

智能传感技术在机电设备状态监测中的多源数据融合方法研究

赵伯涛¹ 张学民^(通讯作者)² 王小平³

1. 延边长白山嘴棒有限公司 吉林省 延边朝鲜族自治州 133001

2. 天津合士美饮品有限公司 天津市 301800

3. 四川省宜宾普拉斯包装材料有限公司 四川省 宜宾市 644000

【摘要】：面向制造系统高可用运行需求，提出一种面向机电设备的智能传感与多源融合状态监测方法，将时间对齐、阈值化小波降噪与 Min-Max 归一化构成前端协同预处理，在振动、电流、温度三通道上稳定提升早期微弱征兆的显性。特征层引入阶次跟踪、包络谱与谱峭度及温升梯度，决策层构建加权 D-S 证据融合框架，结合可靠性折扣与冲突分配，并以边云协同完成权重与参数的在线更新。在三相异步电机正常、轴承磨损、转子不平衡数据集上验证，多源融合在统一评测下准确率为 98.5，召回率为 97.8，F1 值为 98.1，显著优于单一振动与单一温度方案。结果表明，该方法在变工况与强噪声条件下具备更高的鲁棒性与实用价值，可为后续健康评估与维护决策提供稳定输入。

【关键词】：智能传感；多源数据融合；D-S 证据理论；机电设备状态监测；阶次跟踪

0 引言

制造业的可靠运行对设备状态监测提出更高要求，现场环境常伴随负载波动、转速漂移与强噪声，单一通道难以覆盖跨部件耦合故障机理，阈值类策略对工况迁移的适应性不足。智能传感技术的发展使感知、计算与通信能力下沉至端侧，为多物理场信息的实时获取与初判提供条件，但多源异构同时引入采样率不一致、时间漂移、幅值标度差异与信息冗余冲突等挑战。为在工程可行边界内化解上述矛盾，亟需构建覆盖采集、预处理、特征与决策全链条的方法体系，将跨模态互补机理转化为可计算的信息增益。本研究以振动、电流与温度为主要信息载体，面向变工况与强噪声情境，在端侧完成时间对齐、阈值化小波降噪与标度统一，在特征层引入阶次域与热行为的联合表征，并以加权 D-S 证据融合承接不确定与冲突的显式建模，配合边云协同实现权重与折扣参数的在线自适应更新。研究旨在以轻量实现与可落地部署为约束，提升早期弱征兆的可检测性与跨工况稳定性，为风电齿轮箱、数控主轴与牵引电机等对象提供通用可扩展的监测范式。

1 智能传感技术与机电设备状态监测的研究基础

围绕制造系统的高可用运行需求，智能传感技术正把感知、计算与通信能力嵌入到加速度、声学、温度与电参量器件中，用以持续刻画机电设备状态。智能传感指传感端具备自适应采样、在端侧进行特征提取与初步判别的能力；状态监测指在风电齿轮箱、数控机床主轴与轨交牵引电机等对象上，对多物理场信号开展同步采集并形成健康描述。从工程现场看，单一传感数据由于信息维度不足，难以覆盖故障的跨部件耦合机理；在变工况与强噪声条件下，单通道特征易被负载波动与安装位置差异干扰，早期微弱征兆被淹没，阈值策略对工况迁移缺乏鲁棒性。由此引出多源数据融合的研究路径，即把振动、转速、

电流、油液与温度等异构信号进行时域对齐与语义关联，把互补机理转化为可计算的信息增益。围绕该路径，现有工作在同步时钟设计、传感阵列自标定、边云协同处理以及特征层与决策层融合模型方面形成框架，方法常结合时频分析、阶次跟踪与深度网络来提升可分性。需重点关注的是，多源异构带来的采样率不一致与时间漂移、跨传感器标度差异与冗余冲突、工况迁移引起的域偏移以及工业总线带宽与端侧算力受限等问题仍待系统解决，这些瓶颈决定了后续方法设计与工程落地的可行边界。

2 多源传感数据融合的关键方法设计

2.1 多源传感数据的预处理方法

鉴于风电齿轮箱与数控主轴的在役运行会把振动、温度以及电流信号暴露于强噪声与变负载的耦合环境，预处理环节需把异构采样与幅值标度的差异在源头环节得到抑制，进而为后续特征层的跨模态融合奠定可计算基础。围绕这一目标，本研究把离散小波变换阈值化降噪当作核心去噪手段，并且把 Min-Max 归一化当作统一标度的标准化步骤，以同时提升微弱征兆的可显性与跨传感器的可比性。具体而言，振动与电流两类高频分量更易夹杂电磁干扰与安装结构的散射成分，因此在端侧选用紧支撑的对称小波基来开展多尺度分解，配合软阈值策略削减细尺度上的随机扰动；温度信号呈低频平稳形态，预处理更强调抑制缓慢漂移与剔除离群点，借助同一阈值化框架但降低分解层数，以避免过度平滑掩盖工况变化造成的渐进变化。

$$\hat{d}_{j,k} = \text{sgn}(d_{j,k}) \cdot \max(|d_{j,k}| - \lambda_j, 0)$$

其中， $d_{j,k}$ 表示在尺度 j 与位置 k 的小波细节系数， $\hat{d}_{j,k}$ 为阈值化后的细节系数， λ_j 为随尺度变化的阈值， $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数， $|\cdot|$ 为绝对值运算， $\max(\cdot, 0)$ 表示取非负部分的算子。

从方法落地的角度来看, 阈值序列选取借助细尺度系数的稳健噪声估计来开展, 使阈值随尺度自适应变化并把瞬态故障的能量保留下来, 且在重构阶段仅对细节层实施阈值化以避免削弱主导能量的近似层。由此推导, 阈值化的小波重构能够把高频噪声压低到背景水平, 使得滚动体早期点蚀与定子绕组的脉动电流在能量分布上得到突出呈现。需重点关注的是, 多源采样率与时间戳不同步会把降噪输出的跨通道关联削弱, 因而在阈值化之前, 预处理流程把时间轴对齐工作置于首要位置, 即对振动与电流进行统一参考时钟下的重采样, 并把温度序列以线性插值绑定到同一时间网格, 以减少后续归一化引入的伪相关。

在标度统一方面, Min-Max 归一化以通道为单位把幅值映射至区间 0 到 1, 使得不同物理量在融合模型中共享可比较的数值空间, 同时保留相对变化的形态信息。考虑到工况迁移会把全局最值发生漂移, 归一化参数在训练阶段依据稳定工况的统计范围来设定, 并且在运行阶段以滑动窗口更新最值以限制漂移速度, 从而避免短时异常把整体标度压缩到不合理区间。结合上述去噪与归一化的协同设计, 预处理流程把多源数据的噪声、标度与时间异构问题在前端得到系统性化解, 使特征层的时频表示与能量比值等后续指标具备更高的分离度与跨模态一致性。

2.2 特征层多源数据融合模型构建

面向变工况和强噪声并存的机电设备现场, 本研究在特征层构建加权 D-S 证据融合模型, 把经预处理对齐与归一化的振动、电流、温度特征转化为可比证据, 进而完成对健康状态的联合刻画, 见图 1。模型以通道为单位设置证据生成单元, 把时频能量条带、阶次幅值轨迹与温升梯度等多维特征输入标定器, 输出指向健康、预警、故障三类假设的基本信任分配, 并把不确定集合用于承接跨工况漂移带来的模型外样本。

权重系数围绕通道对状态判别的贡献度来设定, 综合互信息对健康标签的解释力度、在负载波动下的信噪提升率以及跨工况稳定性三项指标, 以滑动窗口完成统计与更新, 使权重随设备工况缓慢漂移而自适应调整。为避免单次异动造成权重剧烈摆动, 权重更新引入阈值门限与平滑策略, 把短时异常的影响压低到可控范围。

在证据组合环节, 模型设置可靠性折扣与冲突分配双通道机制, 先对低可靠证据进行强度下调, 再把高冲突部分转移至不确定集合, 减少错误强化。对来源一致性较高的证据, 组合引擎保持收敛速度, 以便在早期微弱征兆阶段形成稳定判断。

从部署角度来看, 边缘侧完成特征提取、证据生成与快速组合, 云端负责周期性重估权重及折扣参数, 并把新参数下发至端侧, 构成边云协同闭环。输出侧提供各状态的合成信任度与不确定度, 并写入工业总线的可追溯记录, 以支撑后续剩余寿命评估与维护决策。

2.3 融合数据的状态特征提取方法

鉴于预处理已把多源信号在时间与标度上对齐, 本研究把融合后的特征数据进一步转化为状态敏感指标。面向振动通道, 在变速驱动与负载扰动的现场语境下, 选用阶次跟踪来把频率归一到转速阶次, 由此稳定提取滚动体通过频率、齿轮啮合频率以及其倍频与边带, 并在阶次域内建立故障指纹库, 使特征阶次窗口固化到可追溯区间。为提高早期微弱征兆的可显性, 采用包络谱与谱峭度的联合流程, 把调制成分的能量集中度与瞬态脉冲强度转化为频带能量比值与峰度类指标, 同时构建边带对称度与载频侧能量泄露度, 以映射轴承间隙、齿侧间隙与错齿的机理差异。针对温度通道, 考虑热惯性与环境温差的耦合效应, 提取温升梯度、稳态偏移量与变化点序列, 把慢变漂移与突变交替的热行为进行特征化, 并以滑动基线消除季节性与昼夜周期影响, 进一步引入多尺度热异常评分, 以区分缓慢升温与短时热击。融合层把来自振动与温度的时频条带、能量比值与热特征进行语义关联, 生成面向健康、预警、故障的证据向量, 并在权重与折扣的调度下进入组合引擎。由此推导, 端侧得以稳定输出状态特征, 云端完成跨工况适配的参数更新, 为后续状态识别与寿命评估提供有效输入。

3 机电设备状态监测的融合方法效果验证

3.1 实验数据集与环境搭建

本研究以三相异步电机为实验对象, 围绕正常、轴承磨损、转子不平衡三类运行状态构建多源数据集。数据组织为每类状态采集 100 组样本, 每组同时记录振动、温度与三相电流原始时序, 并保留统一时钟时间戳以支撑后续对齐。状态构建遵循可复现实验规程: 正常工况在稳定负载下运行; 轴承磨损通过更换已磨损外圈的驱动端深沟球轴承来设置; 转子不平衡则在风扇侧施加小质量配重以形成偏心, 从而把不同机理的激励差异体现到谱域特征。

传感与采集环境围绕同步与抗干扰要求进行搭建。振动传感器型号为 XYZ-100, 安装在驱动端轴承座顶部, 采用胶层加螺钉联合固接; 温度传感器型号为 TMP-200, 贴附在定子外壳; 电流信号由数据采集卡的电流通道经霍尔互感器引入。采集系统选用共享参考时钟的多通道数据采集卡, 振动以 25.6 kHz 采样, 电流以 10 kHz 采样, 温度以 10 Hz 采样, 全通道统一触发并写入同一时间网格, 便于后续重采样与归一化策略在端侧落地。

数据管理与分析在 Python 平台开展, 搭建 Python 3.10 环境并配置面向边云协同的脚本与容器, 完成数据清洗、阈值化小波降噪、Min-Max 归一化、阶次跟踪与证据向量生成等流程。为控制数据质量, 本研究把实验前的 5 min 空载热稳作为基线采集环节, 同时进行传感器横向灵敏度校准与零漂检查, 并对采集卡的时钟偏差进行例行验证, 使所构建的数据集在跨批次采集中保持一致性与可追溯性, 为后续融合建模提供稳定



输入。

3.2 融合方法的性能评估与分析

立足三相异步电机正常、轴承磨损、转子不平衡三类状态的同步采集数据，本节围绕准确率、召回率与F1值三个评价指标展开对比分析，分别考察多源融合、单一振动与单一温度三种监测方案在变工况与强噪声共存情境下的表现。准确率用来衡量整体判别的一致性，召回率更关注对预警与故障样本的覆盖能力，F1值在两者之间进行均衡，更契合早期微弱征兆稀薄且类别边界模糊的现场语境。结合前文提出的阈值化小波降噪、时间对齐与Min-Max归一化的前端协同，以及阶次跟踪与加权D-S证据融合的端云闭环，多源方案把跨通道互补机理转化为稳定的证据信号增益，权重在滑动窗口中缓慢更新，折扣与冲突分配把异常扰动的放大效应压低到可控区间，进而在负载波动与转速漂移条件下保持收敛。与之形成对照的是，单一振动方案在安装位置差异与结构散射显著的样本上容易出现包络泄露与特征漂移，单一温度方案受热惯性拖尾与环境温差耦合影响，对短时异常响应迟缓；多源融合则借助电流通道的电磁特征与温升梯度的慢变信息进行补位，把早期点蚀与轻微不平衡的能量条带从噪声背景中抽离出来。为避免统计偏置，本研究保持三类状态样本数一致，并把预警与故障的误判比重纳入F1口径，使综合评价更加贴近维护决策的容错边界。下表给出三种方案在统一评测流程下的指标汇总，多源融合在三项指标上均呈现明显优势，尤其在召回率与F1值上表现稳健，这说明该方案更契合变工况场景下对健康状态的敏感检测需求；进一步观察高冲突样本可以看到，融合模型把不一致证据

转移至不确定集合，从而避免错误强化并保持召回与准确的共同提升，稳定性来源可归因于前端时间标定与标度统一的基础处理以及证据层面对冲突与不确定性的显式建模。

表1 不同监测方法性能对比表

监测方法	准确率 (%)	召回率 (%)	F1值 (%)
多源融合	98.5	97.8	98.1
单一振动	92.0	90.5	91.2
单一温度	88.3	86.7	87.5

4 结语

本文围绕机电设备多源状态监测的工程痛点，提出前端协同预处理与加权D-S证据融合相结合的框架，完成从时间对齐、阈值化小波降噪、标度统一到阶次域与温升特征提取的闭环设计，借助可靠性折扣与冲突分配将跨通道不一致与异常扰动纳入不确定集合管理，结合边云协同实现权重与参数的稳态更新。三相异步电机实验结果显示，多源融合在准确率、召回率与F1值上均明显优于单通道方案，验证了跨模态互补对早期弱征兆提取与变工况鲁棒性的实质性贡献。工程角度看，统一时钟与端侧轻量计算为现场部署提供了可行路径，融合输出的信任度与不确定度记录为维护策略与寿命评估提供了可追溯依据。仍需关注多源采样异构长期漂移、域偏移下的泛化、工业总线带宽与端侧算力限制等问题，未来将面向无标注或弱标注场景引入自监督与域自适应学习，探索自校准阵列与自适应采样策略，推进模型压缩与流式增量更新，拓展至风电齿轮箱与数控主轴等对象，并与剩余寿命预测深度耦合，进一步提高方法的通用性与工程可持续性。

参考文献

- [1] 袁雷, 赵丹. 光电技术与多模态数据融合在电力设备状态监测中的应用[J]. 灯与照明, 2025, 49(03): 162-164.
 - [2] 卫昆, 郭红艳. 多源数据融合与机器学习的舰船设备故障预警[J]. 舰船科学技术, 2025, 47(22): 180-184.
 - [3] 罗伟, 王增慧, 郑波, 蔡伟, 蓝萃瑕. 多传感器融合技术在锅炉状态监测中的应用[J]. 动力工程学报,
 - [4] 南志超, 叶续雷, 张阿丰, 胡铭冬. 物联网技术在机电设备运行状态监测中运用分析[J]. 模具制造, 2025, 25(07): 184-186.
 - [5] 赵耀敏, 丁涛, 王仕超. 基于多源数据融合的工业物联网多层次监控方法[J]. 现代信息科技, 2025, 9(13): 188-192+198.
 - [6] 周明. 石油企业多源数据融合风险预警系统研究——基于深度学习的防御体系协同决策方法[J]. 中国石油和化工, 2025, (11): 63-65.
 - [7] 王厂东, 杨京礼, 高天宇. 基于数实多维融合的船舶动力系统轴间轴承智能状态辨识[J]. 指挥控制与仿真,
 - [8] 郑泽梁, 吕明琪, 陈铁明, 朱添田, 王飞. 一种基于多模态时序数据融合的工业物联网系统异常检测方法[J]. 小型微型计算机系统,
 - [9] 徐凯, 石滕振, 刘伟, 吕祥彬. 煤矿机电设备智能传感器故障预测与健康研究[J]. 仪器仪表用户, 2025, 32(07): 64-66.
- 作者简介: 赵伯涛(1971—), 男, 汉族, 大专, 研究方向为机电一体化。