

# 宽工作温度范围的激光甲烷遥测仪设计及应用

郭东歌, 陈海永, 张华杰, 王海超, 王栋, 杨菁, 郑新杰

(汉威科技集团股份有限公司, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了解决激光甲烷遥测仪工作温度范围窄, 无法满足西气东输、中俄东线等极寒、极热应用场景需求的问题, 本文提出了一种目标气体吸收谱线动态切换算法, 并将其应用于激光甲烷遥测仪。选用甲烷 1650.9nm 附近三条吸收谱线, 微处理器根据实时采集的半导体激光器附近的温度, 动态调整激光器输出的中心波长, 使其在三条吸收谱线之间进行切换。实验结果表明, 应用该算法后, 激光甲烷遥测仪的工作温度范围扩展至 $-40^{\circ}\text{C}\sim+70^{\circ}\text{C}$ , 增强了仪器的环境适应性, 更好地满足工业场景的应用需求。

**关键词:** 可调谐半导体激光吸收光谱技术; 激光遥测; 燃气泄漏检测; 目标气体吸收谱线动态切换

## Design and Application of Laser Methane Remote Detector with a Wide Operating Temperature Range

GUO Dongge, CHEN Haiyong, ZHANG Huajie, WANG Haichao, WANG Dong,

YANG Jing, ZHENG Xinjie

(Hanwei Technology Group Co., LTD, Henan Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the working temperature range of laser methane remote detector is narrow and cannot meet the needs of extremely cold and hot applications scenes such as West Gas Transportation and China-Russia East Line, this paper proposes a dynamic switching algorithm for target gas absorption lines and applies it to the laser methane remote detector. Three absorption lines of methane at 1650.9nm are selected, and the microprocessor dynamically adjusts the center wavelength of the laser output based on the real-time temperature collected near the semiconductor laser, so that it switches between the three absorption lines. The experimental results show that after applying this algorithm, the working temperature range of the laser methane remote sensing instrument has been expanded to  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $+70^{\circ}\text{C}$ , enhancing the instrument's environmental adaptability and better meeting the application needs of industrial scenes.

**Keywords:** Tunable Semiconductor Laser Absorption Spectroscopy; Laser Remote detector; Gas Leak Detection; Dynamic switching of target gas absorption lines

## 1 引言

中国的输气管线网络覆盖了广泛的地理区域，“十四五”以来国家管网集团累计建成主干天然气管道里程超 1 万公里。到 2025 年，横跨东西、纵贯南北、覆盖全国、联通海外的天然气“全国一张网”将更加完善，对燃气管网运营监测压力随之增加。天然气管道一旦泄漏，不仅会严重影响城市基础能源的安全平稳供给，泄漏到大气环境中的天然气危及生态安全，而且甲烷气体易燃易爆，一旦泄漏可能引起燃烧、爆炸，严重威胁百姓人身安全、造成巨大财产损失<sup>[1-2]</sup>。

常见的气体泄漏检测方法包括光学检测法、电化学、催化燃烧、半导体和 PID 光离子化等，光学检测法相比于其他检测方法具有响应速度快、分辨率高、寿命长、非侵入性等优势，是目前研究的热点和产业界关注的新技术方向<sup>[3-4]</sup>。可调谐半导体激光吸收光谱技术（Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy，简称 TDLAS）是光学检测方法中的一种，利用半导体二极管激光器的波长扫描和电流调谐特性对痕量气体进行快速、准确测量，气体选择性好、灵敏度高，已经在工业过程控制、环境监测、安全检测等多个行业中得到了广泛应用<sup>[5-9]</sup>。

激光甲烷遥测仪是基于 TDLAS 技术设计的一种便携式的设备，可实现远距离、非接触甲烷气体检测。目前，现有的激光气体遥测设备均选用目标气体的固定吸收谱线进行检测，例如激光甲烷检测，一般选用 1653.7nm 或者 1650.9nm 固定吸收谱线，工作温度范围为 -20°C~+50°C。半导体激光器输出的中心波长会随着温度和电流发生漂移，而在激光气体探测领域，每种气体分子具有固定的吸收光谱，只有半导体激光器的波长准确地调谐在被测气体的吸收峰处，光通过气体才会产生吸收，进而分析光强信息，探测气体的浓度。然而，西气东输、中俄东线、川气东送等输气管道极有可能处于极热或极寒等恶劣环境中，超出了仪器的工作温度范围，激光器波长会发生偏移，甚至出现温度失控的现象，进而严重影响测量结果。因此，急需宽工作温度范围的激光气体遥测仪。

本文将目标气体吸收谱线动态切换算法与 TDLAS 激光遥测技术相结合，设计了激光甲烷遥测仪，如图 1 所示。该仪器能够在极端温度条件下稳定运行，工作温度范围覆盖了

-40°C~+70°C，响应速度快，能实时远程遥测甲烷气体泄漏，适用于燃气输配、石油石化等各地域可能存在燃气泄漏的场所。



图1 激光甲烷遥测仪

## 2 基本原理

TDLAS 技术基于朗伯比尔定律，出射光强  $I$ 、入射光强  $I_0$  和目标气体的浓度满足以下关系<sup>[10-11]</sup>：

$$I = I_0 \exp[-\alpha(\nu)CL] \quad (1)$$

式 (1) 中， $\alpha(\nu)$  为目标气体的吸光度； $L$  为检测光通过目标气体的光程； $C$  为目标气体的浓度。由于半导体激光器的高单色性，可以利用气体分子的一条孤立的吸收谱线对气体浓度进行测量，从而避免其它气体的干扰。针对目标气体，选择其某个特征吸收谱线，当半导体激光器输出的中心波长被调谐在该吸收谱线时，光经过目标气体就会被吸收，形成气体吸收信号，通过对吸收后的光信号进行分析，反演计算得到气体浓度。

查找 HITRAN 数据库中甲烷气体的吸收谱线，如图 1 所示，甲烷在 1653.7nm 附近存在四条吸收谱线，分别为 1648.23nm、1650.96nm、1653.72nm 和 1656.55nm，其中，1650.96nm 处的吸收强度最大，为 1653.72nm 处的 1.04 倍，1656.55nm 处的吸收强度最小，为 1653.72nm 处的 55%，1648.23nm 处的吸收强度为 1653.72nm 处的 59%。

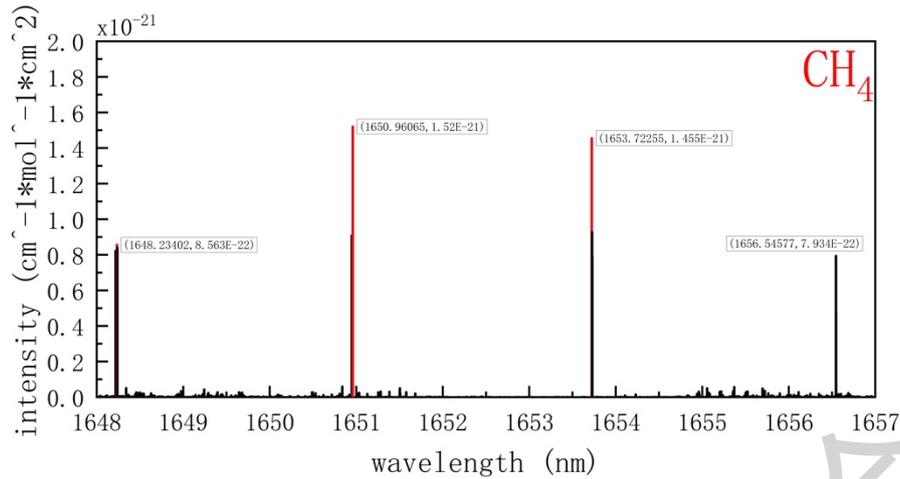


图2 甲烷气体吸收谱线

半导体激光器输出的中心波长与其工作温度和工作电流相关，工作电流一定时，在不同的工作温度下，激光器输出的中心波长会产生相应的变化。当激光器温度升高时，中心波长产生红移现象，温度降低时，则产生蓝移现象。DFB 半导体激光器温度调谐系数一般为 0.1nm/°C，激光器输出中心波长为 1648.23nm 与 1650.96nm 时，两者工作温度相差 27.3°C，同理，输出中心波长为 1650.96nm 与 1653.72nm 时，两者工作温度相差 27.6°C，输出中心波长为 1653.72nm 和 1656.55nm 时，两者工作温度相差 28.3°C。

为了实现激光遥测系统宽工作温度范围，本文采用目标气体吸收谱线动态切换的算法，选择激光器中心波长附近的三条吸收谱线进行动态切换，即当激光器输出的中心波长为 1650.96nm 时，在环境温度较低时，对激光器制冷，使其输出的中心波长为 1648.23nm，环境温度较高时，对激光器加热，使其输出的中心波长为 1653.72nm。同理，当激光器输出的中心波长为 1653.72nm 时，在环境温度较低时，对激光器制冷，使其输出的中心波长为 1650.96nm，环境温度较高时，对激光器加热，使其输出的中心波长为 1656.55nm。

### 3 系统设计

#### 3.1 系统组成

激光甲烷遥测仪系统框图如图 3 所示，微处理器输出激光器驱动信号，控制 DFB 激光器的电流和温度使其输出覆盖甲烷气体吸收峰的调制光信号。光信号经过分光比为 1: 99 的光纤分路器，99%的出射光作为检测激光从接收透镜的中心出射，穿过目标气团，经背景物反射后，反射光被接收透镜聚焦到主光电探测器上，放大滤波后输入微处理器进行分析解调，反演得到目标气体浓度信息。气体浓度信息传输到显示与信号输出单元进行显示，当测量的气体浓度超出报警阈值后，仪器发出声、光、振动报警。1%的出射光作为参考激光穿过密封有甲烷标准气体的参考气室后，被参考光电探测器接收，用于监测激光器中心波长漂

移情况，以便进行实时调整。参考气室中密封的甲烷标准气体浓度大于 95%VOL，气室长度为 10mm。温度传感器放置于半导体激光器附近，用于检测半导体激光器附近的环境温度。

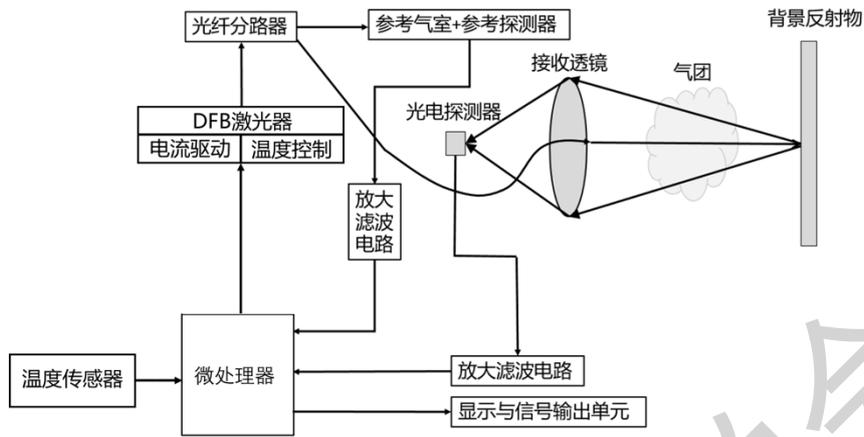


图3 手持激光甲烷遥测仪系统框图

### 3.2 激光器驱动方案

激光器驱动部分包括电流驱动和温度控制电路，温度控制采用负反馈，电路框图如图4所示。每支激光器输出气体吸收峰时的工作温度均会有一定差异，因此在进行检测之前，首先会进行激光器温度值标定，微处理器记录温度值对应电压的数字量作为设定值。该温度值与激光器内部热敏电阻反馈的实时电压值，输入运算放大器比较后，传给温度控制芯片，从而控制内部 TEC 上的电流大小及方向，对 DFB 激光器加热和制冷，使 DFB 激光器管芯稳定在设定的温度<sup>[12]</sup>。

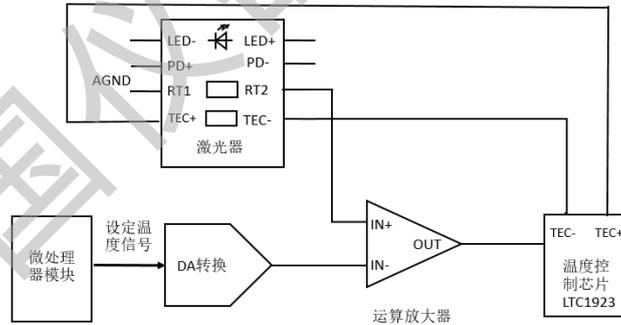


图4 温度控制电路框图

(1) 激光器温度值标定：设定采样周期中的某个采样点 P 作为吸收峰位置，固定激光器工作电流，调整激光器的温度值，使激光器自动扫描目标气体的三个吸收谱线，采集参考探测器的信号，记录参考探测器输出二次谐波峰值最大时的三个温度值作为激光器设定的温度值，代表激光器输出波长分别为目标气体三个吸收谱线时的温度值。

(2) 系统测量：系统实时采集参考探测器和温度传感器信号，监测参考信号二次谐波波峰的位置、大小和半导体激光器附近的温度，判断系统应采用哪种吸收谱线进行测量，同时监测参考探测器二次谐波峰值位置与设定的吸收峰位置P之间的偏移量。当位置偏移量超

过设定的阈值或者温度变化需要切换气体吸收谱线时，调整激光器内置TEC的温度，对激光器中心波长进行修正，使二次谐波波峰保持在吸收峰位置。

### 3.3 目标气体吸收谱线动态切换算法

目标气体吸收谱线动态切换算法的流程图如图 5 所示。进行气体浓度检测时，微处理器读取温度传感器采集的实时环境温度  $T$ ，根据该温度调整激光器输出的中心波长。当实时环境温度  $T < \text{切换温度阈值 } T_1$  时，切换至第 1 种吸收谱线策略；当切换温度阈值  $T_1 \leq \text{实时环境温度 } T \leq \text{切换温度阈值 } T_2$  时，切换至第 2 种吸收谱线策略；以此类推，当切换温度阈值  $T_{N-2} \leq \text{实时环境温度 } T \leq \text{切换温度阈值 } T_{N-1}$  时，切换至第  $N-1$  种吸收谱线策略；当实时环境温度  $T > \text{切换温度阈值 } T_{N-1}$  时，切换至第  $N$  种吸收谱线策略<sup>[13]</sup>。确定某个吸收谱线策略后，微处理器控制半导体激光器的 TEC 对激光器进行加热或者制冷，使激光器输出的中心波长切换至所需要的吸收谱线附近，再通过监测参考气室的二次谐波吸收峰的位置，实时调整激光器温度，使其稳定在吸收强度最大的位置。

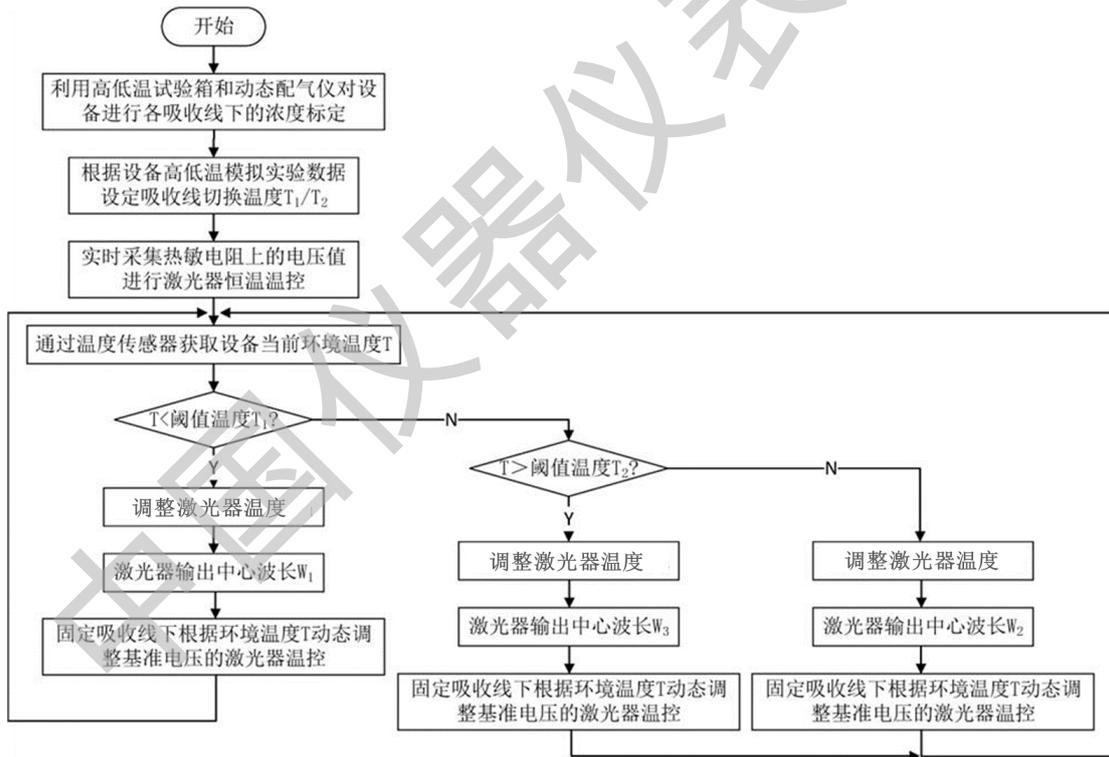


图 5 目标气体动态吸收谱线切换算法流程图

针对激光甲烷遥测仪，本文选择 1648.23nm、1650.96nm、1653.72nm 三条吸收谱线，分别设定为  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 。根据数据库查到的吸收强度计算三条吸收谱线的强度比值，以  $W_2$  处的吸收强度为基准， $W_1$  处的吸收强度为  $W_2$  处的 56%， $W_3$  处的吸收强度为  $W_2$  处的 96%，

系统根据该比例数值对  $W_1$  和  $W_3$  谱线下的气体浓度进行归一化，使谱线切换前后测得的气体浓度一致，也可根据高低温环境下吸收谱线切换后实测的气体浓度进行归一化处理。

设定吸收谱线切换温度阈值  $T_1$  为  $-15^{\circ}\text{C}$ ， $T_2$  为  $45^{\circ}\text{C}$ ，该数值根据高低温模拟试验得到。系统上电时，微处理器会根据内部存储的温度数据将激光器的工作稳定在  $W_2$  附近，同时采集环境温度  $T$ ，当采集温度传感器的温度  $-15^{\circ}\text{C} \leq T \leq 45^{\circ}\text{C}$  时，微处理器会使激光器输出波长保持在  $W_2$  附近，再根据参考气室二次谐波峰值位置实时调整激光器问题，使其稳定在吸收峰处。当采集温度传感器的温度  $T < -15^{\circ}\text{C}$  时，微处理器会根据内部存储的温度数据自动调整激光器 TEC，对激光器进行制冷，使激光器输出的中心波长调整在  $W_1$  附近，同时微处理器会根据参考气室二次谐波峰值的位置，再对激光器温度进行微调，使其稳定在  $W_1$  处，检测的气体浓度数值乘以 1.78 输出。同理，当采集温度传感器的温度  $T > 45^{\circ}\text{C}$  时，激光器输出波长则会稳定在  $W_3$  处，检测的气体浓度数值乘以 1.04 输出。

如果半导体激光器输出的波长为  $1653.72\text{nm}$ ，可以选择  $1650.96\text{nm}$ 、 $1653.72\text{nm}$  和  $1656.55\text{nm}$  三条吸收谱线进行动态切换，同样可以实现以上效果。

#### 4 实验结果及分析

为了验证激光甲烷遥测仪的温度性能，对该遥测仪进行了高低温试验箱测试，同时在东北某地进行了实际模拟测试。

将三台激光甲烷遥测仪放置于高低温环形试验箱中，距离激光甲烷遥测仪 1 米处放置反射率为 65% 的标准反射板，向环形试验箱通入 500ppm 甲烷气体，保证环形试验箱中充满该浓度气体，计算得到的标准气体浓度为  $500\text{ppm}\cdot\text{m}$ 。设定环形试验箱温度分别稳定在  $-40^{\circ}\text{C}$ 、 $25^{\circ}\text{C}$  和  $70^{\circ}\text{C}$  三个温度点各 120 分钟，每间隔 30 分钟测量一次气体浓度，气体浓度检测数据如图 6 所示。测试结果表明：激光甲烷遥测仪在  $-40^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$  温度范围内，均能准确检测甲烷气体浓度，测量误差最大为 3.8%，满足实际检测需要。

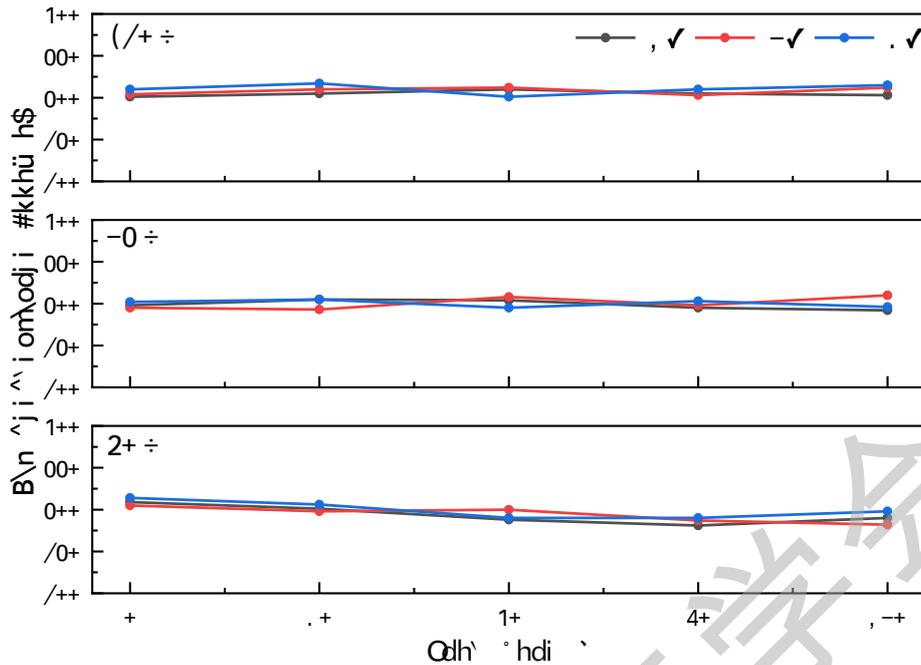


图 6 高低温环境下的气体浓度检测数据

取 1 号遥测仪在东北某地进行了实际的巡检试用，试验时外部环境温度约为-28℃，当架空的燃气管、调压箱、调压阀等出现的燃气泄漏时，该仪器可快速响应，发出声光振动报警，实用性强。

## 5 总结

本文结合目标气体吸收谱线动态切换算法和 TDLAS 激光遥测技术，设计了激光甲烷遥测仪，通过内置永久标准气体，根据半导体激光器外的实时环境温度信号  $T$  动态调整目标气体吸收谱线策略，使调整后的吸收谱线与现场环境匹配。确定执行何种吸收谱线策略后，微处理器根据参考光路的检测波形实时、动态调整激光器的中心波长，使之精准地锁定在气体的吸收峰上。该方法使激光甲烷遥测仪能够在-40℃~70℃环境下稳定工作，增强了仪器的环境适应性，满足工业场景的应用需求，更好地保障人民生命财产安全。

### 参考文献：

- [1] 陈国华,董浩宇,张强,等.狭长受限空间甲烷-空气爆炸事故研究评述[J].安全与环境学报,2020,20(3):946-959.
- [2] 李欣,乐有邦,张刚,等.基于事故调查技术的天然气泄漏爆炸分析-以十堰“6·13”重大燃气爆炸事故为例[J].爆破,2023,40(03):39-45.
- [3] 汪玉,王贵师,李竣,等.红外光谱技术测量氨排放的研究进展[J].大气与环境光学学报,2024,19(4):391-404.

- [4] 康虎,张夏,郑世杰,等.基于调制激光光谱吸收的高稳定性气体检测[J].激光技术, 2024,48(2):145-152.
- [5] 丁武文,孙利群,衣路英.基于可调谐半导体激光器吸收光谱的高灵敏度甲烷浓度遥测技术[J].物理学报,2017, 66(10):53-61.
- [6] Li G, Ma K, Jiao Y, et al. Performance enhancement of DFBL based near-infrared CH<sub>4</sub> telemetry system using a focus tunable lens [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2021, 63(4): 1147-1151.
- [7] 赵成龙,黄丹飞,刘智颖,等.开放型 TDLAS-WMS 技术 CO<sub>2</sub> 痕量气体检测[J].光子学报,2022,51(2):333-342.
- [8] Wang Y.Pipeline Laser Methane Detector Based on TDLAS Technology for In-situ Direct Measurement[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2246. DOI: 10.1088/1742-6596/2246/1/012025.
- [9] 李金义,李连辉,赵烁,等.可调谐半导体激光吸收光谱技术在石油工业中的应用研究[J].激光与光电子学进展,2022,59(13): 1300006.
- [10] 薛芳,谭勇,邬志强,等.基于激光遥感的酒驾遥感探测技术研究[J].激光技术, 2019, 43(01): 93-97.
- [11] 吕文静,李红莲,李文铎,等. TDLAS 技术调制参量的优化及实验研究[J].激光技术, 2021, 45(03): 336-343.
- [12] 郭东歌,陈海永,贾林涛,等.车载激光甲烷遥测系统的设计[J].计算机测量与控制,2020,28(7): 9-13.
- [13] 陈海永,武传伟,张华杰,等.基于动态吸收线的激光红外气体浓度检测方法 & 系统[P].中国发明专利, CN202210480618.7[P] 2022-09-06.