



# 铁路隧道钻爆法施工智能管理的安全质量进度 知识图谱构建方法

朱 庆<sup>1</sup> 王所智<sup>1</sup> 丁雨淋<sup>1</sup> 曾浩炜<sup>1</sup> 张利国<sup>1</sup> 郭永欣<sup>1</sup>  
李函侃<sup>1</sup> 王万齐<sup>2</sup> 宋树宝<sup>2</sup> 郝 蕊<sup>2</sup> 程智博<sup>2</sup>

1 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川 成都,611756

2 中国铁道科学研究院集团有限公司电子计算技术研究所,北京,100081

**摘要:**复杂艰险的山区环境和不确定的地理地质条件是影响铁路隧道施工建设安全、质量和进度的关键因素,面向智能化、精准化的施工管理,提出一种铁路隧道钻爆法施工安全质量进度知识图谱构建方法。首先,根据铁路隧道施工建设过程中与安全质量进度关联的人机料法环5类关键要素的概念与语义关系,设计了模式层自上而下和数据层自下而上双向协同的构建方式;然后,抽取实体及关系并进行融合、存储,完成模式-数据关联的知识图谱构建;最后,以某新建铁路隧道出口工区施工事件为例构建实例图谱。结果表明,该方法构建的知识图谱精细刻画了影响安全、质量和进度的关键要素属性、要素间语义关联关系以及互馈作用关系等,为铁路隧道钻爆法施工全过程的安全质量进度整体性、系统性的智能化管理提供了关键支撑,也为铁路隧道工程数字孪生奠定了基础。

**关键词:**铁路隧道;施工管理;知识图谱;安全质量进度;人机料法环

中图分类号:P208

文献标志码:A

隧道是铁路交通设施互联互通的关键节点与枢纽工程,“长隧”已成为复杂艰险山区铁路建造的新常态。同时,复杂艰险环境的地形地质条件、频发的山地灾害等对隧道建造技术和工程安全质量进度管理提出了更高的要求。例如隧道沿线地质条件极端复杂,且不良地质段落长,硬岩岩爆、软岩大变形、高地温、活动断裂、超高压富水断裂等不良地质问题突出,施工安全质量风险极高。对于这类复杂艰险山岭隧道,常采用钻孔、装药、爆破的钻爆法施工。钻爆法隧道施工作业复杂,涉及超前支护作业、开挖作业、装运作业等9类作业线,关系复杂且动态变化,需综合考虑人机料法环(man-machine-material-method-environment, 4M1E)等多因素影响。由于隧道工程综合作业场地狭小、作业面分散、隐蔽工程众多,人员配备、机械调度、原材料供应等因素也会对工期进度、工程质量产生直接影响;客观复杂的不良地质条件以及施工人员的主观不安全行为极

易酿成工程事故,对铁路隧道建设的安全、工期和施工质量造成严重危害。虽然经过长期探索,铁路部门逐步建立起以质量、安全、工期、投资、环保、稳定为核心管理要素的六位一体目标管理体系,其中安全、质量与进度三方面紧密关联,且存在复杂的链式影响作用。然而日积月累的海量数据仅有小部分被转化为领域知识<sup>[1]</sup>,且知识和方案以及系统依旧是分散的,各自针对单一问题,在实际执行过程中,缺乏多目标体系关联认知的科学决策机制和多角度综合感知的整体性、系统性智能管控措施。如何为铁路隧道钻爆法施工提供数据-模型-知识集成的智能化、整体化、精细化管理是当前铁路隧道建设领域研究的前沿难题<sup>[2-3]</sup>。数字孪生驱动的智能建造是最有潜力的途径,而构建安全质量进度语义关联描述的知识图谱是关键基础。

知识图谱本质上是一种结构化的语义知识库<sup>[4]</sup>,用以揭示和描述物理世界中的概念、实体及

其相互关系,可表述为一种有向图模型,其中图模型的节点代表各类实体或者概念,连接各节点的边代表概念或者实体之间的关联关系。知识图谱已成为人工智能从机器智能到感知智能再到认知智能进程中不可或缺的基本工具<sup>[4-8]</sup>。在铁路隧道建设领域,大多采用文献计量法进行统计、可视化知识图谱分析<sup>[9-10]</sup>,缺少铁路隧道施工安全质量进度多要素间关联关系的精细刻画,难以支撑复杂环境下智能化的精准管控。

本文以铁路隧道钻爆法施工事件为核心,围绕安全、质量、进度3个维度的施工考量指标,分析各项指标所关联的4M1E关键要素及其关联关系,构建铁路隧道施工领域知识图谱。利用知识图谱对现场的施工情况、安全风险等进行信息化管控,为数字孪生驱动的铁路安全质量进度智能管控提供新的理论方法基础。

## 1 知识图谱构建方法

知识图谱基本结构单元是实体-关系-实体或者实体-属性-属性值三元组,实体之间通过关系边相连形成网状结构。知识图谱的架构包括其自身的逻辑结构和构建所用的技术体系,逻辑结构又分为模式层和数据层<sup>[7]</sup>。通过现场调研、相关文献资料、专家交流梳理铁路隧道钻爆法施工过程中相关的工序、工艺和工法,从安全、质量、进度3个维度综合考虑铁路隧道钻爆施工领域知识图谱,其中涉及的关键影响因素可抽象归纳为4M1E这5类。

采用自顶向下和自底向上相结合的方式构建铁路隧道钻爆法施工知识图谱<sup>[1]</sup>，流程如图1所示。其中，自顶向下是指通过本体编辑器或者其他方式预先构建知识图谱模式层，通过领域本体设计搭建知识图谱的框架<sup>[11]</sup>，预先定义模式层中的上下位关系、语义关联关系、时空耦合关系等，形成清晰明确的概念层次结构。自底向上是针对铁路隧道钻爆法施工领域系统数据库、相关的专业领域文献资料、各类传感器数据以及行业标准等多源多模态数据，设计合适的知识抽取方法，对数据进行实体及其关系的抽取，并将不同源的知识进行对齐、合并、消歧，以及设计对应的底层数据存储方式，将抽取的知识关联到所设计的概念层中，完成概念层与数据层的关联映射，进而形成完整的铁路隧道钻爆法施工管理知识图谱。

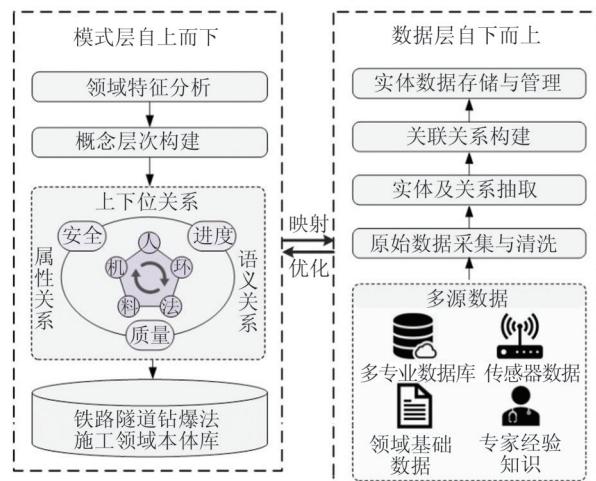


图 1 铁路隧道钻爆法施工知识图谱构建流程

Fig.1 Flowchart of Knowledge Graph Construction Process for Railway Tunnel Drilling and Blasting Construction Method

## 2 铁路隧道钻爆法施工安全质量进度本体模型

对于知识图谱的模式层,通常采用本体库进行管理,本体决定了知识图谱中的概念节点和关联关系,是构建知识图谱的重要依据,相当于知识库中的模板。如图2所示,以铁路隧道钻爆法施工事件为核心,围绕施工管理核心的安全质量进度,梳理关键4M1E 5类关键要素语义关联及时空耦合作用<sup>[12]</sup>,构建对应的本体模型。

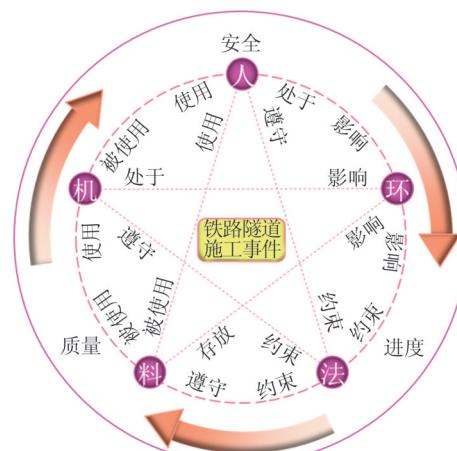


图2 铁路隧道钻爆施工场景关键要素及主要关系  
Fig.2 Key Features and Main Relationships of Railway  
Tunnel Drilling and Blasting Construction Scenes

## 2.1 关键要素分类

### 2.1.1 人员要素分类

在钻爆法隧道施工作业过程中,参与施工建设的核心要素“人”,包括自然人与法人单位/

组织等,参与施工的人员/机构作为整个工程建设过程中的参与者和执行者,其整体素质水平和技术操作能力的高低,以及质量安全意识的优劣会直接影响整个工程质量的好坏以及进度。对于人员要素的分类,参照数字孪生铁路实体要素分类中的人员要素分类以及隧道施工领域相关文献资料,分为自然人和组织/单位(法人)两类。其中,自然人包括负责工程项目整体运作的项目经理、生产经理、合约经理、管理人员、技术人员、质检人员等,组织单位则包括勘察设计单位、建设单位、检测单位、监理单位、咨询单位等,具体分类如图3所示。

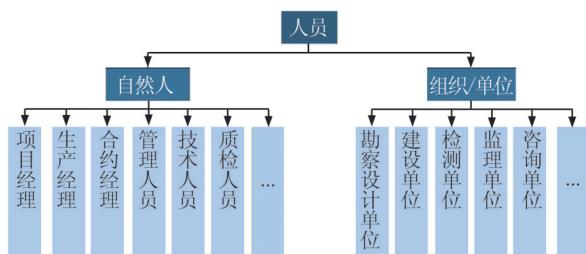


图3 人员要素分类  
Fig.3 Classification of Man Feature

### 2.1.2 机械设备要素分类

钻爆法施工涉及超前支护作业、开挖作业、装运作业、初期支护作业、仰拱施工作业、防水层施工作业、二次衬砌施工作业、沟槽作业以及其他辅助作业等9类作业线。每个作业流程均涉及大型机械化配套设施,此外还需要拌合站、钢筋加工场等大型临建设施为工程建设提供物资保障。随着物联网技术的不断发展,各类立体化动态监测设备也在不断接入施工作业现场,例如施工作业人员的可穿戴设备、各类监控影像设备、机械设备、监测点的多源传感器。这类机械设备或传感器的质量和运行状态也直接影响到工程进度及工程质量安全。根据已有的钻爆法施工成套装备体系研究内容,兼顾数字孪生铁路人机物三元空间融合的全景式感知-认知-控制相关理念,将机械设备要素划分为施工作业装备、传感监测设备两大类。每个大类可以继续细分小类,如按照施工工序推进的不同阶段,施工作业机械又可以分为超前作业装备(含高原型智能多功能钻机、智能注浆设备等)、结构作业设备(含仰拱桥模台车、钢筋铺设台车等),传感器设备则按照功能可分为计测用、监视用、检查用、诊断用、控制用、分析用等传感器,详细的分类如图4所示。

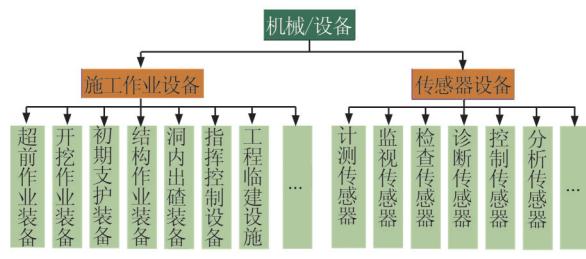


图4 机械设备要素分类  
Fig.4 Classification of Machine Feature

### 2.1.3 材料要素分类

施工过程中的材料是工程项目推进环节最基本的生产要素,是施工质量和工程安全的关键。钻爆法隧道施工关键的几道工序包含超前支护(小导管、中管棚、大管棚)、开挖(高段雷管、导爆索)、初期支护(锚杆、钢筋网、拱架、喷射混凝土)、仰拱、二次衬砌(土工布、防水板、止水带、钢筋、混凝土),所包含的各类工程材料包括原材料、成品、半成品、构配件以及为了完成施工任务而使用的周转性的材料和辅助用料等均属于材料要素。除此之外,钻爆法隧道施工过程中必然存在大量的文档记录表等数据资料,这些资料也属于材料要素。因此,将材料要素划分为施工材料、数据资料两大类,每个大类可以细分小类,具体分类见图5。

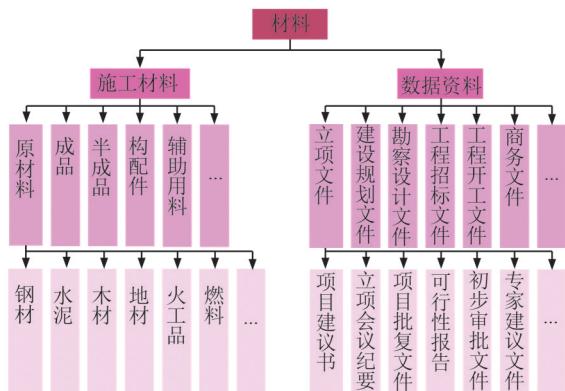


图5 材料要素分类  
Fig.5 Classification of Material Feature

### 2.1.4 方法法规要素分类

方法/法规要素是指施工生产过程中所遵循的规章制度等,主要包括施工过程中的各种标准规范、操作流程、作业标准、检验标准、工艺工法等,作为工程建设最基本的理论依据,是工程建设当中不可或缺的基础,能够及时准确地反映施工作业的进度以及产出成果是否符合既定产品质量要求,也能够有效规范和约束其他要素参与工程建设。依据铁路隧道钻爆施工断面成型控

制有关理论研究,将该要素分为技术方法和规章制度两大类<sup>[12]</sup>。每个大类可继续细分小类,例如技术方面主要包括及时预测前方围岩和断层破碎带等状况的综合地质预报方法,针对不同围岩等级采用适宜的开挖工法,如全断面法、台阶法、分部开挖法等;管理方面包括现场钻眼精度与验孔等工序质量控制方法等,具体分类见图6。

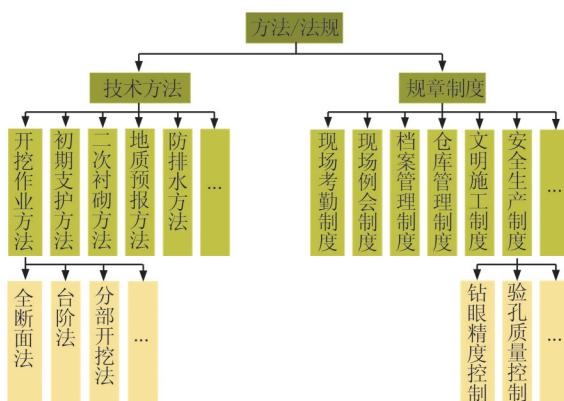


图6 方法法规要素分类

Fig.6 Classification of Method Feature

### 2.1.5 环境要素分类

环境是工程施工的载体,也是一个较为宽泛的概念,包含了自然环境、社会环境、作业环境3个大类概念,其中自然环境又包含地理地质环境、局部水文环境、气象条件以及地下障碍物等,如在地下高水位地区进行隧道钻爆施工作业,应考虑到突泥突水事故发生的可能性,提前准备排水方案;寒冷地区冬季进行焊接施工作业,考虑到气象气温等环境因素,保温或者预热措施不到位很有可能出现焊接部位裂纹等情况。社会环境则包含施工队精神文明环境、当前经济环境、所在地行业管理以及质量监管素质水平以及和施工相关的造价咨询等关联业务的市场成熟度等;作业环境则主要包括施工总平图和施工现场相关联的空间环境条件,例如隧道内粉尘浓度是否达标,瓦斯等有害气体是否降低到标准线以下等等。结合施工各个阶段的环境要求规划论证方案以及数字孪生铁路的实体要素分类标准等相关规则,环境要素分类情况如图7所示。

## 2.2 关键要素语义关联和时空耦合作用描述

构建知识图谱既要分析领域场景所包含的关键要素,构建知识图谱中的节点,同时还要分析用以连接节点的边,即节点间的关系。而知识图谱中,实体的关系分为属性(property)和关系(relation)两种<sup>[13]</sup>。实体关系描述实体间的关联状态,相当于事物与事物之间的联系,而属性刻

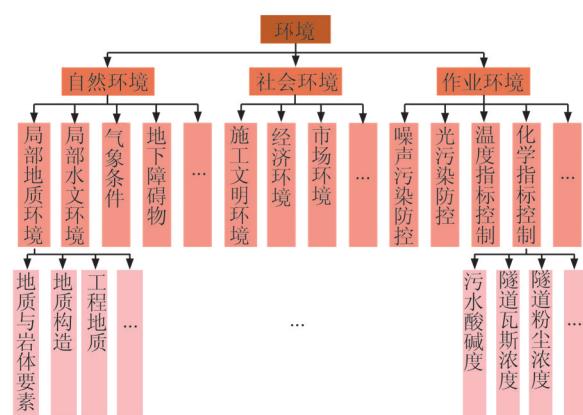


图7 环境要素分类

Fig.7 Classification of Environment Feature

画了实体内的信息,丰富了人们对事物本身的认识,属性和关系共同描述着要素内、要素间的语义关联及时空耦合作用。

从项目管理角度来看,安全质量进度这三者之间本身就存在着辩证统一的关系,安全是施工质量和进度的保障,质量是工程施工的根本,进度是施工安全与工程质量的具体实践。诸多实体要素间依旧存在语义关联或时空耦合关系,例如铁路隧道工程质量与隧道施工过程中的超欠挖、平整度等存在直接关联。若是超挖,衬砌量增多,则工程费用会因为超挖部分而大大提高,且局部超挖会导致围岩的稳定性得不到保证,进而存在安全隐患;而欠挖不仅改变了衬砌质量,还会导致隧道的开挖质量下降,为以后的运营带来极大的安全隐患等。整合上述分析,可将要素间的语义关联和时空耦合作用归纳为上下位关系、空间关系、时间关系、因果关系这四大类关系,而依据本体论,概念关系间依旧存在继承行为,对于不同的要素间的关系描述,可以对应使用不同的关系谓词<sup>[17]</sup>,相应的关系描述见表1。

### 2.2.1 上下位关系

上下位关系是一种语言学概念,其中概括性较强的词叫做特定性词的上位词,而特定性较强的词称为概括性较强词语的下位词<sup>[14]</sup>。在知识图谱领域,对于领域场景涉及的多类要素,首先进行要素的归纳分类,然后利用上下位关系描述要素间的层次关系。对§2.1中的关键要素进行分类,父类要素是子类要素的上位词,子类要素是父类要素的下位词。例如在人员要素分类中,自然人与组织/单位属于人员的下位词,而施工员又属于自然人的下位词,以此类推。

表 1 关键要素间语义及时空耦合关系

Tab.1 Semantic and Spatiotemporal Coupling  
Relationship Between Key Features

关联关系类型	细分类型	关系描述
上下位关系	—	描述要素间父子继承关系的实例关系
	拓扑关系	表达要素间的相交、相离、穿插等关系
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	表达要素间所处的位置间远近、亲疏关系
时间关系	工序衔接关系	描述要素之间产生相互作用的时间先后关系
	相互作用	揭示相关要素之间的互馈机制与逻辑关系
因果关系		描述要素在自然或人为作用下,或自身在时空演变过程中发生的性质、状态的变化
	行为过程	

## 2.2.2 空间关系

空间关系包含了拓扑关系、方位关系以及距离关系,用于表达关键要素之间的空间位置相关的信息,包含点、线、面、体等几何对象之间的空间关系,如地形地貌、地质体、人员机械设备等要素之间的空间拓扑关系。特定要素之间的空间拓扑关系与工程风险之间存在着较强的关联性。如通过超前地质预报发现隧道掘进前方围岩等级为 VI 级,即受构造影响而呈严重碎石、角砾或泥土状断层带的地质体位于施工作业环境之中时,表明前方围岩极易坍塌变形,甚至出现突泥突水现象,浅埋时易塌至地表,造成严重的安全隐患,如不及时给出应对预案,则会有极大的风险。

## 2.2.3 时间关系

时间关系用于描述时间变化特征较为明显的各类要素,主要体现在方法要素的衔接关系上。由于铁路隧道钻爆法施工工序需要具备足够的严谨性,对关键点的把握及控制应该更细致。当选定了具体的施工方案后,其工序步骤存在先后顺序,如果不按照既定的施工工序进行作业,轻则影响施工进度,重则产生安全隐患。因此,精准控制钻爆施工过程中的主要工序与关键节点逐渐成为有效提高施工水平、解决施工问题的手段之一。例如在对隧道洞口进行施工,首先需要对隧道边仰坡的实际情况进行考察,全面清除危岩、悬石,在确保施工环境安全才能进行下一步洞门施作、洞身断面开挖、超前支护等操作。

此外,对于每一种施工方法的物料也存在先后供给关系,只有充分结合关键施工节点,使得每个环节有序连接,才能安全快速推进施工。

## 2.2.4 因果关系

因果关系包含相互作用和行为过程两类子关系,是多要素间主要的关系表达,也是链式影响分析的基础。相互作用描述了 4M1E 多元互馈机制,关键要素间关系密切且错综复杂,任意一种因素的问题都有可能对整个工程项目产生安全质量进度方面的安全隐患,如针对材料要素,施工所用钢材的强度、水泥的标号与隧道质量有强相关性。除单一要素影响外,多因素的组合影响往往更加复杂,例如在钻爆法隧道施工过程中,经常会出现隧道瓦斯有害气体(环境要素),而隧道空间狭小,瓦斯浓度会逐渐升高,此时如果相应的瓦斯传感设备(机械设备要素)未能有效检测并报警,无法启动隧道通风设备(机械设备要素),则很有可能导致相关作业人员(人员要素)出现中毒迹象,造成严重的人员安全风险隐患。行为过程用于描述多要素随着时间推移而产生的性状或行为的变化,如设备设施在其生命周期中的老化磨损现象,隧道施工过程中,对山体进行削切挖掘,或者超载堆积工程废料(如土方、弃碴)会改变地层应力状态,随着时间的推移,会造成地面沉降等风险隐患。

基于以上实体要素分类以及关联关系,本文构建了铁路隧道钻爆法施工场景本体模型,如图 8 所示。

## 3 模式-数据关联的知识图谱构建

构建领域知识图谱就是对照着已构建的模式层进行对应实体和关系的提取和填充<sup>[6]</sup>,结合图 1 所示的知识图谱构建流程,在领域本体库概念框架指导下,针对已有的领域数据库以及相关文献资源等不同类型的数据源,抽取实体及其关系,并进行融合、存储,完成模式-数据关联的知识图谱构建。

### 3.1 数据特征分析及获取

铁路隧道工程建设领域数据一般来源于结构化数据、半结构化数据以及非结构化数据,整体上表现出较为复杂的多源异构、跨尺度多模态特征。在数据来源方面<sup>[15]</sup>,由于铁路隧道工程建设领域的行业特点,领域数据具有一定的封闭性,且大部分数据在互联网上并未公布,例如某新建铁路隧道正处于开工建设初期,大部分知识还是来源于领域专家或者内部已存在的结构

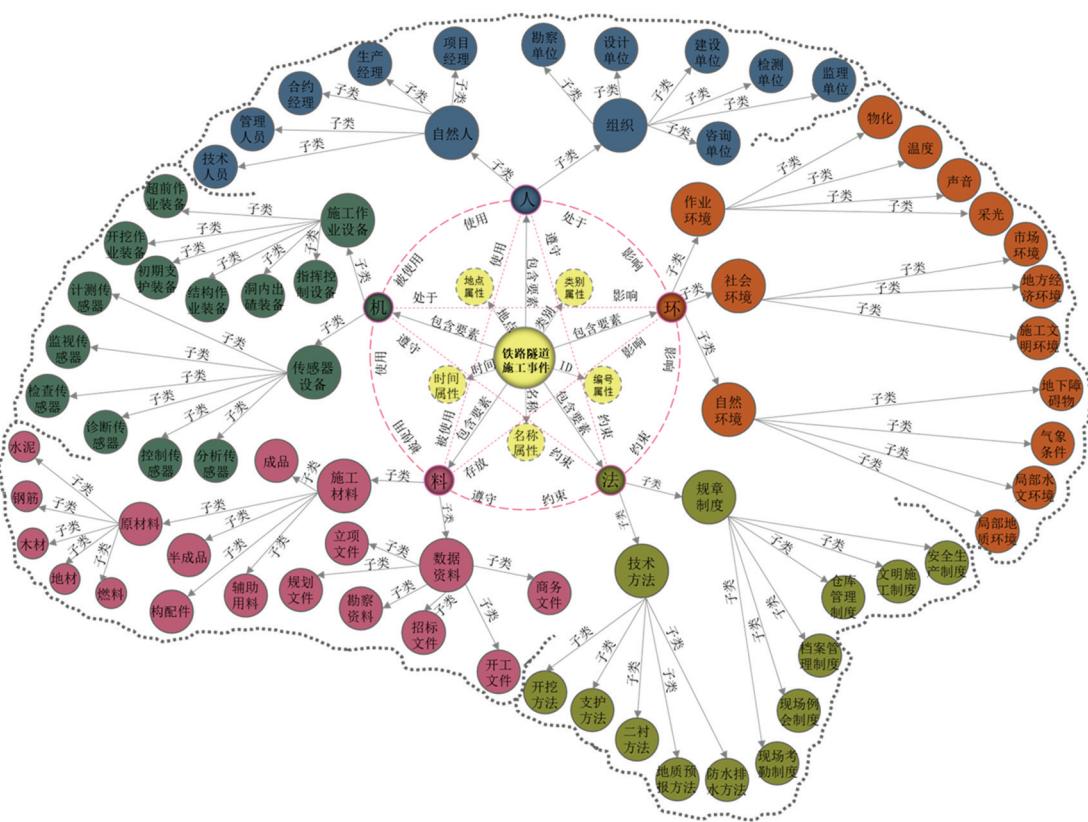


图8 钻爆隧道施工建设安全质量进度本体模型(部分)

Fig.8 Ontology Model of Safety-Quality-Schedule for Tunnel Drilling and Blasting Construction (Part)

化数据源,如空间数据库,专题数据库、叙词表等权威数据,以及现场采集到的实时上报数据等。

### 3.2 知识抽取

知识抽取主要是从多源异构的数据中获取知识,即得到承载知识表达的各类要素实体、实体属性以及实体间的关联关系。通用的知识抽取的方法有众包法、专家法、爬虫法以及机器学习等<sup>[16]</sup>。一般地,多源异构数据按照存储类型可分为结构化数据、半结构化数据以及非结构化数据。针对结构化数据,因其具有固定格式以及显式表达结构,一般分为关系数据库或者链接数据两种。对于链接数据,一般利用图映射的方法进行转换,而对于关系型数据库,则可以利用D2R工具进行转换,将关系表转化为资源描述框架(resource description framework, RDF)三元组。D2R工具可以将数据库中各个表映射为知识图谱中的某个类型,同时将表格中对应的一列设置为该类型的属性,每一行为一个实体,实体间的相互关系则通过表连接模式来表达。针对各类网页中的半结构化数据,通常是建立相应的模板封装器来进行抽取,一般是抽取对应的实体名、标签、扩展连接以及分类信息等,重点是要解决不同源的数据之间的实体消歧及融合。针对非

结构化数据(如各类文本数据),现阶段一般采用监督学习的方法,即通过已知的知识,通过远程监督的方式构建训练集,然后通过深度学习等方法对未知文本进行自动标注,抽取文本中的知识,此过程需要注意实体统一的问题,通常需要预定义一些基本规则来处理。

顾及到领域数据特征,本文仍基于知识模板,即铁路隧道钻爆法施工场景本体进行匹配。对应的知识模板由相应的领域专家维护,其中仅包含概念层中核心要素相关的结构化数据,以及各类场景对象的元数据信息,或者对部分的半结构化、非结构化数据进行人工预处理,转化为结构化数据,然后进行要素实体的分类抽取。当具有足够数据支撑时,可基于文本统计、深度学习以及自然语言处理等进行开放领域数据的获取、要素实体的识别提取,以及属性关系抽取等方面的研究。

### 3.3 知识融合与推理

由于知识抽取的数据多源异构,对于同一个概念的描述可能存在多种方式,通过知识抽取所获得的各类实体、属性以及实体间的关系间可能包含冗余或者错误的信息,数据之间也缺乏层次性和逻辑性,关系也是扁平化的,因此需要对其

进行知识融合,具体包括实体链接和模式对齐两部分内容<sup>[7]</sup>。实体链接是指根据给定的实体指称项,通过相似度计算等,将其链接到从知识库中选出的正确候选实体对象。例如对于铁路隧道建设过程中涉及到的钻眼爆破法与钻爆法以及矿山法实际上为同一概念,因此在构建知识图谱时可以对其进行合并。而模式对齐是要进行实体属性和属性值的融合,旨在判断两个或者多个属性是否表达同一个属性,将不同名字但是表征相同的属性进行整合,例如描述隧道施工人员的年龄属性与年纪属性,二者表述不一,但是为实体的同一属性值。

知识推理是在已有的知识库基础上,进一步挖掘出隐含的知识,从而丰富完善知识图谱,在推理过程中,一般需要关联规则的支持,对于推理规则的发掘,主要还依赖于实体以及关系间的丰富同现情况。知识推理包括实体关系的推理以及实体属性的推理两个部分。知识推理的方法主要分为基于逻辑的推理以及基于图的推理两种<sup>[7]</sup>,其中基于逻辑推理的核心在于定义链式推理规则,利用关联规则推理出新的语义关联关系。例如在铁路隧道施工过程中,工人的不安全行为往往是导致项目发生安全生产事故的重要原因,不遵守操作规程、技术素质低等都是人的不安全行为,当施工过程中发生事故时存在不遵守操作规程等行为,可以推理出不遵守操作规程是导致本次事故发生的直接原因等等。基于图的推理则将知识图谱中的要素实体作为节点,将实体属性或者实体间的关联关系作为边建立图模型,通过图中的两个实体节点间的多步路径来预测它们之间的语义关系,即在源节点根据相应的路径建模算法开始游走,如果能够顺利到达目标节点,即可说明二者存在语义关联关系,例如在图模型中存在节点A和B有共同的子节点C,若在满足一定的路径建模算法的条件下游走,包含游走路径  $A \xrightarrow{\text{包含任务}} C \xleftarrow{\text{包含任务}} B$ ,即A与B有相同的施工任务,则可推断出A与B之间的关联关系很有可能是同一个施工队的队友关系等。

### 3.4 知识存储

通过知识抽取将多源异构的数据转化为结构化的知识,对于结构化的知识存储,目前主流的方式有基于表结构和基于图结构两种<sup>[17]</sup>,分别对应关系型数据库和图数据库。基于表结构的存储对于单一要素数据存储表达清晰明确,但是对于多要素间的关系表达,涉及多表间的连接,

查询操作开销会随着要素数量呈指数级上升。而对于结构明确,实体属性及关联关系丰富的铁路隧道施工领域数据,图数据库的存储方式明显更占优势。本文采用基于图模型的Neo4j数据库对知识图谱进行存储表达,将知识基本结构单元中的实体-关系-实体或者实体-属性-属性值三元组两端实体存储为对应的节点,关系或者属性存储为连接节点的边,实现结构化的知识到图结构中的节点和边的一一对应,利用图结构存储知识,也可以利用图的相关挖掘算法对存储的知识展开进一步的延伸应用。

## 4 案例分析

以某新建铁路隧道出口钻爆法施工场景为例,进行知识图谱构建。首先,围绕安全质量进度3个维度,构建包含4M1E 5种核心要素语义关联和时空耦合关系,自上而下构建本体模型作为模式层,构建的领域综合本体能够对施工事件进行较为完整、清晰的描述,也有助于领域信息的共享及复用。然后,自底向上对照模式层进行数据层的填充和连接,从铁路工程管理平台、铁路参建单位等多种渠道获取多源数据,进行实体、属性值的抽取,将抽取到的实体、属性值以及关联关系进行知识融合,形成完整的知识图谱,并利用图数据库Neo4j存储以上节点及关系边。图9为铁路隧道钻爆法施工安全质量进度知识图谱,展示了部分节点及关系,浅黄色节点表示铁路隧道施工事件,与之对应的实例是某新建铁路隧道出口工区施工事件,其中与该事件节点相连的有所属项目、开工时间、起止里程、所属项目编号等属性节点,以及施工事件对应的方法要素节点钻爆法(深黄色)。对应隧道施工方法的还有相应的机械要素节点(绿色)与物料要素(粉色)节点,例如针对某新建铁路隧道钻爆法施工,需要用到三臂凿岩台车这类机械设备以及雷管等相应的爆破物料,机械设备又与相关的人员要素节点(蓝色)产生连接,表示人员与机械设备之间存在着操作等关系。例如,人员要素(张三)需要具体操作一台三臂凿岩台车来开展施工作业任务,人员要素又同时与法规制度要素产生连接,表示相关人员要遵照指定的规章制度来进行作业。此外,部分环境要素节点(橙色)也与方法要素节点有连接关系,例如属于局部地质环境实例的隧道围岩除了包含自身的围岩等级属性外,还会影响到对应的隧道施工方法,进而从方法层面

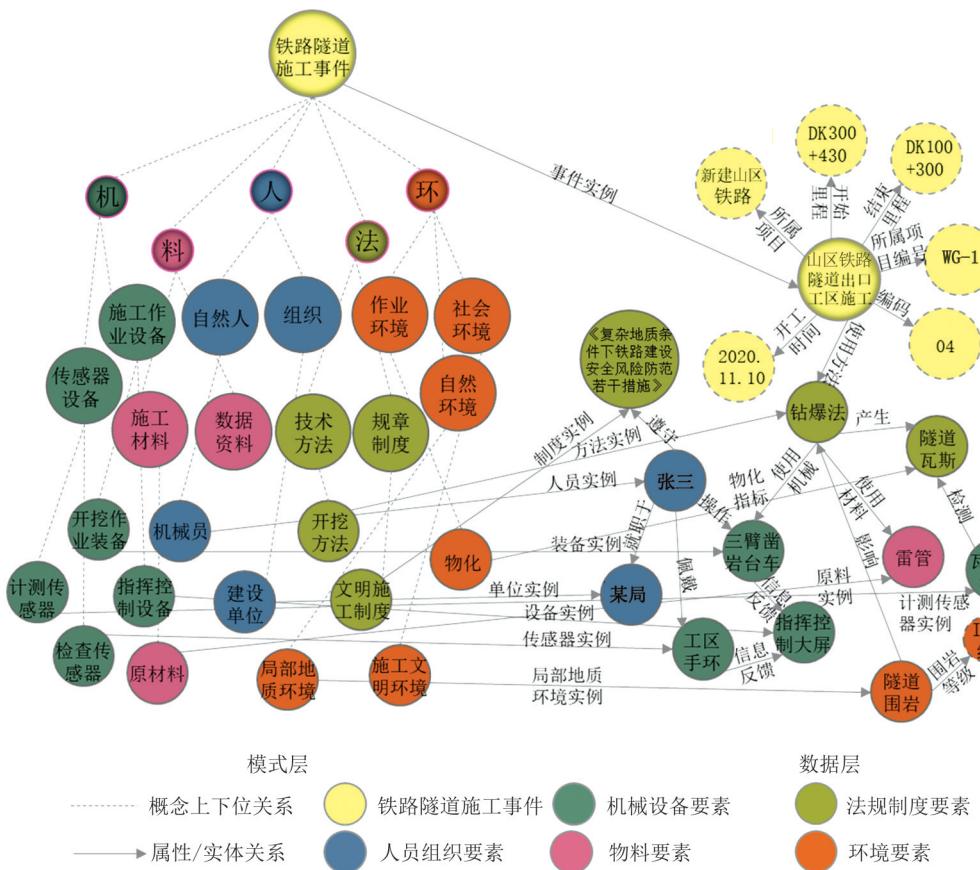


图9 铁路隧道钻爆法施工安全质量进度知识图谱(部分)

Fig.9 Knowledge Graph of Safety-Quality-Schedule for Railway Tunnel Drilling and Blasting Construction (Part)

再影响后续的支护或者材料选用等,即铁路隧道钻爆法施工过程中的多要素间是彼此关联的,对任一要素的改动往往会产生相应的链式影响。

## 5 结语

复杂艰险环境下的铁路隧道钻爆法施工面临着难以智能化、整体化、精细化管理的困境,容易增加工程项目在安全质量进度方面的隐患风险,针对此类问题,本文引入了知识图谱的相关理论和方法,对铁路隧道钻爆法施工领域安全质量进度3个主要维度涉及的4M1E5个关键要素进行了本体层面的概念分类描述和关联关系定义,构建统一的概念描述框架,并在框架指导下,通过数据获取、知识抽取、知识融合与存储等关键步骤,以某新建铁路隧道出口工区施工事件为例,构建了模式-数据关联的知识图谱。结果表明本文构建的知识图谱在概念、属性、语义关联以及时空耦合关联上能够较为丰富地展现多元要素实体间的丰富关联关系,为实现知识驱动的铁路隧道施工安全质量进度风险管控提供一种新的方法和视角,对于提高复杂艰险环境下的施工

效率,降低施工过程中的安全风险,实现数据-知识-模型集成表达的可持续数字孪生铁路建设具有重要意义。此外,对于隧道施工建设过程中存在的安全隐患、质量问题和进度推进状况的评估,参评要素众多,关系复杂且动态变化,要素间往往又存在链式影响,且内在机理交错复杂,隧道施工的工艺工法也会相应做出动态优化调整,因此在后续研究中,可基于施工现场多端传感设备等获得准确、实时的源数据来实现多目标综合感知的知识图谱动态更新。

## 参 考 文 献

- [1] Du Zhiqiang, Li Yu, Zhang Yeting, et al. Knowledge Graph Construction Method on Natural Disaster Emergency [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(9): 1344-1355 (杜志强, 李钰, 张叶廷, 等. 自然灾害应急知识图谱构建方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(9): 1344-1355)
- [2] Wang Tongjun. Railway Tunnel Construction Methods Evolution in China and Intelligent Construction Technology System and Prospects [J]. *China Railway*, 2020(3): 1-11 (王同军. 我国铁路隧道建造

- 方法沿革及智能建造技术体系与展望[J]. 中国铁路, 2020(3): 1-11)
- [3] Wang Tongjun. Development Status and Prospect of Intelligent Construction Technology for Railway Tunnel in China[J]. *China Railway*, 2020(12): 1-9 (王同军. 我国铁路隧道智能化建造技术发展现状及展望[J]. 中国铁路, 2020(12): 1-9)
- [4] 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 (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)
- [5] Qi Hao, Dong Shaochun, Zhang Lili, et al. Construction of Earth Science Knowledge Graph and Its Future Perspectives[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2020, 26(1): 2-10 (齐浩, 董少春, 张丽丽, 等. 地球科学知识图谱的构建与展望[J]. 高校地质学报, 2020, 26(1): 2-10)
- [6] Jiang Bingchuan, Wan Gang, Xu Jian, et al. Geographic Knowledge Graph Building Extracted from Multi-Sourced Heterogeneous Data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(8): 1051-1061 (蒋秉川, 万刚, 许剑, 等. 多源异构数据的大规模地理知识图谱构建[J]. 测绘学报, 2018, 47(8): 1051-1061)
- [7] Liu Qiao, Li Yang, Duan Hong, et al. Knowledge Graph Construction Techniques[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2016, 53(3): 582-600 (刘峤, 李杨, 段宏, 等. 知识图谱构建技术综述[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(3): 582-600)
- [8] Zhu Qing, Zeng Haowei, Ding Yulin, et al. A Review of Major Potential Landslide Hazards Analysis [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(12): 1551-1561 (朱庆, 曾浩伟, 丁雨淋, 等. 重大滑坡隐患分析方法综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1551-1561)
- [9] Zhan Qinglin, Chen Yubin. Quantitative Analysis on Literature on Safety Risk Management of Traffic Tunnel Construction[J]. *Engineering Construction*, 2020, 52(12): 68-73 (占庆林, 陈玉斌. 交通隧道施工安全风险管理的文献计量分析[J]. 工程建设, 2020, 52(12): 68-73)
- [10] Zhou Yu, Wang Jinhui, Zhang Shaogang. Knowledge Map of Tunnel Fire Research[J]. *Safety & Security*, 2020, 41(1): 53-59 (周雨, 汪金辉, 张少刚. 隧道火灾研究的知识图谱分析[J]. 安全, 2020, 41(1): 53-59)
- [11] Gruber T R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications [J]. *Knowledge Acquisition*, 1993, 5(2): 199-220
- [12] Zhang Jiankun. Six Elements Management of Section Forming Control in Drilling and Blasting Construction of Plateau Railway Tunnel[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2018, 30(3): 172-176 (张建昆. 高原铁路隧道钻爆施工断面成型控制“六要素”管理[J]. 西部探矿工程, 2018, 30(3): 172-176)
- [13] Li Weilian, Zhu Jun, Zhang Yunhao, et al. An On-Demand Construction Method of Disaster Scenes for Multilevel Users[J]. *Natural Hazards*, 2020, 101(2): 409-428
- [14] Chen Jindong, Xiao Yanghua. Hypernymy Relation Extraction Based on Semantics[J]. *Computer Applications and Software*, 2019, 36(2): 216-221 (陈金栋, 肖仰华. 一种基于语义的上下位关系抽取方法[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(2): 216-221)
- [15] Tan Jianmei. The Construction and Application of Earthquake Disaster Scene Knowledge Graph Concerned on the Demands of Multy-Type Users[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019 (谭剪梅. 顾及多类型用户需求的地震灾害场景知识图谱构建及应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2019)
- [16] Tao Kunwang, Zhao Yangyang, Zhu Peng, et al. Knowledge Graph Construction for Integrated Disaster Reduction [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(8): 1296-1302 (陶坤旺, 赵阳阳, 朱鹏, 等. 面向一体化综合减灾的知识图谱构建方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(8): 1296-1302)
- [17] Zhang Xueying, Zhang Chunju, Wu Mingguang, et al. Spatiotemporal Features Based Geographical Knowledge Graph Construction[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2020, 50(7): 1019-1032 (张雪英, 张春菊, 吴明光, 等. 顾及时空特征的地理知识图谱构建方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(7): 1019-1032)

# A Method of Safety-Quality-Schedule Knowledge Graph for Intelligent Management of Drilling and Blasting Construction of Railway Tunnels

ZHU Qing<sup>1</sup> WANG Suozhi<sup>1</sup> DING Yulin<sup>1</sup> ZENG Haowei<sup>1</sup> ZHANG Liguo<sup>1</sup> GUO Yongxin<sup>1</sup>

LI Hankan<sup>1</sup> WANG Wanqi<sup>2</sup> SONG Shubao<sup>2</sup> HAO Rui<sup>2</sup> CHENG Zhibo<sup>2</sup>

1 Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

2 Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Co. Ltd, Beijing 100081, China

**Abstract:** Objectives: The complex and dangerous mountainous environment, uncertain geographical and geological conditions are the key factors affecting the safety, quality and schedule of railway tunnel construction. Methods: Orient to intelligent and precise construction management, this paper proposes a top-down and bottom-up combination of railway tunnel drill safety-quality-schedule knowledge graph construction method, clarifies the conceptual connotation and semantic relationship for the five key elements of man-machine-material-method-environment(4M1E) related to safety-quality-schedule during the construction of railway tunnels, and designs a two-way collaborative construction method of mode layer from top to bottom and data layer from bottom to top, then introduces key technologies such as data acquisition and knowledge extraction. Results: Taking the construction event of a new railway tunnel exit work area as an example, we construct a case knowledge graph. The results show that the knowledge graph constructed by the method in this paper finely depicts the key element attributes that affect safety-quality-schedule, the semantic relationship between the elements, and the mutual feedback relationship, etc. Conclusions: Our proposed method provides key support for the overall systemic intelligent management of safety-quality-schedule in the whole process of railway tunnel drilling and blasting construction, and also lays the foundation for the digital twin of railway tunnel engineering.

**Key words:** railway tunnel; construction management; knowledge graph; safety-quality-schedule; 4M1E

**First author:** ZHU Qing, PhD, professor, majors in digital photogrammetry, GIS and VGE. E-mail: zhuq66@263.net

**Corresponding author:** DING Yulin, PhD, associate professor. E-mail: dingyulin@swjtu.edu.cn

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China(41941019).

**引文格式:** ZHU Qing, WANG Suozhi, DING Yulin, et al. A Method of Safety-Quality-Schedule Knowledge Graph for Intelligent Management of Drilling and Blasting Construction of Railway Tunnels[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(8): 1155-1164. DOI:10.13203/j.whugis20210573(朱庆, 王所智, 丁雨淋, 等. 铁路隧道钻爆法施工智能管理的安全质量进度知识图谱构建方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(8):1155-1164.DOI:10.13203/j.whugis20210573)