

· 极端环境光学技术及应用 ·

## 采用 BP 神经网络补偿的激光气体检测系统研制

王 彪<sup>1</sup>, 连厚泉<sup>1,3</sup>, 俞泳波<sup>1,3</sup>, 张 瑞<sup>1,2</sup>, 程林祥<sup>1,2</sup>, 戴童欣<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>中国科学技术大学, 合肥 230026

**摘 要:** 海底天然气开采是目前我国实行多元化能源结构的重要一环, 而组成天然气的成分包含有一氧化碳和甲烷, 实现对一氧化碳的检测在深海天然气开采具有积极意义。因此本文基于近红外 VCSEL 激光器实现了适应性较好的痕量一氧化碳气体检测系统。为适应不同气体检测环境的需要, 本文依据反演模型随温度压强变化的特点设计了对应的补偿算法。考虑到采用二元二次函数拟合气体温度压强补偿系数的误差较大, 本文基于 BP 神经网络实现了更加准确的气体温度压强补偿算法, 为本系统在深海天然气开采探测方面的应用奠定了基础。

**关键词:** 激光气体检测; VCSEL; 反演补偿; BP 神经网络

中图分类号: TN271.5 文献标识码: A doi: 10.14016/j.cnki.jgzz.2022.08.019

## Development of laser gas detection system with BP neural network compensation

WANG Biao<sup>1</sup>, LIAN Houquan<sup>1,3</sup>, YU Yongbo<sup>1,3</sup>, ZHANG Rui<sup>1,2</sup>,  
CHENG Linxiang<sup>1,2</sup>, DAI Tongxin<sup>1,3</sup>

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

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

<sup>3</sup>University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

**Abstract:** Deep sea natural gas exploitation is an important part of China's diversified energy structure, and the components of natural gas include carbon monoxide and methane. The detection of carbon monoxide is of positive significance in deep-sea natural gas exploitation. Therefore, a trace carbon monoxide detection system with good adaptability is realized based on near infrared VCSEL laser. In order to meet the needs of different gas detection environments, this paper designs the corresponding compensation algorithm according to the characteristics of the inversion model varying with temperature and pressure. The error of fitting gas temperature and pressure compensation coefficient with binary quadratic function is large. In this paper, a more accurate gas temperature and pressure compensation algorithm is realized based on BP neural network, which greatly improves the possibility of applying laser gas detection system to deep-sea natural gas exploitation.

**Key words:** laser gas detection; VCSEL; inversion compensation; BP neural network

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 国家重大科研仪器设备研制项目( No.61727822)

作者简介: 王彪(1981-) 男, 博士, 博士生导师, 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

一氧化碳气体是天然气的组成部分之一, 对其浓度的监测是深海天然气开采领域的一个重要课题<sup>[1]</sup>。

<http://www.laserjournal.cn>

由于天然气开采过程中通常伴有其他气体产出,因此深海天然气开采时所需的气体检测设备应该具有较好的单一性。目前可调谐激光二极管吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)以其高精度、低检测下限、抗气体干扰能力强和环境适应性好等优点<sup>[2]</sup>,比较适合深海天然气开采的气体浓度实时监测。

基于 TDLAS 技术实现的气体检测系统常采用分布反馈式(Distributed feedback, DFB)激光器作为核心光源,但随着垂直腔面发射半导体激光器(Vertical cavity surface-emitting laser, VCSEL)的发展,其具有光纤耦合效率更高、激光器体积更小、驱动电流更低,热容更小等特点使得该激光器在 TDLAS 技术应用中得到了较大的关注。VCSEL 激光器相比于 DFB 激光器优势明显,便于小型化、低功耗的激光气体检测系统实现<sup>[3]</sup>。本文依据目前天然气开采一氧化碳气体检测的需要,研制了基于 VCSEL 激光器的一氧化碳气体检测系统。

TDLAS 技术主要基于光谱理论实现,谱线的线型会受到气体温度压强的影响,因此在系统实现时需要考虑气体温度和压强对反演的影响<sup>[4]</sup>。由于气体温度压强对反演的影响是非线性的,采用二元二次函数拟合误差较大,因此本文基于 BP 神经网络实现了补偿函数的拟合,在简单的神经网络结构中实现了更加准确的气体反演效果,提高了系统对复杂环境的适应能力。该补偿算法可以应用到面向深海天然气开采的 TDLAS 一氧化碳气体浓度检测系统中,以增加系统对复杂环境的检测适应能力。

## 2 整体方案设计

为实现不同气体温度压强下一氧化碳气体浓度的检测,本文设计了结构如图 1 所示的气体检测系统。

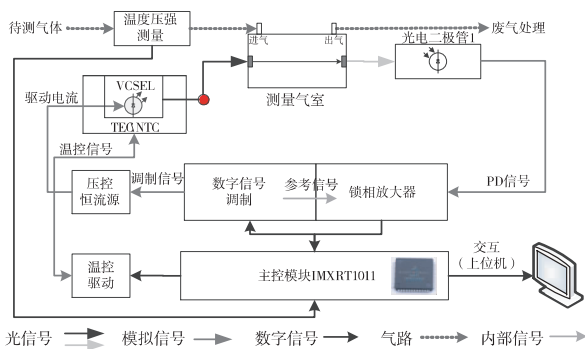


图 1 系统总体框图

系统具有用于气体温度压强检测的测量模块,该模块串接于气路中,通过采集温度压强信息,从而确定反演模型的补偿系数,实现更精确的气体浓度反演。该模块的实现为气体浓度温度压强补偿奠定了硬件基础<sup>[5]</sup>。

系统的主控是 IMXRT1011,其通过控制锁相放大器和激光器温度控制模块,实现激光器的温度控制和激光波长调制。锁相放大器采集光电信号,并将二次谐波幅值发送到主控,主控反演计算得到浓度信息。考虑到 VCSEL 激光器工作电流较小、热容较小,为保证激光器波长稳定,还设计了高精度的电流驱动电路和激光器温度控制电路<sup>[6]</sup>。

## 3 系统功能设计

### 3.1 激光器驱动电路设计

由于本系统采用 VCSEL 作为核心激光器,其驱动电流较小,因此需要考虑设计小电流的恒流驱动电路。图 2 是该恒流驱动电路的原理图。

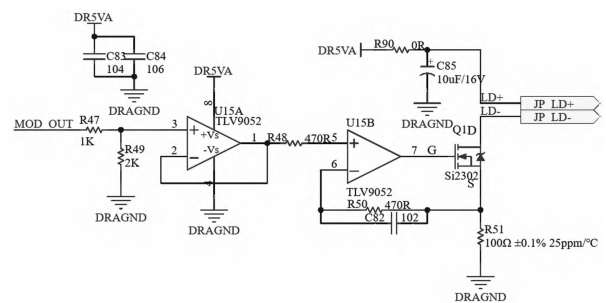


图 2 激光器恒流驱动电路

通过接入调制电压信号,恒流驱动电路根据该信号控制激光器的注入电流,从而实现激光波长调制。该驱动电路可分为两级,前一级用作信号衰减,用于匹配 DAC 的输出和后一级驱动的输入关系。后一级用作电流输出,通过改变 MOS 管栅极电压实现电流控制<sup>[7]</sup>。由于激光器工作时,采样电阻的功耗较大,因此电路采用了低温漂高精度的采样电阻以降低器件温漂造成的影响<sup>[8]</sup>。

### 3.2 激光器温控电路设计

激光器出光波长随温度和电流变化,为了控制激光器出光波长的稳定,就需要控制激光器工作温度稳定。因此设计了如图 3 所示的温度控制结构。

激光器中 NTC 的温度信号经电路转换放大后由 AD7982 转换为数字信号,主控根据该温度信号计算

反馈控制量,并驱动TEC实现温度的闭环控制。测温电路原理如图4所示。

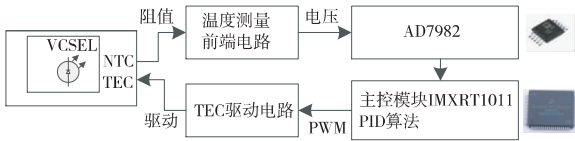


图3 激光器温度控制结构框图

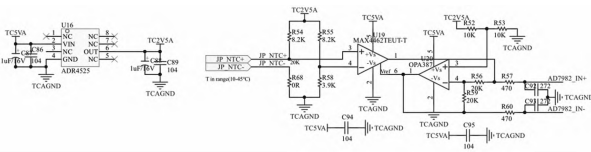


图4 温度采集前端电路

采用高精度的参考源 ADR4525 为惠斯通电桥提供驱动电源可以减少电源扰动造成的测量误差,经理论计算该电路在采用 18 位 ADC 进行采样的情况下,理论检测精度可达 0.001 °C。TEC 驱动则采用了高速的 H 桥芯片 TC4428,其具有低至 20 ns 的响应速度,使得该电路能够在最高 200 kHz 的 PWM 驱动下稳定运行。其电路如图 5 所示。

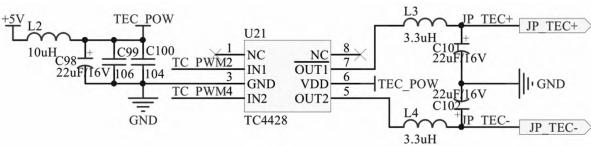


图5 TEC 驱动电路

经测试,该激光器温度控制方案最终可实现稳定情况下温度波动范围小于 0.01 °C,且阶跃响应时间小于 5 s。

3.3 控制器电路设计

考虑到 TDLAS-WMS 技术实现时,需要进行激光器温度控制、气体浓度反演计算、数据交互、锁相放大、信号调制控制等功能的实现,本文采用了 MCU 和 FPGA 配合的方式实现系统的控制。其中 FPGA 负责信号调制和锁相放大的功能实现,而 MCU 则负责激光器温度控制、浓度信息反演、数据交互、系统控制等功能。本系统采用了 Xilinx 公司的 XC6SLX25 型 FPGA 和 NXP 公司的 IMXRT1011 型 MCU 作为控制器。图 6 为 IMXRT1011 最小系统原理图。

IMXRT1011 具有高达 500 MHz 的 Cortex-M7 内核和丰富的外设资源,其强大的计算能力非常适用于气体浓度信息的反演计算和数据交互的实现。

XC6SLX25 具有多达 25 k 的 Slices 和 32 个 DSP48A 计算单元,能够较快地处理数据流信息,保证了锁相放大和数字信号调制功能的实现<sup>[9]</sup>。

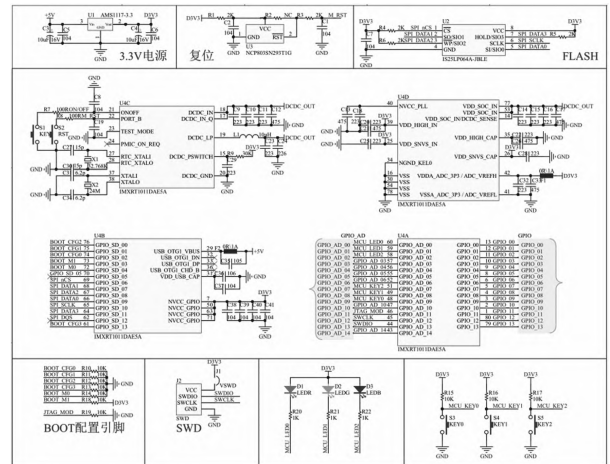


图6 IMXRT1011 最小系统

3.4 气体温度压强采集电路

在系统进行气体浓度信息反演时,需要考虑气体的温度压强影响,因此需要设计对应的温度压强采集模块<sup>[10]</sup>。本设计采用 MS4525DO-DS3AI030AS 型气体温度压强传感器实现,其具有 0~206 Kpa 的气压测量范围和-10~85 °C 的测温工作范围,能够满足本系统的设计需求。

4 算法实现

4.1 程序功能框图

MCU 的程序设计主要考虑系统控制和温度压强补偿算法的实现,由于工作内容较多,因此本设计程序功能主要基于 FreeRTOS 实现,功能框图如图 7 所示。

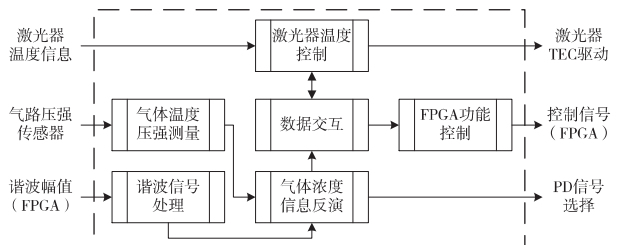


图7 MCU 程序功能框图

MCU 的各个子程序以数据交互为核心,实现各自的功能。其中谐波信号处理和气体浓度信息反演之间具有一定相关性,流程图如图 8 所示。

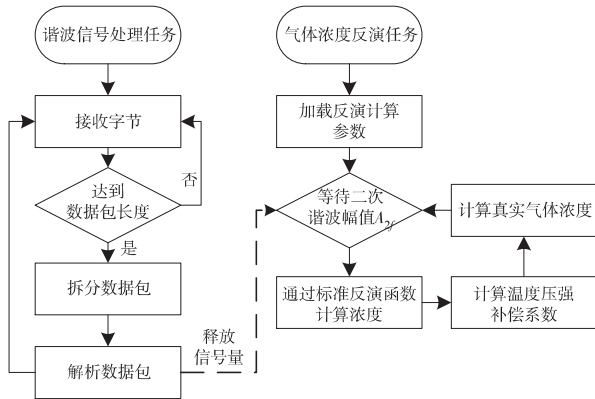


图8 谐波信号处理和气体浓度反演流程图

在系统上电时,气体反演任务首先会读取反演模型,并载入用于温度压强补偿的算法数据。然后根据谐波信号处理任务释放的信号量,依次反演对应的气体浓度信息。

#### 4.2 气体温度压力补偿

在进行气体浓度反演时,其最终探测的气体浓度可由下式获得<sup>[11]</sup>。

$$\varepsilon = \varphi(A_{2f}, T, P) = \varphi_1(A_{2f}) \varphi_2(T, P) \quad (1)$$

其中气体浓度是  $\varepsilon$ ,  $\varphi_1$  表示气体浓度关于二次谐波幅值  $A_{2f}$  的标准反演函数,而  $\varphi_2$  则表示关于温度和压强的补偿函数。标准反演函数可由固定浓度下测量不同的系统响应并通过一次函数拟合得到,而补偿函数关于温度压强的关系较为复杂,通常采用拟合得到。常用的拟合方法是二元二次函数拟合<sup>[12]</sup>。通过搭建系统,并测试得到补偿函数的取值如图9所示。图中的补偿值以 25 °C @ 1atm 的环境为参考测得。

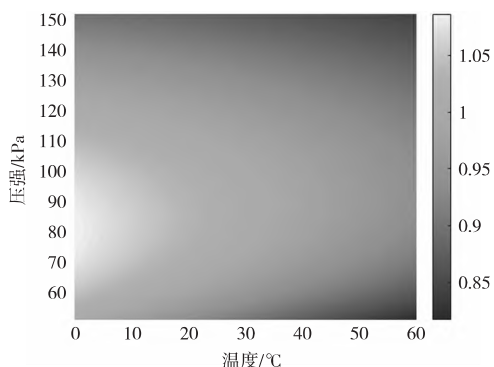


图9 补偿系数随温度压强变化图

首先选取 200 个随机数据点对二元二次函数的拟合进行测试,得到的结果如图 10。

由图可看出,二元二次函数拟合的  $R^2$  为 0.975 69。此外还测试了 BP 神经网络(层数 2 : 3 : 1)的数据拟

合效果,也采用相同的测试方法,得到如图 11 所示的结果。

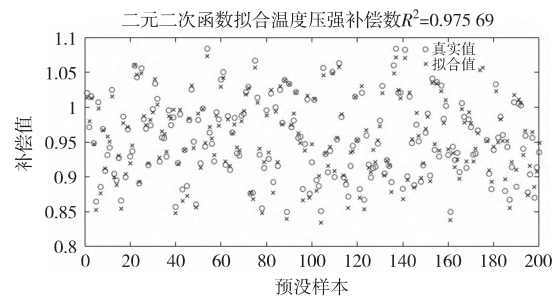


图10 二元二次函数拟合效果

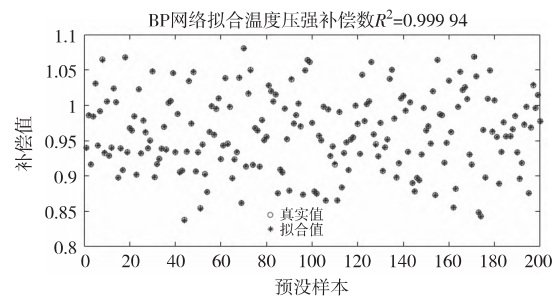


图11 BP神经网络拟合效果

由图可看出其  $R^2$  为 0.999 94,相比于二元二次函数拟合准确度更高。最终将该算法移植到 IMXRT1011 中,经测试,其能够在 1  $\mu$ s 内计算得到反演浓度。

### 5 实验结果

为评估激光输出波长的稳定性,需要对激光器恒流驱动电路的波动情况进行测试。通过设定不同电流,测试电流波动情况<sup>[13]</sup>,得到如表 1 所示结果。

表1 不同驱动电流和误差关系表

序号	设定驱动电流	实测电流	波动
1	0.01 mA	0.010 mA	$\pm 1.0 \mu$ A
2	4.00 mA	4.008 mA	$\pm 0.8 \mu$ A
3	8.00 mA	8.004 mA	$\pm 0.5 \mu$ A
4	12.00 mA	11.995 mA	$\pm 0.7 \mu$ A
5	16.00 mA	15.993 mA	$\pm 0.5 \mu$ A
6	20.00 mA	20.001 mA	$\pm 0.6 \mu$ A

由表可以看出,该电路的实测误差较小,线性度较好。此外恒流驱动的电 流波动小于 1  $\mu$ A,能够减少因电流波动造成的激光器线宽增加,从而降低线宽对检测精度的影响。

在完成恒流驱动电路测试后,还需要对系统性能进行测试,在 15 °C @ 1atm 的环境下通入不同浓度一

氧化碳,测量对应的误差情况,得到图12所示的结果。

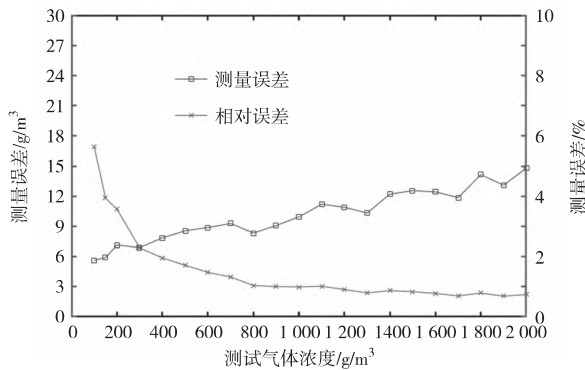


图12 15 °C@ 1atm 环境下的误差

由图可以看出,当气体浓度大于200 g/m<sup>3</sup>时,气体检测的误差小于4%,因此该系统对不同环境的检测适应性较好。

## 6 结语

研制了一种基于VCSEL的一氧化碳激光气体检测系统。该系统采用BP神经网络进行气体温度压强反演的补偿计算,相较于二元二次函数拟合方法具有更高的准确性。经过测试在气体浓度大于200 g/m<sup>3</sup>时其实际误差小于4%,验证了基于BP神经网络的气体温度压强反演算法具有更好的适应性,该算法不但适用于一般的气体检测环境,同样也适用于深海天然气开采等复杂环境气体检测,因此该算法在面向深海天然气开采领域具有一定应用价值。

## 参考文献

- [1] 刘志伟. 近海底二氧化碳中红外原位探测系统的研制及应用[D].长春:吉林大学,2021.
- [2] 俞泳波,王彪,张瑞,程林祥,连厚泉,戴童欣.用于人体呼气检测中CH<sub>4</sub>气体检测的激光器温控系统设计[J].激光杂志,2022,43(01):8-11.
- [3] 刘昱峰.采用VCSEL光源的新型TDLAS甲烷气体检测系统研究[D].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2018.
- [4] 马砺,范新丽,张朔,王伟峰,魏高明.基于TDLAS技术的CH<sub>4</sub>气体检测与温度补偿方法[J].光谱学与光谱分析,2021,41(11):3632-3638.
- [5] 宫学程,杨军.基于TDLAS的压力测量技术[J].计测技术,2019,39(03):8-13.
- [6] 张建伟,宁永强,张星,周寅利,陈超,吴昊,秦莉,王立军.高温工作垂直腔面发射半导体激光器现状与未来(特邀)[J].光子学报,2022,51(02):11-30.
- [7] 何启欣.基于红外激光吸收光谱技术的气体检测系统研究[D].长春:吉林大学,2018.
- [8] 鹿洪飞.近红外VCSEL型TDLAS氨气检测系统的研制[D].长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2020.
- [9] 郭天太,崔晨晨,孔明,潘孙强,陈哲敏,胡朋兵.基于FPGA的TDLAS气体检测系统设计[J].应用激光,2018,38(05):829-834.
- [10] 田伟山.基于BP神经网络的压力传感器温度补偿的FPGA实现[D].哈尔滨:黑龙江大学,2020.
- [11] 陶波.发动机非稳态燃烧流场二极管激光吸收光谱诊断技术研究[D].西安:西北工业大学,2019.
- [12] 王国水,郭奥,刘晓楠,丰雷,常鹏浩,张李明,刘龙,杨晓涛.TDLAS气体检测系统仿真与影响因素分析[J].光谱学与光谱分析,2021,41(10):3262-3268.
- [13] 李奥奇,王彪,许玥,黄硕,戴童欣,连厚泉.用于CH<sub>4</sub>气体TDLAS检测系统的信号发生电路研制[J].激光杂志,2019,40(12):6-9.