

面向煤矿安全的智能安全帽设计与应用

丁 一 李玉丽

(吉林建筑大学, 吉林 长春 130118)

摘要: 提出了一种基于STM32的矿用智能安全帽,集成DHT11、MAX30102和煤矿专用防爆型MQ-4C与MQ-2传感器,分别检测环境温湿度、矿工心率血氧、甲烷浓度以及烟雾浓度。数据经STM32处理后在OLED屏显示,超标或异常时报警。采用IGWO-LSTM算法模型来预测甲烷浓度,以保障煤矿井下安全。通过实验测试,IGWO-LSTM算法模型在甲烷浓度预测中表现优异,其决定系数 R^2 达到0.970 73,均方根误差RMSE为0.632 57,均方误差MSE为0.40,预测精度高,能够提前发现甲烷浓度的异常变化,具有良好的应用前景。该智能安全帽系统显著提升了矿井安全管理的效率和可靠性,减少了事故发生率和因生产中断导致的经济损失。

关键词: 安全帽; 甲烷气体; STM32; IGWO-LSTM

中图分类号: TP212; TU714

文献标志码: A

文章编号: 1008 - 6609 (2025)01 - 0065 - 05

1 引言

近年来,煤矿开采被公认为世界上最危险的工业活动之一,矿工面临的突发事故和安全隐患对生命健康构成重大威胁。传统的矿井安全监测方法主要依赖人工巡检和人工报告,存在反应速度慢、漏检率高的问题,难以应对复杂的矿井环境。随着物联网和人工智能技术的快速发展,其在采矿领域的应用为矿井安全管理和矿工健康保障提供了全新解决方案。基于这些技术的智能系统可以实时监测矿工健康状况和矿井环境条件,并通过数据分析与自动报警,及时应对潜在风险。本文设计了一种基于STM32的矿用智能安全帽系统,它能够实时监测矿工周围环境参数和矿工的生理指标,自动分析环境变化,及时发现异常并发出警报,将风险信息传输至管理中心以便快速应对。与传统方法相比,该系统显著提升了矿井安全管理的效率和可靠性,减少了事故发生率和因生产中断导致的经济损失^[1,2]。

2 系统设计总方案

硬件设计结构图如图1所示,主要由DHT11、MQ-4C、MQ-2组成的环境监测模块、由MAX30102组成的矿工健康监测模块、ESP8266-01S组成的Wi-Fi模块以及声光报警模块和电源管理模块,主控芯片STM32C8T6组成。当矿井中甲烷等气体浓度超出阈值,声光报警装置开始响应,提醒矿工及时撤离。同时监测到的各项数据通过Wi-Fi模块上传到

云平台,地面控制中心监测实时收集到的数据,以应对突发事故。设计原理如下:

(1) 数据采集与处理。利用STM32微控制器通过ADC接口读取MQ-4C和MQ-2传感器的模拟输出电压。读取连接到STM32的I2C通信引脚上MAX30102传感器的数据,读取连接到STM32的GPIO引脚上的DHT11传感器的数据。并把这些数据实时上传到云平台。

(2) 安全监测与响应。MQ-4C、MQ-2等传感器数值与预设值进行比较,超出阈值,声光报警装置立即响应。

(3) 远程监控与应急响应。通过ESP8266-01S Wi-Fi模块,STM32将所有监测数据上传至云平台。地面控制中心可以实时收集和监控上传的数据,以便在发生紧急情况时迅速做出反应。

通过这种设计,智能安全帽系统能够在矿井环境中实时监测多种关键参数,并在检测到潜在危险时及时响应,同时提供远程监控能力,以提高矿工的安全和矿井的运营效率。

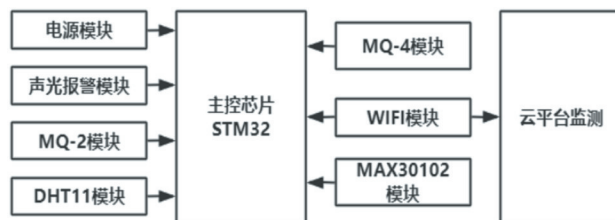


图1 智能安全头盔监测系统框图

3 系统硬件设计

3.1 微控制器

STM32 系列微控制器是基于 ARM Cortex-M 核心的 32 位 RISC 架构。本系统采用 STM32F103C8T6, 该型号具有高达 72 MHz 的主频, 支持高性能和低功耗操作, 特别适合地下矿井中各种复杂的环境。此外, 该微控制器具有低功耗模式, 便携式锂电池可直接为其供电。STM32F103C8T6 集成了 128 KB 的 Flash 存储器和 20 KB 的 SRAM, 能够存储复杂的程序和数据。它还具有丰富的外设接口, 包括多个 GPIO、USART、I2C 和 SPI, 便于与各种传感器和模块连接。

3.2 环境监测模块

选择防爆型 MQ-4C 检测甲烷气体浓度, MQ-2 检测空气中的烟雾浓度。这两种传感器都是通过检测气体与敏感材料接触时电阻或电导率的变化来工作的, 将这些变化转换为与气体浓度相对应的输出电信号。其计算过程如下:

第一步, 在洁净空气中预热传感器后测量电压 V_{RL0} , 计算电阻值 R_0 :

$$R_0 = \frac{V_c}{V_{RL0} - 1} \times R_L \quad (1)$$

第二步, 在目标气体中测量 V_{RL} , 计算电阻值 R_s :

$$R_s = \frac{V_c}{V_{RL} - 1} \times R_L \quad (2)$$

其中, V_c 是供电电压, V_{RL} 是传感器上的电压降, R_L 是负载电阻。

第三步, 计算传感器在目标气体中的电阻值与在清洁空气中的电阻值的比值 R_r :

$$R_r = \frac{R_s}{R_0} \quad (3)$$

第四步, 根据传感器的特性曲线, R_s/R_0 与 PPM 浓度之间的关系是非线性的。使用对数—对数转换后的线性关系:

$$\log\left(\frac{R_s}{R_0}\right) = a \cdot \log(PPM) + b \quad (4)$$

解这个方程, 可以得到 PPM 的计算公式:

$$PPM = 10^{\frac{\log(\frac{R_s}{R_0}) - b}{a}} = 10^{\frac{\log(R_r) - b}{a}} \quad (5)$$

设定甲烷气体浓度与有毒气体阈值, 当超过设定值时会触发声光报警用来提示矿工及时撤离。选择 DHT11 检测矿井内温湿度, DHT11 内部包含一个负温度系数(NTC)热敏电阻, 其电阻值随温度的升高而降低, 反之亦然。当矿工所在环境的温湿度发生变化时, 地面控制中心会调节井下通风口的开启速率, 以优化矿井内的环境条件。

3.3 矿工健康监测模块

选用 MAX30102 传感器, 它是一款集成了心率和血氧

饱和度监测功能的光学传感器模块, 通过发射红外和红光 LED 光并检测反射光的强度变化来测量心率和血氧水平, 其血氧饱和度计算公式如下:

$$SpO_2 = \frac{HbO_2}{HbO_2 + Hb} \times 100\% \quad (6)$$

矿工健康监测模块包含光电二极管、LED 驱动器、信号放大器和数字接口, 能够提供精确的健康监测数据, 且价格低廉。当超过设定值时会触发声光报警用来提示救援人员救助^[3]。

3.4 Wi-Fi 模块与声光报警模块

选择 ESP8266-01S 传感器, 它支持 2.4 GHz 频段的 Wi-Fi 网络, 兼容 802.11 b/g/n 标准, 提供 UART 数据接口, 工作电压为 3.3 V, 在不同模式下有不同的功耗表现, 具有低功耗特性。支持 WPA/WPA2 安全模式。支持多种无线网络模式, 包括 station、softAP 以及 SoftAP+station 模式。当有毒气体超出阈值时蜂鸣器与 LED 灯同时开启, 工人心率血氧超出阈值时蜂鸣器响起。

3.5 传感器接线引脚图

DHT11、MQ-4C、MQ-2、MAX30102、ESP8266-01S 其连接 STM32F03C6 引脚接线如图 2 所示。

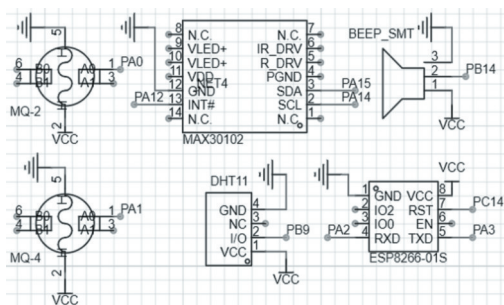


图2 传感器引脚接线图

4 系统软件设计

4.1 传感器板程序设计

本系统设计开发环境是 Keil uVision5, 它是一款功能强大的集成开发环境 (IDE), 专为嵌入式系统开发而设计。板上电后, 首先进行对四个传感器初始化, 通过 I2C 协议与 MAX30102 传感器进行通信, 并在 OLED 屏显示。通过单总线协议进行 DHT11 温度模块的数据采集; 使用 ADC 通道连接 MQ-2 和防爆型 MQ-4C 气体传感器, 周期性采样它们的输出信号并转换为数字量以获取烟雾浓度 (MQ-2) 以及相应气体浓度 (MQ-4C 主要检测如甲烷等可燃气体浓度), 然后在 OLED 显示屏上显示相关数据; 单片机对采集的数据进行阈值判断, 若采集的温湿度、甲烷与有毒浓度超过了设置的阈值, 则蜂鸣器与 LED 进行声光报警。最后上传云平台。其

流程图如图3。

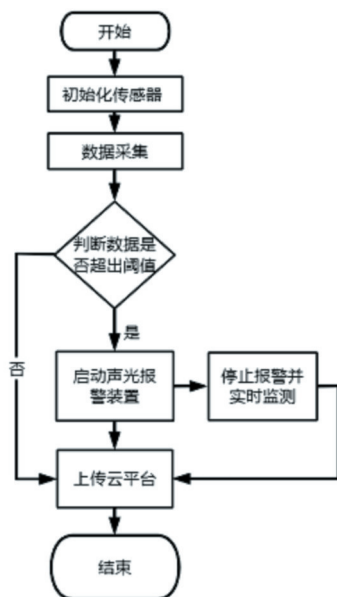


图3 传感器程序流程图

4.2 云平台程序流程

使用AT指令使单片机通过ESP8266模块与阿里云物联网平台建立TCP连接。把这些AT指令写入ESP8266模块中并连接到手机上的热点，最后将数据上传到阿里云，从而实现了单片机与阿里云物联网平台之间的数据交互。利用阿里云物联网平台管理ESP8266-01S设备，并通过MQTT协议实现数据的双向传输。通过阿里IoT Studio的应用编辑器，用户能够将ESP8266-01S收集的数据，如环境温湿度和甲烷气体浓度和有毒气体浓度等，直观地展示在Web界面上，实现实时监控。阿里云物联网平台与ESP8266-01S的整合，极大地增强了开发的便捷性和灵活性。阿里云物联网云平台Web可视化配置流程如图4所示。



图4 云平台操作流程

5 控制算法

5.1 甲烷数据样本准备

根据中国《煤矿安全规程》和相关标准，甲烷浓度 $\leq 0.5\%$ 时，矿井才可以正常作业。煤矿专用防爆型MQ-4C传感器实时监测甲烷浓度并实时将收集数据传输到云平台，在云平

台中导出过去一段时间检测甲烷气体浓度的数据，将这些数据划分为训练集(70%)、测试集(30%)，其中甲烷数据样本如图5所示。采用IGWO-LSTM(改进灰狼算法优化长短期记忆网络)算法模型评估预测性能，以便提前发现甲烷浓度的异常变化，保障煤矿井下安全^[4]。

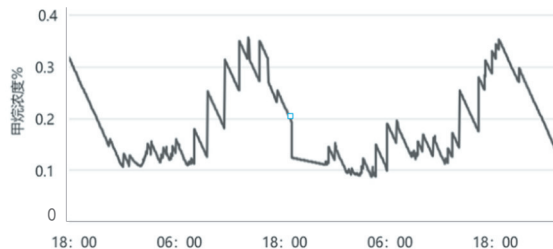


图5 甲烷监测数据样本

5.2 预测算法模型

IGWO-LSTM是利用IGWO分别优化LSTM模型中正则化系数、学习率和隐含层神经元个数，从而避免局部最优解的问题。改进的灰狼优化算法(IGWO)是一种基于灰狼优化算法(GWO)的改进版本，它通过引入新的搜索策略来提高算法的性能。它包括初始化种群、跳出局部最优策略、自适应搜索策略等。LSTM是一种特殊的循环神经网络(RNN)，主要是为了解决传统RNN在处理长序列数据时的梯度消失和梯度爆炸问题。它的结构中有三个门：输入门(Input Gate)、遗忘门(Forget Gate)和输出门(Output Gate)。遗忘门决定了从细胞状态中丢弃哪些信息，输入门确定要更新的信息，输出门则控制细胞状态有多少信息输出。IGWO-LSTM算法模型，主要是IGWO通过优化LSTM模型中正则化系数、学习率和隐含层神经元个数，正则化是为了防止LSTM模型过拟合。如果过大，模型会过于简单，导致欠拟合；如果过小，可能无法有效防止过拟合。其数学模型如下：

$$L(\theta) = L_0(\theta) + \lambda \cdot R(\theta) \quad (7)$$

其中， $L(\theta)$ 是总损失， $L_0(\theta)$ 是原始损失， $R(\theta)$ 是正则化项。

数学学习率(η)是控制权重更新的步长。数学模型如下：

$$\theta_{i+1} = \theta_i - \eta \cdot \nabla_{\theta} L(\theta_i) \quad (8)$$

其中， θ 是模型参数， $\nabla_{\theta} L(\theta_i)$ 是损失函数关于参数的梯度。

隐含层神经元个数(N)主要是影响模型的复杂度和能力。

IGWO-LSTM预测模型的流程图如图6。

5.3 算法指标、算法预测结果以及算法在STM32上占用资源的情况

决定系数(R^2)是评估回归模型拟合优度的一个常用指标，它反映了模型能够解释的变异程度，值越接近1表示模型拟合越好。均方误差(MSE)是一个衡量模型预测与真实值之间差异的标准。它计算了预测值和真实值之间差异的平

方的平均值。均方根误差(RMSE)是均方误差(MSE)的平方根,它和MSE一样,也是评估模型误差的常用指标,但它的单位和预测值相同,因此解释起来更加直观。

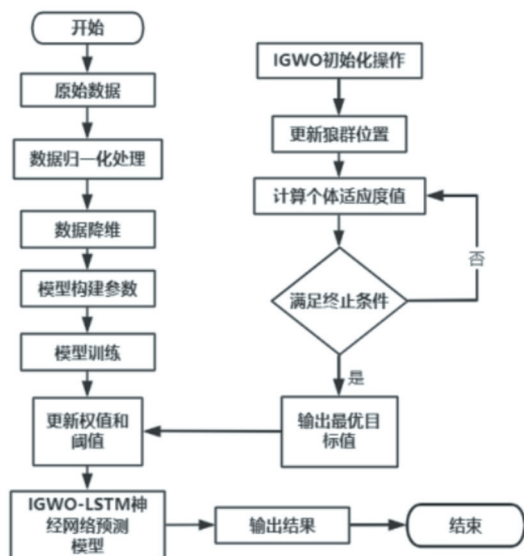


图6 IGWO-LSTM预测模型流程图

对矿井下智能安全头盔检测的甲烷气体浓度的前70%与模型预测的甲烷气体浓度进行比较。决定系数 $R^2=0.94878$,这个值越接近1,说明模型的预测气体浓度值与头盔检测气体浓度的值之间有很高的相关性。均方根误差 $RMSE=0.70896$,它表示预测值与真实值之间的平均误差,值越小,模型的预测精度越高。均方误差 $MSE=0.50$,它是预测值与真实值差的平方的平均值。具体数据与图形如图7。对甲烷气体浓度的后30%与模型预测的甲烷气体浓度进行比较。决定系数 $R^2=0.97073$,表明模型拟合度非常好。均方根误差 $RMSE=0.63257$,证明预测值与真实值之间的平均误差值小,其模型的预测精度比较高。均方误差 $MSE=0.40$,是衡量预测精度的一个指标。具体数据与图形如图8。因此IGWO通过结合LSTM的时间序列建模能力和改进的灰狼优化算法的全局优化能力,能够在复杂的时间序列预测任务中取得更好的效果^[9]。

LSTM网络的训练和推理计算非常复杂,通常需要高效的矩阵运算和大规模的参数更新。在部署LSTM模型时,主要考虑神经网络的层数、规模、激活函数和矩阵运算。IGWO优化算法本身依赖于群体搜索、位置更新和适应度计算。IGWO的计算过程相对较为简单。部署IGWO-LSTM模型到STM32时,主要面临计算能力限制、内存限制、存储限制、能耗等问题。为了在STM32等嵌入式设备上成功部署IGWO-LSTM算法,通常采取模型简化、分阶段计算、优化灰狼优化算法、硬件加速以及软件优化等处理。通过这些优化,可以使

得IGWO-LSTM在嵌入式系统中运行得更加高效。

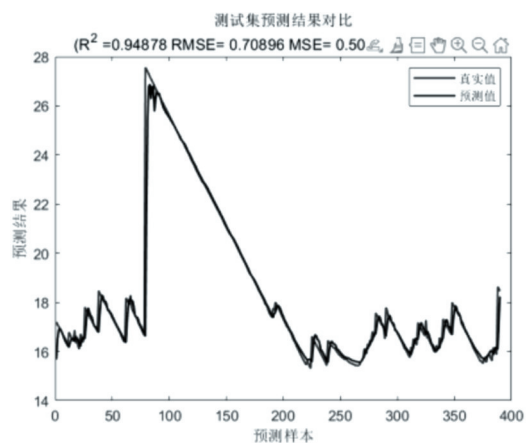


图7 测试集中预测值与真实值对比

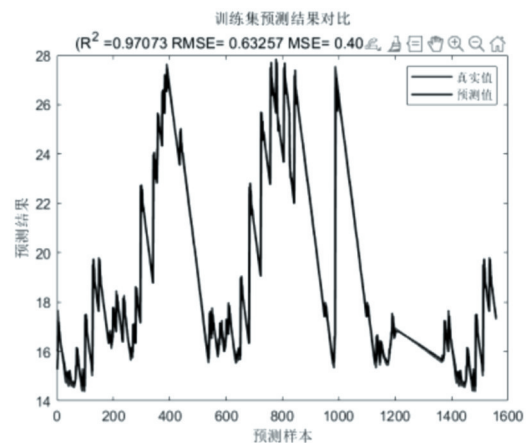


图8 训练集中预测值与真实值对比

6 系统测试

在密闭无风房间中,将系统上电。测试人员利用打火机喷气在MQ-4C传感器周围模拟甲烷气体泄漏,观察OLED气体浓度变化情况,如图9中间位置所示。用打火机喷气在MQ-2传感器周围模拟有毒气体泄漏,观察OLED气体浓度变化情况,如图9右一位置所示。测试出现心律血氧失常,头盔上的蜂鸣器报警。当矿井内的温度和湿度水平出现变化时,地面控制中心会改变通风口的开启程度或通风量来改善和维持矿井内部的环境条件,确保矿工的安全和舒适^[6]。密闭环境下OLED显示结果如图9左一所示。



图9 OLED显示结果

7 结语

本设计提出的基于 STM32 的矿用智能安全帽,通过集成多种传感器模块,实现了对矿工生理状态和矿井环境的实时监测。该系统不仅提高了矿井安全管理的效率和可靠性,还通过远程监控和应急响应机制,为矿工提供了更为及时的安全保障。该系统采用了 IGWO-LSTM 算法,显著提升了甲烷浓度的预测性能,能够提前发现异常变化,进一步增强了安全预警能力。智能安全帽的低功耗、高性能和结构简单特点,使其在复杂多变的矿井环境中具有广泛的应用前景。

然而,本文还存在一些不足之处。为了实现对人体生理指标和环境参数更加全面、精准的预测,从而进一步增强系统的性能与可靠性,应当融合多种先进算法,更加全面准确地预测矿井作业所带来的安全问题,进一步提高基于 STM32 的矿用智能安全帽系统的性能和可靠性。

参考文献:

- [1] 张力,赵钢,俞文博,等. 基于 STM32 单片机的人体健康指标采集系统的设计[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(2): 81-83.
- [2] 苏杰,吴有龙,沈亮,等. 基于心率和血氧传感器的智能安全帽人体体征状态系统设计[J]. 物联网技术, 2022, 12(3): 14-16.
- [3] 程杰,陈鼎,李春,等. 基于 GWO CNN BiLSTM 的超短期风电预测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(35): 15091-15099.
- [4] 王晓蕾,姬治岗,谢怡婷,等. 采煤工作面瓦斯涌出量预测技术现状及发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(33): 1-9.
- [5] 王福生,王建涛,顾亮,等. 煤自燃预测预报多参数指标体系研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(6): 45-51.
- [6] 郑学召,李梦涵,张嫵妮,等. 基于随机森林算法的煤自燃温度预测模型研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(5): 58-64.

Intelligent Safety Helmet Design and Application for Coal Mine Safety

DING Yi LI Yu-li

(Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China)

Abstract: This design proposes a mining intelligent safety helmet based on STM32, integrating DHT11, MAX30102, and coal mine specific explosion-proof MQ-4C and MQ-2 sensors to detect environmental temperature and humidity, miner's heart rate, blood oxygen, methane concentration, and smoke concentration, respectively. The data is processed by STM32 and displayed on the OLED screen, and an alarm is triggered when it exceeds the standard or is abnormal. The IGWS-LSTM algorithm model is adopted to predict methane concentration to ensure safety underground in coal mines. Through experimental testing, the IGWS-LSTM algorithm model has shown excellent performance in predicting methane concentration, with a determination coefficient R^2 of 0.970 73, a root mean square error $RMSE$ of 0.632 57, and a mean square error MSE of 0.40. It has high prediction accuracy and can detect abnormal changes in methane concentration in advance, with good application prospects. The intelligent safety helmet system significantly improves the efficiency and reliability of mine safety management, reducing the incidence of accidents and economic losses caused by production interruptions.

Keywords: safety hat; methane; STM32; IGWO-LSTM