

# Application progress of general mechanical safety monitoring and fault diagnosis technology

Liu Changyu

Sichuan Guotai Min'an Safety and Environmental Protection Technology Service Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

## Abstract

General-purpose machinery is widely used in various industrial settings, and its safe operation directly impacts the stability and efficiency of equipment. As automation and system integration continue to advance, traditional fault identification methods that rely heavily on human experience are no longer sufficient for high-reliability operations. In recent years, safety monitoring and diagnostic systems that integrate multi-source data fusion, dynamic state recognition, and fault prediction models have seen rapid development, shifting from periodic maintenance to real-time monitoring and intelligent diagnosis. This article focuses on the key technical approaches for safety monitoring and fault diagnosis in general-purpose machinery, reviews current research hotspots and technological achievements, analyzes the compatibility challenges and system stability issues encountered during application, and proposes future-oriented technical integration directions and optimization strategies. These insights aim to provide theoretical support and technical references for the intelligent and precise management of industrial equipment.

## Keywords

general-purpose machinery; safety monitoring; fault diagnosis; multi-source fusion; system optimization

## 通用型机械安全监测与故障诊断技术应用进展

刘昌玉

四川国泰民安安全环保技术服务有限公司, 中国·四川成都 610000

## 摘要

通用型机械在各类工业场景中被广泛应用,其安全运行状况直接关系到设备稳定性和作业效率。随着设备自动化和系统集成程度的不断提升,传统依赖人工经验判断的故障识别方式已难以满足高可靠性运行需求。近年来,基于多源数据融合、动态状态识别及故障预测模型等技术的安全监测与诊断系统得到了快速发展,实现了从定期检修向实时监控与智能诊断的转变。本文围绕通用型机械安全监测与故障诊断的关键技术路径,梳理当前的研究热点与技术成果,分析应用过程中存在的适配性难题与系统稳定性挑战,提出面向未来发展的技术集成方向与优化思路,为推动工业设备智能化、精细化管理提供理论支持与技术参考。

## 关键词

通用型机械; 安全监测; 故障诊断; 多源融合; 系统优化

## 1 引言

通用型机械设备作为工业制造与能源运输等领域的重要支撑,其运行状态的稳定性与安全性已成为现代工业体系中的核心关注点。在设备使用周期延长、工况环境日趋复杂的背景下,传统的机械故障管理方式正逐步暴露出监测滞后、响应不及时、诊断结果依赖人为经验等显著局限性。伴随着传感技术、数据处理手段及系统控制能力的快速进步,机械安全监测与故障诊断的技术边界不断扩展,形成了从单一传感到多维数据联动、从静态采集到实时反馈、从经验判

断到模型预测的技术演进趋势。本文聚焦通用型机械在实际运行中的关键风险识别与故障治理需求,探讨其安全监测系统的构成要素与诊断机制的演化逻辑,并从系统集成与适用性拓展的角度分析当前技术体系面临的现实问题及发展瓶颈。

## 2 通用型机械设备运行安全的风险特征分析

### 2.1 常见故障类型与失效机理概述

通用型机械设备在长期运行过程中容易出现轴承磨损、润滑系统失效、连接松动、疲劳裂纹、结构变形等典型故障,这些故障多由载荷波动、环境温度变化、长期疲劳作用等因素引发。失效机理表现为材料性能退化、应力集中点裂纹扩展、接触面磨损积碳等过程,严重时可导致结构断裂或功能

【作者简介】刘昌玉(1993-),女,中国四川广汉人,本科,注册安全工程师,从事安全评价研究。

丧失。不同工况下故障类型呈现多样化趋势，运行中伴随的异常信号如温升、振动、噪声、电流波动等成为判断依据。系统性分析这些故障类型与成因，有助于构建完整的机械风险识别框架，为后续监测与诊断模型提供基础支撑，增强设备运行的可预测性与可靠性保障能力。

## 2.2 机械安全事故的诱因分类与影响机制

机械安全事故的诱因主要可归因于设备本体缺陷、操作不当、环境干扰、保养不足和外部冲击等多个方面。设备设计阶段存在的结构应力集中、材料强度不足等问题易在运行中诱发失效，操作过程中未按规定执行操作规程或负载超限也会引发突发事件，灰尘、湿气、电磁干扰等环境因素可影响监测精度与部件功能，维护保养不到位将加剧设备老化速度。事故发生后常伴随生产中断、设施损坏、人身伤害等严重后果，其影响机制呈现出链式反应和系统传导特征。因此，应通过系统性分类与深入剖析各类诱因，构建具有响应能力的风险识别逻辑，提升监测系统对潜在安全威胁的辨识和应对能力。

## 2.3 风险评估在机械安全管理中的作用

风险评估作为安全管理的前置环节，在通用型机械设备运行保障中具有基础性与策略性双重价值。通过识别潜在故障源、分析失效概率与后果等级，可建立风险矩阵与优先控制序列，指导监测资源配置与维护计划制定。在不同设备类型、工况条件下，风险评估能结合历史数据、实时参数与专家知识，动态判断关键风险点的演化趋势，帮助实现从静态分析到动态管控的转化。在实践中，科学的风险评估机制能显著降低事故率与运行成本，同时提升安全冗余设计、预警系统设置与事故响应能力的精准性与实用性，是实现精细化管理与智能决策的重要技术支撑环节。

## 3 机械安全监测技术的发展路径

### 3.1 基于传感器的状态参数采集技术

状态参数采集是实现机械安全监测的基础环节，常用传感器涵盖振动、温度、压力、电流、速度、位移等类型，分布于设备关键部位以获取动态工况数据。随着 MEMS 技术、光纤传感、无线信号传输的发展，传感器在小型化、高灵敏、抗干扰等方面取得显著进展，提升了监测精度与适应环境的能力。高频响应和实时同步的采集能力使得设备早期故障信号得以及时捕捉，为后续诊断算法提供关键特征输入。多点分布与集中处理结合的采集方式使得系统具备高度兼容性与部署灵活性，在工厂自动化、运输装备和能源设备中得到了广泛应用，是构建多层次监测体系的核心支撑单元。

### 3.2 边缘计算与嵌入式系统在实时监控中的应用

边缘计算技术将数据处理能力前移至采集端设备，在不依赖远程服务器的情况下即可实现数据筛选、压缩、预处理与初步分析。配合嵌入式系统可将算法模块固化于控制芯

片中，提升监测系统的响应速度与部署效率，适应对低时延、高实时性要求的场景。此类结构在工业生产线、无人值守设备及恶劣环境下表现出较强的稳定性与低功耗优势，能够有效减轻中心服务器负担并降低数据传输成本。通过边缘侧初步判断异常趋势并实现本地预警，可实现分布式监测架构的灵活拓展，为多点协同、模块化部署的智能监控系统构建提供了重要技术基础。

### 3.3 多源数据融合与动态监测技术进展

多源数据融合技术通过整合不同类型传感数据、历史运行记录、维护日志与结构模型，实现对设备运行状态的多维认知与动态掌控。融合方法包括时间序列对齐、特征提取、语义映射与信息加权整合等，可有效提升监测数据的完整性、鲁棒性与诊断精度。动态监测系统利用连续采集的数据实现状态变化趋势建模与实时响应机制构建，可在故障初期实现趋势预警与异常溯源。随着云计算、物联网和工业大数据的深度融合，动态监测逐步向云边协同、模型自适应与任务智能分配方向发展。多源融合不仅拓宽了监测覆盖范围，也提升了数据驱动下的决策能力，是未来通用型机械运行安全保障的关键支柱技术。

## 4 机械故障诊断的核心技术体系

### 4.1 振动分析与频谱诊断方法演变

振动分析是机械故障诊断中最早应用的技术之一，通过采集设备运行过程中的振动信号，分析其时域与频域特征，以识别故障类型与严重程度。FFT (Fast Fourier Transform) 方法的引入使得频谱特征分解效率显著提升，能够精准识别特征频率与倍频关系，辅助判断轴承剥落、不对中、松动等常见故障。近年来 EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition)、STFT (Short-Time Fourier Transform) 与小波包分析等技术的迭代应用提升了信号处理的分辨率与适应性，在处理非平稳和瞬态信号方面具备明显优势，为复杂运行状态下的诊断精度提供技术保障，推动了振动信号分析从经验判断向模型支持的智能化转型。

### 4.2 热成像与声发射在隐患识别中的应用

热成像技术利用设备运行中产生的热辐射图谱，结合红外成像仪器实时捕捉温度异常区域，用于识别电机过热、摩擦升温、绝缘层退化等隐患。通过非接触式扫描和定量分析，可快速识别发热故障源，适用于高压、高速运行环境。声发射 (AE) 技术基于材料内部释放的高频弹性波进行采集与分析，对裂纹扩展、腐蚀穿孔、冲击失效等内部损伤过程具有高灵敏性，尤其在压力容器和高速旋转部件中表现优异。两种技术各具优势，热成像反映宏观热场分布，声发射揭示微观破坏过程，结合使用可实现表征层面与结构层面的互补，提升隐患识别的空间分辨率与动态响应能力。

### 4.3 故障预测模型与趋势评估方法构建

故障预测模型主要依赖历史运行数据、实时监测参数

和诊断标签进行训练与优化,当前主流方法包括随机森林、BP神经网络、SVM支持向量机与LSTM递归神经网络等。模型通过学习设备在不同状态下的特征分布,预测未来可能出现的故障趋势与发生时间。趋势评估则采用时间序列分析、滑动窗口回归与贝叶斯更新算法动态修正预测结果,提高准确率与时效性。在预测系统构建中,参数稳定性、样本

质量与异常值过滤对整体模型性能影响显著。采用多模型集成与多尺度特征提取策略,可在10分钟级别内实现秒级响应与小时级趋势预测,支持状态评估与运维决策的一体化落地,构成从诊断到预测的技术闭环,图1为机械设备故障预测的模型解析。

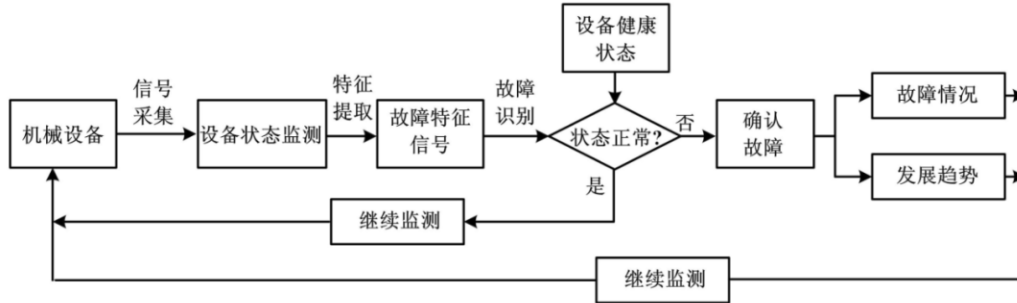


图1 机械设备故障预测的模型解析

## 5 通用型机械故障诊断的典型技术集成

### 5.1 基于信号处理的智能分析流程

机械故障诊断的信号处理流程通常包括数据采集、特征提取、降噪预处理与分类识别四个环节。在数据采集阶段,每秒采样频率设置为5120Hz,覆盖轴承、电机、齿轮等关键部位。特征提取环节使用小波变换提取频域特征30维,EEMD分解重构出12个本征模态函数,对非平稳信号结构实现有效分离。降噪模块通过SVD(Singular Value Decomposition)压缩冗余信息,将噪声比例从18%降低至3%。最后应用CNN(Convolutional Neural Network)进行模式识别,在测试集中分类准确率达92.6%。整个流程实现从原始数据到诊断输出的高效转换,并可嵌入工业控制终端完成边缘侧自动处理,提升诊断自动化水平。

### 5.2 模型驱动与数据驱动技术的集成路径

在机械诊断体系中,模型驱动技术以物理规律为基础构建结构、运动与热力学模型,代表方法包括有限元分析(FEA)、多体动力学仿真(MBD)与热-结构耦合分析;数据驱动则侧重于统计模式识别与深度学习,常用算法包括XGBoost、GRU神经网络与随机森林集成分类器。集成路径通过构建物理模型指导特征空间约束,再结合深度学习模型自动提取非线性关系,构建混合驱动架构。在齿轮箱诊断实验中,模型驱动预测齿根应力偏差小于5%,数据驱动模型在80万条样本中实现F1值达0.91。集成架构解决了纯数据模型解释性差与纯物理模型泛化性弱的问题,适用于高耦合、复杂边界工况下的故障识别任务。

### 5.3 诊断系统的人机交互与远程支持设计

诊断系统在实现智能判断的同时需具备清晰的人机交互界面与高效的远程支持机制。在终端界面设计中采用HTML5可视化模块,通过WebSocket协议实现数据刷新间隔控制在200ms以内,支持趋势图、频谱图、警报日志与

决策建议四类展示。远程支持平台通过MQTT协议与边缘节点通讯,每小时可推送240条设备状态数据至运维中心,并支持双向指令响应,命令响应时延低于600ms。系统集成RUL(Remaining Useful Life)预测模块与B/S架构,可实现不同权限用户的分级访问与日志留存。结合SCADA系统,支持故障定位后自动切换控制逻辑,实现远程调度与工况恢复,构建具备智能联动能力的远程诊断支持体系。

## 6 结语

通用型机械的安全运行已成为现代工业体系稳定高效运转的基础保障,安全监测与故障诊断技术作为核心支撑,其系统性与智能化程度直接决定了设备管理水平与运维效益。随着传感技术、数据融合、边缘计算和预测模型的不断进步,故障识别的精度与响应效率持续提升,技术集成与应用场景逐步拓宽。面对复杂多变的运行环境和设备结构的高度异构,构建一体化、高适应性的监测诊断系统成为行业发展的关键方向。未来需在模型适配、平台协同和交互优化等层面持续创新,推动诊断技术向智能、集约、协同方向演化,全面提升通用型机械设备的运行安全与管理智能化水平。

## 参考文献

- [1] 陈登国,季诺亚,薛海斌.基于动态监测数据的桥梁安全状态评估[J].智能城市,2025,11(03):6-9.
- [2] 王奉吉.基于物联网技术的工程机械电气系统安全监测研究[J].电气技术与经济,2025,(01):87-89+94.
- [3] 闫路遥.基于数字孪生的人机协作安全距离监测与个性化控制策略研究[D].导师:罗国富.郑州轻工业大学,2024.
- [4] 张为堂,李孝东.机械压力机主电机安全静止监测解决方案[J].锻压装备与制造技术,2024,59(02):67-70.
- [5] 周成,张相炎,居里镨.机械安全风险预警监测要素确定方法[J].中国安全科学学报,2023,33(02):132-139.