

A structured assessment method of human error probability for chemical systems

Qianlin WANG^{1,2}, Shicheng CHEN^{1,2}, Xiaodong HU¹, Jianwen ZHANG^{1,2}, Liangchao CHEN^{1,2},
Jinghai LI^{1,2}, Zhan DOU^{1,2*}

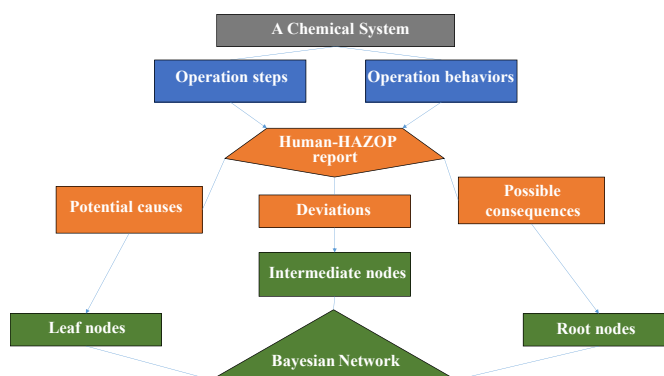
1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

2. Interdisciplinary Research Center for Chemical Process Safety, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

Abstract: At present, the essential reliability of chemical equipment has been increasingly improved with a development of automation and information technology, and human error has become the main factor over chemical accidents. Hence it is necessary to conduct human reliability analysis (HRA) on chemical systems to ensure their safe and stable operations. However, the chemical systems have a high non-linearity and complex coupling. The existing HRA technologies cannot be directly applied on them, and

the effectiveness and accuracy of analysis results are poor. Therefore, this work proposes a structured assessment method of human error probability for chemical systems. This method particularly combines the human-hazard and operability analysis (human-HAZOP) with Bayesian network (BN). Firstly, according to the operation manual, process flow diagram, and other information of a chemical system, the tasks are summarized for human-HAZOP and further subdivided into several operation steps and behaviors. Secondly, meaningful deviations are selected using the operation behaviors and guide words. Accordingly, the potential causes, possible consequences, existing measures, and suggested measures are analyzed to form a structured human-HAZOP report for this chemical system. Thirdly, based on the human-HAZOP results, the potential causes and possible consequences are considered as leaf nodes and root nodes, respectively. A structured BN model is finally established to calculate the human error probability in the chemical system. The esterification reaction of one methyl-acrylate virtual simulation factory is taken as a test case. The probability of human error for the esterification reaction is calculated to be 0.0004 and the main human error behavior is maintenance staff stealing work omission of maintenance staff. Traditional CREAM analysis of this chemical system results in human error probability results of 0.0001 to 0.01. Results show that this structured method can effectively and accurately assess the human error probability of chemical systems in comparison with the traditional CREAM.

Keywords: chemical systems; human error probability; structured assessment; human-hazard and operability analysis (human-HAZOP); Bayesian network



收稿: 2023-09-14, 修回: 2023-11-24, 网络发表: 2023-12-05; Received: 2023-09-14, Revised: 2023-11-24, Published online: 2023-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 52004014); 国家重点研发计划资助项目(编号: 2021YFB3301100)

作者简介: 王倩琳, 博士研究生, 讲师, 安全科学与工程, E-mail: wangqianlin@buct.edu.cn; 通讯联系人, 窦站, 博士, 副教授, 主要从事化工安全研究, E-mail: zhando@buct.edu.cn

引用格式: 王倩琳, 陈士成, 呼小栋, 等. 一种结构化的化工系统人因失误概率评估方法. 过程工程学报, 2024, 24(5): 609-617.

Wang Q L, Chen S C, Hu X D, et al. A structured assessment method of human error probability for chemical systems (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2024, 24(5): 609-617, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.223251.

一种结构化的化工系统人因失误概率评估方法

王倩琳^{1,2}, 陈士成^{1,2}, 呼小栋¹, 张建文^{1,2}, 陈良超^{1,2}, 李静海^{1,2}, 窦站^{1,2*}

1. 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029

2. 北京化工大学安全工程交叉学科研究中心, 北京 100029

摘要: 化工生产系统高度非线性且复杂耦合化, 使现有人因可靠性分析(HRA)技术难以直接应用, 且分析结果的有效性和准确性差。为此, 本工作将人因-危险和可操作性分析(人因HAZOP)与贝叶斯网络(BN)相融合, 提出了一种结构化的化工系统人因失误概率评估方法。通过概述人因HAZOP的作业任务, 筛选引导词和偏差, 形成结构化的人因HAZOP报告, 并据此构建BN模型, 求解化工系统人因失误概率。以丙烯酸甲酯虚拟仿真工厂的酯化反应为例, 人因失误概率的计算结果为0.0004, 且主要人误行为是维护人员遗漏。对该化工系统进行传统CREAM分析, 人因失误概率结果为0.0001~0.01。与传统CREAM相比, 这种结构化方法能够高效且精确地评估化工系统人因失误概率。

关键词: 化工系统; 人因失误概率; 结构化评估; 人因-危险和可操作性分析(人因HAZOP); 贝叶斯网络

中图分类号: TQ02

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2024)05-0609-09

1 前言

随着自动化和信息化技术不断发展, 化工设备的本质可靠性水平日益提高, 人因失误已成为化工事故的主要因素, 高达57.14%~85.71%^[1-5]。2015年8月31日, 山东滨源化学有限公司发生了重大爆炸事故, 造成13人死亡、25人受伤, 直接经济损失4326万元; 事故直接原因为车间负责人违章指挥, 安排操作人员违规向地面排放混有二硝基苯的物料, 在冲击力作用下起火燃烧、引发爆炸^[6]。2019年4月15日, 齐鲁天和惠世制药有限公司发生了重大着火中毒事故, 造成10人死亡、12人受伤, 直接经济损失1867万元; 事故直接原因为违规进行动火作业, 引燃现场堆放的冷媒增效剂, 瞬间产生爆燃并放出有毒气体^[7]。由此可见, 有必要对化工系统开展人因可靠性分析(Human Reliability Analysis, HRA), 以保障其安全平稳运行。

HRA研究始于20世纪50年代。1958年, Williams^[8]指出对系统可靠性进行预测必须包含HRA。1975年, 美国发布了全球首份核电站概率安全评价报告, 并明确了概率安全评估必须包含HRA^[9]。随后, HRA在核电、航空、船舶等领域得到广泛关注, 并逐渐形成技术体系。第一代HRA技术主要通过统计事故案例来获取人因失误概率数据, 如人误评价与减少技术(Human Error Assessment and Reduction Technique, HEART)^[10]、人的认知可靠性(Human Cognitive Reliability, HCR)^[11]、人误率预测技术(Technique for Human Error Rate Prediction, THERP)^[12]等; 但这些技术只考虑人的外部行为, 忽略了

内部认知。第二代HRA技术重视人误行为的内在方面, 尤其是认知过程中人误产生机理, 最具代表性的方法为认知可靠性和失误分析方法(Cognitive Reliability and Error Analysis Method, CREAM)^[13]。1998年, Hollnagel^[14]详细阐述了为何复杂工业系统需要开展HRA, 并建立了CREAM。此后, 众专家学者对CREAM开展改进研究。例如, 有学者在CREAM的基础上, 引入通用效能条件(Common Performance Conditions, CPCs), 对影响人因可靠性的情景环境进行分类, 以提高人因失误概率的计算精度^[15]。又如, 有学者将加权的CREAM与贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)相结合, 对作业过程的人因失误进行评估, 且评估结果更符合实际^[16]。然而, CREAM需依据认知学原理, 对整个系统具备详尽了解的基础上开展评估工作, 应用难度大。此外, 因化工生产系统高度非线性且复杂耦合化, 使其风险因果关系无法以精确数学模型表达, 因此现有HRA技术难以直接应用, 且分析结果的全面性和有效性差。

据此, 本工作将人因HAZOP与BN相融合, 提出一种结构化的化工系统人因失误概率评估方法。首先, 该方法根据相关资料识别化工生产系统中的作业任务, 将其细分为操作行为和操作步骤, 从而更加清晰地揭示化工系统涉及的人员操作。其次, 针对识别出的操作行为和操作步骤进行人因HAZOP分析, 利用引导词, 结构化且系统化地辨识、分析可能存在的人误行为, 并以直观的文本形式描述可能原因和后果, 判别其存在的保护措施并提出相关建议, 从而解决化工生产系统中风险发生原因与后果间的高度非线性问题。再次, 引入BN模型,

解耦关系复杂的风险因素,且分别将原因、偏差和后果作为叶节点、中间节点和根节点,揭示人误行为导致事故发生的传播机理。最后,通过BN求解化工系统的人因失误概率,实现人因失误概率的定量化评估。管理人员可根据评估结果合理补充或改进相关的防护措施,便于后续避免和管控化工系统中的人误操作。

2 基本理论

2.1 人因-危险和可操作性分析(人因HAZOP)

HAZOP技术源于20世纪70年代,由英国帝国化学工业公司首次提出,是一种广泛应用于化工行业的风险评估方法。针对化工工艺流程及其装置,该技术利用引导词,通过开展结构化、系统化审查,主要用于辨识、分析和评价可能造成的人员伤害、财产损失或环境污染等^[17]。人因HAZOP在传统HAZOP的基础上发展而来,重点关注关键操作或维护活动中人因失误可能引发的潜在危险,并给出相应措施和建议,以优化作业操作和维护;因具有结构性与系统性的优点,人因HAZOP能够全面辨识作业过程人员误操作^[18]。此外,人员操作虽被视为间歇性过程,但可进行层次划分,为此需明确如下基本概念^[19]。

- (1) 操作步骤:按照任务顺序,将整个作业流程进行划分,即操作步骤。
- (2) 操作行为:操作人员的具体动作。
- (3) 引导词:用于指导分析者辨识潜在人因失误的关键词汇,详见表1。
- (4) 偏差:与预期行为的偏离。

表1 人因HAZOP的常用引导词
Table 1 Common guide word for human-HAZOP

Guide word	Description
None	Overlook and forget
Part of	Appearance of misbehavior that deviates from the objective
More or Less	Error in the amount or degree of action triggering
Early or Late	Action triggered at the wrong time
Before or After	Action triggered in the wrong order

2.2 贝叶斯网络(BN)

BN是一种用于知识表达和概率推理的图论模型,可提供形式化手段来处理不确定性问题^[20]。该模型的拓展性好,事件概率计算简便且分析直观,适用于人因可靠性的量化建模与评估^[21]。BN模型涉及两类概率—先验概率和条件概率^[22]。先验概率是指根据历史数据或主观判断,获知某事件发生的概率。例如,A事件的发生概率记作 $P(A)$,称为A的先验概率。条件概率则指在某事件已发生的条件下,获知另一事件发生的概率。例

如, $P(A|B)$ 表示在B事件已发生的条件下,A事件发生的概率; $P(B|A)$ 表示在A事件已发生的条件下,B事件发生的概率。此外,BN建模的概率乘法定理如公式(1)所示,且在已知叶节点先验概率和节点间条件概率的条件下,可求解根节点的联合概率分布,如公式(2)^[23]所示。

$$P(AB) = P(A|B)P(B) \tag{1}$$

$$P(V) = P\{V_1, \dots, V_n\} = \prod_{i=1}^n P(V_i|V_1, \dots, V_{i-1}) \tag{2}$$

3 方法步骤

根据上述基本理论,本工作提出了一种结构化的化工系统人因失误概率评估方法。如图1所示,该方法主要包括开展人因HAZOP和BN建模两部分,且可划分为以下8个步骤。

步骤1:收集化工系统的相关资料,如操作手册、工艺流程图、P&ID图等。

步骤2:概述人因HAZOP的主要作业任务,即明确操作过程可能出现的人因失误,一般包括遗漏型和执行型两类。其中,遗漏型是指因遗忘疏忽而造成操作上缺失,如操作人员未按照规定打开或切换阀门等;执行型是指进行操作时并未达到操作要求,如操作人员在投入原料时未达到规定的量或按照规定的配比等。

步骤3:将整个作业流程划分为不同的操作步骤,并选取所需分析的操作步骤,依次细分为单一的操作行为。

步骤4:利用操作行为和引导词,筛选出有意义的偏差,进而分析偏差的潜在原因与可能后果,识别规避偏差的已有措施,并根据潜在原因、可能后果和已有措施,提出建议措施。重复上述步骤,直至完成全部操作行为分析,且形成结构化的化工系统人因HAZOP报告。

步骤5:基于人因HAZOP分析结果,提取其潜在原因和可能后果,并分别作为BN模型的叶节点与根节点。

步骤6:按照人因HAZOP报告所涉及的因果关系,确定BN模型的中间节点—父节点与子节点。

步骤7:参考节点间的因果关系,通过有向箭头连接相应节点,并构建结构化的BN模型。

步骤8:邀请操作人员、维修人员和管理人员等参与调查问卷;经统计,分别获取叶节点的先验概率和节点间的条件概率,并作为BN模型的输入,根据公式(1)和(2),评估化工系统人因失误概率。

4 案例分析

4.1 化工系统简介

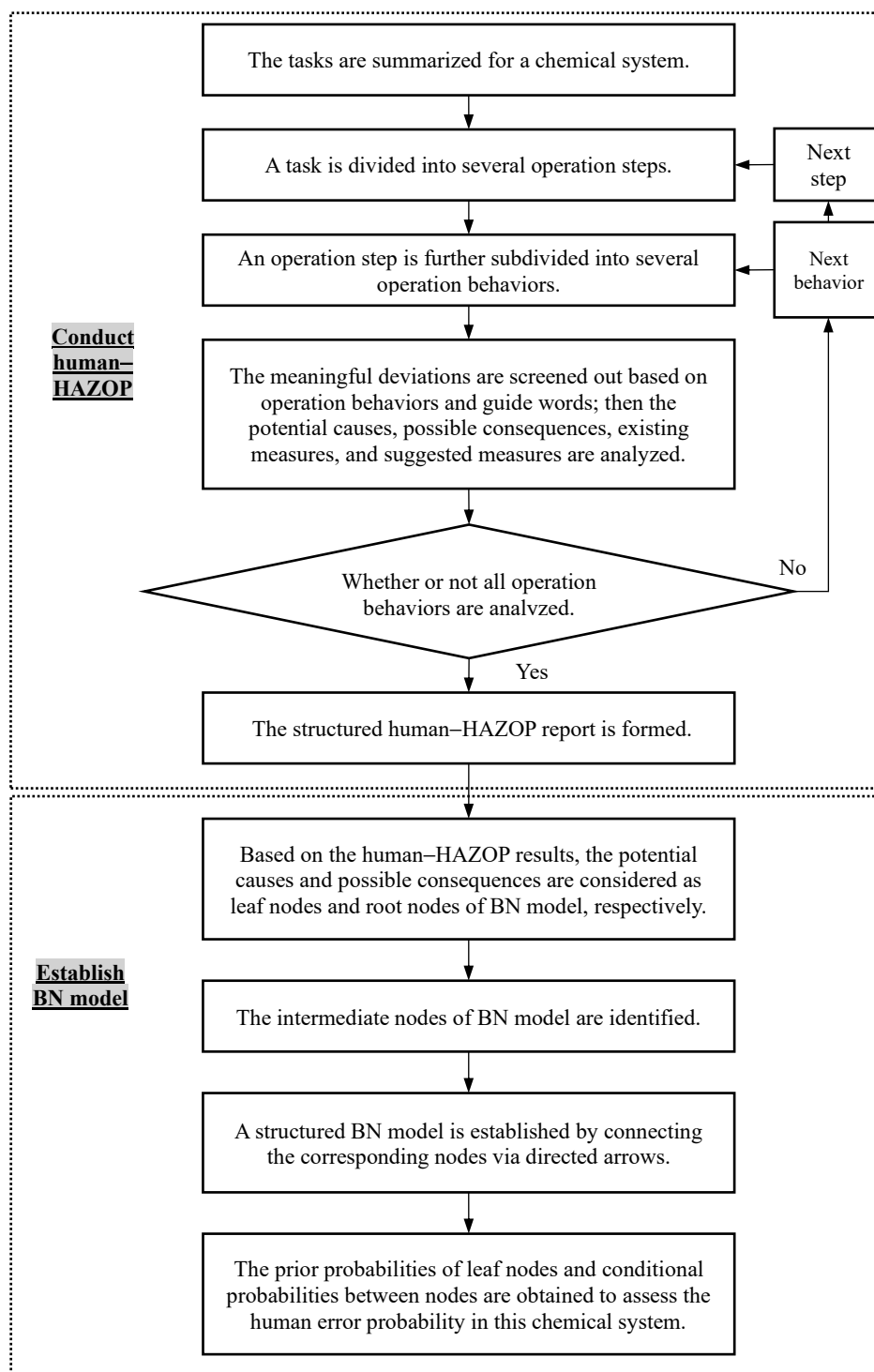


图1 结构化人因失误概率评估方法步骤

Fig.1 The structured assessment flowchart of human error probability

丙烯酸甲酯虚拟仿真工厂以实际化工企业为蓝本, 通过将真实的化工生产装置(包括设备、管道、仪表和控制系统等)与仿真技术相结合, 并借助物料虚拟和动态工况模拟, 构建而成的虚实结合的智能仿真工厂。该仿真流程以酯化级丙烯酸和甲醇为原料, 利用磺酸型离子交换树脂的催化作用进行酯化反应, 并经连续转化生成

丙烯酸甲酯液体, 最终通过闪蒸、脱重、萃取、精制等处理来获取合格的丙烯酸甲酯产品; 其中, 涉及酯化反应、丙烯酸分离回收、甲醇分离回收和丙烯酸甲酯分离精制4个典型工序。

如图2所示, 酯化反应是丙烯酸甲酯虚拟仿真工厂的主反应, 因其可逆, 故需在固定床反应器中采用过量

醇。具体而言,新鲜的丙烯酸、甲醇与回收所得的循环丙烯酸、循环甲醇等作为混合进料,输入反应预热器(E311);经预热后,继而送至酯化反应器(R301),并在强酸性磺酸型阳离子交换树脂的催化剂床层上,通过酯化

反应生产反应液,温度75℃、压力201 kPa;最终反应液从R301底部出口流入酸分离塔(T3011)。在此,重点以酯化反应为例,对上述人因失误概率评估方法开展应用和验证。

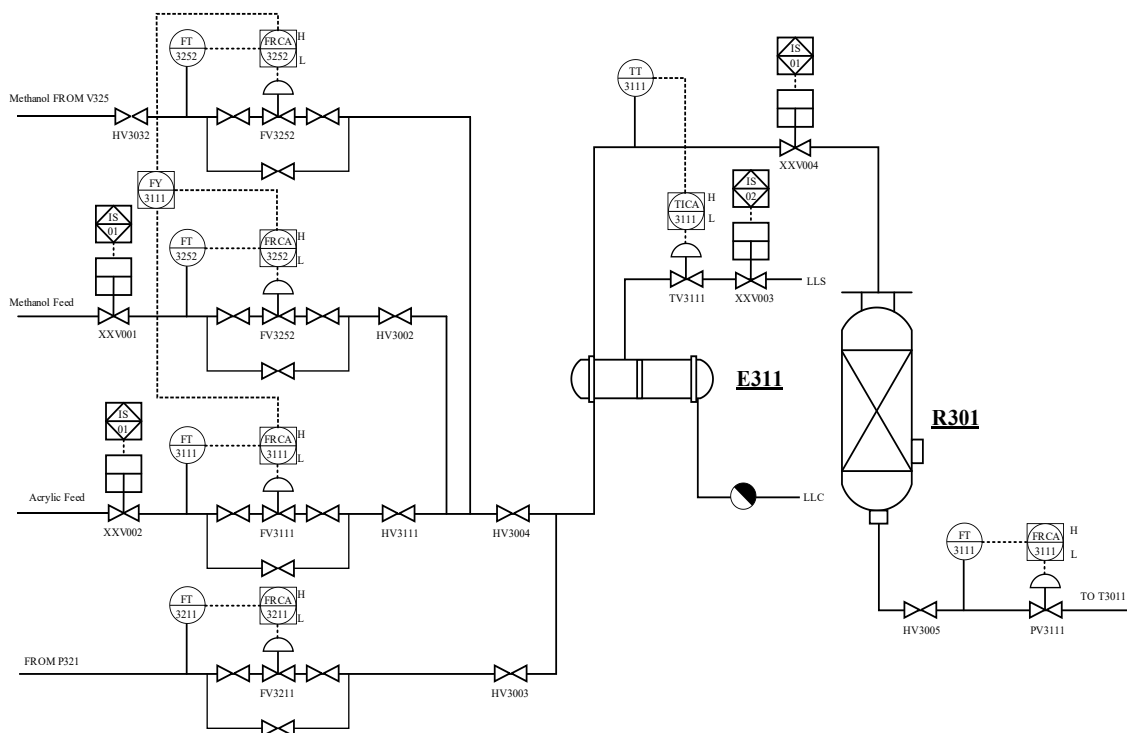


图2 酯化反应的工艺流程图

Fig.2 The process flow diagram of esterification reaction

4.2 人因失误概率评估

步骤1:收集丙烯酸甲酯虚拟仿真工厂酯化反应的相关资料,共计操作手册1份、工艺流程图1张、P&ID图1张。

步骤2:结合上述资料,概述酯化反应中人因HAZOP的主要作业任务。例如,由于维护人员偷工或遗漏,未定期维护流量阀。

步骤3:将酯化反应的整个作业流程划分为将丙烯酸、甲醇混合送入反应预热器,以及丙烯酸、甲醇预热后送至酯化反应器2个操作步骤。根据操作手册,将这两个操作步骤细分为单一的操作行为。例如,内操人员在WinCC界面上打开快速切断阀XXV001, XXV002, XXV003和XXV004,且外操人员将气动调节阀FV3011(甲醇进料)前后的阀门FXV3011A, FXV3011B开至100%。

步骤4:利用上述操作行为和引导词,筛选出有意义的偏差。例如,操作人员将TV3111开至35%,这个操作行为与引导词“多”相结合,即可构成偏差—操作人员将TV3111开度过大。经分析,此偏差的潜在原因为操作

人员一时大意,且可能后果为输送蒸汽过多,造成预热器R301温度过高。另外,已有的保护措施为设有温度计,据此提出建议措施—增设温度报警装置。重复上述步骤,直至完成全部操作行为分析,且形成结构化的酯化反应人因HAZOP报告,详见表2。

步骤5:基于人因HAZOP分析结果,提取其潜在原因和可能后果,并分别作为酯化反应BN模型的叶节点与根节点。例如,维护人员偷工、维护人员遗漏即可视为叶节点,且酯化反应不充分、产量减少、甲醇转化率降低即可视为根节点。

步骤6:按照人因HAZOP报告所涉及的因果关系,即在操作步骤中“可能原因—偏差(操作行为与引导词的组合)—可能后果”所形成的事故链,确定酯化反应BN模型的中间节点—父节点与子节点。例如,将维护人员遗漏作为父节点,则其子节点为流量阀FV3111漏液;将流量阀FV3111漏液作为父节点,则其子节点为丙烯酸流量未达到反应所需流量。

步骤7:参考节点间的因果关系,通过有向箭头连接相应节点,并构建结构化的酯化反应BN模型,如图3所

表2 酯化反应的人因HAZOP报告
Table 2 The human-HAZOP report of esterification reaction

Operation step	Operation behavior	Guide word	Deviation	Potential cause	Possible consequence	Existing measure	Suggested measure
Mix acrylic acid and methanol and feed into reaction preheater	Regular maintenance of flow valves by maintenance personnel	None	Failure of maintenance personnel to regularly maintain flow valves	Maintenance staff stealing work Omission of maintenance staff	Abnormal flow rate and failure to meet the acrylic acid: ethanol=1:0.75 criterion for esterification reaction	With manual adjustment valve	Installation of additional flow meters
Feed preheated acrylic acid and methanol to the esterification reactor	Central controller feeds preheated acrylic acid and methanol into the esterification reactor (R301)	Early	The controller feeds acrylic acid and methanol into the esterification reactor before the temperature and pressure have stabilized	Lack of patience on the part of the center control staff Failure of the center control staff to pay attention	Inadequate esterification reaction, reduced yield, lower methanol conversion	With thermometer	Add temperature/pressure interlock
	Operator opens TV3111 to 35%	More	The operator turned the TV3111 over	Operator carelessness	Preheater R301 temperature too high	With thermometer	Addition of a temperature alarm device

示,且相应的节点名称详见表3。

步骤8:邀请操作人员、维修人员和管理人员等30人共同参与调查问卷,统计结果详见表4;经统计,分别

获取叶节点的先验概率和节点间的条件概率,详见表5。

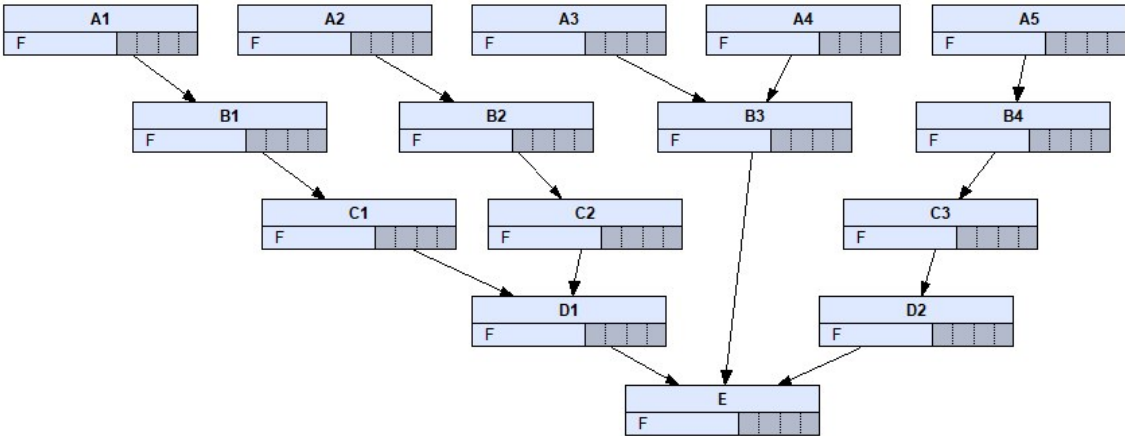


图3 基于人因HAZOP的酯化反应BN模型
Fig.3 The BN model of esterification reaction based on human-HAZOP

将上述先验概率和条件概率作为BN模型的输入,根据公式(1)可计算出各节点的后果概率。例如,节点B1—流量阀FV3252损坏的发生概率如下所示:

$$P(B1)=P(A1)P(B1|A1)=0.30\times0.80=0.24$$

同理,可分别获取中间节点B2, B3, B4, C1, C2, C3,

$$P(E)=P(A1)\cdot P(A2)\cdot P(A3)\cdot P(A4)\cdot P(A5)\cdot P(B1|A1)\cdot P(B2|A2)\cdot P(B3|A3,A4)\cdot P(B4|A5)\cdot P(C1|B1)\cdot P(C2|B2)\cdot P(C3|B4)\cdot P(D1|C1,C2)\cdot P(D2|C3)\cdot P(E|D1,B3,D2)=0.0004$$

综上所述,酯化反应的人因失误概率为0.0004。其中,后验概率计算结果详见表6。据此可知维护人员遗

D1和D2的后果概率,即0.36, 0.40, 0.24, 0.0216, 0.0324, 0.0216, 0.0432和0.0172。此外,根据公式(2)可求解出根节点E—酯化反应不充分、产量减少、甲醇转化率降低的后果概率,如下所示:

漏的发生概率最大,为主要的人误行为。经核查,此结果符合丙烯酸甲酯全流程虚拟仿真工厂的模拟工况,即

所提出的人因失误概率评估方法具有有效性。

表3 BN模型的节点名称
Table 3 The descriptions of nodes in BN model

Node	Description	Node	Description
A1	Maintenance staff stealing work	B4	The operator turned the TV3111 over
A2	Omission of maintenance staff	C1	Methanol flow rate does not reach the required flow rate for the reaction
A3	Lack of patience on the part of the center control staff	C2	Acrylic flow rate not reaching the required flow rate for the reaction
A4	Failure of the center control staff to pay attention	C3	Preheater R301 temperature too high
A5	Operator carelessness	D1	Abnormal flow rate and failure to meet the acrylic acid: ethanol=1:0.75 criterion for esterification reaction
B1	Flow valve FV3252 damaged	D2	Methanol to gaseous
B2	Flow Valve FV3111 Leakage	E	Inadequate esterification reaction, reduced yield, lower methanol conversion
B3	The controller feeds acrylic acid and methanol into the esterification reactor before the temperature and pressure have stabilized.		

表4 先验概率与条件概率的调查统计结果
Table 4 Results from a survey on a priori probability and conditional probability

Incident	A1	A2	A3	A4	A5	B1 A1	B2 A2	B3 A3, A4	B4 A5	C1 B1	C2 B2	C3 B4	D1 C1, C2	D2 C3	E B3, D1, D2
1	0.3	0.4	0.2	0.3	0.5	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8
2	0.3	0.5	0.3	0.3	0.3	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.5	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8
4	0.2	0.4	0.1	0.3	0.3	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
5	0.3	0.4	0.2	0.4	0.3	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
6	0.3	0.2	0.3	0.3	0.4	0.9	0.9	0.8	0.6	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
7	0.1	0.3	0.2	0.3	0.3	0.6	0.9	0.9	0.7	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
8	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2	0.7	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
9	0.1	0.1	0.3	0.5	0.3	0.8	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
10	0.3	0.2	0.2	0.3	0.1	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
11	0.1	0.4	0.2	0.5	0.3	0.8	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
12	0.3	0.4	0.2	0.3	0.1	0.8	0.9	0.7	0.8	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7
13	0.2	0.5	0.5	0.5	0.3	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9
14	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.8	0.9	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8
15	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8	0.9	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
16	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.9	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
17	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.9	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
18	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8
19	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
20	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
21	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.9	0.9	0.8	0.7	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
22	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.7	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
23	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.8	0.9	0.9	0.6	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
24	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.6	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
25	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.9	0.9	0.8	0.6	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
26	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
27	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.8	0.9	0.6	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8
28	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.9	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8
29	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.7	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.7
30	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8

表5 BN模型叶节点的先验概率和节点间的条件概率
Table 5 The prior probability of leaf node and the conditional probability between nodes in BN model

Leaf node	A1	A2	A3	A4	A5
Prior probability	0.3	0.4	0.2	0.3	0.3
Node	B1 A1	B2 A2	B3 A3, A4	B4 A5	C1 B1
Conditional probability	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9
Node	C2 B2	C3 B4	D1 C1, C2	D2 C3	E B3, D1, D2
Conditional probability	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8

表6 BN模型叶节点的后验概率
Table 6 The posterior probability of leaf node in BN model

Leaf node	A1 E	A2 E	A3 E	A4 E	A5 E
Posterior probability	0.35	0.52	0.32	0.48	0.35

4.3 对比与讨论

利用第二代HRA的代表性方法—CREAM,对酯化反应进行分析和评估。根据情境环境,相关专家或技术人员需评判出9类CPCs的效用水平,结果详见表7。

按照上述CPCs水平,可求得: $[\sum \text{降低}, \sum \text{不显著}, \sum \text{改进}] = [0, 3, 6]$,且酯化反应的控制模式为战略模式,相应的人因失误概率区间为0.0001~0.01。

通过上述分析过程,可直观看出:其一,在传统CREAM中,各个CPCs因子的不同水平等级间分界不清晰,即存在模糊性。例如,在“组织完备性”方面,“非常有效”和“有效”之间没有明确边界。这种模糊性导致相关专家或技术人员在分析同一对象时易给出不同的结果,大大增加了量化评估的不确定性。其二,CREAM自身局限性较大,所获取的酯化反应评估结果只是一个概

率区间,无实际指导意义。相比而言,本工作所提出的结构化人因失误概率评估方法将人因HAZOP与BN进行有机融合,不仅可提高人因失误辨识的系统性和全面性,还可提高人因失误概率评估的有效性和准确性。

5 结论

针对化工生产系统具有高度非线性与复杂耦合性,现有HRA技术难以直接应用,且分析结果的有效性和准确性差的问题,本工作将人因HAZOP与BN相融合,提出一种结构化的化工系统人因失误概率评估方法,系统有效地完成人误风险识别分析和概率计算,得出以下结论:

(1) 该方法根据作业任务,利用操作行为和引导词,筛选出有意义的偏差,形成结构化的人因HAZOP报告,以提高化工系统人因失误辨识的系统性和全面性。基于人因HAZOP结果,将潜在原因、可能后果作为根节点和叶节点,构建结构化的BN模型,以提高人因失误概率评估的有效性和准确性。

(2) 通过对丙烯酸甲酯虚拟仿真工厂的酯化反应进行案例分析,结果表明:人因失误概率为0.0004,且主要人误行为是维护人员遗漏。相比而言,传统CREAM所获取的人因失误概率区间为0.0001~0.01,且属于战略模式。本工作所提出的结构化方法能够准确地评估化工系统人因失误概率。

(3) 后续可进一步研发化工系统人因失误概率评估平台,以减小计算和分析工作量,提高评估效率。此外,该平台可通过收集并分析历年化工事故,形成人因失效

表7 酯化反应的CPCs分析表
Table 7 The CPCs analysis table of esterification reaction

	CPCs factor	Behavior-forming factor	CPCs level	Expected utility
CPC1	Organizational integrity	Safety incident reporting system, safety awareness of operators involved in the esterification reaction, degree of professionalism in the organization's division of functions, etc.	Effective	Not significant
CPC2	Working conditions	Weather, temperature, lighting conditions, noise level, etc.	Superior	Improved
CPC3	HMI and operability support	equipment and installation of esterification reactors and protective equipment, user-friendliness of equipment, etc.	Auxiliary support	Improved
CPC4	Procedure/schedule availability	Esterification reaction work norms, standard operating procedures, etc.	Appropriate	Improved
CPC5	Number of simultaneous targets	Esterification reaction task distribution balance, duration and intensity of work, etc.	Matches the person's current abilities	Not significant
CPC6	Available time	Difficulty of tasks to be completed and degree of task repeatability, etc.	Adequate	Improvement
CPC7	Operator training and experience adequacy	Knowledge and experience of transesterification operators, awareness of regulations, training, etc.	Adequate and experienced	Improved
CPC8	Operational timeframe	Shift scheduling, length of service, etc.	Daytime	Not significant
CPC9	Quality of multi-person co-operation	Communication between transesterification control personnel and front-line operators, operators and maintenance personnel, etc.	Very effective	Improved

数据库,从而获取BN节点的先验概率和节点间的条件概率,使评估结果更加客观、准确。

参考文献

- [1] 张鹤达,刘伟.危险化学品事故致因研究[J].工业安全与环保,2012,38(11):10-11.
Zhang H D, Liu W. Hazardous chemical accidents causation characteristics of China: a statistical investigation [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2012, 38(11): 10-11.
- [2] 梁博阳,郭景景,王占伟,等.基于参数残差驱动贝叶斯网络的冷水机组故障诊断[J].过程工程学报,2023,23(4):627-636.
Liang B Y, Guo J J, Wang Z W, et al. Fault diagnosis based on Bayesian network driven by parameter residuals for chiller [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2023, 23(4): 627-636.
- [3] 王倩琳,田文慧,张东胜,等.基于FRAM的化工装置事故情景推演研究[J].过程工程学报,2022,22(6):782-791.
Wang Q L, Tian W H, Zhang D S, et al. Scenario deduction on chemical plant accidents using FRAM [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 22(6): 782-791.
- [4] 毛海涛,田文德,梁慧婷.基于双层机器学习的动态精馏过程故障检测与分离[J].过程工程学报,2017,17(2):351-356.
Mao H T, Tian W D, Liang H T. Fault detection and isolation of dynamic distillation process using two-tier machine learning [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(2): 351-356.
- [5] 潘东.液氨储罐事故后果模型分析及技术改造思路[J].过程工程学报,2018,18(S1):67-71.
Pan D. Model analysis of liquid ammonia tank accident consequence and thinking of technical transformation [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018, 18(S1): 67-71.
- [6] 山东省安监局.东营市山东滨源化学有限公司“8·31”重大爆炸事故调查报告[R].2015-11-14.
- [7] 山东省应急厅.济南齐鲁天和惠世制药有限公司“4·15”重大着火中毒事故调查报告[R].2022-12-30.
- [8] Williams H L. Reliability evaluation of the human component in man-machine systems [J]. Electrical Engineering, 1958, 44(2): 78-82.
- [9] Fieming K N, Hannaman P H, Houghton G W, et al. HTGR accident investigation and progression analysis status report (vol. II): AIPA risk assessment methodology [R]. San Diego: General Atomic Co., 1975.
- [10] Evans M, He Y, Maglaras L, et al. HEART-IS: a novel technique for evaluating human error-related information security incidents [J]. Computers & Security, 2019, 80: 74-89.
- [11] Wakefield D J. Application of the human cognitive reliability model and confusion matrix approach in a probabilistic risk assessment [J]. Reliability Engineering & System Safety, 1988, 22 (1/2/3/4): 295-312.
- [12] Shirley R, Smidts C, Li M, et al. Validating THERP: assessing the scope of a full-scale validation of the technique for human error rate prediction [J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 77: 194-211.
- [13] Yan S Y, Yao K, Li F J, et al. Application of a Bayesian network to quantify human reliability in nuclear power plants based on the SPAR-H method [J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2022, 28(4): 2588-2598.
- [14] Hollnagel E. Cognitive reliability and error analysis method (CREAM) [M]. New York: Elsevier Science Ltd., 1998: 76.
- [15] Chen J Y, Zhou D, Chuan L, et al. A method of human reliability analysis and quantification for space missions based on a Bayesian network and the cognitive reliability and error analysis method [J]. Quality and Reliability Engineering International, 2018, 34(5): 912-927.
- [16] 柴松,余建星,马维林,等.基于CREAM和不确定推理的人因可靠性分析方法[J].天津大学学报,2012,45(11):958-962.
Chai S, Yu J X, Ma W L, et al. A human reliability analysis method based on CREAM and uncertain reasoning [J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(11): 958-962.
- [17] Li J. Improving the depth and accuracy of HAZOP analysis for safer process development in chemical industries [J]. American Journal of Chemical Engineering, 2021, 9(1): 18-24.
- [18] 陈全,刘信君.基于HAZOP分析法的煤矿作业人员不安全行为识别研究与应用[J].煤矿安全,2019,50(6):297-300.
Chen Q, Liu X J. Research and application of HAZOP to identify unsafe behavior of coal mine workers [J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(6): 297-300.
- [19] 郭维,张中坤.人因HAZOP在物探作业安全风险识别及控制中的应用[J].中国安全生产科学技术,2017,13(S1):50-53.
Guo W, Zhang Z K. Application of human HAZOP in identifying and controlling safety risk in geo-physical operations [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(S1): 50-53.
- [20] Song Q S, Song L. A quantitative analysis of chemical plant safety based on Bayesian network [J]. Processes, 2023, 11(2): 525.
- [21] Tu J X, Lin W, Lin Y X. A Bayes-SLIM based methodology for human reliability analysis of lifting operations [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2015, 45: 48-54.
- [22] 苑忠帅,孙四通.基于局部信息的LNS-PCA的多模态过程故障监测[J].过程工程学报,2023,23(5):790-798.
Yuan Z S, Sun S T. Multimodal process fault monitoring of LNS-PCA based on local information [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2023, 23(5): 790-798.
- [23] Fereshteh S, Renato M, Danil K, et al. Application of Bayesian network and artificial intelligence to reduce accident/incident rates in oil & gas companies [J]. Safety Science, 2021, 133: 104981.