

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106865

针对复杂屉式结构的气体泄漏定位算法

郭小焯^{1,2} 侯钰龙^{1,2} 刘胜^{1,2}

(1. 中北大学 电子测试技术国家重点实验室 太原 030051; 2. 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对在复杂屉式结构中,由于其构造不规则、可供安装传感模块的区域狭小、监测节点较多等原因可能造成的漏警、虚警等问题,设计了一种精准定位泄露点的浓度梯度算法。通过实验测试,证明整个监测系统在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境下能够正常工作,系统的虚警率低于3%、漏警率低于1%,验证了整个系统的稳定性和实用性。在其他存在气体或者液体泄漏风险的类似复杂屉式环境中,例如化工、农业、医药、军事、环境保护等具体场景,这一技术满足较为广泛的通用性测试需要。

关键词: 传感器;定位算法;复杂空间

中图分类号: TP312 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Gas leak location algorithm for complex drawer structure

Guo Xiaoye^{1,2} Hou Yulong^{1,2} Liu Sheng^{1,2}(1. National Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Testing, Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Aiming at problems such as missing and false alarms that may be caused by the complex drawer structure due to its irregular structure, small area for installing sensor modules, and many monitoring nodes. This paper designs a concentration gradient algorithm that accurately locates the leakage point. Through the experimental test, it is proved that the whole monitoring system can work normally in the environment of $-15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$. The false alarm rate of the system is less than 3% and the missing alarm rate is less than 1%, which verifies the stability and practicability of the whole system. In other similar complex drawer structures with the risk of gas or liquid leakage, such as chemical industry, agriculture, medicine, military, environmental protection and other specific scenarios, this technology meets the needs of a wide range of universal testing.

Keywords: sensor; location algorithm; complex space

0 引言

随着我国现代化和工业化的不断发展,人们对于机器的依赖程度也在不断增加,但在机器带给人们生产生活便利的同时,也带来了许多亟待解决的问题。气体的运输或者存储已经较为普遍地存在于化工生产的过程中,这些化工气体一旦因为人为的疏忽或者机器老化等问题而产生泄露不仅会污染环境,甚至会导致爆炸、火灾等危害人们生命安全、国家财产安全等更加严重的事故发生^[1]。

一般的气体泄漏监测对象通常为储气罐、运输管道等大型空间,但是对于内部结构复杂、不规则的空间的痕量级、多点位的泄露监测技术的研究较少,由于复杂屉式结构内部空间狭小、气体泄漏量较小,如果不能在第一时间发现泄露并精确定位漏点,很可能导致进一步的恶化,最终产生大规模的泄露,造成不可挽回的损失^[2]。

针对不同的泄漏场景及应用环境,现有的测量技术存在不同的缺点,本文调查看目前市面上技术相对成熟的传感器技术,发现多维传感的应用难度取决于其复杂程度。比如在环境监测中,其受时空相关性及复杂的特征参数影响,监测难度较大,是目前急需解决的问题。例如高聚物电缆漏传感器的精度仅能达到分米级别,更高的定位精度则难以实现,而且这类传感器存在接触式测量以及定位精度不足等问题;分布式光纤传感器光纤内信号衰减大,传感点少,多传感点之间串扰,多传感点难标定等实际问题且响应速度需数分钟,实时性不足。

泄露定位算法近来已经有多位学者对其进行研究,文献[3]研究了一种针对矿用空气压缩机管路的气体泄漏定位算法,并不适用于复杂屉式结构;文献[4]研究了一种针对燃气管道泄露的定位算法,但其定位误差较大。

所以,本文设计了一种定位算法,这种算法能够最大限度地降低周围干扰对检测结果的影响,目的在于既能同时满足多节点同时监测及复杂狭窄结构应用,又能解决泄漏点定位不准确、系统响应时间过长和虚警漏警率偏高的问题。在本系统所处的模拟环境下系统的虚警率低于 3%、漏警率低于 1%。

1 实验模拟结构分析

本次设计的实验平台是屈式箱体结构,如图 1 所示为屈式箱体结构。每一个隔间内都安装一个传感模块,设计要求是检测并精确定位出发生气体泄漏的格子。在屈式箱体中有规律的布置一定数量的气体传感器,保证每个传感器都能检测到对应屈格内部的气体泄露状态,监测节点在监测区域实时对箱体中气体浓度进行收集、监测和记录,并将浓度信息打包传递给上位机。针对本设计研究的复杂箱体结构内部气漏点的定位,涉及静态环境下气体泄漏源的定位分析,由于实验平台是相对密闭的,受周围气流和风向的影响可以忽略,所以在设计定位算法的时候不考虑到有风的情况^[5]。

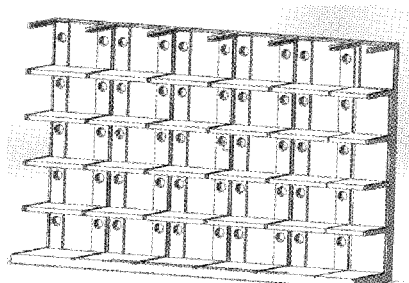


图 1 屈式箱体内部结构

这种复杂结构下气体的扩散很大程度上受箱体壁和不同屈格间挡板的影响,隔板之间的缝隙尺寸等都会给气体扩散模型带来很大的不同^[6]。相比于在大气中的气体扩散,在屈式箱体结构中气体容易扩散到周围最为接近的屈格内,因此需要判断真正的泄漏点所在^[7]。屈格内气体扩散的路径如图 2 所示,每条路径的扩散快慢都可能不同,不过可以肯定的是受到结构材料的阻碍,复杂屈式结构内部的气体扩散速度会远小于在自由空间中气体的扩散速度^[8]。

2 算法流程

2.1 判断传感器是否正常工作

在整个算法的第 1 步也是极为重要的一步是判断每个传感器是否能够正常工作,能否有效地实时监测对应区域,也就是传感节点的地址位是否合法。在本实验的模拟结构中一共包含 24 个监测节点,首先需要查看这 24 个传感节点是否全部正确地将各自收集到的数据传输到主节点上,检查传感器的地址合法与否,也就是检查地址位是否为设定的 24 个地址位集合之一。如果检查结果为不合法,就丢

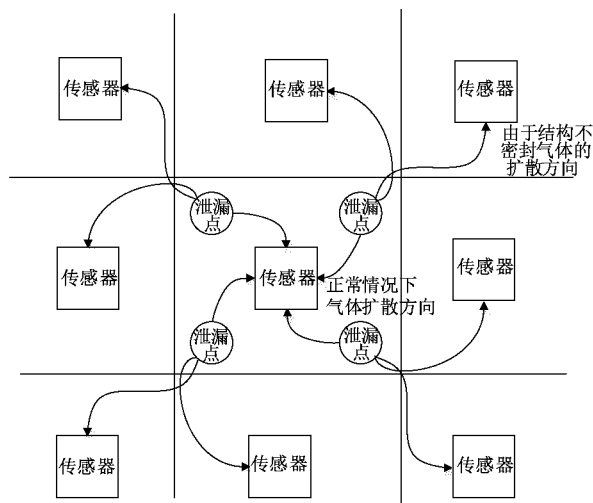


图 2 屈格内气体扩散的路径

掉收到的整包数据;如果检查结果为合法的地址位,但接收到的数据并不连续,则在丢失的数据位写入“FF”,再将整包数据存入 RAM 中;如果接收到的地址位合法并且连续,则将 24 组数据存入 RAM 中,为下个阶段的判定做好准备^[9]。如图 3 所示为判断传感器是否正常工作的流程。

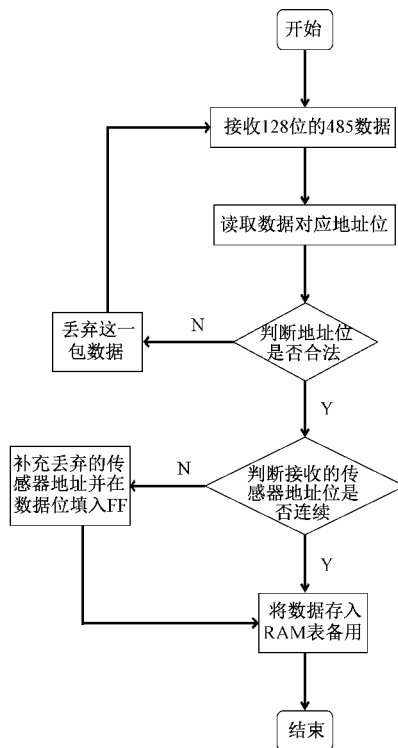


图 3 判断传感器是否正常工作流程图

2.2 判断监测点是否出现泄漏

根据设计的模拟屈式结构,在对应位置设置监测节点,并依照顺序设置传感节点对应的地址位,模拟结构测点、24 个传感模块与地址位一一对应,传感节点及分布图及对应地址位如图 4 所示。主要通过监测这 24 个测点读回的数

值是否超过预设的阈值来判断该监测节点是否发生泄露。当收到传感器数据时,计算机如果一直对其进行分析和处理,势必会降低计算机处理数据的效率,占用大部分内存,导致一些真正发生泄露的节点传回的数据得不到及时的处理,难以实现及时精确定位,耽误补救的时间,所以要针对被测环境设定一个标准值,也就是阈值。在环境较为稳定的状态下,屈式结构内部的气体浓度保持在一定范围以内,虽然结构内部存在一定的气体流动和电气噪声脉冲,这些都有可能影响测量值,但是这种影响是暂时的,气体浓度会在一定时间内趋于稳定状态,一旦结构内部出现气体泄漏,传感模块传回的数据也会明显增大^[10]。本文可以将环境较为稳定时传感器测得的气体浓度的平均值作为阈值,一旦发现监测得到的数据超过这一数值,就将该监测节点作为可以对象,接下来还要对可疑对象进行下一步的验证。

节点1 0X13D	节点2 0X142	节点3 0X147	节点4 0X14C	节点5 0X151
节点6 0X156	节点7 0X15B	节点8 0X160	节点9 0X165	节点10 0X16A
节点11 0X16F	节点12 0X174	节点13 0X179	节点14 0X17E	节点15 0X183
节点16 0X188	节点17 0X18D	节点18 0X192	节点19 0X197	节点20 0X19C
节点21 0X1A1	节点22 0X1A6	节点23 0X1AB	节点24 0X1B0	

图4 传感节点及分布图及对应地址位

这种算法的原理是建立在各个监测节点测得的数据累加从而形成浓度梯度之上的^[11]。根据实际使用环境,可设置两个阈值,较低的为阈值1,较高的为阈值2。当检测到某一节点的一次数值大于阈值1时,则将这包数据中其他所有节点的测得数据存起来备用,否则判断其为不泄漏点;接着监测该有疑问的节点的下一次数值,若其仍然大于阈值1,则再将这包数据中其他所有节点的测得数据存起来备用,否则判断其为不泄漏点;接下来监测该有问题的节点的下一次数值,若其大于阈值2,则将该节点周围九宫格处节点的近3次数据进行累加,将问题节点的3次数据之和与周围节点3次数据之和进行比较,只有当问题节点3次数据之和分别大于周围3次之和时,将其标为泄漏点。

为了降低整个监测系统的虚警率,排除某一次环境噪声产生的影响,所以算法中将数据与阈值进行了3次比较。由于本次实验模拟环境时相对封闭的屈式结构,其受风向、环境噪声的影响可忽略不计,主要影响气体扩散方向就是每个屈式结构之间的缝隙,在模拟结构内气体扩散速度则将远远小于自由空间内的扩散速度,每个屈格内的浓度优势会保持相对稳定的状态,所以算法中对多次浓度之和进行了比较。当某一监测节点发生泄漏时,内部泄露的气体在达到饱和之前,该屈格内的气体浓度的相对增长量和增长速度将会远远大于周围的屈格,同一时间点测得的数据也会是泄漏点位最高,将该点位及周围的浓度累加,使得得

一浓度梯度更加明显,以此来实现漏点的精准定位^[12]。

例如在判断节点13是否泄漏时,首先提取RAM表中节点13采集到的第一次数据,判断其是否大于阈值1,若小于阈值1则判定其为安全点,也就是并没有发生泄露,若大于阈值1,则进入下一个步骤;继续查看节点13存于RAM表中的第2次数据,判断其是否大于阈值1,若小于阈值1则判定其为安全点,若大于阈值1,则进入下一个步骤,这一步骤的目的主要是“防抖动”,也就是排除一次环境噪声的情况,这一步骤能够降低发生虚警的情况发生的概率;然后是查看第13监测节点的第3次数据是否大于阈值2,若小于阈值2,则判定该点为安全点,若大于阈值2则进入最后一个步骤;在这一步骤中将节点13周围九宫格内的其他节点也就是节点7、8、9、12、13、14、17、18、19这3次采集到的数据分别进行累加,当且仅当节点13的3次数据之和分别大于其他监测节点的3次数据之和则判断节点13为泄漏点,否则判断其为安全点。如图5所示为浓度梯度算法流程。

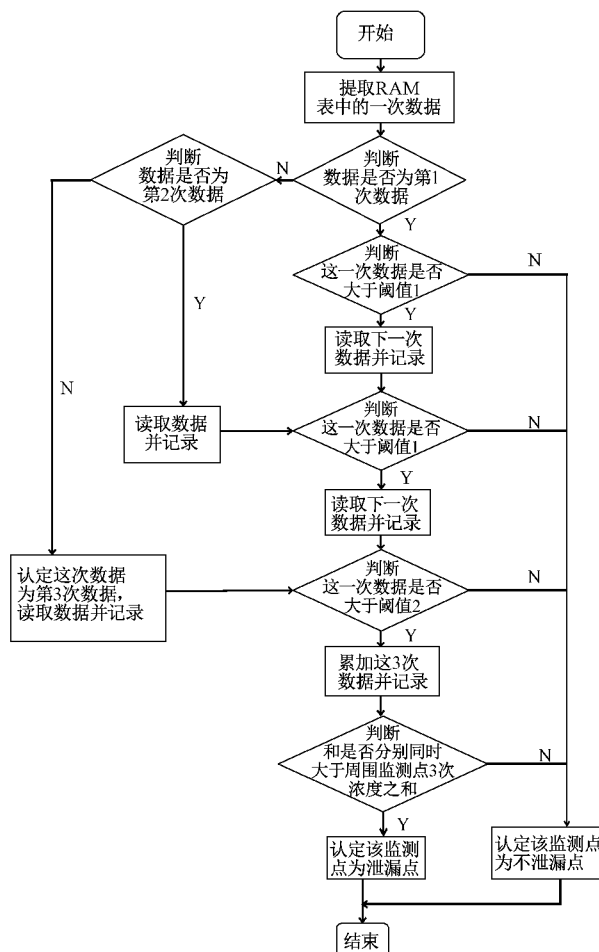


图5 浓度梯度算法流程

3 测试与分析

3.1 测试系统

本文所采用的采集系统主要包括子节点和主节点两个

部分,主节点下可挂载 24 个子节点,子节点选用 STM32 作为主控芯片,负责收集传感器采集的数据,传感器部分选择 Cambridge CMOS Sensors 公司推出的 Ccs811 气体传感器,最小检测浓度可小于 0.1 mg/L,且尺寸仅有 2.7 mm×4.0 mm,完全符合痕量级测量以及狭小空间安装的要求^[13]。主节点选择 FPGA 作为控制芯片,主节点和子节点之间通过 RS485 总线连接从而形成通信网络。主节点和上位机之间的数据传输通过 USB 实现^[14]。如图 6 所示为测试系统原理。

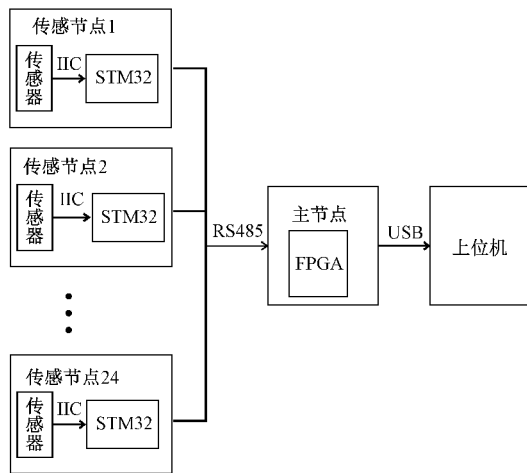


图 6 测试系统原理

下面是系统各部分硬件实物图,子节点传感单元实物图如图 7 所示,总节点实物图如图 8 所示。

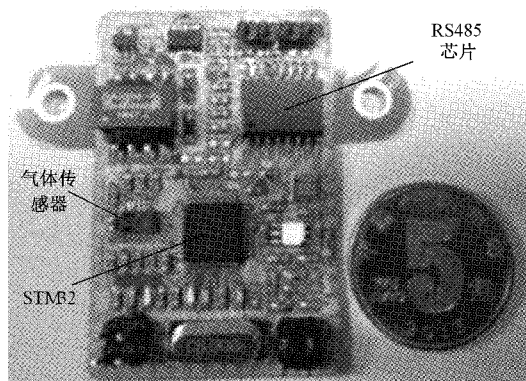


图 7 子节点实物图

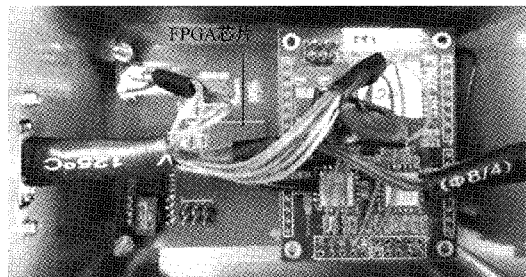


图 8 主节点实物图

3.2 实验环境

上文提到的模拟复杂狭小空间屉式结构,每个单独间的长宽高分别为 12、10 和 8 cm,每个屉式结构之间用亚克力板间隔,形成相对密闭的空间,如图 9 所示为 24 个子节点安装实物图。测量系统实物图如图 10 所示。

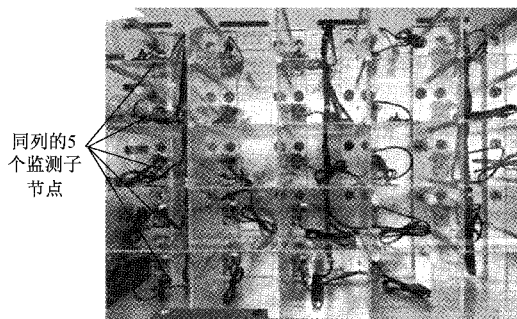


图 9 24 个测点实物安装图

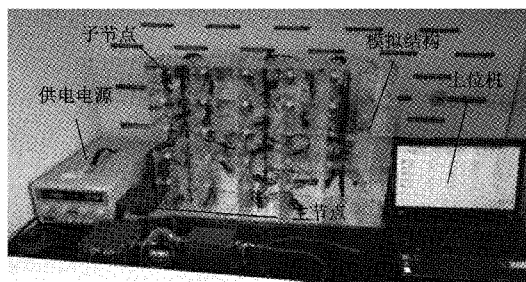


图 10 测试系统实物图

3.3 实 验

实验前准备好浓度为 100% 乙二醇溶液,其挥发物为 VOC 气体且不易挥发,符合对痕量级气体检测的要求^[15]。实验 1:在实验室模拟屉式结构空间内部适当位置安装传感器,设置测点,准备浓度为 100% 的乙二醇溶液,随机设置漏点,将乙二醇液体滴入屉中,监测 24 个监测节点的数据并记录 1 min 时记录下各个节点数据。实验 2:在实验室模拟屉式结构空间内部适当位置安装传感器,随机设置漏点,记录下 3 min 内设置漏点上位机却没有报警的次数以及未设置漏点上位机却报警的次数,并计算 20 次、50 次 100 次及 200 次测试后的虚警率和漏警率。每次实验之后使用通风橱对整个测试环境进行通风,使用第三方气体检测仪检测环境气体浓度恢复正常后继续进行下一次实验,重复进行多次试验。实验 3:将一块气体泄露监测传感板放入 CTPS701B 高低温快速温度变化湿热试验箱中,将设备连接好,实验开始前在室温 25 °C 下采集系统基准值,实验过程中每隔 10 °C 分别保持 120 min,记录下系统稳定后采集到的数据,将基准值与其相对比,记录下差值本次实验的温度范围是 -15 °C ~ 55 °C。实验 4:将一块气体泄露监测传感板放入烧杯中,并将其固定在烧杯底部,将烧杯放置于 MS-H280-Pro 数显加热器上,将设备连接好,设备通电,实验开始前在室温 25 °C 下采集系统基准值,实验过程

中每隔 5℃ 分别保持 120 min,记录下系统稳定后采集到的数据,将基准值与其相对比,记录下差值本次实验的温度范围是 25℃~55℃。

3.4 实验结果及分析

实验 1:在本模拟环境中设置阈值 1 为 0.2 mg/L,阈值 2 为 0.5 mg/L。表 1 为设置节点 2 为漏点时各个节点数据对比。图 11 为设置节点 2 为漏点时上位机报警情况。

表 1 设置节点 2 为漏点时各个节点数据对比

监测节点 具体位置	设置漏点时 各节点数据/ (mg·L ⁻¹)	监测节点 具体位置	设置漏点时 各节点数据/ (mg·L ⁻¹)
节点 1	0.377	节点 13	0.219
节点 2	0.546	节点 14	0.210
节点 3	0.512	节点 15	0.107
节点 4	0.313	节点 16	0.064
节点 5	0.118	节点 17	0.116
节点 6	0.259	节点 18	0.114
节点 7	0.360	节点 19	0.092
节点 8	0.328	节点 20	0.082
节点 9	0.220	节点 21	0.027
节点 10	0.104	节点 22	0.049
节点 11	0.112	节点 23	0.011
节点 12	0.147	节点 24	0.036

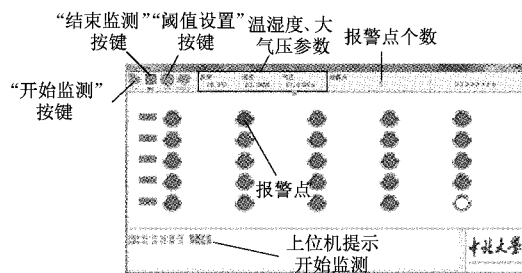


图 11 设置节点 2 位漏点时上位机报警情况

根据实验 1 的结果能发现由于结构内部各个监测节点并不是完全密闭的,所以当设置节点 2 为漏点时,由于结构之间并不密封,漏点周围的监测节点也会检测到气体浓度的异常变化,从传感器传回的数据可知节点 1、4、6、7、8、9、13、14 的气体浓度超过阈值 1,节点 3 的气体浓度超过阈值 2,但经过浓度算法后,将这几个节点被排除是漏点的可能性,上位机也并不会对数据超过阈值但是不满足浓度梯度算法的监测节点进行报警。

实验 2:表 2 为经过多次试验后整个系统的漏警率和虚警率,通过实验结果可知本文设计的浓度梯度算法可有效控制复杂屈式结构的虚警、漏警率。

实验 3:根据表 3 高低温实验数据可知,在实验温度之下进行气体泄漏监测,系统仍然能够正常工作。但是由于

表 2 多次试验后整个系统的漏警率和虚警率

实验次数	漏警次数	虚警次数	漏警率/%	虚警率/%
20	0	0	0	0
50	1	0	2	0
100	3	0	3	0
200	5	1	2.5	0.5

CTPS701B 高低温箱在工作时,通过热风或冷风实现温度控制,将外部环境中的气体经过制冷和加热后,通过管道吹入实验箱体,会随机导致一定程度有机挥发物引入或释放,吹风过程中在试验箱内累积或随风排出。因此,在高低温试验箱内进行有机挥发物浓度检测,测量气体浓度具有一定波动性和随机性。温度升高过程,有机挥发物加速释放和累积,浓度相对偏高;温度降低时,气体浓度累积和排出彼此影响,浓度在一定范围内随机性波动,浓度值相对偏低。为了排除外部干扰气体的影响设计了补充实验 4。

表 3 高低温实验数据

温度/ ℃	基准值/ (mg·L ⁻¹)	保持时间/ min	系统稳定后 数值/(mg·L ⁻¹)	是否正 常工作
-15	0.016	120	0.013	是
-5	0.016	120	0.013	是
5	0.016	120	0.017	是
15	0.016	120	0.025	是
25	0.016	120	0.029	是
35	0.016	120	0.030	是
45	0.016	120	0.033	是
55	0.016	120	0.037	是

实验 4:为了避免引入干扰气体,实验使用烧杯作为容器,将传感单元置于烧杯内,对烧杯加热后进行实验,实验环境如图 12 所示。

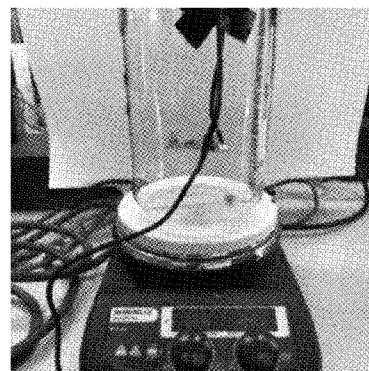


图 12 高低温实验环境

如表 4 所示,在 25℃~55℃ 的升温过程中,VOC 气体浓度仍然呈现出随机波动的特点,但是波动的范围低于 0.2 mg/L(小于测量系统响应阈值)。由于实验室用容器并非严格密闭容器,因此无法完全排除外部环境有少量干

扰气体的进入。因此,上述试验可以表明如下两点:1)传感单元在 25℃~55℃温度范围内工作时,未见显著温度相关性规律变化,其显示出的随机性波动更有可能来自外部气体干扰;2)可以明确的是,25℃~55℃温度范围内变化时,温度对传感单元的影响较低,传感单元可以正常工作,且不会对系统测量造成较大的扰动(波动小于测量系统响应阈值)。

表 4 升温实验数据

温度/ ℃	基准值/ (mg·L ⁻¹)	保持时间/ min	系统稳定后 数值/(mg·L ⁻¹)	是否正 常工 作
25	0.016	120	0.020	是
30	0.016	120	0.018	是
35	0.016	120	0.018	是
40	0.016	120	0.025	是
45	0.016	120	0.013	是
50	0.016	120	0.027	是
55	0.016	120	0.019	是

4 结 论

本文针对复杂屉式结构内部气体泄漏提出了浓度梯度算法,详细地介绍了浓度梯度算法的工作原理及流程。通过多次实验证明,该浓度梯度算法具备精准定位的功能,为气体泄漏的排查提供了有效手段,拓宽了气体泄漏的测量方式和研究方向,有着重要的意义。在其他存在气体或者液体泄漏风险的类似复杂屉式环境中,例如化工、农业、医药、军事、环境保护等具体场景,这一技术满足较为广泛的通用性测试需要。

参考文献

- [1] 刘川. 探究石油化工管道焊接工艺与质量控制措施[J]. 工程建设与设计, 2019(2): 171-172.
- [2] 李育忠, 郑宏丽, 贾世民, 等. 国内外油气管道检测监测技术发展现状[J]. 石油科技论坛, 2012, 31(2): 30-35, 75.
- [3] 李沛阳. 矿用空气压缩机管路气体泄漏识别方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [4] 张梅, 张双双, 袁宏永, 等. 燃气管道泄漏的次声源定位算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 187-194.
- [5] 吴惠萍. 管道输送有毒有害气体泄漏扩散数值模拟研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2014.
- [6] 郑晓亮, 王强, 薛生. 输气管道泄漏的线性阵列两步定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 171-178.
- [7] 邓林青, 余建星, 阴炳钢, 等. 海底管道气体泄漏率模型及实验研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2019, 6(5): 726-731.
- [8] 韩卫济, 徐光, 赵光辉, 等. 基于 ZigBee 的推进剂气体无线监测及定位算法设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(9): 97-100.
- [9] 刘永松. 基于 ANSYS 模拟研究障碍物对油气扩散的绕流影响分析[J]. 石油工业技术监督, 2013, 29(5): 55-57.
- [10] 苗嘉轩. 基于学生宿舍的智能家居传感器系统设计[J]. 通讯世界, 2018(11): 273-275.
- [11] 钱喜玲, 闫小燕, 赵江平. 地下综合管廊天然气管道泄漏扩散模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(11): 85-89.
- [12] 徐元哲, 何野, 郭海涛, 等. SF₆ 断路器气体泄漏红外图像中散斑噪声的抑制算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2669-2673.
- [13] 谢超, 王正. 基于单片机的室内空气质量监测系统设计与实现[J]. 林业机械与木工设备, 2020, 48(12): 32-36, 42.
- [14] 张玮. 现代智慧农业设施大棚环境监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(8): 135-138.
- [15] 刘畅. 在线式 VOC 检测仪的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

作者简介

郭小焱, 硕士研究生, 主要研究方向为仪器仪表工程。

E-mail: 1215502221@qq.com

侯钰龙, 高级实验师, 主要研究方向为面向航天测试的新型特种传感技术及器件。

E-mail: houyulong@nuc.edu.cn

刘胜, 硕士研究生, 主要研究方向为仪器仪表工程。

E-mail: 602801103@qq.com