

石油化工智能 HAZOP 分析技术的应用进展与挑战

孙华平 (江苏国恒安全评价咨询服务有限公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 石油化工智能 HAZOP 分析技术有助于突破传统石油化工风险管理存在的局限性, 对于满足大规模、复杂化石油化工装置风险管理需求具有深远意义。基于此, 研究以石油化工智能 HAZOP 分析技术的应用进展与挑战展开分析, 论述了传统 HAZOP 分析原理与流程、智能技术赋能的理论框架、智能 HAZOP 的技术融合路径。进而提出智能 HAZOP 在石油化工的应用进展及智能 HAZOP 技术面临的挑战及应对策略, 为广大学者提供参考帮助及建议。

关键词: 石油化工; 智能 HAZOP 分析技术; 应用进展; 面临挑战

中图分类号: TQ086; TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 007-0007-03

Advances and Challenges in the Application of Intelligent HAZOP Analysis Technology for Petrochemical Industry

Sun Huaping (Jiangsu Guoheng Safety Evaluation and Consulting Services Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210019, China)

Abstract: Intelligent HAZOP analysis technology in the petrochemical industry helps overcome the limitations of traditional petrochemical risk management and holds profound significance in meeting the risk management demands of large-scale and complex petrochemical facilities. Based on this, this study analyzes the application advances and challenges of intelligent HAZOP analysis technology in the petrochemical sector. It discusses the principles and processes of traditional HAZOP analysis, the theoretical framework enabled by intelligent technologies, and the integration pathways of intelligent HAZOP. Furthermore, it presents the application progress of intelligent HAZOP in the petrochemical industry, the challenges faced by intelligent HAZOP technology, and corresponding strategies, aiming to provide reference, assistance, and suggestions for scholars in the field.

Keywords: Petrochemical Industry; Intelligent HAZOP Analysis Technology; Application Progress; Challenges

石油化工作为国民经济重要产业之一, 其生产高温、高压、易燃、易爆及有毒有害等特点非常突出, “两重点一重大”生产储存装置较多, 导致安全风险防控难度大幅度提升。HAZOP 即危险与可操作性分析技术, 作为结构化、系统化的风险辨识工具, 通过“引导词+参数”的矩阵检查方法可以发现装置存在的偏差及风险, 目前已被广泛应用于石化企业的安全管理体系中。传统 HAZOP 分析技术存在着分析周期长、效率低、主观性大及辨识风险不够等风险^[1]。基于此, 研究以石油化工智能 HAZOP 分析技术的应用展开研究, 旨在为广大学者提供参考帮助及建议。

1 HAZOP 分析与智能化技术基础

1.1 传统 HAZOP 分析原理与流程

传统 HAZOP 分析方法主要采用“引导词、工艺参数”组合模式来识别偏离设计目的的状态, 利用演绎法寻找产生偏差的原因及可能引起的危害结果并提出建议预防措施, 其本质上为定量风险辨识技术。传统 HAZOP 分析方法一般分为 6 个步骤: ①获取 P&ID 图纸、工艺指标及技术规格书等相关文件, 成立多专业的分析小组; ②对工艺过程进行划分并确定分析点, 即把整个生产流程分成若干个相对独立的部分, 如反

应部分、精制部分、运输部分等, 保证分析全面性和聚焦性; ③偏差发现, 采用引导词、重要过程参数; ④对各项发现偏离, 挖掘其可能发生的原因, 推理其可能引发的后果及影响; ⑤风险分析及应对措施, 使用风险矩阵等方式分析偏差存在的风险级别, 并针对现有的安全防护, 提出补充控制措施使得风险处于可接受状态; ⑥描述分析过程及结果, 并最终形成包括偏差、原因、后果、风险等级、控制措施等内容的报告。

1.2 智能技术赋能的理论框架

基于“数据驱动、知识赋能、模型映射”智能 HAZOP 分析方法理论体系的智能 HAZOP 方法的关键, 旨在利用智能化手段摆脱传统 HAZOP 对人员经验水平的依赖性, 并能自动地完成风险识别、分析、评价全过程。其框架主要涵盖数据层、知识层及应用层三部分, 各层次互相支持、彼此配合, 形成完整的系统。具体如下:

1.2.1 数据层

数据层主要负责多源异构数据融合, 其中数据源有静态数据和动态数据分类, 静态数据一般包含工艺流程图、设备参数信息、设计资料、以往的 HAZOP 报告以及相关标准和规定等; 动态数据通常指实时

采集到生产中各点温度、压力、流速等相关传感装置反馈的信息,包括设备运行维护情况、事故数据及 SCADA 数据等^[2]。

1.2.2 知识层

作为智能 HAZOP 的赋能层,主要目的在于建立系统的工艺安全知识库;即采用知识工程、本体建模等方法,对零散的专家知识、规范、事故资料进行处理,形成可被计算机理解和推导的知识。此外,通过创建包括工艺参数、引导词、偏差类型、故障模式、后果类型、控制措施等实体以及部分实体间的关系的 HAZOP 的本体模型,形成标准化的知识图谱;并结合历史 HAZOP 案例、事故统计数据等建立案例知识库、规则推理库,达到知识共享、复用目的。

1.2.3 应用层

应用层作为智能 HAZOP 的输出载体,即利用机器学习、数字孪生、虚拟现实等智能技术实现 HAZOP 分析流程的智能化应用;包括智能建模、自动偏差识别、风险推理、后果仿真、报告自动生成等功能模块,其核心理论为基于数据驱动模型训练及基于知识的推理决策^[3]。

1.3 智能 HAZOP 的技术融合路径

智能 HAZOP 技术路线是指多种技术手段进行整合的过程,即人工智能、大数据、数字孪生等技术与 HAZOP 分析法有机地结合的过程。一方面,基于实时生产数据自动发现异常偏差,预测风险发展变化趋势,提高风险辨识准确性和及时性;通过知识图谱及推理机的应用,实现风险原因链条的自动推演,替代传统的人工头脑风暴过程,降低分析的主观性;二是通过建立大规模工艺安全数据库,将历史生产数据、事故、维护维修等各类数据纳入其中,在此基础上利用数据挖掘方法揭示数据背后潜在的安全联系,如某两种工艺参数变化之间可能存在交互影响从而增大风险发生的可能性等。采用大数据进行量化风险分析,克服 HAZOP 分析方法定性的缺陷,在海量数据的基础上利用统计和概率模型对风险的发生概率及后果严重程度进行量化估算,并以此为基础进行风险等级划分^[4]。

2 智能 HAZOP 在石油化工的应用进展

2.1 智能辅助建模与流程自动化

智能辅助建模及流程自动化作为智能 HAZOP 在石油化工领域应用的重要研究方向,利用智能手段减少建模的工作量,进一步提高 HAZOP 分析流程的自动化水平。传统的 HAZOP 建模需要手工绘制 PFD 及划分子节点,效率较低,智能 HAZOP 软件利用图像识别技术和计算机视觉算法,在 1s 内即可识别 P&IDs 图纸上的设备、管线、仪表等要素并提取出工艺的拓

扑关系,根据设定好的规则进行节点划分,以此有效提高建模速度。

在分析过程智能化方面,智能 HAZOP 软件实现了从偏差发现到分析报告编制的全部过程自动化。如采用 SDG、知识图谱方法,结合工艺原理及以往经验自动给出“引导词—参数”,用于发现偏差;借助智能推理算法对自动追溯导致偏差的原因,推演会导致什么结果,然后匹配现有的安全保护层,进行初步的风险评价。当分析完成以后,可自动形成 Word/Excel/PDF 结构化报告,包含偏差清单、因果链、风险等级、控制措施等详细信息,格式统一、内容完整,可直接满足石油化工行业监管要求^[5]。

2.2 知识驱动的风险推理系统

知识驱动的风险推理系统作为智能 HAZOP 的核心应用模块,主要功能为基于大量工艺安全知识构建的大规模知识库进行风险因果链的准确推理与预警;其核心技术为基础知识图谱及规则推理系统的融合运用,知识库包含 10 万个以上工艺安全知识点。包含典型错误种类、故障形式、事故事例、管控手段等内容,涵盖石化行业主流装置及工艺类别。在风险推理过程中,系统会基于本体模型定义的实体关系与 SWRL 规则,结合实时生产数据实现风险因果链的自动推演。

此外,部分先进的系统还增加机器学习算法,通过在历史事故和生产数据中训练建立风险预测模型可对出现偏差的场景进行预测,达到风险的超前预警效果。如利用 LSTM 神经网络建立偏差预测模型,通过分析以往温度、压力变化的趋势就可以,提前 30min 预判可能发生温控偏差,给操作留有充分的时间处理。

2.3 人机协同分析与决策优化

智能 HAZOP 高级应用形式为人机协同分析及决策优化,主要是实现“机器智能分析+专家经验验证”,发挥机器效率高、专家权威性强的优势,提高风险决策水平。在人机协同分析中,由智能体先进行初步风险分析,输出候选风险清单及因果链分析报告;然后由专家通过人机交互界面来验证、纠错以及完善分析结果,并对机器难以识别的风险情况进行人工处理,以此有效提高分析结果的精确性。

2.4 应用实例分析

以某石化企业 120 万 t/a 乙烯装置改造项目智能 HAZOP 分析为例,项目应用数字孪生+知识图谱驱动型智能化 HAZOP 工具,通过人工智能算法对图纸进行高精度图片解析,采用图像识别、语义分割技术自动提取设备、管道、仪表等核心元素,结合乙烯装置工艺特点,科学划分出裂解炉单元、分离器单元、换热器单元等独立分析单元,保证分析范围无遗漏、

无重叠；进而在基于工具内搭建的乙烯装置专属知识库的基础上，整合乙烯项目历史经验事件、边界条件信息、设备特性等相关重要信息，在知识挖掘的基础上利用知识图谱技术进行智能关联分析，如“裂解炉超温”“分离器压差低”“反应器进料波动”“冷却水上水温度过高”“裂解气组成异常”“连锁点虚假动作”，以此精准对接项目改造风险特征。如针对“裂解炉超温”偏差的分析就体现出智能 HAZOP 方法相对于传统的手工分析更加全面深刻。

在人工进行 HAZOP 分析时，人员通常凭借自身经验和知识去分析超温现象，导致分析存在习惯性、局限性、单一性。依托智能化 HAZOP 软件可以从不同角度进行多方位的考虑，将隐患点全部考虑到。如基于数字化建模软件还原裂解炉的实际工况，并结合实际生产过程中的动态信息，一方面对可能的操作原因进行检查，如燃料气控制阀门故障造成实际开度不准确、温度控制回路 PID 整定值不合适出现调节过慢等情况；另一方面依据知识图谱中相关设备的历史记录，查找设备自身及外部因素可能带来的影响，如炉管结焦、炉管高温渗碳造成的材质损伤，以及原料性质波动等情况。

3 智能 HAZOP 技术面临的挑战

3.1 技术层面的挑战

智能 HAZOP 在技术上面面临的数据融合、模型精度与实时性、算法可靠性等问题，在数据融合方面，石油化工企业生产数据是典型的多源异构、格式不统一的数据集合，包括结构化传感器数据、半结构化运维数据以及非结构化图纸及报告等。由于来自不同源的数据语义存在很大差别，且数据的质量也不尽相同，如何建立起高质量的工艺安全数据库，成为智能 HAZOP 技术的主要瓶颈。同时，数据隐私及安全问题也日趋严重，由于生产数据蕴含较多企业关键工艺数据，在数据共享和利用的过程中确保数据的安全性、防止信息外泄成为影响数据驱动型智能 HAZOP 发展的关键。

3.2 行业适配性与标准化问题

智能化 HAZOP 技术还存在着对行业适应性差及缺乏规范标准的问题。关于对行业的适应性，由于不同的石油及化学工业装置其生产工艺流程种类繁多，规模大小不一，生产工艺流程复杂程度也各不相同，如原油炼制、乙烷裂解、有机合成等生产工艺过程所具有的风险特点均存在很大差异；而目前的智能化 HAZOP 方法以通用性的方法为主，但无法适应于不同生产工艺，不能保证其在具体装置中的分析结果的风险辨识准确性、针对性。如大型乙烯装置开发的智

能化 HAZOP 分析技术应用到精细化工间歇式生产装置时，因该类装置存在工艺过程变化频繁、偏差多等特点，智能化 HAZOP 分析的效果将明显变差。

3.3 实施与推广障碍

开展和应用智能 HAZOP 技术面临成本、人才等方面的问题。成本方面，智能 HAZOP 的建设和使用成本较高。智能 HAZOP 建设过程中涉及高配置计算机、专门程序设计以及数据库的建立，且在后续使用中还需不断投入资金进行系统升级、数据维护、知识库更新等，对中小规模的石化企业来说，成本压力大，难以承受。人才方面：智能 HAZOP 的应用需同时具备石油化工工艺安全技术和人工智能、大数据、数字孪生等智能技术双重背景的专业人员。目前行业复合型人才紧缺，现有安全管理人员多不具备智能技术背景，无法很好地使用和维护智能 HAZOP 软件。然而，从事智能化技术工作的人员往往不懂工艺安全，不能准确把握业务需求，使得软件设计及实施偏离业务目标。

4 结论

综上所述，智能化 HAZOP 方法能有效提升 HAZOP 分析效率及危险辨识质量，缩短 HAZOP 分析周期，降低企业安全投入费用，具有较高的学术及工程实践意义。现有的智能化 HAZOP 技术存在一定的局限性，在智能化方面还存在信息整合困难、智能化模型精确性和时效性差、智能化算法稳定性不够等问题。文章认为，应加大核心技术研发力度，加强多源异构数据融合、高精度数字孪生模型构建及可解释人工智能等核心技术研发，提高智能系统可靠性与实时性。此外，推动智能化 HAZOP 标准体系建设工作，加紧编制智能化 HAZOP 数据格式、智能化 HAZOP 技术规范、智能化 HAZOP 分析结果评价等行业标准，进而建立完备的标准体系，以此为石油化工安全管理奠定良好基础。

参考文献：

- [1] 严阳. 基于 HAZOP 分析的化工工艺过程安全隐患治理策略探讨 [J]. 化工设计通讯, 2025, 51(12): 137-139.
- [2] 谢洪龙. 石油化工装置 HAZOP 分析技术应用与风险防控研究 [J]. 化学工程与装备, 2025, (09): 118-120.
- [3] 张金华, 包娜娜, 邢屹. 化工过程安全分析方法的协同进化——HAZOP-LOPA-SIS 集成策略的多维度比较 [J]. 化工自动化及仪表, 2025, 52(05): 806-811.
- [4] 张羽瑄, 唐杰, 伍全红. 信息化平台在 HAZOP 分析中的运用 [J]. 化工设计通讯, 2025, 51(08): 101-103+117.
- [5] 段文举. HAZOP 技术在大型乙烯领域中的应用 [J]. 石油化工技术与经济, 2017, 33(5): 4.