

中文引用格式:郑霞忠,刘奕成,邵波,等.基于文本挖掘的水电工程施工物体打击事故致因分析[J].中国安全科学学报,2024,34(4):50-57.

英文引用格式:ZHENG Xiazhong, LIU Yicheng, SHAO Bo, et al. Accident causal analysis of object strike in hydropower project construction based on text mining [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 50-57.

基于文本挖掘的水电工程施工物体打击 事故致因分析*

郑霞忠^{1,2}教授,刘奕成²,邵波^{**1,2}副教授,王硕²,柯善钢²

(1 三峡大学水电工程施工与管理湖北省重点实验室,湖北宜昌443002;

2 三峡大学水利与环境学院,湖北宜昌443002)

中图分类号:X928.02

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.04.1452

基金项目:国家自然科学基金资助(72204141)。

【摘要】为探明水电工程施工过程中物体打击事故的致因及作用关系,提出针对性的事故预防措施,从源头遏制事故发生。遴选水电工程施工物体打击事故调查报告,运用文本挖掘从人、机、环、管4个方面提取14项事故致因。融合关联规则、决策试验和评价实验室(DEMATEL)方法,厘清致因因素间的关联关系,构建重要度分析模型,确定事故近端致因因素。结果表明:水电工程物体打击事故各致因间联系紧密,其中,安全监督检查不到位、违章作业、安全防护措施不完备、安全意识淡薄等致因因素对事故发生具有直接影响作用。现场清理不彻底、安全技术交底不到位、安全教育培训不到位等是诱发事故的深层影响因素,且安全意识淡薄的中心度排名第一,对事故致因系统的影响较大,在实际施工中应着重考虑上述致因因素。

【关键词】文本挖掘;水电工程;物体打击;事故致因;关联规则;决策试验和评价实验室(DEMATEL)方法

Accident causal analysis of object strike in hydropower project construction based on text mining

ZHENG Xiazhong^{1,2}, LIU Yicheng², SHAO Bo^{1,2}, WANG Shuo², KE Shan'gang²

(1 Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China; 2 College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China)

Abstract: To clarify the accident causes and their association rules of strike accidents in hydropower project construction, specific accident prevention strategies were proposed to curb accidents at source. Based the selected object strike accidents during hydropower construction process, 14 accident causal parameters were summarized using text mining from four perspectives including worker, machine, environment and management. Moreover, an importance analysis model was proposed by coupling association rules and the DEMATEL approach to analyze the interrelated relationship between causes and

* 文章编号:1003-3033(2024)04-0050-08; 收稿日期:2023-10-14; 修稿日期:2024-01-18

** 通信作者:邵波(1990—),男,湖北孝感人,博士,副教授,主要从事安全管理、风险管理等方面的研究。E-mail:shaobo@ctgu.edu.cn。

determine major accident causes. The results showed that the accident causes of object strikes in hydropower projects were closely related to each other, among which inadequate safety supervision and inspection, illegal operations, insufficient safety protection, and weak safety awareness directly affected the accident's occurrence. Furthermore, the deeper causing factors of accidents were incomplete on-site cleaning, insufficient disclosure of safety technology, and inadequate safety education. Weak safety awareness ranked first in terms of centrality and had the greatest influence on the accident causation system, thereby the above causative factors should be emphasized in project construction.

Keywords: text mining; hydropower project construction; object strike; accident causes; association rules; decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) approach

0 引言

事故预防一直是安全管理工作的重点、难点,有效的事故预防措施主要依赖于研究历史事故,以此给事后控制提供便利^[1]。物体打击是工程施工领域中备受关注的高风险安全事故之一,易导致重大生命财产损失,在劳动力、施工机具、物料投入较多的工程施工中多发频发,尤其是交叉作业施工过程中^[2-3]。而水电工程多在深山峡谷,施工技术复杂,作业空间有限,施工要素更加密集,导致物体打击事故更为频繁,并且相较于其他工程领域危害更大,影响更为恶劣^[4-6]。为预防水电工程施工物体打击事故,降低施工安全风险,防止事故带来的危害,需探明水电工程施工物体打击事故致因和挖掘致因间的作用关系。

对于水电工程施工物体打击事故的致因研究,目前学者们主要利用事故致因模型来解释事故发生的机制,厘清事故致因间的逻辑关系,分析事故致因过程^[7]。ZHENG Xiazong 等^[8]利用人为因素分析及分类系统探索水电工程事故致因与人为因素之间的联系。传统的事故致因分析多依赖研究人员经验,加之事故文本多为非结构化数据,对事故分析的准度和效率提出很大挑战。为应对这个问题,部分学者开始采用文本挖掘等智能分析方法研究事故致因,如陈述等^[9]利用短语提取技术从非结构化文本中挖掘水电工程施工安全隐患部位与隐患类型的关联规则,发现在边坡处极易发生物体打击事故;王仁超等^[10]结合 RoBERTa-wwm-CNN 混合深度学习模型,实现水电工程施工安全隐患文本的智能分类,揭示了物体打击事故的分布特征,研究发现,“坝段”“尾水段”为物体打击隐患的多发部位;CHEN Shu 等^[11]采用基于卷积神经网络的智能文本分类方法,从水电事故报告中提取文本信息,并结合关联规则和桑基图探究物体打击事故与其发生部位

之间的关系。综上,学者们的研究大多围绕水电工程物体打击事故与隐患部位之间的联系,对于水电工程施工中物体打击事故致因尚缺乏系统的研究,并且物体打击事故致因因素间的作用关系没有得到充分展现。

鉴于此,笔者拟综合考虑施工现场事故过程,采用文本挖掘方法提取水电工程施工物体打击事故特征词项,挖掘物体打击事故致因主题,结合 Apriori 算法挖掘因素间的关联规则,量化分析因素间的逻辑关系,全面系统地分析事故致因,以期水电工程施工安全管理提供理论依据。

1 物体打击事故致因研究流程

首先,收集水电工程施工物体打击事故报告,预处理事故报告文本,将预处理后的文本语料导入潜在狄利克雷分布(Latent Dirichlet Allocation, LDA)主题模型,提取得到物体打击事故主题和事故特征词,归纳总结出物体打击事故致因因素;然后,遍历事故报告集,挖掘致因因素间的关联规则,设定合理阈值得到强关联规则,并按作用度对关联规则进行排序;最后,为探究各致因因素间的作用关系,采用决策试验和评价实验室(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)方法分析各致因因素的重要度,计算得出各致因因素的原因-结果属性,达到挖掘隐含信息的目的。具体研究流程如图1所示。

2 物体打击事故致因因素提取

2.1 文本数据收集与预处理

水电工程施工事故多为大型伤亡事故,事故发生后企业和当地政府会根据实际情况调查统计伤亡人数、经济损失及社会影响等,总结出的事故调查报告反映了事故发生的原因及经过,相较于其他事故文本更具代表性,故从某大型水电企业获得物体打

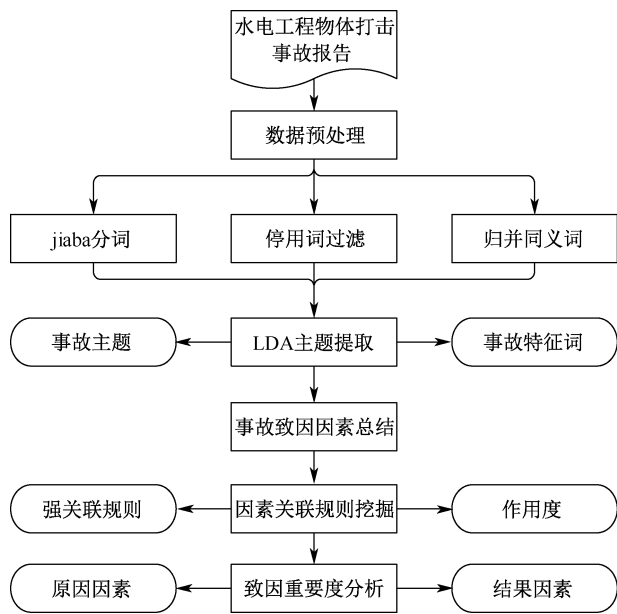


图1 事故致因研究流程

Fig. 1 Flow chart of accident causes

击事故调查报告 108 份,作为文本挖掘的语料,报告包含近些年较新的事故数据,确保后续事故致因分析的准确性。

数据预处理主要包括 jieba 分词、去停用词及归并近义词项。采用 jieba 分词中可以把句子精确切开且适合文本分析的精确模式,同时,建立水电工程物体打击事故自定义词典,以防部分专业词汇被错误切分,进而提高结果的准确性。停用词是文本中经常出现的术语,如标点符号、连词和代词等,对于文本分析毫无意义甚至会后续的数据分析造成干扰,故需进行停用词过滤,文中停用词表主要来源于百度停用词库。水电工程文本数据中存在许多含义相近的词汇,如“撞击”“碰撞”“相撞”可统称为“碰撞”,为精简分词结果,归并处理文本中相近含义词项。

2.2 物体打击事故主题特征分析

2.2.1 LDA 主题模型构建

LDA 主题模型是一种从文本中抽取主题的主题挖掘模型,2003 年由 BLEI 等^[12]提出,又被称为 3 层贝叶斯概率模型,包括文档、主题、词 3 层。LDA 的基本流程是生成以文档为条件的主题概率分布和以主题为条件的词概率分布,它可以充分挖掘文档词项间的潜在联系,帮助人们从大量文本语料中更高效地获取潜在主题或中心思想,从而对文本内容进行划分归类,达到快速获取有效信息的目的。LDA 采用语义分析技术,利用文本词项共现特

征,通过无监督方式挖掘出文档中隐含的抽象主题,基本思想是:一篇文档隐含多个主题,一个主题由多个词项组成,通过不间断迭代模拟文档生成过程,进而将文档表示为潜在主题的随机混合,最后每个主题通过词分布进行表征,即潜在主题是由文档-词概率分布和主题-词概率分布中得出。

LDA 生成流程:由于主题的先验分布服从从参数 α 控制的 Dirichlet 分布,则文档 m 的主题分布 θ_m 可表示为: $\theta_m = \text{Dirichlet}(\alpha)$;从文档 m 中任选一个主题 k ,主题 k 中的词分布也服从由参数 β 控制的 Dirichlet 分布,则主题 k 的词分布 ψ_k 可表示为: $\psi_k = \text{Dirichlet}(\beta)$;对于第 m 个文档的主题 k 的词语分布 ψ_k 中的第 n 个词,根据 θ_m 可得到它的主题编号分布 $z_{m,n}$,即 $z_{m,n} = \text{Multi}(\theta_m)$;对于某一主题下的词概率分布可由 ψ_k 取样获取,根据主题编号 $k = z_{m,n}$ 可得 $w_{m,n} = \text{Multi}(\psi_{z_{m,n}})$ 。其中, α 表示文档-主题分布的 Dirichlet 参数; β 表示主题-词语分布的 Dirichlet 参数; $z_{m,n}$ 表示第 m 篇文档第 n 个词的主题编号; $w_{m,n}$ 表示第 m 篇文档第 n 个词项。

在建立 LDA 主题模型时,模型主题数目需得到科学合理的设置。由于不同数量的主题数可能会导致所挖掘的语料库结构完全不同,主题数目过小会导致模型过于粗糙,主题之间区分度不够;主题数目过大则会导致模型过拟合,主题之间产生重叠。因此,为确定主题数目,引入困惑度指标来确定合理的主题数目,困惑度的定义可理解为主题模型对于某一特定文档属于某一主题的不确定程度,所以困惑度越小表明该模型的区分度越高,模型结构越好,主题数目越优。困惑度计算公式为:

$$X = \exp \left(- \frac{\sum_{m=1}^R \log_d(P(w_m))}{\sum_{m=1}^R H_m} \right) \quad (1)$$

式中: X 为困惑度; R 为文档总数; d 为语料库中的测试集; $P(w_m)$ 为第 m 篇文档每个单词的概率; H_m 为第 m 篇文档词项总数。

2.2.2 事故主题特征词提取

将文本预处理后的事故数据通过 Wordcloud 工具包可视化展示,得到水电工程物体打击事故词云图,如图 2 所示。词云图中词语字体大小与词频高低成正比,同时词语相距越近联系越大。

将预处理得到的事故数据文本导入 LDA 主题模型,困惑度随主题数的变化曲线如图 3 所示。由图 3 可知:当主题数目 K 为 14 时,此时主题重叠现



图 2 水电工程物体打击事故词云图

Fig. 2 Word cloud map of object strike accidents in hydroelectric project construction

象较小,说明此时模型训练效果良好,通过困惑度检验最终得到最优主题数为 14。

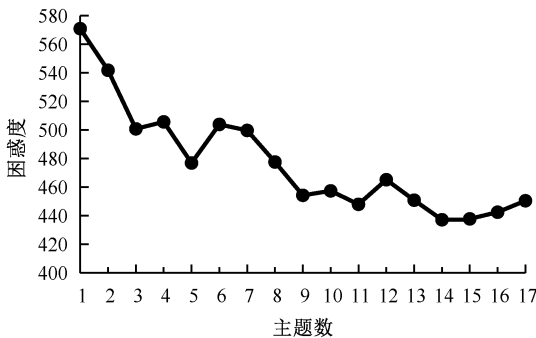


图 3 不同主题数下对应的困惑度

Fig. 3 Perplexity corresponding to different number of topics

输入事故文档集和最优主题数,通过 python 编码构建 LDA 模型,抽取水电工程施工物体打击事故潜在主题。在最优主题数的基础上通过 LDA 主题模型得到各个主题下对应的主题特征词,从主题致因分析视角出发,剔除各个主题下词义含糊、语义范围较大的词项,保留符合事故致因过程的特征词项,最终提取的事故主题特征词见表 1。为加强事故致因分析的科学性和系统性,在事故特征词性上保留有名词和动词以及少量形容词,以便完善主题特征,体现事故主题的显性性质;从直接和间接 2 个原因层面梳理特征词项,便于提高后续致因因素分析的逻辑性。

表 1 事故主题特征词

Tab. 1 Accident theme features words

主题	特征词
1	现场、管理、事故、落实、责任、履行、职责、督促、规章制度

续表 1

主题	特征词
2	防范、措施、流于形式、未能、支架、扣件、支护、横撑、溜槽、承台
3	作业、人员、违章、操作、违反、规程、吊装、吊柱、放置、钢管、挖掘机
4	现场、爆破、岩块、围岩、块石、施工、危石、裂隙、隐患、电杆、缺失、节理
5	事故隐患、滑坡、重视、及时、发现、井沟、涉事、盖板、消除、施工
6	作业、交叉、现场、拖吊、拉线、挂钩、矩管、发生、风道、分包
7	玄武岩、岩类、致密、坚硬、倾角、斑状、岩石、导致、扰动、混凝土、事故
8	安全意识、盲目、缺乏、提升、坠落、放松、拆除、致使、人员、施工
9	交底、技术、操作、规程、细则、断裂、严格、执行、制定、监理
10	维护、保养、年限、较长、断裂、冲击、磨损、长时间、联结、螺栓、料斗、托轮
11	检查、安全、焊接、隐患、人员、牢固、固定、排查、整治、冒险
12	教育、培训、意识、擅自、指挥、过程、规定、现场、到位、监理
13	经验、人员、安全、意识、脱落、缺乏、失误、落实、导致、施工、发生
14	清理、岩石、到位、部位、现场、围岩、异常、施工、导致、钻孔

2.3 基于主题特征的事故致因因素确定

为探明水电工程作业中物体打击事故致因因素间的影响关系和作用逻辑,根据文本挖掘的事故主题特征词结果,回归事故报告语料,结合前人研究成果,合并含义相近的致因,依据全面适用原则合理确定事故致因因素,致因因素之间相互独立且互不影响,最终归纳总结出事故致因因素 14 个。其中,全面涵盖了人、机、环、管 4 个方面的作用因素,达到了系统性分析目的。事故致因因素结果见表 2。

表 2 物体打击事故致因因素

Tab. 2 Causal factors of object strike accidents

代码	致因因素	代码	致因因素
C ₁	现场管理失职	C ₈	安全意识淡薄
C ₂	安全防护措施不完备	C ₉	安全技术交底不到位
C ₃	违章作业	C ₁₀	维护保养不到位
C ₄	作业环境不佳	C ₁₁	安全监督检查不到位
C ₅	隐患排查治理不力	C ₁₂	安全教育培训不到位

续表 2

代码	致因因素	代码	致因因素
C_6	交叉作业	C_{13}	施工经验不足
C_7	地质条件不良	C_{14}	现场清理不彻底

3 物体打击事故致因因素分析

3.1 事故致因因素关联规则挖掘

3.1.1 强关联规则方法构建

关联规则是数据挖掘中识别要素间潜在关联关系的一种重要方法,它能够反映一种事物与其他事物之间的相互依存关系,从而量化因素之间的关联程度^[13]。目前普遍使用 Apriori 算法挖掘数据之间的关联规则,其原理是基于逐层搜索的迭代方法挖掘项集之间的关联规则^[14]。文中结合 Apriori 算法挖掘 14 项致因因素间的关联规则,并构建强关联规则分析事故致因。

记总项目数据集 $D = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 是所有项目 T_i 构成的集合,设 A, B 为全集 D 的项目子集,并且 $A \cap B \neq \emptyset$,则关联规则可表示为 $A \Rightarrow B$ 的蕴含式, A 为前项, B 为后项。用支持度 S 和置信度 I 衡量 2 因素间的关联性强弱,作用度 L 表示 2 因素间的相关性。

项目集 A 的支持度是指项目集 A 在总项目集 D 中占比,反映的是 A 在 D 中出现的概率大小。而关联规则 $A \Rightarrow B$ 的支持度则表示为项目集 A 和项目集 B 在全集 D 中同时出现的概率大小,关联规则 $A \Rightarrow B$ 的支持度计算式为:

$$S(A) = P(A) \quad (2)$$

$$S(A \Rightarrow B) = P(A \cup B) \quad (3)$$

关联规则 $A \Rightarrow B$ 的置信度是指项目集 A 和项目集 B 在全集 D 中同时出现的概率与项目集 A 在 D 中出现概率的比值,反映的是 A 出现的情况下 B 出现的概率,可以衡量 A 与 B 之间关联性的强弱。关联规则 $A \Rightarrow B$ 的置信度计算式为:

$$I(A \Rightarrow B) = \frac{S(A \Rightarrow B)}{S(A)} = \frac{P(A \cup B)}{P(A)} \quad (4)$$

关联规则 $A \Rightarrow B$ 的作用度是指 $A \Rightarrow B$ 的置信度与 B 的支持度的比值,反映项目集 A 的出现对项目集 B 出现概率的影响程度。关联规则 $A \Rightarrow B$ 的作用度计算式为:

$$L(A \Rightarrow B) = \frac{I(A \Rightarrow B)}{S(B)} = \frac{P(A \cup B)}{P(A) \cdot P(B)} \quad (5)$$

设置支持度与置信度的阈值,若关联规则 $A \Rightarrow B$ 的支持度与置信度均不劣于支持度与置信度的阈

值,称强关联规则;反之为弱关联规则。作用度反映关联规则中 A 与 B 的相关性:当 $L=1$ 时, A 与 B 没有相关性,强关联规则无效;当 $L<1$ 时, A 与 B 呈负相关性, A 的出现抑制了 B 的出现;当 $L>1$ 时, A 与 B 呈正相关性, A 的出现促进了 B 的出现,则强关联规则有效。

3.1.2 致因因素关联规则提取

将 108 份水电工程物体打击事故报告作为基础资料,构建物体打击事故关联规则数据集。首先,通过 Apriori 算法挖掘每对致因因素的关联规则;其次,通过设置参数阈值获取有分析价值的强关联规则;最好通过人工调试最终设定最小支持度为 0.1,最小置信度为 0.4,最小作用度为 0.7,经数据挖掘生成 171 条强关联规则用作物体打击事故致因关联性分析,其中,97.7%的关联规则的支持度介于 0.1~0.6 之间,78.9%的关联规则作用度 > 1 ,54.4%的关联规则的置信度 > 0.5 ,这表明水电工程施工物体打击事故致因间复杂的耦合性和关联性^[15]。

设定最小支持度为 0.1,最小置信度为 0.8,按作用度获得排名前 6 的关联规则作为代表性强关联规则进行分析,见表 3。其中,强关联规则 $\{C_2/C_{12}\} \Rightarrow \{C_{11}\}$ 作用度最高,说明致因 C_2 和 C_{12} 导致致因 C_{11} 出现的概率极高。结合事故报告和专家经验分析强关联规则的真实性, $\{C_1/C_{13}\} \Rightarrow \{C_8\}$ 关联规则表示当工人施工经验不足时很大概率会出现安全意识淡薄,从而导致事故发生。研究表明:在实际作业人员中农民工参与占比达到 40%,由于个别农民工的文化水平不高施工经验不足,安全意识不强,进行违章操作导致物体打击事故发生,符合事故致因过程。同理,其他强关联规则也得到有效性验证。

表 3 排名前 6 的强关联规则

Tab. 3 Top 6 strong association rules

后项	前项	支持度	置信度	作用度
C_{11}	C_2, C_{12}	0.111	0.833	1.875
C_8	C_{11}, C_{13}	0.111	0.833	1.364
C_8	C_{14}	0.102	0.818	1.339
C_8	C_7, C_{13}	0.102	0.818	1.339
C_8	C_1, C_{13}	0.102	0.818	1.339
C_8	C_2, C_{13}	0.194	0.81	1.325

3.2 事故致因因素重要度分析

3.2.1 重要度分析模型构建

基于各因素强关联规则提取,采用 DEMATEL 方法计算致因因素重要度。DEMATEL 方法是一种

综合运用图论与矩阵进行系统要素分析的方法,能够极大简化复杂问题的分析难度。该方法可确定各因素在系统中的地位、因素间因果关系以及主次关系,抓住问题中的主要矛盾。具体操作流程是在确定两两因素之间影响程度的直接影响矩阵的基础上,根据矩阵运算求得各因素的中心度和原因度,在此基础上分析各致因因素。

1) 构建直接影响矩阵 M 。通过关联规则揭示

各致因因素间的关联关系,得到各因素间的置信度,置信度与 DEMATEL 方法中直接影响矩阵中的数值含义存在一定程度的共性,都可以表示各因素间影响程度的大小,因此,把置信度转化为直接影响矩阵中行元素对列元素的影响值,即关联规则中前项对后项的影响程度,再按照 DEMATEL 方法规定,直接影响矩阵中主对角线影响值设为 0。直接影响矩阵 M 见表 4。

表 4 直接影响矩阵 M

Tab. 4 Direct impact matrix M

致因因素	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}
C_1	0.00	0.47	0.62	0.00	0.41	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00	0.59	0.44	0.00	0.00
C_2	0.00	0.00	0.42	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54	0.00	0.42	0.00
C_3	0.40	0.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.54	0.00	0.40	0.00
C_4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.56	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C_5	0.00	0.44	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58	0.00	0.00	0.53	0.00	0.00	0.00
C_6	0.00	0.61	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61	0.00	0.00	0.56	0.00	0.44	0.00
C_7	0.00	0.46	0.00	0.58	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.00
C_8	0.00	0.47	0.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	0.00	0.47	0.00
C_9	0.50	0.50	0.71	0.00	0.57	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.71	0.64	0.00	0.00
C_{10}	0.00	0.50	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C_{11}	0.42	0.56	0.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C_{12}	0.52	0.41	0.59	0.00	0.45	0.00	0.00	0.48	0.00	0.00	0.62	0.00	0.00	0.00
C_{13}	0.00	0.51	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C_{14}	0.00	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.82	0.00	0.00	0.45	0.00	0.55	0.00

2) 规范化直接影响矩阵 N 。归一化处理所得的直接影响矩阵,即将矩阵内各数值转化为 $[0, 1]$ 区间内的数值,归一化处理如下式:

$$N = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n M_{i,j}} M \quad (6)$$

3) 计算综合影响矩阵 T 。矩阵 N 不断自乘可得因素间的间接影响程度,把直接影响和间接影响相加可得到综合影响程度。计算方法如下式:

$$T = (N + N^2 + \dots + N^n) = \sum_{n=1}^{\infty} N^n = N(e - N)^{-1} \quad (7)$$

式中: N 为规范化直接影响矩阵; e 为单位矩阵。

4) 计算各因素影响度与被影响度。因素的影响度是指综合影响矩阵中该因素对应的行和,反映的是该因素对其他因素的综合影响水平;被影响度是指综合影响矩阵中该因素对应的列和,反映的是该因素受其他因素的综合影响水平。计算方法如下式:

$$D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

$$F_i = \sum_{j=1}^n t_{ji}, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中: D_i 为因素 i 的影响度; F_i 为因素 i 的被影响度。

5) 计算各因素中心度和原因度。将因素对应的影响度和被影响度相加得到该因素的中心度,中心度反映的是该因素在系统中与其他因素的联系程度,原因度反映的是该因素在系统中的因果属性,若为正值,表明该因素偏向于影响其他因素,被判定为原因型因素;若为负值,则表明该因素偏向于受到其他因素的影响,被判定为结果型因素。计算方法如下式:

$$Q_i = D_i + F_i, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

$$E_i = D_i - F_i, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

式中: Q_i 为因素 i 的中心度; E_i 为因素 i 的原因度。

3.2.2 致因因素重要度量化表征

通过重要度分析模型计算得到水电工程物体打击事故致因的影响度 V 、被影响度 Y 、中心度 U 、原因

度 J 、中心度排名 q 和因素属性 b , 具体结果见表 5。

表 5 重要度模型求解结果

Tab. 5 Results of solving the importance model

C_i	V	Y	U	J	q	b
C_1	1.571	1.012	2.583	0.558	5	原因
C_2	0.830	2.873	3.702	-2.041	3	结果
C_3	1.145	2.664	3.809	-1.519	2	结果
C_4	0.548	0.163	0.711	0.386	13	原因
C_5	0.950	0.608	1.558	0.342	10	原因
C_6	1.281	0.581	1.862	0.700	9	原因
C_7	0.910	0.158	1.068	0.753	12	原因
C_8	0.866	3.028	3.894	-2.162	1	结果
C_9	2.147	0.000	2.147	2.147	6	原因
C_{10}	0.458	0.000	0.458	0.458	14	原因
C_{11}	1.064	2.580	3.644	-1.516	4	结果
C_{12}	1.551	0.369	1.920	1.182	8	原因
C_{13}	0.834	1.244	2.078	-0.410	7	结果
C_{14}	1.123	0.000	1.123	1.123	11	原因

由表 5 可知:水电工程物体打击事故致因包括 C_1 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 、 C_9 、 C_{10} 、 C_{12} 、 C_{14} 等 9 个原因因素。其中, C_9 、 C_{12} 和 C_{14} 的原因度 >1 且排名前 3, 充分说明 C_9 、 C_{12} 和 C_{14} 在水电工程施工中更易导致其他致因发生从而引发物体打击事故, 是事故发生的根本原因, 必须引起管理人员的高度注意。其余 6 项原因因素原因度虽低, 但主要涉及施工现场的安全管理与施工环境等重要领域, 说明水电工程中完善的安全管理体系和良好的施工环境是确保施工安全的必要前提。

结果因素包括 C_2 、 C_3 、 C_8 、 C_{11} 、 C_{13} 等 5 个因素, 因素原因度越小表明该因素越易受其他因素影响, 其中, C_8 为物体打击事故发生创造了主观环境; C_{11} 为潜在致灾体危害能量释放埋下安全隐患(如边坡滚石伤人), 而 C_2 极大加深了作业人员在危害能量威胁下的伤亡程度; C_3 为致灾体(施工机具)作用于承灾体(作业人员)提供了客观的前提条件; C_{13} 是导致人的不安全行为的重要条件之一。以上 5 个因素与事故发生直接相关, 是水电工程物体打击事故的近端致因因素, 在事故预防中应成为首要控制对象。

事故致因原因-中心度如图 4 所示。由图 4 可知:致因 C_{11} 、 C_8 、 C_3 和 C_2 的中心度在事故系统中排名前 4, 对水电工程物体打击事故系统起到重要作用, 因此, 在施工过程中要不断加强安全教育培训, 进而在思想上提高工人的安全生产意识; 提高安全防护措施, 如穿戴智能感应设备实时监控工人状态; 认真落实或完善各项规章制度, 加强监管人员的责任意识, 把安全监督检查工作落到实处, 从人

-机-管 3 方面切断事故的致因路径。

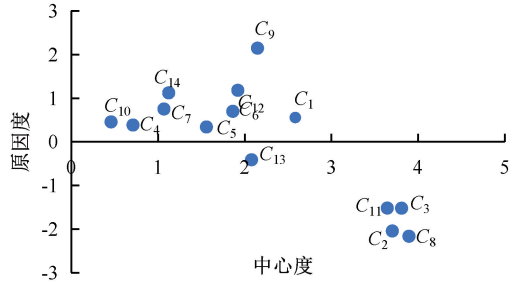


图 4 事故致因原因-中心度

Fig. 4 Causality-centrality of accident causal factors

致因 C_1 、 C_5 、 C_6 、 C_9 、 C_{12} 和 C_{13} 的中心度均介于 1.5~2.6, 对事故发生也起到一定的促进作用, 因此, 在水电工程实际工作中应该适当加强对失职人员的惩处措施, 提高现场管理人员的责任意识, 调整施工节奏, 避免施工交叉混乱, 严格落实技术交底工作, 加强隐患细节的排查力度, 以及增加水电施工人员的技能培训。通过设置合理的奖惩制度提高水电人员的工作热情, 降低事故人因风险, 借助事故系统的反馈调节机制降低事故发生概率。

其余事故致因的中心度较低, 但在施工作业中仍不可忽视, 它们彼此影响、相互作用、共同促进事故发生, 在事故防控阶段要全方位、多角度综合考虑致因因素, 抓住重要的少数, 把握次要的多数, 从源头遏制事故的发展, 尽量减少不必要的损失, 确保水电施工安全进行。

4 结 论

1) 采用文本挖掘技术, 在所搜集的 108 份水电工程物体打击事故报告基础之上, 结合相关文献归纳总结出 14 项物体打击事故致因, 提高了事故致因的准确性。

2) 采用 Apriori 算法挖掘水电工程物体打击事故致因间的 171 条强关联规则, 结合指标分析可知: 安全监督检查不到位、安全防护措施不完备、安全教育培训不到位 3 项致因间关联性较强, 并通过现实致因过程对相应强关联规则加以验证, 为证明事故致因间的关联耦合关系提供重要依据。

3) 基于 DEMATEL 方法获得各致因因素的影响度、被影响度、中心度和原因度, 并分析事故致因重要度, 从原因-结果层面揭示了事故致因的诱发机制和事故发生特征, 并提出针对性的事故预防措施。

4) 文中未考虑水电工程物体打击事故致因间的路径传递, 后续可进一步研究各致因因素的层级影响路径, 挖掘事故致因的深层影响机制。

参 考 文 献

- [1] 周兴波, 周建平, 杜效鹄. 美国奥罗维尔坝溢洪道事故分析与启示[J]. 水利学报, 2019, 50(5): 650-660.
ZHOU Xingbo, ZHOU Jianping, DU Xiaohu. Lessons from the Oroville Dam spillway failure analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(5): 650-660.
- [2] 樊启祥, 林鹏, 魏鹏程, 等. 水电工程安全事故发生机制与管理对策[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(1): 144-149.
FAN Qixiang, LIN Peng, WEI Pengcheng, et al. Hydropower engineering safety accident occurrence mechanism and management strategies[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(1): 144-149.
- [3] 徐刚, 阳小东. 水利水电工程施工现场安全管理对策探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(增2): 135-138.
XU Gang, YANG Xiaodong. Discussion on safety management of construction site in water resources and hydropower project[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(S2): 135-138.
- [4] 王旭, 郑权. 浅析里底水电站建设主要安全事故风险及管控对策[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(增2): 85-88.
WANG Xu, ZHENG Quan. Brief analysis on the risk of the major safety accidents and security control in Lidi hydropower station[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(S2): 85-88.
- [5] 曾爱琴, 林晓峰, 赵硕. 水电工程生产安全事故特征分析[J]. 人民黄河, 2021, 43(增1): 279-280.
ZENG Aiqin, LIN Xiaofeng, ZHAO Shuo. Analysis on the characteristics of production safety accidents in hydropower projects[J]. Yellow River, 2021, 43(S1): 279-280.
- [6] 陈述, 刘文濯, 邵波, 等. 水电工程施工安全隐患时空分布特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(11): 90-96.
CHEN Shu, LIU Wenzhuo, SHAO Bo, et al. Research on spatial and temporal distribution characteristics of safety hazards in hydropower projects[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(11): 90-96.
- [7] 陈芳, 沈芮宇. 基于文本挖掘的空中危险接近事件致因研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 3 280-3 287.
CHEN Fang, SHEN Ruiyu. Study on causes of near mid-air collision based on text mining[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(6): 3 280-3 287.
- [8] ZHENG Xiazhong, ZHOU Jianlan, WANG Fei, et al. Routes to failure and prevention recommendations in work systems of hydropower construction[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 24(3): 206-222.
- [9] 陈述, 刁俊博, 王建平, 等. 水电工程施工安全隐患关联规则挖掘[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(8): 75-82.
CHEN Shu, XI Junbo, WANG Jianping, et al. Mining association rules of near-misses of hydropower projects construction[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(8): 75-82.
- [10] 王仁超, 张毅伟, 毛三军. 水电工程施工安全隐患文本智能分类与知识挖掘[J]. 水力发电学报, 2022, 41(11): 96-106.
WANG Renchao, ZHANG Yiwei, MAO Sanjun. Intelligent text classification and knowledge mining of hidden safety hazards in hydropower engineering construction[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(11): 96-106.
- [11] CHEN Shu, XI Junbo, CHEN Yun, et al. Association mining of near misses in hydropower engineering construction based on convolutional neural network text classification[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, 2022: DOI: 10.1155/2022/4851615.
- [12] BLEI D M, NG A Y, JORDAN M I. Latent dirichlet allocation[J]. Journal of machine Learning research, 2003, 3(4/5): 993-1 022.
- [13] 程明, 梅傲然. 基于关联规则的跑道着陆事件演化网络构建研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(12): 203-208.
CHENG Ming, MEI Aoran. Research on construction of evolution network for runway landing event based on association rules[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(12): 203-208.
- [14] 王艾迪, 邢莹莹, 张诗雯, 等. 基于关联规则的危险品公路运输事故风险因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(6): 159-165.
WANG Aidi, XING Yingying, ZHANG Shiwen, et al. Research on risk factors of hazardous material highway transport accidents based on association rules[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(6): 159-165.
- [15] 陈伟, 王利莹, 杨劼, 等. 基于关联规则的塔式起重机事故致因网络模型研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(4): 1 161-1 168.
CHEN Wei, WANG Liying, YANG Jie, et al. Research on the network model of tower crane accidents based on association rules[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(4): 1 161-1 168.