

基于振动信号的电机轴承故障检测与维修策略

刘上一

哈电集团佳木斯电机股份有限公司，黑龙江佳木斯

摘要：轴承的健康状况会对设备运行的可靠性产生直接影响，而传统的定期维修方式因存在盲目性，所以难以对突发故障进行精准应对。本文特意提出了一套以振动信号为基础的闭环技术方案，该方案不仅系统地阐述了从传感器的选型、安装以及信号的预处理滤波，再到时域与频域特征参数提取的具体实施方法，借助这一流程得以实现对轴承内圈、外圈以及滚动体故障的类型识别和严重程度分级，进一步地，依据诊断所得到的结果，制定出了分级的维修响应机制以及预测性维修计划优化模型，本研究通过将振动监测、故障诊断与维修决策进行无缝衔接的方式，形成了一套可供现场执行的技术指南，该指南为提升电机的运维效率，以及实现从被动维修向预测性维护的转变，提供了一条完整的技术路径。

关键词：振动信号；电机轴承；故障检测；特征提取；预测性维修

Motor Bearing Fault Detection and Maintenance Strategy Based on Vibration Signals

Shangyi Liu

Harbin Electric Corporation Jiamusi Electric Machine Co., Ltd., Jiamusi, Heilongjiang

Abstract: The health condition of bearings directly impacts the operational reliability of equipment. Traditional periodic maintenance methods, due to their lack of specificity, struggle to address sudden failures effectively. This paper proposes a closed-loop technical solution based on vibration signals. The solution systematically outlines specific implementation methods, covering sensor selection, installation, signal preprocessing and filtering, as well as time-domain and frequency-domain feature parameter extraction. Through this process, it enables type identification and severity classification of faults in the inner ring, outer ring, and rolling elements of bearings. Furthermore, based on diagnostic results, a graded maintenance response mechanism and predictive maintenance plan optimization model are developed. By seamlessly integrating vibration monitoring, fault diagnosis, and maintenance decision-making, this study establishes a field-ready technical guideline. The guideline provides a comprehensive technical pathway to enhance motor operation and maintenance efficiency, as well as facilitate the transition from reactive to predictive maintenance.

Keywords: vibration signal; motor bearing; fault detection; feature extraction; predictive maintenance

1 引言

在复杂工况作用下电机轴承发生失效，往往成为导致非计划停机现象出现以及安全事故发生的主要根源，传统所采用的依赖固定周期开展的预防性维修模式和处于被动状态的事后维修模式，难以契合现代工业对于设备具备高可靠性以及维持低维护成本的双重要求，使得设备维护面临挑战；振动信号作为能够直接反映轴承运行状态的载体，其中蕴含着极为丰富的故障相关信息，并且信号采集过程中规范性的缺乏、特征参数所具备的工程意义不够明确，以及诊断结果与维修行动之间存在的脱节问题，均对该技术实现规模化应用形成了制约；鉴于此，本文的目的在于弥补这一存在的间隙，围绕“检测-诊断-决策”这一核心主线，对一套具有标准化特点且具备可操作性的电机轴承振动监测与维修策略闭环实施方案展开详细的阐述，致力于为设备维护工程师提供清晰明确的技术指导，进而推动预测性维护理念能够得到切实的落地执行，以解决当前设备维护过程中面临的实际问题。

2 振动信号采集与预处理方法

2.1 振动信号采集方案设计

振动信号采集的可靠性是故障诊断的基石，传感器选型优先考虑压电式加速度传感器，其频率响应范围宽，通常需覆盖0.5Hz至10kHz，以捕捉轴承故障引发的高频共振信号。安装位置直接决定信号质量，测点必须尽可能靠近轴承承载区，电机驱动端轴承承受负载更大，是监测重点，传感器应垂直安装于轴承座顶部以敏感捕获径向振动。安装工艺要求刚性连接，采用钢制磁座或胶粘剂确保传感器底面与测点表面平整贴合，防止安装共振频率落入分析频带[1]。采样参数设置依赖采样定理，针对轴承故障特征频率及其高阶谐波，采样频率至少设置为轴承滚动体通过内圈故障频率的3.5倍以上，通常不低于12.8kHz。数据长度需兼顾频率分辨率与计算效率，连续采集32768个数据点可满足多数频谱分析需求，对应2.56秒的采样时间。为获取稳定统计特征，每次测量应连续记录10组以上数据。

2.2 振动信号的预处理技术

原始振动信号混杂多种干扰，预处理旨在增强故障特征信噪比。信号中的噪声主要来源于现场电磁干扰、机械结构传递的非轴承振动以及线路传输噪声。预处理首要步骤是消除信号直流分量，对原始数据序列计算算术平均值并整体减去，避免后续频谱分析中零频处的巨大峰值。数字带通滤波是核心预处理手段，其目的是保留与轴承故障相关的特征频率带，同时抑制低频旋转振动与无关高频噪声[2]。巴特沃斯滤波器因其通带内幅度响应最大平坦特性而被选用，其传递函数定义了系统输入与输出的关系，二阶巴特沃斯带通滤波器的传递函数可表示为：

$$H(s) = \frac{\omega_c^2 s}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q}s + \omega_c^2} \quad (1)$$

式(1)中， s 是复频率变量， ω_c^2 是中心角频率， Q 为品质因数，控制滤波器带宽，通常带宽的精确设定需结合轴承的共振频带。

3 基于振动信号的轴承故障诊断方法

3.1 故障特征参数提取

预处理后的振动信号需转换为可量化的特征参数以支持诊断决策，时域特征直接反映信号的能量与冲击特性，振动速度有效值用于评估整体振动烈度，其值超过ISO 10816标准中对应设备支撑类型报警阈值4.5mm/s，通常表明异常。峰值指标对早期局部损伤的瞬时冲击敏感，正常轴承该值在3至5范围内，当出现点蚀或裂纹时，峰值可跃升至8以上。峭度指标对冲击信号的非高斯特性尤为敏感，正常状态下接近3，其值超过6是轴承出现早期损伤的强有力指示。频域分析依赖于快速傅里叶变换，将时域信号转换为功率谱密度函数[3]。分析时重点考察轴承故障特征频率及其谐波与边带，内圈故障频率、外圈故障频率、滚动体自转频率及保持架频率依据轴承节径、滚动体数量、接触角及主轴转速精确计算。频谱中，外圈故障频率成分幅值稳定突出；内圈故障频率常伴随转速频率的边带，呈现“调幅”特征；滚动体故障则可能激发其

自转频率的倍频。能量谱在2kHz至5kHz高频段的能量积分值也是有效特征，用于量化由冲击激发的共振频带能量。

3.2 故障模式判定流程

故障诊断依据预设的逻辑流程对特征参数进行自动判识，流程始于特征向量的输入，系统首先比对时域健康阈值，振动有效值若持续超过基线值1.5倍，则触发初级警报，标志存在异常。随后流程进入频谱细化分析阶段，计算得到的故障特征频率成分需与理论值匹配，并评估其幅值显著性[4]。设定特征频率幅值超过周围噪声基底平均幅值6dB为有效峰值，若在某一故障特征频率处识别到有效峰值，则判定存在对应类型的局部损伤。严重程度依据多指标融合判定，例如，峭度值大于8且对应故障特征频率幅值超过整体均方根值的20%，可判定为严重损伤。流程最终输出包含故障类型、位置与严重等级的诊断报告，并自动关联至维修策略库，诊断流程逻辑如图1所示。

4 基于诊断结果的维修策略制定

4.1 故障等级评估与维修响应

故障等级评估将诊断结果转化为可操作的行动指令，评估基于多特征融合判据，建立三级分类标准。一级轻微预警对应早期潜在损伤，特征表现为时域峭度值介于4.5至6之间，或某一故障特征频率幅值虽有上升但未超过基线值3倍，频谱中边带成分开始显现。此等级触发黄色预警，维修响应措施为自动提升该设备的在线监测频率，由常规的每24小时一次加密至每4小时一次，并生成观察日志，

该状态允许设备继续运行但需在下一轮计划停机时安排检查。二级中度预警标志损伤已发展，振动有效值超过ISO 10816标准中报警限值的1.2倍，峭度值处于6至8区间，特征频率幅值达到基线值的3至5倍，谐波成分清晰。此等级触发橙色警报，系统自动在生产计划模块中标识该设备，推荐在72小时至未来7天内，利用已有的生产间歇或周末窗口安排计划性停机检查，维修工单自动生成并推送至维护班组，要求准备轴承更换工具与备件[5]。三级严重警报指示故障已进入晚期，振动有效值超停机阈值，峭度值大于8，特征频率幅值超过基线值5倍且伴有丰富的高次谐波，时域波形出现明显周期冲击。

4.2 预测性维修计划的生成与优化

预测性维修计划的核心在于融合故障发展趋势与生产资源约束，系统利用历史特征参数时间序列，采用趋势外推算法预测故障发展轨迹。以振动速度有效值为例，对其过去7天的数据点进行线性或指数回归拟合，外推预测该值达到下一预警等级阈值的时间点，此时间点即为理论维修窗口。计划生成模块将此理论窗口与生产计划排程系统、备件库存数据库、维修人员技能库进行多重匹配与优化计算。首先检索理论窗口前后24小时内的生产空闲时段，若无合适窗口，则计算设备在各生产任务间的强制停机所导致的最小经济损失方案。系统自动校验备件库存，若库存不足则触发采购流程并重新预估到货时间。维修工单内容依据诊断报告具体化，若诊断为外圈故障，工单明确列出所需轴承型号、润滑脂规格、拉拔器与液压螺母等专用工具清单。

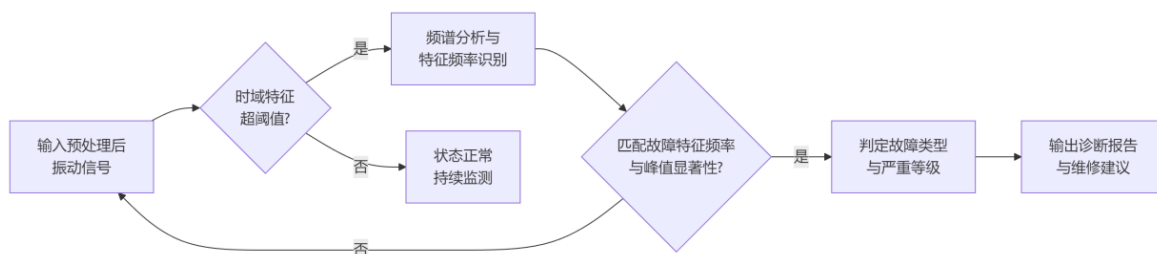


图1. 轴承故障诊断逻辑判定流程图

5 结语

本文所构建的从振动信号采集开始、经故障特征智能诊断至维修决策闭环的一整套完整技术体系,不仅设计了具备标准化特性的信号采集与预处理流程,还提出了包含多维度特征提取以及分步判定逻辑的相关内容,并且建立了与诊断结果直接形成联动的三级维修响应机制和预测性维修计划优化方法,而文章的价值体现于把先进的振动分析技术转化成为现场工程师能够执行且可操作的明确技术路径与行动指南这一方面,以此实现轴承故障的早期发现、精准定位以及预知维修的目标。该方案直接为工业现场的设备健康管理提供服务,借助有效减少非计划停机现象、规避继发性损伤、优化备件库存与维修资源等方式,进而显著提升设备综合利

用率与生产经济效益,推动电机维护模式从传统的事后维修、定期维修向着以数据驱动的预测性维修实现实质性的转变。

参考文献

- [1]高文杰,陈鹏.基于Lab VIEW的电机轴承故障诊断系统设计[J].现代工业经济和信息化,2025,15(06):257-260+263.
- [2]李静,袁志奇.基于PPLCD方法的电机轴承故障振动信号特征提取[J].防爆电机,2024,59(05):10-12.
- [3]王凡,马军,王晓东,等.一种改进的TVD电机轴承故障特征提取方法[J].振动与冲击,2023,42(10):203-214.
- [4]尚前明,陈家君,杜昌,等.基于PCA-VNWOA-LSSVM的感应电机轴承故障诊断[J].应用科技,2023,50(03):93-99.
- [5]杨如意.基于深度残差BiLSTM的轴承故障诊断研究[J].现代计算机,2021,27(24):42-46.

