

中文引用格式:付建民,梁正弹,王俊杰.基于STAMP复合方法的危化品罐区泄漏事故致因分析[J].中国安全科学学报,2025,35(6):70-78.

英文引用格式:FU Jianmin, LIANG Zhengtan, WANG Junjie. Cause analysis of hazardous chemical tank area leakage accidents based on STAMP composite method[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 70-78.

基于 STAMP 复合方法的危化品罐区 泄漏事故致因分析*

付建民 副教授, 梁正弹**, 王俊杰
(中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580)

中图分类号:X937

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.1196

【摘要】 为解决危化品储罐区泄漏事故危险性大,事故风险难以有效量化评估的问题,提出一种基于系统理论事故模型和过程(STAMP)复合方法,解析危化品罐区泄漏事故的发生机制,理清事故因素间逻辑关系并定量表述事故致因影响,以定量分析非线性事故。首先,利用 STAMP-“2-4”模型(24Model)建立危化品储罐区泄漏事故分析图,确定系统各组件及其层次关系,并分析事故致因及其逻辑关系;其次,采用解释结构模型(ISM)方法确定事故致因间的路径关系及层级结构,并通过度和聚类系数分析以及贝叶斯网络(BN)节点分析获得事故致因对系统的重要性;最后,通过事故案例验证该方法的有效性。结果表明:组织管理失效(如安全生产规章制度未落实、工程管理规定执行不严)是事故风险演化的核心驱动力,其总度值占比达53.3%,且与物理层、人员层因素存在显著耦合效应。

【关键词】 系统理论事故模型和过程(STAMP); 危化品罐区; 泄漏事故; 事故致因;
贝叶斯网络(BN); 逻辑关系

Cause analysis of hazardous chemical tank area leakage accidents based on STAMP composite method

FU Jianmin, LIANG Zhengtan, WANG Junjie

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum,
Qingdao Shandong 266580, China)

Abstract: To address the challenges of high risk and difficulty in quantitative analyzing hazardous chemical storage tank area leakage accidents, a composite method based on STAMP was proposed to elucidate the accident mechanisms. It clarifies the logical relationships among causal factors and quantitatively evaluate the impacts of accident causation, thereby enabling nonlinear quantitative accident analysis. First, the STAMP-24Model was utilized to construct an accident analysis diagram for hazardous chemical storage tank leakage, identifying system components, hierarchical relationships, as well as analyzing accident causal factors and their logical connections. Subsequently, Interpretive Structural Modeling (ISM) method was applied to determine path relationships and hierarchical structures among causal factors. Node importance analysis based on degree and clustering coefficients, as well as BN node analysis, was conducted to assess the criticality of causal factors on system. Finally, the validity and

* 文章编号:1003-3033(2025)06-0070-09; 收稿日期:2025-02-17; 修稿日期:2025-04-20

** 通信作者:梁正弹(2002—),女,海南琼海人,硕士研究生,主要研究方向为安全工程信息化技术。E-mail:lzt2509413768@163.com。

feasibility of the method were verified through a case study. The results show that organizational management failure (e. g., failure to implement safety rules and regulations, lax implementation of engineering management regulations) is the core driver of accident risk evolution, with a total degree value of 53.3%, and a significant coupling effect with physical and personnel layer factors.

Keywords: system-theoretic accident model and processes (STAMP); hazardous chemical tank area; leakage accidents; accident causation; Bayesian network (BN); logical relation

0 引言

储罐区是危险化学品集中存放的区域,具有易燃易爆以及有毒有害等特性,通常被视为重大危险源。一旦储罐区发生化学品泄漏,极可能引发火灾爆炸等事故,从而造成巨大的伤亡损失,如2023年1月15日,盘锦浩业化工有限公司在烷基化装置水洗罐入口管道处带压密封作业过程中,水洗罐内流出物大量喷出遇到点火源发生火灾爆炸事故,造成13人死亡、35人受伤^[1];2019年3月17日,美国得克萨斯州 Deer Park 市的洲际码头有限责任公司装有石脑油和丁烷产品混合物的储罐发生泄漏,导致大火持续燃烧长达3天,财产损失超1.5亿美元^[2];2015年7月16日,山东省石大科技石化有限公司在液化石油气倒罐作业过程中,液化石油气发生泄漏,泄漏后的液化气遇点火源引发火灾爆炸,导致直接经济损失2 812万元^[3]。因此,有效预防和控制危化品罐区泄漏事故,对提高危化品罐区安全水平具有重要意义。

目前传统的风险分析方法,如故障类型和影响分析、危险性和可操作性研究等,往往局限于线性的因果关系视角,仅片面地探索事故发生途径而忽略了事故内部的动态变化与反馈机制,致使难以全面解析系统的深层特征和潜在的风险源^[4]。近年来,众多研究均集中在开发动态方法来分析事故风险,如:多米诺骨牌风险分析、贝叶斯网络分析和系统事故模型等。其中,系统事故模型的典型代表是系统理论事故模型和过程^[5](System-Theoretic Accident Model and Processes, STAMP),与传统模型不同,STAMP能够揭示事故的发生机制,且有效表征系统中技术的复杂性与动态演变特性,并解析事故的因果机制。到目前为止,众多国内外学者利用STAMP分析事故风险,如:ALTABBAKH等^[6]将STAMP应用于石油和天然气行业以证明模型的实用性和有效性,成功识别导致事故的错误行为;QIAO Wanguan等^[7]利用STAMP模型从煤矿事故原因层面控制煤矿安全系统,表明事故的根本原因是管理层之间缺

乏沟通、协调和反馈。然而,由于其定性的性质,STAMP缺乏为评价结果提供定量估计的能力^[8]。因此,STAMP已经从简单应用发展到与其他模型或方法相结合的方式以补充其缺乏定量分析的弊端。如EBRAHIMI等^[9]提出将STAMP与决策试验与评价实验室法和模糊逻辑集成的一种定量事故分析方法,用于分析过程工业的事故,表明事故是由操作失误、管理不到位等多因素导致的;孙逸林等^[10]将STAMP与复杂网络模型相结合,定量分析燃气管道泄漏爆炸事故,表明应从企业和政府2个方面采取多维度协同的安全防控措施。上述研究虽然能在一定程度上定量分析事故的成因,但对于STAMP定性分析事故致因间的逻辑关系仍存在一定的主观性。

鉴于此,文中提出基于STAMP复合方法分析危化品罐区泄漏事故风险,揭示危化品罐区泄漏事故发生机制,定量表述事故因素间的逻辑关系并给出事故致因对系统的影响程度,以期预防和控制该类事故的发生提供参考。

1 STAMP 复合方法

为分析危化品罐区泄漏事故的致因机制,文中提出STAMP复合分析方法,流程如图1所示。首先,通过STAMP-“2-4”模型(24Model)模型全面且系统地识别事故致因;其次,利用解释结构模型(Interpretative Structural Modeling, ISM)确定事故致因的逻辑关系;最后,基于逻辑关系分析事故致因影响事故(系统)的程度,从而有针对性地提出控制措施以预防事故发生。

1.1 基于 STAMP-24Model 模型的事故致因识别

STAMP模型是由美国工程院院士LEVESON教授^[4]提出的一种新型事故致因模型。该模型主要包含3个核心组成部分,即分层控制结构、安全约束和过程模型^[11]。分层控制结构是一种层级关系,其中,高层控制约束低层行为,低层向高层反馈执行情况;安全约束是确保系统控制和反馈机制有效运行的关键措施;过程模型是高层基于低层反馈信息进行决策和调整的过程^[12]。

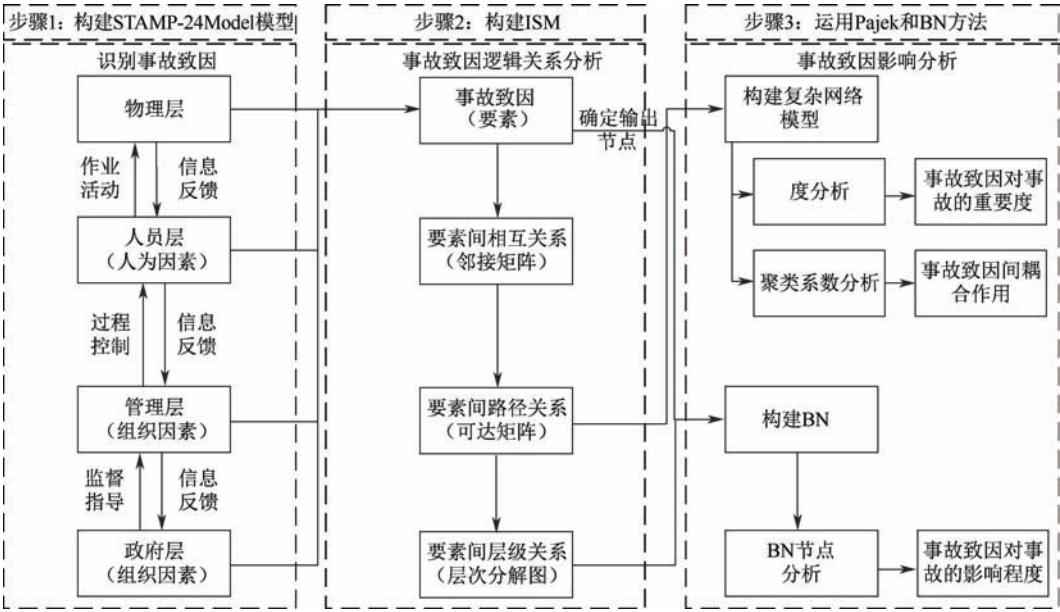


图1 STAMP 复合方法流程

Fig. 1 STAMP composite methodology flow chart

24Model 于 2005 年由 中国矿业大学(北京)傅贵教授团队提出,目前已演变到第 6 个版本,该模型将事故原因划分为 2 个层次,即组织层面(根本原因)和个人层面(直接和间接原因)^[13]。

STAMP 通过系统组件间的交互影响分析事故机制,但其对因果关系的拆解缺乏模块化分析框架^[14]。24Model 旨在表达事故的发生是由组织层面与个人层面的根本原因与直接和间接原因导致,但缺乏组织内部的交互影响分析。为此,需结合 STAMP 模型与 24Model 的优点,弥补各自的缺点,从而构建 STAMP-24Model 模型,通过组织层面、个人层面与物理层面分析系统(危化品罐区泄漏事故)组件的交互作用,深层次剖析事故原因。

1.2 基于 ISM 的事故致因逻辑关系分析

为直观且定量描述 STAMP-24Model 模型识别事故致因间的逻辑关系,利用 ISM 中可达矩阵阐明事故致因间的路径关系,并通过层次图表示因素间的层级关系。

ISM 是由 WARFIELD^[15] 于 1973 年提出的一种系统分析方法。该方法通过图形化的方式展示并阐述各种概念间错综复杂的关系与影响。

其分析步骤如下^[16]：

1) 确定并识别影响系统的要素。依据 1.1 节中结合 STAMP 与 24Model 模型识别出的事故致因,从而确定影响系统的所有关键因素,并对各因素进行编号 $S_i, i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 。

2) 分析各要素间相互关系确定邻接矩阵 E 。

$$E = a_{ij}, i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \tag{1}$$

式中 a_{ij} 为邻接矩阵中的要素,若因素 S_i 对因素 S_j 有影响,则 a_{ij} 取 1,反之则取 0。

3) 运用布尔运算规则计算邻接矩阵的可达矩阵 M 。若可达矩阵中元素为 1 时,则表明二者之间存在路径。

$$(E + I) \neq (E + I)^2 \neq \dots \neq (E + I)^k = (E + I)^{k+1} = M \tag{2}$$

式中: I 为单位矩阵; k 为正整数。

4) 将可达矩阵层级分解,构建 ISM 层次图。

1.3 事故致因影响分析

基于 1.2 节中事故致因逻辑关系的分析结果,可进行以下事故致因影响分析:①由可达矩阵确定因素间的路径关系,利用 Pajek 方法构建复杂网络模型,减弱事故致因间逻辑关系的主观性,并依据度和聚类系数分析事故致因影响;②由层次结构图确定因素间的层级关系,利用贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)模型分析节点的变化率以确定事故的关键致因,从而相互印证得出事故致因影响事故的程度。

1.3.1 Pajek 方法

1998 年 BATAGELJ 等^[17] 基于 Delphi(Pascal)语言研发出 Pajek 软件。Pajek 软件是一个专门用于分析复杂网络结构的仿真平台,其基于复杂网络结构图模型,能够处理多种数据类型,进而解析多节

点网络拓扑结构,并量化性能指标,从而有效地进行复杂网络分析,该软件已被成功应用于社会网络分析、生物信息学和基础设施规划等行业。

应用 Pajek 软件分析复杂网络常用方法有度分析和聚类系数分析。

1) 度分析。度是复杂网络节点的属性中最简单也是最重要的指标^[18]。在复杂网络分析中,节点的度通常被用来衡量其在网络中的重要性。对于有向网络而言,度被细分为出度、入度和总度 3 种。其中,出度反映该节点对网络中其他节点施加影响的程度;而入度体现该节点受其他节点影响的程度;总度是出度和入度之和,综合反映节点的重要程度。

2) 聚类系数分析。聚类系数是用于量化图形中节点聚集程度的指标。当 1 个节点的聚类系数高于整个网络的平均值时,这意味着该节点与其相邻节点之间的连接相对紧密,即该事故致因容易与其他因素发生耦合作用造成风险演化。

1.3.2 BN 方法

BN 模型于 1988 年由 PEARL 等^[19]提出,BN 能够模仿人类在处理不确定性问题时的推理过程,从

而精确且迅速地揭示不同影响因素之间的相互关系以及事故的根源。

BN 分析方法是 通过 agena. ai 软件构建 BN 图,基于数据收集确定各节点的先验概率和条件概率,将泄漏事故作为证据变量以观测各节点发生概率的变化,从而反映节点对事故的影响。

2 危化品罐区泄漏事故致因识别与影响量化

以中国石油化工股份有限公司茂名分公司“6·8”泄漏起火事故^[20](简称“6·8”事故)为例开展研究,并采用事故调查报告及官方权威报道等资料进行分析。

2.1 STAMP-24Model 模型识别事故致因

经过分析“6·8”事故,明确涉事故主体包括涉事故设备、涉事故人员、涉事故企业、政府和有关部门 4 个方面,因此,STAMP-24Model 模型可分为物理层、人员层、管理层和政府层 4 个层级。“6·8”事故 STAMP-24Model 模型如图 2 所示。

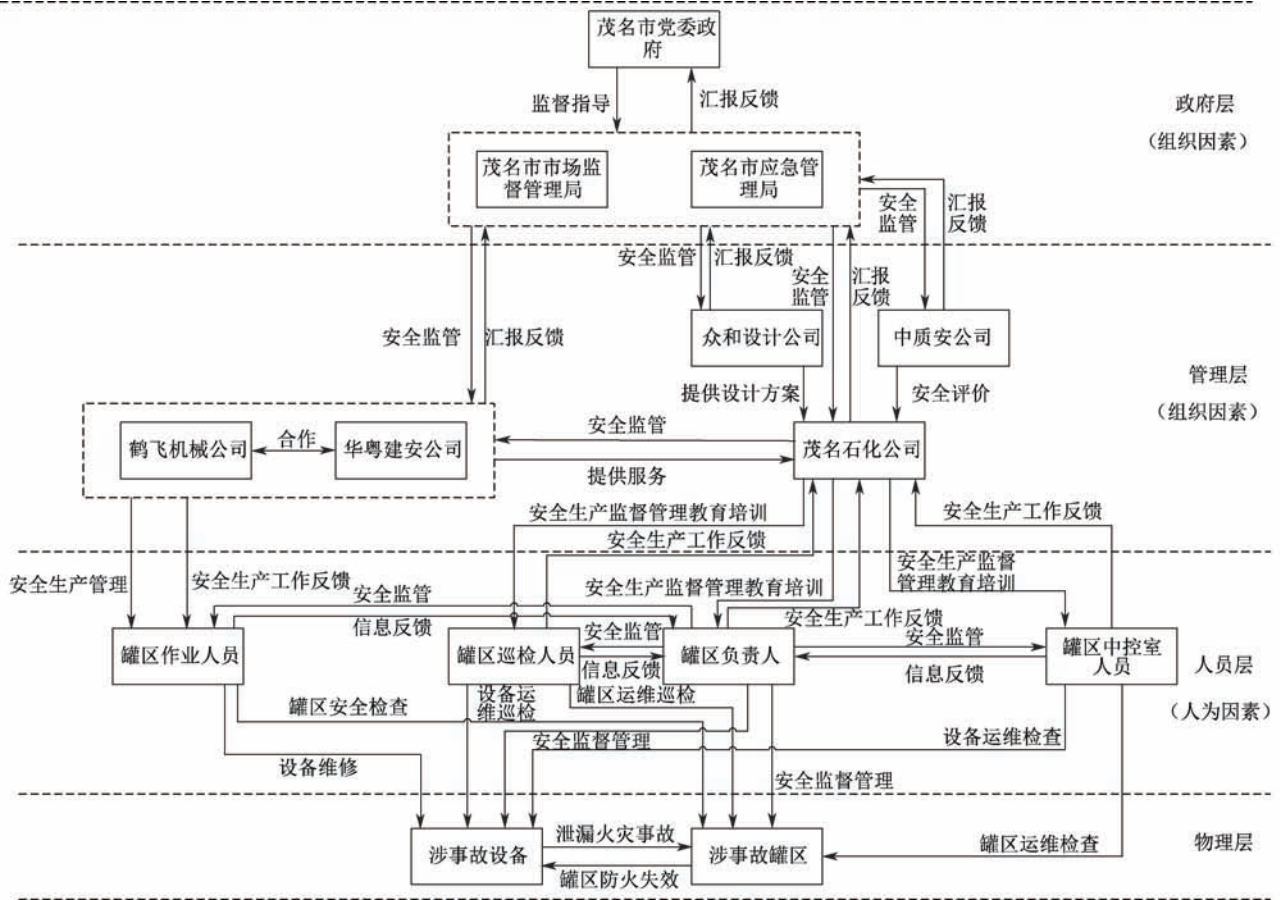


图 2 基于 STAMP-24Model 模型的“6·8”事故致因分析

Fig. 2 Analysis chart of "6·8" accident based on STAMP-24Model

根据图 2 所呈现的模型框架,从物理层、人员层的直接和间接原因分析见表 1,管理层和政府层、管理层和政府层深入剖析事故致因,物理层和人员层的根本原因分析见表 2。

表 1 “6·8”事故直接和间接原因分析结果

Table 1 Results of analysis of direct and indirect causes of "6·8" accident				
系统层次	组件	直接原因	说明	间接原因
物理层	涉事故设备 (乙烯输送泵)	涉事故泵由于人员的操作失误造成泄漏 A_1	乙烯输送泵由于拆卸阀门环节的失误发生泄漏	—
		乙烯与泄漏口摩擦产生静电火花 A_2	高速喷射的乙烯与泄漏口摩擦产生静电火花	—
		涉事故泵安全装置失效 A_3	乙烯输送泵手动阀处于火场核心区,事故发生后难以关闭	—
	涉事故罐区	罐区内其他设备防火失效 A_4	火灾造成中间泵带管廊上的管道破裂,泄漏源增多,火势扩大	安全措施不足 B_3 、 隐患意识不足 B_2
人员层	罐区作业人员	作业过程未排除故障 A_5	技术人员未在规定时间内完成泵阀门拆卸安装,未排除故障	专业知识不足 B_1
		更换不适用泵的阀门结构 A_6	技术人员将泵阀门更换为不适用该泵的阀门结构	专业知识不足 B_1 、 安全意识缺失 B_4
		未排除故障后,未告知或未标记信息 A_7	未排除故障后,技术人员没有告知车间人员泵的处理情况	专业知识不足 B_1 、 安全意识缺失 B_4
人员层	罐区巡检人员	未分析作业风险而直接作业 A_8	泵阀门发生故障时,巡检人员未分析其风险而直接操作	专业知识不足 B_1 、 安全意识缺失 B_4
		维修设备配置不足 A_9	巡检人员拆卸阀门时专业设备配置不足	专业知识不足 B_1
	罐区负责人	监督作业过程未排除隐患 A_{10}	罐区负责人监督技术人员操作,未发现技术人员操作存在隐患	安全意识缺失 B_4 、 隐患意识不足 B_2
		作业过程未配备人员监督 A_{11}	罐区设备人员操作作业时,负责人未进行安全监督	安全意识缺失 B_4 、 隐患意识不足 B_2
	罐区中控室人员	管网压力变化未告知 A_{12}	更换阀门后,中控人员未告知现场人员压力发生变化	安全意识缺失 B_4 、 隐患意识不足 B_2
		应急措施失效 A_{13}	发生火灾后,中控仪表失灵,监控信息失真	安全措施不足 B_5

2.2 构建 ISM 分析事故致因逻辑关系

根据 STAMP-24Model 模型中每个组件间的关系,并结合事故致因分析,得出事故致因间的相互关系。

1) 确定并识别影响系统的要素。根据图 2 中各组件间的控制与反馈关系以及表 2 的事故致因分析,确定影响系统要素。

2) 建立邻接矩阵 E ,并计算可达矩阵 M 。确定事故致因间的逻辑关联,构建邻接矩阵表征因素间影响关系;基于布尔运算规则计算可达矩阵,识别致因演化路径。

3) 将可达矩阵层次分解,得到 ISM 层次,如图 3 所示。

2.3 事故致因影响分析

2.3.1 复杂网络模型建立

根据 2.2 节可达矩阵式(4),将可达矩阵的各

因素化为节点,若元素为 1,则表明因素间存在路径,即节点间存在有向边。为此,使用 Pajek 软件建立复杂网络模型,“6·8”事故复杂网络模型,如图 4 所示。

为研究“6·8”事故复杂网络系统与事故致因的关系,选取度和聚类系数分析复杂网络特性,通过度值来刻画各节点(事故致因)对系统或其他节点的影响程度,利用聚类系数表明各节点的耦合作用。

1) 度分析。根据度分析结果,根本原因为出度值比另外 2 个因素整体偏高,即在事故复杂网络系统中根本原因更容易影响系统和其他因素;直接原因为入度值比另外 2 个因素整体偏高,即在事故复杂网络系统中直接原因更容易受系统和其他因素影响。总度排序前 10 位依次是: C_1 、 C_8 、 C_{12} 、 C_6 、 A_8 、 A_6 、 A_9 、 C_2 、 C_3 、 C_{13} 。根据总度值可以看出, C_1 、 C_8 排列最高,表明企业安全生产规章制度未落实与工程

表 2 “6·8”事故根本原因分析结果
Table 2 Results of root cause analysis of "6·8" accident

系统层次	组件	根本原因	说明
管理层	涉事故及相关企业	安全生产规章制度未落实 C_1	涉事故企业对外包公司管控不力, 未按施工方案冒险作业
		变更管理制度未落实 C_2	涉事故企业未按规定对变更项目风险评估, 违规简化审批流程
		设备管理漏洞严重 C_3	涉事故企业对涉事故罐区设备资料不全, 投入使用非法制造的球阀
		事故整改措施未落实 C_4	涉事故企业在事故发生前的事故调查报告中的重大危险隐患仍未落实整改
		安全生产费用未按规定使用 C_5	涉事故企业自 2020 年以来安全生产费用未专款专用
		人员配置情况不到位 C_6	涉事故企业存在个别人员未按期培训考核、持证上岗
		违规涉事项目阀门改造 C_7	涉事故相关企业在资料不全并未技术对接情况下, 擅自改造阀门结构
		工程管理规定执行不严 C_8	涉事故相关企业伪造施工技术方案且未审批、施工过程安全监督不到位
		涉事故企业安全评价报告失实 C_9	涉事故相关企业对涉事故企业安全评价失实
		涉事故设备阀门设计与实际不符 C_{10}	涉事故相关企业在未论证情况下, 将涉事故设备阀门设计与现实不符
政府层	各级政府和有关部门	安全发展理念不牢 C_{11}	未对前两年重大事故深刻反思
		安全生产监管职责不明确 C_{12}	未明确涉事故企业监管主体
		特种设备安全监督管理不力 C_{13}	未按照规定将涉事故企业违法行为移送执法监督

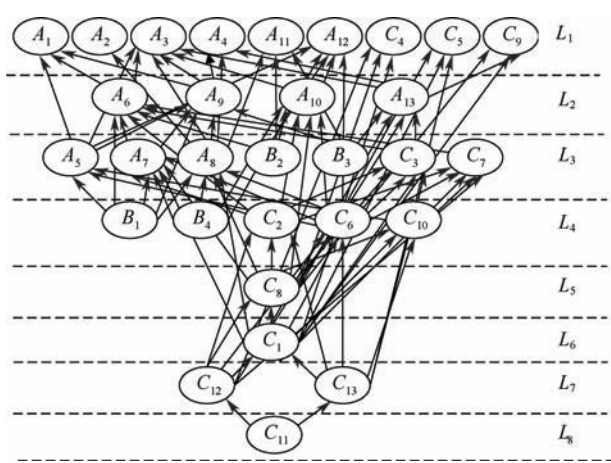


图 3 “6·8”事故 ISM 层次

Fig. 3 ISM hierarchy diagram for "6·8" accident

管理规定执行不严是影响其他致因及系统的关键因素。人为因素中 A_8 、 A_6 、 A_9 排列最高, 即事故中未分析作业风险而直接作业、更换不适用泵的阀门结构和维修设备配置不足是关键直接因素。总度排序前 10 中, 组织因素占 70%, 说明企业安全生产规章制度未落实、工程管理规定执行不严及政府与相关部门安全生产监管职责不明确等是导致事故发生的核

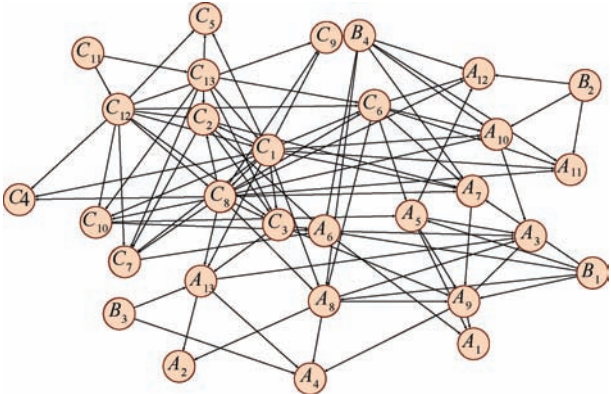


图 4 “6·8”事故复杂网络模型

Fig. 4 Complex network model of "6·8" accident

心。度分析结果如图 5 所示。

2) 聚类系数分析。复杂网络各节点聚类系数见表 3。由表 3 可知: 整个网络的平均聚类系数为 0.165 738 937。在各节点中, 有 9 个节点的聚类系数高于平均值, 分别属于直接原因 (A_1 、 A_4)、间接原因 (B_3)、根本原因 (C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_7 、 C_9)。其中, 根本原因占 66.7%, 说明根本原因容易与其他因素发生交互作用, 并通过相互耦合促进风险的动态演化, 因此, 必须强化安全约束以控制风险连锁反应的产生。

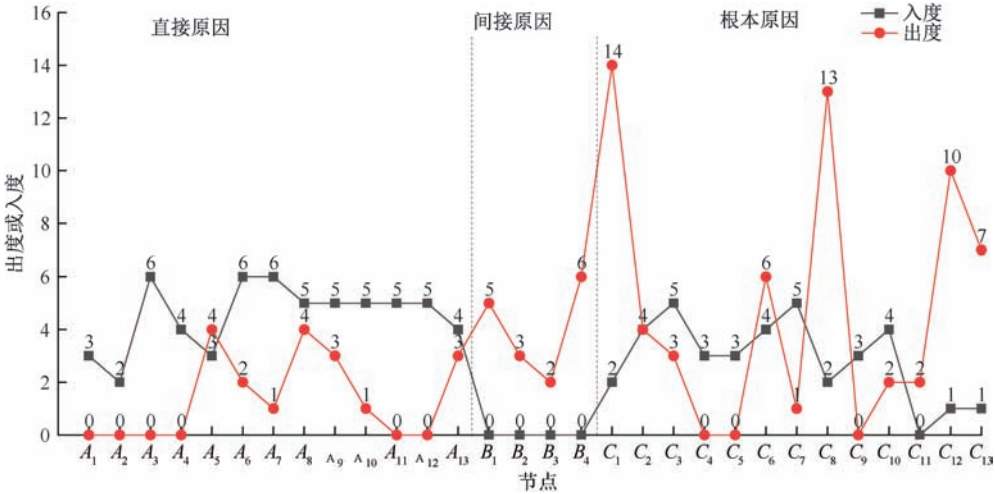


图5 各节点出度或入度值

Fig. 5 Outgoing or incoming values for each node

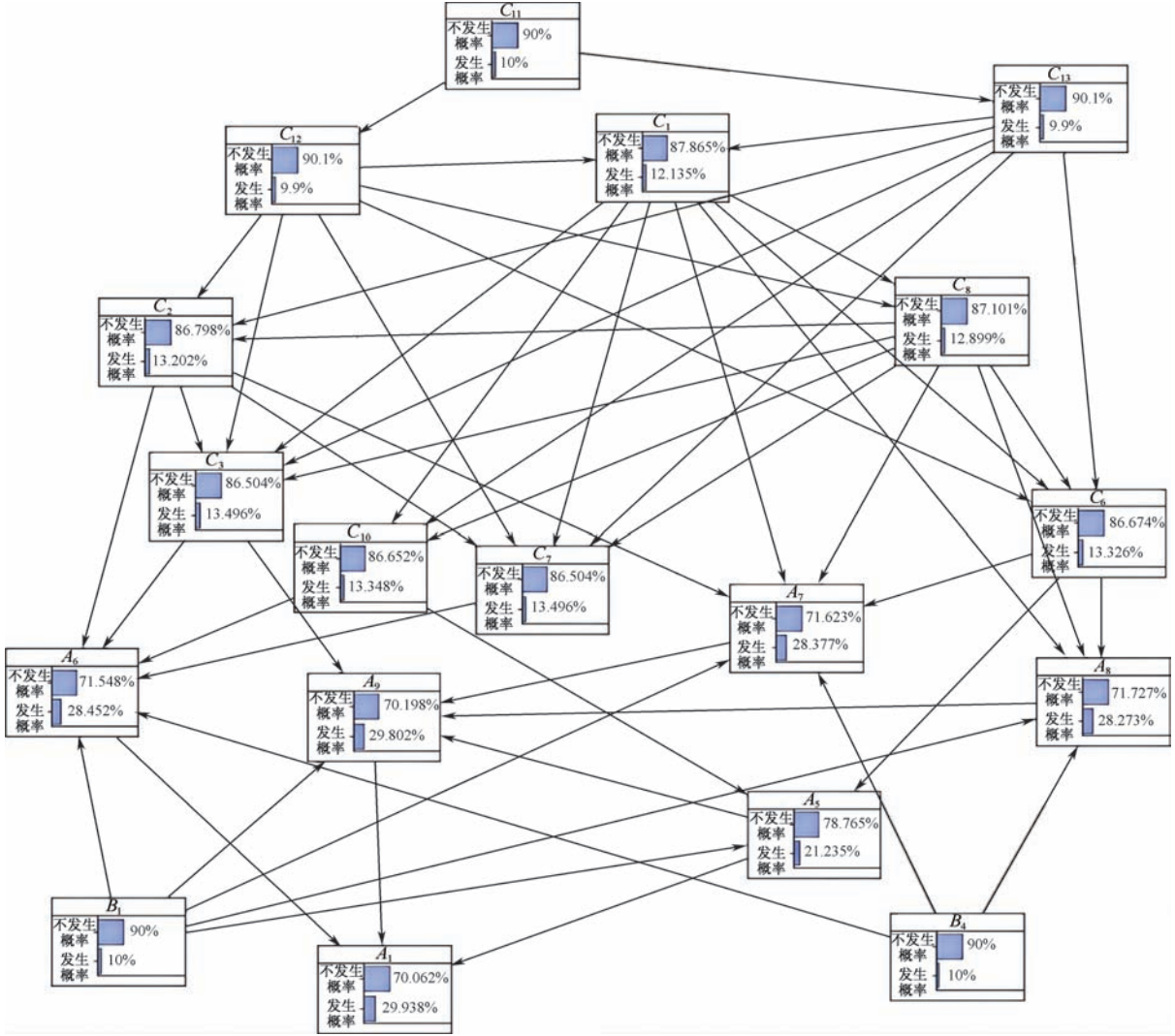


图6 以A₁为输出节点的BN

Fig. 6 BN graph with A₁ as output node

表 3 聚类系数计算结果

Table 3 Calculation results of clustering coefficient

节点	聚类系数	排序	节点	聚类系数	排序	节点	聚类系数	排序
A_1	0.166 666 667	8	A_{11}	0.15	12	C_4	0.5	1
A_2	0	27	A_{12}	0.1	20	C_5	0.333 333 333	4
A_3	0.066 666 667	25	A_{13}	0.095 238 095	22	C_6	0.155 555 556	11
A_4	0.166 666 667	8	B_1	0.15	12	C_7	0.3	5
A_5	0.095 238 095	22	B_2	0	27	C_8	0.138 095 238	17
A_6	0.035 714 286	26	B_3	0.5	1	C_9	0.5	1
A_7	0.142 857 143	15	B_4	0	27	C_{10}	0.133 333 333	18
A_8	0.083 333 333	24	C_1	0.145 833 333	14	C_{11}	0	27
A_9	0.125	19	C_2	0.285 714 286	6	C_{12}	0.163 636 364	10
A_{10}	0.1	20	C_3	0.196 428 571	7	C_{13}	0.142 857 143	15

2.3.2 BN 建立

由表 1 可知: A_1 (涉事故泵由操作失误造成泄漏)是泄漏事故发生的起点,通过 ISM 层次图,将 A_1 作为 BN 输出节点,构建 BN 图。以 A_1 作为证据变量确定各节点发生概率的变化程度从而分析节点对 A_1 的重要性。其中,节点的先验概率与条件概率通过数据收集进行确定,以 A_1 为输出节点的 BN 如图 6 所示。

将 A_1 作为证据变量,即可获得各节点的后验概率,如图 7 所示。由图 7 可知:直接原因(人为因

素)的节点发生概率变化最大,均超过 50%。因此,为预防和控制泄漏事故的发生,有必要控制人的不安全行为而预防事故的发生。

3 结 论

1) 采用基于 STAMP 的复合方法量化分析危化品储罐区的泄漏事故,突破了传统 STAMP 模型在事故分析中的局限性,构建基于动态系统理论的量化风险耦合分析框架。通过引入复杂网络与概率演化算法,数值化表征“复杂人-机-环-管交互风险”,为危化品储罐区安全防控提供可量化决策依据。

2) 通过事故案例验证 STAMP 复合方法的有效性和可行性,结果表明:根本原因的总度值高达 16,影响节点超过 53.3%,说明企业安全生产规章制度未落实、工程管理规定执行不严等是导致事故发生的核心;根本原因的聚类系数远超平均值,且在高于平均值的节点中占 66.7%,说明根本原因与其他因素相比更容易发生耦合而造成风险演化;直接原因的节点发生概率变化均超过 50%,对事故与其他因素最为敏感。

3) 基于研究发现的耦合风险演化特征,提出系统性防控策略,即构建“制度约束—过程反馈—能力迭代”三位一体安全管理体系,重点强化规范执行力的数字化监测与动态纠偏机制。

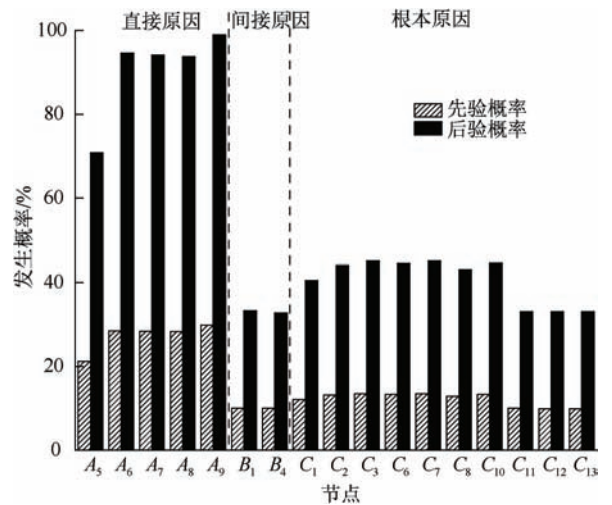


图 7 各节点的先验概率和后验概率

Fig. 7 Prior and posterior probabilities for each node

参 考 文 献

[1] “1·15”盩厔化工厂爆炸事故[OL]. [2023-01-15]. <https://baike.baidu.com/>.

[2] “3·17”美国休斯敦油库火灾事故[OL]. [2019-03-17]. <https://baike.baidu.com/>.

[3] 日照市山东石大科技石化有限公司“7·16”较大着火爆炸事故调查报告[OL]. [2015-07-16]. <http://www.shandong.gov.cn/index.html/>.

[4] LEVESON N. A new accident model for engineering safer systems[J]. Safety Science, 2004, 42(4): 237-270.

[5] CEYLAN B O, KARATUĞÇ, AKYUZ E, et al. A system theory (STAMP) based quantitative accident analysis model

- for complex engineering systems [J]. Safety Science, 2023, 166: DOI: 10.1016/j.ssci.2023.106232.
- [6] ALTABBAKH H, ALKAZIMI M A, MURRAY S, et al. STAMP-Holistic system safety approach or just another risk model? [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 32: 109–119.
- [7] QIAO Wanguan, CHEN Xue, XIA Wenxin. STAMP-based causal analysis of the coal mine major accident: from the perspective of safety process [J]. Energy Reports, 2021, 7: 116–124.
- [8] CHEN Jiayu, YAO Boqing, LU Qinhua, et al. A safety dynamic evaluation method for missile mission based on multi-layered safety control structure model [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 241: DOI: 10.1016/j.res.2023.109678.
- [9] EBRAHIMI H, ZAREI E, ANSARI M, et al. A system theory based accident analysis model: STAMP-fuzzy DEMATEL [J]. Safety Science, 2024, 173: DOI:org/10.1016/j.ssci.2024.106445.
- [10] 孙逸林, 郑小强, 刘险峰, 等. 重大城市燃气管道泄漏爆炸事故定量分析方法研究: 以湖北十堰“6·13”事故为例 [J]. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 3 312–3 320.
- SUN Yilin, ZHENG Xiaoqiang, LIU Xianfeng, et al. Research of quantitative analysis approach for serious leakage and explosion accident of urban gas pipeline: a case study of “6·13” accident [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(6): 3 312–3 320.
- [11] 吴海涛, 黎双喜. 高铁应急调度 STAMP/STPA 安全性分析 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 113–120.
- WU Haitao, LI Shuangxi. High-speed railway emergency dispatching safety analysis based on STAMP/STPA [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(6): 113–120.
- [12] 赵挺生, 胡俊杰, 师玉栋, 等. 塔吊安装与拆卸作业安全性分析 [J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(10): 32–38.
- ZHAO Tingsheng, HU Junjie, SHI Yudong, et al. Safety analysis on tower crane installation and dismantling [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(10): 32–38.
- [13] 傅贵, 陈奕燃, 许素睿, 等. 事故致因“2-4”模型的内涵解析及第6版的研究 [J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(1): 12–19.
- FU Gui, CHEN Yiran, XU Surui, et al. Detailed explanations of 24Model and development of its 6th version [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(1): 12–19.
- [14] 曾明荣, 秦永莹, 刘小航, 等. 采用 STAMP-24Model 的多组织事故分析 [J]. 安全与环境学报, 2024, 24(7): 2 741–2 750.
- ZENG Mingrong, QIN Yongying, LIU Xiaohang, et al. Analysis of multi-organization accident based on STAMP-24Model [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(7): 2 741–2 750.
- [15] WARFIELD J N. Binary matrices in system modeling [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1973, 3(5): 441–449.
- [16] 张玥, 帅斌, 尹德志, 等. 基于 STAMP-ISM 的铁路危险品运输系统风险-事故分析方法 [J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(9): 147–153.
- ZHANG Yue, SHUAI Bin, YIN Dezhi, et al. Risk-accident analysis method of railway dangerous goods transportation system based on STAMP-ISM [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(9): 147–153.
- [17] BATAGELJ V, MRVAR A. Pajek-program for large network analysis [J]. Connections, 1998, 21(2): 47–57.
- [18] 陈文瑛, 杜艳洋, 张艺凡, 等. 基于复杂网络的地铁运营风险传导规律研究 [J]. 安全与环境工程, 2017, 24(3): 170–174.
- CHEN Wenying, DU Yanyang, ZHANG Yifan, et al. Research on metro risk conduction based on complex network theory [J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24(3): 170–174.
- [19] PEARL J, BACCHUS F, SPIRITES P, et al. Probabilistic Reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference [J]. Synthese, 1988, 104(1): 161–176.
- [20] 茂名石化“6·8”泄漏起火事故调查报告及处理结果公布 [OL]. [2022-06-08]. <http://yjgl.gd.gov.cn/>.

作者简介: 付建民 (1977—),男,吉林靖宇人,博士,副教授,主要从事石油、化工过程风险辨识与评价技术、HAZOP 与 LOPA 技术应用、油气安全技术、石油化工装置泄漏模拟与评价技术等方向的研究。E-mail:fujianmin@126.com。

