

异步电机常见故障诊断与检测方法研究

李 廷

宁夏西北骏马电机制造股份有限公司 宁夏 石嘴山 753000

摘要: 异步电机作为工业领域中最广泛应用的动力设备之一,其运行状态直接关系到整个生产系统的安全、稳定与效率。一旦发生故障,不仅会造成设备停机、生产中断,还可能引发严重的安全事故和巨大的经济损失。因此,对异步电机进行有效的故障诊断与检测具有重要的理论价值和现实意义。本文系统梳理了异步电机常见的故障类型及其产生机理,重点分析了当前主流的故障诊断与检测方法,包括基于电流信号分析(MCSA)、振动信号分析、温度监测、绝缘电阻测试以及基于人工智能的智能诊断技术。通过对各类方法的原理、优缺点及适用场景进行比较,本文旨在为工程实践中异步电机的状态监测与故障预警提供理论依据和技术参考,并对未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 异步电机;故障诊断;状态监测;电机电流信号分析;人工智能

引言

在现代工业自动化体系中,异步电机(Asynchronous Motor),尤其是三相鼠笼式异步电机,因其结构简单、坚固耐用、成本低廉、维护方便等优点,被广泛应用于风机、水泵、压缩机、传送带等各类驱动系统中,被誉为“工业的心脏”。据不完全统计,在全球工业用电中,电动机消耗的电能占比超过60%,其中异步电机占据了绝对主导地位。然而,长期在复杂工况下运行,异步电机不可避免地受到电气应力、机械应力、热应力以及环境因素(如粉尘、湿度、腐蚀性气体)的影响,导致其内部部件逐渐老化或损坏,从而引发各种故障。传统的“事后维修”或“定期检修”模式存在明显的滞后性和盲目性,无法有效预防突发性故障。相比之下,基于状态监测的预测性维护(Predictive Maintenance)策略,通过实时或定期采集电机运行数据,利用先进的信号处理与模式识别技术,能够提前发现潜在故障征兆,实现“早发现、早处理”,从而显著提高设备的可用性、可靠性和安全性,降低全生命周期的运维成本。因此,深入研究异步电机的故障机理,并开发高效、准确、鲁棒的故障诊断与检测方法,已成为电机工程、电力电子、信号处理及人工智能等多个学科交叉融合的重要研究方向。

1 异步电机常见故障类型及机理分析

1.1 电气故障

电气故障主要源于电机绕组绝缘性能的劣化或导体结构的破坏。其中,定子绕组故障是最为常见且危害较大的一类。当电机长期运行于高温、高湿或存在电压冲击的环境中,绕组绝缘材料会逐渐老化,导致匝间短路的发生。这种局部短路使得该相绕组的有效匝数减少,阻抗下降,进而引起局部电流急剧增大,产生异常高温,形成

恶性循环,最终可能演变为相间短路或对地短路,造成灾难性后果。此外,转子故障同样不容忽视,尤其是在鼠笼式异步电机中,转子导条在频繁启停、重载启动或负载剧烈波动等工况下,承受着巨大的交变电磁力和热应力,极易在焊接点或导条本体上产生裂纹乃至断裂^[1]。断条故障会破坏转子电流的对称分布,扰动气隙磁场,导致输出转矩出现周期性脉动,同时伴随振动加剧、效率下降和温升异常。除了电机本体问题,外部电源质量也对电机健康状态有直接影响。例如,三相电压不平衡或缺相运行虽非电机内部故障,但会诱发不对称磁动势,使定子电流畸变,加速绕组发热和绝缘老化,甚至间接导致转子过热或轴承电流腐蚀等问题。

1.2 机械故障

机械故障通常表现为运动部件的磨损、松动或几何偏差。轴承作为支撑转子旋转的关键部件,其失效在所有机械故障中占比最高。润滑不良、安装误差、过载运行或异物侵入等因素都会加速轴承滚动体、内外圈或保持架的疲劳损伤,初期表现为微弱的周期性冲击振动,随着损伤扩展,振动能量在特定频率处显著增强。转子不平衡则是另一类典型机械问题,其根源可能来自制造公差、装配偏心、运行中积尘不均或转子部件脱落。不平衡质量产生的离心力与转速平方成正比,会在径向方向激发强烈的1倍频振动,长期作用下会加剧轴承磨损甚至引发共振。此外,当电机轴与负载轴在安装或运行过程中发生中心线偏移时,即出现转子不对中现象,这会在联轴器处产生附加弯矩,导致振动频谱中2倍频成分异常突出。气隙偏心作为一种特殊的几何缺陷,无论是静态偏心(定转子几何中心不重合)还是动态偏心(转子轴心轨迹呈椭圆),都会改变气隙磁导的空间分布,使得

气隙磁场谐波含量增加,进而调制定子电流和振动信号,表现出复杂的频谱特征。

1.3 混合故障

在实际工业现场,单一故障往往只是理想化的假设。更常见的情况是多种故障相互耦合、彼此诱发。例如,轴承早期磨损可能导致转子轻微不对中,进而引起振动加剧和额外摩擦发热;而持续的温升又会加速绕组绝缘老化,降低其电气强度;与此同时,若电网存在电压不平衡,将进一步恶化电流分布,形成多重应力叠加效应。这种故障间的非线性交互作用使得故障特征相互掩盖或变形,极大增加了诊断的复杂性和不确定性。因此,现代故障诊断技术必须具备识别和解耦多故障并发的能力,才能真正满足复杂工业场景的需求。

2 异步电机故障诊断与检测方法

针对上述多样化的故障模式,研究人员发展出多种诊断与检测手段,从传统的物理量监测到前沿的人工智能方法,形成了多层次的技术体系。

2.1 基于电机电流信号分析(Motor Current Signature Analysis, MCSA)

电机电流信号分析(MCSA)之所以成为应用最广泛的在线诊断技术,根本原因在于其物理基础坚实且实施便捷。电机内部任何故障——无论是电气的还是机械的——都会扰动其内部电磁场的平衡状态,而这种扰动必然以调制的形式反映在定子电流中。以转子断条为例,故障导条导致转子回路不对称,使得气隙磁场出现额外的谐波分量,这些谐波与主磁场相互作用,在定子电流频谱中于电源频率两侧产生特征边频带,其频率位置由转差率精确决定。通过高分辨率频谱分析,工程师可以清晰识别这些边频,并计算其幅值比作为故障严重程度的量化指标。类似地,定子绕组匝间短路会破坏三相电流的对称性,引入负序电流和谐波成分,这些特征可通过Park矢量变换或对称分量法有效提取^[2]。MCSA的最大优势在于仅需在供电线上接入低成本的电流互感器,无需停机或改造电机本体,非常适合集成到现有的配电监控系统中。然而,该方法对负载波动较为敏感,尤其在轻载或空载工况下,故障特征往往被噪声淹没;此外,准确的转速信息对于边频定位至关重要,这在无编码器的普通工业电机上可能构成挑战。

2.2 基于振动信号分析

振动信号分析作为机械故障诊断的经典手段,其有效性建立在“故障源—传递路径—传感器响应”这一完整动力学链条之上。当轴承出现点蚀或剥落时,滚动体每经过缺陷区域就会产生一次微冲击,这种周期性激励

通过轴承座传递至电机外壳,被加速度传感器捕获。通过对振动信号进行频域分析,可以将其分解为不同频率成分的能量分布,而轴承各部件(内圈、外圈、滚动体、保持架)的故障均有其理论计算的特征频率,若在频谱中对应位置出现能量峰值,则可判定相应部位存在损伤。对于转子不平衡或不对中等故障,其振动特征则主要体现在低频段(1X、2X转频)的幅值异常。为了应对非平稳运行工况(如启停、变速),时频分析方法如小波变换或经验模态分解被引入,以揭示故障特征随时间演变的规律^[3]。尽管振动分析对机械故障极为敏感且结果直观,但其局限性也不容忽视:传感器需牢固安装于电机本体,增加了系统复杂性和成本;外部环境振动(如邻近设备运行)易造成干扰;更重要的是,对于深藏于电机内部的电气故障,振动信号的响应往往微弱且缺乏特异性。

2.3 基于温度监测

温度作为反映能量损耗的综合指标,几乎所有的电机故障最终都会以温升异常的形式表现出来。无论是绕组短路引起的焦耳热剧增,还是轴承磨损导致的摩擦热积累,亦或是通风不良造成的散热效率下降,都会使电机关键部位的温度偏离正常范围。因此,通过在定子槽内预埋热电偶或使用红外热像仪进行非接触式扫描,可以实现对电机热状态的连续监控。这种方法原理简单、易于理解,常被用作安全保护的最后一道防线。然而,温度监测本质上是一种滞后性指标,只有当故障发展到一定程度、能量损耗显著增加时,温升才会被可靠检测到,这使其难以胜任早期预警的任务。此外,温度变化无法提供关于故障具体类型的任何信息,仅能提示“可能存在异常”,需结合其他诊断手段进一步确认。

2.4 基于绝缘电阻测试

绝缘电阻测试是评估电机电气健康状况不可或缺的离线检测环节,属于预防性维护的标准操作。其基本原理是利用高压直流源(如兆欧表)施加于绕组与地之间或相与相之间,测量由此产生的泄漏电流,从而计算出绝缘电阻值。一个健康的绝缘系统应具有极高的电阻(通常在数百兆欧以上),而受潮、污染或老化的绝缘则会导致电阻值显著下降^[4]。为进一步区分可逆性受潮与不可逆性老化,工程上常采用极化指数(PI)测试,即比较1分钟与10分钟时的绝缘电阻比值。尽管该方法操作简便、成本低廉,且能有效筛查出存在严重绝缘隐患的电机,但其致命缺陷在于必须在电机完全断电停机状态下进行,无法用于在线监测;同时,它只能反映绝缘的整体劣化程度,无法定位具体的故障点或判断故障的早期萌芽状态。

2.5 基于人工智能 (AI) 的智能诊断方法

近年来,人工智能技术的迅猛发展为电机故障诊断注入了新的活力。传统诊断方法高度依赖专家经验进行特征设计和阈值设定,面对日益复杂的多故障耦合场景显得力不从心。而AI方法,特别是深度学习,能够从原始或浅层特征数据中自动学习深层次、高判别性的故障表征。其典型工作流程是:首先构建一个多传感器数据采集系统,同步获取电流、电压、振动、温度等多维信号;然后通过信号处理技术(如FFT、STFT、小波变换)将时域信号转化为更适合网络输入的形式(如频谱图、时频图);最后,利用卷积神经网络(CNN)强大的空间

特征提取能力,或长短期记忆网络(LSTM)对时序依赖的建模能力,直接从数据中学习故障模式与类别标签之间的映射关系。相较于传统机器学习方法(如SVM、随机森林),深度学习省去了繁琐且易出错的手工特征工程步骤,端到端的学习方式使其在大数据支撑下展现出卓越的泛化性能。当然,AI方法也面临挑战:高质量标注数据的获取成本高昂;模型决策过程缺乏透明度,影响工程信任度;且对计算资源有一定要求,限制了其在资源受限边缘设备上的部署。尽管如此,AI无疑是推动故障诊断从“经验驱动”迈向“数据驱动”的关键力量。

3 各类方法的综合比较与应用建议

表1: 各类方法的综合比较

方法	主要适用故障	在线/离线	传感器要求	优点	缺点
MCSA	转子断条、定子绕组故障	在线	电流互感器	成本低,安装方便,对电气故障敏感	对负载敏感,需转速信息
振动分析	轴承、不平衡、不对中	在线	加速度传感器	对机械故障极其敏感	安装复杂,易受干扰
温度监测	所有故障(晚期)	在线	热电偶/红外	原理简单,直观	响应滞后,无法早期预警
绝缘测试	绝缘老化、受潮	离线	兆欧表	标准化,操作简单	无法在线,无故障定位
AI智能诊断	多故障、复合故障	在线	多传感器融合	自动化、智能化,潜力巨大	依赖数据,可解释性差

在实际工程应用中,单一的诊断方法往往难以满足全面、可靠的监测需求。因此,“多源信息融合”已成为主流趋势。通过同时采集电流、振动、温度等多种信号,并利用数据融合算法(如D-S证据理论、卡尔曼滤波或深度学习中的多模态融合网络),可以相互印证、优势互补,从而构建一个更加鲁棒和精准的故障诊断系统。

4 结语

本文全面综述了异步电机常见故障类型、产生机理及主流诊断检测方法。研究发现,MCSA和振动分析等传统方法在特定场景仍作用显著,深度学习等AI技术为解决复杂未知故障提供新途径。未来,异步电机故障诊断技术将呈现新趋势:一是深度融合,耦合多物理场建模与多源传感信息,全面刻画故障演化;二是边缘智能,将轻量化AI诊断模型部署到边缘设备,实现本地化实时

诊断;三是数字孪生,构建电机虚拟映射,实现故障诊断及性能退化预测等功能;四是自监督与小样本学习,利用无标签数据预训练、少量标注样本微调,突破工业现场标注数据稀缺瓶颈,推动AI技术规模化落地。

参考文献

- [1] 阚超豪,姚晓键,齐安康,等.三相异步电机匝间短路故障的诊断方法[J].电气传动,2024,54(11):76-80.
- [2] 李炜航,林挺豪,高振博,等.三相异步电机轴承故障的诊断策略[J].微电机,2024,57(05):7-10+45.
- [3] 霍琳,胡正宇,徐海,等.基于机器学习的异步电机故障诊断方法[J].兵器装备工程学报,2024,45(08):18-25.
- [4] 刘飞,赵志伟,张晨玥.异步电机故障特征提取方法研究综述[J].重型机械,2023,(06):6-13.