

露天煤矿电铲提升减速机润滑油在线监测与智能故障预警系统研究

景晨, 朱宴南, 柳海生, 杨志佳

扎鲁特旗扎哈淖尔煤业有限公司, 内蒙古 霍林郭勒 029200

DOI: 10.61369/SSSD.2025040032

摘 要 : 露天煤矿电铲提升减速机作为关键设备, 其可靠性直接影响生产效率和安全性。本文针对传统润滑管理方法的不足, 提出了一种基于在线监测与智能故障预警的润滑油管理系统。该系统通过监测提升减速机的金属磨粒、水分含量和粘度等参数, 结合机器学习算法, 实现对设备磨损状态和故障趋势的预测, 为设备维护提供科学依据, 提高设备可靠性和降低维护成本。

关 键 词 : 露天煤矿; 电铲提升减速机; 润滑油在线监测; 智能故障预警; 机器学习

Research on Online Monitoring and Intelligent Fault Warning System for Lubricating Oil of Electric Shovel Lifting Gearbox in Open pit Coal Mine

Jing Chen, Zhu Yannan, Liu Haisheng, Yang Zhijia

Zha Lu Te Qi Zha Naoer Coal Industry Co., Ltd., Huolingole, Inner Mongolia 029200

Abstract : As a key equipment, the reliability of the electric shovel lifting reducer in open-pit coal mines directly affects production efficiency and safety. This article proposes a lubricant management system based on online monitoring and intelligent fault warning to address the shortcomings of traditional lubrication management methods. The system monitors the metal abrasive particles, moisture content, viscosity and other parameters of the gearbox, and combines machine learning algorithms to predict the wear status and fault trend of the equipment, providing scientific basis for equipment maintenance, improving equipment reliability and reducing maintenance costs.

Keywords : open-pit coal mine; electric shovel lifting reducer; online monitoring of lubricating oil; intelligent fault warning; machine learning

引言

露天煤矿电铲提升减速机在采掘过程中起着关键作用, 其运行稳定性直接影响矿山生产效率与安全。由于恶劣作业环境和高负荷工作, 减速机易发生故障, 而传统润滑管理方法依赖定期检测和人工判断, 存在周期长、实时性差等局限^[1], 导致故障未能及时发现。

为解决这些问题, 本文提出了一种基于在线监测与智能故障预警的润滑油管理系统。通过实时监测金属磨粒、水分和粘度等关键参数, 并结合机器学习算法, 系统可预测设备磨损和潜在故障。该系统有助于提高减速机的可靠性, 减少故障率和维护成本, 保障生产安全。结合油液监测和机器学习技术可有效提升设备预警的准确性。

一、润滑油在线监测原理

在线监测侧重于对润滑油中的金属磨粒、水分含量和粘度等关键参数进行实时监测。本研究采取了以下措施: 在原有润滑油路中安装油液监测装置, 以实时监控润滑油的质量, 减少减速机故障的发生。下图展示了改进后的润滑油路运行示意图。

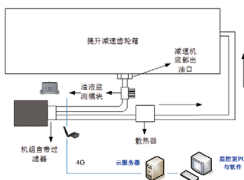


图1 油液在线监测系统总体部署

磨损与油品监测技术是一种先进的流体在线传感技术, 它实时、在线地检测润滑系统中的金属磨屑和润滑油品质。该技术能够监测流体的状态, 通过连续跟踪磨屑的生成和润滑油的理化特性^[2], 为用户提供设备组件早期磨损的预警信号。这样的监测使得用户能够在设备故障的早期阶段, 以较低的成本进行校正和维护, 从而预防潜在的严重事故。

本研究还涉及对电铲车油箱内设备在不同工作环境下的有效工作时间进行统计分析, 这些环境因素包括磨粒浓度 / 尺寸、温度、粘度等。通过消除随机因素的干扰, 将传感器收集的实时状态数据转换为反映设备运行寿命的统计概要信息。基于这些信息, 构建潜在故障的预测模型, 对于大型机组的运维至关重要。

监测传感器安装在润滑系统油箱底部的取油口。这一位置的

传感器能够有效地捕捉到油液中的磨损颗粒和品质变化，为设备的维护和故障预测提供了可靠的数据支持。如图2所示：



图2 油液、磨损传感器安装点位^[3]

在齿轮箱的原出油口位置，通过管路改造，将传感器牢固的串联在齿轮箱的回油管路上，确保了传感器与设备结构的稳定性和监测数据的准确性。

二、齿轮箱油液及设备磨损监测模块

（一）油液磨损及品质监测模块

齿轮箱油液及设备磨损监测模块是一种高精度监测系统，它通过集成油液检测传感器和磨损监测传感器，实时监测齿轮箱油液的水分、粘度和金属磨粒含量，从而准确评估油液品质和设备磨损状况。该模块能够记录和分析数据，一旦发现油液性能下降或磨损程度超出正常范围，立即触发故障预警，并通过通信接口将数据传输至监测软件，便于操作人员及时采取维护措施，确保齿轮箱的稳定运行和延长设备使用寿命。

（二）数据采集模块

监测数据采集器设计用于连接多达12路的油液检测模块信号（RS485）^[4]，该采集器位于减速机旁侧。在采集到油液数据后，转换为无线4G信号进行传输。

现场数据采集站配备了适量的存储空间，即使在通信中断的情况下，也能持续实时采集并存储至少一个月的油液检测数据。一旦通信恢复，系统将自动将采集站内保存的数据上传至服务器。在电铲设备间铁壁位置采用焊接的方式固定数据采集器，内置电源以及信号转换器等设备，从而实现供电以及数据的传输。

（三）供电及通信线缆敷设

在电铲车设备间的配电控制柜中，系统直接从现场220V交流电源取电，鉴于系统采集器和监测传感器均需24V直流电源供电，现场需安装开关电源以将AC 220V转换为DC 24V。鉴于电铲车作业环境的苛刻性，传统的有线网络通信难以实施，因此，在电铲车设备间安装了4G无线网络路由器，以实现通信和数据传输的功能。

三、油液分析算法

该算法基于工业过程控制（SPC）和数据正态分布^[5]，创新性地采用积累分布技术（CDT），通过将历史油液监测数据作为标准依据，系统可以计算不同机械设备和油品的在线磨粒判断标

准，并通过自学习方式实时更新模型和预警故障。

在使用本算法设定报警限之前，需要确认设备磨损和油品的关键指标，并选择特定设备进行长期监控，确保在线取样时间间隔一致。该算法适用于在线监测齿轮箱磨粒和油品指标，特别是磨粒数量的“趋势积累”分布，算法通过数据增量和积累分布技术预测磨粒的变化趋势^[6]，从而判断是否进入预警或报警范围。以下为具体的算法步骤。

1. 计算磨损数据的增量

设样本空间内的总样本数量为 N ，其中第 x 条数据为 D_x ，则计算样本空间相邻两次采集数据的差值，即增量 $M_x = D_{x+1} - D_x$ ，另外，将所有的增量集合 M 留作备用。此外，为了保持集合 M 中样本数量和样本空间数量一致，在增量集合中第一位可以使用0补充。

2. 寻找增量的最大值与最小值

在集合 M 中寻找增量的最大值与最小值，记作 M_{min} 和 M_{max} 。

3. 在增量的最大值与最小值之间设置积累区间

通过上述章节中的 M_{min} 和 M_{max} ，设定区间相等的 n 等份，作为 n 个增量区间。

4. 查找各个积累区间的样本数量

在增量样本空间 M 中，对应每个增量区间，查找每个增量区间在集合 M 中样本的数量，分别记作增量积累区间 K_1, K_2, \dots, K_n ，此时， $K_1 + K_2 + \dots + K_n = M = N$ 。

5. 绘制各个增量积累区间与样本数量的柱状图

根据各个增量积累区间的数量 K 以及 n 个增量区间，画出增量区间与数量 K 的对应柱状图。注意，此时要求 n 个增量区间应按照大小排列。

6. 根据各个积累区间的样本数量绘制样本数量曲线图

根据各个积累区间的样本数量 K ，绘制样本数量曲线。注意，此时应按照 n 个增量区间大小进行排列。

7. 根据各个积累区间与样本数量的柱状图寻求正态分布的 σ 作为报警关键值

对集合 M 中的数据进行正态分布分析，获得 σ 值，并确定 $+2\sigma$ 作为磨粒数据增量预警值， $+3\sigma$ 作为磨粒数据增量报警值。

8. 根据报警关键值计算关键样本数量

得到 $+2\sigma$ 和 $+3\sigma$ 后，使用样本数量 N 做以下计算：

$N1 = +2\sigma * N$ ； $N1$ 即为到达 $+2\sigma$ 处的样本数量；

$N2 = +3\sigma * N$ ； $N2$ 即为到达 $+3\sigma$ 处的样本数量。

9. 根据关键样本数量查询样本数量曲线图和各个积累区间与样本数量的柱状图，确定关键积累区间

得到 $N1$ 和 $N2$ 值以后，参照3.2.6和3.2.7做出的图形，确定 $N1$ 和 $N2$ 与对应的增量积累区间的值。

10. 根据关键积累区间自动设定预警限与报警限

通过 $N1$ 和 $N2$ ，找到增量积累区间的值 $H1$ 和 $H2$ ， $H1$ 和 $H2$ 即可作为判断下一条磨粒数据的预警值与报警值。

11. 根据限值判断下一条数据是否应该做出报警

得到 $H1$ 和 $H2$ 后，待第 $N+1$ 条数据更新后，判断第 $N+1$ 条数据是否要预警或者报警。

12. 最新数据不断迭代上述方法，用于判断下一条数据是否报警

最后，待第 N+1 条数据判断完毕后，将数据样本空间扩大至 N+1，再次使用上述方法，用于判断第 N+2 条数据是否预警或者报警。最后，如此往复循环。

趋势模型图如下图3所示：

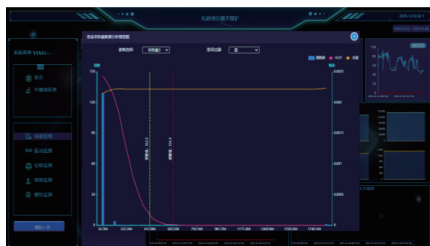


图3 磨损、水分趋势模型

四、相关案例分析

通过在本项目安装油液及磨损在线监测装置后得到的数据可以分析出水分和磨损对应的趋势图如图4所示：

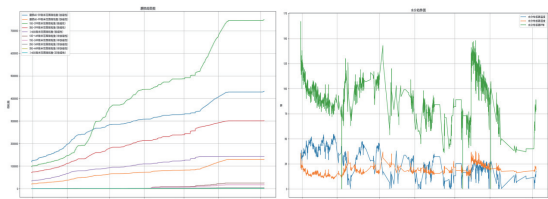


图4 磨粒与水分含量趋势图

从图4中可以看出，随着时间的变化，自2024年10月3日起，磨损颗粒的数量显著增加，且持续维持在高水平。这可能是由于机械零件的磨损加剧导致的。此外，较大的微粒（例如 >400 微米范围微粒数）的增长速度比较小的微粒更快，ICBM 设备健康监测与管理平台及时发出警报提醒^[7]。停机检修后发现齿轮表面有明显的磨损痕迹，包括划痕、凹坑和可能的腐蚀现象。这表明该部件已经运行了相当长的时间，并且可能承受了较大的负载或不良的工作条件。如图5所示：



图5 设备检修图

从图4中可以看出，水分传感器的温度和湿度都呈现出波动的趋势，且两者之间有一定的相关性。当温度上升时，湿度也倾向于上升；反之亦然。趋势图中的水分含量数据显示出一定程度的波动，但没有明确的上升趋势或高峰值。这可能意味着系统中存在一定量水分，但并没有达到对设备造成严重影响的程度^[8]。

综上所述，磨损和水分趋势图共同描绘了设备或系统在不同时间点的磨损情况和环境参数（温度、湿度和 PPM）的变化。通过在线监测装置监测数据以及智慧诊断系统分析这些数据，可以更好地理解设备或系统的健康状态和环境条件对其性能的影响。同时能够对异常数据进行及时报警，避免出现非计划停机造成生产事故。

五、结束语

本文深入探讨了露天煤矿电铲减速机油液在线监测技术的应用，以及对磨损故障的分析与诊断。通过系统的研究与实践，确认了油液监测技术在露天煤矿电铲减速机健康监测的有效性。该技术不仅实现了对设备状态的实时监测，更能通过数据分析预测潜在故障，从而为维修人员提供宝贵的预警时间。显著提升了设备维护的针对性和效率^[9]，降低了突发故障带来的生产风险。

本研究不仅验证了油液在线监测技术在露天煤矿电铲减速机中的应用价值，还为设备的磨损故障分析与诊断提供了新的思路和方法，未来还可结合多源传感数据与 AI 模型^[10]，进一步提升诊断的准确率。我们期待这些研究成果能在未来的实践中得到广泛应用，并为推动露天煤矿行业的持续进步和发展贡献力量。

参考文献

- [1] 国家能源局. GB/T 35094-2018 矿山机械润滑油在线监测技术规范 [S]. 北京：中国标准出版社，2018.
- [2] Yan X., et al. Real-time wear debris monitoring in gearboxes using inductive sensors[J]. Tribology International, 2020, 152: 106532.
- [3] Johnson K.L., et al. Wireless sensor networks for industrial equipment monitoring[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(6): 5812-5820.
- [4] 朱洪波等. 露天采矿设备油液多参数实时监测系统设计 [J]. 工矿自动化, 2019, 45(3): 54-60.
- [5] Smith J.R., et al. IoT-based lubrication health management for mining machinery[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 126: 105463.
- [6] 张勇, 刘洋. 基于机器学习的油液磨粒趋势预测模型 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(7): 76-82.
- [7] Li H., et al. Early fault warning of gearboxes by combining vibration and oil debris analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 130: 248-263.
- [8] 王建华, 李志强. 基于油液分析的齿轮箱磨损状态监测技术 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(12): 102-110.
- [9] 杨斌, 张涛. 露天矿大型设备智能故障预警系统研究 [J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(5): 189-195.
- [10] Peng Z., et al. Deep learning-based anomaly detection in oil condition monitoring[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 230: 108956.