

· 激光测量与检测 ·

采用 LPC55S69 的 CO 激光气体检测无线传输系统的研制

连厚泉^{1,3}, 王 彪¹, 戴童欣^{1,3}, 黄 硕^{1,2}, 俞泳波^{1,3}, 程林祥^{1,2}¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;²中国科学院大学, 北京 100049;³中国科学技术大学, 合肥 230026;

摘 要: CO 气体作为一种还原剂在工业冶金等场景中广泛应用, 对于 CO 的检测在工业生产、大气监测、中毒预警中是十分重要的。TDLAS 技术能够高效准确地检测特定气体浓度, 基于 TDLAS 技术的 CO 气体检测相较于传统检测方法优势明显。本设计采用 LPC55S69 作为主控, VCSEL 激光器作为核心光源实现 TDLAS 的 CO 气体检测。随着检测环境越加复杂, 基于现场检测的方法局限性越来越大, 本设计还根据需要, 设计了检测数据无线加密传输方式。LPC55S69 采用 128 位 AES-ECB 算法实现数据加密, 并通过 WIFI (ESP8266) 将数据上传至 PC 端, PC 端进行解密后得到待测气体浓度信息。该方法实现的远程数据加密传输大大拓宽了 TDLAS 型 CO 气体检测的应用范围并且保证了数据传输的安全性。

关键词: LPC55S69; TDLAS; VCSEL; ESP8266; AES 加密

中图分类号: TN271.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.14016/j.cnki.jgzz.2021.03.042

Design of laser CO gas detection wireless transmission system based on LPC55S6

LIAN Houquan^{1,3}, WANG Biao¹, DAI Tongxin^{1,3}, HUANG Shuo^{1,2},
YU Yongbo^{1,3}, CHENG Linxiang^{1,2}¹. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;³ University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: As a reducing agent, CO gas is widely used in industrial metallurgy and other scenes. In industrial production, atmospheric monitoring and poisoning early warning, the detection of CO is essential. TDLAS technology can efficiently and accurately detect specific gas concentration. CO detection based on TDLAS has apparent advantages over other traditional detection methods. In this design, LPC55S69 is used as the central control, and VCSEL is used as the core light source to realize CO gas detection of TDLAS. As the detection environment becomes complex, the method's limitations based on field detection become larger. The design also designs the wireless encryption transmission mode of the detection data according to the needs. LPC55S69 adopts a 128-bit AES-ECB algorithm to encrypt data and upload data to PC through Wi-Fi (ESP8266). After decryption, the PC can get the gas information to be measured. Use remote data encryption transmission technology by this method dramatically broadens the application range of TDLAS CO gas detection. Besides, it also made the transmission more secure.

Key words: LPC55S69; TDLAS; VCSEL; ESP8266; AES encryption algorithm

收稿日期: 2020-11-21

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制项目 (No. 61727822)

作者简介: 连厚泉 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事嵌入式系统软硬件方面研究。E-mail: lianhouquan@163.com

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

1 引言

CO 是一种易燃有毒气体, 在工业生产中应用广泛, 可用作冶金还原剂或有机物加工的碳源^[1-3]。CO

也是一种大气污染源,对于大气 CO 气体浓度的监测能更加高效地治理大气环境。因此,高效地对 CO 气体浓度检测就能提高工业生产效率,避免人员中毒等事故的发生,此外还能增加大气治理能力,有效避免大气污染对人类造成危害^[3]。

采用可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)技术实现激光气体检测具有很高的选择性,且检测速度快,灵敏度高^[4-5]。TDLAS 技术基于比尔-朗伯定律,当可调谐激光器的出光波长扫过待测气体吸收峰时,激光被吸收衰减^[6-7],在探测器上就能得到与浓度相关的衰减信息,通过反演就能得出待测气体的浓度信息。基于可实现和成本等多方面因素综合考虑,拟选取 CO 位于波长 1 568 nm 附近的吸收峰作为特征吸收峰。采用垂直腔面发射激光器(VCSEL)的功耗相比于 DFB 激光器更低^[8-11],因此,本设计采用 VCSEL 激光器作为核心光源实现 CO 气体检测。采用高精度的电流驱动实现激光的调谐,引入正交锁相放大技术提高检测灵敏度,减少噪声影响。

针对 CO 气体检测中常遇到的采集与分析场景分离的场合,本设计加入数据加密无线传输机制。采集到的气体浓度信息经过主控处理器 LPC55S69 内的 HASHCRYPT 外设进行 128 位 AES-ECB 加密,增加包 ID 和 CRC 校验码等信息后通过 WIFI 传输到 PC 端解密和存储分析。

该系统引入的数据加密传输机制实现数据采集和存储分析的分离,能够很好地满足复杂环境、非现场检测要求,从而大大提高了数据处理的安全性,大大增加了 CO 激光气体检测的应用范围。

2 整体方案设计

TDLAS 技术通过调制激光波长扫过待测气体的吸收峰,实现浓度检测。该设计包含了 LPC55S69 主控电路、光电采集和锁相放大模块、信号调制和激光驱动模块、气室等基础模块实现气体检测;此外为实现加密无线传输机制,增加了 ESP8266WIFI 模块、路由器、PC 及软件三个部分。本系统的总体框图如图 1 所示。

LPC55S69 主控电路通过驱动信号调制和激光驱动模块,使其发出低频锯齿波与高频正弦波叠加的调制波形,该调制波形经压控恒流源转换为电流用以驱动 VCSEL 激光器,激光器发出的激光波长随调制波形变化。激光透过气室,光强被待测气体部分吸收,

透射的光强经光电采集和锁相放大模块采集并提取谐波信息。主控电路利用内部 ADC 采样二次谐波的最大幅值,该幅值经过反演就可得到待测气体的浓度信息。

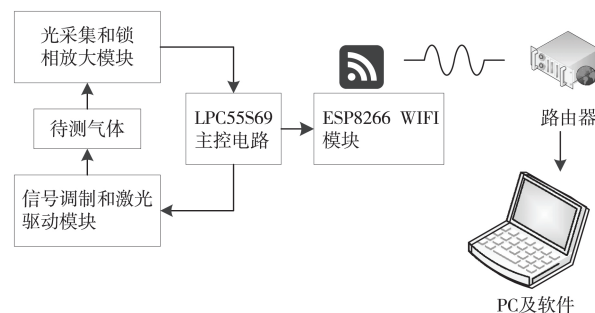


图1 系统总体框图

主控电路将已经采集到的气体浓度信息进行加密传输到 ESP8266WIFI 模块,该模块使用 TCP 协议将数据经路由器发送到 PC 端,PC 端再进行解密,得到实时的浓度信息。

3 电路设计

3.1 主控电路

本系统的主控采用了 NXP 公司的 LPC55S69 微控制器,该主控是一款 32 位双 Cortex-M33 内核的低功耗处理器,其采用的最新 Cortex-M33 架构使得其具有较高的安全性和较好的应用处理速度。该主控芯片内部带有一个 16 位的 ADC,能够实现最大 1 MHz 频率的 AD 转换;具有 8 组 FLEXCOM,能够任意实现串口、SPI、IIC 等常用通讯协议。得益于该主控搭载先进的安全相关机制(安全启动, HASH, AES, RSA, UUID, 动态加密解密等功能),因此,该控制器在嵌入式安全领域得到了广泛的应用。图 2 为该处理器的基本框图。

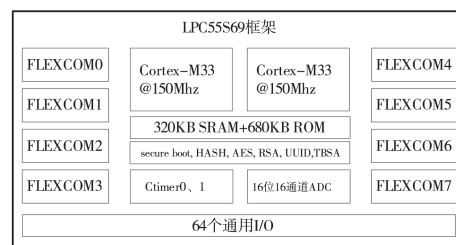


图2 LPC55S69 基本框图

基于该处理器的安全机制,本设计对发送的数据进行 128 位 AES-ECB 算法加密,保证了数据传输的安全性。基于该处理器的双核性能,其中一个核心进行波形产生控制,实现激光的调制和参考信号的产

生;另一个核心进行 AD 数据的采集,分析二次谐波的最大值和气体浓度信息,并且在每个采集周期间隔时间内进行数据的加密和发送。

控制器通过 FLEXCOM 的 SPI 接口控制信号调制和激光驱动模块,通过内部 ADC 采集模拟信号,通过 FLEXCOM 的串口与 ESP8266 进行通讯,实现数据到 PC 端的收发。

3.2 信号调制和激光驱动模块

为实现 TDLAS 气体检测就需要对激光的波长进行调制,调制过程中需要产生高频正弦波和低频锯齿波,然后叠加两个信号,实现波形的调制。再通过压控恒流电路实现激光器电流的驱动^[12],从而使激光器发出波长随调制波形变化的激光。本系统的信号调制和激光驱动模块框图如图 3 所示。

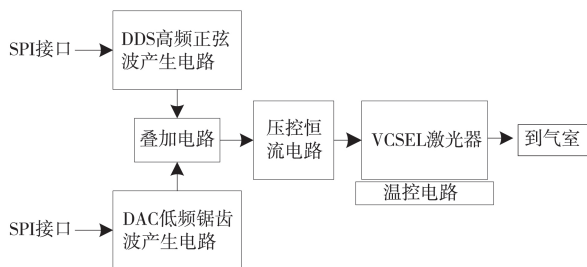


图 3 信号调制和激光驱动模块框图

DDS 产生的高频正弦波叠加 DAC 产生的低频锯齿波得到调制信号,该调制信号经压控恒流电路转换成驱动激光器的电流,即可使激光器发出波长随调制波形变化的调制光。

2.3 光电采集和锁相放大模块

经过气体吸收后的光强包含了微弱的气体浓度信息,为了能够有效检测该信息,则需要高精度的光电采集电路和锁相放大器^[13]。该设计采用如图 4 所示的结构实现光电采集和锁相放大功能。

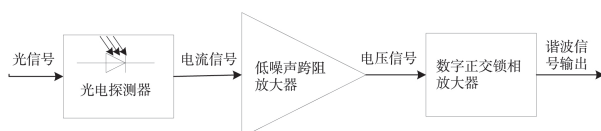


图 4 光电采集和锁相放大模块框图

该模块中,光电探测器的电流信息经过跨阻放大器转换成电压后^[14],输入到数字数字锁相放大器。数字锁相放大器实现锁相放大,提取包含浓度信息的谐波幅值。得到的幅值电压信号通过主控电路的 ADC 进行采集和分析。

3.4 ESP8266WIFI 模块

为实现数据的无线传输,本设计采用乐鑫公司的 ESP8266 作为 WIFI 无线传输模块,ESP8266 是一款 32 位 Tensilica 内核的无线处理器。该模块电路图如图 5 所示。

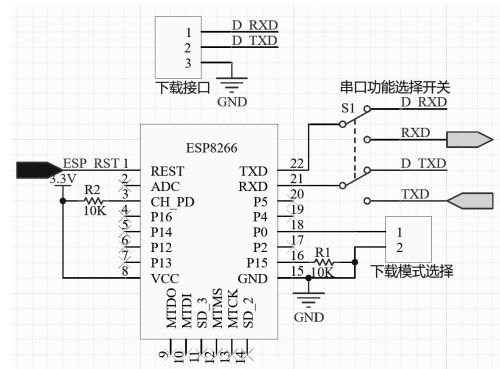


图 5 ESP8266WIFI 模块电路

WIFI 模块负责实现数据到 PC 的传输,主控芯片 LPC55S69 与 ESP8266 通过串口连接,实现两者的数据交互。为了对 ESP8266 进行编程的需要,该模块还增加了程序下载接口。

4 程序设计

4.1 程序过程

主控芯片在每次处理完一个周期的 CO 浓度采集后,就会对计数值加一,并将该计数值作为包号与加密后的浓度信息一同通过 WIFI 模块发送到 PC 端。PC 端通过 TCP 协议接收来自 WIFI 发来的数据信息,经过解密验证通过后,向主控芯片返回应答信息。主控根据应答情况来确定是否重发或者进行下一次的浓度信息采集。当 WIFI 模块监测到未连接 TCP 服务时,会由 WIFI 模块返回通讯失败的应答。整体的程序设计主要分成三个部分,分别是主控部分程序、PC 端程序、通讯协议。

4.2 主控部分程序设计

主控部分的程序,首先进行程序的初始化,初始化时启动两个内核,一个内核负责波形调制,另一个内核负责数据处理和发送。在每个数据处理的空窗期,负责数据处理的内核将采集到的浓度信息经过加密传输到 ESP8266,并且等待回应。主控部分程序的流程图如图 6 所示。

ESP8266 主要负责主控与 PC 之间的通讯,接收来自两方的信息,并对数据做适当处理后进行透传。该设计采用固定的 SSID 与密码进行路由器的连接,

在每次数据传输过程中都需要检测 TCP 连接是否成功,如果未连接则仅返回失败信息。

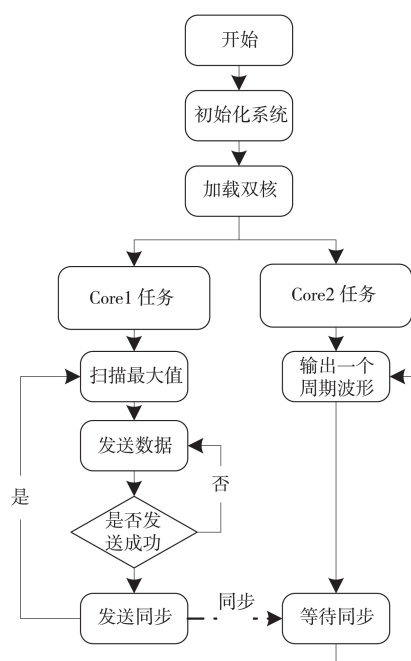


图6 主控程序流程图

4.3 PC 端程序设计

PC 端仅需要打开 TCP 服务,等待连接。当连接成功后,等待数据的传输并作出回应。传输的数据经过解密可得到浓度信息和对应的包号。通过记录包号和浓度信息可实现数据的记录。增加了显示功能,能够绘制浓度信息随时间变化的曲线图。PC 端软件界面如图7所示。

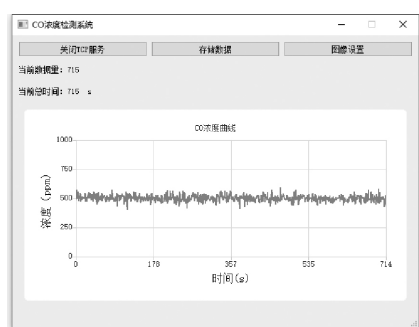


图7 PC 端界面

4.4 通讯协议设计

该设计中的通讯协议如表1所示。主要的无线传输协议由 ESP8266 与 PC 之间实现,而主控与 ESP8266 之间的通讯可看做是 ESP8266 与 PC 之间通讯协议的一个段。即 ESP8266 与 PC 之间通讯协议包含了主控发给 ESP8266 的信息段。

具体的通讯协议如表1所示。

表1 通讯协议

协议方向	帧头	段2	段3	段4	段5	段6
主控到 ESP8266	0xF8	包号 4 Byte	数据 4 Byte	校验 2 Byte	帧尾 0xF9	Null
ESP8266 到主控	0xF8	控制字 1 Byte	累加和 1 Byte	帧尾 0xF9	Null	Null
ESP8266 到 PC	0xF8	ID 2 Byte	包号 4 Byte	数据包 nByte	累加和 1 Byte	帧尾 0xFD
PC 到 ESP8266	0xF8	控制字 1 Byte	累加和 1 Byte	帧尾 0xFD	Null	Null

主控到 ESP8266 的协议中,段3代表浓度信息,段3的信息经过 AES-ECB 加密;段4为校验段,即段2、段3的 CRC16 校验码。ESP8266 在收到该数据包后,将段2作为包号,段3、4合并为数据包,发送到 PC 端。

ESP8266 到 PC 的协议中,段2为程序固化时写入,代表着该系统的 ID 号,用于数据归属解析。段3、4来源于主控发送到 ESP8266 的信息。段5是累加和,代表段2、3、4的累加信息,用于校验。

PC 发送到 ESP8266 的有用信息仅包含控制字(0x01代表接收数据成功,0x00代表上个数据接收失败)。ESP8266 收到该数据后,将帧尾替换后,透传到主控模块,主控模块根据控制字验证通讯是否成果,进而确定是否需要重发数据包。

ESP8266 可能与路由器断开,或者无法通过 TCP 连接 PC,此时 ESP8266 会根据需要对主控直接返回数据接收失败的数据包。

5 实验结果

本设计采用 TP-LINK 的 TD-W89841N 路由器作为测试路由器,在实验室环境下,通过测试一段时间内数据的重发情况来确定该系统的稳定性。在 20 000 个数据点的测试中,仅有一次出现重发,且重发后正确收到数据。因此,可以认定该系统的传输性能稳定,且其错误重发机制能够有效地避免数据传输中错误的纠正。

另外在 8 小时的稳定性测试中,该系统以每秒 1 个数据点的速率进行数据发送,分别在不同的时间段抽取 600 个数据点进行统计,得到表2结果。

经过表2所示的5个抽样时间点的数据来看,虽然偶尔出现重发情况(重发率小于2‰),但每次数据都能被正确地接收,因此,系统能够稳定地传输气体浓度数据,该传输机制具有较好的稳定性,适用于该

系统的无线传输功能实现。

表 2 稳定性测试

抽样时间点(h)	重发概率
1	1/600
2	0/600
4	0/600
6	1/600
8	0/600

6 结语

描述了以 LPC55S69 作为主控,设计了一款 CO 激光气体检测无线传输系统。通过 LPC55S69 实现 TDLAS 对 CO 气体浓度进行采集,再将气体浓度信息加密通过 WIFI 传输到 PC,PC 利用预设好的解密密钥实现数据解密。并且 PC 端的软件能够实现数据实时绘制和存储,利于数据的分析。该系统能够实现远程数据传输,适用于检测与采集分离的应用场景,增加了 TDLAS 气体检测系统的应用范围。

参考文献

- [1] 邓军,陈炜乐,王伟峰.基于 TDLAS 技术的矿井 CO 气体在线检测方法研究 [A].中国职业安全健康协会、中国黄金协会.中国职业安全健康协会 2020 年学术年会(科技奖颁奖大会)暨黄金行业职业安全健康管理现场会会议手册 [C]//中国职业安全健康协会、中国黄金协会:中国职业安全健康协会,2020:1.
- [2] 周佩丽,谭文,彭志敏.基于 TDLAS 的烟气中 CO 浓度混合取样式在线监测 [J].仪器仪表学报,2019,40(11):233-240.
- [3] 张洪伟,丁亚林,马迎军,等.红外双波段双视场成像告警系统设计 [J].光学精密工程,2020,28(06):1283-1294.
- [4] 高光珍,蔡廷栋,张婷,张刚.基于多模激光关联光谱的甲烷气体检测技术 [J].光电子·激光,2019,30(02):140-145.
- [5] 王彪,连厚泉,黄硕,等.面向气体检测的 VCSEL 型激光器电流调制系统研制 [J].激光杂志,2019,40(08):5-8.
- [6] 吴四清,沈波,熊钢,等.激光能量对气体等离子体产生太赫兹波的影响 [J].发光学报,2020,41(07):873-877.
- [7] 杨滨赫,蔡引娣,文志祥,等.长距离激光测量中光束漂移的自动补偿 [J].光学精密工程,2020,28(11):2393-2402.
- [8] 张继业,李雪,张建伟,等.垂直腔面发射激光器研究进展 [J].发光学报,2020,41(12):1443-1459.
- [9] 杨卓凯,田思聪,LARISCH Gunter,等.基于 PAM4 调制的高速垂直腔面发射激光器研究进展 [J].发光学报,2020,41(04):399-413.
- [10] 刘义鹤,江洪.半导体激光器器件和材料研究进展 [J].新材料产业,2019,04:55-58.
- [11] 胡旭文,李云超,张彦军,等.垂直腔面发射激光器的内调制特性 [J].激光与红外,2019,49(03):315-321.
- [12] 李乐,汪龙祺,黄煜,等.光电探测系统噪声特性研究与降噪设计 [J].光学精密工程,2020,28(12):2674-2683.
- [13] 王浩楠,岳小峰,徐海洋,等.电极肖特基接触对有机光敏晶体管性能的影响 [J].发光学报,2020,41(03):316-322.