

中文引用格式:国汉君,崔华莹,胡振启,等.融合知识图谱和 Apriori 算法的高风险作业致因分析与管控[J].中国安全科学学报,2026,36(4):75-84.

英文引用格式:Guo Hanjun, Cui Huaying, Hu Zhenqi, et al. Control and cause analysis for high-risk operations combined knowledge graph and Apriori algorithm [J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(4): 75-84.

融合知识图谱和 Apriori 算法的高风险作业 致因分析与管控*

国汉君¹研究员,崔华莹²,胡振启²,康荣学³研究员,赵金龙^{**2}教授

(1 国家能源集团,北京 100011; 2 中国矿业大学(北京)应急管理与安全工程学院,北京 100083; 3 中国安全生产科学研究院,北京 100012)

中图分类号:X928.03

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.04.0702

【摘要】 为提高高风险作业安全管理水平,提出一种基于知识图谱和 Apriori 算法的高风险作业智能精准管控方法。首先,搜集高风险作业相关事故案例,利用基于变换器的双向编码器表征-双向长短期记忆网络-条件随机场(BERT-BiLSTM-CRF)模型实现事故原因自动分类抽取,并构建高风险作业知识图谱,存储相关事故数据;然后,结合作业标准规范构建高风险作业致因要素指标体系,并利用 Apriori 算法明确高风险作业致因要素之间的关联关系;最后,提出针对性管控措施,以有限空间作业为例开展具体阐述。结果表明:作业人员未佩戴安全防护装备、盲目施救、未配备气体检测等设备、安全警示标志缺失、安全教育培训不到位和安全管理不到位是导致有限空间作业事故发生的主要原因。安全教育不到位与未佩戴安全防护装备的关联度较大,支持度为 80.7%,置信度为 60.41%;安全教育培训不到位与盲目施救的关联性也较强,支持度为 80.7%,置信度为 55.88%。

【关键词】 知识图谱; Apriori 算法; 高风险作业; 智能化管控; 致因要素

Control and cause analysis for high-risk operations combined knowledge graph and Apriori algorithm

Guo Hanjun¹, Cui Huaying², Hu Zhenqi², Kang Rongxue³, Zhao Jinlong²

(1 China Energy Investment Corporation Limited, Beijing 100011, China; 2 School of Emergency Management & Safety Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3 China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China)

Abstract: In order to improve the safety management level of high-risk operations, an intelligent management and control method was proposed based on the knowledge graph and the Apriori algorithm. First, some high-risk operation accidents were collected. Then, the accident causes were extracted and classified automatically by Bidirectional Encoder Representations from Transformers-Bidirectional Long Short-Term Memory-Conditional Random Field (BERT-BiLSTM-CRF) model, which constructed a knowledge graph of high-risk operation accidents, storing relevant accident data. Subsequently, an index system of high-risk operation causative factors was established, combined with the corresponding operation

* 文章编号:1003-3033(2026)04-0075-10; 收稿日期:2025-11-14; 修稿日期:2026-02-04

** 通信作者:赵金龙(1988—),男,河北承德人,博士,教授,主要从事火灾防治和城市风险评估方面的研究。E-mail: 15210567787@163.com。

standard specification. Furthermore, the correlation among causative factors was determined by the Apriori algorithm. Finally, some countermeasures were proposed for targeted control. In this paper, the application of confined space operations was used to demonstrate this method. The results showed that the main causes of confined space accidents are not wearing safety protective equipment", blind rescue", not being equipped with gas detection and other equipment", missing safety warning signs", insufficient safety education", and inadequate safety management". Moreover, the correlation between insufficient safety education" and not wearing safety protective equipment" is greater (80.7% support, 60.41% confidence), and the relationship between insufficient safety education" and blind rescue" also has a strong association (80.7% support, 55.88% confidence).

Keywords: knowledge graph; Apriori algorithm; high-risk operation; intelligent management; causative factor

0 引言

近年来,动火作业、有限空间作业等高风险作业逐渐成为城市发展和建设过程中的重要组成部分。在作业过程中,由于高风险作业的环境特殊、人员流动性大等因素影响,导致高风险作业具有高度危险性^[1],极易发生事故。同时,高风险作业涉及的不安全要素较多,包括人员、设备、环境和管理等多个方面,要素之间存在相互关联与风险叠加效应,导致现场安全管理难度大,因此,亟需基于现有高风险作业事故,研究高风险作业不安全要素之间的相互关系,建立一种高风险作业智能化管控方法,精准靶向管控高风险作业现场。

目前,针对高风险作业安全管控,国内外学者展开了一系列研究。在高风险管控方面,现有高风险作业管控方法主要通过人员经验辨识现场不安全因素,进而提出针对性管理办法。如章博等^[2]基于工作安全分析方法,开发了一款模拟高风险作业现场的虚拟平台,能够开展针对性的高风险作业培训;Peres 等^[3]针对高风险作业提出一个作业程序系统模型,利用任务频率、行业经验和程序三者相互作用的程度进行预测,发现考虑任务频率和行业经验时,安全氛围的影响更大。在数据库构建方面,高风险作业事故数量较多,现有研究主要通过提取事故调查报告中的因素,构建事故知识图谱,归纳相关事故。如 Jiang Weiguang 等^[4]基于 2010—2023 年中国发生的 86 起起重作业事故,提取吊装状态、吊装参数、操作人员等 6 类因素,构建起重作业事故知识图谱,并能够结合实时数据识别不安全的起重作业状态;Zhou Zhipeng 等^[5]基于 2011—2022 年发生的 941 起高处作业事故调查报告,利用双向长短期记忆网络-条件随机场 (Bidirectional Long Short-Term

Memory-Conditional Random Field, BiLSTM-CRF) 提取坠落防护设备、建筑构件、组件和坠落防护系统等 4 个实体,并建立高处作业事故知识图谱,协助专业人员进行安全管理。在要素分析方面,Apriori 算法能够明确事故致因要素之间的关系,用于高处作业、起重作业等单一场景的高风险作业。如田晓敏等^[6]基于 2018—2022 年发生的 131 起高处坠落事故,利用 Apriori 算法挖掘事故致因要素之间的强关联规则,并结合贝叶斯网络明确关键要素,结果表明:安全监管职责履行不到位极易导致安全监管不到位或安全教育培训不到位。综上,目前对于高风险作业安全管控的研究还存在如下不足:①管控方法多依靠人员经验提出,主观性较强,且很少统计分析现有高风险作业事故。②目前针对高风险作业的知识图谱大多只关注起重作业、高处作业等单一场景,根据吊装参数、防护设备等作业具体内容构建相关知识图谱,知识图谱构建中很少考虑事故原因、类型等具体内容。③现有研究仅通过 Apriori 算法明确要素之间的关系,并未深层次制定相应的管控策略,无法应用于现场实践中。

鉴于此,笔者拟提出一种针对高风险作业的智能化管控方法,利用基于变换器的双向编码器表征 (Bidirectional Encoder Representations from Transformers, BERT)-BiLSTM-CRF 模型自动抽取事故致因要素并分类,同时建立高风险作业事故知识图谱,利用 Apriori 算法明确指标之间的强关联关系,以期提高高风险作业安全管理水平。

1 高风险作业智能化管控方法

1.1 数据收集与处理

高风险作业内容多,涉及高处作业、动火作业、吊装作业等多个领域,且不同作业类型可能引发的

事故类型不同。因此,选取生产作业过程中常见的动火作业、起重作业、有限空间作业和高处作业为研究对象,开展相关的研究,高风险作业的内容界定具体见表 1。

表 1 高风险作业的内容界定

范围	定义	事故类型
动火作业	在直接或间接产生明火的工艺设施以外的禁火区内从事可能产生火焰、火花、炽热表面的非常规作业	火灾、爆炸、中毒等
起重作业	通过起重机械实施重物垂直起升与水平移动的操作活动	物体打击、起重机倒塌、起重伤害等
有限空间作业	封闭或部分封闭,进出口较为狭窄有限,未被设计为固定工作场所,自然通风不良,易造成有毒有害、易燃易爆物质积聚或氧含量不足的空间	中毒、缺氧、燃爆等
高处作业	人在一定位置为基准的高处进行的作业	高处坠落、物体打击等

从安全管理网、政府官网等相关网站,搜集高风险作业事故调查报告,并根据事故调查报告的文本

结构人工抽取事故名称、事故类型、事故直接原因和间接原因等所需信息,以便后续开展事故致因要素提取。数据收集与处理的具体过程如图 1 所示。

1.2 高风险作业事故知识图谱构建方法

高风险作业事故数量多,涉及原因不同,仅依靠人员分析每起事故原因,耗时长。文中利用自然语言处理技术对事故致因要素进行自动提取分类,并根据要素之间的相互关系建立高风险作业知识图谱。

1) 确定高风险作业事故知识图谱构建框架(模式层)。现有高风险作业事故调查报告仅阐述事故发生的直接原因和间接原因,并未明确事故直接原因与间接原因之间的相互关系,且目前没有针对高风险作业的具体事故原因分类标准,事故原因之间的相互关系大多依靠专家经验进行判断。构建的事故知识图谱主要为了明确每起事故的事故原因之间的相互关系,并存储相关事故信息。因此,结合内-外因事故致因理论^[7]中事故根本原因与直接原因之间的相互关系,构建高风险作业知识图谱模式层。内-外因事故致因模型如图 2 所示,高风险作业事故知识图谱模式层如图 3 所示。



图 1 数据收集与处理的具体过程

Fig. 1 Specific process of data collection and processing

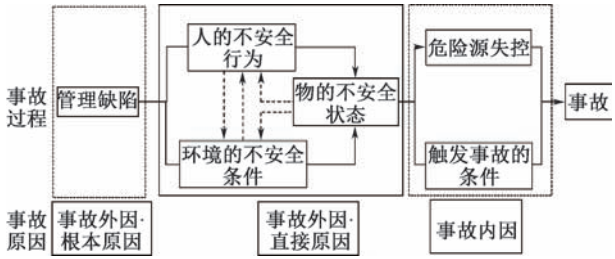


图 2 内-外因事故致因模型

Fig. 2 Internal-external accident cause model

2) 采用 BERT-BiLSTM-CRF 模型^[8-9]抽取事故原因实体。实体抽取过程主要包括数据预处理、模型训练、模型预测等,具体如下:①对部分事故原因

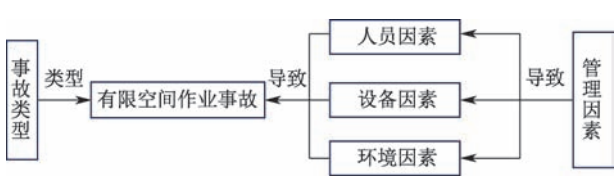


图 3 高风险作业事故知识图谱模式层

Fig. 3 High-risk operation accident knowledge graph pattern layer

按照人员、设备、环境和管理进行分类,分别人工标注为 nr、ne、nh、nm,并将标注形式转换为 BIOES 标注,建立模型训练的数据集。②将该数据集按照 8 : 2 的比例划分为训练集和验证集,并利用 BERT-

BiLSTM-CRF 模型对训练集进行模型训练,计算准确率、召回率等指标,确定最优的训练模型。③对比该模型与其余模型的训练效果,确定效果好的模型。④利用训练好的模型自动抽取其余的事故原因。实体抽取的具体过程如图 4 所示。

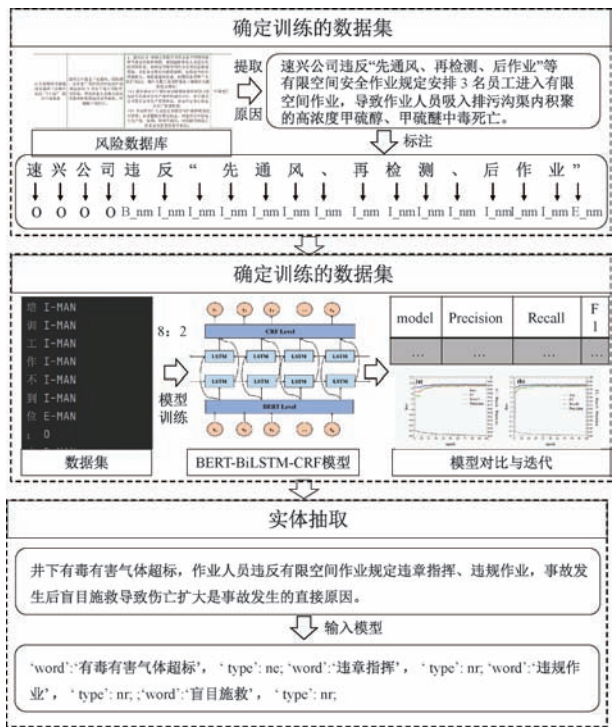


图 4 实体抽取的具体过程

Fig. 4 Specific process of entity extraction

3) 确定高风险作业事故原因及事故实体之间的关系。实体关系抽取类型见表 2。

表 2 实体关系抽取类型

Table 2 Entity relationship extraction type	
实体间的关系类型	实体间的关系
从属关系	事故名称,事故类型
	事故名称,事故原因(人员、设备、环境、管理)
因果关系	管理因素,人员因素
	管理因素,设备因素
	管理因素,环境因素

4) 构建高风险作业事故知识图谱。根据高风险作业事故实体抽取结果及实体之间的相互关系,建立高风险作业事故知识图谱,该知识图谱呈现每一起高风险作业事故具体的事故名称、事故类型及事故原因(具体为人员因素、设备因素、环境因素和管理因素),将现有的高风险作业事故整理归纳在知识图谱中,实现事故案例的收集整理。

1.3 高风险作业致因要素间关联关系挖掘方法

高风险作业知识图谱中事故因素间的关系复杂多样,需要挖掘大量的事故信息,明确关联性较强的因素,便于现场管控。Apriori 算法能够从大量的事故数据中发现有意义联系的关联^[10],被广泛用于致因要素间关系挖掘。强关联规则是指满足预设的最小置信度阈值(min_conf)和最小支持度阈值(min_sup)的规则,如果关联规则($X \rightarrow Y$)的置信度 $\geq \min_conf$ 和支持度($X \rightarrow Y$) $\geq \min_sup$,则关联规则为强关联规则^[11-12]。

因此,利用 Apriori 算法明确事故致因要素间的关联规则。首先,预处理每起事故,将事故信息进行规范化处理和标注。在导入数据的过程中,需要明确挖掘的关联关系的前项和后项,将前项统一标注为输入,后项统一标注为目标。然后,合理设置最小置信度和最小支持度,利用 Apriori 算法明确关联性较强的关联规则。最后,根据相关领域知识和经验判断挖掘出的关联规则,筛选出与实际情况相符的有用关联规则,避免错误关联规则的干扰,并整理归纳结果。高风险作业关联关系挖掘过程如图 5 所示。

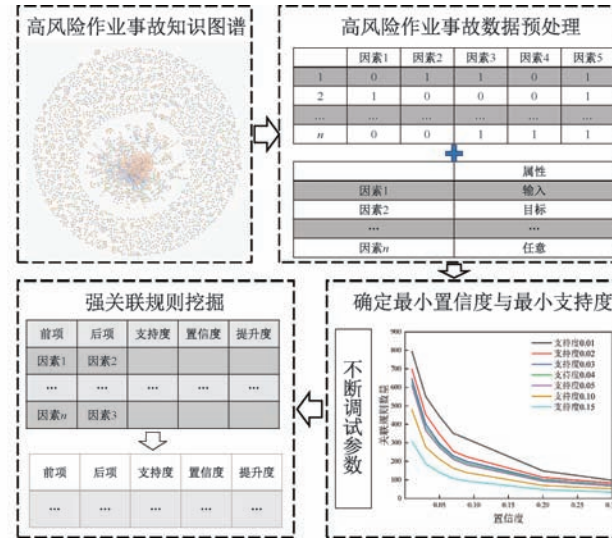


图 5 高风险作业关联关系挖掘的具体过程

Fig. 5 Specific process of association mining for high-risk operations

1.4 智能化管控方法的制定规则

从技术和管理 2 个方面分析相应的管控对象,制定针对性管控措施,具体包含作业人员系统管控和生产资料与作业环境系统管控 2 方面。

作业人员系统管控是通过分析与人的不安全行

为及工作状态是否具备履行作业的能力,深入分析密切相关的素质条件因素,包括年龄、文化程度、工作年限、技能培训与等级证书等;分析人员作业准入条件检查与培训教育考核,班组建设管理(包括班前会学习教育、沟通协作、自保互保等)、承包商管理,作业现场监督、奖罚激励等方面管控原因,在此基础上,完善企业管控措施,建立人员选拔录用、培训、宣传教育,人员组织与管理等系统化管控体系。

生产资料与作业环境系统管控是通过分析与生产资料不安全状态产生的相关因素,包括使用年限、性能状况、质量完好状况、与生产的匹配适用性等;此外,通过分析现场作业环境与人员作业的匹配程度,存在的危害因素,环境设施的现代化水平等,进而分析日常运行、维护保养、隐患整治、安全投入等

方面管控原因,在此基础上,完善企业管控措施。

高风险作业智能化管控方法主要通过 BERT-BiLSTM-CRF 模型实现事故原因自动抽取,构建高风险作业事故知识图谱,确定高风险作业事故致因要素,并利用 Apriori 算法明确致因要素之间的相互关系,提出针对性管控措施。该方法能够基于高风险作业事故调查报告,明确要素之间的相互关系,针对性出现场管控措施,减少人工提取所需时间,为高风险作业现场管控提供参考。

2 有限空间作业致因分析及管控

2.1 有限空间作业事故数据预处理

搜集近 20 年中国发生的 601 起有限空间作业事故调查报告,601 起事故按年份统计的事故起数、死亡人数数量分布、事故类型分布如图 6 所示。

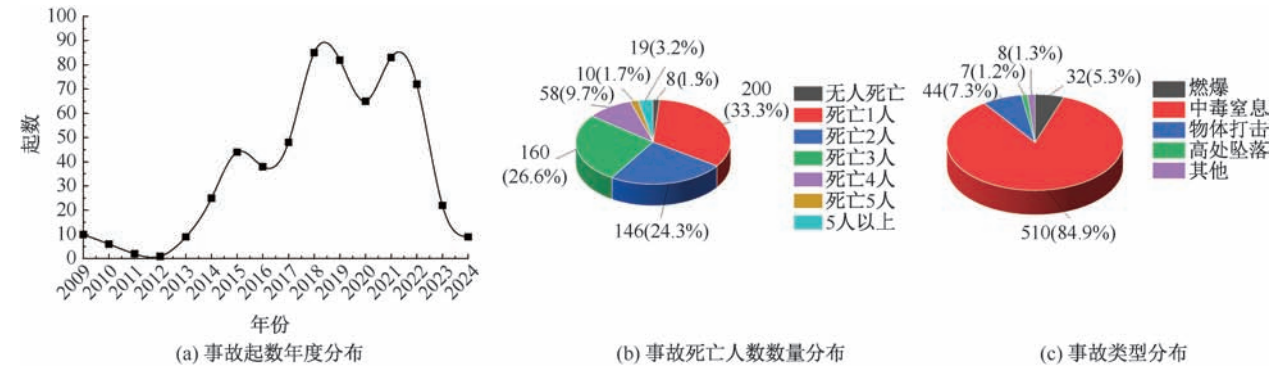


图 6 601 起事故按年份统计的事故起数、死亡人数数量分布、事故类型分布

Fig. 6 Number of accidents, number of deaths, and distribution of accident types for 601 accidents

标注 200 起有限空间作业事故调查报告文本信息,共标注 5 858 个训练样本,以一起有限空间作业事故案例为例,部分文本标注过程如图 7 所示。

2.2 有限空间作业事故知识图谱构建

将标注好的数据集(200 起事故)按照 8 : 2 的比例划分为训练集和验证集。通过 Python 代码编程,模型每迭代一次都会展示出对应迭代次数模型的评价指标结果,对比测试结果与实际结果,得到最优模型评价指标(准确率、召回率和 F_1 值),即迭代 100 次,模型结果最优。评价指标和迭代次数的对应关系如图 8 所示。

对比该模型与其他模型的训练效果,提高命名实体识别的效果。选取迭代空洞卷积神经网络-条件随机场(Iterated Dilated Convolutional Neural Networks-Conditional Random Field, IDCNN-CRF)模型、BiLSTM-CRF 模型与 BERT-BiLSTM-CRF 模型进行对比,3 种模型训练结果较好的评价指标

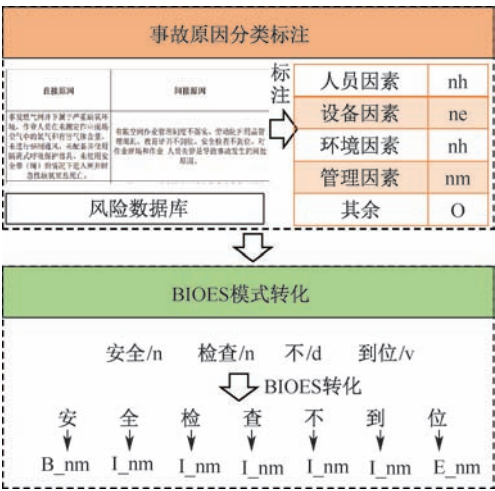


图 7 有限空间作业事故案例文本标注

Fig. 7 Text annotation of confined space operation accident

值见表 3。对比 3 种模型的精确率、召回率和 F_1 分数发现,加入 BERT 的深度学习模型在精确率、召回

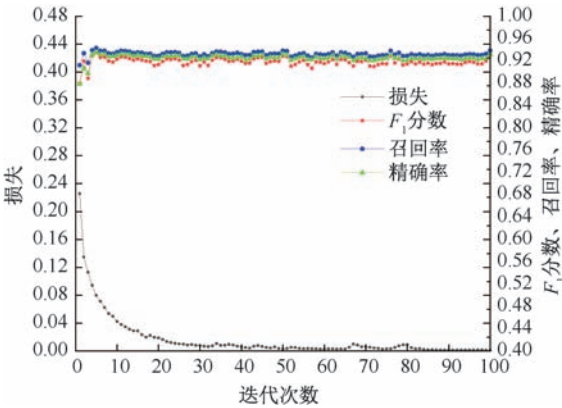


图 8 模型评价指标和迭代次数的对应关系
Fig. 8 Correspondence between the model evaluation index and the number of iterations

表 3 3 种模型训练效果对比

模型	精确率	召回率	F_1 分数
BERT-BiLSTM-CRF 模型	0.931 7	0.938 4	0.931 8
BiLSTM-CRF 模型	0.926 1	0.934 7	0.922 7
IDCNN-CRF 模型	0.919 9	0.931 9	0.919 1

率、 F_1 分数方面,数值都有了较大提升。

利用训练好的 BERT-BiLSTM-CRF 模型抽取与分类整理其余事故原因,并结合对应的事故名称和事故类型,建立有限空间作业事故风险数据库(表 4),存储相关事故数据,为后续建立有限空间作业致因要素指标体系提供参考。

根据有限空间作业事故原因及其相互关系,构

表 4 有限空间作业风险数据库

Table 4 A schematic table of the confined space job risk database

事故名称	直接原因	间接原因	人员因素	设备因素	环境因素	管理因素	事故类型	事故后果
北京朝阳“7·30”较大中毒和窒息事故	井下缺氧,作业人员未测定气体含量、未通风、未配备呼吸器具和安全带	管理制度不落实、劳动用品管理混乱、培训不到位、安全检查不到位	未检测现场环境	—	氧气含量不足	劳动用品未配备	窒息死亡	3 人死亡
			未佩戴呼吸器	—		培训不到位		
			未佩戴安全带	—		管理不到位		
			—	—		检查不到位		

建有限空间作业事故知识图谱,如图 9 所示。有限空间作业事故知识图谱包含 601 个有限空间作业事故名称节点、601 个有限空间作业事故类型节点、560 个人员因素节点、141 个设备因素节点 234 个环境因素节点和 870 个管理因素节点。

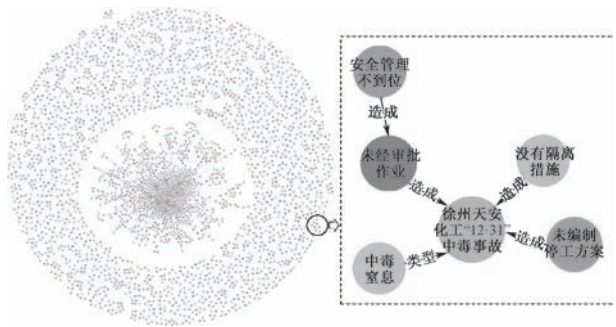


图 9 有限空间作业事故知识图谱
Fig. 9 Knowledge graph of confined space operation accidents

2.3 有限空间作业致因要素指标体系构建

调研北京、浙江、山西等地出台的有限空间作业管理相关标准规范^[13-15],结合有限空间作业知识图

谱,从人员、设备、环境和管理 4 个方面建立有限空间作业致因要素指标体系,包括 20 个二级指标和 65 个三级指标,部分有限空间作业事故致因要素指标体系见表 5。

致因要素指标体系构建的具体过程如下:

1) 统计分析有限空间作业知识图谱中的事故原因,明确发生频次较多的致因要素,人员、设备、环境和管理因素占比前 10 的事故原因统计如图 10 所示。由图 10 可知:对于作业人员,未佩戴安全防护装备和盲目施救是导致有限空间作业事故发生的关键因素,分别占统计事故起数的 29.2% 和 25%;对于设备因素,41.1% 的有限空间作业事故是由于有限空间现场作业未配备气体检测、通风等设备导致的;对于环境因素,安全警示标志缺失极易导致事故的发生(44.3%);对于管理因素,安全教育培训不到位和安全管理不到位是管理因素中导致有限空间作业事故发生的主要原因。因此,在实际操作过程中,应重点关注这些因素,保障有限空间作业安全。

2) 调研国内外有限空间作业相关标准规范发

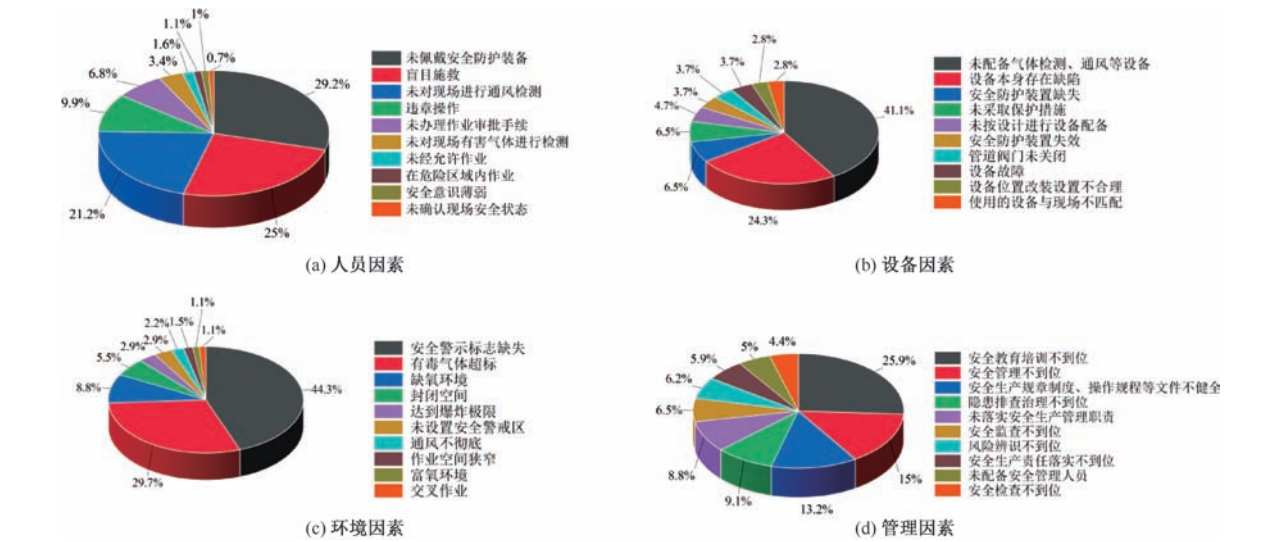


图 10 事故原因统计

Fig. 10 Statistics on the accident causes

表 5 部分有限空间作业事故致因要素指标体系

Table 5 Index system of causative factors for accidents in some confined space operations

一级指标	二级指标	三级指标
人员因素	操作规程执行错误	未对现场进行通风检测;未对现场有害气体进行检测;违章操作;未经允许作业;未办理作业审批手续;未对设备进行安全检查;未检测作业现场环境
	自身行为(动作、姿势、站位规范性要求)不规范	站在危险区域作业;未按正确方式作业;作业不彻底
	未察觉生产现场状态条件存在安全风险	未及时发现现场环境变化;未能检测出气体浓度超标
	未佩戴个体防护装备或佩戴不正确	未佩戴安全防护装备;防护装备佩戴不正确
	应急处置不当	盲目施救;应急救援不当
	技能状况	安全意识薄弱;技能不足
设备因素	设备系统设计与选择的完整性与工作适配性	设备设计不符合实际要求;设备位置、改装设置不合理;使用的设备与现场不匹配
	设备设施质量完好	安全防护装置失效;设备本身存在缺陷;安全防护装置缺失
	作业前生产场所的安全状态与措施	未配备气体检测、通风等设备;管道阀门未关闭;管道封堵;设备之间无连锁
	生产作业中出现的突发异常不安全因素	零部件自燃;设备故障;设备电源未切断
环境因素	物理环境	照明不足;温度较高
	空间环境	封闭空间;作业空间狭窄;有害气体超标;缺氧环境;通风不彻底
	安全防护	安全警示标志缺失;现场无安全防护措施;安全距离不足;未设置安全警戒区
	作业干扰因素	交叉作业;有其他干扰的杂物
管理因素	技术管理	未制定各项规章制度、操作规程、处置方案等文件;安全生产规章制度、操作规程等文件不健全;安全措施内容制定不全面
	生产组织管理	劳动用品配备不足;未安排专人进行现场安全管理;防护设备设施配备不足;检测设备配备不足
	作业前准备管理	风险辨识不到位;隐患排查治理不到位;安全技术交底不到位;设备、环境等安全检查不到位
	作业过程管理	安全管理不到位;安全生产规章制度和安全操作规程落实不到位
	基础管理	安全教育培训不到位;未建立安全生产责任制或安全主体责任落实不到位;未制定有限空间作业安全管理制度;安全投入不足
	合规管理	人员无证上岗;外包作业;无证经营;作业审批不到位

现,目前我国现有的有限空间作业标准规范主要从人员、设备、环境和管理 4 个角度出发,规定了有限空间作业现场安全管理、通风设备、人员行为等方面的具体内容,并强调从作业前、作业中和作业后规定作业涉及的各个环节,例如:规定在有限空间作业前需要开展作业审批。而国外针对有限空间作业制定的标准规范主要针对有限空间作业涉及的作业人员、通风设备、环境和管理等方面制定管理方法,重点关注进入有限空间作业人员的资质证明和对有限空间作业的风险评估,强调要考虑应急处置方面的内容。因此,综合国内外有限空间作业相关标准规范分析,在建立有限空间作业事故致因要素指标体系时,需要从作业前、作业中和作业后等作业全流程角度进行考虑,并将应急救援、应急处置等事故救援方面因素考虑到指标体系中。

2.4 有限空间作业致因要素间关联关系挖掘

1) 数据处理。基于近 20 年中国发生的 601 起有限空间作业事故调查报告和有限空间作业事故知识图谱,根据致因要素指标体系中的三级指标,标注 601 起有限空间作业事故致因要素,部分标注结果如图 11 所示。

序号	事故名称	直接原因	间接原因	人员因素	设备因素	环境因素	管理因素	事故类型	事故后果
1	北京市朝阳区“7·30”较大中毒和窒息事故	事发燃气井下属于严重缺氧环境。作业人员任未制定作业现场空气中的氧气和有害气体含量,未进行强制通风,未配备并使用隔离式呼吸保护装置,未使用安全带(绳)的情况下进入密闭的紧急抢修室维修。	有限空间作业管理制度不落实,劳动防护用品管理混乱,教育培训不到位,安全检查不到位,对作业现场和作业人员失管是导致事故发生的间接原因。	未检测作业现场环境,未佩戴呼吸器具,未系安全带。		氧气含量不足	劳动用品配备不足,安全教育培训不到位,安全管理不到位	窒息死亡	3人死亡
标注									
		未对现场进行通风检测	未对现场有害气体进行检测	违章操作	无	无证经营	作业审批不到位		
		0	0	0	...	0	0		
		1	0	0	...	0	0		0
		...	...	...	...	...	...		...
		1	0	0	...	0			1

图 11 有限空间作业事故调查报告事故原因标注
Fig. 11 Annotation of causes in the investigation report of the confined space operation accident

2) 有限空间作业致因要素关联关系挖掘。采用 IBM SPSS Modeler 软件分析 601 起有限空间作业事故原因之间的关联关系。结合专家经验和设置最小支持度、置信度的实际情况,将最小支持度设置为 0.025,最小置信度设置为 0.045,最大前项数设置为 1,共挖掘出 353 条关联规则。去除前项后项没有关系的关联规则,筛选增益大于 1 的关联规则,确定有限空间作业致因要素之间的关联关系,共筛选出 203 条关联规则。图 12 为 203 条强关联规则的

可视图,图中每个点的数值代表每条关联规则的编码。

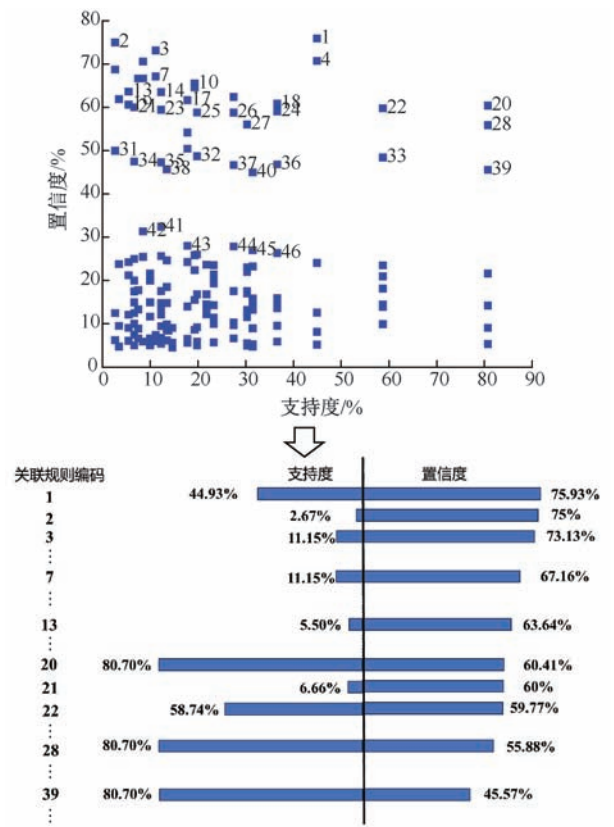


图 12 强关联规则的可视图

Fig. 12 Visualization of strong association rules

由图 12 可知:综合考虑支持度和置信度的大小,安全教育不到位与未佩戴安全防护装备的关联度较大(支持度为 80.7%,置信度为 60.41%,编码 20),这主要是由于有限空间事故很少造成特别重大事故(超过 30 人死亡),企业经常忽视安全性的重要性,对员工的教育培训重视程度不够,作业前未对员工进行严格的安全教育培训,导致作业人员对具体作业内容和作业方式不了解,对作业过程中潜在的危險缺乏基本的认识,忽视了安全带、防护面具等安全防护装备的重要性,导致作业人员未佩戴安全防护装备便开展有限空间作业,极易造成有限空间作业事故的发生。此外,安全教育培训不到位与盲目施救的关联性也较强(支持度为 80.7%,置信度为 55.88%,编码 28),这说明盲目施救是导致有限空间作业发生事故的关键因素。有限空间作业中毒窒息、缺氧窒息等事故事发突然,在紧急情况下作业人员往往情绪化救援^[16],且由于缺少严格的安全教育培训,作业人员不了解正确的救援方法,常出现施救不当,进而导致事故扩大。

2.5 有限空间作业精准管控方法

根据有限空间作业知识图谱中相关数据及关联关系挖掘分析得到的结果,从作业人员系统管控和生产资料与作业环境系统管控 2 方面提出针对性管控方法,具体如下:

1) 根据盲目施救与安全教育培训关联度较大,制定相应的作业人员系统管控方法,规定“发生中毒窒息事件时,作业人员和抢救人员必须使用隔绝式呼吸保护用品,严禁使用过滤式呼吸保护用品”。同时,还要求企业应根据现场实际情况,制定相应的有限空间作业应急处置预案,并定期组织作业人员进行应急演练,使作业人员面对突发情况时能沉着应对并能采取正确的应对措施。

2) 分析质量完好状况、与生产的匹配适用性相关的致因要素,制定生产资料与作业环境系统管控方法。有限空间作业现场应配备必要、足够、有效的照明、通风、消防设施,现场作业条件满足安全要求;此外,有限空间作业现场应设置明显的标识牌和警示说明,有限空间与外界连通的出入口处应设置遮栏、盖板等防护装置。

3 结 论

1) 提出一种基于知识图谱和 Apriori 算法的高风险作业智能精准管控方法,能够有效降低传统人为归纳的主观偏差,实现从大量事故案例中系统性、可视化地提取致因要素及其内在关联,结合事故发生发展的实际路径,从技术与管理提出针对性管控措施,实现事故链的精准切断,为高风险作业精准管控提供依据。

2) 针对有限空间作业,作业人员未佩戴安全防护装备、盲目施救、有限空间现场作业未配备气体检测、通风等设备、现场安全警示标志缺失、企业安全教育培训不到位和安全管理不到位是导致有限空间作业事故发生的主要原因。因此,需要重点关注这些因素,保障有限空间作业安全。

3) 研究重点在于智能化分析高风险作业致因要素,未考虑具体影响程度,在未来需要融合贝叶斯网络、层次分析法等开展量化评估,明确各要素影响权重与作用机制。

参 考 文 献

- [1] 刘辉,郑向莞,张智超,等. 定量改进 JHA 法的建筑施工高危作业风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(4): 146-151.
Liu Hui, Zheng Xiangwan, Zhang Zhichao, et al. Risk analysis of high-risk operations in construction by a quantitatively improved JHA method[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(4): 146-151.
- [2] 章博,刘悦,姚明,等. 基于 JSA 方法的高风险作业在线实践平台[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 509-513.
Zhang Bo, Liu Yue, Yao Ming, et al. Practice teaching platform for high risk operation based on the JSA method[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(2): 509-513.
- [3] Peres S C, Hendricks J W. A systems model of procedures in high-risk work environments: empirical evidence for the safety model 2 approach using the interactive behavior triad[J]. Safety Science, 2024, 172: DOI: 10.1016/j.ssci.2023.106328.
- [4] Jiang Weiguang, Liu Yuhuan, Chen Ke, et al. Early-warning of unsafe hoisting operations: an integration of digital twin and knowledge graph[J]. Developments in the Built Environment, 2024, 19: DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100490.
- [5] Zhou Zhipeng, Yu Xinhui, Magoua J J, et al. Integrating machine learning and a large language model to construct a domain knowledge graph for reducing the risk of fall-from-height accidents[J]. Accident Analysis & Prevention, 2025, 215: DOI: 10.1016/j.aap.2025.108009.
- [6] 田晓敏,李晓冬. 基于 Apriori 算法和贝叶斯网络的高处坠落事故致因分析[J]. 重庆科技大学学报(自然科学版), 2024, 26(6): 80-87.
Tian Xiaomin, Li Xiaodong. Analysis of falling accident causes based on Apriori algorithm and Bayesian network[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2024, 26(6): 80-87.
- [7] 国汉君. 内-外因事故致因理论与实现安全生产的途径[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(7): 46-53, 179.
Guo Hanjun. Theory of Accident causation based on internal-external factors and approaches for work safety[J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(7): 46-53, 179.

[8] Li Wei, Du Yajun, Li Xianrong, et al. UD_BBC: named entity recognition in social network combined BERT-BiLSTM-CRF with active learning[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2022, 116: DOI:10.1016/j.engappai.2022.105460.

[9] Yu Yuqing, Wang Yuzhu, Mu Jingqin, et al. Chinese mineral named entity recognition based on BERT model[J]. Expert Systems with Applications, 2022, 206: DOI:10.1016/j.eswa.2022.117727.

[10] Witten I H, Frank E, Hall M A, et al. Practical machine learning tools and techniques[J]. Data Mining, 2005, 2(4): 403-413.

[11] Xu Ruihua, Luo Fan. Risk prediction and early warning for air traffic controllers' unsafe acts using association rule mining and random forest[J]. Safety Science, 2021, 135: DOI:10.1016/j.ssci.2020.105125.

[12] 况宇琦. 基于数据挖掘的塔吊事故案例分析研究[D]. 武汉: 华中科技大学,2021.
Kuang Yuqi. Research on case analysis of tower crane accidents based on data mining [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.

[13] DB11T 1584—2018 有限空间中中毒和窒息事故勘查作业规范 [S].
DB11T 1584-2018 Specification for the investigation of poisoning and asphyxia accidents in confined spaces [S].

[14] DB33/T 707—2022 工贸企业受限空间作业安全技术规范[S].
DB33/T 707-2022 Safety technical regulations for working in confined spaces of enterprises [S].

[15] DB14/T 2124—2020 冶金工贸企业有限空间作业安全规范[S].
DB14/T 2124-2020 Industrial and trade enterprises operating in confined space safety technical specifications.

[16] 王勇毅,姜亢,郭建中,等. 职业中毒场所盲目施救行为的心理因素分析与对策研究[J]. 中国安全科学学报,2012, 22(11): 11-15.
Wang Yongyi, Jiang Kang, Guo Jianzhong,et al. Analysis and countermeasures research on psychological factors in blind rescue behavior in occupational poisoning place[J]. China Safety Science Journal,2012,22(11): 11-15.

作者简介： 国汉君 （1965—）,男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士,研究员,主要从事企业安全生产与应急救援等方面的工作。E-mail: hanjun.guo@chnenergy.com.cn。