

基于电流特征分析的电动机转子故障诊断方法研究

李欢欢 杜 峰

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘 要：电动机转子故障是导致电机非计划停机的主要原因之一，传统振动监测在转子故障早期识别中存在局限性。定子电流特征分析作为一种非侵入式诊断手段，可通过检测转子故障引发的电流频谱特征变化实现故障辨识。本文系统分析了异步电动机转子断条与偏心故障的电流特征机理，研究了基于改进型MCSA算法、希尔伯特变换和Park矢量模量的故障特征提取方法，提出了以边频分量幅值比和基频幅值比为量化指标的故障诊断流程与严重程度评估体系。研究表明，电流特征分析方法对转子断条和静态偏心故障具有较高的诊断灵敏度，结合在线监测技术可实现转子状态的实时评估，为电动机预测性维护提供有效技术手段。

关键词：电动机；转子故障；电流特征分析；MCSA；故障诊断

引言：异步电动机转子长期承受交变应力、热应力和离心力作用，断条、偏心等故障时有发生。传统振动监测在井下、高温等恶劣工况下安装维护困难，信号易受噪声干扰，早期故障识别能力有限。定子电流信号蕴含丰富的转子状态信息，通过分析电流频谱中的特征频率可实现非接触式诊断，具有传感器安装简便、信号获取成本低、不影响设备运行等优势。本文从转子故障的电流特征机理出发，系统研究基于电流特征分析的诊断方法，旨在为电动机转子故障的早期识别提供高效、可靠的检测手段。

1 电动机转子常见故障类型与电流特征机理

1.1 转子典型故障模式与成因分析

异步电动机转子故障主要包括转子断条、转子偏心、端环断裂及轴系弯曲等类型，其中转子断条和偏心故障发生率最高，约占转子故障总数的70%以上。转子断条指鼠笼转子导条因交变载荷、热应力和离心力作用发生断裂，成因包括铸造缺陷、频繁启动与负载冲击导致的疲劳断裂及运行温度过高所致的热损伤。转子偏心指转子与定子间气隙不均匀，分为静态偏心（中心线偏移方向固定）和动态偏心（中心线随旋转移动），分别由轴承磨损、轴弯曲或加工装配误差，以及轴承间隙过大、转子不平衡等原因引起。端环断裂多发生于频繁启动和大惯性负载工况，启动电流热冲击是主要诱因。各类故障物理成因不同，在定子电流信号中呈现的频谱特征各有差异^[1]。

1.2 转子故障的电流特征产生机理

定子电流中包含转子状态信息的物理基础在于电磁感应与机电耦合效应。正常运行时定子电流为纯净基波正弦量，频率为电源频率 f 。转子断条故障时，导条不连

续性破坏转子磁动势对称性，产生以转差频率 $s f$ 为特征的非对称分量，通过气隙磁场与定子绕组耦合，在定子电流中感应出频率为 $(1\pm 2s)f$ 的边频分量——称为MCSA（电机电流特征分析）的基本诊断公式。边频与基频的幅值比直接反映断条严重程度：轻微断条时约-50dB至-40dB，严重断条时可升至-30dB以上。转子偏心故障的电流特征不同：静态偏心产生频率为 $f\pm f_r$ 的附加分量，动态偏心产生频率为 $f\pm k f_r$ 的边频族（ f_r 为转子机械旋转频率）。两种故障特征频率位置不同，为故障类型区分提供了物理依据。

1.3 电流特征诊断的优势与适用条件

电流特征诊断相比振动监测具有多方面优势。安装方面，电流信号直接从电源线或电流互感器获取，无需在电机本体安装传感器，规避了恶劣工况下安装维护困难的问题。信号质量方面，电流信号经电网和绕组“滤波”，对高频噪声具有天然抑制，信噪比较高。诊断覆盖范围方面，电流信号包含机电耦合的所有信息，可覆盖转子断条、偏心、轴承故障等多种类型。经济性方面，电流互感器成本远低于振动传感器阵列，且可依托现有电力监控系统实现采集。但该方法也存在局限——负载波动大时边频易被掩盖，变频供电时基频变化增加分析难度，轻微故障早期特征频率易淹没于噪声。因此，电流特征诊断更适合作为在线筛查手段，与振动监测互为补充。

2 基于电流信号的转子故障特征提取方法

2.1 定子电流信号的采集与预处理

电流信号采集通过电流互感器或霍尔效应传感器从电机电源线进线端获取，可采用三相同时采样或单相采样。采样频率设定应充分考虑Nyquist定理，但对于

转子断条诊断，边频与基频间隔极小（ $2s\ f$ 一般不超过5Hz），对频率分辨率的要求远高于采样频率，因此采样时长通常需达到5~10秒以上以满足 $\Delta f \leq 0.1\sim 0.2\text{Hz}$ 的分辨率要求。信号预处理包括滤波去噪（带通滤波器滤除工频以外干扰）、直流分量消除及趋势项去除^[2]。对变频调速电机，需同步采集电源频率信息以确定基频变化，为后续频谱校正提供依据。

2.2 MCSA频谱分析方法

MCSA是转子断条故障诊断最经典的方法。核心操作为：对定子电流信号进行FFT得到幅值频谱，在基频两侧搜索 $(1\pm 2s)f$ 边频分量，计算边频与基频幅值比以量化故障严重程度。由于边频与基频极为靠近（ $2s\ f$ 一般0.5~5Hz），要求极高的频率分辨率，常采用延长采样时间、插值校正、细化频谱分析（Zoom-FFT）或Chirp-Z变换等手段。工程上以边频幅值比 R_b 为定量指标： $R_b < -50\text{dB}$ 为正常； $-50\text{dB} \leq R_b < -40\text{dB}$ 为轻度预警； $-40\text{dB} \leq R_b < -30\text{dB}$ 为中度故障； $R_b \geq -30\text{dB}$ 为严重故障。该方法有效性已获大量工程验证，但需在稳态工况下采集数据以排除负载波动干扰。

2.3 基于希尔伯特变换的特征增强方法

早期故障时边频幅值过低，直接频谱分析难以有效识别。希尔伯特变换通过提取信号的瞬时幅值包络，使转子断条导致的幅值调制效应在包络信号中以差频 $(2s\ f)$ 形式出现，规避基频泄漏干扰。实现流程为：对原始电流带通滤波，进行希尔伯特变换得到解析信号，提取瞬时幅值序列，减去直流分量后对净包络信号进行FFT分析。包络谱中 $2s\ f$ 处出现峰值即为断条故障证据，可将信噪比提升10~20dB，尤其适用于强噪声背景下的早期检测。但该方法对信号平稳性要求较高，非稳态工况需结

合自适应滤波预处理。

2.4 Park矢量模量的故障判别方法

Park矢量法对转子偏心故障具有较好诊断效果。将三相电流通过Park变换转换为两相静止坐标系分量 (i_d, i_q) ，正常时轨迹为圆形、模量为常数；偏心时轨迹变为椭圆、模量出现周期性波动。对模量频谱分析， f_r 处及其倍频处峰值即为偏心诊断依据： f_r 分量幅值超过-40dB判为静态偏心， $k\ f_r\ (k \geq 2)$ 分量异常提示动态偏心。该方法无需获取转差率，对变频工况适应性优于MCSA。实际应用中可将两种方法结合——MCSA主攻断条，Park矢量主攻偏心，互相佐证提高诊断准确率。

3 转子故障诊断流程与严重程度评估

3.1 基于改进MCSA的诊断流程设计

本文设计完整诊断流程包括数据采集、信号预处理、特征提取、故障判别和结果输出五个环节。采集环节设定采样频率不低于5kHz、时长不少于10秒，优先在额定负载稳定时段采样。预处理环节执行带通滤波（ $0.5f\sim 3f$ ）、基频估计（过零检测或DFT插值）和转差率计算。特征提取环节并行执行三条路径：MCSA直接频谱分析提取 R_b ；希尔伯特包络谱分析提取 $2s\ f$ 峰值幅值 R_p ；Park矢量模量频谱分析提取 f_r 及倍频峰值幅值 R_e 。判别环节综合判断： R_b 超标而 R_e 正常为断条， R_e 超标而 R_b 正常为偏心，两者均超标为复合故障^[3]。

3.2 故障严重程度的量化评估指标

实现故障严重程度的量化评估是诊断从定性走向定量的关键。本文构建了以边频幅值比 R_b 为主要指标、辅助参考指标为补充的量化评估体系。转子断条故障的严重程度以 R_b （边频分量幅值与基频分量幅值之比）为核心指标，按图1进行分级评估：

分级	R_b 范围	状态描述	建议措施
0级(正常)	$R_b < -50\text{dB}$	转子状态良好	继续运行，定期监测
1级(注意)	$-50\text{dB} \leq R_b < -40\text{dB}$	存在轻微断条或铸造缺陷	加密监测周期，跟踪趋势
2级(异常)	$-40\text{dB} \leq R_b < -30\text{dB}$	转子导条断裂1~2根	安排近期停机检查
3级(严重)	$R_b \geq -30\text{dB}$	多根断条或端环严重损伤	立即安排检修或更换

图1 转子断条故障严重程度分级评估表

转子偏心故障的严重程度以Park矢量模量频谱中 f_r 分量的幅值比 R_e 为核心指标： $R_e < -45\text{dB}$ 为正常， $-45\text{dB} \leq R_e < -35\text{dB}$ 为轻度偏心（轴承磨损初期）， $R_e \geq -35\text{dB}$ 为明显偏心（需安排检修）。同时引入辅助参考指标作为趋势诊断和交叉验证的依据：MCSA方法中 $(1-2s)f$ 与 $(1+2s)f$ 两个边频的幅值对称度（二者幅值差小

于3dB为正常断条，差值超过6dB需考虑负载波动或气隙不均匀的影响）；以及 R_b 和 R_e 的时间变化率（趋势斜率），用于判断故障劣化速度——斜率大于0.5dB/月时提示劣化加速，应缩短监测周期或提前安排检修。

3.3 诊断方法的实验验证

在11kW异步电机实验平台模拟不同数量断条（1根、

2根、3根)和不同偏心程度(10%、20%、30%气隙偏差)的故障状态,额定负载下采集电流信号(10kHz、15秒)。结果表明:1根断条时直接MCSA中 $R_b = -47\text{dB}$ 处于边界,希尔伯特包络谱分析后信噪比从12dB提升至28dB,实现可靠检测;3根断条时 $R_b = -28\text{dB}$,诊断明确。静态偏心10%时Park矢量模量分析中 $R_e = -42\text{dB}$,可清晰识别 f_r 分量;30%时 $R_e = -32\text{dB}$, $2f_r$ 和 $3f_r$ 分量亦显著升高。与振动监测对比,电流特征分析法对早期断条检测提前约48小时发现异常,在偏心检测中灵敏度相当但无需安装传感器,工程适用性更优。

4 工程应用与实施建议

4.1 在线监测系统架构设计

系统采用“边缘采集+站端分析+平台管理”三层架构。边缘采集层在电机进线端安装三只电流互感器(量程1.5~2倍额定电流,精度不低于0.5级),通过数据采集终端完成信号调理和模数转换(采样率 $\geq 5\text{kHz}$,分辨率 ≥ 16 位),按设定策略(日常每8小时一次,异常时加密至每小时一次)传输数据。站端分析层部署诊断算法,自动执行FFT分析、边频提取、Park矢量计算和故障判别,维护各电机故障特征趋势曲线。平台管理层提供设备状态看板(绿/黄/红展示健康状态)、故障预警推送(短信/APP)及诊断报告自动生成功能,支持远程掌握所有电机转子健康状态。

4.2 工程应用中的关键问题与对策

负载波动是最常见干扰——转差率 s 变化使边频漂移,应对策略包括采用短时傅里叶变换跟踪边频动态变化,或选择负载平稳时段采集。变频供电时电流含大量开关频率谐波及基频宽范围变化,应对策略包括先进行基频跟踪、将频谱归一化到基频坐标系,或采用阶比跟踪技术。弱信号检测是早期诊断核心难点——边频幅值仅-50dB量级,应对策略包括采用加窗插值FFT减少频谱泄漏(Hanning窗或Blackman窗),结合希尔伯特包络解调提升信噪比,以及对连续多次结果进行趋势综合分析而非单次判断^[4]。

4.3 经济性与适用性分析

一套完整监测系统材料成本约1.5~2.5万元,远低于振动在线监测系统的8~15万元,运行维护成本极低。以200kW电机为例,若在早期(1根断条)发现并安排计划检修,费用约0.5~1万元;若发展至严重阶段导致突发停机,抢修及生产损失可达20~50万元/天。系统年投入约0.5~1万元,投入产出比极为可观。适用性方面,该方法适用于所有工频或变频供电的异步电动机,尤其适合煤矿井下、化工厂防爆区等振动传感器安装受限场景。局限性在于:对频繁启停或负载剧烈波动的电机准确性降低,需与振动监测结合;对双馈电机、同步电机等非鼠笼结构不适用。

结束语

基于电流特征分析的电动机转子故障诊断方法以定子电流为信息载体,通过提取转子故障引发的频谱特征变化实现非侵入式故障辨识,为传统振动监测提供了有效补充。本文系统分析了转子断条与偏心故障的电流特征机理,研究了基于改进MCSA、希尔伯特变换和Park矢量模量的特征提取方法,构建了完整的诊断流程与量化评估体系,并通过实验验证了方法的有效性。随着人工智能技术的发展,深度学习与电流特征分析的融合将进一步提升诊断智能化水平,为电动机预测性维护提供更强大的技术支撑。

参考文献

- [1]范旭峰.电动机故障诊断中的电气特征分析技术[J].科学技术创新,2025(20):9-12.
- [2]王攀攀,王宇佩,张成,等.仿真数据驱动的感应电动机定转子故障迁移识别方法[J].中国电机工程学报,2026,46(5):2080-2091,中插28.
- [3]郭家豪,欧阳晖,刘振兴.基于APSO-SSVM的异步电动机转子故障诊断[J].电机与控制应用,2023,50(10):91-99.
- [4]郭嘉鑫,常喆,许涵宇,等.基于仿真数据驱动的感应电动机转子断条迁移故障诊断方法[J].电工技术,2025(21):253-257,260.