

• 光电测量与检测 •

TDLAS 型采用 VCSEL 光源的 H₂S 气体检测系统的研制

王 彪¹ 张国军^{1 3} 黄 硕^{1 2} 连厚泉^{1 3} 戴童欣^{1 3} 李奥奇^{1 3}

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: 本文以 VCSEL 激光作为光源, 利用 TDLAS 技术对硫化氢气体进行检测。对比近红外波段硫化氢及其他常见气体的吸收光谱, 确定硫化氢气体的吸收波长为 1 590 nm, 利用波长调制技术对激光器进行调谐, 使其输出波长扫过硫化氢气体的吸收谱线。基于 VCSEL 激光器相比传统 DFB 激光器具有高效率、低功耗和小体积等优点, TDLAS 技术整个系统的功耗大幅降低。通过配比多种浓度的硫化氢标气对检测系统性能进行标定, 实验结果表明系统的检测下限达 9 g/m³, 并且系统的稳定性和检测单一性表现良好, 适用于复杂的工业生产环境中, 应用前景广泛。

关键词: 硫化氢检测; TDLAS; VCSEL 激光器; 波长调制光谱; 锁相放大器

中图分类号: TN219 文献标识码: A DOI 编码: 10. 14016/j. cnki. jgzz. 2020. 07. 047

Design of TDLAS H₂S gas detection system using VCSEL light source

WANG Biao¹ ZHANG Guojun^{1 3} HUANG Shuo^{1 2} LIAN Houquan^{1 3} DAI Tongxin^{1 3} LI Aoqi^{1 3}

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

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: This article uses VCSEL laser as the light source, and uses TDLAS technology to detect hydrogen sulfide gas. Comparing the absorption spectra of hydrogen sulfide and other common gases in the near-infrared band, the absorption wavelength of hydrogen sulfide gas is determined to be 1 590 nm, and the laser is tuned by using a wavelength modulation technique to make its output wavelength sweep the absorption line of hydrogen sulfide gas. Compared with traditional DFB lasers, VCSEL lasers have the advantages of high efficiency, low power consumption and small size. The power consumption of the entire system of TDLAS technology is greatly reduced. The performance of the detection system is calibrated by mixing various concentrations of hydrogen sulfide standard gas. The experimental results show that the detection accuracy of the system is 10 ppm, and the lower detection limit is 9 ppm, and the system stability and detection unity perform well and are suitable for complex industries. In the production environment, the application prospects are broad.

Key words: hydrogen detection; TDLAS; VCSEL; WMS; lock-in amplifier

1 引言

硫化氢是重要的工业材料, 普遍存在于工业生产和天然气采集作业以及石油开采过程中, 而硫化氢有毒且腐蚀性较强, 对人们的生命安全造成严重威胁, 近年来因硫化氢泄露导致的中毒事件频发。传统的

硫化氢检测设备检测精度低, 检测响应慢, 设备体积大, 不能够应用于复杂的工业生产过程, 因此研制一套新型的硫化氢气体浓度检测装置具有十分重要的现实意义^[1-2]。

本文利用了可调谐半导体激光吸收光谱技术 (TDLAS) 对硫化氢气体进行浓度检测, TDLAS 技术以气体吸收理论为基础, 能够对气体分子的单个甚至多个距离很近的吸收线进行测量, 具有气体选择性单一和检测精度高等诸多优点, 广泛应用于气体痕量领域。TDLAS 技术的检测光源通常采用 DFB 激光器,

收稿日期: 2020-02-17

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目 (No. 61727822)

作者简介: 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

[http : //www. laserjournal. cn](http://www.laserjournal.cn)

它的功耗较高且体积较大,由此造成检测系统不适用于功率敏感的领域。本文采用 VCSEL 激光器作为检测的光源,具有低功率、高效率以及体积小等优点,可以有效改善 TDLAS 技术整个系统的功耗和体积问题^[3-6]。

本文基于 VCSEL 光源的 TDLAS 型硫化氢气体检测系统,涉及波长调制技术和弱信号的谐波提取技术等,主控器采用 NXP 公司的 ARM 型高性能处理器 LPC54114 控制检测系统的信号采集及各模块的驱动。本系统在检测精度、响应速度以及稳定性等各方面参数较好,可实现硫化氢的快速准确的检测。在大气环境监测以及化工生产中实时监测有害气体方面具有很好的应用前景。

2 系统总体设计方案

本文研制的 TDLAS 型采用 VCSEL 光源的硫化氢气体检测系统总体设计如图 1 所示。

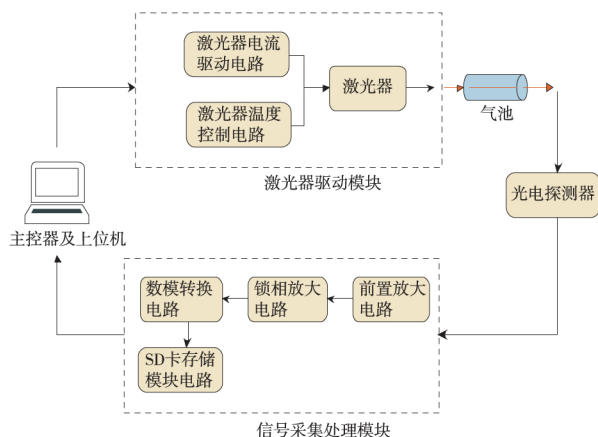


图 1 系统总体设计图

首先分析近红外波段内常见气体的吸收光谱,确定硫化氢气体的最佳吸收波长,进而选择合适的 VCSEL 激光器并设计相应的驱动电路和温控电路;设计主控器模块实现整个系统的控制和运算;由光电探测器检测经硫化氢吸收后衰减的激光信号;衰减光信号的谐波分量包含了气体的浓度信息,利用锁相放大电路提取;然后信号采集处理模块实现信号的数模转换及存储功能,主控器通过数学建模及算法编程获取硫化氢的浓度^[7-9]。

3 系统关键技术研究

3.1 采用波长调制光谱的 TDLAS 技术研究

本文 TDLAS 技术采用波长调制光谱技术实行 VCSEL 激光器的调谐,使其输出波长在硫化氢气体的吸收峰附近扫描吸收。调制光谱技术原理图如图 2

所示。

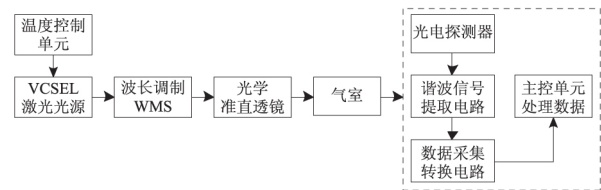


图 2 调制光谱技术原理框图

WMS 技术中采用正弦调制方法,将激光器的低频扫描信号与高频调制信号叠加后信号频率可表示为:

$$v(t) = v_a + A \cos \omega t \quad (1)$$

上式中 v_a 是激光器的中心频率; A 为调制的幅度; ω 是角频率。在近红外区域内,硫化氢气体的吸收系数 $\alpha(v)$ 非常小,则比尔朗伯定律可由下式表示,通过变算可得吸收后的光信号为:

$$I_1 = I_0 [1 - \alpha(v_1 + A \cos \omega t) CL] \quad (2)$$

将吸收后的光强信号利用傅里级数展开,并将吸收系数在频率 v_1 处进行泰勒级数展开:

$$H_n(v_1) = -\frac{2I_0 CL}{n!} \int_0^\pi \cos^n(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t A^n \left. \frac{d^n \alpha}{dv^n} \right|_{v=v_1} \quad (3)$$

然后把 $\cos^n \omega t$ 继续泰勒展开,将结果代入上式,可得到二次谐波分量:

$$H_2(v_1) = -\frac{1}{4} (I_0 CL A^2) \left. \frac{d^2 \alpha}{dv^2} \right|_{v=v_1} \quad (4)$$

由上式可知,待测气体吸收后光强的衰减与二次谐波信号的幅值成比例关系。本文通过提取二次谐波信号推算待测气体的浓度^[10-12]。

3.2 基于锁相放大器的谐波检测技术

本文利用二次谐波信号反演待测气体的浓度,VCSEL 激光器的驱动信号为周期性的扫描信号,二次谐波信号为特定频率的周期性信号,由于二次谐波信号较微弱,本文利用锁相放大器可以有效提取弱信号。锁相放大器能够从复杂的噪声干扰中准确提取目标频率信号的相位和幅值信息。

设输入的被测信号表达式为:

$$U_s(t) = A \cos(\omega_1 t) + N(t) \quad (5)$$

式中 $N(t)$ 为随机噪声信号。参考信号为:

$$U_r(t) = B \cos(\omega_2 t + \varphi) \quad (6)$$

其中 φ 为信号相位差。相敏检波器处理后的信号为:

$$U = U_s(t) U_r(t) = [A \cos(\omega_1 t) + N(t)] [B \cos(\omega_2 t + \varphi)] = \frac{AB}{2} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t - \varphi] - \frac{AB}{2} \cos[(\omega_1 + \omega_2)t + \varphi] +$$

$$BN(t) \sin(\omega_2 t + \varphi) \quad (7)$$

上式中信号有和频信号($\omega_1 + \omega_2$)和差频信号($\omega_1 - \omega_2$);当差频信号为 0 时输出的是直流分量 $\frac{AB}{2} \cos\varphi$ 。由后续的低通滤波器滤波后,仅有直流分量输出,其他频率的信号均被滤除^[13-14]。

3.3 硫化氢气体吸收谱线

通过分析近红外波段内常见气体和硫化氢气体的吸收谱线图,并考虑相应波段内激光器和光电探测器等种类和相关技术是否成熟以及石英玻璃等光学镜片在近红外区损耗较低等因素,本文硫化氢气体的吸收线选定于近红外波段,硫化氢在近红外的吸收光谱如图 3 所示。

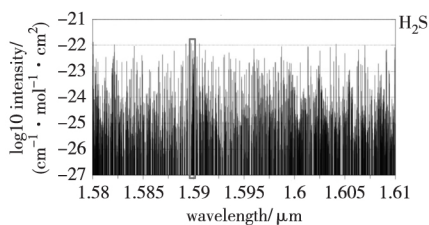


图 3 硫化氢气体最佳吸收波长光谱图

可见硫化氢气体在 1 590 nm 处有最强的吸收峰,而且此波段左右无其他气体干扰。所以本文的硫化氢气体的吸收波长选定为 1 590 nm,对应波数为 6 288.601 cm⁻¹。由 HITRAN 数据库查询硫化氢在 1 590 nm 波长吸收谱线参数,如表 1 所示。

表 1 硫化氢在 1 590 nm 波长处谱线参数

中心频率 ν_0 (cm ⁻¹)	线强度 S (cm · mol ⁻¹)	空气展宽系数 r_{air} (cm ⁻¹ · atm ⁻¹)	自展宽系数 r_{self} (cm ⁻¹ · atm ⁻¹)
6 288.571 9	2.662×10^{-24}	0.096 6	0.193
6 288.601 3	8.994×10^{-23}	0.071	0.18

本文实验条件为常温常压,根据系统设计以及 HITRAN 数据库资料,硫化氢气体在波数 6 288.601 cm⁻¹处吸收系数是 2.7×10^{-4} 。

4 系统硬件电路设计

4.1 主控器电路设计

本文实现采用 VCSEL 光源的 TDLAS 技术硫化氢检测系统,需要设计搭建复杂的电路系统和光学系统。系统采用 NXP 公司的 ARM 型双核处理器 LPC54114 芯片作为主控芯片,该芯片通信接口多,响应速度快,实时处理性能强,主控电路系统如图 4 所示。

4.2 VCSEL 激光器驱动及温控设计

根据可调谐半导体激光器的调谐特性,VCSEL 激

光器的驱动包括电流驱动和温度控制两个模块。激光器总体驱动控制设计如图 5 所示。

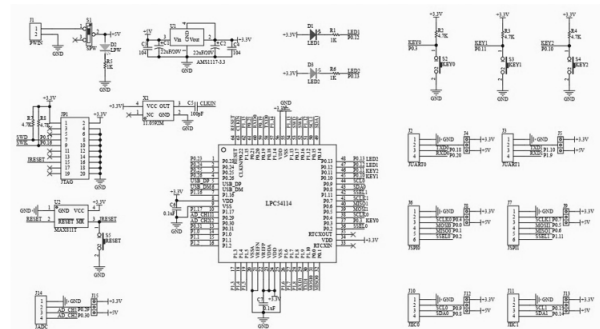


图 4 主控电路系统图

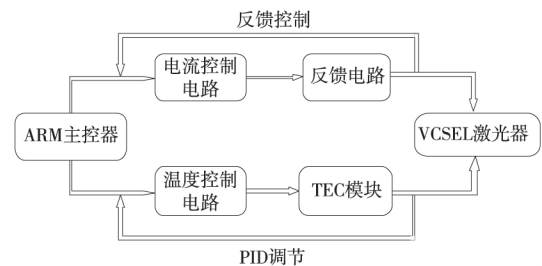


图 5 VCSEL 激光器驱动和温控总体设计图

4.2.1 VCSEL 激光器驱动单元

VCSEL 激光器驱动单元包括四个部分:低频三角波扫描单元、高频调制单元和信号叠加电路以及 VI 转换电路。低频扫描单元由主控器控制数模芯片 AD5664 输出低频三角波信号;高频调制单元由 DDS 模块 AD9954 输出特定高频正弦波,作为载波;信号叠加电路是将三角波信号和正弦波信号叠加,然后通过 VI 转换电路转换成电流信号驱动激光器^[15-19]。VCSEL 激光器驱动电路设计如图 6 所示。

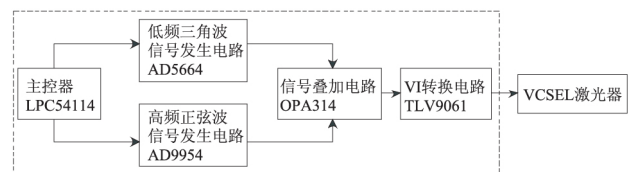


图 6 VCSEL 激光器驱动设计图

4.2.2 VCSEL 激光器温度控制单元

本文中 VCSEL 激光器的工作温度设定为 25 ℃,设计温控模块对激光器进行快速又稳定地控温。首先由主控器驱动 ADT7410 实时采集激光器的温度,若温度高于或低于 25 ℃,则利用 LTC1923 温控芯片与 TEC 结合,并加入 PID 算法,实现激光器的温度快速稳定在 25 ℃。若激光器温度正好为 25 ℃,则保持不变。控温过程超调量要严格控制,不能太大,以免烧坏激光器。VCSEL 激光器的温控单元如图 7 所示。

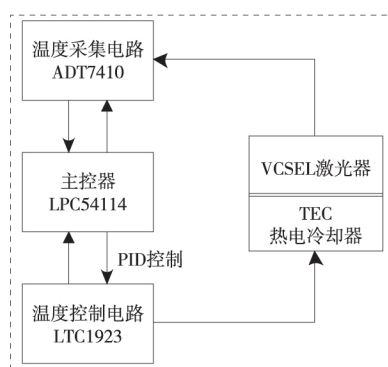


图7 VCSEL 激光器温控模块设计图

5 系统软件设计

本检测系统除了依赖稳定的硬件系统,也需要配合良好的软件模块,软硬件结合,保证系统的高效稳定工作。本系统软件设计流程如图8所示。

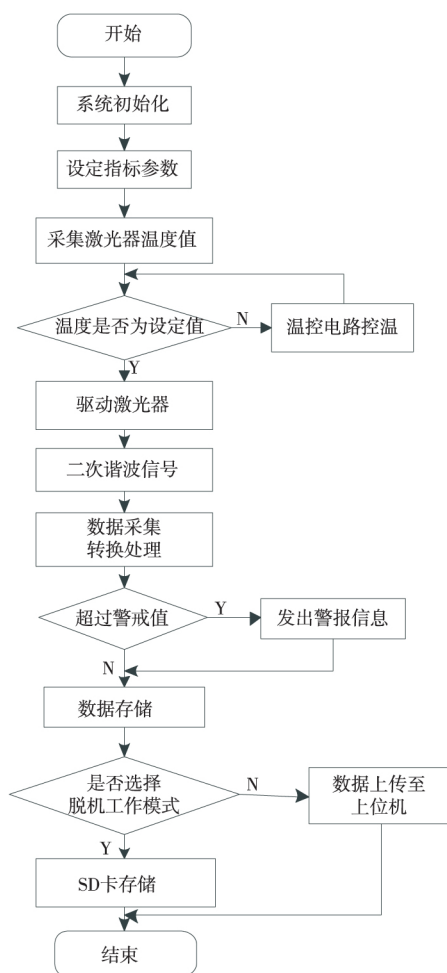


图8 软件工作流程图

系统软件运行过程为,系统上电后首先对主控芯片的基本功能进行初始化并挂载 FatFs 文件系统,然后初始化其他外设芯片初;然后设定各项指标如设定激光器的工作温度为 25 ℃,驱动 ADT7410 芯片采集

激光器的温度值,并驱动 LTC1923 控制 TEC 对激光器进行温度控制;锁相放大器提取的二次谐波信号为模拟量,经过信号采集处理模块运行后,检测数据可选择脱机模式下存储在 SD 卡中,也可以选择联机模式下用 USB 上传到上位机。若检测结果超过设定的最高值,系统发出警报信息。

6 实验数据分析处理

本章对检测系统的各项检测性能进行测试,用动态配气法配备了多种浓度的硫化氢标气,对系统的检测性能进行标定实验。

6.1 系统检测下限

VCSEL 激光器射出的 1 590 nm 波长的光信号被硫化氢气体吸收,光强减弱,而衰减后光信号的二次谐波幅值与硫化氢的浓度呈正相关。用锁相放大器提取各种浓度硫化氢气体吸收后的二次谐波幅值。二次谐波幅值与硫化氢的浓度之间的关系用 origin 软件拟合处理后如图9所示。

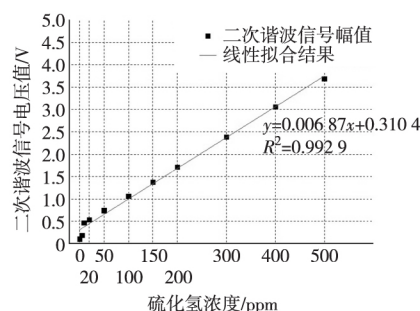


图9 二次谐波信号电压值与浓度关系图

由上图可以明显看出,二次谐波幅值与硫化氢浓度有非常好的线性关系。通过检测二次谐波信号的幅值就可以推算出硫化氢气体的浓度。经实验验证,本系统对硫化氢气体浓度的检测下限为 9 g/m³,系统检测的稳定性较好。

6.2 系统检测单一性

为测试系统的检测单一性,现将硫化氢标准气体的稀释气体由氮气更换为空气中常见气体 CO₂ 以及工业生产中气体 CH₄ 对不同浓度的硫化氢气体进行检测,并将三种背景气体下系统检测的误差对比分析。如图10所示。

由图可以看到,在系统选用不同气体作为背景气体时,系统检测结果并没有发生很大的偏移。在硫化氢气体浓度较低时,三种背景气体的检测误差看起来有偏差,但实际检测浓度值基本上无差别。本系统具有良好的检测单一性。

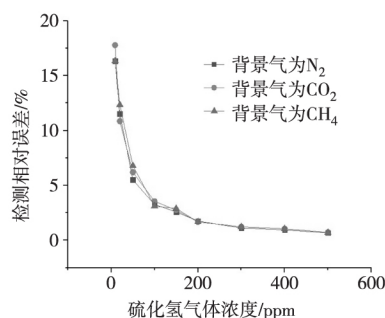


图 10 不同背景气体下检测误差与浓度关系曲线

7 总结

在深入研究气体吸收理论和分子光谱理论的基础上,本文设计了一套采用 VCSEL 激光器的 TDLAS 型硫化氢气体检测系统,TDLAS 技术是气体痕量领域常用的高精度检测方法,VCSEL 激光器具有低功耗、高效率和小体积等优点。通过对 TDLAS 技术理论上的推导以及硬件电路上的设计实现,完成了对不同浓度硫化氢气体的检测^[20-21],检测结果表明本检测系统具有良好的检测稳定性和单一性,对硫化氢气体的检测下限在 9 g/m^3 。

参考文献

- [1] 王文和,张爽,刘林精,米红甫,袁玮成. 1992-2017 年近 25 年硫化氢中毒事故统计分析研究[J]. 工业安全与环保 2020 46(02): 1-5.
- [2] 曾永达,黄国家,李悦. 硫化氢气体检测方法及其传感器研究发展现状[J]. 理化检验(化学分册),2019,55(07): 827-832.
- [3] 张国军,王彪,李奥奇,鹿洪飞,范兴龙,许玥. 用于 H_2S 气体检测的 TDLAS 型程控数据采集系统的设计[J]. 激光杂志 2018 39(12): 15-18.
- [4] SARZAŁA Robert P, PISKORSKI Łukasz, CZYSZANOWSKI Tomasz, Dems Maciej. Influence of Various Bottom DBR Designs on the Thermal Properties of Blue Semiconductor-Metal Subwavelength-Grating VCSELs[J]. Materials (Basel, Switzerland) 2019, 12(19): 17-19.
- [5] 高升,王巧华. 基于高光谱图像信息融合的红提糖度无损检测[J]. 发光学报 2019 40(12): 1574-1584.
- [6] 谢仕永,王久旺,孙勇,黄康胜,王彩丽,史小玄,薄铁柱,蔡华,宋普光. 垂直腔面发射激光端面泵浦的高能量调 Q Nd:YAG 激光[J]. 光学精密工程 2020 28(03): 558-564.
- [7] 张杨,范颖,王哲,陈文亮. 基于可调谐激光吸收光谱技术的硫化氢检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 12(12): 1943-1947.
- [8] 王晓梅,张玉钧,刘文清,等. 可调谐二极管吸收光谱痕量气体浓度算法的研究[J]. 光学技术 2006 32(5): 717-719.
- [9] 陈东,刘文清,张玉钧,等. 基于半导体激光光谱的光纤分布式开放光路 H_2S 气体传感器[J]. Chinese Optics Letters 2007 5(2): 21-24.
- [10] 程丽娟,刘贵珊,万国玲,何建国. 可见/近红外高光谱成像技术对长枣中葡萄糖含量的无损检测[J]. 发光学报, 2019 40(08): 1055-1063.
- [11] 郭健,陈雨行,王丽荣,韦阳,郭宇,赵也明,刘丽兰,陈晓禾. 非接触式呼吸与心率信号采集系统[J]. 光学精密工程 2019 27(06): 1354-1361.
- [12] 张可可. 光谱吸收式光纤气体检测理论及技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学 2012.
- [13] 苗茁茁. 基于波长调制光谱技术的气体遥测系统的研究[D]. 吉林: 吉林大学 2019.
- [14] 周佩丽,谭文,彭志敏. 基于波长调制技术的吸收谱线型函数测量[J]. 红外与激光工程 2020 49(01): 199-205.
- [15] 王岳,王勇,李占国,尤明慧. 全息光刻制备 808 nm 腔面光栅半导体激光器[J]. 发光学报 2019 40(09): 1130-1135.
- [16] G. M. Isoe, A. W. R. Leitch, T. B. Gibbon. VCSEL polarization modulation for pulse-per-second clock signal transfer in optical frequency distribution systems[J]. Optoelectronics Letters 2018, 14(05): 376-379.
- [17] 范兴龙,王彪,许玥,张国军,鹿洪飞,李奥奇. 用于 CO_2 气体检测的 VCSEL 激光器温控系统设计[J]. 激光杂志 2018 39(11): 18-21.
- [18] 陈虹豆,李莉,罗汉文. 垂直腔面发射激光器光功率-电流模型可靠性研究[J]. 上海师范大学学报(自然科学版) 2018 47(05): 625-630.
- [19] AXSUN Technologies Inc. "Optically Pumped Tunable VCSEL Employing Geometric Isolation" in Patent Application Approval Process (USPTO 20190348813) [J]. Medical Patent Business Week 2019, 6(6): 21-23.
- [20] 李春光,董磊,王一丁,等. 基于 TDLAS 和 ICL 的紧凑中红外痕量气体探测系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1855-1861.
- [21] ZHANG Rui, GUO MaoNing, WANG YiZhong, YANG HeXuan, HU Bin, GUO HongFei, WANG Yan. Research on CO_2 Detection System in Refrigerated Compartment of Agricultural Products Based on TDLAS Technology [J]. Procedia CIRP 2019 83(11): 17-19.