

文章编号: 1671-251X(2025)02-0084-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2024110046

露天煤矿边坡安全时序知识图谱构建方法研究

储扬静¹, 张衡², 汤玲¹, 侯晓东²

(1. 南京北斗创新应用科技研究院有限公司, 江苏 南京 211500;

2. 鄂尔多斯市腾远煤炭有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017099)

摘要: 针对露天煤矿边坡安全时序知识图谱匮乏、数据资源难以有效共享、处理动态知识存在局限等问题, 提出一种露天煤矿边坡安全时序知识图谱构建方法。基于“头实体-关系-尾实体-时间戳”的描述模型, 指出露天煤矿边坡安全时序知识图谱就是边坡失稳事故、事故应急预案、边坡监测数据、边坡风险识别方法 4 类本体的概念及关系在时间顺序上的形式化表达。首先基于专家先验知识、文献资料等建立模式层, 分析边坡失稳事故、事故应急预案、边坡监测数据、边坡风险识别方法 4 类本体概念的抽象定义及概念间的语义关联关系, 进行知识图谱概念的框架搭建。然后基于知识图谱框架, 从专业文献、监测数据等海量数据中进行知识抽取, 对冗余实体进行知识融合, 实现实体匹配, 基于图数据库进行知识存储, 最终完成露天煤矿边坡安全的实体节点、节点属性、节点关系的数据层构建。现场验证结果表明, 露天煤矿边坡安全时序知识图谱构建方法具备可行性, 能够完整表达露天煤矿实体概念及实体间的联系, 在进行边坡安全事故搜索时, 能够发现关联的边坡监测数据、风险识别方法及应急预案知识, 为露天煤矿处理边坡事故提供技术支撑。

关键词: 露天煤矿; 边坡安全; 时序知识图谱; 动态知识图谱; 实体抽取; 知识融合
中图分类号: TD67 文献标志码: A

Research on the construction method of temporal knowledge graph for open-pit coal mine slope safety

CHU Yangjing¹, ZHANG Heng², TANG Ling¹, HOU Xiaodong²

(1. Nanjing Beidou Innovation and Application Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211500, China;

2. Ordos Tengyuan Coal Industry Co., Ltd., Ordos 017099, China)

Abstract: This paper aims to address the issues of insufficient temporal knowledge graphs for open-pit coal mine slope safety, difficulties in effectively sharing data resources, and limitations in handling dynamic knowledge. A method for constructing the temporal knowledge graph for open-pit coal mine slope safety is proposed. Based on the "head entity-relationship-tail entity-timestamp" descriptive model, the open-pit coal mine slope safety temporal knowledge graph was defined as the formal expression of the concepts and relationships of four types of ontologies: slope instability accidents, emergency response plans, slope monitoring data, and slope risk identification methods, arranged in a chronological sequence. First, based on expert prior knowledge, literature materials, and other sources, a model layer was established, and the abstract definitions of the four ontology concepts—slope instability accidents, emergency response plans, slope monitoring data, and slope risk identification methods—were analyzed. The semantic relationships between these concepts were examined to construct the framework of the knowledge graph. Then, based on this knowledge graph framework, knowledge extraction was carried out from vast amounts of data such as professional literature and monitoring data. Redundant entities were integrated, entity matching was performed, and knowledge was stored in a graph

收稿日期: 2024-11-15; 修回日期: 2025-02-25; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 鄂尔多斯市科技重大“揭榜挂帅”项目(JBGS-2023-001)。

作者简介: 储扬静(1992—), 女, 江苏南京人, 工程师, 主要从事遥感、地理信息在灾害防治、城市管理等方面的研究工作, E-mail: 1607276127@qq.com。

引用格式: 储扬静, 张衡, 汤玲, 等. 露天煤矿边坡安全时序知识图谱构建方法研究[J]. 工矿自动化, 2025, 51(2): 84-90, 130.

CHU Yangjing, ZHANG Heng, TANG Ling, et al. Research on the construction method of temporal knowledge graph for open-pit coal mine slope safety[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(2): 84-90, 130.



扫码移动阅读

database, ultimately completing the construction of the data layer for the entity nodes, node attributes, and node relationships in open-pit coal mine slope safety. On-site verification results showed that the proposed method for constructing the temporal knowledge graph of open-pit coal mine slope safety is feasible. It can fully represent the concepts of open-pit coal mine entities and their relationships, and when searching for slope safety accidents, related slope monitoring data, risk identification methods, and emergency response plans can be discovered, providing technical support for open-pit coal mines facing slope accidents.

Key words: open-pit coal mine; slope safety; temporal knowledge graph; dynamic knowledge graph; entity extraction; knowledge fusion

0 引言

露天煤矿是我国经济发展的重要支柱性产业,其边坡安全隐患不容忽视。露天煤矿边坡安全影响因素复杂,且边坡监测系统随着时间推移形成海量数据,当发生边坡坍塌事故时,存在反应滞后、分析不足、救援方案决策多依靠经验判定而导致主观性强等问题^[1-3],大幅降低了事故的处置效率和决策执行能力。如何从海量数据中获取关键信息,建立信息关系,进行露天煤矿边坡安全的智能化应急服务,是当前露天煤矿安全建设的主要任务。

知识图谱是一种基于图的数据结构^[4],旨在描述客观世界的概念、实体、事件及其间的关系^[5]。知识图谱在内容推荐系统^[6]、自然语言问答^[7]及文本信息检索系统^[8]中已展现出显著优势,但仅有很少一部分在非常有限的范围内被转化为信息与领域知识^[9],领域知识工程的知识图谱建设少之又少^[10]。在煤矿安全领域,许瀚戈等^[11]构建了煤矿水害事故领域知识图谱,整合了水害事故知识,辅助进行水害防治处理。陈堃等^[12]对煤矿顶板的主要致灾因子进行了知识图谱构建,实现了致因灾害链的网络分析。宋兆雪等^[13]绘制了矿井火灾可视化知识图谱,分析了矿井火灾的历史、现状及研究重点。刘永立等^[14]将知识图谱与应急处置预案进行动态融合,为应急预案的生成提供数据基础与辅助决策支持。赵佳佳等^[15]构建了煤矿热动力知识图谱,对热动力灾害的研究方向和研究手段进行了分析。目前,煤矿领域的知识图谱大多围绕井工煤矿,露天煤矿与井工煤矿的生产存在差异,安全风险来源也不尽相同,且煤矿领域知识图谱主要为静态知识图谱^[16],基于“实体-关系-实体”进行实体间的关系描述,缺少时间维度,制约了知识图谱在应用中的效能和潜力^[17]。

针对上述问题,本文基于“头实体-关系-尾实体-时间戳”的描述模型,提出一种露天煤矿边坡安全时序知识图谱构建方法,围绕边坡失稳事故、事故应急预案、边坡监测数据、边坡风险识别方法,建立本体

概念,构建时序知识图谱,从海量异构的数据中,抽取有效信息,实现露天煤矿的智能应急服务。

1 露天煤矿边坡安全时序知识图谱定义

时序知识图谱在传统静态知识图谱上引入时间约束,为事实加上时间戳,将三元组扩展为“实体-关系-实体-时间”四元组,模型 $A = \{s, r, o, t\}$ (s 为头实体, r 为关系, o 为尾实体, t 为时间戳,表示事实在该时间戳上有效),关注实体和关系随时间的变化情况^[18]。露天煤矿边坡安全领域中,事故描述复杂、动态监测数据多、模型方法耦合复杂、应急时效性要求高、实体之间的关联关系复杂且多样,是典型的复杂知识结构。露天煤矿边坡安全时序知识图谱就是边坡失稳事故、事故应急预案、边坡监测数据、边坡风险识别方法4类本体的概念及关系在时间顺序上的形式化表达。

2 露天煤矿边坡安全时序知识图谱构建

露天煤矿边坡安全时序知识图谱构建流程如图1所示。首先基于专家先验知识、文献资料等建立模式层,分析边坡失稳事故、事故应急预案、边坡监测数据、边坡风险识别方法4类本体概念的抽象定义及概念间的语义关联关系,进行知识图谱概念的框架搭建。然后基于知识图谱框架,从专业文献、监测数据等海量数据中进行知识抽取,对冗余实体进行知识融合,实现实体匹配,基于图数据库进行知识存储,最终完成露天煤矿边坡安全的实体节点、节点属性、节点关系的数据层构建。

2.1 模式层构建

边坡失稳事故、事故应急预案、边坡监测数据、边坡风险识别方法4类本体贯穿了“数据-数据分析-事故-事故预案”全过程,因此,露天煤矿边坡安全时序知识图谱模式层先构建这4类本体间的描述模型,再对这4类本体进行多层次划分与表达。

边坡失稳事故、事故应急预案、边坡监测数据、边坡风险识别方法4类本体间的关系如图2所示。

1) 边坡失稳事故本体。边坡失稳事故本体主要

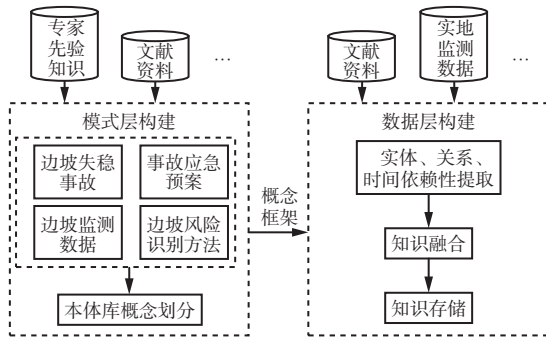


图 1 露天煤矿边坡安全时序知识图谱构建流程

Fig. 1 Construction flow of the temporal knowledge graph for slope safety in open-pit coal mines

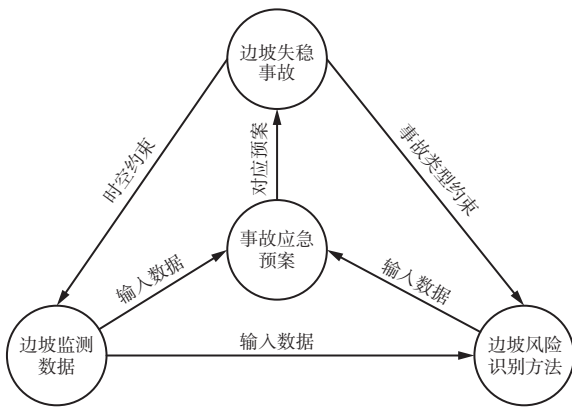


图 2 4 类本体间的关系

Fig. 2 Relationship of the four ontologies

指露天煤矿边坡失稳事故的所有概念、概念属性、关联关系及时间戳的描述。边坡失稳事故本体概念主要包括露天煤矿边坡变形、边坡滑坡、边坡坍塌。概念属性主要为基本属性和事故环境、事故损失。其中基本属性主要为事故名称、事故地点、事故类型、事故等级；事故环境为边坡角度、边坡高度、降水量等；事故损失包含伤亡人数、经济损失等。关联关系为事故之间的联系，主要为无关系、引发、群发、并发等，例如边坡变形会引发边坡滑坡、边坡滑坡与边坡坍塌并发等。时间戳为事故发生的时间段。

2) 事故应急预案本体。事故应急预案本体主要指露天煤矿事故应急预案的所有概念、概念属性、关联关系、时间戳的描述。应急预案本体概念按照应急阶段划分为应急前准备、应急处置、后期处置。其中应急前准备包括组织体系构建、人员培训、响应条件设置、救援设备配置、救援人员配置、边坡风险监测预警、环境监测预警；应急处置包括安全防护、人员转移策略、救援设备调度策略、救援人员调度策略等；后期处置包括现场清理、原因调查、整改措施等。概念属性包括应急预案名称、响应等级、响应条件、所处阶段、预案详细描述等。关联关

系为应急阶段之间的联系，主要为阶段前、阶段后、并行。时间戳为应急预案制定、更新、修改时间。

3) 边坡监测数据本体。边坡监测数据本体主要指露天煤矿边坡监测数据的所有概念、概念属性、关联关系、时间戳的描述。边坡监测数据本体概念按照露天煤矿存在的边坡风险进行安全监测，主要涉及边坡稳定性监测、环境监测。根据 GB/T 37697—2019《露天煤矿边坡变形监测技术规范》，边坡稳定性监测主要包括地表裂缝监测数据、地表位移监测数据、地下位移监测数据、地表水位监测数据、地下水监测数据、内部应力监测数据等；环境监测主要包括降雨、降雪监测数据。概念属性包含数据名称、数据类别、数据采样频率、数据覆盖范围、数据描述对象、数据来源等。关联关系为任意 2 组监测数据之间的相关性。时间戳为监测数据采集时间。

4) 边坡风险识别方法本体。边坡风险识别方法本体主要指用于对露天煤矿边坡失稳风险进行识别所使用模型方法的概念、概念属性、关联关系、时间戳的描述。边坡风险识别方法本体概念主要是对边坡变形滑坡的风险识别涉及到的方法，包括异常值剔除、最大最小值归一化、拉格朗日多项式插值法、反距离插值法、时序分析、卡尔曼滤波法、有限元法、边界元法、三参量法、切线角算法、深度学习等。概念属性主要包含方法名称、方法功能、方法具体描述、应用效果、应用任务名称等。关联关系为方法之间的关联度。时间戳为边坡风险识别方法提出时间。

2.2 数据层构建

露天煤矿边坡安全时序知识图谱数据层根据知识图谱模式层构建的框架，针对不同的数据结构，设计知识抽取方法，获取实体及其属性、关系、时间戳，对冗余的实体进行知识融合，并将融合后的实体四元组按照节点和边存储至图数据库中。

2.2.1 知识抽取

1) 实体抽取。露天煤矿边坡安全知识数据来源主要可分为结构化数据、半结构化数据、非结构化数据。结构化数据包括各设备实地监测数据(csv)、地质岩层数据(csv)、矿山历史边坡失稳数据(csv)等。半结构化数据如百科数据(Wikipedia、百度百科等)。非结构化数据主要是纯文本形式，如网络发布的露天煤矿灾害的新闻信息、通知公告、专业文献等文本数据。本文针对不同数据结构设计对应的实体抽取方法，实现多策略知识获取，并将知识转换为标准格式。

对于结构化的边坡设备监测数据，根据表格字

段项,建立实体、属性映射,提取数据名称、数据类别、数据采样频率、数据覆盖范围、数据值、数据来源等关键信息进行存储;对于结构化的矿山历史边坡失稳数据,建立实体、属性映射,提取事故名称、事故地点、事故类型、事故等级、事故发生时的边坡角度、边坡高度、降水量、伤亡人数、经济损失等信息进行存储。

对于半结构化网页数据源,基于人工建立的实体匹配规则库和网络爬虫技术,半自动地抽取所需信息。部分实体匹配规则见表 1。

表 1 实体匹配规则(部分)
Table 1 Entity matching rules (Partial)

头实体	关系	尾实体
滑坡	引发	崩塌
事故	造成	人员伤亡
部门	启动	响应等级
风险识别	采用	算法
灾害	导致	损失
方法	进行	功能

对于非结构化数据,主要为文本数据和专业文献数据,通过长短期记忆(Long Short-Term Memory, LSTM)和条件随机场(Conditional Random Field, CRF)相结合的抽取模型进行知识抽取,使用 BIO(开始(Begin),内部(Inside),外部(Outside))标注形式,把实体、关系、属性作为主语、谓语、宾语中需要识别的专有名词,建立标签字典,通过标注样本训练模型,进行实体抽取。

2) 关联关系抽取。主要是对 4 类本体间关联关系抽取与本体内部关联关系抽取。

4 类本体间关联关系抽取。边坡失稳事故与事故应急预案通过专家先验知识进行关联;边坡失稳事故与边坡监测数据的时空约束通过事故发生时间、地点与监测时间、位置进行关联;边坡失稳事故与边坡风险识别方法之间主要通过专业文献中进行边坡变形、滑坡、坍塌、方法、模型等关键词的搜索进行关联;边坡监测数据与事故应急预案之间的关系为输入关系;边坡风险识别方法与事故应急预案之间的关系为输入关系;边坡监测数据与边坡风险识别方法之间的关系为输入关系。

本体内部关联关系抽取。边坡失稳事故及事故应急预案具体实例间的关系可通过专家经验判定。边坡监测数据间关系通过互信息法计算任意 2 组数据从记录开始时间到当前时间戳下的关联程度而得

到,互信息能够衡量 2 组数据间的直接关系,互信息值越小,则 2 组监测数据间的相关性越小。

设 S 为包含 n 个监测数据变量的集合, A_i 和 $A_j(i \neq j)$ 为 S 中的任意 2 个变量,集合 S 的互信息值为

$$F(S) = \frac{2}{n(n-1)} \times \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [H(A_i) + H(A_j) - H(A_i, A_j)] \quad (1)$$

$$H(A_i) = - \sum_{A_i \in S} p(A_i) \ln p(A_i) \quad (2)$$

$$H(A_j) = - \sum_{A_j \in S} p(A_j) \ln p(A_j) \quad (3)$$

$$H(A_i, A_j) = - \sum_{A_i \in S} \sum_{A_j \in S} p(A_i, A_j) \ln p(A_i, A_j) \quad (4)$$

式中: $H(A_i)$, $H(A_j)$ 分别为变量 A_i , A_j 的熵; $H(A_i, A_j)$ 为变量 A_i 和 A_j 的联合熵; $p(A_i)$, $p(A_j)$ 分别为变量 A_i 和 A_j 的边缘概率; $p(A_i, A_j)$ 为 A_i 和 A_j 联合分布的概率。

为了便于进行不同变量之间的互信息值比较,将互信息值归一化到 $[0, 1]$, 优化公式为

$$F(S) = \frac{\frac{2}{n(n-1)} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [H(A_i) + H(A_j) - H(A_i, A_j)]}{\sqrt{H(A_i)H(A_j)}} \quad (5)$$

边坡风险识别方法具体实例间的关联关系为方法之间的关联度,主要通过方法名称相似度和方法功能相似度来表示。根据概念属性中的方法名称和方法功能 2 个属性,基于 Jaccard 算法进行语义相似度计算。Jaccard 相似度是一种用于比较 2 个集合相似性的度量方法,2 个句子相同的部分越多,这 2 个句子就越相似^[19]。

$$S(S_a, S_b) = \frac{N(S_a \cap S_b)}{N(S_a \cup S_b)} \quad (6)$$

式中: S_a 和 S_b 为 2 个集合; $N(S_a \cap S_b)$ 为 S_a 和 S_b 的交集元素个数; $N(S_a \cup S_b)$ 为 S_a 和 S_b 的并集元素个数。

Jaccard 相似度的取值范围为 $0 \sim 1$, 值越接近 1, 表示 2 个集合的相似度越高, 值越接近 0, 表示 2 个集合的相似度越低。

3) 时间抽取。对于结构化的数据,主要为不同设备动态监测数据直接建立字段映射,将时间字段作为时间戳进行存储;对于半结构化和非结构化数据,时间分为具体时间和时间段,通过正则表达式和规则匹配相结合的方式,提取时间信息,并将时间标准化,时间标准化规则见表 2。

2.2.2 知识融合

由于知识表达的多样性,知识抽取过程中会存在冗余数据,需要对抽取的实体进行融合。实体知

表 2 时间信息标准化规则

Table 2 Time information standardization rules

标准化前	时间类型	标准化后
2022年5月20日	具体时间	2022/5/20
从2022年至2023年	时间段	2022-2023

识融合主要采用聚类算法实现。基于密度的聚类算法 (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise, DBSCAN) 不需要预设簇的个数, 对于不同密度分布的数据可以提供更好的聚类效果^[20]。本文采用 DBSCAN 进行知识融合, 进而得到不同类簇的露天煤矿边坡安全实体。

DBSCAN 聚类主要涉及样本点数 k 和融合阈值 r , 其核心思想: 选取某个实体作为融合对象, 计算其他实体与当前选取实体的融合距离, 当融合距离小于融合阈值 r 时, 归为一簇。基于 DBSCAN 的知识融合流程如图 3 所示。

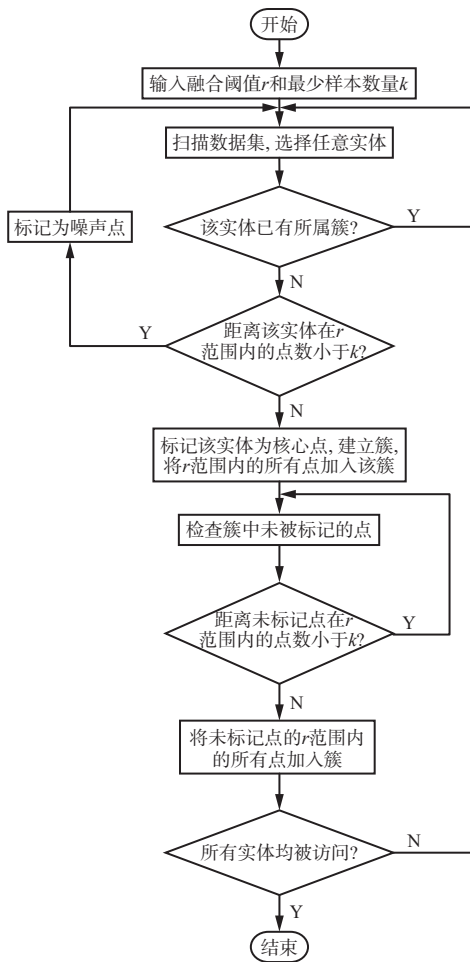


图 3 基于 DBSCAN 的知识融合流程

Fig. 3 Knowledge fusion process based on Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (DBSCAN)

1) 初始化参数。初始化融合阈值 r 和域内最少的样本点数 k 。

2) 核心点查找。选择一个未被访问过的实体作为当前点, 然后搜索以该点为中心、融合距离小于 r 的全部样本点。如果这些点的数量不小于设定样本点数 k , 则该点被认为是一个核心点, 否则该点被认为是噪声点。

3) 簇扩展。当找到一个核心点时, 以此为起点, 沿着其连通的点继续搜索。将所有与其融合距离小于 r 的点都归入同一个簇中, 并标记为已访问。

4) 多次迭代。重复步骤 2) 和步骤 3), 直到所有实体都被访问过为止。其中对于已经被归类的实体, 不需要再次处理。如果某个点既不是核心点, 也不在任何核心点的范围内, 则将其归为噪声点。

在进行 DBSCAN 聚类时, 采用实体 Jaccard 相似度作为融合考量因素, 选取与当前实体相似度大的实体进行融合, 融合距离为

$$L = \frac{N(S_a \cup S_b)}{N(S_a \cap S_b)} \quad (7)$$

经过多次实验, 当融合阈值 r 为 0.76, k 为 8 时, 融合效果最好。融合结果见表 3。

表 3 知识融合前后对比(部分)

Table 3 Comparison of knowledge fusion before and after (Partial)

融合前	融合后
地基雷达 地基雷达监测 雷达监测 雷达数据 合成孔径雷达 地基合成孔径雷达监测	雷达监测
响应条件 响应触动 响应触发 触发机制 响应条件设置	响应条件设置
地表裂缝监测 裂缝监测 地表裂缝	地表裂缝监测
卡尔曼滤波法、 卡尔曼滤波	卡尔曼滤波法

2.2.3 知识存储

通过知识抽取、知识融合后的知识可以通过图数据库进行结构化表示, 图数据库采用 RDF (Resource Description Framework, 资源描述框架) 三元组模型和“点-边”有向图的形式^[21]存储数据, 在图数据库中, 概念、属性可存储为节点, 关系可存储为边, 在实体节点上增加一条 timestamp 属性, 存储时间戳, 用图数据库进行知识图谱的存储可以更加简洁、明确地描述数据间的复杂关系, 更好地表达实体间的关系结构, 提升知识图谱存储和查询性能。

3 结果分析

以鄂尔多斯市腾远煤炭有限责任公司下属腾远煤矿为例,对边坡失稳事故、事故应急预案、边坡监测数据、边坡风险识别方法4类本体的结构化进行描述,构建露天煤矿边坡安全时序知识图谱。

腾远煤矿提供监测数据543条,根据该数据进行头实体、关系、尾实体、时间戳提取,以煤矿边坡风险识别为关键词提取中文文献173条,通过网页提取实体572条,进行知识融合后,共提取实体269条。利用Neo4j图数据库存储实体及实体属性关系,某一时间的存储结果如图4所示。

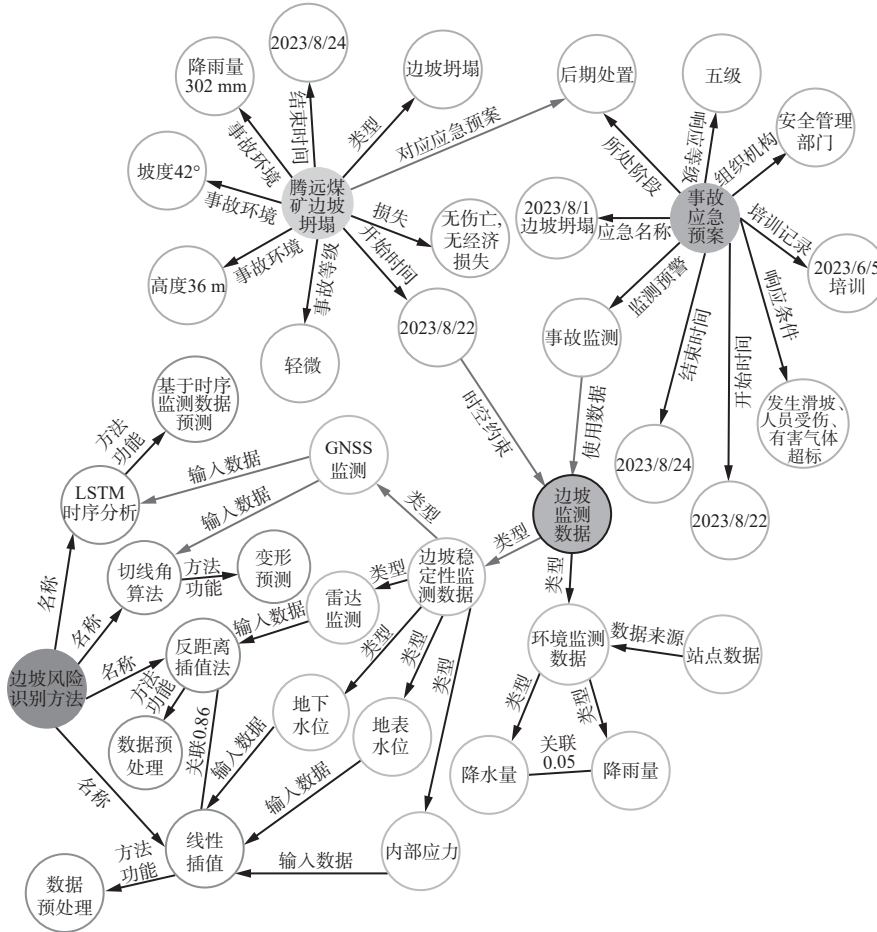


图4 露天煤矿边坡安全时序知识图谱(部分)

Fig. 4 Temporal knowledge graph for slope safety in open-pit coal mines(Partial)

通过露天煤矿边坡安全时序知识图谱,针对已发生的事故,可根据时空约束,回溯当日监测数据、边坡风险识别结果及应急措施,从而优化风险预测方法、加强事故应急工作;针对未发生的安全事故,可快速关联至监测数据,调用对应的风险识别方法,分析事故风险等级;针对正在发生的安全事故,可根据事故类型约束,及时进行事故监测,基于风险识别方法分析预测事故风险,启动应急预案。

4 结语

针对露天煤矿边坡安全时序知识图谱匮乏,数据资源难以有效共享、处理动态知识存在局限等问题,提出一种基于“头实体-关系-尾实体-时间戳”描述模型的露天煤矿边坡安全时序知识图谱构建方

法。面对事故应急需求,分析边坡失稳事故、事故应急预案、边坡监测数据、边坡风险识别方法4类本体概念与本体间的关联关系,通过知识抽取、知识融合和知识存储,实现露天煤矿边坡安全时序知识图谱搭建。结果表明,露天煤矿边坡安全时序知识图谱构建方法具备可行性,能够完整表达露天煤矿实体概念及实体间的联系,在进行边坡安全事故搜索时,能够发现关联的边坡监测数据、风险识别方法及应急预案知识,为露天煤矿处理边坡事故提供技术支持。

现阶段,关于露天煤矿边坡安全知识图谱的本体和实体数量较少,难以满足露天煤矿安全生产的实际需求,同时,知识图谱构建过程是一个不断迭代更新的过程,今后还需进一步研究小样本知识图谱

构建, 以及如何基于已有知识图谱进行动态优化调整, 实现知识的增量式更新。

参考文献(References):

- [1] 徐增林, 盛泳潘, 贺丽荣, 等. 知识图谱技术综述[J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(4): 589-606.
XU Zenglin, SHENG Yongpan, HE Lirong, et al. Review on knowledge graph techniques[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2016, 45(4): 589-606.
- [2] 范鹏飞. 基于数字孪生的三维智慧矿山可视化系统研究与实现[D]. 烟台: 烟台大学, 2024.
FAN Pengfei. Research and implementation of 3D smart mine visualization system based on digital twinning[D]. Yantai: Yantai University, 2024.
- [3] 牛莉霞, 李肖萌. 5G时代面向情报需求的智慧矿山应急管理新模式研究[J]. 灾害学, 2024, 39(3): 228-234.
NIU Lixia, LI Xiaomeng. Research on the new model of intelligent mine emergency management oriented to intelligence needs in the 5G era[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(3): 228-234.
- [4] SOWA J F. Principles of semantic networks[J]. Behavioral & Brain Sciences, 1984, 23(92): 1-50.
- [5] 李涓子, 侯磊. 知识图谱研究综述[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2017, 40(3): 454-459.
LI Juanzi, HOU Lei. Reviews on knowledge graph research[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 2017, 40(3): 454-459.
- [6] CAO Yixin, WANG Xiang, HE Xiangnan, et al. Unifying knowledge graph learning and recommendation: towards a better understanding of user preferences[C]. The World Wide Web Conference, San Francisco, 2019: 151-161.
- [7] HUANG Xiao, ZHANG Jingyuan, LI Dingcheng, et al. Knowledge graph embedding based question answering[C]. Twelfth ACM International Conference on Web Search and Data Mining, Melbourne VIC, 2019: 105-113.
- [8] DIETZ L, KOTOV A, MEIJ E, et al. Utilizing knowledge graphs for text-centric information retrieval[C]. The 41st International ACM SIGIR Conference on Research & Development in Information Retrieval, Ann Arbor, 2018: 1387-1390.
- [9] 朱建章, 石强, 陈凤娥, 等. 遥感大数据研究现状与发展趋势[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(11): 1425-1439.
ZHU Jianzhang, SHI Qiang, CHEN Feng'e, et al. Research status and development trends of remote sensing big data[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(11): 1425-1439.
- [10] 刘龙历, 薛勇, 光洁, 等. 基于本体概念相似度的遥感信息服务匹配研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(8): 13-18, 79.
LIU Longli, XUE Yong, GUANG Jie, et al. Study of remote sensing information service matching based on similarity of ontology concept[J]. Computer Engineering and Applications, 2016, 52(8): 13-18, 79.
- [11] 许瀚戈, 管华宇, 王艺岚, 等. 煤矿水害事故领域知识图谱的构建及应用[J]. 山西焦煤科技, 2024, 48(10): 39-44.
XU Hange, GUAN Huayu, WANG Yilan, et al. Construction and application of knowledge graph in the field of coal mine water damage accidents[J]. Shanxi Coking Coal Science & Technology, 2024, 48(10): 39-44.
- [12] 陈堃, 谭吉玉, 丁元春. 煤矿顶板事故的知识发现及灾害链网络分析[J]. 煤矿安全, 2024, 55(8): 249-256.
CHEN Kun, TAN Jiyu, DING Yuanchun. Knowledge discovery and disaster chain network analysis of coal mine roof accidents[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(8): 249-256.
- [13] 宋兆雪, 张伟, 侯玉亭, 等. 矿井火灾研究领域的知识图谱分析[J]. 煤炭科技, 2023, 44(4): 1-6, 59.
SONG Zhaoxue, ZHANG Wei, HOU Yuting, et al. Knowledge graph analysis in the field of mine fires research[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2023, 44(4): 1-6, 59.
- [14] 刘永立, 王海涛. 基于知识图谱的火灾及耦合灾害应急处置管理[J]. 煤矿安全, 2022, 53(9): 144-150.
LIU Yongli, WANG Haitao. Fire and coupling disaster emergency management based on mapping knowledge domain[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(9): 144-150.
- [15] 赵佳佳, 田世祥, 杨家向, 等. 基于知识图谱的煤矿热动力灾害可视化研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(3): 33-39.
ZHAO Jiajia, TIAN Shixiang, YANG Jiaxiang, et al. Study on visualization of thermodynamic disaster in coal mine based on knowledge map[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(3): 33-39.
- [16] 吴玉洁, 奚雪峰, 崔志明. 嵌入式静态知识图谱补全研究进展[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(12): 34-47.
WU Yujie, XI Xuefeng, CUI Zhiming. Advancements in embedded static knowledge graph completion research[J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(12): 34-47.
- [17] 许凯嘉, 柳林, 王海龙, 等. 时序知识图谱补全研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(22): 38-57.
XU Kaijia, LIU Lin, WANG Hailong, et al. Survey on temporal knowledge graph completion research[J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(22): 38-57.

- [16] 蒋仲安, 杨向东. 基于环境参数协同预测风速的掘进面智能变频通风控制系统[J]. 金属矿山, 2023(7): 57-65.
JIANG Zhong'an, YANG Xiangdong. Intelligent variable frequency ventilation control system for excavation face based on collaborative prediction of wind speed by environmental parameters[J]. Metal Mine, 2023(7): 57-65.
- [17] 卞欢, 刘剑, 刘学, 等. 基于 GA-BP 神经网络的巷道平均风速单点测试研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(5): 57-64.
BIAN Huan, LIU Jian, LIU Xue, et al. Research on single point test of average wind speed in roadway based on GA-BP neural network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(5): 57-64.
- [18] 王海宁, 厉志安. 一种矿井巷道平均风速的单点测控装置与方法: CN202010050498.8[P]. 2022-04-12.
WANG Haining, LI Zhi'an. A single point measurement and control device and method for average wind speed in mine tunnels: CN202010050498.8[P]. 2022-04-12.
- [19] 汪光鑫. 基于三维仿真系统的矿井风流调控技术及应用研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2014.
WANG Guangxin. Research on mine airflow control technology and applications based on 3D simulation system[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2014.
- [20] 万宇鹏, 周远波, 文捷, 等. 基于神经网络的声学参数预测方法研究[J]. 中国测试, 2024, 50(2): 167-171.
WAN Yupeng, ZHOU Yuanbo, WEN Jie, et al. Research of acoustic parameter prediction method based on neural network[J]. China Measurement & Test, 2024, 50(2): 167-171.
- [21] 郑太雄, 贺吉, 张良斌. 基于 LSTM 神经网络的混合燃料 HCCI 发动机复杂工况下燃烧正时估计[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 100-110.
ZHENG Taixiong, HE Ji, ZHANG Liangbin. Combustion timing estimation of the HCCI engine with mixed fuel under complex operating conditions based on LSTM neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 100-110.
- [22] 傅兴宇, 陈颖悦, 陈玉明, 等. 一种全连接神经网络分类方法[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2023, 46(1): 91-100.
FU Xingyu, CHEN Yingyue, CHEN Yuming, et al. A classification method of fully connected granular neural network[J]. Journal of Shanxi University(Natural Science Edition), 2023, 46(1): 91-100.
- [23] POLO-MENDOZA R, DUQUE J, MAŠÍN D. Prediction of California bearing ratio and modified proctor parameters using deep neural networks and multiple linear regression: a case study of granular soils[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20. DOI: [10.1016/j.cscm.2023.e02800](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02800).
- [24] 张振生, 蔡景, 张瑞, 等. 航空发动机滑油消耗率计算与预测方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2024, 56(4): 668-676.
ZHANG Zhensheng, CAI Jing, ZHANG Rui, et al. A calculation and prediction method of lubricating oil consumption rates for aeroengines[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(4): 668-676.
- [25] 韩意, 姜逢源, 田海庆, 等. 基于多层感知机的坠物对海底管道损伤预测及可靠性分析[J]. 海洋湖沼通报, 2020(6): 37-43.
HAN Yi, JIANG Fengyuan, TIAN Haiqing, et al. Damage prediction and reliability analysis of submarine pipelines subject to dropped objects based on multi-layer perceptron[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(6): 37-43.
- [26] FARMANIFARD S, ASGHAR ALESHEIKH A, SHARIF M. A context-aware hybrid deep learning model for the prediction of tropical cyclone trajectories[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 231. DOI: [10.1016/j.eswa.2023.120701](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120701).
- (上接第 90 页)
- [18] 陆佳民, 张晶, 冯钧, 等. 时序知识图谱构建研究综述[J]. 计算机科学与探索, 2025, 19(2): 295-315.
LU Jiamin, ZHANG Jing, FENG Jun, et al. Survey on construction method of temporal knowledge graph[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2025, 19(2): 295-315.
- [19] 魏嵬, 丁香香, 郭梦星, 等. 文本相似度计算方法综述[J]. 计算机工程, 2024, 50(9): 18-32.
WEI Wei, DING Xiangxiang, GUO Mengxing, et al. Review of text similarity calculation methods[J]. Computer Engineering, 2024, 50(9): 18-32.
- [20] 张文怡. 基于改进 Canopy-Kmeans 的专家信息知识图谱的研究及应用[D]. 武汉: 湖北大学, 2023.
ZHANG Wenyi. Research and application of expert information knowledge map based on improved Canopy-Kmeans[D]. Wuhan: Hubei University, 2023.
- [21] 陈年松. 基础地理实体关系的知识图谱构建方法研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(6): 20-24.
CHEN Niansong. Research on knowledge graph construction method of basic geo-entities relationships[J]. Geospatial Information, 2024, 22(6): 20-24.