

化工过程 HAZOP 分析与智能诊断系统的耦合优化研究

何振喜¹ 张洋洋^(通讯作者)² 杨正社³

1 兰州盛恒生物科技有限公司 甘肃省 兰州市 730314

2 滕州中盛化工有限公司 山东省 枣庄市 277500

3 山西华丰阳化工有限公司 山西省 运城市 043100

【摘要】: 针对化工过程 HAZOP 分析静态化、智能诊断结果语义关联不足等问题, 构建 HAZOP 分析与智能诊断耦合系统。系统以 DCS、SIS 及在线分析仪表数据为基础, 通过语义映射、CNN-LSTM 偏差识别、风险推理和人机交互模块, 实现实时工况与 HAZOP 节点、引导词、偏差后果及保护层信息的联动。仿真案例结果表明, 耦合系统偏差识别准确率达到 95.2%, 平均响应时间缩短至 12 s, 漏检率降至 1.8%。实际工业应用中, 系统故障预警准确率达到 93.5%, 装置非计划停机时间减少 20%, 安全事故风险评估值降低 15%。研究表明, 该耦合方法能够提升化工过程偏差识别效率和风险决策支撑能力。

【关键词】: HAZOP 分析; 智能诊断; 化工过程安全; CNN-LSTM; 风险推理

0 引言:

化工过程装置普遍具有高温、高压、强耦合和非线性特征, 运行偏差若不能及时识别, 易引发连锁风险。HAZOP 分析在危险辨识和设计审查中应用广泛, 但传统表单难以适应连续运行过程中的动态风险管理需求。随着 DCS、SIS 及在线仪表数据不断积累, 智能诊断技术为偏差实时识别和风险预警提供了新途径。因此, 探索 HAZOP 知识与智能诊断模型的耦合机制, 对提升化工装置本质安全水平具有重要意义。

1 化工过程HAZOP分析与智能诊断系统耦合的研究基础与问题分析

化工过程装置呈现高温高压、强耦合以及非线性动态特性, 传统 HAZOP 分析把工艺节点、引导词以及偏差后果当作核心对象来开展系统性辨识, 能够支撑设计审查以及风险预控。伴随 DCS、SIS 以及在线分析仪表持续产生多源时序数据, 智能诊断系统借助深度学习、知识图谱以及异常检测模型, 可对压力、温度、流量等变量漂移进行在线判别, 为 HAZOP 结论动态更新提供数据基础。

进一步观察现有应用可知, HAZOP 表单多停留在静态文档层面, 偏差原因、保护层以及处置建议难以同实时运行状态进行联动; 智能诊断模型又常把异常识别限定在变量模式匹配, 缺少与危险场景、后果链以及操作语义的对应关系。由此推导, 耦合研究需要把工艺机理、历史 HAZOP 知识以及实时监测数据纳入统一表达框架, 重点解决偏差语义映射、诊断结果可解释以及报警信息向风险决策转化不足等问题。

2 化工过程HAZOP-智能诊断耦合系统的设计与实现

2.1 耦合系统的整体框架设计

传统 HAZOP 分析依靠专家对工艺节点、引导词以及偏差后

果开展人工推演, 能够覆盖设计审查阶段的危险辨识需求, 但在连续化工装置运行过程中, 表单更新滞后、知识复用效率偏低以及专家经验差异等问题较为突出。智能诊断系统把 DCS、SIS 以及在线分析仪表采集的压力、温度、流量、液位等时序数据当作模型输入, 可借助异常检测以及模式识别方法开展实时判别。两者耦合的必要性在于, 把 HAZOP 静态知识转化为可计算、可调用、可追溯的风险语义单元, 并且把诊断输出进一步关联到偏差缘由、后果链以及保护层状态。系统框架见图 1, 其核心流程由数据接入、语义映射、偏差识别、风险推理以及人机交互构成。需重点关注的是, 当前耦合研究仍存在工艺数据与 HAZOP 条目编码不统一、跨装置模型泛化能力不足、诊断结论难以被操作人员直接用于处置决策等问题, 因此框架设计需预留标准化接口以及知识扩展机制。

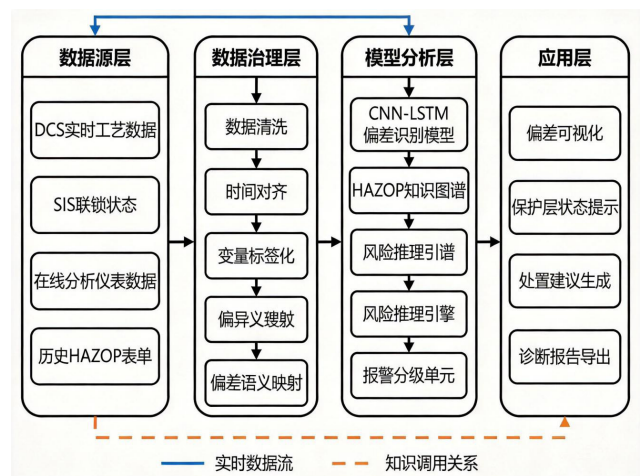


图1 化工过程HAZOP-智能诊断耦合系统框架流程图

2.2 基于深度学习的HAZOP偏差智能识别模型构建

面向化工过程变量多尺度波动以及偏差演化具有时间累积性的特性, 本文构建 CNN-LSTM 偏差智能识别模型。输入特征

由工艺参数时间窗、报警记录、联锁状态以及 HAZOP 偏差历史标签组成，其中工艺参数经归一化和缺失值修正后形成多变量序列。卷积层负责提取相邻采样点之间的局部变化特征，可把短时温度跃升、压力振荡以及流量突降等模式转化为特征图；LSTM 层用于捕捉偏差形成前后的长期依赖关系，从而降低单点噪声对识别结果的干扰。模型输出为不同 HAZOP 偏差类别的概率分布，训练阶段选用交叉熵损失函数衡量预测类别与真实标签之间的差异，公式如下：

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^C y_{ic} \ln \hat{y}_{ic}$$

其中， L 表示模型训练损失， N 表示样本数量， C 表示偏差类别总数， y_{ic} 表示第 i 个样本属于第 c 类偏差的真实标签， $\hat{y}_{ic}$ 表示模型预测为第 c 类偏差的概率。

为评价模型对温度异常、压力波动、流量偏低以及液位超限等常见偏差的识别能力，可运用准确率指标描述整体分类一致性，计算式如下：

$$Acc = \frac{N_{correct}}{N_{total}} \times 100\%$$

其中， Acc 表示偏差识别准确率， $N_{correct}$ 表示识别类别与 HAZOP 标签一致的样本数量， N_{total} 表示参与评价的样本总数量。

2.3 耦合系统的功能模块集成

在系统实现层面，微服务架构较适宜支撑 HAZOP 分析模块、智能诊断模块以及风险推理模块的独立部署和弹性扩展。数据接入服务把实时工艺数据经 API 接口传输至诊断服务，诊断服务完成偏差类别判别后，将结果写入统一事件总线；HAZOP 服

务再依据节点编号、变量名称以及引导词映射关系，调取对应偏差条目、可能后果以及现有保护层信息。用户交互界面需围绕班组运行监控场景进行设计，把偏差趋势、报警等级、关联设备以及建议处置路径集中展示，并支持诊断结果导出为结构化报告。为降低系统后续维护成本，各模块之间应选用标准化数据格式开展信息交换，同时保留模型更新、知识条目增补以及权限管理接口，使系统能够适应装置改造、工况切换以及 HAZOP 再审查带来的功能扩展需求。

3 耦合系统的效果评估与应用验证

3.1 仿真案例下的性能测试

仿真案例选取华东沿海乙烯配套装置中的连续精馏塔系统，围绕塔顶压力升高、塔釜温度偏低、回流流量波动以及进料组成扰动等偏差场景开展性能测试。仿真平台把 DCS 历史曲线以及动态机理模型生成的数据当作输入，设置 120 组正常工况样本以及 180 组偏差工况样本，用于检验耦合系统在多变量关联变化条件下的识别能力。对比对象为人工表单驱动的传统 HAZOP 复核方式，其判断过程主要依赖报警记录回溯以及专家经验核验。

从评价结果来看，耦合系统能够把诊断模型输出同 HAZOP 节点、引导词以及后果链进行关联，偏差识别准确率达到 95.2%，高于传统方法的 82.1%；平均响应时间缩短至 12 s，漏检率降至 1.8%。该结果说明，语义映射以及实时诊断融合后，系统对早期偏差的捕捉能力更强，也能减少人工查表带来的处置延迟。

表1 仿真案例下耦合系统与传统HAZOP分析性能对比表

评价指标	耦合系统	传统HAZOP分析方法	性能差异
偏差识别准确率	95.2%	82.1%	提高13.1个百分点
平均响应时间	12 s	30 s	缩短18 s
漏检率	1.8%	5.3%	降低3.5个百分点
样本覆盖数量	300组	300组	保持一致
主要适用环节	在线偏差识别以及风险推理	离线表单复核以及专家审查	耦合系统更适宜连续监测

3.2 实际工业场景的应用验证

在实际工业应用环节，耦合系统部署于江苏南京化工园区一套间歇反应釜生产过程，监测对象涵盖釜内温度、夹套压力、搅拌电流、投料流量以及冷却水回水温度等变量。系统接入现场 DCS 以及 SIS 数据后，把实时运行状态转换为 HAZOP 偏差事件，并且向操作界面推送偏差缘由、可能后果以及建议处置路径。运行期间，系统对冷却能力下降、投料速率异常以及搅拌负荷升高等工况发出了预警，班组人员据此提前调整冷却水阀位以及投料节奏，异常扩大趋势得到抑制。

连续运行记录表明，实际场景中故障预警准确率达到

93.5%，相较单纯依赖报警阈值的监控方式更能反映偏差演化过程。由于预警信息同保护层状态以及操作建议完成联动，装置非计划停机时间减少 20%，安全事故风险评估值降低 15%。从现场反馈来看，耦合系统没有替代 HAZOP 专家审查，而是把静态风险知识嵌入日常运行监控，使风险辨识由周期性复核延伸到过程状态跟踪。

4 结语

本文围绕化工过程动态风险管控需求，提出 HAZOP 分析与智能诊断系统耦合思路，并从框架设计、偏差识别模型和功能模块集成等方面开展研究。结果表明，将静态 HAZOP 知识转化

为可计算的风险语义单元,并与实时诊断结果联动,可有效提升偏差识别、后果追踪和处置建议生成能力。后续研究可进一步加强对跨装置数据标准化、模型迁移适应性及复杂场景下保护有效性评估,以推动系统在更多工业过程中的应用。

参考文献

- [1] 陈文涛, 杨茗铠, 王文和, 宋宏伟, 孙超. 基于SDG和CBR的化工过程风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(03): 77-84.
- [2] 汤鹏程, 王元吉. HAZOP的发展及在石油化工领域的作用与展望[J]. 四川化工, 2024, 27(05): 31-34+39.
- [3] 杨紫荆, 郑琰. 基于HAZOP-Aspen的水煤浆气化工艺风险分析[J]. 当代化工, 2025, 54(09): 2235-2240.
- [4] 孙国梁. HAZOP分析方法在油库储罐安全管理中的应用[J]. 车用能源储运销技术, 2024, 2(05): 46-50.
- [5] 史喆, 邢峰, 康红艳, 赵媛媛, 马志伟, 王旭文, 张健, 杨玉林. HAZOP分析在火炸药工艺风险控制中的应用[J]. 固体火箭技术, 2024, 47(06): 774-783.
- [6] 张津铭, 党鹏飞, 杨铮鑫, 丁战武, 金志浩. 基于HAZOP和模糊故障树的加氢裂化装置风险评估[J]. 模糊系统与数学, 2024, 38(05): 169-177.
- [7] 王倩琳, 陈士成, 呼小栋, 张建文, 陈良超, 李静海, 窦站. 一种结构化的化工系统人因失误概率评估方法[J]. 过程工程学报, 2024, 24(05): 609-617.
- [8] 尚凤琴, 陈明磊, 何丹, 王静, 阮健, 金国良. HAZOP方法在含铝炸药混合工序风险评估中的应用[J]. 兵工自动化, 2025, 44(03): 77-79.
- [9] 杜旭红, 郑建国, 吴尧, 刘凯, 路文芳, 赵凯杰. 多IE复杂事故场景的LNG储罐工艺HAZOP与LOPA-SIL风险评估[J]. 自动化与仪器仪表, 2024, (09): 134-139.

作者简介: 何振喜(1981—), 男, 汉族, 大专, 研究方向为化工安全。