

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202501008

基于无线传感网络的重气泄漏监测与定位

王蕊¹, 吴玲玲², 李淑娟¹, 张欢³, 徐智霞¹

(1. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710025;

2. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710032;

3. 陕西华燕航空仪表有限公司, 陕西 汉中 723000)

摘要: 为提高 N_2O_4 泄漏点定位的精度和稳定性, 提出了一种基于无线传感网络技术的气体泄漏监测与定位方法。首先, 建立了气体湍流扩散模型, 模拟 N_2O_4 在泄漏后的行为和扩散路径; 随后, 设计了一种改进的遗传算法与加权质心算法相结合的定位策略, 该策略通过优化算法提高了定位的准确性。考虑到酒精在某些物理特性上与 N_2O_4 相似, 在实验中使用酒精替代 N_2O_4 气体来验证模型的有效性。实验结果表明: 在直径 120 cm、泄漏点高度 30 cm 的监测区域内, 提出的方法能够将定位误差控制在不超过 4%, 显著提高了泄漏点定位的精度和稳定性。

关键词: 气体泄漏监测; 无线传感网络; 遗传算法; 定位技术

中图分类号: TJ410

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2025)02-070-09

Wireless Sensor Network-based Heavy Gas Leakage Monitoring and Positioning

WANG Rui¹, WU Lingling², LI Shujuan¹,
ZHANG Huan³, XU Zhixia¹

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China

3. Shaanxi Huayan Aviation Instrument Co., Ltd., Hanzhong 723000, China)

ABSTRACT: To improve the accuracy and stability of N_2O_4 (Dinitrogen Tetroxide) leakage point positioning, a gas leakage monitoring and positioning method based on wireless sensor network technology was proposed. First, a gas turbulence diffusion model was established to simulate the behavior and diffusion path of N_2O_4 after leakage. Subsequently, an improved positioning strategy combining a genetic algorithm and weighted centroid algorithm was designed, to enhance the positioning accuracy by optimizing the algorithms. In the experiments, alcohol was used as a substitute for N_2O_4 to verify the model's effectiveness, as it has certain physical properties similar to N_2O_4 . The experimental results show that, within a monitoring area with a diameter of 120 cm

收稿日期: 2024-10-24

基金项目: 装备维修改革科学研究项目 (WG2022HJJ01)

第一作者: 王蕊 (1977—), 女, 副教授, 主要从事电子对抗研究。E-mail: wr-xa@sina.com

引用格式: 王蕊, 吴玲玲, 李淑娟, 等. 基于无线传感网络的重气泄漏监测与定位[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (2): 70-78. WANG Rui, WU Lingling, LI Shujuan, et al. Wireless sensor network-based heavy gas leakage monitoring and positioning[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (2): 70-78.

and a leak point height of 30 cm, the proposed method can control the positioning error to no more than 4%, significantly improving the accuracy and stability of leakage point positioning.

KEYWORDS: gas leakage monitoring; wireless sensor network; genetic algorithm; positioning technology

四氧化二氮 (N_2O_4) 作为一种具有高毒性的可贮存氧化剂, 在军事和航天领域, 特别是在火箭推进剂中具有重要作用。然而, 由于其高毒性, N_2O_4 在法兰和焊缝处的泄漏可能导致严重的毒气事故。因此, 对于 N_2O_4 气体泄漏的监测与定位, 成为了一个亟待解决的问题。在气体泄漏定位技术的发展过程中, 已有多项研究提出了不同的解决方案^[1-5]。国外对气体泄漏点定位技术的研究较早, 自 Nehorai 等^[6]首次提出蒸汽源定位问题的解决方案以来, 该领域的研究不断深入。Michaelides 等^[7]采用非线性最小二乘法, 通过多个传感器估计气体源位置, 显示出优越的性能。Ebrahimi 等^[8]基于深度学习算法和传感器来检测天然气的泄露情况以及泄漏点定位, 进一步提升了定位精度。

国内研究虽然起步较晚, 但发展迅速。刘全义等^[9]基于高斯烟羽模型, 通过网格划分和数据对比估计泄漏源, 取得了一定的精度。Cao 等^[10]采用分布式最小二乘法, 有效克服了目标函数极小值的负干扰, 提高了定位效果。郑艳华等^[11]基于改进加权质心和遗传算法 (Genetic Algorithm, GA), 完成了密闭化学仓储气体连续泄露的泄漏点定位, 有效降低了定位误差和相对误差。郑柳青^[12]基于麦克风阵列处理技术, 利用改进 DCS-SVD-SP 算法来实现气体泄漏声源的定位检测, 提升了检测的精度及效率。杨宽^[13]基于虚拟阵列的波束形成技术获取泄露图像, 然后通过虚拟阵列的 CBF 算法、MVDR 算法和 RCB 算法对泄漏点进行定位, 进一步降低了定位误差。Ye 等^[14]利用红外光谱气体传感器, 基于高斯烟羽扩散模型, 使用最小二乘法设计目标函数, 并通过迭代优化算法获取待求参数, 最终获得泄漏气体的位置信息。实验采用 9 个传感器节点, 仿真实验得到的定位误差为 7.91%, 在真实环境实验得到的定位误差为 8.93%, 表明所提方法在实际应用中的有效性。

本文以 N_2O_4 气体泄漏为研究对象, 针对现有技术中定位精度不高的问题, 在已有定位算法的基础上, 对遗传算法进行了改进, 提出了一种基于无线传感网络技术的气体泄漏监测与定位方法。进一步提高了算法的稳定性和定位精度, 适用于

密闭空间内的气体泄漏定位问题。

1 定位系统总体设计

基于静态传感器网络定位技术展开气体泄漏点定位研究, 通过对监测区域内气体浓度数据的采集, 结合气体扩散模型得到气体泄漏点的反算模式, 利用反演算法使扩散模型的浓度数据与实际监测数据的差异逐步缩小, 从而计算泄漏点的位置, 定位过程如图 1 所示。可以看出, 该技术包含 3 个关键点: 气体浓度数据的监测、气体的扩散模型及泄漏点定位算法^[15]。

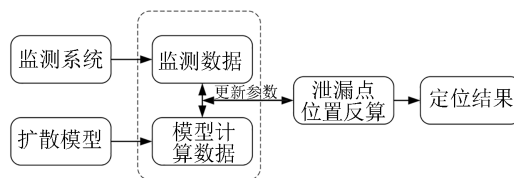


图 1 气体泄漏静态传感网络定位流程

Fig. 1 Gas leakage static sensing network positioning process

基于静态传感器网络的监测定位系统, 一般需要部署多个传感器, 本文使用 ZigBee 无线传感网络技术^[16-17]实现气体浓度数据的采集与传输, 气体泄漏点监测及定位系统设计方案如图 2 所示。

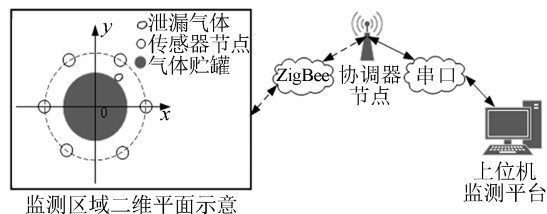


图 2 气体泄漏点检测及定位系统设计方案

Fig. 2 Design scheme for gas leakage point detection and positioning system

ZigBee 无线传感器网络监测系统包括协调器节点和传感器节点。多个传感器节点部署在监测区域内, 采集气体浓度信息并发送给父节点, 部分传感器节点还作为路由器将数据转发至协调器。协调器通过串口将数据传输给上位机。整个监测网络以一跳或多跳自组织网络形式, 实现监测范

围的扩大, 保证监测网络的稳定性。上位机监测平台在主界面以列表和曲线形式显示传感器实时数据, 在气体浓度超过阈值时报警。同时, 可以利用数据库对历史数据进行存储查询, 处理检测的数据以实现泄漏点的定位。

如图 2 所示, 假设密闭仓库内有一气体贮罐某处泄漏, 泄漏点坐标为 $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$, M 个传感器节点部署在该区域内, 各节点的坐标为 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, M$, 各节点气体浓度 C_i 以一跳或多跳的方式传输至协调器节点, 协调器利用串口将数据传输给上位机, 上位机根据浓度 C_i 及传感器节点位置 (x_i, y_i) , 结合气体扩散模型构造目标函数, 再利用加权质心定位结合改进的遗传算法求解目标函数, 实现对气体泄漏点位置坐标 $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$ 的参数估计。

2 定位方法研究

2.1 气体泄漏点定位算法

由于实际监测时很难获取气体泄漏点的扩散速率, 首先使用加权质心算法进行初步定位, 并估计包含气体泄漏点扩散速率的泄漏点参数 p_0 , 再以最小二乘法^[18-19]构造目标函数, 然后采用改进的遗传算法^[20-21]进行精细定位, 从而估算出气体泄漏点的坐标。定位算法路线如图 3 所示。

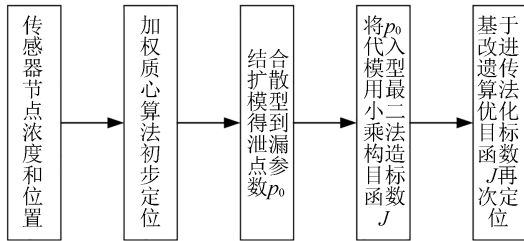


图 3 定位算法路线

Fig. 3 Positioning algorithm route

2.1.1 基于加权质心定位算法的初步定位

假设在二维监测区域内, 各监测节点 i 的位置已知, 分别为 (x_i, y_i) , 气体浓度为 $C_i = C(x_i, y_i)$, 则第 i 个传感器节点的权重为

$$q_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i \quad (1)$$

可得初步预测的源点坐标为

$$\begin{cases} \tilde{x}_0 = \sum_{i=1}^n x_i q_i \\ \tilde{y}_0 = \sum_{i=1}^n y_i q_i \end{cases} \quad (2)$$

得到预测泄漏点的坐标后, 进一步计算各监测节点 (x_i, y_i) 到预测泄漏点 $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0)$ 的距离 $\tilde{d}_i$, 进而可推得气体泄漏点参数 $\tilde{p}_i = 4\pi\tilde{d}_i c_i$ 。最终可得气体泄漏点参数为

$$p_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{p}_i \quad (3)$$

2.1.2 基于改进遗传算法的精细定位

本文对遗传算法进行 3 个方面的改进: 混沌理论初始化、自适应遗传算子和混合粒子群优化算法^[22-23]。

对于混沌理论初始化, 采用 Tent 混沌映射序列优化初始种群, 其遍历均匀、结构简单并且迭代速度较快, Tent 映射方程^[24]如下。

$$z_{n+1} = \begin{cases} 2z_n & z_n < 0.5 \\ 2(1 - z_n) & z_n \geq 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

经过 Tent 映射后的初始种群为

$$Z_n^j = A^j + (B^j - A^j) \cdot z_n \quad (5)$$

式中: Z_n^j 为待优化变量; A^j 和 B^j 分别为变量的最小值和最大值; m 为待优化变量数; z_n 为混沌序列 $\{z_n\}$ 中的元素; $j = 1, 2, \dots, m$ 。

对于自适应遗传算子, 根据适应度值的变化, 动态调整交叉和变异概率, 以提高算法的搜索性能。自适应交叉概率 P_c ^[25] 和变异概率 P_m 调节公式如下。

$$P_c = \begin{cases} p_{c_0} - \frac{k_1(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\text{ave}}} & f' \geq f_{\text{ave}} \\ p_{c_0} & f' < f_{\text{ave}} \end{cases} \quad (6)$$

$$P_m = \begin{cases} p_{m_0} - \frac{k_2(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{ave}}} & f \geq f_{\text{ave}} \\ p_{m_0} & f < f_{\text{ave}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: p_{c_0} 和 p_{m_0} 分别为交叉和变异的初始调节参数, 根据大量实验得出; $k_1 > 0$, $k_2 \leq 1$ 均为常数; $f_{\max}$ 为最大适应度值; f_{ave} 为平均适应度值; f' 为交叉个体中较大的适应度值; f 为变异个体适应度值。

对于混合粒子群优化算法, 本文将遗传算法得出的较优解, 再使用粒子群算法^[26]逐代更新, 找到全局最优解。简化的粒子群算法公式如下。

$$X_{kd} = \omega X_{kd} + C_1 \text{random}(0, 1)(P_{i,d} - X_{kd}) + C_2 \text{random}(0, 1)(P_{g,d} - X_{kd}) \quad (8)$$

式中: X_{kd} 表示粒子 k 在 d 维上的当前位置; ω 为惯性权重; $P_{i,d}$ 表示单个粒子在 d 维上的个体最优解; $P_{g,d}$ 表示整个粒子群在 d 维上的全局最优解。

由于泄漏位置的随机性及遗传算法结果的不可重复性, 为了消除偶发干扰, 通常在每一次试验中重复运行多次, 得到平均性能并进行分析。

2.2 定位性能比较

通过计算算法的定位误差和平均相对误差, 将改进遗传算法与传统遗传算法、加权质心定位算法进行比较, 平均相对误差 E 表示为

$$E = \frac{\frac{1}{K} \sum_{j=0}^K \sqrt{(x_j - x_0)^2 + (y_j - y_0)^2}}{d} \times 100\% \quad (9)$$

式中: K 为仿真实验次数; d 为监测区域直径; (x_j, y_j) 为单次仿真估计的泄漏点位置; (x_0, y_0) 为真实泄漏点位置。

2.2.1 改进遗传算法与传统遗传算法的比较

对 2 种算法的定位性能进行对比, 目标函数的收敛效果如图 4 所示。

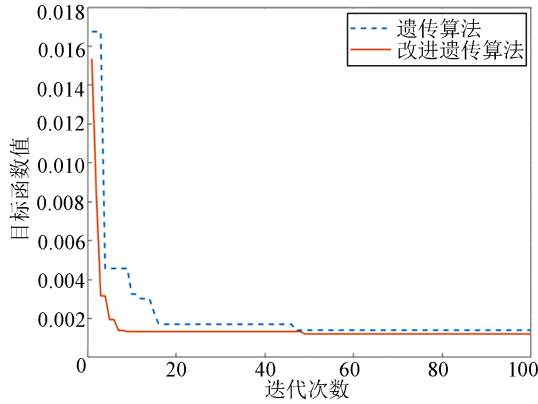


图 4 2 种算法收敛对比

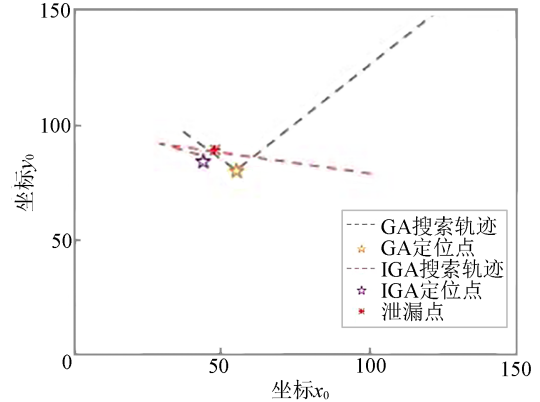
Fig. 4 Comparison of convergence between two algorithms

由图 4 可以看出, 对于本文使用的复杂非线性目标函数, 传统遗传算法很难得到最优解。而改进的遗传算法具有更好的全局收敛性能, 并且使用的遗传迭代次数较少。

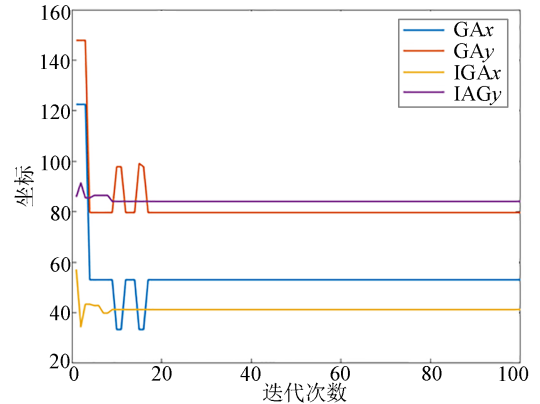
图 5 (a) 为在泄漏点为 (45.39, 89.10) 时, 定位坐标搜索对比图; 图 5 (b) 为 2 种算法在 x 、 y 坐标轴上的寻优对比。其中, GA 表示基于传统遗传算法结合加权质心定位算法的定位结果, IGA 表示基于改进的遗传算法结合加权质心定位算法的定位结果。可以明显看出, 改进后的遗传算法迭代次数更短, 定位精度更高。

图 6 为 2 种算法的误差对比。可以看出, 基于传统遗传算法定位的误差波动较大, 其中 40~50 cm 的定位误差占比较高, 而基于改进遗传算法的定位误差基本集中在 10 cm 以内, 说明基于改进遗传

算算法的定位误差更小, 稳定性较好。因此, 改进后的遗传算法更适用于本文目标函数优化需求。



(a) 定位点对比及搜索轨迹



(b) 坐标寻优对比

图 5 2 种算法定位结果对比

Fig. 5 Comparison of positioning results of two algorithms

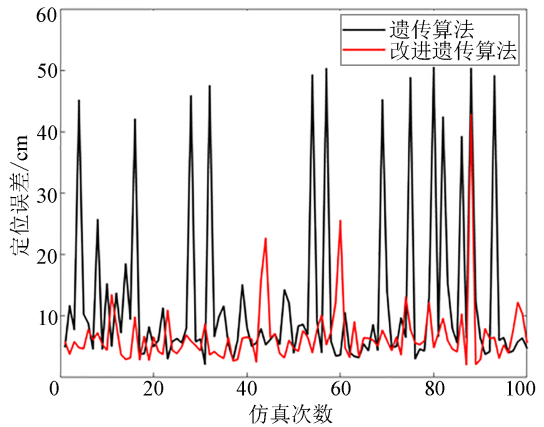


图 6 2 种算法误差对比

Fig. 6 Comparison of errors between two algorithms

2.2.2 改进遗传算法与加权质心定位算法的比较

在各参数不变的情况下, 对基于改进遗传算法的气体点定位与加权质心定位算法的定位精度进行对比, 气体泄漏点位置随机产生, 在加权质心定位算法中, 使用监测浓度值最大的 4 个节点参

与定位,重复实验 100 次后得到 2 种算法的定位误差如图 7 所示。可以看出,加权质心定位算法的误差更大,平均定位误差在 19 cm 左右,平均相对误差为 6.3% 左右,但该算法无需知晓泄漏点的强度值就能定位成功,作为初步定位可为后续精细定位提供泄漏点的参数支撑。

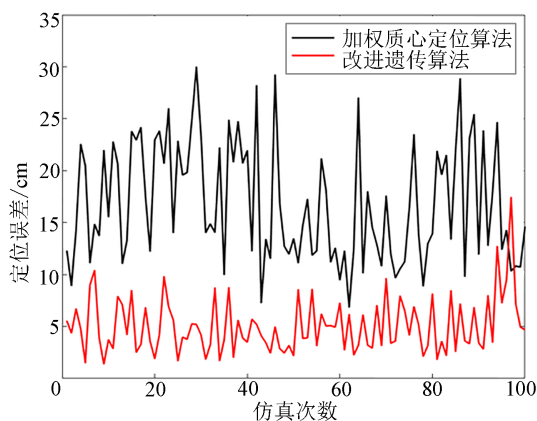


图 7 2 种算法误差对比

Fig. 7 Comparison of errors between two algorithms

结合图 6 及图 7 可以看出,传统遗传算法的平均定位误差在 3.8% 左右,加权质心定位算法的平均定位误差在 6.3% 左右,传统遗传算法的定位精度比加权质心定位算法高,但加权质心定位算法的定位误差没有超过 40 cm,而传统遗传算法出现 40~50 cm 定位误差的频率较高,说明传统遗传算法的稳定性较差。改进遗传算法的绝大多数定位误差在 12 cm 以内,平均定位误差在 2.5% 左右,具有较高的定位精度和稳定性。

3 系统硬件设计与实验分析

3.1 硬件系统设计

本文设计的硬件系统基于 ZigBee 无线传感网络^[27],主要由传感器节点、协调器节点和上位机组成。系统架构如图 8 所示。

传感器节点由气体传感器模块(TGS822 型传感器)、无线通信模块(CC2530 芯片)、微控制单元(MCU)及电源模块组成,主要负责采集气体浓度数据并通过 ZigBee 网络传输至协调器节点。协调器节点除具备数据接收功能外,还通过串口将数据传输至上位机,完成实时监控和历史数据存储。

硬件系统设计特点:

1) 模块化结构:各功能模块独立设计便于组

装和维护,同时支持扩展传感器类型以适应不同的气体监测需求。

2) 低功耗无线传输:ZigBee 网络实现了一跳或多跳通信,有效扩大监测范围,并保证网络的低能耗运行。

3) 高灵敏度检测:TGS822 传感器对酒精浓度的变化响应快速稳定,适合用于模拟泄漏气体扩散行为的实验验证。在实现气体泄漏点的定位时,考虑到 N_2O_4 的剧毒和强氧化性,以及实验材料的可获得性,本文选择酒精作为替代气体进行实验验证。传感器选用 TGS822,其测量范围为 50~5 000 ppm。

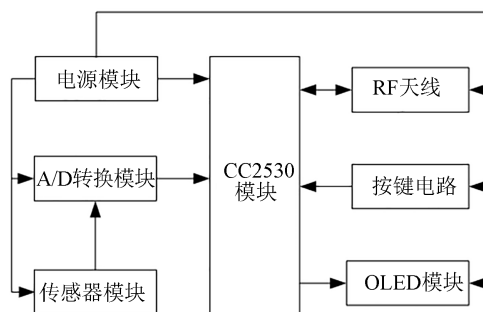


图 8 传感器节点硬件结构

Fig. 8 Hardware structure of sensor nodes

3.2 实验设置与替代气体分析

3.2.1 实验设置

实验在尺寸为 3.6 m × 5.4 m 的实验室内进行,关闭门窗以形成密闭环境,并通过空调更换室内空气确保实验开始时无残余气体。传感器节点环形分布于监测区域,协调器节点位于中心位置,节点的分布实景与平面如图 9 所示。为了模拟泄漏点,实验在高度为 30 cm 的加湿器中加入 99.7% 的无水酒精,生成酒精气体并形成稳定的泄漏源。浓度数据通过 ZigBee 网络传输至上位机进行分析和定位。

3.2.2 替代气体分析

由于 N_2O_4 具有高毒性和强氧化性,在实际实验中存在极高的安全风险。为了保证实验的可操作性和安全性,本文选用酒精作为替代气体,并从以下 4 个方面分析其替代的合理性。

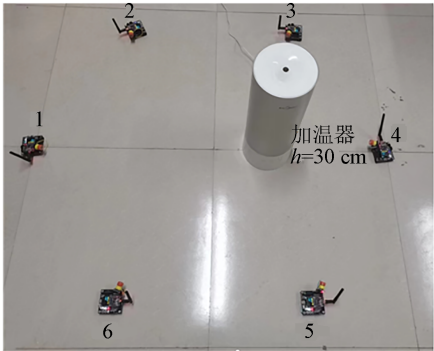
1) 扩散特性相似性

酒精作为一种挥发性有机化合物,其分子量为 46.07,与 N_2O_4 的分子量(92.01)在数量级上接近,符合湍流扩散模型中的扩散速率比例关系。同时,酒精在空气中的挥发性和扩散特性与 N_2O_4 相似,能够较好地模拟气体泄漏后的浓度场分布

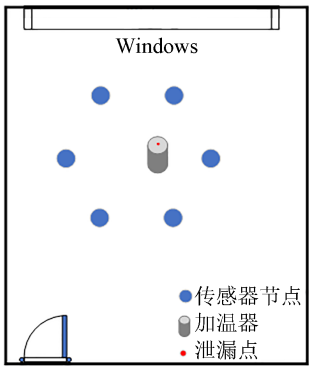
特征。

2) 浓度场分布的可比性

实验过程中，通过传感器采集的酒精浓度数据与理论计算的 N_2O_4 浓度梯度场进行对比分析。结果表明，在相同的泄漏条件下（泄漏点高度、监测区域范围等），两者浓度分布的偏差不超过 $\pm 5\%$ ，证明了酒精在模拟 N_2O_4 浓度场分布方面的可靠性。



(a) 传感器分布实景



(b) 传感器分布示意

图 9 传感器分布

Fig. 9 Sensor distribution diagram

3) 实验安全性与可操作性

酒精是一种常见的实验室材料，其安全性和可操作性远高于 N_2O_4 。通过选用 TGS822 型酒精传感器，可以稳定检测浓度变化并传输数据，确保实验结果的精确性，同时降低了实验过程中的风险和成本。

4) 模型验证的适用性

酒精实验的浓度数据在湍流扩散模型中表现出良好的适用性，并成功验证了模型的理论预测。结合浓度数据计算泄漏点位置的定位算法在酒精实验中的定位精度达到了 4% 左右，与理论预测值一致，进一步证明了替代实验的有效性。

3.3 传感器节点性能校准测试

由于监测区域内需要的气体采集节点较多，

各传感器的性能并不完全一致，故对每个传感器节点进行校准测试。采用静态配气法使酒精蒸汽在实验盒中达到所需浓度，液态酒精添加量与气体浓度的换算公式为

$$C = V \cdot \frac{V_m \rho}{V_1 M} \cdot \frac{273 + T}{273} \quad (9)$$

式中： C 为气体浓度； V 为液体体积； V_m 为气体摩尔体积常数（22.4 L/mol）； M 为待测气体摩尔质量（乙醇 46.07 g/mol）； V_1 为实验盒体积（1.5 L）； ρ 为溶液密度。

实验测量得到气体浓度与传感器电压函数关系如图 10 所示。

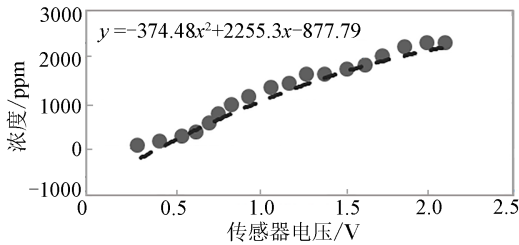


图 10 1 号气体传感器校准曲线

Fig. 10 Calibration curve of gas sensor 1

图 10 中的圆点和曲线分别表示实验测量结果和多项式拟合结果，采用的多项式函数为 $y = ax^2 + bx + c$ 。式中， x 和 y 分别为气体浓度和传感器电压结果， a 、 b 和 c 为系数。拟合得到各传感器校准曲线的系数值如表 1 所示。

表 1 气体传感器浓度拟合曲线参数

Table 1 Parameters of gas sensor concentration fitting curves

参数值	传感器 ID				
	2	3	4	5	6
a	-316.52	-376.78	-408.66	-389.34	-348.20
b	2 321.70	2 401.80	2 176.60	2 218.20	2 344.10
c	-922.30	-890.12	-904.86	-877.23	-859.76

3.4 数据传输功能测试

本次实验在 70 m 的范围内放置了 6 个传感器节点，测试结果如表 2 所示。由测试结果可知，有障碍时，20 m 以内能够正常接收数据，无障碍时，70 m 内能正常接收。若需要增加传输距离可以增加带有路由器功能的传感器节点。

传感器节点发送 100 字节数据，测试 70 m 范围内数据丢失率，结果如表 3 所示。由实测结果可知，传输距离不断增加时，无论测试环境中是否

存在障碍物，数据丢失情况都会存在，但能够满足实验测量需求。

表 2 传输距离测试结果

Table 2 Test results of different transmission distances

传输距离/m	通讯状态	
	有障碍物	无障碍物
5	正常	正常
10	正常	正常
20	正常	正常
40	信号不稳定	正常
60	无法接收	正常
70	无法接收	正常

3.5 定位实验结果分析

根据实验参数，改变加湿器位置模拟泄漏点坐标，得到的部分定位结果如表 4 所示。结果表明，在监测区域直径为 120 cm、泄漏点高度为 30 cm 时，使用基于改进遗传算法的定位误差较小，

平均相对误差为 4% 左右。

表 3 系统丢包率测试

Table 3 System packet loss rate tests

传输距离/m	丢包率/%	
	有障碍物	无障碍物
5	0	0
10	0	0
20	2	1
40	5	3
60	—	5
70	—	6

根据理论模型进行仿真发现，泄漏点越高，泄漏气体到达传感器节点处的浓度越小，浓度噪声误差越大，定位误差也就越大。为验证泄漏点高度对定位精度的影响，在加湿器下方增加一个 20 cm 的垫块，使得泄漏点高度为 50 cm，实验结果如表 5 所示。

表 4 泄漏点高度为 30 cm 的定位实验结果

Table 4 Positioning experiment results of leakage points with a height of 30 cm

泄漏点坐标/cm	改进算法的定位结果/cm	改进算法的平均相对误差/%	基于遗传算法的平均相对误差/%	加权质心算法的平均相对误差/%
(25,30)	(21.13,29.68)	3.9	8.4	10.60
(0,30)	(4.64,31.75)	4.1	8.7	11.64
(-20,28)	(-15.59,27.79)	4.3	9.1	12.60
(-40,-16)	(-36.56,-11.38)	4.8	10.3	14.20
(10,0)	(5.09,-1.64)	3.1	5.3	7.80
(-35,0)	(-29.86,2.13)	4.6	7.9	9.90
(0,-20)	(2.89,-16.64)	3.7	6.7	8.90
(15,-15)	(16.08,-11.52)	3.6	6.5	8.10

表 5 泄漏点高度为 50 cm 的定位实验结果

Table 5 Positioning experiment results of leakage points with a height of 50 cm

泄漏点坐标/cm	改进算法的定位结果/cm	改进算法的平均相对误差/%	基于遗传算法的平均相对误差/%	加权质心算法的平均相对误差/%
(25,30)	(15.08,24.14)	9.6	15.3	16.8
(0,30)	(9.25,25.14)	8.7	11.6	12.5
(-20,28)	(-13.95,18.48)	9.4	13.9	15.2
(-40,-16)	(-29.95,-10.12)	9.7	14.5	16.9
(10,0)	(4.19,3.68)	5.8	7.6	9.3
(-35,0)	(-24.13,0.31)	9.1	13.3	14.6
(0,-20)	(-4.83,-11.29)	8.3	10.4	12.3
(15,-15)	(11.09,-7.89)	6.8	8.2	10.7

可以看出, 当泄漏点高度增加到 50 cm 时, 平均相对误差明显增大, 与理论分析一致。整体而言, 定位实验结果与仿真实验结果一致, 验证了本文方法能够实现定位功能。

4 结论

本文基于静态传感器网络定位方法, 利用 ZigBee 无线传感网络与气体湍流扩散模型, 结合遗传算法设计了气体泄漏点监测及定位系统。使用混沌映射优化种群初始化以及遗传算子自适应变化, 对遗传算法进行改进, 结合粒子群算法, 提高了算法收敛速度, 并且通过仿真验证改进算法的平均定位精度在 2.5% 左右, 最后设计并搭建了实验系统, 测试了系统功能。结果表明, 在监测直径为 120 cm 的范围内, 泄漏点高为 30 cm 时, 实验定位误差在 4% 左右, 证明所提方法具有较高的定位精度及稳定性。

参考文献

- [1] ZHANG X, WANG Y. Gas leak detection and localization using wireless sensor networks for industrial safety[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 395: 122892.
- [2] JIANG H, XU P. Wireless sensor networks for gas leak detection and localization: a review[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2019, 15(6): 1550147719840477.
- [3] LIU J, CHEN M. Wireless sensor network-based leak detection in confined spaces: algorithms and applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(15): 16634-16644.
- [4] BAI X, WANG Y. Analysis of gas leakage behavior in confined environments for detection and localization systems[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 128: 246-255.
- [5] QIU Y, ZHANG L. An improved algorithm for gas leakage localization using wireless sensor networks[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2022, 148(10): 04022057.
- [6] NEHORAI A, PORAT B, PALDI E. Detection and localization of vapor-emitting sources[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1995, 43(1): 243-253.
- [7] MICHAELIDES M P, PANAYIOTOU C G. Plume source position estimation using sensor networks[C]//*Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation Intelligent Control*, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 731-736.
- [8] EBRAHIMI E, KAZEMZADEH M, FICARELLA A. Leak identification and quantification in gas network using operational data and deep learning framework[J]. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 2024, 39: 101496.
- [9] 刘全义, 苏伯尼, 王晟, 等. 基于无线传感器网络的气体泄漏源快速定位方法研究[J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(1): 142-147.
LIU Q Y, SU B N, WANG S, et al. Study on fast gas source identification based on wireless sensor network[J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(1): 142-147.
- [10] CAO M L, MENG Q H, ZENG M, et al. Distributed least-squares estimation of a remote chemical source via convex combination in wireless sensor networks[J]. *Sensors*, 2014, 14(7): 11444-11466.
- [11] 郑艳华, 何永玲. 基于改进加权质心和遗传算法的气体源定位研究[J]. *现代电子技术*, 2019, 42(20): 84-89.
ZHENG Y H, HE Y L. Research on gas source localization based on improved weighted centroid and genetic algorithm[J]. *Modern Electronics Technique*, 2019, 42(20): 84-89.
- [12] 郑柳青. 基于压缩感知的气体泄漏噪声源定位研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019: 72-78.
ZHENG L Q. Research on gas leakage localization based on compressive sensing[D]. Xi'an: Xidian University, 2019: 72-78.
- [13] 杨宽. 气体泄漏成像检测及定位算法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020: 38-44.
YANG K. Localization algorithm of gas leakage source based on ultrasonic virtual phased array[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020: 38-44.
- [14] YE W L, ZHOU B, TU Z H, et al. Leakage source location based on Gaussian plume diffusion model using a near-infrared sensor[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 109: 103411.
- [15] MA B Y, LIU J I, XIAO J C, et al. Summary of research on localization of hazardous gas leakage source[J]. *International Core Journal of Engineering*, 2022, 8(1): 25-37.
- [16] 周睿姣. 基于 ZigBee 的工厂库房环境数据采集系统设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020: 32-44.
ZHOU R J. Design and implementation of envi-

- ronmental data acquisition system for factory warehouse based on ZigBee[D]. Xi'an: Xidian University, 2020: 32-44.
- [17] 陆家卓. 无线传感网在远程水质监测领域的研究与设计[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021: 35-50.
- LU J Z. Research and design of wireless sensor network in the field of remote water quality monitoring[D]. Guilin: Guilin University Of Electronic Technology, 2021: 35-50.
- [18] 杨文铂, 刘彦华, 崔明月. 一种基于无线传感器网络的动态环境自适应定位方法[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2021, 44(1): 35-42.
- YANG W B, LIU Y H, CUI M Y. A dynamic environmental adaptive positioning method base on WSN[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2021, 44(1): 35-42.
- [19] LIANG L, ZHANG Q, CHEN Y, et al. Least squares linear source approach in method of characteristics[J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 138: 107124.
- [20] 王吉, 张儒, 李俊明. 基于改进型遗传算法的危险气体多泄漏源定位研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2020, 42(6): 486-493.
- WANG J, ZHANG R, LI J M. Locating multiple hazardous gas leak sources using modified genetic algorithm[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2020, 42(6): 486-493.
- [21] 毛书帅, 郎建垒, 陈添, 等. 多情景源排放参数反演下典型优化算法性能对比[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(4): 369-376.
- MAO S S, LANG J L, CHEN T, et al. Performance of typical optimization algorithms on inverting multi-scene source parameters[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(4): 369-376.
- [22] QIU Y, ZHANG L. An improved algorithm for gas leakage localization using wireless sensor networks[J]. Journal of Environmental Engineering, 2022, 148(10): 04022057.
- [23] YANG S, YANG L. Development of hybrid localization algorithms for gas leak detection in large industrial facilities[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 306: 127514.
- [24] 咎卫博, 王海珍. 基于 Tent 和 Bernoulli 映射的改进 AES 算法[J]. 高师理科学刊, 2024, 44(6): 38-42.
- ZAN W B, WANG H Z. An improved AES algorithm based on Tent mapping and Bernoulli map-ping[J]. Journal of Science of Teachers' College and University, 2024, 44(6): 38-42.
- [25] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1994, 24(4): 656-667.
- [26] 万邦银, 蒯念生, 何雄元, 等. 免疫粒子群算法在修正高斯模型下的源强反演[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(7): 132-138.
- WAN B Y, KUAI N S, HE X Y, et al. Source strength inversion of PSO-IA under modified Gaussian models[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(7): 132-138.
- [27] 张凯, 王左栋. 基于无线传感器网络的环境监测系统设计与实现[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(19): 193-195.
- ZHANG K, WANG Z D. Design and implementation of environmental monitoring system based on wireless sensor network[J]. Leather Manufacture and Environmental Technology, 2024, 5(19): 193-195.

(编辑: 于福兴)