

矿用运输机、提升机减速器在线油液监测与故障预判技术应用

陈鹏飞¹ 薛永欢²

1. 焦作煤业集团赵固（新乡）能源有限责任公司 河南 新乡 453634

2. 焦作煤业（集团）有限责任公司 河南 焦作 454100

摘要：矿用运输机、提升机减速器是矿井生产的关键传动设备，其运行状态直接影响运输系统的安全与生产效率。传统油液离线检测存在采样滞后、周期长、漏检率高等问题，难以实现早期故障预警。本文分析了减速器典型故障特征与油液监测机理，构建了在线油液监测系统总体架构，阐述了传感器选型与安装的优化方案，建立了故障特征提取与预判模型，形成了从数据采集到故障识别的完整技术链条。在线油液监测技术可实时感知油液状态变化，实现磨损趋势分析与故障早期预判等，对推动设备从计划维修向状态维修转型具有重要价值。

关键词：矿用运输机、提升机；减速器；在线油液监测；故障预判

引言：矿用运输机、提升机是煤矿井上下生产运输、提升系统的核心装备，减速器作为关键传动部件，长期处于重载、高冲击工况运行，齿轮磨损、轴承点蚀、润滑油劣化等故障频发。传统油液检测采用定期取样、实验室分析模式，采样周期长、检测结果滞后，无法捕捉突发性磨损异常，往往等到发现异常时已造成减速器内部齿面损伤或轴承烧毁等无法修复的问题。随着传感器技术和物联网的发展，在线油液监测技术实现了对油液磨粒、粘度、水分、温度等参数的实时连续监测，为减速器状态评估与故障预判提供了新的技术路径。本文系统探讨了在线油液监测技术在矿用运输机减速器中的应用，为设备的智能运维提供了有力参考。

1 矿用运输机、提升机减速器故障特征与油液监测机理

1.1 矿用运输机、提升机减速器结构与常见故障

矿用运输机、提升机减速器通常采用多级齿轮传动结构，运行工况恶劣：负载大且波动剧烈、启停频繁、井下环境潮湿多尘。常见故障分为三类：一是齿轮故障，包括点蚀、磨损、胶合、断齿等，其中点蚀和磨损占比超60%，齿轮啮合时接触应力超疲劳极限产生微裂纹，扩展形成点蚀坑，导致振动加剧。二是轴承故障，包括滚动体剥落、保持架断裂等，初期振动特征不明显但会产生大量磨粒进入到润滑油中。三是润滑系统故障，包括粘度下降、水分和颗粒污染等，润滑失效加速齿轮轴承磨损。约75%的减速器失效与油液劣化或润滑不良有关。

1.2 油液监测技术基本原理

油液监测技术通过分析润滑油中物理化学指标及磨粒信息判断设备状态。一是磨粒分析原理，磨粒尺寸、形态、浓度与磨损类型密切相关：正常磨损颗粒 $<10\mu\text{m}$ ，严重磨损颗粒 $>50\mu\text{m}$ ，疲劳剥落呈片状。通过检测磨粒浓度和尺寸分布可判断磨损趋势。二是油液理化性能分析，粘度变化反映老化程度，酸值升高指示氧化变质，水分含量反映密封状态。三是污染度分析，参照ISO 4406标准判断油液清洁度。各类检测参数相互关联，多参数协同判断可大幅提高故障识别准确率^[1]。

1.3 油液信息与故障类型的关联机制

不同故障类型产生的磨粒特征差异显著，建立关联机制是故障预判的理论基础。齿轮正常磨损产生 $5\sim20\mu\text{m}$ 片状光滑颗粒；点蚀产生 $20\sim100\mu\text{m}$ 不规则块状颗粒；胶合产生不规则团聚状颗粒；断齿产生 $>200\mu\text{m}$ 大颗粒。轴承磨损中，滚动体剥落产生薄片状颗粒，保持架磨损产生细长条状颗粒。油液理化指标同样具有指向性：粘度升高与氧化有关，降低与剪切劣化有关；水分升高指示密封失效；酸值升高反映氧化老化。综合分析磨粒形态、尺寸、浓度与理化指标，可初步判断故障类型及发展趋势。

2 在线油液监测系统总体设计

2.1 系统设计原则

在线油液监测系统设计应遵循五项原则。一是实时性原则，采样频率不低于每分钟1次，数据刷新延迟不超过10秒，确保捕捉突发性磨损异常。二是可靠性原则，矿用环境温度 $-20\text{℃}\sim+40\text{℃}$ 、湿度可达95%、振动达 10g ，传感器必须具备良好的抗振、防潮、抗电磁干扰能力。三

是安全性原则，煤矿井下存在瓦斯爆炸风险，所有电气设备必须取得防爆认证，采用本质安全型电路。四是经济性原则，合理选择传感器类型和数量，确保投入产出比合理。五是易维护原则，传感器具备自诊断功能，安装位置便于检修，软件界面简洁友好。这些原则直接决定系统的实用性和可推广性。

2.2 系统总体架构

在线油液监测系统采用“感知层—采集层—传输层—分析层—应用层”五层架构。感知层由磨粒、粘度、水分、温度等传感器组成，实时采集油液参数。采集层负责信号调理与数据预处理，具备边缘计算能力，可剔除异常值。传输层利用井下工业环网或无线网络将数据上传至地面监控中心，关键数据采用冗余传输。分析层部署于服务器端，集成数据清洗、特征提取、趋势分析、预警判断等算法模块，构建故障预判模型。应用层面向用户提供实时数据显示、趋势曲线、预警信息、维修建议等功能，支持PC端和移动端访问，形成从数据采集到决策支持的完整闭环^[2]。

2.3 关键技术指标

在线油液监测系统关键技术指标包括检测参数、量程、精度、响应时间等。检测参数至少包含磨粒（铁磁性和非铁磁性）、粘度、水分、温度四类核心参数。磨粒传感器：铁磁性颗粒最小检测尺寸 $50\mu\text{m}$ ，非铁磁性 $150\mu\text{m}$ ，计数准确率 $\geq 90\%$ 。粘度传感器：测量范围 $10\sim 500\text{cSt}$ ，精度 $\pm 5\%$ 读数或 $\pm 1\text{cSt}$ 。水分传感器：范围 $0\sim 3000\text{ppm}$ ，精度 $\pm 10\%$ 或 $\pm 50\text{ppm}$ 。温度传感器：范围 $-20^\circ\text{C}\sim 120^\circ\text{C}$ ，精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。系统响应时间 $\leq 30\text{s}$ ，防护等级 $\geq \text{IP67}$ ，防爆等级满足 Ex ib I Mb 要求，本地存储 $\geq 30\text{天}$ ，服务器端 $\geq 3\text{年}$ 。

3 在线油液监测传感器选型与安装

3.1 关键传感器选型

在线油液监测系统的核心是传感器选型，应根据监测需求和工况条件合理选择。磨粒传感器是判断磨损状态的关键，主要有三种技术路线。电磁感应式传感器利用线圈磁场检测铁磁性颗粒，结构简单、成本低，但无法检测非铁磁性颗粒，适用于以钢制齿轮和轴承为主的减速器。电感式传感器通过测量颗粒通过线圈时的电感变化，可区分铁磁性与非铁磁性颗粒，信息更丰富，但成本较高。光学式传感器利用颗粒对光线的遮挡或散射效应进行计数和尺寸分析，精度高但受油液颜色和透光性影响较大。矿用环境下推荐采用电感式与电磁感应式组合方案，兼顾性能与成本。粘度传感器选用振动式，通过测量谐振频率变化计算粘度，无活动部件、抗污染

能力强。水分传感器选用电容式，利用高分子薄膜吸湿后介电常数变化原理，响应快速、价格适中。温度传感器选用铂电阻（Pt100），精度高、稳定性好。传感器选型应优先考虑有矿用安标认证的产品。

3.2 传感器安装位置优化

传感器安装位置直接影响监测效果的代表性和数据的有效性。安装位置选择应遵循四个原则：油液代表性好、流动充分、温度适宜、便于维护。最优安装位置是减速器回油管路，此处油液经过齿轮和轴承啮合区域后刚刚流出，携带了最新的磨损信息，且油液处于流动状态，颗粒分布均匀，能够代表当前磨损状态。其次可安装在油底壳或油池中，安装简便，不受管路接口限制，但油池中油液搅动不充分，大颗粒可能沉降，导致监测结果滞后。在油滤器前后加装压差传感器可判断滤芯堵塞程度，间接反映油液污染状况^[3]。安装时应注意：传感器应安装在管路的直管段，避开弯头、阀门等可能造成油液紊流的位置；传感器探头应完全浸入油液中，避免气泡附着；安装接口应采用快速接头形式，便于检修更换。对于多级减速器，建议在各级回油管路分别安装传感器，实现分区监测。

3.3 矿用适应性设计

矿用环境对在线油液监测系统的适应性提出特殊要求。防爆设计是首要条件，所有电气设备必须采用隔爆型或本质安全型，设备外壳必须具备耐爆性和隔爆性。传感器和采集单元的防爆等级应不低于 Ex ib I Mb ，适用于煤矿井下有瓦斯和煤尘爆炸风险的场所。抗振设计方面，传感器内部元件应灌封固化，电路板采用抗振支架，连接器带锁紧机构，整机通过 5g 加速度的随机振动测试。防尘防水方面，传感器外壳防护等级不低于 IP67 ，接口采用密封圈或螺纹密封，能够在粉尘和淋水环境下正常工作。供电设计方面，优先采用本安电源供电，电压 $12\sim 24\text{V DC}$ ，功耗应尽可能低（ $< 2\text{W}$ ），减少发热量。信号传输方面，优先采用光纤或屏蔽双绞线，避免强电干扰。软件方面，界面设计应简洁直观，数据异常时自动报警，支持远程访问和诊断。通过上述矿用适应性设计，确保系统在恶劣环境下长期稳定可靠运行。

4 故障特征提取与预判模型构建

4.1 数据预处理与特征提取

原始传感器数据包含噪声和异常值，需经过预处理才能用于分析。数据清洗包括三方面：一是剔除明显超出量程的无效数据，如磨粒浓度负值、温度超过传感器量程等；二是识别并剔除由气泡、电磁干扰引起的尖峰异常值，可采用 3σ 原则或滑动中值滤波方法；三是填

充短时缺失数据,采用线性插值或历史同期数据均值填充。数据平滑处理采用指数加权移动平均,既抑制高频噪声,又保留趋势变化信息。特征提取是数据分析的核心步骤,从原始数据中提取反映设备状态的关键指标。时域特征包括磨粒浓度均值、增长率、波动幅度,粘度和水分的稳态值及变化速率。趋势特征包括滑动窗口内的平均值、标准差、斜率等,用于判断参数是稳定、缓慢上升还是急剧变化。针对冲击磨粒事件,需提取脉冲幅值、持续时间、发生频率等特征。特征提取的质量直接影响后续故障判断的准确性。

4.2 磨损趋势分析与预警阈值设定

磨损趋势分析是在线监测的核心功能,通过跟踪磨粒浓度、粘度、水分等参数随时间的变化规律,判断磨损发展阶段。正常磨损阶段,磨粒浓度维持在较低水平且波动平稳,增长率趋于零;初期异常磨损阶段,磨粒浓度开始持续上升,增长率超过设定阈值,但尚未达到报警值;严重磨损阶段,磨粒浓度急剧攀升,颗粒尺寸明显增大,可能伴随粘度异常变化。预警阈值设定采用分级策略。一级阈值(注意级)为正常值上限的1.5~2倍,提示需加强观察;二级阈值(报警级)为正常值上限的3~5倍,建议安排停机检查;三级阈值(危险级)为正常值上限的10倍以上,应立即停机处置。阈值设定应结合设备重要性和历史数据进行动态优化,对于关键运输机应采用更严格的阈值。同时设置变化率阈值,如磨粒浓度日增长率超过20%即触发预警,能够捕捉突发性磨损。

4.3 故障预判模型

故障预判模型是实现从“监测”到“预判”的核心算法。基于阈值的分级预警是最基础的方法,设定各参数的正常范围、报警范围和危险范围,当参数超限时触发相应级别报警,简单直观但无法捕捉多参数关联异常。基于多参数融合的趋势判断模型综合磨粒、粘度、水分、温度等参数的变化趋势,利用加权评分方法计算设备健康指数,当健康指数低于阈值时发出预警。支持向量机模型适用于小样本、非线性分类问题,通过对历史故障数据的训练,建立油液参数与故障类型的映射关系,可对当前状态进行分类识别。随机森林模型通过集成多个决策树提高预测精度,适合处理高维特征数据。灰色预测模型适用于小样本趋势预测,利用少量数据点

外推未来变化趋势,可在故障早期发出预警。不同模型各有优劣,实际应用中常采用多模型融合策略,综合各模型输出结果进行判断,提高故障预判的准确率和鲁棒性。

4.4 故障类型识别

基于油液信息的故障类型识别是预判模型的延伸应用。齿轮磨损与轴承磨损的区分主要依据磨粒形态和尺寸分布:齿轮磨损产生的磨粒多为片状或块状,尺寸范围宽;轴承磨损产生的磨粒中常混有细长条状颗粒(保持架磨损特征),且含有非铁磁性材料颗粒。当磨粒浓度持续上升但粘度无明显变化时,多为纯机械磨损;若粘度同时升高,可能伴随油液氧化或混入不兼容油品;若水分含量同步增加,指示密封失效或冷却系统泄漏。建立故障特征知识库,将典型故障类型与油液参数模式进行关联,形成“参数模式—故障类型”匹配规则。齿轮点蚀的模式特征:铁磁性磨粒浓度上升、出现50~100 μm 片状颗粒、粘度基本稳定、温度轻微上升。轴承严重磨损的模式特征:铁磁性和非铁磁性磨粒同步上升、出现细长颗粒、振动加剧。油液进水劣化的模式特征:水分含量>500ppm、粘度异常变化、酸值快速上升。通过实时监测数据与知识库规则的匹配,可初步判断故障类型,为维修决策提供方向性指导。

结束语

在线油液监测技术通过实时采集磨粒、粘度、水分等参数,实现减速器磨损状态的连续感知。本文构建了五层系统架构,明确了传感器选型与安装方案,建立了数据预处理、特征提取、趋势分析、故障预判的完整技术链条。该技术有效解决了传统离线检测滞后问题,实现磨损趋势分析与故障早期预判,推动维修模式向状态维修转型,对提升矿用运输机、提升机运行的可靠性具有重要工程价值。

参考文献

- [1]兰晋生.矿用胶带运输机减速器断轴原因及改进措施[J].矿业装备,2022(2):226-227.
- [2]张青花.矿用皮带运输机减速器断轴原因及改进措施[J].中国化工贸易,2021(12):159-160.
- [3]倪波,吴京凯,白志国,等.可控震源在线油液监测[J].物探装备,2023,33(3):168-170.