



DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2024.12.24.02

文章编号: 1674-5086(2025)03-0145-11

中图分类号: TE88

文献标志码: A

基于云台式激光甲烷检测仪的天然气泄漏溯源定位模型开发与评估

陈学忠*

中国石油西南油气田公司输气管理处, 四川 成都 610000

摘要: 天然气站场突发气体泄漏事故的应急响应高度依赖于泄漏位置与泄漏量等关键信息获取的准确性。当前, 多数天然气站场已配备云台式激光甲烷检测仪, 该设备具备感知微小泄漏的能力, 但由于缺乏配套气云循迹与搜索算法, 无法实现对泄漏源的自主搜寻。为解决这一问题, 研究建立了全局式泄漏源搜索模型(GSRC)和球形泄漏源搜索模型(SSRC), 并分别通过数值模拟和现场试验评估其有效性和优缺点。结果表明, 基于实时气云浓度和搜索算法建立的GSRC和SSRC两种泄漏源搜索模型, 赋予了云台式激光甲烷检测仪对泄漏的自动搜寻和定位功能, 同时对影响因素的深入分析, 确定了模型的基本参数值; 建立了西部典型站场全尺度CFD泄漏扩散模型, 模拟发现SSRC模型具有最小的搜寻路径长度和平均搜寻时间, 即最高的搜寻效率; 将SSRC模型内嵌至云台式激光甲烷检测仪的工控平台后, 现场试验数据显示, 在10~60 m³/h泄漏速率条件下, 86%的泄漏事件可在4 min内完成定位, 且44%定位误差不超过2 m, 72%定位误差不超过4 m。该泄漏源搜寻模型可大幅提高搜寻精度, 为应急抢险和恢复提供技术支持。

关键词: 天然气站场; 泄漏溯源; 计算流体力学; 全局式泄漏源搜索模型; 球形泄漏源搜索模型

The Development and Evaluation of Leakage Source Localization Model in Natural Gas Stations Based on TDLAS Methane Detector

CHEN Xuezhong*

Gas Transmission & Management Department, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610000, China

Abstract: In the operation of natural gas stations, emergency response to sudden gas leakage accidents highly depends on the accurate acquisition of critical information such as leakage location and volume. Currently, most natural gas stations are equipped with TDLAS methane detectors capable of sensing minor leaks. However, due to the absence of integrated gas plume tracking and search algorithms, autonomous leakage source identification remains unachievable. To address this issue, this study established a global source model based on real-time concentration (GSRC) and a spherical source model based on real-time concentration (SSRC), with their effectiveness and advantages evaluated through numerical simulations and field tests. The results demonstrate that the GSRC and SSRC models, based on real-time gas plume concentration and search algorithms, enable cloud-based laser methane detectors to autonomously search and locate leaks. Furthermore, key model parameters were determined through in-depth analysis of influencing factors. Meanwhile, a full-scale CFD leakage dispersion model was developed for a natural gas station in western China, and the simulation found that the SSRC model has the smallest search path length and average search time, and the highest search efficiency. Field tests conducted after embedding the SSRC model into the detector's industrial control platform revealed that 86% of leakage incidents (within 10~60 m³/h leakage rates) could be located within 4 min, with positioning errors ≤ 2 m in 44% of cases and ≤ 4 m in 72% of cases. The developed leakage source search models significantly enhance localization accuracy, providing critical technical support for emergency response and recovery operations.

Keywords: natural gas station; leakage source localization; computational fluid dynamics; global leak source release concentration model; spherical source release concentration model

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20250612.1331.002.html>

陈学忠. 基于云台式激光甲烷检测仪的天然气泄漏溯源定位模型开发与评估[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2025, 47(3): 145-155.

CHEN Xuezhong. The Development and Evaluation of Leakage Source Localization Model in Natural Gas Stations Based on TDLAS Methane Detector[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2025, 47(3): 145-155.

* 收稿日期: 2024-12-24 网络出版时间: 2025-06-12

通信作者: 陈学忠, E-mail: cxzhong@petrochina.com.cn

引言

天然气泄漏监测作为保障安全生产的关键举措,可有效防范火灾爆炸等重大事故的发生。这不仅是维护天然气站场安全运营的最有效手段,且在“碳达峰碳中和”目标引领下,也对精准管控环保排放具有极为重要的意义^[1-3]。在应对突发天然气泄漏事件时,后续应急预案的启动、事态的有效控制以及应急响应的高效实施,高度依赖于前期对泄漏位置、泄漏量等关键信息的精准掌握,此过程即天然气泄漏的定位溯源^[4-6]。当天然气管道压力高、泄漏量大时,由于压降造成刺耳啸叫,在站员工不需要任何辅助手段,直接根据声源即可确定泄漏点^[7]。但微小泄漏难以仅根据声源监测,需要采取一定的辅助措施以准确定位。当前泄漏监测手段不断提升,已经能够实现大范围空间内微量甲烷气体(cm^3/m^3 量级)的泄漏感知,如法兰垫片或螺纹连接造成的微小泄漏^[8-10]。然而,由于天然气无色无味,加上大气风场扰动,无疑更增加了泄漏点确定的随机性和复杂性。随着信息与数字化改造的推进,无人值守站建设逐步铺开。在此情形下,亟需依据泄漏监测所产生的报警数据,远程对泄漏状况展开精准判断与评估,从而助力应急抢险队伍迅速拟定事态控制及恢复方案。因此,面对突发天然气泄漏事件,在有限报警数据信息支撑下,如何在最短时间内实时准确地定位泄漏源已经成为应急抢险

中亟待解决的关键问题。

随着技术不断进步,多种泄漏源定位技术相继被开发和应用,包括机器人、超声波以及气体传感器等^[11-15]。机器人定位技术依赖其移动能力和搭载的气体传感器,通过感知气体浓度变化追踪泄漏源^[16-17]。超声波定位技术则利用泄漏气体发出的超声波,通过分析不同位置接收到的声波信号确定泄漏源位置,其原理包括信号到达时间、到达时间差以及能量衰减等^[18]。气体传感器定位技术的本质是泄漏反演,传感器作用仅仅是泄漏气体的浓度感知,其关键在于泄漏气体浓度的时序数据,结合当时的风向风速,通过蒙特卡洛或最优化方法反演泄漏点的位置和泄漏量^[19-20]。这种方法分为静态式和移动式两种,静态式是在待监测区域安装多个气体检测仪,通过不同检测仪测量的数据进行反演计算。而移动式定位则是利用各类移动平台携带传感器追踪气体羽流,通过获取在移动过程中的气云浓度进行反演计算。应用云台式激光甲烷气体检测仪进行泄漏源自搜索属于移动式气体传感器定位方法中的一种。云台与检测仪的结合实现了场站内各监测点的扫描巡检功能(图1),但目前仍旧是固定路径巡检+报警录像的工作模式^[21-23],其信息对排查现场泄漏点的帮助非常有限。由于缺少配套气云循迹和搜索算法,难以借助云台式激光甲烷检测仪的自主扫描巡检特性完成泄漏源定位搜索以及泄漏量评估工作。

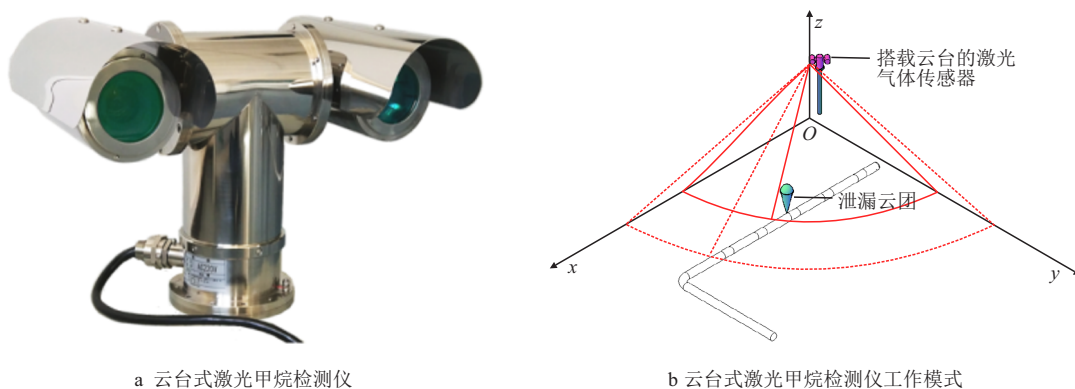


图1 云台式激光甲烷检测仪及其工作模式

Fig. 1 Pan-tilt laser methane detector and its operation modes

为此,开发了全局式泄漏源搜索(Global Leak Source Release Concentration, GSRC)模型和球形泄漏源搜索(Spherical Source Release Concentration model, SSRC)模型,并以西部某天然气站场为例建

立了全尺寸泄漏扩散计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模型,通过虚拟泄漏场景的浓度数据验证模型的有效性,对比其泄漏搜索路径、定位精度以及效率,更进一步将优选的模型内嵌至

工控软件平台上进行现场试验, 以提高在真实泄漏条件下的泄漏搜寻精度和效率。

1 模型与方法

通过云台式激光甲烷气体检测仪实施周期性扫描, 获取不同时刻不同泄漏区域的浓度, 并基于传感器浓度进行泄漏搜索定位。所以构建基于云台式激光甲烷检测仪的泄漏定位模型必须基于一个大前提条件: 即所有的潜在泄漏点都在检测仪的感知范围以内, 对于由于光路遮挡或超过探测仪有效光路半径(通常 <100 m)的潜在泄漏点无法定位。由于此类检测仪属于开路式线型光束可燃气体探测器, 其测量的是甲烷体积分数沿光路长度的积分值, 加之检测仪可感知体积分数为 cm^3/m^3 量级的痕量甲烷气云。根据行业惯例, 云台式激光甲烷气体检测仪测量的积分浓度单位统一表示为 $\text{cm}^3 \cdot \text{m}/\text{m}^3$ 。

其构建的泄漏源搜索模型包括基于实时浓度数据的 GSRC 和 SSRC 模型。

1.1 基于实时浓度数据的 GSRC 模型

当泄漏达到稳态时, 意味着泄漏源所释放的气体已经与周围环境达到了一个动态平衡, 此时监测点的浓度数据将保持相对稳定^[24-25]。本研究采用贪婪算法来确定监测点的最短扫描路径。该算法通过全局遍历监测点, 利用激光云台检测仪沿此路径扫描, 从而快速定位到高浓度区域。在此过程中, 重点关注报警时刻各监测点的浓度值, 对这些数据展开比较与分析, 以找出浓度最高的点。距离此浓度最近的泄漏源就是真实泄漏源最可能的所在位置。GSRC 模型见式(1)~式(3), 以报警点 n 为起点, 利用贪婪算法遍历整个工艺区的 m 个监测点位, 寻找距离最近的监测点 t , 比较两个点位的浓度值 C_n 和 C_t , 并存储浓度较大的点位坐标和浓度值。进一步地, 继续以该点为起点搜寻下一个点位, 循环迭代, 直到不重复、无遗漏遍历完该场景下所有监测点位并形成一条完整路径, 具体流程见图 2。

$$D_{\text{dis}(n,k)} = \sqrt{(x_n - x_k)^2 + (y_n - y_k)^2} \quad (1)$$

$$D'_{\text{dis}(n,t)} = \min \{D_{\text{dis}(n,k)}\}, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$C = \max \{C_n, C_t\} \quad (3)$$

式中: $D_{\text{dis}(n,k)}$ —监测点 n 和监测点 k 的距离, m;

$D'_{\text{dis}(n,t)}$ —监测点 n 和最近的监测点 t 的距离, m;

x, y —点位坐标, m;

m —总监测点数, 个;

C —监测点位的积分浓度, $\text{cm}^3 \cdot \text{m}/\text{m}^3$;

min—求集合中的最大值函数;

max—求集合中的最小值函数;

下标 n, k —监测点号。

值得注意的是, 在基于实时浓度数据的模型中, 数据提取并非局限于单一时刻, 而是形成了一个时间上的浓度数据序列。相较于单一时刻数据, 此序列包含更丰富、详尽的信息, 能够为泄漏源搜索提供更为准确的依据。在动态场景下, 这种数据采集方法尤为重要, 因其可捕捉到由于风向、风速和其他环境因素变化导致的浓度波动, 在达到稳态之前, 这些波动往往非常显著^[26]。实时浓度数据提取时, 以报警点为起始, 每隔 16 个时间步(时间步长 0.5 s)依次提取路径上监测点位的浓度值, 直到完成所有点位的数据提取。随后, 对各点位 16 个浓度数据进行数值比较, 得到浓度最大值以及该值所在监测点位, 距离该点最近的坐标即为该场景下的实际泄漏源。

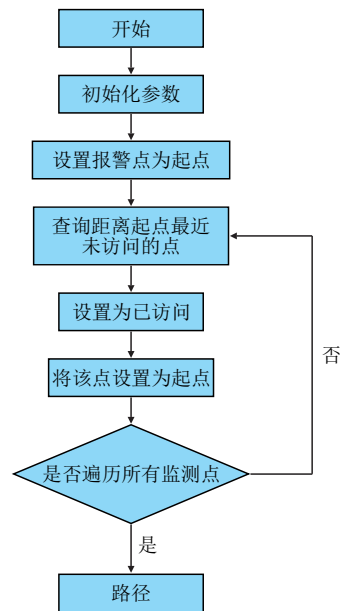
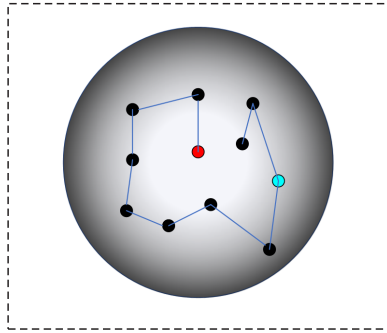


图 2 GSRC 搜索算法流程图
Fig. 2 GSRC search algorithm flowchart

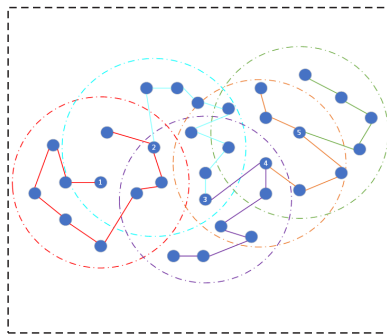
1.2 基于实时浓度数据的 SSRC 模型

球形搜索算法通常是指在多维空间中, 根据给定的中心点和半径, 搜索在这个球内或球面上的点的算法, 其基本原理如图 3 所示^[27]。其中, 图 3a 展

示了单个球内搜索的路径图,其中,红色点代表初始球心,蓝色点代表新球心,完整的球形模型原理如图 3b 所示。SSRC 模型计算公式与 GSRC 模型类似,唯一不同的是 SSRC 模型先将搜寻区域局限于一个圆形区域[式(4)],在该区域内依次搜寻距离最小的点,并比较其浓度。



a 三维球内路径搜索图



b 二维球搜索路径图

图 3 球形模型算法

Fig. 3 Spherical model algorithm

$$D_{dis(n,k)} \leq r \tag{4}$$

式中: r —搜索球形的半径, m 。

当完成一轮搜索后,确定该轮中浓度最大的点及位置坐标。随后,以该点为中心,重新划定圆形区域,再次遍历搜寻以比较浓度。最后,当搜寻的浓度最大点始终位于圆心位置时,表示该点即为区域内浓度最大的点,此时搜寻完毕。

假设云台在巡检过程中发生泄漏警报且报警点为监测点 1,则监测点 1 作为搜索的起始点,以 1 为初始球心,选取特定长度为半径划定首个搜索范围,遍寻球 1 内的其余监测点。各监测点之间采用全连接方式,运用贪婪算法规划出遍历球 1 内所有监测点的最短路径,以红色标识。在此路径遍历过程中,访问每个监测点,自报警开始时,每检测 16 个浓度数据便返回。对比这些数据,取浓度最大值所在监

测点 2 为球 2 的球心,进行下一次球形搜索,搜索路径用蓝色表示。循环迭代,分别得到球 3、球 4、球 5 内的搜索路径。若遍历所有监测点后也无法找到浓度值高于球心监测点 5 的点时,则判定球心检测点 5 为当前浓度值最大的监测点,且泄漏源在其附近,至此完成泄漏源搜索。在整个搜索过程中,为有效控制搜索路径长度,降低时间与计算成本,每个监测点只访问一次并不再返回,最终的路径总距离取决于搜索经过的所有球内监测点。SSRC 模型流程如图 4 所示。

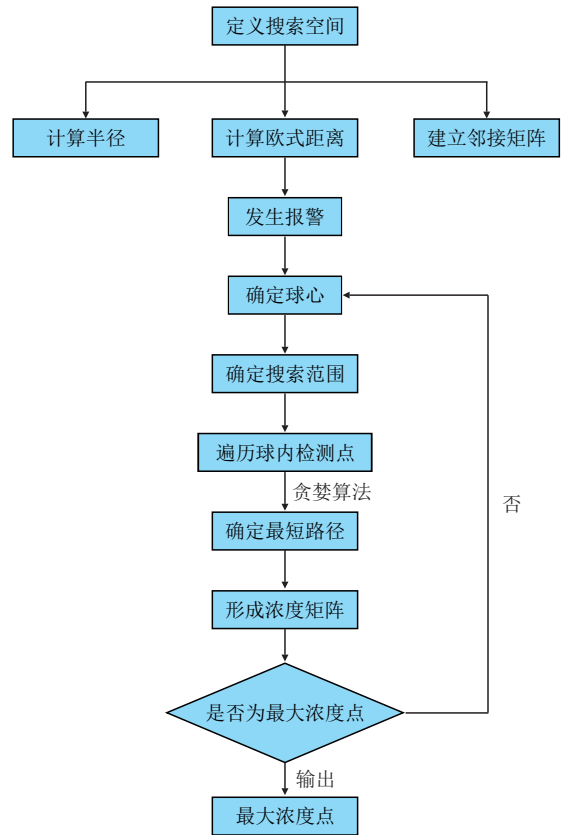


图 4 SSRC 模型流程图

Fig. 4 SSRC model search algorithm flowchart

2 分析与讨论

为了验证上述泄漏定位模型的有效性,首先借助 CFD 模拟天然气站场的泄漏场景,对比泄漏气体浓度分布验证模型的搜寻路径和效率,进一步将优选确定的定位模型内嵌至云台式甲烷泄漏监测系统的工控平台,再次分析模型在现场真实泄漏条件下的效率和精度。

2.1 天然气泄漏扩散 CFD 模拟

依据西部某天然气站场的管道、阀门等设备尺

寸和位置坐标, 构建模型以开展全尺度天然气场站泄漏扩散的 CFD 模拟。

该输配气站航拍图如图 5b 所示, 在模型构建过程中, 重点考量地上工艺管道及设备区域, 同时涵盖办公生活楼与较大规模的绿化树木, 根据航拍图像所构建的输配气站 Mesh 网格如图 5c 所示。所

构建的几何模型与现场管道布局和尺寸相同, 鉴于放空等小尺寸管道对泄漏扩散影响极小, 因此忽略管径小于 50 mm 管道及相关设备。工艺区整体尺寸长 86 m, 宽 120 m, 站内设备最高为 8.2 m。为了使大气风场充分发展, 设定 CFD 计算区域为 270 m×300 m×25 m。



图 5 天然气输配气站及其数值建模的几何模型

Fig. 5 Geometric model of natural gas distribution stations and numerical modeling

基于风险因素分析结果, 确定泄漏点位置坐标和孔径大小, 在相应几何模型的管道坐标上设置泄漏孔, 并对周边网格局部加密处理。计算区域由进气面、出气面、进流面、对称界面构成。风场的入风面定义为速度入口边界条件, 去风面设置为自由流出口边界条件。设定平行于风向的表面为对称界面, 计算域的底部、管道和设备定义为刚性壁面边界条件。模拟过程分成两个步骤: 首先, 使用稳态模拟建立外部风场, 其结果通过用户定义函数导入 Fluent 软件, 以获取风速口速度和湍流参数。随后, 设定泄漏面为质量流入口, 根据标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型计算气体泄漏非稳态扩散过程^[28-31]。瞬态模拟的时间步长设定为 0.5 s, 泄漏时间 300 s。

为了平衡计算成本及计算精度, 首先需要开展网格无关性分析。通过 Gambit 软件中的 Size function 功能设定差异化网格缩放比例, 从而深入剖析 CFD 建模对网格数量的敏感特性。分别设定网格的缩放比例为 1:1.4、1:1.6 和 1:1.8, 再通过 polyhedra 功能转化 3 种网格模型, 转化前后的网格数量如表 1 所示。

以东风风向、风速 0.1 m/s、分离器底部为泄漏源且泄漏速度为 16.7 kg/s 的泄漏场景作为研究对象, 在泄漏孔下游气体扩散分布的区域布置了 12 个监测点, 用于记录各监测点甲烷的扩散浓度, 针对上述 3 种网格数量的 CFD 模型开展甲烷的泄漏扩散模拟。

表 1 网格数量对比图

Tab. 1 Grid quantity comparison diagram

缩放比例	网格数量/个	
	转化前	转化后
1:1.4	7 771 593	1 696 930
1:1.6	6 006 533	1 393 976
1:1.8	4 993 620	1 230 280

图 6 为泄漏 300 s 时 3 种网格数量下监测点处甲烷质量分数的对比。

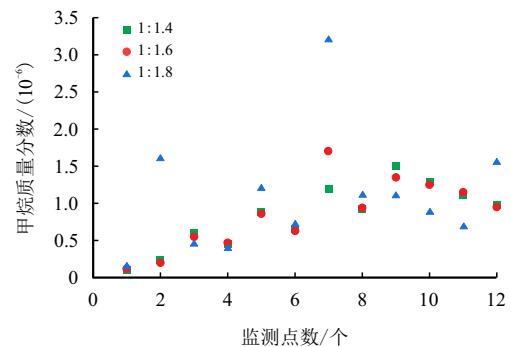


图 6 3 种网格泄漏 300 s 监测点甲烷质量分数对比
Fig. 6 Comparative diagram of CH₄ mass fraction at monitoring points for three grid types during 300 s leakage

由图 6 可见, 1:1.8 网格比与另外两种网格比下得到的模拟浓度值相差较大, 而 1:1.4 与 1:1.6 网格比所得模型在各处监测点浓度基本相同, 因此, 综合考量计算时间成本与预测精度, 后续选取的网格数量为 1 393 976 个。采用相应计算机 [CPU: Intel(R) Core(TM)i9-12900@3.20 GHz, 内存 128 G], 单个泄漏场景模拟所需时间约 14 h。

图 7 为东风风向、风速 0.1 m/s、分离器底部为泄漏源且且泄漏速度为 0.35 kg/s 的工况下,通过定义质量分数等值面(0.01%)所观测到气云的扩散模拟结果图。

由图 7 可见,在泄漏 25 s 内,气体主要朝着风

向下游扩散,由于密度低于空气,气云主要朝着上空运移。扩散 600 s 后,气体扩散已经超过站场围墙边界,在站外 50 m 范围内的低空聚集。

扩散 300 s 后,2.5 m 高度处甲烷质量分数分布如图 8 所示。

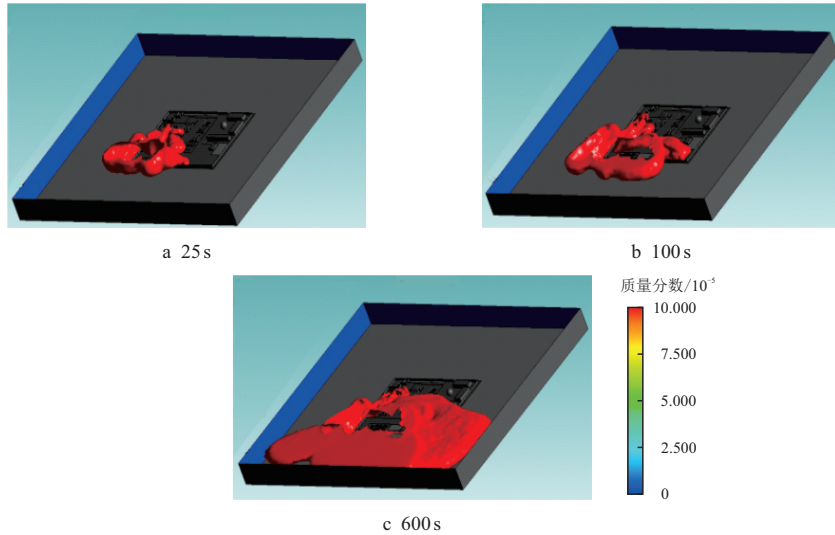


图 7 甲烷扩散模拟图
Fig. 7 Methane diffusion simulation diagram

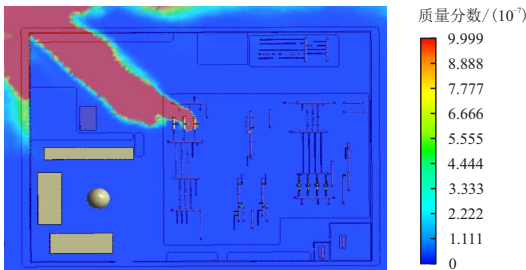


图 8 扩散 300 s 后天然气场站内甲烷质量分数分布
Fig. 8 CH₄ mass fraction distribution of natural gas in station after 300 s diffusion

2.2 搜索模型影响因素评估

搜索模型的性能不仅受大气风向、风速以及泄漏位置等外部因素的显著影响,其搜寻效率亦与模型自身的采样时间及搜索球形的半径 r 等关键参数紧密相关。以下将针对模型内部参数的影响展开深入分析。

1) 采样时间

采样时间定义为检测仪在每个点位检测过程中获得的浓度数据量。由于设备本身采用恒定的频率,因此,采样时间越长,检测仪在该点位的监测停留时间就越久,相应获取的该点位浓度数据量也就越大。图 9 是不同采样时间对搜寻时间的影响。

可以发现,GSRC 模型对采样时间更为敏感。鉴于 GSRC 模型采用全局贪婪搜索,随着采样时间的增加,遍历整个工艺区所需的时间也随之增加。相反,SSRC 模型为局部区域搜寻,其模型的搜寻效率与采样时间确实相关,但由于总体搜寻的点位较少,采样时间的影响并不明显。

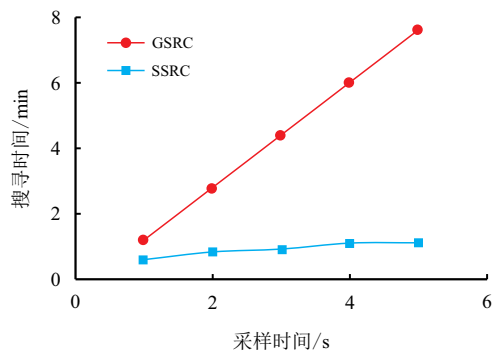


图 9 不同采样时间对搜寻时间的影响
Fig. 9 Influence of different sampling time on search time

图 10 为不同采样时间对定位精度的影响。由于设备的采样频率为 10 Hz,所采集数据量已经足以支撑搜寻目标,因此,随着采样时间增大,其两个模型的定位精度仅在小范围内正常波动。图 10 中,5% 的波动范围主要是由风向风速等外部因素

导致, 可以认定采样时间对定位精度并没有影响。

2) 搜索球形半径

搜索球形半径的大小对于搜寻效果较为重要。假定当球形半径非常大, 甚至一个球形就将站场内所有的潜在泄漏点覆盖, 则此时 SSRC 模型与 GSRC 模型完全一样, 即通过贪婪算法将站内的每一个泄漏点都遍历测量一遍, 无法凸显二者的差异和优劣势。但如果将搜索球形的半径设置非常小(如 0.5~1.0 m), 则会在泄漏气体的某个局部位置反复搜索, 将导致无法搜寻到较远的泄漏点。

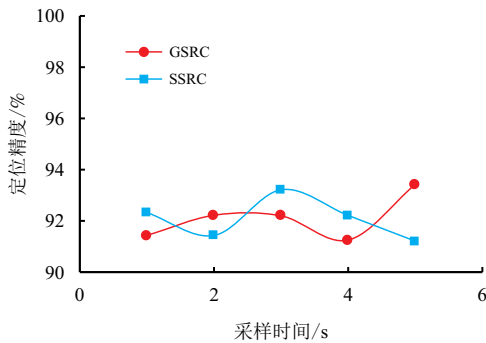


图 10 采样时间对定位精度的影响
Fig. 10 Influence of different sampling time on positioning accuracy

图 11 为不同搜索球形半径对 SSRC 模型搜寻时间和定位精度的影响图。搜寻时间随着搜索球形半径增大而明显提升, 但对于定位精度来说, 1~2 m 搜寻半径下的定位偏差很大, 最大值的误差距离甚至超过 5 m, 此时可以认定搜寻失败。而在 3~5 m

半径范围内搜寻的话, 其定位精度能够维持在较高水平。

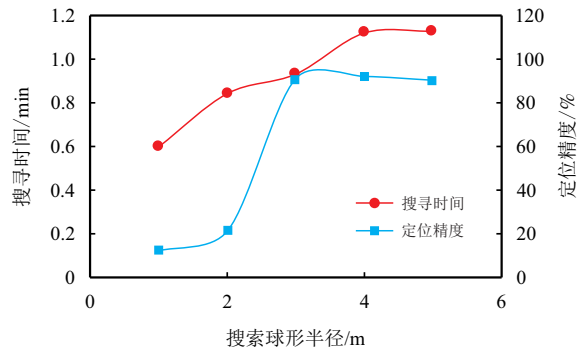


图 11 搜索球形半径对 SSRC 模型搜寻时间和定位精度的影响

Fig. 11 Influenc of spherical region radius on search time and positioning accuracy in SSRC model

结合上述分析, 在综合考量计算效率、定位精度以及模型复杂度等多方面因素后, 设定模型采样时间 1 s、球形搜索区域半径 3 m 是一组较为适宜的模式参数配置。

2.3 搜索模型在虚拟泄漏场景中评估

以风速 0.1 m/s、泄漏速率 0.035 kg/s、泄漏源坐标 (35.41, 55.01, 1.64) 为例, GSRC 模型的搜索路径如图 12a 所示, 该场景检测点位的积分浓度最大为 $5.541 \times 10^5 \text{ cm}^3 \cdot \text{m} / \text{m}^3$, 此极值出现于第 20 个监测点处, 坐标为 (35.40, 54.90, 2.60)。经验证, 距离第 20 个监测点最近的泄漏源坐标为 (35.41, 55.01, 1.64), 符合该场景的真实情况。

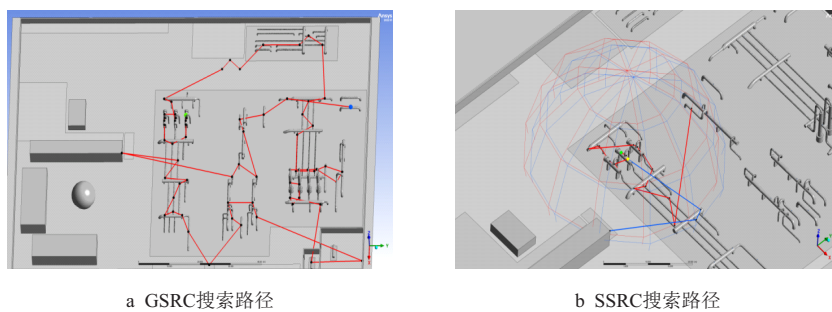


图 12 GSRC、SSRC 模型的泄漏源搜索路径
Fig. 12 Leakage source search paths of GSRC model and SSRC model

SSRC 模型的搜索路径见图 12b, 该场景初始报警点位为监测点 10, 以该点为球心划分球形范围, 采用贪婪算法对范围内的所有监测点进行路径寻优, 得到的最短路径为[10, 14, 19, 15, 8, 9, 13, 5, 2, 1, 16, 18, 20, 21, 28, 31, 23, 41, 61, 24], 路径中浓度最大的点位为监测点 15, 因此, 以该点为球心重新划定巡检范围得到第二条巡检路径为[15, 55, 59, 70], 该路

径中积分浓度最大为 $9.62 \times 10^4 \text{ cm}^3 \cdot \text{m} / \text{m}^3$, 仍位于监测点 15 处, 则该点即为距离泄漏源最近的监测点, 坐标为 (35.40, 51.40, 2.60), 路径总距离为 135.1 m。

为进一步探究 GSRC 与 SSRC 模型的性能表现, 针对多种不同泄漏场景以及泄漏位置, 测试两个模型的定位精度、平均搜寻路径长度和平均搜寻时间, 结果见表 2。

表 2 GSRC、SSRC 模型的测试结果
Tab. 2 Test result of GSRC and SSRC models

搜索模型	定位精度/%	平均搜寻路径长度/m	平均搜寻时间/s
GSRC	91.67	545.2	35
SSRC	93.89	104.5	7

由表 2 可见,两种搜寻模型均展现出较高的定位精度(大于 90%)。在搜寻最大值浓度监测点坐标过程中,GSRC 模型的平均搜寻路径长度为 545.2 m,平均搜寻时间为 35 s;而 SSRC 模型的平均搜寻路径长度仅为 104.5 m,平均搜寻时间为 7 s。因此,认定两个模型在不同场景下基本都能实现泄漏定位功能,而 SSRC 模型凭借其在局部搜索方面具有的搜寻路径最短这一优势,可大幅缩短搜索时间,有效提升应急响应效率,为实际应用场景中的泄漏应急处置提供更为高效的解决方案。

2.4 搜索模型的现场试验

以上虚拟泄漏场景的模型评估表明,两个泄漏搜寻模型均可确定泄漏方位,但 SSRC 模型的搜寻效率更高,因此,将该模型内嵌至云台式激光甲烷监测系统中,旨在完善自动搜寻和定位功能。现场试验选择在与数值模拟条件一致的天然气站场内开展,如图 13 所示,云台式激光甲烷检测仪安装在值班室房顶,以便获取更为全面的监测视角。在站场工艺区内选取 4 个与检测仪相距 15~100 m 的位置作为测试点,在选定测试点位置拆装压力表考克,将气体流量计接入管道,以此精确控制气体的泄放速率。同时,在各泄放点处放置风向风速计,用于实时记录测试期间的大气风向与风速。

在现场泄放测试中,针对不同泄漏位置、泄漏速率(10~60 m³/h)开展泄漏搜寻试验,结果见图 14。

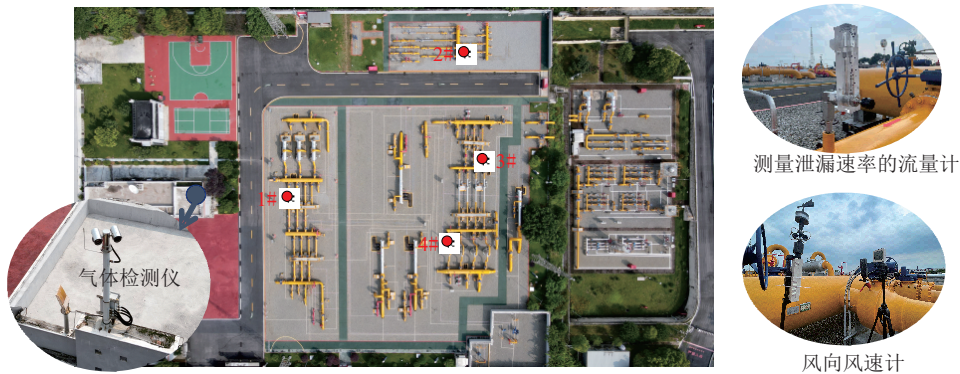


图 13 现场测试中云台式激光甲烷检测仪的位置及其甲烷泄放点的位置
Fig. 13 Locations of the pan-tilt laser methane detector and methane release point in field tests

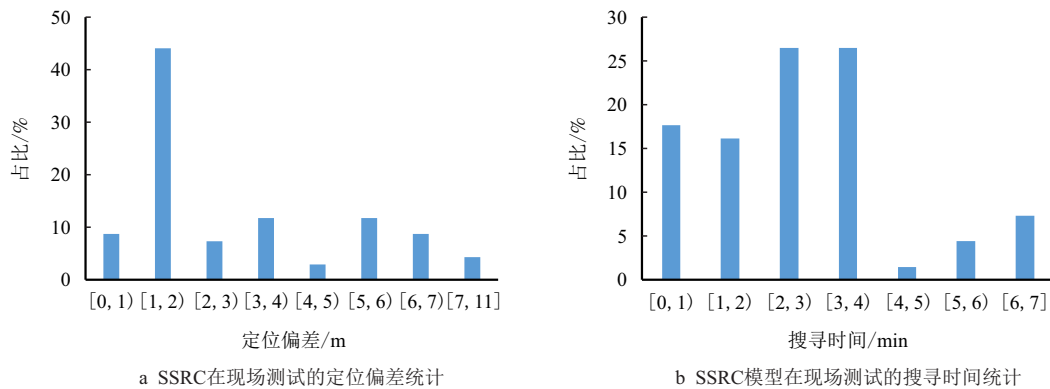


图 14 SSRC 现场测试结果
Fig. 14 Result of SSRC field testing

在测试条件下,大多数泄漏都可被搜寻出,如果将定位偏差小于 4 m 界定为定位成功,则测试组数中的 72% 实现了成功定位,且其中 44% 的搜寻结果定位精度达到了 2 m 以内。但 100% 定位精

度(偏差小于 1 m)的测试组数占比较少,仅占总测试量的 8.8%,究其原因在于现场始终存在不稳定的风场扰动,导致其扩散气云并不连续,另外一个原因在于搜寻球形的半径设置为 3 m,一些区域的泄

漏点间隔较远(>3 m), 导致定位失败。

此外, 在搜寻时间的指标评估中发现, 86% 泄漏测试在 4 min 内就完成了泄漏源的搜寻。综合定位偏差评估, 可认为本研究提出的泄漏搜寻模型不仅实现了泄漏源的自动搜寻和定位功能, 且在定位精度和搜寻速度方面表现卓越, 相较当前凭借人员现场确认复核的方式大幅提高了站场安全管理水平。

3 结 论

1) 针对天然气站场泄漏源快速定位问题, 本研究分别基于全局贪婪算法和局部球形搜索算法建立了 GSRC 和 SSRC 两种泄漏源搜索模型, 充分利用云台式激光甲烷检测仪的高灵敏度以及扫描巡检的工作模式, 通过感知的气云浓度数据实现对泄漏的自动搜寻和定位。其中模型参数采样时间设定为 1 s, 搜索球形半径为 3 m。

2) 以西部某天然气站场为例, 建立了全尺度天然气场站泄漏扩散 CFD 模拟。借助虚拟泄漏场景得到的浓度数据, 验证评估 GSRC、SSRC 模型对泄漏源的搜索路径和特点, 发现 SSRC 的平均搜寻路径长度和平均搜寻时间均最小, 搜寻效率最高。

3) 将 SSRC 模型内嵌至云台式激光甲烷检测仪的工控平台开展现场试验。结果表明, 在 10~60 m³/h 泄漏速率时, 86% 泄漏可以在 4 min 内完成搜寻, 其中 44% 搜寻结果的定位精度在 2 m 以内, 72% 搜寻结果的定位精度在 4 m 以内。

参考文献

- [1] 王磊. 石化装置有害气体泄漏检测优化研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
WANG Lei. Research on optimization of hazardous gas leakage detection in petrochemical plants[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [2] PALTRINIERI A, TUGNOLI A, BUSTON J, et al. Dynamic procedure for atypical scenarios identification (DYPASI): A new systematic hazard tool[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26: 683–695. doi: 10.1016/j.jlp.2013.01.006
- [3] 章博, 辛倩倩, 贾双明. 高硫原油加工装置气体检测报警仪布置优化技术方案[C]. 上海: 2012 年环境污染与大众健康学术会议, 2012.
ZHANG Bo, XIN Qianqian, JIA Shuangming. Optimization of gas detection and alarm instrument networks in high sulfide crude oil process installations: Overall technical scheme[C]. Shanghai: 2012 International Conference on Environmental Pollution and Public Health, 2012.
- [4] 穆青. 石化企业气体探测器设置确定性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
MU Qing. Conclusive research on gas detector setting in petrochemical enterprises[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- [5] 王海清, 王玉秀, 宋贤生, 等. 基于 GA 算法的火气系统探测器布局优化研究[C]. 青岛: 第四届 CCPS 中国过程安全会议, 2016.
WANG Haiqing, WANG Yuxiu, SONG Xiansheng, et al. Detector location optimization for fire and gas system based on genetic algorithm[C]. Qingdao: The 4th CCPS China Process Safety Conference, 2016.
- [6] 朱远星. 高含硫天然气净化厂气体检测仪优化设置方法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
ZHU Yuanxing. Study on optimization method of gas detector arrangement in high-sulfur natural gas purification plant[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [7] 贾艳. 基于风险及收益的炼油装置气体探测器优化布置研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
JIA Yan. Optimal gas detectors placement of oil refining unit based on risk and benefit[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [8] GOMES E G, MEDRONHO R D A, ALVES J V B. Gas detector placement in petroleum process unit using computational fluid dynamics[J]. International Journal of Modeling & Simulation for the Petroleum Industry, 2014, 8: 125–131.
- [9] BENAVIDES-SERRANO A J, MANNAN M S, LAIRD C D. A quantitative assessment on the placement practices of gas detectors in the process industries[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 35: 339–351. doi: 10.1016/j.jlp.2014.09.010
- [10] ZHOU Cancan, ZHANG Bo, QIAO Shen, et al. A stochastic programming approach for the optimization of gas detector placement in offshore platforms[J]. Ocean Engineering, 2019, 187: 106223. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106223
- [11] GANESAN S N, MARSZAL E. Performance-based gas detection system design for hydrocarbon storage tank sys-

- tems[C]. Delhi: Oil & Gas Industry Conclave, 2014.
- [12] 王玉秀. 天然气生产碳氢处理工艺可燃气体探测器优化布置研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
WANG Yuxiu. Research on optimized layout of flammable gas detectors of hydrocarbon process in gas production process[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [13] YANG Dongdong, CHEN Guoming, DAI Ziliang. Accident modeling of toxic gas-containing flammable gas release and explosion on an offshore platform[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 65: 104118. doi: 10.1016/j.jlp.2020.104118
- [14] 尹恒, 邹庆, 廖柯熹, 等. 天然气管道站场泄漏扩散三维动态研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(2): 135–147. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2021.06.30.02
YIN Heng, ZOU Qing, LIAO Kexi, et al. Three-dimensional dynamic study on leakage and diffusion of natural gas pipeline station[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2022, 44(2): 135–147. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2021.06-30.02
- [15] WANG Jijun, YU Xiaoyang, ZONG Ruowen. A dynamic approach for evaluating the consequences of toxic gas dispersion in the chemical plants using CFD and evacuation modelling[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 65: 104156. doi: 10.1016/j.jlp.2020.104156
- [16] 安建川. 输气管道泄漏模型不确定性因素敏感性分析[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(1): 149–156. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2020.06.29.03
AN Jianchuan. Sensitivity analysis for uncertain factors of gas pipeline leakage model[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2020, 43(1): 149–156. doi: 10.11885/j.issn.1674-5086.2020.06-29.03
- [17] 朱愚, 杨圆鉴, 黄杰, 等. 含硫天然气站场泄漏事故应急疏散路径规划研究[J]. *石化技术*, 2021, 28(3): 95–97. doi: 10.3969/j.issn.1006-0235.2021.03.044
ZHU Yu, YANG Yuanjian, HUANG Jie, et al. Study on emergency evacuation route planning for sulfur-containing natural gas station leakage accident[J]. *Petrochemical Technology*, 2021, 28(3): 95–97. doi: 10.3969/j.issn.1006-0235.2021.03.044
- [18] 严密, 袁晓骏, 管文涌. 露天站场天然气泄漏激光监测系统的设计及应用[J]. *油气储运*, 2021, 40(6): 685–691. doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.06.012
YAN Mi, YUAN Xiaojun, GUAN Wenyong. Design and application of laser gas leakage monitoring system at gas station[J]. *Oil and Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(6): 685–691. doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.06-012
- [19] 章博, 王磊, 王志刚. 炼油装置有害气体泄漏区域风险等级划分[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(5): 144–149. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2015.05.020
ZHANG Bo, WANG Lei, WANG Zhigang. Area risk level classification for hazardous gas release in petroleum refining installations[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(5): 144–149. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2015.05.020
- [20] KIDAM K, HURME M. Analysis of equipment failures as contributors to chemical process accidents[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2013, 91: 61–78. doi: 10.1016/j.psep.2012.02.001
- [21] KEREN N, ANAND S, MANNAN M S. Calibrate failure-based risk assessments to take into account the type of chemical processed in equipment[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19: 714–718. doi: 10.1016/j.jlp.2006.05.005
- [22] HU Si, JI Hong, ZENG Xiaohong. Quantitative risk assessment model of hazardous chemicals leakage and application[J]. *Safety Science*, 2012, 50: 1452–1461. doi: 10.1016/j.ssci.2012.01.011
- [23] 章博, 陈国明, 龚金海, 等. 基于计算流体力学的集气站气体检测报警仪布置优化[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2010, 34(5): 141–146. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2010.05.026
ZHANG Bo, CHEN Guoming, GONG Jinhai, et al. Optimization of gas detection and alarm instrument networks at gas gathering station based on CFD[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2010, 34(5): 141–146. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2010.05.026
- [24] 章博, 王志刚, 王彦富, 等. 基于场景集的危险气体检测报警仪选址方法[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(6): 156–162. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2016.06.020
ZHANG Bo, WANG Zhigang, WANG Yanfu, et al. An approach to placement optimization of gas detectors based

- on leakage scenario set[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(6): 156–162. doi: 10.3969/j.issn.1673-5005.2016.06.020
- [25] 章博, 王志刚, 王彦富. 高硫炼油装置硫化氢泄漏场景集定量分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(10): 73–78. doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2015.10.013
- ZHANG Bo, WANG Zhigang, WANG Yanfu. Quantitative analysis on scenario set of hydrogen sulfide leakage for high-sulfur oil refinery installations[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(10): 73–78. doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2015.10.013
- [26] 王海清, 王玉秀, 宋贤生, 等. 采用遗传算法优化气体探测器布局策略研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(9): 86–91. doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2016.09.016
- WANG Haiqing, WANG Yuxiu, SONG Xiansheng, et al. Study on layout optimization strategy of gas detectors using genetic algorithm[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(9): 86–91. doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2016.09.016
- [27] 尚胜美, 王海清, 刘俊芳. FPSO 火灾气体探测器的优化布置研究[J]. 石油与天然气化工, 2013, 42(3): 311–315. doi: 10.3969/j.issn.1007-3426.2013.03.024
- SHANG Shengmei, WANG Haiqing, LIU Junfang. Study on optimized layout of fire and gas detectors in FPSO[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2013, 42(3): 311–315. doi: 10.3969/j.issn.1007-3426.2013.03.024
- [28] 尚胜美. FPSO 火焰探测器的优化布置研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- SHANG Shengmei. Research on layout optimization of flame detectors in FPSO[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [29] 赵日彬. 考虑可靠性的气体探测器多目标布置优化方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- ZHAO Ribin. Study on multi-objective optimization method of gas detectors placement considering reliability[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [30] 章博, 赵日彬. 失效情景下气体探测器多目标布置优化[J]. 化工进展, 2018, 37(3): 867–874. doi: 10.16085/j.issn.1000-6613.2017-1122
- ZHANG Bo, ZHAO Ribin. Multi-objective optimization for placement of gas detectors considering failure scenario[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(3): 867–874. doi: 10.16085/j.issn.1000-6613-2017-1122
- [31] 王旭, 廖柯熹, 彭善碧, 等. 罐区可燃气体探测器优化设置研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(10): 2809–2813. doi: 10.3969/j.issn.1671-3206.2021.10.039
- WANG Xu, LIAO Kexi, PENG Shanbi, et al. Review on the optimal setting of combustible gas detector in tank farm[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(10): 2809–2813. doi: 10.3969/j.issn.1671-3206.2021.10.039

作者简介



陈学忠, 1968年生, 男, 汉族, 重庆忠县人, 高级工程师, 主要从事常规气、页岩气勘探开发和安全生产等方面的管理工作。E-mail: cxzhong@petrochina.com.cn

编辑: 王旭东

编辑部网址: <http://zk.swpuxb.com>