

· 自动化技术 ·

基于分布式传感器阵列的静态气体源定位方法

陈立伟¹, 杨建华², 孙亮², SHI Mi-mi³

(1. 郑州大学电气工程学院 郑州 450001; 2. 西北工业大学自动化学院 西安 710072;

3. Arbeitsbereich Linguistik University of Münster Münster 德国 48149)

【摘要】基于气体湍流扩散模型提出了适用于稳定风场的静态气体源定位方法,采用分布式传感器阵列对空间内的目标气体浓度进行检测,依靠多点观测结果计算气体源位置。定位算法预先设定气味源的潜在范围,采用遍历计算的方法将气味源定位问题转变为根据最小二乘法则在预设范围内求取气体源坐标最优解的问题。通过仿真实验对新算法进行验证,建立金属氧化物气敏传感器阵列及信号采样系统,以乙醇蒸汽为目标气体在实验室环境下进行了实际气体源定位实验。

关键词 金属氧化物气敏传感器; 气体源定位算法; 传感器阵列; 信号处理; 湍流扩散模型
中图分类号 TP23 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.01.010

Odor Source Localization Algorithm Based on Spatially Distributed Sensors Array

CHEN Li-wei¹, YANG Jian-hua², SUN Liang², and SHI Mi-mi³

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University Zhengzhou 450001;

2. School of Automation, Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072;

3. Arbeitsbereich Linguistik University of Münster Münster Germany 48149)

Abstract Based on the turbulence model, this paper proposes an approach of odor source localization which is designed to find the static odor source in stable wind field. The spatially distributed sensors array is adopted to monitor odor concentration on multiple spots. And the odor source can be localized depending on the measuring results of sensors array. The optimal solution of the source position is estimated with location algorithm in a predetermined range. By using traversal calculation, the odor source localization problem is converted into the optimal solution based on least-square. Comparing with other odor source location algorithms, the new algorithm can operate without known wind speed and diffusion coefficient. And the traversal calculation avoids being trapped in local optimum. Simulation experiments are performed to verify the localization algorithm. The metal oxide semiconductor sensors array and the sampling system are designed. And the ethanol odor localization experiments are operated in the laboratory.

Key words metal oxide semiconductor odor sensor; odor source localization; sensors array; signal processing; turbulence model

现代工业生产中的常见事故如化学仓储泄露、管道破裂、火灾等都会产生大量的有害气体、烟尘。快速、精准地对气体泄露源进行定位能够有效确定灾源位置,减少灾害损失。气体源定位技术还可以广泛应用于遇难人员搜救、毒品及爆炸物搜索等领域,具有很高的研究价值。随着气体传感技术的不断发展,20世纪90年代以来国外研究人员开始从事气体源定位领域的相关研究并取得了大量成果^[1-8]。

我国在该领域的研究起步较晚,近年来也获得了显著进步^[9-14]。

现有的气味源定位方法根据工作原理分为主动嗅觉法和静态定位法^[1]。主动嗅觉法出现较早^[4-8],该方法将移动机器人技术与便携式电子鼻技术相结合主动搜索气味源,因此也被称为“主动电子鼻法”^[13]。移动机器人凭借车载气体传感设备在运动轨迹的多个位置上对目标气体进行检测,通过搜寻算法对机

收稿日期: 2012-10-22; 修回日期: 2013-09-25

基金项目: 国家青年自然科学基金(11204242)

作者简介: 陈立伟(1983-),男,博士,主要从事气体源定位方面的研究。

器人行进的步长与方向进行调整直至最终找到气体源。这种方法不需要依靠精确的气体扩散模型且受湍流影响较小,但其定位效果很大程度上受到地面环境及机器人自身条件的限制。因此,近年来许多科研工作者开始研究静态气体源定位技术^[1-3,9,11-12]。静态气体源定位利用固定的分布式气体传感设备根据气体扩散的浓度梯度对气味源进行定位。与主动嗅算法相比,静态定位法不需要接近气体源就能够实现远距离定位,通过对模型参数进行修正能够适用于多种风场环境。本文提出了一种基于分布式气体传感器阵列的静态气体源定位法,根据气体湍流扩散模型设计了气体源定位算法。

1 湍流扩散模型

常用于预测扩散气体浓度的模型有BM(britter McQuaid)模型、三维有限元模型、高斯扩散模型以及湍流扩散模型。湍流扩散模型最早应用于静态气体源定位实验,它通过气体在二维平面内的浓度分布描述了平流风场中的气体湍流扩散情况,是目前静态气体源定位领域应用最为广泛的数学模型^[2]:

$$C(x, y, x', y', t) = \frac{q \exp\left(\frac{V(x-x')}{2K}\right)}{\pi^{1.5} K d} \times \int_{(d/2\sqrt{Kt})}^{\infty} \exp\left(-\zeta^2 - \frac{V^2 d^2}{16K^2 \zeta^2}\right) d\zeta \quad (1)$$

式中, 设气体源处于 z' 平面, q 为气体泄露速度; t 为气体泄露时间; V 为风速且风向与 x 轴正方向一致; K 为气体扩散系数; d 为 $z=z'$ 平面上任意点 (x, y, z') 与气体源 $S(x', y', z')$ 的欧几里得距离; C 为 t 时刻点 (x, y) 处的气体浓度。设 $t \leq 0$ 时任意位置上气体浓度为 $C=0$, 则当 $t \rightarrow \infty$ 时, 由式(1)可得:

$$C(x, y, x', y', \infty) = \frac{q \exp\left(-\frac{V}{2K}(d - (x - x'))\right)}{2\pi K d} \quad (2)$$

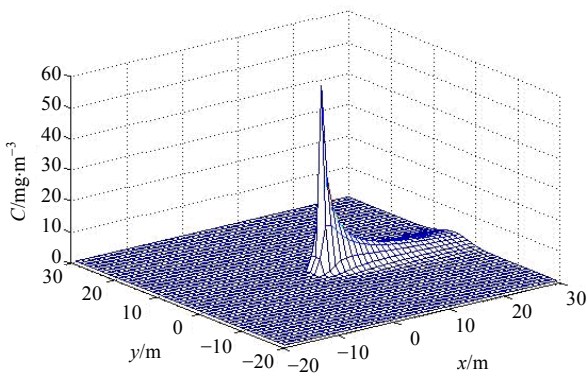


图1 气体浓度分布

设气体源与传感器同置于 $z=z'$ 平面上, 气体源点与坐标系原点重合, $K=0.04 \text{ m}^2/\text{s}$, $V=0.02 \text{ m/s}$, $q=5 \text{ mg/s}$, 风向与 x 轴正方向一致。当 $t \rightarrow \infty$ 时在气体源附近出现气体浓度最高值, 气体扩散方向与风向一致, 如图1所示。文献[1]的实验证明即使在微风情况下($V=0.02 \text{ m/s}$)湍流作用依然能够帮助气体迅速扩散, 气体源附近风场的气体浓度将在短时间内快速收敛于一个稳定值, 这一稳定值与式(2)的计算结果一致^[1]。

2 气体源定位算法

2.1 基于最小二乘的定位计算

最小二乘估计是以误差平方和最小为准则, 根据观测数据估计模型中未知参数的基本参数估计方法。最小二乘估计的基本思路是已知 $Y=f(X, \theta)$, Y 为输出向量, X 为输入向量, θ 为参数向量, 经过 M 次实验得到观测值 $(X_1, X_1), (X_2, X_2), \dots, (X_m, X_m)$, 求解参数向量 θ 使得式(3)为最小:

$$Q = \sum_{k=1}^M [Y_k - f(X_k, \theta)]^2 \quad (3)$$

根据系统的类别可以分为线性最小二乘估计与非线性最小二乘估计, 对于复杂的非线性系统通常采用迭代、搜索的方法求取最优解, 也可以结合粒子群优化以及遗传算法等复杂方法对特殊问题进行处理, 但所求最优解使误差平方和最小的这一基本思路与线性最小二乘法的基本原则相同。

结合湍流气体扩散模型与分布式传感器阵列的应用特点, 提出了基于最小二乘法的气体源定位算法。设包含 N 个传感器节点的传感器阵列与气体源在同一水平面内, 设 S_1 为传感器阵列的基准节点, 将节点观测值与坐标代入式(2)可得:

$$C_i / C_1 = \frac{d_1 \exp\left(-\frac{V}{2K}(d_i - (x_i - x_0))\right)}{d_i \exp\left(-\frac{V}{2K}(d_1 - (x_1 - x_0))\right)} \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

设 $\gamma = \frac{V}{2K}$ 为环境参数, 式(4)两边取对数得到:

$$\ln C_i - \ln C_1 = \ln d_1 - \ln d_i + \gamma(d_1 - d_i - x_1 + x_i) \quad i = 2, 3, 4, 5, 6 \quad (5)$$

式(5)为非线性模型, 未知参数包括环境参数 γ 、气体源坐标 x', y' , 对静态气体源的定位可以转为式(5)的最优参数估计问题。采用传统的迭代、搜索算法容易出现陷入局部极值、收敛性差、对迭代初值敏感等问题。而在实际工作中由于传感器阵列受到风

向、传感器阈值和工作范围等实际条件的制约,只能对出现在上风处一定范围内的气体源进行有效检测,因此可以分3步实现气体源定位。

1) 根据传感器性能与阵列尺寸预先设定气体源 (x',y') 的潜在范围 A ,依照所需定位精度将 A 等分为 l 个区域,并设区域 a_l 的中心坐标 (x_l',y_l') 为区域坐标。

2) 将 a_l 的坐标 (x_l',y_l') 带入式(5),根据最小二乘法则得到式(6),由式(6)极易求得 Q_l 的最小值 Q_{lmin} 。

$$\begin{cases} Q_l = \\ \sum_{i=2}^6 [\ln C_i - \ln C_1 - (\ln d_{li} + \ln d_{ri} + \gamma(d_{li} - d_{ri} - x_1 + x_i))]^2 \\ d_{li} = \sqrt{(x_1 - x_l')^2 + (y_1 - y_l')^2} \\ d_{ri} = \sqrt{(x_i - x_l')^2 + (y_i - y_l')^2} \\ i = 2, 3, 4, 5, 6 \end{cases} \quad (6)$$

3) 依照步骤2)对所有 a_l 区域进行计算得到各个区域内的 Q 最小值: $Q_{1min}, Q_{2min}, \dots, Q_{lmin}$ 。通过比较得到范围 A 内的极值 Q_{Amin} ,从而求得对应的区域 a_{min} 为气体源坐标。与经典的交叉定位法相比^[1-2]新定位法不需要预先测定风速和气体扩散系数,通过预设范围与定位精度使运算量得到控制,并且有效避免了局部最优的干扰。

2.2 定位算法仿真实验

对湍流扩散模型的气体浓度分布引入10%的随机误差,气体源坐标、传感器节点坐标如图2所示。图中, S_i 为传感器, R 为气体源,深色区域 A 为气体源可能存在的预定范围。 A 的预设范围为: $0 \text{ m} \leq x' \leq 7 \text{ m}$, $0 \text{ m} \leq y' \leq 10 \text{ m}$,预设定位精度为5 cm,将 A 分割为 2.8×10^5 个 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的小型区域 a_l 。使用定位算法对 a_l 进行遍历计算,预设范围内的计算结果如图3所示,图中, x 轴、 y 轴为平面坐标, z 轴代表小块区域 (x,y) 上的运算结果 $S = \log Q_{lmin}$ 。

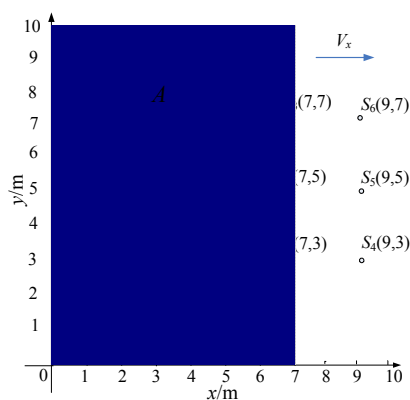


图2 气体源坐标、传感器节点坐标示意图

气体源坐标计算结果为 $(4.95 \text{ m}, 4.90 \text{ m})$,与实际坐标的距离误差 $e=0.403 \text{ m}$ 。改变气体源坐标,

对气体源定位算法进行了20次仿真实验,距离误差均小于 0.5 m 。将随机误差提高至20%后的20次仿真实验结果,距离误差均小于 1.2 m 。仿真实验证明新的定位算法能够在一定误差范围内实现对气体源的定位。

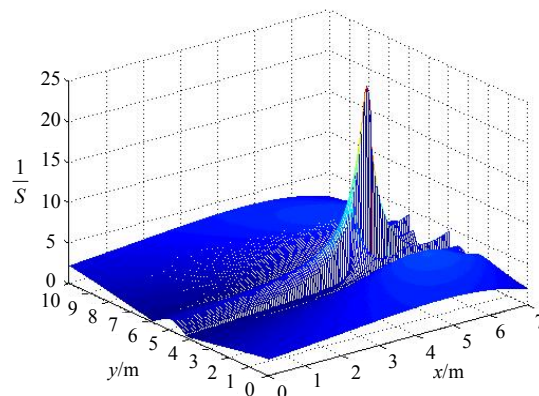


图3 预设范围内的遍历计算结果

3 实验系统设计

静态气体源定位系统包含分布式传感器阵列和信号采集系统两部分,阵列包含6个自制的气敏传感器节点,每个传感器节点由金属氧化物气敏传感器TGS2610-J00^[15](FIGARO公司)、初级信号调理电路和屏蔽线组成。TGS2610-J00在使用前以乙醇蒸汽为标定气体在容量为 1.5 m^3 的试验箱内分别进行了重新标定^[16]。信号采集系统由二级信号调理板、NI6009数据采集卡(NI公司)与计算机组成,采样控制程序在labview环境下编写,应用虚拟仪器技术实现对传感器阵列的实时采样与数据保存,静态气体源定位系统如图4所示。

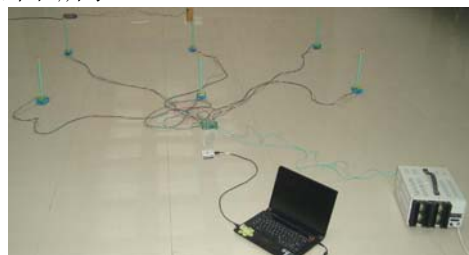


图4 基于分布式传感器阵列的静态气体源定位系统

4 气体源定位实验

气体源定位实验在 $12 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ 的实验室内进行,利用3个低速运行的负压风机与4个进气风窗在实验室中央形成稳定的人工风场^[11]。在直径 10 cm 的金属盘内倒入 20 ml 乙醇(分析纯)并在杯底安装 60° 的恒温电热片加热形成乙醇蒸汽源^[1]。气体源放置在 $7 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的预设范围内,分布式传感器阵列分

两排放置在预设范围的下风处, 传感器节点间距为 2 m 排列, 如图2所示。

气体源与传感器节点的位置如图2所示, 数据采集卡以 10 Hz 的采样频率对传感器阵列进行连续采样, $t=0$ 时将乙醇倒入金属杯, 传感器阵列在实验开始后 12 min 内的响应曲线如图5所示, 10 min 后传感器节点响应趋于稳定。取传感器节点在第 12 min 内响应均值作为 C_i 代入定位算法, 预设范围内的遍历计算结果如表1所示, 气体源坐标计算结果为(5.05 m, 5.15 m)与实际位置误差为0.652 m。改变气体源坐标, 采用同样方法共进行了6次定位实验, 结果与误差如表1所示。实验证明新的定位算法能够在一定范围内实现对乙醇气体源的定位, 但依然存在距离误差, 这主要是由传感器的测量误差、模型偏差以及实验环境所引起的。

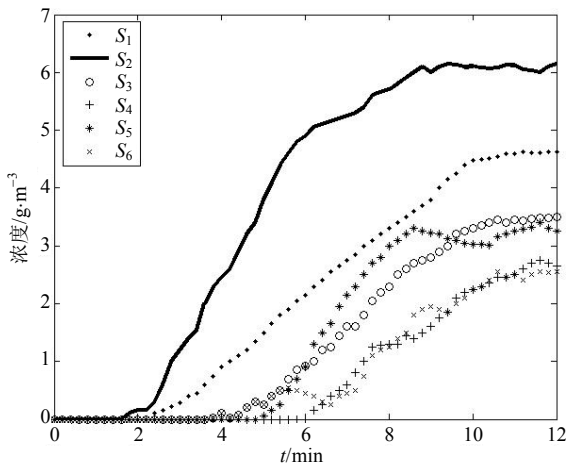


图5 传感器阵列在实验开始后 12 min 内的响应曲线

表1 实际定位实验的结果与误差

标号	实际坐标/m	计算结果/m	误差距离/m
1	(5.00,4.50)	(5.05,5.15)	0.652
2	(5.00,3.50)	(5.45,3.40)	0.461
3	(5.00,6.50)	(4.35,6.30)	0.680
4	(4.00,4.50)	(4.65,4.60)	0.658
5	(4.00,3.50)	(3.50,3.60)	0.510
6	(4.00,6.50)	(4.55,6.45)	0.552

5 结果与讨论

基于气体湍流扩散模型所设计的静态气体源定位算法以观测值误差平方和最小为原则, 通过对预设范围内的遍历计算求取气体源坐标最优解。仿真实验证明该算法能够在稳定风场中实现对静态气体源的定位。同时设计了分布式金属氧化物气敏传感器阵列以及信号采集系统, 以乙醇蒸汽为目标气体在实验室环境下进行了静态气体源定位实验。实验结果证明本文的定位算法能够对静态气体源进行定

位, 但计算结果与实际位置依然存在距离误差。

参 考 文 献

- [1] MATTHES J, GROLI L, HUBERT B K. Source localization by spatially distributed electronic noses for advection and diffusion[J]. Signal Processing, IEEE Transactions on, 2005, 53(5): 1711-1719.
- [2] MATTHES J, GROLL L, HUBERT B K. Optimal weighting of networked electronic noses for the source localization[C]//Proceedings of the 2005 Systems Communications. [S.l.]: IEEE, 2005.
- [3] CAI J, LEVY D C. Tracking dynamic source direction with a novel stationary electronic nose system[J]. Sensors, 2006, 11(6): 1537-1554.
- [4] HAYES A T, MARTINOLI A, GOODMAN R M. Distributed odor source localization sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2002, 2(3): 260-271.
- [5] NAKAMOTO T, ISHIDA H, MORIIZUMI T. An odor compass for localizing an odor source[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1996, 35(1-3): 32-36.
- [6] LIU Zhen-zhang, LU Tien-fu. Multiple robots plume-tracing in open space obstructed environments[C]//Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. [S.l.]: IEEE, 2009: 2433-2439.
- [7] MEHMET E A, MOLLY H S. Model-based solution techniques for the source localization problem[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(6): 895-904.
- [8] VERGASSOLA M, VILLERMAUX E, SHRAIMAN B I. 'Infotaxis' as a strategy for searching without gradients[J]. Nature Letters, 2007, 445(25): 406-409.
- [9] 陈立伟, 杨建华, 崔博. 基于金属氧化物气体传感器的气味罗盘的实验分析研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(11): 1532-1535.
CHEN Li-wei, YANG Jian-hua, CUI Bo. Experimental study on odor compass system based on metal oxide gas sensors[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(11): 1532-1535.
- [10] 张小俊, 张明路, 孟庆浩, 等. 一种基于动物捕食行为的机器人气味源定位策略[J]. 机器人, 2008, 30(3): 269-272.
ZHANG Xiao-jun, ZHANG Ming-lu, MEMG Qing-hao, et al. A gas/odor source localization strategy for mobile robot based on animal predatory behavior[J]. Robot, 2008, 30(3): 269-272.
- [11] 匡兴红, 邵惠鹤. 基于传感器网络的气体源定位方法研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7): 1464-1467.
KUANG Xing-hong, SHAO Hui-he. Study of plume source localization based on WSN[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(7): 1464-1467.
- [12] 庞丽萍, 常海娟, 曲洪权. 飞行器舱室突发污染源定位及强度估计方法研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(1): 282-286.
PANG Li-ping, CHANG Hai-juan, QU Hong-quan. Source identification of emitting characters in aircraft cabin[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(1): 282-286.

(下转第221页)