

机械设备状态监测与智能故障诊断技术研究进展

程 军

中国石化中原石油化工有限公司 河南 濮阳 457000

摘 要：状态监测与智能故障诊断技术是保障机械设备安全可靠运行的关键。振动、温度、油液及电气等监测技术，可实时捕捉设备运行状态信息；人工智能、机器学习、深度学习等智能诊断技术，实现故障精准识别与预测。多源信息融合、智能化、自动化成为发展主流，故障预测与健康管理及与工业互联网的深度融合，显著提升设备运维效率与可靠性，为工业智能化转型提供重要技术支撑。

关键词：机械设备；状态监测；智能故障诊断；技术

引言

在现代工业生产中，机械设备的稳定运行直接关系到生产效率与安全。状态监测与智能故障诊断技术作为保障设备可靠性的核心手段，受到广泛关注。振动监测捕捉设备机械动态特征，温度监测反映热状态变化，油液监测分析润滑磨损情况，电气监测评估电气系统性能。在此基础上，人工智能等智能诊断技术进一步挖掘数据价值。本文围绕机械设备状态监测与智能故障诊断技术，系统梳理其研究进展与发展趋势。

1 机械设备状态监测技术

1.1 振动监测技术

振动监测技术基于机械设备运行时振动信号与设备状态紧密关联的特性，通过采集设备振动信号，分析其频率、幅值、相位等参数，实现对设备运行状态的评估。在实际应用中，加速度传感器、速度传感器和位移传感器是常用的振动信号采集工具，可安装于轴承座、机壳等关键部位，获取设备振动的时域和频域数据。时域分析能够直观反映振动信号的波形特征，帮助判断是否存在异常冲击；频域分析则通过傅里叶变换，将时域信号转换为频谱，从而识别振动信号中不同频率成分，确定故障类型，如不平衡、不对中、轴承磨损等故障均会在频谱上呈现特定频率特征。该技术具有灵敏度高、响应速度快的特点，能够在故障初期捕捉到微小振动变化，适用于旋转机械、往复机械等多种设备的状态监测，为设备的预防性维护提供重要依据。它也存在一定局限性，复杂工况下振动信号易受干扰，需要专业的信号处理和分析技术来排除干扰，准确提取故障特征。

1.2 温度监测技术

温度监测技术依据设备运行过程中部件温度变化与设备状态的对应关系，通过测量设备关键部位的温度，判断设备是否正常运行。常用的温度监测方法包括接

触式和非接触式。接触式测温利用热传导原理，如热电偶、热电阻等传感器直接与被测物体接触，通过测量传感器的电信号变化来获取温度值，具有测量精度高的优点，但在高温、高速或不易接触的场合应用受限。非接触式测温则基于物体的热辐射特性，利用红外测温仪、热像仪等设备，通过接收物体表面辐射的红外能量来计算温度，可实现远距离、大面积的温度测量，适用于高温、高压、旋转等特殊工况下的设备温度监测。设备异常运行时，如机械摩擦加剧、电气过载等情况都会导致局部温度升高，通过实时监测温度变化趋势，能够及时发现设备潜在故障，预防故障进一步恶化。非接触式测温易受环境因素影响，如环境温度、物体表面发射率等，需要进行合理的修正和补偿，以确保测量结果的准确性。

1.3 油液监测技术

油液监测技术是通过机械设备的润滑系统或液压系统中的油液进行分析，获取设备磨损、润滑状态等信息的监测方法。油液中包含着设备摩擦副磨损产生的金属磨粒、污染物颗粒以及油液本身的理化性能变化信息。常用的油液分析方法包括油液理化性能分析、污染度分析和磨损颗粒分析。油液理化性能分析通过检测油液的粘度、酸值、水分、闪点等指标，判断油液是否氧化变质、混入水分或其他杂质，评估油液的润滑性能和使用寿命。污染度分析则利用颗粒计数器等设备，测定油液中污染物颗粒的数量、尺寸分布，了解油液的清洁程度，防止污染物对设备造成磨损。磨损颗粒分析通过铁谱分析、光谱分析等技术，对油液中的磨粒进行分离、观察和成分分析，确定磨损部位、磨损类型和磨损程度，如正常磨损、粘着磨损、疲劳磨损等在磨粒形态和成分上具有不同特征。油液监测技术能够提供设备磨损的早期预警，监测设备的润滑状态，延长设备使用寿

命,降低维修成本,但分析过程相对复杂,需要专业的仪器设备和技术人员。

1.4 电气监测技术

电气监测技术针对机械设备中的电气系统,通过监测电气参数和电气设备状态,判断电气系统的运行状况。对于电机、变压器、断路器等电气设备,主要监测其电压、电流、功率、绝缘电阻、局部放电等参数。电压和电流监测能够反映电气设备的负载情况和运行稳定性,当出现电压波动、电流异常增大等情况时,可能表明设备存在故障或异常运行状态。功率监测可用于评估设备的能效和运行效率,发现能耗异常问题。绝缘电阻监测是判断电气设备绝缘性能的重要手段,绝缘性能下降可能导致设备漏电、短路等故障,危及设备和人员安全。局部放电监测则通过检测电气设备内部局部放电产生的脉冲电流、超声波、电磁波等信号,发现设备内部的绝缘缺陷、局部过热等潜在故障。电气监测技术能够实时、准确地反映电气系统的运行状态,及时发现电气故障隐患,保障电气设备的安全可靠运行,但电气系统的电磁环境复杂,监测信号易受电磁干扰,需要采取有效的抗干扰措施,确保监测数据的准确性和可靠性。

2 机械设备智能故障诊断技术

2.1 基于人工智能的故障诊断技术

基于人工智能的故障诊断技术以模拟人类专家思维和推理过程为核心,构建智能化故障诊断系统。通过知识工程将领域专家的经验、原理性知识等进行有效组织与表达,建立包含大量规则与案例的知识库,再结合推理机实现对机械设备故障的逻辑推理与判断。在实际应用中,当系统获取设备运行数据后,推理机依据知识库中的规则,对数据特征进行分析比对,逐步缩小故障范围,最终得出故障结论。该技术尤其适用于复杂工业设备,能够处理难以用数学模型精确描述的故障诊断问题,利用专家知识的沉淀和逻辑推理机制,实现对设备故障的快速定位与准确诊断,提升故障诊断的智能化水平^[1]。

2.2 基于机器学习的故障诊断技术

基于机器学习的故障诊断技术通过对大量设备运行数据的学习,挖掘数据中隐含的故障特征与规律。它利用分类、聚类、回归等算法,对设备正常运行状态和各类故障状态的数据进行训练,构建故障诊断模型。在训练过程中,算法不断调整模型参数,使模型能够准确识别不同状态数据的特征差异。当新的设备运行数据输入时,训练好的模型可快速判断设备当前运行状态,识别潜在故障。例如,在旋转机械设备故障诊断中,通过采集振动、温度等数据,运用支持向量机等算法进行训

练,模型可精准区分轴承磨损、不平衡等多种故障类型,为设备维护提供科学依据,凭借强大的数据处理与模式识别能力,有效提升故障诊断的效率与准确性。

2.3 基于深度学习的故障诊断技术

基于深度学习的故障诊断技术凭借其强大的自动特征提取能力,在机械设备故障诊断领域展现出独特优势。深度学习模型如卷积神经网络(CNN)、循环神经网络(RNN)等,可直接对原始设备运行数据进行处理,无需人工手动提取特征。以振动信号为例,CNN能够自动从复杂的振动波形数据中提取深层次、抽象的故障特征,通过多层神经元的学习与映射,构建高度非线性故障诊断模型。RNN则适用于处理具有时序特性的数据,能够捕捉设备运行状态随时间变化的规律。这些模型在大量数据的训练下,能够精准识别各种复杂故障模式,对早期微弱故障也具有较高敏感度,在航空发动机、数控机床等高端设备的故障诊断中发挥着重要作用,为设备的可靠性运行提供有力保障^[2]。

2.4 基于大数据和物联网的故障诊断技术

基于大数据和物联网的故障诊断技术依托物联网传感器实时采集设备运行过程中的海量数据,涵盖振动、温度、压力等多维度信息,这些数据通过网络传输至数据中心进行存储与分析。借助大数据分析技术,对设备全生命周期内的运行数据、历史故障数据等进行深度挖掘,能够发现数据间的潜在关联与规律。例如,通过分析设备长时间运行数据的变化趋势,可预测故障发生的可能性与时间节点。结合物联网实现对设备的远程监控与实时诊断,技术人员可通过网络随时随地获取设备状态信息,及时发现异常并采取相应措施,打破了时间与空间的限制,有效提升设备管理的智能化与高效化水平,降低设备故障带来的损失。

3 机械设备状态监测与智能故障诊断技术的发展趋势

3.1 多源信息融合

(1)随着机械设备复杂度提升,单一传感器获取的振动、温度等数据已难以全面反映设备状态,多源信息融合技术通过集成振动、声发射、油液分析、红外热像等不同类型传感器数据,结合信号处理算法和数据挖掘技术,构建多维度设备运行画像。例如,在风力发电机组监测中,将齿轮箱振动信号与润滑油铁谱数据融合,能更精准识别齿轮磨损程度与故障类型。(2)多源信息融合需解决数据时空对齐、特征互补等难题,深度学习中的注意力机制与多模态融合网络为此提供有效途径。通过建立端到端模型,可自动提取各数据源关键特征并加权融合,在复杂工况下显著提升故障诊断准确率,减

少误判漏判风险。(3)未来,随着物联网传感器微型化与低功耗技术发展,多源信息融合将向高频率、高精度方向延伸,同时与边缘计算结合实现数据本地处理,降低传输延迟与云端负载,为设备实时健康评估提供更全面的数据支持。

3.2 智能化和自动化

(1)传统基于阈值判断与人工经验的故障诊断方式,难以适应现代设备动态复杂工况,智能化和自动化技术通过引入机器学习、深度学习算法,实现从数据采集、特征提取到故障诊断的全流程自动化。例如,卷积神经网络(CNN)可自动学习振动信号的时频域特征,在滚动轴承故障诊断中达到95%以上准确率。(2)强化学习与迁移学习的应用,使智能诊断系统具备自主优化与跨工况适应能力。通过与设备运行环境交互,强化学习算法能动态调整诊断策略;迁移学习则可将已训练模型快速应用于新场景,大幅减少数据标注成本与模型训练时间。(3)在工业现场,智能诊断系统通过集成自动化控制模块,可实现故障预警后自动调整设备运行参数或触发停机保护,配合机器人巡检与自动采样技术,逐步构建无人化、自适应的设备运维体系,显著提升生产安全性与运维效率^[3]。

3.3 故障预测与健康管理(PHM)

(1)故障预测与健康管理(PHM)突破传统事后维修与定期维护模式,基于设备运行数据构建退化模型,结合剩余使用寿命(RUL)预测算法,实现故障发生前的精准预警。例如,利用粒子滤波算法对锂电池容量衰减进行建模,可提前预测电池失效时间,为更换决策提供依据。(2)PHM系统融合数据驱动与物理模型方法,将设备运行机理与机器学习算法结合,既保证预测结果的物理可解释性,又能捕捉复杂非线性退化规律。通过建立设备健康指标体系,实时量化设备健康状态,为维修计划制定提供科学依据。(3)随着数字孪生技术发展,PHM系统可构建与物理设备实时映射的虚拟模型,通过仿真推演不同工况下设备退化过程,优化维护策略并评估改造升级效果,实现从故障诊断到主动维护的跨

越,降低设备全生命周期运维成本。

3.4 与工业互联网和智能制造的深度融合

(1)工业互联网平台为机械设备状态监测提供海量数据传输、存储与分析能力,通过边缘节点实时采集设备数据并上传云端,利用大数据分析技术挖掘设备运行规律与潜在故障模式。例如,在石化企业中,基于工业互联网平台整合全厂区设备数据,实现关键设备集群化健康管理。(2)与智能制造的融合使故障诊断技术深度嵌入生产流程,通过与制造执行系统(MES)、企业资源计划(ERP)系统的数据交互,将设备状态信息与生产计划、物料调度联动。当设备出现异常时,系统自动调整生产排程,减少停机损失并优化资源配置。(3)5G与低时延通信技术的应用,加速设备数据实时交互与协同诊断,推动形成跨地域、跨企业的远程诊断与协同运维模式。未来,随着工业互联网标识解析体系完善,设备数据的标准化共享将进一步提升,助力构建智能化、协同化的制造业生态^[4]。

结语

综上所述,机械设备状态监测与智能故障诊断技术通过多种监测手段与智能算法的结合,已取得显著研究成果与应用成效。这些技术的发展极大提升了设备故障预警能力与运维管理水平,有效降低设备停机风险与维护成本。未来,随着技术的持续创新,多源信息融合、智能化与工业互联网深度融合等趋势将推动该领域迈向更高阶段,为工业高质量发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]于永哲.浅谈油田机械设备状态监测与故障诊断技术[J].中国设备工程,2024(11):163-165.
- [2]王洋,杨立.旋转机械红外智能状态监测与故障诊断[J].光学精密工程,2022,30(16):1905-1914.
- [3]荣洪国.机械电气设备维修中的故障诊断和解决措施[J].模具制造,2024,24(5):243-245.
- [4]马梦华.大型机械状态监测与故障智能诊断方法研究[J].信息与电脑,2020,32(13):122-123.