

中文引用格式:夏妮妮, 许淦. 建设工程安全风险管理领域案例推理应用研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(10): 24-35.
英文引用格式:XIA Nini, XU Gan. Literature review on application of case-based reasoning in construction project safety risk management[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 24-35.

建设工程安全风险管理领域案例推理 应用研究综述*

夏妮妮 副教授, 许淦*

(东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189)

中图分类号:X948 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.0588

基金项目:国家自然科学基金资助(72002030)。

【摘要】 案例推理(CBR)技术能有效解决安全风险管理中要素不明确的问题,为系统归纳 CBR 在建设工程安全风险管理中的应用研究现状及未来研究方向,基于 45 篇中文文献、50 篇英文文献,采用文献计量法与内容分析法进行系统综述。结果表明:文献数量总体呈现波动上升并趋于平稳的态势,覆盖环境科学、计算机科学等多学科领域,关键学者合作主题中共性和差异并存,其中中国发文量居于首位,研究主题经历了由知识建构与方法探索逐步迈向集成与智能融合的演进过程;CBR 已广泛用于安全风险识别、分析与评估、应对以及知识管理,但在控制对象、应用场景、知识管理、数据和工作流程等方面仍存在局限。未来研究可聚焦扩展控制对象、构建全过程管理应用场景、构建知识协同管理机制、融合多源异构数据,以及改进工作流程,以推动建设工程智能化安全风险管理工作发展。

【关键词】 建设工程; 安全风险管理; 案例推理(CBR); 知识管理; 智能化

Literature review on application of case-based reasoning in construction project safety risk management

XIA Nini, XU Gan

(School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 211189, China)

Abstract: CBR can effectively address the issue of unclear elements in safety risk management. However, existing research lacks systematic reviews of its application status and development trends. To systematically summarize the current state of research on the application of CBR in construction safety risk management and to identify future research directions, this paper comprehensively reviewed 45 Chinese and 50 English papers, employing bibliometric analysis and content analysis. The results show that the number of publications shows a fluctuating upward trend and tends to stabilize, spanning multiple disciplines such as environmental science and computer science. Key scholars demonstrate both commonalities and differences in collaboration themes, with China ranking first in publication volume. The research themes have evolved from knowledge construction and methodological exploration toward

* 文章编号:1003-3033(2025)10-0024-12; 收稿日期:2025-05-06; 修稿日期:2025-07-12

** 通信作者:许淦(2000—),女,湖南岳阳人,硕士,主要从事职业健康安全、国际外派管理等方面的研究。E-mail: 220221311@ seu.edu.cn。

integration and intelligent convergence. CBR has been widely applied in safety risk identification, analysis and assessment, response, and knowledge management, yet limitations remain regarding control targets, application scenarios, knowledge management, data integration, and workflow optimization. Future research should focus on expanding control targets, developing whole-process management scenarios, establishing collaborative knowledge management mechanisms, integrating multi-source heterogeneous data, and improving workflows to advance the development of intelligent safety risk management in construction projects.

Keywords: construction projects; safety risk management; case-based reasoning (CBR); knowledge management; intelligentization

0 引 言

建设工程领域涉及采矿业、建筑业等高危行业,安全风险至关重要^[1]。据全国工程质量安全监管信息平台统计(不含港澳台地区),2023 年房屋市政工程共发生 584 起生产安全事故,造成 635 人死亡,严重危及人民生命财产安全。因此,提升安全风险管理水平势在必行。建设工程安全风险涉及复杂要素,但当前仍多依赖经验和主观判断。因知识局限和决策不一致,往往缺乏系统性和标准化,不仅影响管理效能,还增加了事故风险^[2]。随着建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)、人工智能等技术的发展,智能化建设工程管理正成为重要趋势^[3]。

案例推理(Case-based Reasoning, CBR)作为人工智能领域的成熟技术,通过借鉴相似案例而非难以建立的预定义规则来解决新问题,尤其适用于要素不明确的情境^[4]。现有研究已对 CBR 在建设工程成本管理^[5]、进度管理^[6]和决策支持^[7]等领域的应用进行了系统评述。虽然部分学者研究了 CBR 在建设工程安全风险领域中的应用,但目前对其应用现状和发展趋势仍缺乏全面系统的综述。

鉴于此,笔者拟系统综述相关中英文文献,旨在归纳研究现状、识别未来研究方向。首先,运用文献计量法分析文献数量、关键期刊和引用量,关键学者研究差异,关键国家/地区的研究特征,以及研究热点演进趋势;然后,运用内容分析法识别 CBR 在安全风险领域中的 4 个应用主题:安全风险识别、分析与评估、应对和知识管理;最后,基于现有研究缺口提出潜在未来研究方向,以期更好地为智能化建设工程安全风险领域提供理论和实践参考。

1 CBR 工作原理

CBR 是一种通过借鉴相似历史案例经验来解

决新问题的类比推理方法^[8],在经验驱动型行业中应用广泛。CBR 流程如图 1 所示,其流程包括案例表示、检索、复用、修正和保存 5 个阶段。系统首先表示目标问题,并据此在案例库中检索相似案例,尝试复用其解决方案,必要时进行修正以获得适用答案。问题解决后,目标案例转化为新“历史案例”存入案例库。随着案例积累,系统可通过聚类分析生成新知识,具备自主与增量学习能力^[9]。

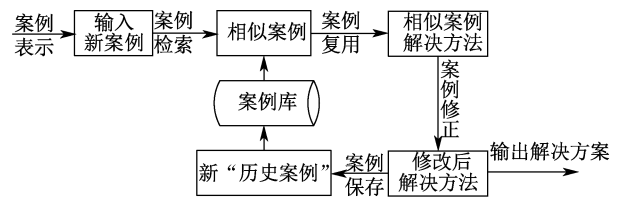


图 1 CBR 流程
Fig. 1 Workflow of case-based reasoning

2 系统文献综述法

为系统梳理建设工程安全风险领域 CBR 的应用研究现状并提出未来研究方向,根据系统文献综述和元分析报告项目指南(Preferred Reporting In Systematic reviews and Meta-Analysis, PRISMA)^[10]开展 3 阶段文献综述,具体流程如图 2 所示。

3 CBR 应用文献特征与研究趋势

3.1 文献数量、关键期刊和引用量

图 3 为建设工程安全风险领域 CBR 应用研究的文献数量分布。整体呈现波动上升并趋于平稳的态势。表 1 和表 2 为发表量超过 2 篇的关键期刊,涉及环境科学、计算机科学等多个学科领域。

表 3 和表 4 分别为被引频次排名前 10 的中英文文献(数据分别来源于中国知网和 Web of Science,时间统一截至 2025 年 7 月 27 日)。中文高被引文献主要关注 CBR 在风险评估、质量控制和应

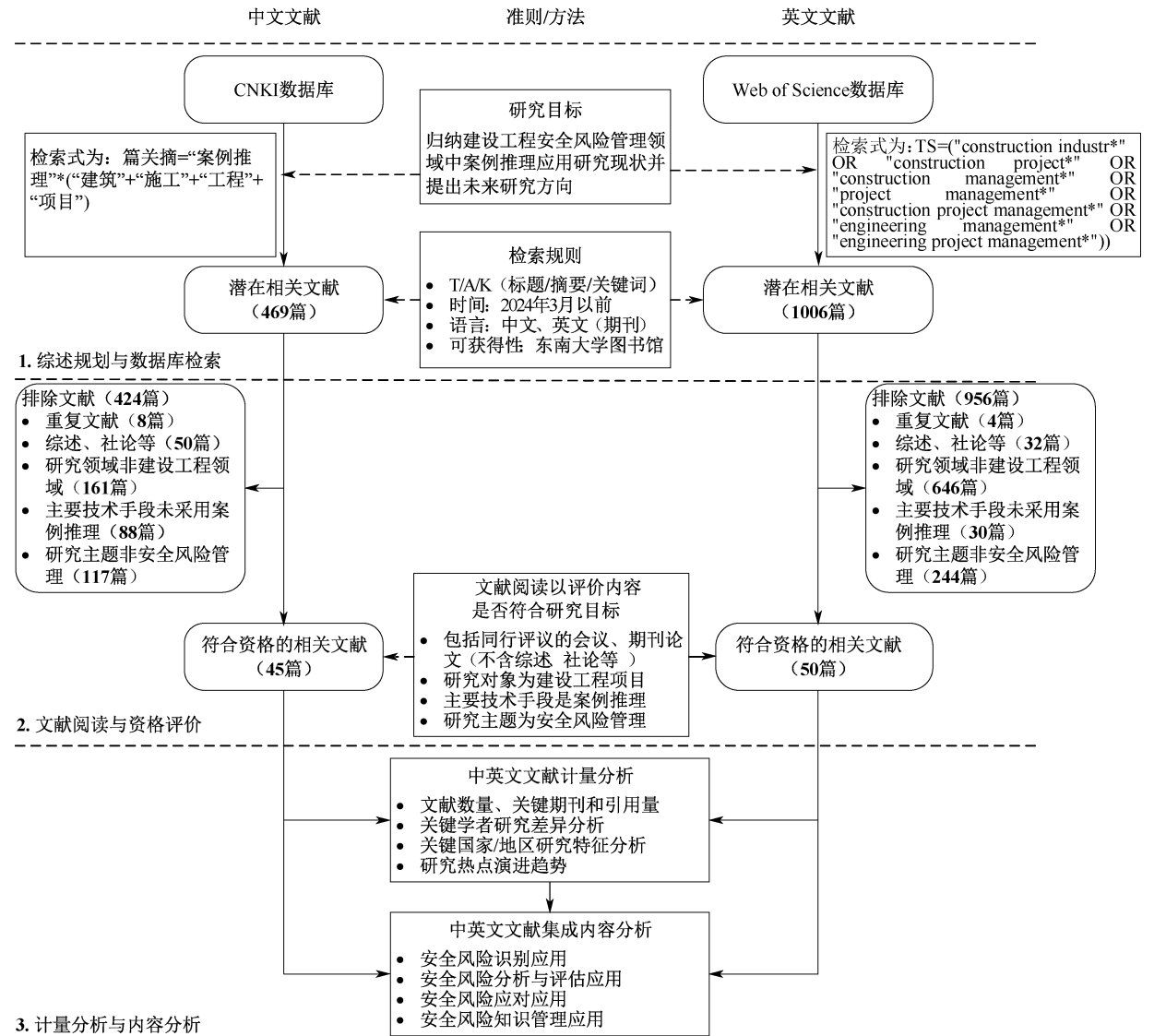


Fig. 2 Literature retrieval and screening process

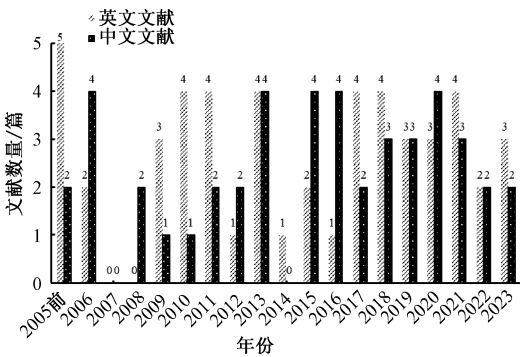


图 3 文献数量分布

Fig. 3 Distribution of publications

表 1 45 篇中文文献中发表数量多于 2 篇的关键期刊

Table 1 Top journals with more than 2 publications among 45 Chinese papers

序号	中文期刊	发文数量
1	土木工程与管理学报	5
2	工程管理学报	5
3	断块油气田	2
4	中国安全生产科学技术	2

3.2 关键学者研究差异分析

表 5 为中文文献中的关键学者。北京工业大学的霍达、周乐云和李伟峥合作密切,其研究主要聚焦建设工程优化、不确定性处理和结构分析控制等领域。表 6 为英文文献中的关键学者。阿尔伯塔大学的 FAYEK A R 和 SOMI S,虽然都涉及建设工程管

急响应等方面的实践应用值。英文高被引文献则侧重 BIM、自然语言处理与 CBR 在风险管理体系的集成应用。

表 2 50 篇英文文献中发表数量多于 2 篇的关键期刊

Table 2 Top journals with more than 2 publications among 50 English papers

序号	英文期刊	发文数量
1	Automation in Construction	5
2	Expert Systems with Applications	4
3	Journal of Construction Engineering and Management	4
4	International Journal of Environmental R esearch and Public Health	2
5	Journal of Computing in Civil Engineering	2
6	Safety Science	2
7	Sustainability	2

表 3 45 篇中文文献的被引频次排名

Table 3 Citation frequency ranking of 45 Chinese papers

序号	文献题目	被引 频次
1	基于灰色关联分析和 CBR 的边坡稳定性 评价方法	43
2	基于本体的建筑工程质量通病诊断方法	41
3	基于 CBR 的超高层建筑施工安全事故研究	36
4	基于本体和 CBR 的深基坑施工安全风险评估	34
5	基于知识支持的建筑施工质量控制系统研究	33
6	建筑安全事故应急措施推理研究	32
7	旧工业建筑再生利用施工风险应急管理研究	30
8	CBR-RBR 混合模式在地铁工程施工 安全事故案例库中的应用研究	28
9	基于 CBR 的建筑生产安全诊断系统研究	23
10	考虑方案有效性的应急案例决策方法	21

表 4 50 篇英文文献的被引频次排名

Table 4 Citation frequency ranking of 50 English papers

序号	文献题目	被引 频次
1	A knowledge-based BIM system for building maintenance	267
2	Accident case retrieval and analyses; using natural language processing in the construction industry	129
3	Retrieving similar cases for construction project risk management using natural language processing techniques	123
4	Generating project risk response strategies based on CBR: a case study	100
5	BIM-based risk identification system in tunnel construction	94
6	A knowledge-based risk management tool for construction projects using case-based reasoning	91
7	Safety assessment in megaprojects using artificial intelligence	60

续表 4

序号	文献题目	被引 频次
8	FPSWizard: A web-based CBR-RBR system for supporting the design of active fall protection systems	41
9	A disjunctive belief rule-based expert system for bridge risk assessment with dynamic parameter optimization model	38
10	Prediction of onset of corrosion in concrete bridge decks using neural networks and case-based reasoning	38

理和模糊逻辑应用研究,但前者研究范围较广,主要运用模糊逻辑解决工程风险、成本和进度等问题,而后者则专门研究模糊 CBR 在可再生能源项目风险管理中的应用。

表 5 45 篇中文文献中发文数量多于 2 篇的关键学者

Table 5 Top scholars with more than 2 publications among 45 Chinese papers

序号	学者姓名	所属机构	发文数量
1	夏元友	武汉理工大学	3
2	左勇志	中国建筑标准设计研究院	3
3	霍达	北京工业大学	3
4	袁永博	大连理工大学	2
5	刘妍	大连理工大学	2
6	周乐云	北京工业大学	2
7	刘育民	中电投工程研究检测 评定中心有限公司	2
8	李伟峥	北京工业大学	2
9	李梅	武汉理工大学	2

表 6 50 篇英文文献中发文数量多于 2 篇的关键学者

Table 6 Top scholars with more than 3 publications among 50 English papers

序号	学者姓名	所属机构	发文数量
1	FAYEK A R	阿尔伯塔大学	3
2	SOMI S	阿尔伯塔大学	3
3	BICHINDARITZ I	纽约州立大学 奥斯威戈分校	2
4	ABOURIZK S	阿尔伯塔大学	2
5	HAN S	汉阳大学	2
6	DING Lieyun	华中科技大学	2
7	PEREIRA E	卡尔加里大学	2
8	FREUDENTHALER B	林茨大学	2
9	SERESHT N G	达勒姆大学	2
10	AYHAN B U	伊斯坦布尔 比尔基大学	2
11	GOH Y M	新加坡国立大学	2

表 7 为以 GOH Y M 和 AAMODT A 为代表的高影响力学者。AAMODT A 主要从事 CBR 等人工智

能技术研究,而 GOH Y M 则致力于建设工程管理与计算机科学的交叉研究,重点运用人工智能技术解决施工安全风险管理工作。

表 7 基于被引频次的学者排名

Table 7 Top scholars ranked by citation frequency		
序号	学者姓名	被引频次
1	GOH Y M	21
2	AAMODT A	16
3	范正平	11
4	KOLODNER J	10
5	陆莹	10
6	RAMON L A	7
7	HU Xin	7
8	WATSON I	7
9	PEREIRA E	7
10	丁烈云	6

厂安全评估等。

表 8 高发文国家/地区和机构

Table 8 Countries/regions and institutions with high publication volumes

序号	国家/地区	发文数量	该国家/地区发文量最多的机构	发文数量
1	中国	69	西安建筑科技大学	8
2	美国	8	华盛顿大学、伊利诺伊大学	2
3	澳大利亚	8	科廷大学	2
4	加拿大	7	阿尔伯塔大学	5
5	新加坡	5	新加坡国立大学	5
6	土耳其	3	中东科技大学	3
7	韩国	3	汉阳大学	2
8	波兰	2	—	—
9	苏格兰	2	—	—
10	英格兰	2	—	—

3.3 关键国家/地区研究特征分析

表 8 为发文量前 10 的国家/地区,其中,中国、美国和澳大利亚位列前 3。中国的研究机构以西安建筑科技大学最为突出(8 篇),研究内容包括旧工业建筑改造项目的安全与应急管理、建筑安全事故应急措施与风险控制等。美国方面,华盛顿大学和伊利诺伊大学各发表 2 篇,研究主题涉及火力发电

3.4 研究热点演进趋势

运用 CiteSpace 软件聚类分析,形成 8 个聚类标签(0 号 CBR 安全决策支持工具、1 号 制定项目风险应对策略、2 号 决策方法、3 号 基础设施管理、4 号事故案例检索、5 号 坍塌风险评估、6 号 集成 CBR、7 号 基于案例的企业信息系统),以及如图 4 所示的关键词演化时间路径图。

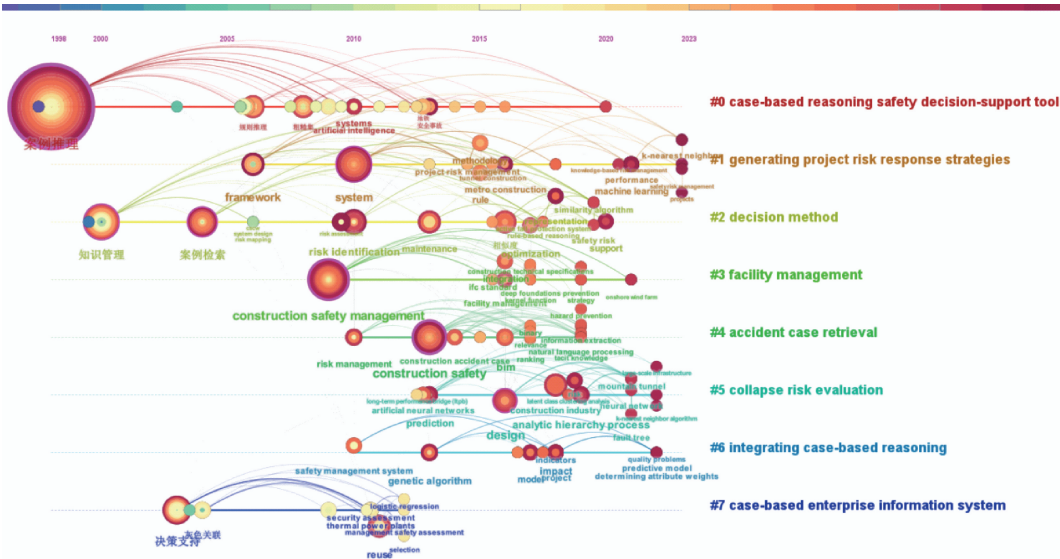


图 4 关键词演化时间路径

Fig. 4 Time path of keywords evolution

结合聚类标签和关键词演化路径可见:该领域研究经历了从基础信息系统构建到实践管理应用探索,再到融合技术成熟应用的演进过程。具体来看:①早期(2000—2012 年)关键词如“7 号 基于案例的企业信息系统”“知识管理”和“系统框架”,反映了

CBR 研究聚焦于知识管理与信息系统基础建设;②中期(2013—2018 年)关键词包括“1 号 制定项目风险应对策略”“5 号 坍塌风险评估”和“风险管理”,表明技术向工程实践中安全风险管理的应用拓展;③近期(2019 年至今),出现“6 号 集成 CBR”

“机器学习”和“自然语言处理”等关键词,研究热点转向技术优化以及跨技术集成应用,特别是人工智能算法的融合运用,标志着技术成熟度的提升。整体而言,研究已由知识建构与方法探索迈向集成与智能融合,体现了从基础理论到复杂系统适配的演进过程。未来可聚焦多源异构数据的模型优化,以及全生命周期安全管理智能化决策系统的构建,增强其实用性与前瞻性。

4 CBR 在建设工程安全风险中的应用

建设工程项目全生命周期涵盖多个关联的安全风险管理环节,包括风险识别、分析评估与应对,贯穿于项目规划、设计、施工、运营、报废等阶段,以保障安全风险管理的持续性和有效性^[11]。基于 CBR 原理,可用于支持风险识别、评估及应对策略分析。同时,跨项目、企业及组织的知识传递亦是关键,强化知识管理有助于提升整体安全管理水平^[12]。CBR 在 4 类安全风险应用中的文献分布为:识别(25 篇)、分析与评估(32 篇)、应对(31 篇)以及知识管理(7 篇)。

4.1 安全风险识别应用

安全事故前兆的识别是安全风险管理的首要环节^[13]。CBR 可通过以下方式提升危险识别的效率和全面性,如在案例表示和检索阶段构建详细的故事案例危险知识表示方案和基于案例属性语义网络的智能化检索机制^[14];在案例复用和修正阶段采用自适应方法筛选与新场景最相关的危险因素和案例事件^[15]。CBR 已被应用于多种建设工程项目的安全风险识别,文中文献相关应用涉及房屋建筑工程(3 篇)、地铁隧道工程(3 篇)、公路桥梁工程(2 篇)、钻井工程(3 篇)以及水电工程(1 篇)。

房屋建筑工程领域研究表明:尽管钢筋混凝土工程和钢结构工程存在工况差异,但 CBR 系统中的层次关系模型与事故案例模糊近似度计算原理具有通用性。通过构建模糊检索与知识索引机制,系统能够快速匹配相似案例和处理模糊信息,适应不同类型和复杂程度的工况^[16]。

在地铁隧道工程中,基于概念语义化和相似度计算建立的事故案例库^[17],显著提升了识别系统的精度和响应速度。相比之下,ZHANG Limao 等^[18]开发的基于 BIM 的风险识别专家系统,通过提取 BIM 参数、结合 IFC 标准构建知识库,并融合 CBR 与规

则推理,不仅提高了数据标准化和识别准确性,还实现了多层次分析,增强了风险识别的全面性。

公路桥梁工程中,CBR 有效解决了安全预警系统的指标选取、事故关联分析和预警预测等关键问题^[19]。MORCOUS 等^[20]结合人工神经网络和蒙特卡罗模拟,提出了考虑参数不确定性的预测混凝土桥面钢筋腐蚀开始时间的机械模型。该模型能通过识别复杂的非线性关系模式和模拟各种潜在场景等方式,提高预测精度。

钻井工程^[21]和水电工程^[22]等领域也广泛应用 CBR 识别安全风险。郑霞忠等^[22]构建的类比推理框架结合 Word2vec 模型,将安全隐患文本转化为词向量并计算相似度,准确、高效挖掘了大规模非结构化安全隐患文本数据,从而提高水电工程安全隐患识别的准确度和效率。

然而,CBR 在安全风险识别中仍存在检索效率低、相似度不稳定等问题。建筑物损伤信息多为非结构化数据,采集难度大,影响系统效率。为提高识别率和利用率,可结合本体技术与标准案例建立多属性结构化采集格式^[23],或结合点云模型和描述性规范构建数字化缺陷信息表达体系,实现数据预处理^[24]。此外,点云等三维数据可通过 WebGIS 技术进行分析与可视化管理,提升搜索效率与预测准确性^[25]。针对施工现场广泛使用的视频监控,研究提出结合 Near-miss 事件划分与目标检测跟踪算法,从视频中提取典型帧生成摘要与结构化说明,并借助 CBR 识别风险^[26],有效实现动态视频向静态数据转换,提升现场隐患识别的实时性。

4.2 安全风险分析与评估应用

识别安全风险后需进行系统化分析评估,以确定潜在影响程度和风险因素,从而制定针对性管理策略。在安全风险分析与评估方面,现有研究主要运用 CBR 开展施工风险评估(9 篇)、建设工程质量管理与控制(11 篇)以及生产安全诊断(12 篇)。

在施工风险评估方面,边坡和深基坑施工受地质条件影响大,复杂性和不确定性高。CBR 可通过匹配历史地质特征,有效处理模糊信息,提供针对性评估建议,从而提高风险评估可靠性^[27]。相比之下,地铁隧道因封闭空间、高压环境等特殊风险,更依赖 CBR 整合多种风险因素,生成全面的评估方案,并通过实时学习和更新快速调整评估方案,保障施工安全^[28]。

在建设工程质量管理与控制方面,CBR 与规则推理协同,可综合质量控制知识,结合本体实现多源

和多领域质量通病信息的标准化表达与复用,用于建设工程质量诊断^[29]。生产安全绩效虽然是反映质量管理与控制的重要指标,但事故率等指标具有滞后性,难以准确评估实际安全水平,也无法实现事前预警^[30]。CBR 可将安全相关措施纳入安全水平评估指标体系,更客观地反映安全状况并实现风险预警^[31]。

在生产安全诊断方面,学者们关注了如何利用和改进 CBR 实现结构损失和机械故障诊断。霍达等^[32]基于 CBR 开发了钢结构破损诊断技术,通过构建破损特征-原因关系矩阵和分析模型,系统化整合事故成因分析,显著提升了诊断效率和准确性;李小全等^[33]基于 CBR 的基本流程,围绕案例整理、表示、检索与匹配、学习和维护 5 个方面设计了一套工程机械故障智能化诊断系统,实现了更加有序、高效的诊断过程。

在安全风险分析与评估应用中,常常会面临数据冗余、质量和完整性不足等问题。现有研究通过采用灰色关联分析处理模糊和不确定信息,神经推理网络模拟学习数据中的复杂模式和关系,以及遗传算法自适应调整搜索策略,提升了系统检索效率和案例挖掘效果^[34]。并且,通过结合本体规范案例表示过程^[27]、结合粗糙集约简案例特征属性^[28]还可提高安全风险评估的准确率。此外,在分析与评估施工安全相关场景时常忽略其动态性质,PEREIRA 等^[35]利用连续和离散仿真模拟复制项目寿命周期,对比仿真模拟所得的安全场景与历史案例,动态评估了项目安全绩效。

4.3 安全风险应对应用

为有效降低安全事故的频率和严重性,管理人员需在识别和评估基础上及时采取预防和应急措施。安全风险按可测性分为已知、可预测和不可预测 3 类^[36],前 2 类可通过预防加以控制,不可预测风险则需要依靠科学的应急响应以减轻损失与影响。涉及安全风险应对的包括预防类 7 篇、应急类 13 篇、兼顾两者的 11 篇。

对于房屋建筑工程中常见且难以避免的建筑缺陷,CBR 可借助历史案例经验,为缺陷处理与事故预防提供参考^[37]。在铁路工程中,何志敏等^[38]构建了基于 CBR 的滑坡防治措施辅助决策模型,通过灰色关联分析检索并修正相似案例,提高风险应对的有效性^[39]。除关注物的不安全状态外,安全管理也需重视人的不安全行为,SU Yikun 等^[40]将工人行为纳入事故案例属性,结合云图法与基于词库

的词句级相似度计算,提高案例检索和重用的准确性,为预防风险提供更可靠的决策支持。

尽管可利用历史应急决策方案构建应急模型^[41],但在旧工业建筑再生等应急研究较少的工程中,引入规则推理可弥补案例数据不足并避免输出不切实际的方案,提升系统实用性^[42]。应急响应速度和质量直接影响事故损失及二次事故风险^[43],尤其在大型基础设施工程项目中要求更高。通过提取事故案例特征,采用框架法表示法构建案例库,并结合模糊层次分析法和 k 近邻方法计算属性相似度和结构相似度,可提高系统检索速度和准确性,从而有效支持大型基础设施项目的应急管理工作^[44]。

为解决案例特征主观性强、知识结构化程度低等问题,现有研究采用粗糙集技术约简属性,并通过文本挖掘将事故信息转换为结构化数据,以提升应急响应效率^[45]。此外,可变模糊聚类迭代模型可预处理案例,克服静态、单隶属度限制,在保证聚类质量的同时提升检索效果,助力实现快速且精准的应急响应。传统风控系统多依赖静态信息且仅应对单一风险,XU Yingzhuo 等^[46]结合 CBR 与 WebGIS 构建可视化钻井风险智能控制系统,实现多领域信息共享与协同决策,提升多风险控制能力。

4.4 安全风险知识管理应用

建设工程安全风险知识管理是指为降低风险发生概率和影响,企业或项目获取、利用、共享和改进安全风险知识的过程^[12]。

在企业层面,知识管理侧重于利用工具进行组织层面的安全风险规划与管理。涉及 4 篇文献,指出企业可借助 CBR 传递关键信息,用于员工培训^[47],并构建组织记忆体系,实现安全知识的资本化^[48]。项目层面则强调知识的应用与改进,同时促进参与方间的共享与协同。涉及 3 篇文献,如 OKUDAN 等^[49]构建的知识管理工具,集成历次项目的风险知识,支持前期规划与实施阶段的风险识别和监控,并借助网络技术促进学习与知识共享。

当前事故案例知识管理系统多采用非结构化文本,导致检索和分析效率低。为此,KIM^[50]引入自然语言处理技术,结合工程事故词库和 Okapi BM25 排序方法提升检索效果,并采用基于规则的条件随机场方法自动提取知识,增强隐形知识分析能力。尽管 CBR 具备增量式学习特点,但案例库扩展后易受冗余数据干扰。为此,ZHANG Yongcheng 等^[51]在案例表示阶段采用 MapReduce 方法并行处理大规模规范数据,在检索阶段引入集成加权 k 最近邻算

法,通过多策略加权提升新旧案例相似度衡量,从而增强深基坑施工技术知识系统的推理性能。

5 研究不足及展望

针对现有研究不足,未来可从控制对象、应用场景、知识管理、数据和工作流程 5 方面深化探索。具体而言,可在建设工程全生命周期内整合安全风险控制对象,依托优化的流程和数据技术,构建企业级或跨企业的安全风险知识库,提升全过程智能化安全风险管理水平。

1) 在控制对象方面,建设工程安全隐患主要包括人的不安全行为、物的不安全状态及管理因素^[52]。现有研究更关注物的不安全状态和管理因素,对人的因素关注较少。未来可结合眼动、脑电、VR 等人机交互技术采集生理行为数据^[53],识别不安全心理与行为,提高风险预测能力。同时,应融合安全风险理论、系统工程学、心理学等多学科知识,增强事故案例特征提取和表示的科学依据,提高 CBR 的应用价值。例如:可基于灾害系统理论分析复杂系统因素及其传导机理,支撑风险案例特征提取与表示^[54]。

2) 在应用场景方面,现有研究多聚焦单一阶段,缺乏全过程管理视角。情景元是指某一时段(时刻)的特定情境中,影响事件进程的关键因素和背景信息^[55],有助于简化复杂案例、提升信息表达的适用性。未来研究可基于情景元模型,整合不同阶段的信息,构建动态、自适应的安全风险管理系统,实现从识别到应对的全过程控制^[56]。此外,现有研究主要关注静态风险,未来可结合物联网与智能传感器技术,实现风险的实时监测与预警^[57]。

3) 在知识管理方面,当前研究多将 CBR 孤立应用于安全风险管理或知识管理领域,整体较少涉及安全风险知识协同管理。未来研究可结合知识图谱,整合经验与知识,构建以安全风险案例为基础的结构化图谱,利用遗传算法、模糊逻辑等方法提升推理效率^[58]。同时,结合语义网技术整合企业内不同项目间或跨企业间的新知识资源,形成动态更新的安全风险知识库,促进跨项目、跨企业间协作与知识

共享^[59]。

4) 在 CBR 数据方面,从数据类型来看,目前系统多采用文本数据,未来可融合文本、视频和传感器等多模态数据,提升对复杂安全风险的识别和应对能力。在数据来源上,现有研究主要依赖实际工程数据,未来可通过自适应数据融合模型整合天气、地质等多源信息,动态调整策略以适应环境变化。同时,结合深度学习和复杂网络分析,挖掘多源数据间的关联模式,识别潜在风险因果关系与复杂隐患^[60]。

5) 在工作流程方面,现有研究更关注案例表示与检索的改进,而对复用、修正和保存阶段的改进较少。未来可在复用阶段设定基于风险等级的差异化权重,提高识别精度与应对可行性,并收集复用失败案例用于安全培训系统建设。在修正阶段可关注案例演化过程,分析修正轨迹优化案例库质量,同时借助机器学习识别问题、动态调整策略,增强系统适应性和准确性。在保存阶段应完善多模态数据存储机制,抽取案例实体与关系信息进行建模,支持跨领域知识共享。

6 结 论

1) 文献数量发表总体呈现波动上升并趋于平稳的态势,关键期刊覆盖土木工程、计算机科学、环境科学和管理学等领域,关键学者主要有 GOH Y M 和 AAMODT A 等人,合作主题既有共通性也体现差异性。

2) 在关键国家/地区中,中国的发文量最多,其中,西安建筑科技大学贡献最大。

3) 研究已由知识建构与方法探索迈向集成与智能融合。随后,采用内容分析法总结 CBR 在安全风险识别、分析与评估、应对和知识管理等方面的应用情况。针对 CBR 在控制对象、应用场景、知识管理、数据和工作流程等方面的不足,提出未来可在扩展控制对象、构建全过程管理应用场景、构建知识协同管理机制、融合多源异构数据,以及改进工作流程等方向深化研究,以推动建设工程智能化安全风险

参 考 文 献

[1] PINTO A, NUNES I L, RIBEIRO R A. Occupational risk assessment in construction industry: overview and reflection[J]. Safety Science, 2011, 49(5): 616-624.

- [2] 张鑫. 建筑施工安全管理影响因素分析及智能化管控研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
ZHANG Xin. Analysis of influencing factors of construction safety management and research on intelligent management and control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [3] 薛小龙, 王璐琪. 重大工程管理理论演化与发展路径[J]. 系统管理学报, 2018, 27(1): 192–199.
XUE Xiaolong, WANG Luqi. The evolution and development paths of the megaproject management theory[J]. Journal of Systems & Management, 2018, 27(1): 192–199.
- [4] KOLODNER J L, LEAKE D B. Case-based reasoning: experiences, lessons & future directions[M]. Cambridge: MIT Press, 1996: 31–65.
- [5] HU Xin, XIA Bo, SKITMORE M, et al. The application of case-based reasoning in construction management research: an overview[J]. Automation in Construction, 2016, 72: 65–74.
- [6] AMER F, KOH H Y, GOLPARVAR-FARD M. Automated methods and systems for construction planning and scheduling: critical review of three decades of research[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2021, 147(7): DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002093.
- [7] LI Yangluxi, DU Hu, KUMARASWAMY S B. Case-based reasoning approach for decision-making in building retrofit: a review[J]. Building and Environment, 2023, 248: DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.111030.
- [8] KOLODNER J L. An introduction to case-based reasoning[J]. Artificial Intelligence Review, 1992, 6(1): 3–34.
- [9] CRAW S, WIRATUNGA N, ROWE R C. Learning adaptation knowledge to improve case-based reasoning[J]. Artificial Intelligence, 2006, 170(16/17): 1 175–1 192.
- [10] MOHER D, LIBERATI A, TETZLAFF J, et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement[J]. International Journal of Surgery, 2010, 8(5): 336–341.
- [11] 张亚莉, 杨乃定, 杨朝君. 项目的全寿命周期风险管理的研究[J]. 科学管理研究, 2004, 22(2): 27–30.
ZHANG Yali, YANG Naiding, YANG Chaojun. The study of risk management in total life cycle of a project[J]. Scientific Management Research, 2004, 22(2): 27–30.
- [12] 许娜, 梁燕翔, 王亮, 等. 基于知识图谱的煤矿建设安全领域知识管理研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 28–35.
XU Na, LIANG Yanxiang, WANG Liang, et al. Research on knowledge management in coal mine construction safety field based on knowledge graph[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 28–35.
- [13] 杨晓光, 胡仕星月, 张梦雅. 智能高速公路交通应用技术发展综述[J]. 中国公路学报, 2023, 36(10): 142–164.
YANG Xiaoguang, HU Shixingyue, ZHANG Mengya. Development of intelligent motorway traffic application technologies: a review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 142–164.
- [14] GOH Y M, CHUA D K H. Case-based reasoning for construction hazard identification: case representation and retrieval[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2009, 135(11): 1 181–1 189.
- [15] GOH Y M, CHUA D K H. Case-based reasoning approach to construction safety hazard identification: adaptation and utilization[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2010, 136(2): 170–178.
- [16] 李伟峥, 左勇志, 霍达, 等. 基于案例推理的钢结构事故案例模糊检索与知识索引[J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(1): 31–36.
LI Weizheng, ZUO Yongzhi, HUO Da, et al. Case fuzzy retrieval and knowledge index of steel-structure accidents based on CBR[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2012, 34(1): 31–36.
- [17] 王勇, 赖友宇, 易紫妮, 等. 基于案例推理的地铁施工事故案例库的建立与评价[J]. 武汉工程大学学报, 2018, 40(3): 301–305.
WANG Yong, LAI Jiyu, YI Zini, et al. Establishment and evaluation of database of subway construction accidents based on case-based reasoning[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2018, 40(3): 301–305.
- [18] ZHANG Limao, WU Xianguo, DING Lieyun, et al. Bim-based risk identification system in tunnel construction[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2016, 22(4): 529–539.
- [19] LIU Yan, YI Tinghua, XU Zhenjun. Safety early warning research for highway construction based on case-based reasoning and variable fuzzy sets[J]. Scientific World Journal, 2013: DOI: 10.1155/2013/178954.
- [20] MORCOUS G, LOUNIS Z. Prediction of onset of corrosion in concrete bridge decks using neural networks and case-based

- reasoning[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2005, 20(2): 108-117.
- [21] 张学洪, 李黔. 基于案例推理的井漏风险预警方法[J]. 断块油气田, 2017, 24(2): 255-258, 263.
ZHANG Xuehong, LI Qian. Risk pre-warning method of well leakage based on case reasoning[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2017, 24(2): 255-258, 263.
- [22] 郑霞忠, 汪珂, 陈云, 等. 水电工程施工安全隐患文本智能类推研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(12): 4 449-4 456.
ZHENG Xiazhong, WANG Ke, CHEN Yun, et al. Research on text intelligent analogy of potential safety hazards in hydropower engineering construction[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(12): 4 449-4 456.
- [23] 徐照, 李苏豪, 袁竞峰. 基于多属性分类的建筑物损伤案例推理方法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(2): 429-441.
XU Zhao, LI Suhao, YUAN Jingfeng. Research on case-based reasoning of building defects in multi-attribute classification[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2019, 39(2): 429-441.
- [24] XU Zhao, LI Suhao, LI Heng, et al. Modeling and problem solving of building defects using point clouds and enhanced case-based reasoning[J]. Automation in Construction, 2018, 96: 40-54.
- [25] 李智芸, 刘妍, 袁永博. 基于 CBR 与三维 WebGIS 的建筑业风险智能预测[J]. 工程管理学报, 2010, 24(2): 129-132.
LI Zhiyun, LIU Yan, YUAN Yongbo. Intelligent prediction of construction risks based on CBR and 3D-WebGIS[J]. Journal of Engineering Management, 2010, 24(2): 129-132.
- [26] 余宏亮, 黄金艳, 蒋励, 等. 基于视频摘要的地铁工程施工 Near-miss 事件识别及自动响应研究[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(2): 59-67.
YU Hongliang, HUANG Jinyan, JIANG Li, et al. Research on Near-miss incident recognition and automatic response in metro construction based on video summarization[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2021, 38(2): 59-67.
- [27] 谭文博, 郭海湘, 宫培松, 等. 基于本体和案例推理的深基坑施工安全风险评估[J]. 工程管理学报, 2020, 34(2): 147-152.
TAN Wenbo, GUO Haixiang, GONG Peisong, et al. Safety risk assessment of deep foundation pit construction based on ontology and case-based reasoning[J]. Journal of Engineering Management, 2020, 34(2): 147-152.
- [28] 胡珉, 张链翔. 基于粗糙集的隧道施工风险案例推理研究[J]. 计算机工程, 2008, 34(23): 244-246.
HU Min, ZHANG Lianxiang. Research of case-based reasoning for tunnelling risk using rough set[J]. Computer Engineering, 2008, 34(23): 244-246.
- [29] 刘欣, 姜韶华, 李忠富. 基于本体的建筑工程质量通病诊断方法[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(2): 78-83.
LIU Xin, JIANG Shaohua, LI Zhongfu. Common construction quality fault detection based on ontology[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015, 32(2): 78-83.
- [30] 臧成君, 瞿园, 高旭. 基于风险管控的煤矿安全绩效评估方法[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增1): 29-33.
ZANG Chengjun, QU Yuan, GAO Xu. Coal mine safety performance assessment methods based on risk management and control[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(S1): 29-33.
- [31] PEREIRA E, HERMANN U, HAN S, et al. Case-based reasoning approach for assessing safety performance using safety-related measures[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2018, 144(9): DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001546.
- [32] 霍达, 李伟峥, 左勇志, 等. 基于改进案例推理的钢结构破损原因诊断分析[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(4): 570-575.
HUO Da, LI Weizheng, ZUO Yongzhi, et al. Detection analysis of steel structural damage based on CBR[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(4): 570-575.
- [33] 李小全, 刘安心, 程懿. 基于案例推理的工程机械故障诊断智能化研究[J]. 机械制造与自动化, 2006, 35(1): 115-118, 122.
LI Xiaoquan, LIU Anxin, CHENG Yi. CBR-based research on intelligent fault diagnosis of construction machinery[J]. Machine Building & Automation, 2006, 35(1): 115-118, 122.

- [34] 李梅, 夏元友, 曹杉杉. 基于案例推理的边坡稳定性评价系统及应用[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(6): 53-56, 61.
LI Mei, XIA Yuanyou, CAO Shanshan. Research on slope stability evaluation system based on case-based reasoning[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(6): 53-56, 61.
- [35] PEREIRA E, HAN S, ABOURIZK S. Integrating case-based reasoning and simulation modeling for testing strategies to control safety performance[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2018, 32(6): DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000792.
- [36] 李长宏. 龙岩空间结构公司施工项目风险管理的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
LI Changhong. Research on risk management of construction projects of longyan space structure company[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [37] 蔡竞瑶, 白一男. 基于案例推理的建筑工程缺陷问题解决方法挖掘[J]. 工程管理学报, 2021, 35(5): 129-134.
CAI Jingyao, BAI Yi'nan. Experience mining based on case-based reasoning for defects solving of construction projects[J]. Journal of Engineering Management, 2021, 35(5): 129-134.
- [38] 何志敏, 李远富, 周静, 等. 基于 CBR 的边坡滑坡防治措施辅助决策模型研究[J]. 路基工程, 2018(4): 19-24.
HE Zhimin, LI Yuanfu, ZHOU Jing, et al. Study on the auxiliary decision-making model for slope landslide prevention and control measures based on CBR[J]. Subgrade Engineering, 2018(4): 19-24.
- [39] HAO Xiaolong, CAO Cen, YU Sheng, et al. Emergency decision making for electric power personal accidents based on ontology and case-based reasoning[J]. Sustainability, 2023, 15(14): DOI: 10.3390/su151411404.
- [40] SU Yikun, YANG Shijing, LIU Kangning, et al. Developing a case-based reasoning model for safety accident pre-control and decision making in the construction industry[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(9): DOI: 10.3390/ijerph16091511.
- [41] FAN Zhiping, LI Yonghai, ZHANG Yao. Generating project risk response strategies based on CBR: a case study[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(6): 2 870-2 883.
- [42] 李润萍, 王浩玮, 陈旭. 旧工业建筑再生利用施工风险应急管理研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(2): 151-156.
LI Runping, WANG Haowei, CHEN Xu. Research on emergency management of construction risk for recycling of old industrial buildings[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(2): 151-156.
- [43] 刘妍, 张明媛, 袁永博. 基于快速检索的高速公路建设期安全事故应急响应[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(6): 160-167.
LIU Yan, ZHANG Mingyuan, YUAN Yongbo. Safety emergency response of highway during construction period base on rapid retrieval[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(6): 160-167.
- [44] 李慧敏, 孙佳斌, 李锋, 等. 基于案例推理的跨流域调水明渠工程事故应急决策方法研究[J]. 工程管理学报, 2020, 34(6): 137-142.
LI Huimin, SUN Jiabin, LI Feng, et al. Research on the emergency decision-making method for the open channel engineering accident of inter-basin water transfer based on case-based reasoning[J]. Journal of Engineering Management, 2020, 34(6): 137-142.
- [45] TANG Ziqi, WU Huiming, BIAN Yiwen. A case library creating method based on risk control of tunnel engineering[C]. Proceeding in International Conference on Innovation Manufacturing and Engineering Management, 2011: 151-156.
- [46] XU Yingzhuo, WANG Liupeng. Research of visualization intelligent decision support system for drilling risk control[C]. Proceeding in 22nd Chinese Control and Decision Conference, 2010: 3 822-3 827.
- [47] CAMPBELL J M, SMITH S D. Knowledge transfer of safety critical information by the Internet[C]. Proceeding in 23rd Annual ARCOM Conference, 2007: 431-440.
- [48] BOURY-BRISSET A C, TOURIGNY N. Knowledge capitalisation through case bases and knowledge engineering for road safety analysis[J]. Knowledge-Based Systems, 2000, 13(5): 297-305.
- [49] KIM T, CHI S. Accident case retrieval and analyses: Using natural language processing in the construction industry[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2019, 145(3): DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001625.
- [50] OKUDAN O, BUDAYAN C, DIKMEN I. A knowledge-based risk management tool for construction projects using case-

based reasoning[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 173: DOI: 10.1016/j.eswa.2021.114776.

[51] ZHANG Yongcheng, DING Lieyun, LOVE P E D. Planning of deep foundation construction technical specifications using improved case-based reasoning with weighted k-nearest neighbors[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(5): DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000682.

[52] 陈全. 事故致因因素和危险源理论分析[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(10): 67-71.
CHEN Quan. Analysis on accident causation factors and hazard theory[J]. China Safety Science Journal, 2009, 19(10): 67-71.

[53] 郑霞忠, 石博元, 陈云, 等. 融合 VR-眼动的施工现场隐患识别视觉注意与搜索特征研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(3): 1 087-1 095.
ZHENG Xiazhong, SHI Boyuan, CHEN Yun, et al. A study of visual attention and search features for construction site hazard identification incorporating VR-eye movement [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24 (3): 1 087-1 095.

[54] 王兴鹏, 雷书华, 刘文梅. 基于 CBR 的地铁工程事故应急决策方法研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(9): 104-109.
WANG Xingpeng, LEI Shuhua, LIU Wenmei. Research on the emergency decision-making method for the safety accidents in subway construction based on CBR[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(9): 104-109.

[55] 张磊, 王延章, 陈雪龙, 等. 面向突发事件应急决策的情景建模方法[J]. 系统工程学报, 2018, 33(1): 1-12.
ZHANG Lei, WANG Yanzhang, CHEN Xuelong, et al. Scenario modeling method for unconventional emergency decision-making[J]. Journal of Systems Engineering, 2018, 33(1): 1-12.

[56] 夏登友, 李丞曜, 朱毅, 等. 基于情景元的案例推理及其在应急决策中的应用[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(3): 1 028-1 033.
XIA Dengyou, LI Chengyao, ZHU Yi, et al. Case-based reasoning method based on the scenario element and its application in the emergency decision-making[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(3): 1 028-1 033.

[57] 耿志强, 景邵星, 白菊, 等. 基于 MWSPCA-CBR 的智能预警方法研究及其在石化工业中的应用[J]. 化工学报, 2019, 70(2): 572-580.
GENG Zhiqiang, JING Shaoxing, BAI Ju, et al. Improved intelligent warning method based on MWSPCA-CBR and its application in petrochemical industries[J]. CIESC Journal, 2019, 70(2): 572-580.

[58] 胡玉玲, 万雨瑞, 李紫旋, 等. 融合知识图谱和案例推理的燃气应急辅助决策研究[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(2): 143-148.
HU Yuling, WAN Yurui, LI Zixuan et al. Research on gas emergency assistance decision making by integrating knowledge graph and case based reasoning[J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(2): 143-148.

[59] 赵开功, 张晓蕾, 李长明, 等. 铁路列控系统应急案例知识重用方法[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(增 2): 217-224.
ZHAO Kaigong, ZHANG Xiaolei, LI Changming, et al. Case knowledge reuse method of railway train control system emergency plan[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(S2): 217-224.

[60] 张红, 程传祺, 徐志刚, 等. 基于深度学习的数据融合方法研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(24): 1-11.
ZHANG Hong, CHENG Chuanqi, XU Zhigang, et al. Survey of data fusion based on deep learning[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(24): 1-11.

作者简介: 夏妮妮 (1988—), 女, 江苏连云港人, 博士, 副教授, 主要从事职业健康安全、国际外派管理、项目利益相关者管理等方面的研究。E-mail: ninixia@ seu.edu.cn。

