

# 机械设备故障诊断技术的研究与应用

狄政晓

宁夏宁东泰畅水务有限责任公司 宁夏 银川 750000

**摘要：**机械设备故障诊断技术通过振动分析、油液分析及人工智能等手段，提取设备运行特征以识别故障。振动分析借助信号处理解析振动规律，油液分析通过理化与磨粒检测反映部件状态，人工智能则利用智能模型实现自动诊断。这些技术在泵类、减速机、离心风机及电厂机械中广泛应用，可精准定位故障。当前面临复杂工况特征提取难、多源数据融合难、模型泛化能力不足等挑战，需通过改进信号处理、发展融合技术、增强模型泛化能力应对。

**关键词：**机械设备；故障诊断技术；应用

## 引言

机械设备的稳定运行对工业生产至关重要，故障诊断是保障其可靠运行的关键。传统诊断方法依赖人工经验，难以应对复杂设备与工况。随着技术发展，振动分析、油液分析及人工智能诊断技术逐渐成熟，为精准诊断提供支撑。本文围绕这三类技术，阐述其原理与应用，分析在泵类、减速机等设备中的实践，探讨面临的挑战及对策，旨在为相关领域提供技术参考。

## 1 机械设备故障诊断技术

### 1.1 基于振动分析的故障诊断技术

机械设备运行时，各部件相互作用产生振动，其振动信号蕴含设备运行状态的丰富信息。基于振动分析的故障诊断技术通过在设备关键部位布置加速度传感器、位移传感器等，实时采集振动信号，借助傅里叶变换、小波变换等信号处理方法，将时域信号转换为频域或时频域信号，提取振动信号的幅值、频率、相位等特征参数。正常运行设备的振动信号具有特定规律，当设备出现不平衡、不对中、轴承磨损、齿轮故障等异常时，振动信号的特征会发生显著变化。例如，转子不平衡会导致设备在旋转频率及其谐波频率处出现较大振动幅值；轴承内圈故障则会在特定的故障特征频率处产生振动峰值。技术人员通过分析这些振动特征变化，可准确判断设备故障类型、程度及发生部位，为设备维护和维修提供可靠依据。

### 1.2 基于油液分析的故障诊断技术

油液作为机械设备润滑、冷却和传动的介质，其物理化学性质和所含磨粒信息能直观反映设备内部零部件的运行状况。基于油液分析的故障诊断技术主要涵盖油液理化性能分析、污染度检测和磨粒分析。通过测定油液的粘度、酸值、水分、闪点等理化指标，可判断油液是否氧化变质、受污染或性能下降，及时发现因油液

问题可能引发的设备故障。利用颗粒计数器等仪器检测油液中的固体颗粒数量、尺寸和分布，评估油液污染程度对设备的影响。磨粒分析是该技术的核心，采用铁谱分析、光谱分析等方法，分离并检测油液中的金属磨粒和非金属磨粒。光谱分析可定量测定油液中各类元素的含量，判断磨损零件的材料和磨损程度；铁谱分析则能直观观察磨粒的形貌、大小和成分，根据磨粒特征区分正常磨损、异常磨损和严重磨损，进而识别设备故障原因，如齿轮磨损、轴承疲劳剥落等，实现对设备故障的早期预警和精准诊断。

### 1.3 基于人工智能的故障诊断技术

随着人工智能技术的快速发展，其在机械设备故障诊断领域的应用日益广泛且深入。基于人工智能的故障诊断技术利用机器学习、深度学习等算法，对大量设备运行数据进行学习和分析。通过构建神经网络、支持向量机、随机森林等智能模型，自动提取设备运行数据中的复杂特征和故障模式。在训练过程中，将设备正常运行数据和各类故障数据作为样本输入模型，使模型学习正常状态与故障状态的差异。当模型训练完成后，可实时处理新采集的设备运行数据，快速准确地判断设备是否发生故障以及故障类型。例如，卷积神经网络在处理振动信号、图像数据等方面具有强大优势，能够自动提取深层次特征，有效诊断设备故障；递归神经网络可处理时序数据，适用于分析设备运行状态随时间的变化规律。该技术克服了传统故障诊断方法对人工经验的依赖，能处理非线性、复杂多变的设备运行数据，实现对设备故障的智能、高效诊断，尤其在早期故障识别和多故障诊断方面展现出独特优势。

## 2 机械设备故障诊断技术的应用分析

### 2.1 在泵类设备维修中的应用

(1) 泵类设备长期运行，易因内部部件磨损、气蚀

等出现故障。借助振动分析技术，在泵体关键部位安装振动传感器，实时采集振动数据。例如柱塞泵故障时，其振动信号的频率和幅值会发生特定改变，通过对这些变化的精准分析，可判断出柱塞磨损、密封件损坏等问题，为维修提供准确方向。（2）压力监测也是重要手段。泵的出口压力若出现异常波动，很可能是泵腔内部出现堵塞、叶轮损坏等状况。以多级离心泵为例，通过监测各级出口压力，能定位具体故障级，提高维修效率。对泵的进出口流量进行监测对比，若流量偏差超出正常范围，可进一步排查泵的内部结构是否有损坏。（3）对于一些输送特殊介质的泵，如腐蚀性液体泵，还可利用油液分析技术对其润滑系统油液进行检测。若油液中金属颗粒含量异常升高，表明泵的内部部件可能存在过度磨损，需及时检修更换，以保障泵类设备稳定运行<sup>[1]</sup>。

## 2.2 在减速机设备维修中的应用

（1）减速机的故障常与齿轮、轴承等部件相关。逻辑诊断方法在此发挥重要作用，通过建立故障诊断逻辑模型，对减速机的各个组成部分逐一排查。比如，结合温度传感器、振动监测器的数据，若发现减速机温度过高且振动异常，经分析可能是齿轮啮合不良或轴承损坏。（2）故障树分析（FTA）可将减速机复杂的故障问题分解为多个简单事件和条件。当减速机出现振动过大故障时，运用FTA能查明是齿轮磨损、轴承老化，还是安装不当等原因所致，从而针对性地制定维修方案，如更换磨损齿轮、修复或更换老化轴承、重新调整安装位置等。（3）振动分析在减速机维修中同样关键。运转时，正常振动信号有特定频率和幅度范围，出现频率成分改变、幅值突然增大等异常振动，很可能是内部零件松动、磨损或疲劳损坏。技术人员可依据分析结果，及时修复或更换故障部件，确保减速机正常运行。

## 2.3 在离心风机设备维修中的应用

（1）离心风机运行时，振动监测是首要的故障诊断手段。在风机的轴承座、机壳等部位安装振动传感器，收集振动数据。若风机的主要振动频率异常，且幅值超出正常范围，极有可能是转子不平衡、轴承故障或叶片损坏等原因导致，需进一步深入排查。（2）例如某离心风机在运行中出现异常振动，经振动分析技术检测，确定是转子叶片因长期受气流冲刷磨损，导致质量分布不均，进而引发转子不平衡。技术人员随即对转子叶片进行清洗、修复和动平衡校正，使转子质量分布均匀，有效解决了振动问题。（3）温度监测也不容忽视。离心风机的轴承、电机等部位在正常运行时温度相对稳定，若温度突然升高，可能预示着轴承润滑不良、电机过载等

故障。通过及时监测温度变化，可提前发现潜在问题，采取相应措施，如补充润滑脂、调整电机负载等，保障离心风机稳定运行<sup>[2]</sup>。

## 2.4 在电厂相关机械维修中的应用

（1）电厂机械种类繁多，故障诊断技术需综合运用多种手段。以反渗透高压水泵为例，振动分析诊断技术和红外热成像技术可有效检测故障。当水泵运行异常，驱动端轴承温度偏高时，使用振动分析仪检测振动信号，能判断故障频率来源；利用红外热成像仪检测温度分布，可直观了解轴承发热量情况。（2）如某电厂的反渗透高压泵，投产初期驱动端轴承温度异常升高。经振动分析发现存在电机故障频率传导，红外热成像显示轴承温度远超标准。综合判断是轴承轴向间隙过小，受热挤压变形所致。解体水泵检查证实了这一诊断，通过调整轴承轴向间隙，设备恢复正常运行。（3）对于电厂的其他转动设备，如汽轮机、发电机等，可结合油液监测分析技术获取部件磨损信息，利用电机电流分析技术诊断电机故障，全方位保障电厂相关机械稳定运行，确保电力生产的连续性和可靠性。

## 3 机械设备故障诊断技术面临的挑战与对策

### 3.1 面临的挑战

#### 3.1.1 复杂工况下的故障特征提取困难

机械设备在实际运行中，常处于高动态、强干扰的复杂工况，振动、温度、压力等信号相互耦合叠加，使得故障特征被噪声掩盖。非线性、时变特性显著的运行环境，导致故障信号的频率成分、幅值变化呈现复杂的动态特性，难以通过传统傅里叶变换等静态分析方法捕捉有效特征。例如，高速旋转机械在负载突变时，故障引发的振动信号不仅包含基频及其谐波成分，还会产生调制边带，这些边带信号极易受环境振动、电磁干扰影响而失真。多故障共存时，不同故障特征相互交织，进一步加剧特征提取的难度，致使基于单一特征的诊断方法无法精准识别故障类型与程度。

#### 3.1.2 多源异构数据的融合与处理难题

现代机械设备集成多种传感器，产生振动、电流、油液光谱等多源异构数据，数据在采样频率、格式、物理意义上存在显著差异。振动信号以高频采样捕捉瞬态变化，而油液分析数据采样间隔长，反映长期磨损趋势，这种时空特性差异使得数据同步融合面临技术瓶颈。不同类型数据蕴含的故障信息存在冗余与互补，如何去除冗余数据、挖掘互补特征并建立统一的数据表征模型，成为亟待解决的问题。异构数据的处理需适配不同的算法框架，振动信号适用时频分析，电流信号适合

频谱分析，算法间的协同优化与数据转换机制尚未形成成熟体系，导致多源数据的价值难以充分发挥。

### 3.1.3 故障诊断模型的泛化能力不足

当前故障诊断模型多基于特定工况、设备型号的历史数据训练，对训练数据分布外的工况适应性差。设备运行参数变化、环境温湿度波动、零部件性能退化等因素，会使实际数据与训练数据的特征分布发生偏移，导致模型诊断准确率大幅下降。深度学习模型虽在特定数据集上表现优异，但由于缺乏对物理机理的深度融合，过度依赖数据驱动，难以应对工况突变、罕见故障等复杂场景。例如，基于正常运行数据训练的轴承故障诊断模型，在润滑状态异常、轴系不对中复合工况下，因缺乏相关数据样本支撑，无法准确识别故障模式，模型泛化性能不足严重制约故障诊断技术的工程应用<sup>[3]</sup>。

## 3.2 对策

### 3.2.1 改进信号处理和特征提取方法

针对复杂工况下的信号特征提取难题，可融合经验模态分解（EMD）、变分模态分解（VMD）等自适应分解算法与深度学习方法。EMD通过筛分过程将复杂信号分解为固有模态函数，有效分离不同频率成分，抑制噪声干扰；VMD则基于变分原理优化模态分解，避免模态混叠问题。结合卷积神经网络（CNN）强大的特征提取能力，构建端到端的特征学习模型，可自动从分解后的信号中提取深层故障特征。引入时频分析技术如小波变换、希尔伯特-黄变换，将时域信号转换为时频图像，利用图像识别算法挖掘时频域特征，增强对非线性、非平稳信号的特征提取能力，提升故障诊断的准确性。

### 3.2.2 发展多源数据融合技术

为解决多源异构数据融合难题，可构建基于特征级、决策级融合的多层架构。在特征级融合层面，利用主成分分析（PCA）、独立成分分析（ICA）等降维方法，对不同类型数据进行特征提取与标准化处理，消除数据维度差异；采用自编码器、生成对抗网络（GAN）实现异构特征的映射与融合，构建统一的特征空间。决策级融合则通过D-S证据理论、贝叶斯推理等方法，融合

多个诊断模型的决策结果，综合判断故障类型与程度。开发基于时间序列对齐算法的数据同步技术，解决多源数据采样频率不一致问题，确保数据在时空维度上的一致性，实现多源数据的深度融合与协同分析。

### 3.2.3 增强故障诊断模型的泛化能力

提升故障诊断模型泛化能力需融合数据驱动与物理模型。将设备动力学方程、传热学原理等物理机理嵌入深度学习架构，构建机理-数据融合模型，使模型具备对物理过程的理解能力，降低对特定数据分布的依赖。采用迁移学习技术，将在源领域（如正常工况）训练的模型参数迁移至目标领域（如复杂工况），结合少量目标领域数据进行微调，快速适应新工况。通过数据增强技术，如添加噪声、改变数据尺度等方式扩充训练数据集，模拟不同工况下的数据分布；引入对抗训练机制，训练模型识别分布差异并增强鲁棒性，从而有效提升模型在复杂多变工况下的泛化能力，保障故障诊断的可靠性与稳定性<sup>[4]</sup>。

## 结语

综上所述，机械设备故障诊断技术在理论与应用上均取得显著进展。振动分析、油液分析及人工智能技术各有优势，在多类设备维修中发挥重要作用，提升了故障诊断的精准性与效率。尽管面临复杂工况、多源数据融合及模型泛化等挑战，但通过改进信号处理、发展融合技术及增强模型适应性等对策，可推动该领域持续发展，为机械设备安全稳定运行提供更有力保障。

## 参考文献

- [1] 黄金辉. 机械设备故障诊断技术研究[J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(1):22-24.
- [2] 褚金波. 机械设备故障诊断技术及其发展[J]. 河北农机, 2022(9):85-87.
- [3] 谭晓鹏, 张佩佩. 机械设备轴承故障自动化诊断技术研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(9):14-16.
- [4] 王均佩. 机械设备轴承故障自动化诊断技术[J]. 电动工具, 2023(4):19-22.