

煤矿井下永磁电机退磁故障机理及诊断方法研究

毕振国

内蒙古北联电高头窑矿业有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 014399

摘要：永磁电机在煤矿井下输送、提升及通风系统中广泛应用，但井下高温、振动、过载等恶劣工况易引发永磁体退磁故障，严重威胁矿井安全生产。本文系统分析煤矿井下永磁电机的工作特性及退磁影响因素，从电磁理论、热-磁耦合及动态过程三个维度揭示退磁故障的产生机理，对比研究基于信号处理、模型参数辨识及人工智能的诊断方法，提出多方法融合的诊断策略。研究表明，温度与电枢反应的协同作用是导致不可逆退磁的主导因素，多源信息融合可显著提升诊断准确性与鲁棒性，为煤矿井下永磁电机状态监测与智能运维提供技术参考。

关键词：煤矿井下；永磁电机；退磁故障；故障机理；诊断方法

引言：永磁电机凭借高效率及良好的低速性能，在煤矿井下输送、提升及采掘等关键装备中逐步替代传统异步电机。然而，井下存在高温、振动及频繁过载等恶劣工况，永磁体极易发生不可逆退磁故障，导致电机输出转矩下降、温升加剧，严重时引发安全事故。目前，针对煤矿井下永磁电机退磁故障的研究尚不系统，缺乏适用于井下条件的诊断方法。本文从煤矿井下实际工况出发，系统分析退磁故障机理，对比各类诊断方法的适用性，提出多方法融合的诊断策略，为煤矿永磁电机可靠运行提供技术支撑。

1 煤矿井下永磁电机工作特性与退磁影响因素分析

1.1 煤矿井下永磁电机工作特性

煤矿井下永磁电机工作环境与地面差异大，运行特性独特。其一，负载波动剧烈且频繁，像带式输送机、提升机启停及调速时电流冲击大，瞬时过载倍数达额定值 2-3 倍，电枢反应去磁效应明显增强。其二，散热条件差，井下封闭、通风受限，环境温度高，部分矿井采掘面超 35℃，电机热量难散失，绕组和永磁体工作温度居高不下。其三，运行时间长、维护时间短，主运输系统常连续运行超 20 小时，停机检修时间有限，故障难及时处理。其四，振动与冲击载荷大，采掘及破碎设备振动经基础传至电机，高频振动或影响永磁体微观磁畴结构稳定性。这些特性使井下永磁电机退磁风险远高于地面，需针对性研究退磁机理与诊断方法。

1.2 退磁影响因素分析

煤矿井下永磁电机退磁故障的影响因素可归纳为温度、电流、振动及环境四大类。温度因素是导致退磁的首要原因，永磁体的剩磁和矫顽力均随温度升高而下

降，当温度超过永磁材料的工作极限时，将发生不可逆热退磁。钕铁硼永磁体居里温度约为 310~340℃，其工作温度通常不超过 150℃，而煤矿井下过载工况下电机内部温度可能突破此限值。电流因素主要表现为电枢反应去磁效应，定子绕组产生的旋转磁场中含有与永磁体磁化方向相反的分量，在电机启动、堵转或严重过载时，去磁电流幅值急剧增大，可能将永磁体工作点推至退磁曲线拐点以下。振动因素方面，长期机械振动可能导致永磁体微观裂纹扩展及磁畴结构紊乱，加速磁性能衰减。环境因素包括湿度及腐蚀性气体，煤矿井下空气湿度常达 90% 以上，且含有硫化物等腐蚀成分，永磁体表面氧化或腐蚀会降低有效磁通面积。上述各因素往往同时存在、相互叠加，温度升高会降低矫顽力，使永磁体对电枢反应去磁更为敏感，形成热-磁协同退磁效应^[1]。

2 煤矿井下永磁电机退磁故障机理研究

2.1 永磁材料磁特性分析

永磁材料的磁特性是理解退磁机理的理论基础。常用永磁材料包括钕铁硼、钕钴及铁氧体三类，其中钕铁硼因磁能积高、性价比优良在煤矿电机中应用最广。永磁体的磁特性由退磁曲线和回复线描述，退磁曲线表征磁感应强度随外磁场变化的关系，其第二象限形状决定抗退磁能力。剩磁密度决定气隙磁通密度；矫顽力反映抗去磁能力；内禀矫顽力是判断不可逆退磁的关键参数。当永磁体工作点位于退磁曲线线性段时，去掉去磁磁场后磁体沿回复线回复至原工作点，属可逆过程；若工作点被推至退磁曲线拐点以下，回复线与退磁曲线不再重合，产生不可逆退磁。钕铁硼的退磁曲线在常温下呈良好线性，但在高温条件下拐点明显上移，矫顽力

显著下降,对去磁磁场的敏感度大幅增加。因此,煤矿井下高温环境显著降低了永磁体抵抗电枢反应去磁的能力,使原本安全的工况也可能引发不可逆退磁。

2.2 退磁故障的电磁理论分析

从电磁场理论分析,永磁电机气隙磁场由永磁体励磁和电枢反应磁场叠加而成。正常运行时,电枢反应磁场对永磁体工作点产生周期性扰动,但扰动幅值较小,工作点始终位于退磁曲线线性段。当电机发生堵转、严重过载或启动失败时,定子电流可达额定值的5~7倍,电枢反应去磁磁场强度急剧增大。以表贴式永磁电机为例,直轴去磁电流产生的磁场与永磁体磁化方向相反,使永磁体工作点沿退磁曲线下移,工作点磁密与空载磁密的关系可表示为线性函数。当去磁电流超过临界值时,磁密低于退磁曲线拐点对应值,即发生不可逆退磁。煤矿井下设备频繁启停及重载启动工况下,去磁电流冲击反复出现,每次冲击造成微量不可逆退磁,长期累积导致永磁体磁性能逐步劣化^[2]。此外,局部退磁会使气隙磁场分布不对称,产生不平衡磁拉力,进而加剧机械振动,形成电磁-机械耦合的故障演化链。

2.3 退磁故障的热-磁耦合分析

温度与磁场的耦合作用是煤矿井下永磁电机退磁故障的重要特征。永磁体的磁特性具有显著的温度依赖性,矫顽力随温度升高近似线性下降。对于钕铁硼永磁体,其内禀矫顽力温度系数约为-0.5%~-0.8%/°C,每升高10°C矫顽力下降5%~8%。当电机在高温环境下连续运行时,永磁体工作温度可达120~150°C,矫顽力降至常温的50%~60%,此时正常幅值的电枢反应磁场也可能引发不可逆退磁。另一方面,退磁本身会加剧温升,形成正反馈循环。永磁体部分退磁后,为维持相同输出转矩,定子电流需相应增大,铜耗增加;同时退磁区域产生涡流损耗,进一步升高局部温度。有限元仿真表明,局部退磁区域温度可比周边高出15~20°C,高温进一步加速退磁进程。煤矿井下通风散热条件差,热-磁耦合效应更为显著,退磁一旦开始便可能快速恶化,因此对早期退磁的及时诊断尤为重要。

2.4 退磁故障的动态过程分析

退磁故障经历从微观到宏观、从局部到整体的渐进演化过程,可划分为三个阶段。第一阶段为早期潜伏期,永磁体局部微观区域发生磁畴翻转,但宏观磁性能无明显变化,此阶段约占永磁体总寿命的60%~70%,常规检测难以发现异常。第二阶段为加速发展期,随着热、电、振动等应力持续作用,退磁区域逐步

扩展,宏观磁性能开始显现下降趋势,反电动势幅值降低3%~8%,定子电流谐波含量增加,电机效率下降5%~10%。此阶段是故障诊断的关键窗口期,及时识别可避免故障恶化。第三阶段为严重失效期,永磁体大范围退磁甚至物理碎裂,电机输出转矩严重不足,温升急剧升高,保护装置可能触发停机。煤矿井下工况的复杂性使退磁演化速率呈现不确定性,负载率波动、环境温度变化及启停频次都会影响退磁进程。

3 煤矿井下永磁电机退磁故障诊断方法研究

3.1 基于信号处理的诊断方法

基于信号处理的诊断方法通过对电机可测信号进行分析,提取与退磁故障相关的特征量。定子电流分析法是最常用的诊断手段,退磁故障会导致气隙磁场分布变化,进而在定子电流中引入特定频率的谐波分量。均匀退磁主要引起基波幅值变化,而局部退磁则会产生边频带分量。通过快速傅里叶变换对电流频谱进行分析,监测谐波幅值变化趋势,可判断退磁程度。小波变换和经验模态分解等时频分析方法适用于非平稳工况下的特征提取,能有效分离故障特征与负载波动干扰。振动信号分析法通过检测振动频谱识别退磁故障,退磁引起的不平衡磁拉力会产生特定频率的电磁振动分量,但振动信号易受井下机械噪声干扰,需配合自适应滤波处理。反电动势检测法物理意义明确,退磁程度与反电动势幅值呈线性关系,但需离线测量,不适用于在线监测^[3]。信号处理方法计算量小、易于实现,但对噪声和工况变化敏感,需结合信号预处理技术提高鲁棒性。

3.2 基于模型参数辨识的诊断方法

基于模型参数辨识的诊断方法通过建立永磁电机数学模型,利用在线采集的电压、电流信号反推关键参数,根据参数变化判断退磁状况。永磁体磁链是最直接反映退磁程度的参数,在d-q旋转坐标系下,永磁同步电机的电压方程中包含永磁体磁链项。通过模型参考自适应系统、扩展卡尔曼滤波器或滑模观测器等算法,可在电机运行过程中实时辨识永磁体磁链值。当辨识得到的磁链较初始值下降超过设定阈值时,判定发生退磁故障。该方法可在不停机、不增加额外传感器的条件下实现在线监测,物理意义清晰。然而,参数辨识精度受电机参数不确定性及逆变器非线性等因素影响,需引入参数补偿和校正算法。另一种途径是辨识退磁等效电流,通过观测等效电流大小评估退磁程度。该方法能定量评估退磁程度,但算法复杂度较高,对控制器算力有一定要求。随着煤矿智能装备算力提升,该方法应用前景广阔。

3.3 基于人工智能的诊断方法

基于人工智能的诊断方法利用机器学习算法自主学习故障特征与运行状态之间的映射关系,适用于复杂非线性系统的故障诊断。该方法流程包括数据采集、特征提取、特征降维、模型训练及故障识别。在煤矿井下永磁电机退磁诊断中,可采集多源信号从时域、频域及时频域提取高维特征集,采用主成分分析等方法降维提取敏感特征。模型选择方面,支持向量机适用于退磁程度分级识别;深度神经网络可自动提取信号深层特征;长短期记忆网络可捕捉退磁演化趋势。针对正负样本不平衡问题,可采用生成对抗网络增强训练数据。人工智能方法的优势在于无需精确物理模型,能处理非线性、强耦合的故障特征,诊断精度高;其局限性在于依赖大量标注训练数据,模型可解释性差,训练计算量大。在煤矿智能化建设背景下,可依托矿山工业互联网平台实现云端训练、边缘推理的部署模式。

3.4 多方法融合的诊断策略

单一诊断方法各有优劣,难以全面应对煤矿井下复杂环境下的退磁故障诊断需求。基于信号处理的方法简单易行但抗干扰能力弱,基于模型参数辨识的方法物理意义明确但受参数不确定性影响,基于人工智能的方法精度高但依赖训练数据。多方法融合诊断策略通过整合各类方法的优势,构建多层次、多维度、互补协同的诊断体系,显著提升诊断的准确性、鲁棒性和可靠性。融合诊断框架可分为三个层次:数据层融合、特征层融合和决策层融合。数据层融合是对原始多源传感数据进行同步采集与预处理,消除噪声和异常值,实现数据质量增强。特征层融合是将信号处理提取的统计特征、模型辨识得到的物理参数以及深度学习自动编码的特征进行组合与降维,形成综合特征向量。决策层融合是对多个诊断子模型的输出结果进行综合判决,常用的融合规则包括加权投票法、贝叶斯推理及 D-S 证据理论^[4]。针对煤

矿井下特殊环境,融合策略还应包含工况自适应机制:根据当前负载率、环境温度等工况信息,动态调整各子模型的置信度权重,在轻载平稳工况下侧重参数辨识结果,在重载波动工况下侧重信号处理特征。此外,建立退磁健康基线及趋势预警模型,通过长期监测数据拟合退磁演化曲线,预测剩余有效寿命,实现从故障报警向预测性维护的跨越。

结束语

本文系统分析了煤矿井下永磁电机的工作特性及退磁影响因素,从电磁理论、热-磁耦合及动态过程三个维度揭示了退磁故障的产生机理,对比研究了基于信号处理、模型参数辨识及人工智能的三类诊断方法,提出了多方法融合的诊断策略。研究表明,高温、过载及振动的协同作用是加速退磁的主导因素,热-磁正反馈效应使退磁一旦发生便可能快速恶化。多方法融合诊断策略通过数据层、特征层及决策层的三级融合,结合工况自适应机制,能够有效应对井下复杂环境对诊断的干扰。本研究为煤矿井下永磁电机退磁故障的早期识别与智能运维提供了理论依据与技术框架。

参考文献

- [1] 陈昊,高彩霞,桑晓晨,等.基于环轭型探测线圈的永磁同步电机局部退磁故障定位方法[J].电机与控制学报,2023,27(4):97-110,118.
- [2] 高彩霞,李炳银,陈昊,等.基于半周反电势残差的永磁同步电机局部退磁故障诊断[J].电机与控制学报,2023,27(7):183-194.
- [3] 徐政,张建忠,姜永将,等.基于高频信号注入的永磁同步电机局部退磁故障诊断研究[J].中国电机工程学报,2025,45(8):3205-3213,中插 29.
- [4] 陈少峰,林国斌,韩耀飞,等.基于滑模信息融合的内置式永磁同步电机退磁故障诊断策略[J].同济大学学报(自然科学版),2025,53(12):1898-1903.