

# 基于LOPA方法的大型氨制冷系统安全完整性评估方法

孙胜利, 齐琳

北京国信安技术有限公司, 北京

收稿日期: 2021年8月20日; 录用日期: 2021年9月5日; 发布日期: 2021年9月23日

---

## 摘要

本文采用LOPA的风险评估方法, 针对国家雪橇雪车中心氨制冷系统识别潜在的运行风险, 对装置的设计及操作中存在的风险进行识别, 提出建议措施, 为下一步设计提供参考。

## 关键词

安全完整性等级(SIL), 国家雪橇雪车中心, 安全仪表系统(SIS), 保护层分析LOPA

---

# Safety Integrity Assessment Method for Large Ammonia Refrigeration Systems Based on LOPA

Shengli Sun, Lin Qi

Beijing GXAK Technology Ltd., Beijing

Received: Aug. 20<sup>th</sup>, 2021; accepted: Sep. 5<sup>th</sup>, 2021; published: Sep. 23<sup>rd</sup>, 2021

---

## Abstract

This paper uses LOPA as a risk assessment method. This study analyses potential operational risks in ammonia refrigeration system at the National Snowmobile Center, aiming to identify risks in design as well as operation of the device. Furthermore, the study gives some significant recommendations for action, providing a reference for the next step design.

## Keywords

Safety Integrity Level (SIL), National Snowmobile Center, Safety Instrumented System (SIS), Layer of Protection Analysis (LOPA)

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

保护层分析(LOPA)是在定性危害分析的基础上,进一步评估保护层的有效性,并进行风险决策的系统方法。其主要目的是确定是否有足够的保护层使其风险满足企业的风险标准。

通过对场景识别与筛选,确认初始事件(IE),对独立保护层(IPL)进行评估、场景频率计算,根据风险评估与决策,确定风险是否可接受。可接受则进入下一场景,不可接受,则考虑风险降低的措施返回独立保护层(IPL)进行评估,直至所有场景分析完毕。

本文基于危险与可操作性(HAZOP)方法对国家雪车雪橇中心氨制冷系统中的危险因素进行分析,对SIS评估的3个SIF回路进行了SIL等级选择,并提出建议措施[1]。

## 2. 氨制冷系统的工艺背景/流程

经制冷压缩机压缩的高温高压氨气进入蒸发式冷凝器冷凝成常温高压氨液,经节流降温降压后进入低压循环桶,再经液氨泵供至雪橇雪车赛道下的制冷盘中恒温恒压部分蒸发制冷,汽液两相氨经回气管回至低压循环桶进行分离,氨气返回制冷压缩机再次压缩,如此循环达到制冷的目的。

氨制冷原理示意图见图1:

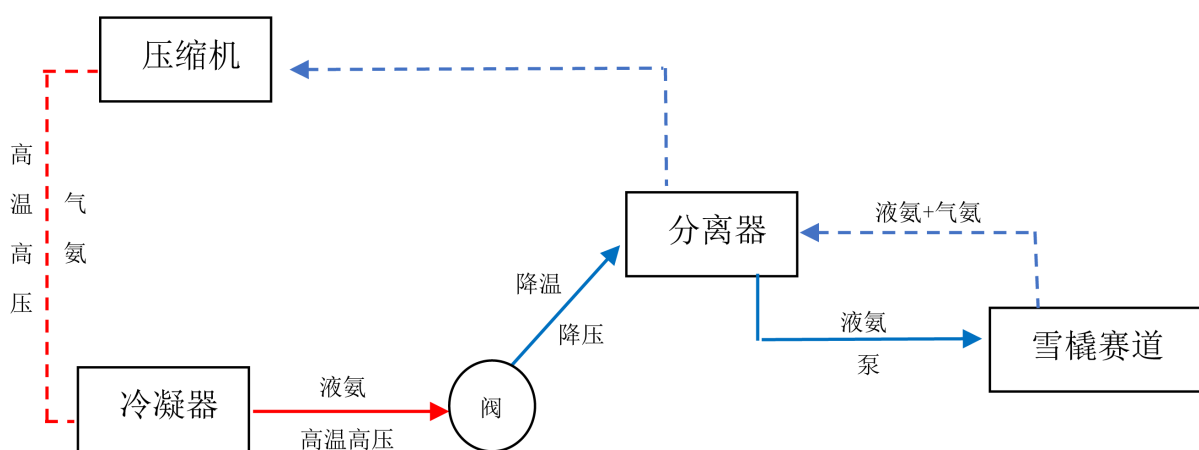


Figure 1. Schematic diagram of ammonia refrigeration principle

图1. 氨制冷原理示意图

制冷系统采用“R717”作为制冷系统的制冷工质,系统供液型式为氨泵强制供液,系统氨液总充注量为87.5 t。制冷主机采用变频且内容积比可调的单级带经济器补气功能的螺杆式制冷压缩机,制冷主机共用一台经济器,经济器形式为闪发式,工质冷却螺杆压缩机组的油冷却器。

采用氨直接制冷, 在一个密闭的系统内循环使用, 利用氨的沸点随压力变化而变化的特征, 即氨的压力越低, 沸点越低; 压力越高, 沸点越高。利用压缩机做功, 将气相的氨气压缩、冷却冷凝成液相, 然后使其减压、膨胀、汽化(蒸发), 从被冷物质(雪车赛道)中吸取热量降低其温度, 而达到赛道处于冷冻状态的目的。

### 3. 氨制冷系统分析方法的采用

根据氨制冷系统的特点, 可以采用预先危险性分析、事故树分析、事故后果模拟分析、HAZOP 分析等等。

预先危险分析也称初始危险分析, 是在每项生产活动之前, 特别是在设计的开始阶段, 对系统存在危险类别、出现条件、事故后果等进行概略地分析, 尽可能评价出潜在的危险性。因此, 该方法也是一份实现系统安全危害分析的初步或初始的计划, 是在方案开发初期阶段或设计阶段之初完成的。

事故树分析是系统安全分析中最重要的定量分析方法之一, 是一种表示故障事件发生原因及其逻辑关系的逻辑树图。

HAZOP 分析的侧重点是工艺部分或操作步骤的各种具体值, 其基本过程就是以引导词为引导, 对过程中工艺状态可能出现的变化加以分析, 找出其可能导致的危害。对于新建项目当工艺设计要求很严格时使用 HAZOP 方法最为有效。

事故后果模拟分析是运用数学模型, 通过模拟计算机软件对火灾爆炸和中毒事故等后果进行模拟分析, 对事故后果进行分析。

氨制冷系统安全完整性分析是在 HAZOP 分析的基础上, 通过 LOPA 对系统进行保护层分析, 通过分析结果对配置的 SIF 回路指定其所需的 SIL 等级, 为设计提供是否需要设置安全仪表系统的建议措施。

## 4. 氨制冷系统安全完整性分析

### 4.1. 影响氨制冷系统安全性的因素

影响氨制冷系统安全性的因素, 从安全风险管理的四要素来看包括人、机、环、管四个方面。

操作的不安全性主要指现场指挥的不安全性, 失职, 决策失误, 人员身体状况不佳。

没有按规定配备必需的设备, 设备选型, 设备安装不符合要求, 设备维护保养不到位, 设备保护不安全, 有效防护设施不齐全、完好, 警示标识不齐全。

环境包括自然地址和工作环境两方面, 危险、有害因素主要有不良地质、雷击、地震、风沙、低温、高温等。

管理包括组织机构不合理、不健全, 机构职责不明, 规章制度不齐全, 文件记录不符合要求, 作业规程, 操作规程, 安全技术规程不符合规定, 未制定应急救援预案, 岗位职责不明, 员工安全教育培训不符合规定等。

以上无论哪个方面出现问题均可能会影响氨制冷系统的整体安全性。

### 4.2. 安全完整性 SIL 介绍

SIL 即 Safety Integrity Level 的缩写, 意思为安全完整性等级, 是由每小时发生的危险失效概率来区分。国际 IEC 标准中共规定了四个 SIL 等级, SIL 4 表示最高的完整性程度, SIL 1 表示最低。

SIL 等级定义见表 1:

**Table 1.** SIL grade definition table  
**表 1.** SIL 等级定义表

安全完整性等级(SIL)	要求时失效概率(PFD)目标平均值
4	$\geq 10^{-5}$ 至 $< 10^{-4}$
3	$\geq 10^{-4}$ 至 $< 10^{-3}$
2	$\geq 10^{-3}$ 至 $< 10^{-2}$
1	$\geq 10^{-2}$ 至 $< 10^{-1}$

注: 该表摘自 IEC 61511-1, 表 3。

### 4.3. SIL 定级程序

SIL 定级依据以下程序执行:

先确定系统是否适用于 LOPA 分析方法, 在进行 LOPA 分析前, 确定以下分析标准: a) 后果度量形式及后果分级方法; b) 后果频率的计算方法; c) IE 频率的确定方法; d) IPL 要求时的失效概率(PFD)的确定方法; e) 风险度量形式和风险可接受标准; f) 分析结果与建议的审查及后续跟踪。

再根据 LOPA 基本流程对系统进行保护层分析, 通过分析结果对配置的 SIF 回路指定其所需的 SIL 等级。

### 4.4. LOPA 方法流程

1) 场景识别与筛选。LOPA 通常评估先前危害分析研究中识别的场景。分析人员可采用定性或定量的方法对这些场景后果的严重性进行评估, 并根据后果严重性评估结果对场景进行筛选;

2) 初始事件确认。首先, 选择一个事故场景, 一次 LOPA 分析只能选择一个场景; 然后确定场景(IE)。场景包括外部事件、设备故障和人员行为失效;

3) IPL(独立保护层)评估。是 LOPA 的核心内容, 评估已采取的防护措施是否满足 IPL 的要求;

4) 场景频率计算。将后果、场景频率和 IPL 的要求时失效概率(PFD)等相关数据进行计算, 确定场景风险;

5) 评估风险, 做出决策。根据风险评估结果, 确定是否采取相应措施降低风险。然后, 重复步骤 2~5 直到所有的场景分析完毕;

6) 后续跟踪和审查。LOPA 分析完成后, 对提出降低风险措施的落实情况应进行跟踪。应对 LOPA 的程序和分析结果进行审查[2]。

### 4.5. 基于 LOPA 确定 SIL 等级

根据 LOPA 分析技术, 风险的定量计算可以如式(1)所示。

$$f_i = f_i^l \left( \prod_{i=1}^J PFD_i \right) \quad (1)$$

式中,  $f_i$  是事故后果发生的概率,  $f_i^l$  是初始事件频率,  $PFD_i$  是保护层要求时失效概率。

$PFD_i$  削减后的引起人员致死的概率计算公式如式(2)所示。

$$f_i = f_i^l \left( \prod_{i=1}^J PFD_i \right) \times P^{ig} \times P^{ex} \times P^s \quad (2)$$

$P^{ig}$  是点火概率,  $P^{ex}$  是人员受影响的概率,  $P^s$  是人员致死概率。根据计算剩余风险结果与可接受风险值做比较, 判断风险是否处于可接受的范围, 从而判断事故场景所需要的最低安全完整性 SIL 等级[2]。

#### 4.6. 案例分析

通过分析在氨制冷系统中由于冷凝器冷凝风扇故障,引起压缩机出口憋压, 压缩机有毒气体监测高高报警(四取一), 压缩机房内氨气集聚, 可能导致人员中毒。氨气积聚, 达到爆炸极限, 与空气形成爆炸性混合物, 有发生爆炸事故的可能。

独立保护层(IPL)为报警及操作人员响应的描述为: 1) 压力设有高报警, 并连锁依次启动其他冷凝器; 2) 设有压缩机出口压力高报警, 并高高连锁停压缩机; 3) 设有冷凝器冷凝风扇运行指示报警; 4) 压缩机房内设有 12 个氨气检测报警仪, 任何一个高报警时连锁启动事故风机。其 PFD 值为  $1 \times 10^{-2}$ , 通过 LOPA 方法做安全完整性评估, 后果分类为财产时, 目标 SIL 无要求; 后果分类为人员时目标 SIL 等级为 SIL1; 后果分类为环境时目标 SIL 等级为 SILA。

场景一: 以“人员”为后果分类, 压缩机有毒气体监测报警装置 4 个点中的 1 个高高报警。初始事件 IE 一般包括外部事件、设备故障和人员失误, 具体分类见表 2:

Table 2. Initial event classification table

表 2. 初始事件分类表

类别	外部事件	设备故障	人员失误
分类	a) 地震、海啸、龙卷风、飓风、洪水、泥石流、滑坡和雷击等自然灾害 b) 空难 c) 临近工厂的重大事故 d) 破坏或恐怖活动 e) 邻近区域火灾或爆炸 f) 其他外部事件	1) 控制系统故障(如硬件或软件失效、控制辅助系统失效) 2) 设备故障 a) 机械故障(如泵密封失效、泵或压缩机停机); b) 腐蚀/侵蚀/磨蚀; c) 机械碰撞或振动; d) 阀门故障; e) 管道、容器和储罐失效; f) 泄漏等 3) 公用工程故障(如停水、停电、停气、停风等) 4) 其他故障	a) 操作失误 b) 维护失误 c) 关键响应错误 d) 作业程序错误 e) 其他行为失误

经确认初始事件为水泵(P11-14)其中某一个故障, 引起压缩机出口憋压, 其等级为 L7, 频率为  $1.0E-01$ 。通过结合国际/国内同类公司采用的可容忍风险等级, 推荐了不同后果的风险可容忍水平, 最终经过业主确认了适合本公司的可容忍风险等级。通过对独立保护层(IPL)分析评估, 所要求时失效概率(PFD)在报警及操作人员响应方面为  $1.0E-02$ , 在其他减缓措施, 限制人员进入等方面为  $1.0E-01$ 。将后果、IE 频率和 IPL 的 PFD 等相关数据进行计算, 减缓后的频率为  $1.0E-04$ , 可容许后果的频率  $1.0E-06$ , 得出风险降低目标(SIF)值为  $1.0E-02$ , 目标 SIL 值为 SIL1, 需要采取措施降低风险。

场景二, 以“环境”为后果分类, 压缩机有毒气体监测报警装置 4 个点中的 1 个高高报警。经确认初始事件为水泵(P11-14)其中某一个故障, 引起压缩机出口憋压, 其等级为 L7, 频率为  $1.0E-01$ 。通过对独立保护层(IPL)分析评估, 所要求时失效概率(PFD)在报警及操作人员响应方面为  $1.0E-02$ , 在其他减缓措施, 限制人员进入等方面为  $1.0E-01$ 。将后果、IE 频率和 IPL 的 PFD 等相关数据进行计算, 减缓后的频率为  $1.0E-04$ , 可容许后果的频率  $1.0E-05$ , 得出风险降低目标(SIF)值为  $1.0E-01$ , 目标 SIL 值为 SILA, 这个回路 SIF 可以保留, 但可以通过 DCS 实现。

其他场景重复分析完毕, 得出压缩机房氨泄漏二级报警 SIL 等级为 SIL1。

SIL 等级选择计算情况见表 3。

**Table 3.** SIL grade selection calculation table  
**表 3.** SIL 等级选择计算表

编号	SIF回路描述	后果描述	后果分类	严重程度	初始事件		促成必要事件条件		条件修正(如果适用)		独立保护层 (IPL)			可容许后果的频率	减缓后果的频率	风险降低目标 (SIF)	目标 SIL	备注	建议	责任方
					描述	等级	频率	描述	可能性	描述	概率	类型	描述							
2.1	压缩机房有毒气体监测高高(四取一)	压缩机房内氨气聚集, 人员中毒, 环境污染遇高温火源可能发生火灾爆炸(超压工况引起)	财产	S4	水泵P11-14故障, 引起压缩机出口憋压	L7	1.0E-01	NA	1	使用率 人员暴露 概率	基本设计 工艺流程 控制系统	1、设有压力PT-ZD001高报警并连锁依次启动其他冷冻器 2、压缩机出口设有压力高报警并高高报警及操作人员响应 3、水泵P11-14故障设有运行指示报警 4、压缩机房设有12个氨气高报警器, 任何一个高报警时启动事故风机	1.0E-02	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-00	无要求			
2.2	压缩机房有毒气体监测高高(四取一)	压缩机房内氨气聚集, 人员中毒, 环境污染遇高温火源可能发生火灾爆炸(超压工况引起)	人员	S5	水泵P11-14故障, 引起压缩机出口憋压	L7	1.0E-01	NA	1	使用率 人员暴露 概率	基本设计 工艺流程 控制系统	1、设有压力PT-ZD001高报警并连锁依次启动其他冷冻器 2、压缩机出口设有压力高报警并高高报警及操作人员响应 3、水泵P11-14故障设有运行指示报警 4、压缩机房设有12个氨气高报警器, 任何一个高报警时启动事故风机	1.0E-02	1.0E-04	1.0E-06	1.0E-02	SIL1			
2.3	压缩机房有毒气体监测高高(四取一)	压缩机房内氨气聚集, 人员中毒, 环境污染遇高温火源可能发生火灾爆炸(超压工况引起)	环境	S5	水泵P11-14故障, 引起压缩机出口憋压	L7	1.0E-01	NA	1	使用率 人员暴露 概率	基本设计 工艺流程 控制系统	1、设有压力PT-ZD001高报警并连锁依次启动其他冷冻器 2、压缩机出口设有压力高报警并高高报警及操作人员响应 3、水泵P11-14故障设有运行指示报警 4、压缩机房设有12个氨气高报警器, 任何一个高报警时启动事故风机	1.0E-02	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-01	SILA			

## 4.7. LOPA 分析总结

本次对国家雪车雪橇中心氨制冷系统项目 SIS 评估的 3 个 SIF 回路通过保护层分析(LOPA)进行了 SIL 等级分析。

SIF 测量仪表位号为压缩机房氨泄漏二级报警(氨气爆炸下限的 10%) (四取一), SIF 功能名称为联锁系统全部断电(气液分离器 B1/B2 进出口共 14 个阀门全部关闭)的 SIL 等级要求为 SIL1, 这个 SIF 必须通过 SIS 实现[3] [4]。

## 5. 结论

本文通过对安全完整性等级 SIL 评估流程做了一定的阐述。在确定 SIL 的评估方法中, LOPA 分析法作为一种定量分析方法, 其结果更加准确。

本文以国家雪车雪橇中心氨制冷系统项目为例, 对 LOPA 分析确定 SIL 的过程做了详细的阐述, 对氨制冷系统装置工艺过程起到了很好的保障作用。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国质量检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会发布. 保护层分析(LOPA)应用指南[EB/OL]. GB/T 32857-2016, ICS 25.040 N 10. <http://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=0275D634948F185297479803BA33FC89>, 2021-07-25.
- [2] 国家安全生产监督管理总局发布. 保护层分析(LOPA)方法应用导则[EB/OL]. AQ/T 3054-2015, ICS 13.200 C 67 备案号: 49407-2015. <https://www.mem.gov.cn/fw/flfgbz/bz/bzwb/201506/P020190327398811597955.PDF>, 2021-07-25.
- [3] 朱灵波. 基于 HAZOP 与 LOPA 的输油站场泄压罐风险分析[J]. 化工设计通讯, 2021(6): 37-38.
- [4] 董梅. LOPA 方法在加氢装置安全完整性等级上的研究[J]. 山东化工, 2021, 7(50): 122-123.