

基于本体的市域(郊)铁路运营安全应急决策系统框架探索

孙洪茹^{1,2}, 陈有亮³

¹北京市域铁路融合发展集团有限公司, 北京

²北京市基础设施投资有限公司, 北京

³上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年6月24日; 录用日期: 2025年7月17日; 发布日期: 2025年7月28日

摘要

面对市域(郊)铁路未来网络化运营多线路、多运营模式、多运营商以及多行政主体协同运营的局面, 结合目前市域(郊)铁路高质量发展背景下运营安全管理和应急管理措施, 提出在安全设计、安全生产、运营维护、应急预案演练和监督检查等措施的基础上, 进一步探索构建本体驱动的市域(郊)铁路运营安全应急决策系统模型框架, 并与一般应急决策系统进行对比分析; 搭建系统功能模块, 对运营安全风险控制体系和突发事件应急救援体系等两个系统核心功能进行分析设计; 构建应急救援决策系统实现流程、救援预案查询流程、案例查询和推理流程及其共享数据库的结构模型等, 为市域(郊)铁路多运营管理模式下的安全监控和应急决策提供技术支撑。

关键词

市域(郊)铁路运营安全, 本体模型, 应急决策系统框架

Exploration of the Framework of Emergency Decision System for Regional (Suburban) Railway Operation Safety Based on Ontology

Hongru Sun^{1,2}, Youliang Chen³

¹Beijing Suburban Railway Joint Development Group Co. Ltd., Beijing

²Beijing Infrastructure Investment Co. Ltd., Beijing

³School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 24th, 2025; accepted: Jul. 17th, 2025; published: Jul. 28th, 2025

文章引用: 孙洪茹, 陈有亮. 基于本体的市域(郊)铁路运营安全应急决策系统框架探索[J]. 建模与仿真, 2025, 14(7): 206-216. DOI: 10.12677/mos.2025.147529

Abstract

Under the background of high-quality development, in the face of the future network operation of multi-line, multi-operation mode, multiple operators and multiple administrative subjects, combined with the current safety management and emergency management measures of regional (suburban) railway, on the basis of the measures of safety design, safety production, operation and maintenance, drill of emergency plan and supervision and inspection, further explore the construction of an ontology-driven regional (suburban) railway operation safety emergency decision system model framework, and make a comparative analysis with the general emergency decision-making system; build the system function module, analyze and design the two core functions of the system: operation safety risk control system and emergency rescue system; construct the implementation process of emergency rescue decision system, rescue plan query process, case query and reasoning process and the structure model of shared database, it provides technical support for the safety monitoring and emergency decision under the multi-operation management mode of regional (suburban) railway.

Keywords

Regional (Suburban) Railway Operation Safety, Ontology Model, Emergency Decision-Making System Framework

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,全国市域(郊)铁路建设持续加速,覆盖范围进一步扩大,通过政策支持和重大项目推进,逐步完善轨道交通网络,尤其是长三角、京津冀、粤港澳等都市圈。市域(郊)铁路的快速成网将显著提升城市群通勤效率,助力区域经济协同发展。2024年《交通运输部国家铁路局关于加强城际铁路、市域(郊)铁路监督管理的意见》的出台,为进一步推动市域(郊)铁路规范有序、健康持续发展提供了有力支撑[1]。

国内市域(郊)铁路在营线路主要采取政府购买服务、企业委托运输的管理模式,未来随着新线路的建设开通,车站的增加及车次的加密,市域(郊)铁路逐步形成网络化运营,线和线之间的勾连更加紧密,加之更加多样化的运输组织,将形成利用干线铁路开行市郊列车、利用非干线铁路公交化运营、利用非干线铁路自主确定运营模式等多种运营场景,对调度、客服、售票、行车等运营服务环节安全和应急等方面的管理提出了更高要求。

应急预案是为应对潜在事故而预先制定的应急响应措施,旨在减少事故损害,在突发事件中发挥着不可替代的作用[2]。目前,市域(郊)铁路还主要依赖于事先制定的应急预案进行应急决策,这种方法比较全面、规范,但缺乏灵活性,尤其是对于一些非常规突发事件,由于这类事件具有一定的罕见性,因此很难找到现成的处置方法。此外,对于大多数决策者来说,很难快速掌握足够的应急处置相关信息,加之相关经验的缺乏,更增加了及时做出有效应急决策的难度。

本体旨在研究事物的本质和存在方式。1990年, Tim Berners-Lee 等将语义网引入本体工程[3]。本体作为语义网络的核心之一,能够描述信息的含义和关系,推动信息自动化处理。国内外学者在安全领域、生物医学领域、地理科学领域和电子商务领域均已实现了从领域词典到领域本体的转化和应用[4]-[7]。徐静海等构建了地震灾害应急响应(earthquake disaster emergency response, EDER)知识的概念模型,采用地

理本体表示 EDER 知识的地理空间特征, 该模型能够辅助智能应急[8]。刘广宇等基于领域本体模型, 针对公路工程安全管理中的知识缺口, 提出一种实现领域知识建模与更新的方法[9]。本体技术在应急管理领域已实现从静态知识库向动态认知系统的跨越式发展, 其核心价值在于通过语义化建模解决多源异构数据的互操作问题。当前应用聚焦三大方向: 一是构建“隐患点 + 风险区”双控模式的知识图谱; 二是支撑智能预警决策; 三是优化协同救援。研究前沿体现在动态本体构建、多模态知识融合与边缘推理等方向, 但面临新型复合灾害表征不足、跨域标准不统一等技术瓶颈, 未来将向认知智能增强(结合大语言模型)、数字孪生融合等方向发展。

本体作为领域模型, 提供了人们对领域概念和概念层次的共同理解, 同时其应用也有效地降低了对自然语言理解技术的依赖。本文提出构建基于本体驱动的市域(郊)铁路运营安全应急决策系统, 采用图示化的本体建模方法, 根据 Protégé 的模型完成构建, 为市域(郊)铁路未来网络化运营多线路、多运营模式、多运营商以及多行政主体协同运营模式下的安全监控和应急决策提供技术参考。

2. 系统模型框架

2.1. 系统结构模型图

本体较强的语义属性有助于对特定领域内的概念及概念关联的形式化表示, 可以一定程度上实现基于知识、语义的检索[10]。

目前, 市域(郊)铁路主要通过安全设计、安全生产、运营维护、应急预案演练和监督检查等措施来实现安全管理, 以更好地预防事故, 降低风险。对于突发事故应急决策, 则是仍然主要依赖于事先制定的应急预案。本文探索构建市域(郊)铁路安全应急决策系统, 依托市域(郊)铁路监控系统、自动售检票系统及通信专业系统等, 对市域(郊)铁路线网的基础信息、客流、行车、供电、视频图像、主要机电设备、调度指挥、突发事件等数据进行收集、存储和分析, 通过搭建基于本体驱动的针对市域(郊)铁路事故处理领域的应急决策原型系统框架, 如图 1 所示, 实现对市域(郊)铁路各专业数据资源的一体化整合及大容量的长期存储, 并对网络化运营中突发事件应急指挥调度及辅助决策提供技术支持。

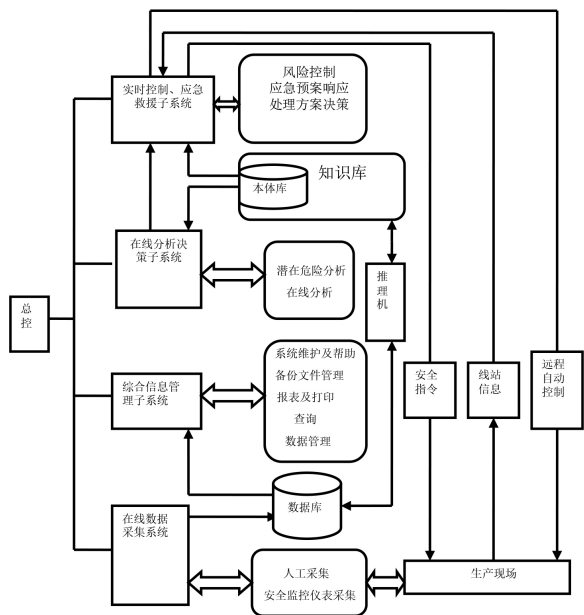


Figure 1. The system configuration
图 1. 系统结构图

2.2. 系统对比分析

在计算机科学中,本体是一种用于定义和描述领域知识的形式化规范,其目的是通过标准化的方式表达事物的概念及其之间的关系。本体是一种体现使用者对领域概念和概念层次共同理解的领域模型。在一般应急救援系统中存在如下问题:存在语义冲突,数据查询性和可交换性较差;缺乏能利用计算机提供信息存取并支持跨组织决策的理论和方法等。而本体的应用则可以有效地降低对自然语言理解技术的依赖,避免上述问题带来的困扰。因此,本文提出将本体应用到应急领域做进一步的探索,将采用基于本体的应急处理模型构建的应急决策系统与一般应急救援系统做初步对比如表 1 所示[11]。

一般应急救援系统和基于本体模型的应急系统在功能和应用上存在显著差异。一般应急救援系统通常依赖预设的流程和规则,侧重于快速响应和资源调度,适用于标准化应急场景。而基于本体模型的应急系统则通过语义网络 and 知识图谱,实现更智能的决策支持,能够处理复杂、多变的应急情况,具备更强的适应性和扩展性。本体模型通过统一的知识表示,提升了系统间的互操作性和信息共享效率,适用于跨部门、多领域的协同应急。二者的本质差异在于一般系统以流程标准化为核心,技术实现侧重响应效率;本体系统以知识语义化为根基,通过形式化建模提升系统智能性与跨域协同能力。综上所述,基于本体模型的应急系统通过对资源的描述,增加各种资源之间的可交换性,提高资源的可访问性,为不同的数据库架起沟通的桥梁。

Table 1. Comparison of two systems

表 1. 两个系统的比较

项	一般应急救援系统	基于本体模型的应急系统
数据库	关系数据库	本体数据库
集成方式	信息集成	概念集成
系统架构	C/S, B/S 三层结构	B/S 三层结构, 构件系统时增加本体层
解决问题	各部门间及部门内的协同活动	解决语义冲突问题
知识表示	依赖非结构化文档(如 Word/PDF 预案), 语义模糊	OWL 语言定义领域本体, 实现概念、关系的精确形式化建模
数据整合能力	多源异构数据关联困难, 易形成“信息孤岛”	通过本体映射实现跨部门数据语义互操作, 如预案库↔案例库
智能决策支持	人工匹配预案, 响应效率低	结合规则推理与案例推理, 自动生成处置方案
资源调度机制	基于经验或简单规则调度, 灵活性差	动态语义匹配资源需求, 如“就近-就急-就能力”优化模型
系统扩展性	功能模块紧耦合, 新增灾害类型需重构系统	本体模型支持动态扩展, 如新增灾害链关系自动继承属性

2.3. 系统功能模块

基于本体和 CBR 的应急决策系统,主要分为资料录入、风险控制、预案查询、案例查询、规则查询、案例推理、应急响应、生成规则、生成决策建议等模块。在用语言来描述事故的发生情况时,由于突发事件发生时具有不确定性,我们通过数据预处理模块可以将其泛化,查询预案,应急启动,通过案例推理决策生成应急处理方案,最后将其转换成规则的形式,并给出准确的注解和说明。该系统的功能模块情况如图 2 所示。

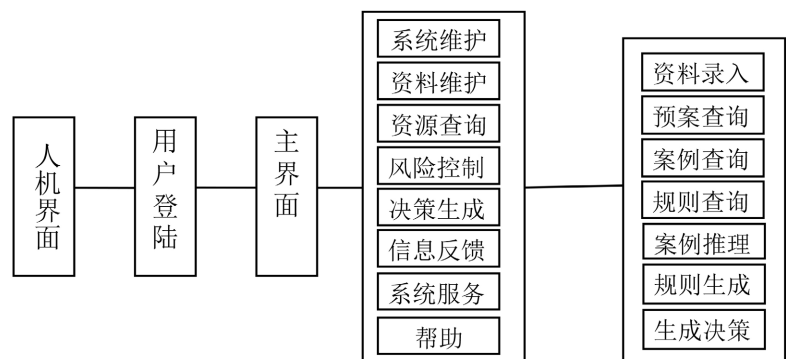


Figure 2. Function module
图 2. 功能模块

3. 系统核心功能分析设计

3.1. 市域(郊)铁路运营安全风险控制体系

根据市域(郊)铁路行业经验和特点,运营安全风险主要发生于市域(郊)铁路设施监测养护、设备运行维修、行车组织、客运组织和服务、运行环境等业务板块。基于实时监测数据、历史数据分析和发展趋势预测,对市域(郊)铁路重大事故进行系统安全分析,并研究给出不同情况下的安全对策。采用事故树分析方法的基础上,建立基于本体的运营安全事故知识,对事故发生原因进行分析,预测导致事故发生的潜在危险因素,以期实现事故的预防和快速处理。

市域(郊)铁路的风险控制,通常可以采用风险避免策略和损失控制策略。市域(郊)铁路风险控制的具体方法与措施如图 3 所示:

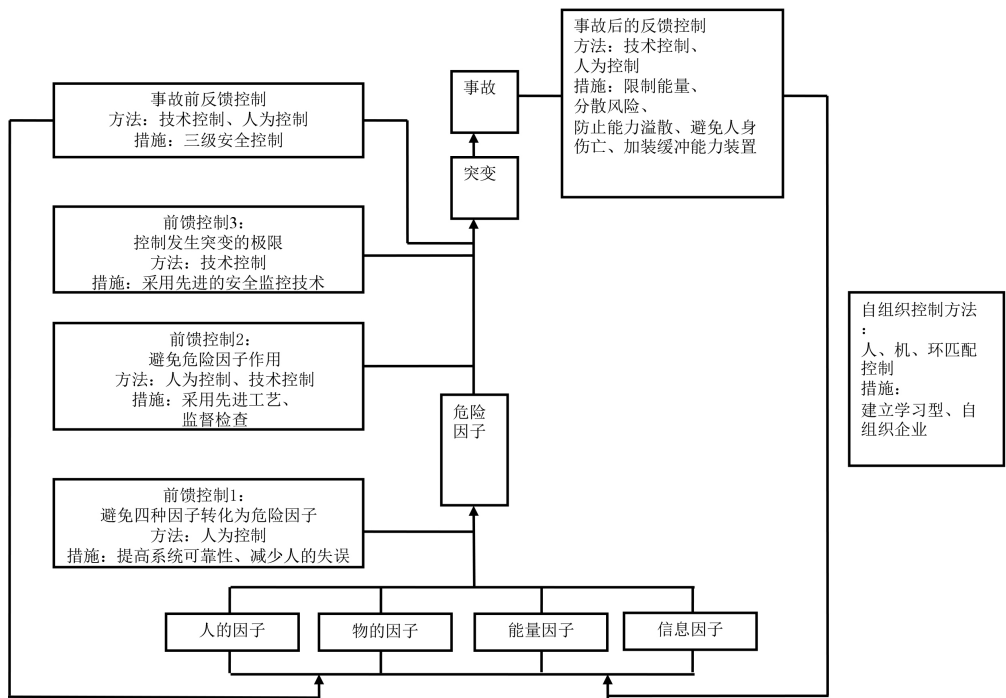


Figure 3. The methods and measures of regional (suburban) railway operation safety risk control
图 3. 市域(郊)铁路运营安全风险控制方法措施图

3.2. 市域(郊)铁路运营安全事故应急救援体系

在整个市域(郊)铁路运营安全事故处理决策系统中,最主要的是决策生成模块,图4给出了应急处理决策模块的软件体系结构图。

市域(郊)铁路运营安全事故救援应以预防为主,遵循统一指挥、分级负责、区域为主、自救与社会救援相结合的原则,分类、分级制定预案。应急预案的制定要有充分依据,要依据市域(郊)铁路危险源辨识、风险评价、运营安全现状评价、应急准备与响应能力评估等方面调查、分析的结果[12]。事故专项预案的逻辑图见图5所示。

4. 系统设计

4.1. 系统流程及运行

应急救援决策系统实现流程图见图6所示。

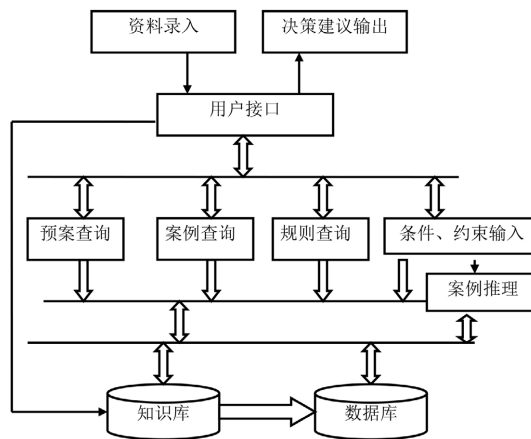


Figure 4. Software architecture

图4. 决策体系结构图

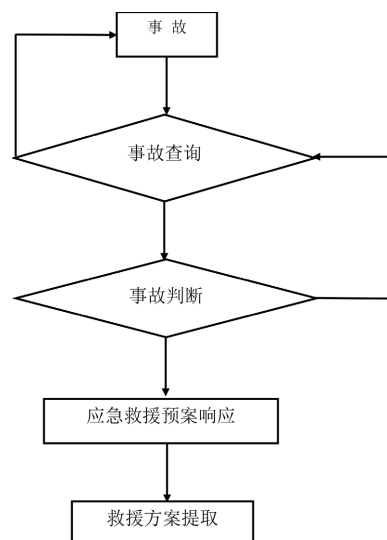


Figure 5. The logic diagram of accident

图5. 事故专项预案逻辑图

4.2. 原型系统的救援预案查询流程

在突发性事故现场, 指挥员借助类似事故预案, 形成实际可行的救援执行方案, 预案中提供的信息能帮助现场指挥员确定事故的主要方面, 从而快速决策最佳的战术方法、任务分配、部署、救援准备时限和时间序列表等。

本系统引入本体将原有救援预案和救援方法转换成机器表示, 以实现快速检索, 智能决策的目的。因此, 该系统实现查询时, 首先通过本体库查询, 对提交的事故信息及危化品属性分析后, 再对事件库进行救援决策的检索。具体的查询过程如图 7 所示。

4.3. 案例查询和推理流程

用本体描述语言 OWL 对事故案例采用通用模型进行描述, 然后使用 CBR 方法对案例进行推理, 从而得到相似案例结果集。基于本体论的 CBR 检索, 增强了不同领域或系统对案例的共享性、重用性和互操作性。将市域(郊)铁路运营安全事故领域的案例包装成基于案例推理的形式, 模拟专家处理事故时的情景, 将事故案例库模拟成专家的大脑, 在突发事故发生时, 案例推理引擎从案例库的实例中查找类似的特征属性和描述, 继而找到事故的处理决策方法[13]。其案例推理流程如图 8 所示。

首先, 由用户选择要检索哪个领域的案例, 因为基于本体表达的案例本体是可扩展到多领域的, 只需加入该领域案例的特征向量模型。

其次, 用户按照从本体定义库中的本体, 填写新案例的特征属性值, 这些特征属性是基于专业书籍、专家经验和大量案例总结提取的。填写完属性并提交后, 后台的 CBR 检索引擎将进行推理工作, 使用加权最近相邻策略检索相似案例。检索到的相似案例将按相似度从高到低排列, 参照这些相似案例的判案结果, 为当前案例提供结果预测、诊断和治疗方案等。

再次, 用户对照检索出来的知识库中的领域知识, 如果对相似案例结果集的处理方法都不满意, 可以回到对新问题描述阶段, 调整问题描述。如果在相似案例集查询到认为符合实际情况的案例, 则转入案例学习过程。知识工作者依照本体定义, 抽取新案例的特征属性值, 由系统创建一个案例本体的 Case 类的对象, 将案例的一般信息和特征属性值存入该对象, 并自动复制找到的案例库中最接近的案例处理方法存入该对象, 最后系统将新创建的案例存入案例库中, 完成案例的学习过程。

此时该案例的状态是临时的, 等待知识工作者对其进行知识标注, 建立 KnowledgeItem 的实例, 将案例的概念及资源等信息存入该实例中, 最后将新案例存储到案例库, 以备下次检索。

4.4. 共享数据库的应用

基于本体的运营安全共享数据库模型是利用现代网络技术, 将描述好的知识元以模块化的方式嵌入到网络后台, 通过开放式端口接收来自各个客户端的知识信息, 并通过服务器融合技术对知识元信息的字面值进行处理。具体的数据收集、融合及其使用系统结构如图 9 所示。基于本体的市域(郊)铁路运营安全共享数据库的实施需要以下条件[14]-[16]:

设立专门管理机构对数据库进行维护与管理。

- (1) 制定相关的市域(郊)铁路运营安全事故数据收集制度以及规范文件。
- (2) 市域(郊)铁路运营企业设立相关事故的技术专家, 对收集到的数据参数按要求进行分类。
- (3) 根据模型提示进行相关录入操作, 保证事故参数的规范性和实际性。
- (4) 将应用端口开放给各个运营单位, 以便利用共享资源进行事故判断与预测。

基于本体的市域(郊)铁路运营安全共享数据库通过市域(郊)铁路运营企业之间的协作进行收集数据, 将数据根据本体知识元的规则进行融合, 以实现对其合理利用。考虑共享原则, 将数据库端口公开于各

个运营企业, 作为行业分析或者数据挖掘使用, 如根据共享数据库的数据对本线站的运营安全事故进行深层次的分析, 从而得到正确而合理的分析处理效果。

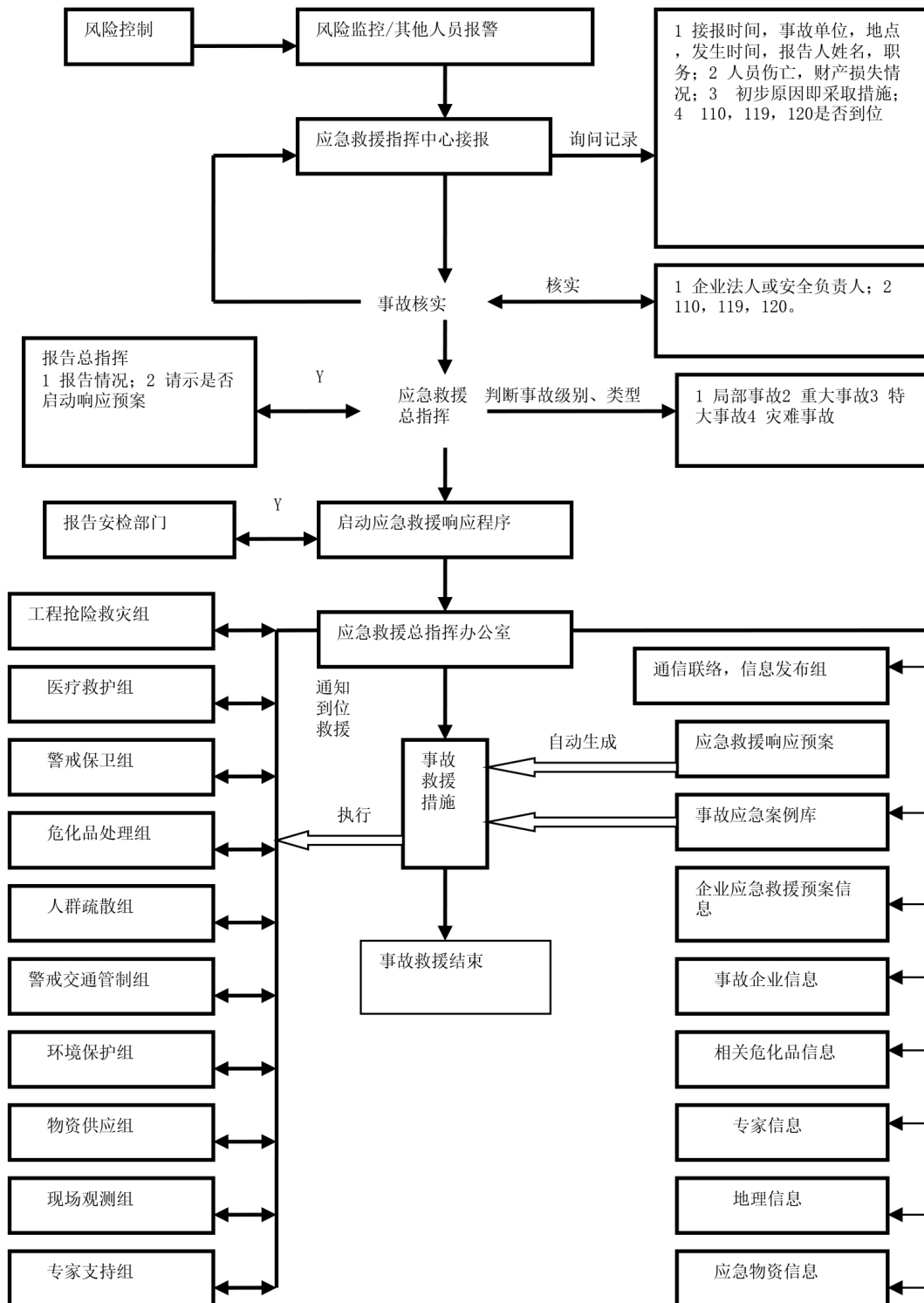


Figure 6. Implementation procedure of emergent rescuing system decision support system

图 6. 应急救援决策系统实现流程

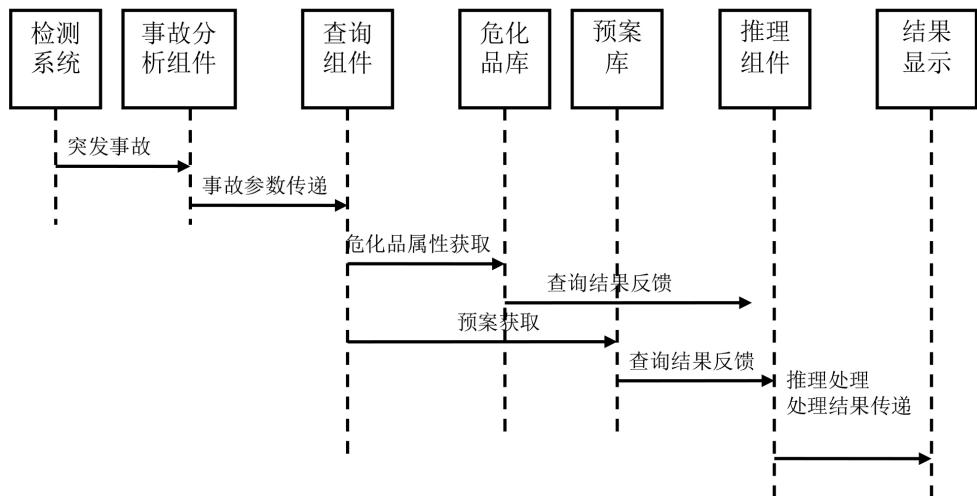


Figure 7. Flow process diagram of rescue plan inquiry
图 7. 救援预案查询流程图

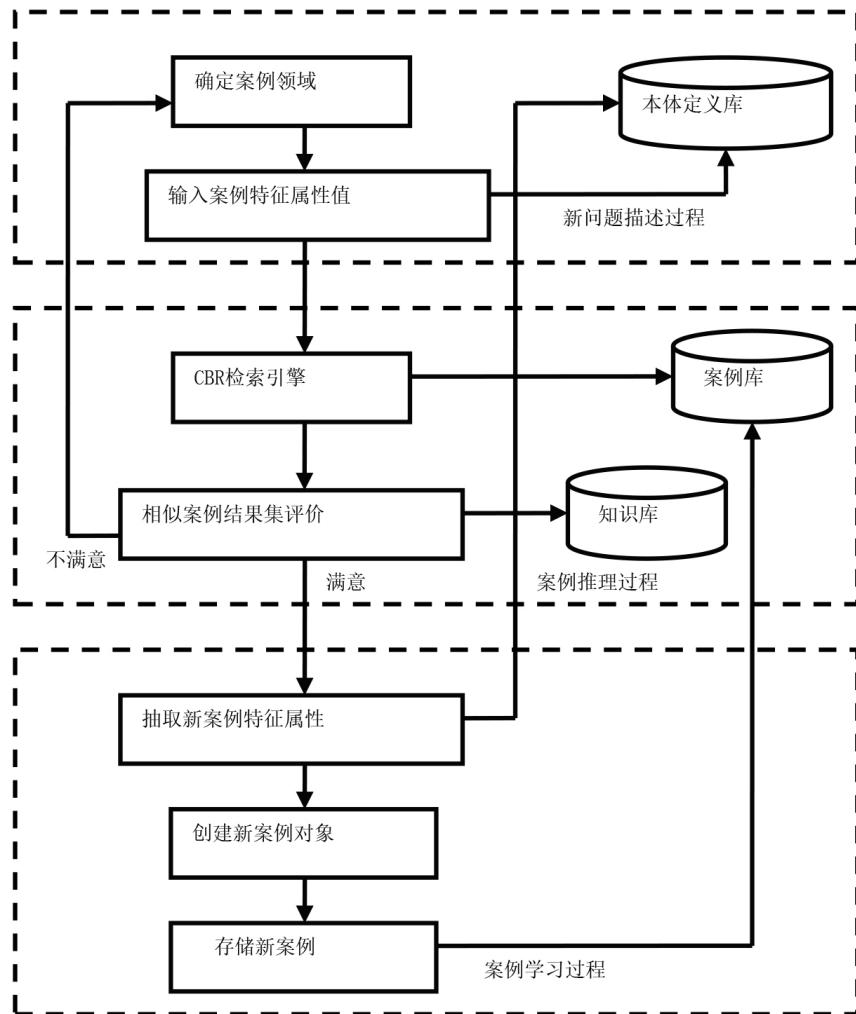


Figure 8. Flow of case reasoning
图 8. 案例推理流程

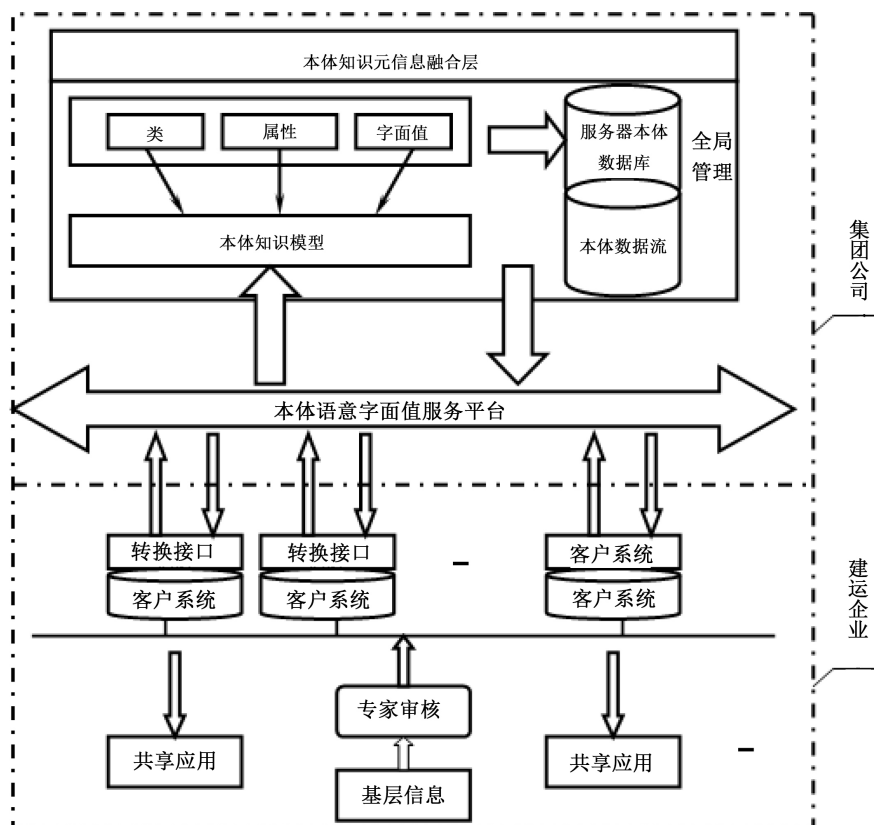


Figure 9. System flow chart of shared data fusion model based on ontology

图 9. 基于本体的共享数据融合模型系统流程

5. 小结

本文通过对运营应急事故模型的本体化建模与描述, 主要搭建了一个本体驱动的针对市域(郊)铁路运营安全应急处置领域的指挥决策原型系统框架, 以数据上报、采集、录入、管理、分析、推理、决策为主线, 构造一个具有推理能力、学习能力、能够自我改善的应急救援决策系统, 建立高效查询及分析推理机制, 加强各类应急数据的管理、综合分析、信息共享, 提高突发事故的应急处置和指挥调度能力, 为市域(郊)铁路安全应急决策指挥提供科学依据和技术支撑。

参考文献

- [1] 交通运输部, 国家铁路局. 交通运输部 国家铁路局关于加强城际铁路、市域(郊)铁路监督管理的意见[Z]. 交铁路发[2024] 31 号. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202406/content_6955428.htm
- [2] 张海波. 中国应急预案体系: 结构与功能[J]. 公共管理学报, 2013, 10(2): 1-13, 137.
- [3] 黄必清, 王涛, 朱鹏, 等. 基于本体的临床试验数据语义查询[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(1): 47-54.
- [4] Liu, H., Luo, N. and Zhao, Q. (2022) Research on the Construction of Typhoon Disaster Chain Based on Chinese Web Corpus. *Journal of Marine Science and Engineering*, **10**, Article 44. <https://doi.org/10.3390/jmse10010044>
- [5] The Gene Ontology Consortium (2014) Gene Ontology Consortium: Going Forward. *Nucleic Acids Research*, **43**, D1049-D1056. <https://doi.org/10.1093/nar/gku1179>
- [6] 李媛媛, 翁文国, 袁宏永. 基于 GIS 的林火蔓延模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(12): 1726-1730
- [7] Chang, X. and Terpenney, J. (2009) Ontology-Based Data Integration and Decision Support for Product E-Design. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **25**, 863-870. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2009.04.003>
- [8] Xu, J., Nyerges, T.L. and Nie, G. (2013) Modeling and Representation for Earthquake Emergency Response Knowledge:

Perspective for Working with Geo-Ontology. *International Journal of Geographical Information Science*, **28**, 185-205.
<https://doi.org/10.1080/13658816.2013.845893>

- [9] 刘广宇, 安芃, 伍震, 等. 基于本体的公路工程安全领域知识建模和应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 64(2): 224-234.
- [10] 王子成, 周明星, 刘慧婷. 应急管理学科体系建构: 本体论、认识论与方法论[J]. 中国应急管理科学, 2021(2): 14-25.
- [11] 李蓓, 王鹏, 杨政, 等. 基于多层次语义约束的煤矿灾害事件本体模型构建[J]. 陕西煤炭, 2024, 43(4): 146-149.
- [12] 曹宏杨. 高速铁路高铁运营中事故预防与应急救援研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会, 西南大学, 重庆工商大学, 重庆建筑编辑部. 人工智能与经济工程发展学术研讨会论文集. 沈阳: 中国铁路沈阳局集团有限公司调度所, 2025: 18-21.
- [13] 张振海, 李红亮, 王晴雯. 地铁应急预案知识本体建模及案例库的构建. 城市轨道交通研究[J]. 2022, 25(8): 17-22.
- [14] 李贺, 郭佳, 沈旺, 等. 面向辅助决策支持的突发事件预案情景库构建研究[J]. 图书情报工作, 2024, 68(12): 4-17.
- [15] 吴文晓. 基于本体的突发事件网络舆情案例推理研究[D]: [硕士学位论文]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
- [16] 夏登友, 郑策, 陈昶霖, 等. 不完全信息下的重大事故应急决策方法研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(5): 1498-1504.