

交通事故致因图谱构建及融合大模型的可解释性 问答系统研究

黎帅, 宋晨城, 孔羿翔, 叶琦

东北林业大学土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

DOI: 10.61369/TACS.2026020016

摘 要 : 针对大模型在道路交通事故致因研判中存在推理黑箱化、幻觉生成、可解释性不足, 难以适配事故鉴定严谨性要求的痛点, 本文开展交通事故致因图谱构建及融合大模型的问答系统专项研究。首先结合事故致因分层理论与行业规范, 构建覆盖多要素的层级化交通事故致因链知识图谱, 形成标准化事故致因知识体系; 其次提出轻量化检索增强融合推理架构, 以图谱结构化知识约束大模型推理逻辑, 生成含明确推理路径的可解释性研判结果, 并将该架构落地为适配基层应用的桌面端问答程序; 最后以287份道路交通事故调查报告为数据基础, 选取86份测试样本开展对比实验。结果表明, 融合架构的致因研判准确率达94.2%, 幻觉生成率仅1.2%, 可解释性达标率为100%, 显著优于纯大模型推理。本研究完成了交通事故致因图谱构建与融合大模型的问答系统研发, 有效弥补了大模型推理的不确定性缺陷, 提升了事故致因研判的严谨性与精准性, 为交通管理部门的事故处置、隐患治理提供有效的技术支撑。

关 键 词 : 道路交通事故; 知识图谱; 大模型; 致因推理; 可解释性; 检索增强

Research on the Construction of a Causal Map for Traffic Accidents and the Interpretable Question Answering System Integrating a Large Model

Li Shuai, Song Chencheng, Kong Yixiang, Ye Qi

School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150001

Abstract : In response to the pain points of black box reasoning, illusion generation, and insufficient interpretability in the causal analysis of road traffic accidents using large models, which make it difficult to meet the rigorous requirements of accident identification, this paper conducts a special study on the construction of a traffic accident causal map and the integration of large models into a question answering system. Firstly, combining the theory of accident causation stratification with industry standards, a hierarchical knowledge graph of traffic accident causation chain covering multiple elements is constructed to form a standardized accident causation knowledge system; Secondly, a lightweight retrieval enhanced fusion reasoning architecture is proposed, which constrains the reasoning logic of the large model with graph structured knowledge, generates interpretable judgment results with clear reasoning paths, and implements the architecture as a desktop Q&A program suitable for grassroots applications; Finally, based on 287 road traffic accident investigation reports, 86 test samples were selected for comparative experiments. The results showed that the causal analysis accuracy of the fusion architecture reached 94.2%, the illusion generation rate was only 1.2%, and the interpretability compliance rate was 100%, significantly better than pure large-scale model inference. This study has completed the construction of a traffic accident causation map and the development of a question answering system that integrates a large model. It effectively fills the uncertainty gap in the inference of large models, improves the rigor and accuracy of accident causation analysis, and provides effective technical support for traffic management departments' accident disposal and hidden danger management.

Keywords : road traffic accidents; knowledge graph; large model; causal reasoning; interpretability; retrieval-augmented

引言

随着社会经济快速发展, 机动车保有量持续攀升, 道路交通事故致因呈现多因素耦合、动态关联的复杂特征, 交通安全管理与事故预防面临严峻挑战 [1]。道路交通系统由人、车、路、环境等动静要素构成, 事故发生是各要素协调失效的结果, 事故调查报告等非结

国内外学者围绕交通事故数据处理与致因分析开展了大量研究。传统方法多依赖贝叶斯网络等统计建模手段, 虽在概率推理与风险预测中取得一定成效, 但对人工特征依赖度高, 难以处理多语义交叉的非结构化数据 [3]。大数据技术发展后, 生成对抗网络 [4]、图卷积网络及表示学习等方法逐步应用于事故数据挖掘 [5], 大幅提升了海量数据处理能力, 却存在可解释性差、缺乏领域专业知识约束的痛点。

综上, 现有研究尚未解决事故致因智能研判中专业约束不足、融合针对性弱、落地性差等问题。鉴于此, 本文构建贴合行业规范的层级化事故致因链知识图谱, 设计知识图谱约束大模型的轻量化融合推理架构, 实现二者深度融合并落地为本地桌面端程序, 为基层提供高效、精准、可追溯的事故致因智能研判工具, 推动交通事故研判从经验驱动向数据+知识双驱动转型。

据支撑。部分原始事故报告的关键要素示例见表1。

表 1 原始事故报告关键要素示例

事故要素	具体信息
事故名称	湖南郴州宜凤高速“6·26”特别重大道路交通事故
事故时间	2016年6月26日10时20分
事故地点	宜凤高速 K33+856至 K34+106处
当事人情况	刘大辉, 驾驶湘 D94396 大型普通客车, 疲劳驾驶, 车辆超员 (核载 55 人、实载 57 人)
车辆状况	湘 D94396 金龙牌大型普通客车, 检验有效期内; 安全锤未按照规定放置, 4 把藏于驾驶人储物箱, 无其他机件故障
道路环境	沥青 + 水泥路面, 直线下坡 (纵坡 0.5%—4.7%), 设有限速 / 避险车道标志, 中央 / 路侧设混凝土护栏; 天气晴、视线良好
事故经过	刘大辉驾驶超员大巴行至下坡路段时, 疲劳驾驶致车辆失控碰撞中央护栏, 油箱破损漏油, 轮毂摩擦生高温引燃柴油; 车辆停后车门被护栏阻挡, 乘客因安全锤缺失难破窗, 最终起火造成重大伤亡
事故原因	直接原因: 疲劳驾驶致失控碰撞 + 漏油起火, 车门受阻 + 安全锤缺失致疏散失败; 间接原因: 客运公司未落实防疲劳驾驶 / 动态监控, 监管部门履职流于形式; 根本原因: 企业安全生产主体责任不落实, 监管部门监管不到位
伤亡结果	35 人死亡, 13 人受伤 (含 4 名重伤), 直接经济损失约 2290 万元

根本原因：管理漏洞/规范执行/安全培训 → 间接原因：道路属性/环境条件/交通设施 → 直接原因：违法行为/操作失误/车辆故障 → 触发：事故：追尾/侧滑/侧翻/碰撞 → 造成：伤亡结果：轻伤/重伤/死亡

涉及：事故主体：机动车/非机动车/行人

图 1 事故致因链知识结构示意图

（三）图谱构建流程

本文按照“案例分析-知识建模-知识抽取-知识融合-知识存储-可视化”的标准化工程化流程构建事故致因链知识图谱,严格遵循知识图谱构建的通用规范与交通领域专业标准,确保图谱知识的准确性与一致性。整体构建流程如图2所示。

图2道路交通事故致因知识图谱构建流程

首先，以道路交通事故调查报告为基础，依托事故致因链知识结构开展案例分析，明确事故时间、地点、人员伤亡、经济损失、致因层级、违法过错、路面状况、天气情况等核心知识提取维度。知识建模作为图谱构建的核心基础，通过构建层级化 Schema 体系（如图3所示），定义根本致因、间接致因、直接致因及关联实体的核心类别、专属关联关系与特征属性，划定知识抽取的专业范围与统一标准，为后续知识抽取提供规范化的语义框架。接着，知识抽取环节采用基于 BERT-BiLSTM-CRF 的实体与关系联合抽取方法，实现从非结构化事故文本到结构化三元组的自动化转换。以人工标注完成的201份训练集数据对模型进行微调，使模型能够同时识别文本中的实体边界、实体类型及实体间的语义关系，一次性输出三元组结构。随后，知识融合环节完成实体对齐、属性融合与冲突消解，将不同事故报告中表述不同但指向同一对象的实体进行合并，处理多源数据中的属性冲突问题。最终将经过融合与校验的标准化三元组存入 Neo4j 图数据库进行持久化存储，通过数据库可视化功能生成层级化的知识关联网络，完成事故致因链知识图谱的构建，构建图谱如图4所示。



图3事故致因链知识图谱层级与分类（部分）

图4道路交通事故知识图谱（部分）

二、交通事故知识图谱问答方法

传统基于大模型的交通事故问答方法，多采用单流程直接生成模式，或仅将知识图谱作为简单外挂知识库做单次检索匹配。这类方法在致因研判中适配性不足：难以捕捉三级致因的多跳因果关联，易致层级混乱、逻辑跳步；语义对齐能力弱，易漏检关键知识；结果无明确依据，存在幻觉与黑箱问题，无法满足事故鉴定的严谨性要求。

基于已构建的层级化事故致因链知识图谱，设计适配交通事故致因研判需求的大模型问答方法，通过交通事故术语深度语义向量化、语义混合检索、问题增强式答案推理三个核心环节，为事故致因智能研判提供可靠的技术支撑，方法整体流程如图5所示。

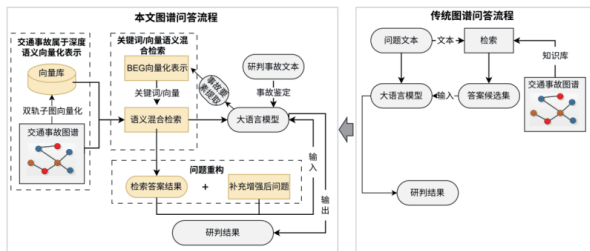


图5交通事故图谱问答实现过程

（一）交通事故术语深度语义向量化表示

针对事故致因链“直接致因-间接致因-根本致因”的多跳层级特征，构建适配交通事故领域的语义向量知识库，为后续检

索提供统一的语义匹配基础。

采用双轨制子图存储结构对事故图谱三元组进行分类处理：遍历所有三元组，识别存在链路关联的三元组集合，如“雨天-路面湿滑-制动距离延长-驾驶员避让不及时-追尾”，存入多跳致因链列表 Mh_triples，完整保留三级致因的层级化关联信息；无链路关联的单跳属性三元组存入单跳列表 Single_triples，用于存储事故实体基础属性。对两类列表分别去重后，完成多跳致因子图与单跳属性数据的结构化分离。

采用 BGE-small-zh 中文向量模型，对去重后的多跳致因子图与单跳三元组分别进行语义向量化表示。向量融合阶段引入层级动态权重机制，按照“根本致因0.4、间接致因0.35、直接致因0.25”的权重分配强化多跳致因链的语义表征，确保层级化因果关联在向量空间中的主导地位。最终将生成的标准化语义向量存入 FAISS 轻量化向量库，构建事故领域语义向量知识库。

（二）语义混合检索

检索环境作为连接用户查询与知识库的核心枢纽，单一关键词检索仅能实现字面对齐，易漏检同义表述的关键知识；单一向量检索易混淆语义相近但专业含义不同的术语，存在误检风险。因此采用“关键词精准检索+语义向量泛化检索”的双路并行机制，实现问答候选集的高精准、高覆盖召回，检索流程如图6所示。

具体的，先从用户输入文本中提取事故核心实体、致因要素、违法类型等专业关键词，在 Neo4j 事故致因链图谱库中执行 Cypher 查询，召回与核心实体1-3跳关联的致因知识，通过最长公共子串计算完成初步筛选，得到结构化候选集 R1。同时采用与知识库构建一致的 BGE-small-zh 模型，将用户查询文本转换为标准化语义向量，在 FAISS 事故语义向量库中执行余弦相似度检索，召回 Top30 相关知识片段，得到语义候选集 R2。将两个候选集合并去重后，通过 BGE-Reranker 重排模型对候选片段进行二次打分排序，过滤相似度低于0.6的低相关内容，最终选取 Top10 高相关知识片段作为最终答案候选集。

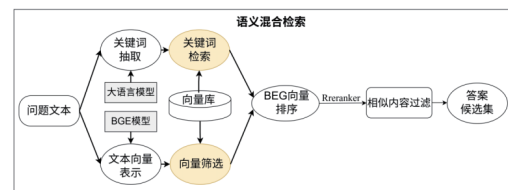


图6语义混合检索工作流程

（三）问题增强式答案推理

针对事故问答中用户查询语境缺失、大模型推理逻辑不规范的问题，采用致因要素覆盖率驱动的多轮问题增强机制，以事故致因链层级规则为硬约束，引导大模型生成可解释、可溯源的致因问答结果，推理流程如图7所示。

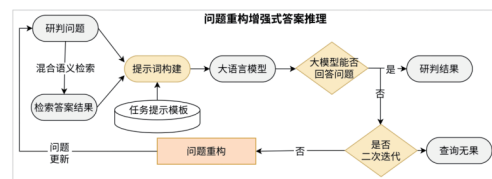


图7问题增强式答案推理工作流程

基于用户原始查询执行首次语义混合检索，获取初步事故成因知识候选集。将原始查询与初步候选集输入大模型，识别查询中缺失的“人-车-路-环境-管理”五大致因维度信息，重构为信息更完整的标准化问题。通过“致因要素覆盖率（阈值0.85）”判断是否需要继续迭代：该指标衡量问题覆盖五大致因维度的比例，用于判断关键信息补全是否充分。当覆盖率达标或迭代次数达到2轮时，强制终止增强流程，兼顾信息补全的充分性与基层事故研判的实时性需求。

用最终增强后的标准化问题执行二次检索，获取更精准的致因知识候选集。强制大模型严格基于检索结果，按照“事-事实认定-直接致因-间接致因-根本致因挖掘”的固定路径完成分步推理，输出内容采用“结论-依据”双段式结构，每一条致因研判结论必须标注对应的图谱三元组来源。完成推理后，对生成的结果执行致因闭环校验，确保推理逻辑形成完整的三级致因链，无层级跳步、无因果矛盾、无超出知识边界的内容，校验通过后输出包含完整致因链、推理路径、溯源依据的标准化问答结果。

三、实验验证与结果分析

基于已构建的层级化事故致因链知识图谱，从软件实现层面完成知识图谱与大模型的深度融合开发，搭建轻量化桌面端事故致因问答系统，并通过对比实验验证融合架构的实际研判性能。

问答系统基于 Python 3.10 完成开发，依托 py2neo 实现 Neo4j 图数据库的连接与操作，通 faiss-cpu 构建事故领域语义向量库，使用 transformers 库加载 BGE 向量化模型与 Qwen-7B-Chat 大模型，最终采用 PyQt6 完成桌面端交互界面开发，各模块通过统一接口完成调用，保障系统运行的稳定性与可扩展性。桌面端界面集成查询输入、结果展示、致因链可视化功能，可满足基层用户的实操需求，问答系统如图8所示。

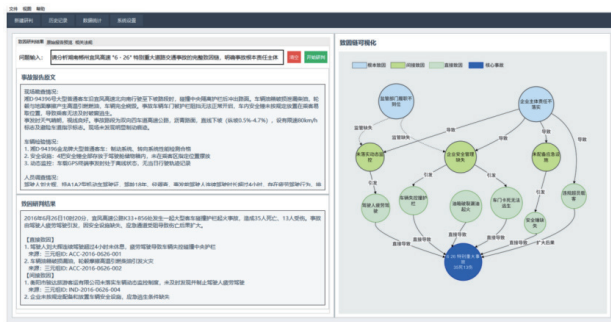


图8问答程序展示

实验数据选取287份道路交通事故调查报告，按7:3比例划分构建集与测试集，以86份报告为测试样本，围绕直接致因、根本致因、口语化查询三类问题开展验证。选取 Qwen-7B-Chat、Llama-2-7B-Chat、ChatGLM3-6B 三种主流开源大模型作为对照，与本文知识图谱融合方案开展对比实验，在统一硬件环境下，以致因研判准确率、幻觉生成率、可解释性达标率、平均响应时间为核心评价指标完成测试，测试结果如图9所示。

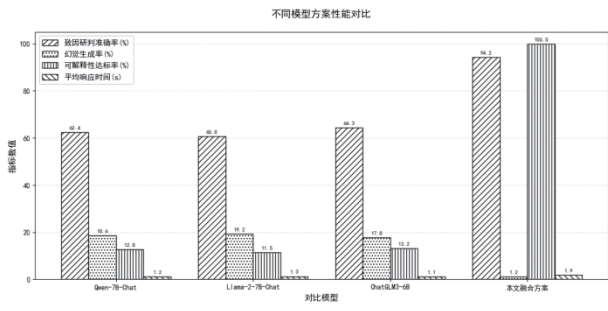


图9对比测试结果

从图中可以看出，三种主流开源大模型的致因研判准确率均低于65%，幻觉生成率普遍高于17%，可解释性达标率不足14%，平均响应时间在1.1~1.3s之间，整体性能受限于领域知识储备不足，难以满足事故致因研判的严谨性要求。相比之下，本文融合方案的致因研判准确率达94.2%，较开源模型提升超30个百分点；幻觉生成率仅1.2%，有效遏制了无依据推理；可解释性达标率实现100%，所有结论均有明确知识溯源；仅平均响应时间小幅增至1.9秒，仍在基层应用可接受范围内。这一结果表明，知识图谱与大模型的融合架构，通过结构化知识约束与层级推理引导，显著弥补了纯大模型在垂直领域的应用缺陷，在研判精度、结果可靠性与过程透明性上均实现了质的提升。

四、结论

本文针对交通事故致因研判中纯大模型准确率低、易生成虚假结论、推理过程缺乏依据的问题，构建层级化事故致因链知识图谱，与大模型融合搭建轻量化问答系统。通过双路混合检索与问题增强，实现结构化知识约束下的层级推理与结论溯源。实验结果显示，相比主流开源模型，本方案致因研判准确率达94.2%，幻觉率降至1.2%，所有结论均可追溯，仅小幅增加响应时间，为基层事故智能研判提供了实用可靠的技术支撑。

参考文献

[1] 于德新, 彭万里, 吴新程, 等. 知识图谱和表示学习在道路交通事故数据挖掘中的应用 [J]. 安全与环境学报, 2024, 24 (10): 3950-3958.

[2] 朱广宇, 张萌, 裔扬. 基于知识图谱的城市轨道交通突发事件演化结果预测 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45 (3): 949-957.

[3] 成卫, 马铭伟, 张小龙. 基于贝叶斯网络的高速公路交通事故严重程度预测及致因分析 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2023, 42(7): 87-95.

[4] 熊晓夏, 刘攀超, 沈钰杰, 等. 基于 LSTM-BF 的高速公路交通事故风险模型 [J]. 中国安全科学学报, 2022, 32 (5): 170-176.

[5] 卢浩文, 何元清. 基于转移的航空安全事件知识图谱表示学习 [J]. 现代计算机, 2023, 29(07): 59-63+84.

[6] 张丁荣, 王铭铭, 冯心妍. 基于知识图谱和故障树的高速铁路事故致因分析 [J]. 铁路计算机应用, 2023, 32 (7): 14-18.

[7] 王占中, 张书源, 杨萌, 等. 交通事故致因知识图谱构建及风险因素挖掘 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2025, 53 (04): 611-618.

[8] 张丽岩, 王燕, 马健, 等. 基于道路交通事故领域的知识图谱构建及可视化 [J]. 信息技术与信息化, 2024 (1): 47-50.

[9] 马健, 崔玉玉, 张丽岩. 大语言模型融合知识图谱的交通事故问答系统研究 [J]. 电脑与信息技术, 2025, 33 (4): 108-111.