

# 电气自动化控制系统的故障诊断与维护策略研究

高佳澄

靖江市人民医院 江苏 泰州 214500

**摘要:** 电气自动化控制系统作为现代工业、能源、交通等关键领域的核心支撑,其运行的可靠性与稳定性直接关系到生产效率、产品质量乃至公共安全。然而,系统在长期运行中不可避免地会受到元器件老化、环境应力、电磁干扰及人为因素等多重影响,从而引发各类故障。因此,构建一套科学、高效、前瞻性的故障诊断与维护体系,是保障系统全生命周期可靠运行的关键。本文旨在系统性地探讨电气自动化控制系统的故障诊断理论、方法论及其对应的先进维护策略。文章首先剖析了系统故障的成因、分类与危害,继而深入阐述了基于信号处理、模型驱动、数据驱动以及知识工程等多维度的故障诊断技术框架。在此基础上,论文重点论述了从传统的被动维修、预防性维护向以状态监测为基础、以预测性维护为核心的现代化维护策略的演进路径。本研究旨在为提升电气自动化控制系统的健壮性、可用性与可维护性提供理论参考与实践指导。

**关键词:** 电气自动化;故障诊断;维护策略;预测性维护;可靠性

## 引言

进入二十一世纪以来,以工业4.0和智能制造为代表的新一轮产业革命正深刻重塑全球制造业格局。在这一进程中,电气自动化控制系统(Electrical Automation Control Systems, EACS)扮演着“神经中枢”与“执行末梢”的双重角色,实现了对物理世界的精确感知、智能决策与高效控制。从微小的生产线单元到庞大的电网调度中心,EACS的稳定、可靠、高效运行已成为衡量一个国家工业化与信息化融合水平的重要标尺。然而,随着系统集成度、复杂度与智能化程度的不断提升,其潜在的故障模式也呈现出多元化、耦合化与隐蔽化的趋势。一旦发生故障,轻则导致生产中断、效率下降,重则可能引发设备损毁、安全事故乃至环境污染,造成巨大的经济损失和社会影响。传统的“事后维修”(Run-to-Failure)模式已无法满足现代工业对高可用性和高可靠性的严苛要求。因此,如何在故障发生前或初期阶段对其进行精准识别、定位与评估,并据此制定最优的维护决策,已成为学术界与工业界共同关注的核心议题。

## 1 电气自动化控制系统故障的机理与分类

### 1.1 故障机理

EACS的故障根源复杂,可大致归结为以下几类:①硬件层面的失效:这是最直观的故障来源。包括元器件(如电阻、电容、集成电路、继电器、接触器等)因长期工作导致的老化、疲劳、磨损;半导体器件因过压、过流、过热而发生的击穿或烧毁;连接件(如端子、插头、焊点)因振动、腐蚀或制造缺陷引起的接触不良、断路或短路;以及传感器、执行器等现场设备因环境侵蚀(粉

尘、湿气、化学腐蚀)或机械冲击造成的性能漂移或功能丧失。②软件与逻辑层面的错误:随着可编程逻辑控制器(PLC)、分布式控制系统(DCS)及嵌入式系统的广泛应用,软件故障日益凸显。这包括控制程序中的逻辑错误、算法缺陷、内存泄漏;组态参数设置不当;固件版本不兼容;以及由电磁干扰(EMI)或电源波动诱发的程序跑飞、数据错乱等软故障。此类故障往往具有偶发性和间歇性,诊断难度较大<sup>[1]</sup>。③外部环境与人为因素:恶劣的工业环境,如高温、高湿、强电磁场、剧烈振动等,会加速硬件老化并干扰信号传输。供电系统的电压暂降、谐波污染、频率波动等电能质量问题,也会对控制系统的稳定运行构成威胁。此外,操作人员的误操作、维护不当或恶意攻击(如网络入侵)同样是不可忽视的故障诱因。

### 1.2 故障分类

根据故障的表现形式与影响范围,可将其分为:①突发性故障:无明显征兆,瞬间发生,通常由严重过载、短路或元件灾难性失效引起。②渐进性故障:性能随时间缓慢劣化,如传感器精度逐渐下降、电机轴承磨损加剧等,具有一定的可预测性。③局部性故障:仅影响系统某一特定模块或回路。④全局性故障:导致整个系统或大部分功能瘫痪。

## 2 故障诊断的核心方法论体系

故障诊断(Fault Diagnosis)的本质是利用一切可获得的信息,对系统当前的健康状态进行评估,并在异常发生时,确定故障的类型、位置、严重程度及原因。针对EACS的特点,现代故障诊断方法已形成多维度、多

层次的技术体系。

### 2.1 基于信号处理的诊断方法

该方法直接对系统运行过程中产生的原始信号（如电压、电流、温度、振动、声音等）进行分析，从中提取能够表征故障特征的敏感信息。其核心在于信号预处理与特征提取。①时域分析：通过计算信号的均值、方差、峰值、峭度、波形因子等统计量，可以初步判断信号是否存在异常。例如，电机轴承损坏常会导致振动信号的峭度值显著增大。②频域分析：利用傅里叶变换（FFT）将时域信号转换到频域，通过分析频谱结构的变化来识别故障。例如，齿轮箱故障会在其啮合频率及其倍频处产生明显的边带<sup>[2]</sup>。③时频域分析：对于非平稳信号（即频率成分随时间变化的信号），传统的FFT存在局限。小波变换（Wavelet Transform）因其良好的时频局部化特性，成为分析瞬态冲击、信号突变等故障特征的有力工具。它能有效分离噪声与故障信息，揭示故障发生的时间点与频率成分。④高阶统计量分析：对于淹没在高斯噪声中的微弱故障信号，利用双谱、三谱等高阶统计量可以抑制噪声，增强故障特征的显现。

### 2.2 基于模型驱动的诊断方法

此方法建立在对被控对象或控制系统本身精确数学模型的基础之上。通过比较系统实际输出与模型预期输出之间的差异（即残差），来判断系统是否发生故障。①状态观测器法：设计一个与被控对象动态特性一致的状态观测器，用其估计值与实际测量值进行比较。当残差超出预设阈值时，即可判定为故障。Luenberger观测器、卡尔曼滤波器（Kalman Filter）是常用的技术。②参数估计法：许多故障会表现为系统模型参数（如电阻、电感、摩擦系数等）的改变。通过在线辨识系统参数，并监测其变化趋势，可以实现对渐进性故障的早期预警。③奇偶空间法：通过构造一组与系统输入无关的残差向量（奇偶向量），使其对特定故障敏感而对其他干扰鲁棒，从而实现故障的隔离与辨识。模型驱动方法的优点在于物理意义明确、诊断精度高，但其效果高度依赖于模型的准确性，在面对复杂、非线性、时变的EACS时，建模难度大、成本高。

### 2.3 基于数据驱动的诊断方法

随着工业物联网（IIoT）和大数据技术的发展，海量的运行数据为故障诊断提供了新的可能。数据驱动方法不依赖于精确的物理模型，而是通过挖掘历史数据中的模式与规律来实现故障的智能识别。①机器学习方法：支持向量机（SVM）、随机森林（Random Forest）等传统机器学习算法，通过对标注好的正常与故障数据进行训

练，可以构建高效的分类器，用于故障类型的判别。②深度学习方法：卷积神经网络（CNN）擅长处理图像和具有空间相关性的信号（如振动频谱图），循环神经网络（RNN）及其变体长短期记忆网络（LSTM）则在处理时间序列数据方面表现出色。它们能够自动从原始数据中学习深层次的故障特征表示，极大地减少了人工特征工程的工作量，在复杂故障模式识别上展现出巨大潜力<sup>[3]</sup>。③无监督/半监督学习：在实际应用中，获取大量标注的故障数据往往是困难的。无监督学习（如自编码器Autoencoder）可以通过学习正常数据的分布，在遇到偏离该分布的数据时发出异常警报。半监督学习则结合少量标注数据与大量未标注数据，提升模型的泛化能力。数据驱动方法具有强大的非线性拟合能力和自适应性，但其“黑箱”特性使得结果的可解释性较差，且对数据质量和数量有较高要求。

### 2.4 基于知识工程的诊断方法

该方法模拟人类专家的诊断思维过程，将领域专家的经验、规则和启发式知识进行形式化表达，构建专家系统或故障树（Fault Tree Analysis, FTA）。①专家系统：由知识库、推理机和人机接口组成。当系统出现故障征兆时，推理机依据知识库中的规则进行逻辑推理，逐步缩小故障范围，直至定位故障源。②故障树分析：采用自上而下的演绎分析法，将系统最不希望发生的顶层事件（如“系统停机”）作为分析目标，逐层分解为导致该事件发生的各种基本事件（如元器件失效），通过逻辑门（与门、或门）连接，形成一棵倒置的树状图。FTA不仅能定性分析故障原因，还能进行定量的概率计算。知识工程方法的优势在于充分利用了人类专家的宝贵经验，逻辑清晰，易于理解和接受，特别适用于处理那些难以用数学模型描述的复杂、模糊的故障问题。

在实际应用中，单一的诊断方法往往难以应对所有挑战。因此，多方法融合（Hybrid Approach）成为发展趋势，例如将模型驱动的残差生成与数据驱动的模式分类相结合，或将信号处理的特征提取与专家系统的逻辑推理相融合，以期获得更鲁棒、更全面的诊断性能。

## 3 现代化维护策略的演进与实施

### 3.1 维护策略的演进路径

①事后维修(Corrective Maintenance, CM) 这是最原始的策略，即“坏了再修”。其优点是管理简单、初期投入低，但缺点是故障后果不可控，停机损失大，且可能因连锁反应造成更大范围的损害。②预防性维护(Preventive Maintenance, PM) 基于固定的日历时间或设备运行小时数，定期进行检修、更换易损件。PM能有效减少突发性故障，

但存在“过度维护”（在设备仍健康时进行不必要的拆卸）和“维护不足”（在两次维护间隔内发生故障）的风险，维护成本较高。③基于状态的维护(Condition-Based Maintenance, CBM) CBM是维护理念的一次重大飞跃。它依赖于前述的故障诊断技术，通过实时或定期监测设备的关键状态参数（如温度、振动、绝缘电阻等），只有当监测数据表明设备健康状况出现劣化趋势时，才启动维护活动。这实现了按需维护，显著提高了维护的针对性和经济性<sup>[4]</sup>。④预测性维护(Predictive Maintenance, PdM) PdM是CBM的高级形态。它不仅判断设备“是否”需要维护，更能预测“何时”会发生故障。通过运用先进的数据分析、机器学习和物理模型，PdM能够对设备的剩余使用寿命（Remaining Useful Life, RUL）进行量化估计。这使得维护计划可以被精确地安排在故障发生前的最优时间窗口，从而最大化设备可用率，最小化维护成本和库存成本。

### 3.2 预测性维护的核心要素

实施成功的PdM需要以下几个关键要素的协同：①全面的状态感知：部署足够密度和精度的传感器网络，覆盖所有关键子系统。②高效的数据采集与传输：构建可靠的工业通信网络（如工业以太网、5G），确保数据的完整性与时效性。③智能的分析平台：利用边缘计算和云计算资源，运行复杂的诊断与预测算法。④闭环的决策支持：将预测结果无缝集成到企业的资产管理系统（EAM）或企业资源规划（ERP）系统中，自动生成工单、备件需求和维护计划。

### 3.3 全生命周期管理视角

现代化的维护策略不应孤立地看待设备的运行阶段，而应置于全生命周期管理（Total Productive Maintenance,

TPM）的框架下。这意味着从设备的设计选型、采购安装、调试运行，到最终的报废更新，每一个环节都应考虑其对后期维护的影响。例如，在设计阶段就融入“可维护性”和“可诊断性”的设计理念，选用高可靠性的元器件，预留足够的测试点和维护空间，这将为后期的高效维护奠定坚实基础。

## 4 结语

电气自动化控制系统的故障诊断与维护是一项复杂的系统工程，涉及多学科知识的交叉融合。本文系统地梳理了故障的成因与分类，构建了涵盖信号处理、模型驱动、数据驱动和知识工程的多维诊断方法论体系，并阐述了从被动维修到预测性维护的策略演进路径。研究表明，单一的技术手段已难以满足现代EACS的高可靠性需求。未来的方向在于，以预测性维护为核心，深度融合先进的诊断技术、智能化的分析平台与全生命周期的管理理念，并辅以冗余设计、网络安全等综合保障措施，从而构建一个韧性十足、智慧高效的运维生态。唯有如此，才能真正驾驭日益复杂的自动化系统，为其在数字经济时代的蓬勃发展保驾护航。

## 参考文献

- [1]吴明雨,孙海龙.电力系统中电气自动化控制技术的应用[J].电力设备管理,2026,(04):119-121.
- [2]项礼春.电气自动化故障诊断及维护应用研究[J].中国设备工程,2025,(21):173-175.
- [3]张玉鹏.电气自动化设备故障诊断技术与维护策略研究[J].造纸装备及材料,2025,54(03):61-63.
- [4]陈刚.电气自动化设备故障诊断与预测维护技术进展探究[J].仪器仪表用户,2024,31(11):93-95.