

LOPA 分析与 SIL 定级在在役合成氨装置中的应用

冯 彬 (河北正元化工工程设计有限公司, 河北 石家庄 050061)

摘 要: 合成氨工艺属于重点监管的危险化工工艺, 并且还涉及到多种重点监管的危险化学品, 对工艺自动化要求高, 国家也出台了相关规定要求设置 SIS 系统, LOPA 分析与 SIL 定级则为 SIS 系统的设置提供了依据。

关键词: 合成氨装置; LOPA 分析; SIL 定级

1 前言

合成氨工艺属于重点监管的危险化工工艺, 涉及到多种重点监管的危险化学品, 并且液氨等危险化学品的储存构成了重大危险源, 根据《国家安监总局关于加强化工安全仪表系统管理的指导意见》安监总管三(2014)116 号文的要求, 涉及“两重点一重大”的生产装置应该设置安全仪表系统。本文是对于在役合成氨装置增设 SIS 系统的探讨与实践。安全仪表系统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工况时, 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, 因此, 必须有很高的可靠性和规范的维护管理, 如果安全仪表系统失效, 往往会导致严重的安全事故, 根据安全仪表功能失效产生的后果和风险, 将安全仪表功能划分为不同的完整性等级(SIL1-4, 最高为 4 级), 安全完整性等级(SIL)定级是利用保护层分析法(LOPA)对每个安全仪表功能回路进行分析, 给出需要的 SIL 值。SIL 定级的目的是对每个安全仪表回路进行以下分析: ①需求的原因和频率; ②所有保护层均失效的情况下后果的严重性; ③为满足风险标准的要求, 安全仪表功能所需达到的风险降低因数。

2 LOPA 法的 SIL 定级

2.1 LOPA 分析

保护层分析 LOPA 是一种简化的风险评估的方法, 它通过对初始事件频率、事故严重度、独立保护层 IPL 的失效概率等数据来近似评估一个场景的风险。LOPA 是一种半定量的评估方法, LOPA 评估分为以下几个步骤:

2.1.1 确定安全仪表功能 SIF

对装置区的联锁回路进行筛选, 确认需要进行 SIL 定级的安全仪表功能 SIF, 明确其输入条件、输出动作和设计意图。

2.1.2 发展事故场景

确认 SIF 故障时可能出现的最严重的事故后果, 事故后果从人员伤亡、财产损失、环境破坏三方面进行评估, 并按照风险可接受标准对事故后果进行分级。

2.1.3 场景初始事件 IE 的识别和初始事件频率的确定

分析事故场景的初始事件, 即需要 SIF 动作的需求原因, 并确定初始事件的发生频率。初始事件的发生频率可采用行业统计数据、企业历史统计数据或其他可用

数据, 当没有数据可参考时, LOPA 小组人员可依据经验估计合理的数据作为失效频率。对于 LOPA 分析, 每一个事故场景都有一个单独的初始事件及其对应的单一后果。当同一个初始事件导致不同的后果, 或多个初始事件导致同一后果时, 应假设多个场景。当场景中存在使能必要条件或条件时, 应将其包含在场景中。

2.1.4 识别独立保护层及其失效概率

识别所有符合独立保护层要求的保护措施是 LOPA 分析的重点, 独立保护层是能够阻止事故场景发展链的一个设备、系统或动作。独立保护层应满足以下要求: ①独立性: 独立于初始事件或后果; 独立于同一场景中的其他 IPL; ②有效性: 能够阻止事故的发生, 能检测到响应条件且在有效的时间能够进行响应; ③可审查性: 应有可用的信息、文档和程序可查, 以说明保护层的设计、检查、维护和测试等活动。

独立保护层 IPL 的有效性通过故障时的失效概率 PFD 值来体现, PFD 是一个 0-1 之间的数值, PFD 值越小, 独立保护层的风险降低因数越大, 初始事件导致后果的频率就越低。独立保护层的失效数据可采用行业统计数据、企业历史统计数据或其他可用数据, 当没有数据可参考时, LOPA 小组人员可依据经验估计合理的数据作为独立保护层的失效概率。

2.1.5 估算事故场景的风险

使用初始事件的发生频率、使能条件或条件修正概率、独立保护层的失效概率来估算事故场景的发生频率。

事故场景的发生频率计算如下:

$$f_i^c = f_i^I \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times \cdots \times PFD_{ij}$$

式中: f_i^c : 初始事件 i 的后果 C 的发生频率, 单位为次/a; f_i^I : 初始事件 i 的发生频率, 单位为次/a; PFD_{ij} : 初始事件 i 中第 j 个阻止后果 C 发生的 IPL 的 PFD。

存在使能事件或条件时, 修正场景频率如下:

$$f_i^c = f_i^I \times f_i^E \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times \cdots \times PFD_{ij}$$

式中: f_i^E : 使能条件或条件发生概率

2.1.6 SIL 定级

当计算出的事故场景风险与可接受风险标准进行对比, 以决定风险是否在容许的范围内。如果计算风险低于风险可接受标准, 则事故场景已有足够的保护层, 不需再增加任何保护层。合成氨装置 SIL 定级采用了低需求模式, 在需求模式下, 如果计算风险高于风险可接受标准, 则剩余的风险降低就由 SIF 来承担, SIF 需要降

低的风险水平就决定了 SIF 所需达到的 SIL 等级, SIF 的 PFD 由下式决定:

$$PFD_{SIF} = TF / TMF$$

风险降低因数 RRF 由下式计算 (风险降低因数 RRF 是 PFD 的倒数)

$$RRF_{SIF} = TMF / TF$$

式中: PFD_{SIF} : SIF 功能需求时的失效概率; RRF_{SIF} : SIF 功能的风险降低因数; TMF: 削减后的风险频率; TF: 事故的可接受频率。

确定了 SIF 的 PFD_{SIF} 或 RRF_{SIF} 之后, 依据下列标准确定 SIL 等级:

安全完整性等级 SIL	风险降低因数 RRF	故障时失效概率 PFD	备注
SIL1	> 10 且 ≤ 100	$\geq 1 \times 10^{-2}$ 且 $< 1 \times 10^{-1}$	
SIL2	> 100 且 ≤ 1000	$\geq 1 \times 10^{-3}$ 且 $< 1 \times 10^{-2}$	
SIL3	> 1000 且 ≤ 10000	$\geq 1 \times 10^{-4}$ 且 $< 1 \times 10^{-3}$	
SIL3	> 10000 且 ≤ 100000	$\geq 1 \times 10^{-5}$ 且 $< 1 \times 10^{-4}$	

同一个安全仪表功能, 从人员伤害、财产损失、环境危害三个方面可能得到不同的 SIL 等级, 此时, 取其中最高的等级作为所需要的 SIL 等级。

2.2 独立保护层

独立保护层分为预防性保护层和削减性保护层, 预防性保护层用于阻止事故的发生, 削减性保护层不能防止事故的发生, 但能够减轻事故的严重程度。

2.2.1 预防性保护层包括

①过程安全设计; ②过程控制系统; ③报警 + 人员响应; ④紧急关闭系统; ⑤压力泄放系统等。

2.2.2 削减性保护层包括

①火气探测系统; ②紧急响应系统。

2.2.3 报警 + 人员操作作为一个独立保护层考虑时, 应满足以下条件

①报警信号应在控制室或操作盘上可见; ②操作人员 24h 在岗; ③操作人员有独立的手段将工艺参数调节至正常工况 (没有使用 SIF 的任何部件, 不涉及初始事件或其他独立保护层的任何部件); ④过程安全时间大于 15min, 也就是说, 在报警信号发出至演变成事故之前应有 15min 的处理时间。

2.3 过程控制系统 BPCS 独立保护层的确认

过程控制系统 BPCS 作为独立保护层时, 应遵循以下原则: ①一个 BPCS 控制回路失效, 最有可能是传感器或最终控制元件失效, 而 BPCS 逻辑控制器仍能正常运行, 此时, 允许 BPCS 有一个以上的 IPL; ②如果传感器或最终执行元件是场景中其他 IPL 的公共组件或是 IE 的一部分, 则多个不回路不应作为 IPL; ③如果 IE 不涉及 BPCS 逻辑控制器失效, 每个回路均能满足 IPL 的所有要求, 在同一场景下, 作为 IPL 的 BPCS 回路不应超过 2 个; ④所有 BPCS 回路 IPL 的总的 PFD, 不宜低于 10^{-2} ; ⑤如果人员失效是 IE, 不宜将启动人员行动的 BPCS 报警作为 IPL; ⑥在同一场景中, 不宜将两个人员响应同时作为 IPL, 除非证明它们完全独立并且满足人

员行动作为 IPL 的所有要求。

3 LOPA 分析与 SIL 定级在合成氨装置中的应用举例

本文以笔者做过的某化工有限责任公司在役合成氨装置 LOPA 分析与 SIL 定级为例。该公司合成氨装置分为两套, 共用一套造气系统。造气以煤为原料, 铁路或公路运输到厂区, 经过型煤制备成煤棒送入富氧连续气化, 生成半水煤气。1# 合成氨装置半水煤气经过栲胶—888 碱液湿法脱硫、“中低低”变换、变压吸附脱碳、低压甲烷化、往复式氮氢压缩机、氨合成 (31.4MPa) 生成液氨进入液氨储罐。2# 合成氨装置经过半水煤气脱硫、“四段式无饱和塔全低变”变换、变压吸附脱碳、往复式氮氢压缩机、醇烃化、氨合成 (31.4MPa) 生成液氨进入液氨储罐, 醇烃化生成的甲醇进入甲醇贮槽。

经 HAZOP 分析, 该公司合成氨装置中的甲烷化、氨合成、醇烃化、氨罐区、甲醇罐区需要进行 LOPA 分析与 SIL 定级, 进行 SIS 系统改造, 结果如下:

序号	SIF 回路	SIF 功能	SIL	备注
1	氨合成塔温度高高连锁	氨合成塔温度高高联锁停部分压缩机	SIL2	需求模式, 满足 SIL2 回路需求。在 SIS 系统中实现
2	废热回收器液位低低联锁	废热回收器液位低低联锁压缩机停车	SIL2	需求模式, 满足 SIL2 回路需求。在 SIS 系统中实现
3	冷交液位低低联锁	冷交液位低低联锁关出口阀	SIL1	需求模式, 满足 SIL1 回路需求。在 SIS 系统中实现
4	氨分液液位低低联锁	氨分液液位低低联锁关出口阀	SIL1	需求模式, 满足 SIL1 回路需求。在 SIS 系统中实现
5	氨分液液位高高联锁	氨分液液位高高联锁循环机停机	SIL1	需求模式, 满足 SIL1 回路需求。在 SIS 系统中实现
6	甲烷化炉温度高高连锁	在甲烷化进气总管设置放空管, 甲烷化炉出口温度与该放空管的开关阀连锁	SIL2	需求模式, 满足 SIL2 回路需求。在 SIS 系统中实现
7	醇化塔温度高高连锁	醇化塔温度高高联锁停部分压缩机	SIL2	需求模式, 满足 SIL2 回路需求。在 SIS 系统中实现
8	烃化塔温度高高连锁	烃化塔温度高高联锁停部分压缩机	SIL2	需求模式, 满足 SIL2 回路需求。在 SIS 系统中实现
9	液氨储罐液位低低连锁	液氨储罐设置液位低低连锁停液氨出口阀	SIL2	需求模式, 满足 SIL2 回路需求。在 SIS 系统中实现
10	液氨储罐液位高高连锁	液氨储罐设置液位高高连锁停液氨进口阀	SIL2	需求模式, 满足 SIL2 回路需求。在 SIS 系统中实现
11	甲醇贮槽液位高高连锁	甲醇储罐设置液位高高连锁停甲醇进口阀	SIL1	需求模式, 满足 SIL1 回路需求。在 SIS 系统中实现

参考文献:

- [1] GB/T 32857-2016. 保护层分析 (LOPA) 应用指南 [S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2016.