

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208999

# 基于气体扩散模型的信息趋向搜索方法研究\*

邓恩丹 范书瑞 张艳

(河北工业大学电子信息工程学院 天津 300401)

**摘要:** 释放源定位技术在防治有害气体泄漏与扩散中具有极其重要的意义。传统的定位算法依靠气味浓度梯度或风向进行搜索,在应对气味稀疏的湍流环境时则容易丢失目标而导致搜索失败,而信息趋向算法以搜索过程中获得的信息作为线索,在方向选择时追求熵降最大,搜索性能更好。首先,研究分析了常用气体扩散模型,后依其特点选择以气体湍流扩散模型为基础对信息趋向定位算法进行了仿真实验,验证了算法可行性。之后,通过对比实验研究了搜索距离长度对算法的影响,证明了信息趋向算法的鲁棒性。为进一步提升算法性能,分析了基本四边形路径单元、六边形路径单元及八点路径单元下的搜索特性,提出了改进型的四边形搜索路径单元,并通过大量对比实验验证其增强了算法的适应性,减小了搜索时间,提升了搜索效率。

**关键词:** 气体扩散模型;释放源定位;信息趋向算法;搜索路径单元

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

## Research on location method of infotaxis research algorithm on gas diffusion model

Deng Sidan Fan Shurui Zhang Yan

(School of Electronic Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** The technology of release source location is of great significance in the prevention and control of harmful gas leakage and diffusion. The traditional location algorithm relies on the odor concentration gradient or wind direction to search, but when dealing with the turbulent environment with sparse odor, it is easy to lose the target and lead to the search failure, while the infotaxis algorithm takes the information obtained in the search process as a clue to maximize the entropy reduction when choosing the direction, and the search performance is better. First of all, the commonly used gas diffusion model is studied and analyzed, and then according to its characteristics, the infotaxis algorithm is simulated based on the gas turbulent diffusion model, and the feasibility of the algorithm is verified. After that, the influence of the search distance length on the algorithm is studied through comparative experiments, and the robustness of the infotaxis algorithm is proved. In order to further improve the performance of the algorithm, the search characteristics of basic quadrilateral path unit, hexagonal path unit and eight-point path unit are analyzed, and an improved quadrilateral search path unit is proposed. A large number of comparative experiments are carried out to verify that the proposed search path unit enhances the adaptability of the algorithm, reduces the search time and improves the search efficiency.

**Keywords:** gas diffusion model; location of release source; infotaxis; search path unit

## 0 引言

随着科技的进步,人类对于各类气体的应用逐步增多,天然气、氮气、一氧化碳等等,然而这些化学气体在便利人们日常的生产生活的同时也潜在地威胁到了人们的健康及生命财产安全。在危险气体化学制品的生产、运输、存储及

使用的过程中,由于自然因素或人为因素引起的有毒有害、易燃易爆的气体的泄漏与扩散造成了巨大的安全隐患<sup>[1]</sup>,灾害事故频发,引发了公众的广泛关注。因此秉承危险从源头治理的理念,针对危险气体的释放源搜索定位技术应运而生。

为了准确、高效地定位气体释放源,研究人员接连提出

收稿日期:2022-02-11

\* 基金项目:国家自然科学基金(42075129)、河北省省级科技计划(19210404D)、河北省高等学校科学研究项目(ZD2019010)资助

了多种搜索策略。目前较为火热的研究方向大概分为两类,包括静态的采用无线传感网络(WSN)技术的定位方法以及动态的采用智能机器人的搜索定位方法。

无线传感网络技术中,传感器节点尺寸小且网络密度大,使用 ZigBee 技术等进行无线传输<sup>[2]</sup>,可将传感器布置在机器人难以深入搜寻的有障碍区域或特定的人群中。另外,WSN 技术具有计算复杂度较低、工作时间较长、定位速度较快等优点<sup>[3]</sup>,但也存在维护、供电、联网、定位和成本等问题<sup>[4]</sup>。而移动平台搜索则相对更具有机动性和主动性,利于维护,便于充电且定位较为准确。同时,使用移动机器人进行搜索相较于使用人工搜索队可提高搜索效率并保护搜索人员的安全。

在自然界,许多生物通过嗅觉线索来进行高精度地定位,他们天生拥有搜索气源的优异能力,通过气体(信息素)进行个体交流、躲避天敌、吸引异性 and 寻找食物。受这些生物的气源定位方式的启发,一些研究者在经过长期观察研究后总结出了多种释放源搜索算法,推进了机器人主动气源搜索策略的研究。在过去的 20 多年里,相关研究已成为一个逐渐完善的研究领域——机器人主动嗅觉(RAO)<sup>[5]</sup>。

对于移动机器人主动嗅觉搜索策略,根据搜索机器人的数量,释放源搜索算法可分为两类:单机器人搜索和多机器人协同搜索;根据搜索目标的数量,可分为单目标定位搜索和多目标定位搜索<sup>[6-8]</sup>;而根据搜索方式,气源搜索主要分为三类<sup>[9]</sup>:1)基于化学趋向性的搜索算法 Chemotaxis,2)基于风趋向性的搜索算法 Anemotaxis,3)基于信息趋向性的搜索算法 Infotaxis<sup>[10]</sup>。

化学趋向性算法要求浓度足够高,以确保其在两个邻近位置测得的平均差值大于典型的波动。但是,平均浓度可能会随着远离源的距离而迅速下降,在弱信噪比情况下,等待时间变得很长。并且,在稀疏湍流环境中,气体浓度梯度会变得无规则、不稳定,搜索器仅能间歇性地获得感知线索<sup>[11]</sup>,因而一些局部最大值会吸引搜索器,使其无法达到标志目标位置,即全局最大值<sup>[12]</sup>,从而导致搜索任务的失败。

风趋向性算法常与化学趋向性算法相结合应用,搜索性能较单一趋向性算法有所提高,但在雷诺数较大、湍流强度较强、风向多变的环境中,浓度场分裂成复杂的丝状结构,在搜索过程中容易丢失目标,因而搜索失败。

相比之下,在使用信息趋向算法进行气源搜索时,通过搜索器的不断移动,充分利用了搜索环境中的气味信息,最大限度地提高了有关震源位置的预期信息增益,在符号上显示出与数据一致的历史依赖,从而实现真正的羽流跟踪,能够在稀疏环境中取得很好的搜索效果<sup>[13]</sup>。

本文在气体扩散模型的基础上对信息趋向算法进行了仿真实现,并对其性能进行了分析,针对基本信息趋向算法中存在的适应性不够强的问题,在保证计算量不变的前提下对基本的四边形搜索路径单元进行了改进。

## 1 气体扩散模型

为实现对气体释放源的精确定位,需对气体扩散过程进行研究分析,掌握其中的基本规律。气体从释放源发出,其扩散运动的物理特性符合基本的流体运动,可结合物理相关知识利用数学表达式进行描述,即为气体扩散模型。在目前的相关研究中,应用较为广泛的气体扩散模型包括高斯扩散模型和气体湍流扩散模型等。

### 1.1 高斯扩散模型

高斯扩散模型作为最早的一种气体扩散模型,因其简单的气体扩散浓度分布而被广泛应用,主要可大致划分为两种类型:高斯烟羽扩散模型及高斯烟团扩散模型。其中,高斯烟羽模型主要针对连续性源扩散,而高斯烟团模型则主要针对瞬时性源扩散。下面重点介绍高斯烟羽扩散模型的相关原理。

高斯扩散公式的建立包含如下假设<sup>[14]</sup>:空间中大气环境稳定,气象参数不随时空变化,风速均匀,风向平直且恒定;扩散气体浓度在风向以外的方向上均遵从正态分布;气体扩散过程中,气团体总质量保持恒定不变,无损耗;气体释放源源强连续且均匀。

在满足以上假设且不考虑噪声和地形因素时,高斯烟羽扩散模型表达式为:

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi V \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (1)$$

式中:Q 是指气源强度,即源粒子发射率,V 是指风速,H 表示释放气体的有效源高。而  $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  是待测点 x 轴坐标的函数,其取值与大气稳定度有关,日前应用较广的是由 Pasquill 提出的大气稳定度级别确定方法以及国际原子能机构(IAEA)提出的分类办法<sup>[15]</sup>。

在模拟仿真过程中,取三维模型的地面截面( $z=0$ )以实现二维模型,设定仿真参数如表 1 所示,其浓度分布和概率地图如图 1 和 2 所示。

表 1 湍流扩散模型仿真参数

变量	数值
源位置	(0.1, 0.5)
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.5
分子扩散率/(m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0.05
源粒子发射率/(mg·s <sup>-1</sup> )	100
搜索器半径/m	0.003
粒子寿命/s	100
仿真时间步长/s	0.1
羽流范围	x: 0~2, y: 0~1
有效源高/m	0.12
截取切面	z=0

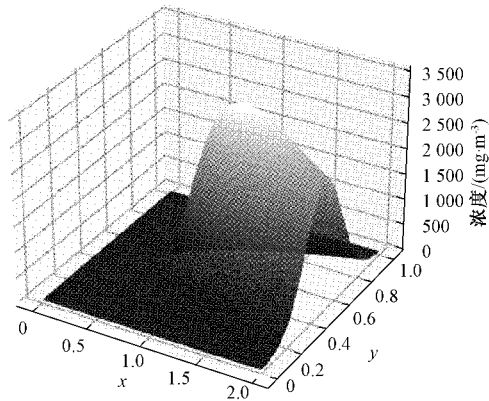


图 1 高斯烟羽扩散模型浓度分布图

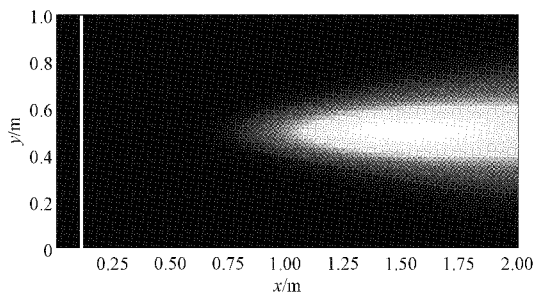


图 2 高斯烟羽扩散模型击中概率地图

高斯烟羽模型中,当环境中存在风时,气体沿高斯分布扩散。由仿真结果图可知,待测气体从源点开始沿风向呈烟羽状分布,其浓度值先急速增大后逐渐减小。在垂直风向方向上,其击中率随远离源距离的增大而迅速减小,在距离源较远的位置几乎检测不到气味。

### 1.2 湍流扩散模型

气体湍流扩散模型是一种基于湍流扩散理论的用以描述气体扩散运动的静态模型。湍流扩散服从统计规律,类似于分子的扩散,相邻的空气质点群作无规则湍流运动,使气体分子间距不断扩大。为凸显信息趋向算法在稀疏信息搜索的情况下具有优越性,这里讨论有风存在情况下的扩散模型。

在开放的外界环境中,气体从释放源发出,以恒定的扩散系数向周围扩散,当外界有风时,气体扩散除自身因素以外,还受到风速及风向的影响。在环境风稳定的情况下,假设风向沿  $y$  轴负半轴,位于  $r_0$  位置的气源产生的平均平稳浓度场  $c(r|r_0)$  将满足以下平流扩散方程<sup>[16]</sup>:

$$0 = V \nabla_y c(r|r_0) + D \Delta c(r|r_0) - \frac{1}{\tau} c(r|r_0) + R \delta(r-r_0) \quad (2)$$

在二维空间中,可由式(2)解析得到湍流扩散模型平均静止浓度场为:

$$c(r|r_0) = \frac{R}{2\pi D} e^{-\frac{(y-y_0)V}{2D}} K_0\left(\frac{|r-r_0|}{\lambda}\right); \lambda = \sqrt{\frac{D\tau}{1 + \frac{V^2\tau}{4D}}} \quad (3)$$

其中,  $K_0$  是修正的零阶贝塞尔函数,  $\lambda$  为特征长度,代表粒子从气味源发出到最终消散历经的平均路径长度。在三维空间中,有相似的解析解:

$$c(r|r_0) = \frac{R}{4\pi D |r-r_0|} e^{-\frac{(y-y_0)V}{2D}} e^{-\frac{|r-r_0|}{\lambda}} \quad (4)$$

式中:  $R$  是源粒子发射率,  $V$  是风速,  $D$  是分子扩散率,  $\tau$  为粒子寿命。在模拟仿真过程中,为便于对比分析,仿真参数设定与高斯扩散模型基本相同,具体如表 2 所示。二维湍流扩散模型仿真结果如图 3、4 所示。

表 2 湍流扩散模型仿真参数

变量	数值
源位置	(0.1, 0.5)
风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	0.5
分子扩散率/( $m^2 \cdot s^{-1}$ )	0.05
源粒子发射率/( $mg \cdot s^{-1}$ )	100
搜索器半径/m	0.003
粒子寿命/s	100
仿真时间步长/s	0.1
羽流范围	$x: 0 \sim 2, y: 0 \sim 1$

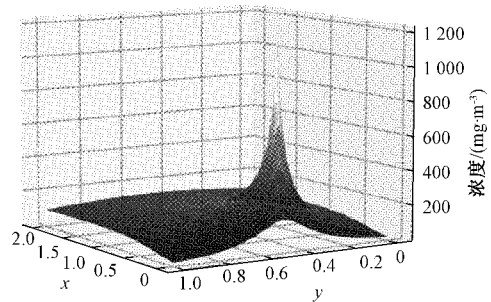


图 3 二维湍流扩散模型浓度分布图

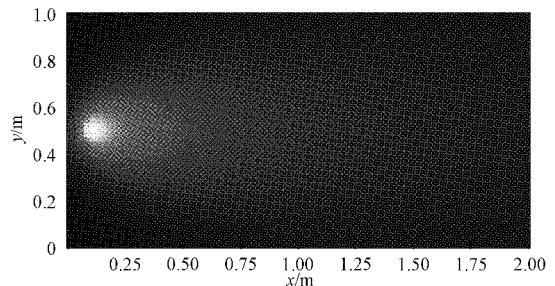


图 4 二维湍流扩散模型击中概率地图

由图 3 和 4 可看出,在源位置(0.1, 0.5)处,气体浓度最大,击中率最大,检测到气源的概率最大,随远离源的距离增大,气体浓度呈指数级急速衰减,在较远点较为难以检测到待测气体。在环境风的作用下,气体烟羽在风速方向上扩散,浓度先急速增大后逐渐减小,在逆风方向上,几乎检测不到气体。

由仿真结果可知,两种气体扩散模型具有一定的相似

性,且均受风影响。但湍流扩散模型与高斯扩散模型相比,气体分布更为稀疏,由文献[17]可知,在信息较为稀疏的环境中,认知性搜索策略的搜索效果更好。可以说信息趋向算法是专门用于在湍流介质中寻找扩散源而提出的,因此本文在实现信息趋向搜索时,使用湍流扩散模型进行气体扩散模拟。

## 2 信息趋向算法

任何的寻源搜索过程都可以看作是获取源位置信息的过程。对于信息趋向性算法,信息起着类似于化学趋向中浓度的作用。基于局部浓度梯度的化学趋向搜索策略要求浓度足够高,以确保其在两个邻近位置测得的平均差值大于典型的波动,但随着远离源的距离逐渐增大,气体浓度会呈指数级迅速下降,在这种弱信噪比的稀释情况下,基于信息熵最小化的信息趋向搜索策略更具有优越性。

### 2.1 气味检测率

由经典的 Smoluchowski 表达式可知,半径为  $a$  的球形粒子与具有有效扩散系数  $D$  的分子的相遇率为:

$$J(r) = 4\pi Dac(r) \quad (5)$$

其中,  $c(r)$  指局部粒子浓度。若检测时间为  $T$ , 则检测事件的平均值为  $TJ(r)$ 。

考虑湍流环境下的气味源搜索,气味平均检测率与搜索器距离源的距离、源的强度、流场的运动以及环境的几何结构有关。羽流中气味浓度由式(3)和(4)可知,搜索器半径为  $a$ ,环境中分子扩散率为  $D$ 。

则在三维环境中,气味粒子可被检测到的概率为:

$$R(r|r_0) = 4\pi Dac(r|r_0) = \frac{aR}{|r-r_0|} e^{\frac{|r-r_0|}{\lambda}} e^{\frac{(y-y_0)^2}{2D}} \quad (6)$$

其中,

$$\lambda = \sqrt{\frac{D\tau}{1 + \frac{V^2\tau}{4D}}} \quad (7)$$

而在二维环境中,扩散粒子返回到给定位置的时间是已知的对数发散。这导致用于推导式(5)的常规论点出现分歧,对数发散通过检测到的粒子有限寿命的存在而正则化,气味检测率采取如下形式:

$$R(r|r_0) = \frac{2\pi Dc(r|r_0)}{\ln(\frac{\lambda}{a})} = \frac{R}{\ln(\frac{\lambda}{a})} e^{\frac{-(y-y_0)^2}{2D}} K_0(\frac{|r-r_0|}{\lambda}) \quad (8)$$

### 2.2 模拟气味检测

由于本课题对于算法的研究为基于气体扩散模型的仿真模拟,并无真实存在的气体传感器进行实时气味检测,因此在仿真过程中首先需要模拟气味检测的过程。模拟检测方法流程如图 5 所示,图中的“击中”指搜索器气味传感器击中待测气味分子,即检测到气味。

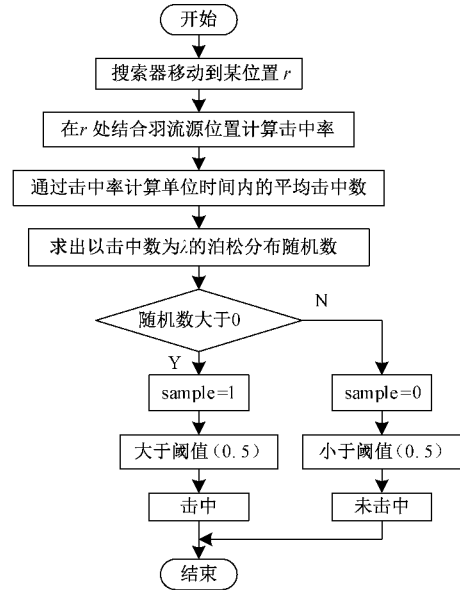


图 5 模拟气味检测流程

当搜索器移动到某一位置  $r$  时,由式(8),结合气体扩散模型中羽流源的位置  $r_0$  计算出期望击中率  $R(r|r_0)$ , 则单位时间  $\Delta t$  内期望平均击中数为:

$$k = \Delta t R(r|r_0) \quad (9)$$

以此构建泊松分布模型:

$$z \sim p(z) = \frac{k^z e^{-k}}{z!} \quad (10)$$

最后通过判断此泊松分布随机数  $z$  是否大于 0 来模拟判断是否击中,即是否检测到了气味。

### 2.3 构建气味源概率地图

在释放源搜索过程中,某时刻搜索器在某处检测到了气味即获得了一个包含气源位置的信息。以  $\Gamma_i$  表示搜索器的搜索轨迹,其中含有检测到气味粒子的时刻和坐标信息。此信息由气源发出,但因湍流环境中的气流波动使气味粒子的扩散传播有较大的随机性,导致搜索器接收到的信息带有较强的噪声。信息趋向搜索中,对于给定的接收信号,使用贝叶斯推理对信息进行解码,以构建源  $r_0$  未知位置的后验概率分布  $P_i(r_0)$ 。在搜索过程中,  $\Gamma_i$  和  $P_i(r_0)$  会随搜索进程的变化而不断更新。

定义对于位于  $r_0$  处的源有轨迹  $\Gamma_i$  的可能性为:

$$L_{r_0}(\Gamma_i) = \exp\left[-\int_0^t R(r(t')|r_0)dt'\right] \prod_{i=1}^H R(r(t_i)|r_0) \quad (11)$$

其中,  $H$  为搜索器沿轨迹检测到气体的次数,  $t_i$  为对应的时刻。由贝叶斯公式,可推得后验概率分布为:

$$P_i(r_0) = \frac{L_{r_0}(\Gamma_i)}{\int L_{r_0}(\Gamma_i) dx} = \frac{\exp\left[-\int_0^t R(r(t')|r_0)dt'\right] \prod_{i=1}^H R(r(t_i)|r_0)}{\int \exp\left[-\int_0^t R(r(t')|r_0)dt'\right] \prod_{i=1}^H R(r(t_i)|r_0)} \quad (12)$$



应注意的是,  $P_{t+\Delta t}(r_0)$  由  $P_t(r_0)$  乘以一个因数决定, 该项取决于在时间间隔  $\Delta t$  中接收到的击中数。因而概率地图的更新无需跟踪整个轨迹和搜索历史:

$$P_{t+\Delta t}(r_0) = \frac{P_t(r_0)e^{-R(r(t+\Delta t)|r_0)\Delta t} R^\eta(r(t+\Delta t)|r_0)\Delta t}{Z_{t+\Delta t}} \quad (13)$$

其中,  $\eta$  为  $\Delta t$  时间内检测到气味的次数(击中数),  $Z_{t+\Delta t}$  为  $P_{t+\Delta t}$  的归一化常数。

### 2.4 信息趋向算法基本步骤

在气味分布稀薄的条件下, 一个好的策略是首先“探索”环境, 收集信息, 然后“开发”现有的信息, 直接指向估计的源位置, 从而利用信息在探索和开发之间取得平衡<sup>[18]</sup>。

考虑到定义在同一集合上的随机变量, 具有较大熵的随机变量更不可预测, 而具有较小熵的随机变量的概率分布更集中且集中在几个点上。因此, 降低源位置  $r_0$  的概率分布  $P_t(r_0)$  的熵相当于在其位置上具有更少的不确定度, 即更多的信息。这是通过估计的概率分布的熵的减少率来量化关于气味源位置的信息的获取速率的基本原理。

在进行释放源搜索时, 首先, 构建初始后验概率, 搜索器从起始位置开始搜索, 在每个时间步长, 搜索器都会选择使信息获取的预期速率局部最大化的方向。具体来说, 搜索器从格子上的相邻站点中选择或静止不动, 选择使后验概率场的熵的预期减少最大化的位置进行移动, 如此循环, 直到最终找到气味源。具体的算法流程如图 6 所示。

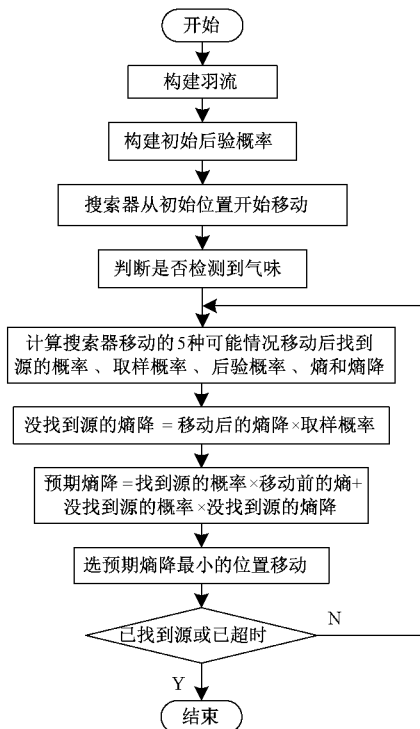


图 6 Infotaxis 算法流程

图 6 中, 搜索器的 5 种可能移动情况是指基本的四边形路径单元情况, 即在二维平面内, 搜索器可以选择向上、

下、左、右 4 个方向进行移动或在原地保持不动。搜索器移动到位置  $r_j$  后, 其后验概率熵的预期变化为:

$$\overline{\Delta S}(r_i \rightarrow r_j) = P_t(r_j)[-S] + [1 - P_t(r_j)][\rho_0(r_j)\Delta S_0 + \rho_1(r_j)\Delta S_1 + \dots] \quad (14)$$

式中: 右侧第 1 项对应于移动后找到源的熵降, 是“开发”项, 倾向于运动到最大似然点; 第 2 项则对应于在  $r_j$  处找不到源的替代情况, 代表保守的“探索”, 从接收到的其他消息中获得信息增益。可以看到信息趋向算法自然地结合了开发性和探索性倾向, 使二者达到了平衡。

### 3 实验及结果分析

本节首先完成了信息趋向算法的仿真实现, 后进行大量的对比实验对算法性能进行了分析, 并从搜索路径单元的角度对算法进行了改进。实验采用 Python 语言进行编程, 使用 Visual Studio Code 软件进行编译。

#### 3.1 信息趋向算法的实现

仿真实验结果如图 7 所示, 设定源位置为 (0.1, 0.5), 图 7 中使用星形标记, 搜索起点为 (1.9, 0.9), 图 7 中使用方形标记, 搜索路径单元为四边形路径单元, 仿真时间步长为 0.1 s, 搜索范围:  $x: 0 \sim 2, y: 0 \sim 1$ 。

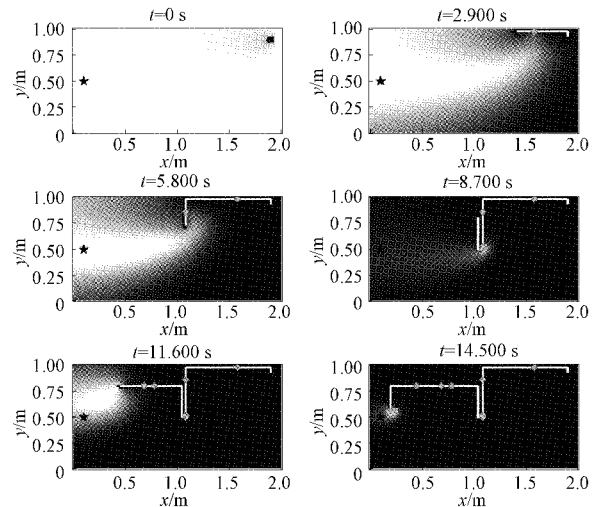


图 7 Infotaxis 搜索轨迹变化

将搜索过程等分为 6 个时间段, 图 7 中各子图分别展示了各时间节点搜索状态。背景为气味源概率分布地图, 是采用 gray 灰度变化形式绘制的热力图, 用以表示不同位置的源后验概率大小, 白色代表的数值最大, 黑色代表的数值最小。图 7 中的折线表示搜索轨迹, 轨迹上的菱形标记代表击中, 即检测到气味。

由仿真结果可以观察到, 搜索伊始, 气源位于搜索域各点均有很大的可能性, 因而第 1 个子图主要以白色为主, 各点概率均较大; 后在搜索过程中, 概率地图随搜索进程而不断更新、变化, 时而发生击中, 搜索器逐渐向着概率更大的位置进行移动; 直到最后, 源后验概率仅在某极小的区域内取得较大值, 而其他位置因数值较小而显示以黑色为主, 终

寻得释放源。

仿真过程中,在修改参数进行多次实验后发现气源检测成功率较高,验证了信息趋向算法的可行性和有效性。

### 3.2 搜索距离长短情况对算法的影响

在气源搜索领域中,搜索距离在一定程度上会影响搜索器移动轨迹的选择,不同的搜索算法适应的搜索距离不同。为研究搜索距离长度对于信息趋向算法的影响,在不同搜索距离的情况下分别进行仿真搜索实验,并对比分析实验结果。

长距离搜索仿真实验中,设定源位置为(0.1,0.5),搜索起点为(1.9,0.9),经计算,直线距离为1.84 m,其搜索轨迹变化如图7所示。短距离搜索仿真实验中,设定源位置为(1.1,0.4),搜索起点为(1.45,0.65),直线距离为0.43 m,其搜索轨迹变化如图8所示。

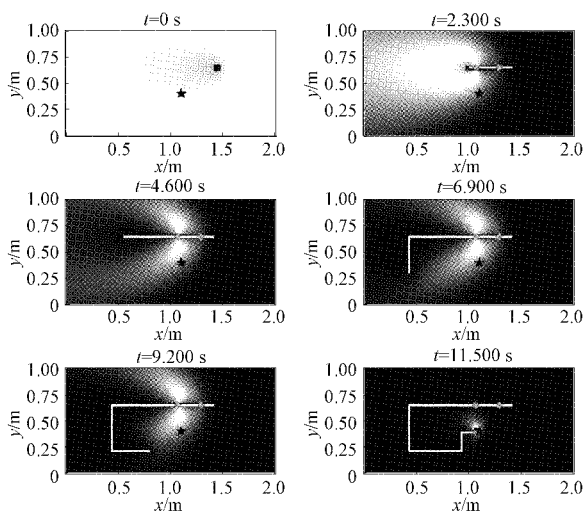


图8 短距离搜索路径

统计搜索过程中搜索器的运动情况,对比分析使用信息趋向算法进行气源搜索时搜索距离对于搜索进程产生的影响,如图9中的柱状图所示。可见,各组中搜索器做横越风、逆风运动所占的比例均高于顺风运动。而在不同搜索距离的情况下,相较于长距离组,短距离搜索过程中横越风、逆风运动的占比均较低,顺风运动的比例则较高。

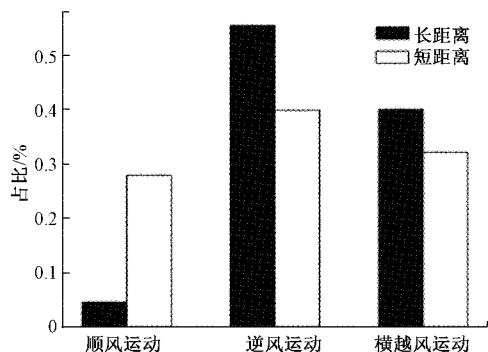


图9 Infotaxis 运动风向性分析

实验结果表明,搜索距离长度会影响信息趋向搜索的运动风向性,信息趋向算法不同于仅进行逆风搜索的基于风趋向性的搜索算法,而是在进行短距离搜索时以增大顺风搜索比例的方式更精准地实现释放源定位,不易丢失目标。因而可以看出信息趋向搜索算法可适应不同搜索距离的气源搜索情况,具有一定的鲁棒性。

### 3.3 路径单元形状对搜索的影响

在信息趋向搜索中,当前搜索器处于某一位置,将其可能的下一步的位置点称为一个路径单元。如图10(a)所示为信息趋向算法基本的四边形搜索路径单元,三角形为搜索器当前位置,圆形为下一步移动到的位置。本文研究了前人提到的几种不同的路径单元,如图10(c)、(d),并提出了一种改进版的四边形路径单元,如图10(b)所示。

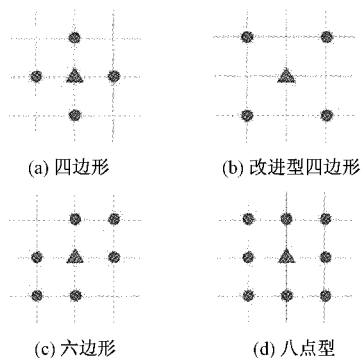


图10 搜索路径单元示意图

仿真实验中,设定源位置为(0.1,0.5),搜索起点为(1.85,0.85),对比观察不同搜索路径单元下的搜索结果,如图11所示。

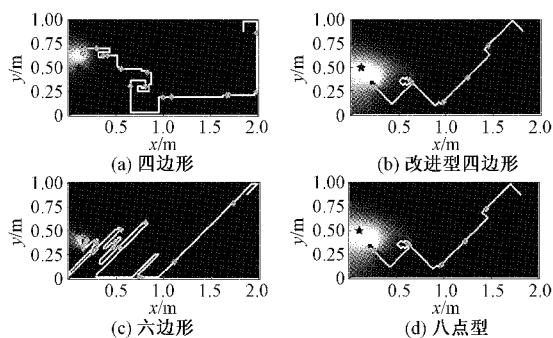


图11 不同搜索路径单元情况搜索轨迹

观察记录其搜索时间,基本四边形路径单元情况下搜索时间为30.3 s,改进型四边形路径单元搜索时间为12.3 s,六边形路径单元搜索时间为32.2 s,八点路径单元搜索时间为12.1 s。

对比不同搜索路径单元下的气源搜索结果,可以看出,在此模拟源点和搜索起点设定情况下,选用不同的路径单元均可找到气源,但搜索效率不同。其中八点路径单元下的搜索时间最短,搜索路径最短,其搜索效率最高,而六边形路径单元下搜索时间最长,效率也最低。可见,选择形状

对称的路径单元更利于搜索过程中路径的选择,可减少搜索时间,获得更高的搜索效率;同时,在此仿真情况中,使用方向选择更全面的路径单元更利于在较短时间内找到气源。

为获得更为客观的验证结论,使用其他参数进一步进行实验研究,如表 3 所示为 10 次实验的实验结果。实验设定最长搜索时间为 40 s,若超时即为搜索失败。

表 3 路径单元测试实验数据

实验 序号	起点 位置	搜索时间/s			
		四边形	改进型 四边形	六边形	八点形
1	(1.83,0.83)	19.00	11.90	34.20	11.90
2	(1.9,0.9)	17.50	22.40	37.90	25.30
3	(1.85,0.9)	超时	13.40	31.00	13.60
4	(1.94,0.55)	20.90	10.00	23.90	16.30
5	(1.8,0.93)	27.60	22.90	26.30	24.10
6	(1.8,0.9)	18.00	24.20	超时	22.40
7	(1.91,0.9)	超时	10.40	26.10	26.10
8	(1.7,0.8)	16.80	21.60	24.50	17.00
9	(1.7,0.63)	28.60	17.00	28.10	19.20
10	(1.94,0.8)	22.70	20.10	35.80	35.80
平均	—	21.39	17.39	29.75	21.17

由实验结果可知,同前面使用特定值进行实验时的分析,使用六边形路径单元搜索时间最长,因而实际搜索时,不推荐使用。另一方面,可以看出,使用基本的四边形路径单元或六边形路径单元进行仿真搜索时,均存在搜索失败的情况,而使用改进型的四边形路径单元和八点路径单元进行搜索时可以适应各种搜索情况,未出现失败。对比二者平均搜索时间,改进型四边形路径单元移动步数更少,搜索时间更短,同时,就其计算量来看,四边形路径单元中仅有 5 种移动情况,而八点路径单元中包括 9 种移动情况,因而改进型四边形路径单元计算量更小,其搜索效率更高。同时,改进型四边形路径单元平均搜索时间较基本的四边形路径单元更短。总的来说,对四边形路径单元的改进提升了信息趋向算法的性能。

#### 4 结 论

随着人们对于气体的应用逐步增加,有毒有害气体泄漏后的泄露源搜索作为极重要的灾害应对措施逐渐被国内外研究学者关注。传统的气源搜索策略是利用气味浓度梯度或风向作线索进行搜索,然而在气味浓度较低的稀疏环境中,传统算法容易陷入局部最高浓度点,而导致搜索失败。信息趋向算法是一种将信息作为搜索线索、追求信息熵降低的释放源搜索算法,实现了探索与开发的平衡,表现出较好的搜索性能。本文主要针对信息趋向搜索算法在稀

疏环境中进行仿真实验,得到如下结论。

使用信息趋向算法进行气源搜索的过程中,概率地图随搜索进程而不断更新、变化,同时搜索路径的选择也随概率地图而变化,引导搜索器逐渐向着概率更大的位置进行移动,逐步减小信息熵以减小不确定度,直到最终寻得释放源。证明了信息趋向算法的可行性和有效性。

信息趋向算法中,搜索器更趋向于逆风运动和横越风运动,搜索距离的长度会影响信息趋向搜索的运动风向性,当搜索距离较短时,顺风运动比例增大,以实现更为精准的定位,不易丢失目标。证明了信息趋向算法具有一定的鲁棒性。

搜索路径单元的选取会影响信息趋向算法性能。与其他类型的搜索路径单元相比,本文提出的改进型四边形路径单元具有计算量较小、平均搜索时间较短且条件适应性较高的优点,具有很大优势,提升了信息趋向算法的性能。

#### 参考文献

- [1] 王艺博. 障碍物场景下基于信息熵的气体源定位搜索[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [2] 潘新平,郑艳华,林荣列,等. 基于气体扩散模型的气体源定位系统[J]. 国外电子测量技术,2017,36(9):72-76.
- [3] 廖海龙. WSN中基于气体扩散模型的气体源点定位研究[D]. 汕头:汕头大学,2011.
- [4] HUTCHINSON M, LIU C, CHEN W H. Information-based search for an atmospheric release using a mobile robot: Algorithm and experiments[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27: 1-15.
- [5] LUO B, MENG Q H, WANG J Y, et al. A flying odor compass to autonomously locate the gas source[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(1): 137-149.
- [6] 张雨,陈熙源,朱敏,等. 基于斜率约束和回溯搜索的水下多目标跟踪方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(9):81-88.
- [7] 朱晓坡,徐仕源,张卓,等. 一种多目标水下定位系统信号处理算法[J]. 国外电子测量技术,2020,39(10):19-24.
- [8] 马学森,谈杰,陈树友,等. 云计算多目标任务调度的优化粒子群算法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(8):133-143.
- [9] FAN S R, HAO D X, SUN X D, et al. A study of modified infotaxis algorithms in 2D and 3D turbulent environments [J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2020, DOI: 10.1155/2020/4159241.
- [10] 张思齐,崔荣鑫,徐德民. 稀疏环境中信息趋向性搜索算法性能分析[J]. 机器人,2013,35(4):432-438.
- [11] HUTCHINSON M, OH H, CHEN W H. Entrotaxis

- as a strategy for autonomous search and source reconstruction in turbulent conditions[J]. *Information Fusion*, 2018, 42: 179-189.
- [12] RODRÍGUEZ J D, GÓMEZ-ULLATE D, MEJÍA-MONASTERIO C. Geometry-induced fluctuations of olfactory searches in bounded domains [J]. *Physical Review E*, 2014, 89(4): 042145.
- [13] PANG R, VAN BREUGEL F, DICKINSON M, et al. History dependence in insect flight decisions during odor tracking [J]. *PLOS Computational Biology*, 2018, 14(2): e1005969.
- [14] 李万莉. 基于高斯模型的复杂地形下天然气泄漏扩散特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- [15] 李子豪. 危险气体泄露定位在线监测系统的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2019.
- [16] 张苗苗. 危险气体源定位监测系统设计与实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [17] VOGES N, CHAFFIOL A, LUCAS P, et al. Reactive searching and infotaxis in odor source localization[J]. *PLOS Computational Biology*, 2014, 10(10), DOI:10.1371/journal.pcbi.1003861.
- [18] SONG C, HE Y Y, LEI X K. Autonomous searching for a diffusive source based on minimizing the combination of entropy and potential energy [J]. *Sensors*(Basel, Switzerland), 2019, 19(11):2465.

### 作者简介

邓思丹, 本科, 主要研究方向为信号处理。

E-mail: sidan\_deng@163.com

范书瑞, 副教授, 博士, 主要研究方向为无人系统自主探测, 涉及嵌入式人工智能、无人系统智能感知、环境遥感与遥测等领域。

E-mail: fansr@hebut.edu.cn

张艳(通信作者), 硕士, 讲师, 主要研究方向为信号处理。

E-mail: zhangyan@hebut.edu.cn