

Fault diagnosis and prediction technology of metallurgical mechanical transmission system

Hu Li

Chifeng Zhongtang Special Steel Co., Ltd., Chifeng, Inner Mongolia, 024000, China

Abstract

Metallurgical machinery is the power unit of industrial production, under long-term high load and high-intensity working conditions, it is easy to cause problems such as gear surface wear in the transmission system, fatigue failure of rolling elements such as needle rollers, bearing fracture and oil deterioration and failure. Therefore, it is very necessary to do a good job in the diagnosis and prediction of transmission system faults to improve the operational stability and safety of mechanical equipment. The following will analyze the main fault types and common manifestations of the current metallurgical mechanical transmission system, and study the system fault diagnosis and prediction technologies such as vibration signal analysis, thermal imaging monitoring, multi-sensor fusion and acoustic emission detection, hoping to provide theoretical and technical support for the efficient maintenance and predictive management of equipment in the metallurgical industry.

Keywords

metallurgical machinery; Transmission system; fault diagnosis; Forecast; technology

冶金机械传动系统故障诊断与预测技术

李虎

赤峰中唐特钢有限公司, 中国·内蒙古 赤峰 024000

摘要

冶金机械是工业生产的动力装置,在长期处于高负荷、高强度工况条件下,容易出现传动系统中的齿轮齿面磨损、滚针等滚动体的疲劳破坏、轴承的断裂以及油品的变质失效等问题。因此非常有必要做好传动系统故障的诊断与预测,以提高机械设备的运行稳定性和安全性。下文将对目前冶金机械传动系统的主要故障类型以及常见表现进行分析,并有针对性地研究振动信号分析法、热成像监测、多传感器融合以及声发射检测等系统故障诊断与预测技术,希望能为冶金行业设备维护高效化与预测性管理提供理论与技术支持。

关键词

冶金机械; 传动系统; 故障诊断; 预测; 技术

1 引言

冶金行业的设备种类繁多,运行环境恶劣,在冶炼车间的炼钢连铸、轧钢以及高线的精轧等重要工序当中,设备上的机械传动装置会受到周期性的冲击载荷以及高温污染等因素的影响,并制约生产效率以及产品的质量情况。传统依靠人工巡检的方式无法达到及时发现与检测前期故障的作用,无法与现代化工业的“零非计划停机”要求相符,所以研究高效、智能化的故障诊断与预测技术,已成为冶金设备运维体系升级的关键方向。

2 冶金机械传动系统常见故障类型分析

2.1 齿轮啮合异常与断裂故障

冶金设备传动系统的齿轮常承受周期性冲击载荷及高频振动等工况,在长时间运转作用下,会导致齿轮齿面产生疲劳剥落、齿轮齿根裂纹的发展延伸和啮合偏差等失效形式。而齿轮材料多为高强度合金钢,虽然有较强的抗疲劳强度,但在润滑不良或载荷突变或制造误差等因素的作用下,齿轮会发生齿形的变形以及产生大量的微裂纹。特别是在高速传动装置中,由于瞬时扭矩突然增大,会产生瞬时高接触应力,使齿轮产生局部断裂,将会影响整个齿轮副的传动精度以及系统稳定性^[1]。

2.2 轴承早期疲劳与磨损问题

冶金机械轴承是传动系统的组成部分,对转子轴的径向和轴向力起着至关重要的作用。由于服役条件恶劣且工作时间长,容易发生疲劳剥落、滚动体压痕、保持架变形等多

【作者简介】李虎(1974-),男,中国河北唐山人,本科,助理工程师,从事冶金研究。

种故障模式，而早期磨损大多因颗粒污染、润滑油品质下降以及

装配偏心等引发，继而导致接触面出现微动腐蚀和金属材料退化。在高温高冲击条件下，由于轴承过热导致的游隙失控会使轴承产生内间隙变动和滚动不稳定现象，从而造成运行噪声异常、温升过快等典型的退化现象。

2.3 联轴器错位与传动不对称

联轴器是实现动力输入与动力输出之间柔性连接的部件，常见的问题是径向偏移、角度偏移和轴向窜动等。由于冶金设备体积庞大、存在热胀冷缩效应，在联轴器安装、联轴器与基础连接以及生产运行阶段均可能出现不同的轴系位移现象。机组运行过程中出现的错位会使得传递载荷在配合面发生周期性的波动，进而加剧机组轴系的振动强度，降低轴系的疲劳寿命，并造成紧固螺栓松动或者法兰连接失效，直接影响整个传动系统的动态平衡性。

2.4 润滑系统异常与润滑失效

润滑系统是保证冶金机械的传动装置得以正常工作的一个运行保障机构，而系统的性能影响着各个零部件的磨损和温升。润滑系统最常见的故障有油品污染、润滑通道堵塞及供油中断等情况。如果在润滑油内混入了氧化产物或者一些细小颗粒物质，会使得零件表面产生磨料的作用而加快零件的磨损。或者当润滑泵的出力不足或者是管道出现泄漏，会导致油膜破裂使金属之间直接发生接触，发生局部粘着磨损或是发生烧结，甚至会引起严重事故如：齿轮卡住、轴承抱死等情况。

2.5 动态疲劳裂纹隐性扩展

冶金传动结构在载荷长期作用下，材料内部必然会有初始缺陷存在，包括冶炼夹杂、加工刀痕及热处理后硬化层厚度分布不均等，长久往复，在这些初始缺陷处将出现微裂纹萌生，随后裂纹向着最大的应力路径方向发生缓慢扩展，并最终表现出裂纹“裂纹隐性成长—临界扩展—瞬间失效”的典型演化规律。尤其是在关键转动部件（如高速轴或支撑轴）表面，由于裂纹很小，普通情况下是无法用肉眼观察，就需要使用超声波、磁粉、声发射等方式进行无损检测时，才可能被发现并对其进行危险性评估。

3 冶金机械传动系统故障诊断技术

3.1 多维信号融合与频谱分析

齿轮啮合传动因受到高频冲击载荷和周期性振动作用，其运行状态极易发生改变，在这一过程中其运行状态变化可由结构响应信号表征。采用多通道信号协同监测诊断方法，基于采集到的振动信号、噪声信号和扭矩波动信号等多源数据获取早期故障前兆如：啮合失稳、齿根裂纹、齿面剥落等的不同故障类别、故障部位以及发展趋势等信息。在数据处理过程中，利用小波包分解来分层提取非平稳信号，在此基础上提取出局部啮合的异常特征。并运用希尔伯特-黄变换

完成非线性冲击分量重构及瞬时频率变化的还原，从而得出齿轮系统能量谱随时间演变的真实规律^[2]。

在频谱域内，齿轮故障会出现以特征频率为中心的幅值增加或者侧频带加宽的情况。通过倍频、谐波、调制频率的变化规律来定位局部刚度降减处，进而推断出其可能发生的断裂位置。此后使用包络谱可以准确地将冲击信号中的幅度调制分量提取出来，然后结合包络谱来提高齿轮齿面微损伤的检测精度。与此同时，将融合后的功率谱密度与统计指标模型进行建模，以实现运行状态的定量评估与趋势预测。

3.2 振动信号分析技术

振动信号分析是一种非接触式的检测方法，因此其具有响应快、信息维度高优点，在齿轮啮合异常、轴承损伤、联轴器偏心等问题的故障辨识中获得了有效应用^[3]。其主要是在关键部位安装高灵敏度加速度传感器采集运行过程中产生的微弱振动信号，并以高采样率来采集原始信号的储存方式确保获取故障特征的完整频谱。

在识别轮传动环节的损伤过程中，常用快速傅里叶变换（FFT）方法将时域信号转化成频域信号，并通过求解其特征频率或者特征频率的谐波分量的方法判断齿轮系统中是否存在断齿、偏载等问题。对于早期的轴承故障检测而言，人们较为常用的便是利用包络调制技术，通过对高频振动信号进行包络滤波的方法，找出滚动体和内外圈之间碰撞冲击的能量变化过程；而小波包分解算法因为其具备良好的时频局部化优点可以很好地完成非平稳信号的多尺度分解，可以将微弱故障成分以及背景噪声很好地分离出来，以此达到从低能特征中提取出故障信号的目的。

3.3 热成像与温度监测技术

冶金机械传动系统工作时，温度变化反映部件摩擦、副系统负荷和润滑的状

态，是极其重要的物理量。红外热成像技术基于被测物体辐射能量与其表面温度的相对应关系，用红外探测器采集不同波长的热辐射信号，并通过电信号形式转变为图像数据，经过二维量化处理之后形成热图图像，使工作人员对设备的关键部位温度场有一个清晰的认识。在实际诊断过程中，这一技术通过对设备的关键部位温度分布及其变化趋势进行持续监测，以准确提取出齿轮啮合区、轴承座、电机壳体等热敏部位特征，从而将因为摩擦增大、润滑失效或局部卡滞而导致的热异常辨识出来。此外辅助使用图像灰度值统计、温差梯度计算与动态时序对比等定量分析方式来构建温度演化模型，来判断是否超过设备的额定热负荷，进而进行早期故障预警。通过有效结合热成像技术与嵌入式温度传感器系统，可以有效获得各点温度数据，提高热成像检测的数据精度以及空间分辨率，为设备的持续稳定运行提供数据支撑。特别是在高转速、高载荷的场景下，使用传统的接触式测温方法受到外界环境干扰较大，而红外热成像法不仅具有非接触性，而且具有较高的响应速度，能够更为及时、准确

地发现这种瞬时性的短暂热冲击或突发异常情况。

3.4 声发射技术

声发射检测技术是一种常用的非破坏性测试方法，可以探测到冶金机械传动系统在载荷作用下发生的材料内部微裂纹扩展、摩擦脱粘、结构位移等情况所引起的瞬态弹性波的变化。该项技术主要是由于能量在局部应力集中点以较快的速度释放产生一种高频的声信号，并由专门的传感器收集起来，可用于监测齿轮啮合区、轴承滚动体接触面等高应力处的状况，可以在裂纹没有形成宏观结构破坏前，实现微损伤的前期识别。在应用上，根据实际需要布置多通道高灵敏度压电传感器阵列，采用波速、传播路径、声源定位等算法进行信号反演解算，获得信号时空分布，找出故障发生的初始部位和发展趋势。数据采集系统常配频谱分析模块和累积能量分析模型，从幅值、频率、能量释放速率等角度提取声发射信号的多维参数值，根据其大小判断材料疲劳发展的程度与局部损伤的程度。

3.5 磁粉与超声波无损检测

磁粉检测和超声波检测是冶金机械传动系统的常规无损检测手段，主要用于识别早期结构微缺陷和疲劳损伤的空间分布特征。磁粉检测是基于铁磁性材料在外加磁场作用下形成的磁力线畸变，在裂纹、夹杂或者焊接缺陷处产生漏磁场，利用磁粉聚集效应形成缺陷可视化的方法。适用于对齿轮齿面、轴类旋转件、联轴器等表面细裂纹的检测，对深度小于 3mm 的疲劳源有很高的灵敏度。为了提高检测分辨率多用荧光磁粉配合交流磁化的方法，同时应用数字图像增强算法来提取缺陷的几何参数。

超声波检测利用高频机械波在材料内传播时对界面不连续性的敏感，在发射/接收换能器上完成对传动系统内部缺陷回波的识别。检测频率一般在 1 ~ 10MHz，主要针对轴颈裂纹、锻件夹杂以及厚壁齿轮轮毂内侧表面异常等情况的识别。同时，利用时差法、幅值法或 TOFD 技术可以将缺陷深度、长度和位置坐标都精准地反映出来，因此能够较为真实地呈现检测结果。

4 冶金机械传动系统故障预测技术

4.1 退化建模与寿命预测

在长期的工作中，冶金机械传动系统的运转部件比如轴承、齿轮、联轴器等总是存在一定的性能退化现象，因此通过模型构建的方式得到的退化曲线能够很好地表示出零部件的实际工作状态。如何建立退化模型就是对零部件寿命预测最重要的一项工作，需要在对温度、振动、声发射等高

频率采集到的数据信息进行分析的基础上，从中提取具有意义的时间序列信息来描绘设备的劣化情况。用的建模方法有随机过程模型（如 Gamma 过程、Wiener 过程）及参数化的统计模型（如对数正态分布、Weibull 分布），它们都是根据设备性能指标随运行时间的概率变化规律进行建模的一种方法。

4.2 基于机器学习的故障趋势识别

冶金机械传动系统的长周期运行中，故障演化规律一般是呈现非线性和具有时变性的，但传统的基于静态模型很难找出其内在的劣化规律。基于机器学习的趋势识别法是直接通过对关键监测数据建立数据驱动模型的方法，在没有给出明确物理模型的基础上刻画故障发展趋势。具体可分为信号预处理、特征提取、模型训练和趋势输出四个步骤，在特征构建部分运用到了时域统计量、频域谱系参数、小波包能量分布等多种特征指标，用信息增益或最大相关最小冗余算法（mRMR）去除冗余特征，进行训练，通过支持向量回归（SVR）模型完成小样本的回归预测任务。

4.3 自适应阈值与健康评分机制

针对冶金机械传动系统故障预测体系而言，基于自适应阈值的构建方法能够很好地解决工况变化所引起的检测灵敏度过低或过高问题。传统固定阈值模式能较好地分出正常状态下的瞬时振荡幅度与异常信号的情况，会造成一些装置出现较大的失误判别概率。而通过采用基于统计学习与时序建模相结合的自适应调整技术，则可以动态地重构阈值边界，经过将历史运行数据以及工况标签、特征权重分布等输入，然后运用滑动窗口法和递推法建立的数据漂移及设备状态演化的判断规则，及时修正自身判定阈值。

5 结语

冶金机械传动系统的正常运转关系到生产的效率和安全问题，建立冶金机械传动系统故障诊断及预测的科学体系，并将先进的传感技术和智能分析手段相互融合，实现“事后维修”阶段向“预测维护”阶段转变。随着工业数字化与人工智能的深度融合，未来冶金装备的智能运维将迈向更加高效、精准、可持续的新阶段。

参考文献

- [1] 丁仕明.冶金企业混合动力液压机械传动系统优化设计分析[J].中国金属通报, 2023(12):81-83.
- [2] 刘翻,史修江.齿轮传动系统故障研究及振动响应分析[C]//第一届全国人因振动工程理论及技术应用学术会议摘要集.2023.
- [3] 刘孝军,任文清.基于振动信号分析的齿轮传动系统故障诊断方法研究[J].煤炭工程, 2025(5).