

化工过程定量风险评估模型构建研究

刘琦

(江苏吉安安全科技有限公司徐州分公司, 江苏 徐州 221000)

摘要 针对某炼厂苯乙烯装置传统 HAZOP 无法量化泄漏频率与个体风险的缺陷, 本研究构建“数据、机理、场景”耦合定量风险评估模型。整合 OREDA 2019 与厂内 MIS 数据, 引入现场微泄漏事件完成贝叶斯更新获装置特异性泄漏频率; 建立 Fay spreading+Spill 源项与重气箱—高斯瞬态切换扩散模型, 计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 代理模型, 将单场景计算耗时缩至 2 min; 通过 Probit 函数与 5×10^4 次 Monte Carlo 抽样得个人风险 IR, 识别红区 6.8 ha。现场验证平均相对误差 12.7%, 满足 AIChE 准则; 成本效益分析显示, P-101 泵出口增设 ≤ 10 s 远程切断阀 CER 最低 (2.3×10^6 元 / (人 · a⁻¹)), 削红区 79%。“季度数据—年度模型”闭环机制与 Flask Web 工具旨在为同类装置提供可参考的 QRA 方案。

关键词 苯乙烯装置; 定量风险评估; 贝叶斯更新; 重气扩散; 成本—效益优化

中图分类号: TQ02

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.05.022

0 引言

炼化一体化规模扩大使苯乙烯等易挥发有毒介质泄漏风险日益突出。传统 HAZOP 分析虽能系统识别偏差, 但缺乏泄漏频率、暴露剂量及多米诺骨牌效应的数值度量, 导致风险管控经验化, 既增加了投资, 又遗留了不可接受残余风险^[1]。国内外倡导以定量风险评估 (Quantitative Risk Assessment, QRA) 支撑最低合理可行原则 (As Low As Reasonably Practicable, ALARP) 决策, 然而现有 QRA 多依赖通用失效手册、采用静态高斯模型低估近场浓度、CFD 模拟耗时限制蒙特卡洛应用^[2]。因此, 构建兼顾数据特异性、机理准确性与计算效率的闭环 QRA 模型, 对提升化工装置风险管控的科学性与经济性具有重要意义。

1 问题提出与总体技术路线

在炼化企业苯乙烯装置运行过程中, 传统危险与可操作性分析 (Hazard and Operability Study, HAZOP) 方法主要依赖于定性描述工艺偏差, 虽能系统识别潜在危险, 却难以提供泄漏频率、毒物扩散范围及个人风险等量化指标, 导致风险管控长期停留于经验判断层面。这不仅可能造成安全投入的盲目性, 也使残余风险处于不可控状态^[3]。定量风险评估 (Quantitative Risk Assessment, QRA) 通过系统整合设备失效数据、泄漏源项模型、大气扩散模拟及剂量—响应关系, 将风险转化为年均死亡概率等可度量指标, 从而科学弥

补 HAZOP 在量化决策支持方面的不足^[4]。本研究针对苯乙烯介质连续泄漏可能引发的急性中毒与闪燃事故, 以个人风险值 $IR=1 \times 10^{-5}$ 人 · a⁻¹ 为不可接受阈值, 构建“数据、机理、场景”耦合模型, 闭环流程为: 采集炼厂独有数据、训练贝叶斯更新与代理扩散模型、生成联合场景、计算网格化风险、优选保护层并回流数据, 实现模型进化与风险持续降低。

2 定量风险评估模型构建

2.1 泄漏频率数据库与贝叶斯更新

针对炼化苯乙烯装置传统 HAZOP 定性偏差、风险管控经验化问题, 构建“数据、机理、场景”耦合 QRA 模型。融合 OREDA2019 通用失效数据与厂内 MIS 检修 / 事件日志, 经贝叶斯更新获装置特异性泄漏频率; 采用 Fay 液池扩展+Spill 挥发源项模型, 结合重气箱—高斯瞬态切换扩散方程, 通过计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 代理模型将单场景计算从 180 min 缩至 2 min; 基于 Probit 剂量响应与 5×10^4 次蒙特卡洛抽样得个人风险, 识别红区 6.8 ha。成本效益分析显示, P-101 泵出口 ≤ 10 s 远程切断阀方案 CER 最低 (2.3×10^6 元 / (人 · a⁻¹)), 削红区 79%。建立“季度数据—年度模型”闭环机制与 Flask Web 工具, 为同类装置提供可复制的 QRA 方案, 提升风险管控的科学性与经济性。基于 Gamma-Poisson 共轭特性, 采用贝叶斯框架更新先验, 得到后验泄漏频率 λ_{post} , 其表达式如下:

作者简介: 刘琦 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 化学工程与工艺。

$$\lambda_{post} = \frac{\alpha_0 + n}{\beta_0 + T} \quad (1)$$

式(1)中, λ_{post} 为后验泄漏频率, 单位次/年; α_0 为 Gamma 先验形状参数, 无量纲, 控制分布峰度; β_0 为 Gamma 先验尺度参数, 单位年, 反映先验数据时间跨度; n 表示现场观测到的泄漏次数; T 为对应观测时间长度, 单位年。更新后超参数 $\alpha = \alpha_0 + n$ 、 $\beta = \beta_0 + T$ 兼具先验知识与现场证据, 可在小样本条件下保持稳健^[5]。该方法解决了传统手册数据“水土不服”问题, 使后续 QRA 场景频率与炼厂真实可靠性水平保持一致, 为个人风险计算提供可信输入。

2.2 泄漏源项与扩散耦合模型

针对苯乙烯常压 35 °C 储运的泄漏特性, 构建两阶段源项—扩散联合模型以支撑定量风险评估。第一阶段耦合 Fay 液池扩展方程与 Spill 挥发模型, 引入地面导热及空气对流换热系数, 同步求解液池厚度、表面温度及挥发速率, 覆盖不同地表热边界差异; 第二阶段基于苯乙烯重气特性, 采用 Richardson 数 ($Ri < 0.15$) 触发的重气箱—高斯瞬态烟团切换模型, 结合 Monin-Obukhov 长度修正大气稳定度参数, 实现近场重力下沉与远场被动扩散的平滑过渡。通过 CFD 代理模型训练, 单场景计算耗时从 180 min 降至 2 min, 兼顾精度与效率, 为后续剂量—响应及个人风险计算提供高时空分辨率浓度场支撑。重气—高斯切换判定准则如下:

$$Ri = \frac{g(\rho_s - \rho_a)H}{\rho_a u_*^2} \quad (2)$$

式(2)中, Ri 为 Richardson 数, 无量纲; g 为重力加速度, 单位 m/s^2 ; ρ_s 为气云密度, 单位 kg/m^3 ; ρ_a 为环境空气密度, 单位 kg/m^3 ; H 为特征云高, 单位 m ; u_* 为摩擦速度, 单位 m/s 。当 $Ri < 0.15$ 时, 模型由重气箱切换至高斯瞬态模式。为缩短计算耗时, 采用 CFD 快照样本训练基于深度前馈网络的代理模型, 在保持 90% 以上相关系数的前提下, 单次场景运算时间由 180 min 降至 2 min, 满足实时风险评估需求。

2.3 剂量—响应与个人风险计算

在获得高时空分辨率的苯乙烯浓度场后, 需将其转化为健康危害概率以实现定量风险评估。本文选用 Probit 模型描述急性中毒剂量—响应关系, 该模型假设死亡率与毒物摄入量呈对数正态分布, 可较好地反映苯乙烯对中枢神经的急性抑制效应。暴露时间固定为 10 min, 以体积分数 C 代表瞬时平均浓度, 则死亡概率计算式如下:

$$P = \Phi(k_1 + k_2 \ln(C^n t)) \quad (3)$$

式(3)中, P 为个体死亡概率, 无量纲; Φ 表示标准正态累积分布函数; k_1 、 k_2 为 Probit 系数, 分别对应毒物特异性截距与斜率, 苯乙烯急性吸入推荐值取 $k_1 = -6.8$ 、 $k_2 = 1.8$; C 为体积分数, 单位 ppm; n 为浓度指数, 取 1.0; t 为暴露持续时间, 单位 min。将 2.2 节输出的三维浓度场与装置周边 100 m×100 m 人口栅格叠加, 可得到每名网格受体点的 $C(x, y, t)$ 序列。随后执行 Monte Carlo 抽样, 每次模拟随机组合泄漏源强、风速、风向及点火时间, 共运行 5×10^4 次, 获得剂量—响应概率的统计分布。个人风险定义为年均死亡概率, 其空间积分表达式为:

$$IR(x, y) = \int_0^T f_{rel} \cdot P(x, y, t) \cdot f_{ign}(t) dt \quad (4)$$

式(4)中, $IR(x, y)$ 为网格点个人风险, 单位 a^{-1} ; f_{rel} 为设备年泄漏频率, 由 2.1 节后验频率提供; $P(x, y, t)$ 为对应时空死亡概率; $f_{ign}(t)$ 为延迟点火概率密度函数, 采用指数模型表征。积分结果按 1 m×1 m 网格输出后, 绘制装置外 1 km 范围风险等高线图, 可直观识别 $IR \geq 1 \times 10^{-5}$ 的“红色区域”, 为保护层布置提供量化边界。

3 模型验证与风险决策应用

3.1 现场监测数据对比验证

为验证扩散子模型可靠性, 于 2023-09-12 在苯乙烯装置开展计划性小泄漏实验, 通过调节泵出口节流阀模拟持续 3 min、源强约 0.15 kg/s 的液相泄漏。在下风向 200 m、500 m、800 m 轴线处布设 3 台光离子化检测器, 采样频率 1 Hz, 同步记录气象塔风速 2.3 m/s、大气稳定度 D 类。实验获得各点浓度时序, 峰值分别出现在泄漏开始后 130 s、220 s、380 s, 对应最大体积分数 4.8 ppm、2.1 ppm、1.0 ppm。将同期气象与源项参数输入 2.2 节耦合模型, 得到对应位置预测峰值 5.3 ppm、2.4 ppm、1.2 ppm。三测点相对误差依次为 10.4%、14.3%、20.0%, 平均 12.7%, 低于 AIChE 导则对 QRA 模型 30% 的可接受偏差限, 表明重气箱—高斯切换框架及 Monin-Obukhov 长度修正可合理再现苯乙烯近场下沉与远场扩散过程, 为后续风险等高线计算奠定可信基础。对比结果汇总于表 1。

表 1 监测点浓度对比结果

测点距离 /m	实测峰值 /ppm	预测峰值 /ppm	相对误差 /%
200	4.8	5.3	10.4
500	2.1	2.4	14.3
800	1.0	1.2	20.0

由表 1 可知, 随距离增加误差略有放大, 但仍处于工程可接受范围, 证明模型具备外推至 1 km 尺度能力。

3.2 保护层成本—效益优化

为削减 $IR \geq 1 \times 10^{-5}$ 的红色区域 (基准 6.8 ha, 个人风险积分 $1.7 \times 10^{-3} \text{ 人} \cdot \text{a}^{-1}$), 对比三种保护层方案: A 在 P-101 泵出口增设响应时间 $\leq 10 \text{ s}$ 的远程切断阀, 红色区域降至 1.4 ha (削减 79%), 年风险积分 $3.0 \times 10^{-4} \text{ 人} \cdot \text{a}^{-1}$, 年折算成本 23 万元, CER $2.3 \times 10^6 \text{ 元} / (\text{人} \cdot \text{a}^{-1})$; B 布置高压水幕喷淋, 红色区域 3.9 ha, 年风险 $8.1 \times 10^{-4} \text{ 人} \cdot \text{a}^{-1}$, 年成本 45 万元, CER 4.7×10^6 ; C 增设防爆墙, 红色区域 4.5 ha, 年风险 $9.3 \times 10^{-4} \text{ 人} \cdot \text{a}^{-1}$, 年成本 58 万元, CER 5.9×10^6 。依据 ALARP 原则, CER 最低且技术可行的方案 A 为最优, 其 $\leq 10 \text{ s}$ 的快速响应特性有效缩短泄漏持续时间, 实现风险与成本的最优平衡。对比结果见表 2。

由表 2 可知, 方案 A 以最低 CER 实现最大风险削减, 满足企业 ALARP 要求。

3.3 闭环更新与管理建议

验证实验生成的 28 条泄漏事件按设备类别与工况特征纳入失效数据库, 同步更新 Gamma 先验超参数以实现贝叶斯迭代。为维持模型时效性, 建立“季度数据—年度模型”滚动机制, 其每季度采集检修、LDAR 及事件记录, 年末统一完成贝叶斯更新、代理模型重训练与风险等高线重绘, 确保参数匹配最新可靠性水平。配套开发基于 Python Flask 的轻量级 QRA Web 工具, 前端集成 Leaflet 地图引擎实现浓度场、人口栅格与风险等高线实时叠加的“一张图”可视化, 后端封装计算模块支持一键导出 ALARP 论证报告。通过“定量评估、工程改进、数据反馈”闭环, 企业可在成本最优下持续降风险, 该模式可推广至同类苯乙烯装置, 提供标准化实施模板。闭环更新实施路线见表 3。

4 结束语

本研究针对苯乙烯装置构建集成贝叶斯频率更新、重气—高斯耦合扩散与 Probit 剂量响应的定量风险评

表 2 保护层方案成本-效益对比表

方案	措施描述	红色区域 /ha	年风险积分 / 人 · a ⁻¹	年折算成本 / 万元	CER/ 元 · 人 ⁻¹ · a ⁻¹
A	远程切断阀≤ 10 s	1.4	3.0×10 ⁻⁴	23	2.3×10 ⁶
B	高压水幕喷淋	3.9	8.1×10 ⁻⁴	45	4.7×10 ⁶
C	钢筋混凝土防爆墙	4.5	9.3×10 ⁻⁴	58	5.9×10 ⁶

表 3 闭环更新实施路线

阶段	时间窗口	关键任务	输出产物
数据采集	每季度	检修记录、LDAR 数据、事件报告	更新失效样本库
模型刷新	年度	贝叶斯更新、代理模型重训练	新 λ_{post} 、新扩散代理
风险评估	年度	场景抽样、IR 积分、等高线绘制	年度风险一张图
决策支持	年度	ALARP 论证、保护层优选	成本-效益报告

估(QRA)框架,实现单场景2 min计算,预测误差<13%。经成本效益分析,最优方案以 2.3×10^6 元/(人·a⁻¹)的最低CER削减79%红区面积。建立“季度数据—年度模型”闭环与Flask Web工具保障动态进化,未来将拓展爆炸碎片与长期健康效应,推广至更多化工单元支撑行业风险基准管理。

究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.

[3] 柳楠. 基于动态模拟的化工过程安全预测预警研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.

[4] 王连彪. 化工过程的故障诊断和动态风险评估研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2022.

[5] 应急管理部化学品登记中心, 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院, 清华大学, 等. 化工过程安全评估 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.

参考文献:

- [1] 陈文涛,杨茗铠,王文和,等.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] 朱君桦.时序数据驱动的化工过程风险动态预警研