

引文: 朱喜平. 大型石油储库全寿命周期风险管控一体化平台研发[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1175-1183.

ZHU Xiping. Research and development of integrated life cycle risk management and control platform for large petroleum storage depot[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1175-1183.

# 大型石油储库全寿命周期风险管控一体化平台研发

朱喜平

国家石油天然气管网集团有限公司

**摘要:** 为了保障国家能源安全和实现“双碳”战略,在大力提高油气储备能力建设的同时,亟需加强大型油气储存设施的风险管控。针对大型石油储库在数据库建设、风险预测与预警、应急决策支持方面存在的问题,并结合 GB/T 42097—2022《地上石油储(备)库完整性管理规范》的总体实施要求,对大型石油储库风险管控一体化平台运行过程中的关键技术进行了优化:建立了平台的核心架构及全生命周期数据库;形成了基于多米诺效应的定量风险评价方法;建成了应急决策支持子系统,并通过改进 Dijkstra 算法,构建了储库应急救援路线优化模型,开发了火情分析算法及应急无人机平台。以中国石化舟山石油储库为示范,建立了全寿命周期风险管控一体化平台,从全生命周期数据管理、风险预测与预警、应急管理等多个方面提高了储库的管理与安全决策水平。研究结果可为石油储备库的安全运行提供技术支撑。(图 10,表 5,参 26)

**关键词:** 大型石油储库;全生命周期;数据库;风险管控;一体化平台

中图分类号: TE88

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2023)10-1175-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.011

## Research and development of integrated life cycle risk management and control platform for large petroleum storage depot

ZHU Xiping

China Oil & Gas Pipeline Network Corporation

**Abstract:** In order to ensure energy security and realize the “dual carbon” strategy, it is urgent to strengthen the risk management and control of large oil and gas storage facilities while vigorously improving the storage capacity of oil and gas. In response to the problems of large petroleum storage depots concerning database construction, risk prediction and early warning, and emergency decision-making support, the key technologies adopted during the platform operation were optimized with reference to the general implementation requirements specified in the *Aboveground Petroleum Storage Depot Integrity Management Specification* (GB/T 42097—2022). Specifically, the core architecture of the integrated risk management and control platform for large petroleum storage depots and a life cycle database were established, a quantitative risk assessment method based on the domino effect was formed, and an emergency decision-making support subsystem was developed. Besides, an emergency rescue route optimization model for petroleum storage depots was built by improving the Dijkstra algorithm, and a fire analysis algorithm and an emergency drone platform were developed. Moreover, an integrated life cycle risk management and control platform was established based on SINOPEC Zhoushan petroleum storage depot, which effectively enhanced the decision-making level on management and safety of petroleum storage depot from multiple aspects, such as full life cycle data management, risk prediction and early warning, and emergency management. Generally, the research results could provide technical support for the safe operation of petroleum storage depots. (10 Figures, 5 Tables, 26 References)

**Key words:** large petroleum storage, full life cycle, database, risk management and control, integrated platform

大型石油储库是国家能源重要战略储备基础设施,中国的石油储库大多地处沿江沿海,一旦发生事

故,会严重危害公共安全与生态环境<sup>[1-2]</sup>,因此保证储库安全生产运行尤为重要<sup>[2]</sup>。国外石油储库已建立了

成熟的风险管控系统和基于物联网的安全保障系统,但中国石油储库的风险管控平台建设仍处于起步阶段。在储库数据库建库方面,数据仓库技术目前在全球大型石油储库应用广泛<sup>[3-4]</sup>,中国针对储库数据仓库研究较少,目前仅局限于收集数据和业务流程管理,缺乏数据规范、与其他系统的数据接口,不能为储库的合理建设、科学管控以及平稳运行提供数据基础与业务支撑,无法满足储库资产全生命周期精细化管理的需求。在风险预测与预警方面<sup>[5-14]</sup>,缺乏有用的失效数据支持,无法开展基于物联网采集、大数据分析技术的评价研究。在应急决策支持方面<sup>[15-16]</sup>,尚未建立决策支持模型,一旦发生应急事故仅依靠消防配置,缺少具有全局性、即时性的应急决策支持方案。

当前,中国大型石油储库安全风险高、运行难度大、缺乏统一的完整性管理标准。2023 年 4 月 1 日起开始实施 GB/T 42097—2022《地上石油储(备)库完整性管理规范》,提出了地上石油储库完整性管理的内容、方法及要求,主要包括建设期完整性管理、数据采集与整合、风险评价、完整性检测、完整性评价、风险削减与设备设施维修维护、效能评价、应急管理、风险管控一体化平台等要求,适用于地上石油储库储罐、工艺管道、控制系统、附属设施等资产的完整性管理,以及地上石油储库的安全与应急管理。该标准要求在役储库建设期、运行期均需开展风险管控一体化平台与信息平台建设,并提出了相关规定。

针对大型石油储库风险管控系统平台在开发及应用中存在的问题,结合 GB/T 42097—2022 相关要求,梳理了石油储库的数据库建设、风险评价、决策支持等方面的关键技术,开发了大型石油储库全寿命周期风险管控一体化平台,并在中国石化舟山石油储库开展了工程实践应用与示范,以为大型石油储库重大事故的预测、应急资源科学调配提供参考。

## 1 平台核心架构及功能

### 1.1 核心架构

大型石油储库风险管控一体化平台(图 1)的核心架构包括 3 个层级,分别为分析层、应用层以及数据层。根据大型石油储库的实际情况,可实现数据采集、数据分析、数据管理。

(1)数据层主要负责数据采集与管理,数据采集包

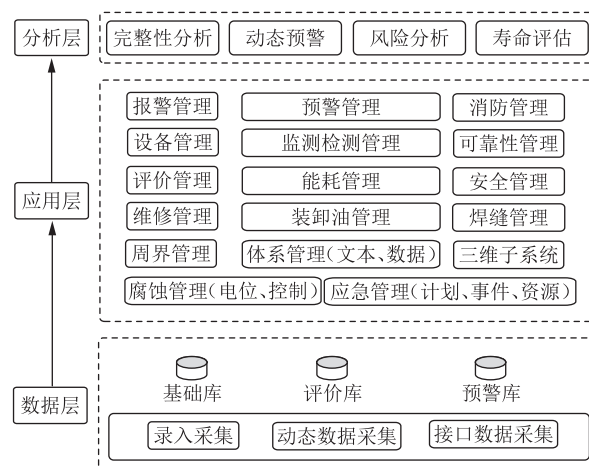


图 1 大型石油储库风险管控一体化平台系统框架图  
Fig. 1 Architecture of integrated risk management and control platform for large petroleum storage depot

括以下 3 种方式:通过建立数据录入界面,实现数据的手动录入;根据现场实际情况进行数据同步,实现动态数据采集;根据 Restful 接口开发原则和储库中已有系统情况,建立数据接口实现接口数据采集。数据层采集的数据划分为储库基础信息数据、分析评价数据、预警数据 3 类,录入对应的数据库中综合管理。

(2)分析层主要是对储库的管理工作开展数据分析及预警,依据所建立的数据分析模型,实现大型石油储库的完整性分析、动态预警、风险分析及寿命评估。

(3)应用层主要是对大型石油储库实际业务的管理,包括设备管理、评价管理、维修管理、三维子系统、应急管理等。通过应用层实现大型储库安全保障一体化管理工作,提高储库管理与安全决策的技术水平,全面保障储库安全运行。

### 1.2 关键技术

#### 1.2.1 基于全生命周期的数据库系统

基于大数据的大型石油储库全生命周期数据库打通了储库从规划、建设、运行、维护到报废的全生命周期链条,对储库不同业务环节的数据进行有机整合,满足了储库全生命周期项目管理的相关需求,可最大化地实现各环节数据的业务价值。根据大型石油储库全生命周期数据库总体功能框架(图 2),其数据库搭建包括以下 3 大步骤。

(1)分解大型石油储库工程实体结构,以实物分解结构 PBS(Project Breakdown Structure)为核心,按照项目、子项目、项目单元、功能区 4 个层次的划分要求进行数据的关联、挂接应用。

(2)深度挖掘大型石油储库工程实体属性,依据

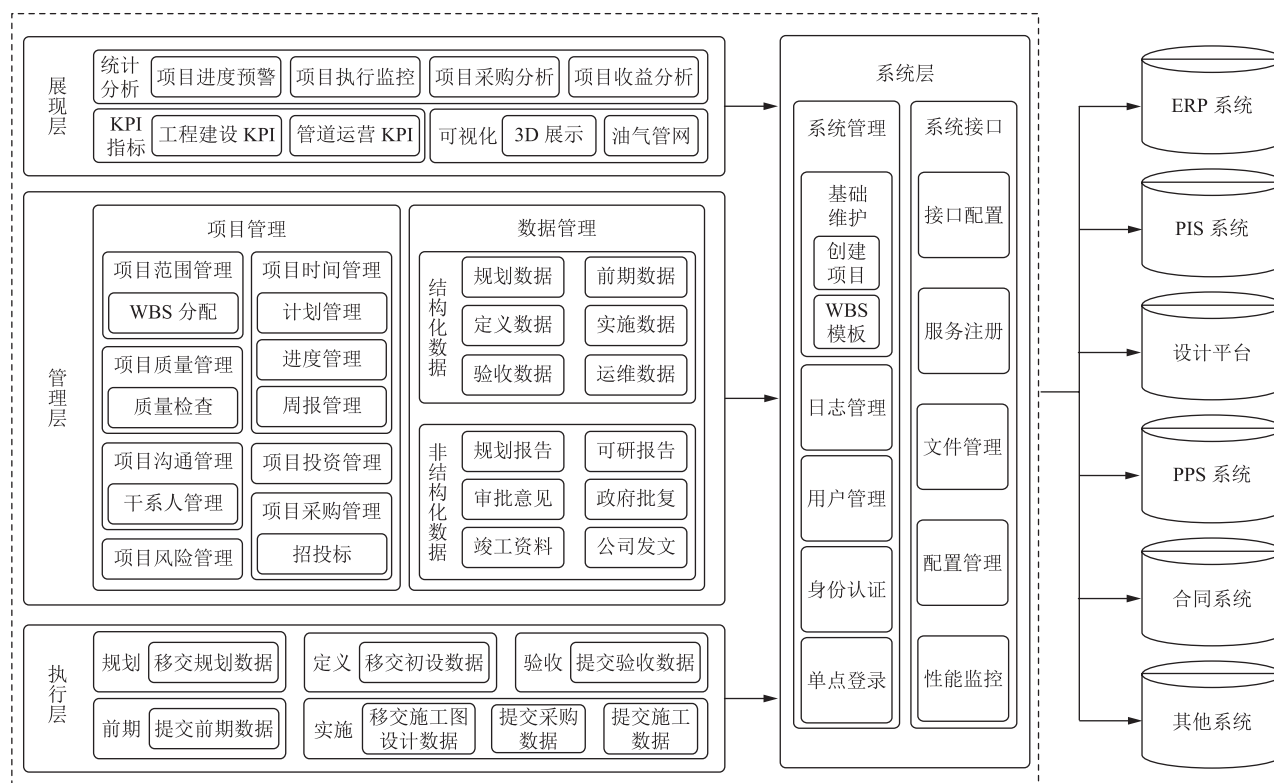


图2 大型石油储库全生命周期数据库总体功能框架图

Fig. 2 Overall functional framework of life cycle database of large petroleum storage depot

GB/T 42097—2022 制定数据字典。依据数据实体的属性(基本信息)定义数据项,包括公共属性、字段名称、计量单位、数据类型、精度、值域/约束等,并依据数据项形成相应的数据字典,用于数据的字典查询和索引。对于大型石油储库,储罐实体的基本信息包括储罐的编号、名称及类型等,数据项包括设计参数、运行参数、维护维修记录等,贯穿了储罐的全生命周期管理。

(3) 搭建全生命周期数据库及可视化系统。Oracle 数据库具有高度可移植性、便于访问和管理的优点,选取 Oracle 数据库按照数据字典的数据集合方法进行数据库设计,搭建基于大数据的大型石油储库全生命周期数据库(图2)。由于大型石油储库全生命周期数据库存在海量数据、空间数据展示等需求,因此集成了各种数据库技术,并得到了较为良好的融合:采用 Oracle 数据库来处理强事务型需求功能,利用 MongoDB、Redis 等数据库框架结构来解决大数据量场景功能,并使用 Oracle spatial 来实现空间数据需求。通过对三维建模、可视化要素等进行研究,开展了大型石油储库三维建模,该数据库具有了配套展示系统,即储库可视化<sup>[17]</sup>系统。

### 1.2.2 基于多米诺效应的定量风险评价系统

油库罐区事故触发的多米诺效应会引起一系列的

连锁反应,造成多个二次事故,对整个罐区风险有较大影响。计算并分析由初始事故引起的多米诺效应概率,能够为降低事故后果和风险提供依据。针对油库储库区多米诺火灾事故频发,基于多米诺效应<sup>[18-22]</sup>的定量风险评价方法,通过事故场景识别、频率分析、后果分析及风险计算4个方面,对区域内所有危险源进行全面分析,定量分析复杂罐区布局的风险(图3)。大型石油储库罐区多米诺效应定量风险评价及计算主要包括以下3个步骤。

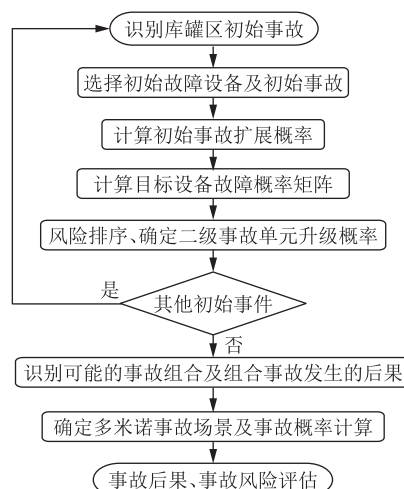


图3 大型石油储库罐区多米诺效应定量风险评价流程图  
Fig. 3 Quantitative risk assessment process of tank farm in large petroleum storage depot based on domino effect



(1) 计算考虑多米诺效应下各储罐失效概率。从识别可能引发初始事件的危险源开始, 考虑主要事件的事事故场景、事件位置、发生频率等特征, 确定事故传播的主要升级因素, 结合可能升级目标的位置, 识别可信的多米诺事件场景, 并进行升级概率和预期严重性的评估; 同时, 还考虑到每个主要场景可能引发的所有可信的次要事件组合, 从而得到整个罐区中每个储罐单元可能的事事故场景及概率<sup>[23-24]</sup>。由初始事件升级向量引发的二次事件概率为:

$$P = P_0 P_h \quad (1)$$

式中:  $P$  为多米诺事件概率;  $P_0$  为初始事件的概率;  $P_h$  为由升级向量引起的事件升级概率。

(2) 假设目标区域有  $N+1$  个设备单元, 选择其中一个作为初始事件设备, 则  $k(k \leq N)$  个设备同时发生事故的  $m$  种多米诺场景概率为:

$$P_h^{(k,m)} = \prod_{i=1}^N [1 - P_{h,i} + f(i, J_m^k)(2P_{h,i} - 1)] \quad (2)$$

式中:  $P_h^{(k,m)}$  为含  $k$  个储罐同时发生事故的  $m$  种多米诺场景的概率;  $P_{h,i}$  为目标设备  $i$  发生事故的的概率;  $J_m^k$  为  $k$  个设备同时发生事故的  $m$  种多米诺场景, 当设备  $i$  的事故包含于第  $m$  种多米诺场景组合  $J_m^k$  时,  $f(i, J_m^k) = 1$ , 否则  $f(i, J_m^k) = 0$ 。

$k$  个发生二次事件的设备同时发生第  $m$  种多米诺场景概率  $P_h^{(k,m)}$  为:

$$P_h^{(k,m)} = P_0 P_h^{(k,m)} \quad (3)$$

(3) 计算事故扩展造成的死亡区域、重伤区域及轻伤区域的半径。采用热通量-作用时间伤害准则<sup>[25]</sup>确定人员受到不同程度伤害时的临界热通量, 通过临界热通量计算初始事故所造成的死亡区域、重伤区域及轻伤区域的半径  $r$ :

$$P'' = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (4)$$

$$Y = -14.9 + 2.56 \ln W \quad (5)$$

$$W = 0.006 I^{1.33} t \quad (6)$$

$$r = \frac{Q t}{\sqrt{4\pi I}} \quad (7)$$

式中:  $P''$  为扩展事故人员致死概率;  $Y$  为概率变量;  $u$  为积分变量;  $W$  为事故产生的物理效应的危险剂量;  $I$  为热通量,  $\text{kW/m}^2$ ;  $t$  为人体暴露于热辐射的时间,  $\text{s}$ ;  $Q$  为火焰表面热辐射通量,  $\text{kW}$ 。

根据上述计算式, 并结合宇德明等<sup>[23]</sup>提出的热辐射破坏准则, 可得出大型石油储罐罐区多米诺效应造

成的人员伤害后果严重度为事故区域内人员所受到的伤害程度与致死概率之积(表1)。

表1 大型石油储罐罐区多米诺效应造成的人员伤害后果严重度表

Table 1 Severity of personal injury consequence caused by domino effect in tank farm of large petroleum storage depot

伤害区域	人员所受到的伤害程度	人员所受伤害程度的致死概率	事故严重度
死亡区	受伤害概率100%	死亡概率为50%	0.50
重伤区	二度烧伤概率50%	二度烧伤的死亡概率为30%	0.15
轻伤区	一度烧伤概率50%	一度烧伤的死亡概率为10%	0.05

### 1.2.3 基于大数据的应急决策支持系统

大型石油储罐应急决策支持是一种持续地对态势进行分析、综合、评估及判断决策的循环过程, 涉及大量的信息采集、整合、分析以及方案优化。基于大型储罐安全屏障与多米诺失效模式, 构建了事故应急决策支持模型<sup>[24-25]</sup>, 优化应急规划、事故应急处理及应急预案; 基于最大可信事故链确定重点监控设备, 制定事故预防与控制措施。

#### 1.2.3.1 应急决策支持系统模块

根据大型石油储罐应急决策支持需求的分析, 开发了应急决策支持系统(图4), 并设置了基础信息子系统、危险源管理子系统、危险源安全评价子系统以及应急救援决策子系统。其中, 基础信息子系统具备维

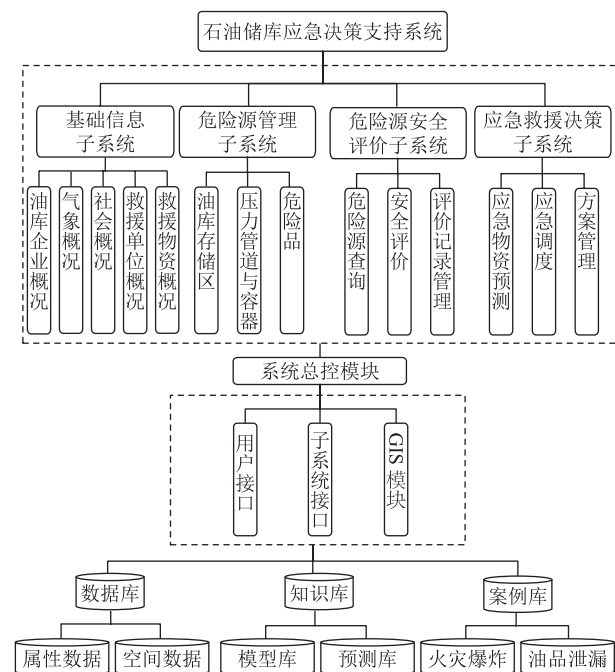


图4 大型石油储罐应急决策支持系统组成示意图  
Fig. 4 Composition of emergency decision-making support system for large petroleum storage depot

护与管理生产信息、救援单位概况、救援物资概况等基础信息的功能;危险源管理子系统可实现库内重大危险源信息的维护、录入及查询等功能;危险源安全评价子系统通过信息系统获得危险源信息,采用包括火灾爆炸模型、油品泄漏模型在内的多种评价模型实现危险源安全等级的判断,分析事故后果;应急救援决策子系统依据安全评价子系统提供的数据,为决策用户提供应急预案的选择及应急资源预测,并根据预测结果进行应急调度。

### 1.2.3.2 基于改进 Dijkstra 算法的应急救援路线模型

由于储库周边救援道路网较复杂,救援物资种类多、分布网络节点多,如消防、公安、医院、社区人员以及物资等需要及时到达救援地点,在规划路径上的网络节点也非常多,传统 Dijkstra 算法存在非计算网络节点多、空间浪费、应急决策不及时等不足。因此,通过改进 Dijkstra 算法<sup>[26]</sup>,综合考虑大型石油储库应急所需资源、公路交通量系数、道路危险系数、地形因子等关键因素,建立大型石油储库应急救援路线优化模型。储备库事故应急救援路径规划的计算策略为:从未选定为最短距离的网络节点中选择一个当前集合中权值最小的点,即距离源点最近的点。由此,得到基于改进 Dijkstra 算法的大型石油储库应急救援路线规划计算步骤为:

(1)添加应急资源储备网络节点的标记,采用布尔值类型的数组标记对算法过程中的节点进行标记。如果应急资源储备网络节点已选定为最短距离节点,则标记为“True”,否则标记为“False”。

(2)添加最小路径变量。采用整型变量对未确定的最小距离、最短时间的应急资源储备网络节点的值进行标记,初始化定义整型变量为最大值,伴随着数组的遍历,整型变量的值会越来越小,通过对比选出最佳路径。

在实际的计算过程,需将应急资源储备点添加到网络节点标识中,一旦某处或多处发生大规模灾害事故,在应急资源配送过程中,将面临从多个储备点向一个事故点的资源配送问题。通过采用改进 Dijkstra 算法,可在最短时间内找到距离最近的应急资源储备点,并能优选出资源规划路径。

应急所需资源依据事故类型确定,将距离急救点较远、应急物资储备较少的应急点删除。公路交通量系数、道路危险系数、地形因子影响救援路径当量长度

的确定:公路交通量系数根据车型、车速、道路宽度确定;道路危险系数依据事故类型确定,针对油品泄漏事故,由于油品本身的物性使部分区域受污染程度大于其他区域,救援路线的选择应尽量避免这些区域内的道路;地形因子分为平地、轻微起伏地形、丘陵地形、较陡峭地形、山地,不同的地形对车速会产生很大的影响,尤其是对于医疗救护队伍,陡峭的公路将给患者带来极大的隐患。

储库事故的应急救援路径规划通过改进 Dijkstra 算法实现(图 5,其中 A 代表应急资源储备点, B、C 代表各交通十字路口, D 代表应急事故点, 1~5 代表各条道路),点与连线是对实际交通道路网络拓扑部分结构的模拟。利用改进 Dijkstra 算法,可求出点 A 到 D 的最短路径。

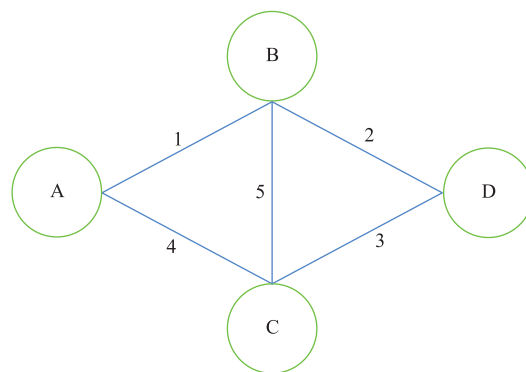


图 5 基于改进 Dijkstra 算法的大型石油储库应急救援路线规划示意图

Fig. 5 Emergency rescue route planning for large petroleum storage depot based on the improved Dijkstra algorithm

### 1.2.3.3 无人机平台

大型石油储库一旦发生应急事件,由于其罐体体积庞大、占地面积大,风险源不易观察,无人机平台(图 6)成为大型石油储库应急指挥的重要装备,不仅可以传递现场图像、辅助应急人员进行现场指挥,而且可以进行泄漏浓度探测。

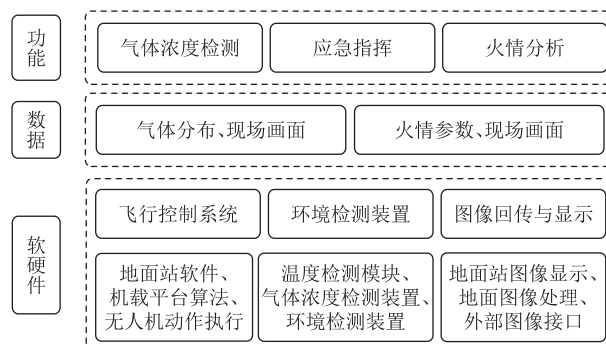


图 6 大型石油储库应急救援无人机平台架构图

Fig. 6 Architecture of emergency drone platform for large petroleum storage depot

无人机平台的搭建是以某无人机公司的 M100 四轴飞行器为基础,该飞行器集成了飞行的全套设备,包括飞行控制器、动力系统、GPS 模块、DJI Lightbridge 高清图传、遥控器、智能电池等。通过 M100 四轴飞行器的扩展式机架,增加 H20 云台及 U10 激光甲烷传感器组件,结合火情分析算法(图 7,其中 GRB(Green Red Blue)为加色混合色彩模型、HSV(Hue Saturation Value)为用户直观的色彩模型)实现火情分析、危险气体浓度检测、画面远传等功能。

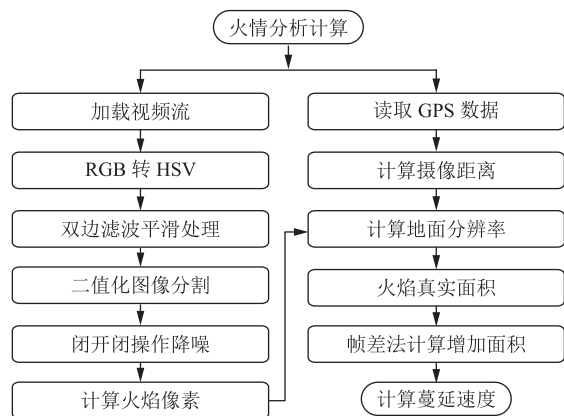


图 7 大型石油储库应急救援无人机平台火情分析算法流程图  
Fig. 7 Process of fire analysis algorithm of emergency drone platform for large petroleum storage depot

## 2 应用案例

### 2.1 基本概况

中国石化舟山石油储库位于浙江省舟山市南部嵊山岛,地处中国沿海南北航线与长江、甬江、钱塘江入海的交汇点。油库区由 55 座储罐及附属设备组成,单罐

最大容量  $10\times 10^4\text{ m}^3$ ,总罐容达  $256\times 10^4\text{ m}^3$ 。建有 6 座 3 000~300 000 t 级输油码头,能接卸 500~275 000 t 油轮,是中国的重要石油储备基地之一。

### 2.2 风险管控一体化平台建设

根据舟山石油储库设备设施数据、生产数据、库区规划建设数据等,建立了舟山石油储库 Oracle 基础数据库,建设完成舟山石油储库风险管控一体化平台(图 8),经过 3 年工程实践,取得了良好的应用效果。



图 8 中国石化舟山石油储库风险管控一体化平台功能架构图  
Fig. 8 Functional framework of integrated risk management and control platform for SINOPEC Zhoushan petroleum storage depot

### 2.3 风险评价与预警

依托中国石化舟山石油储库储罐油品物性(表 2)及储罐分布的实际情况,结合基于多米诺效应的石油储库定量风险评价模型,建立了舟山石油储库罐区风险评价与预警模块。以大型原油储罐的池火灾事故、蒸气云爆炸事故为事故场景代表,结合储罐油品物性参数及库区相关布局参数,根据典型事故场景计算模型,求取两种事故场景下燃烧、爆炸相关参数。

表 2 中国石化舟山石油储库油品物性参数表  
Table 2 Physical parameters of oil products of SINOPEC Zhoushan petroleum storage depot

液体燃烧热值/ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	液体蒸发热/ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	液体定压比热容/ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )		油品沸点/K	环境温度/K
			油品	空气		
43 890	400	1.7	840	1.293	393.15	293.15

以中国石化舟山石油储库某罐组区(图 9)为例,有  $T_1\sim T_6$  共 6 座储罐,相邻储罐间距为 32 m,单个储罐容积为  $10\times 10^4\text{ m}^3$ 、罐径为 80 m。假设储罐  $T_1$  发生池火灾初始事故,池火灾发生概率为  $1\times 10^{-5}$ ,人体暴露于热辐射的时间为 60 s,可计算出在热通量为  $37.5\text{ kW/m}^2$ 、 $25.0\text{ kW/m}^2$ 、 $12.5\text{ kW/m}^2$ 、 $4.0\text{ kW/m}^2$  的情况下,该罐组区储罐对应的安全距离分别为 60.418 m、69.120 m、89.324 m、134.828 m,并可得到该储库初始事故后果(表 3)。

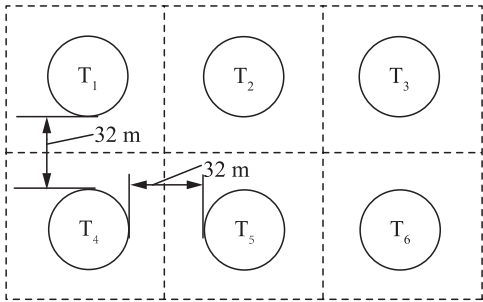


图 9 中国石化舟山石油储库某罐组区储罐分布示意图  
Fig. 9 Tank distribution in a farm of SINOPEC Zhoushan petroleum storage depot



表 3 中国石化舟山石油储库某罐组区初始事故伤害区域计算结果表

Table 3 Calculation results of initial accident damage area in a tank farm of SINOPEC Zhoushan petroleum storage depot

伤害区域	区域半径/m	事故后果严重度
死亡区	93.648	0.50
重伤区	107.785	0.15
轻伤区	137.776	0.05

依据事故发生概率及事故风险矩阵确定概率最大可信事故链和风险最大可信事故链,对存在的事故升级风险进行预警,可有效遏制事件的进一步恶化。基于安全屏障的事故多米诺效应概率分析模型,计算多米诺效应下中国石化舟山石油储库某罐组区储罐  $T_1 \sim T_6$  发生事故概率分别为  $2.31 \times 10^{-5}$ 、 $2.69 \times 10^{-5}$ 、 $2.30 \times 10^{-5}$ 、 $2.31 \times 10^{-5}$ 、 $2.69 \times 10^{-5}$ 、 $2.30 \times 10^{-5}$ ,并可得到该罐区事故后果及风险(表 4、表 5)。

表 4 中国石化舟山石油储库某罐组区事故扩展伤害区域计算结果表

Table 4 Calculation results of extended accident damage area in a tank farm of SINOPEC Zhoushan petroleum storage depot

伤害区域	区域半径/m	事故后果严重度
死亡区	97.162	0.50
重伤区	107.785	0.15
轻伤区	111.620	0.15

表 5 多米诺效应下中国石化舟山石油储库某罐组区各储罐事故风险计算结果表

Table 5 Calculation results of accident risk of each tank in a farm of SINOPEC Zhoushan petroleum storage depot

储罐编号	事故风险概率		
	死亡区	重伤区	轻伤区
$T_1$	$1.16 \times 10^{-5}$	$3.47 \times 10^{-6}$	$1.16 \times 10^{-6}$
$T_2$	$1.35 \times 10^{-5}$	$4.04 \times 10^{-6}$	$1.35 \times 10^{-6}$
$T_3$	$1.15 \times 10^{-5}$	$3.45 \times 10^{-6}$	$1.15 \times 10^{-6}$
$T_4$	$1.16 \times 10^{-5}$	$3.47 \times 10^{-6}$	$1.16 \times 10^{-6}$
$T_5$	$1.35 \times 10^{-5}$	$4.04 \times 10^{-6}$	$1.35 \times 10^{-6}$
$T_6$	$1.15 \times 10^{-5}$	$3.45 \times 10^{-6}$	$1.15 \times 10^{-6}$

2.4 应急决策支持

根据中国石化舟山石油储库所属辖区应急救援单位、应急救援物资等基础信息,结合上述风险评估结果,建立舟山储库应急决策支持系统,可实现应急资源分布查询、应急物资调度、最优路由分析等功能。通过选择油库事故点位置、所需应急资源,并输入查询范围,即可进行应急资源分布查询,并针对所需的应急资源得到最佳救援路由。以系统预先设计的应急预案文本模板为基础,实现各级各类应急预案的查询和基于图表的统计分析,辅助应急人员掌握全区域各级各类

应急预案及其数量与分布情况,依据事故类型选取最优的应急预案。

无人机平台实现了事故现场画面的远传、火情分析及辅助应急指挥功能。无人机搭载云台 H20 的红外镜头功能对火情进行高温场的检测,结合现场火情检测的效果,可以展示高温浓度场的范围,然后再通过直播链路将测试结果回传到指挥中心,进行事故处理指导,辅助应急人员依据事故的发展情况调整应急处置方案(图 10,颜色越亮的区域代表此处温度越高,红色代表温度最高的区域,紫色区域代表最低的温度)。同时,通过无人机平台对事件现场的管理人员、涉事人员、围观群众发布明确指令,有利于稳定人员情绪,提高疏散效率,避免恶性事件的发生。

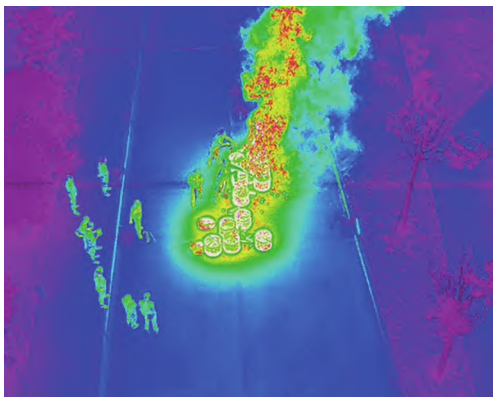


图 10 无人机现场画面远传红外实物图  
Fig. 10 Remote infrared object map of field scene by drone

3 结论

为解决大型石油储库在数据库建设、风险预测与预警、应急决策支持方面存在的问题,保障能源安全并实现“双碳”战略,综合利用全生命周期的数据库、多米诺效应的定量风险评价、大数据的应急决策支持等多项技术,研发了大型石油储库全寿命周期风险管控一体化平台。该系统能够实现大型石油储库在线监测、事故实时预警、事故风险自动化控制等功能的风险防控与决策支持,可为大型石油储库重大事故的预测、应急资源科学调配及管理提供技术支撑。该系统已在中国石化舟山石油储库投产运行,得到了企业运营单位的一致好评,有利于保障中国石化舟山石油储库安全平稳运行。实践证明,新建系统具有以下优点:

(1)建立了大型石油储库全生命周期数据库,打通了从规划、建设、运行、维护到报废的全生命周期链条,对储库资产不同业务环节的数据进行有机整合,满足

了储库资产全生命周期管理、风险管理、运营管理的相关需求,可最大化地实现各环节数据的业务价值。

(2)开发了基于多米诺效应的石油储库定量风险评价子系统,准确量化了大型石油储库各储罐发生的事故概率、后果及风险,解决了大型原油罐区安全隐患多米诺效应预测评估及防范的难题,极大程度上提升了大型石油储库的安全性。

(3)开发了基于大数据的石油储库应急决策支持子系统、基于新建石油储库应急救援路线优化模型与应急无人机平台,有效提升了储库应急智能化水平,为应急资源配置和事故防控提供了参考,解决了多源数据下储库应急决策支持难以精准化的问题。

#### 参考文献:

- [1] 董绍华,张行.石油及天然气储备库安全保障技术现状及展望[J]. 油气储运,2018,37(3):241-247. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2018.03.001.  
DONG S H, ZHANG H. Development status and prospect of safety insurance technologies for oil & gas reserves[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(3): 241-247.
- [2] 韩子兴.石油计量技术在储备库精益管理中的运用[J].中国计量,2022(4):78-81,88. DOI: 10.16569/j.cnki.cn11-3720/t.2022.04.048.  
HAN Z X. Application of petroleum measurement technology in lean management of reserves[J]. China Metrology, 2022(4): 78-81, 88.
- [3] 周登极,邢同胜,张麟,马世喜,郭永华.大数据背景下天然气管网数据挖掘与应用[J]. 油气储运,2021,40(3):271-276. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.03.005.  
ZHOU D J, XING T S, ZHANG L, MA S X, GUO Y H. Data mining and its application in natural gas pipeline network under the context of big data[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(3): 271-276.
- [4] 张朝,张红旗,包曼.一种基于数据仓库技术修正下的信息融合选线方法[J].山西电力,2021(3):13-15. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0320.2021.03.004.  
ZHANG C, ZHANG H Q, BAO M. Research on a method of information fusion line selection based on data warehouse technology modification[J]. Shanxi Electric Power, 2021(3): 13-15.
- [5] PASMAN H J, ROGERS W J. Risk assessment by means of Bayesian networks: a comparative study of compressed and liquefied H<sub>2</sub> transportation and tank station risks[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(22): 17415-17425. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2012.04.051.
- [6] RATH S, KROL M. Comparative risk assessment for different LNG-storage tank concepts[J]. Chemical Engineering Transactions, 2013, 31: 103-108. DOI: 10.3303/CET1331018.
- [7] 孙旭.浮顶储油罐消防设施的改善[J]. 油气储运,2011,30(3): 236-237. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2011.03.021.  
SUN X. Improvement on fire extinguishment facilities of floating roof oil tank[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2011, 30(3): 236-237.
- [8] BORGHETTI A, COZZANI V, MAZZETTI C, NUCCI C A, PAOLONE M, RENNI E. Monte Carlo based lightning risk assessment in oil plant tank farms[C]. Cagliari: 2010 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP), 2010: 1-7.
- [9] FABBROCINO G, IERVOLINO I, ORLANDO F, SALZANO E. Quantitative risk analysis of oil storage facilities in seismic areas[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 123(1/2/3): 61-69. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2005.04.015.
- [10] KANG J, LIANG W, ZHANG L B, LU Z, LIU D T, YIN W Z, et al. A new risk evaluation method for oil storage tank zones based on the theory of two types of hazards[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 29: 267-276. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.03.007.
- [11] LANDUCCI G, ARGENTI F, TUGNOLI A, COZZANI V. Quantitative assessment of safety barrier performance in the prevention of domino scenarios triggered by fire[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 143: 30-43. DOI: 10.1016/j.res.2015.03.023.
- [12] YUAN Z, KHAKZAD N, KHAN F, AMYOTTE P. Domino effect analysis of dust explosions using Bayesian networks[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2016, 100: 108-116. DOI: 10.1016/j.psep.2016.01.005.
- [13] GRUNT O, BRIŠ R. SPN as a tool for risk modeling of fires in process industries[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 34: 72-81. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.01.024.
- [14] BI H P, SI H. Dynamic risk assessment of oil spill scenario for Three Gorges Reservoir in China based on numerical simulation[J]. Safety Science, 2012, 50(4): 1112-1118. DOI: 10.1016/j.ssci.2011.11.012.
- [15] 范冬丽,王立娟,贾虎军,马松,刘欢.不同管理模式下应急物资储备库应急能力评估[J]. 防灾科技学院学报,2022,24(3): 43-49. DOI: 10.3969/j.issn.1673-8047.2022.03.005.  
FAN D L, WANG L J, JIA H J, MA S, LIU H. Evaluation of



- the emergency capacity of emergency material storehouses under different management modes[J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2022, 24(3): 43-49.
- [16] HOU L, WU X G, WU Z, WU S Z. Pattern identification and risk prediction of domino effect based on data mining methods for accidents occurred in the tank farm[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 193: 106646. DOI: 10.1016/j.ress.2019.106646.
- [17] 李庆, 马聪, 叶可仲. 基于全生命周期数据库的可视化平台在储备库管理中的探索与实践[J]. 当代化工研究, 2020(24): 170-172. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8114.2020.24.082.
- LI Q, MA C, YE K Z. Exploration and practice of visualization platform based on life cycle database in reserve library[J]. Modern Chemical Research, 2020(24): 170-172.
- [18] 吴守志, 侯磊, 伍星光, 刘芳媛. 安全屏障对储油罐区池火灾多米诺效应概率的影响[J]. 油气储运, 2022, 41(2): 165-176. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.02.006.
- WU S Z, HOU L, WU X G, LIU F Y. Influence of safety barriers on probability of domino effect triggered by pool fire in tank farm[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(2): 165-176.
- [19] 杨国梁, 多英全, 王振华, 师立晨, 朱天玲. 大型原油储罐火灾多米诺效应概率计算模型及应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(8): 130-134. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2013.08.024.
- YANG G L, DUO Y Q, WANG Z H, SHI L C, ZHU T L. Study on fire domino effect probability of large crude oil storage tanks[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(8): 130-134.
- [20] 侯磊, 吴守志, 刘芳媛, 伍星光. 油库池火灾多米诺效应定量分析方法及优选[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(5): 122-130. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5005.2020.05.015.
- HOU L, WU S Z, LIU F Y, WU X G. Quantitative analysis methods and optimization of domino effect triggered by pool fire in tank farms[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2020, 44(5): 122-130.
- [21] 许学瑞, 帅健, 吴宗之. 大型原油库火灾定量风险评价[J]. 油气储运, 2015, 34(5): 482-487. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2015.05.005.
- XU X R, SHUAI J, WU Z Z. Quantitative risk assessment for fire hazards in large-scale crude oil tankfarms[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(5): 482-487.
- [22] 孔林, 张国富, 苏兆品, 蒋建国. 基于改进蚁群算法的救护车应急救援路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(13): 153-159. DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.1702-0215.
- KONG L, ZHANG G F, SU Z P, JIANG J G. Ambulance emergency rescue routing planning for improved ant colony algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(13): 153-159.
- [23] 宇德明, 冯长根, 曾庆轩, 郭薪亚. 热辐射的破坏准则和池火灾的破坏半径[J]. 中国安全科学学报, 1996, 6(2): 5-10. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.1996.02.002.
- YU D M, FENG C G, ZENG Q X, GUO X Y. Thermal radiation damage criteria and pool fire damage radius[J]. China Safety Science Journal, 1996, 6(2): 5-10.
- [24] 王付宇, 王涛, 叶春明. 突发灾害事件情景下应急救援车辆调度问题综述[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(10): 2887-2891. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3695.2017.10.002.
- WANG F Y, WANG T, YE C M. Review of emergency rescue vehicle scheduling problem under sudden disaster[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(10): 2887-2891.
- [25] 朱莉, 顾珺, 马铮, 徐逸水. 面向受灾差异的跨区域应急救援路径优化[J]. 控制与决策, 2017, 32(5): 879-884. DOI: 10.13195/j.kzyj.2016.0157.
- ZHU L, GU J, MA Z, XU Y S. Routing optimization of cross-regional emergency rescue considering differentiated disaster impacts[J]. Control and Decision, 2017, 32(5): 879-884.
- [26] 石晓达, 孙连英, 葛娜, 赵平, 李子元. 应急资源配送中 Dijkstra 改进算法的研究[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2018, 32(2): 61-66. DOI: 10.16255/j.cnki.lxbz.2018.02.011.
- SHI X D, SUN L Y, GE N, ZHAO P, LI Z Y. Research on the improved algorithm of Dijkstra in emergency resource distribution[J]. Journal of Beijing Union University (Natural Sciences), 2018, 32(2): 61-66.
- (收稿日期: 2023-01-30; 修回日期: 2023-02-24; 编辑: 李在蓉)
- 
- 基金项目:** 国家重点研发计划资助项目“国家石油天然气储库安全保障技术与装备研发”, 2017YFC0805800。
- 作者简介:** 朱喜平, 男, 1974 年生, 高级工程师, 2013 年博士毕业于中国石油大学(北京)安全技术与工程专业, 现主要从事储气库安全管理相关研究工作。地址: 北京市朝阳区东土城路 5 号, 100028。电话: 010-87981867。Email: zhuxp@pipechina.com.cn

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

