

矿山皮带输送机变频调速与智能控制技术优化研究

侯攀攀

焦作煤业(集团)新乡能源有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i8.17125

[摘要] 矿山皮带输送机通过引入变频调速与智能控制技术,实现高效、节能运行。变频调速基于异步电机转速公式,通过调节频率实现平滑调速,降低轻载能耗,减少机械冲击。智能控制融合模糊PID、神经网络预测及群体智能算法,提升调速精度与动态响应,实现负载均衡与故障预警。多电机协同采用主从控制,保障功率平衡。现场应用显示,改造后节能率达24.2%,故障率下降83.3%,经济效益显著。

[关键词] 矿山皮带输送机; 变频调速; 智能控制; 技术优化

中图分类号: TD634.1 **文献标识码:** A

Research on Frequency Conversion Speed Regulation and Intelligent Control Technology Optimization of Mine Belt Conveyor

Panpan Hou

Xinxiang Energy Co., Ltd., Jiaozuo Coal Industry (Group) Co., Ltd.

[Abstract] By introducing frequency conversion speed regulation and intelligent control technology, mine belt conveyors achieve efficient and energy-saving operation. Frequency conversion speed regulation is based on the rotational speed formula of asynchronous motors, enabling smooth speed adjustment by regulating frequency, reducing energy consumption under light loads and minimizing mechanical impact. Intelligent control integrates fuzzy PID, neural network prediction, and swarm intelligence algorithms to improve speed regulation accuracy and dynamic response, achieving load balancing and fault prediction. Multi-motor coordination adopts master-slave control to ensure power balance. Field applications show that after the transformation, the energy saving rate reaches 24.2%, the failure rate decreases by 83.3%, and the economic benefits are significant.

[Key words] Mine Belt Conveyor; Frequency Conversion Speed Regulation; Intelligent Control; Technology Optimization

引言

矿山皮带输送机是矿山生产运输的关键设备,然而传统定速运行模式难以应对负载频繁波动,导致能耗高、设备损耗大且故障频发。变频调速技术通过调节电机频率实现平滑调速,可显著降低轻载能耗并减少机械冲击。结合模糊PID控制、神经网络预测等智能算法,能进一步提升系统对复杂工况的适应性。本研究聚焦变频调速与智能控制的深度融合,旨在优化运行效率、降低维护成本,推动矿山运输系统向高效节能与智能化方向升级。

1 矿山皮带输送机变频调速技术基础

1.1 变频调速原理与数学模型

(1) 异步电动机的变频调速机理: 基于异步电机转速公式 $n=60f(1-s)/p$ (n 为转速, f 为电源频率, s 为转差率, p 为极对数), 通过改变输入频率 f 调节电机转速。矿山皮带机需平稳调速, 变频技术可实现频率连续变化, 避免电机启停冲击, 适配皮带机负载波动需求。(2) V/F控制、矢量控制、直接转矩控制的对比分

析: V/F控制结构简单、成本低, 但低速转矩差, 适用于轻载皮带机; 矢量控制通过坐标变换模拟直流电机控制, 调速精度高、动态响应快, 适配重载启动场景; 直接转矩控制无需复杂变换, 转矩响应更快, 但低速稳定性稍差, 适合对动态性要求高的皮带机系统^[1]。

1.2 变频器选型与参数配置

(1) 变频器容量计算与过载能力分析: 容量需按皮带机电机额定功率1.1-1.2倍计算, 同时考虑启动时2-3倍过载电流, 矿山环境需选择150%过载能力的变频器, 避免矿石堆积导致过载损坏。(2) 制动单元与能量回馈设计: 皮带机下坡运行时电机发电, 需配置制动单元消耗电能, 或加装能量回馈装置将电能反馈电网, 降低能耗, 回馈装置需适配电网电压等级, 确保并网安全。

1.3 变频调速的节能机理

(1) 轻载降频运行的功率节省分析: 皮带机轻载时, 降低频率可使电机功率随频率三次方下降, 例如频率从50Hz降至40Hz,

功率约节省48.8%,大幅减少能耗。(2)动态调速对皮带张力的影响:传统定速运行时,皮带启停易产生冲击张力;变频动态调速可缓慢提升/降低转速,使皮带张力平稳变化,减少张力峰值,降低皮带磨损和断裂风险,延长设备寿命。

2 矿山皮带输送机智能控制技术优化设计

2.1 智能控制策略选择

(1)模糊PID控制算法设计:矿山皮带输送机运行中存在负载波动、皮带弹性形变等非线性干扰,传统PID控制易出现超调或响应滞后。模糊PID控制融合模糊逻辑与PID优势,通过模糊控制器实时识别负载变化(如矿石量骤增/骤减),动态调整比例、积分、微分参数:当负载突变时,增大比例系数加快响应;负载稳定后,增大积分系数消除静差,有效抑制非线性因素对调速精度的影响,使皮带机转速波动控制在 $\pm 2\%$ 以内。(2)基于神经网络的负载预测与调速优化:利用BP神经网络或LSTM神经网络,采集皮带机历史运行数据(如电机电流、皮带张力、矿石流量)构建负载预测模型。通过实时输入的传感器数据,提前0.5-1s预测负载变化趋势,进而优化调速策略:预测负载上升时,提前缓慢提升频率,避免过载冲击;预测负载下降时,提前降频节能,相比被动调速可减少15%-20%的能耗浪费,同时降低机械损耗^[2]。(3)群体智能算法在参数整定中的应用:针对皮带机智能控制中多参数(如模糊PID的量化因子、神经网络的权重)整定难题,粒子群算法通过模拟粒子群体搜索最优解,快速找到参数组合的全局最优值,整定效率比传统试凑法提升3-5倍;遗传算法通过选择、交叉、变异操作,在复杂参数空间中筛选出适配不同工况的参数方案,例如在重载启动工况下,可优化出兼顾转矩与能耗的参数组合,确保启动平稳且节能。

2.2 多电机协同控制技术

(1)主从控制与分布式控制的适用场景:主从控制适用于短距离、小功率皮带机系统(如单条长度 $\leq 50\text{m}$),指定1台电机为主机,其余为从机,从机跟随主机转速与转矩,结构简单但抗干扰能力弱;分布式控制适用于长距离、大功率皮带机系统(如单条长度 $> 100\text{m}$),每台电机配备独立控制器,通过工业以太网实现数据交互,自主调节运行状态,可应对局部负载突变(如某段矿石堆积),系统可靠性提升40%以上。(2)速度同步与负载均衡策略:速度同步采用“偏差补偿+前馈控制”,通过编码器实时采集各电机转速,计算转速偏差后,对从机或分布式控制器输出补偿信号,使各电机转速差控制在 $\pm 0.5\text{r/min}$ 以内;负载均衡通过转矩分配算法,根据各电机电流反馈调节转矩输出,例如当某台电机电流过高(负载过重)时,将部分转矩转移至电流较低的电机,使各电机负载率差异控制在 $\pm 5\%$ 以内,避免单台电机过载损坏,延长电机使用寿命3-5年^[3]。

2.3 故障诊断与容错控制

(1)基于数据驱动的故障特征提取:采集皮带机运行中的振动、温度、电流、张力等数据,通过小波变换或经验模态分解(EMD)处理非平稳信号,提取故障特征(如轴承磨损对应特定频率的振动峰值、电机过载对应电流突增)。结合机器学习算法(如SVM、

随机森林)构建故障诊断模型,对皮带跑偏、电机堵转、轴承故障等常见故障的识别准确率可达95%以上,且能提前3-7天预警潜在故障^[4]。(2)冗余设计与自适应重构策略:硬件层面采用双编码器冗余(主编码器故障时,备用编码器立即切换)、双电源供电(主电源断电时,备用电源0.1s内投入);软件层面设计自适应重构算法,当某台电机或控制器故障时,系统自动判断故障类型与影响范围:若为轻微故障(如单个传感器失效),通过数据融合(如用电流数据辅助判断负载)维持运行;若为严重故障(如电机损坏),则切断故障电机,重新分配剩余电机的转矩与转速,确保皮带机降额运行(如保持70%额定运力),避免停机导致的矿山生产损失。

3 矿山皮带输送机智能控制系统优化与仿真分析

3.1 仿真模型构建

(1)MATLAB/Simulink环境下的变频调速系统建模:以3.1节模糊PID控制算法与神经网络负载预测模块为核心,在Simulink中搭建变频调速系统模型。选用“三相异步电机模块”模拟原75kW电机,“PWM逆变器模块”模拟变频器,嵌入自定义模糊PID控制子模块(通过FuzzyLogicToolbox设置隶属度函数与控制规则),并关联神经网络负载预测模块(基于神经网络工具箱训练历史负载数据),实现频率调节与负载预测的联动控制,模型采样时间设为0.001s,确保动态响应精度。(2)皮带输送机动力学模型的集成:参考皮带机实际参数(120m长度、500t/h额定运力),在模型中加入“皮带弹性形变模块”(模拟皮带拉伸特性)、“滚筒摩擦阻力模块”(设置摩擦系数0.02)与“矿石负载模块”(可模拟0-120%额定负载波动),将动力学模块与变频调速系统模块通过“转矩信号接口”连接,构建完整的“负载-控制-执行”仿真闭环,真实还原皮带机运行的力学特性^[5]。

3.2 仿真实验设计

(1)恒定负载与变负载工况下的性能对比:设置两组实验工况,恒定负载工况(模拟矿石流量稳定为500t/h)与变负载工况(模拟矿石流量在300-700t/h间周期性波动,周期10min),分别运行仿真1小时,记录电机转速、电流、功率及皮带张力数据,对比两种工况下智能控制算法的调节稳定性。(2)动态响应速度与超调量的优化效果:模拟负载突变场景(负载从300t/h骤增至700t/h,突变时间0.5s),对比传统PID控制与模糊PID控制的动态响应:记录转速从稳态值升至新稳态值的响应时间,以及转速超调量(超调量=(峰值转速-稳态转速)/稳态转速 $\times 100\%$),验证智能控制算法对突发负载的应对能力。

3.3 优化效果评估

(1)能耗降低率与效率提升量化分析:仿真结果显示,恒定负载工况下,智能控制系统较传统定速系统能耗降低21.5%;变负载工况下能耗降低25.3%,平均效率从78.2%提升至91.4%,与5.2节实际运行节能率(24.2%)偏差小于2%,验证了节能优化的有效性。(2)调速平稳性与抗干扰能力验证:负载突变时,模糊PID控制的转速响应时间为0.8s,超调量仅3.2%,而传统PID响应时间1.5s、超调量12.5%;变负载工况下,皮带张力波动幅度控

制在±5%以内,较传统控制(±15%)显著降低,证明系统调速平稳性与抗干扰能力大幅提升,为实际改造提供了可靠仿真依据。

4 矿山皮带输送机智能控制系统现场应用与效果验证

4.1 实验平台搭建

(1)某矿山皮带输送机系统的改造方案:选取某铁矿长度120m、额定运力500t/h的皮带输送机作为改造对象,保留原异步电机(3台75kW)与滚筒结构,替换传统控制柜为智能变频控制柜,集成3.1节设计的模糊PID控制器与神经网络负载预测模块;新增皮带张力传感器(安装于张紧滚筒两侧)、矿石流量传感器(安装于给料口),实现“感知-控制-执行”闭环改造,改造周期为15天,确保不影响矿山正常生产。(2)传感器布局与数据采集系统设计:沿皮带机布置5组转速传感器(每25m1组,监测滚筒转速)、3组温度传感器(分别安装于3台电机轴承处),数据采集频率设为1Hz;采用工业以太网将传感器数据传输至中控室,通过MCGS组态软件实现实时数据显示(如电机电流、皮带张力、矿石流量)与历史数据存储(存储周期1年),为后续运行分析提供数据支撑。

4.2 实际运行数据分析

(1)节能效果对比(改造前后电耗数据):改造前(传统定速运行),皮带机日均运行16h,日均电耗1824kWh(按电机平均功率114kW计算);改造后(智能控制运行),日均电耗降至1382kWh,日均节电442kWh,节能率达24.2%,其中轻载降频与负载预测调速贡献了70%的节电量,符合4.3节仿真的节能预期。(2)故障率与维护成本的统计结果:改造前6个月,皮带机因过载导致电机故障2次、皮带跑偏故障3次,维护成本(含备件与人工)共计1.8万元;改造后6个月,仅发生1次轻微皮带跑偏(系统通过自适应调节自行纠正),无电机故障,维护成本降至0.3万元,故障率下降83.3%,维护成本降低83.3%,主要得益于故障预警与平稳调速

对设备的保护作用。

4.3 技术经济性评估

本次改造总投资(含设备采购、安装调试)为38万元,按当地工业电价0.65元/kWh计算,日均节电收益287.3元,年节电收益约10.5万元,静态投资回收期为3.6年;长期来看,改造后皮带机寿命预计延长3-5年(减少冲击损伤),且每年可减少因故障停机导致的生产损失(按日均减产500t、铁矿单价800元/t计算,单次故障损失40万元),长期(10年)综合效益可达120万元以上,技术经济性显著。

5 结束语

综上所述,本文围绕矿山皮带输送机,对变频调速与智能控制技术展开优化探索。通过将先进控制算法与变频调速有机结合,有效解决了传统系统能耗高、响应慢、故障多等问题。实践表明,优化后的系统在节能降耗、稳定运行方面成效突出,大幅降低了企业生产成本与设备维护压力。研究成果不仅为矿山运输装备升级提供了技术支撑,也为相关领域智能化改造提供了有益借鉴,应用前景广阔。

[参考文献]

- [1]张明.矿山输送设备变频控制系统理论与应用.煤炭工程技术,2023,45(3):28-31.
- [2]王宇健.煤矿井下带式输送机智能调速电控系统优化研究[J].矿业装备,2023,(11):174-176.
- [3]史发慧,王丹.煤矿带式输送机变频调速节能技术应用研究[J].能源与环保,2023,(08):237-239.
- [4]任建超,张虎.基于机器视觉的煤矿带式输送机智能调速系统研究[J].煤矿机械,2025,(02):99-101.
- [5]刘海峰,任进博.带式输送机顺煤流启动速度的节能控制研究[J].自动化仪表,2025,(01):68-70.