

中文引用格式:陈文涛,杨茗铠,王文和,等.基于SDG和CBR的化工过程风险评价[J].中国安全科学学报,2025,35(3):77-84.

英文引用格式:CHEN Wentao, YANG Mingkai, WANG Wenhe, et al. Chemical process risk assessment utilizing SDG and CBR methodologies [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(3): 77-84.

基于SDG和CBR的化工过程风险评价*

陈文涛¹ 副研究员, 杨茗铠², 王文和^{2,3} 教授, 宋宏伟², 孙超¹ 教授级高级工程师

(1 应急管理部 信息研究院, 北京 100029; 2 重庆科技大学 安全科学与工程学院, 重庆 401331; 3 油气生产安全与风险控制重庆市重点实验室, 重庆 401331)

中图分类号: X937

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.03.1368

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3017000); 重庆高校创新研究群体项目(CXQT20028); 重庆市教委科学技术研究重点项目(KJZD-K20220-1505); 重庆市自然科学基金重点项目资助(CSTB2023TIAD-KPX0089)。

【摘要】 为全面高效率分析与评价化工过程风险,设计开发基于符号有向图(SDG)与案例推理(CBR)的化工过程风险分析与评价辅助系统,并集成保护层分析(LOPA)和安全完整性等级(SIL)基础验算功能,实现风险的半定量化分析和评价。此外,利用CBR技术实现对化工过程历史案例经验的有效保存与复用,提高危险与可操作性分析(HAZOP)和评价辅助系统的使用功效。采用该系统开展丙烯氧化制取丙烯酸化工工艺风险评价,结果表明:该系统与企业自主风险评价的结果基本一致,具有良好的实用性和可靠性。SDG-CBR耦合推理机制突破传统HAZOP对人工经验的依赖,实现危险识别从定性到半定量转变,提高评估效率和准确性。

【关键词】 符号有向图(SDG); 案例推理(CBR); 危险与可操作性分析(HAZOP); 化工过程; 风险评价

Chemical process risk assessment utilizing SDG and CBR methodologies

CHEN Wentao¹, YANG Mingkai², WANG Wenhe^{2,3}, SONG Hongwei², SUN Chao¹

(1 Information Research Institute, MEM, Beijing 100029, China; 2 College of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China; 3 Chongqing Key Laboratory of Oil and Gas Production Safety and Risk Control, Chongqing 401331, China)

Abstract: To comprehensively and efficiently analyze and evaluate chemical process risks, a risk analysis and evaluation auxiliary system for chemical processes was designed and developed based on SDG and CBR. The system was integrated with foundational verification functions for layer of protection analysis (LOPA) and safety integrity level (SIL), enabling semi-quantitative risk analysis and evaluation. Additionally, CBR technology was utilized to effectively preserve and reuse historical case experiences in chemical processes, thereby enhancing the efficacy of HAZOP and the auxiliary evaluation system. The system was applied to conduct a risk evaluation of the propylene oxidation to acrylic acid process. The results demonstrate that the system aligns closely with the independent risk evaluation outcomes of the

enterprise, exhibiting strong practicality and reliability. The SDG-CBR coupling reasoning mechanism is verified to overcome the reliance of traditional HAZOP on manual experience, achieving a qualitative-to-semi-quantitative transformation in hazard identification while enhancing evaluation efficiency and accuracy.

Keywords: signed directed graph (SDG); case-based reasoning (CBR); hazard and operability analysis (HAZOP); chemical process; risk assessment

0 引言

化工行业在国民经济中居于非常重要的位置,对国家的经济发展和科技的推动具有十分重要的作用^[1]。化工行业具有生产装置集成度高、生产过程连续性强、生产设备复杂性高、生产过程风险因素多的特点^[2]。随着新技术、新产品不断地开发和利用,化工生产过程中潜在的风险因素也在不断地增加^[3]。2003—2020年,我国共发生较大以上化工安全事故至少277起,死亡1277人^[4-5]。血的教训引发了社会各界对于化工过程安全的广泛关注,积极采用各种管理技术方法让化工生产能够更加安全、稳定、高效。化工生产安全问题已经成为社会发展的重大核心问题,如何有效地评价化工过程中风险和控制风险,已成为各国政府和科研人员共同努力的方向^[6]。

危险与可操作性分析(Hazard and Operability Analysis, HAZOP)评价方法是化工过程风险评价法中应用最广、效果较好的评价方法,但HAZOP评价的缺点限制了该方法的应用^[7]。运用计算机作为化工过程风险分析与评价的辅助工具,可提高HAZOP的分析效率,但在HAZOP分析中仍存在10%的偏差,不能采用符号有向图(Signed Directed Graph, SDG)进行建模分析,将案例推理(Case-Based Reasoning, CBR)技术应用到风险评价系统中可解决上述的问题,并将评价结果保存在HAZOP案例库中形成专家经验库,利用计算机开发化工过程风险评价辅助系统,可方便企业和评价人员评价化工过程风险,这对于降低化工企业风险,实现化工企业安全生产具有积极的促进作用。

VISWANATHAN等^[8]指出,使用SDG能让HAZOP分析结果更加完备。目前,在我国最常用的是结合HAZOP与SDG来实现风险评价的计算机化。许兰娟等^[9]结合离散并行理论与SDG,以SDG模型为主体,构建一种用于间歇系统的SDG模型;刘康炜等^[10]提出一种基于SDG模型的HAZOP分析方法,该算法利用SDG的定性模型,建立一套由

计算机进行的自动推理引擎,利用逆向推理技术,可迅速、有效地挖掘出非正常原因;吴重光^[11]开发了以SDG模型为基础的HAZOP分析软件系统,在HAZOP的计算机辅助分析上起到了推动作用。综上所述,人工开展HAZOP风险评价不仅耗时,特别是对于初学者而言开展HAZOP风险评价工作比较困难。国内外相关的HAZOP系统软件在一定程度上得到了应用,但现有软件系统存在功能单一或不能进行后续量化和不能自动化HAZOP辅助推理等不足。

1982年,SCHANK等^[12]提出CBR技术,他认为CBR是以历史的经验与知识为基础,以处理新问题为目标。李潇^[13]应用CBR方法进行计算机辅助HAZOP分析,一定程度上提高了HAZOP推理的全面性、可靠性和其自动化程度,增强了推理效果的稳定性。许晶^[14]以用户HAZOP风险管理功能需求为目标,设计开发了HAZOP专家系统。鉴于此,笔者建立SDG-HAZOP模型,实现HAZOP的自动化分析,将CBR技术应用到HAZOP分析系统中,将SDG-HAZOP分析结果或过往HAZOP分析案例导入到系统之后形成经验库,实现对HAZOP分析经验的重复有效的利用学习和HAZOP的非常规分析,同时集成保护层分析(Layer Of Protection Analysis, LOPA)法和安全完整性等级(Safety Integrity Level, SIL)验算等功能,开发化工过程风险分析与评价辅助系统,以期全面提高企业和专家分析与评价化工过程风险的效率。

1 化工过程风险分析与评价方法

1.1 HAZOP-LOPA半定量风险评价方法

HAZOP风险评价方法是对设备和工艺流程开展头脑风暴式的分析评价,针对生产设备、工艺过程中存在的各种危害进行分析^[15]。LOPA法是要分析现有评价对象存在能够阻止后果发生的独立保护层及其对应的失效概率。

HAZOP确定的严重事故场景是进行LOPA的

基础,同时,HAZOP 确定偏差产生的原因和频率为 LOPA 所需的初始事件和其发生频率提供信息。HAZOP 还可找出现有的安全措施,为 LOPA 识别独立保护层提供依据^[16]。LOPA 是对 HAZOP 内容的进一步发展和具体化,结合 HAZOP 和 LOPA 可弥补 HAZOP 的不足,同时,提高评估人员对目标风险对象评价结果的理解,从而提出更科学、更具针对性的建议。

1.2 基于 HAZOP-LOPA 的 SIL 定级与验算

HAZOP 法主要分析偏差,并评价其产生的可能原因和后果,再利用 LOPA 法根据 HAZOP 的结果,筛选风险较高的危险因素场景,识别潜在的风险影响因素和有效的独立保护措施,判定已有的保护措施是否充分并评估确定所需要的 SIL^[17]。HAZOP 结合 LOPA 可以半定量分析的方式进行 SIL 的确认,因此,采用 HAZOP 与 LOPA 相结合的方法,可确保分析结果更加全面精确。

对在役的安全仪表系统(Safety Instrumented System, SIS)或开展 HAZOP-LOPA 分析后,需要验算安全仪表的 SIL,判断其是否满足 SIL 定级的要求,在实际使用中,以平均要求时失效概率(Average Probability of Failure on Demand, PFDavg)值作为 SIL 验算结果的评判准则。PFDavg 值需要满足下式:

$$PFD_{avg} \leq \frac{F_1}{F_p} \quad (1)$$

式中: F_1 为可接受风险概率; F_p 为危险事件发生概率。

通常情况下,化工安全仪表系统在低要求的操作模式下运行,即安全仪表系统的动作频率不超过每年一次。在低要求操作模式下,安全仪表的 SIL 的划分见表 1。通过相关计算得到其平均失效概率,即可确定其所属的 SIL,若计算结果的等级大于或等于所需等级,则说明仪表系统满足对应的 SIL 要求。

表 1 低要求操作模式下安全仪表功能 SIL 划分

Table 1 Classification of safety instrument function SIL levels under low requirement operating modes

序号	PFDavg	SIL 等级
1	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	1
2	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	2
3	$10^{-4} \sim 10^{-3}$	3
4	$10^{-5} \sim 10^{-4}$	4

目前,主流 SIL 验算方法有简化公式法、故障树

法、可靠性框图法和马尔可夫模型。4 种方法皆为建立数学模型来解决 SIL 等级验算问题,而 SIL 的验算应尽量使用简单有效的方法,如果使用技术难度较高的方法,如马尔可夫模型,则会使获取相关资料的难度提升,加大建模的难度,不利于 SIL 验算工作的开展,因此,在对比以上 4 种方法之后决定选取可靠性框图法进行 SIL 验算。

通过结构框图及其连线,可直观反映各部件失效对系统性能的影响。该模型假设系统各部件的故障发生机制是独立的。在进行系统完整性计算时,其计算结果是在某一特定事件情况下表示系统失败或成功的可能性,可看作是安全完整性的表现。

2 SDG-HAZOP 评价与 CBR 方法

2.1 SDG-HAZOP 工艺过程风险评价方法

2.1.1 SDG 辅助 HAZOP 分析原理

基于 SDG 的 HAZOP 评价方法主要利用工艺单元中的关键变量作为节点,利用虚线或实线连接不同节点,代表不同变量之间存在的增量相同或相反的影响关系。添加代表非正常原因和不利结果的节点,若将这些结点与某个变量相连接,则表明该变量可能有潜在的不利后果和导致不利后果发生的非正常原因。同时,节点之间的联系也是有方向的,是一个有向的连线,必须从一个原因到变化过程,再到一个结果。SDG-HAZOP 模型就是利用此方法人为对变量节点进行正向拉偏或负向拉偏,寻找不利后果和非正常原因事件,在此基础上汇总推理内容,以便找到解决问题的方法,从而构建 SDG-HAZOP 模型。

2.1.2 基于经验和流程图的 SDG-HAZOP 建模方法

在综合分析比较现有各种模型基础上,总结出一种结合工艺流程图及经验的 SDG 模型建立方法,该建模方法采取分版块的方式开展,可有效增强建模方法的实用性。SDG-HAZOP 建模及推理的流程如图 1 所示。

建立系统模型的步骤主要包括:

1) 将系统划分为若干版块。根据系统内部各个部件的功能和材料特性,将其划分为若干版块。尽管每个工业生产过程和运作方式都不尽相同,但其生产设备设施基本构成却大同小异,如都存在常见的储罐、泵、热交换器等设备装置。

2) 定义变量。在 SDG-HAZOP 模型中,需要将各主要变量作为节点,寻找与之相关联的其他变量,列出其成因及影响后果。

3) 确定影响关系。在完成上述版块划分和变

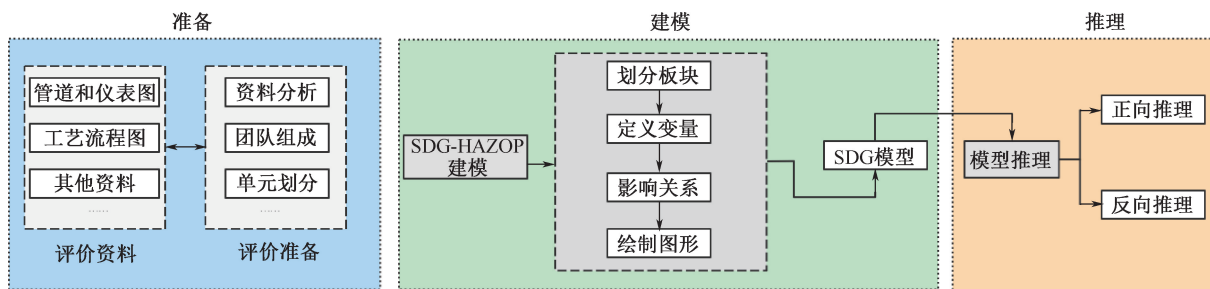


图1 SDG-HAZOP 建模及推理流程

Fig.1 SDG-HAZOP modeling and reasoning process

量定义后,确定各变量之间的相互影响关系,并列写变量影响关系表以及影响方程组。在这个过程中,需人为选取偏差变量,并将偏差变量进行正向拉偏,得到变量发生偏差后产生的影响列写于表中形成影响关系表。根据影响关系表,将重要变量列写于表格左侧,与正向拉偏该变量有影响的其他变量写于右侧,用箭头指向左侧变量,若其中的变量拉偏后不影响其他变量,则方程组右侧为0。

4) 绘制 SDG-HAZOP 图。按照上述步骤得到变量影响关系和变量影响方程,结合工艺流程绘制 SDG 模型图,用矩形方框表示原因和后果节点。

5) 模型简化。变量节点需要以安全为主要考虑对象,因此,将图中对安全影响关系不大的节点去掉,以达到简化目的。

2.1.3 重要节点定向推理策略

在 SDG-HAZOP 模型中,当某一偏差节点超出正常阈值时,需要分析其风险传播路径。为确保分析的有效性,这些传播路径必须是相容的,即风险能够在实际情况下沿着这些路径进行传递。通过识别并确认这些相容路径,能够全面描述 SDG-HAZOP 风险传递过程,从而为风险评估与管理提供更加精准和系统的支持。在建模过程中,各节点的状态均存在不确定性,需要假定节点在正常情况下,利用 SDG-HAZOP 模型,将风险扩散与相容路径理论相结合,设定下一节点的状态,以此进行推理,直至找到所有非正常原因和由非正常原因所导致的不利后果。

SDG-HAZOP 推理方法根据节点的选取不同具体可分为以下2类。

1) 从一切异常的原因节点出发,沿着与其连接的分支寻找一切与其异常有关的后果。根据这种方法进行推理和分析,将所有异常原因和后果都寻找出来,从而减少在推理算法层面的困难,并且容易理解,但这种算法会造成结果的大量冗余,形成很多无

效路径,从而影响到后续的处理。

2) 比较分析化工生产过程中各变量之间的重要性,选取重要变量作为初始偏差。其方法是在一开始推理时,假定化工过程各相变量均处于正常情况,令所选取的主要变量出现偏差,根据产生偏差进行正向推理和反向推理。

2.2 HAZOP 案例库构建与应用

2.2.1 基于 CBR 的 HAZOP 分析方法

基于 CBR 的 HAZOP 方法可根据结果的表现形式划分为2种类型,即问题解决型推理和问题解释型推理。问题解决型推理是指根据新问题的特征,在案例库中查找相似案例,并利用领域知识直接引用或适当的修改这些案例,就可形成解决新问题的答案。而问题解释型推理则是主要用于说明一种新问题是否可以用一种特殊的方式来处理,并对其进行解释说明^[18]。文中采用解决型推理。

利用 CBR 技术进行 HAZOP 分析的先决条件是需要建立一个以 HAZOP 案例为基础的案例库,并依据案例自身的特点将每个案例转化为一个特征实例,每个实例包含若干个已经抽取的属性特征,且需给出相应问题解决办法。CBR 的运行流程如图2所示。基于 CBR 技术的 HAZOP 推理流程主要分为5个部分。

1) 说明。根据特定的 HAZOP 案例的组织和表达方式,表达和储存案例的特征信息和原因、后果以及措施。

2) 检索。根据特定的检索匹配策略,在案例库中寻找最接近目前问题的 HAZOP 案例相关信息。

3) 复用。对比目标案例与 HAZOP 中的案例,根据查询信息判定案例的原因或后果以及措施是否满足分析对象的特征。

4) 修正。对于要复用的案例方案,如果其原因或后果以及措施不能很好地适应新的问题,则必须修改成适用于目标对象的信息。

5) 保留。解决新的问题,系统会自动存储当前经过修正的案例信息以备解决未来类似情况的HAZOP案例。

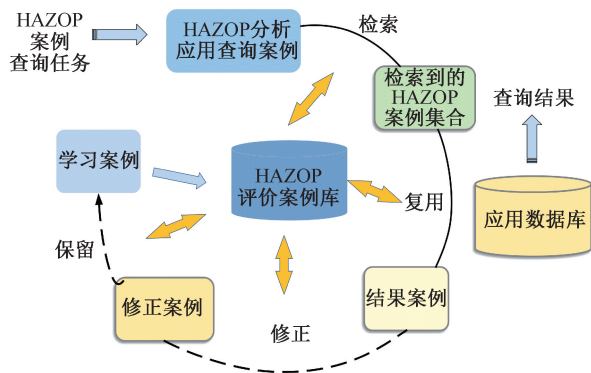


图2 基于CBR的HAZOP案例库推理流程

Fig. 2 CBR based HAZOP case library reasoning flow

2.2.2 结构化HAZOP案例库设计

1) HAZOP案例的知识获取。主要通过2种途径来实现:①系统自主知识的获取,主要保存SDG-HAZOP的分析结果,以实现案例经验知识的复用,这是由系统本身的功能完成自动的知识获取,这也是本系统的一大特色;②被动的知识获取,这主要依靠人工通过案例导入模板,将HAZOP案例相关信息导入到HAZOP案例库中。

2) HAZOP案例的表示。推理历史案例是CBR技术的核心,因此,在进行案例推理之前,必须以一种合理的方式表达存储的案例信息。案例表达的目的在于易于系统辨识的方式表达新案例和历史案例,同时,确保案例信息清晰完整,具有可扩展性。

3 丙烯氧化工艺过程风险评价

本文选取丙烯氧化制取丙烯酸工艺作为案例,以验证基于SDG和CBR的风险评价方法。

3.1 丙烯氧化工艺SDG建模

3.1.1 变量定义

根据SDG建模流程,结合P&ID图及生产资料,将丙烯氧化工艺分为丙烯输送、空气输送、循环气输送、第一反应器和第二反应器模块5个子系统。由于第一和第二反应器相似,SDG建模仅涉及第一反应器。以丙烯输送部分为例,定义相关变量节点,包括丙烯汽化器流量、压力、温度等。

3.1.2 变量影响方程组

根据各变量间的相互影响关系,建立影响方程组,列出每个变量及其影响的其他变量,并用箭头表

示影响方向。

3.1.3 变量影响关系表

根据变量影响方程组,生成变量间相互影响关系的矩阵表,使用“+”和“-”表示增减影响。

3.1.4 丙烯输送模块SDG图

根据P&ID图和其他资料,建立丙烯输送模块的SDG模型图。

3.1.5 丙烯氧化工艺段总SDG图

重复丙烯输送模块的建模流程,完成空气输送、循环气和第一反应器模块的SDG建模,并添加非正常原因及不利后果节点,最终得到完整的丙烯氧化工艺段SDG图。

3.2 基于SDG的丙烯氧化工艺段风险推理

根据丙烯氧化工艺段总SDG模型,通过拉偏关键变量分析非正常原因和不利后果。例如:正向拉偏丙烯汽化器压力时,非正常原因可能包括压力调节阀、温度调节阀和进料调节阀开度过大。不利后果包括:第一反应器温度升高、催化剂损坏、物料泄漏、火灾爆炸风险,或丙烯汽化器温度过低导致系统冻结或超压损坏。

3.3 HAZOP分析结果

在正式开始HAZOP分析前,进行风险矩阵设置。完成矩阵设置后,开展HAZOP分析,根据相关生产工艺资料,人工分析事件发生的可能性、严重性以及现有措施等,即可得到HAZOP分析结果。HAZOP分析结果见表2。

3.4 案例库应用效果

在丙烯氧化工艺中,使用案例库分析泄漏偏差。输入相关特征后,得到相似案例的原因、后果和措施。乙烯氧化制环氧乙烷的泄漏案例与丙烯氧化制丙烯酸相似,因此,可借用其分析结果,只需将“乙烯及环氧乙烷”替换为“丙烯及丙烯酸”。同时,HAZOP分析结果也会存入案例库,以便后续查询和分析。如当分析“压力高”偏差时,能够获得相似案例的HAZOP结果。

3.5 安全完整性需求分析

在完成HAZOP分析后,需要采用LOPA进一步分析其中风险较大的事件场景,选取氧化第一反应器调节阀开度过小或关闭等7个原因造成第一反应器温度升高、超温、催化剂粉结损坏。氧化反应器温度升高场景LOPA分析见表3。

根据LOPA分析结果,需要的温度高于连锁装置的SIL,为SIL1,也就是SIL1等级的温度高于连锁

表2 HAZOP 分析结果
Table 2 HAZOP analysis results

序号	变量	偏差	原因	后果	可能性	严重程度	风险等级	现有安全措施	采取措施后		
									可能性	严重程度	风险等级
1	丙烯汽化器压力	压力高	丙烯汽化器压力调节阀开度大	第一反应器温度升高,可能超温,催化剂粉结损坏,物料泄漏,潜在火灾爆炸,人员伤亡风险	4	4	16	①安全阀;②爆炸曲线及爆炸曲线触发报警;③温度高连锁	3	4	12
2				可能超压,设备损坏	4	4	16	①压力控制及压力高报警;②丙烯汽化器设安全阀	2	3	6
3				丙烯汽化器温度降低,冷冻水温度降低,可能冻堵,影响系统正常运行	4	3	12	—	4	3	12
4			丙烯汽化器冷冻水管线温度调节阀开度大	第一反应器温度升高,可能超温,催化剂粉结损坏,物料泄漏,潜在火灾爆炸,人员伤亡风险	5	4	20	①安全阀;②爆炸曲线及爆炸曲线触发报警;③温度高连锁	3	4	12
5				可能超压,设备损坏	5	3	15	①爆破片;②温度高报警;③安全阀	2	3	6
6				丙烯汽化器温度降低,冷冻水温度降低,可能冻堵,影响系统正常运行	5	3	15	—	5	3	15
7			丙烯汽化器进料调节阀开度大	第一反应器温度升高,可能超温,催化剂粉结损坏,物料泄漏,潜在火灾爆炸,人员伤亡风险	5	4	20	①安全阀;②爆炸曲线及爆炸曲线触发报警;③温度高连锁	3	4	12
8				可能超压,设备损坏	5	4	20	①爆破片;②温度高报警;③安全阀	3	3	9
9				丙烯汽化器温度降低,冷冻水温度降低,可能冻堵,影响系统正常运行	5	3	15	—	5	3	15

装置才能保证风险在可接受范围以内,因此,还需要开展 SIL 等级的验算工作。利用本系统,输入相应的失效数据即可得到对应的 SIL 验算结果。SIL 分析结果见表 4。

SIL 验算结果表明:SIF 回路的 SIL 等级为 SIL1,符合 SIL 定级要求,风险可接受。与企业使用其他工具得到的 SIL 验算结果对比,结果也在 SIL1 等级范围内。虽然企业使用基于马尔可夫模型的计算平台更为精准,但本系统计算结果与其差距不大,证明其可行性。

分析结果与企业风险评价结论一致,表明 SDG 建模方法简化了风险评价过程。该方法推理全面,能够揭示系统的潜在危险,包括非正常原因和不利后果,且计算机辅助建模和推理节省了时间和成本。与其他系统相比,加入 CBR 推理技术能有效保存 SDG-HAZOP 分析结果,为后续风险评估提供支持。

集成的 LOPA 分析和 SIL 验算功能还可实现风险的半定量评价和 SIL 等级验证,具备实际应用价值。

4 结论

1) 基于 SDG-CBR 耦合推理机制的风险评价新方法,突破了传统 HAZOP 对人工经验的绝对依赖,可实现危险识别从定性向半定量的转变。通过引入状态向量约束与多参数动态映射算法,实现 HAZOP 的自动化和风险评价的半定量,提高分析效率的同时保证了评价结果的准确性和可靠性。

2) 化工过程风险分析与评价辅助系统实现 HAZOP-SDG-LOPA 技术链的闭环应用,通过构建“识别-评估-验证”3 级模型,为化工过程安全防护提供标准化工具集。该系统已在丙烯酸生产工艺的实际应用中得到验证。

表3 氧化反应器温度升高场景LOPA分析

Table 3 LOPA analysis of oxidation reactor temperature rise scenario

场景	描述	初始发生频率	使能条件	风险控制目标及结论					
				类别	可接受频率	独立保护层描述	独立保护层	风险差距	分析结论
氧化反应器温度升高	氧化第一反应器调节阀开度过小或关闭	0.01	暴露概率0.05	人员	1.0×10^{-6}	有爆破片进行物理防护	0.1	0.029	若 SIL=1, 则风险可接受
	丙烯汽化器压力调节阀开度过大								
	丙烯汽化器冷冻水管线温度调节阀开度过大								
	丙烯至第一反应器流量调节阀开度过大					氧化第一反应器设有爆炸曲线及爆炸曲线触发报警	0.1	0.1	
	空气压缩机出口流量调节阀开度过大								
	预混合器循环气流量调节阀开度过小或关闭								
	空气预热器温度调节阀开度过大								

表4 氧化反应器温度高高连锁SIL验算结果

Table 4 Calculation results of SIL for high and high temperature interlock of oxidation reactor

回路	类别	名称	冗余结构	未检失效比例	已检失效比例	危险失效率	已检危险失效率	未检危险失效率	已检安全失效率	检验测试时间间隔/h	平均恢复时间/h	系统 PFD _{SIF}	SIL 等级
氧化反应器温度高高	感应器	温度传感器	2oo3	0.1	0.05	1.26×10^{-6}	1.12×10^{-6}	1.36×10^{-7}	8.42×10^{-7}	8	8 760	2.60×10^{-2}	SIL1
		安全栅	2oo3	0.1	0.05	3.50×10^{-7}	0	3.50×10^{-7}	0	8			
	逻辑运算器	主处理器	1oo1	0.1	0.05	3.63×10^{-7}	2.38×10^{-7}	1.25×10^{-7}	0	8			
		电源模块	1oo1	0.1	0.05	2.50×10^{-7}	2.50×10^{-7}	0	0	8			
		输入模块	1oo1	0.1	0.05	1.90×10^{-7}	9.00×10^{-8}	1.00×10^{-7}	4.32×10^{-8}	8			
		输出模块	1oo1	0.1	0.05	2.00×10^{-7}	1.90×10^{-7}	1.00×10^{-8}	1.68×10^{-8}	8			
	执行器	继电器	2oo2	0.1	0.05	4.28×10^{-8}	0	4.28×10^{-8}	0	24			
		电磁阀	2oo2	0.1	0.05	1.56×10^{-7}	1.39×10^{-7}	1.74×10^{-8}	2.69×10^{-7}	24			
		气动膜	2oo2	0.1	0.05	5.60×10^{-7}	0	5.60×10^{-7}	3.51×10^{-6}	24			
		球阀	2oo2	0.1	0.05	1.86×10^{-7}	1.06×10^{-7}	7.96×10^{-8}	0	24			

3) 针对间歇过程的特殊性,未来研究将 Petri 网与 SDG 模型相结合,以更好地描述多因素交互作用下的动态信息,完善对间歇过程的风险评价。

参考文献

- [1] 李家运. 化工设计与安全评价对化工安全生产的影响研究[J]. 低碳世界, 2022, 12(4): 175-177.
 [2] 王立进. 化工工艺的风险识别与安全评价[J]. 化学工程与装备, 2022(10): 251-252.

- [3] 吕彦杰. 化工企业火灾爆炸事故特性及对策建议[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(6): 856-859.
LYU Yanjie. Characteristics and countermeasures of fire and explosion accidents in chemical enterprises[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(6): 856-859.
- [4] 胡万吉. 2009—2018年我国化工事故统计与分析[J]. 今日消防, 2019, 4(2): 3-7.
- [5] 张圣柱, 王旭, 魏利军, 等. 2016—2020年全国化工和危险化学品事故分析研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(10): 119-126.
ZHANG Shengzhu, WANG Xu, WEI Lijun, et al. Analysis and research on chemical and hazardous chemicals accidents in China during 2016-2020[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(10): 119-126.
- [6] 赵国良. 探究化工工艺的风险识别和安全评价[J]. 山西化工, 2022, 42(3): 228-229.
ZHAO Guoliang. On the risk identification and safety evaluation of chemical process[J]. Shanxi Chemical Industry, 2022, 42(3): 228-229.
- [7] 马静. 化工工艺安全风险辨识研究进展[J]. 化工管理, 2022(29): 68-70.
MA Jing. Research progress in safety risk identification of chemical process [J]. Chemical Industry Management, 2022(29): 68-70.
- [8] VISWANATHAN S, SHAH V V. Hybrid framework for hazard identification and assessment in batch processes[J]. AIChE Journal, 2002, 48(8): 1765-1774.
- [9] 许兰娟, 周江涛, 曹青. 基于动态 SDG 模型的间歇过程 HAZOP 方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(9): 162-164.
XU Lanjuan, ZHOU Jiangtao, CAO Qing. Study of HAZOP analysis for batch processes based on dynamic SDG model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 7(9): 162-164.
- [10] 刘康伟, 于风清. 一种基于状态向量推理的 SDG-HAZOP 分析方法[J]. 安全与环境工程, 2015, 19(3): 73-76.
LIU Kangwei, YU Fengqing. SDG-HAZOP analysis method based on status vector reasoning [J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 19(3): 73-76.
- [11] 吴重光. 人工智能+HAZOP 分析软件介绍[J]. 劳动保护, 2019(11): 90-92.
- [12] GRABOWSKI M, AYYALASOMAYAJULA P, MERRICK J, et al. Accident precursors and safety nets: leading indicators of tanker operations safety[J]. Maritime Policy & Management, 2007, 34(5): 405-425.
- [13] 李潇. 采用 CBR 进行计算机辅助 HAZOP 方法的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.
LI Xiao. Study on computer-aided HAZOP by adoption of CBR[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2009.
- [14] 许晶. 基于案例的 HAZOP 专家系统研究与开发[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
XU Jing. Research and development of the HAZOP expert system based on CBR[D]. Qingdao: China University of Petroleum :East China, 2014.
- [15] 付强. 风险分析和风险控制对化工企业安全生产至关重要[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(9): 15-16.
- [16] 李洋, 盖盈盈. 保护层分析(LOPA)与 HAZOP 分析结合的应用研究[J]. 山东化工, 2022, 51(12): 201-203.
LI Yang, GAI Yingying. Application research on the combination of protective layer analysis (LOPA) and HAZOP analysis[J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(12): 201-203.
- [17] 杜旭红, 刘晓明, 郑建国, 等. 铀转化电解制氟工艺的 HAZOP 与 LOPA-SIL 风险评估分析[J]. 自动化与仪器仪表, 2022(8): 297-302.
DU Xuhong, LIU Xiaoming, ZHENG Jianguo, et al. HAZOP and LOPA-SIL risk assessment analysis of uranium conversion electrolysis process for fluorine production[J]. Automation & Instrumentation, 2022(8): 297-302.
- [18] 国家安全生产监督管理总局. 危险与可操作性分析(HAZOP 分析)应用导则[Z]. 2013-10-01.

作者简介: 陈文涛 (1983—),男,安徽宿松人,博士,副研究员,主要从事安全风险评估技术、建筑安全、化工过程等方面的工作。E-mail:cwt123@vip.sina.com。

