

# 安全联锁装置可靠性分析与故障预警系统研究

曹志 宫宏卓 高娜

沈阳永业实业有限公司 辽宁 铁岭 110013

**摘要:** 本文深入探讨了安全联锁装置的基础理论、可靠性分析及故障预警系统设计。首先介绍了安全联锁装置的定义、工作原理及其分类。详细阐述了可靠性分析方法,包括故障树分析、失效模式与影响分析等,并建立安全联锁装置的可靠性模型,设计了故障预警系统,从需求分析到系统实现进行全面介绍。最后,提出了提升安全联锁装置可靠性的策略和故障预警系统的优化建议,旨在为工业生产安全提供有力保障。

**关键词:** 安全联锁装置; 可靠性分析; 故障预警系统; 工业生产安全

## 1 安全联锁装置基础理论

### 1.1 安全联锁装置的定义

安全联锁装置是一种用于保障工业生产设备安全运行的关键装置,它通过监测设备运行状态、控制设备动作,防止因操作失误、设备故障等原因引发安全事故。从不同角度出發,安全联锁装置具有多种分类方式。按作用原理划分,可分为机械联锁装置、电气联锁装置、液压联锁装置和气动联锁装置。机械联锁装置利用机械结构实现联锁功能,如通过机械杠杆、齿轮等部件的相互作用,确保设备在特定条件下才能进行操作。电气联锁装置则借助电气元件和电路实现联锁,常见的有继电器联锁、PLC联锁等,通过电气信号的传输与控制,保障设备运行安全。液压联锁装置依靠液压系统的压力变化和液压元件的动作来实现联锁,常用于需要较大作用力的场合。

### 1.2 安全联锁装置的工作原理

安全联锁装置的工作原理基于对设备运行状态的监测、判断和控制。一般来说,它由传感器、控制器和执行器三个主要部分组成。传感器作为安全联锁装置的“感知器官”,负责实时监测设备的运行参数和状态信息,如温度、压力、速度、位置等。这些参数被转换为电信号或其他便于传输和处理的信号形式,传输至控制器。例如,在化工反应釜中,温度传感器会实时监测反应釜内的温度,当温度超过设定阈值时,传感器将信号传输给控制器;控制器是安全联锁装置的“大脑”,它接收来自传感器的信号,并依据预先设定的逻辑规则和控制策略进行分析和判断。当检测到异常信号或不符合安全条件的情况时,控制器会发出相应的控制指令。控制器可以是简单的继电器逻辑电路,也可以是复杂的可编程逻辑控制器(PLC)或工业计算机。以电梯的安全联锁系统为例,PLC控制器会根据电梯门的开关状态、轿厢

位置、载荷等信号进行综合判断,确保电梯在安全状态下运行;执行器则是安全联锁装置的“手脚”,它根据控制器发出的指令执行相应的动作,如切断电源、关闭阀门、制动设备等,从而实现对设备的安全控制<sup>[1]</sup>。在电力系统中,当发生短路故障时,控制器发出指令,执行器迅速动作,使断路器跳闸,切断故障电路,保护电力设备和人员安全。

## 2 安全联锁装置可靠性分析

### 2.1 可靠性分析方法概述

可靠性分析是评估安全联锁装置在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力的过程。目前,常用的可靠性分析方法包括故障树分析(FTA)、失效模式与影响分析(FMEA)、可靠性框图分析(RBD)、马尔可夫模型分析等。(1)故障树分析(FTA)是一种自上而下的演绎式失效分析方法,它从系统不希望发生的故障事件(顶事件)出发,通过逐层分析导致顶事件发生的直接和间接原因,构建故障树模型。通过对故障树的定性和定量分析,可以找出系统的薄弱环节,评估系统的可靠性水平。例如,在分析化工装置安全联锁系统故障时,将“安全联锁系统失效”作为顶事件,逐步分析传感器故障、控制器故障、执行器故障等中间事件和底事件,从而确定导致系统失效的关键因素。(2)失效模式与影响分析(FMEA)是一种自下而上的分析方法,它通过识别系统中各个组成部分的潜在失效模式,分析每种失效模式对系统功能的影响程度,并评估其发生的可能性和检测难度。根据分析结果,对失效模式进行风险排序,以便采取相应的改进措施。在铁路信号联锁设备的FMEA分析中,会识别出信号灯故障、轨道电路故障等失效模式,并分析这些失效模式对列车运行安全的影响。(3)可靠性框图分析(RBD)通过图形化的方式展示系统中各组件之间的可靠性关系,将系统分解为串联、并联、

表决等基本结构,从而计算系统的可靠性指标。马尔可夫模型分析则适用于描述系统状态随时间变化的过程,通过建立状态转移矩阵,分析系统在不同状态下的可靠性和可用性。

### 2.2 安全联锁装置可靠性模型建立

建立安全联锁装置可靠性模型需要综合考虑装置的组成结构、工作原理和运行环境等因素。以典型的电气安全联锁装置为例,其主要由传感器、控制器和执行器三个部分组成,且这三个部分为串联关系,即只要其中一个部分发生故障,整个安全联锁装置就会失效<sup>[2]</sup>。基于此,可建立串联系统的可靠性模型。设传感器的可靠度为 $R_1(t)$ ,控制器的可靠度为 $R_2(t)$ ,执行器的可靠度为 $R_3(t)$ ,则整个安全联锁装置的可靠度 $R(t)$ 为: $R(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times R_3(t)$ 。

在实际应用中,各组件的可靠度可通过以下几种方式确定:一是根据组件的生产厂家提供的可靠性数据,如平均无故障时间(MTBF)等;二是通过对组件进行大量的试验和统计分析,获取其失效数据,进而计算可靠度;三是参考行业标准和经验数据。同时,还需考虑环境因素对组件可靠度的影响,如高温、潮湿、振动等恶劣环境会加速组件的老化和失效,需对可靠度模型进行相应修正。

### 2.3 可靠性分析实施与结果解读

在进行安全联锁装置可靠性分析实施时,首先要明确分析的目标和范围,确定需要分析的安全联锁装置及其关键功能。然后,收集相关的数据资料,包括装置的设计图纸、技术规格书、运行维护记录、故障数据等。以某化工企业的反应釜安全联锁装置为例,在收集数据后,运用故障树分析方法构建故障树模型。将“反应釜安全联锁装置失效”设定为顶事件,分析发现传感器故障、控制器故障和执行器故障是导致顶事件发生的主要中间事件。进一步分析,传感器故障可能由传感器老化、接线松动等原因引起;控制器故障可能与程序错误、硬件损坏有关;执行器故障则可能是由于机械磨损、电气故障导致。

通过对故障树的定性分析,确定了导致安全联锁装置失效的最小割集,即系统发生故障的最基本组合。定量分析则计算出了顶事件发生的概率以及各底事件的重要度。结果显示,传感器老化导致的传感器故障对顶事件发生概率的影响最大,其重要度最高。对可靠性分析结果的解读表明,该反应釜安全联锁装置的可靠性主要受传感器老化的影响。在后续的维护和改进工作中,应重点关注传感器的使用寿命,定期对传感器进行检测和

更换,以提高安全联锁装置的整体可靠性。

## 3 故障预警系统设计与实现

### 3.1 故障预警系统需求分析

故障预警系统的需求分析是设计和实现系统的基础,从功能需求来看,系统需要具备实时监测安全联锁装置运行状态的功能,能够准确采集装置的各项运行参数,如温度、压力、电流、电压等,并对这些参数进行实时分析和处理。当参数出现异常变化时,系统应及时发出预警信号,提醒操作人员采取相应措施。在性能需求方面,系统需要具备高实时性,能够在短时间内对大量的监测数据进行处理和分析,确保预警信息的及时性,系统应具有高准确性,减少误报和漏报的情况发生,系统还应具备良好的扩展性,能够适应安全联锁装置的升级和改造,以及监测参数的增加或调整。从用户需求角度,操作人员希望系统界面简洁直观,易于操作和理解,能够快速获取安全联锁装置的运行状态和预警信息。管理人员则更关注系统的数据分析和报表生成功能,以便对安全联锁装置的运行情况进行全面评估和管理决策<sup>[3]</sup>。

### 3.2 故障预警系统设计

基于需求分析,故障预警系统采用分层架构设计,包括数据采集层、数据处理层、预警决策层和用户界面层。数据采集层负责从安全联锁装置的传感器和相关设备中采集运行数据,通过各种通信接口,如RS-485、以太网等,将数据传输至数据处理层。数据处理层对接收到的数据进行预处理,包括数据清洗、滤波、归一化等操作,去除噪声和异常数据,提高数据质量。然后,运用数据挖掘和机器学习算法对处理后的数据进行特征提取和分析,挖掘数据中隐藏的信息和规律。预警决策层根据数据处理层的分析结果,结合预先设定的预警规则和阈值,判断安全联锁装置是否存在故障隐患。当检测到异常情况时,按照预警等级发出相应的预警信号,并将预警信息存储到数据库中。用户界面层为操作人员和管理人员提供友好的交互界面,以图表、曲线等直观的方式展示安全联锁装置的运行状态、历史数据和预警信息,方便用户进行查询、分析和操作。采用数据加密、用户认证、访问控制等安全措施,保障系统数据的安全。通过冗余设计、负载均衡等技术,提高系统的稳定性和可靠性,确保系统在各种情况下都能正常运行。

### 3.3 故障预警系统实现

在故障预警系统实现阶段,数据采集模块采用嵌入式系统开发技术,选用合适的微控制器和通信芯片,实现与安全联锁装置传感器的连接和数据采集功能。例如,使

用STM32微控制器作为核心处理器,搭配RS-485通信芯片,实现对多个传感器数据的实时采集和传输。数据处理模块利用Python语言和相关的数据库,如NumPy、Pandas等,对采集到的数据进行预处理和分析。采用机器学习算法,如支持向量机(SVM)、随机森林等,构建故障诊断模型,对安全联锁装置的运行状态进行预测和诊断;预警决策模块基于Java语言开发,利用SpringBoot框架搭建系统后台,实现预警规则的配置、预警信号的生成和发送等功能。通过与短信网关、邮件服务器等集成,实现多种方式的预警通知,如短信预警、邮件预警等;用户界面层采用HTML5、CSS3和JavaScript技术开发,结合Vue.js前端框架,构建响应式的用户界面<sup>[4]</sup>。通过Echarts图表库实现数据的可视化展示,为用户提供直观、便捷的操作体验;在系统实现过程中,对各个模块进行了严格的测试,包括功能测试、性能测试、安全测试等。通过测试,不断优化系统性能,解决发现的问题,确保故障预警系统能够稳定、可靠地运行。

#### 4 安全联锁装置可靠性提升与故障预警系统优化策略

##### 4.1 可靠性提升策略

在设备选型与采购环节,应优先选择质量可靠、性能稳定、经过市场验证的产品和组件。对供应商进行严格的评估和筛选,确保其具备良好的生产工艺、质量控制体系和售后服务能力。在日常维护管理方面,制定科学合理的维护计划,定期对安全联锁装置进行检查、保养和维修。建立完善的设备维护档案,记录设备的运行情况、维护内容和故障处理情况,为设备的维护和管理提供依据。例如,定期组织维护人员参加安全联锁装置的原理、操作和维护培训课程,邀请专家进行现场指导和技术交流。引入新技术、新材料和新工艺,对现有安全联锁装置进行升级改造。同时,加强对安全联锁装置的可靠性研究,不断优化设计方案,提高装置的整体性能。

##### 4.2 故障预警系统优化建议

对于故障预警系统,可从以下几个方面进行优化。采用新型传感器技术,如无线传感器、智能传感器等,实现对安全联锁装置运行状态的更精准监测。同时,优化数据传输网络,提高数据传输的稳定性和速度,减少数据丢失和延迟。在数据分析与处理环节,不断改进数据挖掘和机器学习算法,提高故障诊断和预测的准确性。结合实际应用场景,对算法进行优化和调整,使其更适合安全联锁装置的故障预警需求。加强对历史数据的分析和利用,建立更完善的故障模式库和预警规则库,提高系统的智能化水平<sup>[5]</sup>。

#### 结束语

综上所述,安全联锁装置的可靠性和故障预警系统的有效性对于工业生产安全至关重要。通过深入分析可靠性及优化预警系统,可以更有效地预防和控制安全事故的发生。未来,随着技术的不断进步,应持续关注安全联锁装置的新技术、新材料和新工艺,不断完善故障预警系统,为工业生产提供更加安全、可靠的技术保障。

#### 参考文献

- [1]周沁乔,郑伟,谢云辉.安全联锁装置监控系统研究[J].装备制造技术,2023(4):61-65,82.DOI:10.3969/j.issn.1672-545X.2023.04.013.
- [2]王军.快开门式压力容器联锁保护装置的功能分析与检验[J].中国设备工程,2022,(5).DOI:10.3969/j.issn.1671-0711.2022.05.085.
- [3]云瀚.浅谈RTO装置安全联锁方案[J].中国仪器仪表,2024(9):47-50.DOI:10.3969/j.issn.1005-2852.2024.09.007.
- [4]袁东升.化工机械设备故障诊断与预测方法[J].清洗世界,2024,40(12):193-195.
- [5]钱红东.新时期化工机械设备安全特性及故障诊断技术研究[J].现代制造技术与装备,2024,60(07):176-178. DOI:10.16107/j.cnki.mmte.2024.0440.