

煤矿井下皮带运输系统智能调速技术研究

舍晓东

禹州枣园煤业有限公司 河南 禹州 461670

摘要: 随着煤矿智能化建设加速推进,井下皮带运输系统作为煤炭运输的核心环节,其能耗高、磨损大、效率低等问题日益凸显。本文聚焦煤矿井下皮带运输系统智能调速技术展开研究。首先阐述相关理论基础,包括负载-速度动态匹配理论、多传感器融合感知技术及智能控制算法优化。接着介绍关键技术,涵盖高精度煤流量监测、动态调速执行机构、数字孪生与可视化平台、多机协同控制以及故障预测与健康管理等。最后探讨该技术发展趋势,如深度融合工业互联网、智能化水平提升、绿色节能技术深化以及安全可靠性增强。此研究旨在推动煤矿井下皮带运输系统向智能化、高效化、安全化方向发展。

关键词: 煤矿井下; 皮带运输系统; 智能调速技术; 发展趋势

引言: 煤矿作为我国重要的能源产业,其生产效率与安全性至关重要。井下皮带运输系统作为煤炭开采运输的关键环节,传统调速方式难以适应复杂多变的井下工况,导致运输效率低下、能耗较高且安全隐患较多。随着科技的飞速发展,智能调速技术为解决这些问题提供了新的思路和方法。通过引入先进的理论、技术与算法,实现对皮带运输系统的精准、智能调速,不仅能显著提升运输效率、降低能耗,还能增强系统的安全性和可靠性。因此,开展煤矿井下皮带运输系统智能调速技术研究具有重要的现实意义和广阔的应用前景。

1 煤矿井下皮带运输系统智能调速技术理论基础

1.1 负载-速度动态匹配理论

负载-速度动态匹配理论以功率传输最大化为核心,通过实时调整驱动电机转速与负载的动态关系实现高效运行。在煤矿井下皮带运输系统中,该理论基于最大功率传输定理,通过无速度传感器矢量控制技术,根据皮带负载电流信号动态预置变频器速度参数。例如,当检测到煤流量增加时,系统自动提高电机转速以匹配负载需求,避免传统固定速度模式下的过载打滑或轻载空转问题。该理论突破了静态匹配的局限性,通过动态调整负载阻抗与电机输出转矩的匹配关系,实现运输效率提升15%-20%,同时降低电机能耗与设备磨损^[1]。

1.2 多传感器融合感知技术

多传感器融合感知技术通过集成激光扫描、3D视觉、称重传感器及电流反馈装置,构建全维度负载监测体系。激光扫描仪可实时生成煤流立体模型,结合高精度称重传感器获取单位长度煤量数据,计算瞬时运载量;3D视觉系统则通过AI算法识别皮带跑偏、异物侵入等异常状态。多源数据经卡尔曼滤波算法融合后,系统

能精准区分正常负载波动与故障特征,为动态调速提供可靠依据,故障识别准确率达98%以上。

1.3 智能控制算法优化

智能控制算法优化以深度强化学习与数字孪生技术为核心,构建自适应调速决策模型。基于历史运输数据训练的LSTM神经网络可预测未来10分钟煤流量变化趋势,结合Q-learning算法动态优化调速策略,实现能耗与效率的帕累托最优。例如,某系统通过数字孪生平台模拟200种工况,生成最优速度曲线库,实际运行中根据实时负载匹配最佳调速方案,使电机综合能效提升12%。同时,卷积神经网络(CNN)对皮带振动信号进行特征提取,结合SVM分类器实现故障早期预警,将设备突发故障率降低60%,维护周期延长至传统模式的2.3倍。

2 煤矿井下皮带运输系统智能调速关键技术

2.1 高精度煤流量监测技术

煤矿井下皮带运输系统的高精度煤流量监测技术是实现智能调速的核心基础,其精度直接影响调速效果与运输效率。(1) AI图像识别技术凭借深度学习算法展现出卓越性能。通过在皮带运输机上方安装高清摄像头,实时采集煤流图像,经后台AI系统预处理去除噪声、增强对比度后,模型自动识别煤炭特征并计算煤流量。该技术测量误差可控制在 $\pm 2\%$ 以内,能精准反映煤流动态变化,即便煤块大小不一、分布不均也能准确测量,且具备自我学习优化能力,随着数据积累识别精度持续提升。(2) 激光三角法测量技术通过激光器发射激光至煤流表面,接收反射光并计算高度差,结合皮带速度得出煤流量。相关研究通过控制变量法优化系统参数,将相对误差控制在1%以内,实现高精度多参数耦合测量,可获取煤流截面的高精度轮廓线。(3) 激光雷达技术利用

时间飞行原理，发送与接收激光脉冲的时间差计算2D轮廓，结合皮带速度生成体积流量信号。其采集点云最大帧率可达75fps，适用于低速场景，能满足井下复杂环境下的实时监测需求，为智能调速提供可靠数据支持。

2.2 动态调速执行机构

动态调速执行机构是煤矿井下皮带运输系统实现精准、灵活调速的关键硬件，对提升运输效能与稳定性至关重要。（1）变频调速装置是核心部件。它通过改变输入电源的频率和电压，精确控制驱动电机的转速和转矩。在实际应用中，先进的变频器采用矢量控制技术，能将电机的定子电流分解为转矩电流和励磁电流，分别进行独立控制，就像为电机配备了“智能大脑”。这使得电机在低速运行时也能输出较大转矩，避免皮带打滑，且调速范围宽，可从极低速到高速平滑过渡，响应时间短，能在毫秒级内根据指令调整输出，满足煤流量动态变化时的快速调速需求。（2）高精度速度传感器不可或缺。它实时监测皮带的实际运行速度，并将数据反馈给控制系统，形成闭环控制。常见的光电编码器式速度传感器，其分辨率可达每转数千脉冲，能精确感知皮带速度的微小变化，误差控制在极小范围内，确保调速的准确性。（3）可靠的制动装置保障安全。当需要紧急停车或调速至低速时，制动装置迅速发挥作用。电磁制动器能在短时间内产生强大制动力，使皮带快速停止，且制动过程平稳，减少对设备的冲击，延长设备使用寿命，为井下运输安全提供坚实保障^[2]。

2.3 数字孪生与可视化平台

（1）数字孪生技术为煤矿井下皮带运输系统构建了精准的虚拟映射。它借助高精度建模工具，将皮带运输系统中的皮带、驱动装置、托辊等实体设备，以及运行环境等要素，在虚拟空间中以1:1的比例进行还原。通过实时采集物理系统的各类数据，如电机转速、皮带张力、煤流量等，每秒可更新数千次数据，确保虚拟模型与实际系统状态高度同步，误差控制在极小范围内，为后续的分析与决策提供坚实基础。（2）可视化平台将数字孪生模型中的复杂数据转化为直观的视觉信息。它运用先进的图形渲染技术，以三维动态的形式展示皮带运输系统的运行状态。操作人员无需面对繁琐的数据表格，通过可视化界面就能清晰看到皮带的运行速度、负载分布、设备温度等关键指标，数据展示精度可达小数点后两位，便于快速掌握系统整体情况。（3）数字孪生与可视化平台的结合实现了智能决策支持。基于虚拟模型与实时数据，系统可模拟不同调速策略下的运行效果，提前预测可能出现的问题，如皮带打滑、过载等。

通过数据分析算法，为操作人员提供最优的调速建议，使皮带运输系统始终保持在高效、稳定的状态运行，有效提升运输效率，降低故障发生率。

2.4 多机协同控制技术

多机协同控制技术是提升煤矿井下皮带运输系统整体运行效能与稳定性的关键所在。（1）该技术实现了多台皮带运输机之间的信息交互与共享。通过构建统一的通信网络，各皮带机的控制系统能够实时交换运行参数，如速度、负载、故障状态等。这使得系统能够全面掌握整个运输流程的动态信息，为协同控制提供数据基础。例如，当上游皮带机煤流量增加时，可及时将信息传递给下游皮带机，使其提前做好提速准备，避免煤流堆积。（2）多机协同控制技术采用集中式或分布式控制策略，实现各皮带机的协调运行。集中式控制通过中央控制器统一调度各皮带机的运行，根据整体运输需求和各皮带机的状态，制定最优的调速方案。分布式控制则赋予各皮带机一定的自主决策能力，同时通过通信网络相互协作，共同完成运输任务。两种策略各有优势，可根据实际工况灵活选择。（3）多机协同控制技术具备强大的故障处理能力。当某台皮带机出现故障时，系统能够迅速调整其他皮带机的运行状态，重新分配运输任务，确保整个运输系统的连续运行。同时，通过故障诊断与隔离机制，防止故障扩散，提高系统的可靠性和安全性。

2.5 故障预测与健康管理（PHM）

故障预测与健康管理（PHM）技术是保障煤矿井下皮带运输系统稳定运行、降低运维成本的重要手段。（1）PHM技术依托多源数据融合实现精准状态监测。通过在皮带运输系统的关键部位，如电机、减速器、托辊等安装振动传感器、温度传感器、电流传感器等，实时采集设备运行过程中的振动、温度、电流等多维度数据。这些数据经数据采集系统汇总后，利用数据融合算法进行综合分析，全面反映设备的实际运行状态，避免单一传感器数据可能存在的局限性，为后续的故障预测和健康评估提供可靠依据。（2）基于机器学习算法构建故障预测模型。运用深度学习、支持向量机等算法，对历史故障数据和正常运行数据进行深度挖掘，找出设备状态参数与故障之间的潜在关联，建立精准的故障预测模型。该模型能够根据实时监测数据，提前预测设备可能出现的故障类型、发生时间和故障程度，为运维人员提供充足的预警时间，以便提前采取维护措施，避免故障扩大导致系统停机。（3）PHM技术提供科学的健康管理策略。根据设备的健康状态评估结果，制定个性化的

维护计划,实现从传统的定期维护向状态维护的转变。合理安排维护时间和维护内容,提高设备的使用寿命和运行可靠性,降低运维成本,提升整个皮带运输系统的运行效率^[3]。

3 煤矿井下皮带运输系统智能调速技术发展趋势

3.1 深度融合工业互联网

煤矿井下皮带运输系统智能调速技术与工业互联网的深度融合将成为重要趋势。工业互联网凭借其强大的数据连接、汇聚与处理能力,可打破井下设备间的信息孤岛。通过构建统一的工业互联网平台,将皮带运输系统的各类传感器、控制器等设备接入,实现设备状态、运行参数等数据的实时采集与共享。基于这些数据,可开展远程监控与诊断,运维人员能在地面实时掌握井下皮带运行情况,及时发现并处理故障。同时,利用工业互联网的云计算和大数据分析能力,对海量运行数据进行深度挖掘,优化调速策略,实现更精准的负载-速度匹配,进一步提升运输效率,推动煤矿生产向智能化、数字化、网络化方向迈进。

3.2 智能化水平提升

未来,煤矿井下皮带运输系统智能调速技术的智能化水平将持续提升。一方面,智能控制算法将不断优化,引入更先进的机器学习、深度学习算法,使系统具备更强的自主学习和决策能力,能够根据复杂多变的井下工况自动调整调速策略,实现自适应智能调速。另一方面,多传感器融合感知技术将进一步发展,提高对皮带运行状态、煤流量等参数的监测精度和可靠性,为智能决策提供更准确的数据支持。

3.3 绿色节能技术深化

随着环保和节能要求的日益提高,煤矿井下皮带运输系统智能调速技术的绿色节能特性将不断深化。在调速策略上,将更加注重根据实际负载动态调整电机转速,避免电机长时间处于高能耗运行状态,降低电能消耗。同时,采用高效节能的电机和变频器等设备,提高能源转换效率。此外,还将加强对余热回收利用等技术

的研发与应用,将皮带运输系统运行过程中产生的余热进行回收,用于井下供暖或其他生产环节,实现能源的循环利用。

3.4 安全可靠性能增强

安全可靠是煤矿生产的首要要求,井下皮带运输系统智能调速技术的安全可靠性将不断增强。在硬件方面,将采用更高可靠性、抗干扰能力强的设备,确保在恶劣的井下环境中稳定运行。同时,加强设备的冗余设计,当部分设备出现故障时,系统能自动切换至备用设备,保障运输系统的连续运行。在软件方面,不断完善故障预测与健康诊断(PHM)技术,通过实时监测设备运行状态和参数,提前预测潜在故障,及时发出预警并采取相应措施,避免故障扩大引发安全事故^[4]。

结束语

煤矿井下皮带运输系统智能调速技术的研究,是顺应矿业智能化发展趋势的关键探索。通过高精度煤流量监测技术精准感知煤流变化,动态调速执行机构实现快速精准响应,数字孪生与可视化平台提供直观决策支持,多技术协同让皮带运输系统具备自主调节能力。这不仅提升了运输效率、降低了能耗与设备损耗,更增强了系统运行的稳定性与安全性。未来,随着技术持续创新,智能调速技术将进一步完善,为煤矿高效、绿色、安全生产提供更有保障,推动矿业行业迈向更高水平的智能化新阶段。

参考文献

- [1]吕元杰.基于嵌入式技术的煤矿顺槽带式输送机智能控制方法[J].煤矿机械,2021,42(12):176-179.
- [2]武杰杰.带式输送机智能调控系统的研究[J].机械管理开发,2021,36(10):254-255.
- [3]陈玉珊.矿用带式输送机节能优化智能控制系统研究[J].煤炭与化工,2021,44(9):71-73.
- [4]路倩倩.综采工作面智能运输系统的研究[J].能源与节能,2021(6):154-155;201.