

# 轮斗挖掘机核心部件故障预测与健康管理关键技术研究

宋春雨 李惠泽

DOI:10.12238/gmsm.v7i11.2041

**[摘要]** 轮斗挖掘机在露天煤岩开采中有着广泛的应用,是一种重要的大型非标工程机械。其核心零部件的稳定性与可靠性,直接关系到装备的工作效率与使用寿命。然而,由于其工作环境恶劣,载荷大,运行周期长,导致核心零部件故障率显著升高,引发设备非计划停机时间增加、维修成本攀升以及生产效率下降等问题,严重制约了工程进度并削弱了经济效益。因此,亟需采取设备运行状态实时监测、数据分析与建立预测模型等科学技术,开展轮斗挖掘机核心零部件故障预测和健康管理关键技术研究,以精准预测故障隐患、优化维修策略,全面提升设备运行的可靠性与效率。

**[关键词]** 轮斗挖掘机; 核心部件; 故障预测; 健康管理

中图分类号: U415.51+1 文献标识码: A

Research on key technologies of fault prediction and health management of core components of wheel bucket excavator

Chunyu Song Huize Li

**[Abstract]** Rowheel excavator is widely used in open-pit coal mining and is an important large non-standard construction machinery. The stability and reliability of its core components are directly related to the working efficiency and service life of the equipment. However, due to the harsh working environment, large load and long operation cycle, the failure rate of core components increases significantly, which causes the increase of unplanned equipment downtime, rising maintenance cost and decreased production efficiency, which seriously restricts the project progress and weakens the economic benefits. Therefore, it is urgent to adopt scientific and technologies such as real-time monitoring of equipment operation status, data analysis and prediction model establishment to carry out research on fault prediction and health management of core components of wheel excavator, so as to accurately predict potential faults, optimize maintenance strategies, and comprehensively improve the reliability and efficiency of equipment operation.

**[Key words]** wheel bucket excavator; core components; fault prediction; health management

随着工业技术持续迭代演进,轮斗挖掘机的智能化程度越来越高,其故障预测和健康管理技术也得到了长足的发展。根据统计,轮斗挖掘机中动力系统和液压系统出现故障的次数最多。随着人工智能、大数据等技术的应用,现代故障预测模型的预测精度呈显著提升态势<sup>[1]</sup>。这些技术的引进可有效提高动力系统和液压系统的预测精准性,降低故障发生风险,大大减少了设备的停工期,降低维护费用。然而,目前该领域仍存在传感器数据精度低、模型泛化能力差、实时监控系统稳定性差等问题。因此,开展轮斗挖掘机核心部件故障预测及健康管理关键技术研究,在提升设备运行可靠性、缩减非计划停机时长、确保露天矿山得以高效且连续地实施开采作业,以及优化维修策略、降低运维成本等方面,具有极为重要的理论价值与现实意义。

## 1 轮斗挖掘机的结构特点

轮斗挖掘机是一种高效、连续作业的大型矿山开采设备,其结构设计复杂且功能强大,适用于大规模土方剥离和物料挖掘。通常由多个铲斗环绕在一个大型轮缘上,通过斗轮体的旋转实现连续挖掘。斗轮体安装在臂架的前端,臂架可伸缩和调节角度,以适应不同的挖掘深度和地形条件。臂架内部装有输送带系统,能够将挖掘的物料快速输送至设备后部或直接装载到运输车辆上,确保作业的连续性和高效性。设备的行走装置多采用履带式设计,履带宽度大、接地压力小,能够在松软或崎岖的地形中稳定移动<sup>[2]</sup>。驱动系统通常由大功率电动机或柴油机提供动力,确保设备在高负荷下稳定运行。此外,轮斗挖掘机还配备先进的液压系统和控制系统,用于精确调节斗轮体和臂架的动作,提升作业精度和安全性。整体结构设计注重耐用性和可靠性,能够在恶劣的矿山环境中长时间高效作业,是现代露天采矿不可或缺的重要设备。

## 2 轮斗挖掘机核心部件的故障预测与健康管理关键技术分析

### 2.1 基于多传感器数据融合的故障特征提取技术

轮斗挖掘机液压系统、齿轮传动系统及机械结构等核心零部件在复杂工况下易发生失效,多传感器信息融合是实现早期故障检测的关键。采用压力、振动、温度、油液等多个传感器,可实现对设备运行状态的实时监测。如液压系统中的压力传感器能够对液压泵输出压力进行监控,正常情况下压力范围控制在15~20MPa之间,而振动传感器能够捕捉到齿轮、轴承的振动频率,在正常运行的情况下,振动频率不能超过50Hz<sup>[3]</sup>。

在实际应用中,需要解决多传感器数据的同步与校准问题。如融合高清晰摄像机、红外摄像机、激光雷达等获取的点云信息,实现对机械零部件磨损状态的精确识别。在此基础上,采用信号处理技术,提取振动信号时域特性(均值、方差)和频域特性(主频、频谱分布),并采用主成分分析(PCA)降维,有效降低数据冗余,提高故障诊断效率。此外,为进一步提高特征提取的精度,可利用多粒度级联森林模型对传感器数据进行分析,通过多级特征提取与分类的方法,可对不同类型的故障模式进行有效识别。

在液压系统中,通过对液压泵内部压力、温度的变化进行检测,并与振动传感器采集到的高频振动数据相结合,可以实现对内部泄漏与磨损的早期诊断,提高故障诊断效率。同时在实际应用中,传感器数据还可通过云计算、边缘计算等技术实时传输至云平台,实现数据的处理与分析。在挖掘机上安装边缘计算设备,对传感器数据进行实时处理,并将关键特征信息上传到云平台进行深度分析,这一体系结构不仅提高了数据处理速度,而且降低了网络带宽需求。

### 2.2 深度学习驱动的故障预测模型开发

由于轮斗挖掘机在复杂工作环境持续运转,运行状态受多重复杂因素影响,极易发生故障导致动作失效。近年来,深度学习以其在特征提取、模型建模等方面的强大优势,逐渐成为当前故障预测领域的研究热点。其核心是利用多层神经网络从数据中自动抽取特征,以实现高效的故障预测。

卷积神经网络(CNN)与长时记忆网络(LSTM)是目前广泛使用的两种深度学习框架。卷积神经网络能有效地提取局部特征,对振动等时间域的数据具有较强的适应性;LSTM在处理时间序列数据时具有长时相关性,适用于对设备运行状态进行动态监控<sup>[4]</sup>。将二者相结合形成的混合模型(CNN-LSTM),可充分发挥二者优势,实现轮斗挖掘机关键部件故障的高效预测。在具体实施过程中,可采取以下措施:

(1) 安装高精度传感器。将液压系统压力传感器应安装在泵出油口、油缸进口,采集频率设定在100Hz以上,使其能准确地捕捉压力变化。振动传感器安装于液压泵、液压缸外壳,以200Hz的频率进行检测,实现对设备工作状态的监控,将传感器采集到的数据与设备的工作状态及历史故障记录相结合,建立训练数据集。

(2) 开展模型训练。使用CNN-LSTM混合模型时,卷积神经网络可被设计成3层的卷积网络,每个层的卷积核大小分别为 $3 \times 3$ 和1个步长。LSTM部分可分为两层,每个层有128个神经元,以均方误差为损失函数,利用Adam优化算法对模型参数进行修正。为了保证模型能准确地学习正常状态与异常状态下的特征,训练样本集中需包含正常运行与故障数据,将比例控制在7:3。

(3) 实施模型部署。在边缘计算设备上部署CNN-LSTM模型,实现对传感器数据的实时采集和预测。通过将诸如TensorFlow Lite之类的轻量级推理引擎安装到设备上,可以使模型在边缘设备上快速运行,降低对云计算资源的依赖。同时预测结果可实时传送至云平台,运维人员可通过移动终端或监测系统了解设备运行状况。为充分展示深度学习驱动在故障预测模型中的关键参数,可参考表1。

表1 深度学习驱动在故障预测模型中的关键参数

参数名称	参数值	说明
压力传感器采集频率	100 Hz	液压系统压力数据采集频率
振动传感器采集频率	200 Hz	液压系统振动数据采集频率
CNN卷积层数量	3层	每层卷积核大小为 $3 \times 3$ ,步长为1
LSTM层数量	2层	每层神经元数量为128

### 2.3 核心部件剩余使用寿命(RUL)评估技术

寿命评估是一种融合物理模型与数据驱动的科学技术,通过对部件健康状况进行动态评估,实现剩余寿命预测。物理模型能准确地描述零部件在不同工况下的退化过程。然而,建立物理模型需要大量的试验数据、繁琐的数学推导,且不能适应复杂的工况变化。贝叶斯更新算法与粒子滤波算法是对部件健康状况进行动态评估的重要手段,贝叶斯算法将先验知识与实时监测数据相结合,对模型参数进行动态调整,提高预测精度。粒子滤波算法是在蒙特卡洛模拟基础上建立贝叶斯滤波算法,利用随机抽样点逼近系统随机变量的概率分布,得到系统状态的最小方差估计。

在具体寿命评估中,需先进行数据采集,并将传感器采集到的数据与设备的工作状态及历史故障记录相结合,建立训练数据集。在模型构建中,可通过贝叶斯修正与粒子滤波相结合的方法,对液压泵的健康状况进行动态评价<sup>[5]</sup>。具体而言采用贝叶斯修正的方法,通过对液压泵的压力、振动等信号进行检测,并与历史故障数据相结合,可建立基于贝叶斯学习的液压泵劣化模型。模型的初始参数可由历史数据确定。如假设液压泵的故障时间满足威布尔分布,形状参数 $\beta=1.5$ ,标度参数 $\eta=2000$ 小时,那么通过粒子滤波算法,可通过实时监测数据动态更新模型参数,实现剩余寿命的预测。在后续的模型验证中,可将其在实际设备中进行应用,以检测数据并对预测误差进行验证,结合实时

监测数据,实时更新模型参数,提高剩余寿命评估精度。为充分展示核心部件寿命评估技术中的关键技术参数,可参考表2:

表2 核心部件寿命评估技术中的关键技术参数

参数名称	参数值	说明
压力传感器采集频率	100 Hz	液压系统压力数据采集频率
振动传感器采集频率	500 Hz	液压系统振动数据采集频率
威布尔分布形状参数? $\beta$	1.5	基于历史失效数据的估计值
威布尔分布尺度参数? $\eta$	2000小时	基于历史失效数据的估计值
模型预测误差	< 10%	基于贝叶斯更新和粒子滤波算法的RUL预测误差

## 2.4 智能化健康管理系统的集成与优化

将故障预测、健康评估与维修决策集成于一体的智能健康管理平台,可以对轮斗挖掘机核心部件进行全面的监测与管理。在具体实施过程中,需要从硬件整合、软件开发和数据管理三方面着手。

(1) 硬件整合方面,在轮斗挖掘机关键部位安装高精度传感器。如安装振动传感器等,以实现对轮斗挖掘机工作状态的监控。通过设定振动速度阈值,实时监测异常振动信号,实现对轴承磨损、齿轮故障的早期检测。为了保证数据的实时传输及远程监测,可以在设备中安装数据采集模块及无线通信模块。

(2) 软件开发方面,建立失效预测模型。如通过对轮斗挖掘机运行数据的分析,提取振动频率、压力变化、温度波动等特征,采用长-短记忆网络(LSTM)建立故障预报模型。该模型能较好地预报斗轮轴承故障,预报准确率大于90%。同时,该系统还具有状态评估功能,对设备运行状况进行评估,并自动生成维修方案。

(3) 数据管理方面,构建高效的数据存储与处理平台是保障数据安全可靠的必要手段。系统采用分布式计算技术,将采集到的实时数据存入云数据库,进而实现数据的快速处理与分析。通

对大量的监测数据进行存储、管理与分析,可实现对设备健康状况的深层次挖掘。利用大数据分析与人工智能算法,可实现设备运行状态的实时处理与分析,为故障预警与健康管理提供数据支撑。同时,数据管理平台支持可视化的数据展示,使操作人员可以直观地了解设备的运行状况及健康状况。

## 3 结束语

综上所述,开展轮斗挖掘机核心部件故障预测及健康管理关键技术研究,能有效降低设备故障率,提高设备可靠性及使用寿命,具有重要的经济价值。在未来研究中,随着人工智能、大数据、物联网等技术的深入融合,故障预测和健康管理将向智能化、精准化方向发展。为轮斗挖掘机核心部件的设计优化、性能提升提供全新的理论依据与技术支撑,进一步推动轮斗挖掘机故障预测及健康管理技术迈向新的高度,为露天矿山的高效、安全开采提供坚实保障。

## 【参考文献】

- [1]刘玲.轮斗挖掘机+自卸卡车连续采煤开采工艺在哈密一矿的应用[J].露天采矿技术,2024,39(04):46-49.
- [2]金磊,李浩然,刘欣.德国露天煤矿开采技术与装备发展研究[J].中国煤炭,2023,49(10):101-108.
- [3]周帅.轮斗挖掘机冬季作业问题探讨[J].中国设备工程,2022,(18):191-193.
- [4]刘金强,张波,潘博,伊敏露天矿轮斗挖掘机工作面参数确定[J].露天采矿技术,2020,35(04):79-81.
- [5]李旭涛,刘志明,张幼振,等.我国露天煤矿开采工艺及装备研究现状与发展趋势[J].露天采矿技术,2023,38(5):6-9.

## 作者简介:

宋春雨(1995--),男,汉族,辽宁阜新人,研究生,助理工程师,主要从事露天煤矿装备技术研发工作。

李惠泽(1996--),女,汉族,辽宁沈阳人,研究生,助理工程师,主要从事露天煤矿装备技术研发工作。