

# 石油化工罐区安全仪表系统 (SIS) 中液位高高 / 低低联锁的可靠性分析

闫艳风 (中石化 (河南) 炼油化工有限公司, 河南 洛阳 471012)

**摘要:** 石油化工罐区的液位高高 / 低低联锁属于安全仪表系统的核心防护部分, 其可靠性与罐区安全事故关联密切, 主要受到硬件适配情况、逻辑设计水平、维护管控力度等因素的限制。本文从硬件适配的优化、逻辑软件的精准配置、全生命周期的维护以及可靠性的验证等方面提出了方案, 经过优化之后, 联锁的误动作率降低到了 0.014 次 / 台 · 年, 响应时间稳定保持在 0.3s 以内, 达到了 SIL2 安全等级的要求。这既解决了当前联锁存在的关键问题, 也为行业内同类安全仪表系统的优化提供了能够实际实施的范例。

**关键词:** 石油化工罐区; 安全仪表系统; 液位联锁; 可靠性优化

中图分类号: TE687 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 035-0153-03

## Reliability Analysis of High-High/Low-Low Level Interlocks in Safety Instrumented Systems (SIS) for Petrochemical Tank Farms

Yan Yanfeng (Sinopec (Henan) Petrochemical Co., Ltd., Luoyang Henan 471012, China)

**Abstract:** The high-high/low-low level interlock in petrochemical tank farms is a core protective component of the Safety Instrumented System (SIS). Its reliability is closely related to tank farm safety incidents and is primarily constrained by factors such as hardware compatibility, logic design quality, and maintenance management. This paper proposes solutions from the perspectives of hardware optimization, precise configuration of logic software, lifecycle maintenance, and reliability verification. After optimization, the false action rate of the interlock was reduced to 0.014 times/unit · year, with the response time consistently maintained within 0.3 seconds, meeting the requirements for SIL2 safety integrity level. This not only addresses the key issues currently present in interlocks but also provides a practical implementation model for the optimization of similar safety instrumented systems in the industry.

**Keywords:** petrochemical tank farm; safety instrumented system (SIS); level interlock; reliability optimization

石油化工罐区所储存的介质大多是具有易燃、易爆以及有毒特性的物质, 一旦液位失去控制, 进而引发溢罐、抽空等事故, 就极有可能造成较为严重的人员伤亡状况以及对环境产生破坏。液位高高 / 低低联锁身为安全仪表系统里极为关键的控制部分, 担负着超液位报警、紧急切断进料等保障安全的功能, 其可靠程度直接和罐区的运行安全存在关联。依据行业统计数据显示, 在近五年石油化工罐区发生的安全事故当中, 有 42% 是和液位联锁的可靠性不够有关。本文着重围绕这一关键核心议题展开探讨, 借助系统地剖析液位联锁可靠性的各类影响要素, 进而提出具备实际可操作性的优化技术以及管控策略, 其主要目的在于增强联锁动作的精准程度与及时效能, 为罐区安全防护构建起坚实稳固的技术保障。

### 1 石油化工罐区液位联锁与安全仪表系统的关联基础

#### 1.1 液位高高 / 低低联锁的安全防护功能定位

液位高高或者低低联锁属于安全仪表系统针对罐

区液位出现异常状况的专门防护机制, 其借助对储罐液位变化开展实时监测, 触发预先设定好的安全动作, 从而规避可能出现的风险。液位高高联锁的主要作用是防止介质溢出情况的发生, 在液位达到预先设定的高限值时会马上启动如声光报警、切断进料泵、开启紧急泄压阀等动作, 以此避免易燃易爆介质出现泄漏而引发火灾爆炸事故; 液位低低联锁重点在于防止泵体出现抽空现象, 当液位下降到低限值时会自动切断出料泵, 并且触发补料提示, 对设备起到保护作用, 使其免受空转带来的损坏, 与此同时避免空气进入罐内形成具有爆炸性的混合气体。此类联锁的核心意义在于达成“预警 - 响应 - 处置”这一流程的自动化闭合循环, 降低因人为干预不及时而产生的安全风险, 属于罐区安全防护方面最为关键的最后一道防线。

#### 1.2 安全仪表系统对液位联锁的可靠性要求

安全仪表系统的功能安全标准针对液位联锁给出了清晰确切的可靠性指标, 其核心涵盖三个层面: 其一为动作精准性, 要求联锁装置仅在液位达到预先设

定的阈值时才会触发，误动作的比率必须控制在每年每台设备不超过 0.01 次，以此防止因频繁的错误停机而引发经济方面的损失；其二是响应及时性，要求从联锁装置检测到液位超出限定范围，直至完成安全动作的整个时长，不得超过 1s，从而保证在液位迅速变动的情况下，能够及时阻止风险的进一步扩散；其三是故障容错性，要求系统必须具备故障自我诊断的能力，当联锁设备的组成部件出现故障时，系统能够马上发出警报信号，并迅速切换至备用的运行模式，避免因单个故障致使联锁功能失效。除此之外，依照 IEC61511 标准，罐区液位联锁所应具备的安全完整性等级，需要达到 SIL2 或者更高的水平，从而契合高危场景在安全防护方面的相关要求。

## 2 石油化工罐区液位高高 / 低低联锁的可靠性影响因素

### 2.1 硬件选型与适配不当

联锁可靠性的首要制约因素是硬件设备在选型方面存在偏差，以及与工况适配程度不足。例如，液位传感器类型的选择若不够合理，就可能出现问题：如在高粘度介质的罐区，若是采用超声波传感器，由于介质容易附着在探头之上，就很容易造成测量出现偏差；而在压力波动较为剧烈的储罐中，使用浮筒式传感器，因为浮力不稳定就极易引发误触发的情况。此外，传感器的精度等级不达标，同样会对联锁可靠性产生影响，部分企业为了控制成本，选用了精度  $\pm 0.5\%$  的经济型传感器，然而这种传感器无法满足联锁对液位测量  $\pm 0.1\%$  的精度要求，进而导致阈值判断出现误差。另外，逻辑控制器和执行机构之间的适配性方面存在较为明显的问题，如控制器所输出的信号和执行机构能够接收的信号存在不匹配的状况，这就导致联锁动作出现了延迟现象；执行机构（如紧急切断阀等设备）响应的速度较为迟缓，从全开状态到全关状态或者反之的时间超过了 0.8s，难以达成快速进行处置的相关需求。

### 2.2 逻辑设计与软件配置缺陷

联锁逻辑设计的不合理状况以及软件参数配置的不恰当情形，会直接对动作的准确程度产生影响。逻辑表决方式的选择若存在不当之处，例如采用单一传感器直接接触联锁的方式，缺乏应对故障的容错能力，一旦传感器出现故障，就会致使联锁出现错误动作；相反，若过度执着于冗余设计，采用三取二模式，却没有对表决算法进行优化，那么很容易因为信号同步方面的偏差而引发联锁拒绝动作的情况。联锁触发条件的设置若显得过于僵化，没有充分考量工况波动这一因素，例如没有设置液位变化速率的滤波功能，当

罐区进料的流速突然发生改变时，液位出现的瞬时波动就容易触发联锁的错误动作。软件参数配置出现错误的情况也颇为常见，如延时触发时间设置得过于短暂（低于 0.2s），这就使得系统无法对虚假信号予以过滤；阈值的设定没有与储罐的实际容积以及介质特性相结合，进而造成高高 / 低低限值和实际的安全边界不相匹配。

### 2.3 维护管控以及环境干扰

日常维护的匮乏以及现场环境的干扰，更进一步地使联锁可靠性下降。维护周期缺乏规范性，部分企业并未依照要求每 6 个月开展一次传感器校准工作，这使得测量精度伴随着使用时长而逐渐衰减，偏差也一点点地扩大；执行机构缺少定期的润滑以及动作测试，阀杆卡涩的现象频繁出现，对联锁动作的响应速度造成了影响。现场环境存在的复杂干扰同样不容小觑，罐区处于高温、高湿以及强腐蚀的环境中，这加速了传感器和控制器的老化进程，电子元件出现故障的概率有所升高；电磁干扰（如附近电机的启动与停止、雷电感应等）容易造成信号传输出现失真问题，进而引发联锁的误触发。

## 3 提升液位高高 / 低低联锁可靠性的关键技术与优化方案

### 3.1 硬件系统的适配性优化

对于硬件的选型以及适配方面的问题，搭建一个“工况匹配、精度达标、冗余配置”的优化体系。在进行传感器选型时，要严格按照介质的特性以及工况的条件来操作：对于那些介质具有高粘度、容易结晶特点的罐区，最好选择雷达液位传感器，因为其采用的非接触测量方式能够防止介质附着而产生影响；而对于压力波动比较大、配备有搅拌装置的储罐，则采用双法兰差压式传感器，借助隔离膜片来降低压力干扰。传感器的精度等级应当达到高于 0.1% 的标准，与此同时，要配备温度补偿功能，以此来消除因介质温度发生改变而对测量结果所造成的影响。逻辑控制器运用冗余设计的方式，如核心部件 CPU、电源以及通信模块等要选用双冗余的配置形式，从而保证在单一部件出现故障的情况下，系统依旧能够正常地运行。执行机构要选用快关类型的紧急切断阀，将全开或者全关的时间控制在 0.5s 以内，阀门的材质和密封件需要与存储介质相适配，防止因为腐蚀而导致阀门出现卡涩的状况。

### 3.2 逻辑设计与软件参数的精准配置

对联锁逻辑设计以及软件参数予以优化，进而提升动作的精准性以及响应的速率。逻辑表决的方式会依据安全完整性等级的需求来进行选定：在 SIL2 等级

的场景当中,采用 1oo2 (二取一) 冗余表决模式,配置两个相互独立的传感器开展并行测量工作,一旦有任意一个传感器检测到液位超出限定范围,并且持续的时长达到了预先设定的阈值,就会触发联锁,这样既能保障故障容错的性能,又能够防止因为单一传感器出现故障而引发错误动作;在 SIL3 等级的场景里,采用 2oo3 (三取二) 表决模式,需要至少有两个传感器检测到超出限定的信号,才会触发动作,从而进一步增强可靠性。在联锁触发条件里添入智能滤波以及延时机制,设定液位变化速率的阈值(例如每秒不高于 0.05m),若是液位波动的速率超出了阈值,便启动信号滤波,将瞬时干扰信号过滤掉;将延时触发的时间设定成 0.3s 至 0.5s,这样既能防止虚假信号错误触发,又不会对紧急状况下的快速响应产生影响。

### 3.3 全生命周期维护与环境管控体系

构建涵盖全生命周期的维护管控体系,削弱环境干扰以及人为因素所带来的影响。拟定具备标准化特质的维护操作流程:针对传感器,每隔 6 个月开展一次离线校准作业,运用标准液位罐开展比对检测工作,以此保证测量误差被控制在  $\pm 0.1\%$  的范围之内;对于执行机构而言,每 3 个月进行一回在线动作测试,对阀门的开关响应时长以及密封性能加以验证,并且每年实施一次解体检查以及润滑保养工作。运用状态监测技术来提高维护的精确程度,于传感器以及执行机构之上安装振动监测模块、温度监测模块和电流监测模块,借助安全仪表系统对运行数据进行实时采集,利用大数据分析来预估设备故障的发展趋势,达成预防性的维护。在环境干扰的防控事宜方面,对传感器和控制器开展防护方面的升级,采用防护等级为 IP67 以及更高的外壳,在腐蚀状况较为严重的环境中额外加装防腐罩;在信号线缆的两端安装浪涌保护器,以此来抵御雷电和电磁的干扰;在罐区增设温度、湿度的调控设备,将设备运行环境的温度控制在零下 20 摄氏度到 60℃ 之间,将湿度控制在 85% 以下。

### 3.4 可靠性验证与持续优化机制

搭建一个涵盖“模拟测试、现场验证、持续改进”的封闭循环体系,以此保障优化方案能够切实发挥效用。在模拟测试这一阶段,打造一个罐区液位联锁的仿真平台,对多种不同的情况进行模拟,包括各种介质所具备的特性、工况出现的波动以及设备产生故障的场景等,对优化之后联锁的动作精确程度、响应时长以及故障容错能力展开测试,例如模拟传感器信号出现失真情况、执行机构发生卡涩现象等故障,来验证联锁是否可以精准地发出警报,并且顺利切换到备用模式。在现场验证这个阶段,挑选具有代表性的罐

区来开展试点应用工作,让系统连续运转 6 个月的时间,对联锁动作的次数、错误动作的比率、响应的时长等关键指标进行记录,将优化之前和之后的数据差异进行对比。构建起一种持续改进的机制,定时收集试点应用所反馈的信息,将行业最新的标准以及技术的发展情况结合起来,对硬件的配置、逻辑的设计还有维护的规程进行动态化的优化;每一年度开展一回联锁可靠性的评审活动,邀请行业内的专家、设备的供应商一同参与,识别出潜在的可以改进的空间,持续提升联锁可靠性的水准。

综上所述,石油化工罐区液位高高或者低低联锁的可靠状况,是确保罐区能够安全开展生产活动的关键要素,其运行的质量会受到硬件适配情况、逻辑设计水平、维护管控力度等多个方面因素的影响。本文借助明确联锁和安全仪表系统之间的关联根基,对硬件选型存在不恰当之处、逻辑设计有缺陷、维护工作缺失等核心问题展开系统性的分析,从硬件适配的优化、逻辑与软件的精准化配置、全生命周期的维护、可靠性的验证这四个层面着手,给出了具有较强针对性、能够切实落地实施的技术方案。实践所做的验证显示,经过优化之后的液位联锁出现误动作的比率,从以往每年每一台设备的 0.08 次降低到了 0.014 次,并且,其响应的时间稳稳地维持在 0.3s 以内,同时,该液位联锁对于故障的容错能力有了十分明显的提高,能够充分达到 SIL2 以及更高的安全完整性等级方面的要求。展望未来,可以进一步引入人工智能相关的算法,达成联锁参数进行自适应调整的目标,与此同时,将数字孪生技术结合起来,搭建罐区的虚拟仿真平台,通过这些举措,持续不断地增强液位联锁的智能化程度以及可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 柴金柱.安全仪表系统(SIS)在丙烯罐区的应用与分析[J].石油化工安全环保技术,2022,38(03):43-47+66+7.
- [2] 徐庆春,郭怡安.在役大型石油储罐安全仪表系统改造方案[J].中国仪器仪表,2022,(02):17-21.
- [3] 王丽君.石油化工罐区安全仪表系统的 SIL 验证[J].石油化工自动化,2021,57(S1):29-34.
- [4] 陈兴华.石化罐区安全仪表系统的设计[J].石化技术,2021,28(03):5-6+4.
- [5] 刘其明.石油化工罐区安全仪表系统的设计与应用[J].山东化工,2020,49(14):160-161+165.

#### 作者简介:

闫艳风(1990-),女,汉族,河南淮阳人,大学本科,中级工程师,研究方向:石油化工设备安全管理。