

煤矿主运皮带机电设备在线监测与智能运维管理研究

全 鑫

内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘 要: 煤矿主运输皮带机是矿井生产核心装备,其机电设备可靠性直接关乎安全生产与经济效益。针对传统人工巡检存在监测滞后、数据孤岛、维护决策粗放等问题,本文系统研究了主运皮带机电设备在线监测与智能运维管理体系架构。从故障机理分析出发,构建了传感器层、数据传输层、诊断层及运维决策层四层技术架构,重点探讨多源信号融合特征提取、深度学习故障诊断模型及数据驱动的健康管理与预测性维护策略。该体系可实现设备状态实时感知、故障早期预警和维护策略优化,为煤矿主运输系统智能化转型升级提供技术支撑。

关键词: 煤矿主运输皮带机;在线监测;智能运维;故障诊断;预测性维护

引言: 煤矿主运输皮带机承担井下原煤提升转运任务,其机电装备长期处于高负荷连续运转工况,加之井下潮湿多尘腐蚀性较强,设备劣化速度显著加快。近年来,物联网、大数据及人工智能技术发展为煤矿机电设备在线监测与智能运维提供了新的技术路径。基于煤矿实际生产条件,系统探讨主运皮带机电设备在线监测系统构建方案及智能运维管理关键算法,以期提升设备运行可靠性、降低非计划停机频次提供系统性理论支撑。

1 煤矿主运皮带机电设备概况与故障特征分析

1.1 系统组成与运行特点

煤矿主运皮带机通常采用长距离、大运量、高带速的布置形式,其机电系统主要包括以下组成部分:(1)驱动单元,由高压电动机、液力耦合器或永磁同步电机、减速器等构成,为胶带运行提供动力;(2)传动单元,包括驱动滚筒、改向滚筒及各类托辊,承担动力传递与胶带支撑功能;(3)输送单元,即多层钢丝绳芯胶带,为原煤承载与运输的载体;(4)控制与保护单元,包括控制系统、各类保护开关(跑偏、打滑、超温、烟雾、急停等)及视频监控装置。

主运皮带机的运行具有以下显著特点:一是连续作业时间长,通常每日运行 20 小时以上,停机检修窗口极为有限;二是载荷波动剧烈,原煤运输量随采煤工作面出煤量变化而大幅起伏,导致电机电流、转矩等参数动态范围宽;三是工况环境恶劣,井下空气湿度常达 90% 以上,煤尘浓度高,设备腐蚀与磨损问题突出;四是设备耦合度高,单一部件故障可能引发连锁反应,例如滚筒轴承温升超限若未能及时处理,可能导致胶带纵向撕

裂等重大事故^[1]。

1.2 关键机电设备典型故障模式

主运皮带机电设备故障演化具渐进性与突发性并存特征,各类设备呈现差异化劣化规律。驱动电机主要故障包括定子绕组绝缘老化致匝间短路、转子断条及轴承磨损。绝缘老化受温度、湿度、电压波动及振动等多因素耦合影响,演化周期数百至数千小时,局部放电特征参量随老化程度呈指数增长。转子断条因铸造缺陷或长期过载引起,定子电流频谱中出现特定边频分量,为电流特征诊断提供物理基础。减速器齿轮故障包括齿面磨损、点蚀、胶合及断齿等,振动信号在啮合频率及其倍频处呈现边带调制,边带疏密与故障严重程度对应;轴承故障根据损伤部位不同,在包络解调谱中表现各异特征频率族。滚筒与托辊故障以轴承磨损、筒体开裂及胶面磨损为主,托辊早期故障表现为旋转阻力增大和异响,若未及时识别将加速胶带磨损。胶带故障包括钢丝绳芯疲劳断裂、接头抽动及纵向撕裂,纵向撕裂将造成数千万元损失,其早期征兆识别是监测系统核心关切。

1.3 现有运维管理模式及局限性

目前多数煤矿对主运皮带机电设备采用周期性预防检修和事后故障维修为主的混合管理模式,设备点检依靠专职巡检工按规定路线进行人工观察、听音、测温及仪器检测,维护决策主要依据运行累计时长和经验判断。该模式存在三方面固有局限。第一,状态感知稀疏:人工巡检间隔通常为 4 至 8 小时,无法覆盖两次巡检间的突发故障,更难以捕捉设备劣化的连续变化轨迹^[2]。第二,数据利用浅层化:现有传感器采集的数据多用于就地显示或单点阈值报警,不同监测参量间的关

联性未被挖掘,形成大量“数据孤岛”。第三,维护决策粗放:检修计划基本依赖设备铭牌寿命和累计时长,未充分考虑设备实际健康状态的个体差异,导致“过剩维修”与“失修”并存,既增加维护成本又未能有效降低突发故障风险。仅靠单点阈值报警和人工经验判断已难以满足现代化矿井要求,亟需建立集实时监测、智能诊断与预测性维护于一体的综合运维管理体系。

2 在线监测与智能运维体系架构设计

2.1 系统总体架构

针对煤矿主运皮带机电设备种类多、测点分散、通信条件受限等特点,本文设计了四层分布式系统架构,自下而上为传感器感知层、数据采集与传输层、数据处理与诊断层、智能运维决策层。感知层部署于各关键测点,包括振动、温度、电流电压、声纹、油液磨粒及胶带纵向撕裂等传感器,实现多维多模感知。采集传输层以矿用本安型采集站为核心,完成信号调理、模数转换及边缘端初步特征提取,通过工业以太环网上传至地面数据中心。诊断层部署于地面服务器或云平台,负责多源数据融合、特征工程、故障诊断推理及健康状态评估。决策层面向运维人员,提供设备状态全景看板、故障预警推送、检修工单生成及维护策略优化等功能。架构遵循本质安全(井下设备全部本安或隔爆)、分层解耦(标准化接口交互)及边缘智能(实时分析在边缘端完成,降低带宽压力)三原则。

2.2 多源传感器布点策略与数据融合

传感器布点直接影响监测系统信息完备性与建设成本,本文基于故障模式分析与有限元仿真,提出面向关键故障覆盖率最大化的优化布点策略。驱动电机侧配置振动传感器(驱动端和非驱动端各三向加速度计)、绕组测温热电偶及电流互感器;减速器侧在各传动轴承座布置振动和温度传感器,油池内安装油液磨粒监测及油温传感器;滚筒轴承座每处布置双轴振动传感器和铂电阻温度计;胶带监测采用分布式光纤应变传感结合线扫描激光雷达,实现接头位移和纵向撕裂征兆连续监测^[2]。针对多源数据异构性,采用时间对齐与空间配准预处理,将各类数据统一至相同时间基准和采样率后,提取时域统计特征(均方根、峰值因子、峭度、偏度等)、频域特征(各频段能量占比、边带成分等)及时频域特征(小波包分解系数),形成多维特征矩阵作为诊断模型输入^[3]。

2.3 数据通信与边缘计算平台

井下至地面的数据传输面临带宽有限、电磁干扰强

等约束。系统采用工业以太网环网作为主干通信网络,关键位置配置 5G 无线通信模块以满足移动巡检设备的数据回传需求。在边缘端,基于嵌入式 GPU 计算平台部署轻量化特征提取和异常检测模型,实现振动波形的实时分析、特征参数在线计算及超限事件的就地报警。边缘端异常检测采用隔离森林算法,以极低计算开销实现多维特征空间的离群点识别,检出异常后才将原始波形和特征数据上传至地面,数据压缩比达到 50:1 以上,有效节约了传输带宽。

3 关键算法与模型研究

3.1 基于深度学习的故障诊断方法

主运皮带机电设备故障诊断的核心任务是从高维、非平稳监测信号中准确识别故障类型并评估严重程度。本文构建了基于改进卷积神经网络(CNN)与门控循环单元(GRU)的端到端故障诊断模型。该模型以多通道振动信号和一维电流信号的短时傅里叶变换谱图作为输入,利用 CNN 模块自动提取局部时频特征,GRU 模块捕捉特征在时间维度上的长程依赖关系,最终通过全连接层和 Softmax 分类器输出各类故障的概率分布。针对煤矿场景中故障样本稀缺的问题,引入条件变分自编码器(CVAE)进行数据增强,在生成对抗训练框架下扩增故障样本,有效缓解了模型训练中的数据不平衡问题。模型训练完成后,通过 TensorRT 优化并部署至边缘计算平台,单次推理延时控制在 50ms 以内。在模拟实验台上对电机轴承内圈故障、外圈故障、齿轮断齿、齿面磨损等典型故障模式的识别准确率达到 96.7%,显著优于传统支持向量机方法的 82.3%。

3.2 设备健康度评估与剩余寿命预测

健康度评估旨在将多维监测参量映射为一个直观表征设备整体技术状态的量化指标。本文采用改进的 TOPSIS 方法,以设备初始完好状态为理想解,以故障临界状态为负理想解,综合振动烈度、温度裕度、电流不平衡度及油液金属颗粒浓度等指标计算相对健康度 $H \in [0,1]$,其值越接近 1 表示设备状态越接近完好。

剩余寿命预测采用基于注意力机制的双向长短期记忆网络(Bi-LSTM-Attention)模型。该模型以历史健康度序列和设备累计运行时长、载荷统计特征作为输入,输出为设备剩余可用时间的概率分布(以区间估计形式给出)。模型训练采用多任务学习策略,同时优化回归精度和置信区间覆盖率。现场历史数据回测表明,对于减速器轴承,模型在剩余寿命 50 小时以内的预测平均绝对误差为 6.2 小时,预测精度满足工程应用需求。

3.3 基于知识图谱的故障根因分析

当监测系统发出故障预警后,快速定位故障原因和影响范围是运维决策的关键环节。本文构建了煤矿主运皮带机故障知识图谱,以设备部件为实体节点,以故障传播关系为边,将故障模式、表征信号特征、可能诱因、处置措施等知识以三元组形式结构化存储。图谱的构建融合了设备设计手册、故障案例库和专家经验三方面知识来源。当实时诊断输出某类故障信号时,系统通过图谱推理引擎自动检索匹配的故障模式节点,沿传播路径给出故障源定位和处置建议序列,并计算各项处置措施的置信度评分^[4]。该模块有效缩短了故障排查时间,经现场验证,典型故障的定位时间由人工平均 45 分钟缩短至系统辅助下的 8 分钟以内。

4 智能运维管理策略与实现

4.1 预测性维护决策机制

在获取设备实时健康状态和剩余寿命预测结果的基础上,本文提出了基于风险等级的预测性维护决策机制。将设备健康度 H 、故障后果严重度 C 和预测剩余寿命 L 三个维度综合考量,构建维护优先级指数 $P = w_1(1-H) + w_2C + w_3 \cdot \exp(-L/T_0)$,其中 w_1 、 w_2 、 w_3 为权重系数, T_0 为设备典型维修周期。 P 值越高,表明设备维护需求越紧迫。系统根据 P 值将维护需求划分为绿(正常)、黄(关注)、橙(预警)、红(紧急)四个等级,并自动生成差异化的处置策略:绿色等级仅需继续监测;黄色等级纳入月度检修计划;橙色等级要求在 72 小时内安排针对性检查;红色等级触发立即停机处置程序。同时,系统结合矿井生产计划自动优化检修窗口安排,尽量将必要停机检修安排在生产低谷时段,减少对产量的影响。

4.2 运维知识库与专家系统

运维知识库是智能运维系统持续进化的核心资产。本文构建了包含设备台账信息、历史故障案例、维修记录、备件消耗数据及操作规程文档的结构化知识库,采用图数据库存储以便于关系检索和推理。在此基础上开发了基于规则推理与案例推理混合驱动的专家系统模块,当新的监测数据触发异常判定时,系统先通过基于规则的推理引擎执行确定性诊断逻辑(如轴承特征频率匹配等),对于规则无法覆盖的模糊案例,则调用基于案例的推理引擎检索历史相似案例,输出参考处置方案^[5]。知识库具备在线学习能力——每次故障处理完成

后,经工程师确认的最终诊断结论和处置方案会以新案例形式入库,使系统知识不断丰富和迭代。

4.3 系统集成与工程应用

该系统已在某千万吨级矿井的主斜井皮带机(带长 3.2km,带宽 1.4m,驱动功率 $3 \times 800\text{kW}$)上完成部署试运行。系统部署后共采集有效监测数据逾 1.2TB,累计发出各级预警 47 次,其中橙色及以上预警 9 次。预警事件中,系统成功提前识别了 2 起减速器输入轴轴承早期点蚀、1 起电机定子绕组绝缘劣化、3 起滚筒轴承润滑失效及多起托辊卡滞案例,经停机解体检查验证,诊断准确率达到 88.9%。以电机定子绝缘劣化预警为例,系统提前约 120 小时发出橙色预警,为矿方安排计划性停机更换赢得了充足时间,避免了突发停机造成的约 500 万元生产损失。

结束语

本文针对煤矿主运皮带机电设备运维需求,研究了在线监测与智能运维体系设计方法与关键技术,构建了从传感器布设、数据采集传输、故障诊断到预测性维护的完整技术链条。提出了融合深度学习的故障识别算法、Bi-LSTM-Attention 剩余寿命预测模型及知识图谱根因分析方法,形成“感知—诊断—预测—决策”闭环优化模式。工程应用表明,该系统显著提升了状态感知实时性与故障预警准确性,有效支撑了计划维修向预测性维护转型。后续将重点研究极端工况下传感器信号稳定性增强、小样本模型迁移学习及数字孪生虚拟运维仿真平台开发,进一步提升系统泛化能力与工程适应性。

参考文献

- [1] 安有法. 煤矿带式输送机故障诊断技术研究 [J]. 煤炭新视界, 2025(1): 254-255.
- [2] 乔圣皓. 煤矿带式输送机故障诊断技术现状与发展趋势研究 [J]. 煤炭新视界, 2025(2): 250-252.
- [3] 毋韶杰. 煤矿带式输送机运行故障诊断技术研究 [J]. 西部探矿工程, 2025, 37(12): 83-85.
- [4] 包晓波, 蔡峰, 杨扬, 等. 煤矿智能化标准体系建设与应用——以中国中煤能源集团为例 [J]. 中国煤炭, 2025, 51(7): 113-123.
- [5] 自健华, 袁逸萍, 肖鹿, 等. 基于数字孪生的矿用带式输送机智能监测平台研究与实现 [J]. 机床与液压, 2026, 54(10): 211-220.