

# 工业电气自动化控制系统故障诊断技术应用研究

王贤哲

渭南师范学院 陕西渭南 714099

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21191

**[摘要]** 工业电气自动化控制系统是现代智能制造体系的重要载体。在系统运行中,由于电气元件老化、线路干扰以及程序逻辑错误等故障,会导致生产中断,并可能造成安全生产事故。故障诊断技术作为保证控制系统正常工作的关键措施之一,能够完成对故障原因的确定、追溯及预估工作,进而缩减系统维护费用支出。通过归纳工业电气自动化控制系统的常见故障种类,解析三种主要故障诊断技术的工作机制及其特点,找出目前该领域存在的实际问题并加以解决,从而预测工业数字革新进程中相关技术的发展方向,希望为有关工业电气自动化控制系统的运营改进及故障处理方法更新提供一定的理论支撑。

**[关键词]** 工业电气自动化; 控制系统; 故障诊断; 智能诊断; 运维保障

## 引言:

在工业 4.0 和智能制造全面落地的行业背景下,工业生产逐步走向无人化、集中化、精准化。电气自动化控制系统涉及化工、冶金、机械制造、电力等全部工业范畴,负责设备启停控制、生产流程联动以及运行参数闭环调整等工作。现阶段工业控制系统结构愈发繁杂,软硬件融合度不断提升,系统耦合程度也在增强,一个部分的小故障很容易经由控制链路蔓延到整个生产系统,致使设备停止运转、生产参数发生偏差甚至引发安全事故。本文全面整理工业电气自动化控制系统的故障诊断技术体系,总结技术应用的不足与改良路径,契合当前工业自动化控制领域学术探究与技术实践的双重需求。

## 一、工业电气自动化控制系统故障类型及诊断需求

### (一) 硬件类故障

硬件类故障是工业电气自动化控制系统中最根本也最常见的故障类型,包含执行器、传感器、供电模块、线路回路以及电气开关等物理实体硬件所出现的异常情况。传感器是系统的前端数据采集装置,在高温、粉尘、电磁干扰等恶劣的工业环境中使用,容易发生信号漂移、信号中断、无法测量等情况,直接导致系统对设备运行状态所采集的数据出现错误,进而使后续的控制指令产生偏差。执行器由变频器、接触器、伺服电机组成,长期往复运动会导致机械磨损、电气线圈老化,从而引发指令响应滞后、执行动作偏移等故障。由于供电回路电压不稳定、线路绝缘层破裂、接线端子虚接等原因引起的线路故障,会引发系统瞬间断电、电磁干扰过

载等问题,造成控制系统失稳。硬件故障具有直观性高且故障影响范围逐步扩大的特点,是故障诊断技术需要重点解决的诊断问题。

### (二) 软件与控制逻辑故障

随着控制系统数字化水平提高,PLC 控制程序、组态监控软件、通讯协议程序等软件方面的故障比例不断上升。软件故障主要包括程序逻辑漏洞、通讯链路故障、系统兼容性故障三种类型。程序编写时出现的逻辑错误会导致程序陷入死循环或者错误地执行某些操作,在生产过程中遇到特定工况时就会暴露问题;工业以太网、Modbus 等现场总线通讯环节中,由于电磁干扰或者地址冲突而引起的数据丢失以及通讯中断现象,会使上位机与下位机间无法实现有效信息交换;不同厂家生产的软硬件设备相互配合不当,也会造成控制系统运行迟缓甚至出现程序异常退出的情况。相比于硬件故障,软件故障没有实体损坏的特点,更加难以发现且反复再现更为困难,要求相关人员不断增强针对此类问题开展深入研究的技能水平<sup>[1]</sup>。

### (三) 系统综合性耦合故障

现代工业电气自动化控制系统是多模块耦合的闭环控制系统,硬件故障和软件故障容易互相诱发,产生综合性的耦合故障。单个传感器的硬件故障会影响控制程序的运算逻辑,导致软件指令异常;程序逻辑错误发出的异常控制指令,又会加重执行器的机械磨损及电气负荷,促使硬件快速老化失效。此类故障没有唯一的故障源,其传播途径错综复杂,传统的单方面故障检测方式无法做到精确追溯,是当前工业现

场故障诊断的主要难题。根据系统故障的不同特点,工业现场需要分层、准确、及时、可追踪的一体化故障诊断体系,并且要满足对显性硬件故障和隐性软件故障的同时监测需求,适应复杂的耦合系统维护场景。

## 二、工业电气自动化控制系统主流故障诊断技术

### (一) 基于解析模型的故障诊断技术

基于解析模型的故障诊断技术以控制系统准确无误的数学机理模型为依托执行故障判定,依据系统正常工作时电压、电流、转速、压力等运行参数建立起动态数学模型,持续采集控制系统实际运行数据并与模型中的标准数据展开对比分析,借助残差数值的偏离程度来推测系统是否存在故障,并凭借模型参数的变化找出故障发生的位置。该技术依靠明确的物理运行机理,诊断逻辑清晰,诊断结果具有很强的可解释性,不需要大量的历史运行数据,适合结构相对简单、运行机理明确的中小型电气控制系统。

### (二) 基于信号分析的故障诊断技术

基于信号分析的故障诊断技术无需建立系统的数学模型,而是直接对控制系统运行过程中产生的振动信号、电流信号、电压信号、电磁信号等原始运行信号进行采集,再利用时域分析、频域分析、小波变换等信号分析方法提取信号的特征参数,比较正常工况与故障工况下信号特征参数的差异,以达到故障识别的目的。时域分析借助信号峰值、有效值、峭度等时域指标来判定运行是否正常,频域分析针对信号频谱分布的变化来辨别电气谐波以及频率偏移等故障,小波变换兼具时域与频域分析的优点,适用于非稳定且存在突变性的工业电气信号检测场景。该技术工程落地难度小,运算速度快,能够迅速辨识突发性电气故障,被大量应用于电机、变频器、高压配电装置等电气设备的故障检测当中<sup>[2]</sup>。

### (三) 基于数据驱动的智能故障诊断技术

数据驱动型智能故障诊断技术是当前自动化领域的研究重点,其无需依赖机理模型及人工特征提取,而是以工业场景中大量存在的运行大数据为基础,利用机器学习、深度学习以及神经网络等AI算法自主完成故障的识别与原因追溯。该技术首先对控制系统的多源运行数据执行清洗、降噪及归一化等预处理步骤,然后依靠卷积神经网络、长短期记忆网络等算法自动挖掘故障数据背后的隐含特征,构建故障特征与故障类型的映射关系,从而实现自动化的故障识别、精确

定位及剩余寿命预估。相比前两种传统诊断技术,数据驱动诊断技术更适用于非线性、强耦合的复杂电气控制系统,抗干扰能力较强,诊断准确度较高,且能实现故障的提前预警及预测性维修。它依托工业互联网平台实现多站点间的数据共享,可应用于大规模、集群化的工业自动化生产线中,是今后故障诊断技术发展的主要方向<sup>[3]</sup>。

## 三、故障诊断技术实际应用现存问题

### (一) 复杂工况下诊断鲁棒性不足

工业现场充斥着强烈的电磁干扰、温湿度剧烈变化以及粉尘侵蚀等恶劣条件,电气控制系统的运行信号容易被这些环境噪声所污染,导致采集到的运行数据失真或出现杂波干扰。传统的模型驱动及信号分析诊断技术抗干扰能力较弱,噪声数据会直接影响残差判断和信号特征偏移,从而引发故障漏报或误报;当前主流的智能诊断模型大多基于实验室内的干净数据集进行训练,泛化性能较差,若直接应用于复杂工业现场,诊断精度将大幅下降。此外,工业生产的工况处于不断变换之中,控制系统运行参数始终处于波动状态,依赖固定参数进行诊断的模型难以适应全工况下的运行要求,致使复杂工况下故障诊断的稳定性和可靠性降低。

### (二) 多源异构数据融合能力欠缺

现代工业电气自动化控制系统中存在设备运行数据、视频监控数据、环境传感数据以及通讯日志数据等多种不同来源且结构各异的数据集,这些数据在存储格式、采样速率及维度上表现出较大差异性,形成了“数据孤岛”。目前多数故障诊断系统仅依靠单一方面的运行信号完成诊断,无法综合软硬件全方位运行数据以实现故障的全面判断,遇到系统耦合类复合性故障时,难以把握整个过程链条。此外,边缘端现场采集数据与云端维护平台之间存在一定的时间滞后,在实施边缘即时检测的同时无法与远程数据中心实现同步交互,导致实时告警与反馈机制失效,难以达到工业现场对高精度与快速度兼备的理想要求<sup>[4]</sup>。

### (三) 诊断模型可解释性与运维适配性较差

深度学习类智能故障诊断模型属于黑盒模型,其内部特征提取与故障判断的机制无法直观展现,只能呈现最终的诊断结果,却无法揭示故障的发展过程、扩散路径及模型的判断依据,给现场运维人员实施针对性检修和系统改进带来困难。现有诊断模型缺乏通用性,大多针对某一类型的电气控

制系统进行定制开发, 不同行业、不同型号的自动化设备之间难以通用, 且二次开发成本较高。目前大部分故障诊断系统仅能实现故障的检测与定位, 未能与控制系统自愈调节、运维工单自动派发、设备寿命预测等环节有效结合, 致使诊断结果难以真正融入现场运维的全过程, 技术闭环尚未完全建立。

#### 四、工业电气自动化故障诊断技术发展趋势

##### (一) 多方法融合的混合诊断架构发展

单一故障诊断技术存在固有的应用短板, 未来行业将逐步形成一种机理模型结合信号分析再融合人工智能的混合故障诊断架构, 以相互取长补短来提升整体诊断性能。通过解析模型把握控制系统的基本运行机理, 实现对一般故障的快速筛选; 借助信号分析手段完成对原始运行信号的初步处理与特征呈现, 以减轻智能算法的运算负担; 运用深度学习算法挖掘复杂的隐蔽故障特征, 解决高度复杂的耦合故障溯源问题。混合诊断架构同时兼顾诊断结果的可解释性、实时性与高精度要求, 既能弥补单一模型机理缺失的不足, 也能解决大型系统中数学模型难以构建的问题, 适用于全层级、多类别的电气控制系统故障诊断, 将成为工程实际应用落地的主要架构<sup>[5]</sup>。

##### (二) 数字孪生赋能全生命周期故障预测

数字孪生技术能够建立与实体电气控制系统每一部件对应的虚拟镜像模型, 并实时同步实体设备的运行状态、参数变化及故障演变过程, 实现物理世界与数字世界的双向互动。通过数字孪生虚拟模型, 可对不同工况条件、不同故障原因下的系统运行情况进行模拟仿真, 并开展故障演化过程的预判分析, 真正由传统的“事后维修”模式转变为“事前预警”的预防性维修方式。利用数字孪生技术, 还可整合设备出厂的原始参数信息、历史运维记录及当前在线监测数据等多源异构数据资源, 构建完整的设备全生命周期健康管理档案, 进而精确判断每台电气装备的实际健康状况及剩余使用寿命, 在此基础上指导工厂制定前瞻性检修计划, 替代过去经验主义主导的粗放型维护模式, 从而全面提升整个工业自动化控制系统的数字化运营管理水平。

##### (三) 边缘计算与云平台协同的分布式诊断普及

针对工业现场数据传输时延大、云端诊断实时性差等问

题, 边缘计算加云计算的分布式诊断方式将得到广泛应用。

在工业现场的边缘节点上部署轻量级诊断模型, 就近进行实时信号采集, 并快速完成故障检测及突发故障应急处置, 降低数据传输带宽压力, 保障故障诊断的即时性。确定继电保护装置控制的评判集, 结合运维因素构建灰色模糊关系矩阵, 有序加权平均算子函数的加权向量计算中和评判值, 经过转换后获取继电保护装置控制区间动作决策结果。云端大数据分析平台汇聚全厂区各个边缘节点的数据信息, 执行全局范围内的故障成因分析, 持续优化诊断模型, 并更新行业故障数据库。云边协同的架构实现即时本地化诊断与全局大数据分析的结合, 兼顾故障的紧急处理速度与模型的长远优化能力, 适合大型工业园区多条生产线、众多控制站点的规模化故障诊断需求, 契合工业互联网的整体架构体系。

#### 结语:

工业电气自动化控制系统稳定可靠的运行是现代工业安全生产与高效生产的基石, 而故障诊断技术则是工业电气自动化控制系统运维的核心支撑技术, 贯穿于系统从安装调试到日常运行再到检修维护的全生命周期。在工业数字化、智能化技术不断更新迭代的过程中, 故障诊断技术将进一步融合工业互联网、人工智能等技术手段, 构建一套完整的集故障检测、源头查找、危险预估、自动恢复与运维于一体的智能化运维体系, 为工业电气自动化控制系统的安全稳定运行提供全面的技术支撑。

#### [参考文献]

- [1] 刘诗凡. 小麦播种机械自动化控制技术应用与系统性优化路径详细分析[J]. 农民致富之友, 2026, (18): 72-74.
- [2] 范玉轩, 刘松, 刘娟, 等. 基于人工智能的化工装置电气自动化控制技术[J]. 科学技术创新, 2026, (13): 25-28.
- [3] 邱涤明. 自动化控制系统在石油化工生产优化中的应用与效益分析[J]. 中国化工贸易, 2026, 18(18): 100-102.
- [4] 宋娟, 吴进扬. 智能制造背景下造纸机械自动化控制系统应用研究[J]. 华东纸业, 2026, 56(6): 35-37.
- [5] 袁东. 智能传感器在机械自动化控制中的应用[J]. 信息记录材料, 2026, 27(11): 94-96.

作者简介: 王贤哲(2005-02), 男, 汉族, 陕西商南人, 本科, 研究方向: 电力电子与电力传动。