安全仪表触发组表决形式对安全仪表回路完整性等级的影响

樊文龙　王　江（青岛中油华东院安全环保有限公司，山东　青岛　266000）

摘　要：随着国家经济的发展，石油化工及天然气集输等行业飞速发展，同时带来的安全问题也备受关注。安全仪表系统在保证工艺安全发挥极其重要的作用，安全仪表系统在设计、安装及维护使用过程中都需满足国家标准及相关条文的规定，以实现全生命周期管理。本文着重关注对构成安全仪表系统的触发组不同的表决形式对安全仪表回路完整性的影响，不同的触发组对安全仪表回路完整性的影响主要体现在硬件的平均失效概率、平均误停车时间间隔等参数，甚至会影响整体的安全仪表回路完整性等级。

关键词：安全仪表回路；完整性等级；SIL 验证

0 前言

安全仪表系统（SIS）是石油化工、天然气集输等危险工艺在发生紧急情况时对整体或部分工艺进行紧急停车，使装置处于安全状态。安全仪表系统在确保装置安全中发挥重要的角色。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 [2014]116 号文中强调 2020 年 1 月 1 日起，新建化工装置、危险化学品储存设施安全仪表系统应执行功能安全相关标准要求，设计符合要求的安全仪表系统。在天然气集输站中，天然气压缩机组是核心设备，在可能发生重大事故的紧急情况下，机组控制系统控制机组紧急停车防止机组损坏或造成其他次生灾害，但机组由于仪表故障造成机组误动作停车会让天然气集输终止，对下游用户造成影响。因此，在保证安全的前提下，应尽量降低机组误动作停车的概率。某天然气集输站因触发组失灵发生过机组误停车的事件，对下游用户造成重大损失，为降低这种意外事件的发生频次，运用科学、系统的方法对联锁回路触发组的表决形式进行计算分析，获取更优化的技术方案。

1 SIL 验证方法

SIL 验证的方法通常包括马尔科夫模型法、故障树法及可靠性框图法等。通过不同的验证方法来验证安全仪表回路的搭建是否满足需求的平均失效概率。本文根据工程中遇到的实际案例，选用可靠性框图法对选取的联锁对象进行计算，分析不同的联锁触发形式对安全回路可靠性及安全仪表联锁等级的影响。为提高联锁可靠性，减少联锁触发误动作可能性，选取对触发组由一取一表决形式（1OO1）改为二取二表决形式（2OO2）和三取二（2OO3）表决形式后，寻求在满足安全等级要求前提下，同时提高联锁可靠性的技术方案。

天然气集输行业中，压缩机作为天然气运输过程的动力来源，对天然气的稳压及输送起到核心作用，当天然气压缩机出现故障停机或误动作停机时，下游用户面临断气的风险。因此，在压缩机正常供气过程中，在无其他安全隐患的前提下，应保证压缩机正常状态下长周期运行，尽量避免因安全联锁触发元件的误动作造成的压缩机停机，影响天然气集输站的正常运行。在某天然气集输站中，天然气压缩机发生了因合成油压力低低造成的天然气压缩机停机，而造成压缩机联锁停机的原因并不是工艺指标偏离正常范围造成，而是由于触发元件失效造成的压缩机误停机，从而对集输造成了停机的生产影响。

基于以上的误停机风险，天然气集输站提出了技术要求，在满足需求的安全仪表回路等级要求的前提下，降低联锁误动作触发的概率，以提高联锁的可靠性。图 1 给出了某天然气集输站压缩机合成油压力低低联锁的可靠性框图，原天然气压缩机的合成油压力低低联锁触发元件是单一的压力远传，当该压力远传元件检测到压力低于联锁触发值时，联锁启动并切断压缩机组燃气轮机进气阀门，最终机组停车。联锁回路的可靠性框图如图 1 所示。

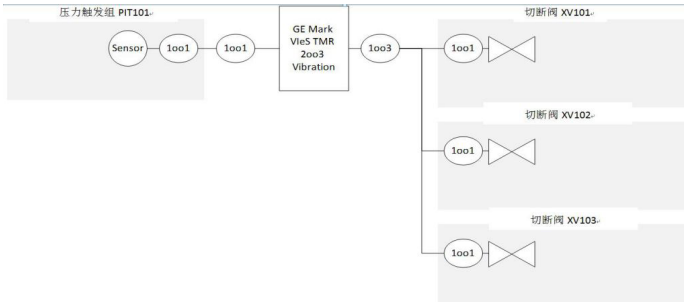


图 1　某天然气集输站压缩机组合成油压力联锁可靠性框图

2 触发组表决形式对平均误停车时间间隔的影响

SIF 回路的误停车率（STR）及平均误停车时间间隔（MTTFS）是衡量一个 SIF 回路可靠性的重要指标。表决结构的选择对 SIF 回路误停车率及平均误停车时间间隔有重要影响。

分别选取联锁触发组一取一表决形式与二取二形式和三取二触发组表决形式进行计算研究，通过结果比对，

选择合理的表决形式。压缩机组合成油压力低低联锁触发组表决为一取一、二取二和三取二情况下的触发组MTTFS（平均误停车时间间隔）占本 SIF 回路 MTTFS。

3 触发组表决形式对回路失效概率的影响分析

1OO1 表决形式下的触发组平均误停车时间间隔（MTTS）为 84.08，误停车率为 0.012；在 2OO2 表决形式下的触发组平均误停车时间间隔（MTTS）为 645.11，误停车率为 0.0016；在 2OO3 表决形式下的触发组平均误停车时间间隔（MTTS）为 355.92，误停车率为 0.0028。因此，根据结果可知，1OO1 表决形式下的触发组平均误停车时间间隔（MTTS）远小于 2OO2 和 2OO3 表决形式下的触发组平均误停车时间间隔（MTTS）；而误停车率，1OO1 表决形式下的触发组误停车率远大于 2OO2 和 2OO3 表决形式下的触发组误停车率。同样，不同的表决形式对于整体回路的 MTTFS 和误停车率影响也是显著的。因此，综合来看将触发组的表决形式由 1OO1 改为 2OO2 和 2OO3 能够提高该 SIF 回路的可靠性，增加联锁触发组误动作触发联锁的时间间隔，降低误停车率。

安全仪表回路目的是在被保护工艺过程或设备发生紧急情况时，实现部分或全部停车功能，安全仪表回路的整体构建需要符合安全仪表回路定级需求，这其中包括平均失效概率、硬件故障裕度 HFT 及系统能力 SC。当考察触发组表决形式 1OO1 改为 2OO2 和 2OO3 时，并不会降低回路的硬件故障裕度 HFT 及系统能力 SC，因此分析触发组的表决形式由 1OO1 改为 2OO2 和 2OO3，整体回路平均失效概率需要满足需求的安全仪表等级要求（SIL2，由定级报告给出），计算过程运用爱仕达软件对不同表决形式的触发组构成的联锁回路平均失效概率进行安全仪表等级计算，计算结果见表 2。

从表 2 中可以看出，1OO1 表决形式下的触发组平均失效概率 PFG_{avg} 为 1.55E–03，整体 SIF 回路平均失效概率 PFG_{avg} 为 2.88E–03，安全仪表回路等级达到 SIL2；2OO2 表决形式下的触发组平均失效概率 PFG_{avg} 为 1.70E–02，整体 SIF 回路平均失效概率 PFG_{avg} 为 1.84E–02，安全仪表回路等级达到 SIL1；2OO3 表决形式下的触发组平均失效概率 PFG_{avg} 为 1.57E–03，整体 SIF 回路平均失效概率 PFG_{avg} 为 2.98E–03，安全仪表回路等级达到 SIL2。因此，建议压缩机合成油压力低低联锁触发组由 1OO1 改为 2OO3，以求在满足安全等级要求的前提下，提高联锁的可靠性。

4 总结

压缩机合成油压力低低联锁触发组由 1OO1 改为 2OO2 后，可提高联锁回路的平均误停车时间，提高可靠性，但经过验证，触发组 2OO2 组成的联锁平均失效概率为 SIL1 级，不能满足需求的安全仪表回路等级 SIL2 对平均失效概率要求；触发组 2OO3 组成的联锁不仅可提高联锁回路的平均误停车时间，提高可靠性，同时验证后的安全仪表平均失效概率等级为 SIL2 级，可满足需求的安全仪表回路等级 SIL2 对平均失效概率要求。因此，建议压缩机合成油压力低低联锁触发组由 1OO1 改为 2OO3，以求在满足安全等级要求的前提下，提高联锁的可靠性。

表 1 SIF 回路不同表决形式触发组 MTTFS

序号	触发组表决形式	触发组 MTTFS	误停车率 STR	SIF 回路 MTTFS	误停车率 STR
1	一取一表决形式	84.08	0.012	33.55	0.030
2	二取二表决形式	645.11	0.0016	51.83	0.019
3	三取二表决形式	355.92	0.0028	77.4	0.013

表 2 不同表决形式触发组构成的安全回路等级验证结果

序号	触发组结构	触发组平均失效概率 PFG_{avg}	SIF 回路平均失效概率 PFG_{avg}	SIL 等级	符合性结论
1	一取一表决形式	1.55E-03	2.88E-03	SIL2	符合
2	二取二表决形式	1.70E-02	1.84E-02	SIL1	不符合
3	三取二表决形式	1.57E-03	2.98E-03	SIL2	符合