

电机绕组故障（短路 / 断路 / 接地）检测与分析

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：电机作为现代工业系统的核心动力装置，其运行状态直接关系到整个生产流程的安全性、可靠性和经济性。在各类电机故障中，绕组故障因其高发性和破坏性而备受关注，主要包括匝间短路、相间短路、断路以及对地绝缘击穿（接地）等类型。本文旨在系统性地探讨电机绕组三大核心故障——短路、断路和接地的形成机理、故障特征及其危害，并深入分析当前主流的检测与诊断技术。文章首先从电机绕组的基本结构出发，详细阐述了各类故障的物理成因；其次，通过理论建模与仿真，揭示了故障发生时电机内部电磁场、电流、电压及振动等物理量的变化规律；最后，重点综述并比较了基于电气量、信号处理、人工智能以及在线监测等多种检测方法的原理、优缺点及适用场景。研究表明，融合多源信息、结合先进算法的智能诊断系统是未来电机绕组故障检测的发展方向，对于实现预测性维护、保障工业系统稳定运行具有重要的理论价值和工程意义。

关键词：电机绕组；短路故障；断路故障；接地故障；故障诊断；在线监测

引言

电动机作为“工业的心脏”，在电力、冶金、石化等多个领域广泛应用，确保其长期高效可靠运行对降低能耗和保障国家关键基础设施安全至关重要。然而，电机在实际运行中会受电气、热、机械应力及环境因素影响，性能逐渐劣化引发故障，其中绕组故障占比极高。绕组故障轻则致电机效率下降、温升异常，重则引发电气火灾、设备损毁甚至人身安全事故，其表现形式有短路、断路和接地三种，根源多与绕组绝缘系统老化或损伤有关。传统电机维护策略存在“过度维修”或“维修不足”问题，难以预防突发性绕组故障。随着技术发展，基于状态的预测性维护成为主流，可实时监测分析电机运行状态，在故障萌芽时预警。本文将围绕绕组三大故障展开系统性研究，剖析机理表现、建立故障模型、评估检测诊断技术，为工程实践提供参考。

1 电机绕组故障机理与特征分析

1.1 电机绕组基本结构与绝缘系统

电机绕组通常由高导电性的铜线或铝线绕制而成，嵌放在定子或转子铁心的槽内。为了保证各导体之间以及导体与铁心之间的电气隔离，绕组被多层绝缘材料包裹。典型的绝缘系统包括导线自身的漆包绝缘（匝间绝缘）、槽绝缘、相间绝缘以及对地绝缘（主绝缘）。这些绝缘材料在长期运行中会受到电、热、机械和环境等多重应力的侵蚀，导致其介电强度和机械强度逐渐下降。

1.2 短路故障

短路故障是指绕组中不同电位点之间因绝缘失效而形成的非正常低阻抗通路。根据短路位置的不同，可分

为匝间短路和相间短路。

1.2.1 匝间短路

这是最常见的绕组故障之一，指同一相绕组内相邻线圈或线匝之间的绝缘被击穿。其成因主要有：由于散热不良、谐波电流或制造缺陷导致局部温度过高，使绝缘材料碳化、脆化。雷电过电压或开关操作引起的瞬态过电压，超过匝间绝缘的耐压水平。电机运行中的持续振动会使绕组产生微动磨损（Fretting），磨穿薄弱的漆包层。制造工艺缺陷如绕线过程中刮伤绝缘漆、浸漆不充分等^[1]。匝间短路会在短路环内感应出一个强大的环流（Circulating Current），该环流远大于正常工作电流。这会导致局部剧烈发热，形成恶性循环，加速绝缘劣化。同时，短路会破坏绕组的对称性，引起三相电流不平衡，电机的电磁转矩出现脉动，进而激发特定频率的机械振动和噪声。在严重情况下，匝间短路可迅速发展为相间短路或对地短路。

1.2.2 相间短路

指不同相绕组之间发生的短路。其能量巨大，通常由严重的匝间短路蔓延或外部因素（如异物侵入、绝缘老化贯穿）引起。相间短路会产生极大的短路电流，瞬间释放大量热量，极易造成绕组烧毁、铁心熔焊等灾难性后果。其故障特征极为明显，通常伴随着巨大的爆裂声、浓烟和保护装置（如断路器）的立即动作。

1.3 断路故障

断路故障，也称为开路故障，是指绕组回路在某处断开，导致电流无法流通。其成因包括：绕组端部的焊接点、接线端子或引出线连接处因振动、热胀冷缩或腐

蚀而断开。在交变电磁力和热应力的长期作用下，导线金属疲劳，最终断裂。外部机械损伤如搬运、安装过程中的不当操作。对于三相电机，若一相发生断路，则电机变为两相运行（单相运行）。此时，电机将无法产生启动转矩，若在运行中发生，则会出现转速急剧下降、电流大幅增加（未断相的两相电流会增大至额定值的1.7倍左右）、机身剧烈振动和异常嗡嗡声。长时间两相运行会迅速烧毁电机。对于单相电机，主绕组或副绕组断路将直接导致电机无法启动。

1.4 接地故障

接地故障，即对地绝缘击穿，是指绕组导体与电机机壳（地）之间因绝缘失效而形成通路。其成因主要有：水分侵入绕组，大幅降低绝缘电阻。油污、粉尘、盐雾等污染物在绕组表面形成导电通道。长期高温运行使绝缘材料龟裂、粉化。机械损伤如铁心毛刺刺穿槽绝缘。轻微的接地故障可能仅表现为绝缘电阻下降，电机仍能运行，但存在安全隐患。当接地电阻较低时，会形成接地电流，导致保护装置动作^[2]。严重的接地故障等同于相线直接对地短路，会产生巨大的短路电流，后果与相间短路类似。此外，接地故障还会导致电机外壳带电，构成严重的人身触电风险。

2 电机绕组故障建模与仿真分析

为了深入理解故障机理并为检测算法提供理论依据，建立准确的电机故障数学模型至关重要。本文以应用最广泛的三相感应电机为例，简要介绍其故障建模思路。

2.1 正常电机模型

正常三相感应电机的电压方程可表示为：

$$\begin{bmatrix} V_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}$$

其中， V_s 、 I_s 、 R_s 、 L_{ss} 分别为定子电压、电流、电阻和自感矩阵； I_r 、 R_r 、 L_{rr} 为转子相应参数； $L_{sr} = L_{rs}^T$ 为互感矩阵。

2.2 匝间短路故障模型

匝间短路破坏了绕组的对称性。假设A相有 n_s 匝发生短路，可将A相绕组等效为两个并联支路：一个包含 $(N-n_s)$ 匝的正常支路，另一个是包含 n_s 匝的短路支路。短路支路两端会感应出一个内部电压 e_r ，并流过一个环流 i_r 。修改后的定子电压方程需增加短路支路的状态变量。通过MATLAB/Simulink或有限元分析（FEA）软件（如ANSYS Maxwell）进行仿真，可以清晰地观察到故障特征：（1）电流波形：A相电流幅值增大，且波形出现畸变，不再是完美的正弦波。（2）频谱分析：在定子电流频谱中，除了基频（ f_1 ）外，还会出现边频带，其频率为 $f_1 \pm 2sf_1$ （ s 为转差率）。这

是诊断匝间短路的关键特征频率。（3）磁场分布：电机内部磁场变得不对称，气隙磁密波形畸变。

2.3 断路故障模型

断路故障的建模相对简单，只需将故障相的电压源置零，并将其从电路方程中移除。仿真结果表明：电机进入单相运行状态，定子合成磁场由圆形旋转磁场变为脉振磁场。未故障两相的电流显著增大，且相位关系发生变化。转矩输出出现大幅度的二次谐波脉动（频率为 $2f_1$ ）。

2.4 接地故障模型

接地故障可通过在故障相绕组与地之间并联一个故障电阻 R_f 来模拟。 R_f 的大小决定了故障的严重程度。仿真分析显示：当 R_f 较大时（高阻接地），对电机运行影响较小，但零序电流会增大。当 R_f 较小时（低阻接地），故障相电流急剧增大，三相电流严重不平衡。在供电系统中性点接地的情况下，接地故障会产生明显的零序分量。

3 电机绕组故障检测与诊断技术

基于上述故障特征，研究者们开发了多种检测与诊断方法。这些方法可大致分为离线检测和在线监测两大类。

3.1 离线检测方法

离线检测通常在电机停机状态下进行，主要用于预防性试验和故障后排查。（1）绝缘电阻测试：使用兆欧表（摇表）测量绕组对地及相间的绝缘电阻。这是检测接地和相间绝缘状况最基本、最经济的方法。绝缘电阻值低于规定阈值（如每千伏工作电压不低于 $1M\Omega$ ）即视为不合格。（2）直流耐压与泄漏电流测试：在绕组上施加高于额定电压的直流高压，测量泄漏电流。良好的绝缘其泄漏电流很小且稳定；若存在局部缺陷，泄漏电流会随电压升高而急剧增大。此方法比绝缘电阻测试更灵敏，能发现潜在的绝缘隐患^[3]。（3）绕组电阻测试：使用双臂电桥或微欧计精确测量各相绕组的直流电阻。通过比较三相电阻值的平衡度（不平衡度一般不应超过2%），可以有效判断是否存在匝间短路或断路。匝间短路会使该相电阻略微减小，而断路则会使电阻趋于无穷大。（4）匝间耐压测试（浪涌测试）：向绕组施加一系列高压脉冲（浪涌电压），通过比较各相的响应波形（衰减振荡波形）是否一致来判断匝间绝缘的好坏。若存在匝间短路，其振荡频率和衰减特性会与其他相明显不同。此方法对早期微小的匝间短路非常敏感。

3.2 在线监测与诊断方法

3.2.1 基于定子电流信号分析（MCSA）

MCSA是目前应用最广泛的在线诊断技术。其核心思想是，任何内部故障都会在定子电流频谱中留下独特的“指纹”。通过快速傅里叶变换（FFT）对采集的电流信

号进行频谱分析,即可识别故障特征频率。匝间短路检测边频带 $f_1 \pm 2sf_1$ 的幅值。转子断条检测边频带 $f_1 \pm 2sf_1$ (注意与匝间短路频率相同,需结合其他特征区分)。电源不平衡/偏心也会产生特定的边频成分。MCSA的优点是非侵入式、成本低;缺点是对负载波动敏感,且在早期故障时特征信号微弱,易被噪声淹没。

3.2.2 基于电压与零序电流分析

对于接地故障,特别是中性点接地系统,监测零序电流(三相电流之和)是最直接的方法。零序电流的出现或异常增大通常是接地故障的明确指示。此外,分析三相电压的不平衡度也能间接反映绕组问题。

3.2.3 基于振动与噪声信号分析

绕组故障引起的电磁力不平衡会激发特定频率的机械振动。通过在电机外壳安装加速度传感器,采集振动信号并进行频谱分析,可以发现与电气故障相关的特征频率。例如,匝间短路和断路都会引起 $2f_1$ 频率的振动增强。此方法可与MCSA形成互补,提高诊断的可靠性。

3.2.4 基于人工智能(AI)的智能诊断

随着机器学习和深度学习的发展,AI技术被广泛应用于故障诊断。其基本流程为:信号采集→特征提取(如时域、频域、时频域特征)→特征选择→分类器训练与诊断。传统机器学习支持向量机(SVM)、人工神经网络(ANN)等被用于对提取的特征向量进行分类,能有效处理非线性问题。深度学习卷积神经网络(CNN)可以直接从原始信号(如时域波形或时频图)中自动学习深层次的故障特征,省去了繁琐的人工特征工程,诊断精度更高^[4]。例如,将电流信号的时频图(如小波变换或短时傅里叶变换结果)作为CNN的输入,可以实现高准确率的故障分类。

3.2.5 多物理场融合诊断

单一信号源的信息往往是有限的。融合电流、电压、

振动、温度、局部放电(PD)等多种传感器信息,构建多源信息融合的诊断模型,可以极大地提升故障检测的灵敏度、准确性和鲁棒性。例如,结合MCSA和振动分析,可以有效区分匝间短路和转子断条这两种在电流频谱上特征相似的故障。

4 结语

本文针对电机绕组的短路、断路和接地三大核心故障展开系统研究,分析形成机理,明确绝缘劣化是共同根源;通过建模仿真揭示故障对电机多性能的复杂影响;综述现有检测技术,呈现技术演进路径。研究发现,单一检测方法无法完美应对所有工况和故障类型。未来,电机绕组故障诊断技术将朝多方向发展:智能化与自主化上,AI技术深化应用,实现从故障识别到剩余寿命预测跨越,边缘计算使智能诊断算法实时自主决策;高精度与早期预警方面,开发高灵敏度传感器与先进信号处理算法,精准捕捉故障极早期迹象;数字孪生驱动下,构建高保真模型实现全景可视化监控与仿真推演;还会推动标准化与云平台集成,统一数据格式等,实现远程监控、大数据分析和专家知识共享。

参考文献

- [1]姜尧.永磁电机绕组故障诊断方法研究综述[J].品牌与标准化,2026,(01):113-115.
- [2]郑仕满,黄诗杰,朱一凡.一起三相异步电机定子绕组直流电阻不平衡故障分析[J].云南水力发电,2026,42(01):103-106.
- [3]李韵逸.开绕组永磁同步电机故障诊断及容错控制技术[D].燕山大学,2025.DOI:10.27440/d.cnki.gysdu.2025.001519.
- [4]艾胜,闫逊志,刘思凯,等.双三相永磁电机绕组及逆变器故障的容错控制[J].电力电子技术,2025,59(04):10-14.