

中文引用格式:刘青锋,胡长明,赵江平. 建筑施工交叉作业事故致因因素聚类及关联分析[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(3): 142-150.

英文引用格式:LIU Qingfeng, HU Changming, ZHAO Jiangping. Clustering and correlation analysis of factors causing cross operation accidents in construction[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(3): 142-150.

建筑施工交叉作业事故致因因素聚类 及关联分析*

刘青锋¹, 胡长明^{1,2,3}教授, 赵江平¹副教授

(1 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055; 2 西安建筑科技大学
土木工程学院, 陕西 西安 710055; 3 延安大学 西安创新学院, 陕西 西安 710100)

中图分类号: X948

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.03.0717

【摘要】 为有效预防施工过程中交叉作业事故发生, 首先, 收集2010—2022年全国范围内130份交叉作业事故案例为研究对象, 结合扎根理论建立建筑施工交叉作业评价体系; 然后, 依据指标间的关系运用谱聚类算法分析事故致因组合, 并通过主成分分析法和层次分析法对各致因因素进行权重分配, 划分不同等级的风险等级; 最后, 运用Apriori算法获得致因组合内各因素关联链。结果表明: 评价体系包括5个核心范畴、13个主范畴和40个范畴; 对施工过程交叉作业风险影响最大的核心范畴为技术管理; 40个范畴聚类为4类致因组合, 其中, 1类高风险, 1类中风险, 2类低风险。此外, 针对因素复杂的簇确定关键的致因组合并提出针对性预防措施, 以减少交叉作业事故的发生概率。

【关键词】 建筑施工; 交叉作业; 事故致因; 致因因素; 谱聚类; 关联规则

Clustering and correlation analysis of factors causing cross operation accidents in construction

LIU Qingfeng¹, HU Changming^{1,2,3}, ZHAO Jiangping¹

(1 School of Resource Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China; 2 School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China; 3 Xi'an Innovation College, Yan'an University, Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: In order to effectively prevent cross operation accidents in the construction process, firstly, 130 cross operation accident cases nationwide from 2010 to 2022 were collected as research objects, and an evaluation system for cross operation in construction was established based on the grounded theory. Then, according to the relationship between the indicators, a spectral clustering algorithm was used to analyze the combination of accident causes. The weight of each cause factor was allocated, and different levels of risk were divided by principal component analysis and analytic hierarchy process. Finally, the Apriori algorithm was used to obtain the correlation chain of each factor in the causative combination. The results show that the evaluation system includes 5 core categories, 13 main categories and 40 categories. The core category that has the greatest influence on the risk of cross operation in the construction process is technical management. The 40 categories are grouped into 4 causal combinations, among which 1 is high

risk, 1 is medium risk, and 2 are low risk. In addition, for the complex cluster of factors, the key combination of causes is identified and targeted preventive measures are proposed to reduce the probability of cross-operation accidents.

Keywords: construction work; cross operation; accident cause; cause factor; spectral clustering; association rule

0 引言

建筑业一直是生产安全事故高发的高风险行业^[1]。近年来,随着建筑行业的蓬勃发展,建筑项目逐渐变得更加庞大复杂。对于复杂的大型项目工程,建设条件与有限土地资源的冲突、多工种并行作业、工期时间压力等因素,促使工程中的“交叉”作业越来越多,这种“交叉”作业进一步增加了工程的控制难度。根据近些年建筑项目事故调查报告分析,大型复杂项目发生的多起火灾、物体打击,甚至密闭空间的爆炸等安全事故多与交叉作业安全管理不当有关,因此,探究此类事故的成因,并挖掘它们之间的关联关系,是预防交叉作业事故发生的重要环节。

目前,国内外学者针对建筑业交叉作业开展了许多研究,如 AKINCI 等^[2]开发了时空冲突形势分析法,用于对检测到的空间冲突进行分类和优先级排序;MOO 等^[3]为更直观地反映施工现场空间竞争的程度,运用建筑信息模型技术研发了一套交叉作业冲突可视化系统;胡超等^[4]在考虑空间冲突对于施工安全影响的基础上,建立了施工方案动态调整优化模型进行施工方案的优化决策;王建平等^[5]以立体交叉作业的安全管理为研究对象,运用作业条件危险性评价法辨识和评价危险源,构建了安全管理执行传递机制;江新等^[6]参照前人经验以及专家打分的方法建立了水电工程项目群交叉作业风险因素体系;屈静等^[7]采用头脑风暴的决策方法,判断压气站场是否存在交叉作业并形成风险因素矩阵;ROZENFELD 等^[8]研究了人与物连续、动态交叉的风险状况,通过与现场工程师、主管的系列访谈,获得可能发生的失控事件。

以上对建筑交叉作业的研究更多侧重于不同交叉作业空间展示和可视化、作业冲突识别和分析以及交叉作业干扰解决方案等主题,对交叉作业风险因素的研究集中在非房建领域,且研究方法多为问卷收集、专家论证等常见方法,而问卷收集的各类参与者,由于个人认知水平与经验的差异,使研究结果受主观意识影响较大。因此,关注交叉作业过程中

的事故,同时如何更系统、全面地辨识风险因素成为文中研究方向之一。

鉴于此,笔者以 2010—2022 年的建筑施工交叉作业事故调查报告为研究对象,依据扎根理论构建建筑施工交叉作业评价体系,探索交叉作业之间的风险关系及评估方法,挖掘交叉作业风险的特性、相互影响关系及它们的发生路径,以期减少施工过程中交叉作业造成的事故。

1 事故数据收集及致因因素识别

1.1 数据来源与编码数据建立

从各省市应急管理部门收集 2010—2022 年建筑领域的交叉作业事故报告。通过查阅《生产安全事故调查报告编制指南》^[9]发现,事故调查报告无法以作业类型为主题编制,这导致在海量事故报告中直接利用机器学习进行交叉作业事故原因字段提取变得困难。使用 python 第三方工具中文分词库 jieba 提取交叉作业事故案例,得到 130 份建筑交叉作业引发的事故案例。将每个案例编码为 $O_i (i=1, 2, \dots)$, 引发事故的交叉作业子作业分为 A_i 和 B_i , 并提取出作业共同作用下的事故原因与事故类型, 建立出基于文本挖掘的交叉作业事故调查报告数据库。值得注意的是,文中只针对 2 种作业的交叉,不讨论 2 种以上的情况。不能否认的是,多工种交叉作业导致的事故是存在的,且交叉作业本身就具有复杂的相互影响关系,如果讨论作业项过多,则风险分析更加困难,不利于进行针对性较强的研究工作。

1.2 风险因素识别

采用扎根理论,通过开放式编码、主轴编码、选择性编码并结合交叉作业特性辨识风险因素^[10],将 130 份案例进行扎根编码分析,最终识别获得人员与组织配置、材料设备、技术管理、合同管理、环境条件 5 个核心范畴、13 个主范畴和 40 个范畴的编码数据,见表 1。另外,还收集 2023—2024 年发生的 10 例建筑业交叉作业事故,检验 10 份案例资料的饱和度,未发现新的概念、范畴,由此判断,建筑施工交叉作业安全事故致因研究理论达到饱和^[11]。

表 1 建筑施工交叉作业评价体系

Table 1 Construction cross operation evaluation system

核心范畴 (选择性编码)	主范畴 (主轴编码)	范畴化 (开放性编码)
人员与组织配置	安全管理机构 H1	安全管理机构不健全 H11; 施工手续缺失或作假 H12
	安全管理人员 H2	备案项目负责人长期不在岗 H21; 专职安全人员不足 H22
	作业人员 H3	无证上岗 H31; 安全意识淡薄 H32; 身心状态 H33; 专业技能水平不足 H34
	监理人员 H4	监理人员不足 H41; 监理不作为 H42
材料设备	材料 M1	材料的数量和质量 M11; 危险材料管理不严 M12; 安全防护用具缺失 M13
	机械设备 M2	支撑体系强度不足 M21; 设备故障 M22; 设备警告标识 M23
技术管理	施工方案 T1	设计图缺陷 T11; 更改工艺流程 T12; 施工方案未编制论证 T13; 技术交底不规范 T14
	危险源管理 T2	危险源辨识不充分 T21; 未消除安全隐患 T22
	现场安全管理 T3	安全培训不到位 T31; 现场安全检查不到位 T32; 安全防护缺失 T33; 施工过程监督缺失 T34; 违规指挥作业 T35
合同管理	合同协议 C1	工期压力 C11; 未签订安全生产协议 C12
	承包问题 C2	挂靠 C21; 违法分包 C22; 工作范围不明确 C23; 权责划分不明确 C24
环境条件	自然环境 E1	水文地质条件 E11; 不良天气 E12
	施工环境 E2	未设置警戒区 E21; 施工安全间距 E22; 材料设备摆放混乱 E23; 临时荷载过大 E24; 临时用电不规范 E25

2 交叉作业事故及致因分析

2.1 事故类型分析

交叉作业事故类型统计,如图 1 所示。其中,“其他”指爆炸、中毒等较少出现的意外事故。“坠落+坍塌”指二者同时发生的事故。由图 1 可知:52.3%的事故存在高处坠落的情况。物体打击和坍塌发生的比例分别为 9.23%、13.85%,这与目前建筑业的主要事故类型相符^[12],表明选取的事故数据具有较好的可靠性与有效性。

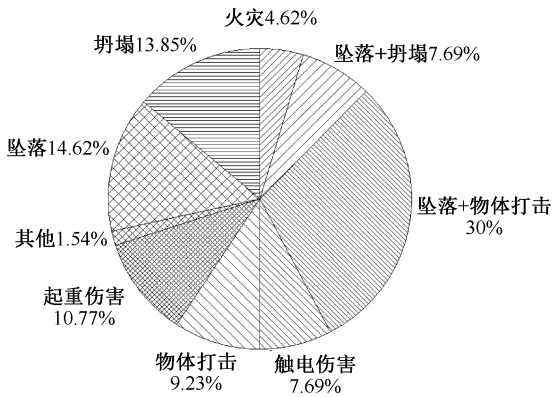


图 1 交叉作业事故类型

Fig. 1 Type of cross operation accident

2.2 事故特征分析

通过大量案例以及研究相关文献,发现交叉作业事故实际上是各种因素相互冲突导致的。将冲突类型归纳总结为:时空冲突、资源冲突、权责冲突,统

计结果如图 2 所示。

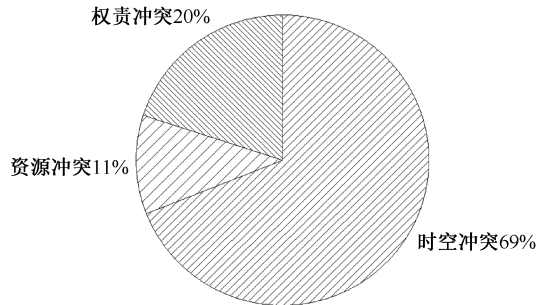


图 2 交叉作业事故特征

Fig. 2 Cross operation accident characteristics

时空冲突是施工过程中常见的,共发生 90 例,占比 69%。表现形式为同一作业区内有 2 种或 2 种以上工种同时执行作业导致交叉阻碍、空间重叠、操作相互干扰等冲突。

资源冲突共发生 14 例,占比 11%。该冲突本质上是对一组相互关联的活动进行资源分配,即工程调度。目前,我国大部分工程协调采用网络计划技术解决资源调度问题,但其忽略非关键路径上的工作进而忽视关键路径与非关键路径上的资源需求,易造成人员疲惫、人员技能水平不足、设备超负荷等风险。

权责冲突共发生 26 例,占比 20%。该类冲突多发生在工程总承包模式下,因为各承包单位经常会对进行非法转包、违法分包,且不同分包或工种在交叉作业施工前,未签订施工安全协议,只考虑本专业注意事项,且并未做到告知义务,导致现场缺乏监护、

安全隐患排查不全等风险。权责模糊也说明了为什么进行责任追究时只针对直接发生事故的环节。

3 事故致因因素聚类及关联分析

3.1 事故致因因素聚类分析

聚类是使用簇标签给样本赋以不同的类别值,通过类别值实现样本的聚类。谱聚类算法本质是聚类问题转化为图的最优划分问题,包含聚类所需的所有信息,再定义一个划分准则,再优化这一准则,使得同一类内的点具有较高的相似性,而不同类之间的点具有较低的相似性^[13]。文中以开放性编码为分类依据,各事故调查报告中的用1表示,未出现用0表示,最终将数据库转换成布尔矩阵用于聚类分析。

考虑到交叉作业事故中致因因素的复杂性及潜在的多维度关联,采用主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)与谱聚类算法相结合的方式分类优化事故致因^[14]。

高维数据谱聚类算法的步骤如下:

- 1) 选用轮廓系数法确定最佳聚类数量 k 。
- 2) 运用 PCA 降维数据集,使数据集成为 40×2 维的矩阵 X 。
- 3) 输入降维矩阵 X 、最佳聚类数量 k 。
- 4) 使用余弦相似度构造相似度矩阵 W 。
- 5) 计算相似度矩阵的对角矩阵,即度矩阵 D 。
- 6) 定义拉普拉斯矩阵并归一化。
- 7) 计算特征值和特征向量,组成新矩阵 U 。

随后用 K-means 算法聚类样本点的行向量,输出簇 $i(i=1,2,\dots)$ 。轮廓系数的范围是 $[-1, 1]$,轮廓系数越趋近于 1 则簇之间越紧凑,聚类效果越显著;反之则簇之间越松散效果越差。通过计算出不同聚类数量下的轮廓系数值,得到轮廓系数如图 3 所示,最佳聚类数量取 $k=4$ 。

使用 K-means 算法对交叉作业事故致因因素聚类,根据各致因因素的关联强度进行分类,得到 4 种簇划分,在二维空间中展示数据点的分布和聚类情况。结果表明:簇内致因的数量存在不均衡性,4 个簇内事故致因数量分别为 7、13、10、10,聚类结果见表 2。聚类可视化如图 4 所示,横坐标和纵坐标分别代表数据经过降维处理后的特征值。

为进一步提升聚类分析结果的科学性与实用性,采用 PCA 和层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 赋权处理各聚类,并通过计算得出 1、2、3 级的风险等级划分。

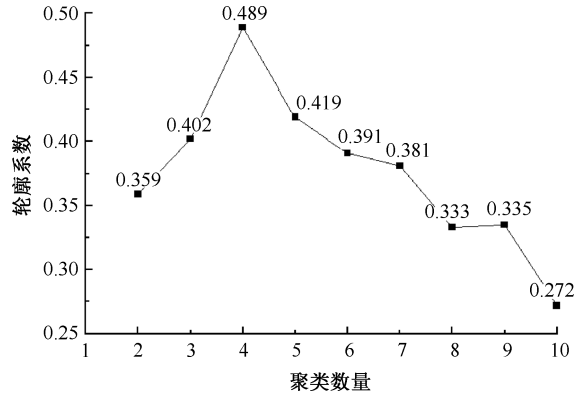


图 3 轮廓系数比较

Fig. 3 Contour coefficient comparison diagram

表 2 聚类结果

Table 2 Clustering results

编号	数量	致因因素	风险等级
簇 1	7	H32、H22、T14、T22、T31、T33、T34	三级(高)
簇 2	13	H11、H21、H33、H34、H41、M11、M22、C11、C23、C24、E24、E11、E12	二级(中等)
簇 3	10	T32、C12、T13、M23、M13、M12、E21、E22、E23、E25	一级(低)
簇 4	10	H12、T21、H31、C21、T12、T11、H42、C22、T35、M21	一级(低)

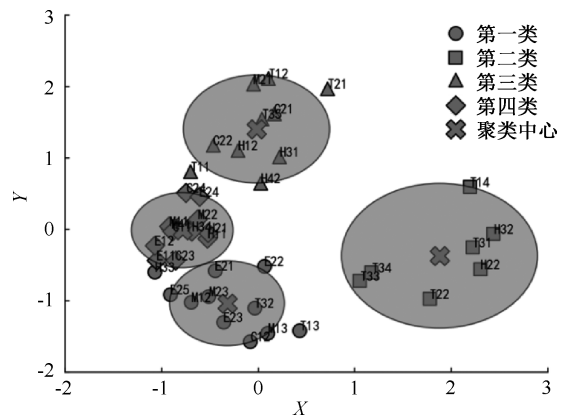


图 4 聚类可视化

Fig. 4 Spectral clustering visualization

PCA 通过分解所有因素的协方差矩阵的特征值,保留解释方差较大的主成分。结果显示,前 3 个主成分的累积解释方差达到 90%,主成分 1 (F_1) 解释了 40% 的方差,涵盖专职安全人员不足和技术交底不规范等直接影响事故发生因素;主成分 2 (F_2) 解释了 30% 的方差,主要涉及安全管理机构不健全和项目负责人缺岗等管理层面的因素;主成分 3 (F_3) 解释了 20% 的方差,包含施工过程监督缺

失和安全培训不到位等与管理流程相关的因素。

采用 AHP 赋权构建各因素。AHP 是一种用于多准则决策的系统方法^[15],通过构建层次结构模型、建立判断矩阵和进行一致性检验来计算各因素的权重。计算结果得出矩阵 CR 值为 0.08,小于阈值 0.1,说明矩阵具有良好的 consistency。计算得出的权重值显示: F_1 的权重为 0.45,显示出其对事故发生的直接影响较大; F_2 的权重为 0.35,属于间接影响因素; F_3 的权重为 0.20,反映出其对事故的影响相对较小。各致因因素在每个主成分中的具体权重见表 3。

表 3 PCA 协方差矩阵

Table 3 Covariance matrix of PCA

因素	F_1	F_2	F_3
专职安全人员不足	0.65	0.10	0.05
技术交底不规范	0.55	0.08	0.02
安全管理机构不健全	0.10	0.50	0.05
项目负责人缺岗	0.12	0.60	0.08
施工过程监督缺失	0.05	0.20	0.55
安全培训不到位	0.08	0.18	0.60

通过结合 PCA 和 AHP 的赋权计算,构建致因因素的判断矩阵,见表 4。在该矩阵中, F_1 (专职安全人员不足)与其他 2 个因素相比,具有更高的重要性,赋予了较高的比较值。在获得判断矩阵后,归一化处理每一列,使每一列的值之和为 1,归一化后的矩阵见表 5。将表 5 每一行的值相加,除以列数(即 3 列)得到初步的主成分权重为 $F_1 = 0.54$, $F_2 = 0.30$, $F_3 = 0.16$ 。

表 4 AHP 判断矩阵

Table 4 AHP Judgment matrix

因素	F_1	F_2	F_3
F_1 (专职安全人员不足)	1	2	3
F_2 (安全管理机构不健全)	0.5	1	2
F_3 (施工过程监督缺失)	0.33	0.5	1

表 5 归一化后矩阵

Table 5 Normalized matrix

因素	F_1	F_2	F_3
F_1 (专职安全人员不足)	0.546	0.571	0.5
F_2 (安全管理机构不健全)	0.273	0.286	0.333
F_3 (施工过程监督缺失)	0.18	0.143	0.167

在风险等级划分中,参考 KAPLAN^[16] 阈值设定方法,结合各因素的加权总和,将风险等级分为三级:总权重大于 0.4 为三级高风险,0.2~0.4 为二级中等风险,小于 0.2 为一级低风险。簇 1、簇 2、簇 3 和簇 4 分别对应不同级别风险。

通过谱聚类分析可以发现,交叉作业的致因并非按照传统的人、机、环境、管理 4 个方面,是不同致因因素互相组合的结果。簇 1 为高风险致因组合,其内专职安全人员不足、施工过程监督缺失、技术交底不规范等因素,频繁出现在事故案例中,这些因素与现场技术管理直接相关,反映在施工现场管理中缺乏有效的控制和监督。由此可见:技术管理的失效在事故致因中占据主导地位。

相比之下,簇 2 的因素更多与管理体系中的结构性缺陷有关。这些因素虽然不会直接引发事故,但会削弱管理系统的执行力,间接为事故发生创造了条件。簇 2 中的因素在管理层面起到了推动作用,表明技术管理失效是核心原因,管理机构的薄弱使得技术管理失效难以被纠正。

簇 3 和簇 4 则与日常施工管理和辅助管理相关,如现场安全检查不到位、未设置警戒区等,更多是日常管理中的不足,虽然不直接导致事故,但其长期积累会为事故埋下隐患,这些问题虽然不具有直接性,但会削弱整体安全意识,间接增加事故风险。

综上,技术管理的失效在事故发生过程中起到了关键作用。簇 1 的致因组合主导了事故的发生,而其他簇中的因素则间接加剧现场管理的失效。因此,在实际现场施工过程中应着重防护簇 1 当中的因素,避免事故发生。

3.2 簇内致因因素关联分析

簇 1 主要由高风险因素组成,这些因素在事故中直接表现为显著的触发点,其影响力已在权重分配过程中明确体现,因此,簇 1 的关联规则挖掘并未进一步展开分析。而簇 2、簇 3 和簇 4 中致因因素个数均超过 10,且这些因素在各自簇内具有不同的特性和相互关系。通过聚类分析,能够识别出这些因素的分组情况,但难以深入揭示导致交叉作业事故的具体致因组合。因此,采用 Apriori 算法对簇 2、簇 3 和簇 4 进行关联规则挖掘。Apriori 算法是通过多次扫描原始数据集,并逐次迭代,最后生成频繁项集^[17]。在此基础上,通过分析支持度、置信度和提升度 3 个指标来确定事故致因的关键组合。支持度反映某一组合在事故数据中出现的频率;置信度则衡量一个因素发生后,另一个因素随之发生的概率;提升度则用于评估 2 个因素之间的关联强度。通过这些指标的计算与分析,不仅能够发现某些高频出现的因素组合,还能明确这些组合对事故发生的具体贡献。

将原数据集按照聚类结果划分为 4 个分部集合,

选取簇2、3、4的数据集分别进行Apriori算法,根据产生关联规则的数量和有效性,选择合适的支持度与置信度阈值,生成和筛选出规则^[18]。运用Gephi软件可视化,将致因因素间连边次数表示为节点强度,将节点设置为先导项和后导项,箭头表示关联方向,边的粗细表示提升度的大小,如图5—图7所示。

1) 簇2中的强节点和关联规则。设置最小支持度为0.02,最小置信度为0.5,筛选出22条规则,如图5所示。在这些关联规则中,8条关联规则与H11连边,表明其节点强度最高,需重点关注。H11、C24、H41是关联规则中最常见的组合(支持度为0.023,置信度为0.75,提升度为9.83),其置信度为0.75表明:当出现安全管理机构不健全、权责划分不明确任意一项时,在75%的案例中出现监理人员不足;提升度 $9.83 > 1$ 表明:该致因组合存在强关联性。这种关联规则发生的可能性较低,但一旦发生,其后果会非常严重。

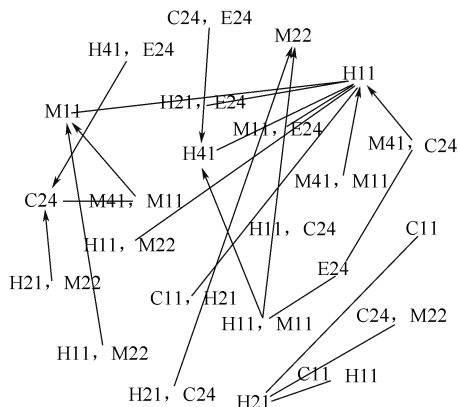


图5 簇2强关联规则

Fig. 5 Cluster2 strong association rules

针对簇2结果提出预防措施:建设单位作为责任主体要加大管理职能和监管力度,建立健全安全管理机制,聘请监理单位,以合同形式明确各方责任与义务,必要时可申请政府主管部门介入。

2) 簇3中强节点和关联规则。设置最小支持度为0.03,最小置信度为0.6,筛选出24条规则,如图6所示。在这些关联规则中,8条关联规则与M13连边,此因素在施工过程中应当重点关注。E25和M12是网络图当中最显著的规则(支持度为0.046,置信度为0.6,提升度为4.37),其置信度为0.6表明:该致因组合在60%的案例中同时发生;提升度 $4.37 > 1$ 表明致因组合有效。在实际作业中表现为线缆敷设不当、漏电等引起触电、火灾事故,接触到存放不当、无防护措施的危险材料,造成更大的

风险和事故。这表明交叉作业现场分包之间缺少协调,在施工过程中应当提供必要的个人安全防护用具,减少人身伤害的风险。

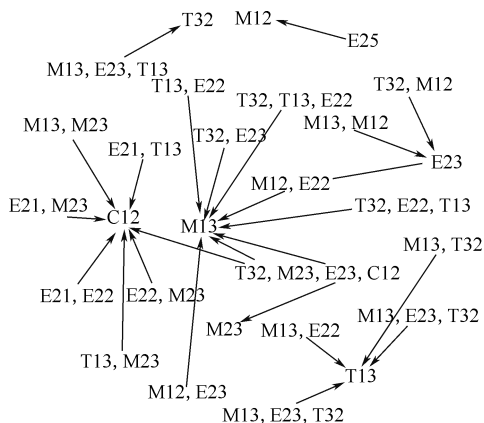


图6 簇3强关联规则

Fig. 6 Cluster3 strong association rules

针对簇3结果提出预防措施:簇3结果均属于施工准备阶段安全隐患,需加强针对性施工前检查,仅基本巡视现场是不够的,在交叉作业施工前,应当互相告知施工内容和安全注意事项,进行针对性的防护、排查隐患,防止对方作业对自身产生危害。

3) 簇4中强节点和关联规则。设置最小支持度为0.04,最小置信度为0.9,筛选出18条规则,如图7所示。在这些关联规则中,7条关联规则与T12连边,在安全管理过程中应当充分关注这些致因因素。M21、H31、T35、C21、C22是网络图当中最显著的规则(支持度为0.046,置信度为0.9,提升度为5.04),其置信度等于0.9表明:该致因组合在90%的案例中同时出现;提升度 $5.04 > 1$ 表明:致因组合有效。在实际作业中表现为施工管理体系不规范,现场作业人员的违规指挥、违章操作,支撑结构失稳成为直接原因,造成事故。

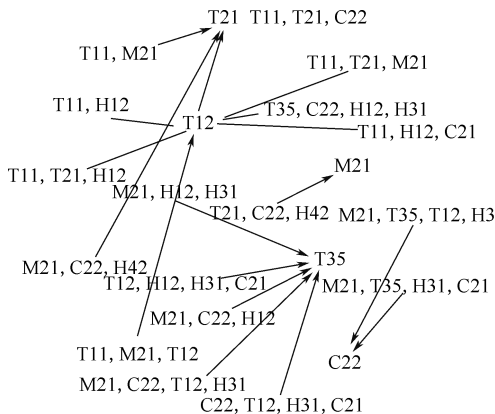


图7 簇4强关联规则

Fig. 7 Cluster4 strong association rules

针对簇4结果提出预防措施:加强对参建方、参建人员的资质审核、动态排查。做到管理人员、特殊作业人员持证上岗。

4 典型事故案例验证

4.1 事故概况

2023年4月18日,北京市丰台区北京长峰医院发生重大火灾事故,造成29人死亡、42人受伤,直接经济损失3 831.82万元。根据事故调查报告^[19]显示:净化门安装作业人员在现场安装净化门,总包通知了自流平地面作业进场施工,但未告知门框安装人员;自流平地面施工人员到场后使用环氧树脂底涂材料涂刷地面,环氧树脂底涂材料中易燃易爆成分挥发,遇角门框安装人员用磨机切割金属净化板产生火花发生爆燃,两者形成违规交叉作

业,且现场无应急预案,消防系统瘫痪,无法控制火灾蔓延速度,造成重大安全事故。

4.2 事故致因因素分析

依据建立的交叉作业事故致因评价体系,识别北京长峰医院重大火灾案例出现的交叉作业类型与事故致因,结果见表6。此事故直接原因是施工单位违规在同一作业区域同时进行自流平地面施工和门框安装切割交叉作业,属于时空冲突。40个致因因素中有23个在该起事故中出现,人员和组织配置6个因素出现,技术管理10个因素出现,表明组织管理和现场管理的重要性。合同管理4个因素出现,这表明合同纠纷可能成为交叉作业事故的一个影响因素。缺乏明确责任分担和沟通规定,容易造成工程协调不当。从簇分析,簇1当中的因素全部发生,簇2的关键关联组合也产生,簇4的关键关联

表6 事故案例致因分析

Table 6 Causes analysis of accident cases

交叉作业类型	事故责任分析	致因因素提取	因素转换
作业 A:门框安装作业	未按规定设立安全生产管理机构	A-H11 安全管理机构不健全	H11、H12、H22、H31、H32、H41、M12、T12、T13、T14、T21、T22、T31、T32、T33、T34、T35、C12、C21、C22、C24、E21、E22
	ICU 改造工程未按规定申请施工许可证和开工登记手续	A-H12 施工手续缺失或作假	
	未配备专职安全生产管理人员	A-H22 专职安全人员不足	
	现场巡查值班人员证书未达到相应资质等级	A-H31 无证上岗	
	施工现场未聘用工程监理	A-H41 监理人员不足	
	固定消防设施失效,消火栓系统管网无水	A-T33 安全防护装置缺失	
	未发现西北门外坡道的易燃材料着火未提前消除安全隐患	A-T22 未消除安全隐患	
	未根据施工现场实际情况制定施工方案	A-T13 施工方案未编制	
	未对作业人员开展安全生产教育和培训	A-T31 安全培训不到位	
	未进行针对性技术交底	A-T14 技术交底不到位	
	未办理动火审批,对现场可燃物清理的情况擅自开展切割作业	A-T12 更改工艺流程	
	未配有专人值守,现场无人监护	A-T34 施工过程监督缺失	
	开展自流平地面施工和净化门门框安装切割动火时违规交叉作业	A-T35 违规指挥作业	
	两家分包在同一区域作业时未沟通协调造成交叉干扰	A-C12 未签订安全生产协议	
	个人借用他人公司资质承揽工程	A-C21 挂靠	
未经建设单位允许将工程私发给无承揽资质的个人	A-C22 违法分包		
施工区和非施工区之间未进行防火分隔	A-E21 未设置警戒区		
作业 B:自流平地面施工	环氧树脂涂料属于易燃物品,在储存和放置过程中未按规定进行	B-M12 危险材料管理不严	
	危险区域内违规调料施工	B-H32 安全意识淡薄	
	已知材料为易燃易爆物品,现场仍未保持有效通风	B-T32 现场安全检查不到位	
	未配有专人值守,现场无人监护	B-T34 施工过程监督缺失	
	总承包单位与自流平地面分包之间无合同	B-C24 权责划分不明确	
	未将残留的环氧树脂底涂材料清理干净,忽视其可能造成的危害	B-T21 危险源辨识不充分	
	作业区域内存在动火作业,未将危险源转移到安全区域	B-E22 施工安全间距	
开展自流平地面施工和净化门门框安装切割动火时违规交叉作业	B-T35 违规指挥作业		

组合中除支撑体系不足因素外全部发生。总体上看,长峰医院火灾事故案例研究结果与聚类及关联分析得到的结论基本一致,能够有效地反映针对施工交叉作业安全管理的实际情况。

5 结 论

1) 基于建筑施工交叉作业事故案例,运用扎根理论得到建筑施工交叉作业风险评价体系;分析交叉作业事故特征及致因,发现高处坠落是主要事故类型,事故特征表现为时空冲突、资源冲突和权责冲突。

2) 运用谱聚类算法聚类分析致因因素,将致因

因素划分为4个簇,再运用PCA与AHP相结合的赋权方法得出,簇1为高风险,簇2为中等风险,簇3和簇4为低风险。技术管理因素被确认为导致交叉作业事故的关键因素;关联分析中等风险及低风险簇得出强关联规则,并提出针对的预防措施。

3) 文中主要体现在数据提取的难度较大,导致可使用的事故案例数量有限。关联规则分析仅限于簇内部,未考虑跨簇因素的交互作用。事故的复杂致因往往涉及多个系统或多个因素之间的交互作用,未来的研究可扩展数据库,完善数据筛选标准,并探索跨簇因素的关联关系,以更加全面地揭示交叉作业事故的致因模式。

参 考 文 献

- [1] YEO C, BHANDARI J, ABBASSI R, et al. Dynamic risk analysis of offloading process in floating liquefied natural gas (FLNG) platform using Bayesian network[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 41: 259-269.
- [2] AKINCI B, FISCHEN M, LEVITT R, et al. Formalization and automation of time-space conflict analysis[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2002, 16(2): 124-134.
- [3] MOON H, DAWOOD N, KANG L, et al. Development of workspace conflict visualization system using 4D object of work schedule[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2014, 28(1): 50-65.
- [4] 胡超, 赵春菊, 周宜红, 等. 高拱坝仓面施工时空冲突分析与调整方法研究[J]. *水力发电学报*, 2017, 36(5): 19-27.
- HU Chao, ZHAO Chunju, ZHOU Yihong, et al. Time-space conflict analysis and adjustment methods for pouring concrete of higharch dams[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(5): 19-27.
- [5] 王建平, 聂本武, 李智. 三峡升船机立体交叉作业的风险控制措施研究[J]. *安全与环境工程*, 2013, 20(1): 147-150.
- WANG Jianping, NIE Benwu, LI Zhi. Research on the risk control countermeasures of the grade separation operation of ship lift in three gorges[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2013, 20(1): 147-150.
- [6] 江新, 吴园莉. 水电工程项目群交叉作业风险演化机理研究[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(12): 157-163.
- JIANG Xin, WU Yuanli. Research on evolution mechanisms of risks in hydropower project group cross operation[J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(12): 157-163.
- [7] 屈静, 张明星, 张明, 等. 基于压气站场的交叉作业安全风险评价模型研究[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(3): 1 163-1 169.
- QU Jing, ZHANG Mingxing, ZHANG Ming, et al. Research on the safety risk control mode of compressor field based on cross operation[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(3): 1 163-1 169.
- [8] ROZENFELD O, SACKS R, ROSENFELD Y, et al. Construction job safety analysis[J]. *Safety Science*, 2010, 48(4): 491-498.
- [9] 应急管理部办公厅. 生产安全事故调查报告编制指南(试行)[EB/OL]. (2023-03-16). https://www.mem.gov.cn/gk/fzxxgkpt/fdzdgnr/202303/t20230316_444990.shtml.
- [10] 方雪, 谢朝武, 黄锐. 扎根理论下国内漂流旅游安全事故成因机制[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(4): 23-29.
- FANG Xue, XIE Chaowu, HUANG Rui. Formation mechanism of safety accidents in domestic drifting tourism based on GT[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(4): 23-29.
- [11] 闫淑敏, 杨小丽. 基于扎根理论的高校科研人员创新动力研究[J]. *科技管理研究*, 2019, 39(1): 39-45.
- YAN Shumin, YANG Xiaoli. Research on innovation motivation of scientific research personnel in colleges and universities based on grounded theory[J]. *Science and Technology Management Research*, 2019, 39(1): 39-45.

- [12] AYHAN B U, DOĞAN N B, TOKDEMİR O B. An association rule mining model for the assessment of the correlations between the attributes of severe accidents[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2020,26(4):315-330.
- [13] 周林, 平西建, 徐森, 等. 基于谱聚类的聚类集成算法[J]. *自动化学报*, 2012,38(8):1 335-1 342.
ZHOU Lin, PING Xijian, XU Sen, et al. Cluster ensemble based on spectral clustering[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012,38(8):1 335-1 342.
- [14] 梅睿, 吕志勇, 顾文, 等. 基于主成分分析和谱聚类的短期风功率预测[J]. *现代电力*, 2023,40(1):35-41.
MEI Rui, LYU Zhiyong, GU Wen, et al. Short-term wind power prediction based on principal component analysis and spectral clustering[J]. *Modern Electric Power*, 2023,40(1):35-41.
- [15] 胡长明, 刘一衡, 黄华, 等. AHP-改进物元法在整体钢平台顶升模架体系安全风险评估中的应用[J]. *安全与环境学报*, 2024,24(1):33-41.
HU Changming, LIU Yiheng, HUANG Hua, et al. Application of AHP improved matter-element method in safety risk assessment of integral steel platform jacking formwork system[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024,24(1):33-41.
- [16] KAPLAN S G B J. On the quantitative definition of risk[J]. *Risk Analysis*, 1981,1(1):11-27.
- [17] 郑彬彬, 冯婷婷, 王佳贺, 等. 基于文本挖掘的城镇燃气事故致因及关联分析[J]. *中国安全科学学报*, 2023,33(7):190-195.
ZHENG Binbin, FENG Tingting, WANG Jiahe, et al. Causes and correlation analysis of urban gas accidents based on text mining[J]. *China Safety Science Journal*, 2023,33(7):190-195.
- [18] 李鑫, 阳富强. 危化品事故人为因素关联规则挖掘与分析[J]. *中国安全科学学报*, 2022,32(11):134-139.
LI Xin, YANG Fuqiang. Human factor association rules mining and analysis for hazardous chemical accidents[J]. *China Safety Science Journal*, 2022,32(11):134-139.
- [19] 应急管理部. 北京丰台长峰医院“4·18”重大火灾事故调查报告[EB/OL]. (2023-10-25). https://www.mem.gov.cn/gk/zfxxgkpt/fdzdgknr/202310/t20231025_466731.shtml.

作者简介: 刘青锋 (1999—),男,山西临汾人,硕士研究生,主要研究方向为安全应急管理。E-mail:liu18288749018@163.com。

