应用科技研究

2026 年 9 月 第 1 卷第 3 期

增强型谐振腔 TDLAS 对乙炔的检测极限研究

闫志林 [1, 2]，李哲 [2]

1.江苏师范大学物理与光电工程学院，江苏 徐州; 2.合肥师范学院，安徽 合肥

摘　要｜ 针对乙炔低浓度条件下吸收信号弱、较高浓度条件下响应非线性增强的问题，构建了一套增强型谐振腔 TDLAS 检测系统。系统采用 1530 nm 波段 DFB 激光器、0.50 m 平-凹型增强谐振腔、InGaAs 光电探测器和锁相放大检测方案，并在 25±2 ℃、相对湿度 50±5%、大气压 101.3 kPa 条件下开展实验。基于 HITRAN 谱线筛选与实测验证确定 1530.37 nm 为检测波长。低浓度测试中，浓度—2f 信号线性拟合决定系数 R^2=0.9875，按 3 倍信噪比准则得到检测极限 1.0×10^{-6}（体积分数）；在 2.5%～82%高浓度测试区间，原始响应在 60%以后出现明显压缩，针对本组测试样本采用分段线性校正后高浓度端响应区分度得到改善；连续 2 h 测试的相对标准偏差为 0.45%。结果表明，在本文实验条件下，增强谐振腔与 WMS/2f 锁相检测能够实现乙炔弱吸收信号测量，分段校正可改善所测高浓度区间的响应非线性。研究结果为乙炔宽量程光谱检测系统的设计与校准提供了实验依据。

关键词｜ 增强型谐振腔；TDLAS；乙炔；检测极限；气体光谱分析

Copyright © 2026 by the author(s).

This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.

https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

1 引言

1.1 研究背景与意义

1.1.1 乙炔的工业应用与安全风险

乙炔（C_2H_2）广泛用于焊接、切割及化工生产，同时具有易燃易爆特性，其在空气中的爆炸极限约为 2.5%～82%[1-2]。面向泄漏预警与过程安全监测，检测方法既需要识别低浓度条件下的弱吸收信号，又需要在浓度升高后保持可区分的响应。对于近红外吸收测量而言，低浓度乙炔产生的吸收变化较小，容易受到有效光程、光源波动、探测噪声和基线漂移等因素影响；而单纯增强吸收作用又可能使较高浓度区间的响应非线性更加明显。因此，如何在有限装置尺寸下增强低浓度弱吸收信号，同时兼顾较宽浓度范围内的可测性，是乙炔 TDLAS 检测需要解决的核心问题。

1.1.2 传统检测技术的局限性

乙炔检测可采用气相色谱、电化学传感和红外吸收等方法。气相色谱具有较好的定量分析能力，但采样与分析过程限制了快速在线应用；电化学方法结构相对简单，但长期稳定性和交叉干扰仍需关注。TDLAS 利用分子特征吸收线进行选择性检测，具备非接触和快速响应等特点，但低浓度条件下的

作者简介：闫志林，江苏师范大学物理与光电工程学院光电信息科学与工程专业研究生，主要从事 TDLAS 气体光谱检测方向研究；李哲，合肥师范学院讲师，博士，主要从事可调谐半导体激光吸收光谱方向研究。

文章引用：闫志林, 李哲. 增强型谐振腔 TDLAS 对乙炔的检测极限研究[J]. 应用科技研究, 2026, 1（3）: 144-155.
https://doi.org/10.68070/r1ers609

检测能力并不只由谱线强度决定，还受到有效光程、激光波长与功率稳定性、探测噪声以及信号处理能力共同制约[3]。因此，低浓度检测的技术演进主要围绕稳定光源、延长吸收光程和提高弱信号提取能力展开；与此同时，光程增加和吸收增强后产生的动态范围压缩及高浓度非线性，也需要在系统设计与标定中同时考虑。

1.1.3 增强型谐振腔TDLAS技术在气体检测中的优势

TDLAS 利用窄线宽激光扫描目标分子的特征吸收线实现选择性测量。针对低浓度弱吸收问题，现有技术路径主要包括增加有效吸收光程和提高调制解调信噪比两类：腔增强方法通过多次反射增加激光与气体的作用距离[4-5]，WMS 结合锁相检测则通过提取谐波分量降低直流背景和低频漂移对弱信号的影响。相关 TDLAS 方法已用于变压器油中 C_2H_4 检测[6]以及水溶液中 CO_2 测量[7]，表明光路增强与调制检测具有较好的气体检测扩展性。但从测量机理看，有效光程增加并不意味着检出限按相同比例下降，实际性能仍受腔体耦合、光源稳定性、探测噪声和环境扰动影响；同时，吸收增强后较高浓度区域可能更早出现响应压缩。因此，低浓度灵敏度提升与宽动态范围之间的协调，是增强型 TDLAS 系统需要进一步验证的问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 TDLAS技术研究进展

近年来，TDLAS 性能提升已由单纯依赖吸收谱线选择，逐步发展为光源稳定、吸收光路优化和信号处理协同改进。Wang J 等[8]总结了 TDLAS 水汽检测中的灵敏度提升方法，说明弱吸收测量可从光路与信号处理等环节综合改善；Kan L 等[9]将半监督学习用于甲烷浓度检测，体现了数据处理方法在浓度反演中的拓展；Shim H 等[10]通过三角形激光光路开展超声速流动参数测量，反映了吸收光路设计对复杂工况测量的重要性。国内研究还涉及 DFB 激光器稳定控制[11]和甲烷检测信号处理[12]。这些研究表明，TDLAS 已形成“稳定光源—优化光路—调制检测—浓度反演”的技术链条，但不同气体、谱线和应用场景下的噪声来源、有效光程及动态范围并不相同，相关性能指标不能直接移植到乙炔低浓度检测中。

1.2.2 乙炔检测技术研究现状

针对乙炔检测，陈越开展了小型化 TDLAS 乙炔气体检测系统研究，说明近红外 TDLAS 可用于乙炔浓度测量；与此同时，杨博等[13]和贾鹏等[14]分别在天然气水露点和瓦斯浓度检测中验证了 TDLAS 在工程气体监测中的应用，为光路构建、系统集成和浓度反演提供了参考。总体而言，现有研究已经证明 TDLAS 具备气体选择性检测和工程化应用基础，但针对乙炔低浓度检测，仍需重点解决弱吸收信号可辨识度不足的问题；当通过增加光程提高弱信号后，还需要进一步考察系统在较高浓度下的响应非线性和动态范围。现有文献的研究对象、浓度区间及评价指标存在差异，难以直接形成统一的“检出限—有效光程—测量范围”横向比较，因此本文不以不同实验条件下的单一指标作简单优劣判断，而是在统一实验平台上同时考察低浓度检出能力、高浓度响应和短时稳定性。

1.2.3 增强型谐振腔技术应用现状

腔增强技术利用高反射镜使激光在气体介质中多次传播，可在有限几何尺寸下显著增加有效作用光程，是提高低浓度弱吸收响应的重要途径。石旺龙等[15]综述了 TDLAS 气体遥测技术，张永平等[16]讨论了激光气体检测关键技术，孙志阳[17]开展了 CH_4/CO_2 双组分 TDLAS 检测，相关工作表明光程设计、稳定控制和多组分干扰处理是 TDLAS 进一步提升性能的重要方向。对于乙炔低浓度检测，腔增强的关键科学问题在于有效光程增加后弱吸收响应与系统噪声之间的实际改善关系；关键技术问题则包括高反射腔的稳定耦合、激光波长与功率漂移、探测与采集噪声，以及吸收增强后高浓度区间可能出现的响应压缩。文献[15-16]未给出与本文 0.50 m 平-凹腔在相同乙炔浓度、镜片参数和评价方法下可直接换算的“有效光程—检出限—测量范围”成套数据，因此本文不作失真的倍数比较。基于上述问题，本文采用 0.50 m 平-凹型增强谐振腔结合 WMS/2f 锁相检测，在 HITRAN 谱线筛选和实测峰位验证基础上确定 1530.37 nm 检测波长，并在同一实验系统中评价低浓度检出限、2.5%～82%高浓度响应及 2 h 稳定性，以实验结果讨论光程增强条件下低浓度检测能力与宽量程响应之间的关系。

2. 增强型谐振腔 TDLAS 检测原理与实验系统

2.1 检测原理

2.1.1 吸收测量基础

乙炔浓度反演以比尔-朗伯定律为基础。在均匀、无散射条件下，吸光度由吸收系数、气体浓度和有效光程共同决定。本文引入增强型谐振腔的目的，是在不显著增加装置几何尺寸的条件下延长有效作用光程，从而提高低浓度乙炔弱吸收信号的可辨识度。

对于本文近红外吸收测量，吸光度 A 与气体浓度 c 及有效光程 L 之间的关系用于描述浓度变化对

https://doi.org/10.68070/r1ers609

吸收强度的影响，并作为后续光程增强设计和浓度响应分析的理论依据。

$$A = K \times c \times L \qquad (2-1)$$

因此，本文关注的并非比尔-朗伯定律本身，而是有效光程增加后弱吸收响应的增强，以及较高浓度下由强吸收和检测链路共同引起的非线性响应。

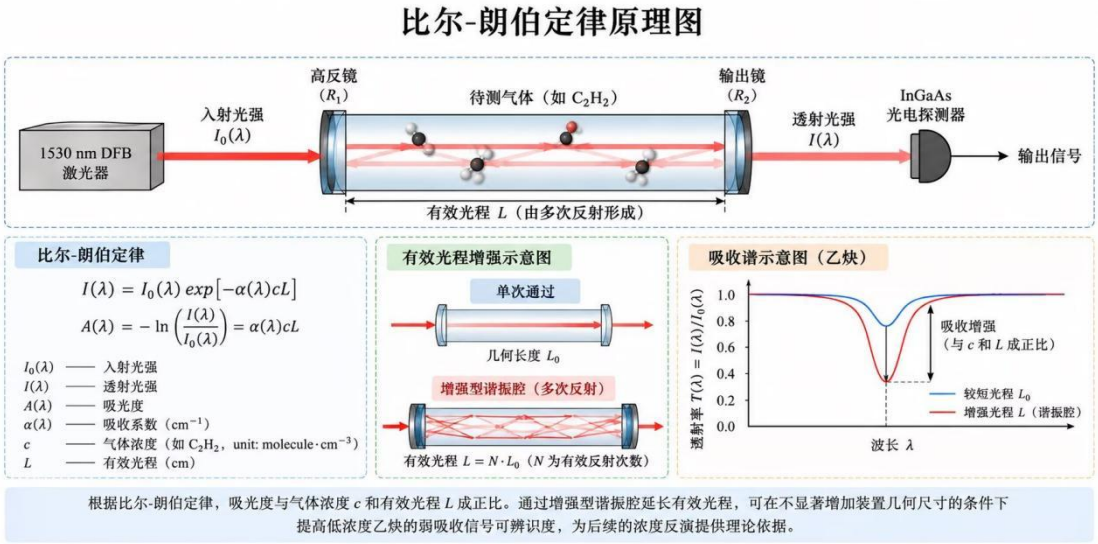

图 1 比尔朗伯定律原理图

Fig. 1. Schematic of Beer–Lambert Law

2.1.2 波长调制光谱技术

本文采用波长调制光谱（WMS）进行信号检测。低频扫描信号驱动激光波长扫过目标吸收线，高频正弦信号叠加于扫描信号完成波长调制，锁相放大器提取二次谐波（2f）分量，以降低直流背景及低频漂移对弱吸收信号的影响。相关 2f 检测方法已用于 TDLAS 气体测量[18]。

实验中，激光经调制后通过待测气体，透射光由 InGaAs 探测器转换为电信号，并送入锁相放大器进行 2f 解调。本文以 2f 信号幅值作为浓度响应量，用于后续低浓度线性、检出限、高浓度响应及稳定性分析。

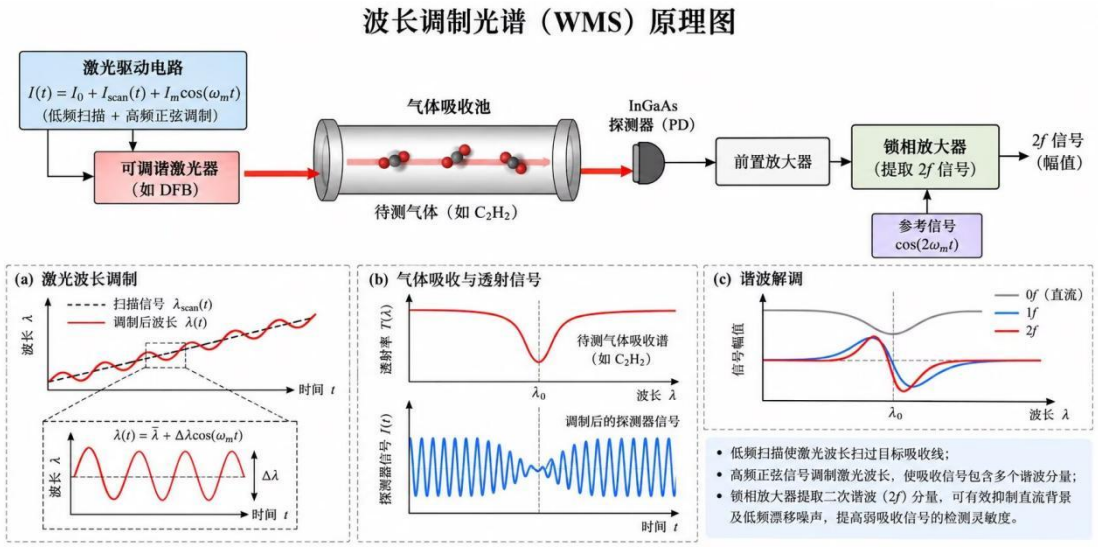

图 2 波长调制光谱原理图

Fig. 2. Schematic of Wavelength Modulation Spectroscopy

2.2 增强型谐振腔设计

2.2.1 腔型与参数确定

为兼顾有效光程、光路稳定性和实验调节难度，本文比较凹-凹腔、平-凹腔和平-平腔后采用平-凹结构。平-平腔对镜片平行度和准直状态较敏感，凹-凹腔的光束约束能力较强但调节相对复杂；平-凹腔能够在本实验平台尺寸条件下兼顾稳定腔要求和对准便利性，因此用于后续乙炔吸收测量。

1. 腔长：50 cm。在兼顾有效光程、系统尺寸和机械稳定性的条件下，配合反射率 99.9%的镜片，设计有效光程约 500 m。

2. 凹面镜曲率半径：1 m。对应谐振腔稳定参数 g_1 g_2 =0.5，满足稳定腔条件，并为光路调节保留一定容差。

3. 镜片参数：熔融石英基底，镀 1.5～2.0 μm 近红外多层介质膜，在设计波长处反射率不低于 99.9%。

4. 腔室参数：采用 304 不锈钢腔体和 O 形圈法兰密封，并采用横向气路以促进待测气体交换与混合。

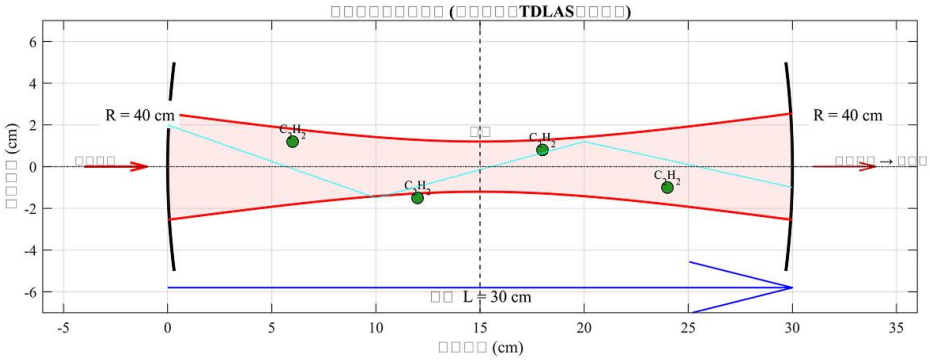

图 3 凹-凹腔示意图
Fig. 3. Schematic of Concave–Concave Cavity

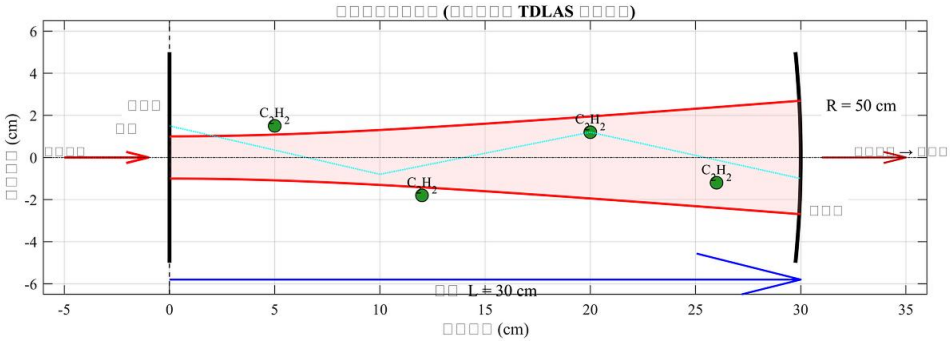

图 4 平-凹腔示意图
Fig. 4. Schematic of Plane–Concave Cavity

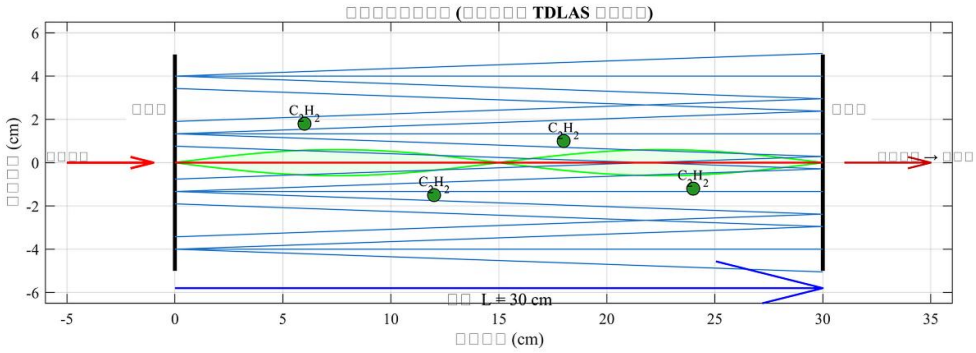

图 5 平-平腔示意图
Fig. 5. Schematic of Plane–Plane Cavity

https://doi.org/10.68070/r1ers609

2.2.2 关键参数及设计依据

谐振腔参数围绕“提高有效作用光程并保持稳定耦合”确定。镜片在乙炔目标吸收波长附近的标称反射率不低于 99.9%，用于增加腔内往返传播次数；凹面镜曲率半径取 1 m，使平-凹腔满足稳定条件并保留一定对准容差；腔长取 50 cm。基于腔长 L_0 =0.50 m、镜片标称反射率 R=0.999，在理想化近似条件下按 $L_{theo}=L_0/(1-R)$估算理论设计有效光程，得到约 500 m。该数值是在忽略额外耦合、散射等损耗并假定镜片达到标称反射率条件下得到的理论设计值。

实际实验系统中，激光与谐振腔之间存在模式匹配与耦合损耗，镜片实际反射率可能与标称值存在偏差，同时还可能存在腔内散射、窗口损耗以及机械扰动等因素，因此实际等效有效光程可能低于上述理论值。受本科实验结束后实验平台拆解、现阶段无法重新搭建光路的条件限制，本研究未开展去除谐振腔的单程对照实验，也未采用腔衰荡等方法直接测量实际等效光程。因此，本文将约 500 m 严格表述为理论设计有效光程，不报告未经实验验证的实际增强倍数；对谐振腔实际增强效果的定量验证作为后续研究内容。

2.3 实验系统组成

2.3.1 激光光源与驱动

实验采用 1530 nm 波段 DFB 激光组件，输出功率 10 mW，并通过温度与注入电流双调谐完成目标谱线附近的波长扫描。其调谐范围覆盖 3.3 节确定的 1530.37 nm 乙炔吸收峰，满足谱线扫描和 2f 检测需要。

激光驱动采用恒流与 TEC 温控方式，恒流稳定性控制在 0.1 mA 以内，温度控制精度为±0.01 ℃，以减小注入电流和温度波动引起的输出功率及中心波长漂移。

2.3.2 光路与探测模块

光路由准直器、平-凹增强谐振腔和 InGaAs 光电探测器组成。准直器将光束发散角控制在 0.5 mrad 以内，以减小发散对腔耦合的影响；谐振腔用于增加乙炔与激光的有效作用距离；InGaAs 探测器响应时间小于 1 μs，用于接收透射光并完成调制信号的光电转换。

2.3.3 调制、解调与数据采集

信号发生器输出低频扫描信号和高频正弦调制信号，锁相放大器提取探测信号中的 2f 分量，数据采集卡以不低于 100 kS/s 的采样率完成数字化，计算机完成基线处理、2f 幅值提取、统计与拟合。该测量链路用于统一获得后续低浓度、高浓度和稳定性实验的响应量。

3 实验部分

3.1 实验装置与测量流程

实验装置如图 6 所示，由标准气体钢瓶、质量流量控制器、动态混合器、平-凹增强谐振腔、1530 nm DFB 激光器、InGaAs 光电探测模块、OE1022 锁相放大器、USB 高速 AD 采集模块和计算机组成。实验时，首先以氮气对气路及谐振腔进行吹扫；随后利用质量流量控制器调节标准气体与稀释气体流量，经动态混合后将待测气体连续通入密封谐振腔。DFB 激光器在目标吸收线附近进行低频扫描，并叠加高频正弦调制信号；透射光经 InGaAs 探测器转换为电信号后输入锁相放大器，提取二次谐波（2f）分量。最后由 USB 高速 AD 采集模块完成信号数字化，计算机进行基线处理、2f 幅值提取、统计与拟合。低浓度响应、高浓度响应和稳定性测试均采用上述测量链路，以保证不同实验结果具有可比性。

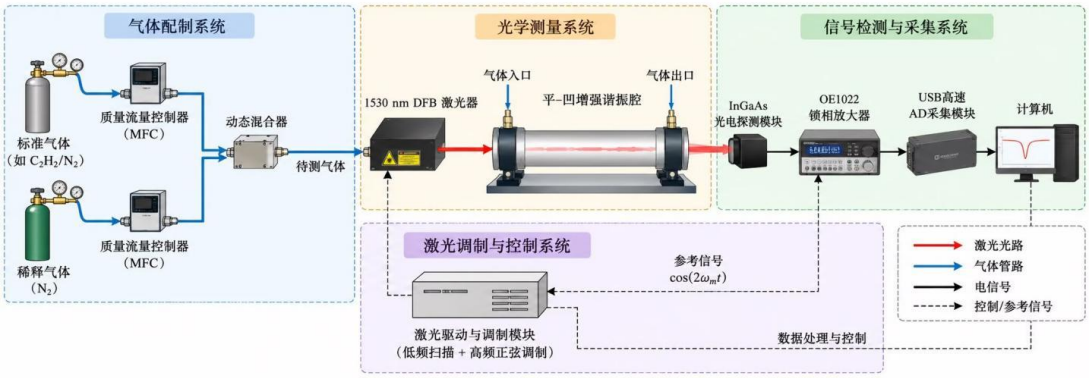

图 6 实验系统示意图
Fig. 6. Experimental System Schematic

3.2 实验条件与测量规范

实验环境温度控制为 25±2 ℃、相对湿度 50±5%，大气压为 101.3 kPa，混合气总流量保持 500 mL/min。每组实验开始前，先以氮气连续吹扫管路和谐振腔不少于 10 min，以减小残余气体对后续测量的影响；待气体流量及检测信号进入稳定状态后开始采集，单次采集时间为 30 s。光源采用国产 1530 nm 波段 DFB 激光组件及配套国产集成 TEC 恒流驱动，探测器为国产 InGaAs 高速光电探测模块，锁相放大器为国产 OE1022，采集卡为国产 USB 高速 AD 采集模块。各浓度点均在相同实验条件和数据处理参数下重复测量 10 次，计算 2f 信号幅值平均值作为该浓度点的响应值，并以标准偏差表征重复测量的离散性。原始信号统一采用实验配套程序完成基线处理、2f 幅值提取、统计和拟合。测量结果可能受到标准气体浓度、流量控制、温压波动、激光功率与波长漂移、腔耦合状态、探测与采集噪声以及重复性等因素影响；其中重复性依据 10 次测量结果评价。受现有实验记录限制，本文不报告缺乏原始量值支撑的合成不确定度。

3.3 检测波长确定

3.3.1 谱线筛选与实验验证

实验前依据 HITRAN 数据库对 1.5～2.0 μm 近红外区域的乙炔吸收谱线进行筛选，如图 7 所示。计算条件取约 298 K、101.3 kPa，与实验环境相对应；筛选过程中综合比较目标吸收线强度、空气展宽半宽、邻线间隔以及 H_2O、CH_4、CO_2 等潜在干扰，并要求候选谱线位于 1530 nm DFB 激光器的可调谐范围内。考虑本文同时开展低浓度与较高浓度测量，谱线选择还需兼顾低浓度弱吸收信号的可辨识性和高浓度条件下的动态范围。

由 HITRAN 仿真可见，1525～1535 nm 范围内乙炔分子存在多条近红外吸收谱线。本文重点考察 1530.37 nm 附近目标吸收线的局部分布：一方面，该谱线具有满足低浓度检测需要的吸收响应；另一方面，在筛选过程中对邻近谱线以及 H_2O、CH_4、CO_2 等潜在干扰进行了排查。同时，1530.37 nm 位于本实验所用 1530 nm DFB 激光器的可调谐范围内，能够保留稳定扫描和波长调制所需的调谐裕量。考虑增强光程后高浓度端可能出现响应压缩，本文没有单纯以“吸收越强越好”作为选择标准，而是在吸收强度、潜在干扰、激光器适配性和宽浓度测量需求之间进行综合权衡。

完成 HITRAN 数据库筛选后，本科实验阶段对 1530.37 nm 目标波段开展了实测验证，通过扫描目标波段核对实测吸收峰位置及其随乙炔浓度变化的响应，并与 HITRAN 预测结果进行对应。综合目标线强度、附近谱线分布、潜在干扰、激光器调谐范围和实测峰位，最终确定 1530.37 nm 乙炔吸收峰作为检测波长，并在后续各组实验中保持该检测波长不变。需要说明的是，本研究未对 H_2O、CH_4、CO_2 分别开展独立定量交叉干扰实验，因此有关干扰影响的判断主要来自 HITRAN 谱线筛选，不将其表述为已经完成实验定量验证。

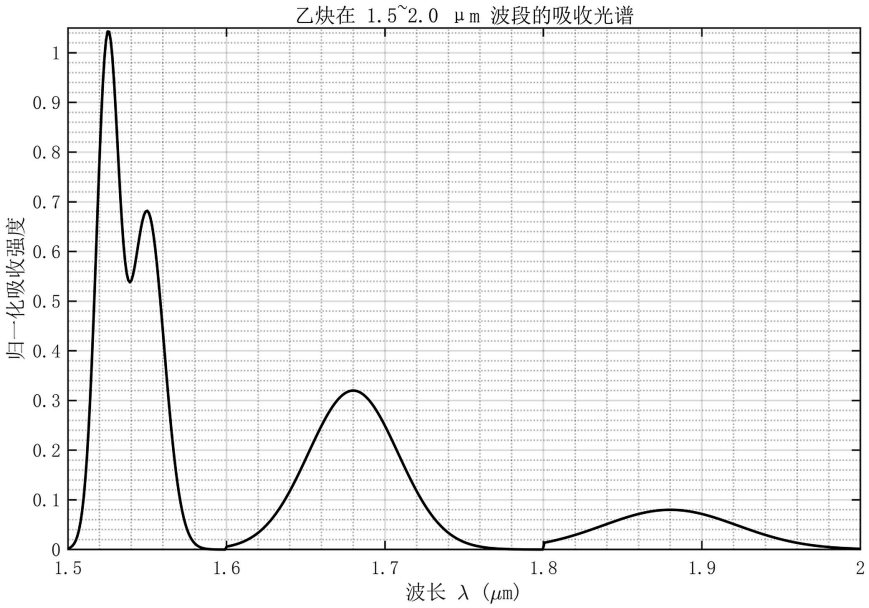

图 7 乙炔分子在近红外区域(1.5～2.0μm)的吸收谱线

Fig. 7. Absorption Spectrum of Acetylene Molecules in the Near-Infrared Region (1.5–2.0 μm)

https://doi.org/10.68070/r1ers609

3.4 实验方案与实施步骤

3.4.1 低浓度响应与检出限实验

低浓度实验用于评价系统对弱吸收信号的响应及检出能力。按照表 1 所列乙炔体积分数依次配制待测气体，各浓度点均执行“氮气吹扫—气体通入—信号稳定—连续采集”的相同流程，并重复测量 10 次。每次测量提取 2f 信号幅值，计算 10 次测量的平均值和标准偏差；以乙炔体积分数为自变量、平均 2f 信号幅值为响应量进行线性拟合，误差棒采用重复测量标准差表示。低浓度响应曲线及统计结果分别见图 8 和表 1。

检出限按照 3 倍信噪比（3-SNR）准则计算。噪声数据来源于本科实验阶段通入高纯 N_2 时采集的零乙炔背景数据；背景测试保持与样品测量一致的激光调制、锁相解调、采样和数据处理条件，并连续采集 10 组基线 2f 信号。本文将零背景条件下 2f 基线信号幅值的标准偏差定义为系统噪声σ_noise；低浓度区间以乙炔体积分数 c 为自变量、2f 信号幅值 S 为响应量进行线性拟合 S=kc+b，其中 k 为标定曲线的灵敏度斜率。检测限按 LOD=3σ_noise/k 计算。代入本科实验已有的基线噪声与低浓度拟合斜率，得到本系统乙炔检测极限为 1.0×10^{-6}（体积分数）。噪声统计与样品测量均采用 10 组数据，以保证计算条件的一致性。

$$LOD = \frac{3\sigma_{noise}}{k} \qquad (3-1)$$

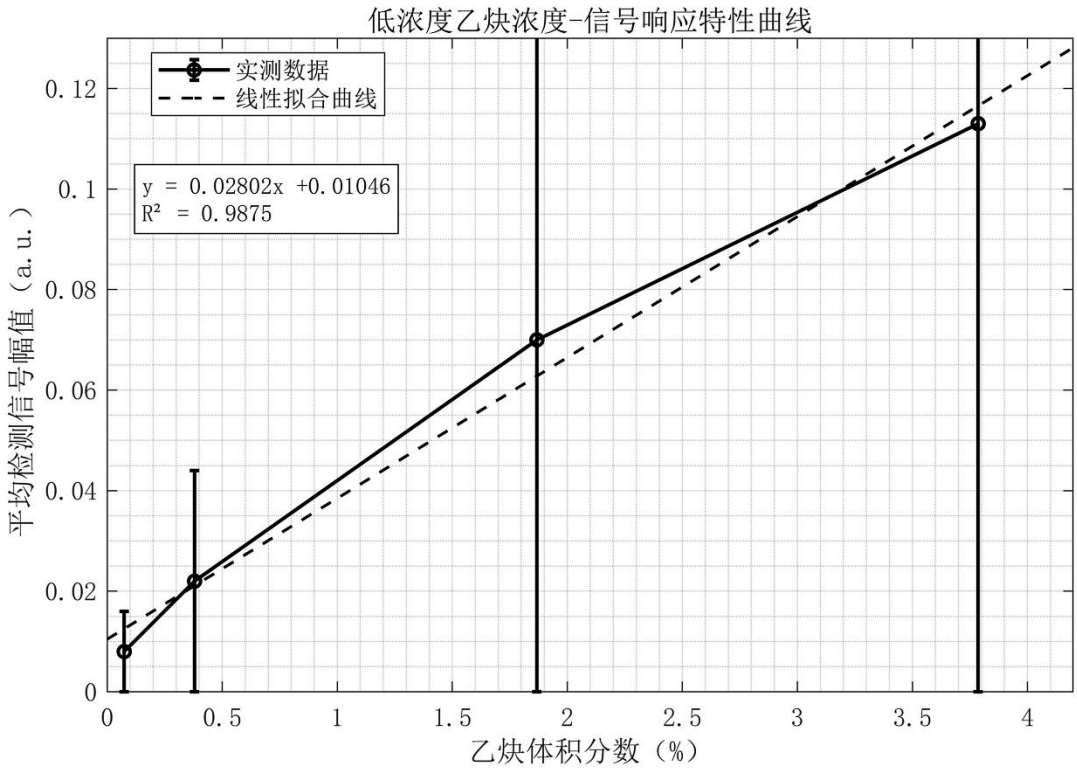

图 8 乙炔低浓度-信号响应曲线

Fig. 8. Low-Concentration Acetylene Signal Response Curve

表 1 灵敏度测试数据

Tab. 1. Sensitivity Test Data

乙炔体积分数	平均检测信号幅值（a.u.）	测量标准偏差
2×10^{-6}	0.074	0.008
1×10^{-5}	0.380	0.022
5×10^{-5}	1.868	0.070
1×10^{-4}	3.786	0.113

3.4.2 高浓度响应与校正实验

高浓度实验用于考察增强吸收条件下系统响应随乙炔浓度升高的变化。依次设置 2.5%、20%、40%、60%和 82%五个乙炔体积分数，每个浓度点均按照与低浓度实验一致的气路置换、稳定和采集流程重复测量 10 次，并记录原始 2f 响应。为描述较高浓度端的非线性响应，在保留原始检测信号的基础上采用分段线性方法进行校正，原始数据及校正数据见图 9 和表 2。

分段校正基于表 2 所列 2.5%、20%、40%、60%和 82%五个测试浓度点建立，目的在于描述 60%以上响应斜率下降后的分区间标定特征，不改变原始检测数据。由于这五个浓度点同时用于模型建立，现有数据只能评价拟合样本内的响应展开效果，不能作为未知浓度样本预测精度的独立证据。针对审稿意见，本文据此收缩了相关结论：不再将校正后的信号变化表述为已验证的定量准确度或泛化能力，而仅作为高浓度响应压缩的校正示例。严格验证仍需另外配制未参与建模的独立浓度点（尤其是 60%～82%区间），将其作为盲样输入已建立的分段模型，并以预测偏差、相对误差或 RMSE 评价泛化性能。

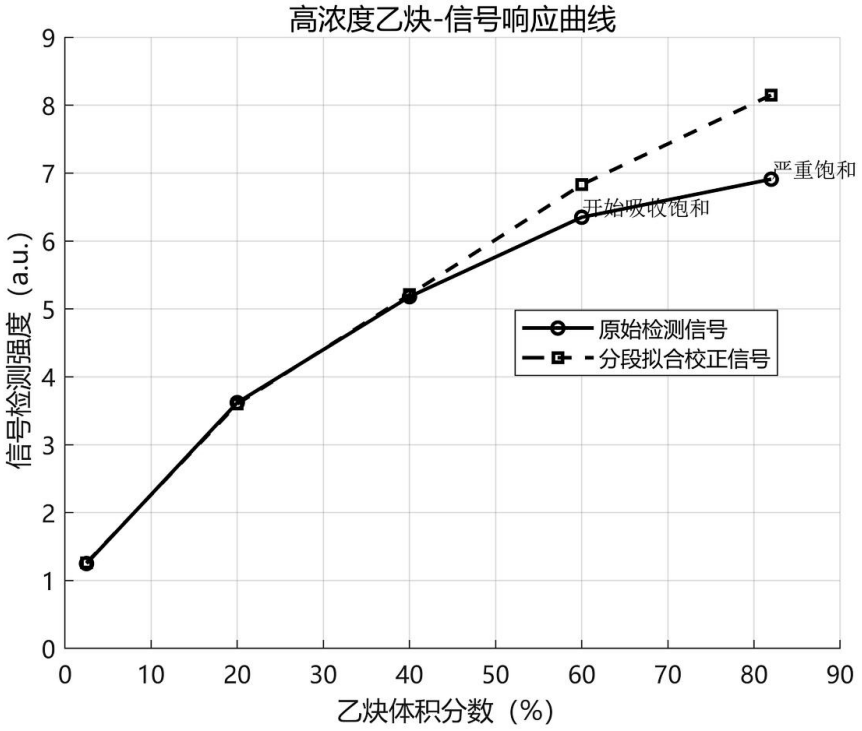

图 9 乙炔高浓度-信号响应曲线
Fig. 9. High-Concentration Acetylene Signal Response Curve

表 2 乙炔高浓度极限检测数据
Tab. 2. High-Concentration Acetylene Detection Limit Data

乙炔体积分数（%）	原始检测信号（a.u.）	分段拟合校正信号（a.u.）
2.5	1.25	1.26
20	3.62	3.60
40	5.18	5.21
60	6.35（开始饱和）	6.83
82	6.91（严重饱和）	8.15

https://doi.org/10.68070/r1ers609

3.4.3 短期稳定性实验

短期稳定性实验采用中等浓度乙炔混合气，在保持温度、湿度、压力、流量及光电检测参数不变的条件下连续运行 2 h，每 10 min 记录一次 2f 信号幅值，共形成 0～120 min 的时间序列。测试过程中不改变气体配比和数据处理方式，并以各时刻信号幅值的相对标准偏差（RSD）评价 2 h 观察窗口内的输出稳定性，测试思路参考刘勇杰[19]。实验记录见图 10 和表 3，稳定性结果及其适用范围在第 4 节讨论。

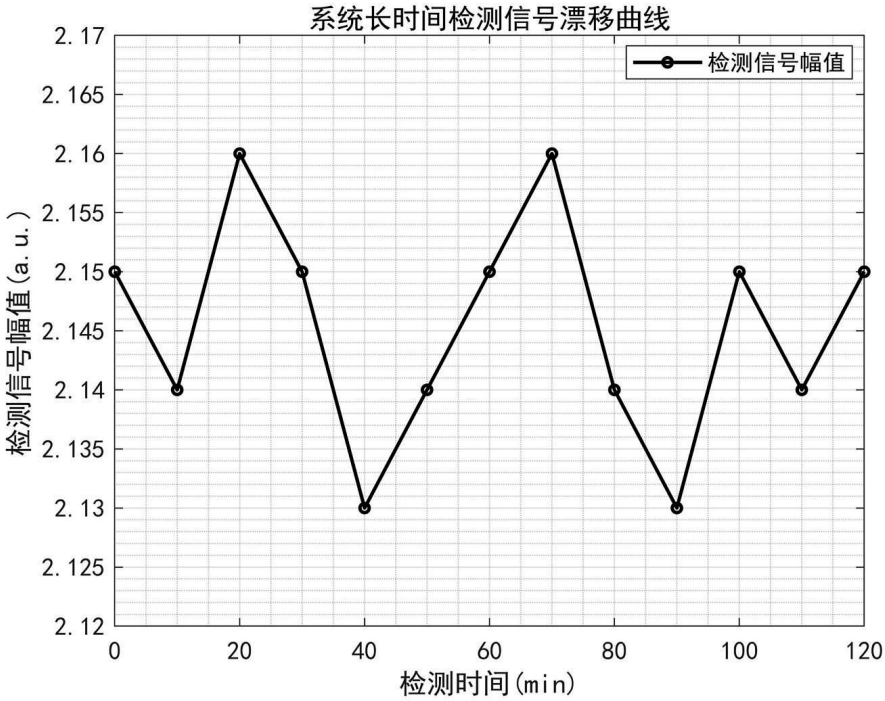

图 10 稳定性测试信号漂移图
Fig. 10. Signal Drift during Stability Test

表 3 稳定性测试数据
Tab. 3. Stability Test Data

时间 (min)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
信号幅值 (a.u)	2.15	2.14	2.16	2.15	2.13	2.14	2.15	2.16	2.14	2.13	2.15	2.14	2.15

4 结果分析与讨论

4.1 低浓度检测性能及影响因素

低浓度实验的线性拟合决定系数为 R^2=0.9875，说明在所测试低浓度区间内，乙炔体积分数与 2f 信号幅值总体保持较强的线性相关关系，但仍存在可观察的偏离。结合表 1 可见，随着信号幅值由 0.074 a.u.增至 3.786 a.u.，重复测量标准差由 0.008 增至 0.113 a.u.；若以标准差相对于平均信号幅值进行比较，其相对离散程度约由 10.8%下降至 3.0%。这表明低浓度端的绝对波动虽然较小，但由于有效信号本身更弱，噪声在测量结果中所占比例更高，因此最低浓度附近是决定系统检出能力的关键区域，而不能仅依据高浓度点的线性趋势评价灵敏度。

按上述 3-SNR 方法，以高纯 N_2 零乙炔背景下 2f 基线信号幅值的标准偏差σ_noise 表征系统噪声，并结合低浓度标定曲线灵敏度斜率 k，依据 LOD=3σ_noise/k 计算得到 1.0×10^{-6}（体积分数）的检出限。该结果对应本文既定的激光调制、锁相解调、采样与基线处理条件。需要注意，约 500 m 是基于腔长和镜片标称反射率得到的理论设计有效光程。受本科实验结束后平台拆解的条件限制，本研究未开展无谐振腔的单程对照实验，因而无法直接获得实测等效光程或实际信号增强倍数。腔耦合损耗、镜片反射率偏差、散射损耗及机械扰动均可能使实

际增强效果低于理想设计值，因此不能直接使用理论光程倍数来预估检出限的改善程度。

4.2 宽浓度响应特性与稳定性

4.2.1 高浓度非线性及校正适用范围

图 9 和表 2 显示，原始 2f 响应随乙炔浓度升高始终增加，但单位浓度增量对应的信号增量持续下降。按相邻测试区间计算，2.5%～20%、20%～40%、40%～60%和 60%～82%的原始响应斜率分别约为 0.135、0.078、0.059 和 0.025 a.u./%。尤其从 40%～60%区间到 60%～82%区间，响应斜率下降约 56%，说明 60%以后并非简单的“信号继续增大”，而是浓度分辨能力明显压缩。该趋势与增强光程条件下吸收加深后响应逐步偏离低浓度近似线性关系的特征一致，同时也可能叠加探测链路动态范围和腔耦合状态等因素的影响。由于现有实验未对各影响量进行独立控制，本文不将非线性归因于单一机制。

4.2.2 分段校正效果与模型边界

分段线性校正后，60%和 82%浓度点的信号由 6.35、6.91 a.u.调整为 6.83、8.15 a.u.，两点间信号差由 0.56 a.u.扩大至 1.32 a.u.；对应 60%～82%区间的响应斜率由约 0.025 a.u./%提高至 0.060 a.u./%。这一变化表明，分段标定能够对本实验已测数据中的高浓度响应压缩进行展开，提高已测浓度点之间的信号区分度。需要重点说明的是，本研究的校正关系完全基于 2.5%、20%、40%、60%和 82%五个高浓度测试点建立，没有设置不参与建模的独立外部验证浓度样本。受本科实验结束后标准气体和配气系统已无法再次使用的条件限制，现阶段无法补充新的独立浓度点。因此，该分段校正仅用于分析本次实验数据的响应改善效果，尚不能作为对未知浓度样本定量预测能力的证明，也不报告外部预测误差或泛化精度。后续研究需在不重新拟合模型参数的前提下配置独立标准气体样本，将模型反演浓度与标准浓度比较，以评价模型的准确性和泛化能力。

4.2.3 短期稳定性与漂移特征

稳定性数据反映的是系统在固定工况下随时间变化的输出特征，而不仅是一个 RSD 数值。由图 10 和表 3 可见，2 h 内 2f 信号幅值位于 2.13～2.16 a.u.之间，峰—峰变化为 0.03 a.u.，相对于约 2.15 a.u.的平均水平仅占约 1.4%；各时刻数据围绕中心值上下波动，没有出现持续单向增大或减小的明显趋势。结合文中给出的 RSD=0.45%，可以认为在本次 2 h 受控实验窗口内，随机波动是主要可见特征，未观察到显著的累积漂移。该结果说明系统短时间连续运行具有较好的重复性，但 2 h 数据不能替代日尺度或更长周期的零点漂移、量程漂移评价。

4.3 方法的应用边界

综合三组实验可以看到，本系统的性能具有明显的浓度区间特征：低浓度端的主要矛盾是有效信号较弱、相对离散程度较大，因此评价重点应放在信噪比和检出限；中等浓度区间信号随浓度增加较为清晰，可用于建立稳定的浓度—响应关系；当浓度提高至 60%以上后，原始响应斜率显著下降，系统限制由“能否检出”转变为“能否保持足够的浓度区分度”。因此，增强谐振腔带来的长有效光程并不是在全量程内产生同等比例的性能增益，而是首先改善弱吸收条件下的可测性，同时使高浓度端更需要采用分区间标定或非线性校正。

这一结果说明，宽量程乙炔检测不能仅用单一的线性拟合系数或单一检出限概括系统性能，而应同时考察低浓度信噪特性、高浓度响应斜率变化和时间稳定性。本文数据支持“低浓度增强检测—高浓度分段校正”的处理思路，但其工程适用范围仍受当前实验边界限制：谱线筛选阶段虽考虑了 H_2O、CH_4 和 CO_2 等潜在干扰，现有实验尚未对交叉干扰进行独立定量，也未开展温压变化、机械振动和长期漂移试验。后续应增加中间浓度及独立验证样本，并在不同环境条件下重复标定，以判断校正模型是否能够稳定迁移至实际工况。

5 结论

本文围绕乙炔低浓度弱吸收检测与较高浓度响应非线性问题，构建了平-凹型增强谐振腔 TDLAS 系统，并通过谱线筛选、低浓度响应、高浓度响应和短期稳定性实验对系统性能进行了验证。主要结论如下：

1. 基于 HITRAN 谱线筛选并结合激光器调谐范围和实测光谱验证，确定 1530.37 nm 乙炔吸收峰作为检测波长。

2. 采用 0.50 m 平-凹型增强谐振腔和 99.9%高反射率镜片，理论设计有效光程约 500 m。现有实验未通过单程对照或腔衰荡法独立测得实际等效光程，因此本文不将理论光程直接作为实际增强倍数；增强腔条件下的实测低浓度响应和检出限作为系统性能依据。

3. 在 25±2 ℃、相对湿度 50±5%、101.3 kPa 和 500 mL/min 条件下完成重复测量。低浓度响应线性拟合 R^2=0.9875，按 3 倍信噪比准则得到检出限 1.0×10^{-6}（体积分数）。

4. 在 2.5%～82%高浓度测试中，原始响应随浓度增加而持续上升，但相邻区间响应斜率逐步下降，60%～82%区间仅约 0.025 a.u./%，表明高浓度端出现明显响应压缩；分段线性校正使当前建模数据的该区间斜率提高至约 0.060 a.u./%。由于未设置独立

https://doi.org/10.68070/r1ers609

验证浓度点，该结果仅说明样本内响应展开效果，不作为未知样本泛化精度的证明。连续 2 h 稳定性测试中信号保持在 2.13～2.16 a.u.范围内，RSD 为 0.45%，未见明显单向漂移。

5. 本文实验结果的适用范围限于现有测试条件。标准气体与流量控制、温压波动、光源漂移、腔耦合、探测采集噪声及重复性均可能影响测量结果；复杂现场应用仍需进一步开展交叉干扰、温压补偿、振动和长期稳定性验证。

综上，本文实验结果支持增强型谐振腔与 WMS/2f 检测结合用于乙炔较宽浓度范围测量的可行性。本文的主要贡献在于，在同一实验系统中同时考察低浓度检出限、高浓度响应非线性及短期稳定性，并明确区分理论光程增强、实测检测性能与校正模型适用范围。

5.1 本研究局限性与后续展望

尽管本文构建了增强型谐振腔 TDLAS 乙炔检测系统，并完成低浓度检出、高浓度响应以及短期稳定性测试，但受实验周期及实验条件限制，本研究仍存在以下局限。

（1）本文约 500 m 有效光程为理想化条件下基于腔长和镜片标称反射率得到的理论设计值。本科实验完成后光学平台已经拆解，现阶段未能开展有无谐振腔的对照实验，也缺少对实际信号增强倍数和真实等效有效光程的直接实验验证。后续重新搭建实验平台后，可通过单程/增强腔对照或其他有效光程测量方法，对腔系统的实际增强效果进行定量评价。

（2）高浓度区间采用的分段线性校正关系基于本组 2.5%、20%、40%、60%和 82%五个测试样本建立，没有设置独立外部验证集。因此，该方法目前仅用于分析已测数据的响应展开效果，不能直接作为未知浓度样本定量反演精度的证明。后续需要配置更多不参与建模的独立标准气体样本，对校正模型的准确性和泛化能力进行验证。

（3）本研究尚未对 H_2O、CH_4、CO_2 等潜在干扰气体开展独立定量交叉干扰测试，也未系统开展宽范围温压变化、机械振动和更长时间尺度下的性能评价。后续可进一步开展多组分干扰、环境适应性及长期稳定性实验，以完善系统性能评价。

利益冲突声明

作者声明不存在与本文研究相关的利益冲突。

数据可用性声明

支撑本文主要结论的实验数据已在正文图表中给出。

作者贡献声明

李哲负责研究指导、方案论证与论文审阅；闫志林负责实验系统搭建、数据采集与分析以及论文撰写与修改。

参考文献

[1] 孙华莉.乙炔气体生产火灾危险性分析及预防对策[J].江西化工,2013,(03):26-27.

[2] 林永荣.溶解乙炔掺液化石油气的鉴别方法探讨[J].福建分析测试,2011,20(03):49-52.

[3] 陈越.基于 TDLAS 技术的小型化乙炔气体检测系统的研制[D].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),2019.

[4] 连久翔.基于 TDLAS 技术的气体检测关键技术研究[D].东南大学,2020.

[5] 超星, 胡臻, 朱宁. 腔增强吸收光谱技术研究与应用进展（特邀）[J]. 光子学报, 2023, 52(3): 0352102.

[6] 曹旺，万元，刘章进等. 基于 TDLAS 方法检测变压器油中 C_2H_4的研究[J]. 电工技术, 2025, (18): 250-253.

[7] 魏志涵, 张俊森, 顾萱, 等. 基于近红外 TDLAS 以及脱气膜水溶液中溶解 CO_2测量方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2025, 45(9): 2452-2458.

[8] Wang J, Wang M, Qian F, et al. Sensitivity improvement of TDLAS in detecting water vapor concentration − Literature review[J]. Infrared Physics and Technology, 2026, 153: 106309.

[9] KAN L, YE Y, LIANG H, et al. Semi-supervised methane gas concentration detection model based on TDLAS technology[J]. Optoelectronics Letters, 2025, 21(11): 690-697.

[10] Shim H., Jung S., Park G., et al. Measurement of pressure, temperature and velocity of supersonic flows by means of TDLAS with triangular laser beam path[J]. Aerospace Science and Technology, 2025, 163: 110309.

[11] 李辉. 一种基于 TDLAS 系统高稳定性的半导体分布式反馈型激光器控制方法的研究[D]. 曲阜师范大学，2025.

[12] 韩贺. 基于 TDLAS 技术的甲烷检测信号处理方法研究[D]. 齐鲁工业大学, 2025.

[13] 杨博，刘治华，张登峰，等.基于 TDLAS 的天然气中水露点检测系统[J].中国测试，2025，51（S1）：296-302.

[14] 贾鹏,王瑞.TDLAS 技术应用于瓦斯浓度检测仪的研究[J].煤炭加工与综合利用，2025，(03)：106-109.

[15] 石旺龙，张亮，臧金亮. 基于非合作目标的 TDLAS 气体遥测技术研究进展[J]. 计量科学与技术，2025，69（06）：19-26.
[16] 张永平、高嵩、张文斌等. TDLAS 激光气体检测关键技术研究[C]/ /中国城市燃气协会标准工作委员会. 2025 年中国城市燃气协会标准工作委员会年会暨标准引领燃气安全运营及智慧城市建设研讨会论文集. 华夏天信传感科技（大连）有限公司, 2025: 99-104.
[17] 孙志阳. 基于 TDLAS 的 CH_4与 CO_2双组分气体检测[D]. 哈尔滨工程大学, 2025.
[18] 李琦、王昊、马柳昊等.基于波长调制光谱技术的高湿烟气残余氧定量测量[J].光电工程, 2025, 52（09）：167-178.
[19] 刘勇杰.基于 TDLAS 的多种工况下甲烷浓度监测[D].东北石油大学,2025.

Study on the Detection Limit of Acetylene by Enhanced Resonant-Cavity TDLAS

Yan Zhilin[1, 2], Li Zhe[2]

1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou Jiangsu; 2. Hefei Normal University, Hefei Anhui

Abstract: An enhanced resonant-cavity tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) system was developed to address weak absorption signals at low acetylene concentrations and increasing response nonlinearity at higher concentrations. The system employed a 1530 nm DFB laser, a 0.50 m plano-concave resonant cavity, an InGaAs photodetector, and lock-in detection. The 1530.37 nm acetylene absorption line was selected by HITRAN-based screening and experimental verification. Under 25±2 ℃, 50±5% relative humidity, and 101.3 kPa, the low-concentration calibration yielded R^2=0.9875, and the detection limit determined using the 3×signal-to-noise criterion was 1.0×10^{-6} in volume fraction. In the 2.5%–82% high-concentration tests, the raw response showed evident compression above 60%, while piecewise linear correction improved response separation at the high-concentration end. The relative standard deviation during a 2 h stability test was 0.45%. Under the tested conditions, the results demonstrate the feasibility of combining resonant-cavity path enhancement with WMS/2f lock-in detection and piecewise calibration for acetylene measurements over a wide concentration range.

Keywords: enhanced resonant cavity; TDLAS; acetylene; limit of detection; gas spectroscopy