Design of Intelligent Safety Helmets and Their Early Warning System for Mining*

CAO Yueyang[1], ZHANG Jiahong[1,2*], ZHOU Jiatao[1], LU Chunling[1], LI Min[1]
(1.School of Integrated Circuits, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China;
2.Jiangsu Collaborative Innovation Center on Atmospheric Environment and Equipment Technology,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210044, China)

Abstract: In order to intelligentize the safety helmet and make it safer for miners to work underground, a mining intelligent safety helmet of terminal system is designed. The system integrates functions such as temperature and humidity detection, gas concentration detection, staff positioning, wireless transmission, light and sound alarm, and voice and video, and based on this, both software and hardware designs have been carried out. The hardware circuit design adopts the STM32G431RBT6 microprocessor as the system control core, and the peripheral circuits integrate various functional modules. The software is designed by using the RT-thread real-time operating system, and the upper computer is designed by using QT. In the experiment, a back propagation(BP) neural network model is used to classify the gas concentration safety status collected in real-time and upload it to the upper computer for real-time display. The classification accuracy is about 92.6%, which can provide real-time alarm for dangerous situations and has certain reference value.

Key words: mining safety helmet; gas detection; LORA wireless communication; UWB/GPS positioning; QT upper computer; neural network
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.038

矿用智能安全帽及其预警系统设计*

曹越洋[1], 张加宏[1,2*], 周家涛[1], 陆春玲[1], 李 敏[1]
(1.南京信息工程大学集成电路学院, 江苏 南京 210044;
2.南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044)

摘 要: 为将安全帽智能化, 使矿工下井作业更加安全, 设计了一种矿用智能安全帽终端系统。该系统集成了温湿度检测、气体浓度检测、工作人员定位、无线传输、光声报警和语音视频等功能, 并据此进行了软硬件设计。采用 STM32G431RBT6 微处理器作为系统控制核心, 外围电路集成各个功能模块。软件采用 RT-Thread 实时操作系统进行程序设计, 采用 QT 设计了上位机。实验中采用逆传播(BP)神经网络模型对实时采集的气体浓度安全状况进行分类并上传至上位机显示, 分类准确度约为 92.6%, 能够对危险情况实时报警, 具有一定参考价值。

关键词: 矿用安全帽; 气体检测; LORA 无线通信; UWB/GPS 定位; QT 上位机; 神经网络
中图分类号: TP302; TD67 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0967-10

矿井作为一种特殊的劳动环境, 存在着复杂的工作条件和高风险情况, 给矿工安全和健康带来了严峻挑战。传统安全帽无法满足矿工在这种特殊环境中的安全需求。他们面临着高温、高噪音、有害气体等多种危险因素[1]。由于传统安全帽的局限性, 无法及时有效地感知矿工的环境风险和生理状态。因此, 研发一种具备智能化功能的安全帽, 已成为相关领域的研究热点[2-5]。

在当前矿用智能安全帽系统的研究中, 已报道的内容涉及智能安全帽创新设计、智能传感器应用、蓝牙通讯、GPS 定位、LORA 定位、UWB 定位、佩戴识别及预警等多种技术[6-12]。例如, 赵鹏[6]设计了有限空间智能安全帽系统, 实现了对有限空间环境及工人状态的实时监测。储希贤[9]设计了基于 LORA 的智能安全帽系统, 实现了工地监管人员对安全帽佩戴人员安全状况监控、安全帽终端与网关设备管理与维护、地图展示等服务。陆启荣等[12]设计了基于作业安全监管的智能安全帽系统, 实现对作业人员生理状态和作业行为的监控, 在心率、血氧检测精度和功能上能满足施工作业现场的需求。上

项目来源: 国家重点研发计划项目(2022YFB3205903)
收稿日期: 2024-07-14 **修改日期**: 2024-11-07

述研究无疑为矿用智能安全帽系统的研究提供了宝贵的经验,在此基础之上,围绕井下气体浓度安全预警,本文着重研究了低成本、可穿戴的基于 BP 神经网络井下气体浓度安全预警的矿用智能安全帽系统。在 BP 神经网络设计方面,采用了由输入层、隐含层和输出层构成的三层结构,并设计了相应的低功耗程序运行流程。在气体浓度安全预警的研究中,根据传感器采集到的数据,移植神经网络对井下气体浓度安全进行预警。

1 系统设计

1.1 系统总体设计

如图 1 所示,矿用智能安全帽系统包括前端数据采集单元、神经网络单元、数据处理单元、执行单元以及人机交互单元。前端采集单元主要由温湿度采集模块、一氧化碳浓度采集模块、甲烷浓度采集模块、氧气浓度采集模块、GPS 定位模块、DW1000 测距[13-14]定位模块和视频监控模块构成。人机交互单元主要为上位机通过 LORA 模块与数据处理单元通信并显示实时信息。执行单元主要由 LED 模块、蜂鸣器模块、语音报警模块构成。

当系统开始运行时,先连接 LORA 模块,保持与上位机的通信。通过前端数据采集单元中的温湿度模块、一氧化碳模块、氧气模块、甲烷浓度采集模块,按一定的频率采集环境中的温度、湿度、氧气浓度、一氧化碳浓度以及甲烷浓度传递给 STM32 处理器,STM32 处理器对接收到的数据进行公式转换,通过 LORA 模块传输到上位机。将接收好的数据通过神经网络模型,判断给出气体浓度危险等级,控制 LED 模块、语音报警模块、蜂鸣器模块是否进行报警。视频模块实时采集矿井内的情况,将实时画面传输到上位机显示。

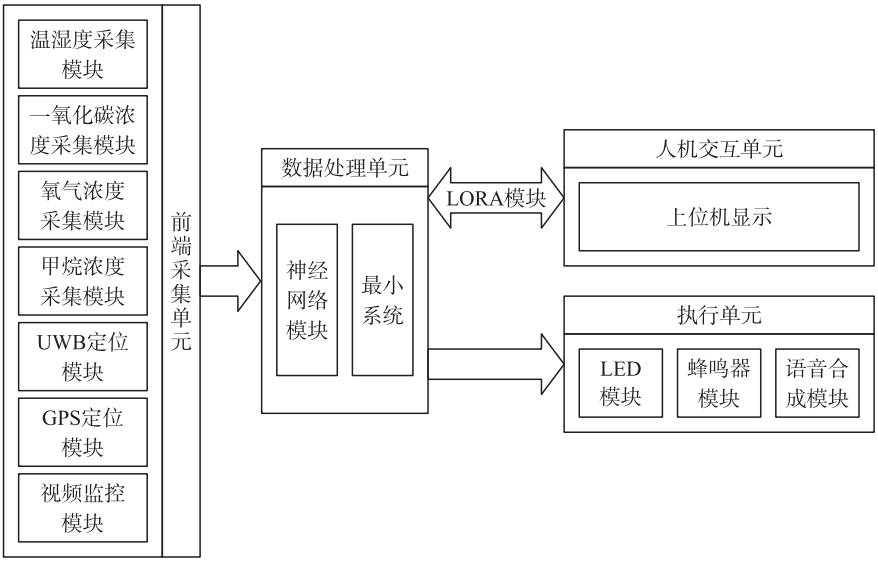


图 1 整体系统设计框图

1.2 硬件电路设计

采用 STM32G431RBT6 作为主控芯片,搭配 MQ-7、MQ-4、JXM-O2 以及 SHT30 等传感器完成矿工佩戴安全帽时的信息采集以及数据传输。图 2 展示了矿用智能安全帽的核心电路板及其外围模块。

本系统的定位模块采用 GPS 和 UWB 收发器模组。GPS 定位模块采用 Air530。Air530 是一款高性能、高精度、高集成度、低功耗的多模卫星导航定位模块,支持北斗/GPS/GPLONASS 等卫星定位系统,支持多系统联合定位和单系统独立定位。Air530 的硬件设计如图 3 所示。该模组采用 USART 模式进行通信。采用典型的 3.3 V 进行供电。VBACKUP 供电电压为 2.8 V~3.3 V,如需要热启动快速定位,

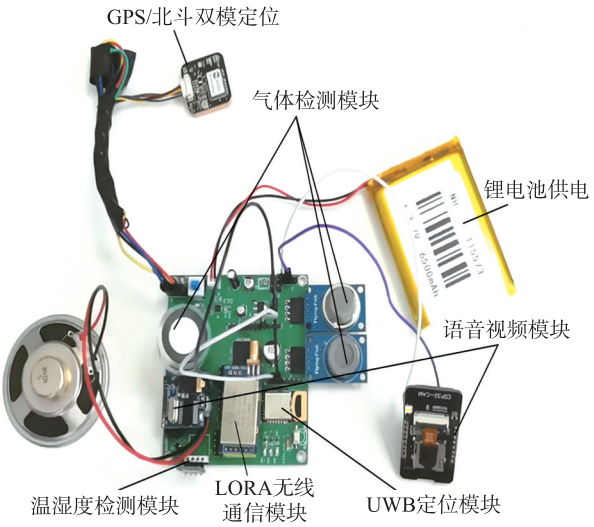


图 2 电路板展示图

则 VBACKUP 外接一个可充电的钮扣电池或者法拉电容,再外加一个充电二极管。串口 TXD、RXD 是 2.8 V TTL 电平,默认波特率为 9 600 bps。

BU01 是基于 DW1000 设计的超宽带(Ultra-Wideband,UWB)收发器模组,集成了天线、RF 电路、电源管理和时钟电路。BU01 可以用于双向测距[15]或 TDOA 定位系统中,定位精度可达到 10 cm,并支持高达 6.8 Mbps 的数据速率。BU01 的硬件电路设计如图 4 所示。BU01 模块的 VCC 接 3.3 V,CLK、MISO、MOSI、CSn 接入单片机 SPI 引脚,分别为 PB3、PA6、PA7、PA4。IO0~IO3 分别接入不同颜色的 LED 灯,用于指示 BU01 的工作状态。

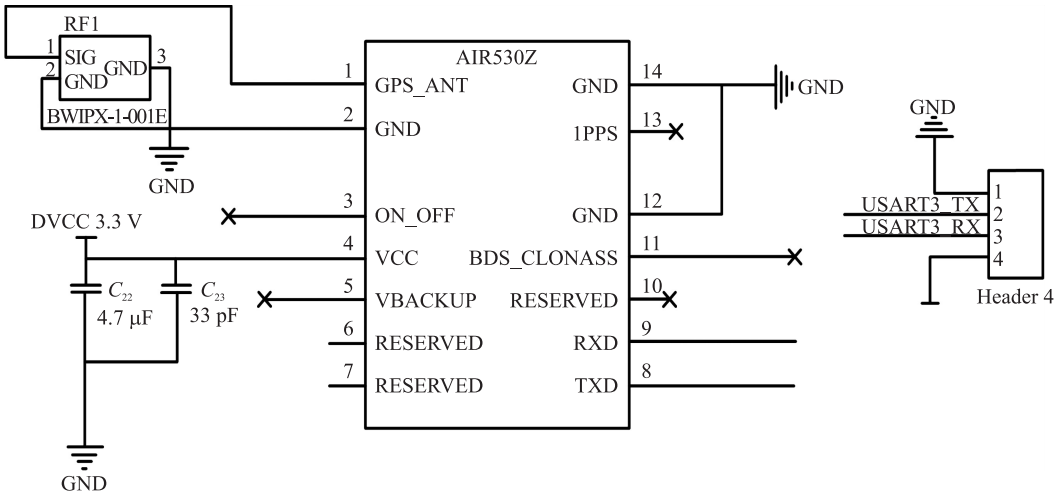


图 3　GPS 定位模块原理图

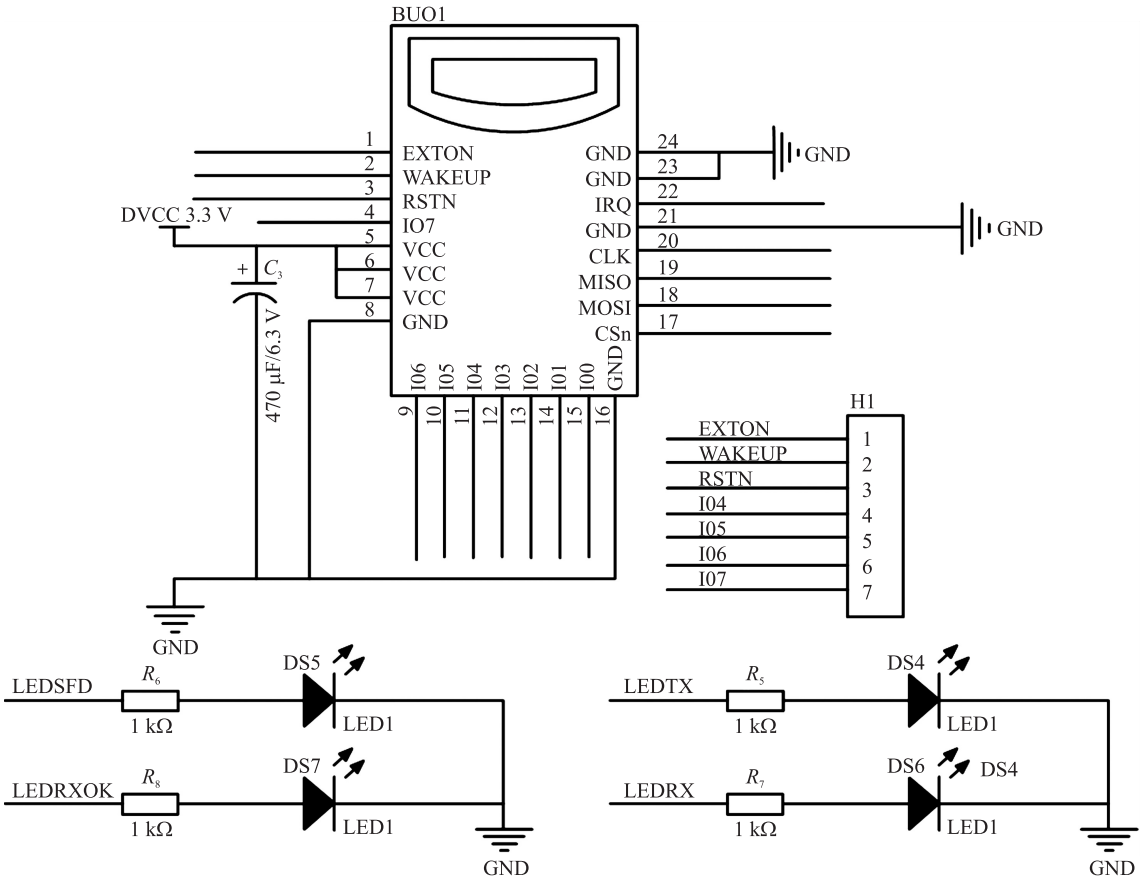


图 4　UWB 定位模组原理图

一氧化碳浓度采集模块采用 MQ-7 气体传感器。MQ-7 是一款高灵敏度的一氧化碳(CO)传感器,能够精确检测空气中的 CO 浓度。矿井环境中,CO 是一种常见的有害气体,尤其是在火灾、爆炸或通风不良的情况下,CO 浓度会急剧上升,对矿工的健康和生命安全构成严重威胁。因此,选择 MQ-7

传感器可以实时监测矿井中的 CO 浓度,及时预警、确保矿工安全。MQ-7 对环境温度和湿度有一定的耐受性,适合矿井这种多变的工作环境。此外,MQ-7 价格适中,易于集成到嵌入式系统中,具有较好的性价比。使用匹配的电路可将电导率的变化转换为与该气体浓度相对应的输出电压信号。传感器表面电阻 R_S,通过与其串联的负载电阻 R_L 上的有效电压信号 V_{RL}输出而获得。二者之间的关系为:

$$\frac{R_S}{R_L}=(V_C-V_{RL})/V_{RL} \tag{1}$$

根据式(1),可以得到如下关于一氧化碳浓度值计算的组合公式:

$$V_{RL}=3.3\times\frac{\mathrm{ADC}}{4\ 095} \tag{2}$$

$$R_S=\frac{3.3-V_{RL}}{V_{RL}\times R_L} \tag{3}$$

$$\mathrm{ppm}=98.322\times\frac{R_S^{-1.458}}{R_0} \tag{4}$$

通过以上公式便可将 MQ-7 的电压值转换为实际的物理量。其中 V_C 为回路电压,V_{RL}为电压输出值,ADC 为模数转换值,R_0 为器件在洁净空气中的电阻值,ppm 为一氧化碳浓度值。

MQ-7 模块与单片机直连,其中 VCC 端接 3.3 V,GND 接地。CO_DO 接口为数字开关量,接入 PB13,CO_AO 为模拟量,接入 PB15。MQ-7 模块的内部电路原理如图 5 所示。

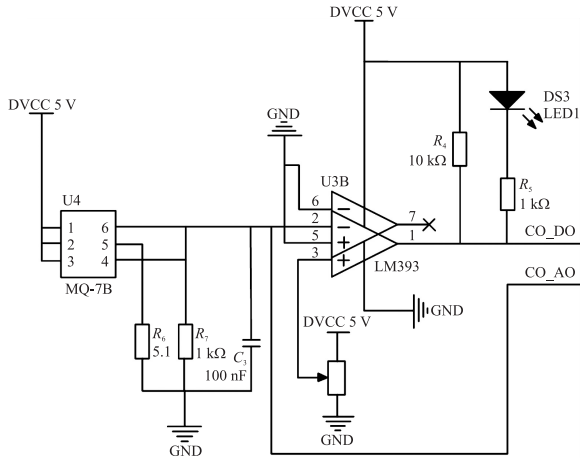


图 5 一氧化碳模块电路原理图

甲烷浓度采集模块采用 MQ-4 可燃气体传感器。它对甲烷的检测灵敏度高,对酒精及其他一些干扰性气体有较强的抗干扰能力,广泛适用于家庭用气体泄漏报警器、工业用可燃气体报警器以及便携式气体检测器。甲烷浓度采集模块原理和一氧化碳浓度采集模块类似,参考图 5。MQ-4 传感器专用于检测空气中的甲烷(CH_4)浓度。甲烷是煤矿中最主要的可燃气体,其浓度一旦过高,容易引发爆炸事故。实时监测甲烷浓度是煤矿安全系统中至关重要的环节。MQ-4 传感器具有较高的灵敏度和检测精度,能够在低浓度下探测到甲烷的存在,提前预警潜在的危险。该传感器同样具有较好的环境适应性,能够在矿井恶劣条件下稳定工作。

氧气浓度采集模块采用了智能型气体检测模组,JXM-O2 是一款高精度的氧气(O_2)浓度传感器。矿井中的氧气浓度直接关系到矿工的呼吸健康和生命安全。氧气浓度过低可能导致窒息,过高则可能引发火灾。因此,选择 JXM-O2 传感器可以确保矿井中的氧气浓度维持在安全范围内。JXM-O2 传感器的输出信号稳定,响应速度快,能够及时反映矿井中氧气浓度的变化。其设计紧凑、功耗低,适合在矿井这样的复杂环境中长时间运行。传感器内部带有高精度放大、去噪声处理、温度补偿处理,同时出厂前每个传感器都经过标准气体标定处理,保证客户拿到手的传感器模组直接输出可用和准确的气体浓度信息。氧气模块同样也是与单片机直连,其中 VCC 端接 5 V,GND 接地。TXD 接 USART2 的 RX 引脚,即 PA3,RXD 接 USART2 的 TX 引脚,即 PA2。

综合精确度和成本温湿度传感器采用 SHT30 模块,SHT30 是一款高精度的温湿度传感器,能够同时监测空气的温度和湿度。矿井环境通常具有较高的湿度和温度变化,而这些环境条件不仅影响矿工的工作舒适度,还可能影响其他传感器的性能。SHT30 集成了温度和湿度传感功能,具有较高的测量精度和可靠性。其体积小巧、功耗低,易于在系统中实现集成,有助于实现对矿井环境的全面监控。SHT30 模块与单片机直连的 VCC 端接 3.3 V,GND 接地,SDA 端接 PB7,SCL 端接 PA15。

选择这四种传感器是基于它们在功能上的互补性。MQ-7 和 MQ-4 分别用于检测有毒气体(CO)和易燃气体(CH_4),JXM-O2 用于氧气浓度监测,SHT30 则用于温湿度监测。这些传感器共同构成了一个全面的环境感知系统,能够及时检测出各种危害,并为矿工提供安全的作业环境。矿井环境特殊,温度、湿度、粉尘等条件对传感器的稳定性和耐久性提出了很高的要求。所选的 MQ-7、MQ-4、JXM-O2 和 SHT30 传感器均具有较高的稳定性和抗干扰能力,能够在恶劣的矿井条件下持续可靠地工作。此外,这些传感器的响应速度快,能实时反馈环境变化,符合矿井安全监控系统的需求。矿井监控系统通常要求设备长时间运行,因此传感器的低功耗特

性尤为重要。MQ-7、MQ-4、JXM-O2 和 SHT30 在满足精度要求的同时,功耗较低,有助于延长系统的运行时间。此外,这些传感器均易于与嵌入式处理器集成,减少了设计和开发的复杂性,提高了系统的可靠性。最后,这些传感器在类似的矿井环境或其他工业应用中已有广泛使用,经过了实际应用验证,证明了其在恶劣环境中的可靠性和准确性。这种实际应用经验为本系统的设计提供了有力的支持,确保传感器选择的合理性和有效性。

信息传输模块采用 LORA 模块,LORA 是一种低功耗广域网络技术,具有远距离传输能力和较低的功耗,非常适合在矿井这样的复杂环境中使用。虽然 LORA 的数据传输速率较低,但其高效的调制方式和抗干扰能力使其在低数据量的传感和监控应用中表现出色。由于设计中摄像头主要用于矿工佩戴,视频的质量要求不高,系统的主要目的是提供基础的可视化支持,如环境监控和状况记录。因此,视频的分辨率和帧率可以适当降低,以减少数据量。这种情况下,视频流的数据速率相对较低,LORA 的传输性能足以应对这种需求。此外矿井作业环境复杂,存在非视距通信的挑战,但 LORA 在非视距条件下的穿透能力相对较强,可以通过反射和绕射实现一定距离内的可靠通信。此外,矿井中的摄像头传输的数据量小,传输时间间隔可以适当延长,减少因数据量过大而导致的传输瓶颈。因此,在合理设置上位机位置(如井口或矿井的中继站)和天线布局的情况下,LORA 完全可以满足视频数据的传输要求。

为了实现井下气体浓度安全预警,需要先实现报警模块的功能,报警模块的设计分为 LED 模块和蜂鸣器模块。蜂鸣器模块采用电磁式有源蜂鸣器。电磁式蜂鸣器利用电磁线圈带动金属振动膜发出声音。LED 模块采用 1 kΩ 电阻进行串联,不同的气体浓度超标会显示不同的颜色。

1.3　软件总体设计

软件系统主要包括 STM32G431RB 控制模块、温湿度采集模块、气体检测模块、GPS/UWB 定位模块、语音视频模块、LORA 无线通信模块和上位机显示部分。采用 RT-Thread 操作系统,使用 CubeMx 将其移植到 STM32G431RB 单片机上并进行引脚外设初始化等系列操作。

RT-Thread Nano 是一个极简版的硬实时内核,由 C 语言开发,是一款可裁剪的、抢占式实时多任务的 RTOS。其内存资源占用极小,功能包括任务处理、软件定时器、信号量、邮箱和实时调度等相对完整的实时操作系统特性。总共创建两个任务,分别为接收任务和发送任务,接收任务主要用来获取传感器数据,包括温度、湿度、一氧化碳、氧气、瓦斯(甲烷)、GPS 经纬度信息、UWB 定位信息,并将获得的一氧化碳、氧气和瓦斯(甲烷)的浓度输入到神经网络中进行分类。当三种气体都处于规定的安全浓度范围内,神经网络输出为第一类安全,此时蓝灯亮;当三种气体中任意一种处于预警浓度范围内,神经网络输出为第二类预警,此时黄灯亮,蜂鸣器发出滴滴声进行提示;当三种气体中任意一种处于危险浓度范围内,神经网络输出为第三类危险,此时橙灯亮,蜂鸣器长鸣。通过邮箱方式将这些数据发送到邮箱中。发送任务用来读取邮箱中的数据,并将这些数据以一定的协议封装成数据包,发送给上位机进行显示。为了保证数据的完整性和准确性,采用信号量和互斥量并以阻塞式方式进行数据发送和接收。主要算法流程如图 6 所示。

1.4　上位机设计

为更好地显示矿井内部信息和方便使用,设计了与矿用智能安全帽配套的远程监控系统,用于对矿井内部的温湿度、气体浓度、位置信息、安全等级和内部情况等参数进行实时监控。系统远端采用 QT 开发平台结合 C++语言编写而成。上位机总共设计四个界面,分别为登录界面、矿用安全帽在线监测平台界面、视频监控界面以及调试界面。图 7 给出了矿用安全帽在线监测平台运行的初始界面,界面可以分为串口检测部分、传感器数据显示部、GPS/UWB 定位信息显示部分、视频监控显示部分以及调试部分。

矿井下的安全帽系统通过 LORA 模块与上位机进行无线通信,上位机会接收下位机发送的数据包,在解析出数据包中的数据后,将其显示在界面上。为更加清晰观察一段时间内温湿度以及各个气体浓度的变化情况,绘制了各个变量随时间变换的曲线。当安全级别为预警或危险时,上位机会发出警报进行提示。定位部分分为 GPS 定位和 UWB 定位,GPS 定位用于矿井外定位,地图上可以实时显示工人的位置信息,矿井内定位用 UWB 定位,在矿井内不同位置设置基站,上位机可以实时显示工人与各个基站的距离。上位机还可以通过视频实时监控矿井内的情况,防止意外等危急事件的发生。

上位机的位置考虑设置在靠近矿井入口或浅层,在矿井作业中,矿工的安全始终是首要关注点。实时监控系统不仅能够保障矿工的安全,还可以优化矿井作业流程。通过对环境参数的实时采集与分

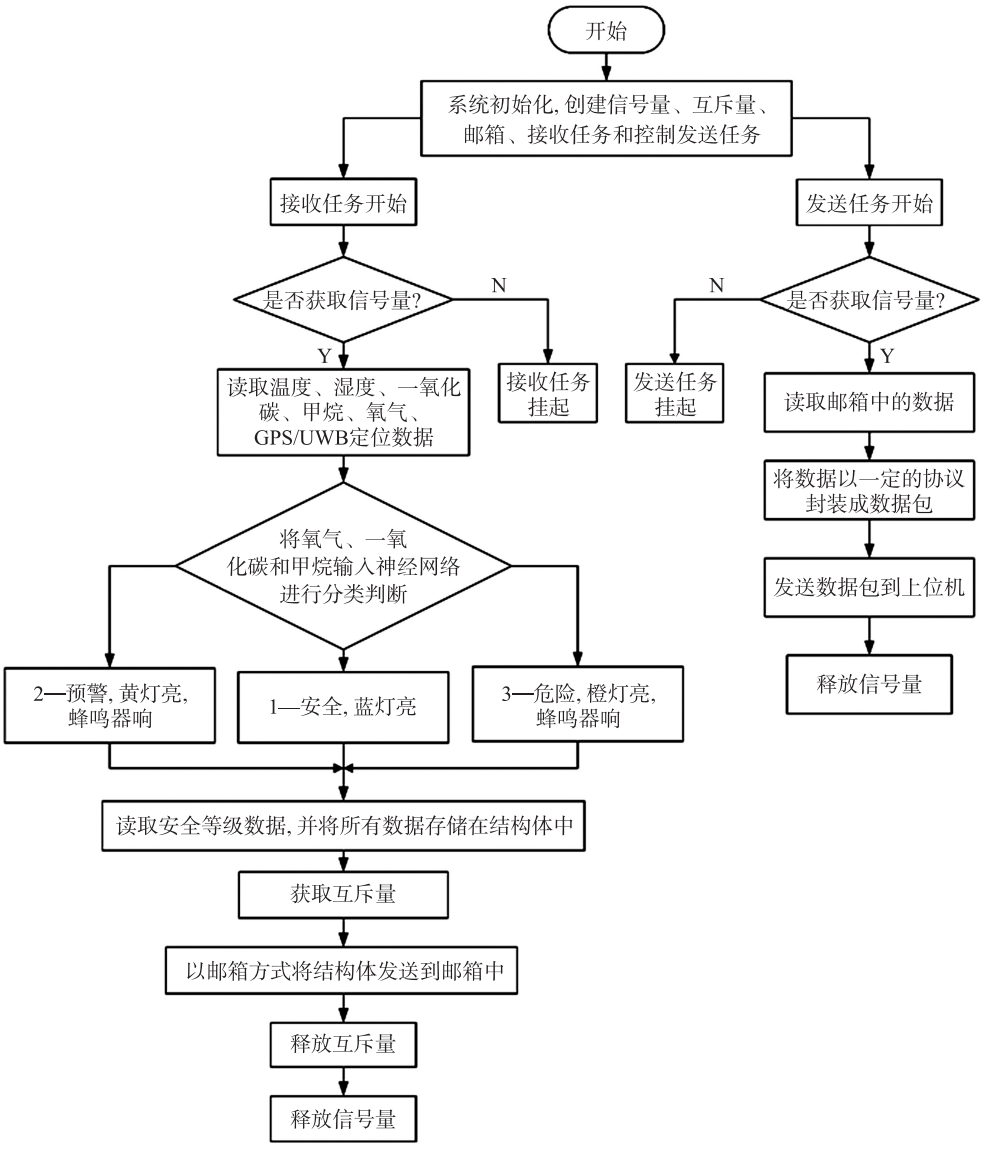


图 6 主要算法流程图

析,管理人员可以更好地了解矿井内的实际情况,从而优化通风系统、调整作业计划、合理调度人员和设备。当矿井环境发生突变(如气体浓度剧烈上升、氧气不足等)时,系统能够迅速传输数据至上位机并发出警报,提升应急响应速度。管理者能够根据实时数据采取行动,如快速疏散人员或启动通风设备,从而避免重大事故的发生。应急响应时间的缩短和决策的及时性对矿井安全管理具有重大意义。并且这种设置能够使得上位机与矿工佩戴的安全帽之间的距离较短,从而减少通信延迟和功耗。

图 7 矿用安全帽在线监测平台

1.5 BP 神经网络的设计

本系统可以实时监测矿井中一氧化碳、瓦斯(甲烷)和氧气的浓度,并根据这些气体浓度来判断矿井当前位置浓度的安全等级[16]类别。安全等级分为三类,分别为安全、预警和危险,并根据判断的结果来达到提示矿工的效果。神经网络[17]设计为3-10-3,其网络拓扑如图 8 所示。

根据《煤矿安全规程》中对矿井中氧气、一氧化碳和甲烷含量的规定对其进行分类,规定井下一氧化碳浓度最高允许范围为 0.0024%,瓦斯(甲烷)浓度不得超过 1%,氧气浓度不得低于 20%。这些规则虽然易于理解和实现,但在复杂的矿井环境中,可

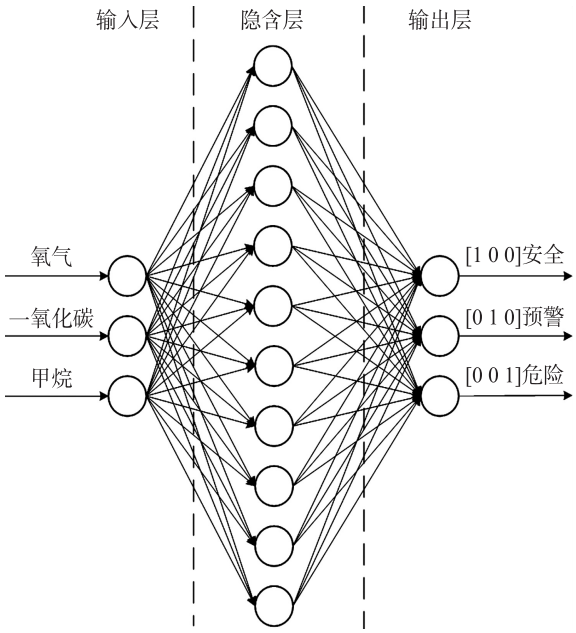


图 8　神经网络拓扑图

能无法充分应对多种因素的非线性影响。因此,有必要探讨更为先进的分类方法,例如神经网络,为此,本文对气体范围分布进行以下划分,用于神经网络训练与测试,见表 1。

表 1　测量数据范围

气体	安全范围/%	预警范围/%	危险范围/%
一氧化碳	X<0.002 0	0.002 0<X<0.002 4	X>0.002 4
甲烷	X<0.9	0.9<X<1	X>1
氧气	X>20.5	20<X<20.5	X<20

运用 MATLAB 中的神经工具箱完成神经网络的搭建和训练,训练好的模型可以移植到单片机上使用,这需要使用 MATLAB 自带的 Simulink 工具进行转换。步骤如下:①通过 gensim 命令将已经训练好的神经网络转换成 Simulink,同时添加输入数据端口和输出数据端口。②配置 Simulink 代码转换器,具体配置选择硬件平台为 ARM,C 语言规范为 C99,选择生成文件为单一 C 文件。③最后进行构建函数,完成编译。

2　实验测试与结果分析

人员佩戴矿用智能安全帽系统如图 9 所示。考虑到安全帽系统不仅需要照明还要对电路负载供电,需要消耗的电流较大,采用 6 000 mAh 大容量锂电池供电,支持有线充电。为了增加用户佩戴舒适度和系统的美观性,使用 3D 打印在安全帽内部安装内罩壳,隔绝电路板和线路。

(a) 人员佩戴示意图　　(b) 整体实物图

图 9　安全帽装置及穿戴示意图

2.1　系统整体运行测试

点击调试按钮,查看下位机传来的数据协议,并将协议里的数据和界面解析后的数据进行对比,看是否一致,若一致,说明解析成功,若不一致则进行代码调试,进行修改。调试界面如图 10(a)所示。可以看出界面显示各个传感器的数据和下位机传来的数据一致,因此,此次上位机和下位机通信且解析成功。

点击打开视频监控,跳出矿用智能安全帽视频检测平台界面,点击开始,可以看到视频效果,经过多次实验,发现视频效果良好,视频测试如图 10(b)所示。

定位部分测试时点击 GPS 定位按钮,上位机会实时显示下位机传来的经纬度信息,并根据当前的经纬度实时在地图上显示矿工的当前位置,本文采用虚拟定位进行测试,设置经纬度坐标为经度 118,纬度 32,点击 GPS 定位按钮,成功在地图上显示位置信息。矿井下定位采用在实验室中进行模拟定

(a) 上位机调试界面　　(b) 视频测试

(c) 定位示意图

图 10　系统整体测试演示

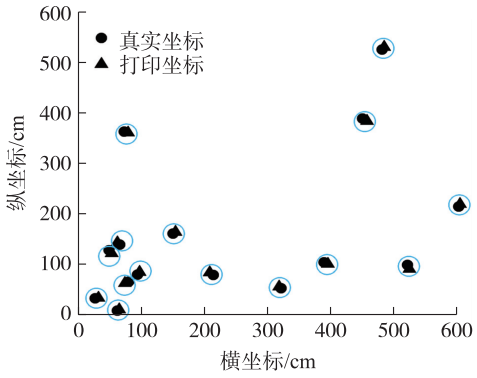
位,采用三基站一标签定位法,每个安全帽上携带一个 UWB 标签,先在实验室固定位置放置三个基站,单片机会返回标签到各个基站的距离,由此来确定安全帽的位置,即矿工的位置。本文在上位机部位进行了井下 UWB 定位的模拟示意来进行说明,如图 10(c)所示。

2.2 DW1000 测距定位测试

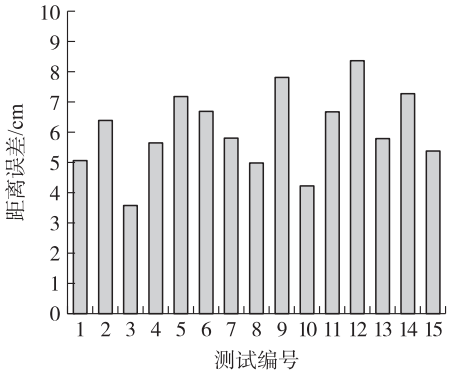
将自主设计焊接的系统电路板上的基于 DW1000 的 BU01 模组作为标签,三套测距定位开发板上的 BU01 模组作为基站,并由设计的双边双向测距法实现距离测量,最小二乘法解算坐标位置。

选择一处空旷场地进行定位实测,实测场景如图 11(a)所示,测试范围划定为 660 cm×660 cm,建立平面直角坐标系,将基站 1 所在位置设为原点(0,0),基站 1 和基站 2 所在直线为 X 轴,基站 1 和基站 3 所在位置设为 Y 轴,基站 2 和基站 3 分别置于平面直角坐标系的(0,300)与(300,0)两点,根据测试结果与真实坐标作图,如图 11(b)所示。由串口打印出的测试结果是通过 DW1000 测距及最小二乘法解算位置得出的坐标,真实坐标以圆点做标记,串口打印的坐标以三角形点做标记,将一组打印坐标与相应的真实坐标用圆圈圈住表示,并以横坐标为基准,将各组从小到大编号。计算每一组的坐标误差距离作柱状图,从图 11(c)中可以发现,测试样本的误差距离均在 10 cm 以内,验证了 DW1000 测距定位单元设计的可靠性。

(a) 定位测试场景



(b) 定位真实坐标与打印坐标对比



(c) 距离误差柱状图

图 11 定位测试场景与测试结果分析

2.3 矿井环境模拟测试

国家煤矿安监局在《煤矿井下安全避险“六大系统”建设完善基本规范》对矿井中甲烷浓度、一氧化碳浓度和氧气浓度等提出了明确的要求,其中,甲烷浓度不得高于 1%,一氧化碳浓度不得高于 0.002 4%,氧气浓度不得低于 20%。根据其规定,将安全帽放入试验箱中,保持其处于密闭空间,并利用气瓶来模拟矿井环境,进行系统的报警灵敏度测试。测试平台如图 12 所示。

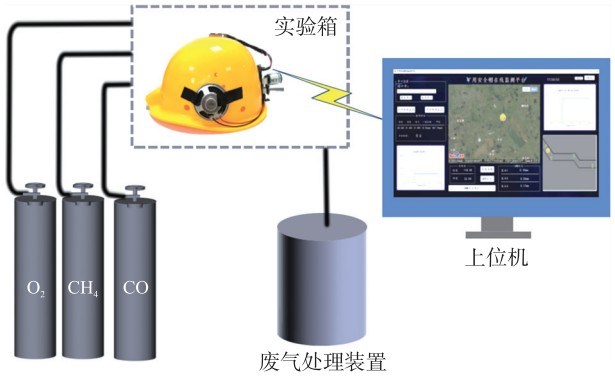


图 12 矿用安全帽气体测试平台

利用气瓶进行随机测试,先将三种气体以安全浓度范围混合通入试验箱中,分别将甲烷和一氧化碳的浓度慢慢调大,将氧气浓度慢慢减小,使其浓度范围变化可以覆盖三个区域,(值得注意的是此实验要在安全的前提下进行,甲烷浓度不得超过 2%,一氧化碳浓度不得超过 0.003%),在这过程中安全帽会实时监测试验箱中的气体浓度信息,并将其无线传输至上位机,方便观察记录分析。

当三种气体浓度处于安全浓度范围时,此时,上位机显示安全等级为安全,硬件部分蓝灯亮。当三种气体浓度处于预警范围内时,此时,蜂鸣器发出滴滴声,且黄灯亮,上位机显示气体安全等级为预警,且有弹窗弹出进行提醒。当一氧化碳、甲烷和氧气的浓度值其中任何一个不满足规定范围内时,蜂鸣器立刻长鸣,且橙灯常亮,上位机显示气体安全分布

等级为危险,弹窗弹出进行提醒。图 13 所示为利用 BP 神经网络进行分类,对各实验气体浓度综合的判断结果。

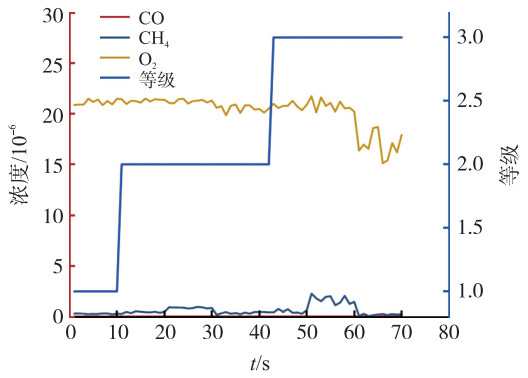
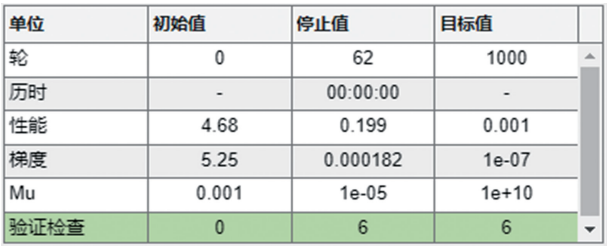


图 13　气体浓度实验测试

为了验证神经网络在气体浓度安全状况分类中的必要性,本研究设计了对比实验,将神经网络方法与传统的简单分类方法进行了比较。简单分类方法是直接按照预定的阈值对气体浓度进行分类,而神经网络方法则通过学习训练数据中的模式,对相同的气体浓度数据进行分类。

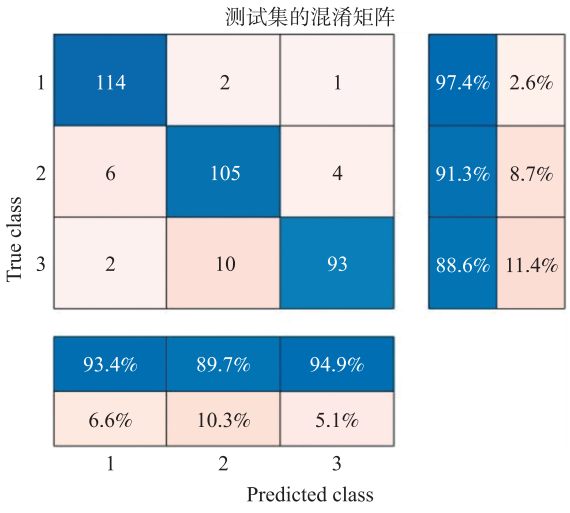
该矿用智能安全帽采用 BP 神经网络[13]来判断用户当前的气体安全等级。BP 神经网络的模型搭建和训练均在 MATLAB 软件中进行。样本数据总量为 1 350 组,每个安全级别分别有 450 组数据。将数据集按照 3∶1 划分为训练集和测试集,这样训练集约有 1 013 组,测试集约有 337 组。在 MATLAB 搭建好模型并设定好学习率、训练轮数等参数,随机打乱样本数据后,将其输入到网络中开始模型的训练,模型训练完成后,使用测试集对模型进行验证。

图 14(a)给出了训练过程中的参数设置情况。可以看到模型的训练最大轮数、训练时间以及训练过程中模型的误差表现。如图 14(b)所示,通过绘制一个 3×3 的混淆矩阵,将模型的预测判定结果与真实结果进行对比,清晰地展示了分类模型的性能。图中横轴代表模型所预测的类别,纵轴则表示测试集中数据的真实分类。混淆矩阵的对角线上的值表示模型正确分类的数量,而在横轴下方的两行数据则展示了模型在各个类别上的正确和错误分类的百分比。同样地,纵轴右侧的两列数据则呈现了各个真实类别的正确和错误分类百分比。具体到图中的示例,1、2、3 类分别对应安全、预警和危险三种不同安全等级。从图中可以明显观察到,针对测试集中的 2 类安全等级状态,模型的识别准确率高达 89.7%。而 3 类安全等级状态,模型的识别准确率更是高达 94.9%。将对角线上的数值相加,可以获得模型在测试集中正确识别的总数,即 312 组。而测试集的总数据量为 337 组,据此可以得出模型对矿井内气体安全浓度等级识别的整体精度约为 92.6%。



单位	初始值	停止值	目标值
轮	0	62	1000
历时	-	00:00:00	-
性能	4.68	0.199	0.001
梯度	5.25	0.000182	1e-07
Mu	0.001	1e-05	1e+10
验证检查	0	6	6

(a) 模型训练参数



(b) 模型识别准确率

图 14　模型训练及验证测试集结果图

在实验中,我们对比了两种方法的分类结果。表 2 列出了两种方法在不同气体浓度范围内的分类结果和准确率。

表 2　预警准确率对比　　单位:%

气体浓度状态	简单分类方法准确率	神经网络分类方法准确率
安全	90.2	93.4
预警	85.4	89.7
危险	93.1	94.9

如表 2 所示,神经网络方法在各类气体状态下的分类准确率均高于简单分类方法,尤其是在危险状态下,神经网络的准确率达到了 94.9%,高于简单分类方法的 93.1%。简单方法依赖于固定的阈值,无法应对复杂的非线性关系和多因素综合影响,可能导致较高的误报或漏报率。神经网络通过学习历史数据中的模式,能够更好地处理非线性关系和多因素影响,提高了分类的准确性和系统的鲁棒性,在实际应用中可以显著减少误报和漏报,提升矿工的

安全保障。

简单分类方法的优点在于实现容易且计算量小,适合资源有限的嵌入式系统。然而,这种方法依赖于固定的阈值,无法应对复杂的非线性关系和多因素综合影响,可能导致较高的误报或漏报率。神经网络通过学习历史数据中的模式,能够更好地处理非线性关系和多因素影响,提高了分类的准确性和系统的鲁棒性。虽然神经网络的实现和训练相对复杂,但在实际应用中可以显著减少误报和漏报,提升矿工的安全保障。不足的是,靠近边界的数据准确率有下降,主要是由于这些数据差别较小,BP 神经网络在识别时,误差增加,后期可以对算法进行改进,总体上,该安全帽系统基本能够实现矿井下气体预警的场景。

3 结论

本文设计了一款矿用智能安全帽。首先根据矿井内有毒气体的主要成分,设计出检测一氧化碳浓度、甲烷浓度以及氧气含量的测量电路。当浓度超标时,会通过语音合成模块进行提醒,附加蜂鸣器和 LED 模块进行报警。该系统还能检测矿井内实时的温湿度。定位部分采用 GPS/UWB 进行定位,并将数据传输到上位机中,管理人员进行记录。摄像头模块记录矿井内的情况,并将矿内情况传输到上位机中,方便管理人员进行观测。考虑到 GPS 矿内定位效果差,采用 UWB 模块进行辅助定位。数据传输采用 LORA 无线串口进行传输。软件方面,设计出基于矿用智能安全帽系统以及对应的上位机,采用神经网络收集气体浓度数据,构建矿井内气体等级分布情况,分为安全、预警和危险状态,当危险气体浓度超标或者氧气浓度低于标准时,在上位机和下位机分别报警,提醒矿工及监护人员。

参考文献:

[1] 王钟. 煤矿矿井通风与安全监控存在的问题与思考[J]. 化工管理,2023(6):95-98.

[2] 朱辰燕. 矿用智能化安全头盔设计研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.

[3] 汪晶. 智能安全帽技术设计[J]. 中国个体防护装备,2019(4):4-12.

[4] Kim Y, Baek J, Choi Y. Smart Helmet-Based Personnel Proximity Warning System for Improving Underground Mine Safety[J]. Applied Sciences,2021,11(10):4342.

[5] Lakshmi S S, Dagar A, Gupta N, et al. A Technical Review on IoT Based Mining Tracking and Safety Helmet[J]. International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology,2021,9(4):44-47.

[6] 赵鹏. 有限空间智能安全帽系统的设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2022.

[7] 黄天昊. 基于感性意象评价的矿用安全帽产品创新设计[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.

[8] 关惠军,郑宗利,何立东,等. 公路工程中智能安全帽功能定位研究[J]. 建筑经济,2022,43(S1):826-831.

[9] 储希贤. LoRa 智能安全帽系统的管理平台设计与实现[D]. 重庆:重庆邮电大学,2023.

[10] 徐畅,王道元,李敬兆,等. 矿用设备智能安全监测与预知维护系统[J]. 工矿自动化,2021,47(3):79-82,88.

[11] Rudrawar M, Sharma S, Thakur M, et al. Coal Mine Safety Monitoring and Alerting System with Smart Helmet[C]// 2022 International Conference on Automation, Computing and Communication, Navi, Mumbai, 2022:01005.

[12] 陆启荣,宋智鹏,邱柏良,等. 基于作业安全监管的智能安全帽系统设计[J]. 科学技术创新,2023(18):30-34.

[13] 张福洪,莫晨晨,王利强. 基于 TOA/TDOA 超宽带无线定位算法的改进[J]. 电子器件,2009,32(1):93-96.

[14] 徐会彬,孙树芳. 基于超宽带测距的定位精度及时延的研究[J]. 传感技术学报,2019,32(5):735-738.

[15] 王春琦,冯大权,何春龙,等. 基于 UWB 的增强非对称双边双向测距算法研究[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2019,33(1):66-73.

[16] 董常庆,施云波,牛昊东,等. 融合传感器阵列与 SSA-BP 神经网络的气体监测系统设计[J]. 传感技术学报,2022,35(8):1093-1101.

[17] 王伟,储泽楠,张修太,等. 一种改进 BP 神经网络的 *K*-Means 算法[J]. 电子器件,2020,43(2):380-385.

曹越洋(2000—),男,南京信息工程大学硕士研究生,主要从事嵌入式系统与多传感器智能信息处理等方面的研究,1592706337@qq.com;

张加宏(1979—),男,博士,南京信息工程大学集成电路学院教授,研究生导师,本文通讯作者,主要从事微纳电子机械系统、模拟集成电路及嵌入式系统等相关研究工作,zjhnuist@163.com。