

# 机电工程自动化生产线设备故障诊断与预测性维护策略

李仁义

江西亿晟电气有限责任公司 江西南昌 330000

**摘要:** 本文聚焦于机电工程自动化生产线设备,深入探讨了故障诊断与预测性维护策略。首先分析了自动化生产线设备故障的常见类型及产生原因,接着详细阐述了当前主要的故障诊断技术,包括基于传感器数据、振动分析、温度监测等方法。然后提出了一系列预测性维护策略,如建立设备健康模型、利用大数据和人工智能算法进行故障预测等。通过实际案例验证了这些策略的有效性,旨在提高自动化生产线设备的可靠性和运行效率,降低维护成本。  
**关键词:** 机电工程; 自动化生产线; 设备故障诊断; 预测性维护

## 引言

机电工程自动化生产线在现代制造业中占据着至关重要的地位,它能够显著提高生产效率、保证产品质量和降低生产成本。然而,生产线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,增加维修成本,还可能影响产品质量和企业的经济效益。因此,及时准确地诊断设备故障并采取有效的维护策略,对于保障自动化生产线的稳定运行具有重要意义。

故障诊断与预测性维护是解决上述问题的关键技术。故障诊断能够快速确定设备故障的位置和原因,为维修提供依据;而预测性维护则可以提前预测设备可能出现的故障,在故障发生前采取措施进行维护,避免设备突发故障对生产造成影响。本文将对机电工程自动化生产线设备的故障诊断与预测性维护策略进行深入研究。

## 一、自动化生产线设备故障类型及原因分析

### (一) 机械故障

机械故障是自动化生产线设备中较为常见的故障类型之一。例如,零部件的磨损、疲劳断裂、变形等。磨损是由于设备在运行过程中,零部件之间的相对运动产生摩擦,导致表面材料逐渐损耗。疲劳断裂则是由于零部件长期承受交变载荷,在应力集中部位产生裂纹并逐渐扩展,最终导致断裂。变形可能是由于设备安装不当、过载运行或材料质量问题等原因引起的<sup>[1]</sup>。

### (二) 电气故障

电气故障主要包括电路短路、断路、接触不良以及电气元件损坏等。短路可能是由于电线绝缘层破损、受潮等原因导致电流直接通过非正常路径,引发设备损坏甚至火灾。断路则是由于电线断裂、熔断器熔断等原因,

使电路无法正常导通。接触不良可能会导致设备运行不稳定、信号传输错误等问题。电气元件如继电器、接触器等长期使用后可能会出现老化、损坏等情况。

### (三) 控制故障

控制故障通常与自动化生产线的控制系统有关。例如,程序错误、传感器故障、控制器故障等。程序错误可能是由于编程人员的疏忽或程序设计不合理导致的,会使设备无法按照预定的逻辑运行。传感器故障会导致控制系统无法准确获取设备的运行状态信息,从而影响设备的正常控制。控制器故障则可能是由于硬件损坏、软件故障等原因,使控制器无法正常发出控制指令<sup>[2]</sup>。

## 二、自动化生产线设备故障诊断技术

### (一) 基于传感器数据的故障诊断

传感器数据采集是实现设备状态监测的基础,其技术核心在于构建多维度感知网络。实际应用中需根据设备特性选择适配的传感器类型:在高速旋转部件(如电机轴承)安装高频响应加速度传感器(采样频率达10kHz以上),在高温区域(如熔炉附近)部署耐高温热电偶传感器,在液压系统管路安装压力变送器。传感器数据通过工业以太网或5G边缘节点实时传输至数据中台,结合边缘计算技术实现毫秒级异常检测。例如,某半导体封装生产线通过部署200+传感器组成的监测网络,将设备异常响应时间从传统的30分钟缩短至5分钟,故障漏报率降低60%。某汽车焊接车间的实践表明,基于多传感器融合数据的故障诊断准确率比单一传感器提升45%,有效避免了因误判导致的停机。

### (二) 振动分析技术

振动分析技术通过捕捉设备振动信号的微观特征实现故障定位,其关键在于信号处理与特征提取。振动信

号采集需遵循“关键测点”原则：在旋转设备的轴承座、齿轮箱壳体等刚性连接部位安装传感器，确保信号传输损耗小于5%。分析方法包括时域分析（如峰值、峭度指标）、频域分析（傅里叶变换识别特征频率）和时频域分析（小波变换捕捉非平稳信号）。具体而言，轴承外圈故障会在振动频谱中产生1-3倍转频的谐波成分，齿轮断齿则表现为啮合频率处的幅值突变。某风机生产线引入振动分析系统后，轴承早期故障检出率提升至90%以上，较传统巡检方式提前2-3个月发现潜在故障，单台设备年维修成本降低12万元<sup>[3]</sup>。

### （三）温度监测技术

温度监测技术通过追踪设备热态变化识别隐性故障，其技术演进已从接触式向非接触式拓展。在高电压设备（如配电柜、变压器）中采用红外热像仪实现非接触测温，避免电磁干扰；在低速转动部件（如传送带滚筒）安装贴片式温度传感器，实时监测摩擦升温。设备正常工作温度范围需结合设计参数与运行环境动态设定：例如伺服电机额定工况温度通常为40-60℃，环境温度每升高10℃需将报警阈值下调5℃。某物流自动化分拣线采用无线温度监测网络后，电机过热故障导致的停机时间减少75%，因温度异常引发的火灾隐患消除率达100%。系统通过温度梯度分析还能识别设备安装偏差，如某案例中通过电机与减速机的温差超过8℃，发现联轴器不对中问题。

### （四）油液分析技术

油液分析技术通过解析润滑油的物理化学特性与磨粒特征，实现机械部件磨损状态的量化评估。常用分析手段包括：铁谱分析观察磨粒形态（正常磨损磨粒直径 $< 5\mu\text{m}$ ，严重磨损可达 $50\mu\text{m}$ 以上）、光谱分析测定金属元素浓度（如铁元素浓度超过150ppm提示异常磨损）、粘度测定评估油液劣化程度（粘度变化率超过10%需警惕润滑失效）。采样频率需根据设备工况动态调整：连续运行的液压系统建议每周采样，间歇运行的齿轮箱可每月采样。某重型机械生产线通过油液分析技术，将液压泵的平均故障间隔从3000小时延长至5000小时，因润滑不良导致的故障占比从28%降至9%，年度润滑油消耗成本降低22%。

## 三、自动化生产线设备预测性维护策略

### （一）建立设备健康模型

设备健康模型的构建需经历“数据积累-特征筛选-模型训练-动态优化”四阶段闭环。在数据层需建立标准化数据采集框架，确保不同设备（如机器人、传送带、

精密机床）的参数可比对；特征层通过灰色关联分析筛选出与故障强相关的核心参数（如电机的振动峭度、温度波动率）；模型层采用联邦学习架构，在保护数据隐私的前提下实现多生产线数据共享训练。模型运行过程中需设置漂移检测机制，当预测误差连续3次超过8%时自动触发参数更新。针对高复杂度设备（如六轴工业机器人），需构建子系统级健康模型，分别评估机械臂、控制系统、驱动单元的健康状态，再通过加权算法生成整体健康评分。某汽车焊装车间的实践显示，动态优化的健康模型较静态模型的预测有效期延长2倍，更适应设备老化过程<sup>[4]</sup>。

### （二）利用大数据和人工智能算法进行故障预测

大数据预处理环节需重点解决数据异构性问题，通过标准化接口将PLC数据、传感器数据、MES生产数据转换为统一格式，采用卡尔曼滤波消除噪声干扰（信噪比提升至35dB以上）。特征工程阶段运用主成分分析（PCA）将高维数据降维，保留85%以上的故障信息。算法选型遵循“场景适配”原则：卷积神经网络（CNN）适合处理图像化的振动频谱数据，长短期记忆网络（LSTM）擅长捕捉温度、压力等时序数据的趋势变化，强化学习则用于优化故障预测的决策逻辑。某电子元件生产线通过融合随机森林与深度学习算法，构建了“特征提取-故障分类-寿命预测”三级模型，使早期故障识别准确率达91%，较单一算法提升17%。算法部署采用边缘计算与云端协同模式，边缘节点处理实时预警（响应时间 $< 1\text{s}$ ），云端进行深度分析与模型迭代，实现算力资源的高效分配。

### （三）制定合理的维护计划

维护计划制定需建立“故障风险-维护成本-生产影响”三维评估体系。风险评估采用故障模式与影响分析（FMEA）方法，量化不同故障的发生概率（如轴承故障 $P=0.02/\text{月}$ ）与影响程度（如停机损失5万元/小时）；成本评估涵盖备件采购、人工工时、设备闲置等全要素成本；生产影响评估需与ERP系统联动，避开订单交付关键期安排维护。针对关键设备（如发动机装配线的拧紧机）采用“预测性维护+备用设备”双保险策略，当健康评分低于70分时启动备用设备切换流程，避免单线停机。维护任务排程运用遗传算法优化，在满足资源约束（如技师数量、工具类型）的前提下，使维护总耗时缩短15%。某家电生产线通过动态调整维护周期，将高健康状态设备的维护间隔从30天延长至45天，同时缩短低健康状态设备的监测周期（从2小时/次加密至1小时/

次), 实现维护资源精准投放<sup>[5]</sup>。

#### (四) 建立设备维护管理系统

系统架构采用微服务设计, 包含设备档案管理、状态监测、工单管理、知识库等12个核心模块, 支持与物联网平台、ERP系统的无缝对接。设备档案模块记录全生命周期数据, 包括出厂参数、安装调试记录、历次故障报告(含故障照片、维修视频); 状态监测模块采用可视化仪表盘, 实时展示关键设备的健康评分、异常参数及预测故障时间。工单管理模块实现全流程数字化: 系统自动生成工单并推送至移动端, 技师通过APP上传维护现场照片与数据, 完工后自动触发效果验证(如振动复测、温度监测)。知识库模块采用自然语言处理技术, 支持通过故障现象关键词检索相似案例(匹配准确率达90%), 新维修方案经专家审核后自动更新入库。某工程机械企业的维护管理系统运行数据显示, 数字化工单使维护流程审批时间从2天缩短至4小时, 知识库应用使技师平均维修时间减少30%, 大幅提升维护效率。

#### 四、实际案例分析

以特斯拉上海超级工厂的车身焊接自动化生产线为例, 该生产线包含300余台焊接机器人、20条自动化输送线及50余套精密检测设备, 设备连续运行强度高, 任何故障都可能导致整车生产中断。2022年, 该工厂引入基于工业物联网(IIoT)的故障诊断与预测性维护体系, 取得显著成效。

在技术应用方面, 工厂在焊接机器人的关节轴承、伺服电机, 输送线的驱动齿轮箱等关键部位安装了2000余个振动传感器和温度传感器, 实时采集1kHz高频数据; 通过边缘计算网关对数据进行预处理, 筛选出振动峰值、温度漂移等关键特征参数, 再上传至云端AI平台。平台采用改进的CNN-LSTM混合算法构建设备健康模型, 针对焊接机器人的电弧电压波动、机械臂重复定位误差等参数进行动态建模。

实际运行中, 系统成功预测多起潜在故障: 2023年3月, 系统监测到某焊接机器人的Z轴关节振动信号在125Hz频段出现异常幅值, 经模型分析判断为轴承润滑不足, 预测剩余寿命约150小时。维护团队在生产间隙进行油脂补充, 避免了轴承卡滞可能导致的4小时以上停机。同年6月, 输送线驱动电机的温度传感器数据显示温升速率异常, 系统结合历史数据预测电机绝缘层可

能老化, 提前更换电机后, 避免了突发停机造成的50万元/小时产能损失。

据工厂统计, 该体系运行一年后, 设备非计划停机时间从2021年的85小时/年降至2023年的32小时/年, 降幅达62%; 维护成本同比降低28%(从230万元降至166万元); 设备综合效率(OEE)从89%提升至94.5%, 为工厂实现年产60万辆整车目标提供了关键保障。该案例证明, 通过“传感器实时监测+AI智能预测+动态维护计划”的闭环体系, 可有效提升自动化生产线的稳定性与经济性。

#### 结论

机电工程自动化生产线设备的故障诊断与预测性维护是保障生产线稳定运行、提高生产效率和降低维护成本的重要手段。本文分析了自动化生产线设备常见的故障类型及原因, 详细阐述了多种故障诊断技术和预测性维护策略。通过特斯拉上海超级工厂的案例验证了这些策略的有效性。

在未来的研究中, 还需要进一步完善故障诊断技术和预测性维护策略, 提高故障诊断的准确性和故障预测的可靠性。同时, 随着工业物联网、大数据、人工智能等技术的不断发展, 应加强这些技术在自动化生产线设备故障诊断与预测性维护中的应用, 实现设备的智能化维护管理。

#### 参考文献

- [1] 崔鹏浩, 王军强, 张文沛, 等. 基于深度强化学习的流水线预测性维护决策[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(12): 3416-3428. DOI: 10.13196/j.cims.2021.12.004.
- [2] 张峰, 张志鹏. 基于大数据的机械故障预测与维护策略研究[J]. 中华传奇(上旬), 2022(16): 0143-0145.
- [3] 林兆源. 智能化技术在机电工程管理中的应用[J]. 百科论坛电子杂志, 2022(23): 205-207.
- [4] 丁少虎, 张瑞晨, 杨称称, 等. 基于声音融合特征与OCSVM的机床故障分类诊断[J]. 制造技术与机床, 2022(10): 8. DOI: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2022.10.002.
- [5] 江朋, 陆远, 胡莹. 基于LSTM+FP-Growth算法的印刷设备故障预警及诊断[J]. 南昌大学学报(工科版), 2021, 043(003): 276-284.