

基于气体扩散模型的气体源定位系统*

潘新平 郑艳华 林荣列 王婉芝 陆奕海 黄清辉 陈锐贤
(广州大学物理与电子工程学院 广州 510006)

摘要:为了快速准确地确定气体泄漏源的位置,利用无风连续泄漏点源浓度的扩散模型,提出了基于加权质心算法的气体源定位法。采用气敏传感器阵列对目标区域的气体浓度进行检测,并通过 ZigBee 无线传感器网络把收集的数据反馈给协调器,协调器把打包好的数据传递给主处理器,处理器依靠测量的结果计算出气体源位置,并可视化显示。在目标区域为 $4\text{ m}\times 4\text{ m}$,以乙醇蒸汽为实验目标气体进行气体源定位实验。结果表明,平均定位结果相对误差不超过 6%,验证了该方法的准确性。

关键词:气体扩散模型;加权质心算法;STM32 处理器;ZigBee 无线传感器网络;气体源定位

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4010

Gas source location system based on gas diffusion model

Pan Xinping Zheng Yanhua Lin Ronglie Wang Wanzhi Lu Yihai Huang Qinghui Chen Ruixian
(School of Physics and Electronic Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to quickly and accurately determine the position of gas leakage source, the weighted centroid method is proposed. The gas sensors are placed near the gas leakage detection area and the data collected from wireless sensor network nodes is sent to the coordinator through ZigBee wireless sensor network. Then, the packaged data coming from the coordinator is passed to the main processor and the location of the gas source is calculated by the main processor based on the weighted centroid method by using the measurement results and the results are displayed. Experiments with ethanol vapor as the target gas are conducted and the relative positioning error is no more than 6% in a area of $4\text{ m}\times 4\text{ m}$, and the correction of the gas source position method is illustrated.

Keywords: gas diffusion model; weighted centroid method; STM32 processor; ZigBee wireless sensor network; gas source position

0 引言

随着工业的迅速发展,存储气体的仓库越来越多,当发生意外事件导致气体发生泄漏,或者一些工厂的有毒危险气体发生偷排,如不能及时寻找泄漏的地点,将对人们的生活和安全带来极大的隐患^[1-4]。从 20 世纪 60 年代开始就有众多研究人员对危险气体的扩散规律进行了研究。现有的气体扩散模型主要有高斯模型、BM 模型、FEM3 模型、箱及相似模型、三维现象传递模型、浅层模型以及板块模型等^[5-6]。上述模型都有各自的局限性,不同的扩散模型适用于不同类型的气体,只有通过实验测试才能找出特定气体泄漏规律适用的模型^[7-9]。

现有的气体源定位方法主要分为主动嗅觉法和静态定位法,主动嗅觉法主要是移动机器人主动搜索气体源^[10-11],此方法缺点是受地面环境及机器人自身条件限制。

静态定位法不需要接近气体源就能够实现定位,通过对气体扩散模型参数进行修正能够适用于不同气体源的定位。在无线传感器网络定位算法中主要包括基于最小二乘法算法、基于三边算法、基于神经网络算法^[12-14]等。当传感器数目不太多时,前两种算法实现方法较为简单,但定位结果误差较大,随着传感器数目增多,其计算复杂度将急剧增大^[12-13];基于神经网络算法需要大量数据样本训练,增加系统的成本^[14]。本文利用无线传感器网络阵列和加权质心算法对气体源进行了定位研究,并进行了

收稿日期:2017-04

* 基金项目:国家自然科学基金(60971093)、大学生创新项目(201511078063)、广东省高等教育教学改革项目、广东省攀登计划项目(pdjh2017b0395)资助

实验验证,可进一步提高定位精度。

1 气体扩散模型

由菲克扩散定律可知^[7],在无风连续泄漏点源的扩散模型中,扩散过程中浓度随时间的变化率等于该处的扩散通量随距离变化率的负值。进而得到经典的扩散方程^[7]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中: C 表示 t 时刻 (x, y, z) 处气体浓度,单位为 mg/m^3 ; u 表示风速,单位为 m/s ; t 表示泄漏气体扩散时间,单位为 s ; K_x, K_y, K_z 分别表示 x, y, z 轴方向上的湍流扩散系数,单位为 m^2/s 。

当气体泄漏源与坐标系原点重合,并设气体恒以泄漏速度 Q (源强 mg/s)在 t_0 时刻开始扩散,在无风时($u = 0 \text{ m}/\text{s}$)有 $K_x = K_y = K_z = K$,则无风连续泄漏点源的扩散模型可简化为微分方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

在初始条件 $x = y = z = 0, C \rightarrow \infty$ 和边界条件 $x = y = z = \infty, C \rightarrow 0$ 下的解为:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{4K\pi d} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{d}{\sqrt{4Kt}}}^{\infty} e^{-\varphi^2} d\varphi \quad (3)$$

这里用 $d(d = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2})$ 表示测量点 (x, y, z) 到源点 (x_0, y_0, z_0) 的距离。

又因研究的是稳态下的模型,即达到平衡状态,等价于 $t \rightarrow \infty$ 时的情况,这时有:

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{d}{\sqrt{4Kt}}}^{\infty} e^{-\varphi^2} d\varphi = 1 \quad (4)$$

由于场源 Q 和扩散系数 K 未知,未知参数越多模型越难预测,这里将 $P = Q/K$ 定义为场源环境参数。所以模型进一步简化为:

$$C(x, y, z, t) = \frac{P}{4\pi d} \quad (5)$$

而在稳态下,浓度仅是位置的函数,与时间 t 无关,所以(5)式转化为:

$$C(x, y, z) = \frac{P}{4\pi d} \quad (6)$$

2 系统设计

2.1 系统的硬件设计

系统的硬件结构总体上包括终端和客户端两部分。在终端处有 ZigBee 节点和气敏传感器,客户端包括 STM32f407 核心处理器、SD 卡模块、温度传感器和 TFT 触摸显示屏。在每个 ZigBee 节点处配置 2 个气敏传感器,通过 ZigBee 节点处自身的 cc2530 处理器使用内部 ADC 采集气敏传感器的电压,每个节点把数据传递到协调器,协调器把每个节点的数据按顺序打包压缩,通过串口通信发送到 STM32f407 处理器。STM32 通过中断接

收到串口传递的数据,对数据进行初步处理,并根据定位算法进行信号处理,将状态信息和处理的结果实时显示在 TFT 屏幕上并保存在 SD 卡内。

2.1.1 气体浓度检测电路的设计

选择正确的传感器是整个系统测量过程中最为关键的一步,假如不能通过传感器对原始的参数进行可靠准确的测量,那么后续的信号转换、信息处理、数据采集与实时控制这些功能都将无法实现;本实验采用 FIGARO 公司设计的酒精传感器 TGS2620 探头,TGS2620 探头对有机溶剂与其他挥发性气体具有很高的敏感度,最适合用于有机溶剂气体检测仪。传感器模块的标准测试电压为 5.0 V。

半导体气敏传感器的输出阻抗往往比较大,从几十 Ω 到 $\text{M}\Omega$,而相应的 A/D 输入端阻抗较小,为了使输入阻抗同其匹配,因而在传感器模拟量输出口加入跟随器——MCP6022,高阻抗信号输入跟随器,阻抗变换后,输出和 A/D 相匹配的低阻抗信号,将输入对 A/D 的影响降至最低,提高对负载电阻电压的采样精度。

2.1.2 终端节点电路的设计

终端节点电路选择 ZigBee 节点作为传送电路的无线发送部分。ZigBee 节点的控制芯片使用 TI 公司的 CC2530,该芯片是使用 ZigBee 标准的一个片上系统解决方案,内部集成了 8051 内核处理器和高性能的射频收发器。本芯片采用了低电压和低功耗设计,内置最大 256 KB 的系统可编程 Flash,8 通道 12 位 A/D 转换器、看门狗定时器和睡眠定时器等功能。CC2530 的 UART0 引脚是 P0_2, P0_3,用于和外部芯片进行通信,本实验中用于与核心处理器 STM32 串口通信。

2.1.3 主控制系统的选择

中央控制器采用的半导体意法(ST)官方公布的基于 Cortex-M4 内核的 STM32F407 单片机,主频为 168 MHz,具有硬件 FPU 单元以及 DSP 指令,适用于需要浮点运算或 DSP 处理的应用,STM32F407 拥有高速的时钟频率,丰富的外设和接口以及对中断多级嵌套的支持,使其产生极高的代码执行效率和数据处理响应能力,可以运行 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 等实时操作系统和 GUI 图形库,在有限的存储空间上展现着 ARM 内核所带来的极佳性能。而且其自带的 FSMC 复用接口、SDIO 接口和 USB HOST 接口,极有利于本设计高效快速的刷新 TFT 显示,读取 SD 卡/U 盘文件,节省系统时间,降低系统功耗。

2.2 系统的软件设计

系统软件设计部分包括无线传感网络的组建、数据的采集与传送、定位数据处理和用户界面设计 4 个部分。

2.2.1 无线传感网络的组建

系统上电后,协调器和各个节点均开始进行初始化工作。一般来说,协调器的初始化工作包括硬件初始化、接口初始化以及软件架构各模块的初始化。建立网络的过程如下:协调器初始化之后等待其他无线 ZigBee 节点的申请,普通 ZigBee 节点自己初始化后则准备发送接入网

络申请,请求信息包含普通节点自己的身份信息;当收到其他节点请求入网时,处于等待状态的协调器验证该节点是否为合法用户,如果是,则允许该节点入网并且为该节点分配网络地址,如果不是合法用户,则拒绝其加入网络。协调器与普通节点之间的身份认证是通过选定的加密算法来实现的,这样就可以保证网络的安全。

2.2.2 终端数据的采集与传送

终端节点最重要的功能是采集现场环境数据并发送给路由节点和协调器。根据终端节点的功能可以将其软件设计分为5个部分:系统初始化、时间同步、数据采集与传输以及睡眠。

路由节点在网络中除了选择数据传输路径,转发数据包,延长通信距离外还有一个功能是网络管理,维护无线传感网络的正常工作。路由节点上电后,发现网络便请求入网并与第一个响应它的协调器节点或是路由节点绑定,然后作为网络中的路由节点等待其他的节点加入。

协调器节点收到终端传感器节点与路由节点的数据信息后,通过数据包解析确定该数据为有效数据信息后,通过串口上传给核心处理器。

2.2.3 定位数据处理

这里采用加权质心算法来进行定位,计算步骤如下。

1) 设第 i 个终端传感器的位置 (x_i, y_i, z_i) 已知,测得浓度为 C_i ,则该传感器的权重为 $q_i = C_i / (C_1 + C_2 + \dots + C_n)$, n 为参与定位传感器的个数。根据加权质心算法,可得预测的源点坐标 (x', y', z') 为:

$$\begin{cases} x' = \sum_{i=1}^n x_i q_i \\ y' = \sum_{i=1}^n y_i q_i \\ z' = \sum_{i=1}^n z_i q_i \end{cases} \quad (7)$$

2) 求出各传感器节点 (x_i, y_i, z_i) 到预测源点的距离 d_i ,由式(6)可得气体环境场源参数:

$$P_i = 4\pi d_i C_i \quad (8)$$

最终气体环境场源参数可取为 n 个终端节点测量得到的平均值:

$$P_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (9)$$

3) 以初步定位坐标 (x', y', z') 为中心,以定位区域边长的 10% 左右为边长画出一个矩形区域作为精细定位区域,将此区域划分为 10×10 的网格,格点坐标记为 (x'', y'', z'') 。

4) 将由初步定位中预测所得的环境场源参数 P_0 及所测得的浓度值 C_i 代入式(7)分别计算理想源点 (x_0, y_0, z_0) 和每个格点 (x', y', z') 到各传感器节点 (x_i, y_i, z_i) 的距离 d_i 和 d'_i ,记误差为 $E = |d'_1 - d_1| + |d'_2 - d_2| + \dots + |d'_n - d_n|$ 。

5) 遍历格点 (x', y', z') ,寻找使得 E 取最小值的格点,其坐标即为精细定位结果。算法运用 MATLAB 编程仿真,画出 E 关于坐标的函数三维图像如图 1 所示(实心

为随机产生源点坐标,十字为初步定位坐标,圆圈为精细定位坐标,星号为节点坐标)。

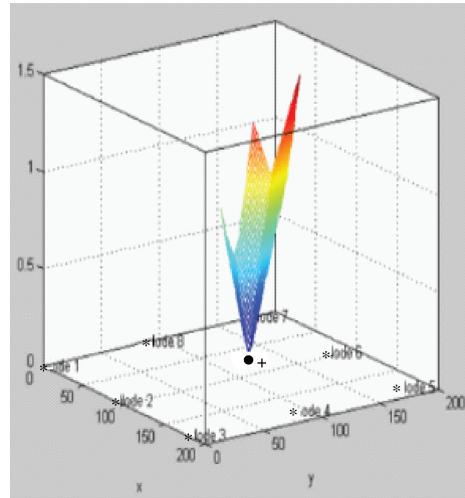


图 1 误差值关于坐标函数的三维图

2.2.4 用户界面设计

本系统采用 ST_emWin 图形库来实现 GUI 界面,其中用到了按钮、图表、文字、列表项等多种控件。在移植 emWIN 之前,需要做好 LCD 驱动,采用的是 SSD1963 控制器的 4.3 寸 LCD 模块。界面设计使用的 emWin GUI-Builder V5.26 设计,界面实际操作命令代码在 MDK-V5.22 用 C 语言编程。操作界面主菜单窗口一共有 5 个应用窗口,分别是实时数据采集窗口、浓度变化曲线窗口、定位结果二维平面显示窗口、系统信息设置窗口和 SD 卡文件管理窗口。二维平面显示定位结果如图 2 所示。

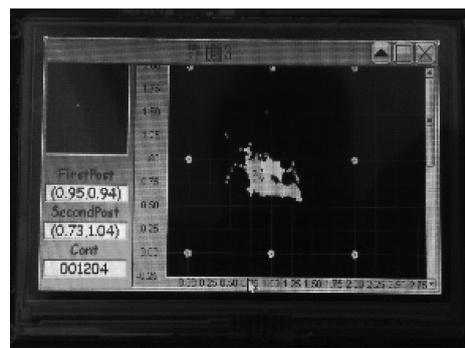


图 2 用户界面实物图

3 气敏传感器测量与校准

一般气敏传感器是没有给出具体的输出电压值与浓度的函数式,因此不能直接根据测量的电压得出气体的浓度。气敏传感器在测量时,其电阻会发生变化,对气体的检测实际上就转换为对电阻的测量。由于实际的传感器电阻值每个都不同,典型的敏感特性由传感器在不同气体浓度下的阻值 (R_s) 与待检测气体的一定浓度下的阻值

(R_0)的比来表达,而 R_s/R_0 被定义为灵敏度,表示器件对被测气体的敏感程度,环境温度 20°C ,湿度 60% 条件下所示,酒精传感器对于酒精蒸汽的灵敏度特性曲线如图3所示,其中 R_s 为传感器在各种浓度气体中的电阻值, R_0 是传感器在 300 ppm 酒精的电阻值, x 轴为浓度单位是 ppm , y 轴为 R_s/R_0 。图3是双对数坐标图,所以酒精传感器对于被测气体浓度的响应为非线性。

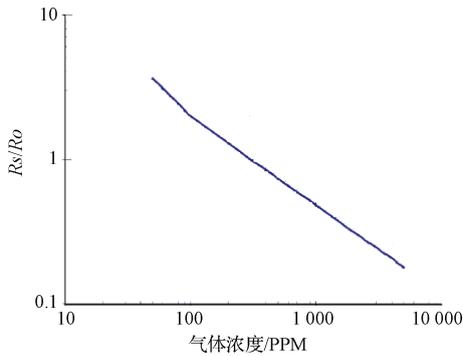


图3 TGS2620 灵敏度特性曲线

在一定范围气体浓度,气体传感器的阻值与被测气体的浓度呈指数变化关系: $R_s=A[C]^{-a}$,式中 R_s 为传感器电阻, A 为常数, $[C]$ 为气体浓度, a 为曲线的斜率。 R_s/R_0 与浓度 $[C]$ 也是遵守指数定律,关系如下:

$$R_s/R_0 = M[C]^{-a} \quad (10)$$

式中: M 和 a 均为常数。

一般传感器的电阻不容易直接测量,所以需要将其转变为电压信号,便于测量与采集信号。传感器测量电路采用分压法,如图4所示,其中, V_H 为加热器电压, V_C 为回路电压, R_L 为负载电阻,负载电阻电压 V_{RL} 与气敏器件电阻 R_s 的关系可表示为:

$$V_{RL} = R_L V_C / (R_L + R_s) \quad (11)$$

式中: V_{RL} 可以通过 AD 采集得到,所以计算传感器电阻 R_s 方程为:

$$R_s = (V_C / V_{RL} - 1) R_L \quad (12)$$

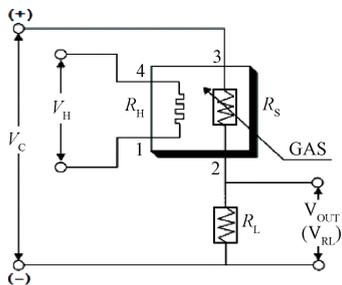


图4 气敏传感器基本测量电路

浓度 C_w 与对应传感器的负载电压 V_{RLW} 关系式为:

$$M[C_w]^{-a} = [(V_C - V_{RLW}) / (V_C - V_{RL0})] (V_{RL0} / V_{RLW}) \quad (13)$$

在标准实验条件(V_{RL0} 是以 300 ppm 浓度下对应的负

载电压), V_C 为 5.00 V 。经过大量实验,拟合出 TGS2620 传感器的敏感特性曲线如图5所示,负载电阻为 $1\ 000\ \Omega$ 。

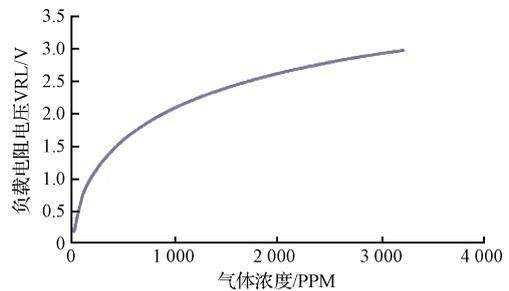


图5 TGS2620 传感器的敏感特性曲线

4 气体源定位实验结果及分析

气体源定位实验在 $25\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的密闭实验室内进行。在直径为 10 cm 的玻璃瓶倒入 20 mL 的酒精形成乙醇蒸汽源。传感器阵列等距离放置在正方形四边。检测区域面积分别为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 和 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ 。

在相同的检测区域下,改变气体源坐标,实验结果与误差如表1所示。误差=定位结果坐标到实际坐标的距离÷检测区域的边长。

表1 定位实验测量

检测区域	次数	实际坐标/m	定位坐标/m	相对误差
2 m×2 m	1	(0.45, 1.50)	(0.45, 1.54)	0.020
	2	(0.45, 1.50)	(0.48, 1.53)	0.021
	3	(0.90, 0.90)	(0.88, 0.89)	0.011
	4	(0.90, 0.90)	(0.80, 0.90)	0.048
3 m×3 m	1	(0.80, 2.05)	(0.93, 2.08)	0.045
	2	(0.80, 2.05)	(0.96, 2.07)	0.054
	3	(2.50, 1.20)	(2.56, 1.31)	0.043
	4	(2.50, 1.20)	(2.65, 1.23)	0.051
4 m×4 m	1	(1.25, 2.80)	(1.35, 2.77)	0.050
	2	(1.50, 0.90)	(1.67, 1.07)	0.060
	3	(1.20, 2.00)	(1.23, 2.13)	0.033
	4	(3.10, 2.10)	(3.01, 2.14)	0.025

在应用系统定位气体源点过程中,系统每 5 s 采集数据并定位,定位结果以二维平面坐标显示。该实验的检测区域为 $4\text{ m} \times 4\text{ m}$,气体源点坐标点为 $(1.20\text{ m}, 2.00\text{ m})$,计算结果为 $(1.23\text{ m}, 2.13\text{ m})$,相对误差为 3.3% 。使用保存在 SD 卡中的坐标数据得到的定位标效果如图6所示。其中实心小点是多次定位的粗略定位结果,圆点是精细定位坐标,而十字形点是真正的气体源坐标点。

需要说明的是,系统在开始定位阶段,气体源还未真正扩散,每个传感器测量的浓度都很低且相近,根据定位算法特性,系统定位的结果为检测区域的正中心周围。随着气体源的泄漏,靠近气体源的传感器浓度慢慢增大,计

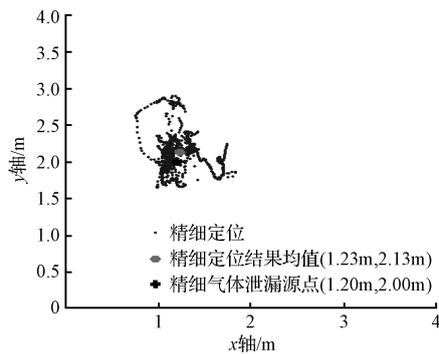


图6 SD卡记录数据的定位效果图

算的定位结果往气体源点坐标靠近。在气体扩散过程后期阶段,源头的酒精量减少,场源减弱,浓度下降,则定位结果靠近传感器阵列的几何中心。

5 结论

本论文基于气体扩散模型利用加权质心算法设计了一种气体源定位系统。同时设计了分布式金属氧化物气敏传感器阵列以及无线传感器网络采集数据,并使用 STewMin 图形库设计用户界面,让定位结果以更直观的二维平面来显示。本实验以酒精蒸汽为目标气体在密闭实验室内进行气体源定位实验。实验结果证明本设计在一定检测区域内能够进行比较精确的定位。但在测试范围和定位精度方面还有待进一步提高。

参考文献

- [1] 陈平,石磊,赵建勇,等. 气体变电站故障泄漏预警回收技术研究与应用[J]. 高压电器,2016, 52(12): 244-248.
- [2] 史腾飞,管义锋. 基于 PHAST 的 CNG 运输船装卸过程气体泄漏后果评估[J]. 船舶工程,2016, 38(12): 83-87.
- [3] 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.
- [4] 李帅永,王鹏飞,严冬,等. 气体管道泄漏模态声发射时频定位方法[J]. 仪器仪表学报,2016, 37(9): 2068-2075.
- [5] 孟东阳,何秀凤,桑文刚. 基于无线网络传感器的定位技术研究[J]. 电子测量技术,2012, 35(9):4-9.
- [6] 陈庆章,毛科技,何文秀,等. 基于共面度和分层结构的 WSN 三维定位算法[J]. 电子测量与仪器学报,2012, 26(8): 673-680.
- [7] 周海鸿,周嘉奉. 基于 ZigBee 技术的温湿度监测系统[J]. 国外电子测量技术,2015,34(7):75-79.
- [8] 陈立伟,杨建华,孙亮,等. 基于分布式传感器阵列的静态气体源定位方法[J]. 电子科技大学学报,2014, 43(2): 212-215.
- [9] 徐从裕,李星辰,胡雪卡,等. 基于贝叶斯估计的气体污染源方位辨识[J]. 电子测量与仪器学报,2014, 28(12): 1389-1393.
- [10] 陈晓飞,凌有铸,陈孟元. 移动机器人辅助下基于 GM-CKF 的无线传感器网络节点定位研究[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(9):1298-1305.
- [11] 孙凯. 危险气体无线监测系统的设计及气体源定位算法的研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
- [12] 康玉梅,刘建坡,李海滨,等. 一类基于最小二乘法的声发射源组合定位算法[J]. 东北大学学报:自然科学版,2010,31(11):1648-1651.
- [13] 赵丽娜. 无线传感器网络中基于三边算法的气体源定位研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2010.
- [14] 宋慧敏,杨社堂,赵栋栋. 基于人工神经网络的无线传感器定位算法[J]. 计算机测量与控制,2014, 22(2): 473-475.

作者简介

潘新平,大学本科,主要研究方向为物联网技术。

郑艳华(通讯作者),博士,讲师,主要研究方向为物联网技术、无线能量传输和智能信息处理。

E-mail:44864223@qq.com,

林荣列,大学本科,主要研究方向为物联网技术。