

氨制冷系统安全完整性等级的确定

李 力, 许开立, 王 犇, 姚锡文
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 在安全完整性等级的评价过程中定义了风险概率降低值 Q_{rpr} , 并给出了 Q_{rpr} 的计算公式. Q_{rpr} 是用来表征风险概率降低的大小, 其数值大小与系统安全完整性等级所要求的失效概率存在对应关系, 进而可以确定系统的安全完整性等级. 在经典的 HAZOP-LOPA 评价方法中融入 Q_{rpr} 的计算, 可以更加准确、快速地评价系统的安全完整性等级. 采用该方法对氨制冷系统进行安全完整性等级评价. 分析了氨制冷系统可能发生的泄漏爆炸事故, 并对其安全相关系统进行了安全完整性等级评价, 验证了该方法的有效性和可行性.

关 键 词: 安全完整性等级; 风险概率降低值; HAZOP-LOPA; 氨制冷; 失效概率

中图分类号: X 913.4 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)07-1034-05

Determination of Safety Integrity Level of Ammonia Refrigeration System

LI Li, XU Kai-li, WANG Ben, YAO Xi-wen
(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: XU Kai-li, professor, E-mail: kaili_xu@aliyun.com)

Abstract: The risk probability reduction quotient (Q_{rpr}) is defined during the evaluation of the safety integrity level, and the formula of Q_{rpr} is given. Q_{rpr} is used to characterize the reduction in the risk probability. The value of the Q_{rpr} corresponds to the failure probability required by the system safety integrity level, and then can be used to determine the safety integrity level. Integrating the Q_{rpr} calculation into the classical HAZOP-LOPA evaluation method can more accurately and quickly evaluate the safety integrity level of the system. This method is used to evaluate the safety integrity level of the ammonia refrigeration system. The leakage and explosion accidents in the ammonia refrigeration system were analyzed, and the safety integrity level of the safety-related system was evaluated to verify the effectiveness and feasibility of the method.

Key words: SIL (safety integrity level); risk probability reduction; HAZOP-LOPA; ammonia refrigeration; failure probability

液氨作为一种性能良好的制冷剂被广泛地应用在制冷行业,尤其是冷库制冷.我国80%的冷库都选用液氨作为制冷剂.但随着冷库氨泄漏、爆炸的事故频发,氨制冷系统的安全性已不容忽视.而系统的安全完整性等级的评价能够有效地反映出系统的安全状态.对氨制冷系统进行安全完整性研究能够有效地分析出其可能发生事故的原因以及系统整体的风险状态,对安全生产管理有着重要的意义.

Kim等^[1]对硬件的安全完整性等级(safety integrity level, SIL)确定进行了研究,通过给出各子系统SIL来确定整个硬件系统的SIL; Kim等^[2]使用HARA和FMEDA法来确定发电站火焰监测系统的SIL; Baghaei^[3]使用风险图对目标SIL进行确定,并对风险图中的参数进行了改进. Dutuit等^[4]使用故障树来确定SIL; 周荣义等^[5]对确定SIL的常用方法进行了比较分析.

本文在传统的HAZOP-LOPA分析方法中引入风险概率降低值来确定氨制冷系统的安全完

完整性等级,使评价过程更加快速、准确.对氨制冷系统可能发生的泄漏爆炸事故进行了分析,确定现有的安全相关系统的安全完整性等级是否能够满足.能够对氨制冷系统的安全状态进行有效的评估,有助于减少氨制冷系统的事故发生.

1 安全完整性理论概述

安全完整性(safety integrity)是指在规定条件和时间内,系统中存在的安全相关系统能够成功实现相应的安全功能的概率,其大小是用安全完整性水平来衡量的^[6].为了区分安全完整性水平的大小,给相关的安全系统制定了不同的安全等级,即安全完整性等级^[7].安全完整性等级(SIL)表示系统安全完整性水平的离散等级,用于规定分配给安全相关系统安全完整性要求的大小^[8].

在 IEC61508 中,根据安全功能动作的频率将安全相关系统的工作模式分为两种:低要求操作模式和高要求操作模式(或连续操作模式).低要求操作模式的动作频率低于每年一次,一般的化工生产为这类模式,其平均“要求时失效”概率用 PFD_{avg} 表示;高要求操作模式的动作频率高于每年一次,一般的机械制造业为这类模式,其平均“要求时失效”概率用 $PFD_{perhour}$ 表示.低要求模式下与高要求模式下的安全完整性等级的分类如表 1 所示^[9].显然,如果能计算出安全相关系统的 PFD_{avg} 或 $PFD_{perhour}$,就可以根据表 1 的划分标准来确定其安全完整性等级.

表 1 不同要求操作模式的 SIL

Table 1 SIL with different required operating modes

SIL	平均“要求时失效”概率	
	低要求操作模式	高要求操作模式
4	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	$10^{-8} \sim 10^{-9}$
3	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	$10^{-7} \sim 10^{-8}$
2	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	$10^{-6} \sim 10^{-7}$
1	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	$10^{-5} \sim 10^{-6}$

安全完整性等级是用来衡量安全相关系统降低风险的能力,主要是通过降低事故发生的概率来达到降低风险的目的.这里引入风险概率降低值(risk probability reduction quotient, Q_{rpr})来表征风险概率降低的大小.风险概率降低值是系统加装安全相关系统后所要达到的事故发生概率 P_1 (可接受概率)与事件的发生概率 P_0 的比值.其表达式为

$$Q_{rpr} = -\lg \frac{P_1}{P_0}.$$

(1)

对于分析对象没有安装安全相关系统的, P_0 就是原始事件(未减轻事件)的发生概率;对于分析对象已安装安全相关系统的, P_0 就是减轻事件的发生概率.

系统通过安装安全相关系统使其风险降低到可接受的范围内, Q_{rpr} 就是反映这个过程中风险概率值数量级的变化.通过与特定 SIL 规定的平均“要求时失效”概率相匹配,就可以得出 Q_{rpr} 与 SIL 的对应关系,其原理如图 1 所示^[10].这里给出了 Q_{rpr} 与 SIL 之间的对应关系如表 2 所示,通过计算 Q_{rpr} 的值可以快速地确定 SIL 的值.

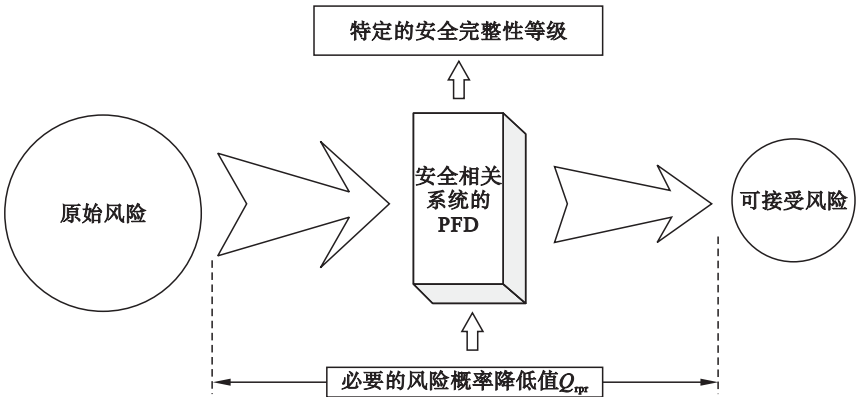


图 1 安全完整性等级确定原理图

Fig. 1 Safety integrity level determination schematic

在实际判断过程中,对于要安装安全相关系统的新建扩建系统来说,可以通过计算 Q_{rpr} 的值来确定安全相关系统所要求的安全完整性等级;

对于已经存在的安全相关系统来说,如果计算结果 $Q_{rpr} < 0$,则说明现在的安全相关系统的 SIL 满足要求.如果 $Q_{rpr} > 0$,则说明现在的安全相关系

统的 SIL 不满足要求,通过表 2 中对应的取值,需要增加相对应 SIL 的安全措施来保证风险能够被接受.

表 2 不同要求操作模式下 Q_{rpr} 与 SIL 的对应关系

Table 2 Corresponding relation between Q_{rpr} and SIL in different demand operation mode

SIL	Q_{rpr}	
	低要求操作模式	高要求操作模式
4	4 ~ 5	8 ~ 9
3	3 ~ 4	7 ~ 8
2	2 ~ 3	6 ~ 7
1	0 ~ 2	5 ~ 6

- 安全完整性等级的确定步骤为
- 1) 明确分析对象,确定其相应的安全相关系统.
 - 2) 采用一定的分析方法对系统可能发生的事故进行分析.
 - 3) 通过采用特定的安全评价方法确定事故发生的概率以及安全相关系统的失效概率.
 - 4) 通过相关的风险评价方法确定该系统发生特定事故的可接受风险概率.
 - 5) 计算 Q_{rpr} 的值,确定现在的安全相关系统是否满足要求,是否需要采取进一步措施.给出改进意见.

2 引入 Q_{rpr} 的 HAZOP – LOPA 评价方法

2.1 引入 Q_{rpr} 的 HAZOP – LOPA 方法简介

HAZOP 是一种通过对工艺参数偏差分析,识别导致偏差产生原因和可能导致后果,从而确定所需要安全保护措施的分析方法^[11]. 而 LOPA 作为一种较简化的风险评价方法,可以通过对系统各保护层的分析,得出系统现实存在的风险^[12]. 这个风险值正是进行系统安全完整性等级评价所需要的^[13].

在 HAZOP 分析的基础上,能够使 LOPA 分析更加具有针对性,更加全面和完善,能够快速准确地进行风险分析^[14]. 从而更加有效地进行系统的安全完整性等级的评价.

在计算 Q_{rpr} 的值时,事件发生概率 P_0 的确定是最重要的环节. 而 HAZOP – LOPA 评价过程中,通过对系统独立防护层的分析,能够很好地分析出减轻事件或未减轻事件的发生概率 P_0 , 为 Q_{rpr} 值的计算提供基础.

2.2 引入 Q_{rpr} 的 HAZOP – LOPA 确定 SIL 的步骤

- 引入 Q_{rpr} 的 HAZOP – LOPA 的评价步骤为
- 1) 熟悉分析对象,收集相关资料.
 - 2) 对分析对象进行 HAZOP 分析,利用偏差识别系统可能发生的事故场景.
 - 3) 确定始发事件、条件事件,以及引发事件后果的概率.
 - 4) 确定安全相关系统的独立保护层及其失效的概率,计算减轻事件的风险概率.
 - 5) 计算 Q_{rpr} 的值,根据表 2 确定其安全完整性等级.
 - 6) 提出改进措施.

3 应用实例

3.1 氨制冷系统

氨制冷系统在冷库中应用十分广泛,本文根据沈阳某水产公司的制冷系统进行分析. 核心的工作部件有 4 个:压缩机、冷凝器、节流阀和蒸发器. 除此之外还有储氨器、低压循环储液桶、氨泵、集油器、油分离器、紧急泄氨器以及安全附件、阀门等. 其工作流程图如图 2 所示. 其正常的工作过程为:氨气经压缩机压缩变成高压高温的氨气,进入冷凝管后被循环水冷却成高压低温的氨液,随后经过节流阀节流变成低温低压的氨液进入蒸发器中,在吸收被冷却物的热量之后,汽化成氨气,然后又回到压缩机中. 如此循环,构成一个制冷系统.

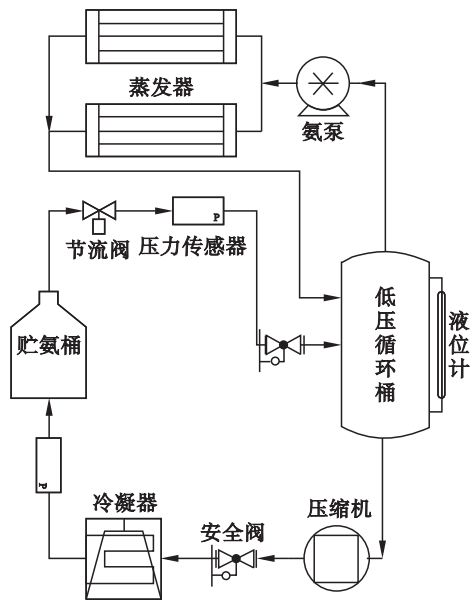


图 2 氨制冷系统工程流程示意图

Fig. 2 Engineering process schematic of ammonia refrigeration system

3.2 安全完整性等级评价

首先对氨制冷系统进行 HAZOP 分析. 这里选择 2 个关键词 (More 和 Less) 与 3 个工艺参数 (压力、流量和温度) 进行分别组合分析, 得到的结果如表 3 所示. 由表 3 分析结果可看出, 氨制冷系统压力和流量过大时产生的后果较为严重; 温度的过高过低、压力过小和流量过小会对制冷系

统正常生产产生一定的影响, 但一般不会造成严重事故. 因此, 这里再对压力过大和流量过大这两种会造成严重后果的情况进行后续的 LOPA 分析以及系统的安全完整性等级评价. 其 LOPA 分析如表 4 所示, 安全完整性等级的确定过程如表 5 所示.

表 3 氨制冷系统 HAZOP 分析
Table 3 HAZOP analysis of ammonia refrigeration system

引导词	偏差	原因	后果	安全措施
More	压力过大	节流阀故障	低压循环桶、蒸发器破裂, 液氨泄漏, 发生爆炸	压力报警器, 泄压阀
	流量过大	压缩机工作异常; 调节阀故障	压缩机工作异常使阀门、密封装置损坏失效, 导致液氨泄漏	液位报警器, 紧急泄氨阀
	温度过高	冷凝器管路堵塞, 水量不足; 蒸发器负荷太重	制冷能力下降	温度报警器
Less	压力过小	氨泵故障	制冷效果下降	压力报警器
	流量过小	调节阀设置不合理; 放油放空时液氨损耗大	制冷效果差	液位报警器
	温度过低	冷凝器流量太大; 蒸发器负荷小	蒸发器结霜加重, 影响制冷	温度报警器

表 4 氨制冷系统 LOPA 分析
Table 4 LOPA analysis of ammonia refrigeration system

事故场景	后果	始发事件	条件事件	引发后果	独立保护层
压力过大导致储罐、管路破裂, 造成氨泄漏	导致人员伤亡, 甚至发生火灾爆炸	节流阀故障 压力增大	容器破裂	发生泄漏	压力报警器、安全阀
流量过大导致压缩机密封不严, 造成泄漏	导致人员伤亡, 甚至发生火灾爆炸	压缩机工作异常; 调压阀故障	阀门、密封圈失效	发生泄漏	流量报警器、紧急泄氨阀

表 5 氨制冷系统安全完整性等级的确定
Table 5 Safety integrity level of ammonia refrigeration system

事故场景	始发事件概率	条件事件概率	引发后果概率	未减轻事件概率	独立保护层 PFD	减轻事件概率 P_0	可接受风险概率 P_1	结果	
								Q_{pr} 值	SIL
压力过大导致储罐、管路破裂, 造成氨泄漏	2. 6E - 02	1. 0E - 02	1. 0	2. 6E - 04	1. 6E - 02	4. 2E - 06	1. 0E - 05	- 0. 38	满足要求
流量过大导致压缩机密封不严, 造成泄漏	1. 5E - 02	1. 0E - 01	1. 0	1. 5E - 03	2. 6E - 02	3. 9E - 05	1. 0E - 05	0. 59	SIL1

由表 4、表 5 结果分析可得出, 由于压力过大引起的管路泄漏事故, 该水产公司有压力报警器与泄压阀作为独立保护层, 通过计算得出 Q_{pr} 值为 -0. 38, 小于 0, 则说明其安全完整性等级符合要求, 不需要加装其他安全设施. 由于流量过大引

起的压缩机泄漏事故, 该水产公司有流量报警器与紧急泄氨阀作为独立保护层, 通过计算得出 Q_{pr} 值为 0. 59, 由表 2 可知, 该系统需要增加安全完整性等级为 1 的安全设备来保障系统安全.

4 结 论

- 1) 定义了风险概率降低值 Q_{rpr} , 给出了 Q_{rpr} 的计算公式. 说明了通过计算 Q_{rpr} 的值来确定安全完整性等级的原理.
- 2) 说明了 Q_{rpr} 与安全完整性等级的对应关系及其对应的原理. 对于要安装安全相关系统的新建扩建系统来说, 可以通过计算 Q_{rpr} 的值来确定安全相关系统所要求的安全完整性等级; 对于已经存在的安全相关系统来说, 可以通过计算 Q_{rpr} 的值来确定现有的安全完整性系统是否符合要求.
- 3) 将 Q_{rpr} 融入 HAZOP – LOPA 评价方法中, 给出了评价系统安全完整性等级的步骤, 并将其运用在氨制冷系统的评价中, 验证该方法的有效性和可行性.

参考文献:

[1] Kim G Y, Yoo K H, Ko B G, et al. Procedure for assessing hardware safety integrity in legacy systems [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 461 – 470.

[2] Kim S K, Kim Y S. An evaluation approach using a HARA and FMEDA for the hardware SIL [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26: 1212 – 1220.

[3] Baghaei A. 3-parameters SPW technique: a new method for evaluation of target safety integrity level [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26: 1257 – 1261.

[4] Dutuit Y, Innal F, Rauzy A, et al. Probabilistic assessments in relationship with safety integrity levels by using fault trees [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2008, 93: 1867 – 1876.

[5] 周荣义, 钟岸, 任竟舟, 等. 安全系统安全完整性等级确定方法比较研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2014, 10 (3) :

67 – 73.

(Zhou Rong-yi, Zhong An, Ren Jing-zhou, et al. Comparative study on determining methods for safety integrity level of safety system [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2014, 10 (3) : 67 – 73.)

[6] Hietikko M, Malm T, Alanen J. Risk estimation studies in the context of a machine control function [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, 96: 767 – 774.

[7] 郭海涛, 阳宪惠. 安全系统的安全完整性水平及其选择 [J]. *化工自动化及仪表*, 2006 (2) : 71 – 75.

(Guo Hai-tao, Yang Xian-hui. Safety integrity level and choice of security system [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2006 (2) : 71 – 75.)

[8] Omeiri H, Innal F, Hamaidi B. Safety integrity evaluation of a butane tank overpressure evacuation system according to IEC 61508 standard [J]. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2015, 15 (6) : 892 – 905.

[9] 靳江红, 吴宗之, 胡玢. 对功能安全基础标准 IEC61508 的研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2009, 5 (2) : 71 – 75.

(Jin Jiang-hong, Wu Zong-zhi, Hu Fen. Research on functional safety basic standard IEC61508 [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2009, 5 (2) : 71 – 75.)

[10] Piesik E, Sliwinski M, Barnert T. Determining and verifying the safety integrity level of the safety instrumented systems with the uncertainty and security aspects [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2016, 152: 259 – 272.

[11] Ahn J, Chang D. Fuzzy-based HAZOP study for process industry [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 317: 303 – 311.

[12] Alimohamdadi I, Jalilian M, Nadi M. Determination of safety integrity level (SIL) using LOPA method in the emergency shutdown system (ESD) of hydrogen unit [J]. *Iranian Journal of Health, Safety & Environment*, 2014, 1 (4) : 191 – 195.

[13] Baybutt P. Overcoming challenges in using layers of protection analysis (LOPA) to determine safety integrity levels (SILs) [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 48: 32 – 40.

[14] 周荣义, 李石林, 刘何清. HAZOP 分析中 LOPA 的应用研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20 (7) : 76 – 81.

(Zhou Rong-yi, Li Shi-lin, Liu He-qing. Study on application of LOPA in HAZOP [J]. *China Safety Science Journal*, 2010, 20 (7) : 76 – 81.)