

基于HAZOP的大型氨制冷系统风险评估方法

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19日; 录用日期: 2021年9月4日; 发布日期: 2021年9月18日

摘要

本文以液氨制冷系统作为1个节点进行分析, 以气液分离器B1压力过高导致压缩机S1-S5排气管道PT-ZD001压力过高为例, 详细描述了HAZOP分析过程, 提出建议确认压缩机启停逻辑关系, 确保个别压缩机故障时, 其他压缩机可以正常启动运行。

关键词

HAZOP方法, 国家雪橇雪车中心, 氨制冷, 风险等级

HAZOP-Based Risk Assessment Method for Large-Scale Ammonia Refrigeration System

Shengli Sun, Lin Qi

Beijing GXAK Technology Ltd., Beijing

Received: Aug. 19th, 2021; accepted: Sep. 4th, 2021; published: Sep. 18th, 2021

Abstract

This paper takes the liquid ammonia refrigeration system as single node for analysis, considering the high pressure of the gas-liquid separator B1 resulting in the high pressure of the discharge pipe PT-ZD001 of compressor S1-S5 as an example. The HAZOP analysis process is described in detail, and the compressor start-stop logic is suggested to be confirmed in order to ensure that other compressors can start and run normally when individual compressors fail.

Keywords

HAZOP Method, National Snowmobile Center, Ammonia Refrigeration, Risk Level

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

氨制冷系统由于其具有高效、低成本及环境友好及特性, 被广泛应用于工业制冷环境, 其制冷方式主要包括间接蒸发式制冰系统和直接蒸发式制冰系统。其中间接蒸发式制冰系统采用氟利昂 + 乙二醇(盐水)作为制冷剂, 直接蒸发式制冰系统又包括二氧化碳制冷系统和氨制冷系统。

但由于氨制冷方式的广泛应用, 对氨制冷系统的安全性评估至关重要, 氨制冷剂由于其具有易燃、有毒、与铜不兼容等特性, 氨制冷系统具有一些潜在的安全风险, 主要涉及火灾、爆炸, 中毒和窒息, 压力容器爆炸等。

危险与可操作性(HAZOP)分析是一种基于系统工程理论, 可用于定性分析的危险性评价方法, 用于探明生产装置和工艺过程中的危险及其原因并寻求必要对策, 是安全设计的重要方法, 目前在国外, HAZOP 分析作为一种安全分析与评价方法已经运用于油气田工程和化工企业中, 在国内, HAZOP 分析方法也已经逐渐用在如油品加氢精制装置风险研判[1]、危险废物焚烧处理[2]、材料合成工艺等领域[3]。

本文基于 HAZOP 分析方法, 对国家雪橇雪车中心氨制冷装置的设计及操作中存在的风险进行识别, 对危险因素进行定性分析, 辨识存在的安全隐患, 并针对不同危险因素提出相应措施, 这些建议都是关于设计方案、安全性评价和如何改进的, 将会降低潜在的安全风险或者导致可操作性问题[4]。

2. 氨制冷系统的工艺背景/流程

如图 1, 氨制冷原理主要是氨气相、液相的制冷转化过程, 不存在化学反应。

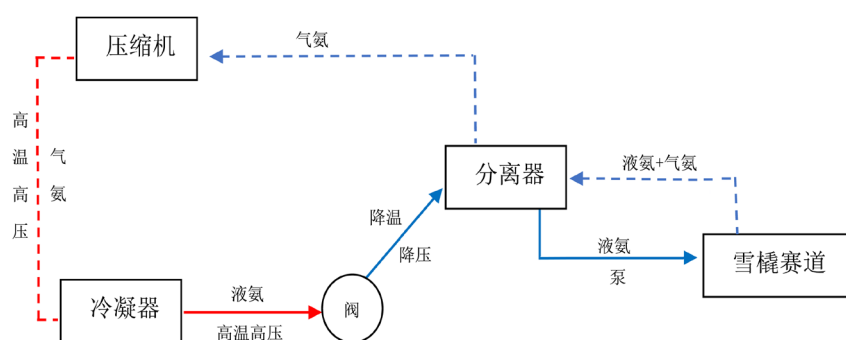


Figure 1. Schematic diagram of ammonia refrigeration principle

图 1. 氨制冷原理示意图

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, 将气相的氨气通过压缩、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, 而达到赛道始终处于冷冻状态的目的。

具体的制冷工艺过程主要是压缩机吸入低压的氨气, 进行压缩后, 成为高压、高温氨气, 经油气分离后进入冷凝器冷却, 释放热量后成为高压、常温液氨, 进入贮氨器, 从贮氨器来的液氨经调节阀减压后, 进入低压循环桶, 经氨泵供至雪橇雪车赛道下冷盘管为赛道降温, 而液氨则蒸发成氨气, 返回低压循环桶, 气液分离(防止氨液进入氨压缩机产生液力冲击造成事故), 氨气再进入压缩机, 氨冷系统即如此往复循环制造冷量。

3. 氨制冷系统 HAZOP 分析

3.1. HAZOP 分析说明

1) 会议时间

HAZOP 分析小组于 2019 年 6 月 20 日在位于华商国际工程有限公司会议室进行了 HAZOP 分析, 共 1 个工作日。

2) 会议参加人员

包括建设单位、设计单位的工艺工程师、仪表工程师、操作代表、设备工程师、安全工程师等人员组成。

3) 分析范围

国家雪车雪橇中心氨制冷系统项目。

4) 分析依据

主要包括工艺流程图、PID 图、工艺平面布置图、设备资料、操作规程等。其中 PID 图是分析的重点。氨制冷系统 PID 图主要包括氨压缩、循环水、氨输送的 PID 图。

3.2. HAZOP 分析方法

1) 引导词及偏差确定方法

对于每一节点, HAZOP 分析组以正常操作运行的工艺参数为标准值, 分析运行过程中工艺参数的变动(即偏差), 这些偏差通过引导词和工艺参数引出。确定偏差最常用的方法是引导词法, 即:

$$\text{偏差} = \text{引导词} + \text{工艺参数} \quad (1)$$

2) 分析顺序

HAZOP 分析顺序有两种: “要素优先”和“引导词优先”。“要素优先”是选取要素在先, 选择引导词在后, 侧重于系统的组成; “引导词优先”是选取引导词在先, 选择要素在后, 对 HAZOP 主席要求较高, 要按照分析方法, 调动大家一起来讨论、分析。氨制冷系统采用“引导词优先”进行分析。

3) 分析流程

本文中氨制冷系统 HAZOP 分析流程如图 2。

3.3. HAZOP 风险评估

HAZOP 分析可识别出装置可能存在的设计缺陷、设备故障等可能带来的各种后果, 提出控制或降低风险以及改善工艺系统可操作性的措施, 从而防止事故的发生或减小事故可能的后果。对每一个“原因—后果”对偶形成的危险进行风险评估[4]。

原国监总局《关于开展提升危险化学品领域本质安全水平专项行动的通知》安监总管三(2012) 87 号要求: 对涉及“两重点一重大”(涉及液氨、三级重大危险源)危险化学品装置, 应在项目基础设计阶段进行装置 HAZOP 分析。

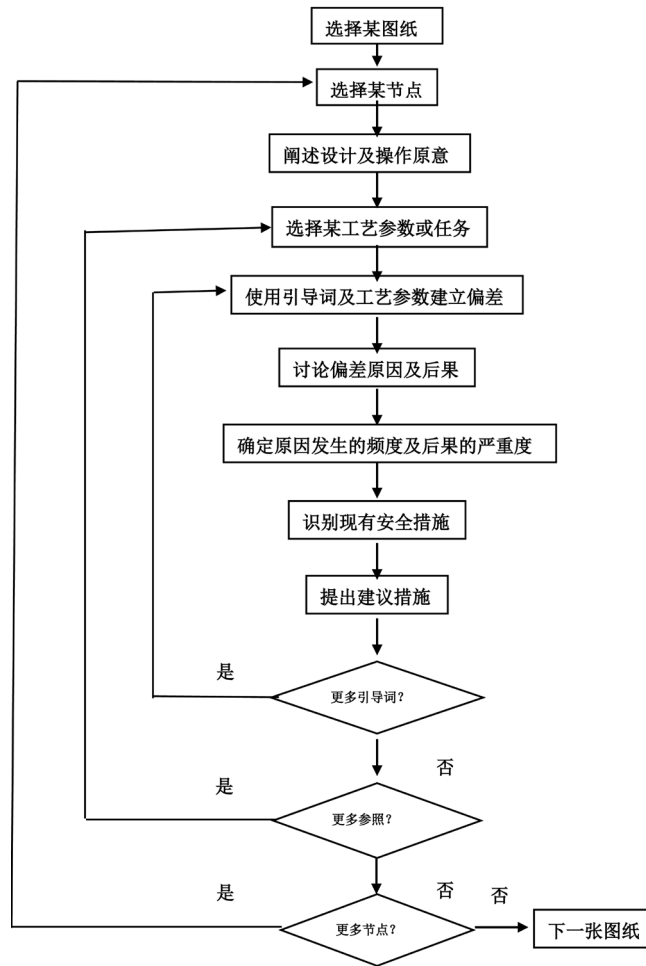


Figure 2. HAZOP analysis flow chart
图 2. HAZOP 分析流程图

HAZOP 分析中通过事件发生的可能性和严重性判断风险等级。图 3 为 HAZOP 分析矩阵及可接受风险图。

发生频率 (a)		风险等级 (R)				
$1 \sim 10^{-1}$	L7	中	中	高	极其	极其
$10^{-1} \sim 10^{-2}$	L6	中	中	中	高	极其
$10^{-2} \sim 10^{-3}$	L5	低	中	中	高	高
$10^{-3} \sim 10^{-4}$	L4	低	低	中	中	高
$10^{-4} \sim 10^{-5}$	L3	低	低	低	中	中
$10^{-5} \sim 10^{-6}$	L2	低	低	低	低	中
$10^{-6} \sim 10^{-6}$	L1	低	低	低	低	低
后果等级 (C)		C1	C2	C3	C4	C5
		可忽略	轻微	严重	重大	灾难性

风险等级说明:
 低: 不需采取行动
 中: 可选择性的采取行动
 高: 选择合适的时机采取行动
 很高: 立即采取行动

Figure 3. HAZOP analysis matrix and acceptable risk diagram
图 3. HAZOP 分析矩阵及可接受风险图

事故的发生频率由 $1 \sim 10^{-1}/a$ 到 $10^{-6} \sim 10^{-7}/a$ 分为七级, 后果等级分为 C1~C5 五级, 矩阵中共 35 种风险等级, 分别构成低、中、高、极其高四种。低风险不须采取行动, 中风险可选择性地采取行动, 高风险选择合适的时机采取行动, 极其高风险应立即采取行动。

3.4. HAZOP 分析案例

以液氨制冷系统作为 1 个节点进行分析, 对液氨制冷系统 PID 流程图节点涉及到的偏差、原因、后果、现有保护措施进行详尽的分析, 形成分析记录表见图 4。

序号	偏差/引导词	详细偏差	原因	后果	可能性	后果严重性	原有风险	保护措施	削减后可能性	削减后严重性	削减后风险	建议
1	过低或无流量	氨道液氨流量过低	1、氨泵故障。 2、氨道各分区主供液管道阀门控制阀故障。	氨道液氨流量过低, 严重时可导致氨道温度上升, 冰融化, 氨泵变频运行状态失常, 严重时影响氨道冰面测量。	L7	C3	高	1、各单元末端设有液氨压力低报警。 2、氨泵设有运行指示报警, 采用一开一备。	L5	C3	中	建议确认氨道末端液氨压力控制器故障时的保障措施。
4	压力过高	1、压缩机S1-S5排气管道PT-Z0001压力过高	1、根据负荷启动其他压缩机时, 自动控制回路延迟或故障。 2、冷液器冷液风阀故障	压缩机S1-S5排气管道压力上升, 冷液效果下降, 严重时超压管破裂, 造成人员中毒, 环境污染, 压缩机房内氨气聚集, 遇高温火源可能发生火灾爆炸。 冷液效果下降, 压缩机S1-S5排气管道压力上升, 严重时超压管破裂, 造成人员中毒, 环境污染, 压缩机房内氨气聚集, 遇高温火源可能发生火灾爆炸。	L7	C5	极其	1、设有压力PT-Z0001高报警并联锁依次启动其他冷液器。 2、压缩机出口设有压力高报警并高高联锁停压缩机。 3、压缩机出口设有安全泄压阀并引至气液分离器。 4、机房内有氨气泄漏报警器并联锁启动应急风机通风系统。 5、冷液器冷液风阀设有运行指示报警。 1、设有压力PT-Z0001高报警并联锁依次启动其他冷液器。 2、压缩机出口设有压力高报警并高高联锁停压缩机。 3、压缩机出口设有安全泄压阀并引至气液分离器。 4、机房内有氨气泄漏报警器并联锁启动应急风机通风系统。 5、冷液器冷液风阀设有运行指示报警。	L3	C5	中	
					L7	C5	极其	1、设有压力PT-Z0001高报警并联锁依次启动其他冷液器。 2、压缩机出口设有压力高报警并高高联锁停压缩机。 3、压缩机出口设有安全泄压阀并引至气液分离器。 4、机房内有氨气泄漏报警器并联锁启动应急风机通风系统。 5、冷液器冷液风阀设有运行指示报警。 1、设有压力PT-Z0001高报警并联锁依次启动其他冷液器。 2、压缩机出口设有压力高报警并高高联锁停压缩机。 3、压缩机出口设有安全泄压阀并引至气液分离器。 4、机房内有氨气泄漏报警器并联锁启动应急风机通风系统。 5、冷液器冷液风阀设有运行指示报警。	L2	C5	中	
					L7	C5	极其	1、设有压力PT-Z0001高报警并联锁依次启动其他冷液器。 2、压缩机出口设有压力高报警并高高联锁停压缩机。 3、压缩机出口设有安全泄压阀并引至气液分离器。 4、机房内有氨气泄漏报警器并联锁启动应急风机通风系统。 5、冷液器冷液风阀设有运行指示报警。 1、设有压力PT-Z0001高报警并联锁依次启动其他冷液器。 2、压缩机出口设有压力高报警并高高联锁停压缩机。 3、压缩机出口设有安全泄压阀并引至气液分离器。 4、机房内有氨气泄漏报警器并联锁启动应急风机通风系统。 5、冷液器冷液风阀设有运行指示报警。	L2	C5	中	
					L6	C3	中	1、冷液器进、出口阀门故障关闭, 环境温度较高时, 冷液器内氨气管道压力升高, 严重时超压泄漏, 造成人员中毒, 环境污染。 2、冷液器进、出口阀门故障关闭, 环境温度较高时, 冷液器内氨气管道压力升高, 严重时超压泄漏, 造成人员中毒, 环境污染。	L5	C3	中	
					L7	C5	极其	1、气液分离器B1压力过高, 严重时超压泄漏, 造成环境污染, 压缩机房内氨气聚集, 遇高温火源可能发生火灾爆炸。 2、压缩机故障。	L3	C5	中	建议确认压缩机后逻辑关系, 确保个别压缩机故障时, 其他压缩机可以正常启动运行。
					L7	C5	极其	1、气液分离器B1压力过高, 严重时超压泄漏, 造成环境污染, 压缩机房内氨气聚集, 遇高温火源可能发生火灾爆炸。 2、压缩机故障。	L5	C5	高	

Figure 4. HAZOP analysis record sheet
图 4. HAZOP 分析记录表

根据引导词的方法分析工艺参数。通过详细偏差、原因、后果、后果的严重性等分析出原有风险, 提出保护措施后得出的削减后可能性、削减严重性、削减后风险。

3.5. HAZOP 分析 PID

液氨制冷系统作为 1 个节点, 所选 PID 图包含 3 张分图, 节点序号均为“1”, 设计意图为液氨送至赛道提供赛道制冷, 液氨气化后经压缩机压缩、冷凝器冷凝后送入虹吸罐、经济罐建立氨循环系统。分析流程从“使用引导词与工艺参数建立偏差”环节(HAZOP 分析流程第 5 步)开始。

示例 1:

1) 引导词(偏差)为: 压缩机排污管道压力过高;

2) 产生偏差的原因及可能导致的后果有以下几种:

① 因负荷需要调整等因素, 启动其他压缩机的时候, 存在延迟或压缩机故障, 可能导致压缩机排气管道压力上升, 严重时管线破裂, 造成人员中毒、火灾爆炸。

② 因冷凝风扇故障, 可能导致冷凝效果下降, 压缩机排气管道压力上升, 严重时管线破裂, 造成人员中毒、火灾爆炸。

③ 因水泵故障, 冷却水不能及时得到循环, 导致出现①、②的后果。

④ 因冷凝器进、出口阀门故障意外关闭, 导致出现环境温度较高, 冷凝器内氨气管道压力升高, 严重时泄漏, 造成人员中毒的后果。

⑤ 因压缩机故障, 导致气液分离器压力过高, 氨气泄漏, 造成环境污染, 机房内氨气超标, 达到爆炸极限, 遇点火源可能发生火灾爆炸。

3) 因上述原因确定发生的频率分别为 L7、L7、L7、L6 及 L7; 导致后果的严重性分别为 C5、C5、C5、C3、C5。

4) 识别已采用的安全措施分别为:

① a、设有压力 PT-ZD001 高报警并连锁依次启动其他冷凝器; b、压缩机出口设有压力高报警(压缩机单元内的压力限位开关和安全压力限位开关), 通过 Unisub 和连锁压缩机并高高连锁停压缩机; c、压缩机出口设有安全泄压阀并引至气液分离器; d、机房内设有氨气泄漏报警器并连锁启动应急风机通风系统。

② a、b、c、d 同上一条; e、冷凝器冷凝风扇设有运行指示报警。

③ a、b、c、d 同上一条; e、水泵设有运行指示报警。

④ 冷凝器氨气管道设有安全阀并引至吸收装置。

⑤ a、压缩机设有运行指示报警, 并设有 5 台压缩机; b、气液分离器 B1 设有压力 PT-ZE006 高报警; c、气液分离器 B1 设有双安全阀。

5) 针对引导词(偏差)为“压缩机排污管道压力过高”提出: “建议确认压缩机启停逻辑关系, 确保个别压缩机故障时, 其他压缩机可以正常启动运行”。

此时, 本轮“示例 1”流程完毕。通过分析, 提出下一引导词“腐蚀/冲蚀”, 继续从 HAZOP 分析流程第 5 步开始。

示例 2:

1) 引导词(偏差)为: 换热器腐蚀;

2) 产生偏差的原因及可能导致的后果为: 因氨、水板壳式换热器内漏, 氨气泄漏至水循环系统, 可能导致氨、水板壳式换热器内漏, 氨气泄漏至水循环系统, 严重时造成设备腐蚀。

3) 确定发生的频率为 L7; 导致后果的严重性为 C2。

4) 识别未采用安全措施。

5) 针对引导词(偏差)为“换热器腐蚀”提出：“建议氨、水板壳式换热器的水系统增加在线氨离子探测器”。

此时, 本轮“示例 2”流程完毕。

以此类推, 分步完成 HAZOP 分析。

PID 附图截图:

氨制冷系统 HAZOP 分析部分 PID 图截图如图 5~7。

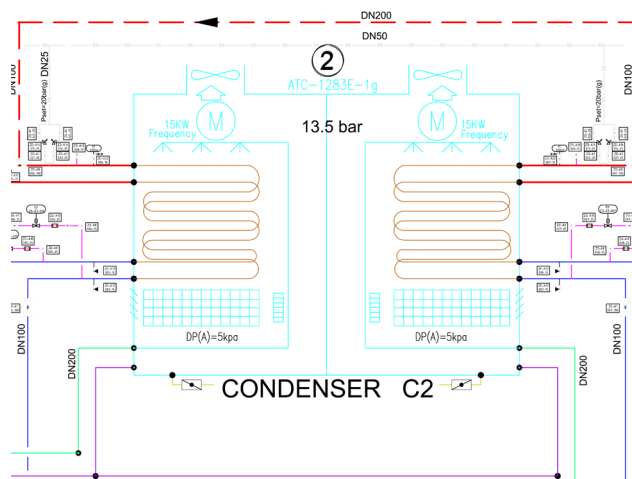


Figure 5. Screenshot of part of the PID diagram (1)
图 5. 部分 PID 图截图(一)

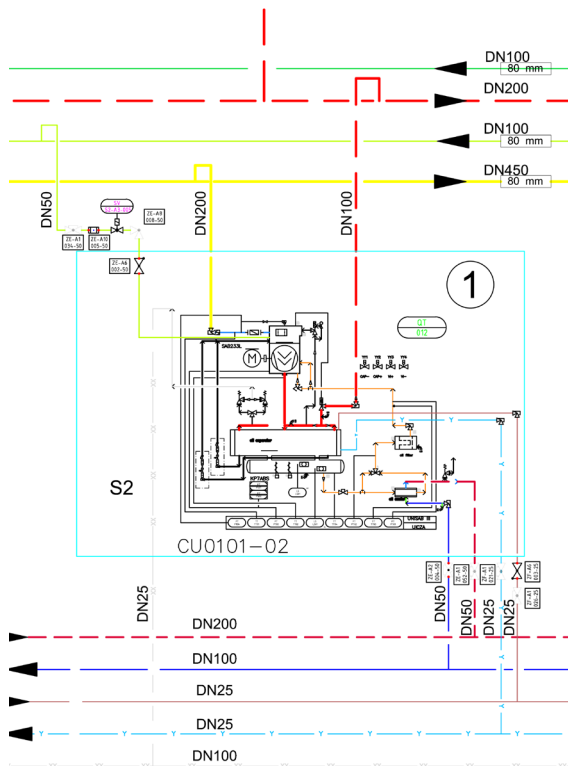


Figure 6. Screenshot of part of the PID diagram (2)
图 6. 部分 PID 图截图(二)

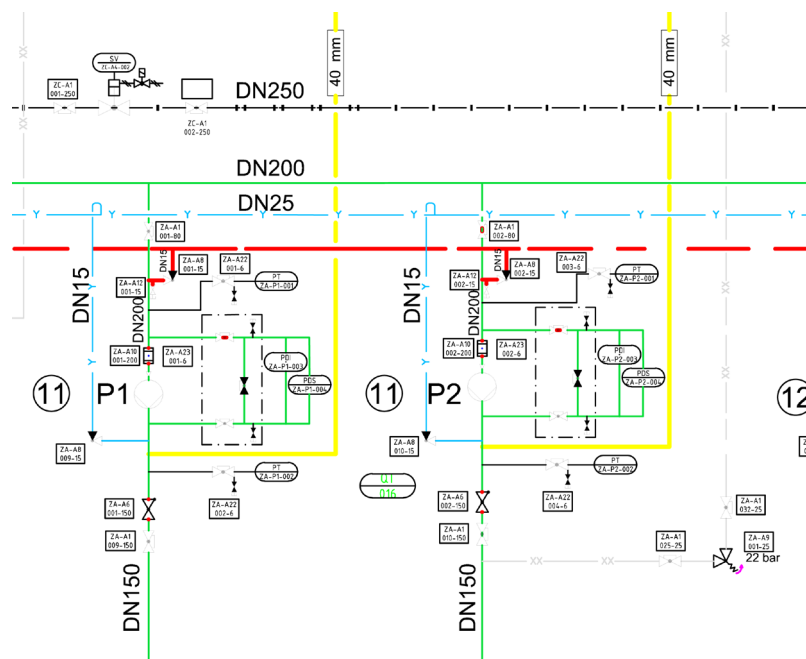


Figure 7. Screenshot of part of the PID diagram (3)
图 7. 部分 PID 图截图(三)

4. 结论

氨制冷系统能否正常工作, 直接关系到雪车雪橇中心的正常运行, 氨制冷系统在国内运行的不在少数, 但是在雪车雪橇赛道上运用还是第一次。

本文采用 HAZOP 分析技术对氨制冷系统的危险因素进行辨识, 例如: 针对氨气压缩机排污管道压力过高及换热器腐蚀可能产生的后果, 分析装置、工艺的安全控制措施, 以风险的系统防控为出发点, 提出必要的安全控制措施建议, 结果显示通过运用 HAZOP 对工艺部分或操作步骤的各种具体值的分析, 可大大提升设计的安全可靠性。

参考文献

- [1] 张鑫, 孟邹清, 朱旭营, 王倩琳. 基于 HAZOP-BN 的油品加氢精制装置风险研判方法[J]. 中国仪器仪表, 2021(6): 69-76.
- [2] 曹伟华. HAZOP 分析在危险废物废液罐区工艺设计中的应用[J]. 广东化工, 2021, 48(9): 215-217.
- [3] 杨丽艳, 沈建琴. HAZOP 分析技术在甲基四氢苯酐合成工艺中的应用[J]. 化工管理, 2021(18): 80-81.
- [4] Meng, Y.F., Song, X.M., Zhao, D.F. and Liu, Q.L. (2021) Alarm Management Optimization in Chemical Installations Based on Adapted HAZOP Reports. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 72, Article No. 104578. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104578>