

基于多模型融合与检索增强生成的危险化学品事故智能应急处置决策支持系统设计

孔晨宇, 高春亚, 卢星源, 袁 源, 曹靖宇, 王晓楠*

重庆科技大学安全科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2026年7月18日; 录用日期: 2026年8月19日; 发布日期: 2026年8月27日

摘 要

针对危险化学品事故具有突发性强、演化过程复杂以及现场应急决策信息需求高等特点, 传统应急处置方式存在数据整合效率低、事故后果定量分析不足以及辅助决策智能化水平有限等问题, 提出一种融合事故后果预测模型、专业知识检索和端侧大语言模型的危险化学品事故智能应急处置决策方法。该方法以危险化学品基础数据为支撑, 通过构建专业知识库实现事故案例、法规标准和现场处置资料的结构化管理; 结合检索增强生成(Retrieval-Augmented Generation, RAG)技术, 将专业知识检索结果与人工智能模型推理过程进行融合, 提高智能生成结果的专业性和可追溯性。同时, 针对危险化学品泄漏、火灾、爆炸以及有毒气体扩散等典型事故场景, 集成泄漏源项计算、池火灾、沸腾液体扩展蒸气爆炸(BLEVE)、蒸气云爆炸(UVCE)和有毒气体扩散等事故后果预测模型, 实现事故影响范围的定量分析。在此基础上, 开发危险化学品事故应急处置决策支持系统, 实现事故信息管理、风险后果计算、消防救援分析以及智能处置方案生成等功能。系统采用桌面端与移动端协同架构, 并支持完全离线运行, 可满足化工生产现场和应急救援现场网络受限条件下的快速决策需求。研究表明, 该系统能够实现危险化学品事故信息快速获取、风险区域辅助判定以及应急处置方案智能生成, 为事故现场科学决策提供技术支持。

关键词

危险化学品, 事故应急处置, 决策支持系统, 事故后果预测, 检索增强生成, 人工智能

Design of an Intelligent Emergency Response Decision Support System for Hazardous Chemical Accidents Based on Multi-Model Fusion and Retrieval Enhancement Generation

*通讯作者。

文章引用: 孔晨宇, 高春亚, 卢星源, 袁源, 曹靖宇, 王晓楠. 基于多模型融合与检索增强生成的危险化学品事故智能应急处置决策支持系统设计[J]. 计算机科学与应用, 2026, 16(8): 270-290. DOI: 10.12677/csa.2026.168280

Chenyu Kong, Chunya Gao, Xingyuan Lu, Yuan Yuan, Jingyu Cao, Xiaonan Wang*

School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: July 18, 2026; accepted: August 19, 2026; published: August 27, 2026

Abstract

To address the characteristics of hazardous chemical accidents, such as strong suddenness, complex evolution processes, and high demands for on-site emergency decision-making information, traditional emergency response approaches suffer from issues including low data integration efficiency, insufficient quantitative analysis of accident consequences, and limited intelligence in auxiliary decision-making. This paper proposes an intelligent emergency response decision-making method for hazardous chemical accidents that integrates accident consequence prediction models, professional knowledge retrieval, and on-device large language models. Supported by fundamental hazardous chemical data, the method constructs a professional knowledge base to enable structured management of accident cases, regulatory standards, and on-site disposal documents. By incorporating Retrieval-Augmented Generation (RAG) technology, it integrates professional knowledge retrieval results with AI model inference processes, thereby enhancing the professionalism and traceability of intelligently generated outputs. Furthermore, for typical accident scenarios including hazardous chemical leaks, fires, explosions, and toxic gas dispersion, the method integrates consequence prediction models such as leak source term calculation, pool fires, boiling liquid expanding vapor explosion (BLEVE), unconfined vapor cloud explosion (UVCE), and toxic gas dispersion, enabling quantitative analysis of the accident impact range. On this basis, a decision support system for hazardous chemical accident emergency response is developed, featuring functions such as accident information management, risk consequence calculation, firefighting and rescue analysis, and intelligent response plan generation. The system adopts a collaborative desktop-mobile architecture and supports fully offline operation, meeting the rapid decision-making needs under network-constrained conditions at chemical production sites and emergency rescue scenes. The research results demonstrate that the system enables rapid acquisition of hazardous chemical accident information, auxiliary determination of risk zones, and intelligent generation of emergency response plans, providing technical support for scientific decision-making at accident scenes.

Keywords

Hazardous Chemicals, Accident Emergency Response, Decision Support Systems, Accident Consequence Prediction, Retrieval-Enhanced Generation, Artificial Intelligence

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

危险化学品行业是支撑现代工业发展的重要基础产业，在能源、化工、医药和材料等领域发挥着重要作用。然而，由于危险化学品具有易燃、易爆、有毒、有害等特性，在生产、储存、运输和使用过程中受到设备失效、操作失误以及管理缺陷等因素影响，容易发生泄漏、火灾、爆炸和中毒等事故。相关事故统计研究表明，危险化学品事故具有明显的灾害放大特征，其中储罐区域事故由于涉及大量危险介质，

往往可能引发火灾、爆炸以及有毒物质扩散等多种次生灾害,对人员安全和周边环境造成严重影响[1]。

近年来,随着危险化学品产业规模不断扩大,事故风险防控压力持续增加。已有研究针对我国危险化学品事故开展统计分析,指出事故类型主要集中于火灾、爆炸和泄漏等类型,其中生产和储存环节是事故发生的重要区域[2]。因此,如何提高危险化学品事故发生后的快速研判能力和科学处置水平,是当前安全工程领域的重要研究方向。

危险化学品事故发生后,现场应急处置需要快速完成事故类型判断、危险区域划分、人员疏散以及救援资源部署等关键任务。传统应急响应方式主要依靠现场人员经验和预案资料查询,在复杂事故条件下容易受到信息获取速度和人工判断能力的限制,难以满足动态事故过程中的快速决策需求。因此,结合事故后果预测模型和智能辅助决策技术,提高事故分析和处置方案生成能力具有重要意义。

随着计算机技术和人工智能技术的发展,危险化学品事故应急决策逐渐由传统经验驱动向数据驱动和模型辅助方向发展。目前,国内外研究主要围绕事故后果模拟、风险评估、应急资源优化配置以及智能辅助决策等方面展开。在事故后果预测方面,研究人员基于热辐射模型、爆炸模型以及气体扩散模型等方法,对危险化学品事故影响范围进行了大量研究,为风险区域划分和应急力量部署提供了理论基础。例如,池火灾模型能够计算火灾热辐射影响范围,BLEVE 模型和 UVCE 模型能够预测爆炸事故影响区域,高斯扩散模型则能够描述有毒气体泄漏后的空间扩散规律。

然而,现有事故后果预测研究大多集中于单一事故模型分析,实际应急场景中不同事故类型之间存在明显关联,仅依靠单一模型难以满足复杂事故快速分析需求。此外,传统事故分析系统通常侧重于计算结果输出,与专业知识、法规标准以及现场处置经验之间缺少有效融合,导致计算结果难以直接转化为现场可执行的应急决策。

近年来,大语言模型技术快速发展,为智能应急决策提供了新的技术路径。基于自然语言理解能力,大语言模型能够对复杂文本信息进行分析,并生成具有一定逻辑性的辅助建议。然而,通用大语言模型主要基于开放互联网数据训练,在危险化学品安全领域存在专业知识不足、事实准确性不稳定以及生成内容缺少依据等问题。在安全生产领域,错误的处置建议可能造成严重后果,因此直接应用通用人工智能模型难以满足危险化学品事故应急场景的可靠性要求。

检索增强生成(Retrieval-Augmented Generation, RAG)技术通过将外部知识库检索与大语言模型生成能力结合,使模型能够基于指定领域知识进行回答,有效降低了大模型产生错误信息的风险。近年来,RAG 技术已逐渐应用于医疗、法律、教育等专业领域,但在危险化学品事故应急处置领域仍处于探索阶段。如何将事故后果预测模型、危险化学品专业知识以及人工智能推理能力进行有效融合,实现面向现场应用的智能辅助决策,仍是当前安全工程领域需要解决的问题。

针对上述问题,本文提出一种基于多模型融合与检索增强生成技术的危险化学品事故智能应急处置决策支持方法,并开发相应系统。主要研究内容如下:

- (1) 构建面向危险化学品事故应急场景的多源数据融合架构,将危险化学品物性参数、企业危险源信息、事故案例以及法规标准等数据进行统一管理,为事故分析提供数据基础。
- (2) 建立事故场景与计算模型自动匹配机制,集成泄漏源项计算、池火灾、BLEVE、UVCE 以及有毒气体扩散等典型事故后果预测模型,实现不同事故类型下危险区域的定量分析。
- (3) 提出基于危险化学品标签约束和检索增强生成的智能决策方法,通过专业知识库检索、语义匹配以及生成结果约束,提高人工智能生成处置方案的专业性和可靠性。
- (4) 设计并实现桌面端与移动端协同运行的危险化学品事故应急处置决策支持系统,实现事故信息查询、后果分析、消防救援计算以及智能方案生成等功能,并支持完全离线运行。

本文研究可为危险化学品事故快速研判和科学处置提供技术支持，对提升化工企业事故应急响应能力具有一定应用价值。

2. 危险化学品事故智能应急决策方法与系统总体设计

2.1. 系统总体设计思路

危险化学品事故应急处置过程涉及事故信息获取、危险源识别、事故后果分析、救援资源配置以及处置方案制定等多个环节，具有数据来源复杂、决策时间紧迫和专业要求高等特点。针对传统应急系统中事故数据分散、模型分析能力不足以及智能辅助决策可靠性有限等问题，本文提出一种融合事故后果预测模型、专业知识库和检索增强生成技术的智能应急决策方法。

该方法以危险化学品事故全过程分析为目标，将事故基础数据、工程计算模型和人工智能推理能力进行融合。系统首先根据事故发生位置、危险化学品类型、设备参数以及环境条件等信息构建事故场景；随后调用对应的事故后果预测模型，对泄漏、火灾、爆炸和扩散过程进行定量计算；最后结合专业知识库检索结果，通过检索增强生成技术形成面向现场人员的辅助处置方案。

与传统基于固定预案的应急管理模式相比，本文提出的方法能够根据事故状态动态调整分析过程，实现由“经验驱动”向“模型驱动”和“知识增强驱动”的转变，提高危险化学品事故应急决策的科学性和适应性。

系统整体由数据资源层、模型计算层、知识服务层、智能决策层和用户交互层五个部分组成，各层之间通过数据接口实现信息交互，其总体架构如图 1 所示。

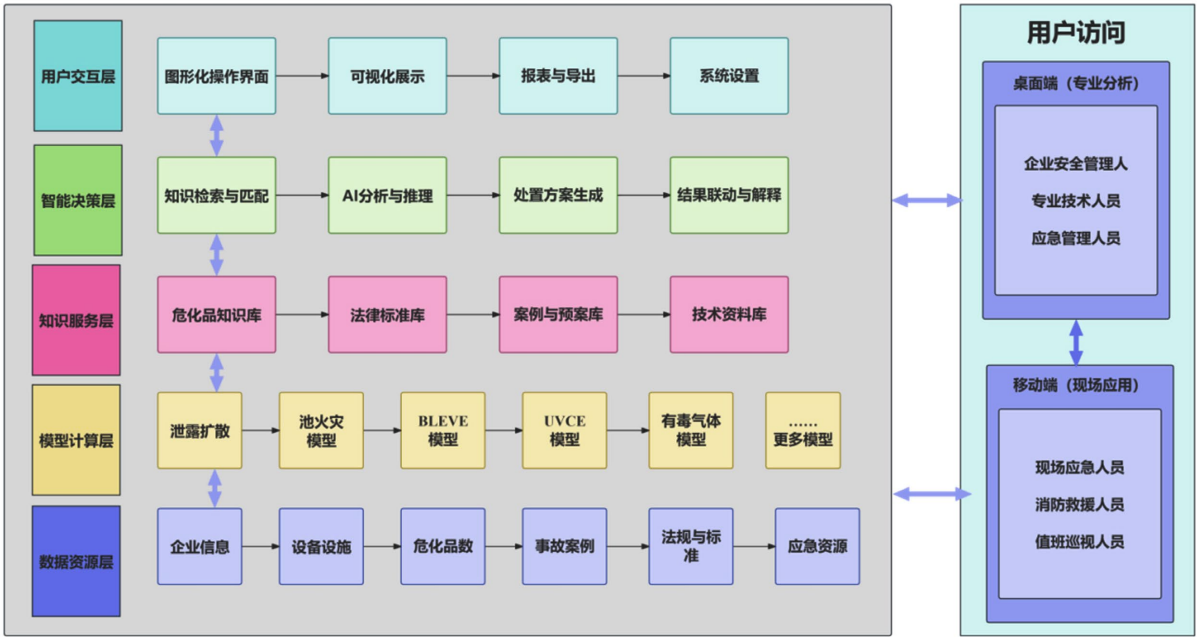


Figure 1. Overall system architecture
图 1. 系统总体架构

2.2. 多源数据融合架构

危险化学品事故应急决策需要同时依赖危险化学品基础属性、企业危险源信息、事故环境参数以及专业安全知识等多类型数据。为了提高数据利用效率，本文构建多源数据融合架构，对不同来源的信息

进行统一管理。
数据资源层主要包括如表 1 所示的四类数据。

Table 1. Composition of system data resources
表 1. 系统数据资源组成表

数据类型	主要内容	主要作用
危险化学品数据	物性参数、危险特性、毒性参数	事故模型计算
企业危险源数据	设备参数、储存条件、空间位置	事故场景构建
事故案例数据	历史事故过程及处置措施	案例辅助分析
法规标准数据	规范、标准、技术文件	方案合规性约束

危险化学品数据主要包括化学品名称、分子结构、物化性质、燃烧参数、毒性参数以及危险类别等信息，为事故模型计算提供基础输入。企业危险源数据主要包括企业基本信息、生产装置、储罐设备、储存介质以及周边环境信息，用于构建具体事故场景。事故案例数据主要收集典型危险化学品事故案例，包括事故原因、事故过程、影响范围以及处置措施，为智能决策提供案例参考。安全知识数据主要包括国家标准、行业规范、应急预案、现场处置方案以及安全技术资料，通过结构化处理形成专业知识库。

通过多源数据融合，系统能够将事故现场信息与专业安全知识进行关联，为后续事故分析和智能决策提供数据支撑。

2.3. 事故场景识别与模型调用方法

危险化学品事故具有多类型、多阶段演化特点，不同事故类型对应不同的灾害形成机制和影响范围。因此，系统根据事故类型选择适用的计算模型，实现事故后果定量分析。危险化学品事故后果分析方法主要包括泄漏源项计算、火灾热辐射分析、爆炸影响评价以及有毒气体扩散分析等内容，相关方法已广泛应用于过程安全风险评价领域[3]。

对应板块的工作模式见图 2，系统首先根据用户输入的危险化学品种类、设备状态、事故表现以及环境参数，对事故类型进行初步判断。随后，根据事故类型匹配对应计算模型，实现事故分析过程自动化。

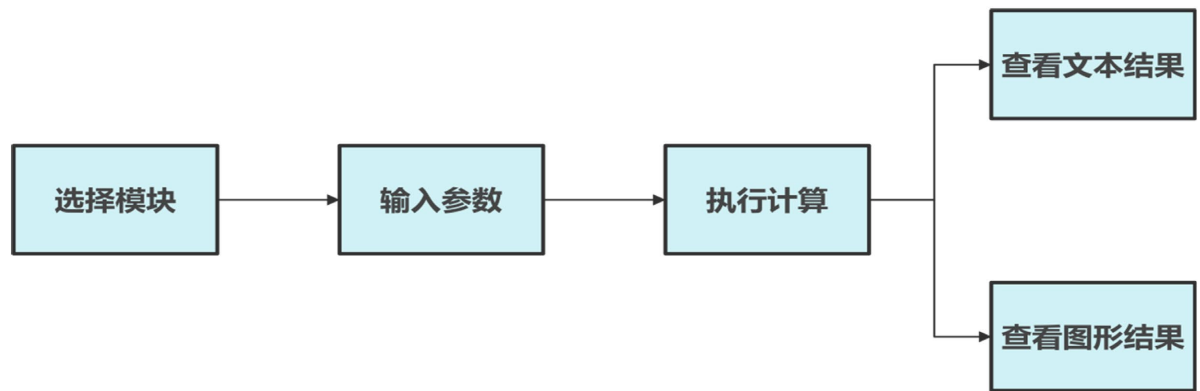


Figure 2. Flowchart of the calculation module's operation process
图 2. 计算模块操作流程

根据危险化学品事故特点，系统主要集成表 2 所示的事故后果预测模型。

Table 2. Safety model used in the accident consequences prediction module
表 2. 事故后果预测模块所运用的安全模型

计算分组	模型、方法名称	核心原理
池火灾后果模拟	热平衡燃烧模型、 热辐射通量衰减模型	由液池直径、物质热力学参数计算燃烧速度和热释放速率，再依据点源辐射衰减推算四个等级的影响距离
沸腾液体扩展 蒸气爆炸(BLEVE)	火球模型、TNT 当量法、 超压衰减关系	计算火球直径、持续时间、燃烧辐射分数和 TNT 当量，据此推算死亡、重伤、轻伤、财产损失四级影响距离
蒸气云爆炸 (UVCE)	TNT 当量法 (含地面反射修正)	由物质质量、燃烧热和爆炸效率因子计算 TNT 当量，再推算不同距离处超压值，划分完全破坏、重度、中度、轻度破坏区域
有毒气体扩散预测	高斯烟羽模型 (Gaussian Puff Model)	假设污染物在稳定均匀大气条件下呈正态分布，根据扩散参数计算浓度分布
泄漏源项计算	小孔泄漏模型、罐体泄漏模型、 均匀两相流泄漏模型	流出系数 - 孔口面积 - 密度联合确定瞬时质量流率；蒸发百分比判定气、液相态
大气扩散浓度估算	高斯烟羽模型 (中心线、任意点、极值点)	通用扩散模型在地面中心线处的特例及任意点推广
爆炸冲击波参数	TNT 当量法、比拟距离查表法	将爆炸能量折算为等效 TNT 质量，通过比拟距离查表确定侧向峰值超压
火球热辐射参数	点源热辐射模型	由物质质量和燃烧热决定火球直径和持续时间，辐射分数随储罐压力递减
泄漏事故综合模拟	泄漏 - 蒸发 - 扩散耦合模型	将液体泄漏、蒸发(Fv 判定规则)和气体扩散三个过程耦合进行联合模拟

2.4. 基于 RAG 与多模型集成智能调度的智能处置决策方法

危险化学品事故应急处置涉及危险物质特性、事故演化规律、工程计算结果以及现场救援经验等多源信息，仅依靠传统规则系统难以满足复杂事故场景下的快速决策需求。近年来，大语言模型在自然语言理解和知识推理方面表现出较强能力，但由于其训练数据主要来源于通用语料，在危险化学品事故领域仍存在专业知识覆盖不足、生成结果缺少依据以及容易产生事实偏差等问题。

因此，本文采用检索增强生成(Retrieval-Augmented Generation, RAG)技术，将专业知识库检索结果作为大语言模型生成过程的重要约束信息，并结合事故后果计算模型、规则约束模型以及端侧大语言模型，构建面向危险化学品事故场景的多模型集成与智能调度方法[4]。系统整体技术流程如图 3 所示。

该方法主要包括专业知识库构建、多路知识检索、事故上下文融合、多模型智能推理以及结果安全约束五个环节。

2.4.1. 专业知识库构建

知识库作为 RAG 系统的信息基础，其质量直接影响智能生成结果的准确性。本文针对危险化学品事故应急场景构建专业知识库，数据来源主要包括危险化学品事故案例、法规标准、企业应急资料、危险化学品安全技术说明书以及事故处置方案等。

事故案例数据主要包括危险化学品事故调查报告、典型事故案例资料以及公开发表的事故分析文献等，重点提取事故发生原因、危险物质类型、事故发展过程、灾害影响范围和现场处置措施等关键信息，并按照危险化学品类别、事故类型及处置环节进行分类整理，为系统开展事故场景分析和智能处置方案生成提供案例知识支撑。法规标准数据主要来源于 GB 系列国家标准、AQ 系列安全生产行业标准以及危险化学品安全管理相关规范，用于对模型生成结果进行标准化约束[5]。

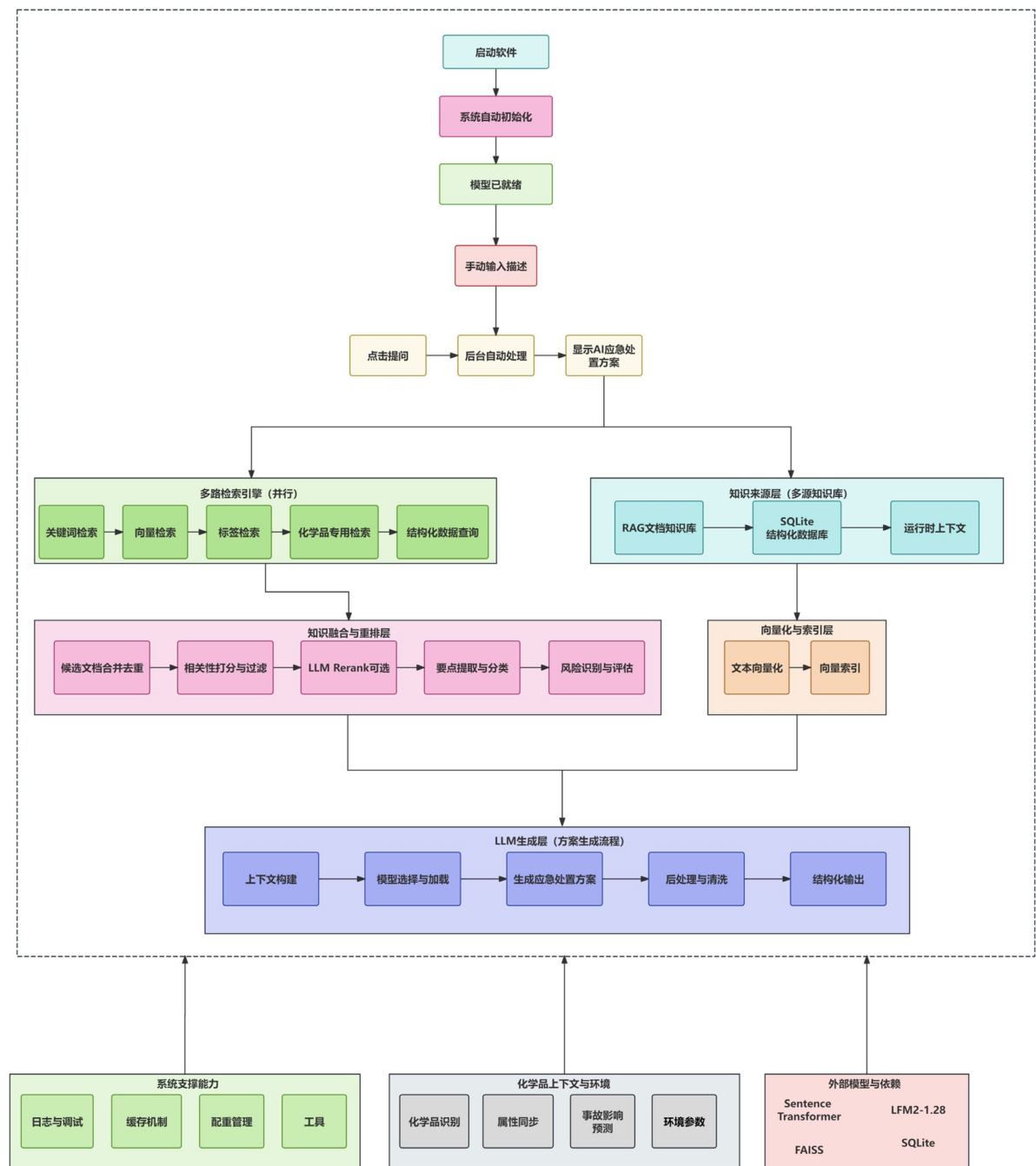


Figure 3. AI solution generation process
图 3. AI 处置方案生成流程

系统在数据管理层采用 SQLite 数据库进行结构化存储，同时支持 JSON 格式专业文档导入。每条知识文档包含文档类型、标题、正文内容以及标签信息等字段，其中标签信息包括危险化学品类别、事故类型以及适用场景等内容。

在知识库构建过程中，系统首先利用文档解析模块完成 TXT、DOCX、PDF、XLSX 等多格式文件解析，对文本进行清洗、结构化处理和语义分块。随后根据文档标题、正文内容以及标签信息建立多层索引结构。

第一层为基于危险化学品名称和事故类型的关键词索引，用于快速定位相关领域文档。第二层为语义向量索引，采用 Sentence Transformer 模型 shibing624/text2vec-base-chinese 对文档进行向量编码，并利用 FAISS 建立向量检索索引。Sentence Transformer 通过优化预训练语言模型的句向量表示能力，提高了文本语义相似度计算效果[6]。第三层为标签结构化索引，根据危险化学品类别和事故场景进行精确过滤。

向量索引采用文档标题和正文前 500 字作为输入进行编码，在保证语义完整性的同时降低索引计算量。系统通过 SHA256 校验文档目录变化情况，仅在知识库内容发生变化时重新生成向量索引，提高系统启动效率。

2.4.2. 多路检索增强策略

针对危险化学品事故描述具有专业术语多、表达形式复杂以及场景差异明显等特点，本文采用关键词检索、标签过滤和语义向量检索相结合的多路检索策略。

当用户输入事故信息后，系统首先进行危险化学品名称识别，通过预置危险化学品词表确定事故对象。若用户输入未直接包含化学品名称，则从当前事故上下文中获取已确定物质信息。

随后系统根据事故类型和危险化学品类别进行标签筛选，减少无关知识文档干扰。在候选文档集合基础上，将用户输入通过 text2vec 模型转换为语义向量，并利用 FAISS IndexFlatL2 计算查询向量与知识文档向量之间的距离，实现知识库中文本向量的快速近邻搜索[7]。

最终检索结果由标签匹配结果和向量相似度共同决定，使系统同时具备结构化检索准确性和语义理解能力。

相比单一关键词检索方式，该方法能够解决“液氨泄漏”和“氨气扩散”等不同表达方式导致的信息匹配不足问题，提高事故场景下知识召回能力。

2.4.3. 事故上下文融合与 Prompt 构造

为了避免大语言模型仅依据检索文本进行泛化生成，系统设计了事故上下文共享机制，实现事故计算模块与 AI 生成模块的数据联动。

当用户在事故后果预测模块完成计算后，系统自动提取事故对象、事故类型、死亡半径、重伤半径、轻伤半径、警戒范围等关键参数，并通过全局上下文管理模块保存。

当用户进入 AI 处置方案生成模块时，系统自动读取当前事故上下文，并与知识库检索结果共同构造增强 Prompt。Prompt 主要包括事故基本信息、危险化学品物性参数、事故后果计算结果、检索得到的专业处置资料、输出格式约束要求。

通过该方式，大语言模型生成过程不仅依赖文本知识，还能够结合事故定量分析结果，提高处置方案针对性。

2.4.4. 多模型集成与智能调度

本文不采用单一大语言模型承担所有任务，而构建由工程计算模型、检索增强语言模型和规则约束模型组成的多模型集成体系。

事故后果预测模型主要负责危险区域定量分析，包括池火灾模型、BLEVE 模型、UVCE 模型以及有毒气体扩散模型，用于计算热辐射影响距离、爆炸超压范围以及毒性扩散区域。检索增强语言模型采用 LFM2-1.2B-RAG 模型，并通过低比特量化方式降低端侧推理资源需求，实现本地化部署[8]，通过结合知识库检索结果完成事故分析和处置方案生成。规则约束模型主要负责危险化学品标签校验、事故类型判断以及标准处置措施匹配，用于降低模型生成错误风险。

当输入事故信息包含明确危险化学品和事故类型时，首先调用对应事故模型完成定量分析，随后将计算结果和检索知识输入 LFM2-1.2B-RAG 模型，模型生成结果经过规则约束模块校验后输出最终处置

建议。

当设备计算资源不足或大语言模型无法运行时，系统自动降低智能等级，进入检索匹配模式。

2.4.5. 三级智能保障机制

考虑实际事故现场可能存在设备性能不足、网络不可用以及计算资源受限等情况，本文设计三级智能保障机制，具体如表 3 所示。

Table 3. Comparison of the tiered protection mechanisms
表 3. 分级保障机制对照

级别	推理方式	输出质量	硬件要求	适用场景
一级	LLM 优先模式(LFM2-1.2B-RAG)	高	高(16 GB + 内存)	桌面端、高性能移动端
二级	向量检索+规则引擎	中	中(6 GB + 内存)	大模型不可用时降级
三级	关键词匹配模式	基础	低	极端条件下应急保障

一级保障模式采用端侧大语言模型推理模式。该模式下系统运行完整 RAG 流程，包括知识检索、上下文融合以及模型生成。当设备满足 LFM2-1.2B-RAG 运行条件时，输出完整事故处置方案。

二级保障模式采用向量检索与规则推理结合方式。当设备无法满足大模型运行要求时，系统关闭语言生成模块，仅利用知识库检索结果和规则库输出结构化处置建议。

三级保障模式采用关键词匹配方式。当设备资源进一步降低或智能模块异常时，系统根据危险化学品名称、事故类型和危险类别，从本地知识库调用对应标准处置措施，实现基础应急信息查询。

通过三级保障机制，系统能够适应桌面计算环境、移动终端以及极端事故现场等不同应用条件，提高系统可靠性和工程适用性。

2.5. 系统总体实现架构

基于上述方法，本文设计并实现危险化学品事故应急处置决策支持系统。

桌面端主要面向安全管理人员和专业分析人员，用于开展危险源管理、事故后果模拟、消防资源分析以及智能处置方案生成等任务。移动端主要面向事故现场人员，提供危险化学品快速查询、事故信息获取、模型计算以及辅助决策功能。系统整体采用离线运行架构，数据库、模型文件以及知识库资源均存储于本地设备，无需依赖网络环境即可完成事故分析和智能辅助决策。

通过上述设计，系统实现了危险化学品事故从信息采集、风险分析到辅助决策生成的全过程支持，为现场应急人员提供快速、可靠的技术辅助。

3. 系统关键功能实现与技术分析

3.1. 危险化学品数据库与专业知识库构建

危险化学品事故应急决策过程中，需要同时考虑危险物质属性、事故发展规律、现场环境条件以及相关安全规范要求。单一数据来源难以满足事故快速分析需求，因此本文构建危险化学品数据库与专业知识库相结合的数据支撑体系，为事故后果计算和智能决策提供基础。

事故案例数据主要来源于国家应急管理部公开发布的危险化学品事故调查报告、中国安全生产科学研究院事故案例资料以及国内外公开发表的事故分析研究文献。数据内容包括事故发生时间、事故地点、危险物质类型、事故原因、事故发展过程、灾害后果以及现场处置措施等。法规标准数据主要来源于国家标准全文公开系统以及行业标准数据库，主要包括 GB 系列国家标准、AQ 系列安全生产行业标准以及

危险化学品安全管理相关法规文件。

其中，事故案例数据用于增强系统对历史事故演化规律和处置经验的学习能力，法规标准数据用于限制智能生成结果的规范性，使系统输出方案满足安全管理要求。

危险化学品数据库主要用于存储事故分析所需的结构化数据，如表 4 所示，包括危险化学品基本信息、物理化学参数、燃烧爆炸特性、毒性参数以及储存条件等内容。数据库采用关系型数据结构进行管理，通过建立危险化学品名称、危险类别、物性参数和计算模型之间的关联关系，实现危险物质信息快速调用。

Table 4. Main data structure of the hazardous chemicals database

表 4. 危险化学品数据库主要数据结构

数据类别	主要字段	应用功能
基础属性数据	名称、CAS 号、分子式	危险品识别
物性参数	密度、沸点、蒸气压	事故计算
燃爆参数	燃烧热、爆炸效率	火灾爆炸分析
毒性参数	毒性阈值、浓度限值	扩散风险分析

危险化学品基础信息主要包括化学品名称、CAS 编号、分子式、分子量、危险类别以及主要危险特性等。事故计算参数主要包括燃烧热、沸点、密度、蒸气压、毒性阈值以及爆炸参数等，为事故模型计算提供输入。设备及环境参数主要包括储罐类型、储存压力、储存温度、设备尺寸以及气象条件等，用于构建具体事故场景。

通过数据库与知识库融合，系统既能够提供精确的结构化计算参数，又能够调用专业文本知识，为后续事故分析和智能方案生成提供双重支撑。

3.2. 事故后果预测计算模块实现

危险化学品事故后果预测是开展风险分析和应急决策的重要基础。根据过程安全分析理论，事故后果评价通常需要结合事故源项、物质特性以及环境条件，对火灾、爆炸和扩散过程进行定量分析[3]。

危险化学品事故后果预测是实现科学应急决策的重要基础，本模块所用到的安全模型见表 5。针对不同事故类型具有不同灾害演化机制的问题，系统建立多模型集成计算模块，实现典型危险化学品事故场景下的风险范围预测。

Table 5. Implementation methods of accident consequence prediction models

表 5. 事故后果预测计算模块模型实现方法

计算分组	模型、方法名称	核心原理
池火灾后果模拟	热平衡燃烧模型、热辐射通量衰减模型	由液池直径、物质热力学参数计算燃烧速度和热释放速率，再依据点源辐射衰减推算四个等级的影响距离
沸腾液体扩展蒸气爆炸 (BLEVE)	火球模型、TNT 当量法、超压衰减关系	计算火球直径、持续时间、燃烧辐射分数和 TNT 当量，据此推算死亡、重伤、轻伤、财产损失四级影响距离
蒸气云爆炸 (UVCE)	TNT 当量法 (含地面反射修正)	由物质质量、燃烧热和爆炸效率因子计算 TNT 当量，再推算不同距离处超压值，划分完全破坏、重度、中度、轻度破坏区域
有毒气体扩散预测	高斯烟羽模型 (Gaussian Puff Model)	假设污染物在稳定均匀大气条件下呈正态分布，根据扩散参数计算浓度分布

续表

泄漏源项计算	小孔泄漏模型、罐体泄漏模型、 均匀两相流泄漏模型	流出系数 - 孔口面积 - 密度联合确定瞬时质量流率；蒸发 百分比判定气、液相态
大气扩散浓度估算	高斯烟羽模型 (中心线、任意点、极值点)	通用扩散模型在地面中心线处的特例及任意点推广
爆炸冲击波参数	TNT 当量法、比拟距离查表法	将爆炸能量折算为等效 TNT 质量，通过比拟距离查表 确定侧向峰值超压
火球热辐射参数	点源热辐射模型	由物质质量和燃烧热决定火球直径和持续时间，辐射分数 随储罐压力递减
泄漏事故综合模拟	泄漏 - 蒸发 - 扩散耦合模型	将液体泄漏、蒸发(Fv 判定规则)和气体扩散三个过程耦合 进行联合模拟

3.2.1. 泄漏源项计算

危险化学品泄漏过程是火灾、爆炸和扩散事故发展的初始阶段。系统根据泄漏设备类型、泄漏孔径、储存状态以及介质性质选择对应泄漏模型。

对于液体泄漏，系统根据孔口流动理论计算泄漏质量流率；对于气体泄漏，根据压力状态判断流动形式，并计算气体释放速率。泄漏源项计算结果主要包括单位时间泄漏质量、累计泄漏量、泄漏持续时间、气液两相释放状态。计算结果作为后续扩散模型和火灾爆炸模型的重要输入参数。

3.2.2. 火灾事故后果预测

针对危险化学品泄漏后形成液池并发生燃烧的事故场景，系统采用池火灾模型进行分析。

池火灾计算主要包括燃烧速率计算、火焰尺寸计算以及热辐射距离计算三个过程。系统根据液池面积、燃烧热、燃烧效率以及环境条件计算火焰释放热量，并采用热辐射衰减模型获得不同距离处的热辐射强度。根据热辐射强度等级，可划分人员伤害区域和设备影响区域，为现场警戒范围确定提供依据。

3.2.3. 爆炸事故后果预测

针对危险化学品泄漏后形成液池并发生燃烧的事故场景，系统采用池火灾模型进行分析。池火灾影响范围主要通过燃烧速率、火焰尺寸以及热辐射强度进行计算，根据不同距离处的热辐射水平评价事故影响区域。

针对压力容器受热失效导致的 BLEVE 事故以及可燃气体泄漏形成蒸气云后的 UVCE 事故，系统分别采用火球模型和爆炸能量等效方法进行分析。相关事故后果计算方法已被过程安全领域广泛用于危险化学品火灾爆炸风险评价[9]。

3.2.4. 有毒气体扩散预测

对于具有毒性危害的危险化学品泄漏事故，系统采用高斯扩散模型计算污染物浓度空间分布。

模型综合考虑泄漏源强、风速、稳定度以及扩散参数等因素，计算不同距离和方向上的污染物浓度。

系统输出结果包括最大影响距离、危险浓度范围、不同毒性等级区域划分。计算结果可用于人员疏散范围确定和应急警戒区域划分。

3.3. 罐区消防救援计算模块实现

危险化学品储罐事故具有火灾持续时间长、热辐射影响范围大以及容易发生事故扩大的特点。针对储罐火灾应急救援需求，系统设计罐区消防救援计算模块，为消防力量部署提供辅助分析。针对危险化学品储罐火灾事故，消防灭火系统设计需要综合考虑燃烧特性、保护对象以及灭火剂供给能力等因素。本文中的泡沫灭火计算依据相关消防技术标准进行设计分析[10]。

该模块主要包括着火罐安全分析和泡沫灭火系统计算两个功能，所用到的安全模型见表 6。

Table 6. Safety model employed in the tank area fire suppression support module
表 6. 罐区扑救支持模块所运用的安全模型

计算分组	模型、方法名称	核心原理	依据标准
着火罐扑救安全分析	热释放速率模型、热辐射安全距离评估	由物质质量和燃烧热估算热释放速率，结合相邻储罐热辐射接收量评估安全距离和冷却需求	CCPS、TNO 指南
储罐泡沫灭火系统设计	泡沫灭火工程计算模型	第一步：按储罐类型计算保护面积；第二步：由液面面积 × 泡沫厚度 × 浓度计算罐内灭火用量；第三步：基础用量 × 设计余量系数得出设计用量	GB 50151-2021 《泡沫灭火系统技术标准》

3.3.1. 着火罐扑救安全分析

储罐发生火灾后，相邻储罐可能受到热辐射影响，引发连续事故。系统根据燃烧释放热量和空间距离计算相邻设备接收热辐射强度。

通过分析不同距离下的热辐射水平，判断邻近储罐是否需要持续冷却，并辅助确定消防重点保护区域。

3.3.2. 泡沫灭火系统计算

针对可燃液体储罐火灾，系统依据储罐类型和介质性质计算泡沫灭火需求。计算内容包括保护面积确定、泡沫供给强度计算、泡沫液需求量计算、消防持续时间分析。

系统计算结果可辅助消防人员快速确定灭火剂配置规模，提高现场救援资源调度效率。

3.4. 基于 RAG 的智能处置方案生成模块实现

智能处置方案生成模块是系统实现辅助决策的核心部分。针对通用大语言模型容易产生不符合专业要求的问题，本文采用检索增强生成技术，实现专业知识约束下的智能文本生成。

系统采用 LFM2-1.2B-RAG 作为端侧语言模型，结合 FAISS 向量检索引擎实现本地化智能推理。生成方案主要包括事故初期响应措施、警戒隔离范围建议、人员防护要求、泄漏控制措施、消防处置建议、事故恢复措施。同时，系统设置危险化学品标签匹配机制，对检索内容和生成内容进行约束，避免因模型语义理解偏差导致危险物质匹配错误，提高生成方案可靠性。

3.5. 系统部署与运行实现

系统采用桌面端与移动端协同开发模式，不同软件的分工见表 7。

Table 7. Dual-end functional coverage
表 7. 双端功能覆盖情况

功能模块	桌面端	移动端(危化应急助手)	移动端(事故后果与消防计算)
企业信息管理	支持	不支持	不支持
危化品知识库	支持	内嵌知识库	不支持
事故后果模拟	支持	不支持	支持
罐区扑救支持	支持	不支持	支持
AI 处置方案生成	支持	支持	不支持
可视化图表	支持(Matplotlib)	不支持	支持(Canvas)
离线运行	支持	支持	支持

桌面端采用 Python 语言开发，基于 PyQt6 实现图形交互界面，利用 SQLite 数据库完成数据管理；事故计算模块采用 NumPy、SciPy 实现数值计算，并通过 Matplotlib 完成结果可视化。移动端采用 Android 平台开发，实现现场快速查询和事故计算功能。

为适应化工现场网络环境复杂的问题，系统采用完全离线部署方式。模型文件、数据库文件以及知识库索引均存储于本地设备，无需访问互联网即可完成事故分析和辅助决策。

通过上述技术实现，系统形成了集数据管理、事故模拟、消防计算和智能决策于一体的危险化学品事故应急处置技术平台。

4. 系统运行与应用分析

4.1. 系统运行环境

危险化学品事故应急处置过程中，现场环境通常具有网络条件不稳定、设备资源有限以及信息获取时间紧迫等特点。因此，系统设计过程中充分考虑实际应用场景需求，采用本地化部署方式，实现数据、模型和计算程序的独立运行。

系统整体由桌面端和移动端两部分组成，运行环境配置见表 8。桌面端主要面向企业安全管理人员、专业技术人员以及应急分析人员，用于开展危险源信息管理、事故后果分析、消防救援计算以及智能处置方案生成等复杂任务；移动端主要面向事故现场人员，用于快速查询危险化学品信息、开展事故参数计算以及获取辅助决策信息。

Table 8. System operating environment configuration
表 8. 系统运行环境配置

类别	技术方案
操作系统	Windows, Android
开发语言	Python, Java, Kotlin
图形界面	PyQt6, Android UI
数据库	SQLite
深度学习框架	PyTorch
向量检索	FAISS
科学计算	NumPy, SciPy
可视化	Matplotlib

桌面端基于 Windows 操作系统开发，采用 Python 作为主要开发语言，利用 PyQt6 实现图形化交互界面。数据管理采用 SQLite 数据库，实现企业信息、危险化学品参数以及知识库索引等数据的本地存储。事故计算模块基于 NumPy 和 SciPy 实现数学计算，利用 Matplotlib 完成计算结果可视化。人工智能模块采用 PyTorch 深度学习框架，实现端侧大语言模型加载和推理计算。知识检索部分采用 FAISS 向量数据库，通过向量相似度计算实现专业资料快速匹配。

移动端采用 Android 平台开发，根据不同应用需求设计危化应急助手和事故后果与消防计算两个应用程序，实现现场快速响应和辅助分析功能。

4.2. 桌面端系统运行功能分析

桌面端作为系统综合分析平台，主要承担危险化学品事故信息管理、模型计算分析以及智能辅助决

策等任务。系统采用模块化设计方式,将不同功能按照事故应急流程进行组织,提高用户操作效率。

桌面端整体布局见图 4,主要包括企业信息管理、危险化学品知识库、事故后果预测、罐区扑救支持以及 AI 处置方案生成五个核心模块。

4.2.1. 企业信息管理模块

企业信息管理模块如图 5 所示用于建立危险化学品企业基础信息数据库,实现生产装置、储存设施、危险介质以及应急资源信息统一管理。

该模块通过结构化数据管理方式,将企业危险源信息与事故计算模型关联。当事故发生时,系统能够根据已有数据快速获取设备参数和危险化学品信息,减少现场信息收集时间。模块主要管理内容包括企业基本信息、罐区信息、应急资源信息、危化品性质信息。

通过企业危险源数字化管理,为事故场景快速构建提供数据基础。

4.2.2. 危化品知识库模块

危险化学品知识库模块如图 6 所示用于实现专业安全知识的集中管理和快速调用。

系统将重大事故案例、法规标准、专项预案、现场处置方案以及演练脚本等文档进行分类存储,并通过文本向量化方法建立语义索引。与传统关键词检索方式相比,向量检索能够根据语义信息匹配相关资料,提高复杂事故场景下知识获取效率。

4.2.3. 事故后果预测模块

事故后果预测模块如图 7 所示用于完成危险化学品事故影响范围计算。

用户根据事故类型选择对应计算模型,并输入危险化学品参数、设备参数以及环境条件后,系统自动完成计算过程。计算结果主要包括泄漏量及泄漏速率、热辐射影响距离、爆炸超压影响范围、有毒气体浓度分布等。系统支持计算结果以数据表格和图形方式展示,便于用户快速判断事故危险区域。

4.2.4. 罐区扑救支持模块

针对危险化学品储罐火灾事故,系统设置罐区扑救支持模块如图 8 所示,为消防救援部署提供辅助计算。

该模块主要包括着火罐热辐射分析、相邻储罐安全评估、消防冷却水量计算、泡沫灭火剂需求计算。系统根据输入的储罐尺寸、储存介质以及消防参数,自动计算消防资源需求,为现场灭火力量配置提供参考。

4.2.5. AI 处置方案生成模块

AI 处置方案生成模块实现基于专业知识增强的智能辅助决策,界面如图 9 所示。

用户输入事故类型、危险化学品名称以及事故状态后,系统首先调用知识库检索相关规范和案例,然后将检索结果输入大语言模型进行分析,最终生成结构化处置建议。生成内容主要包括事故初期响应、人员防护要求、警戒隔离措施、泄漏控制措施、消防处置建议、事故恢复措施。

为提高安全可靠,系统对生成过程设置危险化学品标签匹配和知识来源追踪机制,避免模型生成与事故对象无关的信息。

4.3. 移动端系统运行功能分析

为满足事故现场快速响应需求,系统开发移动端应用,实现现场人员快速查询和辅助计算。

移动端包括“危化应急助手”和“事故后果与消防计算”两个应用。

4.3.1. 危化应急助手

危化应急助手主要面向现场应急人员,用于快速获取危险化学品相关信息和智能处置建议。

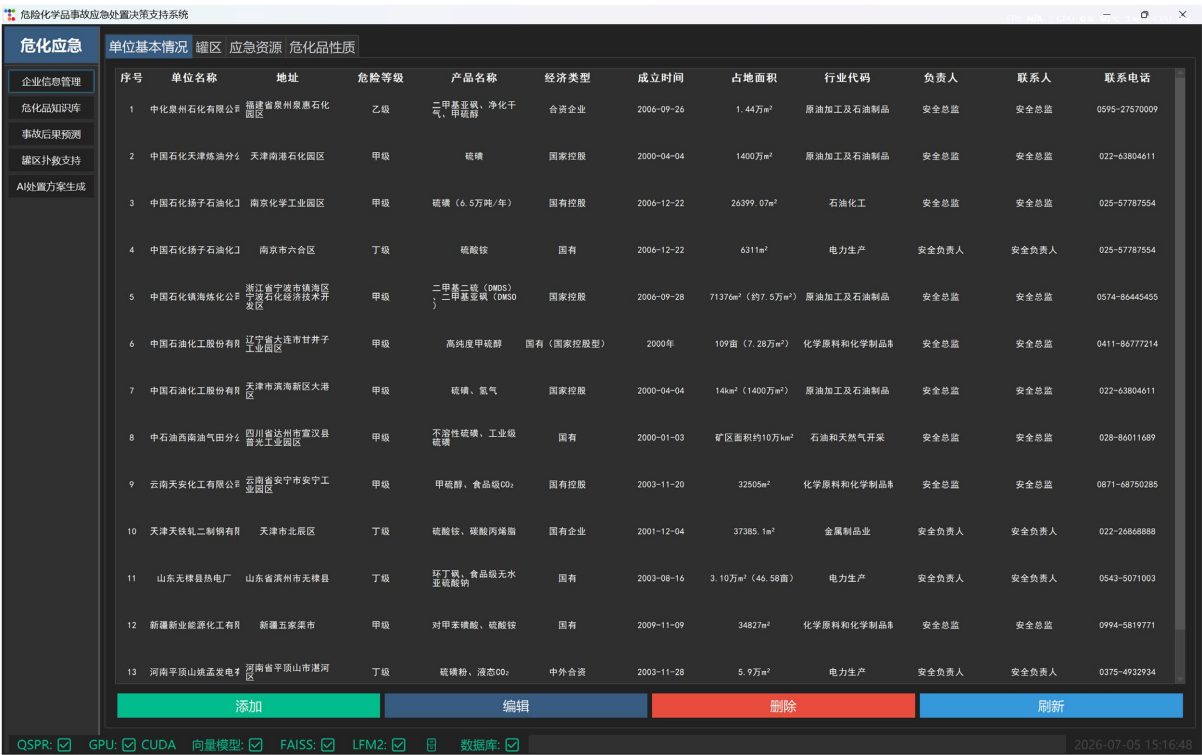


Figure 4. Overall layout of the desktop interface
图 4. 桌面端整体布局

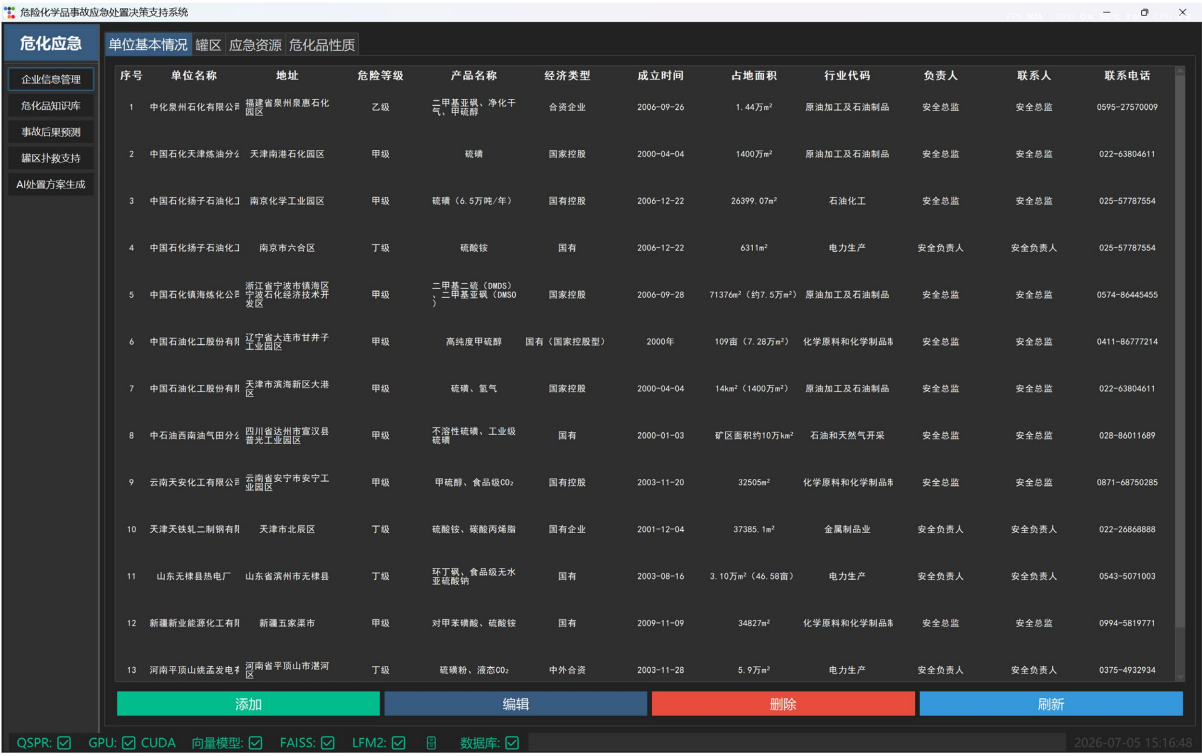


Figure 5. Enterprise information management module
图 5. 企业信息管理模块

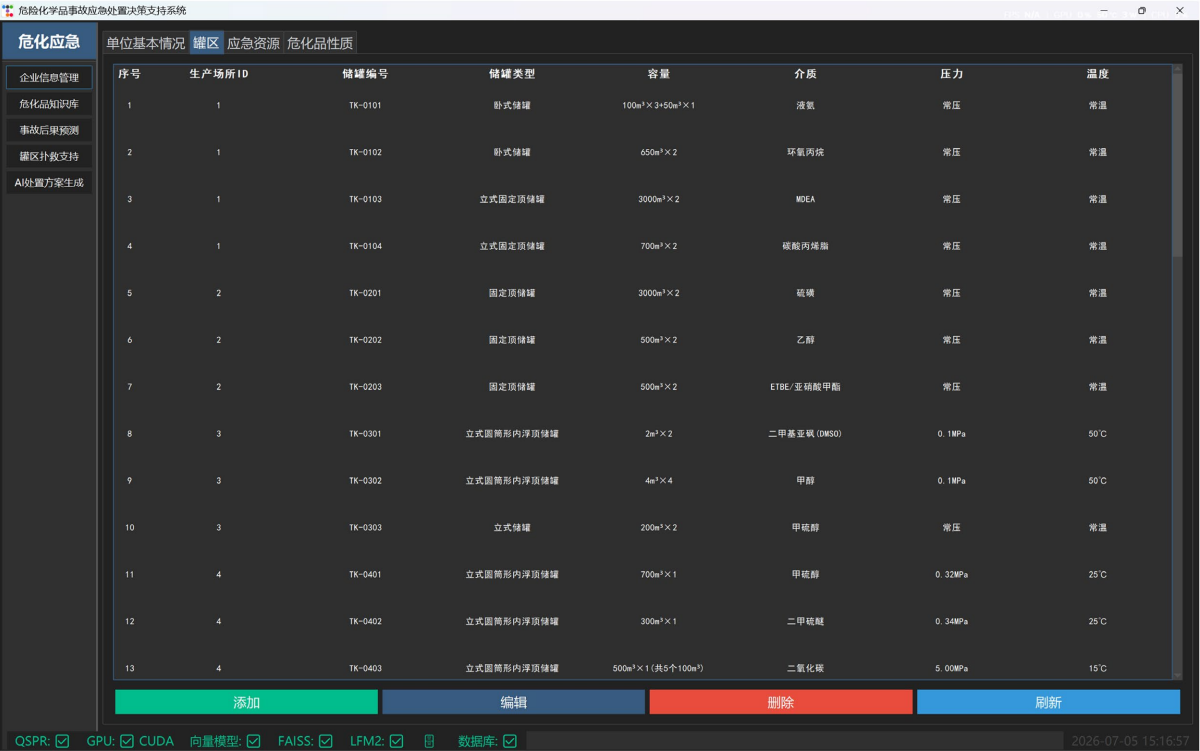


Figure 6. Hazardous chemicals knowledge base module
图 6. 危化品知识库模块

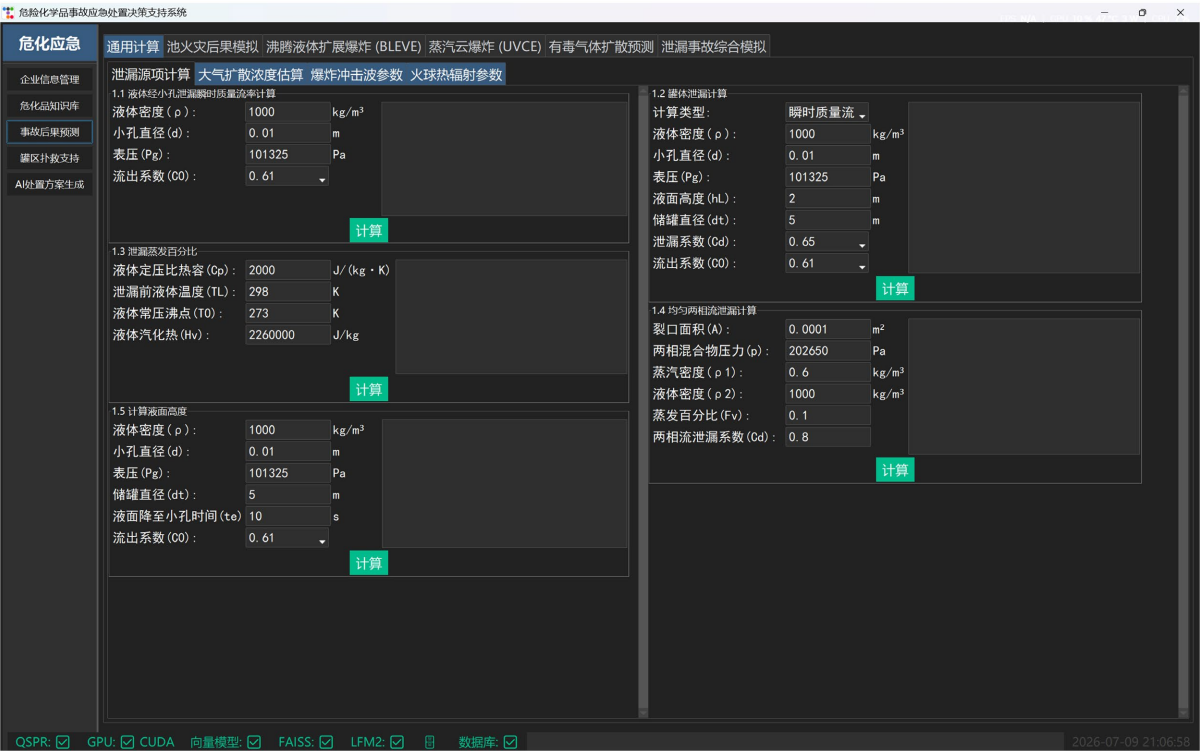


Figure 7. Accident consequences prediction module
图 7. 事故后果预测模块

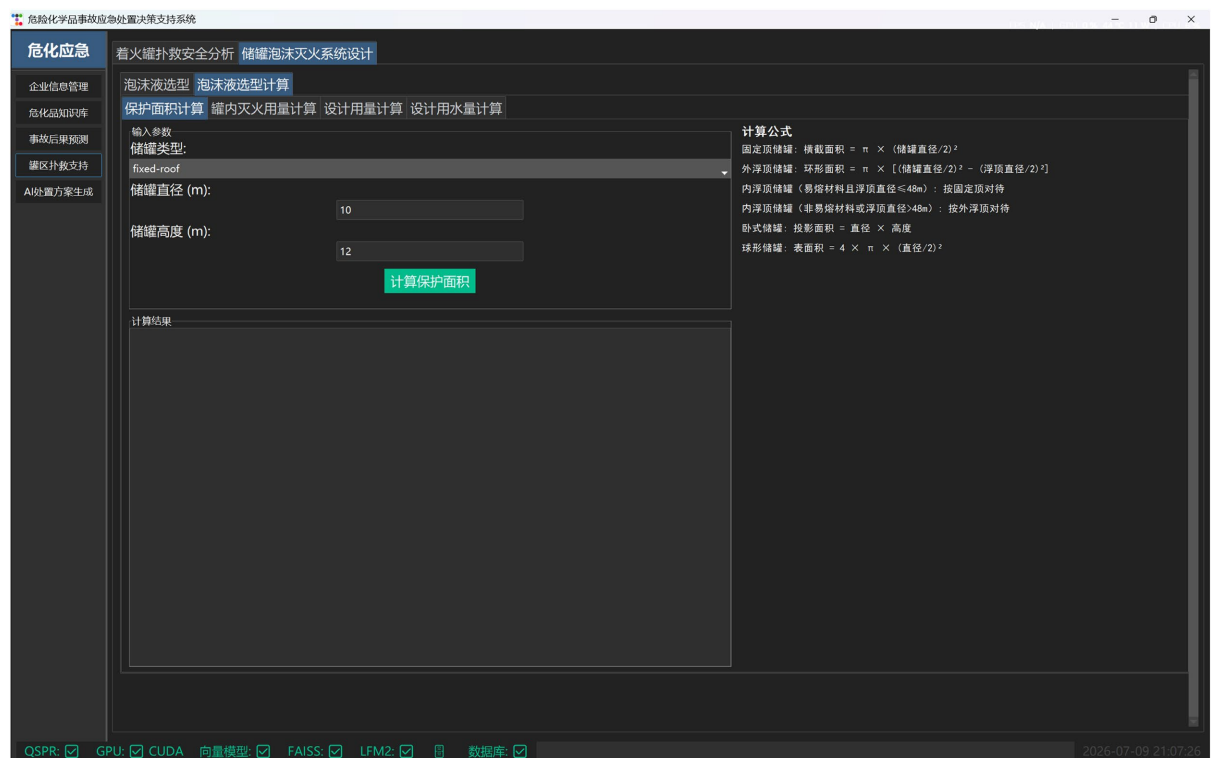


Figure 8. Tank area fire suppression support module
图 8. 罐区扑救支持模块

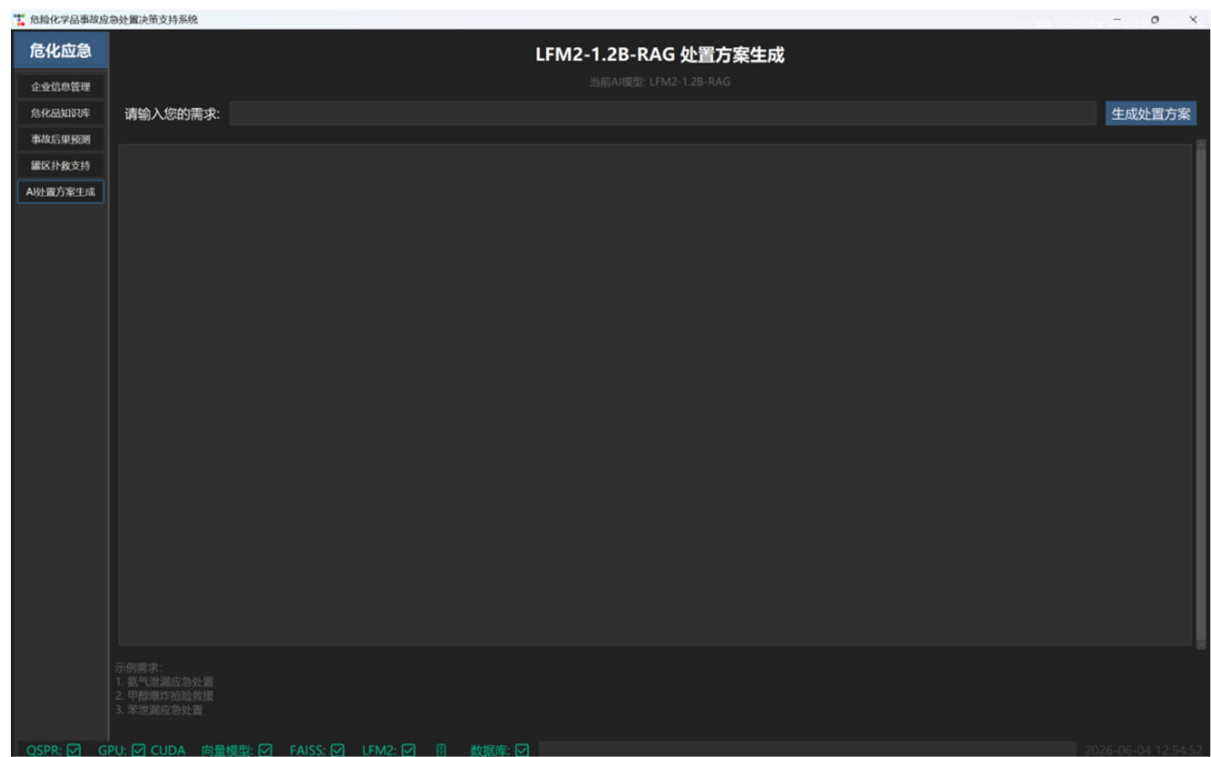


Figure 9. AI disposal solution generation module
图 9. AI 处置方案生成模块

应用界面如图 10 所示，采用简洁化设计，减少现场操作步骤。用户可以通过快捷事故场景入口进入对应分析界面，也可以通过文本输入方式提出具体问题。系统支持事故类型快速选择、AI 辅助问答、处置建议生成。

4.3.2. 事故后果与消防计算应用

事故后果与消防计算应用主要用于现场快速开展工程计算。
该应用如图 11 所示，集成事故后果预测模型和消防计算模型，包括泄漏计算、火灾影响分析、爆炸后果预测、有毒扩散分析、罐区消防计算等。用户输入关键参数后，系统自动完成计算，并输出风险范围和计算结果。



Figure 10. Application interface of the hazardous chemicals emergency assistant
图 10. 危化应急助手应用界面

8:56

0.00 100% 5G 100

事故后果与消防计算

事故模拟组

应急与消防组

通用理化计算工具组

池火灾后果模拟

沸腾液体扩展爆炸

蒸汽云爆炸

危险源名称

物质名称

泄漏质量(kg)

环境温度(°C)

池火直径(m)

暴露时间(min)

燃烧热(kJ/kg)

汽化热(kJ/kg)

比热容(kJ/kg·K)

沸点(°C)

计算

低风险

中风险

高风险

严重风险

Figure 11. Interface for accident consequences and fire protection calculations
图 11. 事故后果与消防计算应用界面

4.4. 系统离线运行与数据管理

危险化学品事故现场可能存在通信中断或网络条件受限情况，因此系统采用完全离线运行架构。系统离线能力主要体现在以下几个方面：

(1) 本地数据库存储

企业信息、危险化学品参数以及计算数据均存储于本地数据库，无需依赖网络服务器。

(2) 本地模型推理

大语言模型文件部署于设备内部，通过本地计算完成推理过程，避免网络访问限制。

(3) 本地知识检索

知识库文档和向量索引文件均存储于本地设备，FAISS 检索过程完全离线完成。

(4) 数据备份恢复

系统支持业务数据备份和恢复功能，方便设备维护和数据迁移。

通过离线部署方式，系统能够适用于化工生产现场、危险源区域以及应急救援现场等复杂环境，提高系统实际应用可靠性。

综上，本文设计的危险化学品事故应急处置决策支持系统实现了危险化学品数据管理、事故后果分析、消防救援计算以及人工智能辅助决策的一体化应用。系统通过桌面端与移动端协同运行，提高了事故信息获取和应急决策效率，为危险化学品事故快速响应提供了技术支撑。

5. 结论

针对危险化学品事故具有突发性强、灾害后果复杂以及现场应急决策要求高等特点, 本文提出了一种融合事故后果预测模型、专业知识库和检索增强生成技术的危险化学品事故智能应急处置决策方法, 并设计实现了相应的决策支持系统。通过将工程计算模型与人工智能技术相结合, 实现了危险化学品事故风险分析与辅助决策的一体化, 为提升事故现场快速响应能力提供了新的技术路径。

本文主要研究成果如下:

(1) 构建了面向危险化学品事故应急场景的多源数据融合体系。通过整合危险化学品物性参数、企业危险源信息、事故案例以及安全规范等数据资源, 建立了结构化数据库和专业知识库, 为事故场景构建、模型计算和智能决策提供了数据支撑。

(2) 建立了事故场景与后果预测模型相结合的分析方法。针对危险化学品泄漏、火灾、爆炸以及有毒气体扩散等典型事故类型, 集成泄漏源项计算、池火灾、BLEVE、UVCE 以及有毒气体扩散等模型, 实现了不同事故条件下危险区域和灾害影响范围的定量分析, 提高了事故风险研判的科学性。

(3) 提出了基于检索增强生成技术的安全领域智能决策方法。通过构建危险化学品专业知识库, 并结合 FAISS 向量检索技术和端侧大语言模型, 实现了专业知识与人工智能推理能力的融合。同时, 通过危险化学品标签匹配、知识来源约束等机制, 提高了智能生成方案的专业性和可靠性, 降低了通用大语言模型在安全领域应用过程中可能产生的信息偏差。

(4) 开发了桌面端与移动端协同运行的危险化学品事故应急处置决策支持系统。系统集成危险源信息管理、事故后果预测、消防救援计算、知识检索以及智能方案生成等功能, 并支持完全离线运行, 能够满足化工企业和应急救援现场在网络条件受限环境下的应用需求。

总体来看, 本文研究实现了危险化学品事故应急处置过程中数据管理、风险分析和智能辅助决策的有效融合, 为传统应急管理向数字化、智能化方向发展提供了技术参考。

未来研究将进一步从以下几个方面开展优化:

(1) 进一步扩展专业知识库规模, 增加更多危险化学品事故案例、行业标准以及国际安全规范, 提高系统知识覆盖范围和专业适应能力。

(2) 进一步优化人工智能模型在安全工程领域的适配能力, 通过领域微调、知识约束优化以及推理过程增强, 提高复杂事故场景下智能决策结果的准确性。

(3) 结合工业物联网技术, 引入实时传感器数据采集功能, 实现事故参数自动获取和动态更新, 使系统由静态分析向实时风险感知方向发展。

通过上述研究, 可进一步提升危险化学品事故智能应急处置水平, 为化工行业安全生产和事故风险防控提供更加高效、可靠的技术支撑。

参考文献

- [1] 陈思强, 王金玮, 胡训军. 50 起危险化学品常压储罐事故分析[J]. 职业卫生与应急救援, 2023, 41(5): 599-602.
- [2] 赵来军, 吴萍, 许科. 我国危险化学品事故统计分析 & 对策研究[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(7): 165-170.
- [3] Crowl, D.A. and Louvar, J.F. (2011) Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications. 3rd Edition, Prentice Hall.
- [4] Lewis, P., Perez, E., Piktus, A., *et al.* (2000) Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. arXiv: 2005.11401.
- [5] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB 30077-2023 危险化学品单位应急救援物资配备要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [6] Reimers, N. and Gurevych, I. (2019) Sentence-BERT: Sentence Embeddings Using Siamese Bert-Networks. *Proceedings*

- of the 2019 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and the 9th International Joint Conference on Natural Language Processing (EMNLP-IJCNLP), 3-7 November 2019, 3982-3992. <https://doi.org/10.18653/v1/d19-1410>
- [7] Johnson, J., Douze, M. and Jegou, H. (2021) Billion-Scale Similarity Search with GPUs. *IEEE Transactions on Big Data*, 7, 535-547. <https://doi.org/10.1109/tbdata.2019.2921572>
- [8] Dettmers, T., Lewis, M., Belkada, Y. and Zettlemoyer, L. (2022) LLM.int8(): 8-Bit Matrix Multiplication for Transformers at Scale. *Advances in Neural Information Processing Systems* 35, New Orleans, 28 November-9 December 2022, 30318-30332. <https://doi.org/10.52202/068431-2198>
- [9] Center for Chemical Process Safety (1994) Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs. AIChE.
- [10] 中国石油化工集团有限公司, 公安部天津消防研究所. GB 50151-2021 泡沫灭火系统技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.