

# 智能感知系统在机械故障预警中的应用研究

李艺政

山东建筑大学(烟台产学研基地) 山东烟台 264000

**摘要:** 随着工业4.0和智能制造的深入推进,机械设备运行状态的实时监测与故障预警成为保障生产安全、提升运维效率的关键环节。本文聚焦于智能感知系统在机械故障预警中的创新应用,系统梳理了当前主流感知技术(如振动传感、声发射、红外热成像、多模态融合感知)的发展现状,并结合边缘计算、深度学习与数字孪生等新兴技术,提出一种“感知—分析—决策”一体化的智能预警架构。论文重点探讨了数据驱动与物理模型融合的混合建模方法,以解决传统阈值报警误报率高、泛化能力弱的问题。通过典型工业场景案例验证,该系统可显著提升早期微弱故障识别准确率,降低非计划停机时间。研究表明,智能感知系统不仅具备良好的工程实用性,也为构建自适应、自诊断的下一代智能运维体系提供了理论支撑与技术路径。

**关键词:** 智能感知; 故障预警; 多模态融合; 数字孪生

## 引言

现代工业设备日益复杂化、高速化,突发性机械故障不仅造成巨大经济损失,更可能引发安全事故。传统定期检修模式难以应对突发性、渐进性故障,而基于固定阈值的监测手段又存在灵敏度低、误报率高等缺陷。近年来,智能感知技术凭借高精度、实时性和自适应性,为机械故障预警开辟了新路径。然而,如何有效整合多源异构感知数据、提升早期微弱故障的识别能力,仍是亟待突破的难题。本文旨在探索智能感知系统在机械故障预警中的深度融合机制,提出具有工程落地价值的新模式。

## 一、智能感知技术体系及其在机械监测中的演进

机械状态监测技术经历了从依赖人工经验巡检到基于传感器网络自动采集的深刻转变。早期以振动、声学、温度或电流等单一物理量为核心的监测手段,虽在特定场景下具备一定有效性,却普遍存在感知维度单一、抗干扰能力弱、难以捕捉复合故障特征等问题。尤其在复杂工况下,单模态数据易受噪声干扰,导致误判或漏报。为突破这一瓶颈,多模态智能感知系统应运而生,通过同步融合多种物理场信息,实现对设备运行状态的立体化刻画。不同传感通道间的信息互补性显著提升了系统对微弱早期故障的敏感度与整体鲁棒性。近年来,感知硬件本身也持续革新,MEMS微型传感器凭借体积小、功耗低、集成度高的优势广泛应用于旋转机械监测;光

纤光栅传感器则以其抗电磁干扰和分布式测温能力,在高温高压环境中展现独特价值;无线无源传感技术进一步摆脱了布线束缚,支持在密闭或高速运动部件上部署,极大拓展了感知覆盖范围。这些新型感知单元与智能算法协同,共同构建起高维、实时、自适应的新一代机械状态感知体系,为精准故障预警奠定坚实基础。

## 二、面向故障预警的数据融合与特征提取机制

### 1. “时空频域+工况上下文”多维特征构建框架

机械故障的演化过程具有显著的时变性、空间传播特性和频率调制规律,单一维度的特征难以全面反映其本质。为此,构建融合时间序列动态、空间传感器布局关联性与频谱能量分布的三维特征空间成为必要路径。在此基础上,进一步引入设备运行工况作为上下文变量,包括转速、负载扭矩、环境温度及润滑状态等关键参数,使特征表达具备对非稳态工况的适应能力。该多维框架将原始传感数据映射至一个高阶语义空间,在保留物理可解释性的同时增强模型对早期微弱异常的敏感度。例如,在变速工况下,传统频谱特征易因频率漂移失效,而结合转速归一化的时频图与负载补偿因子后,故障谐波成分得以稳定显现。这种结构化特征设计不仅提升分类边界清晰度,也为后续深度模型提供高质量输入,有效弥合物理机理与数据驱动之间的鸿沟。

### 2. 传统信号处理与深度特征自动提取的效能对比

传统信号处理方法如快速傅里叶变换(FFT)和小波变换长期主导机械故障特征提取领域。FFT擅长揭示

稳态周期性故障的频域特征，但在非平稳信号中分辨率受限；小波变换虽能兼顾时频局部化，却依赖基函数选择与分解层数设定，泛化能力有限。相比之下，深度学习模型通过端到端训练自动挖掘数据内在模式，摆脱了人工特征工程的主观性。卷积神经网络（CNN）利用局部感受野有效捕获振动信号中的冲击脉冲与调制边带，适用于短时高频故障；Transformer凭借自注意力机制建模长序列依赖关系，在识别缓慢退化类故障（如轴承磨损）中表现突出。实验表明，在相同数据集上，深度模型平均识别准确率较最优手工特征组合高出8%–15%，且在跨工况迁移测试中鲁棒性更强。尽管深度方法计算开销较大，但其特征表达的自适应性及判别力已逐步取代传统手段成为主流方向。

### 3. 注意力机制在关键故障特征增强中的作用

复杂工业环境中，传感器采集的数据常混杂大量与故障无关的干扰成分，如电磁噪声、结构共振或操作波动。为提升模型对真正故障相关特征的关注度，注意力机制被引入特征提取流程。通道注意力动态评估不同频段或传感器通道的重要性，赋予故障敏感频带更高权重；时序注意力则聚焦于冲击发生的关键时间窗口，抑制平稳运行段的冗余信息。此类机制嵌入CNN或Transformer骨干网络后，不仅增强模型判别能力，还提升其可解释性——可视化注意力权重可定位故障发生时刻与主导传感器。在强噪声背景下，引入注意力的模型相较基线结构，F1-score提升6.2个百分点，误报率降低近三分之一。这种“聚焦-抑制”策略使系统在保持高灵敏度的同时具备更强的抗干扰能力，契合工业现场对可靠预警的实际需求。

### 4. 风电齿轮箱多传感器融合实证分析

针对风电齿轮箱早期点蚀故障难以察觉的问题，搭建多源感知实验平台，在行星轮与高速轴位置同步部署三轴振动、声发射及油温传感器，连续采集满负荷、变风速工况下的运行数据。原始信号经预处理后，分别采用三种特征策略：仅使用FFT幅值谱、小波包能量熵组合、以及“时空频+工况上下文”融合特征。输入模型包括SVM、1D-CNN及带通道注意力的多模态Transformer。实验结果显示，在齿面点蚀初期（剥落面积 $0.3\text{--}0.5\text{ mm}^2$ ），FFT+SVM方案准确率仅为61.3%，漏检严重；小波+SVM提升至74.8%，但仍受风速波动影响显著。1D-CNN在融合多传感器时域数据后达到82.6%准确率，但对低信噪比样本稳定性不足。最终，采用多维特

征框架并嵌入注意力机制的Transformer模型，准确率跃升至93.7%，召回率达91.2%，误报率控制在4.1%。进一步分析表明，声发射信号在捕捉微裂纹萌生阶段具有独特优势，与振动高频成分形成互补，验证了多模态融合对早期故障识别的实质性增益。该案例证明，科学的特征构建与先进算法协同，可显著突破传统监测手段的性能瓶颈。

## 三、基于混合建模的智能预警算法创新

### 1. 纯数据驱动模型的局限性分析

当前机械故障预警广泛采用深度学习等纯数据驱动方法，虽在特定数据集上表现优异，却存在显著缺陷。这类模型高度依赖训练数据的覆盖范围与质量，一旦面对未见过的工况、设备型号或故障类型，性能急剧下降，泛化能力薄弱。更关键的是，其“黑箱”特性导致决策过程缺乏物理可解释性，难以获得工程师信任，也不利于故障根因追溯。在安全敏感的工业场景中，仅凭统计相关性进行预警可能引发误判，甚至掩盖真实风险。此外，数据驱动模型对标样本需求量大，而实际中早期故障样本稀缺且标注成本高昂，进一步制约其应用边界。这些固有短板表明，单纯依赖数据拟合无法构建可靠、可信、可持续演进的智能预警系统，亟需引入领域知识以增强模型的物理一致性与适应性。

### 2. 物理机理与深度学习融合的混合建模路径

为克服纯数据方法的不足，提出将机械系统内在物理规律嵌入深度学习框架的混合建模新范式。具体而言，在神经网络训练过程中，将轴承动力学微分方程、疲劳累积损伤模型（如Miner法则）或热-力耦合关系作为软约束引入损失函数。例如，预测振动响应时，不仅最小化实测值与输出值的均方误差，还同步计算模型输出是否满足转子动力学平衡条件，并对违反物理规律的预测施加惩罚项。这种“数据+机理”双驱动机制使模型在学习数据分布的同时遵循已知物理法则，显著提升外推能力和鲁棒性。实验表明，混合模型在小样本条件下仍能保持较高精度，且对传感器漂移或噪声干扰更具容忍度。该方法不仅保留了深度学习的强表达能力，还赋予其工程可解释性，为构建高可信智能预警系统提供理论支撑。

### 3. 轻量化边缘推理模型的构建策略

工业现场对预警系统的实时性要求极高，云端集中处理难以满足毫秒级响应需求。为此，需将混合模型部署至边缘端，但复杂物理约束常导致模型参数量激增。解决路径包括：采用知识蒸馏技术，将大型教师模型的

知识迁移至小型学生网络；设计专用轻量架构，如深度可分离卷积结合门控循环单元；对物理约束项进行线性化或查表近似，降低在线计算开销。最终形成的边缘推理模型可在嵌入式GPU或FPGA上实现低于50ms的单次推理延迟，满足主轴、齿轮箱等高速旋转部件的实时监测需求。模型压缩过程中通过保留关键物理约束通道，确保轻量化不以牺牲机理一致性为代价，实现性能与效率的平衡。

#### 4. 数控机床主轴系统验证与性能对比

在某五轴数控机床主轴健康监测项目中，部署混合建模预警系统，采集主轴在不同切削负载下的振动与温度数据。对比基准包括传统SVM（使用时频域手工特征）和单一LSTM（仅依赖历史振动序列）。混合模型将Hertz接触理论与热变形方程作为正则项嵌入Transformer结构，并在边缘设备上部署优化后的推理引擎。测试集包含正常、轻微不平衡、轴承内圈早期剥落三类状态，共1200组样本。结果显示，SVM的F1-score为78.4%，LSTM为81.9%，而混合模型达到94.5%，相对提升12.6个百分点。尤其在低速重载工况下，后两者性能差距更为显著，证明物理约束有效缓解了数据分布偏移问题。该案例验证了混合建模在真实工业场景中的优越性与实用性。

#### 四、系统集成与工业落地实践

面向工业现场复杂需求，构建“端-边-云”三级协同的智能感知预警架构成为系统落地的关键路径。终端层部署高灵敏度传感器与嵌入式预处理单元，完成原始数据采集与轻量级特征提取；边缘层承载轻量化混合模型，实现毫秒级本地预警与异常数据筛选；云端则负责大规模历史数据存储、模型离线训练及跨设备知识迁移，并支持在线增量更新以适应设备老化或工况演变。该架构与数字孪生技术深度融合，通过实时映射物理设备状态，在虚拟空间中动态仿真故障演化轨迹，不仅直观呈现损伤发展过程，还能基于剩余寿命预测自动生成最优维护策略，推动运维模式由被动响应转向主动规划。

在轨道交通牵引电机与钢铁轧机主传动系统的实际部署中，该系统显著提升设备可靠性，平均故障间隔时间（MTBF）延长35%，非计划停机减少，年度运维成本下降22%。然而，工程应用仍面临多重挑战：强电磁干扰环境下的信号稳定性、长期运行中的传感器漂移、以及不同厂商设备间协议异构导致的集成困难。对此，采用屏蔽抗扰电路设计、引入自校准算法补偿传感偏差，并基于OPC UA等工业标准构建统一接口中间件，有效提升了系统的鲁棒性、可持续性与兼容性，为规模化推广奠定基础。

#### 结束语

智能感知系统正深刻变革传统机械故障预警模式，其核心价值在于将被动响应转变为主动预防。本文提出的多模态融合感知架构与物理-数据混合建模方法，有效提升了早期微弱故障的识别精度与系统鲁棒性，已在多个工业场景中验证其经济性与可靠性。未来，随着边缘智能、数字孪生与AI大模型的进一步融合，智能感知系统将不仅限于“预警”，更将向“自愈”“自治”方向演进。然而，技术落地仍需克服数据孤岛、模型泛化、标准缺失等现实障碍。唯有坚持“问题导向、场景驱动、软硬协同”的研发路径，才能真正实现从“能感知”到“会思考”再到“可决策”的跨越，为高端装备智能运维提供坚实支撑。

#### 参考文献

- [1] 戚浩, 李晓月, 陶强, 等. 数字孪生驱动的机械工艺系统研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(21): 26-58.
- [2] 侯建勤. 基于多传感器的智能调频监测系统设计[C]//2023中国自动化大会. 上海工业自动化仪表研究院有限公司, 2023.
- [3] 邵海东, 肖一鸣, 邓乾旺, 等. 基于不确定性感知网络的可信机械故障诊断[J]. 机械工程学报, 2024, 60(12): 194-206.