

煤矿皮带运输系统电气自动化与智能监控技术应用

杨宇锋

陕西华电榆横煤电有限责任公司 陕西 榆林 719000

摘要：作为煤矿生产系统的“主动脉”，皮带运输系统承担着煤炭从采掘工作面到地面储运环节的连续、高效输送任务，其运行的稳定性、安全性和经济性直接决定了整个矿井的生产效能。面对传统人工巡检模式效率低下、安全隐患突出、能耗居高不下的困境，将先进的电气自动化与智能监控技术深度融合，已成为推动煤矿智能化转型升级的核心路径。本文旨在系统阐述煤矿皮带运输系统在电气自动化控制方面的关键技术架构，并深入探讨以人工智能、物联网、大数据为代表的智能监控技术在皮带异常状态识别、预测性维护及能效优化等领域的创新应用。文章进一步剖析了当前技术融合过程中面临的数据孤岛、算法泛化能力不足及系统可靠性等挑战，并提出了构建统一数据平台、发展多模态融合感知、强化边缘-云协同计算等前瞻性对策，以期构建更加安全、高效、绿色的现代化煤矿皮带运输体系提供理论参考与技术指引。

关键词：煤矿；皮带运输系统；电气自动化；智能监控；人工智能

引言

煤炭在我国能源结构中长期占据主体地位，其安全高效开采是保障国家能源安全的战略基石。在煤矿井下复杂的生产环境中，皮带运输系统以其运量大、距离长、连续性强的优势，成为连接采、掘、运各环节不可或缺的生命线。然而，该系统常年处于高粉尘、高湿度、强电磁干扰的恶劣工况下，加之运行负荷波动剧烈，极易发生诸如皮带跑偏、撕裂、打滑、堆煤、火灾等故障。传统的运维模式高度依赖人工经验，不仅响应滞后、漏检率高，且将人员置于高风险作业环境中，已难以满足现代煤矿对本质安全和精益管理的严苛要求。近年来，随着《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》等国家政策的强力驱动，以及工业互联网、人工智能等新一代信息技术的迅猛发展，煤矿皮带运输系统的智能化升级迎来了前所未有的历史机遇。通过构建集成了先进电气自动化控制与智能视频分析、多源传感融合的综合监控体系，能够实现对皮带运行状态的全天候、全方位、全要素感知，从而将安全管理从“被动响应”推向“主动预防”，将生产运营从“经验驱动”转向“数据驱动”。本文将聚焦于这一技术变革的核心，系统梳理其技术脉络、应用场景与未来发展方向。

1 煤矿皮带运输系统电气自动化控制技术体系

电气自动化是皮带运输系统智能化的物理基础和执行中枢，其核心目标是实现对设备的精准、可靠、高效控制。

1.1 核心控制架构与硬件平台

现代煤矿皮带运输系统的自动化控制普遍采用“集

中管理、分散控制”的分布式架构。其硬件平台通常以可编程逻辑控制器（PLC）为核心，构成现场级的控制单元。PLC凭借其高可靠性、强抗干扰能力和灵活的编程特性，能够实时采集来自各类传感器（如速度、温度、烟雾、跑偏、拉绳开关等）的状态信号，并根据预设的逻辑程序，对驱动电机、制动器、张紧装置等执行机构进行精确控制^[1]。在系统层面，多台PLC通过工业以太网或现场总线（如PROFIBUS、CANopen）互联，并上联至地面中央控制室的监控主机（SCADA系统），实现对整条乃至全矿皮带网络的远程集中监视与调度。这种分层架构既保证了现场控制的快速响应，又实现了全局资源的优化配置。

1.2 关键驱动与调速技术

驱动系统是皮带运输的动力源泉。针对大功率、长距离皮带机启动时对电网的巨大冲击和机械应力，软启动技术（如变频软启动、液力耦合器软启动）被广泛应用。其中，基于变频器的交流变频调速技术因其优异的调速性能、显著的节能效果和完善的保护功能，已成为主流选择。通过调节电机输入电源的频率和电压，变频器可以实现皮带从零速到额定速度的平滑无冲击启动，并能在运行过程中根据实际煤流负载动态调整转速，有效避免“大马拉小车”的能源浪费现象，实现按需供能。最新的研究与应用表明，结合AI煤流检测装置，变频调速系统能够依据皮带上实时的煤流量分级输出，驱动皮带在空载、低流量、中流量、高流量等不同工况下自动匹配最优转速，从而将能效优化推向极致。

1.3 安全保护与连锁控制逻辑

安全是皮带自动化控制的首要考量。一套完备的自动化系统集成多层次的安全保护机制。除了前述的各类传感器外,系统还内置了严密的连锁控制逻辑。例如,当任一保护传感器(如烟雾、超温、严重跑偏)触发报警时,系统会立即发出声光警报,并根据故障等级自动执行降速、停机等操作。同时,多级皮带之间通常设置逆煤流方向的连锁启动和顺煤流方向的连锁停机逻辑,确保物料有序流动,防止堆煤事故发生。此外,系统还具备完善的故障自诊断功能,能够记录故障发生的时间、类型和相关参数,为后续的故障分析和处理提供数据支持。这种由硬件保护与软件逻辑共同构筑的安全防线,是保障皮带系统连续稳定运行的根本。

2 智能监控技术在皮带运输系统中的深度应用

如果说电气自动化解了“如何控制”的问题,那么智能监控技术则致力于回答“发生了什么”和“将会发生什么”,为决策提供智能支撑。

2.1 基于计算机视觉的异常状态智能识别

这是当前智能监控领域最具突破性的应用。通过在皮带沿线关键位置部署高清、防爆的AI摄像机,结合深度学习算法(如卷积神经网络CNN、YOLO系列目标检测模型),系统能够对皮带运行画面进行实时分析,自动识别多种异常状态^[2]。这包括皮带本体的纵向撕裂、横向断裂、表面磨损等损伤;运行状态的跑偏、托辊卡死或缺失、皮带打滑等故障;物料的异常,如大块矸石、金属异物(锚杆、铁器)、堆煤堵塞等;以及环境安全的早期征兆,如明火、烟雾等。与传统视频监控仅提供“事后追溯”不同,AI视觉技术实现了“事前预警”和“事中干预”,一旦识别到异常,系统可立即触发声光报警、推送告警信息至相关人员移动终端,并可联动自动化控制系统执行紧急停机等操作,将事故扼杀在萌芽状态。尽管在井下低光照、高粉尘等复杂环境下,算法的鲁棒性仍面临挑战,但通过引入红外热成像、多光谱融合等技术,其识别精度和适应性正在不断提升。

2.2 多源传感融合与设备健康状态评估

单一的视觉信息有时不足以全面反映设备的健康状况。因此,智能监控系统正朝着多源传感融合的方向发展。通过将视觉数据与振动、声音、温度、电流、张力等多种物理量传感器的数据进行时空同步与特征级融合,可以构建更为精准的设备数字孪生模型。利用机器学习算法(如支持向量机SVM、随机森林)对这些多维数据进行分析,能够对减速机、电机、滚筒轴承等关键部件的健康状态进行量化评估,判断其是否存在磨损、松动、润滑不良等潜在故障。在此基础上,系统可以生

成设备健康指数,并预测其剩余使用寿命,从而为预测性维护提供科学依据。研究表明,基于数字孪生的预测性维护系统可提前数天甚至数周预警设备故障,大幅减少非计划停机时间,并优化备件库存管理。

2.3 数据驱动的能效优化与智能调度

皮带运输是煤矿的用电大户,其能效优化潜力巨大。智能监控系统通过持续采集和分析皮带的速度、载荷、电机功率等运行数据,可以构建精细化的能耗模型。在此基础上,系统能够实现智能调速,即根据上游给煤机的实时出煤量,动态调整皮带运行速度,始终保持在最优能效区间。对于由多条皮带组成的复杂运输网络,还可以利用优化算法(如遗传算法、强化学习)进行全局调度,协调各皮带的启停和速度,避免空载、轻载运行,最大限度地降低整体能耗,实现绿色低碳生产。这种从“恒速运行”到“按需供能”的转变,不仅是技术上的进步,更是管理理念的革新。

3 技术融合面临的挑战与优化路径

尽管前景广阔,但电气自动化与智能监控技术的深度融合仍面临一系列技术和管理上的挑战。

3.1 数据壁垒与信息孤岛问题

在许多煤矿,自动化控制系统(OT)与智能监控系统(IT)往往由不同厂商建设,采用不同的通信协议和数据格式,导致数据无法互通,形成了典型的信息孤岛。这严重制约了跨系统数据融合分析的价值挖掘。解决之道在于推动建立统一的数据标准和开放的通信接口,构建覆盖“云-边-端”的一体化数据平台,实现OT与IT数据的无缝集成与共享^[3]。具体而言,可以在IT与OT网络之间设立工业隔离区(iDMZ),部署工业防火墙和数据代理,对双向数据流进行严格的协议过滤和内容检查,既保障了OT网络的独立性与安全性,又打通了数据流通的渠道。

3.2 智能算法的泛化能力与鲁棒性

井下环境复杂多变,光照条件差、粉尘遮挡、水汽凝结等因素都会严重影响视觉算法的识别精度。目前许多AI模型在特定场景下表现良好,但在面对新的、未见过的工况时,其泛化能力不足。为此,需要采集更丰富、更多样化的井下图像数据集进行模型训练,并研发更具鲁棒性的算法。例如,可以结合红外热成像来弥补可见光在黑暗或烟雾环境中的不足,或者利用小样本学习、迁移学习等技术,使模型能够快速适应新场景。此外,将AI算法下沉至边缘计算节点,在靠近数据源头的地方进行实时处理,不仅能降低网络带宽压力,还能提升响应速度,这对于需要毫秒级响应的安全关键应用尤

为重要。

3.3 系统可靠性与网络安全

智能化系统高度依赖网络和计算资源，其自身的可靠性至关重要。必须采用高可靠性的工业级硬件，并设计冗余架构（如双PLC、双网络）以应对单点故障。同时，随着系统联网程度加深，网络安全风险也随之增加。必须部署严格的网络安全防护措施，遵循“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的原则。这包括在OT网络边界部署专用的工业防火墙，对Modbus、OPC UA等工业协议进行深度包检测；对所有接入设备进行身份认证和访问控制；定期进行安全漏洞扫描和渗透测试^[4]。只有构建起纵深防御的安全体系，才能确保智能化系统在享受互联互通便利的同时，免受外部网络攻击，保障煤矿生产安全。

4 未来发展趋势与展望

展望未来，煤矿皮带运输系统的智能化将沿着以下方向持续演进：

4.1 构建“感知-决策-执行”一体化闭环

未来的系统将不再是简单的监控与控制分离，而是形成一个紧密耦合的智能闭环。前端的多模态感知单元（视觉、声音、振动等）将实时采集数据，边缘计算节点进行初步分析和快速响应，同时将关键数据上传至云端进行深度学习和全局优化。云端的智能决策引擎将生成最优的控制指令，再下发至底层自动化系统执行，真正实现“感知即决策，决策即行动”的自主运行模式。这种闭环架构将极大提升系统的自适应能力和运行效率。

4.2 预测性维护向健康管理（PHM）升级

预测性维护将从对单一设备故障的预测，扩展到对整个皮带运输系统健康状态的全面管理（Prognostics and Health Management, PHM）。通过构建涵盖机械、电气、控制等多学科的综合健康评估模型，系统不仅能预测故障，还能评估剩余使用寿命、推荐最优维修策略、模拟不同运维方案的效果，为设备全生命周期管理提供决策支持。数字孪生技术将在其中扮演核心角色，通过在虚

拟空间中对物理设备进行镜像仿真，实现对设备状态的透明化管理和前瞻性干预。

4.3 无人化与少人化作业的全面实现

随着智能监控与自动化控制技术的日益成熟，皮带运输巷道将逐步实现常态化无人值守。人员的主要职责将从繁重的现场巡检，转变为在集控中心对系统运行状态进行监督、对告警信息进行研判和对异常工况进行远程干预。这不仅极大地改善了员工的工作环境，降低了安全风险，也标志着煤矿生产方式向更高层次的智能化、现代化迈进。最终，这条井下的“智能主动脉”将成为智慧矿山不可或缺的神经中枢，为我国煤炭工业的高质量、可持续发展注入源源不断的强劲动力。

5 结语

煤矿皮带运输系统的电气自动化与智能监控技术的深度融合，是一场深刻的生产力变革。它不仅是解决当前安全生产痛点的有效手段，更是引领煤矿行业迈向高质量发展的核心驱动力。通过构建以PLC为核心的可靠自动化控制底座，嫁接以AI视觉和多源传感为耳目的智能监控体系，并着力破解数据孤岛、算法鲁棒性、系统可靠性等关键瓶颈，我们能够打造出一个集“本质安全、高效运行、绿色节能”于一体的现代化皮带运输系统。未来，随着技术的不断迭代与创新，这条井下的“智能主动脉”必将为我国煤炭工业的转型升级和可持续发展注入源源不断的强劲动力。

参考文献

- [1]张振国,李昀轩,满乐.自动化控制在煤矿井下皮带运输系统中的应用实践[J].设备监理,2024,(2):47-50.
- [2]李伟榕.煤矿皮带机运输系统的智能调速节能控制策略[J].今日制造与升级,2025,(8):140-142.
- [3]王凯,冯珂,冯强.煤矿主副井皮带运输机供电系统可靠性提升研究[J].今日制造与升级,2026,(2):107-109.
- [4]陈勇丞,李海潇,张晓剑.煤矿主皮带运输系统中变频调控的应用[J].内蒙古煤炭经济,2025,(7):172-174.