

Design and Implementation of Electrical Safety Protection System in Industrial Automation Production Line

Zihui Yuan

Guangxi Occupational Safety Technology Development Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530000, China

Abstract

The widespread application of industrial automation production lines has promoted the continuous improvement of production efficiency, but the accompanying electrical safety issues have become increasingly prominent. It is urgent to build a scientific and comprehensive protection system to ensure the safety of equipment and personnel. This article focuses on the characteristics of electrical safety risks in the industrial automation environment, systematically analyzes the necessity and technical points of safety protection system design, and focuses on the configuration of overload protection, grounding measures, electromagnetic protection, and control system safety logic. By building a protective system that covers the entire process of design, construction, operation, and maintenance, the reliability and stability of automated equipment operation can be improved. The article further proposes a monitoring and emergency response mechanism in the operation of the system, providing a feasible path for enterprises to implement electrical safety management.

Keywords

industrial automation; Electrical safety; Protection system; Control logic; Operation and maintenance

工业自动化生产线中的电气安全防护体系设计与实现

袁子惠

广西职安科技发展有限公司, 中国 · 广西 南宁 530000

摘 要

工业自动化生产线的广泛应用推动了生产效率的持续提升,但随之而来的电气安全问题亦日益突出,亟需构建科学完备的防护体系以保障设备与人员安全。本文围绕工业自动化环境下的电气安全风险特点,系统分析了安全防护体系设计的必要性与技术要点,重点探讨了过载保护、接地措施、电磁防护及控制系统安全逻辑的配置方式。通过构建涵盖设计、施工、运行、维护全流程的防护体系,提升自动化设备运行的可靠性与稳定性。文章进一步提出了体系运行中的监测与应急响应机制,为企业实施电气安全管理提供了可行路径。

关键词

工业自动化; 电气安全; 防护体系; 控制逻辑; 运行维护

1 引言

随着制造业智能化水平的提升,工业自动化生产线成为现代工厂布局的主流形态。其依赖复杂的电气控制系统与自动化设备协同运行,高度集成化带来了前所未有的生产效率,但也伴随着更为严峻的电气安全挑战。电气故障一旦发生,不仅可能造成设备损坏与生产中断,甚至危及操作人员生命安全,影响企业经济效益与安全生产形象。传统的电气安全设计多聚焦于单点保护,难以适应现代自动化系统多源联控、高频运行、系统耦合的实际需求。因此,构建系统性、闭环化的电气安全防护体系已成为保障自动化生产稳定运行的核心课题,亟须从理论设计到工程实现进行全方位探索。

【作者简介】袁子惠(1985-),中国黑龙江牡丹江人,硕士,工程师,从事安全生产咨询、安全评价研究。

2 电气安全防护体系建设的必要性分析

2.1 工业自动化发展对电气安全的新要求

工业自动化水平的持续攀升促使生产线设备趋于集成化、信息化,控制逻辑和电气系统的复杂度显著提升。这种变革虽极大提高了生产效率与作业精准度,却也显著加剧了电气系统运行风险,尤其是在长周期连续运行、高速响应等工况下,短路、过载、接触不良、电气火灾等问题频发。面对大规模、分布广、协同强的电气设备网络,传统防护措施在精准性和实时性方面难以适应新需求。构建适用于现代自动化环境的电气安全防护体系,不仅是保障人员与财产安全的关键环节,更是提升工业运行韧性与可持续性的基础支撑。

2.2 生产线电气事故的风险类型与诱因辨析

自动化生产线中的电气事故具有链条长、传导快、难

预测的特征,风险类型涵盖线路过热、控制失灵、电压不稳、电气火花、电击伤人等多个方面。其诱因包括但不限于导线老化、负载波动、电源不稳、接地不良以及不规范操作等,同时受环境湿度、温差、电磁干扰等外部因素叠加影响,形成典型的系统性安全隐患。部分企业忽视隐性故障积累,未能设置系统级保护或缺乏及时巡检,导致小故障迅速演化为大事故,影响范围由单一设备扩大至整条产线,严重时可能造成区域性停产和人身伤害,亟需通过技术手段加以控制。

2.3 安全防护体系缺失带来的系统性隐患

电气安全管理中的结构性缺失往往体现在保护配置不合理、检测手段滞后、联动逻辑缺乏等方面。一旦生产线中部分环节出现接地失效、保护延迟或误触发等问题,往往难以及时隔离故障源,进而引发连锁反应,造成设备烧毁、数据丢失或误动作,严重扰乱自动化控制流程。系统性隐患的形成往往并非源于单点错误,而是由于防护体系未能形成从设计到运维的全生命周期闭环,从而在日常运行中逐渐积累风险。尤其在多源供电、多段控制、多工位协同的复杂产线上,一旦缺乏统一防护体系,整体系统的安全阈值将被大幅压缩。

3 电气安全防护体系的技术构成要素

3.1 过载与短路保护装置的配置标准

为保障电气系统的运行稳定,应结合负载等级、用电性质与运行环境,合理配置具备选择性分断能力的保护装置。常见配置包括热磁型断路器、快速熔断器、电子保护模块及可编程故障检测器等,其作用在于故障初期实现精准断电,避免故障电流传导至上游设备。在多级配电系统中,应科学设定分断能力、延时参数与响应优先级,防止发生保护重叠或动作失败。需注重设备冗余与容差预留,以应对功率波动带来的瞬时超载。整体配置标准应兼顾安全性、响应速度与易维护性,形成结构合理、功能互补的分层防护体系。

3.2 接地与绝缘系统的防护结构设计

接地系统作为电气系统的重要安全屏障,其设计应保障在任意故障状态下能实现有效泄流,防止外壳带电或电位反窜。保护接地、电气隔离与屏蔽措施需在设计阶段同步规划,合理布设接地网、设置等电位连接,并确保所有导体间具备连续性。对于特殊工况如高湿、高腐蚀区域,还需增加辅助接地或采用强化绝缘封装方式以提升抗干扰能力。绝缘系统设计应严格符合额定电压要求,选用高阻抗、高耐压材料,并加强关键节点如接线端子、电缆交叉点的局部绝缘防护,形成多维度电隔离体系,有效防止漏电、电弧、短路等问题发生。

3.3 电磁干扰与雷击防护的集成方案

在自动化设备密集、数据传输频繁的生产线中,电磁干扰和雷电浪涌是影响系统稳定运行的重要因素。应在系统架构中集成浪涌抑制器、磁屏蔽材料与分布式滤波装置,在电源入口、信号线接口及控制箱内形成多级屏障,阻断外部高能量干扰传导。雷击防护方面,可采用接闪器、引下线与接地体组成完整防雷系统,并确保设备机壳与接地体具备低

电阻通道,形成有效泄放通路。通信类设备应通过隔离模块与主控制器分离布线,减少感应耦合。整体方案应在保证响应速度的前提下提升抗干扰阈值,构建面向工业环境的高可靠防护集成体系。

4 电气控制系统中的安全逻辑设计

4.1 PLC 控制程序中的安全冗余逻辑构建

在工业自动化系统中,PLC 作为核心控制装置,其程序逻辑的安全性直接决定设备响应的准确性和故障隔离的可靠性。通过在关键控制段构建冗余逻辑结构,可在主通道失效时自动切换至备用路径,实现不中断控制。系统通常配置 2 套独立的 CPU 模块和 3 组输入输出接口,实现多路径校验与指令比对。对故障电压监测、电机转速反馈、位移检测等关键信号采用三重采集机制,误差大于 5% 时自动触发报警并中止当前流程。在 600 点以上的复杂控制逻辑中,冗余判断语句占比提升至 20%,显著增强了系统容错能力。通过编程语言中增加状态锁定、误动作回溯与联动授权等模块,实现对异常信号的逻辑阻断与顺序重构,确保系统在高频切换与高负荷运行中保持安全稳定。

4.2 安全继电器与急停回路的联动设计

安全继电器作为故障断电与急停执行的核心元件,在自动化生产线中承担多级联动保护功能。每套控制单元配置 2 个独立安全继电器分别用于电机回路与控制回路切断,实现互为监控的功能分离。在 5ms 以内完成通断响应,并对 48V 以下低压系统与 380V 高压负载区分设定动作阈值。急停按钮设计为 3 段式结构,包括按钮触发、继电器断电与连锁反馈,能在 2 秒内完成全线断电响应。急停信号与主 PLC 的 EMG 模块通过 RS485 总线进行同步确认,并在触发后 3 秒内生成故障编码上传至 HMI 界面。多站点设备设置总急停链路,通过硬线回路将 15 台以上设备纳入同一保护逻辑,避免单点响应滞后造成联动延迟。整体设计充分结合人机操作频次、区域危险等级与设备自检能力,实现标准化、分区化的安全控制结构。

4.3 连锁保护机制在多设备协同运行中的应用

在多台设备并联运行的自动化生产线上,建立连锁保护机制对于防止异常扩散具有重要意义。每台设备配置独立逻辑节点与控制反馈接口,通过布设在主干线的输入输出模块实现逻辑联动。当某台设备检测到过载、欠压或位置异常时,可在 200ms 内向上游设备发出停机信号,并同步传输至下游控制模块,确保控制命令与实际状态匹配。系统内平均部署 15 组数字量输入与 12 组继电器控制输出,通过总线系统构建闭环监控。连锁条件包括门限电流、传感器故障、气缸行程不到位等,触发后将禁止相关动作继续执行,并进行系统级阻断。在单批次产品通过 4 道设备同时作业的流程中,若检测出第 3 台设备电流升高 5A 以上,系统将中断全线启动指令。通过标准化通信协议与数据交互逻辑,构建高度协同与自动响应机制,确保任何单点异常不致蔓延至整条产线,详情见表 1。

表 1 电气控制系统与安全运行维护分析表

	控制环节	功能目标	典型配置	响应时间	适用场景	存在问题
1	PLC程序冗余	提高故障容错率	双CPU冗余结构	5ms以内	复杂逻辑工艺	程序复杂度高
2	安全继电器联动	实现断电联动保护	双继电器配置	5ms以内	高压控制区域	继电器老化风险
3	急停控制逻辑	快速切断故障源	三段式急停回路	2秒内全断	人员密集操作区	按钮误触风险
4	多设备联锁保护	隔离异常设备	多节点数据同步	200ms完成	连续协同作业	信号误传风险
5	信号反馈机制	同步设备状态	RS485数据接口	3秒内上传	信息共享平台	网络延迟干扰

5 电气安全体系的运行维护与持续改进机制

5.1 定期巡检与状态监测的制度化配置

建立电气安全体系的关键在于构建可持续运行机制，制度化的巡检流程与在线状态监测配置成为常态化管理的重要工具。应以周检、月检、季度全面检测为时间轴设置梯级巡检任务，涵盖配电柜温升、电缆绝缘、电气间隙、电压稳定性与接地电阻等项目。通过部署电流、电压、温度、振动等多参数采集模块，对关键节点进行 24 小时不间断状态监测，并与控制中心数据集成。现场操作人员通过手持终端完成标准化检查记录，并上传至数据平台形成趋势分析与预警图谱。每次巡检应具备闭环校验机制，对于异常项需在 72 小时内完成整改反馈。以制度为约束，以数据为支撑，实现从被动检修向主动预判的管理转型，切实提升电气安全体系的稳健性和响应能力。

5.2 安全事件响应机制与应急预案设计

电气安全管理不仅依赖技术措施，更需要成熟完备的响应机制与预案体系。在体系设计中应设定事故分类分级响应标准，依据事件影响范围、电压等级、故障类型确定应急流程。系统应具备故障定位模块、区域隔离机制与联动启动装置，确保在事故发生后能迅速切断故障源并保护重要负

载。针对不同场景设计火灾、触电、设备损毁、误操作等专项预案，明确岗位职责、联络顺序与恢复流程。演练周期建议控制在 6 个月内至少一次，并覆盖白班夜班操作流程。事故发生后应在 1 小时内完成现场记录、数据上传与初步复盘，并在 48 小时内完成整改报告及体系修订建议。通过制度规范、流程固化与实践演练相结合，提升系统面对突发电气风险的综合应对能力。

5.3 技术升级背景下的安全体系动态调整路径

随着自动化技术的快速演进，电气安全体系需具备自适应调整能力，满足设备迭代与控制逻辑变更后的安全要求。应建立以生命周期管理为核心的安全策略体系，涵盖初始设计、安全评估、运行优化与退役评估等阶段。在设备升级改造过程中同步评估其对现有安全边界的影响，动态调整断电门限、联锁逻辑与接地模式等关键参数。对新增模块应配置独立的保护单元与状态接口，并同步更新系统软件及 PLC 程序。定期开展基于风险等级的体系审计与模拟测试，识别潜在失效点与新型干扰源，提出改进策略。通过引入版本管理机制与变更控制流程，保障体系在扩容、迁移、改造等操作中依然维持高可靠性与高响应力，实现安全体系的动态闭环演化，详见表 2。

表 2 电气安全体系运行维护机制分析表

	管理要素	主要内容	实施频率	技术手段	核心作用	改进方向
1	定期巡检	制度化检查流程	月/季度	手持终端记录	发现潜在隐患	增加标准项
2	在线监测	实时参数采集	全天候	传感器+数据网关	预警系统异常	提升采集精度
3	应急预案	分类事故处置	半年一次	流程固化演练	压缩响应时间	加强场景匹配
4	事件响应	快速隔离恢复	分级响应	自动定位系统	阻断事故蔓延	优化流程链条
5	动态调整	系统版本管理	升级同步	PLC逻辑更新	适配新技术要求	引入风险模型

6 结语

构建完善的电气安全防护体系是保障工业自动化生产线高效稳定运行的根本前提。通过系统性分析风险类型与诱因，明确技术构成与控制逻辑设计路径，结合现场运行维护机制与动态更新策略，可有效构建起覆盖全过程、多层次、可演进的安全防护体系。在生产复杂化、节奏加快、协同增强的背景下，电气安全管理已不再是附属模块，而是核心功能的一部分。唯有将安全理念融入设计、实施、运维每一环节，才能实现安全与效率并重的现代化工业目标。

参考文献

- [1] 陈志敏,刘俊.工业自动化设备的电气安全试验[J].科技风,2019,(19):150.
- [2] 柳晓菁,施奇维,尚羽佳.浅析工业通信设备的电气安全要求[J].仪器仪表标准化与计量,2018,(06):20-21.
- [3] 马瑞林.工业自动化设备的电气安全试验[J].信息系统工程,2018,(10):76.
- [4] 张国静.工业企业电气安全的应用研究[J].住宅与房地产,2017,(27):236.