

文章编号: 1674—8247(2024)06—0044—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.06.008

VR 场景知识图谱表示及动态更新方法在铁路信息 管理中的应用研究

张可军 黄华平 刘 畅

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:随着铁路信息化的快速发展,虚拟现实(VR)技术在铁路场景建模与信息管理中愈加重要。面向智能化、精准化的铁路信息管理,提出一种针对铁路 VR 场景的知识图谱表示与动态更新方法。首先,梳理铁路 VR 场景关键要素概念与要素之间的复杂关联关系,自顶向下构建模式层、自底向上构建数据层抽取知识并对知识进行关联融合,通过属性图进行知识表示;然后,设计一种以知识质量评估指标为核心的自主循环优化的知识图谱动态更新框架,提升铁路 VR 场景知识建模效率和信息实时性;最后,以某新建铁路桥梁工程场景为例构建实例知识图谱,实现设计数据变化监测的知识图谱动态更新,实时反映场景状态变化。应用实例表明,该方法能有效提高场景建模的准确性和信息管理的响应速度,为铁路信息化建设和复杂系统信息管理提供了新的技术支持。

关键词:VR 场景;知识图谱;动态更新;铁路信息管理;数据可视化

中图分类号:TP391.1;U2

文献标志码:A

44

Research on the Application of VR Scene Knowledge Graph Representation and Dynamic Update Method in Railway Information Management

ZHANG Kejun HUANG Huaping LIU Chang

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: With the rapid advancement of railway informatization, Virtual Reality (VR) technology has become crucial in railway scenario modeling and information management. To enhance the intelligence and precision of railway information management, this study proposed a knowledge graph representation and dynamic update method tailored for railway VR scenarios. Initially, the key elements and complex relationships within railway VR scenarios were identified, enabling the top-down construction of a schema layer and the bottom-up extraction and integration of knowledge within a data layer, which is then represented using property graphs. Subsequently, a dynamically updating framework was designed, centered around knowledge quality evaluation metrics, to autonomously optimize the knowledge graph, thereby improving the efficiency of knowledge modeling and real-time information management in railway VR scenarios. Finally, the proposed method was exemplified through a case study of a newly constructed railway bridge project, where the knowledge graph is dynamically updated to monitor changes in design data, reflecting real-time scenario state changes. The application results demonstrate that this method effectively enhances the accuracy of scenario modeling and the responsiveness of information management, providing innovative technical support for railway informatization and complex

收稿日期:2024-06-17

作者简介:张可军(1967-),男,教授级高级工程师。

引文格式:张可军,黄华平,刘畅. VR 场景知识图谱表示及动态更新方法在铁路信息管理中的应用研究[J]. 高速铁路技术,2024,15(6):44-50.

ZHANG Kejun, HUANG Huaping, LIU Chang. Research on the Application of VR Scene Knowledge Graph Representation and Dynamic Update Method in Railway Information Management[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(6):44-50.

system information management.

Key words: VR scene; knowledge graph; dynamic update; railway information management; data visualization

随着我国高速铁路建设事业的不断发展,对铁路的运营管理工作提出了更高的要求。在这样的背景下,铁路信息可视化得到了迅速地发展和应用。虚拟现实(Virtual Reality,VR)技术相较于以往单一的空间数据可视化方式,铁路虚拟现实在空间数据的表达上具有仿真性和沉浸性的特点^[1]。高速铁路是一个复杂的系统,包含的对象种类多、对象之间关系复杂,在建立铁路VR场景时会涉及到不同的专业领域知识,不同专业针对同一对象也会出现不同定义。现有的铁路VR场景的研究中,主要侧重于场景的功能性描述,较少涉及领域专业知识和场景结构的解释,缺乏概念上的关系描述。因此,如何有效地统一对象概念和具体地描述对象之间关系是一个重要的问题。

知识图谱是大数据时代一种重要的知识表达方式。通过构建知识图谱,对铁路VR场景数据进行分析与挖掘,实现从数据到知识的转变,能够清晰、准确地描述铁路VR场景中的对象和对象之间的关系。在原始数据中,抽取铁路VR场景知识信息,提取本体、关系和属性等知识要素,经过知识融合消除本体歧义,得到一系列基本的事实表达,再通过知识加工构建出结构化、网络化的铁路VR场景知识图谱。知识量随着时间的推移而增加,因此知识图谱的构建过程是一个不断迭代更新的过程。将知识图谱引入铁路VR领域,可以为虚拟场景的建模提供指导,能够有效规范复杂的建模操作、保障建模工作的顺利进行,有利于场景

的高效分析^[2]。
综上所述,本文通过厘清铁路VR场景多要素对象及其关系,建立并集成各铁路专业领域本体,提炼多种领域涉及到的各要素的属性和关联规则^[3],实现铁路VR场景知识图谱的构建,引入质量评估机制实现知识图谱的优化表达与动态更新,为铁路VR场景智能建模提供重要支持。

1 VR场景知识图谱表示及动态更新方法

铁路VR场景知识图谱表示及动态更新方法总体研究思路如图1所示,主要包括知识图谱关联构建、知识图谱表示以及知识图谱动态更新3个方面。知识图谱构建包括基于本体模型的知识抽取以及基于语义相似度关联融合^[4]。其中,基于本体模型的知识抽取包括实体抽取、关系抽取、属性抽取和层次聚类;基于语义相似度关联融合包括内容关联度量、尺度关联度量和实体要素匹配关联融合。知识图谱的表示是基于属性图模型构建铁路VR场景知识图谱的直观表示,其中属性图模型包括顶点集合、边集合、标签函数和属性值。知识图谱更新包括多层次语义推理和质量评估与动态更新,多层次语义推理包括属性语义、类别语义、关系语义和空间语义;质量评估与动态更新包括准确性评估、实体更新、关系更新和属性更新。

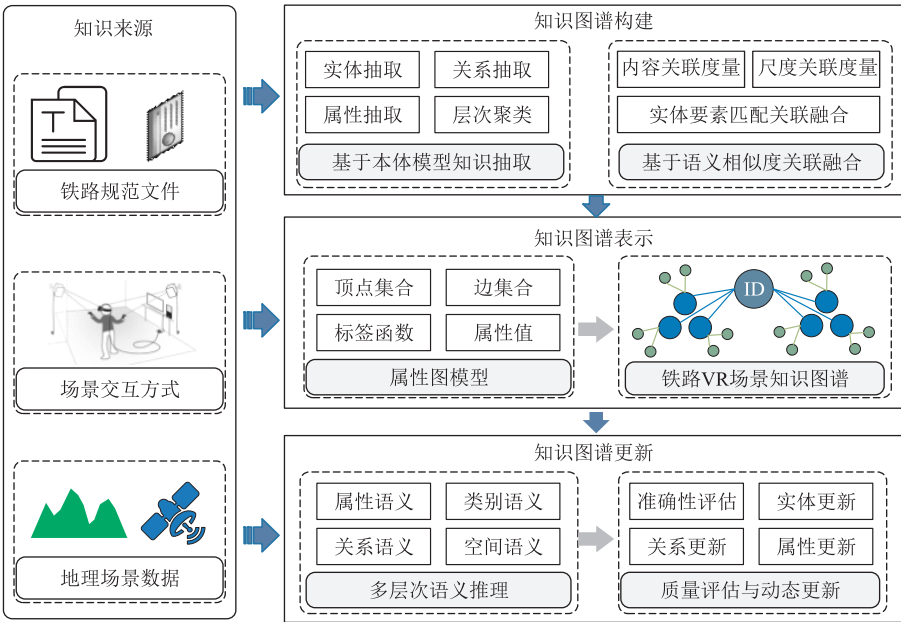


图1 总体研究思路图

1.1 铁路VR场景知识图谱关联构建

铁路VR场景知识图谱的构建采用“自顶向下”的方法构建,主要分为模式层构建和数据层构建。模式层包括铁路VR场景要素的概念和本体,主要通过本体构建的方法实现铁路VR场景本体要素分类体系的构建。数据层包括铁路VR场景实体和相关属性,基于本体对铁路规范文件、场景交互方式、地理场景数据等多源异构数据进行知识抽取、知识融合。

1.1.1 数据驱动的铁路VR场景要素本体建模

建立铁路VR场景要素本体模型能够厘清铁路VR场景中包含的多种要素对象及其关系。由于铁路VR场景存在多要素、多专业、多系统特点,本文从铁路规范文件、场景交互方式、地理监测等多源异构数据出发,构建要素概念、属性以及概念之间关系的本体模

型,为大范围铁路场景知识的规范化表达提供关键基础^[5]。主要包括铁路VR场景要素分类、要素关系分类,以及共同构成的能够描述铁路VR场景内容和关联关系的本体模型。

首先,对铁路VR场景包含的要素进行抽象和分类,如图2所示。铁路VR场景包括通信系统、工务系统、牵引供电系统、列车组和自然地物5类概念对象。其中通信系统包括信号机、基站、应答器等概念对象;工务系统包括桥、路基、隧道、轨道和站场等概念对象;牵引供电系统包括接触网系统和变电所等概念对象;列车组主要包含车体、司机室、辅助电源系统、转向架、连接装置和制动系统等概念对象;自然地物主要包括草地、树木、田地等概念对象。

在此基础上,本文从铁路VR场景的要素显示表

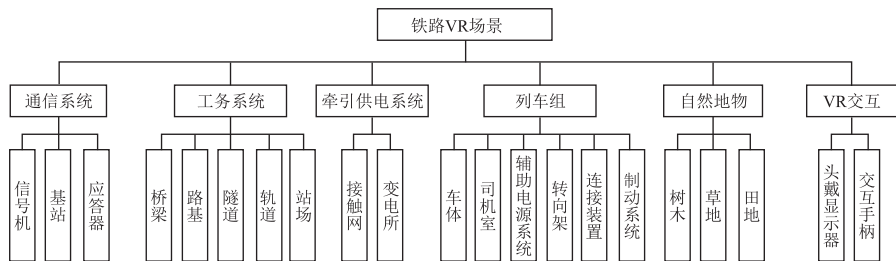


图2 铁路VR场景要素概念分类体系图

达与交互描述的应用需求,将要素概念之间的关系分为时间关系、空间关系、专题关系3类,并分层对关系类型的细分和描述形式进行定义,如表1所示。关系描述要素之间的关联状态,等同于铁路场景中实体/事物与实体/事物之间的联系;同时,本文以可扩展的语义机制刻画要素内的信息,即作为要素的附加属性,如工务系统中桥的空间属性(地理坐标),鉴于铁路场景要素描述信息的多样性,在此对其不再赘述。

表1 铁路VR场景要素间关联关系表

关系类型	细分类型	关系描述
时间关系	顺序关系	描述要素之间产生相互作用的时间先后关系
	起始关系	描述要素在VR场景触发变化事件的起始关系
	依赖关系	描述要素在特定条件或与其他要素变化的关联关系
空间关系	拓扑关系	表达要素之间的相交、相离、覆盖等空间关系
	方位关系	表达要素所处的相对位置关系,如东西南北等
	距离关系	表达要素所处位置的远近或定量关系
专题关系	因果关系	表达铁路场景中要素之间的反馈机制与逻辑关系
	上下位关系	表达要素之间在概念层面的从属、包含等关系
	交互关系	表达要素之间在VR交互层面的动作触发与反应关系

基于上述要素分类及关联关系,本文构建了铁路VR场景要素本体模型,如图3所示。

1.1.2 基于本体模型的知识抽取

本文基于预定义的本体及概念对铁路VR场景实体抽取,通过现有数据转换结合开放域的方式进行实

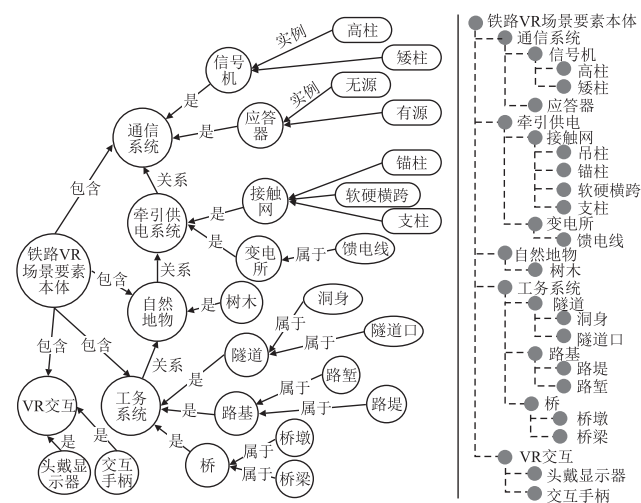


图3 铁路VR场景要素本体模型图(部分)

体、关系与属性抽取,知识抽取流程如图4所示^[6]。实体抽取的数据来源主要分为结构化数据、半结构化数据、非结构化数据。其中结构化数据指能够完全通过二维表结构来进行逻辑表达和实现的数据,包括有铁路领域的专业数据库数据、相关链接数据等;半结构化数据可以理解为难以直接使用二维表结构表达但包含一定的标记信息的数据,包括有以半结构化数据形式存储的线路设计规划、施工装配文档等;非结构化数据

则不具有上述数据特征,包括铁路线路环境相关图像和视频、纯文本形式的线路设计规划和施工装配文档等^[7]。

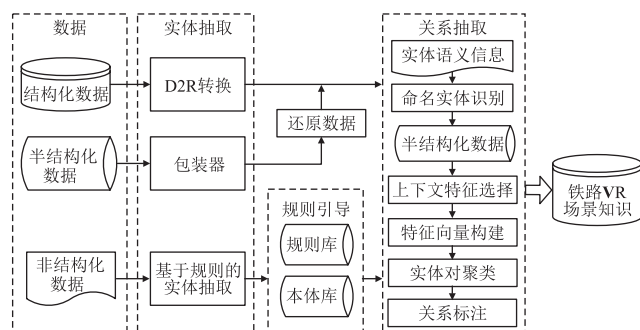


图4 铁路VR场景知识抽取图

针对结构化数据特点,采用D2R转换方法从中抽取相关数据并转换为RDF数据作为实体信息;针对半结构化数据特点,采用包装器抽取相关数据并还原为结构化数据,再从包装器标注好的训练样例集合中学习抽取规则,利用该规则对半结构化数据进行实体构建;针对非结构化数据特点,采用本体库引导下基于规则的方式抽取,基于本体定义的规则、特征,对每个规则赋予权值,当规则冲突时选择权值最高的规则进行命名,规则库的定义根据本体库中各本体之间的关系进行描述。在规则库和本体库的引导下对非结构化数据尤其是纯文本数据中的段落进行分割、标点符号剔除、文档分词处理、词性标注、实体命名得到实体-关系-实体和实体-关系-属性的三元组信息。

完成实体抽取后,进一步对实体间的关系进行抽取。本文采用开放域关系抽取中的无监督关系抽取,即在未预先定义关系类型的情况下,基于铁路VR场景实体对上下文中的一些词语进行实体之间关系的描述。首先应用命名实体识别技术进行实体识别,然后对语料库中出现次数较少的命名实体进行剔除,随后提取每个命名实体对的上下文作为实体对的特征描述,采用层次聚类中的全连通聚类方法对实体进行聚类,最后把聚类结果中每个类中出现次数最多的词汇作为该类中所有命名实体对的关系描述。

1.1.3 基于语义相似度的关联融合

铁路VR场景知识抽取阶段从不同数据源中抽取实体、关系及属性信息,形成了一系列单个孤立要素,且存在知识重复、知识关联不明确等问题^[8]。知识融合过程能够使来自不同数据源的知识通过数据整合等步骤,建立完整明确的实体要素关联。实体匹配和对齐是知识融合阶段的主要工作,其关键在于定义合适的相似度度量。本文结合铁路VR场景数据特点,关注VR场景中数据内容特征和尺度特征,构建基于语

义相似度的内容关联度量和尺度关联度量方法,实现不同要素实体关联,形成完整的铁路VR场景知识图谱网络,数据整体相似度关联可表示为:

$$S_i = W_c \times S_c \times W_s \times S_s \quad (1)$$

式中: S_c ——内容关联度量;

W_c ——内容关联度量权重;

S_s ——尺度关联度量;

W_s ——尺度关联度量权重。

数据整体相似度公式可用于实体相似性计算,最终服务于实体匹配和对齐等知识关联融合过程。内容关联度量主要依靠数据属性等进行关联,通过对象间共享信息的多少判断相似程度,共享信息越多,相似度越高。数据内容是数据的核心,元数据中的数据内容体现在名称、类别、几何尺寸、空间位置等数据属性信息和标题、关键字等文本描述信息。将这些元数据组成特征向量来表达相似度,即内容关联度量可表示为:

$$S = \frac{D1D2}{|D1| \times |D2|} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \text{match}(x_i, y_i)}{2 \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (2)$$

式中: $D1$ ——数据内容特征向量, $D1 = (x_1, x_2, \dots, x_n)$;

$D2$ ——数据内容特征向量, $D2 = (y_1, y_2, \dots, y_n)$;

$\text{match}(x_i, y_i)$ ——匹配计算函数;

w_i ——权重参数,代表不同数据特征的重要程度。

本文构建了基于尺度的关联度量方法,包括空间尺度和时间尺度关联度量表达方法。数据的尺度特征反映了数据内容的精度和详细程度,其空间尺度反映了数据在空间上涉及的范围,如数据的分辨率、比例尺等。当同类型数据的空间尺度相同时,相似度为1,当尺度或数据类型不同时,空间尺度相似度计算较为困难,此时可考虑尺度转换难度与信息量的包含程度。时间尺度则反映了数据在时间上所涉及的范围,如数据的采集频率等,其可用年、月、日等单位衡量,时间尺度关联度量与对象时间尺度需求和内插数据进度有关。

本文结合基于内容和尺度的关联度量方法定义铁路VR场景知识的相似度度量方法,针对多类型数据冲突问题,计算实体要素相似性构建匹配互联,将抽取得到的不同来源的实体、关系及属性等知识通过关联融合建立完整的铁路VR场景知识图谱。

1.2 基于属性图模型的知识图谱表示

面对海量铁路VR场景知识,实体数量众多,实体间的关系错综复杂,如何对获取后的知识进行高效存

储管理已成为知识图谱领域中的一个关键问题。为应对应用层方面的各种需求,拥有着大规模关联集合的知识图谱数据集应存储在知识库的不同知识模块中,并构建索引机制,以便在知识查询时能够快速准确响应。

数据模型是数据管理领域的基础与核心。本文采用属性图模型对铁路VR场景知识集进行管理。属性图模型是图数据库业界中广泛采用的一种数据模型,例如图数据库 Neo4j。

本文将铁路场景知识图谱形式化定义为:

$$G = (V, E, \rho, \gamma, \sigma) \quad (3)$$

式中: V ——顶点的有限集合,代表此铁路场景中的要素实体,例如1号铁轨、2号桥墩、3号路灯等;

E ——边的有限集合,代表不同实体之间的语义关系,本文的边均为有向边;

ρ ——边与边两端点之间的映射关系,表示方法为 $\rho(e) = (v_1, v_2)$,其中 $e \in E, v_i \in V$,例如 e 表示包含关系, v_1 表示1号桥, v_2 表示该桥的2号桥墩,则该式表示1号桥包含了2号桥墩;

γ ——顶点或边的标签(Label),代表顶点实体的抽象类型,或是边对应关系的概念类别,例如 $\gamma("1号桥") = "桥"$;

σ ——顶点或边的属性信息,表示方法为 $\sigma(v, prop) = val$ 或 $\sigma(e, prop) = val$,其中 $prop \in Prop, val \in Value, Prop$ 是所有属性的有限集合, $Value$ 是所有属性值得有限集合^[9]。

由于在属性图模型中边也可像顶点一样作为一个对象存在,因此边也有自己的属性集合,这对知识图谱的详细描述是有利的。例如在描述空间关系“在...上方(over-of)”时,可以为边“over-of”派生一个距离属性,用于表示在上方具体多少距离的空间关系。尤其是在作为铁路场景知识管理时,铁路场景中对象之间的属性以及空间关系需要准确详细地描述和记录,这对于场景自动智能建模是非常有利的,铁路VR场景属性图模型如图5所示。

1.3 自主循环优化的知识图谱动态更新

随着铁路相关事业的不断开拓与发展,客观世界中的知识总是在不断的更新迭代中,因此面对这些与时俱进的新知识,需对知识图谱进行相应的动态更新。现有方法基于原生图结构存储更新知识,知识抽取后以新的节点和关系存储到知识图谱中即可实现更新,这种更新方式与人类不断学习丰富大脑知识库的过程极为相似。此过程需要保证图谱数据与本体模型相匹

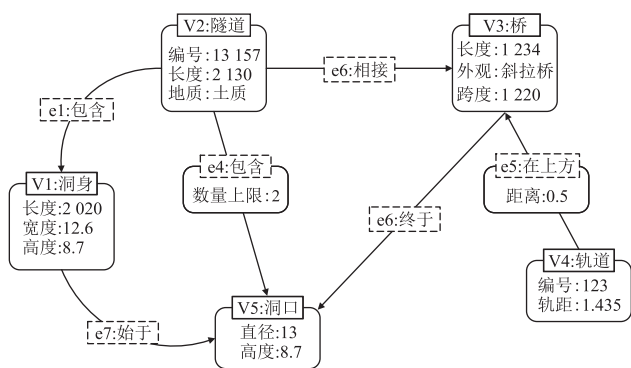


图5 铁路VR场景属性模型图(m)

配,依据变化后的本体模型重新构建知识图谱,存在消耗资源多、场景局限及时效性低的问题。因此,本文特别提出一种以知识图谱更新质量评估指标为约束的知识图谱自主循环优化动态更新机制,其关键在于耦合内部知识推理与外部需求变化,提升知识图谱的完整性、准确性与知识挖掘、推荐结果的置信度,如图6所示。

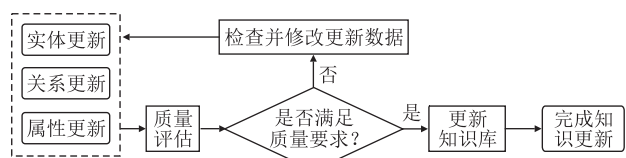


图6 自主循环优化的知识图谱动态更新图

1.3.1 基于语义推理的知识挖掘式更新

基于语义推理的知识挖掘式更新旨在发掘知识图谱中的缺失关联,从知识图谱自身内容出发,完善图谱网络中关联关系并拓展和丰富知识网络。采用知识推理的方法人工构建关联规则,利用规则进行探索式搜索并给出解释,从而获得新的知识。常用的一种方式是基于图的推理,利用知识图谱图结构中的“实体-关系-实体”构成的网络结构,通过路径搜索获取起点实体与终点实体之间的语义关系^[10]。本文采用基于语义的推理方法,从属性语义、类别语义、关系语义、空间语义等来描述VR场景中实体之间的关系,实现实体关联关系、实体预测等知识挖掘,如图7所示。

属性语义(Y_1)描述实体的基本信息,包含实体的名称、地理坐标、尺寸等信息;类别语义(Y_2)表示地理实体的所属类别,如通讯系统、工务系统、列车组、牵引供电系统;关系语义(Y_3)表达实体与实体之间的相互关系,包括附属关系、并列关系等;空间语义(Y_4)是通过场景中对对象的空间位置、空间关系等信息进行清晰准确地描述,如相邻、相离、包含等空间关系。利用知识图谱图中“实体-关系-实体”的结构,基于上述

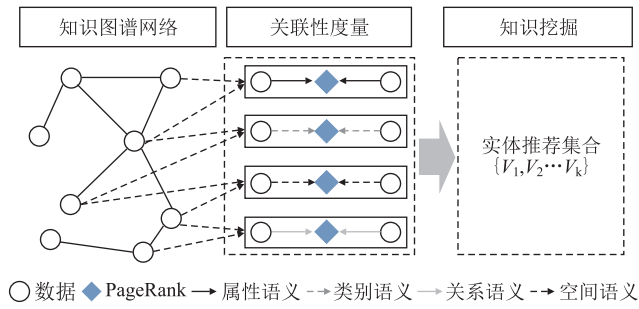


图7 多层次语义推理知识挖掘图

多层次语义推理,挖掘铁路VR场景实体之间的关联关系,预测具有相互关联的实体。通过PageRank计算实体之间的相似性与关联关系程度,以相似性与关联性度量,按照计算结果高低排序形成推荐集,为用户推荐挖掘结果,满足用户需求。表达式为:

$$PR(\{V_1, V_2 \cdots V_k\}) = \sum_{i=1}^{n=4} \alpha_i V_0(Y_i)$$

$$\text{其中, } \sum_{i=1}^{n=4} \alpha_i = 1; V_0(Y_i) \in (0, 1) \quad (4)$$

式中: V_0 ——1个已知的实体或用户偏好实体;

α_i ——多层次语义权重;

$V_0(Y_i)$ ——实体 V_0 与其他实体之间的语义关系值,通过多层次语义推理计算出实体之间的相似性与关联性度量值 PR ,以 PR 排序得到1个实体推荐集合 $\{V_1, V_2 \cdots V_k\}$ 。如以桥梁为基础,通过本文的多层次语义推理知识挖掘方法,可以为用户推荐箱梁、桥墩等与桥梁强相关实体信息。

1.3.2 质量评估指标约束的外部知识动态更新

知识图谱的更新包括模式层的更新和数据层的更新。由于模式层中本体结构的专业性水平较高,因此需要专业人员进行人工操作,包括概念的增加、删除、修改以及概念之间关系的更新。对于数据层的更新,包括实体以及实体间关系和属性值的更新,由于数据层的改动对整个知识图谱的架构影响较小,因此可通过选择可靠的质量评估指标来进行外部数据源的知识更新^[11]。铁路VR场景知识图谱涉及的实体对象多种多样,通过科学有效的手段判断知识图谱的准确性,对铁路VR场景构建的适用性,挖掘、推荐结果的置信度。

由此,本文根据通用知识图谱量化评估指标,构建了面向更新知识的质量评估模型 K_{level} 表达为:

$$K_{\text{level}} = x_1 f_1 + x_2 f_2 + x_3 f_3 + x_4 f_4 \quad (5)$$

式中, x_1 表示实体、实体-属性值、实体-实体关系这3种类型数据的准确性,例如某座桥是否仍然存在(实

体),桥的长度是否正确(实体-属性值),某铁路是否在桥上(实体-实体关系); x_2 表示评估更新的知识是否符合业务需求,例如查询与桥直接关联的实体集合是否正确,或是面对更为复杂的业务需求,检索结果是否正确; x_3 表示查询的响应时间性能,包括图模式匹配查询、导航式查询以及分析型查询3方面的查询效率; x_4 表示关系细粒度,例如桥梁类型,按用途分,有铁路桥、公路桥、人行桥等。按跨越障碍分,有跨河桥、跨谷桥、跨线桥(又称“立交桥”)等。按采用材料分,有木桥、钢桥、钢筋混凝土桥等。按桥面在桥跨结构的不同位置分,有上承式桥、下承式桥和中承式桥。同样对于实体之间的关系也应满足更细的粒度,因此对实体的分类多样化以及关系是否细粒度是知识质量的1个重要评估指标; f_i 为第 i 个指标的权重值,且满足 $\sum f_i = 1$ 。

根据所构建的更新知识质量评估模型,以从外部数据源抽取的新知识作为更新对象进行量化评估,进一步利用整数线性规划,将全时段分离为时点和时段,对2个时间阶段的知识价值进行分布计算,实现质量评估指标约束的外部知识动态更新。

2 案例分析

本文以某新建铁路桥梁VR场景为例,进行知识图谱构建并通过动态更新方法实现场景信息的实时管理与应用。首先,以TB 10012-2019《铁路工程地质勘察规范》、Q/CR 9129-2018《铁路隧道设计规范》等行业标准、铁路工程实体BIM模型、目标场景4D产品等作为数据源,围绕铁路VR场景要素的语义描述与关联关系,自上而下构建本体模型作为模式层,构建的场景本体能够对铁路VR场景进行较为完整、清晰的描述。然后,按照本文所述知识抽取、融合及表达方法,对照模式层本体进行数据层的填充和连接,形成完整的知识图谱。同时,本文采用目前最流行的属性图数据库 Neo4j,其使用局部索引代替传统的全局索引实现对图结构的数据组织,在查询顶点的邻接顶点、邻接边以及属性时,可以很大程度上减少计算量,实现需求的快速反应。铁路VR场景要素描述和相关多源监测数据通过知识图谱进行解析、关联和查询,其中查询到该场景内与桥梁要素相关联的其他要素包括修建的铁路工程、河流、覆盖山脉的植被、位于山谷中河流沿岸的人类聚集地、穿越山脉和河流的道路等,可视化显示了这些要素之间的关联关系。知识图谱示例如图8所示。

在本文应用场景中,随着铁路工程建设的不断推进,需要对桥梁和桥梁建设过程对其周边自然资源要

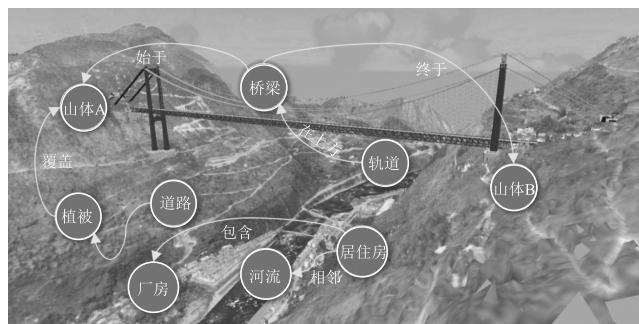


图8 某新建铁路VR场景知识图谱示例图

素和非自然资源要素产生的影响进行全面分析和评估,利用知识图谱动态更新方法,接入气象监测数据、GNSS数据等,对场景知识图谱进行可靠、高效的知识更新,动态更新的知识图谱有助于提高场景建模的准确性和信息管理的响应速度,为准确和透明的铁路工程全空间信息关联管理奠定了基础^[12]。知识图谱更新结果如图9所示。



图9 某新建铁路VR场景知识图谱更新结果图

3 结论

本文利用知识图谱这一重要的知识表达方式,通过构建知识图谱,厘清铁路VR场景多要素对象及其关系,为铁路虚拟场景的建模提供指导,有效地规范建模操作,确保建模工作顺利进行,有利于场景的高效分析,为铁路VR场景智能建模提供重要支持。

基于质量评估机制提出了一种知识图谱动态更新,提出了以数据准确率、需求满足度、查询的响应时间性能、实体是否多样化4个指标为依据更新知识图谱,确保了知识图谱的完整性、准确性,与知识挖掘、推荐结果的置信度。

参考文献:

- [1] 张吉祥,张祥森,武长旭,等.知识图谱构建技术综述[J].计算机工程,2022,48(3):23-37.
ZHANG Jixiang, ZHANG Xiangsen, WU Changxu, et al. Survey of Knowledge Graph Construction Techniques [J]. Computer Engineering, 2022, 48(3): 23-37.

- [2] 王洋.基于铁路领域的知识图谱研究与实现[D].呼和浩特:内蒙古大学,2019.
WANG Yang. Research and Implementation of Knowledge Map based on Railway Field[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2019.
- [3] 王羽莹.铁路视频监控系统云存储技术方案研究[J].高速铁路技术,2018,9(4):71-75.
WANG Yuying. Research on Cloud Storage Technology for Video Monitoring System of Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2018, 9(4): 71-75.
- [4] 纪伟,吴桦林,谢鹏,等.基于云原生的中老铁路信息系统一体化方案研究[J].高速铁路技术,2022,13(4):114-119.
JI Wei, WU Hualin, XIE Peng, et al. Research on the Plan of Cloud-native Integration of Information System for China-Laos Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4): 114-119.
- [5] 陈悦,陈超美,刘则渊,等.CiteSpace知识图谱的方法论功能[J].科学学研究,2015,33(2):242-253.
CHEN Yue, CHEN Chaomei, LIU Zeyuan, et al. The Methodology Function of CiteSpace Mapping Knowledge Domains[J]. Studies in Science of Science, 2015, 33(2): 242-253.
- [6] LIU Jintao, SCHMID F, LI Keping, et al. A Knowledge Graph-based Approach for Exploring Railway Operational Accidents [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 207: 107352.
- [7] 朱庆,张利国,丁雨淋,等.从实景三维建模到数字孪生建模[J].测绘学报,2022,51(6):1040-1049.
ZHU Qing, ZHANG Liguang, DING Yulin, et al. From Real 3D Modeling to Digital Twin Modeling [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 1040-1049.
- [8] 朱军,党沛,江忆言,等.联合大语言模型和知识图谱的轨道交通特色GIS专业课程体系优化[J].测绘通报,2023(S2):23-28.
ZHU Jun, DANG Pei, JIANG Yiyang, et al. Optimization of the Rail Transit-oriented GIS Professional Curriculum System Combining Large Language Models and Knowledge Graphs [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(S2): 23-28.
- [9] PENG Fuchun, MCCALLUM A. Information Extraction from Research Papers Using Conditional Random Fields[J]. Information Processing & Management, 2006, 42(4): 963-979.
- [10] 吴闯,张亮,唐希浪,等.航空发动机润滑系统故障知识图谱构建及应用[J].北京航空航天大学学报,2024,50(4):1336-1346.
WU Chuang, ZHANG Liang, TANG Xilang, et al. Construction and Application of Fault Knowledge Graph for Aero-engine Lubrication System [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(4): 1336-1346.
- [11] 陈焯,周刚,卢记仓.多模态知识图谱构建与应用研究综述[J].计算机应用研究,2021,38(12):3535-3543.
CHEN Ye, ZHOU Gang, LU Jicang. Survey on Construction and Application Research for Multi-modal Knowledge Graphs [J]. Application Research of Computers, 2021, 38(12): 3535-3543.
- [12] XIONG Jing, LIU Guoying, LIU Yongge, et al. Oracle Bone Inscriptions Information Processing Based on Multi-modal Knowledge Graph[J]. Computers & Electrical Engineering, 2021, 92: 107173.