

机电一体化设备故障诊断方法的研究进展

侯文军

山东能源集团鲁西矿业唐口煤业有限公司, 中国·山东 济宁 272000

摘要: 论文综述了机电一体化设备的故障诊断方法, 分析了传统诊断技术的优势与局限, 并重点探讨了基于人工智能和多源数据融合的智能诊断方法。研究表明, 综合应用传统与智能方法能够显著提高诊断的准确性和实时性, 为复杂设备的预测性维护提供支持。未来, 智能故障诊断将进一步向自动化和自适应化方向发展。

关键词: 机电一体化; 故障诊断; 智能诊断

Research Progress on Fault Diagnosis Methods for Mechatronics Equipment

Wenjun Hou

Shandong Energy Group Luxi Mining Tangkou Coal Industry Co., Ltd., Jining, Shandong, 272000, China

Abstract: This paper reviews the fault diagnosis methods of mechatronics equipment, analyzes the advantages and limitations of traditional diagnostic techniques, and focuses on exploring intelligent diagnostic methods based on artificial intelligence and multi-source data fusion. Research has shown that the comprehensive application of traditional and intelligent methods can significantly improve the accuracy and real-time performance of diagnosis, providing support for predictive maintenance of complex equipment. In the future, intelligent fault diagnosis will further develop towards automation and adaptation.

Keywords: mechatronics integration; fault diagnosis; intelligent diagnosis

0 前言

机电一体化是集成机械工程、电子工程、计算机技术和自动化控制的多学科技术, 广泛应用于现代工业生产中。其设备涵盖了数控机床、工业机器人、自动化生产线等, 通过高精度控制和智能化管理, 显著提升了生产效率、产品质量和柔性化程度。在当前制造业向智能化转型的背景下, 机电一体化设备已成为智能制造的核心要素。

1 机电一体化设备的故障类型及特征

机电一体化设备的故障类型多样且复杂, 通常可分为机械类故障、电气类故障和控制系统故障。每种故障类型有其特定的表现特征和诊断难点, 准确识别这些故障类型和特征是实现高效诊断的基础。

1.1 机械类故障

机械类故障主要包括磨损、变形、裂纹、松动和轴承损坏等问题。这类故障通常由设备长期运行、超负荷工作或材料老化引起。在机械类故障中, 磨损现象最为常见。例如, 齿轮磨损会导致传动系统运行不稳定, 增加振动和噪声; 而轴承磨损则可能引发高温、振动异常等问题。此外, 裂纹和松动等故障易引发部件脱落或断裂, 严重时会导致设备停止运转。机械故障的主要特征表现为振动频率的变化、温度升高、运转噪声异常等, 这些信号为诊断提供了直接的依据。

1.2 电气类故障

电气类故障常见于电机、线路和传感器系统中, 包括短路、接触不良、过热和电压波动等问题。这些故障的发生

往往是由于线路老化、接触点腐蚀或电气元件质量不佳所致。短路故障通常会导致电机或其他电子部件突然断电, 而造成设备停机; 而接触不良则可能引发间歇性故障, 导致系统运行不稳定。此外, 过热现象常出现在长时间高负荷运行时, 可能导致电气元件损坏或失效。电气类故障的特征多表现为电流、电压的异常波动和温度异常, 能够通过传感器监测到变化, 为故障检测提供重要信息。

1.3 控制系统故障

控制系统故障通常包括信号干扰、数据丢失、程序异常和通信故障等。由于控制系统依赖复杂的程序和网络通信来实现各组件的协调工作, 任何干扰或程序错误都可能影响系统的正常运行。例如, 信号干扰可能导致传感器采集数据不准确, 影响系统对外界环境的判断; 数据丢失和通信故障则会中断各模块的协同工作, 导致设备行为异常。此外, 控制程序发生错误或逻辑偏差时, 设备可能会出现响应迟缓、执行错误命令或运行逻辑混乱等问题。控制系统故障的特征较为隐蔽, 通常表现为信号传输异常、系统延迟或误动作, 需要深入分析系统日志和数据以进行准确诊断。

1.4 故障诊断的挑战

机电一体化设备的故障诊断面临着多样化和复杂性的挑战。机械类、电气类和控制系统故障往往交织在一起, 使得故障根源的定位更加困难。此外, 设备故障的特征信号通常具有非线性和不确定性, 需要多种诊断手段的结合才能实现准确诊断。随着机电一体化设备向高精度、智能化方向发展, 故障诊断方法的改进和创新成为保障设备稳定性的关键。

2 传统故障诊断方法

传统故障诊断方法是机电一体化设备早期检测和故障识别的基础, 尽管随着智能技术的发展, 传统方法的局限性日益凸显, 但这些方法在简单故障诊断和特定场景中仍然具有重要应用价值。常见的传统故障诊断方法包括经验诊断法、信号处理方法和模型法。

2.1 经验诊断法

经验诊断法基于操作人员对设备的日常监测和运行经验, 通过观察设备的振动、噪声、温度等外在表现, 结合过去故障记录和维修经验, 快速判断出常见的故障原因。经验诊断法无需复杂的工具和设备, 操作简单, 适用于设备结构简单、故障类型明确的场景。例如, 维修人员可以通过倾听设备运转时的异响判断轴承的磨损情况, 或者通过触摸感受温度来识别电机过热问题。然而, 经验诊断法对操作人员的技术水平和经验依赖较高, 判断精度有限, 难以应对复杂或隐蔽的故障类型。

2.2 信号处理方法

信号处理方法通过分析设备运行过程中产生的物理信号特征, 如振动信号、声波信号和温度变化, 识别故障的类型和位置。常见的信号处理方法包括频谱分析、时域分析和波形特征分析等。频谱分析利用傅里叶变换将信号从时域转换到频域, 通过观察频谱图中的特征峰值和频率成分判断机械部件的故障, 例如齿轮磨损或轴承失效。时域分析关注信号的波形特征, 如峰值、均值和冲击等, 用于判断设备的运转平稳性和可靠性。信号处理方法在诊断早期机械故障方面具有较高的有效性, 尤其在检测振动、冲击等问题时应用广泛。然而, 这类方法对复杂环境下的噪声干扰较为敏感, 且难以分析多源信号的交互影响。

2.3 模型法

模型法通过建立机电一体化设备的数学模型或物理模型, 根据系统的正常工作状态和故障状态的差异进行故障判断。这种方法通常基于设备运行的理论模型, 将设备的实际运行数据与模型预测数据进行对比, 识别出异常信号或状态。例如, 在电机故障诊断中, 模型法可以通过建立电机的运行方程, 实时监测电流和电压数据, 识别出电路异常的情况。模型法通常具有较高的诊断准确性, 适用于结构较为清晰、运行状态可以通过数字描述的设备。然而, 建立精确的模型往往需要大量实验和调试, 且模型的适用性会因设备老化和环境变化而受到影响, 使得模型法在复杂系统中的推广应用受到一定限制。

3 智能故障诊断方法的研究进展

随着人工智能、机器学习、大数据和边缘计算等技术的快速发展, 智能故障诊断方法在机电一体化设备中的应用逐渐成为研究热点。这些新兴方法能够突破传统诊断方法的限制, 提供更高的准确性和实时性, 实现复杂系统中多源数

据的有效分析与故障预测^[1]。目前, 主要的智能故障诊断方法包括基于人工智能、机器学习、大数据和边缘计算的方法。

3.1 基于人工智能的方法

人工智能方法在故障诊断中发挥了越来越重要的作用, 尤其是在复杂系统和海量数据的环境下。神经网络是广泛应用于智能诊断中的典型人工智能方法之一, 通过模拟人脑的神经网络结构, 学习设备在正常和故障状态下的特征数据, 自动进行故障分类和预测。卷积神经网络在图像和时间序列信号的处理上表现出色, 通过自动提取特征, 能有效识别设备振动信号、温度曲线等数据中的故障模式。此外, 深度学习进一步提升了故障诊断的准确率和泛化能力, 使系统能够从大量历史数据中学习潜在的故障规律, 特别适用于复杂设备中的微小故障和早期诊断。然而, 人工智能方法依赖于大量标注数据, 且模型训练过程需要较强的计算资源, 这对实时诊断提出了较高的要求。

3.2 基于机器学习的方法

机器学习技术因其数据驱动的特性而广泛应用于机电一体化设备的智能诊断中。常用的机器学习方法包括支持向量机、决策树、随机森林和集成学习等, 这些方法能够通过分类和回归算法, 从数据中提取故障特征并进行故障分类。例如, 支持向量机能够在高维空间中找到不同故障状态间的最优分隔面, 实现准确的故障识别。决策树和随机森林通过特征选择和多模型集成, 能有效降低单一诊断模型的误判率。此外, 集成学习通过多种模型的组合进一步提升了诊断系统的鲁棒性和准确性。机器学习方法对数据量的依赖较小, 适合小样本数据的故障分类和预测, 在设备故障的早期检测中表现出良好效果。但这些方法在处理高维、复杂数据时, 往往需要手动进行特征提取和数据预处理, 诊断的灵活性和扩展性不及深度学习算法。

3.3 基于大数据与云计算的方法

大数据和云计算的融合应用为故障诊断提供了强大的数据处理和存储能力, 使得多源异构数据的融合分析成为可能。在机电一体化设备中, 大量传感器和监控系统生成的实时数据通过云平台进行存储和处理, 为设备的远程监控、状态预测和故障分析提供支持。基于大数据技术的故障诊断系统能够从数据中自动提取特征模式, 并利用统计分析和机器学习技术进行故障识别。例如, 历史数据的分析能够帮助识别长期的性能变化趋势, 进行故障的预测性维护。云计算平台不仅提升了数据处理效率, 还使得诊断系统的扩展更加便捷。然而, 大数据方法对网络带宽和数据安全有较高要求, 在传输大量实时数据时可能会出现延迟, 影响诊断的实时性。

3.4 基于边缘计算的方法

边缘计算方法通过在设备端实现数据的本地处理, 减少了数据传输至云端的延迟, 提高了诊断的实时性。边缘计算适用于实时性要求较高的设备故障诊断场景, 尤其是在设

备处于复杂、分布广泛的环境中^[2]。例如,在制造车间中,边缘计算能够直接在本地对传感器数据进行分析,迅速做出诊断决策并反馈至控制系统,实现即时故障响应。边缘计算不仅降低了对网络带宽的需求,还能够保护数据隐私,有助于减少数据传输中的信息泄漏。边缘计算中的设备端智能芯片和微控制器在实时处理和模型部署方面具有显著优势,适合嵌入式诊断和预测性维护。然而,边缘计算的计算能力和存储资源较为有限,难以处理复杂的深度学习模型,因此常与云计算协同使用,形成“云一边一端”一体化的智能故障诊断架构。

4 故障诊断方法的综合应用与融合技术

随着机电一体化设备故障诊断方法的多样化和智能化发展,单一方法难以满足复杂系统的故障诊断需求。综合应用多种诊断方法和融合技术的方式逐渐成为提高诊断效率和准确性的有效途径。通过结合传统与智能故障诊断方法,构建基于多源数据的综合诊断系统,机电一体化设备的故障识别和预防性维护水平得以显著提升。

4.1 综合诊断系统的构建

在综合诊断系统中,不同的故障诊断方法根据其特长被有机结合以互补各自的不足。例如,经验诊断法和信号处理法在早期机械故障的初步判断中快速高效,而机器学习和深度学习则在后续数据挖掘和复杂特征识别中发挥关键作用。通过在诊断系统中引入多层诊断架构,系统可以在初步筛查后调用更高阶的算法进行精确诊断,从而提升整体的故障检测效率。该系统还可以基于实时数据反馈,动态选择最适合的诊断方法,优化资源利用并保证诊断的及时性和准确性。

4.2 传感器融合技术与多源数据集成

现代机电一体化设备依赖多种传感器获取环境与系统状态数据,包括振动、温度、电流、电压等信息。传感器融合技术通过整合多种传感器的数据,实现多维度信息的综合分析。例如,在轴承故障检测中,通过融合振动和温度数据,可以更全面地捕捉到轴承的运行状态,及时预警潜在故障。此外,多源数据的融合有助于消除单一信号因噪声或设备误差带来的局限性,从而提升了诊断结果的鲁棒性和可靠性。基于传感器融合的诊断方法可以更准确地定位故障来源,并支持更深入的趋势分析,为预测性维护提供坚实的数据基础。

4.3 多算法融合与自适应诊断

多算法融合通过结合多种机器学习和深度学习算法,如支持向量机、随机森林和卷积神经网络等,进一步提升了

诊断系统的自适应性和容错性。在复杂故障诊断中,不同算法对特定数据特征的敏感度和处理方式不同,通过多算法融合能够全面利用数据中的不同特征信息。在故障诊断过程中,根据设备状态和数据特点,诊断系统可以自动选择合适的算法或结合多种算法,形成自适应的诊断策略。这种融合方式在增强诊断灵活性的同时提高了对复杂系统的适应性。

4.4 “云一边一端”协同诊断架构

随着云计算和边缘计算的发展,“云一边一端”协同诊断架构逐渐成为故障诊断技术的创新方向。在这种架构中,设备端的边缘计算实现数据的实时监测和初步分析,云端则负责复杂计算和大数据处理。设备端可以快速捕捉关键故障信号,立即反馈控制系统进行响应,而云端则对长期数据进行深度学习训练,持续优化诊断模型。通过“云一边一端”协同,系统能够实现高速、实时的故障响应,避免延迟影响诊断效果,同时利用云端强大的计算能力提升预测准确性。这种协同架构可以显著提高诊断系统的实时性和灵活性,尤其适用于大规模分布式设备的诊断场景。

4.5 综合诊断系统的实际应用与效果

综合诊断系统在工业现场的应用实践显示出显著的效果。例如,在汽车生产线中,综合诊断系统能够实现焊接机器人、传送设备的实时监测与自适应故障诊断,减少停机时间和人工维护成本。此外,在能源行业的风电设备中,传感器融合与多算法协同能够准确识别设备疲劳与磨损状况,优化维护周期,降低运营成本。通过智能诊断和数据融合,这类系统显著提高了设备的故障预警能力和维护决策的精准度,形成了更高效、更经济的设备管理模式。

5 结语

机电一体化设备的故障诊断方法在传统方法和智能技术的不断发展中取得了显著进展。论文系统分析了传统和智能故障诊断方法的应用与特征,并探讨了综合应用和融合技术的有效性。传统的经验诊断、信号处理和模型法在基础故障诊断中依然发挥作用,而基于人工智能、机器学习、大数据和边缘计算的智能诊断方法则大幅提升了诊断的准确性和实时性。通过多源数据融合、算法自适应和“云一边一端”协同,综合诊断系统可以更高效地应对复杂设备故障的多样性和不确定性。

参考文献:

- [1] 黄诚壬.机电一体化设备故障诊断系统设计与应用研究[J].中国设备工程,2021(24):191-192.
- [2] 杨文平.探讨机电一体化设备故障诊断方法研究[J].世界有色金属,2018(5):252-253.