某高压加氢装置中安全仪表系统的设计

兰天

中国电子系统工程第四建设有限公司

摘要：安全仪表系统（SIS）是精细化工生产中确保安全生产的重要技术手段。本文介绍了某高压加氢装置的工艺生产流程、反应物料及主要设备，经过详细的 HAZOP 分析和 LOPA 分析，确定了此高压加氢反应柱 SIF 回路的 SIL 等级，进而对 SIS 系统的现场检测仪表、最终执行元件、逻辑控制器、系统 I/O 卡件及供电方式等进行了详细选型和设计；最后整理了温度、压力的具体工艺参数联锁设定值，并绘制了 SIS 系统的联锁逻辑图框图，为精细化工项目中高压加氢装置的 SIS 系统设计与应用提供了可行的方案，同时也为此类企业的稳定生产提供可靠的保障。

关键词：安全仪表系统（SIS）；高压加氢；LOPA 分析；联锁逻辑框图

随着精细化工行业的迅速发展，合成反应的生产过程越来越复杂，合成过程对安全性的要求越来越高。特别是在高压加氢合成反应过程中，由于其固有的危险性，如氢气的可燃性、爆炸性以及反应的放热特性，除了可以提高生产效率并对正常工况进行控制的 DCS 系统外，安全仪表系统（Safety Instrumented System, SIS）的设计和应用成为保障生产安全、防止事故发生的关键措施之一 [1,2]。

在某精细化工的高压加氢装置中，核心设备加氢反应柱中主要的反应物为氢气、异丙醇等易燃易爆介质，同时反应柱内的操作压力为 7.5MPa。根据安监总局 116 号文要求，对涉及“两危险一重大”的高压氢化反应控制回路有必要采用 SIS 系统进行控制，保证反应的安全进行。

1 工艺流程方案

车间外氢气经过氢气缓冲罐送到车间内的原料预热器，反应物料异丙醇溶液同时打到原料缓冲罐，并通过计量泵打到预热换热器内进行预热处理。参与反应的气相和液相在同一原料预热器中加热到操作温度，然后从设备底部进入加氢反应柱 01，经过 03 个加氢反应柱内多次合成反应，加氢反应柱 03 顶部出来的产品溶液进入产品冷凝器和冷凝分离器。反应后的气相部分冷却后在屋顶以上放空，产品液相从冷凝分离器底部收集进入产品接收罐，进入后续处理流程，如图 1 所示。

2 SIS 系统设计依据

一般设计前期，SIS 系统需要经过 HAZOP 分析来确定是否有必要设置 SIS 系统，然后经过 LOPA 分析可以准确量化每个 SIF 回路具体的 SIL 等级 [3]，从而为后面 SIS 系统的具体设计方案确定设计依据。

2.1 HAZOP 分析

HAZOP 分析目的在于识别可能会导致伤害或事故（包括财产损失、人员伤亡及伤害、环境污染）的缺陷，及由于与设计操作意图相背离可能的各种后果。分析不仅包括正常操作、投料试车、开停工和维修时可能出现的危害后果，同时对装置的可操作性也进行分析 [3]。本高压加氢反应装置分为 3 个节点，分别为置换加压单元的氢气入口缓冲罐、加料反应单元的计量泵、预热器及 3 个加氢反应柱、冷却分离单元的产品冷凝器、冷凝分离器及产品接收罐。

经过具体分析，加料反应单元需增设 SIS 系统进行紧急冷却，主要为：加氢反应柱超温超压时联锁关闭氢气进料开关阀和液体进料开关阀，打开紧急泄压阀并开启氮气吹扫，关闭正常降温管道的冷媒开关阀，开启紧急冷却的冷冻水进出管道开关阀。

2.2 LOPA 分析

根据 AQ/T 3054—2015《保护层分析（LOPA）方法应用导则》及 T/CCSAS 001—2018《危险与可操作性分析质量控制与审查导则》，加料反应单

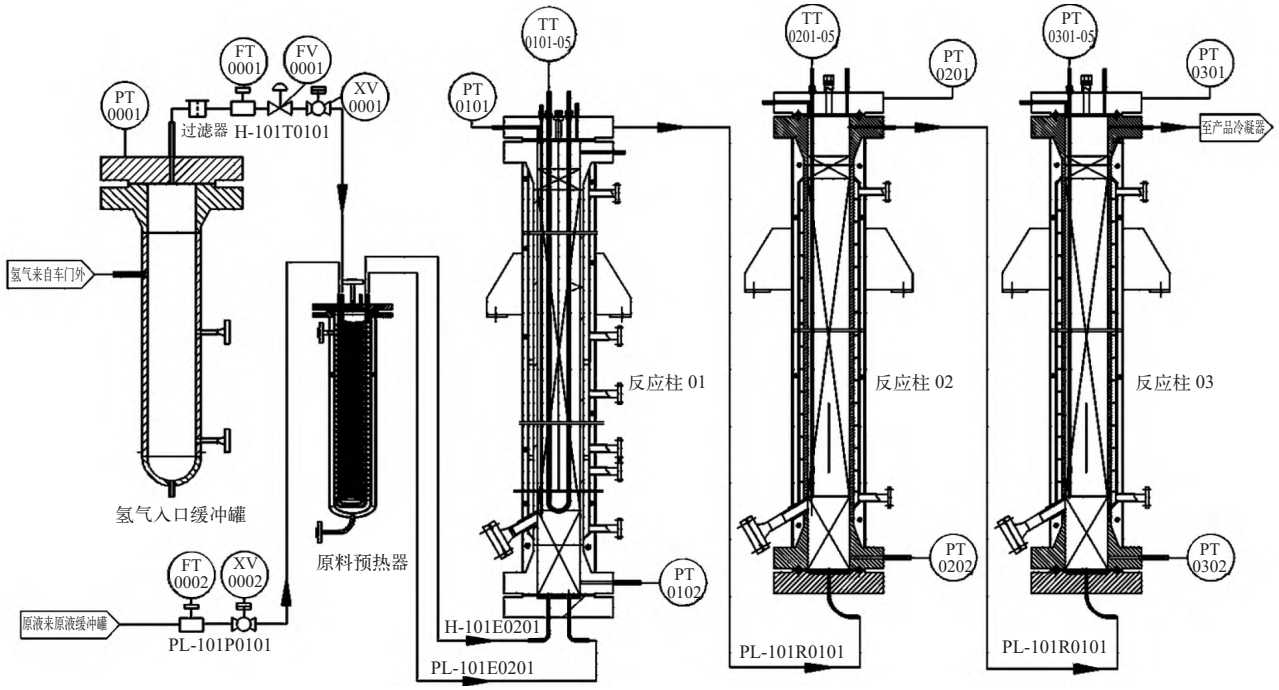

图 1　工艺流程简图

元中的场景需要确定 SIS 系统的安全完整性等级，因此需做进一步 LOPA 分析。保护层分析 LOPA 主要过程包括场景识别与筛选，初始事件确认，独立保护层评估，场景频率计算，风险评估与决策，后续跟踪与审查 [4]。在低要求操作模式下，SIF 回路的安全完整性等级（SIL）一般采用 IEC61511 中的平均失效概率 PFDavg 来确定 [5]。

表 1 为加氢反应柱 01 ~ 03 的 SIL 定级表，经过具体 LOPA 分析，加氢反应柱 01 ~ 03 各 SIF 回路的 SIL 等级均为 SIL1。

3　SIS 系统的设计

根据 GB/T50770 规范要求，设计的 SIS 系统独立于 DCS 系统设置，同时根据 LOPA 分析确定的 SIL 等级，SIS 系统各 SIF 回路 SIL 等级不低于 SIL1，均设置为故障安全型。

SIS 系统采用符合 IEC61508 和 IEC 61511 标准安全认证的可编程控制器系统（PLC）并冗余容错设计，网络通信模块、电源模块、I/O 接口及现场仪表等采用冗余设计，具有自诊断、自测试功能，现场和操作室内非管理允许，不可以误动。在控制室设置 SIS 系统工程师站、操作站、SER 站及辅助操作台等 [5]。工程师站可用于 SIS 系统的组态、调试和日常维护，SER 工作站用于顺序事件记录，两者互为备用；同时设置时钟服务器，对 SIS 系统以及各个控制系统的时间进行同步等，便于进行管理。

3.1　现场仪表的设计和选择

SIS 系统现场仪表包括检测仪表和最终执行元件。在各个 SIF 回路的 PFDavg 计算中，检测仪表和执行元件的故障失效概率对 SIS 系统的可靠性起着决定性作用 [6]，各现场检测元件和最终执行元件独立设置。

加氢反应器温度检测统一采用一体化温度变送器，满足 SIL2 认证，检测元件为多点铠装铂热电阻，设计温度为 0 ~ 250 ℃，防爆等级为 ExdIICT4Gb，螺纹安装。温度检测为“1oo2”冗余的逻辑结构，多点热电阻中任意一点的温度超过联锁设定值即可触发联锁，同时兼顾温度变送器的安全性和可用性，避免温度变送器单点故障或加氢反应柱局部失温而误动

表 1　反应柱 01 ~ 03 SIL 定级表

序号	SIF 回路	SIF 功能描述	SIL 等级
SIF1	加氢反应柱 01 温度	温度高高联锁切断氢气进料、冷热媒进出，开启加氢反应柱紧急冷却，紧急泄压	SIL1
SIF2	加氢反应柱 01 压力	压力高高联锁切断氢气进料、冷热媒进出，开启加氢反应柱紧急冷却，紧急泄压	SIL1
SIF3	加氢反应柱 02 温度	温度高高联锁切断氢气进料、冷热媒进出，开启加氢反应柱紧急冷却，紧急泄压	SIL1
SIF4	加氢反应柱 02 压力	压力高高联锁切断氢气进料、冷热媒进出，开启加氢反应柱紧急冷却，紧急泄压	SIL1
SIF5	加氢反应柱 03 温度	温度高高联锁切断氢气进料、冷热媒进出，开启加氢反应柱紧急冷却，紧急泄压	SIL1
SIF 6	加氢反应柱 03 压力	压力高高联锁切断氢气进料、冷热媒进出，开启加氢反应柱紧急冷却，紧急泄压	SIL1

作造成装置误停车，引发加氢反应的危险事故。

加氢反应柱顶部压力检测采用压力变送器，满足 SIL2 认证，防爆等级不低于为 ExdIICT4Gb，设备口引压安装。

加氢反应柱 SIS 系统联锁动作的最终执行元件为气动开关球阀，分别独立设置在氢气主管道、异丙醇主管道、冷热媒进出管道、紧急冷却和紧急泄压管道。其中，氢气主管道、异丙醇主管道和冷热媒进出管道开关球阀设计为故障关（FC），紧急冷却和紧急泄压管道阀门设计为故障开（FO）；在气源故障或阀门断电情况下，阀门可以迅速切断加氢反应柱的进料和冷热媒进出，同时进行紧急冷却和泄压，保证加氢反应柱内温度、压力迅速下降，防止危险进一步扩大，保证高压加氢装置处于安全状态。

气动开关球阀选用金属硬密封阀座，阀门泄漏等级为Ⅳ级，带防火垫片和增强型柔性石墨填料，并符合 API607 或 AP6FA 火灾安全型。气动执行机构为单作用气缸，加装 250℃熔点的易熔塞；当气缸温度达到易熔塞熔点时，易熔塞熔化，气动执行机构内的气体快速泄放，气动执行机构恢复故障位。所有气动开关球阀整体达到 SIL2 认证。

3.2 I/O 卡件及系统各级负荷

SIS 系统的 I/O 卡件插槽预留 15% ~ 20% 余量，I/O 卡可带电插拔、更换而不影响外部接线及引起系统停机。SIS 系统具有完善的硬件、软件故障诊断及自诊断功能，自动记录故障报警并能提示维护人员进行维护。诊断测试能在系统运行时始终周期地进行，一旦检测出故障，即产生报警及显示。

SIS 系统的各级负荷如下：CPU 的负荷不高于 50%；系统满负荷时，电源、软件的负荷不高于 50%；控制器内部通信负荷低于 50%，以太网通信负荷低于 20%；其他各种负载具有至少 40% 以上的工作裕量。

3.3 SIS 系统的供电方式

SIS 系统采用双路电源供电，一路电源来自车间 DCS 系统共用的 UPS，另一路市电送至 SIS 系统专用 UPS，两路电源在 SIS 系统专用配电柜内进行无扰切换。

3.4 系统联锁逻辑设计

高压加氢装置的 SIS 系统联锁逻

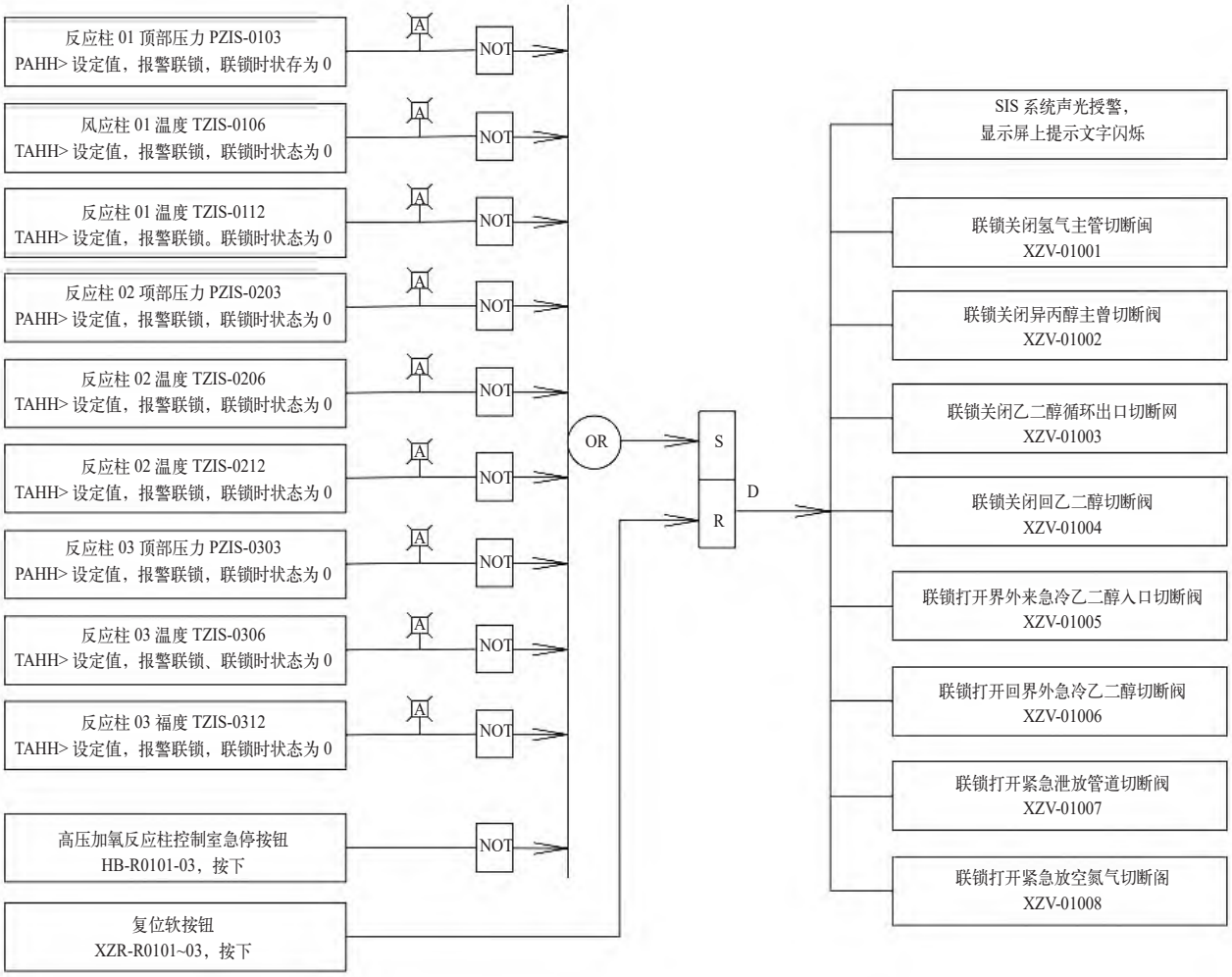

图 2　联锁逻辑框图

辑为：加氢反应柱 01 ~ 03 均设置顶部压力和温度联锁，当任一加氢反应柱的压力达到高高限设定值或加氢反应柱 01 ~ 03 内任一反应温度达到高高限设定值或在紧急情况下在控制室按下急停按钮时，SIS 系统联锁关闭氢气进料主管切断阀 XZV-01001、异丙醇主管切断阀 XZV-01002、乙二醇循环出口切断阀 XZV-01003、回乙二醇切断阀 XZV-01004，打开界外来急冷乙二醇入口切断阀 XZV-01005、回界外急冷乙二醇切断阀 XZV-01006，并打开紧急泄放管道切断阀 XZV-01007 和紧急放空氮气切断阀 XZV-01008。设计的 SIS 系统联锁逻辑框图如图 2 所示。

4 结语

安全仪表系统在精细化工高压加氢装置中的运用可确保化工装置的生产安全。通过合理设计 SIS 系统并可靠实施，可以对高压加氢工艺生产过程进行实时监控和快速干预，有效预防并遏制反应进行过程中安全事故的发生，保护人员、设备和环境安全，为企业的安全稳定生产提供坚实保障，同时对精细化工行业的发展产生积极的影响。

参考文献：

[1] 于波，徐勤梅. 安全联锁紧急停车系统在醋酐生产工艺中的应用[J]. 化工自动化及仪表，2016，43(3):327-329. DOI:10.3969/J.ISSN.1000-3932.2016.03.025.

[2] 曹伟俊，孟铎. 安全仪表系统在乙二醇装置中的应用[J]. 石油化工自动化，2023，59(5):43-46，91. DOI:10.3969/ J.ISSN.1007-7324.2023.05.011.

[3] 邓锐，刘美佳，平洋，等. 安全仪表系统SIL定级及LOPA的应用研究[J]. 石油化工自动化，2023，59(1):57-60. DOI:10.3969/J.ISSN.1007-7324.2023.01.012.

[4] 许忠仪. 安全仪表系统(SIS)的SIL评估[J]. 化工自动化及仪表，2009，36(5):62-66. DOI:10.3969/J.ISSN.1000-3932.2009.05.015.

[5] 方来华，吴宗之，魏利军，等. 安全仪表系统的开发与要求[J]. 中国安全科学学报，2009，19(4):159-168. DOI:10.3969/ J.ISSN.1003-3033.2009.04.027.

[6] 王磊，钱先锋，杨诚，等. 化工安全仪表系统SIL验证的工程应用[J]. 石油化工自动化，2024，60(2):51-54，88. DOI:10.3969/J.ISSN.1007-7324.2024.02.013.

广告