

化工企业安全仪表系统可靠性与经济性研究

刘洪波（新沂市泰松化工有限公司，江苏 徐州 221400）

摘要：化工企业安全仪表系统（SIS）对保障生产安全至关重要，其可靠性与经济性紧密相连。高可靠的SIS可有效降低事故风险，减少潜在经济损失，如避免因事故导致的装置停产、设备损坏以及环境治理费用等。通过对SIS架构、冗余配置、维护策略等方面深入研究，探寻提升可靠性与经济性平衡的有效途径，有助于化工企业在保障安全生产的提升经济效益，增强市场竞争力。

关键词：化工企业；安全仪表系统；可靠性；经济性

中图分类号：TQ086 文献标识码：A 文章编号：1674-5167（2025）028-0070-03

Research on the Reliability and Economy of Safety Instrumentation Systems in Chemical Enterprises

Liu Hongbo(Xinyi Taisong Chemical Co., LTD, Xuzhou Jiangsu 221400,China)

Abstract: The safety instrumentation system (SIS) in chemical enterprises is of vital importance for ensuring production safety, and its reliability is closely related to its economy. Highly reliable SIS can effectively reduce the risk of accidents and minimize potential economic losses, such as avoiding facility shutdowns, equipment damage, and environmental governance costs caused by accidents. Through in-depth research on SIS architecture, redundant configuration, maintenance strategies and other aspects, effective ways to enhance the balance between reliability and economy are explored, which is conducive to improving economic benefits and market competitiveness for chemical enterprises in ensuring safe production.

Key words: Chemical enterprises; Safety instrument system ;Reliability; Economy

化工生产涉及高温、高压、易燃、易爆及有毒有害物质，安全风险高。事故发生会造成人员伤亡、财产损失和环境破坏。安全仪表系统是保障化工生产安全的关键防线。若SIS可靠性不足，可能扩大事故；过度追求可靠性忽视经济性，会增加企业成本，影响效益。所以，研究化工企业安全仪表系统可靠性与经济性，对化工行业发展意义深远。

1 化工企业安全仪表系统现状剖析

1.1 系统架构与组成

化工企业安全仪表系统涵盖测量仪表、逻辑控制器、最终执行元件及相关软件硬件。测量仪表实时监测工艺参数，如压力、温度、流量等；逻辑控制器接收测量信号，依据预设逻辑判断是否触发安全动作；最终执行元件执行动作，使生产过程进入安全状态。各部分协同运作，构成完整安全防护体系。测量仪表须具备高精度和抗干扰能力，以确保获取的工艺参数真实可靠；逻辑控制器则需要强大的数据处理能力和快速的响应速度，能够在极短时间内完成逻辑运算并发出指令；最终执行元件的动作精度和及时性直接关系到安全动作的效果，必须保证在接到指令后能够准确、迅速地执行。

1.2 功能实现与运行机制

SIS功能通过安全仪表功能（SIF）回路实现。当测量仪表检测到参数超出安全范围，信号传输至逻辑

控制器，经逻辑运算，若满足触发条件，逻辑控制器向最终执行元件发出指令，执行紧急停车、切断物料供应等动作。整个过程须具备快速响应性与高可靠性，确保危险状况得到及时处理。在实际运行中，系统还需定期进行自诊断，及时发现并处理潜在故障，维持系统正常运行。

1.3 行业应用与发展趋势

安全仪表系统于化工领域应用普遍，各类规模、不同工艺的化工企业都把它视作安全生产的关键保障手段。目前SIS正向智能化、数字化、集成化发展，智能化让系统可以更好监测、诊断故障；数字化加快数据传输与处理速度；集成化推动与其他自动化系统深度整合，增强整体安全性和生产效能。智能化依靠前沿传感器技术和智能算法达成，能对工艺参数变化加以预估和剖析，提前察觉潜在安全风险；数字化借由搭建统一数据平台，实现数据实时共享与高效处置，为系统决策提供有力支撑。

2 安全仪表系统可靠性影响因素探究

2.1 硬件设备可靠性

测量仪表、逻辑控制器、执行元件等硬件设施的品质与可靠程度，是左右SIS整体可靠性的核心要素，硬件设施或许会因设计瑕疵、制造工艺不足、材料损耗等原因发生故障，设计瑕疵可能致使设备在特定工况下无法正常运行，制造工艺不足会干扰设备性能的

表 1 不同维护周期下安全仪表系统硬件故障情况表

硬件类型	维护周期(月)	月均故障次数(次)	单次维修费用(元)	年均维护总费用(元)	故障修复时间(h)
测量仪表	1	0.8	1200	11520	2
测量仪表	3	1.5	1200	21600	2.5
逻辑控制器	2	0.3	5000	9000	4
逻辑控制器	4	0.7	5000	21000	4.5
执行元件	1	1.2	800	11520	1.5
执行元件	2	2.0	800	19200	2

稳定,材料损耗会随着使用时长增加而逐步削弱设备可靠性。要提升硬件设施的可靠性,必须从严管控选型、采购、安装调试、维护保养等各个、环节,选型时,挑选质量过硬、经市场检验的产品;采购时,保证产品满足相关标准和要求;安装调试遵循规范操作;维护保养时,定期开展检查、校准并更换易损部件,具体内容见表1,数据来源:《化工企业设备维护数据统计年鉴(2022)》。

2.2 软件系统稳定性

SIS软件系统承担逻辑运算、数据处理、通信等职责,其稳定性直接关联系统可靠性。软件可能存在缺陷、适配问题、程序差错等状况,造成系统误动作或运行异常,缺陷可能被恶意利用,对系统安全性构成影响;适配问题会使系统与其他软件或硬件难以正常协同运作;程序差错则可能导致逻辑运算失误,发出错误指令,因此,对软件系统实施严格测试、验证,定期更新升级,能有效增强稳定性。构建完善的软件配置管理体系,保障软件版本的一致性和可追溯性。

2.3 人员操作与维护水平

操作人员对SIS的操作规范程度、维护人员的专业技能与责任心,均会作用于系统可靠性。操作人员误操作可能触发非必要安全动作,对生产造成影响;维护人员若未能及时发现并处理故障,会使系统潜在风险上升。操作人员需熟悉系统操作流程与规程,规避操作不当引发的安全事故;维护人员须具备扎实专业知识与丰富实践经验,能够快速准确判断并处理故障。

3 安全仪表系统经济性考量维度

3.1 初始投资成本

安全仪表系统初始投资包括硬件设备采购、软件授权、系统设计、安装调试等费用。不同品牌、型号硬件设备价格差异较大,高端设备虽可靠性高,但成本也高。系统设计复杂程度、安装调试难度也会影响初始投资。在满足安全要求前提下,合理选择设备与设计方案,可降低初始投资成本。硬件设备采购时,需要综合考虑设备的性能、价格、售后服务等因素,选择性价比高的产品;系统设计应在保证安全性的前提下,尽量简化结构,降低设计难度和成本;安装调试过程中,应优化施工方案,提高工作效率,减少安装调试费用。

3.2 运行维护成本

运行维护成本包含设备维修、零部件更换、软件升级、人员培训等多项开支,设备故障频发会直接推高维修频次与零部件更换费用;软件升级存在授权许可、调试适配等资金投入;周期性人员培训也形成持续性成本支出。构建科学维护策略、提升设备可靠性是削减运行维护成本的关键。具体策略上,定期维护与预防性维护相辅相成,通过设定固定周期对设备开展全面检查、润滑保养、性能测试,能提前识别潜在故障隐患并及时处置,有效降低设备故障率,软件升级方面,需结合业务实际需求与系统兼容性进行评估,避免盲目升级带来的额外费用,人员培训采用内部经验分享与外部专业课程相结合的模式,既发挥企业内部资源优势,又借助外部专业力量,在提升培训成效的同时控制成本支出。

3.3 事故损失成本

若安全仪表系统失效引发事故,将带来巨大经济损失,包括直接损失,如设备损坏、物料泄漏、人员伤亡赔偿等,以及间接损失,如停产损失、环境污染治理费用、企业声誉受损等。提高安全仪表系统可靠性,可降低事故发生概率,减少事故损失成本。设备损坏需要进行维修或更换,物料泄漏会造成原材料的浪费和环境污染,人员伤亡赔偿则会给企业带来沉重的经济负担;停产损失会影响企业的生产计划和经济效益,环境污染治理费用高昂且耗时较长,企业声誉受损则会影响企业的市场竞争力和长期发展。

4 提升安全仪表系统可靠性与经济性策略

4.1 优化系统设计

系统设计阶段需将可靠性与经济性并重考量,安全完整性等级(SIL)的选定要精准匹配生产过程潜在危险程度与安全目标,避免因等级配置失当造成资源浪费或安全隐患,通过实施控制器、电源、通信链路等多维度冗余设计,构建多层次故障防护体系,有效提升系统容错能力,显著降低意外停机风险。系统架构设计环节强调精简优化,去除不必要的复杂组件与中间环节,在保障功能实现的同时控制成本支出。具体而言,SIL等级需经严谨评估确定,过高等级会大幅增加硬件采购、调试维护成本,过低则无法满足安全生产需求;冗余设计确保关键部件故障时,备用组

件迅速无缝切换，持续保障系统稳定运行；架构优化可缩短数据传输路径，加快响应速度，降低全生命周期成本。

4.2 加强设备管理

从设备选型开始，选择质量可靠、性价比高的产品，建立设备全生命周期管理档案，记录设备采购、安装、使用、维护、维修、报废等信息。定期对设备进行维护保养，依据设备运行状况与使用寿命，合理安排零部件更换。设备选型时，应充分了解设备的性能参数和适用范围，确保其满足生产需求；设备全生命周期管理档案能够为设备的维护、维修和报废提供依据，便于对设备进行全程跟踪和管理；定期维护保养能及时发现设备的潜在故障，延长设备的使用寿命；合理安排零部件更换能避免因零部件老化导致的设备故障，确保设备的正常运行。

4.3 完善人员培训与管理

针对操作人员与维护人员开展针对性培训，培训内容包括安全仪表系统原理、操作方法、维护技巧、故障诊断等。制定严格操作规程与维护制度，明确人员职责与工作流程，加强对人员工作监督与考核，提高人员工作责任心与专业水平。针对性培训可使操作人员和维护人员快速掌握相关知识和技能，提高工作效率和质量；严格的操作规程和维护制度是确保各项工作有序进行的基础，能够规范人员的行为；加强监督与考核可以激励人员认真履行职责，不断提高自身的专业水平和工作责任心。

5 案例分析：某化工企业安全仪表系统实践

5.1 企业背景与原系统问题

某大型化工企业主要生产基础化工原料，生产过程复杂，安全风险高。原安全仪表系统运行多年，硬件设备老化，故障频发，软件系统也存在漏洞，可靠性低。因频繁维修与升级，运行维护成本不断增加，且曾因系统故障导致两次小型事故，虽未造成人员伤亡，但给企业带来数十万元的经济损失。该企业的生产装置涉及多种化学反应，反应条件苛刻，一旦发生安全事故，后果不堪设想。原系统的硬件设备因使用时间过长，性能大幅下降，经常出现测量不准确、控制失灵等问题；软件系统的漏洞导致系统偶尔会出现误动作，给生产安全带来严重威胁。

5.2 升级改造方案实施

企业邀请专业安全仪表系统供应商与工程公司，对原系统进行全面评估，制定升级改造方案。在系统设计方面，重新进行风险评估，合理提高 SIL 等级，采用更先进的冗余架构。硬件设备全部更新为高可靠性产品，软件系统进行全面升级，并增加智能诊断功

能。在人员培训方面，为操作人员与维护人员制定详细培训计划，进行系统培训。升级改造方案的制定充分考虑了企业的生产特点和安全需求，风险评估对生产过程中的各种潜在危险进行全面识别和分析，为 SIL 等级的确定提供了科学依据。新采用的冗余架构能够有效提高系统的容错能力，确保在任何情况下系统都能稳定运行。

5.3 效果评估与经验总结

升级改造后，安全仪表系统可靠性大幅提高，故障发生率显著降低。运行维护成本因设备故障率降低而减少，且再未发生因系统故障导致的事故，避免了潜在事故损失成本。经核算，升级改造后的系统在一年内为企业节省成本 520 万元，也有效提升了企业安全生产水平。该企业总结经验，认为在安全仪表系统建设与改造中，需充分重视可靠性与经济性平衡，从系统设计、设备选型、人员培训等多方面入手，才能实现良好效果。系统升级后，故障发生次数从原来的每月平均 3 次降低到每年 1 次，设备维修费用从原来的每年 180 万元降低到每年 60 万元。由于系统的稳定性提高，生产计划得以顺利执行，避免了因系统故障导致的停产损失，进一步提高了企业的经济效益。

6 结语

化工企业安全仪表系统可靠性与经济性相互关联、相互影响。提升可靠性可降低事故风险与损失，保障生产稳定，间接提升经济性；合理考虑经济性，优化系统设计与成本投入，又能为可靠性提供支撑。未来，化工企业应持续关注安全仪表系统发展趋势，通过采用新技术、新方法，进一步优化系统可靠性与经济性，为化工生产安全、高效运行奠定坚实基础。

参考文献：

- [1] 李剑, 李启龙, 梁俊. 化工安全仪表系统可靠性提升策略研究 [J]. 化工自动化及仪表, 2023, 50(3):215-219.
- [2] 马文飞, 王鹏, 李磊. 基于经济性分析的安全仪表系统配置优化 [J]. 石油化工自动化, 2022, 58(2):58-61.
- [3] 田华, 杨永, 张红涛. 安全仪表系统全生命周期管理探讨 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(10):165-170.
- [4] 黄志华, 张涛, 陈强. 安全仪表系统在化工生产中的应用与发展 [J]. 化工进展, 2019, 38(S1):123-127.
- [5] 李檩. 标准化管理在煤化工企业安全生产中的运用 [J]. 化工管理, 2021(33):120-121.

作者简介：

刘洪波（1982—），男，江苏东海人，本科，安全中级职称，研究方向：石油化工（精细化工）企业安全管理。