

电力拖动系统的故障诊断和自愈技术

崔含笑 410825199404163526

摘要：电力拖动系统是工业生产领域核心动力单元，其运行稳定性直接决定生产效率与生产安全。本文围绕电力拖动系统常见故障类型展开分析，梳理了当前主流故障诊断技术的应用特点，探讨了自愈技术的实现路径与应用价值，最后对电力拖动系统故障诊断与自愈技术的发展方向进行展望，旨在为工业领域提升电力拖动系统运行可靠性提供理论参考。

关键词：电力拖动系统；故障诊断；自愈技术；工业控制

一、电力拖动系统概述与常见故障类型

电力拖动系统是以电动机作为动力源，通过控制装置调节电动机的转速、转矩输出，带动生产机械完成既定生产动作的电气系统，是现代冶金、化工、煤炭、制造等工业领域不可或缺的核心动力装置。完整的电力拖动系统主要由电动机、供电装置、控制保护装置、传动机构四个核心部分构成，各部分之间协同配合，才能保证系统稳定输出动力。在长期连续运行过程中，电力拖动系统受负载波动、环境温湿度变化、元器件老化、操作不当等多种因素影响，不可避免会出现各类故障，若不能及时诊断并排除故障，不仅会导致生产中断，还可能引发火灾、电机烧毁等安全事故，造成严重的经济损失。

从故障发生位置来看，电力拖动系统常见故障可以分为四类：第一类是电动机本体故障，也是发生率最高的故障类型，主要包括定子绕组短路或断路、转子断条、轴承磨损、绝缘老化等，这类故障会直接导致电动机输出异常，甚至出现烧毁电机的严重后果；第二类是控制与保护装置故障，主要包括接触器触点烧蚀、继电器故障、变频器功率模块损坏、PLC 程序紊乱、保护整定值偏移等，这类故障会导致系统控制逻辑失效，无法实现正常的启动、停止、调速操作；第三类是供电线路故障，主要包括电源电压波动过大、线路绝缘破损导致的漏电或短路、接线端子松动发热等，这类故障会导致电动机输入电能质量不达标，引发转矩波动、过热等问题；第四类是传动机构故障，主要包括齿轮磨损、联轴器断裂、皮带打滑、负载卡滞等，这类故障会导致电动机负载异常，引发过流、过热等次生故障。

二、电力拖动系统主流故障诊断技术分析

第一，基于信号分析的故障诊断技术。该技术通过在电力拖动系统关键位置安装电流、电压、振动、温度传感器，采集系统运行过程中的状态信号，再通

过傅里叶变换、小波分析、希尔伯特-黄变换等信号处理方法，提取故障特征分量，实现故障的识别与定位。例如针对电动机转子断条故障，其定子电流信号中会出现特定频率的边频分量，通过对定子电流进行频谱分析即可识别该故障；针对轴承磨损故障，通过对振动信号进行小波分解，提取故障特征频率即可实现早期诊断。基于信号分析的诊断技术原理简单，实现难度较低，在工业现场已经得到广泛应用，但其对于弱故障特征的提取能力有限，在强背景噪声下诊断准确率会明显下降。

第二，基于模型的故障诊断技术。该技术需要建立电力拖动系统的精准数学模型，将模型输出的状态参数与实际系统采集的状态参数进行对比，得到残差信号，再通过对残差信号的分析判断是否存在故障以及故障的位置与类型。常用的模型诊断方法包括状态观测器法、参数估计法、等价空间法等。该技术的诊断准确率高度依赖于数学模型的精准度，而电力拖动系统受负载变化、温度变化等因素影响，其参数存在较强的非线性与时变性，建立精准的数学模型难度较大，因此该方法在复杂电力拖动系统中的应用存在一定局限性。

第三，基于人工智能的故障诊断技术。该技术是近年来电力拖动系统故障诊断领域的研究热点，主要包括人工神经网络、支持向量机、深度学习等方法。该方法不需要建立精准的数学模型，只需要采集足够多的不同故障状态下的样本数据，对人工智能模型进行训练，训练完成的模型就可以自动识别新的运行状态是否存在故障以及故障类型。

三、电力拖动系统自愈技术的实现路径与应用价值

第一，硬件冗余自愈。硬件冗余是最可靠的自愈实现方式，对于核心生产场景的关键电力拖动系统，通过配置冗余的关键部件，当某一个部件发生故障时，系统自动切换到备用部件维持系统运行。常见的冗余配置包括冗余电源、冗余控制器、冗余绕组等，例如在大型冶金企业的轧机主拖动系统中，通常配置双绕组电动机，当其中一组绕组发生故障时，系统可以自动切换到另一组绕组运行，维持轧机的低负荷运行，等待计划停机检修，避免了突发停产带来的巨大损失。硬件冗余自愈的实现简单，可靠性高，但会明显增加系统的建设成本，因此通常只用于对连续运行要求极高的核心系统。

第二，控制重构自愈。控制重构自愈是指在系统部分部件发生故障后，不需要更换硬件，通过重新调整系统的控制策略与控制参数，抵消故障带来的影响，维持系统继续运行。例如当电力拖动系统某一个电流传感器发生故障后，系统可以自动切换到基于扩展状态观测器的无传感器控制方式，继续实现转速与转矩的闭环控制，维持电动机正常运行；当变频器某一个功率模块发生故障导致缺相运

行时，系统可以调整 PWM 控制算法，实现缺相状态下的稳定运行，避免系统停机。控制重构自愈不需要额外配置冗余硬件，成本较低，是当前自愈技术领域的研究重点，但其对控制系统的计算能力与控制算法的鲁棒性要求较高，目前主要应用于中小型电力拖动系统。

第三，故障容错自愈。故障容错自愈主要针对轻微故障，通过对故障参数进行补偿，消除故障对系统运行的影响。例如电动机定子绕组发生轻微匝间短路后，会导致三相电流不平衡，引发转矩脉动，通过对三相电流的给定值进行动态补偿，可以抑制转矩脉动，让电动机继续维持正常运行；对于轴承的轻微磨损导致的振动增大，可以通过调整控制算法抑制振动幅值，延长设备的运行时间。

自愈技术的应用对于提升电力拖动系统运行可靠性具有重要价值：一方面，自愈技术可以在故障发生后维持系统继续运行，避免突发生产中断，对于连续生产型工业企业来说，避免一次突发停产就可以减少数万甚至数百万元的经济损失，效益十分明显；另一方面，自愈技术可以为运维人员预留足够的故障处理时间，避免故障在未准备的情况下扩大，提升了生产过程的安全性。

四、电力拖动系统故障诊断与自愈技术发展展望

随着工业互联网与智能制造技术的发展，电力拖动系统故障诊断与自愈技术未来将向三个方向发展：第一，边缘计算与云诊断结合，将部分简单故障诊断功能部署在本地边缘控制器，实现故障的快速响应，将复杂的深度诊断与模型更新部署在云端，利用云端的计算能力不断优化诊断模型，提升诊断准确率；第二，小样本与无样本故障诊断，通过生成对抗网络、迁移学习等技术，解决工业现场故障样本不足的问题，让人工智能诊断技术可以在更多工业场景推广应用；第三，故障诊断与自愈一体化，实现故障的在线检测、诊断、自愈的全流程自动化，不需要人工参与，进一步提升系统的自主运行能力。

参考文献

- [1] 王健, 李刚. 电力拖动系统故障诊断技术现状与发展趋势[J]. 电气应用, 2020, 39(08): 42-47.
- [2] 张宏宇. 基于深度学习的异步电机故障诊断方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2019.
- [3] 刘芳, 陈明. 电力拖动系统的故障自愈控制技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3612-3620+16.