

中文引用格式:王乾,常维纯,赵晶荣,等. 油气长输管道事故致因模型构建与要素分析[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(12): 111-118.

英文引用格式:WANG Qian, CHANG Weichun, ZHAO Jingrong, et al. Construction and factor analysis of accident causation model for long-distance oil and gas pipelines [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(12): 111-118.

油气长输管道事故致因模型构建与要素分析^{*}

王乾¹, 常维纯²高级工程师, 赵晶荣¹, 王智浩¹, 苟泽念², 佟瑞鹏^{**1}教授

(1 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083;

2 国家管网集团 科学技术研究总院分公司, 天津 300457)

中图分类号:X937

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.0535

基金项目:国家自然科学基金资助(52074302);国家管网集团科学技术研究总院科研项目(GWHT20250000101)。

【摘要】 为探究油气管道事故系统致因模型的理论内涵和实践路径,首先,统计 241 起国内外油气长输管道事故,对比分析国内外事故原因类型和调查报告内容;其次,融合人因分析与分类系统(HFACS)模型的因素体系和系统理论事故建模与过程(STAMP)模型的层级结构,提出涵盖 4 个系统层级和 17 个影响因素的事故致因模型;最后,运用 *N-K* 模型和社会网络分析方法开展风险耦合度计算、网络模型构建、中心性分析和核心-边缘分析。结果表明:设备故障和管道腐蚀占油气长输管道事故原因的 35.3%和 22.8%;风险耦合值与系统层级耦合数量成正比;安全培训不足、应急响应延迟、安全监督缺失、风险意识不足、风险沟通缺失、行为违规、设备工艺问题是事故的核心影响因素,事故全生命周期管理包括缩减阶段、预备阶段、反应阶段和恢复阶段。

【关键词】 油气长输管道事故; 事故致因模型; 事故影响因素; 系统理论事故建模与过程(STAMP); 人因分析与分类系统(HFACS); *N-K* 模型; 社会网络分析

Construction and factor analysis of accident causation model for long-distance oil and gas pipelines

WANG Qian¹, CHANG Weichun², ZHAO Jingrong¹, WANG Zhihao¹,
GOU Zenian², TONG Ruipeng¹

(1 School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2 PipeChina Research Institute of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: In order to explore the theoretical connotation and practical path of the systematic causation model of oil and gas pipeline accidents, 241 domestic and international oil and gas long-distance pipeline accidents were counted first, and the types of domestic and foreign accident causes and the contents of investigation reports were compared and analyzed. Secondly, we integrated the factor system of HFACS model and the hierarchical structure of STAMP model, and put forward an accident causation model that

* 文章编号:1003-3033(2025)12-0111-08; 收稿日期:2025-07-14; 修稿日期:2025-09-18

** 通信作者:佟瑞鹏(1977—),男,黑龙江穆棱人,博士,教授,主要从事行为安全管理、职业心理健康、环境风险评估等方面的研究。E-mail: tongrp@cumb.edu.cn。

covers 4 system levels and 17 influencing factors. Finally, the *N-K* model and social network analysis method were used to carry out risk coupling calculation, network model construction, centrality analysis and core-edge analysis. The results show that equipment failure and pipeline corrosion account for 35.3% and 22.8% of the causes of oil and gas long-distance pipeline accidents. The risk coupling value is directly proportional to the number of system-level couplings. Inadequate safety training, delayed emergency response, lack of safety oversight, lack of risk awareness, lack of risk communication, behavioral violations and equipment process issues are the core influences on the accidents. The full life cycle management of accidents includes the reduction phase, readiness phase, response phase, and recovery phase.

Keywords: oil and gas long-distance pipeline accidents; accident causation model; accident influencing factors; systems theoretic accident modeling and processes (STAMP); human factors analysis and classification system (HFACS); *N-K* model; social network analysis

0 引言

截至 2024 年底,我国油气长输管道总里程已达 19.5 万 km,涵盖原油管网、成品油管网和天然气管网“全国一张网”战略布局。油气长输管道事故具有突发性、破坏性和影响深远的特点,人的不安全行为和管道设备故障是导致油气管道事故的主要原因。因此,构建涵盖油气管道人机交互的通用事故致因模型,探究事故演化情景的构成要素,对油气管道事故预防与风险管控具有重要意义。

油气管道泄漏爆炸的影响因素包括人员操作、设备故障、环境灾害、管理缺陷。典型事故研究集中在特定情境下的风险评估和事故情景分析,基于系统理论事故建模与过程 (Systems Theoretic Accident Modeling and Processes, STAMP) 模型分析“11·22”东黄输油管道事故的风险因素和控制结构^[1],运用随机 Petri 网和马尔可夫链条模拟“6·13”十堰燃气爆炸事故的动态演变机制^[2],以及通过知识图谱构建油气管道长距离应急管理模型^[3]。事故案例集研究聚焦关键影响因素和致因路径的共性规律挖掘,使用模糊集定性比较分析方法探究油气管道事故致因的组合方式^[4],基于人因分析与分类系统 (Human Factors Analysis and Classification System, HFACS) 模型和社会网络分析梳理事故致因链条^[5],还有学者从全链条防控角度提出智慧管网安全管理模式^[6-7]。现有研究为油气管道风险管理和事故防控提供有益借鉴,但在大样本事故案例分析和系统理论模型构建上仍存在不足。

有学者尝试将 STAMP 嵌入 HFACS 模型框架,构建油气管道事故原因的分类体系^[8]。然而,将

HFACS 模块化因素类别纳入 STAMP 安全控制结构的组件中被证明是更适用于复杂系统分析的理论模型^[9],已在建筑坍塌事故、道路交通事故研究中应用^[10-11]。因此,笔者拟对比分析国内外油气长输管道事故类型和调查报告内容,综合考虑油气长输管道事故成因,构建 STAMP-HFACS 事故致因模型划分不同层级的影响因素,结合 *N-K* 耦合模型和社会网络分析方法测度风险耦合类型和事故关键因素,以期推进油气管道事故致因机制与防控策略研究。

1 国内外油气长输管道事故统计分析

1.1 油气长输管道事故统计

油气长输管道 (简称油气管道) 实现生产地与消费地成品油、原油和天然气的远距离输送连通。在事故致因机制、应急管理研究领域,油气管道相较于燃气管道或工业管道具有信息资料有限、影响因素多样、多主体协同救援的特点。收集和整理某大型油气管道运营企业的事故调查资料、国内外管道管理部门和社会组织的事故调查报告,开展油气管道事故统计和系统分析。

美国和加拿大油气管道事故管理制度较为完善,定时更新和发布事故年份、状态、类型、原因和经过等数据库信息。美国运输部管道与危险材料安全管理局 (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, PHMSA) 和加拿大能源监管机构 (Canada Energy Regulator, CER) 将油气管道事故原因划分为管道腐蚀、设备故障、自然力破坏、其他外力破坏、挖掘损伤、误操作和其他原因 7 类。收集 PHMSA、CER 以及我国油气管道企业的事故调查报

告,受限于事故调查 1~2 年时间的周期性,统计 2000—2023 年中国(78 起)、美国(132 起)、加拿大(31 起)油气管道事故共 241 起。根据事故调查报告的完整性和权威性筛选 77 起事故作为事故致因机制研究样本,事故数据集如图 1 所示。

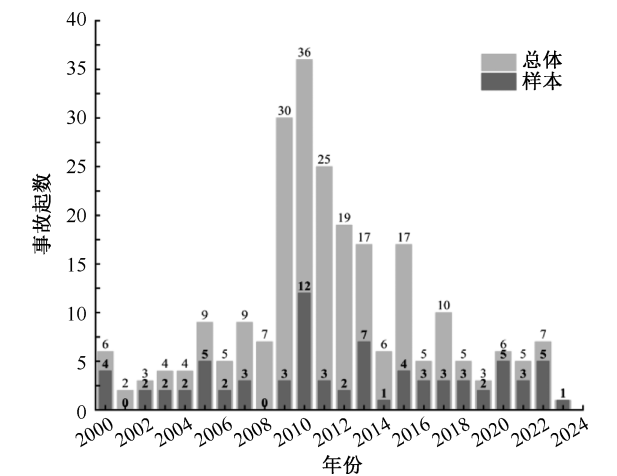


图 1 2000—2023 年油气长输管道事故统计

Fig. 1 Statistics on oil and gas long-distance pipeline accidents from 2000 to 2023

参考 PHMSA 和 CER 油气管道事故的分类体系,将其他外力破坏和挖掘损伤归类为第三方破坏,其他原因如村民耕地破坏暂不统计,事故原因可划分为管道腐蚀、设备故障、误操作、自然灾害破坏和第三方破坏 5 类^[12],油气管道事故原因的统计结果如图 2 所示。美国和加拿大管道事故中设备故障和管道腐蚀分别占比 68.9%、74.2%,同时,设备故障和管道腐蚀分别占国内外事故案例集的 35.3%、22.8%。由于我国油气管道建设初期法律法规和安全监管体系比较薄弱,第三方破坏因素中打孔盗油行为占比 62.9%。根据我国完整信息的事故调查报告,设备故障是最大的油气管道事故原因类型,占比 30.0%。

1.2 国内外事故调查差异化分析

对比分析中国、美国和加拿大的油气管道事故调查报告,均涉及事故基本信息、事故经过与应急处理、事故损失评估和原因分析等内容,但在框架结构、分析侧重点上存在较大差异。框架结构层面,中国调查报告由基本情况、事故发生经过及应急处置情况、事故原因分析、事故责任人员和单位处理情况、事故防控措施组成;美国调查报告包含相关运营商、位置及后果、内容摘要、系统详情、失效前发生的事件、应急响应、恢复运行情况概述、调查详情、调查结果及促成原因、附录;加拿大调查报告基本遵循摘

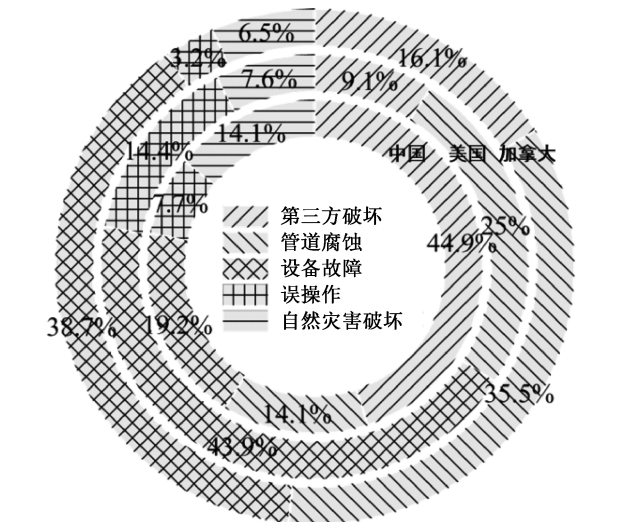


图 2 油气长输管道事故原因分布

Fig. 2 Distribution pattern of causes of oil and gas long-distance pipeline accidents

要、事故信息、响应过程、现场检查、管道信息、实验室分析、诚信管理监督要求、管道完整性管理要求、事故分析、技术检测与测试、事故原因与促成因素、风险调查结果与安全措施。中国、美国、加拿大油气管道事故调查报告主要内容见表 1。分析侧重点上,中国更侧重事故监管体系和责任追究、定量分析数据较少;美国和加拿大偏重技术检测结果分析和事故链的系统性建模。

表 1 国内外事故调查报告框架对比分析

Table 1 Comparative analysis of domestic and foreign accident investigation report frameworks

调查报告内容	中国	美国	加拿大
事故基本信息	√	√	√
事故经过与应急处理	√	√	√
事故损失评估	√	√	√
技术调查与实验分析	—	√	√
管道完整性管理	—	√	√
事故原因分析	√	√	√
监管体系与责任追究	√	—	—
防范措施与改进建议	√	—	√
附录(调查数据)	—	√	—

2 油气长输管道事故致因模型构建

2.1 STAMP 与 HFACS 事故致因模型构建

相较于煤矿、化工、建筑事故直接原因主要是人的不安全行为的特点,油气管道事故的直接致因因素还包括管道本体失效和外部环境扰动,第三方破坏活动也是常见的导致管道损坏、油气泄漏爆炸的

事故触发条件。因此,厘清油气管道的复杂系统特性和事故演化链条,构建涵盖“误操作、第三方破坏、管道腐蚀、设备故障和自然灾害破坏”事故致因类型的通用模型,为油气管道事故分析提供理论指导。

STAMP 模型基于系统控制理论将油气管道系统划分为层次化和关联性的组织结构,每个层级对下一层级施加安全约束,同时,将安全信息反馈给上一层级。STAMP 模型反映油气管道事故层级控制结构间的安全约束失效,强调事故多维影响因素的交互作用,将系统层级划分为政府层、企业层、行为层和物理层。然而,STAMP 模型强调宏观系统的复杂性和交互性,尚且缺少适用于事故综合分析的影响因素分类体系。HFACS 模型提供从人为因素到组织管理的事故致因链条,以及人的不安全行为、不安全行为的前提、不安全监管、组织影响 4 个层面的事故影响因素,由于 HFACS 最早应用于航空领域研

究,一些风险因素并不符合油气管道事故特征,通过汲取 HFACS 层次化因素的分类思想形成油气管道行业特色的影响因素集。将 HFACS 模型的模块化影响因素纳入 STAMP 模型的安全控制结构中,既满足油气管道事故的复杂系统特性和耦合触发机制,又能将成熟的事故致因理论融合应用于油气管道事故分析。因此,基于 STAMP 系统理论模型和 HFACS 人为因素模型的理论内涵和结构逻辑,构建油气管道事故致因通用模型,如图 3 所示。在整个油气管道事故系统中,政府及监管机构包括不安全监督,管道运营单位、承包单位、监理单位、第三方主体包括组织影响和不安全监督,油气管道事故现场包括不安全行为的前提和不安全行为,外部影响包括自然灾害、管道腐蚀和设备工艺。STAMP-HFACS 系统各部分之间相互作用,共同影响油气管道事故的发生和情景演化过程。

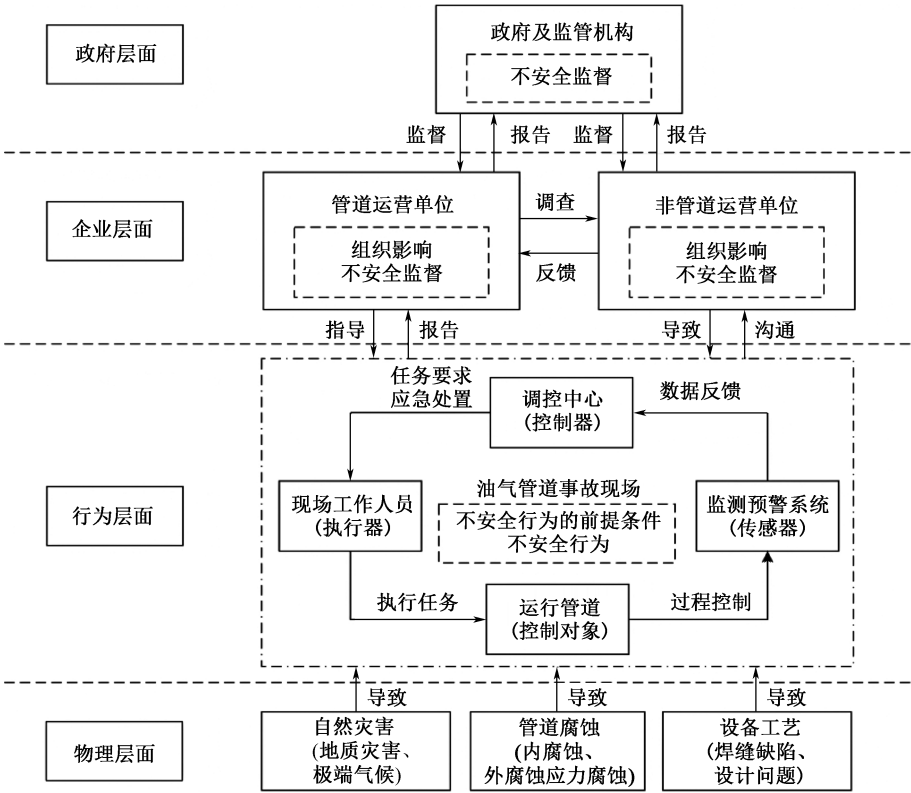


图 3 油气长输管道事故致因通用模型

Fig. 3 Generalized model of oil and gas pipeline accident causation

2.2 油气长输管道事故影响因素筛选

根据油气管道事故调查报告的事故经过、原因、处置信息的详细程度,遵循事故调查原因权威性和事故处置经过参考性的原则,从 241 起油气管道事故中筛选出 77 起事故作为事故致因模型分析样本。

STAMP-HFACS 事故致因模型包括 4 个系统层级和 17 个影响因素,每个影响因素具有独立性和代表性,并且能从事故调查报告的原因部分直接提取,进而避免人为主观因素的干扰。油气管道事故影响因素的频数及占比见表 2。

表 2 油气长输管道事故系统层级及影响因素				
Table 2 Oil and gas long-distance pipeline accident system hierarchy and influencing factors				
系统层次	控制结构	影响因素	频数	占比/%
政府层 (24)	监督职能	应急管理不当	10	12.99
		监管责任模糊	16	20.78
企业层 (71)	组织影响	安全培训不足	21	27.27
		应急响应延迟	27	35.06
	安全监督	安全监督违规	11	14.29
		安全监督缺失	53	68.83
		项目管理问题	17	22.08
	第三方因素	施工破坏	11	14.29
蓄意破坏		3	3.90	
行为层 (68)	人员状态	风险意识不足	36	46.75
		风险沟通缺失	25	32.47
		知识技能不良	16	20.78
	人员行为	行为失误	15	19.48
		行为违规	32	41.56
物理层 (56)	自然灾害	地质灾害/ 极端气候	9	11.69
	管道腐蚀	内腐蚀/外腐 蚀/应力腐蚀	12	15.58
	设备工艺	焊缝缺陷/ 设计问题	39	50.65

企业层的安全监督缺失(68.83%)、行为层的风险意识不足(46.75%)和行为违规(41.56%)、物理层的设备工艺问题(50.65%)的频率较高。管道运营单位的安全监督缺失,如安全检查不落实、风险隐患未整改等,是占比最大的油气管道事故致因因素。行为违规既包含人的不安全行为导致事故发生,也包括未按照规定采取减缓措施促使事故态势的扩大,61.04%的事故涉及人员行为因素。设备工艺问题体现在管道运行期焊缝缺陷的直接致因和建设期施工设计的间接致因,66.23%的事故涉及管道本体安全性的问题。

2.3 N-K 模型与社会网络分析组合方法

N-K 模型是研究复杂系统因素间作用关系和耦合影响的分析方法,社会网络分析是基于图论与矩阵运算剖析复杂系统结构性特征的量化方法。N-K 模型计算系统层次中政府层、企业层、行为层和物理层的风险耦合概率,社会网络分析量化影响因素中的核心节点与重要程度,该组合方法从耦合关系和关键因素 2 个维度分析油气管道事故。

N-K 模型用来量化事故致因因素间非线性的风险耦合特征,揭示事故发生的复杂成因^[13]。N-K 模型由 N 和 K 这 2 个关键参数构成,N 表示复杂系统

内元素的数量,根据每个元素 n 种不同的状态,元素间的耦合方式总数为 n^N ,K 表示复杂系统元素间相互耦合关系的数量,K 的取值范围是[0,n-1]。油气管道事故系统内政府、企业、行为、物理元素的耦合程度即风险耦合值 T 的计算公式如下,T 越大说明该类元素耦合方式更容易导致油气管道事故的发生。

$$T(X_1,X_2,\cdots,X_i)=\sum_{x_1}\cdots\sum_{x_i}F(X_1,X_2,\cdots,X_i)\times\log_2\left(\frac{F(X_1,X_2,\cdots,X_i)}{F(X_1),F(X_2),\cdots,F(X_i)}\right)\quad(1)$$

式中: X_i 为特定类型的系统元素, $i=2,3,4$; $F(X_1,X_2,\cdots,X_i)$ 为不同元素耦合的频率; $F(X_i)$ 为特定元素发生的频率。

油气管道事故影响因素的耦合类型分为单因素风险耦合、双因素风险耦合和多因素风险耦合,影响因素耦合信息见表 3。事件的 4 个数字表示顺序为政府层、企业层、行为层和物理层,1 和 0 分别表示影响因素参与和不参与风险耦合。

表 3 油气长输管道事故影响因素耦合信息			
Table 3 Coupled information on factors affecting oil and gas long-distance pipeline accidents			
耦合类型	事件	频数	频率
单因素风险耦合	0010	1	0.013 0
	0110	15	0.194 8
双因素风险耦合	0101	3	0.039 0
	0011	4	0.051 9
	1100	1	0.013 0
	0111	30	0.389 6
多因素风险耦合	1011	1	0.013 0
	1101	5	0.064 9
	1110	4	0.051 9
	1111	13	0.168 8

社会网络分析主要识别关键影响因素和分析信息传递路径,通过将油气管道事故的影响因素转化为节点,因素间的关系视为连接线,构建“节点-边”网络模型来揭示事故演化的驱动机制,进而补充 N-K 模型的元素耦合分析结果。社会网络分析的关键测量指标包括度中心性、接近中心性和中介中心性和核心-边缘因素。度中心性用某个节点直接连接其他节点的数量衡量,反映节点在整体网络中的重要程度。接近中心性通过到其他节点的最短路径计算,反映节点间的紧密程度。中介中心性体现节点处于网络连接路径的中介作用,揭示其对风险传递的控制能力。

3 风险耦合分析与核心因素挖掘

3.1 N-K 耦合分析结果

N-K 模型的计算结果见表 4。风险耦合值从大到小的排序为 $T_4(a,b,c,d)>T_{31}(a,c,d)>T_{32}(a,b,c)>T_{21}(a,c)>T_{33}(b,c,d)>T_{34}(a,b,d)>T_{22}(c,d)>T_{23}(b,c)>T_{24}(a,d)>T_{25}(a,b)>T_{26}(b,d)$ 。单因素风险耦合、双因素风险耦合、多因素风险耦合的平均值分别为 0.107 1、0.052 1、0.016 5。

通过 N-K 耦合分析结果,得出风险耦合值基本随着系统层次数量的增加而变大,除此之外, $T_{21}(a,c)>T_{33}(b,c,d)$ 反映政府层在企业重大隐患管控与事故应急救援的重要性。耦合值前 5 的因素耦合形式都有行为层的参与,双因素风险耦合值比较大的 $T_{21}(a,c)$ 、 $T_{22}(c,d)$ 、 $T_{23}(b,c)$,表示油气管道事故是系统内部和外部因素共同作用的结果,说明人的行为是导致油气管道事故的重要影响因素。因此,避免多因素耦合作用和重点监管人员行为是预防、控制事故的关键举措。

表 4 事故不同影响因素耦合形式下的风险耦合值 T

Table 4 Risk coupling values T under different forms of influence factor coupling

因素耦合	耦合值	排序
$T_4(a,b,c,d)$	0.107 1	1
$T_{31}(a,c,d)$	0.080 5	2
$T_{32}(a,b,c)$	0.069 6	3
$T_{21}(a,c)$	0.051 6	4
$T_{33}(b,c,d)$	0.034 9	5
$T_{34}(a,b,d)$	0.023 4	6
$T_{22}(c,d)$	0.014 8	7
$T_{23}(b,c)$	0.014 7	8
$T_{24}(a,d)$	0.007 2	9
$T_{25}(a,b)$	0.006 8	10
$T_{26}(b,d)$	0.003 9	11

3.2 社会网络分析结果

3.2.1 社会网络模型构建

挖掘每起油气管道事故影响因素的共现关系,形成事故致因共现矩阵,按照 2 个因素共同存在标记为 1,反之为 0 的规则,将最终的矩阵数据导入 Gephi 软件可视化处理,G、E、B、P 分别代表政府层、企业层、行为层、物理层的影响因素,绘制油气管道事故致因网络,如图 4 所示。

事故致因网络的整体网络密度为 0.875、标准差为 0.331、平均路径长度为 1.125,反映共线网络各节点的联系紧密以及整体结构稳定。节点的颜色深浅和大小表示影响因素的重要程度,连接线的粗

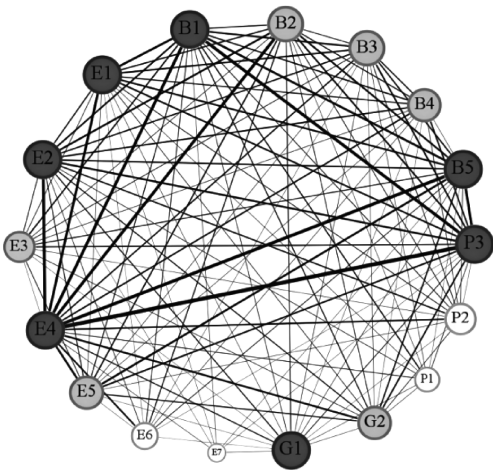


图 4 油气长输管道事故影响因素网络
Fig. 4 Network of factors influencing oil and gas long-distance pipeline accidents

细表示 2 个因素间的关联程度。结果表明:应急管理不当 G1、安全培训不足 E1、应急响应延迟 E2、安全监督缺失 E4、风险意识不足 B1、行为违规 B5、设备工艺问题 P3 为出现频率较高和影响作用较强的事故影响因素,58.4% 的事故由这些影响因素的 3 个及以上组成。同时,构成“人-机-环-管”耦合作用的油气管道事故情景演化链条。

3.2.2 社会网络分析结果

借助 Ucinet 软件分析油气管道事故影响因素的网络中心性,各影响因素的度中心性、接近中心性、中介中心性结果见表 5。在度中心性分析中,排名前 5 的节点为安全监督缺失 E4、设备工艺问题 P3、风险意识不足 B1、行为违规 B5 和应急响应延迟 E2,度中心性总和达到所有节点度中心性的 50% 以上,表明这些节点是造成油气管道事故最为普遍的致因因素,涉及企业监管、行为意识、设备工艺层面的影响。接近中心性排名前 5 的节点依次为蓄意破坏 E7、自然灾害破坏 P1、施工破坏 E6、安全监督违规 E3、管道腐蚀 P2,说明这些节点与其他节点的最短距离较小,影响因素间的联系较为紧密。中介中心性为 0 的节点有安全监督违规 E3、管道腐蚀 P2、施工破坏 E6、自然灾害破坏 P1、蓄意破坏 E7,表明这些节点位于事故致因网络边缘,作为桥梁或关键中介者的程度较低。接近中心性较高而中介中心性较低的节点,如自然灾害引起的泄漏爆炸事故,涉及的影响因素主要为监管缺失,风险意识。该类节点在事故致因网络的局部区域较为重要,但不能发挥信息传递的中介作用,因此,可加强关联影响因素的系统辨识,精准防控特定的油气管道事故。

表 5 油气长输管道事故致因网络中心性

Table 5 Network centrality of oil and gas long-distance pipeline accident causation

影响因素	度中心性	接近中心性	中介中心性
E4	195	16	2. 07
P3	150	16	2. 07
B1	142	16	2. 07
B5	130	16	2. 07
E2	122	16	2. 07
B2	110	17	0. 78
E1	101	16	2. 07
B3	84	17	0. 78
E5	75	18	0. 27
B4	69	18	0. 27
G2	68	18	0. 4
E3	50	19	0
P2	49	19	0
G1	41	16	2. 07
E6	34	21	0
P1	28	22	0
E7	10	25	0

在油气管道事故影响因素网络中心性分析的基础上,核心-边缘分析通过划分网络的核心区域和边缘区域,进一步揭示网络整体结构和节点分布特征,见表 6。核心影响因素有安全培训不足 E1、应急响应延迟 E2、安全监督缺失 E4、风险意识不足 B1、风险沟通缺失 B2、行为违规 B5 和设备工艺问题 P3,通过落实企业安全监管责任、建立健全双重预防机制、开展管道知识技能培训、加强管道完整性管理等防范措施提高系统韧性、预防事故发生。

表 6 油气长输管道事故核心-边缘影响因素

Table 6 Oil and gas long-distance pipeline accident core-periphery influences

位置	影响因素
核心	E1、E2、E4、B1、B2、B5、P3
边缘	G1、G2、E3、E5、E6、E7、B3、B4、P1、P2

系统剖析误操作、第三方破坏、管道腐蚀、设备故障和自然灾害破坏致因类型的油气管道事故,借鉴“缩减-预备-反应-恢复”(Reduction-Readiness-Response-Recovery,4R)危机管理理论提出油气管道事故防控措施。在事故缩减阶段,重点关注设备工艺问题,提升工程设计、物资采购、管材质量方面的管道设备本质安全。在事故预备阶段,加强安全培训体系和安全监督机制的有效落实,保障管道企业员工的履责能力与知识技能水平。在事故反应阶段,针对风险沟通和应急响应影响因素,构建“政府-社会-企业”动态信息共享机制与“情景-应对”应急响应模式。在事故恢复阶段,深度总结油气管道事故的经验教训,提高安全管理者和一线员工的风险意识,最终形成 4R 事故管理闭环反馈机制。

4 结 论

- 1) 对比分析中国、美国和加拿大的油气长输管道事故,设备故障和管道腐蚀分别占事故原因的 35.3%和 22.8%,中国事故调查报告侧重事故处置情况与监管责任追究,美国和加拿大事故调查报告更关注事故技术与管道完整性管理。
- 2) STAMP-HFACS 事故致因模型适用于所有类型的油气长输管道事故,共包含“政府层-企业层-行为层-物理层”4 个系统层级和 17 个影响因素,安全监管缺失、设备工艺问题、风险意识不足和行为违规是出现频率较高的影响因素,61.04%和 66.23%事故涉及人员行为因素和管道设备因素。
- 3) 油气长输管道事故风险耦合值与系统层级耦合数量成正比,事故核心影响因素有安全培训不足、应急响应延迟、安全监督缺失、风险意识不足、风险沟通缺失、行为违规、设备工艺问题,未来可深入研究油气管道事故情景演化过程影响因素的作用机制。

参 考 文 献

[1] GONG Yunhua, LI Yuntao. STAMP-based causal analysis of China-Donghuang oil transportation pipeline leakage and explosion accident[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 56: 402-413.

[2] LI Xinhong, MA Jie, PASMAN H, et al. Dynamic risk investigation of urban natural gas pipeline accidents using stochastic Petri net approach[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 178: 933-946.

[3] CHEN Yiyue, ZHANG Laibin, HU Jinqiu, et al. An emergency task recommendation model of long-distance oil and gas pipeline based on knowledge graph convolution network[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 167: 651-661.

- [4] SUN Yilin, ZEHNG Xiaoqiang, LIU Linxuan. Research on generation paths of production safety accidents in urban gas pipeline networks: a fuzzy set qualitative Comparative analysis (fsQCA) based on Chinese data[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, 90: DOI: 10.1016/j.jlp.2024.105353.
- [5] 韦敏, 史永晋, 范志炜, 等. 油气管道事故人因致因路径研究[J]. 西安科技大学学报, 2025, 45(1): 108-116. WEI Min, SHI Yongjin, FAN Zhiwei, et al. Mechanism of human factors in oil and gas pipeline accidents[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2025, 45(1): 108-116.
- [6] 王钰滔, 吕延鑫, 杨万里, 等. 国内外输气管道事故研究综述[J]. 化工设备与管道, 2022, 59(4): 78-84. WANG Yutao, LYU Yanxin, YANG Wanli, et al. Review of research for accidents occurred in gas transportation pipeline in home and abroad[J]. Process Equipment & Piping, 2022, 59(4): 78-84.
- [7] 张来斌, 胡瑾秋, 肖尚蕊. 油气智慧管道“端+云+大数据”跨域“信息-物理”安全保障技术现状及发展趋势[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(6): 1 825-1 836. ZHANG Laibin, HU Jinqu, XIAO Shangrui. Research status and development trends of "End & Cloud & Big Data" cross-domain security and safety guarantee technology for oil & gas intelligent pipelines system[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(6): 1 825-1 836.
- [8] 宫运华, 张喆, 范志炜. 油气管道事故原因分类模型及其社会网络分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(9): 34-40. GONG Yunhua, ZHANG Zhe, FAN Zhiwei. Classification model of oil and gas pipeline accidents causes and its social network analysis[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 34-40.
- [9] LOWER M, MAGOTT J, SKORUPSKI J. A system-theoretic accident model and process with human factors analysis and classification system taxonomy[J]. Safety Science, 2018, 110: 393-410.
- [10] 李珏, 李佳文. 基于 STAMP-HFACS 的建筑坍塌事故风险因素分析[J]. 工程管理学报, 2022, 36(5): 148-153. LI Jue, LI Jiawen. Risk factors analysis of building collapse accident based on STAMP-HFACS [J]. Journal of Engineering Management, 2022, 36(5): 148-153.
- [11] DONG Chuntong, ZHANG Yingyu, WANG Ziqi, et al. The hybrid systems method integrating STAMP and HFACS for the causal analysis of the road traffic accident[J]. Ergonomics, 2024, 67(7): 971-994.
- [12] 狄彦, 帅健, 王晓霖, 等. 油气管道事故原因分析及分类方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(7): 109-115. DI Yan, SHUAI Jian, WANG Xiaolin, et al. Study on methods for classifying oil & gas pipeline incidents[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(7): 109-115.
- [13] 李琼, 庞敏, 钟虹, 等. 融合 N-K 模型社会网络的化工企业爆炸风险因素耦合研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(12): 4 581-4 590. LI Qiong, PANG Min, ZHONG Hong, et al. Study on the coupling of explosion risk factors in chemical enterprises using Social Network Analysis integrated with the N-K model [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(12): 4 581-4 590.

作者简介: 王 乾 (1999—), 男, 河北秦皇岛人, 博士研究生, 主要研究方向为安全管理、风险评估。
E-mail: wangqian19990825@163.com。