提升机每年可减少数十吨二氧化碳排放，全矿区推广后减排效果更为显著。此外，变频调速系统有效减少电网谐波污染，改善供电质量，避免谐波对其他电气设备的干扰，符合绿色矿山建设标准。节能技术的应用不仅助力企业落实环保政策，更能提升企业社会形象，推动煤炭产业向绿色、可持续方向发展^[1]。

2 煤矿斜井提升机变频调速系统节能存在的问题

2.1 设备选型不合理

在煤矿斜井提升机变频调速系统建设中，设备选型与实际工况匹配度不足的问题较为突出。部分煤矿为追求短期效益，选用功率冗余过大的变频器与电机，导致设备长期处于轻载运行状态，形成“大马拉小车”现象，造成电能浪费。此外，对设备性能参数的忽视，如未充分考虑矿井提升高度、坡度、运输量等关键指标，使得设备无法适应复杂工况。例如，在斜井坡度较大、运输频繁的场景下，若变频器过载能力不足，会出现频繁停机保护，而频繁重启不仅增加能耗，还加剧设备损耗。同时，设备选型时缺乏对节能效率、可靠性等综合指标的评估，导致设备整体能效偏低，难以满足节能需求。

2.2 控制策略不完善

当前煤矿斜井提升机变频调速系统的控制策略普遍存在动态适应性差的问题。传统控制算法多采用固定参

数的PID控制,难以根据提升机负载、速度的实时变化进行精准调节。在实际运行中,斜井提升机的负载存在空载、满载交替,且启动、加速、减速、制动过程工况复杂,固定参数控制易导致速度波动大、响应滞后,无法实现最优能效控制。例如,在重载启动阶段,若控制参数设置不当,会出现启动电流过大或启动缓慢的情况,增加能耗与设备磨损;而在减速制动环节,能量回馈控制不足,导致制动能量未有效回收利用,造成电能浪费。此外,缺乏对提升机运行数据的深度分析与优化,难以形成动态调整的节能控制策略。

2.3 电网谐波影响大

煤矿斜井提升机变频调速系统运行过程中产生的电网谐波问题日益严峻。变频器采用电力电子器件进行整流、逆变,其非线性特性会向电网注入大量谐波电流。这些谐波不仅导致电网电压畸变,降低电能质量,还会造成其他电气设备运行异常。例如,谐波会使变压器、电动机等设备产生附加损耗,增加发热量,降低设备效率与使用寿命;谐波干扰还可能影响煤矿监控、通信等精密电子设备的正常运行,引发数据传输错误或设备误动作。同时,谐波污染会导致电网无功功率增加,功率因数下降,进一步加剧电能损耗。部分煤矿未配备有效的谐波治理装置,使得谐波问题长期存在,影响整个矿区供电系统的稳定性与节能效果。

2.4 维护管理不足

煤矿斜井提升机变频调速系统的维护管理水平直接影响其节能性能,但当前维护管理存在诸多短板。一方面,专业技术人员匮乏,部分煤矿运维人员对变频调速系统的原理、结构及故障诊断方法掌握不足,难以对设备进行精准维护与故障处理,导致设备小故障未及时修复,逐渐演变为大故障,增加维修成本与停机时间。另一方面,维护管理缺乏系统性,未建立完善的设备运行档案与定期检测制度,无法对设备的能耗数据、故障频率等进行有效分析,难以提前预判设备潜在问题。此外,维护工具与检测手段落后,依赖人工巡检,无法实时监测设备运行状态,导致设备异常运行时无法及时发现并调整,长期处于低效甚至高能耗状态,严重制约变频调速系统节能潜力的发挥^[2]。

3 提高煤矿斜井提升机变频调速系统节能的优化策略

3.1 科学选型

科学选型是实现煤矿斜井提升机变频调速系统节能的基础环节,直接影响设备全生命周期的能耗水平。在电机选型方面,需充分考虑斜井提升机的工况特性,优先选择高效节能型电机。永磁同步电机凭借高功率密

度、低转子损耗及宽调速范围的优势,相比传统异步电机可降低10%-15%的运行损耗,尤其适用于频繁启停、负载波动大的场景;对于对成本较为敏感的项目,超高转差率三相异步电机通过优化转子结构,降低启动电流与机械损耗,也能实现显著节能效果。选型时需根据矿井的提升高度、坡度、最大运输量及运行周期,精确计算电机额定功率与扭矩需求,避免因功率冗余导致“大马拉小车”现象,同时应关注电机的能效等级,优先采用符合国家一级能效标准的产品。变频器选型同样关键,需重点考量其过载能力、调速精度及控制功能。应选择适配电机容量且具备矢量控制或直接转矩控制功能的变频器,这类产品能够实现电机磁通和转矩的独立控制,在不同负载条件下均能保持高效运行。同时,需评估变频器的防护等级与环境适应性,确保其在煤矿井下潮湿、粉尘多的恶劣环境中稳定工作。此外,设备选型还应结合全生命周期成本分析,综合考虑初期采购成本、长期能耗费用、维护成本及使用寿命,选择性价比最优的设备组合,从源头上奠定节能基础。

3.2 优化控制算法

传统PID控制算法因参数固定、动态响应慢,难以满足斜井提升机复杂工况下的节能需求,亟需引入先进控制策略。模型预测控制(MPC)通过建立系统动态模型,结合未来有限时域内的输入输出预测,优化控制参数,可显著提升调速精度与能量利用率。在提升机启动阶段,MPC算法可提前规划电流与速度曲线,避免启动电流过大导致的能耗浪费;在减速制动过程中,配合回馈制动技术,将机械能转化为电能回送至电网或储能装置,实现能量回收。模糊控制与神经网络控制利用其自学习能力,可根据负载、速度、加速度等实时数据,动态调整控制参数,适应非线性、时变的运行环境。模糊控制通过模糊逻辑规则库,将输入的精确定量转化为模糊量进行处理,有效应对系统的不确定性;神经网络控制则通过大量数据训练,自主学习系统的复杂映射关系,实现控制策略的优化。此外,将多种算法融合形成复合控制策略,如结合MPC的预测能力与模糊控制的鲁棒性,构建“预测-决策-优化”的闭环体系,能够进一步提升系统的动态响应性能与节能效果。同时,基于大数据分析的自适应控制策略,通过采集设备运行数据挖掘能耗规律,构建动态优化模型,实现控制策略的自主迭代,持续提升系统能效^[3]。

3.3 谐波治理

煤矿斜井提升机变频器运行过程中产生的谐波电流,会导致电网电压畸变、设备损耗增加及电能质量下

降,需采用综合措施进行治理。在源头抑制方面,可采用多重化整流技术或12脉波、24脉波整流器,通过增加整流相数降低谐波含量;同时,优化变频器的调制策略,选择低谐波的脉宽调制(PWM)技术,如空间矢量PWM,减少谐波产生。此外,选用具备谐波抑制功能的变频器,通过内置滤波器或优化电路拓扑结构,降低自身谐波发射量。在末端补偿环节,有源电力滤波器(APF)可实时监测并补偿系统谐波电流,具有动态响应快、补偿精度高的优势,能针对不同频次谐波进行精准治理;无源滤波器(PFF)则适用于谐波成分相对固定的场景,通过配置LC滤波电路,吸收特定频次谐波。此外,合理配置无功补偿装置,如静止无功发生器(SVG),可提升系统功率因数,降低线路损耗;采用隔离变压器或滤波电抗器,能够有效阻断谐波传播路径,减少谐波对其他设备的干扰。通过“源头抑制+末端补偿+路径阻断”的综合治理方案,可将电网谐波畸变率控制在国家标准范围内,保障系统稳定运行与节能效果。

3.4 加强维护管理

完善的维护管理体系是保障变频调速系统长期稳定节能运行的关键。首先,需强化运维人员的专业技能培训,系统开展变频器原理、故障诊断方法及节能优化技术的培训课程,提升其对设备异常状态的识别与处理能力,避免因操作不当或维护滞后导致能耗增加。培训内容应涵盖设备日常巡检要点、常见故障排查流程及节能参数优化方法,确保运维人员能够胜任复杂工况下的设备维护工作。其次,建立设备全生命周期管理档案,详细记录运行参数、维护记录及故障数据,通过数据分析预测设备潜在问题,制定预防性维护计划。定期检测变频器散热系统、电气连接、滤波模块等关键部件的性能状态,及时清理积尘、紧固接线、更换老化元件,确保设备处于最佳运行工况。推行标准化维护流程,规范巡检周期、保养内容及检修标准,形成“日检-周查-月维护”的分级管理机制。同时,建立维护效果反馈机制,根据设备运行数据优化维护策略,形成管理闭环。此外,还应建立备件管理制度,确保关键部件的及时更换,减少设备停机时间,维持系统稳定节能运行。

3.5 应用智能监测技术

智能监测技术为变频调速系统的节能优化提供了数据驱动的支撑。通过在提升机电机、变频器、减速机等关键部位部署振动传感器、温度传感器、电流电压监测模块、红外热成像仪等物联网设备,可实时采集设备运行状态数据,并借助5G网络或工业以太网传输至智能监控平台。平台利用边缘计算与云计算技术,对数据进行深度分析,实现设备能耗实时监测、故障预警及能效评估。建立能耗基准模型,通过对比实际运行数据,自动识别能耗异常点;利用振动与温度数据,结合机器学习算法预测设备故障趋势,提前触发预警。同时,基于数字孪生技术构建虚拟仿真系统,可模拟不同工况下设备的运行状态,优化控制策略与运行参数,实现“虚拟调试-现场验证”的高效节能模式。通过智能监测技术的应用,不仅提升了设备管理的智能化水平,还为节能优化提供了量化依据,助力煤矿实现精细化、智能化运营,持续挖掘系统节能潜力^[4]。

结束语

本研究围绕煤矿斜井提升机变频调速系统的节能优化展开,通过分析传统调速系统能耗痛点,提出基于智能控制策略的变频调速优化方案。研究表明,优化后的系统通过动态匹配提升负载与电机输出功率,可显著降低电能损耗,同时提升设备运行稳定性。实际应用中,该方案不仅实现了提升机启制动过程的平滑控制,还通过能量回馈技术回收再生电能,兼具节能效益与安全性提升。

参考文献

- [1]尚存正.变频技术在煤矿提升机中的应用研究[J].矿业装备,2022,(02):234-235.
- [2]王先科,刘欢欢.基于ARM控制平台的矿井提升机调速控制系统应用研究[J].能源与环保,2021,43(11):193-199.
- [3]尹小英.变频技术在煤矿提升机中的应用研究[J].技术与市场,2021,28(06):127-128.
- [4]张翔.煤矿提升机变频调速控制系统设计研究[J].机械管理开发,2022,37(05):268-269+272.