

石油化工安全仪表系统的设计与可靠性

莎 莎

内蒙古自治区产品质量检验研究院 内蒙古 呼和浩特 010070

摘 要: 石油化工行业生产环境复杂且危险,安全仪表系统对保障其安全生产至关重要。本文围绕石油化工安全仪表系统的设计与可靠性展开深入探讨,先是明晰了安全仪表系统的定义、功能、相关标准规范及构成要素,接着详细阐述其设计要点,涵盖安全完整性等级确定、系统架构、部件设计与逻辑控制策略等方面。同时分析了可靠性相关内容,包括指标、影响因素及提升措施。旨在为优化石油化工安全仪表系统,提升行业安全生产水平提供参考。

关键词: 石油化工;安全仪表系统;设计;可靠性

引言:石油化工生产常涉及高温、高压、易燃易爆及有毒有害物质,安全事故一旦发生,后果不堪设想。在此背景下,安全仪表系统作为关键防线,能有效监测、控制并预防事故,保障生产的平稳安全进行。它依据严格标准规范构建,由多个重要要素组成,其合理设计及可靠运行直接关系到整个石油化工生产流程的安全性。因此,深入探究石油化工安全仪表系统的设计与可靠性意义重大。

1 石油化工安全仪表系统

1.1 安全仪表系统的定义与功能

安全仪表系统(SIS)是一种专门用于保障工业过程安全的自动化系统。它独立于基本过程控制系统,当生产过程出现危险状况时,能自动执行预定的安全功能,使过程处于安全状态。其主要功能包括对工艺参数的实时监测,如压力、温度、液位等;在异常情况发生时迅速发出警报,提醒操作人员;并能及时采取如紧急停车、切断物料、放空等联锁动作,防止危险的进一步扩大,有效降低事故发生的概率和严重程度,保障人员、设备及环境的安全。

1.2 相关标准与规范

在石油化工安全仪表系统领域,存在一系列国际和国内广泛遵循的标准与规范。国际上,IEC 61508是功能安全的基础标准,为电气/电子/可编程电子安全相关系统的整个生命周期提供了全面指导。IEC 61511则聚焦于过程工业领域安全仪表系统的应用,详细规定了从设计、安装、调试到维护、停用等各阶段的要求。国内也有相应的标准,如GB/T 20438等同采用IEC 61508,GB/T 21109等同采用IEC 61511,这些标准规范为石油化工安全仪表系统的设计、评估和管理提供了统一的技术准则,确保系统的可靠性、安全性和合规性,促进了行业的规范化发展^[1]。

1.3 安全仪表系统的构成要素

石油化工安全仪表系统主要由传感器、逻辑控制器和执行器三个核心构成要素组成。传感器负责采集工艺过程中的各种物理量和化学量信息,如压力传感器、温度传感器、液位传感器等,它们需具备高精度、高可靠性和快速响应特性,以准确反映生产过程的实时状态。逻辑控制器是系统的“大脑”,常见的有可编程逻辑控制器(PLC)、集散控制系统(DCS)中的安全模块以及专门的安全仪表控制器(SIS控制器)等,它根据预设的逻辑程序对传感器输入的信号进行处理和判断。执行器则依据逻辑控制器的指令执行相应动作,如电磁阀控制流体的通断、调节阀调节流量等,其性能直接影响到安全功能的有效实现,必须保证动作的准确性和及时性,三个要素相互协作,共同保障安全仪表系统的正常运行。

2 石油化工安全仪表系统的设计

2.1 安全完整性等级确定

安全完整性等级(SIL)确定是石油化工安全仪表系统设计的关键环节。它基于对工艺过程风险的全面评估,旨在明确系统所需具备的安全功能及其可靠性程度。确定SIL等级通常采用如危险与可操作性分析(HAZOP)结合保护层分析(LOPA)的方法。首先,通过HAZOP识别工艺过程中的各种潜在危险场景,分析其可能导致的后果严重程度、发生频率等因素。然后,LOPA进一步量化已有保护层的有效性,确定剩余风险。根据剩余风险的大小,对照相关标准确定对应的SIL等级,一般分为SIL1-SIL4,等级越高要求系统的可靠性越高。例如,对于可能导致重大人员伤亡和环境污染的高风险工艺环节,可能需要达到SIL3或SIL4等级。合理确定SIL等级不仅能确保系统有效防范风险,还能避免过度设计造成的资源浪费,使安全仪表系统在满足安全要求的同时,兼顾经济性和可行性,为后续系统的详细设计

提供明确的目标和依据^[2]。

2.2 系统构架设计

系统构架设计直接影响石油化工安全仪表系统的可靠性和性能。在设计时,需考虑冗余配置以提高容错能力。常见的冗余方式有1oo2(一选二)、2oo3(二选三)等,例如在传感器或执行器的配置上采用冗余,当一个元件出现故障时,冗余元件仍能保证系统正常运行。网络拓扑结构方面,总线型结构布线简单、成本较低,但存在单点故障风险;星型结构则可靠性更高,故障隔离性好,但布线相对复杂。要根据实际需求权衡选择。与基本过程控制系统(BPCS)的集成也至关重要,需设置有效的隔离措施,防止两者相互干扰。例如采用信号隔离器、网关等设备,确保安全仪表系统在独立运行的同时,能与BPCS进行必要的交互。此外,系统构架还应考虑可扩展性,以便在工艺改进或升级时能够方便地添加或调整功能模块,使系统能够适应石油化工生产过程的动态变化,长期稳定地保障生产安全。

2.3 传感器与执行器设计

传感器与执行器在石油化工安全仪表系统中起着感知与执行的关键作用。传感器设计时,首先要依据工艺参数需求确定合适的类型,如测量压力可选用压力传感器,测量液位可选用液位传感器等。其量程需覆盖工艺过程的正常运行范围及可能出现的异常范围,精度要满足安全控制要求,例如对于高精度压力控制的工艺,传感器精度应达到较高标准。响应时间要迅速,以便及时捕捉工艺参数的变化,要考虑传感器的安装位置,确保能准确采集到代表性数据且不易受干扰或损坏。行器方面,根据安全动作需求确定类型,如电磁阀用于快速切断流体,调节阀用于精确控制流量等。执行器的动作速度要满足紧急情况下的快速响应要求,推力或扭矩要足以驱动相应的设备。例如在大型阀门控制中,执行器需具备足够大的扭矩。密封性能要好,防止介质泄漏引发安全事故。此外,传感器与执行器都应具备故障诊断与自检测功能,能够及时发现自身故障并向系统报警,以便及时维修或更换,保障系统的可靠性^[3]。

2.4 逻辑控制策略设计

逻辑控制策略设计是石油化工安全仪表系统实现安全功能的核心。常见的逻辑控制策略包括紧急停车逻辑、物料切断逻辑、放空逻辑等。以紧急停车逻辑为例,当系统监测到关键工艺参数超出安全阈值,如反应器温度过高、压力过大等,逻辑控制器应立即触发一系列动作,如停止进料泵、关闭加热或冷却介质阀门、启动紧急冷却系统等,且这些动作要有严格的顺序和时间

要求,确保能快速有效地将工艺过程带入安全状态。在逻辑编程方面,要遵循规范和最佳实践,采用清晰简洁的逻辑结构,避免复杂嵌套导致的逻辑混乱和难以维护。例如采用模块化编程,将不同功能的逻辑分别编写成独立模块,便于调试和修改。逻辑验证与测试是确保逻辑控制策略正确的重要手段,可采用仿真测试工具模拟各种工艺场景,检查逻辑的正确性和完整性,在现场调试阶段,还要进行实际工况测试,进一步验证逻辑的有效性和可靠性,确保在任何情况下都能准确无误地执行安全功能,保障石油化工生产过程的安全稳定运行。

3 石油化工安全仪表系统的可靠性分析

3.1 可靠性指标与评估方法

石油化工安全仪表系统的可靠性可通过一系列指标来衡量,常见的有平均无故障时间(MTTF)、平均修复时间(MTTR)和可用性(A)等。MTTF表示系统在正常运行状态下,相邻两次故障之间的平均时间间隔,MTTF越长,系统在运行期间出现故障的频率越低,反映出系统的固有可靠性较高。例如,高质量的传感器和逻辑控制器若能在恶劣的石油化工环境下长时间稳定运行,其MTTF就会相对较长。MTTR则是指系统出现故障后,从故障发生到修复完毕恢复正常运行所需的平均时间,这一指标与系统的可维护性密切相关,快速的维修响应和高效的维修手段能显著缩短MTTR。可用性A是衡量系统在任意时刻可正常使用的概率,其计算公式为 $A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR}$,它综合反映了系统的可靠性和可维护性,是评估安全仪表系统能否持续有效保障生产安全的关键指标。评估石油化工安全仪表系统可靠性的方法主要有故障树分析(FTA)和失效模式与影响分析(FMEA)等。FTA是一种自上而下的演绎分析方法,它以系统不希望发生的故障事件作为顶事件,通过逻辑门逐步分析导致顶事件发生的各种可能的故障组合,即底事件,构建出故障树图形。例如,以安全仪表系统的误停车为顶事件,分析可能是由于传感器故障、逻辑控制器错误动作、执行器失效等底事件及其相互组合关系,从而确定系统的薄弱环节和关键故障路径,为采取针对性的改进措施提供依据^[4]。

3.2 影响系统可靠性的因素

硬件故障是影响石油化工安全仪表系统可靠性的重要因素之一。在石油化工恶劣的生产环境中,电子元件易受高温、高压、腐蚀、电磁干扰等影响,导致老化、损坏或性能下降。例如,长时间处于高温环境的电路板可能会出现焊点熔化、元件参数漂移等问题;强电磁干扰可能使传感器信号失真或逻辑控制器误动作。软件故

障同样不容忽视,软件编程错误、操作系统漏洞、病毒感染等都可能导致系统故障。如在逻辑控制程序中,若存在逻辑漏洞或算法错误,可能在特定工艺条件下触发错误的联锁动作;而病毒感染可能破坏系统软件的正常运行,导致数据丢失或系统瘫痪。环境因素对系统可靠性也有显著影响。石油化工生产现场的温度、湿度、振动、粉尘等环境条件复杂多变。高温可能加速电子元件老化,湿度大可能导致电路短路,振动可能使仪表连接松动,粉尘可能堵塞传感器采样口或影响散热,这些都增加了系统故障的风险。

3.3 提高系统可靠性的措施

采用硬件冗余与容错技术是提高石油化工安全仪表系统可靠性的有效手段。例如热备份冗余方式,主从设备同时运行,当主设备出现故障时,从设备能无缝切换接管工作,确保系统不间断运行;三模冗余则通过三个相同的模块同时处理数据,采用多数表决机制,只要有两个及以上模块输出一致即为有效输出,可有效避免单模块故障导致的错误输出。在软件方面,选择成熟可靠的软件平台,其经过大量实践验证,漏洞相对较少;在软件开发过程中,进行严格的软件测试,包括单元测试、集成测试、系统测试等,采用白盒测试和黑盒测试相结合的方法,全面检测软件的功能正确性和稳定性;设置软件看门狗,当软件运行出现异常,如陷入死循环或跑飞时,看门狗能及时复位系统,使其恢复正常运行。针对环境因素,采取环境防护措施。对于控制室,安装空调系统保持适宜的温度和湿度,设置空气净化装置减少粉尘;仪表防护箱采用密封、隔热、抗震设计,为内部仪表提供良好的小环境;电缆敷设时选用屏蔽电缆,减少电磁干扰影响,同时对电缆进行防腐、防水、防机械损伤处理,如穿管保护、电缆桥架加盖板等。加

强人员培训与管理同样重要,对设计人员进行专业技能培训和安全规范教育,使其深入理解石油化工工艺和安全仪表系统设计的要求,提高设计质量;对安装调试人员进行严格的操作规程培训,考核合格后方可上岗;对维护保养人员定期进行技能提升培训,使其熟悉系统常见故障及处理方法;对操作人员进行安全操作培训,制定完善的操作规程并严格监督执行,减少人为误操作,通过全方位的人员管理提升系统可靠性^[5]。

结束语

石油化工安全仪表系统对于保障石油化工生产过程的安全稳定运行起着不可替代的关键作用。通过深入研究其设计与可靠性,我们明确了从安全完整性等级确定到系统各构成要素设计的要点,也全面剖析了影响可靠性的各类因素及相应提升措施。合理的设计能有效预防事故发生,而高可靠性则确保系统在关键时刻发挥作用。随着石油化工行业的持续发展,安全仪表系统也需不断优化与创新,以适应日益复杂的生产环境和严格的安全要求。

参考文献

- [1]潘颖,李忠军.石油化工安全仪表系统的设计与可靠性[J].仪器仪表用户,2019,26(06):115-116
- [2]李胜利,吴强,石油化工安全仪表系统的设计与可靠性[J].石油化工自动化,2019,55(04):49-52.
- [3]高同庆.石油化工安全仪表系统的设计与可靠性[J].科技经济导刊,2020,28(23):64-65
- [4]张晓伟.石油化工安全仪表系统的设计与可靠性[J].化工管理,2020(23):155-156.
- [5]王彦棋.石油化工安全仪表系统的设计与可靠性[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(13):107-108.