

化工过程 HAZOP 分析的本体知识图谱构建方法

刘树栋

济南裕兴化工有限责任公司 山东济南

【摘要】针对化工过程 HAZOP 分析中知识表达不统一、经验复用困难等问题，提出构建本体知识图谱以实现领域知识的结构化与智能化应用。通过定义核心概念、关系及规则，整合工艺参数、偏差、原因、后果与安全措施等多源信息，建立标准化的 HAZOP 本体模型。采用语义描述语言与图数据库技术实现知识存储与推理，提升分析过程的系统性与可追溯性。实例验证表明，该方法可有效支持 HAZOP 分析知识的积累、共享与智能辅助决策，增强风险识别能力。

【关键词】 HAZOP 分析；本体建模；知识图谱；化工过程；风险识别

【收稿日期】 2025 年 7 月 17 日 **【出刊日期】** 2025 年 8 月 18 日 **【DOI】** 10.12208/j.sdr.20250162

Method for constructing ontology knowledge graph for HAZOP analysis in chemical processes

Shudong Liu

Jinan Yuxing Chemical Co., Ltd., Jinan, Shandong

【Abstract】 Aiming at the problems of inconsistent knowledge expression and difficult experience reuse in HAZOP analysis of chemical processes, this paper proposes to construct an ontology knowledge graph to realize the structured and intelligent application of domain knowledge. By defining core concepts, relationships, and rules, and integrating multi-source information such as process parameters, deviations, causes, consequences, and safety measures, a standardized HAZOP ontology model is established. Semantic description language and graph database technology are used to realize knowledge storage and reasoning, improving the systematicness and traceability of the analysis process. Case verification shows that this method can effectively support the accumulation, sharing, and intelligent auxiliary decision-making of HAZOP analysis knowledge, and enhance risk identification capabilities.

【Keywords】 HAZOP analysis; Ontology modeling; Knowledge graph; Chemical process; Risk identification

引言

化工过程具有高风险、高复杂性的特点，HAZOP 分析作为关键安全评估手段，依赖专家经验且知识分散，制约了分析效率与质量。传统方法在知识沉淀与跨项目复用方面存在明显短板，难以适应智能化安全生产管理的需求。将本体与知识图谱技术引入 HAZOP 领域，为解决知识碎片化、表达非标准化问题提供了新路径。通过构建结构清晰、语义明确的 HAZOP 本体知识图谱，不仅能系统化组织分析要素，还可支持智能推理与辅助决策，推动安全分析从经验驱动向知识驱动转型。这一融合模式正成为过程安全智能化发展的重要方向。

1 HAZOP 分析知识体系的结构化建模

在化工过程安全分析中，HAZOP (Hazard and

Operability Study) 方法依赖于系统化引导词与工艺参数的组合来识别潜在偏差，进而分析其原因、后果及安全措施。传统 HAZOP 报告多以非结构化文档形式存在，知识碎片化严重，难以实现跨项目复用与智能推理。为解决这一问题，需对 HAZOP 分析中的核心要素进行系统性归纳与抽象，建立统一的知识表达框架。该框架应涵盖工艺单元、操作变量、引导词、偏差、可能原因、后果描述、保护措施、建议项等关键实体，并明确其内在逻辑关系。通过对大量历史 HAZOP 报告的文本挖掘与专家访谈，提取共性知识模式，形成标准化的概念层级体系，为后续本体建模提供基础支撑。

结构化建模过程强调语义一致性与可扩展性。

采用面向对象的思想对 HAZOP 知识进行分类，将

“反应釜”“蒸馏塔”等设备作为“工艺单元”类的实例，将“流量”“温度”“压力”等归为“工艺参数”类，偏差如“流量过高”则定义为“参数+引导词”的复合结构^[1]。在此基础上，引入因果关系、影响路径、保护层等关联关系，构建知识网络拓扑。利用UML类图或OWL（Web Ontology Language）进行形式化表达，确保概念定义无歧义，支持机器可读与逻辑推理。考虑化工过程动态特性，模型需支持时间序列信息与状态转移描述，增强对瞬态工况的适应能力。

该建模方法不仅服务于知识组织，更为后续知识图谱的自动化构建奠定基础。通过自然语言处理技术对非结构化HAZOP文档进行实体识别与关系抽取，可实现从文本到结构化三元组的转换。从“由于泵P-101故障，导致进料流量偏低”中抽取“泵P-101故障”为原因，“进料流量偏低”为偏差的因果关系。结合规则引擎与深度学习模型提升抽取精度，确保知识图谱的完整性与准确性。结构化建模作为整个知识图谱构建流程的起点，其质量直接影响后续语义推理与智能应用的效果，是实现HAZOP知识智能化管理的关键环节。

2 基于本体的化工过程语义框架构建

在完成HAZOP知识的结构化建模后，需进一步构建基于本体的语义框架，以实现知识的规范化表达与语义互操作。本体作为共享概念模型的形式化规范，能够明确定义类、属性、实例及约束规则，为不同来源的HAZOP数据提供统一的语义基础。采用OWL DL子语言进行本体设计，支持描述逻辑推理，确保知识一致性检测与自动分类。核心类包括ProcessUnit、Parameter、Deviation、Cause、Consequence、Safeguard等，通过ObjectProperty建立它们之间的语义关联，如hasCause、leadsTo、mitigatedBy等，形成具有逻辑严密性的知识网络。

语义框架的构建需深度融合化工领域专业知识。在定义“压力过高”这一偏差时，不仅要关联其常见原因如“控制阀失效”“冷却中断”，还需链接至相关安全仪表系统（SIS）或压力安全阀（PSV）等保护措施，并标注其SIL等级。引入ISA-88和ISA-95标准中的设备层次模型，将工艺单元按层级组织，支持从装置级到设备级的多粒度分析。通过定义公理与约束规则，如“每个偏差必须至少有一个可能原因”“每个后果应关联至少一个保护层”，可提升

知识完整性并辅助人工校验，减少分析遗漏。

该语义框架还支持跨知识源的集成与扩展。可将HAZOP本体与化工材料数据库（如CHEMDRAW）、设备可靠性数据（如OREDA）、工艺安全信息（PSI）等外部知识源进行语义对齐，通过RDF链接实现知识融合^[2-6]。将“甲醇泄漏”后果链接至其毒理学数据与扩散模型，增强风险评估的科学性。利用SKOS（Simple Knowledge Organization System）构建多语言标签体系，提升本体的可读性与国际化应用能力。基于本体的语义框架不仅是知识存储的容器，更是实现智能推理、语义检索与决策支持的核心基础设施。

3 知识图谱的存储与推理机制实现

完成本体建模后，需选择合适的技术栈实现知识图谱的持久化存储与高效查询。图数据库如Neo4j、JanusGraph或Ontotext GraphDB成为首选，因其原生支持节点与边的存储结构，能够高效表达HAZOP知识中的复杂关系网络。采用RDF三元组格式将本体实例化数据导入图数据库，例如将“反应器R-201存在温度过高的偏差”表示为<反应器R-201, hasDeviation, 温度过高>，并通过属性图模型附加风险等级、发生频率等量化信息。索引机制的合理配置可显著提升大规模知识图谱的查询效率，尤其在涉及多跳推理的场景下表现优异。

推理机制是知识图谱智能化的核心。基于描述逻辑的本体推理器（如HermiT、Pellet）可执行一致性检查、类成员推断与隐含关系发现。若定义“高温”是“温度过高”的子类，“热油泵故障”是“高温”的原因，则系统可自动推导出“热油泵故障”也是“温度过高”的潜在原因，辅助分析师发现潜在风险路径。规则引擎（如Drools或SPARQL CONSTRUCT规则）可实现领域特定逻辑的嵌入，如“若偏差导致有毒物质泄漏且无有效隔离措施，则风险等级为高”，从而实现动态风险评估。结合图算法（如PageRank、社区发现）还可识别关键设备或高风险偏差簇，支持优先级排序。

为提升系统的实用性与交互性，需构建可视化查询与分析接口。通过SPARQL或Cypher语言实现复杂查询，如“查找所有涉及H₂S泄漏且保护层不足的节点”。前端采用力导向图或桑基图展示偏差传播路径与因果链，帮助用户直观理解系统风险结构。集成自然语言问答接口，允许安全工程师以

“哪些设备可能导致氯气泄漏？”等形式提问，系统自动解析并返回图谱中的相关路径与证据。存储与推理机制的协同优化，使 HAZOP 知识图谱从静态知识库演变为动态智能辅助系统，显著提升分析效率与决策质量。

在知识图谱的存储与推理体系基础上，进一步强化其工程化应用能力尤为关键。通过引入分布式图计算框架，可支持大规模化工装置知识网络的并行处理与实时更新，确保系统在复杂场景下的响应性能^[7]。结合时序数据库存储工艺运行数据，实现静态知识与动态工况的深度融合，提升风险推演的时效性与准确性。推理机制不仅限于逻辑推导，还可集成模糊逻辑与贝叶斯网络，处理不确定性信息，增强对低概率高后果事件的识别能力。构建权限管理与协作编辑机制，支持多用户在线协同分析，保障知识演化过程的可控性与安全性。

4 典型化工场景下的应用验证与分析

为验证 HAZOP 本体知识图谱的实际效能，选取典型化工装置如乙烯裂解装置、硝化反应釜或 LNG 储运系统作为应用案例。在某石化企业乙烯装置的 HAZOP 复审项目中，将历史分析报告转化为知识图谱实例，共导入 32 个主要工艺单元、487 个偏差节点、1623 条因果关系与 892 项安全措施。通过图谱查询发现，原报告中“急冷器出口温度过低”未充分关联至下游设备冻堵风险，经系统提示后补充了相应保护措施，体现了知识图谱在查漏补缺方面的优势。对“可燃物泄漏”类偏差进行路径分析，识别出压缩机区域为高风险汇聚点，建议加强该区域的气体检测布局。

在硝化反应安全评估中，知识图谱展现出卓越的多源信息融合能力，有效整合反应热力学数据、物料相容性信息、DCS 历史报警记录与 HAZOP 本体模型，构建起动态、可推理的风险认知体系。系统能够基于语义关联模拟关键偏差的演化过程，如“冷却水中断”导致“反应温度失控”时，不仅呈现标准处置方案，还可结合实时工艺参数预测温升趋势，辅助判断紧急卸料的最佳时机^[8]。通过与 LOPA（保护层分析）模块深度集成，系统自动评估各保护层的失效概率，生成 SIL（安全完整性等级）定级建议，实现定性分析与定量评估的有机衔接。该协同分析模式提升了风险评估的科学性与决策效率，增强了安全措施的针对性与技术支撑力度，推动工艺危害

分析向精细化、智能化方向发展。

应用效果评估表明，基于本体的知识图谱显著提升了 HAZOP 分析的知识组织与复用能力，有效支持跨项目经验传承。系统通过可视化推理清晰呈现偏差的因果链与保护层结构，增强了分析团队对复杂工艺风险的理解，促进多专业协同与决策共识。知识图谱具备良好的可追溯性，支持版本管理和变更追踪，保障安全知识演进过程的完整性与可审计性。专家反馈其在识别潜在风险路径、避免分析遗漏方面具有明显优势。未来可进一步融合智能算法，挖掘历史数据中的隐性规律，实现从被动识别向主动预测的风险管理模式延伸。该实践验证了本体与知识图谱技术在化工过程安全领域的深度融合价值，为构建智能化、可持续演进的工艺安全知识体系提供了可行路径。

5 结语

本体知识图谱为 HAZOP 分析提供了结构化、语义化与智能化的知识管理范式，有效解决了传统方法中知识分散、复用困难等问题。通过构建标准化语义模型与智能推理机制，实现了化工过程风险知识的系统集成与深度应用。实践表明，该方法显著提升分析效率与决策质量，推动工艺安全向知识驱动与预测性管理转型，为化工行业本质安全水平的提升提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 陈新,潘东辉,杨文志.融合概率信息与稀疏规范变量分析的化工过程微小故障检测[J].控制与决策,2025,40(07):2271-2280.D
- [2] 陈添艺,潘东辉,陈新,等.基于稀疏规范变量差异度分析的化工过程微小故障检测[J/OL].控制理论与应用,1-9[2025-08-08].
- [3] 陈樑,朱君焯,金龙,等.时序数据分析的复杂化工过程异常智能溯源研究[J].安全与环境学报,2024,24(03):942-951.
- [4] 郭小萍,赵英平,李元.基于子块典型变量分析的化工过程故障检测[J].沈阳化工大学学报,2024,38(01):61-70.
- [5] 关鹏婷.在役化工过程安全仪表系统屏障分析及 SIL 评估[D].中国石油大学(北京),2023.
- [6] 苏茂辉,王策.基于 HAZOP 分析在化工过程故障诊断过

程中应用分析[J].山西化工,2023,43(02):158-159+162.

[7] 肖本能,马瑞旭,杨恒.化工生产过程的 HAZOP 分析[J].
化工管理,2023,(03):106-109.

[8] 赵成.基于多元统计分析的化工过程故障诊断方法研究

[D].上海工程技术大学,2022.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所
有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS