

旋转机械故障诊断监测方法研究

卞 磊

国家能源集团宁煤公司煤制油化工安装检修分公司 宁夏 银川 750411

摘 要：本文系统探讨旋转机械故障诊断监测方法。首先分析不平衡、不对中、轴承及转子裂纹等典型故障机理与特征提取方法；其次阐述振动信号、噪声信号及温度监测等传统技术，以及机器学习、深度学习、知识图谱与多源信息融合等智能诊断方法；最后展望智能化、多学科交叉融合及全生命周期健康管理的发展趋势。研究为旋转机械故障诊断提供技术支撑与理论参考。

关键词：旋转机械；故障诊断；信号处理；智能诊断；全生命周期管理

引言：旋转机械作为工业生产的核心设备，其运行稳定性直接关系到生产效率与安全性。随着设备向高速化、精密化发展，故障机理日趋复杂，传统监测手段难以满足早期预警与精准诊断需求。故障诊断技术需突破单一信号分析的局限，融合多源信息与智能算法，以揭示故障动态演化规律。通过构建涵盖特征提取、模型优化与决策支持的全链条技术体系，可实现故障的早期识别与健康管理，为工业装备的可靠运行提供理论支撑与技术保障。

1 旋转机械故障机理与特征分析

1.1 典型故障类型及成因

不平衡故障是旋转机械中最常见的一类故障，主要由转子质量分布不均或安装偏差引起。当旋转部件的质量中心偏离旋转轴线时，在高速运转下将产生周期性离心力，导致振动幅值异常升高，严重时可能引发共振，损坏轴承及其他连接部件。不对中故障通常发生在轴系连接部位，表现为两根相邻轴的中心线未能完全重合。这种偏差可能来源于安装误差、基础沉降或热膨胀差异，造成附加弯矩和扭转力，进而诱发高频振动与轴承过早磨损。该类故障在联轴器附近表现尤为明显，振动频率常呈现多倍频特征。轴承故障是影响旋转机械正常运行的关键因素之一。滚动轴承在长时间使用后，易因润滑失效、异物侵入或载荷过大而出现点蚀、剥落等损伤。这些缺陷会在运行过程中激发冲击振动，并伴随局部温度上升，影响设备整体运行平稳性。滑动轴承则可能出现油膜失稳问题，导致低频涡动或振荡现象。转子裂纹故障多由材料缺陷、应力集中或长期交变载荷作用引起。裂纹的存在会改变转子刚度分布，使系统动态响应发生非线性变化，特别是在启动或停机过程中表现出明显的临界转速偏移与振动突增现象。此类故障具有渐进性和突发性双重特点，对设备安全构成较大威胁。

1.2 故障特征提取方法

为了准确识别上述各类故障，必须通过信号处理手段提取其特征信息。目前常用的特征提取方法主要包括时域、频域以及时频域分析三类。时域特征分析关注振动信号的基本统计特性，如均值、方差、峰值、峭度等参数。这些指标能够反映信号能量分布的变化趋势，适用于初步判断是否存在异常振动。例如，峭度值的升高往往预示着冲击成分的增强，可能对应轴承局部损伤或齿轮断齿等情况。频域特征分析则基于傅里叶变换技术，将时域信号转换为频率成分进行研究。通过观察频谱图中的主频分量及其谐波关系，可以有效识别不平衡、不对中等周期性故障。功率谱密度分析有助于揭示信号在不同频率上的能量分布情况，为区分不同类型故障提供依据。对于某些复杂工况下的非平稳信号，传统时域和频域方法难以全面描述其动态特性。此时，时频域分析方法显示出更强的适应性^[1]。短时傅里叶变换适用于分析信号在短时间窗口内的频率变化，而小波变换则具有良好的时频局部化能力，尤其适合捕捉瞬态冲击和调制信号。这类方法能够在时间和频率两个维度上同步解析信号特征，更有效地提取故障信息，为后续诊断提供可靠依据。

2 旋转机械故障诊断监测技术体系

2.1 传统信号处理诊断方法

2.1.1 振动信号分析技术

振动信号分析是旋转机械故障诊断的基础手段。振动幅值直接反映设备运行过程中的振动剧烈程度，正常工况下，幅值处于稳定区间，一旦出现不平衡、不对中等故障，幅值会显著增大。相位信息则体现了振动信号与参考信号之间的时间关系，通过分析相位变化，可判断故障发生的具体位置和类型。频谱分析将时域振动信号转换到频域，能够清晰呈现不同频率成分的分布情

况,正常机械的频谱具有特定频率特征,如转子旋转频率及其倍频,而故障发生时,会出现新的频率成分或原有频率幅值异常变化。包络解调技术针对轴承等故障产生的调制信号,通过解调处理,将隐藏在高频载波中的低频故障特征信号提取出来,有效增强故障特征的辨识度。倒频谱分析则对频谱进行二次变换,将功率谱中的频率成分转化为倒频率,能够分离和识别复杂频率成分中的周期性故障信息,特别适用于分析齿轮箱等存在多个旋转部件的设备故障,通过提取倒频谱中的峰值,可准确判断故障齿轮的啮合频率及故障程度。

2.1.2 噪声信号分析技术

噪声信号包含丰富的设备运行状态信息。声压级反映噪声的强弱程度,设备正常运行时声压级处于稳定范围,当出现密封泄漏、部件摩擦等故障时,声压级会明显升高。声强分布能够确定噪声源的位置,通过对设备不同部位声强的测量,可快速定位故障发生区域。噪声频谱分析可揭示噪声的频率组成,不同类型的故障对应特定的噪声频率特征,如密封泄漏产生的高频噪声,摩擦故障引起的宽频带噪声等,通过对噪声频谱的分析,能够辅助判断故障类型和严重程度。

2.1.3 温度监测技术

温度是反映旋转机械运行状态的重要参数。轴承、电机等关键部位在正常运行时,温度保持在合理区间,当出现润滑不良、过载等故障时,摩擦生热增加,导致温度异常升高。温度的变化与故障发展密切相关,早期故障阶段,温度可能仅出现轻微上升,随着故障加剧,温度会快速升高。红外热成像技术利用物体表面的热辐射特性,将设备表面温度分布以图像形式直观呈现,能够快速检测出局部过热区域,即使是微小的温度差异也能清晰显示,为故障诊断提供直观的可视化依据,便于及时发现潜在故障隐患。

2.2 智能诊断技术方法

2.2.1 机器学习诊断模型

机器学习在旋转机械故障诊断中展现出强大的模式识别能力。支持向量机通过构建最优分类超平面,能够有效区分不同故障类型的特征向量,在小样本数据情况下也能保持较高的诊断准确率。神经网络则模拟人脑神经元结构,通过多层神经元的连接和权值调整,自动学习故障特征与故障类型之间的复杂映射关系^[2]。在实际应用中,特征选择与降维技术不可或缺,其能够从大量原始特征中筛选出最具代表性的特征,去除冗余信息,降低数据维度,提高模型训练效率和诊断准确性,避免因特征过多导致的“维数灾难”问题。

2.2.2 深度学习诊断方法

深度学习在旋转机械故障诊断领域具有独特优势。卷积神经网络通过卷积层、池化层等结构,自动提取时序振动信号中的深层特征,对局部特征具有强大的感知能力,能够有效识别不同故障模式下的细微特征差异。循环神经网络擅长处理具有时间序列特性的数据,通过记忆单元保留历史信息,能够捕捉故障发展过程中的动态变化规律,适用于对故障进行预测和趋势分析。自编码器作为一种无监督学习模型,能够自动学习输入数据的压缩表示,实现故障特征的有效提取,通过重构误差判断设备运行状态,在异常检测方面表现出色,可及时发现早期故障征兆。

2.2.3 知识图谱诊断技术

知识图谱诊断技术为复杂旋转机械系统故障诊断提供了新途径。其通过对故障知识进行结构化表示,将故障现象、原因、处理方法等信息以图谱形式关联起来,构建完整的故障知识体系。在诊断过程中,利用知识推理技术,根据采集到的故障信息,在知识图谱中进行搜索和匹配,快速定位故障原因并提供解决方案。语义关联分析能够整合多源故障信息,将振动、温度、噪声等不同类型的监测数据与故障知识进行关联分析,挖掘数据之间的潜在关系,提高故障诊断的准确性和全面性,尤其适用于处理复杂系统中多种故障并存的情况。

2.3 多源信息融合诊断技术

2.3.1 多传感器信息融合

旋转机械运行状态可通过多种传感器采集数据进行反映,多传感器信息融合旨在整合这些异构数据。振动、噪声、温度等不同类型传感器采集的数据具有不同的时空特性,信息融合首先需要对这些数据进行时空对齐,确保数据在时间和空间上的一致性,然后进行关联分析,找出数据之间的内在联系。加权平均算法根据各传感器数据的可靠性和重要性赋予不同权重,计算融合后的结果;D-S证据理论通过对不同证据的合成,处理不确定信息,能够有效融合来自不同传感器的故障诊断证据,提高诊断结果的可靠性和准确性。

2.3.2 多模态特征融合

旋转机械故障特征可从时域、频域、时频域等多个模态进行提取,各模态特征具有互补性。时域特征直观反映信号的基本统计特性,频域特征揭示信号的频率成分,时频域特征则展示信号频率随时间的变化情况。多模态特征融合通过挖掘不同模态特征之间的互补信息,采用合适的融合策略将其整合。特征级融合在数据处理的早期阶段进行,将不同模态提取的特征直接组合,形

成新的特征向量,能够充分利用各模态特征的优势,避免信息损失,显著提升故障诊断的准确性,为旋转机械故障诊断提供更全面、可靠的依据。

3 旋转机械故障诊断监测技术发展趋势

3.1 智能化与自主化发展

智能化是未来旋转机械故障诊断的重要趋势之一,核心在于提升系统的自主决策能力与人机协同水平。基于强化学习的自主诊断策略能够根据设备运行状态的变化不断优化判断逻辑,实现诊断方法的自适应调整。该类系统可在无须人工干预的情况下,自动识别异常模式并选择最优的处理路径,提高诊断效率与准确性。构建自主故障预测与维护决策系统也成为研究重点,通过分析历史数据与实时信号,提前预判潜在故障风险,并生成相应的维护建议,为设备管理者提供科学依据。人机协同诊断则强调人在智能系统辅助下的高效参与。虚拟现实(VR)与增强现实(AR)技术的引入,使故障信息呈现更加直观,操作人员可通过可视化界面快速定位问题区域,提升现场排查效率。专家知识库与智能算法的深度融合,有助于弥补单一模型在复杂故障识别中的局限性。例如,将规则推理与神经网络结合,可以兼顾经验判断与数据驱动的优势,提升诊断系统的灵活性与可解释性。

3.2 多学科交叉融合创新

旋转机械故障诊断正逐步突破传统机械工程的边界,向多学科交叉融合的方向演进。其中,机械、电子与信息技术的融合尤为显著。智能传感器的广泛应用提升了数据采集的精度与稳定性,物联网技术实现了设备状态的远程监控,而云计算则为大规模数据存储与分析提供了支持。这些技术的集成使得监测系统具备更强的数据处理能力与实时响应水平^[3]。边缘计算作为新兴技术,在现场端完成关键数据的初步处理,减少了对中心服务器的依赖,有效提升了诊断的时效性与系统鲁棒性。材料科学的发展也为故障诊断带来了新的视角。新型高性能材料在旋转机械中的应用日益广泛,其物理特性变化可能影响设备的振动、温升等表现形式,进而改变故障的发生机制。需要深入研究材料性能演变与故障模式之间的关联,建立更为精准的诊断模型。材料状态监测与设备健康评估的协同发展,有助于从微观层面揭

示早期损伤的形成过程,为预防性维护提供更及时的信息支撑。

3.3 全生命周期健康管理

全生命周期健康管理理念正在逐步取代传统的周期性检修模式,成为设备运维管理的新范式。健康状态评估是这一理念的核心环节,借助退化模型对设备运行状态进行量化描述,能够建立反映性能衰减趋势的健康指数体系。该体系不仅可用于评估当前状态,还可作为后续维护决策的基础。剩余使用寿命预测技术通过对历史数据与实时监测信息的综合分析,估计设备在未来一段时间内的可用时间,为制定科学合理的维修计划提供指导。这种基于状态的维护方式,避免了传统定期维修可能导致的过度维护或维护不足问题,提高了设备的可用率和运行经济性。在运维策略优化方面,视情维护与预测性维护的应用日益广泛。这类策略以设备实际状态为基础,结合环境、负载等因素,动态调整维护时机和内容,从而在保障设备可靠性的前提下,降低不必要的停机时间和维护成本。还需考虑运维成本与设备可靠性的平衡关系,避免因过度追求高可靠性而造成资源浪费。通过建立科学的评价指标体系,可以在不同应用场景中找到最优的运维方案,提升整体运营效益。

结束语

旋转机械故障诊断技术已从单一信号分析向多源信息融合、智能诊断与全生命周期管理演进。未来需深化多学科交叉创新,强化智能算法的自主决策能力,并构建覆盖设计、制造、运维全过程的健康管理体系。通过材料性能监测、边缘智能与数字孪生技术的协同应用,可进一步提升故障诊断的时效性与准确性,为工业装备的智能化运维提供关键技术支撑,推动制造业向高效、绿色、可持续方向升级。

参考文献

- [1]张益沛.旋转机械故障诊断技术在炼钢设备中的运用分析[J].冶金与材料,2023,43(01):71-73.
- [2]李震.旋转机械故障诊断技术在炼钢设备的应用研究[J].中国金属通报,2021(11):63-64.
- [3]张金玉.旋转机械故障诊断技术在炼钢设备中的应用研究[J].冶金管理,2021(07):37-38.