



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目： 铁路地理地质数据“本体域-变化域-状态域”三域关联的集成表达模型
作者： 张利国, 丁雨淋, 朱庆, 陈曦, 李函侃, 郭永欣, 王玮
DOI: 10.13203/j.whugis20220010
网络首发日期: 2022-10-19
引用格式: 张利国, 丁雨淋, 朱庆, 陈曦, 李函侃, 郭永欣, 王玮. 铁路地理地质数据“本体域-变化域-状态域”三域关联的集成表达模型[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220010>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20220010

引用格式:

张利国, 丁雨淋, 朱庆, 等. 铁路地理地质数据“本体域-变化域-状态域”三域关联的集成表达模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220010 (ZHANG Ligu, DING Yulin, ZHU Qing, et al. A Holistic Multi-domain Association Model for Railway Geographical and Geological Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220010)

铁路地理地质数据“本体域-变化域-状态域”三域关联的集成表达模型

张利国^{1,2}, 丁雨淋¹, 朱庆¹, 陈曦¹, 李函侃¹, 郭永欣¹, 王伟³

1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756
2. 川藏铁路有限公司, 四川 成都, 610045
3. 轨道交通工程信息化国家重点实验室(铁一院), 陕西, 西安, 710043

摘要: 面向铁路全生命周期沿线地理地质环境精准感知需求, 针对持续变化的铁路地理与地质数据长期以来各自独立表达、分散管理、难以深度融合等问题, 本文提出了铁路地理地质数据“本体域-变化域-状态域”三域关联的集成表达模型, 以地理地质环境要素“时空变化”链式关联为中心, 定义了时空变化参与者(要素)、驱动力(事件)和呈现模式(过程), 定义了状态级-实体级-过程级多层次时空变化关联关系, 构建了轴面一体的铁路地理地质数据知识图谱, 描述了“状态域-变化域-本体域”纵向映射轴、“对象-事件-过程”横向关联面之间的轴面关联关系, 提出了知识图谱引导的“状态级-实体级-过程级”时空变化多域关联, 分析了该模型在铁路高陡边坡施工典型应用中的重要意义和巨大应用潜力。

关键词: 铁路地理地质环境; 铁路地理地质数据; 多域关联; 知识图谱; 时空变化

中图分类号: P333 **文献标识码:** A

铁路工程面临环境与工程多要素、多过程互馈作用和级联效应引发的综合风险挑战, 沿线地上-地表-地下集成表达的地理地质环境^[1], 是整个数字孪生铁路的基准框架, 是全生命周期综合风险精准感知、优化设计和智能管控的关键支撑。铁路立体综合勘察、超前地质预报、空天地遥感等持续动态揭示沿线环境的时空变化^[2], 产生了海量多源异质、复杂关联的地理地质数据^[3,4]。集成表达与关联管理地理地质环境多源异质数据, 有助于实现地上-地表-地下多场耦合作用下的复杂时空过程精细模拟分析、以及更精准的诊断性和预测性空间智能服务^[5-8]。常规铁路信息系统采用分阶段、分环节、分部门、分专业、分散管理地理地质数据^[9-13], 未考虑多要素行为及相互作用关联, 不具备全线范围多尺度多场耦合建模与深度关联分析能力, 亟需更有效的地理地质数据集成表达与关联管理手段, 提升对铁路整个复杂巨系统的可预测性和可控性。

在空间信息领域, 为了能够实现时空要素时间-空间-属性的集成表达, 发展了一系列时空数

据模型, 如基于状态的时空数据模型(序列快照模型)、基于时间的时空数据模型(基于事件、过程的时空)、面向对象的时空数据模型等^[14-18]。传统 GIS 数据模型以静态描述要素空间几何、专题属性为主, 缺乏对几何和时间的整体性表达并且关注单个实体对象内部的时空变化情况^[19-22]。采用这种方式构建的空间数据模型, 以矢量或栅格数据结构为基本管理单元, 将空间割裂成图层, 同一实体对象常被分裂划分到多个图层(不同的图幅或区域、不同的数据图层)^[23-25], 地理地质要素的时空连续性和完整性难以保证。对于关联关系的描述, 现有时空数据模型往往对时间和空间关系单独描述, 地上(气象)、地表(桥梁等基础设施、大型临时建筑、水文、生态、灾害)、地下(隧道、地质)等地理地质环境要素分散独立, 忽略了地理地质环境多要素实体内部和实体之间的时空关联关系, 在复杂相互作用关系的表达方面更显无力, 也意味着实体对象之间的互联互动和动态演化过程无法得到充分反映。因此亟需建立显式刻画各要素之间的互馈作用关系的铁路沿

项目资助: 国家自然科学基金(41941019); 西藏自治区科技计划项目(XZ202101ZD0001G)。

第一作者: 张利国, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为地理信息系统与虚拟地理环境。zhangliguo@swjtu.edu.cn

通讯作者: 丁雨淋, 博士, 副教授。dingyulin@swjtu.edu.cn

变化机理。铁路沿线地理地质环境的时空变化是由外界驱动力触发且遵循客观机理规律演化发展，因此在变化域定义了引发铁路地理地质环境变化的要素、驱动力（事件）和运行模式（过程）的抽象。其中，铁路沿线地理地质环境要素是物理世界不能再进一步细分为同一类型的实体，具备典型的时间、空间、属性和关系固有语义，是时空过程、事件必要的参与者。地理地质环境时空事件是地理地质环境时空变化的触发条件，是特定专题领域下地理地质对象发生“质变”的时空边界，作为对变化驱动力的抽象，为过程的运行提供了外部条件、环境解析和约束。地理地质时空过程是时空变化动态发展与演变模式，是实体变化所形成的综合变化谱系。

1.3 状态域

状态域是集成表达时空变化的表征，是铁路地理地质数据层，是最容易通过发现、感受和量测等手段进行直观认识和观察的域。状态域包含了地理地质要素的三个“基础分量”，即铁路地理地质的空间、时间、固有专题属性的语义表达。每个状态特征都具有严格意义的特征参量，表明具体参与到时空变化中的特征性质。

1.3.1 铁路地理地质环境要素空间表达

状态域的空间表达指对铁路广域范围地理地质环境要素空间特征及其空间关系建模，强调地理地质实体空间完整性和空间关联性，以克服“实体空间割裂”问题为目标。铁路地理地质空间表达对地理地质要素位置、形状、范围、几何路径等进行空间特征进行描述，由空间几何、空间语义、空间关系等组成。

1.3.2 铁路地理地质环境要素时间表达

时间表达依据铁路地理地质环境要素时空变化类型，对离散或连续变化进行描述，克服铁路地理地质要素时间表达断层问题。铁路地理地质环境要素时空变化以非规则非线性变化为主，例如地表崩滑体灾害过程、隧道开挖地质环境变化等。其中，铁路地理地质时间语义，由生命周期、时间粒度和时间关系等组成。铁路地理地质生命周期，侧重地理地质实体时间语义的关联性，除了涵盖铁路工程勘察设计-施工建造-运维管理的全生命周期域，也重点关注铁路施工过程中的施工作业周期，例如隧道的爆破-开挖-初支-二衬的工序循环周期等。

1.3.3 铁路地理地质环境要素专题表达

铁路地理地质环境要素专题表达主要是描述

铁路地理地质要素固有属性和专题特征，涵盖地理、地质、生态、灾害、气象等要素的固有属性对铁路地理地质要素时空变化的表征属性域、属性关系、专题分类与分级等语义描述^[30]；多源动态观测（例如超前地质预报、高陡边坡监测等），作为对地理地质时空变化的直接表征信息，也是铁路地理地质环境要素专题表达的重要组成部分。

1.4 铁路地理地质环境时空变化关联关系表达

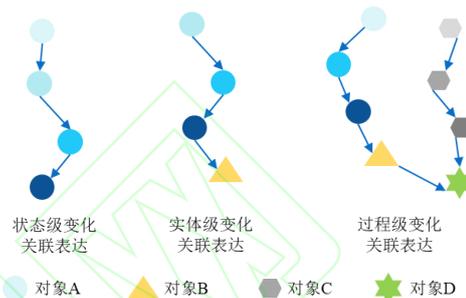


图 2 不同层级时空变化关联关系描述示意图

Fig.2 Schematic representation of the spatial and temporal change correlations at different levels

根据铁路地理地质环境时空变化内容，本文从全局到局部、从整体到个体，定义了“本体域-变化域-状态域”多域关联关系，具体包括状态级、实体级和过程级链式关联关系三个层次（如图 2 所示）：（1）状态级时空变化关联：对铁路地理地质环境要素自身状态变化进行关联表达；（2）要素级时空变化关联：对铁路地理地质环境要素的时空变化进行关联表达。（3）过程级时空变化关联：对铁路地理地质环境中时空过程相互之间的链式关系进行表达。每个层次均包含一种结构模式，内部会继续细分层次。高层次模式向低层次模式的识别提供引导；低层次模式识别向高层次提供输出，通过状态级、实体级和过程级链式关联关系，将铁路全域全生命周期的跨空间、跨时间、跨尺度的离散时空窗口进行时空连续性、关联性、完整性关联表达。

第一层次 铁路地理地质环境要素状态级变化关联关系：铁路地理地质环境要素实体内部变化表达主要描述实体状态上的“量变”，用于持续跟踪地理地质环境对象全生命周期发展过程。例如铁路临时建筑对象从设计、施工、运维全生命周期的产生到消亡发展过程；又如跟踪记录高陡边坡峡谷桥高陡边坡形变过程，地表形变、几何范围等不断变化。状态级时空变化关联关系，包括时间、空间和属性关系等。状态级变化关联关

系可利用关系函数显式描述，例如空间关系和时间关系均具备可计算性，因此该类关系利用关系函数进行显式表达，通过空间关系计算（方位关系计算、拓扑关系计算）、时序关系计算、尺度关系计算等，将语义关系结果填充至语义框架即可。铁路地理地质环境要素属性关系是指相关要素属性之间的关系表示，包括聚集、概括、隶属等；铁路地理地质主题隶属关系，沿用和参考团队前期研究中铁路地理地质全要素分类分级标准进行定义^[30]。

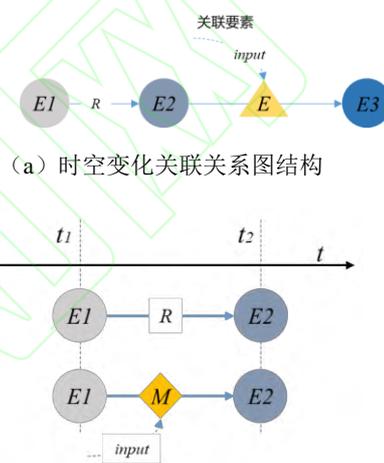
第二层次 铁路地理地质环境时空事件触发的要素级变化关联关系：铁路地理地质环境时空事件是要素对象发生“质变”的时空边界，在状态级时空变化关系表达基础上，进一步由微观尺度向宏观尺度发展描述时空发展中具关联关系实体系列“质变”，刻画相关要素或要素系列之间的时空发展关联关系。例如，高陡边坡岩堆体松动、形变、滑移、灾变等全过程时空变化描述，在“要素状态变化”表达的基础上对“实体级变化”建模，即根据实体因合并、分裂、衍生、融合、重分配等“质变”事件而产生出新的要素实体。例如，峡谷桥高陡边坡岩堆体形变过程演变成灾变，这里形变到灾变即可用第二层次来描述前后衍生关系。实体级变化关系描述的是不同实体物理量之间的数值关系，一般由数值机理模型表达。其中，数值模型常微分反应的是两种变量相互作用关系，而偏微分则是两种以上变量之间的相关作用关系，当涉及到更多变量的复杂连续变化，就是用微分方程组来描述。

第三层次 时空过程级链式变化关联关系：在状态级和要素级时空变化关联关系表达的基础上，进一步对宏观尺度复合地理地质环境时空过程进行描述，进一步刻画不同过程之间的链式耦合关系，具体包括复合-叠加-遭遇-链生等关系，最终构建横向与纵向关联的多层次时空变化链。铁路全生命周期沿线广域范围地理环境演变时空过程、全生命周期全域地质环境演变过程等，这些过程由一系列关联或者不关联的地理地质要素演变所组成，比如不同区段不同尺度不同阶段铁路地理地质环境时空过程演变过程，则由区域尺度地表形变、工程尺度地表灾变、施工面尺度洞内应力灾变等时空演变所组成。过程级链式变化关联关系，定义了宏观演变格局层面的时空关联，由该类关系是由前两层级关系复合而成。

2 知识图谱引导的“状态级-实体级-过程级”时空变化多域关联

2.1 基于知识图谱的铁路地理地质环境时空变化多域关联关系显式描述方法

为了有效地表达时空变化所关联的铁路地理地质环境要素及相互之间的关系，本文利用资源描述框架（RDF）三元组对铁路地理地质环境要素时空关系图进行建模和描述，以此作为知识图谱基本结构单元，以达到支持空间数据-机理模型-专家知识等一体化集成与关联管理目的（如图 3 所示）。



(b) 添加模型节点的时空变化关联关系图结构示意图

图 3 时空变化多域关联关系描述

Fig.3 Representation of multi-domain association relationship

铁路地理地质环境时空变化关系图最基本三元组可以表示为 $En_{tri} = \{E1, R, E2\}$ ，其中节点 $Node = \{L, P, IN_RID, OUT_RID\}$ 用来描述铁路地理地质环境要素；时空变化关联关系 $Relationship = \{START_NID, END_NID, TYPE, MID\}$ 用于描述不同时空变化要素节点之间具体的关联关系，定义了时空变化关联关系的起始节点、终止节点与关系类型。对于铁路地理地质信息“本体-变化-状态”三域关联的知识图谱最基本结构单元可以表示为 $Unit: E1 \rightarrow E2$ 。图 3(a)描述了地理地质状态级时空变化的关联结构，例如 E1 依赖于 E2；对于要素级和过程级时空变化要素节点之间的动态、复杂的相互作用和变化过程需要在此基础上进行扩展表达。另外，在时空变化关系结构中引入了模型 Model 概念（图 3 (b)），形成新的时空关系图结构 $En_{tri} = \{E1, R(m), E2\}$ 。对于

描述时空变化演变机理的 $Model = \{DESC, TYPE, RID, INPUT, OUTPUT, API_URL\}$ ，模型具有所属类型、模型输入参数、输出结果、模型库等信息。通过将输入参数带入模型库计算服务，可以计算和模拟出对象之间动态且复杂的变化和相互作用过程。

2.2 知识图谱引导的时空变化多域关联检索

长周期铁路工程地理地质环境时空变化是气候、气象、地质营力、工程扰动等多因素相互作用导致的综合结果。多域关联使主体三域综合为一个整体，本文以知识图谱引导多域关联（图 4），利用知识图谱上的时空变化模式或关联簇，关联查询与检索应用相关的数据-模型-知识资源，从而实现空间数据-机理模型-专家知识一体化集成的多场耦合建模与深度关联分析能力。铁路地理地质时空变化模式图或关联簇是知识图谱中存储管理的地理地质环境要素之间相互作用关系的一种抽象表述，任何一组自然资源及其相关联的资源对象之间的某种关系均可以抽象概括为一种关系模式。本节知识图谱引导的多域关联查询检索方法是基于铁路地理地质环境“数据-模型-知识”关联管理的地理地质环境要素之间交互的抽象表示。通过将这一种时空变化模式带入到知识图谱中进

行挖掘和匹配，能够得到与该模式相匹配的多种可能结果集。时空变化模式匹配包含节点簇匹配和图匹配两种，点簇匹配是查询知识图谱中是否存在与目标要素一致的子图结构，该查询模式只关注节点之间的连接结构，而不关注数据节点和关系边存在的语义特征。而另外一种顾及图匹配方法则是在结构匹配的基础上，增加了对节点类型、属性以及关系类型的过滤，以实现结构和语义的精准匹配。由于铁路地理地质环境时空变化要素或变化模式具有高度不确定性，因此在铁路地理地质环境空间数据-机理模型-专家知识一体化集成的多场耦合建模与深度关联分析场景中，需要时空变化模式、要素及关系、时空属等之间的深度关联匹配。针对地理地质时空变化的层次性，以时空变化为中心，建立低维状态域数据特征和高维变化域模型全局关联机制，即以知识图谱的语义链、簇，描述三域之间对象的关联关系。其关键在于，当不同模式在概念层被识别出来后，通过有向边发送信号，与下一个更高层级的模式建立链接，其输出结果将成为下一个模式识别的输入；当多个概念输出到数据层后，被激活的数据节点通过模式和语义关系建立连接，最终形成完整的数据链，从而完整保留地理地质要素或数据之间的时空关联。

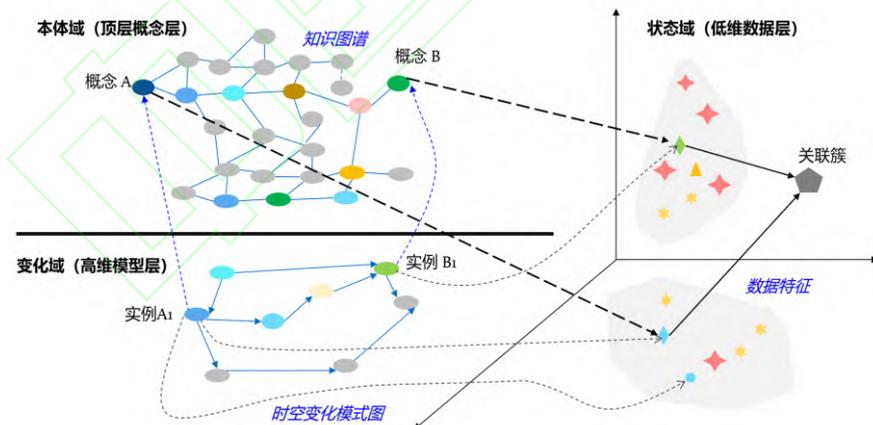


图 4 基于知识图谱的多域关联与映射框架

Fig.4 A framework for multi-domain association and mapping based on knowledge graphs

3 典型应用场景

本文以铁路沿线安全环境精准管控应用验证为例，利用文中提出的多域关联表达模型，实现铁路地理地质数据的元数据描述和关联表达。以重大铁路隧道工程为例，沿线复杂地理地质环境

及各要素相互作用复杂，岩爆、软岩大变形、有害气体、高地温等不良地质问题突出。现有隧道地理地质数据种类主要包括区域地质数据（1:25 万/1:20 万/1:5 万区域地质图、1:20 万工程地质图、水文地质图、区域气象数据等）、遥感解译成果图（高分辨率多模态卫星遥感影像、遥感地质解译

成果等)、地质调绘成果(工程地质平面图)、工程地质评价成果、勘探(钻孔)、孔内测试、地质

BIM 模型等勘察期地质数据等、超前地质预报数据等。

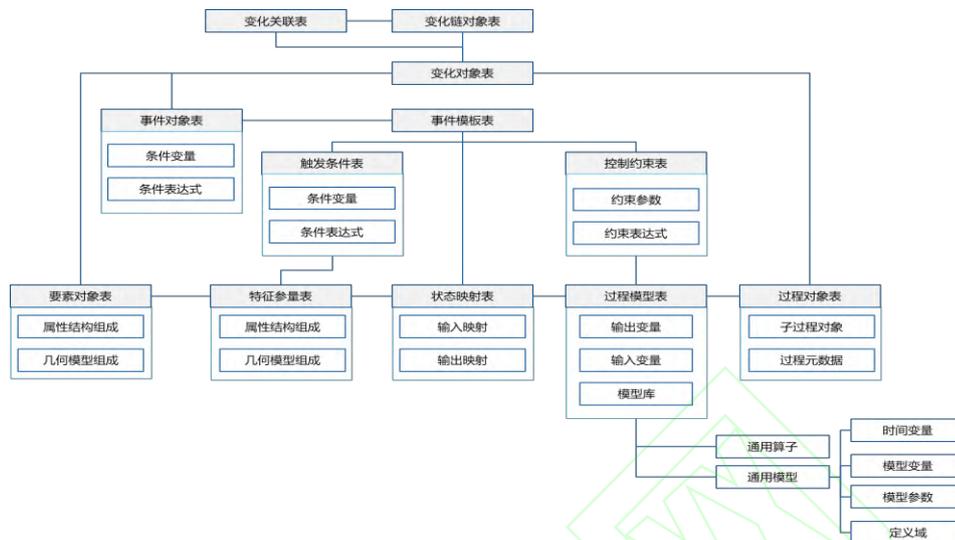


图 5 铁路地理地质时空变化多域关联的 GIS 数据库关系图

Fig.5 GIS database relationship map

本文设计了铁路地理地质多域关联表达数据库结构(图 5),定义了 12 个基础的铁路地理地质时空变化对象表:铁路地理地质时空变化链对象表、时空变化关联表、变化对象表、事件对象表、控制约束表、过程模型表、要素对象表、特征参量表、状态映射表、触发条件表等。其中,铁路地理地质时空变化数据层的状态表结构,包括铁路地理地质要素表和时空变化特征参量表;要素对象表主要是用于定义要素集与要素元数据;特征参量表定义了地理地质要素的空间与专题属性存储结构。铁路地理地质时空变化模式层包括相

互映射与关联的过程对象表(定义过程对象元数据)和过程模型表(定义机理模型元数据信息,包括模型类型、运行环境、输入/输出、参数集等)。铁路地理地质时空变化的外界出发条件通过定义事件模板来描述,存储于事件模板表,主要定义地理地质时空变化状态的状态映射集合、触发时空变化的外界条件表和控制时空演进的条件约束等。铁路地理地质数据“本体域-变化域-状态域”三域关联表结构,状态映射表建立输入和输出之间的关联,利用触发条件表建立过程模型与事件模板之间的关联。

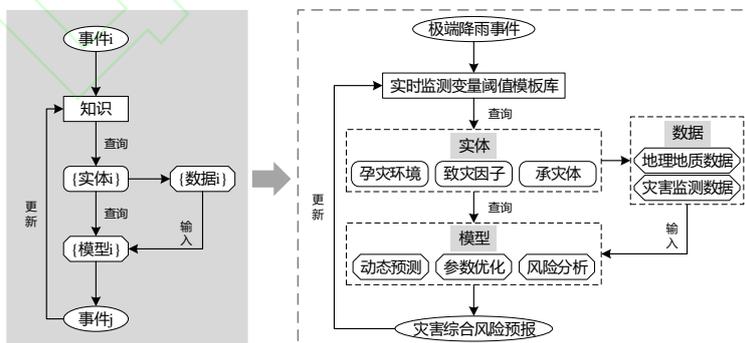


图 6 高陡边坡铁路工程地质灾害综合风险精准管控应用的多域关联流程

Fig.6 Multi-domain association process for railway geological disaster risk management

根据三域关联表达建模方法,面向高陡边坡铁路隧道地质灾害综合风险精准管控应用的地理地质多域关联具体流程如图 6 所示。基于铁路地理地质环境“本体域-变化域-状态域”三域关联表达

系统架构,本文以不同工况下高陡边坡崩塌滑坡等灾害形成过程中所涉及的铁路地理地质环境时空变化要素和要素间的相互作用为例进行分析,能够将铁路工程高陡边坡地质灾害信息通过知识

图谱进行解析、关联和查询。此外，简单或复合的地质灾害风险机理模型有助于确定在灾害形成

和实体间相互作用过程中内在和隐式的关系。

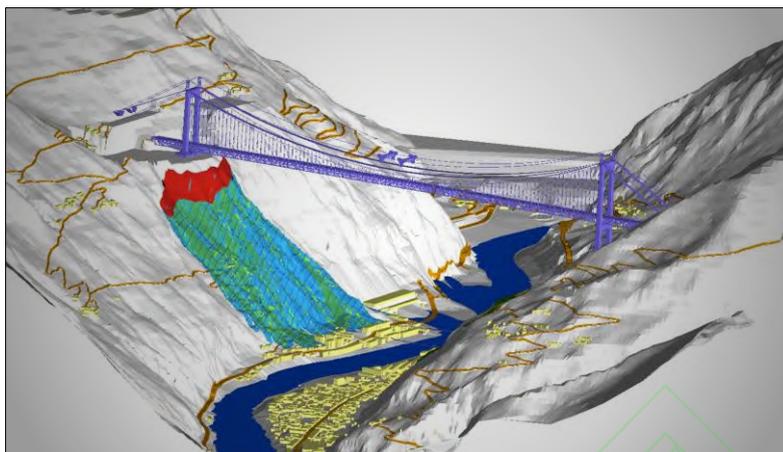


图 7 铁路工程高陡边坡崩塌过程场景要素

Fig.7 Elements of high and steep slope collapse process scenarios for railway

已知铁路工程高陡边坡崩塌滑坡地质灾害承灾体、致灾因子、孕灾环境构成要素，采用“本体域-变化域-状态域”三域关联表达模型构建铁路桥梁工程地质灾害风险情景（图 7）。通过知识图谱查询与崩塌灾害过程相关联的其他实体，查询到该范围内与崩塌灾害关联的实体包括高陡边坡上的施工便道、覆盖在高陡边坡上的植被/农田、架设在高陡边坡两岸的桥梁、影响地质灾害的地下地质断层、位于河谷的河流、河流沿岸的建筑物等。当致灾因子降雨激发潜在灾害发生时，通过关联表达模型构建这些实体之间的关系。面向铁路工程施工安全精准管控，当高陡边坡地质灾害事件发生时，向知识图谱发出任务信号，然后触发由复杂语义关联和链接计算组成的时空查询。多层次的实体节点被激活并组合成一个复杂的语义框架供进一步查询，通过映射关系和机理模型层输出到数据层。并且数据层的相应节点作为模型的输入被激活，并同时更新。在“本体域-变化

域-状态域”三域关联表达模型的作用下，我们应用更高层次的模式来预测或分析事件，输出结果成为更新知识图谱的输入。当多个实体节点输出到数据层时，激活的数据节点通过模式和关系连接，最终形成完整的数据链，至此，更新铁路地理地质要素实体之间的时空关联关系。在该应用场景中，当该区域出现强降水时，通过知识图谱中的极端降雨事件模板结合高陡边坡形变监测传感器监测数据，判断高陡边坡是否出现异常变化。当高陡边坡崩塌事件发生时，进一步关联检索与用于崩塌灾害风险分析评估的机理模型，以此提前预判和预报桥梁工程高陡边坡上的施工便道等要素风险情况。通过“本体域-变化域-状态域”三域关联表达的知识图谱，显式描述铁路地理地质要素实体与灾害事件之间的相互作用关系，进一步通过知识图谱可以推理出灾害链式作用下的风险态势，从而指导铁路工程施工安全风险的主动防控。



图 8 铁路高陡边坡崩塌灾害多域关联的知识图谱

Fig.8 Multi-domain association process based on knowledge graph

4 结论

针对铁路全域全生命周期地理与地质数据长期以来各自独立表达、分散管理，导致在复杂环境下长大线路的勘察设计、施工建设及运营管理等智能化应用分析，难以深度融合多源地理地质数据，本文提出了本体域-变化域-状态域三域关联的集成表达模型，该模型的特点和创新性包括：① 以铁路地理地质时空变化为中心，实现铁路地理地质“本体域-变化域-状态域”的三域关联表达；② 定义了铁路地理地质多层次地理地质知识图谱，描述了状态级、实体级和过程级时空变化关联关系及链式影响作用；③ 设计了知识引导的铁路地理地质多域关联流程，实现了由传感器实时监测-地理地质事件动态感知-地理地质时空过程模型关联分析-地理地质要素当前状态分析与未来趋势预测。以高陡边坡铁路隧道地质灾害综合风险精准管控应用为例，分析了本文模型的可行性，有助于地理地质数据-模型之间的关联与映射，进一步支撑铁路全线范围区域尺度-桥隧工程尺度以及动态施工面精细尺度的地上-地表-地下复杂环境高精度实时动态变化、空间数据-机理模型-专家知识一体化集成的认知计算能力与表达效率的提升。进一步将研究考虑地理地质数据与模型的高效存储管理等关键技术。

参考文献

[1] Wang Tongjun. Overall framework and

development prospect of intelligent railway[J].

Railway Computer Application, 2018, 27(7): 1-8

(王同军. 智能铁路总体架构与发展展望[J]. 铁路

计算机应用, 2018, 27(7): 1-8)

<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=TLJS201807004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>

<https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=TLJS201807004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>

[2] Kurwi S, Demian P, Hassan T. Integrating BIM and

GIS in railway projects: A critical review[J]. 2017.

[3] Qin Li, Zhao Ke, Li Pengyun. Research on

Applications of BIM + GIS Technology in Bridge

Construction[J]. Journal of Information Technology

in Civil Engineering and Architecture, 2017, 9(5):

56-61 (秦利, 赵科, 李鹏云. BIM+GIS技术在桥梁

工程施工中的应用研究[J]. 土木工程信息技术

, 2017, 9(5): 56-61)

<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=TMJZ201705010&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>

<https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=TMJZ201705010&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>

[4] Gao Y, Qian S, Li Z, et al. Digital Twin and Its

- Application in Transportation Infrastructure, 2021[C]. 2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI), 2021,pp.<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9540108>
- [5] Gao Y, Zhang Y, Alsulaiman H. Spatial structure system of land use along urban rail transit based on GIS spatial clustering[J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2021, 54(sup2): 438-445. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1801356>
- [6] Ding Y, Fan Y, Du Z, et al. An integrated geospatial information service system for disaster management in China[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2015, 8(11): 918-945. <https://doi.org/10.1080/17538947.2014.955540>
- [7] Liu Gang, Wu Chonglong, He Zhenwen, et al. Data model for geological spatiotemporal big data expression and storage management[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2020, 39(1): 164-174 (刘刚, 吴冲龙, 何珍文, 等. 面向地质时空大数据表达与存储管理的数据模型研究[J]. *地质科技通报*, 2020, 39(1): 164-174) <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DZKQ202001020&dbname=CJFD&dbcode=CJFQhttps://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DZKQ202001020&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [8] Zhu Qing, Zhu Jun, Huang Huaping, et al. Real 3D Spatial Information Platform and Digital Twin Sichuan-Tibet Railway[J]. *High Speed Railway Technology*, 2020, 11(2): 46-53 (朱庆, 朱军, 黄华平, 等. 实景三维空间信息平台与数字孪生川藏铁路[J]. *高速铁路技术*, 2020, 11(2): 46-53) <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GSTL202002009&dbname=CJFD&dbcode=CJFQhttps://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=GSTL202002009&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [9] Keramati A, Lu P, Tolliver D, et al. Geometric effect analysis of highway-rail grade crossing safety performance[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020,138:105470.<https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105470>
- [10] Ning Xinwen, Zhu Qing, Ren Xiaochun, et al. Graphical Processing Method of High-Speed Railway Construction Progress Data[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2018, 53(2): 414-419 (宁新稳, 朱庆, 任晓春, 等. 高速铁路施工进度数据图形化处理方法[J]. *西南交通大学学报*, 2018, 53(2): 414-419) <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XNJT201802027&dbname=CJFD&dbcode=CJFQhttps://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XNJT201802027&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [11] Zhao Qiang, He Chenzhao, Yang Shizhi, et al. Transformation of Underground Space Models Based on IFC and CityGML——A Case Study of Utility Tunnel[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(7): 1058-1064 (赵强, 何陈照, 杨世植, 等. 利用 IFC 和 CityGML 进行地下空间模型转换——以城市综合管廊为例[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020,45(7):1058-1064) <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=WHCH202007016&dbname=CJFD&dbcode=CJFQhttps://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=WHCH202007016&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [12] Wei Y, Hu T, Zhou T, et al. Consistency retention method for CNC machine tool digital twin model[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021,58:313-322. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.002>
- [13] Kampczyk A, Dybeł K. The fundamental approach of the digital twin application in railway turnouts with innovative monitoring of weather conditions[J]. *Sensors*, 2021, 21(17): 5757. <https://doi.org/10.3390/s21175757>

- [14] Zhu Jie, You Xiong, Xia Qing. Battlefield Environment Object Spatio-Temporal Data Organizing Model Based on Task-Process[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(11): 1739-1745 (朱杰, 游雄, 夏青. 基于任务过程的战场环境对象时空数据组织模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(11):1739-1745)
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=WHCH201811020&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
<https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=WHCH201811020&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [15] Yawen S. A new process-oriented and spatiotemporal data model for GIS data[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, 42: 3.
- [16] Zhou Xiaoguang, Zhao Yijiang, Li Guangqiang, et al. Crowdsourcing Spatio-Temporal Data Model Considering Reputation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(1): 10-16 (周晓光, 赵肄江, 李光强, 等. 顾及信誉的众源时空数据模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(1): 10-16)
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=WHCH201801002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
<https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=WHCH201801002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [17] Xun Cunjin, Zhou Chenghu, Su Fenzhen, et al. Research on Process-oriented Spatio-temporal Data Model[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1). (薛存金, 周成虎, 苏奋振, 等. 面向过程的时空数据模型研究[J]. 测绘学报, 2010, 39(1).)
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=CHXB201001022&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
<https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=CHXB201001022&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [18] Liu Nan, Liu Renyi, Xie Jiong, et al. Management of massive spatial data based on feature-oriented object level model[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2004, 38(11): 1391-1397 (刘南, 刘仁义, 谢炯, 等. 基于实体对象层次模型的海量空间数据管理[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(11): 1391-1397)
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZDZC200411001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
<https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZDZC200411001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [19] Gong J, Geng J, Chen Z. Real-time GIS data model and sensor web service platform for environmental data management[J]. International Journal of Health Geographics, 2015, 14(1):1-13.
<https://doi.org/10.1186/1476-072X-14-2>
- [20] Oloo F, Wallentin G. An adaptive agent-based model of homing pigeons: A genetic algorithm approach[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2017, 6(1):27.
<https://doi.org/10.3390/ijgi6010027>
- [21] Amirebrahimi S, Rajabifard A, Mendis P, et al. A data model for integrating GIS and BIM for assessment and 3D visualisation of flood damage to building[J]. Locate, 2015, 15(2015):10-12.
- [22] Ding Yulin. Hydrological Changes Driven Storm Flood Disaster Simulation Method[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(2): 252 (丁雨淋. 水文变化驱动的暴雨-洪涝灾害主动模拟方法[J]. 测绘学报, 2016, 45(2): 252)
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=CHXB201602021&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
<https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=CHXB201602021&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [23] Chen S, Tan J, Claramunt C, et al. Multi-scale and

- multi-modal GIS-T data model[J]. *Journal of Transport Geography*, 2011,19(1):147-161. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2009.09.006>
- [24] Zhu Jun, Wu Sihao, Zhang Yunhao et al. Lightweight Web Visualization of Massive Road Traffic Data[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2021, 56(5): 905-912 (朱军, 吴思豪, 张昫昊, 等. 大规模道路交通数据网络轻量化可视化方法[J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(5): 905-912) <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XNJT202105002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ><https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=XNJT202105002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [25] Zhu Jie, Zhang Hongjun. Battlefield Geographic Environment Spatiotemporal Process Model Based on Simulation Event[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(9): 1367-1377 (朱杰, 张宏军. 面向仿真事件的战场地理环境时空过程建模[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2020, 45(9): 1367-1377) <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=WHCH202009006&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ><https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=WHCH202009006&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [26] Ehrlinger L, Wöß W. Towards a Definition of Knowledge Graphs[J]. *SEMANTiCS (Posters, Demos, SuCESS)*, 2016,48(1-4):2.
- [27] Maedche A, Staab S. Ontology learning for the semantic web[J]. *IEEE Intelligent systems*, 2001,16(2):72-79. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/920602>
- [28] Fensel D, Van Harmelen F, Horrocks I, et al. OIL: An ontology infrastructure for the semantic web[J]. *IEEE intelligent systems*, 2001,16(2):38-45. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/920598>
- [29] Wang Fei, Yi Mianzhu, Tan Xin. Language Understanding Model Based on Ontological Semantics Network[J]. *Computer Science*, 2018,45(6A):101-105 (王飞, 易绵竹, 谭新. 基于本体语义网络的语言理解模型[J]. *计算机科学*, 2018,45(6A):101-105) <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JSJA2018S1021&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ><https://oversea.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JSJA2018S1021&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>
- [30] Gómez-Pérez A, Corcho O. Ontology languages for the semantic web[J]. *IEEE Intelligent systems*, 2002,17(1):54-60. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/988453/citations?tabFilter=papers#citations>
- [31] AlGeddawy T, ElMaraghy H. A Holistic Multi-Domain Association Model for Industrial Data[J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 51: 920-925. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.129>

A Holistic Multi-domain Association Model for Railway Geographical and Geological Data

ZHANG Ligo^{1,2} DING Yulin¹ ZHU Qing¹ CHEN Xi¹ LI Hankan¹ GUO Yongxin¹ WANG Wei³

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

2 Sichuan-Tibet Railway Co. Ltd., Chengdu 610045, China

3 State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization(FSDI), Xi'an 710043, China;

Abstract: Facing the needs of digital twins for the whole life cycle of railway, aiming at the problems of independent expression, decentralized management and difficult in-depth integration of continuously changing railway geographic and geological data for a long time, this paper proposes an integrated expression model of the three-domain association of "ontology domain - change domain - state domain" for railway geographic and geological data, which takes railway geological and geological elements as an inseparable whole. This paper defines a multi-level spatial -temporal change association relationship between state level - entity level - process level, with spatial - temporal change as the center and change participants (elements), drivers (events) and presentation modes (processes), constructs a knowledge graph of railway geological data with multi-domain association, and finely portrays the semantic association relationship between geological elements - events - processes. The importance and potential of the model in typical tunnel construction applications are analyzed.

Key words: railway geological environment; railway geographical and geological data; multi-domain association; knowledge graph; spatial-temporal change

First author: ZHANG Ligu, PhD, senior engineer, majors in GIS and VGE. E-mail: zhangliguo@swjtu.edu.cn

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

网络首发:

标题: 铁路地理地质数据“本体域-变化域-状态域”三域关联的集成表达模型

作者: 张利国, 丁雨淋, 朱庆, 陈曦, 李函侃, 郭永欣, 王玮

DOI: 10.13203/j.whugis20220010

收稿日期: 2022-10-04

引用格式:

张利国, 丁雨淋, 朱庆, 等. 铁路地理地质数据“本体域-变化域-状态域”三域关联的集成表达模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220010 (ZHANG Ligu, DING Yulin, ZHU Qing, et al. A Holistic Multi-domain Association Model for Railway Geographical and Geological Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/j.whugis20220010)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

面向数字孪生川藏铁路的实体要素分类与编码研究

朱庆, 李函侃, 曾浩炜, 刘铭崑, 丁雨淋, 任晓春, 王玮, 张利国, 罗勋, 朱军

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(9): 1319-1327

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200010>