

电动机轴承智能监测诊断的分析与应用

任聪

大唐阳城发电有限责任公司, 山西 晋城 048102

DOI:10.61369/EPTSM.2026060008

摘 要： 随着工业技术的发展,在工业领域,电机的应用范围不断扩大,提升电机效率的同时也需提高电机的维护技术水平。电机智能维护技术的推广和应用是未来的发展趋势和重要革新课题。轴承作为电机中最关键的组件之一,据相关统计,43%左右的电机故障是由轴承故障引起的。传统的人工检查方式存在效率低、噪声引发的职业病等诸多问题。所以电机轴承的智能监测故障诊断方法的应用,可精准有效识别轴承的故障类型,并及时维护处理。同时,该技术的应用还提供智能化数据分析平台及物联网设备管理等功能,是现代化工业管理的迫切需求。

关 键 词： 电动机轴承智能监测诊断;傅里叶变换与分解;多层域适应

Analysis and Application of Intelligent Monitoring and Diagnosis for Motor Bearings

Ren Cong

Dangtang Yangcheng Power Generation Co., Ltd. Jincheng, Shanxi 048102

Abstract： With the development of industrial technology, the application scope of motors in the industrial field is continuously expanding. While improving the efficiency of motors, it is also necessary to enhance the maintenance technical level of motors. The promotion and application of intelligent motor maintenance technology is the future development trend and an important innovative topic. Bearings, as one of the most critical components of motors, according to relevant statistics, about 43% of motor failures are caused by

Keywords： intelligent monitoring and diagnosis of motor bearings; fourier transform and decomposition; multi-domain adaptation

引言

传统电机轴承诊断方法靠听针听声音,测振仪测振幅,测温仪测温度,取油样分析油质判断轴承的故障状况,各方面因素导致电机轴承使用寿命缩短,维护成本高昂。智能监测通过融合傅里叶数学成果与计算机模块程序技术,应用于电机轴承状态监测诊断,提升电气工程维护人员工作效率的同时,也推动了发电厂进入智能维护新时代。

一、电动机运行工况的巡检分析

进过多年历史经验,我们针对电动机正常运行和故障时声音的对比。分析如下:

正常运行声音应连续均匀,无杂声和异常声。

特大嗡嗡声,说明电流过量,可能是超负荷或三相电流不平衡引起的,特别是电动机缺相运行时,嗡嗡声更大。

不均匀的碰擦声,往往是由于转子与定子相擦发出的异音,即扫膛声。应立即判断处理。

尖锐“吱吱”声高频、刺耳,像金属摩擦缺油、润滑油干涸

沉闷“轰轰”声低频、厚重,伴随振动轴承磨损、间隙变大

断续“嘎嘎”声有节奏的撞击声滚珠破损、保持架损坏。

滚动轴承作为火电厂机械设备中的关键基础部件,广泛应用于各类转动设备中,如汽轮机、发电机、风机、水泵等。其主要作用是支撑旋转体,降低摩擦力,提高设备的运行效率和可靠性。缺油和磨损两类问题,占比超过80%。因此,了解滚动轴承的常见故障类型及原因,对于及时诊断和处理故障,保障火电厂的安全稳定运行具有重要意义。

二、滚动轴承的工作原理、结构及分析

滚动轴承通过滚动体在内、外圈间滚动,将轴与轴承座之间减小摩擦力,使转子能够平稳地旋转。由内圈、外圈、滚动体和保持架组成。部件的分工,同轴一起转动,固定不动。传递载

荷，防止滚动体之间的相互摩擦和碰撞。

轴承故障频率特征是振动故障的重要工具。这些特征频率与轴承的工作状态、几何参数和故障类型密切相关。借助振动信号的频谱，可以提取出与不同类型轴承故障相关的频率成分。

三、滚动轴承的常见故障类型及处理

磨损出现磨损痕迹，精度降低，保证润滑清洁。正确安装调试。

疲劳剥落：滚道或滚动体表面初期为微小裂纹，逐渐扩展成较大面积剥落。合理选用轴承型号和规格，对疲劳剥落的轴承进行修复或更换，避免过载运行。

胶合表面出现熔化、粘连，修复或更换部件用合适的润滑油。降温、减负的运行环境

腐蚀易出现锈斑、腐蚀坑。修复密封阻隔腐蚀物质，较轻锈浊做好防护。

裂纹与断裂危害较大，要及时更换故障轴承，分析故障原因，改进运维操作避免故障再次发生。

四、智能故障诊断方法

（一）轴承故障的频率特征监测数据分析及故障预警

轴承内部结构中的滚动元素、内外圈会在转动时产生特定频率振动。早期缺陷导致某一频率峰值异常上升。然而，在火电厂复杂的工作环境下，滚动轴承容易出现各种故障，严重影响设备的正常运行。傅里叶变换结合频谱分析，实现了轴承状态的实时在线监测，减少了意外停机风险。“故障频率表”将频谱异常快速映射到具体部件，极大提升诊断效率。经过历史数据分析与设备管理云平台，我们设计可视化云平台进行远程的数据分析，对电机轴承故障监测及发出故障预警。

如图：傅立叶变换公式

正变换（时域 → 频域）

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

逆变换（频域 → 时域）

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)e^{j\omega t} d\omega$$

- j ：虚数单位， $j^2 = -1$
- ω ：角频率， $\omega = 2\pi f$

$F(\omega)$ 是频域傅里叶变换的输出

$f(t)$ 是输入时域函数

$2\pi f$ 是角频率，单位为弧度/秒

为了识别轴承的故障频率，通常采用以下步骤：1. 振动监测：通过振动传感器（如加速度计）测量轴承的振动信号。2. 快速傅里叶变换：对采集的时域信号进行快速傅里叶变换（FFT），转换到频域。3. 希尔伯特变换：对时域信号进行希尔伯特变换，提取信号的包络信息。当轴承发生故障时，通常表现为低频调制

现象，去除掉高频噪声并突出低频调制成分，故障特征便明显展示出来。4. 识别故障频率：通过观察频谱图，寻找相对应的频率峰值。根据频谱中的频率特征，可诊断确定轴承的故障类型，如滚动体故障、内圈或外圈故障等。

（二）电动机轴承振动多工况频谱分析

电动机内部多种机械运动叠加，产生复杂振动。一个机械振动信号表面杂乱无章，时间域波形难以直观判定故障。随着计算机技术的发展，傅里叶变换实现了数字化：离散傅里叶变换（DFT）和快速傅里叶变换（FFT）极大提升了运算效率，使得复杂信号的实时频谱分析成为可能。FFT算法的诞生，彻底改变了工业监测的技术格局，实现了大规模数据下的高效频谱计算。经过傅里叶变换后，我们可以清晰看到信号中包含哪些振动频率，哪些频率异常突出，这些频率正是设备内部机械结构振动和缺陷的“指纹”。傅里叶变换帮助将这些混杂振动分解为多个频率成分，揭示诸如曲轴不平衡、齿轮啮合等问题。通过构建不同转速下的频谱色彩图，能清晰观察故障随工况的演变。针对电动机轴承的多工况频谱分析，我们从常规的“转子类故障”聚焦到轴承特征频率随工况的变化规律上。轴承故障频率不是简单的转速倍数，而是基于轴承几何尺寸和转速的非整数倍计算值。核心特征：故障频率随转速线性漂移，轴承故障频率会随转速等比例变化：

内圈故障频率 (BPFI) $\approx 0.6 \times \text{转速频率} \times \text{滚珠数}$

外圈故障频率 (BPFO) $\approx 0.4 \times \text{转速频率} \times \text{滚珠数}$

保持架故障频率 (FTF) $\approx 0.4 \times \text{转速频率}$

滚珠故障频率 (BSF) 涉及自转计算，常表现为边频。

多工况分析的三个关键角度

负载工况（载荷变化）：固定转速下增加负载。BPFI 和 BPFO 幅值应基本稳定，如果随负载显著增长，可能轴承已有游隙配合问题。BSF（滚珠故障）对载荷最敏感，重载下可能完全淹没在噪声中。

温度工况（冷、热态运行）：冷机启动时，配合变紧，振动较小；温度升高后，转子热膨胀可能加剧轴向预紧力，导致故障频率幅值逐步升高。

转速工况（变速过程）：从极低转速缓升到额定转速。若出现“雪崩式”跳变（噪声突然增大且频谱出现宽频抬升），通常表示进入共振区。严重的内圈故障在低速重载时，时域波形会出现周期性尖峰，间隔时间恒定。

在实际工作中，结合火电厂的具体情况，采用合适的故障监测诊断和处理方法，允许远程监控和管理设备，实时跟踪各电机轴承的状态和保养信息，实现同时对多个电机进行检测和统一控制，从而优化资源分配并提升管理效率。

（三）电机轴承故障与气隙偏心在线智能诊断

通过分析电机电流信号的频谱特征来诊断潜在的机械故障。采集轴承直径、轴承节圆直径、接触角、电机极数、轴承滚珠数量，电流频率等。选择合适的滤波器类型和截止频率，应用巴特沃斯滤波器进行抗混叠滤波处理，以消除高频噪声和干扰。对滤波信号进行快速傅里叶变换，将时域到频域转换，并计算幅值谱

分贝刻度以便于分析。算法基于输入的电机参数计算旋转频率，推导出各类轴承内外圈保持架缺陷频率、内外圈缺陷频率、滚动体缺陷频率。同时计算气隙偏心故障的边带频率。在频谱中搜索这些特征频率对应的幅值，并与预设阈值进行比较，若超过阈值则判定存在相应故障。诊断结果实时显示在界面的文本框中，并以可视化方式在频谱图上标记故障频率位置、阈值线和特征线。最后，可以生成包含 FFT 频谱图、电机参数表格、故障诊断结果和轴承故障判断表的详细 Word 格式报告，实现从数据输入到诊断报告输出的全流程自动化。

（四）变速工况下轴承未知故障特征提取算法

在实际工程中，滚动轴承故障受到强噪声干扰，时频图可读性通常很差。分数阶傅里叶变换提取故障信号特征较弱，无法清晰地识别出来。仅依靠分数阶傅里叶变换可能无法满足轴承故障诊断的要求。结合算法先通过希尔伯特变换来获得包络信号。在经分数阶傅里叶变换滤波降低干扰。做零均值处理去除直流分量。依托自适应非周期随机共振增强轴承故障特征频率，提高信号输出信噪比。最后，提取瞬时频率-时间曲线以识别故障类型。实测与理论故障特征频率，则判断为故障类型。该算法只适用于线性变速条件下（线性升速或降速）的轴承故障特征提取。

（五）谐波傅里叶分解及其在旋转机械系统故障识别中的应用

滚动轴承产生的故障特征在频谱分布中表现出能量集中的特点，从而为在状态监测应用中部署一维信号分解技术提供了重要机会。谐波傅里叶分解（HFD）框架通过对功率谱密度（PSD）进行傅里叶趋势分析来推导模态边界，有效降低了计算复杂性并消除了伪分量。采用零相傅里叶滤波器组进行频带分割，在最大限度减少频谱泄漏的同时提高了计算效率。

为了全面提取特定频带的信息，HFD 采用零相位傅里叶滤波器组，可最大限度地减少能量泄漏并优化计算效率。此外，还可集成谐波谱峭度（HSK）以自主量化周期性脉冲分量，同时减轻随机脉冲和噪声的干扰。能够可靠地识别内外滚道中的局部缺陷。

轴承故障信号存在周期性脉冲和不确定的单脉冲，设备运行

会产生调制干扰，会影响故障诊断的精准度。轴承内外圈故障时域波形上有很大区别，故障信息覆盖整个频谱。通过观察来判断包络谱既费时又不合理。HSK 不仅可以抑制单脉冲、噪声与调制干扰，对内圈和外圈的故障信息敏感度高，能识别筛故障信息，特征频率及其谐波。在知道设备参数前提，采用 HFD 方法诊断故障是有效的。实证 HSK 对周期性脉冲辨别都良好，HFD 方法在有效分离故障分量和减少干扰方面的优越性，这对于滚动轴承的精确故障诊断至关重要。

（六）融合全局与局部特征的多层域适应故障诊断

另一方面，我们设计局部特征提取模块，结合深度可分离卷积和部分卷积，可以更精细地捕捉局部特征信息。多头注意力机制、全局模块和金字塔池化模块，协同增强了全局特征的提取能力。还要实现源域与目标域特征分布的高效对齐，动态卷积与分层域对齐结合机制来动态调整卷积核的感受视野，最终结合单核最大均值差异与多核最大均值差异方法，通过域间特征的匹配，便可提升模型在目标域上的迁移适应性。

评估模型在不同数据集上的跨域迁移能力，我们在轴承故障历史数据集开展迁移实验。数据集的核心内容是对轴承在不同负载、转速和故障类型下的振动信号和频率。模型将一维信号调整为二维图像形式在源域与目标域上的性能分析，再从特征提取能力、知识迁移效果及模型鲁棒性等方面进行综合验证，从而缩小两域之间的数据分布差异，提升轴承的故障诊断性能。

五、总结与展望

我们通过识别电机轴承的故障频率及振动的多工况频谱数据，设计电机参数在线偏离阈值，引入轴承故障提取算法，建立谐波傅里叶分解框架，让滚动轴承复杂的机械振动和声学信号变得直观清晰，最后引入全局与局部特征的多层域适应故障诊断方法，让维护人员精确判断故障、及时处理，建立电机轴承保养标准化清单，实现延长电机轴承使用寿命、节省能源的目标。未来随着计算机技术和人工智能的不断发展，电机轴承诊断技术也会进一步让电气维护进入全新的人工智能时代。

参考文献

[1] 欧阳昌乐,张春,吴文泰,栾惟聪,夏祥子.基于改进动态事件触发机制的微电网经济调度一致性算法[J].发电技术.2025,46(06):1240-1250.
[2] 方超,黎璿,徐辉平.基于数据挖掘技术的发电设备故障预警系统[J].电机技术.2024(05):27-31+36.
[3] 吕佩勋.电力机械设备安装施工技术分析.中国战略新兴产业[J].2019(44):1-4.
[4] 硕瑞.机械设备自动化供电节能控制系统研究[J].现代制造技术与装备.2025(7):208-210.
[5] 王建刚.电动机常见机械故障分析及维护检修探讨[J].科学与信息化.2021(8):54-56.