

机械故障诊断技术在自动化生产线中的应用与发展

谢惠斌

黑龙江建龙钢铁有限公司 黑龙江 双鸭山 155100

摘要: 机械设计制造及其自动化在智能制造领域的应用,代表着制造业的一次深刻技术革新。通过引入先进的计算机技术和自动控制技术,机械设计制造及其自动化技术为智能制造提供了强大的技术支持,实现了生产过程的自动化、智能化和高效化。

关键词: 机械故障诊断技术; 自动化生产线中; 应用; 发展

机械故障诊断是通过实时监测、分析与判定机械设备的运行状态,识别异常或故障现象,定位故障位置及原因,并预测其发展趋势的综合性技术体系。状态监测。利用传感器采集设备的振动、温度、噪声、油液状态等多维度信号,构建动态监测网络,捕捉早期异常征兆(如轴承磨损的高频振动信号)^[1]。

1 机械故障诊断技术基本概念

1.1 定义与内涵。机械故障诊断技术旨在通过实时监测、分析与判断机械设备的运行状态,识别其是否异常,确定故障位置及原因,并预测故障发展趋势,为维护决策提供依据。其核心目标是实现设备从“被动维修”向“预测性维护”的转变,减少非计划停机时间和维护成本。

1.2 核心要素。状态监测。通过传感器实时采集振动、温度、噪声、压力等设备运行参数,形成动态监测网络,早期发现异常征兆。例如,振动频谱分析可捕捉轴承磨损的初期信号。故障识别与定位。结合多源数据(如机械、电气、液压信号)分析,确定故障类型、程度及位置。例如,齿轮箱异响可通过声学成像与振动数据融合精准定位。趋势预测与决策支持。基于历史数据和算法模型(如LSTM、数字孪生),预测设备劣化速度及剩余寿命,优化维修计划。

1.3 基本原理。该技术基于设备劣化进程中产生的物理信息(如振动、温度变化、润滑状态等),通过信号处理与智能分析,将原始数据转化为可识别的故障特征。例如,油液监测通过分析金属颗粒浓度推断机械磨损程度。

1.4 方法分类。简易诊断法。依赖阈值报警(如温度超限)或直观检测(噪声异常),适用于快速筛查明显故障。精密诊断法。采用频谱分析、小波变换等高级算法,深入解析复杂故障模式。例如,FFT频谱分析用于齿轮断齿故障的精细识别。无损检测法。包括超声波探

伤、红外热成像等技术,可在不拆卸设备的情况下评估内部损伤。

1.5 技术特征。多学科交叉:融合机械工程、信号处理、人工智能等多领域知识。动态性与实时性:需适应设备运行状态的连续变化,实现毫秒级响应。数据驱动与模型驱动结合:既依赖传感器大数据,也需专家经验构建诊断规则库。

1.6 发展挑战。当前仍面临多源数据标准化不足(如跨厂商设备接口差异)、复合故障诊断精度低(如耦合系统信号干扰)等技术瓶颈,需进一步推动算法轻量化与行业协议统一。

2 传感器在机械故障诊断中的作用

2.1 数据采集与异常检测。多维参数监测。传感器通过实时采集机械设备的振动(加速度、速度、位移)、温度、压力、噪声、油液状态等物理参数,为故障诊断提供基础数据支撑。例如,振动传感器可捕捉轴承磨损或齿轮断齿的高频信号,而温度传感器能预警润滑不良或冷却系统失效导致的过热风险。典型应用:无线温振传感器(如CAT S62方案)同步监测振动与温度,通过低噪声、高量程的MEMS技术提升数据可靠性。早期异常识别。传感器通过连续监测设备运行状态的微小变化(如金属颗粒浓度、振动频谱偏移),实现故障的早期预警。例如,油质传感器可实时分析润滑油的粘度与污染程度,推断内部磨损程度。

2.2 故障定位与机理分析。多源信号融合。结合振动、声学、电流等多模态传感器数据,可精准定位复杂系统中的故障源。例如,霍尔传感器通过磁场变化识别发动机凸轮轴位置异常,辅助诊断点火时序偏差。特征提取与模式匹配。传感器数据经频谱分析(如FFT)、小波变换等处理后,可提取故障特征(如轴承的固有频率偏移),并与历史数据库匹配以确定故障类型。

2.3 诊断精度与效率提升。高精度传感技术。红外热

成像与超声波传感器实现非接触式检测,避免设备停机拆卸。霍尔效应传感器通过数字波形解析机械部件的动态位置,提升电控系统故障诊断的响应速度。智能化集成应用。传感器与边缘计算结合,实现本地化实时诊断(如振动阈值报警),减少云端依赖。无线传感器网络支持大规模设备群的分布式监测,降低布线成本并适应恶劣环境。

3 机械故障诊断核心技术原理

3.1 信号采集与状态监测技术。多维传感技术。通过振动、温度、噪声、压力等传感器实时采集设备运行参数,形成动态监测网络。振动传感器(如压电式加速度计)通过压电效应将机械振动转化为电信号,捕捉轴承磨损或齿轮故障的高频特征。非侵入式检测。红外热成像、超声波探测等技术实现设备内部状态的间接监测,避免停机拆卸,例如通过热分布异常定位电机绕组短路^[2]。

3.2 信号处理与特征提取。时频域分析方法。时域分析:统计特征参数(如峰值、峭度)快速筛查异常信号,支持初步故障定位。频域分析:傅里叶变换(FFT)将振动信号分解为频谱,识别故障特征频率(如轴承固有频率偏移)。小波变换:解决非平稳信号的时频局部化问题,精准提取瞬态冲击特征(如齿轮断齿信号)。结构化稀疏学习。通过“简笔画”式特征提取策略,用最简表征实现故障识别,例如稀疏编码技术压缩高维数据,提升诊断效率。

3.3 模式识别与故障判定。数据驱动模型。机器学习算法:基于历史数据训练分类模型(如SVM、CNN),区分正常与异常状态,识别故障类型。专家系统:结合领域知识构建规则库(如润滑油失效逻辑链),通过推理引擎实现故障定位。多源数据融合。整合机械、电气、液压等多模态信号,增强复杂系统故障诊断精度。例如,振动与电流信号协同分析电机-齿轮箱耦合故障。

3.4 预测性维护技术。趋势分析与寿命预测。通过历史数据拟合设备劣化曲线(如轴承振动幅值增长趋势),结合LSTM等时序模型预测剩余使用寿命。数字孪生仿真。构建设备虚拟模型,实时映射物理实体状态,模拟故障演化路径并验证维修策略,例如预测高温合金部件的蠕变疲劳寿命。

4 机械故障诊断技术在自动化生产线中的应用

4.1 实时状态监测与数据采集。多传感器融合监测。自动化生产线通过振动传感器、温度传感器、电流传感器等设备实时采集机械运行数据,构建动态监测网络。例如,振动传感器捕捉轴承磨损的高频信号,电流传感器检测电机异常负载变化,实现设备状态的全面可视化

监控。非侵入式检测技术。红外热成像、超声波探测等技术用于监测密封设备或复杂结构内部的故障,避免停机维护。例如,通过热分布异常定位电机绕组短路或齿轮箱过热问题。

4.2 智能分析与故障诊断。数据驱动的智能算法。结合机器学习(如SVM、CNN)和时序模型(如LSTM),对多源信号进行特征提取与模式识别。例如,电流信号与振动频谱融合分析,精准诊断工业机器人关节卡顿或齿轮断齿等复合故障。专家系统与规则库。基于领域知识构建故障逻辑链,实现快速定位。例如,润滑油失效导致的轴承磨损可通过油液粘度数据与振动频谱关联推理,生成检修建议。

4.3 预测性维护与优化管理。寿命预测与健康评估。通过历史数据拟合设备劣化趋势,预测关键部件(如轴承、电机)的剩余使用寿命。例如,基于振动幅值增长趋势与LSTM模型的滚动寿命预测,优化备件库存管理。动态阈值调整与自适应报警。突破传统固定阈值限制,根据设备实时负载与工况动态调整报警触发条件,降低误报率与漏检风险。

4.4 系统集成与自动化控制。智能控制闭环。故障诊断系统与PLC、工业机器人控制系统深度集成,实现异常工况下的自动停机或参数调整。例如,检测到输送带偏移后自动触发纠偏程序,减少次品率。数字孪生与仿真验证。构建生产线虚拟模型,实时映射物理设备状态,模拟故障演化路径并验证维修策略有效性。

5 自动化生产线故障预测与预防策略

5.1 实时数据采集与状态感知。多维度传感网络构建。通过振动、温度、电流、压力等传感器实时采集设备运行数据,结合物联网(IoT)技术实现全域覆盖,如工业机器人关节温度监测、输送带振动信号捕捉等,形成设备健康状态基线。典型应用:利用电流传感器检测电机负载异常波动,结合时序分析预测绕组过热风险。非侵入式监测技术。采用红外热成像、超声波探测等手段监测密封部件或复杂结构(如齿轮箱、液压系统),避免拆卸停机造成的生产中断。

5.2 智能分析与预测模型。AI驱动的故障预测。机器学习模型:基于历史数据训练支持向量机(SVM)、卷积神经网络(CNN)等算法,识别设备劣化模式(如轴承磨损频谱特征)。数字孪生仿真:构建生产线虚拟模型,模拟高温、高负载等极端工况下的部件疲劳裂纹扩展趋势,验证维护方案有效性。多源数据融合分析。整合机械、电气、环境等多模态数据(如振动信号与油液金属颗粒浓度),增强复杂耦合系统(如电机-减速机)

的故障诊断精度。

5.3 维护流程标准化与优化。预测性维护计划制定。根据设备类型（高精度/连续运行）差异化设置维护周期，如激光切割机每500小时校准，输送系统轴承每2000小时润滑。动态调整阈值：基于实时工况（负载、环境温度）优化报警触发条件，减少误报率。预防性维护执行。定期检查与保养：通过标准化流程清洁关键部件（如传感器镜头）、紧固松动螺栓、更换老化密封件，降低突发故障概率。寿命预测与备件管理：基于LSTM模型预测关键部件剩余寿命（如同服电机轴承），优化备件库存周转率。

5.4 故障预防与快速响应。关键环节冗余设计。对易损部件（如继电器、传感器）采用双路冗余配置，确保单点故障不影响整体生产连续性。自动化纠错与应急控制。集成智能控制闭环：当检测到异常（如AGV路径偏移）时，自动触发纠偏程序或安全停机。

5.5 跨系统协同与知识沉淀。多系统数据互通。打通设备管理系统（EAM）、制造执行系统（MES）与数字孪生平台，实现故障预警与生产调度的联动优化。故障案例库建设。积累历史故障数据与处理方案，构建知识图谱支持智能推理（如润滑失效关联轴承磨损逻辑链），提升新故障的应对效率。

6 机械故障诊断技术在自动化生产线中的应用与发展

6.1 核心应用场景。实时监测与预测性维护。通过振动、温度、压力等多类型传感器实现设备运行参数的实时采集，结合边缘计算与云端分析平台，构建覆盖全产线的动态监测网络。例如，轴承异常振动数据可触发预警系统，提前介入维修，减少停机损失。典型技术支持：振动监测诊断技术（如FFT频谱分析）已规模化应用，支持非侵入式监测。质量检测与闭环控制。故障诊断系统与自动化产线控制系统深度集成，可自动识别设备异常对产品质量的影响（如加工精度偏移），并反馈至PLC调整工艺参数，形成闭环优化。应用案例：气体泄漏检测、电气局部放电监测等技术已用于半导体、汽

车制造领域的高精度产线。复杂系统耦合故障诊断。针对多设备协同的自动化产线，采用数据融合技术整合机械、电气、液压等多源信号，解决因系统耦合导致的故障定位难题。例如，基于专家系统的推理机制可解析齿轮箱与驱动电机的联动故障。

6.2 技术演进趋势。多模态数据融合与智能分析。结合声学成像、红外热像、激光测振等新型传感技术，构建多维数据感知体系，并通过深度学习模型（如CNN、LSTM）实现故障模式的自适应识别。边缘计算与云平台协同。本地化边缘节点完成实时数据预处理，云端则负责模型训练与知识库更新，形成“端-边-云”分层架构，降低网络延迟并提升诊断时效性。数字孪生驱动的虚拟诊断。基于产线设备的数字孪生模型，模拟故障发生过程并验证维修策略，缩短实际场景中的决策周期。例如，通过仿真预测轴承寿命衰减曲线。AI算法轻量化与自适应优化。开发嵌入式AI芯片及轻量级诊断算法（如迁移学习、联邦学习），适配工业现场低算力环境，同时支持跨产线的模型迁移与增量学习。

6.3 行业挑战与未来方向。数据壁垒与标准化：跨厂商设备的数据接口兼容性不足，需推动开放式通信协议（如OPC UA）与统一故障编码体系。复合型人才需求：需兼具机械工程、数据科学、自动化控制知识的交叉学科人才支撑技术落地。安全与可靠性：诊断系统的网络安全防护能力亟待强化，防止恶意攻击导致误判或生产中断。

总之，机械故障诊断技术通过“感知-分析-决策”闭环，实现从阈值报警到智能预测的跨越，其核心原理在于将物理信号转化为可解析的故障特征，驱动设备健康管理的数字化转型。

参考文献

- [1]王伟.机械故障诊断技术在自动化生产线中的应用与发展研究,2023.
- [2]张俊.机械故障诊断技术在自动化生产线中的应用与发展分析,2022.