

基于深度学习算法的原位激光 CO₂ 检测系统研制

王彪¹, 杨子腾², 卞广雨², 王冠懿², 赵奕飞³, 薛金波^{1,4}, 程林祥^{1,4}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

²吉林大学, 长春 130015;

³吉林农业大学, 长春 130118;

⁴中国科学院大学, 北京 100049

摘要:随着全球变暖日益严重, 精准检测 CO₂ 浓度具有重要的研究意义。可调谐半导体激光吸收光谱技术 (TDLAS) 具有高灵敏度、高分辨率等特点, 被广泛应用于气体检测领域。为进一步提升 TDLAS 气体检测技术的检测精度, 本文提出一种基于深度学习的原位激光二氧化碳检测系统。该系统采用 BP 神经网络算法反演 CO₂ 浓度, 补偿了温度压强对气体浓度反演的影响, 提升了检测精度; 采用无线通信模块, 通过 MQTT 协议将检测的 CO₂ 数据上传至 OneNET 云平台, 实现了 CO₂ 浓度的原位检测。经测试, 该系统可以快速、稳定的处理数据, 并且适配于其他气体检测系统。

关键词: CO₂; 深度学习算法; 反演补偿; 激光气体检测

中图分类号: TN248 文献标识码: A doi: 10.14016/j.cnki.jgzz.2023.06.048

Development of in-situ laser CO₂ detection system based on deep learning algorithm

WANG Biao¹, YANG Ziteng², BIAN Guangyu², WANG Guanyi²,
ZHAO Yifei³, XUE Jinbo^{1,4}, CHENG Linxiang^{1,4}

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

²Jilin University, Changchun 130015, China;

³Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: With the increasing global warming, accurate detection of CO₂ concentration is of great research importance. Tunable semiconductor laser absorption spectroscopy (TDLAS) technology is widely used in the field of gas detection because of its high sensitivity and high resolution. To further improve the detection accuracy of TDLAS gas detection technology, an in situ laser CO₂ detection system based on deep learning is proposed in this paper. The system adopts BP neural network algorithm to invert CO₂ concentration, which compensates the influence of temperature and pressure on gas concentration inversion and improves the detection accuracy; it adopts wireless communication module and uploads the detected CO₂ data to OneNET cloud platform through MQTT protocol to realize the in-situ detection of CO₂ concentration. The system has been tested to process data quickly and stably, and is adaptable to other gas detection systems.

Key words: CO₂; deep learning algorithm; inversion compensation; laser gas detection

收稿日期: 2023-02-12

基金项目: 吉林省科技发展计划重点科技研发项目 (No. 20220203016SF)、
中国科学院大学生创新实践训练计划项目 (No. 2022008090)

作者简介: 王彪 (1981-), 男, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事嵌入式系统软硬件方面研究。E-mail: wb5996@163.com

1 引言

现如今由于化石燃料的燃烧、煤炭和石油等的生

<http://www.laserjournal.cn>

产加工,大气中的 CO₂ 含量正在逐年增加,全球变暖逐步加剧,因此精确检测 CO₂ 气体浓度具有重要的研究意义。

目前 CO₂ 浓度的检测方法有多种,可归为非光学检测方法与光学检测方法^[1]。其中,非光学检测方法包括电化学法、半导体气敏法、气相色谱法等,这些方法具有检测范围窄、受环境干扰大、检测速度慢等缺点,难以广泛应用于实时检测系统中。光学检测法包括光声光谱法、非分散红外吸收法、傅里叶变换红外光谱法等^[2],其中较为常用的为可调谐半导体激光吸收光谱检测技术(TDLAS),该技术的研究多集中在近红外区,且系统检测具有较高的灵敏度,实验室阶段可达到 ppb 量级^[3],响应时间短,具有很高的实时性,适合工业场景下的气体实时监测。

本文基于 TDLAS 检测原理,设计了一种新型的 CO₂ 浓度检测系统。该系统由温度压强检测模块、CO₂ 气体检测模块、主控算法模块以及无线通信模块组成。针对 CO₂ 气体吸收谱线的展宽受气体压力、温度等因素影响,导致 TDLAS 型气体检测系统测量结果误差增大的问题,本系统采用 BP 神经网络对 CO₂ 检测浓度进行补偿,并且设计了无线通信模块,将检测的二氧化碳数据结果上传至 OneNET 云平台,实现对二氧化碳的原位检测。该系统有效提升了 CO₂ 浓度的检测精度,且对其他气体检测系统具有普适性。

2 系统整体设计

系统整体设计如图 1 所示,TDLAS 型 CO₂ 气体检测模块产生调制电流信号驱动激光器产生激光扫描信号,并在温控模块的作用下使激光器保持恒定的温度。在激光扫描信号穿过测量气室后,通过光电二极管和信号调理电路将光信号转化为电信号,然后通过锁相放大器提取电信号中的二次谐波信号,并将数据传输至 ARM 主控模块。ARM 主控模块结合测量的二次谐波幅值及温度压强传感器检测的温度、压强数据,进行深度学习算法训练,反演得到 CO₂ 的精确浓度。最终通过无线通信模块将 CO₂ 浓度数据上传至云服务器进行展示与存储,实现二氧化碳的原位检测^[4]。

系统分为温度压强测量模块、TDLAS 型 CO₂ 气体检测模块、ARM 主控模块和无线通信模块。其中温度压强测量模块使用温度及压强传感器获取所处环境的温度与压强信息;CO₂ 气体检测模块采用 TD-

LAS-WMS 技术^[5],该技术以比尔朗伯定律为原理,采用波长调制光谱的方式,通过检测激光衰减的能量反演 CO₂ 的浓度;由于气体吸收谱线的展宽情况受到压强、温度等影响,使 CO₂ 浓度的测量误差增大,因此在 ARM 主控模块中引入了深度学习算法,补偿温度压强对浓度测量的影响。同时 ARM 主控模块负责实现各模块间的数据传输和数据处理;无线通信模块通过 MQTT 协议将数据上传至 OneNET 平台进行存储与展示^[6]。MQTT 传输协议是基于 Publish/Subscribe 的传输机制,具有功耗低、传输性能好的特点,能够满足系统实时传输存储数据的需求。

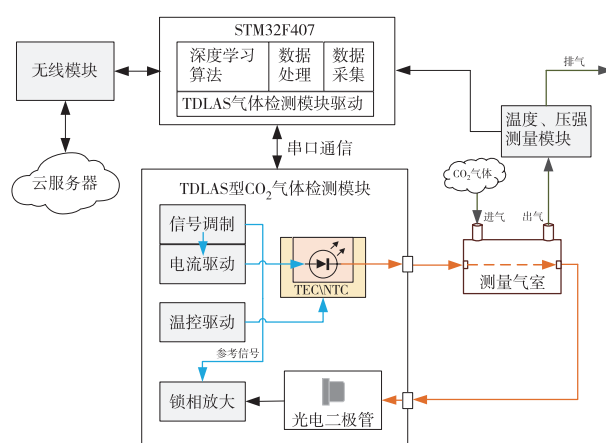


图 1 TDLAS 系统整体设计

CO₂ 浓度反演通过 BP 神经网络反向传播算法实现,BP 反向传播算法具有映射能力强、泛化能力好等优点^[7]。该算法分为数据前向传播及误差反向传播的过程,通过误差反向传播不断修改网络的权重与偏置,直至网络达到满意的拟合效果。采用 BP 神经网络摆脱了传统经验公式法的限制,不需探求二次谐波幅值等与 CO₂ 浓度的具体关系式,即可直接拟合出满足要求的网络,在输入数据后得到精确的 CO₂ 浓度,具有较高的准确性与灵活性。

3 系统功能设计

3.1 温度压强测量模块设计

系统通过温度压强传感器采集温度压强信息进行浓度补偿,减小了环境温度压强变化对 CO₂ 浓度测量会产生影响。系统温度压强测量模块设计如图 2 所示。SSDL-C 系列温度压强传感器通过 IIC 数据总线将检测的温度压强数据传输至 STM32F407 进行处理。

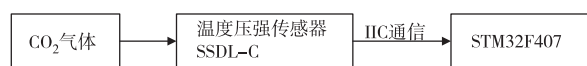


图2 温度压强测量模块设计

该传感器通过使用板载专用集成电路(ASIC)针对传感器偏移、灵敏度、温度效应和非线性进行了充分校准和温度补偿,具有高性能的数字输出压力(14位)和温度(11位)传感器设计,补偿压力范围内的总误差带(TEB)小于1.0%,具有较高的精确度,满足系统测量的需求。

3.2 TDLAS型CO₂气体检测模块设计

系统的气体检测模块设计包括激光器驱动电路、激光器温控电路及光信号采集处理电路的设计。CO₂检测模块在ARM主控模块的命令下产生锯齿波与正弦波叠加的调制信号,驱动可调谐半导体激光器发射激光扫描信号,达到对激光输出波长及强度的调制。

采用ADN8834芯片对激光器进行温度控制,该芯片通过控制电流的大小驱动半导体制冷器(TEC)对激光器制冷或加热,进而控制激光器的温度。

光信号采集电路通过光电二极管和信号调理电路将光信号转化为电信号,并将该信号传入锁相放大器中,提取光电信号中的二次谐波信号。

3.3 无线通信模块设计

本系统中选用ESP8266实现无线通信。ARM与ESP8266通过串口通信,将ESP8266设置为STA模式连接网络^[8],实现数据的接收与发送。通信协议采用MQTT协议,MQTT协议采用发布、订阅的模式。服务器端通过主题的方式管理物联网设备的订阅,实现设备与设备间的通信,手机或者电脑云端连接服务器即可查看CO₂的浓度信息。

目前有两种方法可以使用MQTT服务^[9]:租用现成的MQTT服务器,如阿里云、华为云、OneNET云平台等;自己搭建MQTT服务器。由于本项目只需完成简单的数据的存储与展示,现有的MQTT服务器能轻松实现数据存储功能,因此采用常用的OneNET云平台作为服务器。OneNET是中国移动物联网开放平台^[10],支持MQTT网络协议接入,支持多个客户端同时上传,其具有提供丰富的API及应用模板,满足设备连接、协议适配、数据存储等平台级服务需求。

在系统反演得到CO₂浓度后,由ESP8266通过MQTT协议将数据上传到OneNET平台进行存储。具体流程如图3所示。

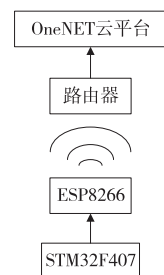


图3 无线通信模块设计图

4 算法实现

4.1 程序整体设计

系统的程序设计主要包括CO₂气体检测模块的数据交互、温度压强补偿算法的实现以及无线通信系统的搭建,程序可分为数据获取、气体浓度反演、无线数据传输三个主要的子任务。系统功能框图如图4所示。

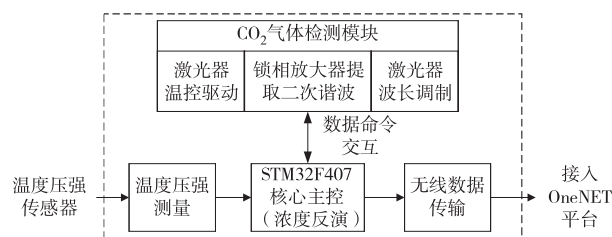


图4 程序功能框图

三个任务以数据交互为主实现各自的功能,图5展示了程序的设计流程。系统上电后,STM32F407首先通过MQTT协议建立与OneNET平台的连接^[11]。在数据信息解析任务下,温度压强测量模块获取环境的温度与压强信息,CO₂检测模块获取检测的CO₂二次谐波幅值。获取的数据输入神经网络模型中可反演得出CO₂浓度,将此浓度信息封装为MQTT消息体,根据协议的格式要求发布消息,数据即可在OneNET平台存储与显示。

4.2 气体浓度反演

采用BP神经网络深度学习算法进行气体浓度反演。模型的搭建与训练流程如图6所示。首先进行网络结构初始化,从HITRAN数据库中提取所需波段的CO₂数据,通过数据仿真得到数据集。接着将数据输入网络模型中进行训练,调整网络参数直至训练效果达到满意值。最后从模型中提取最后一次训练的网络参数,将其移植到STM32F407中,实现浓度反演。

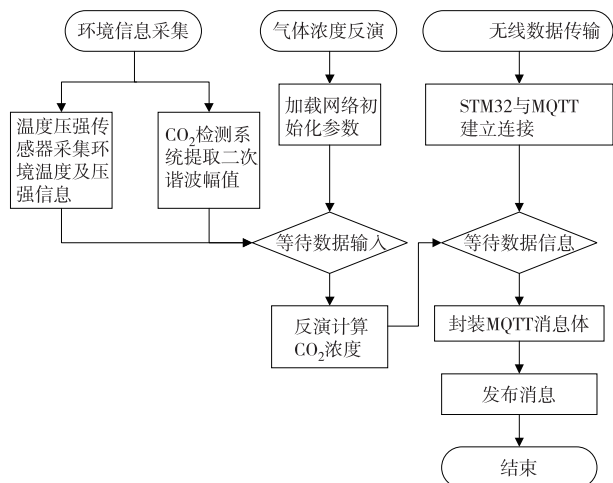


图5 程序流程图

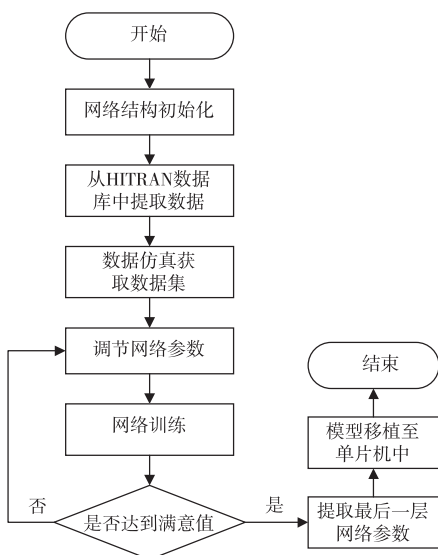


图6 BP网络搭建与训练流程图

本系统的BP网络采用3层拓扑结构,隐含层有16个结点。网络选择sigmoid函数作为激活函数,学习率设置为0.1,在500次训练下R²可达到0.99978,拟合效果较好。

网络模型训练好后移植到ARM中,实际检测时只需将检测到的温度、压强、二次谐波幅值数据输入网络,即可反演出CO₂的浓度。

4.3 无线数据传输

系统采用MQTT协议实现数据的无线传输,MQTT的接入模型如图7所示。在本设计中,平台域为OneNET云平台,设备域为STM32F407核心主控。在平台域创建产品与设备,在设备域中,当设备正常接入WiFi网络后,通过向服务器发送“CONNECT”报文连接服务器^[12]。客户端作为发布者对指定主题发

布数据,创建数据流并实现数据点上传。上传数据后,平台域的数据流可以完成数据的存储及展示,实现数据的无线传输。此外,客户端会定时向服务器发送“PINGREQ”心跳包,表明客户端正常在线,服务器在收到心跳包后,会返回“PINGRESP”作响应。若“PINGREQ”心跳包发送超时,服务器会自动断开与客户端的连接。

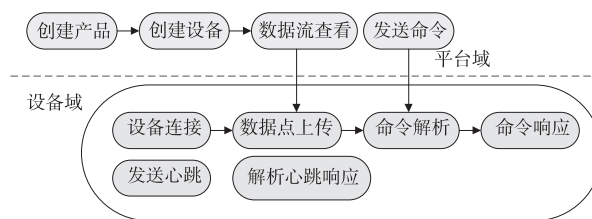


图7 MQTT接入模型结构图

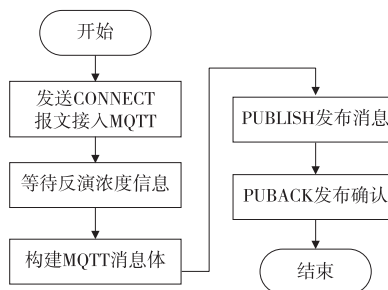


图8 MQTT接入程序流程图

图8展示了构建MQTT通信的程序流程,按照MQTT协议的报文格式与协议规范进行程序设计,通过C语言在STM32F407中实现消息协议的封装。终端通过ESP8266WiFi模块与MQTT建立连接,即可接入OneNET云平台。在STM32F407反演出浓度信息后,根据MQTT协议的格式要求对要发送的消息内容进行封装,构建MQTT消息体。然后终端向服务器发布PUBLISH报文传送消息体,服务器返回PUBACK说明数据已成功上传至OneNET平台,实现了数据的无线传输。

5 实验结果

实验设置了不同的二氧化碳浓度环境进行测试,将反演得到的二氧化碳浓度值与实际值进行对比,结果表明,系统的检测误差在1%范围以内,具有较高的检测精度。数据测试结果如表1所示。

6 总结

该系统通过搭建BP神经网络反演CO₂的浓度,减小温度、压强等因素的影响,提高了CO₂的检测精

度。此外,系统设计了无线通信模块驱动,通过 MQTT 协议将数据上传至 OneNET 云平台,实现 CO₂ 数据的无线传输,可在上位机界面实时获取 CO₂ 的浓度信息,实现二氧化碳的原位检测,系统具有一定的普适性,也可广泛应用其它各种 TDLAS 激光气体检测场景。

表 1 数据测试结果

组号	压强 (atm)	温度 (K)	二次谐波 幅值(V)	实际浓度 (ppm)	补偿浓度 (ppm)	误差 (%)
1	0.85	283	1.847	10 050	10 150	0.99
2	0.9	283	1.825	10 050	10 140	0.89
3	0.95	283	1.799	10 050	10 020	0.30
4	1	283	1.771	10 050	10 113	0.63
5	1.05	283	1.739	10 050	10 084	0.34
6	0.85	283	3.655	20 000	20 110	0.55
7	0.9	283	3.611	20 000	20 120	0.60
8	0.95	283	3.560	20 000	20 103	0.52
9	1	283	3.503	20 000	20034	0.17
10	1.05	283	3.440	20 000	20 081	0.41

参考文献

- [1] 丁少轩,刘文耀,潘梓文,刘昊东,陶煜,唐军,刘俊. STM32 的窄线宽半导体激光器驱动电路设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2023, 23(02): 29-32+37.
- [2] 曹榕. 基于 TDLAS 技术甲烷气体浓度测量系统的实现[D]. 江苏:东南大学, 2019.
- [3] 王金成,梁运涛,田富超. TDLAS 气体检测技术研究现状及在煤矿中的应用[J]. 煤矿安全, 2022, 53(11): 98-102.
- [4] 樊鸿清. 基于 TDLAS 的非合作目标二氧化碳检测系统设计[D]. 天津:天津工业大学, 2020.
- [5] 罗淑芹. 基于 TDLAS 的 CO₂ 气体检测分析系统[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学, 2013.
- [6] 唐茂淞. 基于 OneNET 物联网云平台的农田环境监测及远程灌溉系统设计[J]. 电子制作, 2023, 31(05): 39-43.
- [7] 李峥辉,姚顺春,卢伟业,朱晓睿,邹丽昌,李越胜,卢志民. TDLAS 测量 CO₂ 的温度影响修正方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(07): 2048-2053.
- [8] 芦照烜,龙顺宇,谢鑫刚,杨伟. 基于 MQTT 协议的分布式室内空气质量管理监测系统[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(09): 102-104.
- [9] 成澜. 基于 OneNET 物联网云平台与 MQTT 协议的智能家居模型通用控制小程序设计[J]. 电脑与电信, 2022(07): 10-13.
- [10] 刘忠超,范灵燕. 基于 STM32 和 OneNET 云平台的奶牛计步器系统设计[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(07): 31-35.
- [11] 熊佳慧. 基于 TDLAS 技术的气体浓度检测系统设计及温度补偿研究[D]. 南京:南京理工大学, 2020.
- [12] 王红玉. OneNET 云平台上基于 WiFi 的智能家居监控系统的设计与实现[D]. 内蒙古:内蒙古大学, 2021.