

基于大语言模型的桥梁运维知识图谱构建研究

吴梦雨 文良羽 张新媛 刘恒睿 宋妍慧

南京工程学院，江苏南京，211167；

摘要：桥梁运维的规模化、智能化需求与知识碎片化、信息化不足等瓶颈之间的矛盾，正推动大语言模型与知识图谱技术的融合应用。本文系统梳理了该领域的研究现状、核心成果与现存不足：国外研究起步较早但通用性不足、领域模型适配不深入，国内则在技术融合深度、专用模型研发及图谱动态更新等方面存在明显短板。实现“知识整合—高效抽取—智能应用”闭环是该领域的核心研究逻辑，关键需突破多源异构知识整合、大语言模型领域适配、知识图谱动态更新三大技术难点。未来应着力深化技术融合、完善知识管理体系、拓展智能应用场景并强化成果转化，为桥梁运维向精准化、主动化、智能化转型提供参考框架与技术支持。

关键词：知识图谱；桥梁运维；大语言模型；数据融合

DOI：10.69979/3041-0673.26.01.099

引言

桥梁技术状况关系路网运行效能与公共安全。截至2025年，我国公路桥梁总数超百万座，服役超20年的占比35%。受多种因素影响，桥梁病害隐患突出，传统运维模式难适应精细化养护需求。

当前运维体系存在三重矛盾：知识碎片化，多源信息分散且非结构化，共享复用难；信息化水平低，人工巡检效率低、漏检率大，难早期干预病害；专家经验难传承，复杂病害诊断依赖个体判断，加剧人才培养与应急响应压力。

大语言模型与知识图谱融合可推动桥梁运维从被动维修向主动预警转型。国外研究起步早，在病害识别与知识检索有效果，但多聚焦特定桥型，领域模型适配深度不足；国内围绕病害诊断与健康监测开展图谱构建探索，提升单点运维效率、缓解人工标注压力，但对复杂文本处理能力有限。大语言模型与桥梁运维结合尚处起步阶段，存在技术融合不深等问题，图谱时效性与实用性难满足工程需求。

本文以桥梁运维知识整合与智能化应用为核心，融合大语言模型与知识图谱技术优势，构建面向工程实践的桥梁运维知识图谱。系统梳理领域核心知识体系，明确图谱构建范围与核心要素，建立标准化知识表示框架，解决知识碎片化问题。提出基于大语言模型的运维知识抽取方法，通过提示工程优化与领域微调，提升隐性知识抽取精度，降低人工标注成本，为桥梁运维转型提供技术支持。

1 相关理论与问题成因分析

1.1 知识图谱核心技术

知识图谱以其对实体、关系与属性的结构化组织能力，是支撑桥梁运维智能决策的重要基础。其基本组成单位为“实体 - 关系 - 实体”三元组及实体及其相关属性 - 值对，实体通过关系联结成网状知识结构，本体涵盖构件、病害等核心概念。知识图谱是结构化语义知识库，用于描述物理世界概念及关系。在工业领域（如桥梁运维），实体识别聚焦“支座、裂缝、腐蚀”等构件与病害类型，关系抽取建立“构件 - 病害”等关键关联以实现运维知识语义关联。王鑫等强调 Neo4j 是流行的属性图数据库，有“无索引邻^[2]接”特性。现有研究勾勒出“本体设计—知识抽取—知识融合—知识存储”技术链条，但存在局限：知识来源局限于规范文本与检测报告，对动态监测数据、历史维修案例融合不足，图谱知识密度低；构建多为一次性静态工程，缺乏动态更新机制，难适配知识迭代需求。

1.2 大语言模型核心能力

大语言模型的发展为桥梁运维信息处理开辟新路径。通过指令微调使模型掌握专业术语，实现规范报告生成；借助提示工程从非结构化文本中自动抽取病害信息，降低人工成本；探索传感器数据与文本联合输入，实现双模态推理。大语言模型首先将问题转化为“问题 PDDL”，然后请求经典规划器基于现有领域 PDDL 生成 PDDL 规划，将 PDDL 规划转化回自然语言，输入大语言模型中得到解答。该方法将保证逻辑正确的经典规划器优势与大语言模型强大的语义理解能力相结合，使代理能够解决对话描述的复杂规划任务^[3]。但现有架构仍存不足：各功能模块彼此割裂，未形成支撑完整决策的业务闭环；模型输出缺乏领域知识约束，推理路径难追溯，

与工程对可靠性的要求存在差距。

1.3 桥梁运维体系现状

传统设计理论主要关注结构安全，未涉及桥梁使用期管理、养护等诸多问题^[4]。我国桥梁超 96 万座，多依赖人工定期检测，知识沉淀不足，导致重复检测等现象频发。传统运维缺知识图谱支撑，难以实现数据到决策闭环，多源异构数据整合有短板。现有病害检测模型多单模态，缺跨模态知识融合，检测结果难与历史记录等关联，影响决策科学性。

上述研究环节割裂。检测端病害识别仅输出标签，无法关联构件位置等；管理端知识图谱停留在静态本体阶段，未与实时监测数据打通；决策端依赖专家经验，缺知识图谱推理与大语言模型生成的协同机制。三端断点本质是知识链断裂。打通“检测→管理→决策”全流程知识链路，构建“数据→知识→决策”闭环智能系统，是当前桥梁运维领域亟待突破的核心课题，也是本文研究的整体目标。

2 大语言模型辅助的桥梁运维知识图谱构建

2.1 图谱本体架构设计

围绕桥梁运维数据结构化缺失痛点，提出融合大语言模型的知识图谱本体双层架构。从桥梁事故数据归纳出十二个实体（桥梁、事故等）和六个属性（事故发生地点、响应措施等）。引入大语言模型为概念体系补全、本体校验及术语规范对齐提供技术支撑，降低知识图谱构建对专家人工参与的依赖。以大语言模型为核心的技术将多源异构信息转化为标准化三元组结构。知识融合与动态更新机制协同运作，保障异构数据语义对齐、消解潜在冲突及本体演化更新。该架构核心创新在于“大语言模型全程贯穿”理念与动态演化机制，共同构建多源数据转化为结构化知识的完整路径。

2.2 多源数据预处理与 LLM 辅助知识抽取

在大语言模型辅助桥梁运维知识图谱构建的过程中，多源数据预处理与智能知识抽取构成突破传统模式自动化瓶颈的核心环节。桥梁运维数据普遍呈现多模态与异构性特征，其来源涵盖传感器监测数据、人工检测记录、历史养护文档等多种类型，数据结构涵盖结构化与非结构化两种形态。传统人工处理模式长期面临效率偏低、一致性不足、专业依赖度高等问题，严重制约图谱规模化构建。

多源数据预处理构建“分类整合—清洗校准—融合对齐”全流程体系。针对数据异质性采用统一格式转换

与元数据标注策略，将 JSON、PDF、传感器信号等多格式数据归一化处理。通过降噪算法剥离环境干扰信号，补充缺失值、剔除冗余数据，依据行业规范完成缺陷参数量化与空间坐标统一。借助 BIM/GIS 技术完成时空融合与特征融合，建立“监测参数—物理缺陷”映射关系，为知识抽取奠定数据基础。

大语言模型深度介入破解知识抽取自动化程度低的痛点。通过构建领域适配智能体框架，利用模型对多模态文档理解能力实现桥梁病害类型、养护措施、结构参数等关键实体自动识别。结合检索增强生成技术与领域知识库联动，精准抽取“病害位置—损伤程度—维修方案”等语义关系形成结构化三元组。该方案将数据处理效率提升数倍，通过标准化语义解析降低人工误差，三元组准确率显著提升。

2.3 知识融合与图谱实现

在大语言模型辅助桥梁运维知识图谱的构建过程中，知识融合与图谱实现共同构成决定应用成效的核心环节。检测报告、监测系统、维修记录等多源渠道提供的运维数据，即便已完成初步信息抽取，仍然普遍存在语义表达不一致、实体关系相互矛盾、重复冗余信息较多等问题。未经融合处理的数据若直接载入图谱，查询准确性与响应效率均难以得到保障。

知识融合以“提升质量、消除异构”为核心，构建了“语义对齐—冲突消解—冗余剔除”的三级融合体系。语义层面依托大语言模型对桥梁运维术语的深层理解能力建立统一表达框架，将不同来源中指向同一实体的表述进行归并与对齐。冲突层面针对属性描述与关系逻辑中出现的矛盾，结合养护规范和历史维修记录开展可信度评估，由模型筛选符合工程逻辑的数据。冗余层面运用知识图谱嵌入技术识别重复或低价值的信息节点，在不破坏核心关联网络的前提下压缩知识规模，进而提升图谱简洁性与检索效率。

图谱实现层面着重解决存储适配与查询性能问题。结构化三元组交由 Neo4j 图数据库进行管理，该图结构天然支持构件、病害、维修措施之间的多层关联查询。非结构化检测报告、现场图像等附件存入 MongoDB，通过数据分片机制保障存储扩展性。借助大语言模型识别低频访问节点和关联，构建“核心图谱+扩展图谱”的分层存储结构，将高频业务查询限定在核心层内完成。配合索引优化与缓存机制，核心查询响应时间可控制在毫秒级范围。

知识融合环节解决多源数据质量参差不齐问题，图谱实现环节兼顾存储效率与查询性能，使桥梁运维知识

图谱具备从理论构建走向实际应用的基础,为健康监测、病害诊断、养护决策等业务场景提供有效支撑。

3 大语言模型下桥梁运维知识图谱的智能应用

3.1 桥梁运维状态评估

针对传统桥梁状态评估方法对病害语义特征利用不足、难以清晰刻画时序演化与因果链条等问题,本文提出一种融合知识图谱与大语言模型的桥梁运维状态智能评估方法。该方法构建涵盖“桥梁—构件—材料—病害—规范”多维度的桥梁运维知识图谱,为状态评估提供标准化语义框架;利用大语言模型对巡检文本进行实体识别与关系抽取,通过图谱本体约束实现病害描述的消歧与归一化处理,完成多源异构数据的语义对齐;设计基于图推理的状态传导机制,从单点病害出发沿因果链路逐级推演对构件承载力、结构体系安全性的级联影响,并由大语言模型生成可解释性推理结论;将历次检测与维修记录抽象为时间轴上的事件节点,构建面向劣化趋势的时序分析模型,实现状态演化的动态追踪与溯源归因。工程实例验证表明,该方法能够有效挖掘病害间的耦合效应与演化规律,输出具备完整证据链条的评估结果,在评估准确性、可解释性与可追溯性方面均优于传统方法。

3.2 检修策略智能推荐

针对桥梁检修策略制定中信息不完备与多目标权衡的双重困境,本文提出融合知识图谱与大语言模型的智能决策方法,通过“需求解析—策略适配—反馈优化”三阶段实现检修方案动态生成。

需求解析阶段将状态评估识别的风险项与图谱中构件重要度语义关联,借助大语言模型整合多源证据形成结构化需求清单,针对数据缺失场景设计自适应补全策略。策略适配阶段采用案例推理与约束优化融合的双通道机制,检索图谱中相似历史案例生成候选方案,通过规则引擎剔除不合规选项;将图谱输出的风险等级与交通影响指标输入优化模型,求解资源约束下的最优作业组合,由大语言模型将数学解转化为施工组织说明。策略内容按结构性、耐久性、功能性病害分层设计,确保处治措施与劣化机理深度对应,以“措施—依据—前提”逻辑框架呈现。

反馈优化阶段将验收数据与成本偏差持续回写至知识图谱,通过大语言模型语义归因构建“方案—效果—修正”迭代进化机制,实现系统在动态环境下的自适

应提升。实际应用表明,该方法显著提升检修策略精准性与可操作性,推动桥梁运维决策从局部数据分析向系统性知识推理转变。

4 结论

桥梁运维管理向精细化转型进程中,传统模式下知识离散、隐性经验难传承的结构性缺陷日益凸显,推动了大语言模型与知识图谱技术的协同探索。二者深度融合为破解知识孤岛、实现从经验依赖向知识驱动跃迁提供了系统性路径。从研究进展审视,国外围绕数据整合与场景应用积累了成熟技术储备,但针对桥梁运维专业语境的模型适配仍有不足;国内研究在特定场景取得阶段性突破,但技术融合深度、专用模型研发及图谱动态更新机制仍存明显短板。文献表明,构建“知识整合—高效抽取—智能应用”闭环是核心命题,多源异构数据融合、大语言模型领域适配、图谱动态演化三大技术突破将决定该领域从理论走向工程的进程。未来应推进技术融合纵深,开发轻量化专用模型提升隐性知识抽取精度;健全知识治理体系,实现图谱与实时监测数据动态联动;拓展智能应用边界,推动病害诊断、风险预警等业务深度融合;强化技术转化与协同创新,立足国内需求借鉴国外经验,为交通基础设施运维智能化转型提供支撑。

参考文献

- [1] 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(03):582-600.
- [2] 王鑫;邹磊;王朝坤;彭鹏;冯志勇,知识图谱数据管理研究综述.软件学报2019,30(07),2139-2174.
- [3] 文森,钱力,胡懋地,等.基于大语言模型的问答技术研究进展综述[J].数据分析与知识发现,2024,8(1):1-18.
- [4] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2024[J].中国公路学报,2024,37(12):1-160. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.12.001.
- [5] 郭辉.基于知识图谱的桥梁事故智能问答系统的设计与实现[D].西南大学,2023. DOI:10.27684/d.cnki.gxndx.2023.001919.

作者简介:吴梦雨,2005年,女,汉,江苏南通,无,本科,工程造价。