

基于离群模糊核聚类算法的 PID 毒气检测系统设计

杨 跃^{1,2}

(1. 昆明工业职业技术学院, 昆明 650302; 2. 昆明理工大学, 昆明 650000)

摘要: 针对传统毒气检测系统混合检测中适用性差、检测误差率高的不足, 提出基于离群模糊核聚类算法的 PID 毒气检测系统设计; 在系统硬件设计中选择了性能更强的 STM32F2X 型 MCU, 并设计了专门用于毒气类别分析的功能模块; 在软件算法和主控程序的设计中, 采用了离群模糊核聚类算法提高对毒气数据的聚类分析能力, 以此改善毒气检测的准确性; 实验结果表明, 提出的 PID 毒气检测系统能够识别出多种天然毒气和化学毒气, 在毒气浓度的检测误差方面也能够控制在 2% 以内。

关键词: 离群模糊核聚类; PID 毒气检测; 天然毒气; 化学毒气; 检测误差

Design of PID Toxic Gas Detection System Based on Outlier Fuzzy Kernel Clustering

Yang Yue^{1,2}

(1. Kunming Vocational and Technical College of Industry, Yunnan Kunming 650302;

2. Kunming University of Science and Technology, Yunnan Kunming 650000)

Abstract: To overcome the disadvantages of poor applicability and high detection error rate of traditional toxic gas detection system, the design of PID toxic gas detection system based on outlier fuzzy kernel clustering algorithm is proposed. In the hardware design of the system, STM32F2X MCU with stronger performance is selected, and the function modules specially used for toxic gas category analysis are designed. In the design of software algorithm and main control program, outlier fuzzy kernel clustering algorithm is used to improve the clustering analysis ability of toxic gas data, so as to improve the accuracy of toxic gas detection. The experimental results show that the proposed PID toxic gas detection system can identify a variety of natural and chemical toxic gases, and the detection error of toxic gas concentration can be controlled within 2%.

Keywords: outlier fuzzy kernel clustering; PID toxic gas detection; natural toxic gas; chemical toxic gas; detection error

0 引言

毒气污染对人们的身体健康会造成严重的、不可修复的损伤, 某些毒性剧烈的气体只要微量就能够致人死亡^[1-2]。造成毒气污染的主要原因除了特种企业的毒气泄露事故之外, 以化工企业、冶金企业、电力企业为代表的超标排放, 室内装修材料不合格, 醛、苯元素超标而造成的装修污染, 大量汽车尾气集中排放而导致的大气污染, 都具有十分严重的危害性^[3-5]。鉴于大气污染特别是毒气污染的危害性, 对狭小空间环境下的微量毒气检测十分必要, 对于有毒有害气体的检测与防治也受到了政府、企业和居民的多方重视。当前科研领域对于毒气检测系统的研究较多, 例如基于化学试剂检测方法而设计的应系统用范围最广、成本最低, 但该类系统仅凭借气体传感装置进行毒气检测, 准确率低、实时性差; 近年来随着激光技术的发展^[6-7], 基于光学原理的毒气检测系统逐渐兴起^[8-9], 但光学系统对于检测环境的要求较高, 检测操作十分复杂、耗时

较长, 对于个别种类的毒气识别率较低。针对微量毒气源特征模糊的特点, 本文采用离群模糊核聚类算法研究了毒气产生及扩散时的基本运动特征, 并基于此设计了一种 PID 毒气检测系统, 针对不同种类微量毒气的多样性特点, 提高了系统的检测适用性。

1 PID 毒气检测系统硬件设计

1.1 硬件的总体框架设计

PID 毒气检测系统的硬件结构, 从总体上说需要按照离群模糊核聚类算法要求进行设计, 在硬件模块上增加了特征聚类分析模块。检测系统的核心模块配置了一个高性能的 STM32F2X 型 MCU, 该芯片具有高性能、低功耗的特点, 同时能够兼容主流的主控板, 检测系统的总体结构如图 1 所示。

采集测量模块是一种气体传感装置, 能够检测到封闭环境下有毒气体的种类和含量, 为提高系统的稳定和检测效率, 可以按照检测空间的大小均匀布置采集模块的数量, 采集检测模块的有效检测半径为 10 m。采集检测模块的与基于离群模糊核聚类算法设计的分析检测模块相连, 连接方法可以采用有线来接的方式或无线传输的模块, 无线数

收稿日期: 2019-01-03; 修回日期: 2019-01-28。

作者简介: 杨 跃(1973-), 男, 山西大同人, 硕士, 讲师, 电气工程师, 主要从事工厂供电技术、工业机器人技术方向的研究。

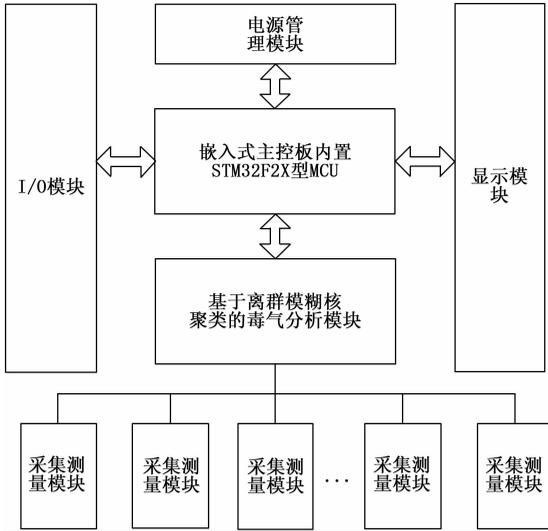


图 1 硬件检测系统的总体架构

据传输的模式更适用于较大的空间，但在检测精度方面略差于有限连接的方式。内置 STM32F2X 型 MCU 的主控板是毒气检测系统的核心模块，具有毒气量和毒气危害程度的分析与鉴定功能，主控板由于电源管理模块供电，并具有检测气体数据输入输出功能和显示功能。

1.2 MCU 控制电路设计

MCU 处理器模块是毒气检测系统设计的主要功能模块，采集测量模块得到的环境数据经毒气分析模块处理后都最终传递到 MCU 处理器模块，进行进一步分析和处理。MCU 芯片的毒气数据处理性能和接口的兼容性至关重要，本文选用意法半导体最新的 STM32F2X 型 MCU 芯片，该芯片的输入、输出引脚的数量适中、性能强劲，由于采用了 14 nm 的先进工艺制程，功耗相对于其他 MCU 具有明显的优势。由于毒气检测系统属于小型的检测系统，因此系统电压不易过高电压浮动范围在 [1.5, 3.6] 之间，系统的内存还要求能够进行外部扩展，STM32F2X 型 MCU 芯片的相关参数设定，如表 1 所示。

表 1 主控芯片参数

制成 14nm	位数 64	RAM 64kb	工作频率 102MHz
定时器 内置	工作电流 2.5mA	最高电压 3.6V	最低电压 1.5V

STM32F2X 型 MCU 主控芯片基于 ARM 的嵌入式架构，ARM 的 M3 内核自带始终控制系统、复位控制系统和数据传输中断控制器，系统物理中断的优先级达到最高的 8 级，M3 内核还具有自动启停和嵌套中断功能，提高了毒气数据分析和处理的灵活性和准确性，STM32F2X 型 MCU 主控芯片的内核结构，如图 2 所示。

MCU 主控芯片的内部运行也通过内部时钟结构来控制，时钟电路震荡器在 MCU 内部产生高频波，而对高频波

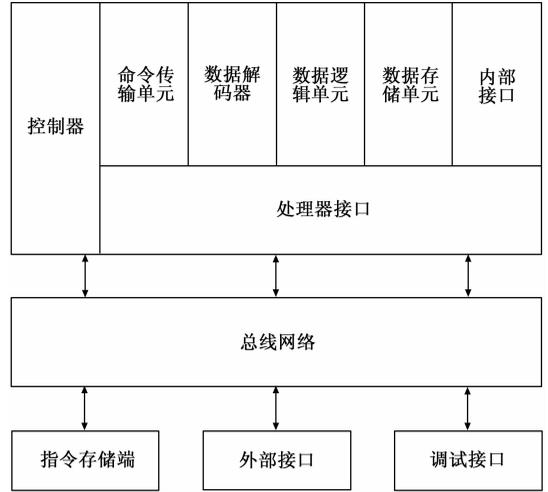


图 2 MCU 主控芯片的内核结构

的分解和傅里叶变化过程就是数据信号的处理过程。芯片中的复位电路能够将分解的高频波复位，复位的过程可以由系统自动操作，也可以由系统管理员手动操作，STM32F2X 型 MCU 主控芯片内置的始终电路和复位电路如图 3 所示。

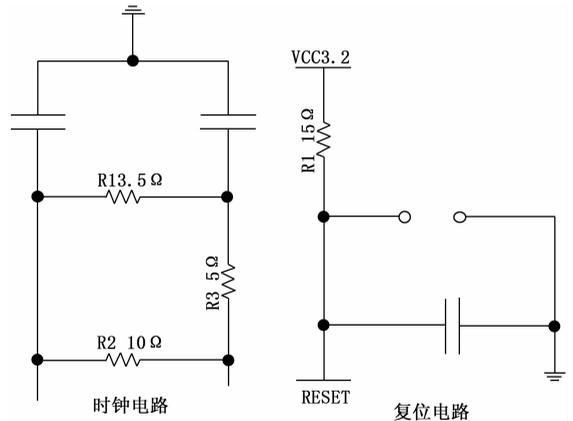


图 3 主控芯片的时钟电路和复位电路

始终电路配备 3 个阻值为 3.5 Ω、10 Ω 和 5 Ω 的电阻器，而复位电路除了配备一个阻值为 5 欧姆的电阻器之外，还具有一件重启的功能，可以是系统恢复到初始状态。编纂好的软件程序需要复制或刻录在 MCU 芯片中毒气检测系统才能够运行，内部结构及芯片的外部接口都采用 SWD 型通用接口。

1.3 毒气检测系统功能模块设计

除主控 MCU 模块之外，毒气检测系统的功能模块还包括多个毒气浓度、类别采集与测量模块、毒气分析模块、电源管理模块、I/O 模块和显示模块。其中毒气分析模块内置了离群模糊核聚类算法程序，这套算法程序是系统功能的主要实现程序。采集与测量模块由于数量较多且寿命较短，在设计过程中注重性能与成本的均衡，模块的数量随检测空间的增加而增加；I/O 模块与显示模块选择兼容性较

好的硬件部分，其中显示器的尺寸需要在 9.0 寸以上，显示分辨率需要达到 $2\ 960 \times 1\ 440$ 即 2K 的像素显示，使检测员在观测中不丢失显示的细节。

数据存储模块也是毒气检测系统的关键功能模块之一，本文选择的数据存储模块的标准内存为 10 T，由于存储数据有部分图像和视频文件，在存储模块的设计中还考虑了扩展存储的问题，配备了丰富的拓展内存接口，可以兼容 USB 接口、TF 接口及其他种类的 FLASH 接口。如果毒气检测装置考虑在室外使用，检测范围较大系统还提供了无线传输模块供选择，无线模块可以选择安装在采集测量模块和基于离群模糊核聚类算法的气体数据分析模块内部。该无线模块还通过内部 USB 串行通信接口的方式与 MCU 模块连接，更易提高系统的检测效率。

2 基于离群模糊核聚类算法的毒气检测系统流程设计

毒气检测系统采用了模块化主程序设计，系统启动之初先将 MCU 模块和离群模糊核聚类分析模块的原始参数清零，重新设定与测试环境相匹配的参数体系。主动芯片发出指令后，系统进入初始化状态，检测各项指标是否正常。PID 毒气检测系统没检测一次后将全部检测数据加入系统的数据库，如果毒气采集模块能够采集到系统数据库存有的毒气原始资料是，检测过程可以在几秒内完成。系统初始化后进入工作状态，毒气采集模块分别将毒气的浓度信息，类别信息传递到离群模糊核聚类分析模块，该模块调整端口电压值及电流、电平数据记性 A/D 转换，变化成 MCU 模块能够读取和分析的数字信息。将模块采集到的毒气原始数据视为一个在有限模式空间 R^n 内的数据集 X ：

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (1)$$

其中任一个有效数据 x_i 都是一个能够被量化的模式向量，如果 m 个 n 为数据将集合 X 表示成一个 $m \times n$ 维矩阵，那么模糊核聚类方法的意义在于能够按照有效数据 x_i 之间的特点重新将这些数据分成 k 个模糊类，并获得一个准确度最高的毒气数据模糊矩阵 Y ， Y 内的全部元素满足条件 $y_{ik} \in [0, 1]$ ， y_{ik} 表示有效矢量 x_i 的第 k 类模糊隶属度，如果设集合 $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_i\}$ 是数据核聚类模式的原型，那么核聚类算法的最小代价目标函数 $\zeta(Y, Z)$ 可以表示为：

$$\zeta(Y, Z) = \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^n y_{ik}^m \tau_{ik}^2 \quad (2)$$

其中， $\tau_{ik} = \|x_i - z_k\|$ 表示任一数据点到聚类中心的距离。本文提出的基于离群模糊核聚类算法的控制程序软件，利用 R^n 空间范围内的非线性函数 $f(x_i)$ 对全部样本投影并得到一组空间向量集 $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_k)$ ，此时不同空间内的有效数据即空间特征向量 x_i 和 x_j 之间的内积，可以用核聚类的模式表现出来：

$$G(x_i, x_j) = f(x_i) \times f(x_j) \quad (3)$$

按照核方法的总体思想用非线性映射拓展到高维的特征空间，能够实现特征矢量的进一步分类，优化后的最

小目标函数 $\zeta(Y, Z)$ 可以表示为：

$$\zeta(Y, Z) = \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^n y_{ik}^m \frac{1}{\omega_k} \|f(x_i) - f(z_k)\|^2 \quad (4)$$

式中， ω 为有效特征矢量之间的权重比例，这时毒气检测系统的模糊隶属度 y_{ik} ，可以表示为：

$$y_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^l \left(\frac{z_{jk}}{x_i}\right)^{\frac{1}{m}}} \quad (5)$$

毒气检测中有效数据模糊隶属度的确定，能够为最终毒气类别、浓度、危害程度等指标的确定提供最直接的证据。本文设计的基于离群模糊核聚类算法的 PID 毒气检测的主控程序，如图 4 所示。

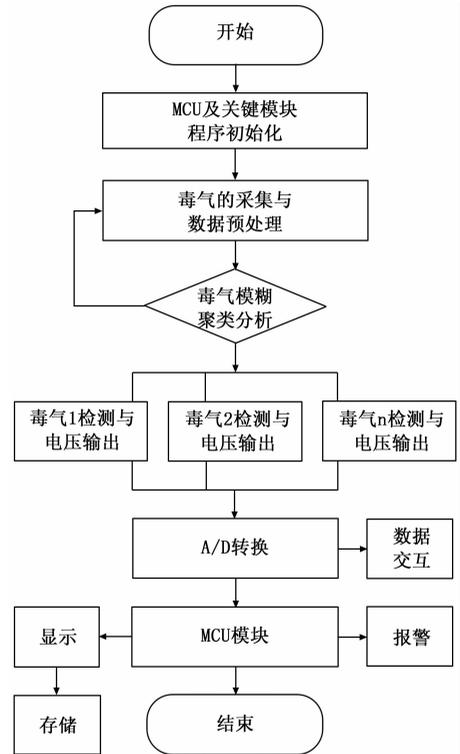


图 4 PID 毒气检测系统主控程序

基于离群模糊核聚类算法主控程序可以按照功能模块分解为若干子程序，当系统进入工作状态以后，由采集测量模块提取的毒气样本经预处理后进入模糊聚类分析模块，由于不同温度条件下的毒气特征明显不同，毒气采集与测量模块除了采集不同种类毒气的特征外，还需要采集到毒气现场的温度变化情况，供数据综合处理时使用。在毒气采集的子程序中，也需要先将毒气采集子程序中的各类参数初始化、函数复位、检测复位信号与返回信号的灵敏度。子系统初始化后将毒气和温度的数值以二进制补码的形式保存在模块内，并及时传递给毒气聚类分析模块和 MCU 主控芯片。数据采集模块针对不同的毒气种类输出不同的电压和电平，系统对采样毒气模糊聚类分析处理后将采样数据转换为模拟数字数据上传到 MCU 模块。MCU 主控芯片的嵌入式结构中内置了数据库功能，该部分功能通

过 FATFS 程序完成，毒气数据信息存储子程序不仅能够驱动内置的数据存储单元，还能够通过 STDIN 外置驱动程序，驱动外接的 USB、SD 等数据存储设备，在读写外接的数据存储程序前需要先将这些设备格式化处理和数据的 A/D 转换，以便于数据能够更好第保存。

对毒气的类别、浓度信息、危害程度等信息汇总处理后，经 OLED 显示屏输出，OLED 材质的显示模块柔性更好，寿命更长，而且在显示图形图像数据时的清晰度更高。显示模块的子程序也需要进行初始化处理，清除原有数据，显示模块具有较强的数据操作功能，系统管理员通过程序输入，可以调用自己所需要的数据显示结果。显示模块还能够进行 FSMC 的时钟操作功能及 AFIO 程序的复位功能，实现想系统这些更高级的编程功能，大都通过专用的数据检测函数程序实现，操作人员可以根据需求输入 main 函数，调取所需要的关键毒气检测数据。毒气检测系统的显示模块子程序自带阈值控制报警装置，如果输出的毒气指标值数据超过了安全范围，提供设备的使用者采取措施，控制毒气源所产生的危害。显示模块根据使用者的要求，可以加装远程报警系统装置，通过无线传输网络向远程的使用者做出提示。针对毒气的危害性，本文设计了一种基于离群模糊核聚类算法的 PID 毒气检测系统，在检测系统模块设计及控制程序的设计方面，引入了离群模糊核聚类的思想提高采样毒气数据的聚类能力。在硬件模块设计上专门的毒气源检测模块，以提高对毒气类别和浓度信息的识别能力；在软件算法流程方面，发挥了离群模糊核聚类算法在数据分类中的优势，提高毒气源检测的实际检测效果。

3 实验结果及过程分析

3.1 毒气检测系统主要参数测试

系统进入工作状态前，需要对毒气检测系统的各个硬件模块及运行主程序、子程序的功能性进行全面测试。检测的主要项目包括毒气采集模块的传感器工作状态、毒气分析模块工作状态、MCU 及电源管理模块的工作状态。检测低频信号的发生装置、高频信号的输出装置、压控恒流电源、毒气数据输入、及信号输出的叠加电路，最后还需要检测电压的数字模拟信号的转换情况，与 OLED 显示模块是否正常。分别试运行系统的主控程序与各模块的子程序，系统采集模块传感器的工作频率，及调制信号的检测参数值，如表 2 所示。

表 2 某典型产品测试数据

采集模块传感器频率	调制信号频率	压控电压最低值	压控电压最高值
5Hz	25Hz	2.5V	3.6V
主控板最低电流	主控板最高电流	毒气分析模块最低电压	毒气分析模块最高电压
1.2mA	5.5 mA	2.5V	3.0V

经检测系统的主要测量值与工作状态的最优参数值一致，可以实施毒气检测实验。

3.2 毒气类别检测

为验证毒气检测系统的综合性能，本文分别选择了五种天然毒气和五种化学毒气，检测的毒气浓度为 0.1 mg/m³，选定的 10 种样本毒气源，如表 3 所示。

表 3 毒气测试样本

天然毒气		化学毒气	
I	CO	VI	C ₄ H ₈ Cl ₂ S
II	NO	VII	(CH ₃) ₂ CHOOPF(CH ₃)
III	H ₂ S	VIII	HCN
IV	SO ₂	IX	ClCO ₂ CCl ₃
V	Cl ₂	X	COCl ₂

在密闭的室内空间内，同时注入微量上述 10 种毒气，检测系统能否在 10 s 时间内检测出毒气，并识别出具体的毒气列表，首先用本文设计的 PID 毒气检测装置进行实验，实验检测结果如图 5 所示。

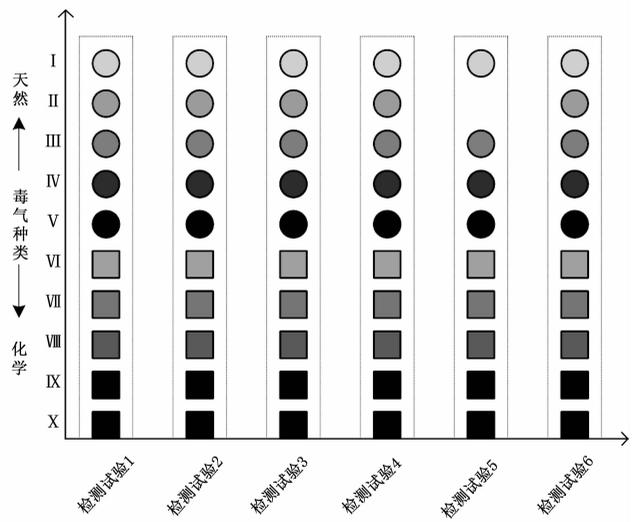


图 5 本文检测系统的毒气类别实验检测结果

本文系统在 6 次检测实验中全部识别检测出了微量的化学毒气，仅在第 5 次检验实验中未识别出天然毒气 NO。再使用传统基于光学原理毒气检测系统进行检测实验，检测分析结果，如图 6 所示。

从图 6 的毒气检测结果分布系统可以分析出，传统毒气检测系统对于化学毒气的敏感程度更低，尤其是对于剧毒物质 HCN 和 COCl₂ 的检测效果更差，总体检测效果无法满足需求。

3.3 毒气浓度检测

分别在普通空气背景下和 CO₂ 背景下，检测毒气的浓度，实验毒气源为 C₄H₈Cl₂S，检测的结果分别如表 4 和表 5 所示。

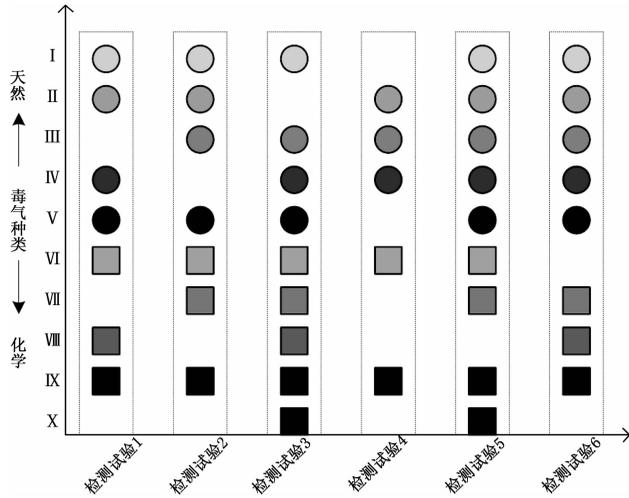


图 6 传统基于光学原理的毒气类别检测结果

表 4 空气背景下毒气源检测结果

气体浓度/ppm	检测结果/ppm		检测误差率(%)	
	本文毒气检测设计	传统毒气检测设计	本文毒气检测设计	传统设计
100	98	95	2.0	5.0
200	195	191	2.5	4.5
500	489	458	2.2	8.4
1000	985	902	1.5	9.8
2000	1990	1901	0.5	4.9
5000	4980	4882	0.4	2.4

表 5 CO₂ 背景下毒气源检测结果

气体浓度/ppm	检测结果/ppm		检测误差率(%)	
	本文毒气检测设计	传统毒气检测设计	本文毒气检测设计	传统设计
100	97	90	3.0	10.0
200	196	190	2.0	5.0
500	486	442	2.8	11.6
1000	980	915	2.0	7.5
2000	1920	1856	0.4	2.2
5000	4915	4801	1.7	3.9

从两种气体背景下对毒气源为 C₄H₈Cl₂S 的浓度检测结果可知，本文检测系统的检测结果更接近于真实值，而且稳定。

[1] 李 国, 李成通, 蒿培培. 基于 Android 系统的机场噪声监测终端设计与实现 [J]. 中国民航大学学报, 2014, 32 (2): 49-54.

[2] 杨 东. 机场航空噪声的测量及感知系统的设计 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.

[3] 沈 松, 刘 通, 应怀樵. 现代智慧测量仪器的软件体系研究 [J]. 国外电子测量技术, 2016, 35 (12): 1-6.

[4] GB 9660-201, 机场周围区域飞机噪声环境质量标准 [S].

[5] 应 明, 杜 峰, 应怀樵, 等. 双 24 位设计的双核数据采集仪 [A]. 全国振动理论及应用学术会议 [C]. 2007.

[6] Miekiņa A, Podgórski A. Digital-Filter-Based Compensation

定性更好，平均检测误差率可以控制在 1.51% 和 1.98%。综合分析，提出的基于离群模糊核聚类算法的 PID 毒气检测系统的检测效果更优，精度更高。

4 结束语

本文设计了一种小型的 PID 毒气检测系统，该系统的最大特点是能够适用于多种天然毒气和化学毒气的同时混合检测。为提高毒气检测精度文中系统应用了离群模糊核聚类算法，并在系统中增加了毒气检测分析模块，以改善对毒气数据的分类处理能力。本文系统在设计之初就考虑到了操作的易用性和人际交互性能，如可以利用基于触屏的数据显示模块，增添或修改系统的主程序和各个模块的子程序。

当前人机交互和人工智能领域已经成为计算机学科的研究重点，随着环境污染情况的加剧，毒气检测重要性不断提升，毒气检测系统设计也朝着小型化、智能化的方向发展。为满足系统检测和人机交互性能的需要，在未来毒气检测的系统功能还将会进一步增强，并且会应用到更为广阔的领域。

参考文献:

[1] 邓云峰, 盖文妹. 重大毒气泄漏事故区域疏散分析系统设计与应用 [J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13 (12): 13-19.

[2] 谢雪凌. 融合环境因素的有限空间毒气扩散危害程度分析 [J]. 人民长江, 2018, 49 (8): 78-82.

[3] 田水承, 周可柔. 基于 ALOHA 的氯乙烯储罐泄漏事故模拟研究 [J]. 西安科技大学学报, 2018 (2): 187-192.

[4] 刘 星. 物流基地危险货物储区外部安全防护距离研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12 (6): 71-76.

[5] 雷其昌. 装饰装修引起室内环境污染来源及防治措施 [J]. 建材与装饰, 2018 (7): 151-152.

[6] 李 颖, 付金宇, 侯永超. 有害气体检测的电化学技术的应用发展 [J]. 科学技术与工程, 2018 (3): 132-141.

[7] 张 铮, 曹守启, 陈佳品. 基于物联网的 QCM 气体检测系统的设计 [J]. 电子设计工程, 2018, 26 (11): 123-126.

[8] 王书涛, 王昌冰, 潘 钊, 等. 光学技术在气体浓度检测中的应用 [J]. 光电工程, 2017, 44 (9): 862-871.

[9] 吴国忠, 王 迪, 李 栋, 等. 开放光路 TDLAS 气体检测系统光学接收组件设计 [J]. 应用光学, 2017, 38 (6): 877-883.

[10] of Case Effect in Sound-Level Meters [J]. International Journal of Electronics & Telecommunications, 2010, 56 (3): 263-266.

[8] Müller G, Moser M. Handbook of Engineering Acoustics [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2013.

[9] 刘正士, 汪小龙, 王 勇, 等. 双线性变换中的频率失真 [J]. 振动工程学报, 2002, 15 (1): 102-105.

[10] 唐 求, 贾杨威, 滕召胜, 等. 基于粒子群优化的声级计 A 计权设计 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (4): 856-862.

[11] 蔡德威, 陈章位. 一种基于 DSP 的时间计权声级算法 [J]. 电声技术, 2015, 39 (2): 59-64.