

电气工程及其自动化背景下机电设备故障诊断技术研究

梁艳超 21132219850721101X

摘要：本文系统综述了机电设备故障诊断的技术体系与实现方法，重点讨论信号采集、预处理与特征提取、数据驱动与模型融合策略，分析复杂工况下的挑战并提出基于多源融合、边缘计算与数字孪生的技术路径，以提升诊断的实时性、鲁棒性与工程可用性。

关键词：机电设备故障诊断；信号采集；特征提取；多源融合；边缘计算；数字孪生；深度学习；预测维护

一、引言

随着电气工程及其自动化水平的不断提升，机电设备朝着大型化、复杂化、智能化方向发展，其内部结构与工作机制日益复杂，故障发生的诱因也呈现多元化特征。在智能制造、能源互联网等战略的推动下，机电设备故障诊断技术已成为提升工业生产智能化水平的核心支撑，朝着精准化、高效化、智能化的方向加速发展。

二、机电设备故障诊断的核心技术体系

（一）故障信号采集技术

故障信号采集是故障诊断的基础，其核心在于精准获取反映设备运行状态的各类物理信号。电气信号采集通过电压传感器、电流传感器、功率传感器等设备，实时监测设备的电压、电流、功率因数、谐波含量等参数，这些参数的异常波动往往与电路故障、电机绕组损坏等问题相关。振动信号采集采用加速度传感器、速度传感器、位移传感器，捕捉设备运行过程中的振动幅值、频率、相位等信息，轴承磨损、转子不平衡、齿轮啮合不良等机械故障会直接导致振动信号特征发生变化。温度信号采集通过热电偶、红外测温仪、温度传感器，监测设备关键部件的温度变化，过热故障可能引发绝缘老化、部件变形等严重问题。

（二）信号预处理与特征提取技术

原始采集信号中包含大量噪声干扰，需通过预处理技术提升信号质量。滤波技术是核心预处理手段，低通滤波器、高通滤波器、带通滤波器分别用于去除高频噪声、低频干扰与特定频段噪声，自适应滤波技术能根据信号特征动态调整滤波参数，有效抑制复杂干扰。信号放大技术通过运算放大器提升微弱信号的幅值，便于后续分析；信号归一化、detrending 处理则用于消除信号中的趋势项与量纲影响。特征提取是故障诊断的关键环节，其目标是从预处理后的信

号中提取能反映故障本质的特征参数。时域分析通过计算信号的均值、方差、峰值、峭度、偏度等统计量，反映信号的时域分布特征；频域分析基于傅里叶变换，将时域信号转换为频域信号，通过功率谱密度、频谱图分析信号的频率分布，识别与故障相关的特征频率；时频域分析结合时域与频域分析的优势，小波变换、短时傅里叶变换、希尔伯特-黄变换等技术能有效处理非平稳信号，捕捉信号的时频局部特征，尤其适用于复杂故障的特征提取。

三、技术发展面临的挑战

（一）复杂故障诊断难度大

现代机电设备的复杂性导致故障呈现多因素耦合、渐变演化、隐匿性强等特征，单一故障信号往往难以全面反映故障本质，多故障并发、故障与干扰信号叠加等情况进一步增加了诊断难度。部分故障在早期阶段特征不明显，信号信噪比低，传统特征提取方法难以有效捕捉故障信息，易导致漏诊或误诊。此外，设备运行工况的动态变化（如负载波动、转速变化）会影响故障特征的稳定性，使诊断模型的泛化能力受到挑战，如何构建适应复杂工况与多故障类型的诊断模型，是当前面临的核心难题。

（二）实时性与可靠性的平衡

工业场景对故障诊断的实时性要求日益提高，需在故障萌芽阶段快速识别并预警，为维护决策争取时间。但复杂诊断算法的计算量较大，尤其是人工智能算法的训练与推理过程，难以满足高实时性需求，如何在保证诊断精度的前提下优化算法结构、提升计算效率，实现实时诊断，仍是技术难点。同时，诊断系统的可靠性直接影响诊断结果的可信度，传感器故障、信号传输干扰、数据丢失等问题会导致诊断误差，恶劣工业环境（如高温、高湿度、强电磁干扰）也会影响诊断设备的稳定性，如何提升诊断系统的抗干扰能力与容错性，确保长期可靠运行，是技术推广应用的关键。

（三）数据质量与标注难题

数据驱动型诊断方法依赖大量高质量标注数据进行模型训练，但工业场景中故障数据往往稀缺，尤其是罕见故障的样本数量极少，导致模型训练不充分，诊断精度受限。同时，实际采集的数据中包含大量冗余信息与噪声，数据质量参差不齐，需耗费大量人力物力进行数据清洗与标注。此外，不同设备、不同工况下的数据分布存在差异，导致训练好的诊断模型难以迁移应用，泛化能力不足，如何通过小样本学习、迁移学习等技术突破数据依赖，提升模型的通用性，是当前的重要研究方向。

四、未来发展趋势

（一）智能化与自主化升级

人工智能技术的深度融合将推动故障诊断向自主化、智能化方向发展。深度学习与强化学习的结合，将实现诊断模型的自主学习与优化，无需人工干预即可适应设备运行状态的动态变化；联邦学习技术通过多设备数据共享训练模型，在保护数据隐私的同时提升模型性能；数字孪生技术构建设备虚拟镜像，实时映射物理设备运行状态，通过虚拟仿真模拟故障演化过程，辅助故障诊断与预测，实现“虚拟-物理”协同诊断。此外，基于知识图谱的智能推理技术将整合设备结构、运行数据、维护记录等多源信息，实现故障原因的深度追溯与维护方案的智能生成。

（二）多源融合诊断技术发展

多源融合诊断通过整合电气、振动、温度、声信号等多维度数据，结合不同诊断方法的优势，实现数据互补与方法协同，提升诊断精度与鲁棒性。传感器融合技术将进一步向微型化、集成化、智能化方向发展，多模态传感器的集成应用将实现多参数同步采集；数据融合技术通过关联分析、特征级融合、决策级融合等方式，挖掘数据间的潜在关联，消除单一数据的局限性；方法融合技术（如模型诊断与数据驱动诊断结合、传统信号处理与人工智能算法结合）将充分发挥各类方法的优势，提升复杂故障的诊断能力。

（三）一体化与网络化构建

故障诊断系统将逐步实现从单一设备诊断向多设备、全系统一体化诊断转型，通过物联网技术构建网络化诊断平台，实现设备状态的集中监测与远程诊断。边缘计算技术的应用将部分诊断任务部署在设备端，降低数据传输延迟，提升实时诊断效率；云计算平台为海量数据存储与复杂计算提供支撑，实现诊断模型的集中训练与升级；5G技术的高带宽、低时延特性将保障信号传输的实时性与稳定性，推动远程运维与协同诊断的发展。此外，诊断系统与设备控制系统、维护管理系统的深度集成，将实现故障诊断、预警、维护决策的闭环管理，提升设备全生命周期管理水平。

五、结论

在电气工程及其自动化技术的支撑下，机电设备故障诊断技术已成为保障工业生产安全高效运行的关键支撑，其技术体系不断完善，诊断精度与效率持续提升。未来，随着人工智能、数字孪生、物联网等新技术的不断突破，机电设备故障诊断技术将朝着智能化、多源融合、一体化网络化方向发展，通过技术创新突破现有瓶颈，实现故障的精准预测与自主诊断。

参考文献

- [1]李德刚.红外诊断技术在电气设备状态检测中的研究与应用[D].山东大学,2010.
- [2]朱德恒,谈克雄.电气设备状态监测与故障诊断技术的现状与展望[J].电力设备,2003,(06):1-8.
- [3]李博.变电站主电气设备状态监测和故障诊断技术应用[J].中国电力,2002,(11):40-44.

