

Application Analysis of Safety Instrumentation System (SIS) in Chlor-Alkali Production

Shengdong Ji

Inner Mongolia Yidong Group Dongxing Chemical Co., Ltd., Ulanqab, Inner Mongolia, 012314, China

Abstract

In the current national drive to enhance efficiency, safety, and intelligence in the chemical industry, the application of Safety Instrumented System (SIS) in chlor-alkali production processes plays a crucial role in ensuring safe and efficient equipment operation. This paper, based on China's chlor-alkali production practices, first provides an overview of SIS and its application value. It then explores the system's practical implementation through four aspects: design, process interlocks, production operations, and maintenance. These efforts not only effectively improve production safety standards but also help chemical enterprises achieve optimal safety and operational efficiency.

Keywords

chemical industry; Safety Instrumentation System (SIS); chlor-alkali production; application; value; path

安全仪表系统 (SIS) 在氯碱生产中的应用探析

冀生东

内蒙古伊东集团东兴化工有限责任公司, 中国·内蒙古 乌兰察布 012314

摘要

在如今国家大力发展化工行业高效化、安全化与智能化的道路背景下, 安全仪表系统 (SIS) 在氯碱生产过程中的应用对于确保设备安全高效运行发挥着十分重要的作用。有鉴于此, 文章由我国化工氯碱生产实际着手, 首先就安全仪表系统 (SIS) 概述及其应用价值展开论述, 随后从设计、工艺联锁、生产运行以及维护四个方面探讨该系统在氯碱生产实际中应用, 从而在切实提升氯碱生产安全保障水平的同时促使化工企业实现良好安全与经营效益。

关键词

化工; 安全仪表系统 (SIS); 氯碱生产; 应用; 价值; 路径

1 引言

安全仪表系统 (SIS) 又称为安全联锁系统。主要为控制系统中报警和联锁部分, 对控制系统检测的结果实施报警动作或停机控制, 是企业自动控制的重要组成部分。安全仪表系统应用在化工氯碱行业中通常独立于过程控制系统, 生产正常时处于休眠或静止状态, 一旦生产装置或设施出现可能导致安全事故的情况时, 能够瞬间准确动作, 使生产过程安全停止运行或自动导入预定的安全状态, 从而避免危险事件发生或最大限度地降低其影响。有鉴于此, 下文将围绕于安全仪表系统 (SIS) 在氯碱生产中的应用展开探析, 以供参考。

2 安全仪表系统 (SIS) 概述

在我国化工装备与过程控制领域, 安全仪表系统 (Safety

Instrumented System, 简称 SIS) 是指用于实施一个或多个安全仪表功能的一种仪表系统, 该系统通常由检测元件 (传感器)、逻辑解算器 (或安全控制器) 以及执行元件 (如切断阀、启动缓释设备) 三大部分组成。依据国家相关标准、如 GB/T41261-2022 中对 E/E/PE 系统的定义, SIS 的设计需考虑其安全完整性等级 (SIL, Safety Integrity Level) 要求^[1]。在我国的氯碱装备及重大危险源监管要求中, 凡涉及有毒、有害或易燃可爆介质 (如液氯、氢气、氯气) 储运或反应的关键工艺节点, 都须配备独立的 SIS 系统以补充普通过程控制系统 (DCS) 所不能覆盖的风险防护功能。SIS 不仅承担事故预防功能, 而且与装置的风险分析、危害识别、LOPA (危险与可操作性分析) 结果挂钩, 其生命周期设计包括需求定义、设计、实施、验证、运行、维护直至退役。在氯碱生产中, 由于其高压电解、剧毒气体 (Cl₂) 和可燃气体 (H₂) 并存, SIS 系统在保证过程装置安全方面具有极其重要的地位。

【作者简介】冀生东 (1994-), 男, 中国内蒙古乌兰察布人, 工程师, 从事化工自动化仪表技术研究。

3 安全仪表系统 (SIS) 在氯碱生产中的应用价值

在我国氯碱生产行业,典型工艺包括盐水精制、离子膜电解、氯气压缩/液化、液氯储运及烧碱中间液处理等环节。由于这些环节常涉及强腐蚀、剧毒、易燃及高压条件,工艺风险水平高。在氯碱装置中引入 SIS 可显著增强重大危险源管理能力,从而实现以下价值:首先, SIS 能够对关键过程参数(如进电解槽盐水流量、碱液流量,氯气总管压力、氢气总管压力、液氯储罐液位等)实施自动实时监测与安全联锁操作,可在偏差演化至失控前触发切断或停机动作,有效阻断事故蔓延链条。其次,选择并验证了 SIL 等级后,安全仪表系统促使氯碱生产装置从“过程控制-保护层-安全联锁”升级到“过程控制+专用保护层(SIS)”的安全防护路径,这样一来有助于增强装置本质安全水平和冗余度。另外,从业务合规角度看,国家安全生产监督管理总局出台相关规定中明确指出,针对剧毒气体(如液氯)、重点危险源等生产贮存装置必须设置独立的安全仪表系统。另外,从运营经济性/事故成本考量的角度分析,安全仪表系统由于能够减少非计划停工、增加氯碱生长装置可用性和延长设备寿命,这使其拥有较强的经济优势。目前我国部分氯碱生产项目的搬迁新建装置已将安全仪表系统设计纳入其中,并取得了安全管理和生产效率双丰收。由此可见,针对我国化工氯碱生产领域中,安全仪表系统既是安全技术要求,也是增强装置竞争优势、保证化工企业可持续发展的重要基础。

4 安全仪表系统 (SIS) 在氯碱生产中的应用路径

4.1 危险识别与 SIL 定级的前期准备

针对氯碱生产中安全仪表系统应用首要环节,应将危险识别与 SIL 定级前期准备工作作为一项重点工作来进行分析和管理工作,具体为:通过针对氯碱生产中诸如离子膜电解槽氢气出口、液氯储罐进出口气管道以及液相管道或是氯气压缩机套管等关键工艺环节开展 HAZOP 分析,旨在发现典型失控链条(比如“氢气逸散且通风失效致爆炸”或“液氯储罐满罐并密封失效导致氯气外泄”),随后再借助 LOPA 分析法对这些失控事件分别按照其相关的失效模式、暴露频度以及暴露风险点对应的各种安全防护措施防护能力进行具体判断^[2]。比如,液氯罐储存量大于 5 吨的,根据重大危险源判定依据在风险评估中须纳入其相关节点,同时构建起以事故场景为基础的风险数据库,接着计算所有事故场景的风险度,涉及发生的可能性、泄漏量、扩散的影响、防护层的有效性等方面,以此确认安全仪表系统必须履行的最关键保护功能。其次,结合化工氯碱生产相关规范以及行业标准建立 SIL 定级流程,随后针对各安全仪表功能(SIF)基于风险降低需求确定目标 SIL 等级。在氯碱实际生产进程里存在高压氢气或是大量液氯时,通常保护层冗余度不够就需要

设置为 SIL3,而如果可以采用多层独立保护措施覆盖风险,此时一般设置为 SIL2。之后也应当建立起相应的功能安全管理系统并完善安全仪表系统生命周期各环节的相关制度,同时针对设计、验证、运行、维护等环节应形成相应可溯的文件记录。另外,还应建立好的技术档案,如 SRS 安全需求规范、验证与确认计划、测试记录和维护方案等,且保证所有的安全相关文件、控制逻辑的一致性。最后,结合定级结果针对硬件环境确定适宜冗余结构,例如 2oo3 逻辑,需要使用表决结构及冗余电源/通信链路、周期性执行自诊断功能和故障切换功能以达到可靠性、可用性的要求。

4.2 系统设计与冗余结构布局

在氯碱生产装置中,基于前期 SIL 定级结果,安全仪表系统(SIS)的设计应在检测元件、逻辑解算器与执行机构三个层面实现系统冗余与故障安全。检测环节中,通常采用“三取二”(2oo3)或“两取二”(2oo2)配置,布置三台或两台独立传感器,通过任意两台信号一致触发联锁,以增强容错能力与防误动作能力。逻辑解算器部分宜采用双模块热备用冗余架构,主、备控制器间实现实时同步与自动切换,保证任一模块故障时系统仍具有完整安全功能。执行机构如紧急切断阀与尾气排放阀组应设置双阀组并联结构,并配备阀位反馈信号及自检回路,使切断与放散动作在执行元件部分出现单点故障时仍能维持安全功能。SIS 与 DCS、GDS 及 ESD 等系统在硬件上必须物理隔离,防止信号干扰及共因故障扩散,通信仅通过安全认证的单向数据通道实现;电源应采用双路独立供电并配置 UPS 和备用电源,确保主电源失效时系统可独立运行。系统冗余设计中应嵌入自诊断与失效检测机制,检测元件应具备漂移自校准功能,逻辑解算器应可记录并识别模块故障,执行机构应具备阀位反馈与循环检测逻辑。联锁逻辑应结合工艺危害分析精确配置,例如液氯储罐液位过高时,安全仪表系统应自动关闭进料紧急切断阀并联动启动尾气排放系统,以切断危险介质通道。系统布局应综合现场管道布置、储罐区相对位置与通风条件,确保检测器覆盖充分、冗余层级合理、动作路径短且响应时间满足安全仪表功能要求,从而实现全流程的冗余布局与故障安全设计^[3]。

4.3 验证、施工与投运阶段控制

在氯碱生产中,安全仪表系统(SIS)在施工、调试与投运阶段的控制应严格依据 SIL 定级要求执行。施工阶段应编制完整的程序说明书、系统说明书与维护说明书,确保各安全仪表功能回路设计可追溯。设备选型需符合中国防爆及防腐标准,针对氯气与液氯的强腐蚀特性,应优先使用钛合金、哈氏合金、聚四氟乙烯内衬或喷涂结构,并严格执行接地、防爆隔离、抗电磁干扰及电缆屏蔽布线规范。执行机构应配置防氯腐蚀保护层,阀门选用耐氯型材质并具备快速切断性能。安装阶段应实施 FAT(工厂验收测试)与 SAT(现场验收测试)。FAT 主要验证逻辑程序、接口定义及 SIF 响

应可靠性,通过仿真测试检验传感器—逻辑求解器—执行机构链路的动作时序及误动作防护逻辑;而针对 SAT 环节则是现场模拟氯碱生产中如氯气泄漏和氢气倒吸等关键事故场景,检测安全仪表功能触发的动作时间、切断阀的切断次数以及诊断报警和手动旁路逻辑是否满足安全需求规范的要求。同时,在调试期间还要将安全仪表系统各个通道的动作时延和设计值对比并记录在案后编制验证报告^[4]。此外,针对安全仪表系统投运初期运行和故障日志管理机制,对每一次安全仪表功能动作、误报警、旁路以及维护都详细记录并及时进行 FMEA 分析,然后根据检测阈值、逻辑参数、诊断覆盖率的变化予以修正。如果出现执行机构延误或是传感器漂移等问题要及时采取变更控制(MOC)流程,以实现元件更换或是控制逻辑优化。最后,安全仪表系统运行期间要落实好定期的校验和证明试验,同时结合氯碱生产环境中腐蚀性严重的特点可相应缩短验证周期,并更新相关维护文件。通过保证整个安全仪表系统从设计、施工再到投运全程闭环控制促使其运行性能得以一直满足 SIL 的设计标准。

4.4 运行维护与生命周期管理

在氯碱生产中对安全仪表系统的运行维护和生命周期管理要按照相关规范与标准的要求执行,从而保证系统能够持续符合设计的 SIL 等级要求,具体为:首先,企业须实施周期性维护保养,即通常按周期(一般为 6~12 个月)开展相应维保,比如校验检测器(包括氯气浓度检测仪、液位传感器等)、验证逻辑解算器程序完整性的内容(包含安全逻辑、I/O 通道、投切记录)以及检查动作执行元件(比如阀门)的动作性、通过气密检测确认气密性;校验检测装置运行中电源、UPS 是否正常(检查是否有漂移值产生、切换可靠性等),并建立完善的定期预防性维护管理体系。其次,建立系统化安全仪表系统故障诊断及失效数据管理平台,将自诊断报警、信号漂移、事件日志等相关信息统一接入平台,分析各点 MTTF、MTBF 等指标,判断安全仪表系统中元器件老化程度。如有液氯储罐回路液位传感器漂移过大或频繁误动的现象,应更换相应模块并重评 SIL 等级。此外,若氯碱生产中装置工艺、设备结构、操作规程发生变化后应同步开展安全仪表系统的 SIL 复核、修改评估工作,通常是根

新的工艺危险度、回路响应时间以及回路冗余配置等情况复核系统能否满足原 SIL 等级要求,比如有回路安全回路失效概率上升或回路逻辑与设计偏差过大等情况必须对安全仪表系统进行升级或通道重构,之后要开展独立的功能安全审核和再认证工作,并定期由签署合作协议且具备相应资质的第三方机构对安全仪表系统生命周期管理文件、维修保养记录、变更控制以及现场验证结果开展全面审核,旨在保证安全仪表系统完整性及安全性达到要求。最后,应建立持续培训与能力保持体系,对操作及维护人员实施 SIS 原理、故障模式分析、诊断策略及失效响应流程的专业化培训,确保其具备应对信号漂移、通道异常及逻辑误触发的实操能力,使系统运行始终处于受控、安全、可验证状态^[5]。

5 结语

综上所述,安全仪表系统(SIS)作为化工氯碱生产环节里重要的安全保护设备,其在氯碱行业转型到绿色、安全及智能化方向发挥着积极作用。为此,上文通过结合相关文献查阅与工作实践基础上针对安全仪表系统(SIS)在氯碱生产中应用探讨了风险识别、系统设计、工程实施及生命周期管理四项具体路径,从而给化工氯碱生产给予强有力的安全保障。今后,随着氯碱生产技术与工艺不断发展,化工企业在安全仪表系统(SIS)应用上可进一步聚焦于其与现场工艺联动、状态监测与预测维护能力的建设,如此一来促使氯碱生产安全迈上新的台阶。

参考文献

- [1] 谢楠,万阳,李阳,等.氯碱设计中安全仪表系统的应用[J].中国氯碱,2024(7):50-54.
- [2] 蓝秋萍.浅谈安全仪表系统(SIS)在化工生产中的重要性[J].中国周刊:英文版,2020(8):1.
- [3] 孟笑言、谢晓刚、肖霖澄.氯碱产品电解工艺安全仪表的选取方法[J].石化技术,2020,27(11):2.
- [4] 王万力.安全仪表系统在氯碱装置中的应用[J].中国氯碱,2023(10):38-42.
- [5] 赵安亮.化工自动化仪表在氯碱和聚氯乙烯行业的应用[J].化工管理,2022(26).