

# 振动分析在工程机械传动系统故障诊断中的应用研究

潘维军

江苏鑫为鑫信息技术咨询有限公司

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18458

**[摘要]** 工程机械作为现代工程建设的关键装备,其运行状态直接关系到施工效率、成本与安全。传动系统作为工程机械的核心组成部分,其结构复杂、工况恶劣,是故障的高发区域。传统的故障诊断方法多依赖于事后维修或定期检修,存在滞后性、盲目性等弊端,难以满足现代工程机械智能化、高可靠性的需求。振动分析技术作为一种成熟、有效的状态监测与故障诊断手段,通过采集、处理和分析传动系统运行过程中的振动信号,能够精准地识别其内部零部件的早期故障与性能劣化趋势,为实现预测性维护提供了坚实的技术支撑。本文旨在系统阐述振动分析的基本原理,深入探讨其在工程机械传动系统典型故障(如齿轮、轴承等)诊断中的具体应用模式与识别特征,并结合信号处理技术的发展,分析其在工程实践中的实施流程、优势与面临的挑战,展望其未来发展趋势,以期提升工程机械传动系统的可靠性维护水平提供理论参考与实践指导。

**[关键词]** 振动分析; 工程机械; 传动系统; 故障诊断; 状态监测; 预测性维护

## 引言

随着我国基础设施建设的持续深入,工程机械的应用广度与深度不断拓展。诸如挖掘机、装载机、起重机、压路机等设备,常在重载、冲击、变载及恶劣环境下连续作业,其传动系统(通常包括发动机、液力变矩器、变速箱、传动轴、驱动桥等)长期承受着复杂的动态载荷,极易引发齿轮点蚀、断齿、轴承磨损、轴系不平衡、不对中等一系列机械故障。这些故障若未能被及时发现和处理,轻则导致设备停机、影响工程进度,重则可能引发连锁性的破坏,造成巨大的经济损失甚至安全事故。

因此,对工程机械传动系统实施有效的状态监测与故障诊断,变被动维修为主动预防,具有极其重要的现实意义。在众多诊断技术中,振动分析技术因其信息丰富、诊断准确、可在线监测等突出优点,被公认为旋转机械故障诊断最有效的方法之一。它基于一个基本物理事实:任何机械部件在运行过程中都会产生振动,当其状态发生变化(如出现缺陷)时,其振动特征(如频率、幅值、相位等)也会发生相应的、有规律的变化。通过捕捉并解读这些变化,即可实现对设备

故障的早期预警与精确定位。相较于通过温度、压力等间接参数进行判断,振动信号能更直接、更快速地反映机械内部的动力学状态变化,具有显著的先行指示作用。

## 一、振动分析技术理论基础与信号处理方法

振动分析技术的核心在于从复杂的背景噪声中提取出与故障相关的特征信息。其理论基础涉及机械动力学、信号处理及模式识别等多个学科。

工程机械传动系统的振动信号通常具有非平稳、非线性的特点,且伴随着强烈的背景噪声。为了有效地提取故障特征,需要采用一系列信号处理技术。时域分析是最为基础的方法,通过观察振动波形的幅值、均值、方差、峰值、峭度、波形指标等统计指标,可以对设备的总体运行状态有一个初步判断。例如,均方根值(RMS)对稳定的故障发展过程较为敏感,常用于评估振动的总体能量水平;而峰值和峭度指标则对冲击性故障非常敏感,在轴承、齿轮的早期点蚀、剥落诊断中效果显著,能够在故障萌芽期即发出预警。

频域分析是振动分析中最核心、最常用的方法。其理论

依据是傅里叶变换, 它将时域信号转换为频域信号, 从而清晰地展示出振动能量在不同频率成分上的分布。传动系统中的各零部件, 如齿轮的啮合、轴承的滚动、轴系的旋转, 都有其特定的特征频率。这些频率可以通过零部件的几何参数和转速精确计算得出。当某个零部件发生故障时, 其对应的特征频率及其谐波、边频带的幅值会显著增高, 这为故障定位提供了直接依据。例如, 齿轮的啮合频率及其倍频处的异常, 通常指向齿轮本身存在的缺陷; 而若在啮合频率周围出现间隔为转频的边频带, 则往往预示着齿轮存在偏心、磨损或不均匀负载等故障。对于轴承, 其内圈、外圈、滚动体和保持架各自有独特的故障特征频率, 通过监测这些频率成分的出现与增长, 可以实现精准的故障部位识别。

然而, 传统的傅里叶变换适用于平稳信号, 对于工况多变的工程机械, 其信号往往是非平稳的。为此, 时频分析技术应运而生, 如短时傅里叶变换、小波变换和希尔伯特-黄变换等。小波变换具有多分辨率分析的特点, 能够在不同尺度下分析信号的细节与近似, 特别适合于提取信号中的瞬态冲击成分。希尔伯特-黄变换则通过经验模态分解 (EMD) 将信号分解为一系列本征模态函数 (IMF), 再结合希尔伯特变换获得信号的瞬时频率与幅值, 对非线性、非平稳信号具有强大的处理能力。这些方法能够同时在时域和频域表征信号的局部特征, 非常适合于分析瞬态冲击和频率成分随时间变化的信号, 从而更精准地捕捉故障发生的时刻及其演化过程。此外, 高阶谱分析能够抑制高斯噪声, 保留相位信息, 对揭示非线性耦合故障特征有益; 盲源分离技术则试图从混合的观测信号中分离出独立的源信号, 有助于在强噪声背景下提取出微弱的故障源信号。

## 二、振动分析在传动系统典型故障诊断中的应用二、振动分析在传动系统典型故障诊断中的应用

工程机械传动系统的核心旋转部件主要包括齿轮、轴承和轴系, 振动分析技术在这些关键部件的故障诊断中具有不

可替代的作用。

在齿轮故障诊断中, 正常齿轮传动的振动能量主要集中在啮合频率及其谐波成分。当齿面出现点蚀、剥落等分布性缺陷时, 啮合频率及其谐波幅值会显著升高; 而对于裂纹、断齿等局部损伤, 则会产生周期性冲击, 在频谱上表现为啮合频率周围出现间隔为轴转频的边频带。通过分析这些边频带特征, 不仅能判定故障存在, 还能精确定位故障位置。

在滚动轴承状态监测方面, 当轴承元件出现点蚀、剥落时会产生周期性冲击脉冲, 激发系统固有频率形成高频共振。采用包络解调技术可有效提取被调制的故障特征频率, 这些特征频率如同轴承的“身份指纹”。外圈故障特征相对稳定, 而内圈故障则因损伤点旋转会产生明显振幅调制。

在轴系故障识别中, 转子不平衡主要表现为径向振动加剧, 频谱中以工频成分占主导; 不对中故障则会产生显著的二倍频乃至高倍频分量, 在轴向振动中尤为明显; 部件松动时振动信号呈现丰富谐波, 且对负荷变化敏感。通过分析频谱结构、相位及其随工况的变化规律, 可有效区分这些故障类型。

## 三、工程机械振动分析诊断系统的实施流程与挑战三、工程机械振动分析诊断系统的实施流程与挑战

将振动分析技术成功应用于工程机械传动系统的故障诊断, 需要建立一个系统化的实施流程。首先, 需要根据传动系统的结构、工况和关键性, 进行全面的测点规划。测点应尽可能靠近轴承座等动力传递路径, 并保证方向性 (水平、垂直、轴向)。对于变速箱, 需在箱体各轴承座位置布点; 对于驱动桥, 则需关注主减速器和轮边减速器位置。然后, 选择合适的振动传感器 (如 ICP 型加速度传感器, 适应恶劣环境)、数据采集设备 (便携式数采器或在线监测系统), 并制定合理的监测周期 (对于关键设备可采用在线连续监测, 对于一般设备可采用定期巡检)。在数据采集后, 运用前述的信号处理方法进行深入分析, 提取故障特征, 并与已知的故障

特征库、历史基线数据或同类设备数据进行比对, 结合设备运行参数(转速、负载等), 最终做出诊断结论和维护决策, 形成从数据采集到维修建议的闭环管理。

尽管振动分析技术优势显著, 但在工程机械领域的实际应用仍面临一些挑战。首先, 工程机械工况极其复杂, 负载变化剧烈, 振动信号中往往混有大量的作业冲击、发动机振动、液压系统脉动等强噪声干扰, 给微弱故障特征的提取带来了巨大困难。其次, 设备移动性强, 工作环境恶劣(高温、潮湿、粉尘、强电磁干扰), 对传感器的安装固定方式、信号传输的可靠性、数据采集设备的防护等级和续航能力都提出了极高要求。再次, 故障诊断的准确性在很大程度上依赖于专家的经验, 智能化和自动诊断水平仍有待提升, 如何将专家知识转化为可靠的算法模型是当前的研究热点。最后, 建立一个全面、准确的设备状态数据库和故障案例库需要长期的积累, 初始投入成本较高, 这使得一些中小型企业推广应用时心存顾虑。

为了应对这些挑战, 未来的发展趋势将集中在以下几个方面: 一是发展更先进的信号处理与人工智能融合技术, 如深度学习、迁移学习等, 实现故障特征的自动、智能识别与诊断, 降低对专家经验的依赖。例如, 利用深度卷积神经网络(CNN)自动学习振动信号中的故障特征, 或利用深度信念网络(DBN)处理高维非线性特征。二是开发集成化、无线化、微型化的状态监测系统, 适应工程机械移动、分散的特点, 便于实施大规模、低成本的监测。基于物联网(IoT)架构的无线传感网络将成为重要方向。三是推动基于工业互联网和云平台的远程监测与诊断中心建设, 实现数据的集中管理、智能分析与决策支持, 构建预测性维护生态系统, 使数据产生最大价值。四是结合其他监测技术, 如油液分析(监测磨损颗粒)、热成像(监测温度异常)、声发射(监测材料微观变形与裂纹扩展)等, 进行多信息融合诊断, 相互验证, 弥补单一技术的局限性, 形成综合性的故障诊断与健康管理体系

(PHM), 全面提高诊断的全面性、准确性和可靠性。

## 结论

振动分析技术以其深厚的理论基础和强大的实践效能, 在工程机械传动系统故障诊断中扮演着至关重要的角色。它通过解读机械振动这一“语言”, 能够敏锐地洞察传动系统内部齿轮、轴承等关键零部件的早期损伤与性能退化, 为从传统的定期维修、事后维修向先进的预测性维护转变提供了核心的技术路径。本文系统论述了振动分析的技术原理、信号处理方法及其在典型故障诊断中的应用特征, 并剖析了其在工程实践中面临的挑战与未来发展方向。

实践证明, 成功应用振动分析技术, 不仅需要先进的硬件设备和分析方法, 更需要一个系统化的工程管理思维, 包括合理的测点布置、规范的监测流程、持续的数据积累和专业的诊断团队。随着传感器技术、信号处理算法和人工智能的不断进步, 以及与物联网、云计算等新技术的深度融合, 振动分析技术必将在提升工程机械运行可靠性、保障施工安全、降低全生命周期成本方面发挥越来越重要的作用。它不仅是故障诊断的工具, 更是驱动工程机械运维模式变革、推动我国工程机械行业向智能化、高端化迈进的关键使能技术。

## [参考文献]

- [1]王红柱, 陈拥军. 降低运转设备轴承故障检修率的研究[J]. 设备管理与维修, 2025, (18): 77-79.
- [2]宁欣, 秦梦瑶, 任麒英, 朱志华, 范豪杰. 基于实际工况载荷的减速器齿轮组轻量化设计[3]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2025, 53(06): 87-96.
- [4]周胡, 张蕾蕾, 金春伟, 林子义, 楚文楷. 基于类质心优化的大型风电机变桨轴承故障诊断技术[J]. 微特电机, 2025, 53(10): 76-80.
- [5]涂文兵, 高宏, 杨本梦, 娄元阔, 葛可可. 考虑打滑摩擦的滚动轴承的振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2025, 44(19): 31-39.