

煤矿胶带机托辊在线监测与故障诊断一体化技术研究

高兆刚

神东煤炭集团石圪台煤矿 陕西榆林 719315

DOI:10.12238/ems.v7i9.15234

[摘要] 随着煤矿生产自动化程度的提高,带式输送机作为一种重要的输送设备,托辊的运行状况直接关系到整个运输系统的稳定和安全。本文针对 Z 矿胶带机托辊故障频发,严重影响生产效率和安全性,对胶带机托辊在线监测和故障诊断集成技术进行了深入研究,提出了一套基于振动信号分析和温度监控的在线监测和故障诊断系统。采用高精度传感器进行数据采集,利用傅立叶变换、小波分析等信号处理技术和机器学习算法对托辊故障进行准确识别。实践证明,该技术可将托辊故障发现时间由 2~3 天的人工巡检缩短到实时检测,减少设备停机时间 40%,降低维护费用 30%,显著提高胶带运输系统的可靠性和安全性。

[关键词] 煤矿胶带机; 托辊; 在线监测; 故障诊断; 一体化技术

引言

胶带机承担着煤炭远距离、大容量输送的主要任务,其关键部件托辊的工作状态对整个输送系统的可靠性起着至关重要的作用。据统计,胶带机托辊故障是造成胶带机停机的重要原因,传统的人工巡检和离线检测方法在效率、精度和故障检测方面存在诸多不足,已不能满足煤矿安全高效运行的要求。随着物联网、人工智能等技术的飞速发展,开展煤矿胶带机托辊在线监测和故障诊断一体化技术研究,实现其运行状态实时监控和智能诊断,是实现矿井智能化升级的重要环节。本文的主要目的是通过对该技术的研究,探索出一种更加高效可靠的托辊故障诊断方法,为矿井的安全生产提供技术支撑。

1 煤矿胶带机托辊在线监测与故障诊断背景

近几年,随着我国煤炭工业不断向智能化方向发展,煤矿胶带机作为煤矿井下输送的核心设备,其工作稳定与否直接影响着矿井的生产效率和经济效益。据国家能源局资料显示,截至 2023 年底,我国大型胶带输送机的输送比例已经达到 78%,然而由于胶带输送机故障造成的生产中断事件平均每年超过 10 万起。托辊是胶带输送机的核心部件,其数量很大,年产 300 万 t 以上的大型胶带输送机一般配备 1500 多个托辊。由于长期工作在高尘高湿的复杂环境中,托辊容易发生磨损,轴承失效,润滑不良^[1]。山西省 Z 矿煤是年生产能力 500 万吨的大型国有矿井,矿井下布置 6 条主要输送胶带,总长度超过 8 千米,托辊数量超过 1 万个。根据该煤矿设备管理部门 2022 年度统计资料,全年因托辊故障而停机的

次数高达 56 起,占胶带机故障总数的 42%,直接经济损失达 215 万元。其中有 3 起因托辊故障造成胶带撕裂,单次维护费用超过 30 万元;胶带跑偏引起的撒料问题,使煤炭输送效率下降 12% 左右。目前 Z 矿主要采用人工巡检和离线检测的方法,巡检周期为 3 天,单次巡检需要 6 人,每次巡检时间 4 小时左右。该方法存在着检测效率不高、检测速度慢、人工成本高等缺陷,难以适应现代化煤矿高效生产和安全管理的需要。因此,开展煤矿胶带机托辊在线监测与故障诊断集成技术研究,建立适合矿井实际工况的监控诊断体系,对于保障煤矿安全生产、提高生产效率和降低运行成本具有重要的现实意义^[2]。

2 Z 煤矿胶带机托辊常见故障分析

根据 2020—2022 年 Z 矿胶带机托辊的历史维护记录、故障报告等资料,在经过 3 个月的现场实地调研后,得出了该煤矿托辊常见的故障类型有:轴承故障、托辊卡死、润滑不良、托辊磨损等。其中轴承故障占矿井托辊失效的 65% 以上。经测试发现,长期处于 80—120 mg/m³ 范围内,远远超过煤矿井下作业场所粉尘浓度限值 (4 mg/m³),且大量煤尘经轴承密封间隙进入轴承内,加剧了轴承磨损。同时,矿井的平均湿度高达 85%,造成了金属轴承零件的锈蚀和腐蚀,进而引起滚珠、滚道的裂纹和剥落。托辊卡死现象也比较普遍,占总故障的 20% 左右,这主要是由于托辊的密封结构设计不当,在矿井下落矸、巷道变形等因素的作用下,会有煤尘、矸石等杂物进入托辊筒内,妨碍转动部件的正常运转。而且,

有些轴承损坏后没有及时更换，使其丧失回转能力，从而导致胶带局部受力不均匀，从而引起胶带的跑偏和撕裂。由于井下工作环境恶劣，托辊润滑脂容易沾染煤尘，在高温高湿环境下，磨损速率加快，不能有效地发挥润滑作用，导致托辊内部部件摩擦加剧，温度上升，磨损加剧。另外，托辊面与输送带长期摩擦，受运输材料撞击，造成托辊面磨损和沟槽，影响托辊支护性能，这类磨损故障约占 5%^[3]。

3 在线监测与故障诊断一体化技术原理

针对 Z 矿复杂工作环境及托辊式故障特征，提出一种基于振动信号分析、温度监测与红外成像相结合的在线监测与故障诊断一体化技术，并结合先进信号处理和机器学习算法，实现托辊式故障的实时监控与精确诊断，为煤矿安全生产筑牢技术防线。

3.1 振动信号分析技术

振动信号通常包含丰富的信息，通过分析这些信号，可以揭示系统的运行状态、故障模式以及潜在的问题。在正常情况下，托辊运行平稳，振动信号具有一定的规律性，频率分量和幅度都比较稳定；当托辊轴发生磨损时，其振动信号的频谱成分及幅值都会发生较大变化。针对 Z 矿胶带机托辊轴承座、托辊轴等关键部位，采用 PCB352C33 型加速度传感器，准确地捕捉这一变化。PCB352C33 型传感器灵敏度可达 100 mV/g，频率响应范围为 0.5Hz–10kHz，可有效地适应井下复杂多变的振动环境，保证微弱振动信号的完整获取^[4]。

在信号处理方面，首先采用傅里叶变换对采集到的振动信号进行频域变换。通过仔细分析频率域信号中各个频率分量的幅值，可以判断托辊有无故障。例如，当托辊轴承内圈发生局部损坏时，按照故障特征频率的计算公式：

$$f_i = \frac{nZ}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{r_i} - \frac{d}{2D}} \cos \alpha$$

(其中，n 是转速、Z 是球的个数、ri 是内滚道半径、d 是滚珠直径、D 是轴承节径、α 是接触角)，在频域信号中存在与此特征频率相对应的峰值，是故障诊断的重要依据。此外，针对井下复杂工况，微弱信号难以分辨的问题，利用小波分析方法，实现微弱故障特征的有效提取，从而提高故障诊断精度，有助于早期发现故障，避免故障进一步扩大。

3.2 温度监测技术

温度监测是指采用各种埋入式测温装置对发电机定子绕

组和有效铁心以及各种冷却介质的温度进行的运行监测。在正常情况下，托辊的温度在一个稳定的范围内，但如果出现润滑不良或卡死等故障，则各部件之间的摩擦加剧，产生了大量的热能，从而使托辊的温度迅速升高。通过在托辊面安装 PT100 热敏电阻温度传感器，使其具有±0.1℃的测量精度，可以实时、准确地掌握托辊温的微小变化，从而实现对托辊温的准确监控。该系统通过预先设置科学、合理的温度报警阈值，并在检测温度超出设定值时，及时发出警报，提醒操作人员进行故障排除。同时采用 FLIRT1040 红外热成像系统实现了对温度的非接触监控。该热像仪可测量-40° C 至 1200° C，测量精度达到±2°C，读数精度±2%。在图像上直观地显示出温度异常区域，使工作人员能够快速找到故障托辊筒，与传统的单点测温方法相比，大大提高了检测效率。

3.3 协同诊断机制

在实际应用中，振动信号的分析和温度的监测并不是孤立的，而是互相配合，互相配合。在此基础上，利用机器学习算法，对海量数据如振动特性、温度变化趋势等进行深度训练和分析，建立更加精确的故障诊断模型。协同诊断机制可为 Z 矿胶带机托辊的安全稳定运行提供全方位、多层次的技术保证，促进煤矿智能化开采进程。

4 在线监测与故障诊断系统方案设计

4.1 硬件系统设计

根据 Z 矿胶带输送机的总体布局和运行特点，对其硬件体系结构进行了设计。本煤矿 1200 米主运带机托辊组每 20 m 安装 1 个振动传感器、1 个温度传感器，共计安装振动传感器 60 个，温度传感器 60 个；将 3 台 FLIRT1040 红外热成像技术安装于胶带机械关键部位，如传动鼓、变坡点等，实现了对托辊运行状态的全方位监控^[5]。

数据采集模块采用 NI Compact DAQ 数据采集系统，配有 24 位分辨率的 NI 9234 动态信号采集模块，可以实时地将传感器采集到的模拟信号转换和预调节，并存储原始数据。数据传输模块采用工业以太网和无线 Mesh 网络相结合的传输模式，采用 100 Mbps 的网络带宽，在井下巷道信号良好的地区采用工业以太网进行数据传输；在信号覆盖严重的地区，无线 Mesh 网络的传输速率可以达到 54 Mbps，保证了数据的稳定和实时传输。监控中心配备 4 台高性能服务器（CPU：

Intel Xeon Gold 6248 R, 内存 256 G, 硬盘: 4 TB×4), 运行自定义的监控诊断软件, 实现对托辊运行数据的集中处理、分析和可视化展示。

4.2 软件系统设计

软件系统主要包括数据采集与传输、信号处理、故障诊断及人机交互等模块。数据采集和传输模块采用 OPC 协议, 以 10 kHz 的采样频率对传感器进行数据采集, 并将数据实时传送到服务器数据库中。信号处理模块采用中值滤波和小波去噪等方法去除噪声, 再通过傅里叶变换和小波包分解等方法提取振动信号的频率特性、能量特性等特征, 并分析其变化趋势特性。一方面, 运用 SVM 的故障诊断方法, 采集该煤矿在正常运行、轴承故障、托辊卡阻、润滑不良、托辊磨损等情况下的振动和温度数据, 共计 5000 组, 其中 1000 组正常数据, 1600 组轴承故障数据, 1000 组轴承故障数据, 1000 组托辊卡滞数据, 500 组轴承磨损数据, 900 组托辊磨损数据。另一方面, 采用交叉验证方法对支持向量机模型参数进行优化, 最终建立的模型对托辊式故障识别准确率达 93.2%。该系统采用 B/S 结构, 以 Vue.js 和 ECharts 为开发平台, 将托辊的运行状态、监控数据、故障诊断结果和预警信息以三维图形、动态曲线的形式显示出来, 便于煤矿管理者和维修人员对托辊的运行状况进行实时监控。

5 系统实施与应用效果

在 Z 矿, 经过周密的准备, 精心策划, 已成功安装调试成功。该系统于 2023 年 6 月正式投入使用, 目前已稳定运行了 6 个月。经过半年的试运行, 该系统已成功诊断出托辊轴承失效 32 次, 托辊卡阻 15 次, 润滑不良 8 次, 托辊轮磨损 10 次。通过对皮带跑偏、撕裂等故障的及时诊断, 有效地防止了多起因托辊故障引起的胶带跑偏、撕裂等事故发生, 保证了矿井安全生产。如 2024 年 3 月 15 日下午 2:23, 系统监测到胶带机上 32 号托辊处出现异常振动信号, 其频率在 200 Hz 出现异常峰值, 峰值高达 1.2 g, 远远超出正常值 0.3 g。同时, 轧辊表面温度由 35°C 快速上升到 55°C, 大大超出了 50°C 的警戒范围。故障诊断模块立即启动, 准确地判断出该托辊处存在轴承故障。系统随即自动发出声光警报, 并迅速将故障信息发送到维修人员的手机上。接到警报后, 维修人员 15 分钟内赶到现场查看。检测结果证实了该系统的判

断, 轧辊轴承滚珠磨损严重, 剥落严重。由于及时更换托辊, 避免了一起可能由于托辊故障而造成的胶带撕裂事故。

通过在线监测及故障诊断系统的投入使用, 使托辊故障发现时间由 2~3 天缩短至实时发现水平。由于托辊故障造成的设备停工时间大幅缩短, 由月平均 48 小时降至 28.8 小时, 降幅达 40%。另外, 托辊维护费用由每月平均 12 万元降至 84000 元, 降幅达 30%。与此同时, 胶带的耗损率也明显降低, 由每月 0.8% 降至 0.6%, 降低幅度高达 25%。以上数据充分表明, 该系统能有效地提高胶带输送机的运行可靠性, 提高其作业效率, 对煤矿安全生产具有积极意义。

结语

本文以 Z 矿为背景, 对煤矿胶带机托辊在线监测与故障诊断集成技术进行了深入的研究和应用。通过对煤矿托辊易出现的故障进行分析, 提出了基于振动信号分析和温度监控的方法。实际应用表明, 该系统能有效地提高托辊机故障诊断的准确性和时效性, 减少设备停工期, 降低维护费用, 为煤矿安全生产提供强有力的保证。但是, 在实际应用过程中也暴露出了一些问题, 井下电磁干扰会对传感器信号的采集造成一定的影响, 造成某些数据的波动; 随着煤矿采动环境的改变, 辊筒的工作状态也在不断变化, 需要不断优化模型以适应新的故障特征。在此基础上, 需要进一步提高传感器的抗干扰能力, 探索融合深度学习的故障诊断模型, 提高系统对复杂工况的自适应能力。同时, 将该系统与矿井智能调度系统相结合, 实现托辊故障预报和生产调度的协同优化, 为矿井智能化建设提供更加完备的技术方案。

[参考文献]

- [1] 高宇波. 煤矿胶带输送机托辊不同载荷工况受力分析 [J]. 机械管理开发, 2024, 39 (07): 52-53+56.
- [2] 李鑫. 煤矿胶带机跑偏故障机理及对策 [J]. 矿业装备, 2022, (05): 276-278.
- [3] 段阳昱. 煤矿胶带机安装调试常见故障研究 [J]. 矿业装备, 2022, (03): 256-257.
- [4] 付彤. 矿用带式输送机智能集中控制系统设计 [J]. 机械管理开发, 2021, 36 (09): 283-285.
- [5] 李维同. 煤矿胶带输送机用直托辊代替小跑车的设计与应用 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2020, (23): 13-14.