

# 电气自动化设备智能故障诊断与预测性维护技术

宋成乾

西华大学 四川成都 610039

**摘要:** 随着工业自动化水平的不断提升,电气自动化设备在工业生产中扮演着愈发重要的角色。然而,设备的故障不仅会影响生产效率,还可能带来安全隐患。因此,电气自动化设备的智能故障诊断与预测性维护技术显得尤为重要。本文旨在探讨电气自动化设备的常见故障类型,分析现有的故障诊断技术,并研究预测性维护技术的实施方法,以期为提高设备运行的稳定性和安全性提供理论支持和实践指导。

**关键词:** 电气自动化设备; 智能故障诊断; 预测性维护

## 引言

在当今工业快速发展的时代,电气自动化设备已成为推动生产效率提升和保障工业安全的关键因素。然而,这些设备在长期运行过程中难免会出现各种故障,这些故障不仅会导致生产中断,影响经济效益,还可能引发安全事故,对人员和环境造成威胁。因此,如何及时、准确地诊断电气自动化设备的故障,并实施有效的预测性维护,成为工业领域亟待解决的重要问题。智能故障诊断与预测性维护技术的出现,为这一问题的解决提供了新的思路和方法。

## 一、电气自动化设备的常见故障类型

### 1. 电气故障

电气故障主要指设备在电气回路及相关部件中发生的故障,其产生原因多样,表现形式复杂。常见的有短路故障,这通常是由于绝缘层老化破损、线路连接不当或外界异物导致相线与相线、相线与零线之间直接接触,造成电流瞬间急剧增大,可能引发设备损坏甚至火灾。过载故障则是因为设备长时间在超过额定负载的情况下运行,使得电气元件发热过度,加速绝缘老化,严重时烧毁电机、熔断器等部件。断路故障多由导线断裂、接头松动或开关触点接触不良引起,导致电路不通,设备无法正常工作<sup>[1]</sup>。此外,还有漏电故障,主要是由于设备绝缘性能下降,电流通过非预期路径泄漏,不仅

浪费电能,还可能对操作人员造成触电危险。电机故障是电气故障中的重要组成部分,如定子绕组故障(包括绕组接地、短路、断路和匝间短路),会导致电机无法启动、运行时异响或振动加剧;转子故障(如断条、端环开裂)则会使电机转速下降、输出功率降低。接触器、继电器等控制电器的故障也较为常见,如触点烧蚀、粘连、线圈烧毁等,会导致控制信号传递失效,影响设备的正常运行逻辑。

### 2. 机械故障

机械故障是电气自动化设备在机械结构和运动部件上出现的问题,直接影响设备的运行精度和稳定性。磨损是最普遍的机械故障之一,发生在相对运动的部件之间,如轴承的滚珠与滚道、齿轮的齿面等,长期磨损会导致配合间隙增大,产生振动和噪声,降低设备的传动效率和使用寿命。疲劳破坏则是由于部件在交变应力作用下,经过一定循环次数后产生裂纹,进而扩展导致断裂,例如传动轴、弹簧等部件容易出现此类故障。变形故障多因设备受到过大的外力、温度变化或长期负荷作用,导致零件产生塑性变形,如机架变形会影响设备的整体精度,导轨变形会导致运动部件卡滞。松动故障通常由紧固件(如螺栓、螺母)的振动松脱引起,可能导致部件定位不准、运行异常,严重时甚至会造成部件脱落引发事故<sup>[2]</sup>。卡涩与卡死故障是由于运动部件之间存在异物、润滑不良或配合尺寸超差,导致部件运动受阻,如导轨内有铁屑会使滑块移动困难,阀门卡涩会影响流体控制精度。

### 3. 控制系统故障

控制系统故障涉及设备的控制核心部分,对设备的

**作者简介:** 宋成乾(1995年9月12-),性别:男,民族:汉,籍贯:四川雅安,学历:本科,研究方向:电气自动化。

整体运行影响重大。PLC（可编程逻辑控制器）故障是控制系统中的常见问题，包括CPU模块故障（如运算错误、程序丢失）、I/O模块故障（如输入信号无响应、输出信号异常）、电源模块故障（无法提供稳定电压）等，会导致控制逻辑混乱或设备无法按预定程序运行。DCS（分布式控制系统）故障可能表现为控制站故障（如数据处理错误、通讯中断）、操作员站故障（如人机界面无响应、数据显示异常）或网络故障（如数据传输丢包、延迟），影响系统的集中监控和协调控制能力。嵌入式控制系统故障则可能由于微处理器性能下降、存储器故障、软件程序漏洞或电磁兼容性问题，导致设备控制功能异常，如执行机构动作错误、控制参数无法修改等<sup>[3]</sup>。

## 二、电气自动化设备的故障诊断技术

### 1. 基于物理原理的诊断技术

基于物理原理的诊断技术是通过分析设备运行过程中的物理现象和规律，来判断设备是否存在故障及故障原因的方法。该技术以设备的结构、材料、运动学和动力学等物理特性为基础，建立故障与物理参数之间的关系模型。例如，在旋转机械故障诊断中，根据振动理论，当转轴存在不平衡故障时，会产生与转速同频率的振动分量；当轴承存在磨损或裂纹时，会出现特定频率的冲击振动信号。通过测量设备的振动信号，并结合转子动力学等物理原理，可对不平衡、不对称、轴承故障等进行诊断。在电气设备诊断中，基于电路理论，通过测量电阻、电感、电容等参数的变化，可判断电气元件是否存在短路、断路、绝缘老化等故障。例如，测量电机定子绕组的直流电阻，若其值超出规定范围，则可能存在绕组匝间短路或断路故障。基于热力学原理，通过监测设备的温度分布，可诊断设备的过热故障，如电机铁芯过热可能是由于铁芯硅钢片绝缘损坏导致涡流增大。这种诊断技术的优点是理论基础扎实，对于简单明确的故障类型诊断准确性高，且不需要大量的历史数据，但对于复杂故障或多因素耦合的故障，其诊断能力有限，往往需要结合其他诊断技术。

### 2. 基于信号处理的诊断技术

基于信号处理的诊断技术是通过从设备采集到的各种信号（如振动、温度、电流、电压、声音等）进行分析处理，提取与故障相关的特征信息，从而实现故障诊断的方法。首先对原始信号进行预处理，包括滤波（去除噪声干扰）、信号放大、A/D转换等，以提高信号质量。然后采用时域分析、频域分析、时频域分析等方

法对信号进行特征提取。时域分析通过计算信号的均值、方差、峰值、峭度等统计量，可反映信号的时域特征，适用于诊断冲击性故障，如轴承的点蚀故障会使振动信号的峰值和峭度值增大。频域分析主要通过傅里叶变换将时域信号转换到频域，得到信号的频谱图，根据频谱中特定频率成分的出现或变化来诊断故障，例如齿轮故障会在啮合频率及其谐波频率处出现明显的峰值。时频域分析则适用于非平稳信号的分析，如短时傅里叶变换、小波变换等，能够同时反映信号的时间和频率特性，对于设备启动、停机过程或故障发展过程中的信号分析具有优势，可捕捉到瞬态故障信息。基于信号处理的诊断技术能够有效提取故障特征，广泛应用于各类设备的故障诊断，但对信号的质量要求较高，且需要操作人员具备一定的信号处理知识和经验<sup>[4]</sup>。

### 3. 基于人工智能的诊断技术

基于人工智能的诊断技术是利用人工智能算法模拟人类的诊断思维过程，实现对设备故障的智能识别和诊断，具有自学习、自适应和强非线性处理能力。专家系统是早期的人工智能诊断技术，它将领域专家的知识 and 经验以规则的形式存储在知识库中，通过推理机模拟专家的推理过程进行故障诊断，具有解释能力强、易于理解的优点，但知识获取困难、适应性差是其主要局限性。人工神经网络是一种模仿人脑神经元结构设计的计算模型，通过对大量样本数据的学习，能够自动建立输入与输出之间的非线性映射关系，具有很强的模式识别和泛化能力，适用于复杂、非线性系统的故障诊断，如在电机故障诊断中，可利用神经网络对电机的振动、电流等信号特征进行学习，实现对不同故障类型的分类识别。支持向量机是一种基于统计学习理论的机器学习方法，通过寻找最优分类超平面来实现对数据的分类，在小样本情况下具有良好的分类性能，广泛应用于设备故障诊断中的模式分类问题。

## 三、电气自动化设备预测性维护技术

### 1. 数据采集

数据采集是预测性维护的基础，其目的是获取能够反映设备运行状态各类数据。首先需要确定采集的参数类型，主要包括振动（如加速度、速度、位移）、温度（如电机绕组温度、轴承温度、环境温度）、压力（如液压系统压力、气压）、流量（如冷却剂流量、介质流量）、电流、电压、功率以及设备的运行参数（如转速、负载、行程）等。根据设备的重要性、故障模式和监测

需求,选择合适的传感器类型,如振动传感器(压电式、电容式)、温度传感器(热电偶、热电阻、红外传感器)、压力传感器(应变片式、电容式)、电流传感器(霍尔传感器、电流互感器)等,并将传感器安装在设备的关键部位,确保能够准确采集到有效的状态信号。数据采集方式可分为在线实时采集和离线定期采集,在线采集通过传感器、数据采集卡和工业总线(如RS485、Modbus、Profinet)将数据实时传输到数据中心,适用于关键设备的连续监测;离线采集则通过便携式检测仪器定期到现场采集数据,适用于非关键设备或临时监测需求。数据采集的频率应根据设备的运行特性和故障发展速度确定,对于故障发展较快的设备,采集频率应较高,以捕捉故障的动态变化过程<sup>[5]</sup>。

## 2. 数据预处理

数据预处理是对采集到的原始数据进行处理,以提高数据质量,为后续的状态评估和故障预测提供可靠的数据基础。首先进行数据清洗,去除原始数据中的噪声、异常值和缺失值。噪声通常来自传感器本身的误差、电磁干扰或数据传输过程中的干扰,可采用滤波(如低通滤波、高通滤波、小波去噪)等方法进行处理;异常值可能是由于传感器故障、突发干扰或设备瞬时异常引起的,可通过统计分析(如 $3\sigma$ 准则、箱线图法)或聚类算法识别并处理;缺失值可根据数据的时间序列特性或相关性采用插值法(如线性插值、样条插值)或基于机器学习的方法进行填补。然后进行数据转换,将不同量纲、不同量级的数据转换到统一的尺度上,如归一化(将数据映射到 $[0, 1]$ 区间)或标准化(将数据转换为均值为0、标准差为1的分布),以消除量纲对后续分析的影响。特征提取是数据预处理的关键步骤,从原始数据中提取能够反映设备状态的特征参数,如时域特征(均值、方差、峭度)、频域特征(频率分量幅值、功率谱密度)、时频域特征(小波系数能量)等,通过降维技术(如主成分分析、因子分析)减少特征维度,去除冗余信息,提高后续算法的效率和准确性。

## 3. 状态评估与故障预测

状态评估是根据预处理后的数据和提取的特征参数,对设备当前的运行状态进行评价,判断设备是否正

常、存在潜在故障或已发生故障。首先建立设备的健康状态评价模型,可采用基于阈值的方法(将特征参数与预设的正常阈值进行比较)、基于统计分析的方法(如控制图法)或基于机器学习的方法(如支持向量机、神经网络)。通过将实时监测数据输入模型,得到设备的健康指数或状态等级(如正常、注意、预警、故障),为故障预测提供依据。故障预测是在状态评估的基础上,利用历史数据和当前状态信息,预测设备未来的健康状态和故障发生的时间。常用的故障预测方法包括基于物理模型的方法(根据设备的退化机理建立数学模型,如疲劳寿命模型、磨损模型)、基于数据驱动的方法(利用机器学习算法对设备的退化过程进行建模和预测,如时间序列分析、神经网络、支持向量回归、隐马尔可夫模型等)。例如,利用长短期记忆网络(LSTM)对设备的振动信号特征或性能参数随时间的变化趋势进行学习,可预测未来一段时间内设备的性能退化情况和剩余使用寿命(RUL)。状态评估与故障预测能够提前发现设备的潜在故障,为制定合理的维护计划提供决策支持。

## 结束语

综上所述,电气自动化设备智能故障诊断与预测性维护技术对于提升设备运行的稳定性和安全性具有至关重要的作用。通过综合运用多种故障诊断技术,并结合预测性维护策略,企业能够显著降低设备故障率,提高生产效率,从而在激烈的市场竞争中占据有利地位。

## 参考文献

- [1] 石磊. 电气自动化控制设备故障预防与检修技术探析[J]. 仪器仪表用户, 2024, 31(11): 37-39.
- [2] 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.
- [3] 张晓春. 电气自动化控制设备常见故障的维修及预防[J]. 中国设备工程, 2024, (15): 193-195.
- [4] 张兰静. 电气自动化设备故障预防及检修方法探讨[J]. 电气技术与经济, 2024, (02): 317-319.
- [5] 后德文. 人工智能技术在电气自动化控制中的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2020, (12): 115-116.