

# 基于双楔形扫描镜的甲烷气体光谱成像方法\*

王夏春<sup>1)2)</sup> 张志荣<sup>2)3)4)†</sup> 蔡永军<sup>5)</sup> 孙鹏帅<sup>2)</sup>  
庞涛<sup>2)</sup> 夏滑<sup>2)</sup> 吴边<sup>2)</sup> 郭强<sup>2)</sup>

1) (中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 合肥 230026)

2) (中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 光子器件与材料安徽省重点实验室, 合肥 230031)

3) (中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

4) (国防科技大学, 先进激光技术安徽省实验室, 合肥 230037)

5) (国家管网集团科学技术研究总院分公司, 廊坊 065000)

(2023年12月4日收到; 2023年12月28日收到修改稿)

随着我国油气管道铺设数量的增加, 对管道的维护工作也需予以更多的重视. 目前, 在油气输送站场内, 主要采用人工巡检、对射式和云台式检测设备来检测天然气泄漏. 但是这些方法存在响应度差、检测区域受限、泄漏点定位较慢等问题. 为了满足对油气管道泄漏实时监测和快速定位的需求, 本文设计了一种快速、精确控制的双楔形扫描镜系统, 结合可调谐半导体激光吸收光谱技术, 使得气体测量由原来的点测量转换为面测量. 通过反解迭代优化算法, 控制楔形镜的转角获得高效均匀的光束扫描轨迹, 并将激光束的偏转方向及检测位置与对应的甲烷浓度信息相融合, 构建了包含位置信息的甲烷浓度数据, 实现甲烷气体的光谱成像. 实验中为了定量验证测量准确度及空间分辨率, 通过标准气袋模拟甲烷泄漏分布, 结果表明系统的成像浓度检测限小于 500 ppm·m ( $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$ ), 位置分辨率小于 6 cm. 同时该方法可以依据油气站场的测量距离调节扫描步进节点, 从而实现成像分辨率的可调节, 该成像方法为精确定位甲烷气体泄漏提供了新的思路.

**关键词:** 激光吸收光谱, 甲烷气体检测, 双楔形扫描镜, 气体成像

**PACS:** 42.62.Fi, 88.20.fq, 42.79.Bh, 07.07.Df

**DOI:** 10.7498/aps.73.20231906

## 1 引言

近年来, 我国油气行业取得了长足的发展, 天然气输送已经成为国民经济发展的支柱<sup>[1]</sup>. 然而, 随着天然气管道和站场的铺设不断增加, 管道使用年限的延长, 各种因素导致天然气输送站场和输送管道的泄漏事故时有发生. 输气管道在建设和运行中面临管道腐蚀、管道老化、自然因素等多种安全威胁, 极易导致天然气泄漏, 不仅对天然气管

道的安全运行造成了巨大危害, 还对环境和人民群众的生命财产安全构成了威胁. 由于天然气的主要成分是甲烷, 因此目前天然气泄漏检测的主要目标气体是甲烷. 我国天然气输送站场和输气管道检测中已有多种气体检测方法得到较为广泛的应用<sup>[2-8]</sup>. 对于开放场景的甲烷气体检测, 目前广泛应用的检测方式以“点测量”为主, 其中包括手持式甲烷遥测方式、固定反射式设备检测方式以及激光云台式设备检测方式<sup>[2-11]</sup>. 手持式甲烷遥测方式操作简单, 但是其依赖人工巡检且不能及时发现潜在的甲烷

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2022YFB3207601, 2021YFB3201904)、国家自然科学基金 (批准号: 11874364, 41877311, 42005107)、中国科学院合肥研究院“火花”基金 (批准号: YZJJ2022QN02) 和安徽省教育厅优秀青年科学基金 (批准号: 2022AH020098) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangzr@aiofm.ac.cn

泄漏情况. 固定反射式设备只能检测光束路径上是否存在甲烷气体, 检测的区域较为受限, 若需检测多个区域需要大规模铺设检测设备, 这需要付出高昂的硬件成本. 激光云台式检测设备是基于甲烷遥测的原理, 搭配云台以及相机, 通过云台的转动, 对待测区域进行长期的自动监测, 但是目前云台的移动速度比较缓慢, 且每次转动只能完成单点检测, 且受环境风速影响难以确定泄漏点的位置, 因此当检测到甲烷气体时, 往往还需要派遣巡检人员去现场对泄漏点进行复检. 为了满足泄漏源准确定位的分析需求, 更加有效的方法是采用气体成像技术. 这种方法能够获取甲烷气团的空间分布, 而且相对于单一位置的甲烷气体浓度测量包含的信息更多, 在泄漏源的定位上则更加高效 [12-16].

目前, 针对甲烷气体的“面检测”方式主要采用焦平面阵列探测器或红外相机直接成像, 分为主动式探测和被动式探测. 其中被动近红外成像技术 [12-14] 采用红外焦平面探测器, 不需要额外的光源, 基于环境的背景辐射吸收实现成像, 成像速度快, 但是受环境的温度影响较大, 很难检测到较低泄漏量的气体, 无法实现对泄漏初期的评估, 大多局限于定性而非准确定量. 主动阵列成像技术 [15] 是利用主动光对待测区域照射, 再用阵列探测器检测回波信号, 实现气体的成像, 但是成像分辨率由探测器上的阵列单元数量决定, 若采用阵列数量较多的探测器则需要高昂的成本, 同样该方法也不能实现气体浓度的准确定量测量, 较难满足大范围的推广应用.

针对快速、准确、定量的气体成像需求, 本文将双楔形扫描镜 [17-25] 与可调谐二极管激光吸收光谱 (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 技术 [6-8] 相结合提出了一种甲烷气体成像的新方法. TDLAS 技术是目前较为成熟的激光吸收光谱技术, 该技术具备测量快速的优点, 能够满足对实时监测的迫切需求. 同时, TDLAS 技术具备良好的选择性, 能够有效排除环境中其他气体的干扰, 从而实现对目标区域的准确测量, 这些特点使得 TDLAS 技术成为一种理想的解决方案. 双楔形扫描镜能够实现激光束灵活、精准的控制, 从而将“点”检测方式拓展为“面”检测方式 [12-16, 26, 27]. 其扫描方式较为简单, 双楔形扫描镜避免了往返多次的高频振动, 相比较传统的机械式二维振镜, 其具备结构可靠、低振动灵敏度、鲁棒性 (对振动相对不敏感) 等优势. 2015 年, Roy 等 [23] 设计了两对

同轴的双楔形扫描镜, 应用于 3D 测绘领域, 两对双楔形扫描镜可以增大光束的扫描视场角, 并且可以增大特定区域的采样点密度. 随着扫描时间的积累, 理论上可以实现待测区域 100% 的覆盖率, 满足高分辨率成像的要求. 2019 年, 曾昊旻等 [24] 基于双楔形扫描镜设计了一种车载激光雷达的大视场扫描方案. 2021 年上市的小鹏 P5 车型上搭载的 HAP 激光雷达采用的扫描方案同样是双楔形扫描镜, 该激光雷达由大疆 Livox 览沃研发, 并首次装载在量产车型上进行推广应用. 2022 年, Sandoval 等 [25] 介绍了一种双楔形扫描镜精准控制的反解迭代方法, 精度达到 pm 量级, 能够满足在光刻、3D 打印等领域的高精度光束控制的需求.

本文创新性地将 TDLAS 技术与双楔形扫描镜相结合, 构建旁轴光路传输系统, 实现了激光束的精准偏转控制, 并获取光束的偏转角度信息和甲烷气体浓度信息. 通过将浓度信息与光束角度信息相结合, 采用相应的图像处理算法, 成功实现甲烷气体的高精度二维成像图. 该技术的实现能够克服传统气体检测方案中的一些限制, 实现更高效、更可靠的甲烷气体成像检测, 为天然气油气站场的甲烷泄漏快速定位与分析提供新的思路.

## 2 原理

### 2.1 TDLAS 技术原理

TDLAS 技术是基于分布反馈式激光器 (DFB) 的窄线宽特性, 并通过调谐激光器驱动电流来改变激光波长, 根据朗伯比尔定律 (Lambert-Beer) 而提出的一种痕量气体检测技术 [5-7]. Lambert-Beer 定律可表述为

$$I(v) = I_0(v) \exp[-S(T)CPL\phi(v)], \quad (1)$$

式中,  $v$  为激光束的频率;  $I_0(v)$  为激光束的入射强度;  $I(v)$  为激光束穿过待测气体被吸收后的激光强度;  $S(T)$  ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$ ,  $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$ ) 为气体分子吸收谱线的线强度与温度  $T$  有关;  $P$  ( $\text{atm}$ ) 为气体的总压力;  $C$  为单位体积内待测吸收气体分子数;  $L$  ( $\text{cm}$ ) 为激光束在待测气体中通过的路径长度;  $\phi(v)$  为吸收线型函数, 其满足

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(v) dv \equiv 1. \quad (2)$$

令截面吸收系数  $\sigma = SP$ , 所以将 (1) 式经过化简可得

$$-\int_{-\infty}^{+\infty} \ln \frac{I(v)}{I_0(v)} dv = \sigma CL. \quad (3)$$

令吸光度  $A = -\int_{-\infty}^{+\infty} \ln \frac{I(v)}{I_0(v)} dv$ , 吸光度  $A$  可以通过解调  $I(v)$  和  $I_0(v)$  求出, 可得

$$CL = \frac{A}{\sigma}. \quad (4)$$

这样就可以求出  $CL$  表示光束路径上的浓度, 其单位为  $\text{ppm} \cdot \text{m}$  ( $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$ ), 表示光束路径上待测气体的平均浓度与光程的乘积.

## 2.2 双楔形扫描镜工作机制

双楔形扫描系统是一种共轴式折射元件的扫描方式, 它是利用双楔形镜片的共轴相对转动连续改变组合楔角大小, 从而使得系统光轴连续偏转, 实现光束的扫描. 如图 1 所示, 所用到的双楔形扫描镜由同一旋转轴上的一对楔形棱镜组成, 当光线经过第 1 个楔形镜时, 它会被折射并偏转一个角度, 经过第 2 个楔形镜时再次被折射并偏转一个角度. 因此, 通过调整两个楔形棱镜相对于旋转轴的旋转角度, 可以精确控制光束在一定范围内任意偏转, 实现光束的扫描效果 [11-14].

图 1 采用的两个楔形镜片的材质和尺寸参数完全相同, 所以对光束的偏转角也相同. 楔形镜 1 和楔形镜 2 绕着  $z$  轴的转动角度分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$  (顺时针为正, 其中镜片最厚处位于最上方时为初始角  $0^\circ$ ); 楔形镜中心点的厚度为  $T$ , 偏转角为  $\alpha$ ; 两个楔形镜之间的距离设为  $S$ ; 楔形镜距离漫反射平面的距离为  $z$ ; 因为两个楔形镜片采用同一规格, 所以  $r_1$  和  $r_2$  满足  $r_1 = r_2 = z \tan(\alpha)$ , 图 1 中  $r_r = r_1 + r_2$ . 光束打在背景墙上光斑的位置可用 (5) 式和 (6) 式表示:

$$Y = (r_1 + r_d) \sin \theta_1 + r_2 \sin \theta_2, \quad (5)$$

$$X = (r_1 + r_d) \cos \theta_1 + r_2 \cos \theta_2, \quad (6)$$

其中  $r_d$  是一个变量, 当楔形镜的参数选定后, 光束偏转角度的变化主要由楔形镜片 1 和楔形镜片 2 相对于  $z$  轴的转角  $\theta_1$  和  $\theta_2$  决定:  $r_d \approx (2T + T') \times \tan(\alpha_i - \alpha_p) + S \tan(\alpha)$ , 其中  $T' = [S \cdot \tan \alpha + T \cdot \tan(|\alpha_i - \alpha_p|)] \cdot \tan \alpha_i \cdot \cos(|\theta_1 - \theta_2|)$ ,  $r_d$  的变化量极其小 ( $r_d$  变化量不超过  $0.05 \text{ mm}$ , 该成像系统中所用的光束准直后的直径为  $2 \text{ mm}$ ), 已经远小于光束直径的大小, 所以可认为  $r_d$  是一个定值; 当楔形扫描镜的参数固定之后, 则  $r_1, r_2, r_d$  皆可看作定值, 可以令  $A = r_1 + r_d, B = r_2$ . 则光束打在背景墙上的光斑的位置信息如下:

$$Y = A \sin \theta_1 + B \sin \theta_2, \quad (7)$$

$$X = A \cos \theta_1 + B \cos \theta_2. \quad (8)$$

当两个楔形镜绕  $z$  轴的转速成一定比例时, 模拟得到如下光斑轨迹扫描图. 其中扫描轨迹的半径长与两个镜片的转动角度的角度差存在图 2(b) 所示的关系.

图 3 分别是双楔形扫描镜角速度差值为  $0.25, 0.2, 0.15$  和  $0.1$  ( $^\circ/\text{s}$ ) 对应的光斑扫描轨迹. 根据双楔形扫描镜的工作特性, 通过减小两个镜片转动角速度差值, 就能够使得光斑的扫描轨迹变得更加密集. 能够看出其光斑轨迹的分布特征为边缘密集, 中心处稀疏. 后续进行甲烷检测的过程中, 在光斑轨迹比较密集的区域, 会造成甲烷气体的重复检测, 这会降低甲烷的检测效率, 增长采样周期; 在光斑轨迹比较稀疏的区域, 这会造成甲烷气体的漏检, 可能会丢失重要检测信息. 为此本文采用一

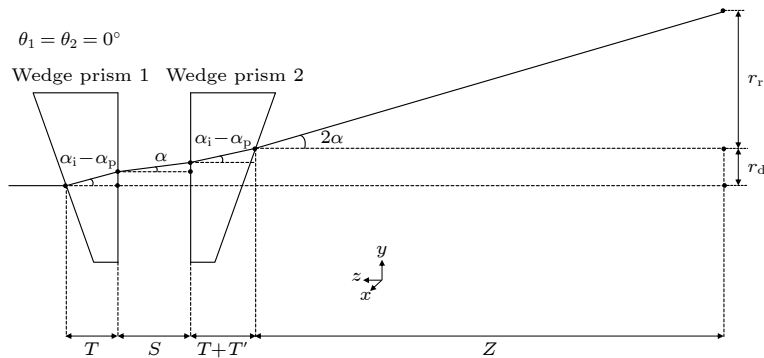


图 1 双楔形扫描镜光束传输原理图

Fig. 1. Schematic diagram of dual wedge scanning mirror.

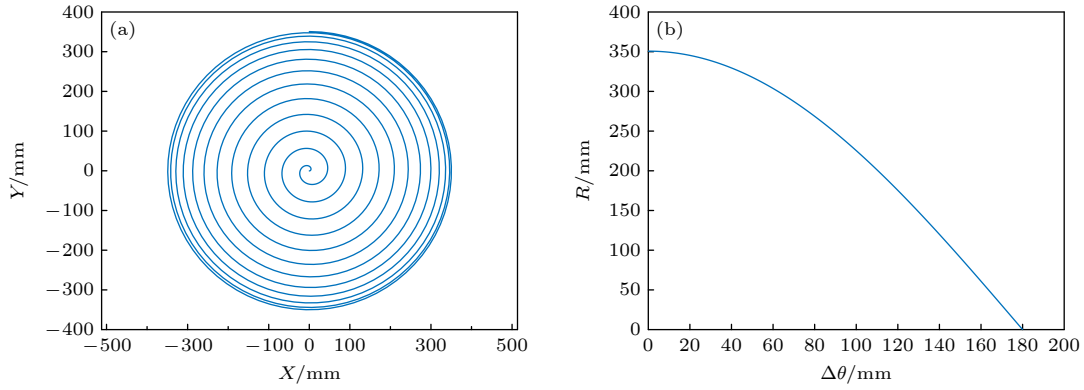


图 2 双楔形扫描镜扫描轨迹 (a) 优化前光斑轨迹扫描图; (b) 轨迹半径与角度差  $\Delta\theta$  的关系

Fig. 2. Scanning trajectory of dual wedge scanning mirror: (a) Scanning image of spot trajectory before optimization; (b) relationship between trajectory radius and angle difference  $\Delta\theta$ .

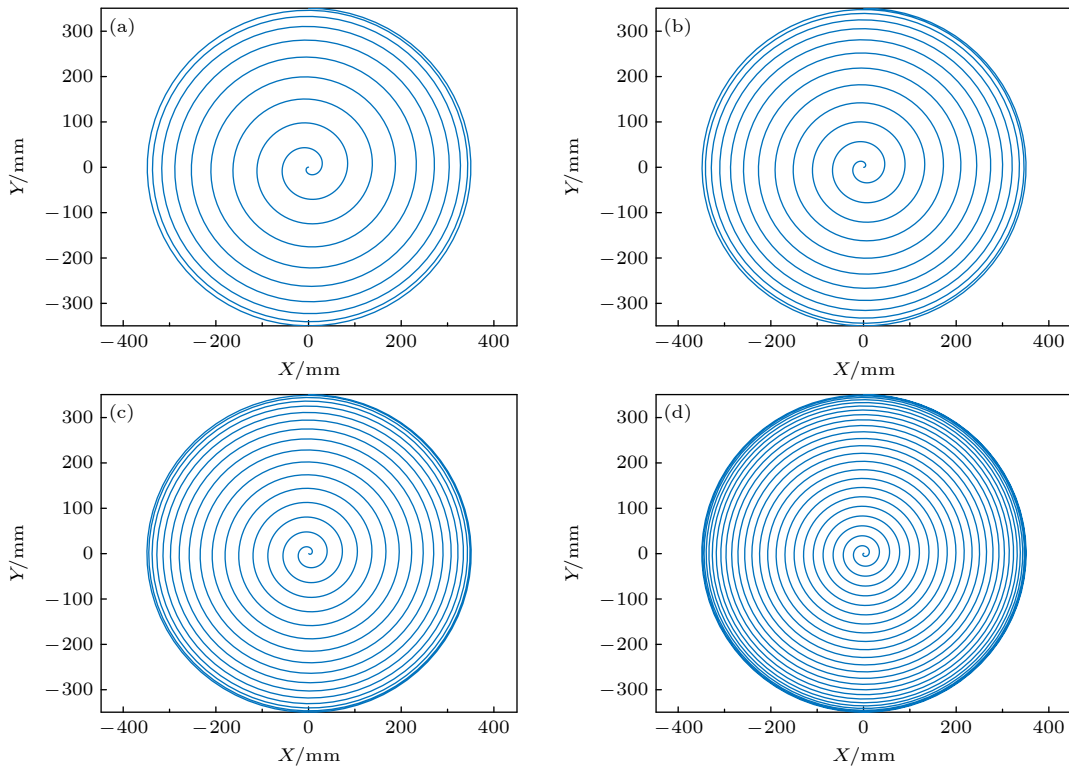


图 3 双楔形扫描镜不同角速度差值对应的扫描轨迹 (a) 0.25 (°)/s; (b) 0.2 (°)/s; (c) 0.15 (°)/s; (d) 0.1 (°)/s

Fig. 3. Scanning trajectories corresponding to different angular velocity differences of dual wedge scanning mirrors: (a) 0.25 (°)/s; (b) 0.2 (°)/s; (c) 0.15 (°)/s; (d) 0.1 (°)/s.

种反解迭代的优化算法, 对扫描镜的轨迹进行优化, 控制镜片的转动速度, 使其扫描轨迹更加合理、高效.

### 3 实验

#### 3.1 扫描路径的优化

光斑的轨迹半径满足公式:

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2} = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB\cos(\theta_1 - \theta_2)},$$

当楔形镜转动时, 光斑距离  $z$  轴的距离  $R$  由  $\theta_1$  和  $\theta_2$  决定. 已知扫描半径的与两个楔形镜的绕  $z$  轴的转动角度  $\theta_1$  和  $\theta_2$  差值有关, 并且当两个楔形镜的转速为一定比例时, 半径  $R$  的变化呈现出周期性, 这里设两个楔形镜转动角度差值  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ . 扫描半径  $R$  与  $\Delta\theta$  关系如图 2(b) 所示. 针对这种扫描方式的不足之处, 为了避免重根多解的

情况,使用牛顿迭代法反解出半径  $R$  所对应的楔形镜转角差值  $\Delta\theta$ ,并给出楔形镜 1 和楔形镜 2 所需要满足的转速条件,优化光斑的扫描轨迹.具体的光斑轨迹优化步骤如图 4 所示.

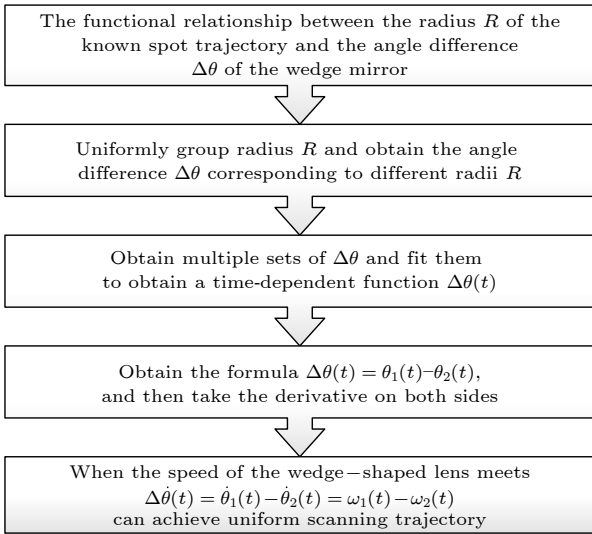


图 4 光斑轨迹优化流程图  
Fig. 4. Flow chart of spot trajectory optimization.

已知扫描半径  $R$  与楔形镜转角差  $\Delta\theta$  满足:  $R(\Delta\theta) = \sqrt{A^2 + B^2 + 2AB\cos(\Delta\theta)}$ , 为了避免三角函数多解的情况,使用迭代反解法.首先,将所需的光斑扫描轨迹半径  $R$  均匀分成多个等差的半径.然后,通过牛顿迭代法计算每个半径  $R$  下所需的角速度差  $\Delta\theta$ .可以将得到的角速度差  $\Delta\theta$  构成一个数组,并进行拟合,得到关于时间的函数  $\Delta\theta(t)$ .接下来,求函数  $\Delta\theta(t)$  的导数,即角速度.通过控制楔形镜 1 和楔形镜 2 的转速,使得它们的角速度满足  $\Delta\dot{\theta}(t) = \dot{\theta}_1(t) - \dot{\theta}_2(t) = \omega_1(t) - \omega_2(t)$ .通过控制楔形镜 1 和楔形镜 2 的转速满足上述条件,就可以实现光斑轨迹的均匀变化.如图 5 所示,光斑轨迹的

疏密程度可以根据实际使用情况进行调整.通过控制两个楔形镜的转速,并结合光斑的大小,可以使光斑的扫描轨迹尽可能地均匀、高效地覆盖待测区域,从而有效避免甲烷检测设备漏检的情况,进而提高目标检测区域的效率.

### 3.2 成像系统装置

如图 6 所示,甲烷气体成像系统主要有甲烷遥测模块、双楔形扫描镜(楔角  $\beta = 3.88333^\circ$ , 镜片的直径为 12.7 mm, 镜片材料为 K9, 折射率  $n \approx 1.517$ ) 及控制模块和算法成像模块.系统中涉及的硬件包括激光器、光电探测器、合束器、激光准直器、自制的集成驱动板、收光透镜和双楔形扫描镜及其驱动器.在甲烷气体成像系统中,首先是驱动电路板对激光器的温度进行精确控制、对输入电流进行精确调谐,这使得激光器能够发射出覆盖甲烷气体分子的在 1653.72 nm 附近吸收谱线的激光束,调试时通过合束器将激光束和指示光(用于扫描区域中心位置的标定)进行合束,再经过准直器,并由双楔形扫描镜控制其光束的指向,扫描镜不仅调整光束的偏转方向,也实时反馈扫描镜的角度信息.激光束穿过待测区域,并在背景面上发生漫反射.随后,通过收光镜头将漫反射的光信号聚焦于近红外光电探测器,探测器将检测到的光电流信号转换为电压信号,再传送至驱动板进行处理并求出该光束路径上的甲烷浓度信息.然后双楔形扫描镜会控制光束继续偏转,使得光束移到下一个扫描位置,重复上述测量过程.当双楔形扫描镜控制的光束完成一个完整的测量周期后,就能获得光束偏转的数据以及对应的气体浓度数据.利用自然邻域插值、滑动窗均值和浓度值标定等处理方式,最终绘制成甲烷气体成像图.

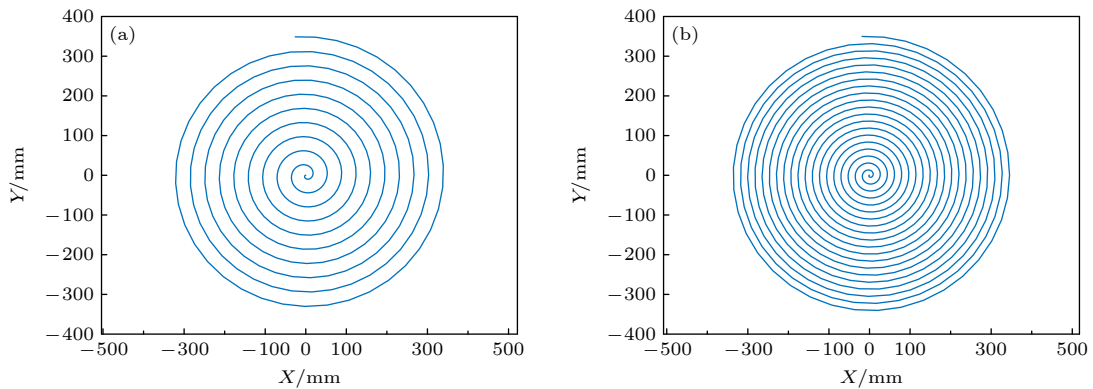


图 5 不同角速度差值优化后的光斑扫描轨迹 (a) 0.5 (°)/s; (b) 0.25 (°)/s  
Fig. 5. Optimized spot scanning trajectory with different angular velocity: (a) 0.5 (°)/s; (b) 0.25 (°)/s.

### 4 测试结果与分析

为了验证该成像系统成像方法的可行性,开展了实验室测试实验,在实验中光束的扫描范围为一个直径 70 cm 的圆形区域,如图 7(a) 所示. 扫描镜采用步进的形式,把连续转动的角速度改为对应的

步长,实现扫描轨迹的均匀化处理. 本实验中单个位置的浓度采样周期设置为 250 ms, 总共扫描检测了 540 个位置点的浓度数据. 系统扫描区域的确定仅需要找到参考点即可, 指示光是为了确定扫描区域的中心位置 (图 7(a) 中红点位置). 图 7(b) 为根据接收到的浓度信息和位置信息, 直接生成散点图; 通过自然邻域插值算法对散点图进行处理, 生

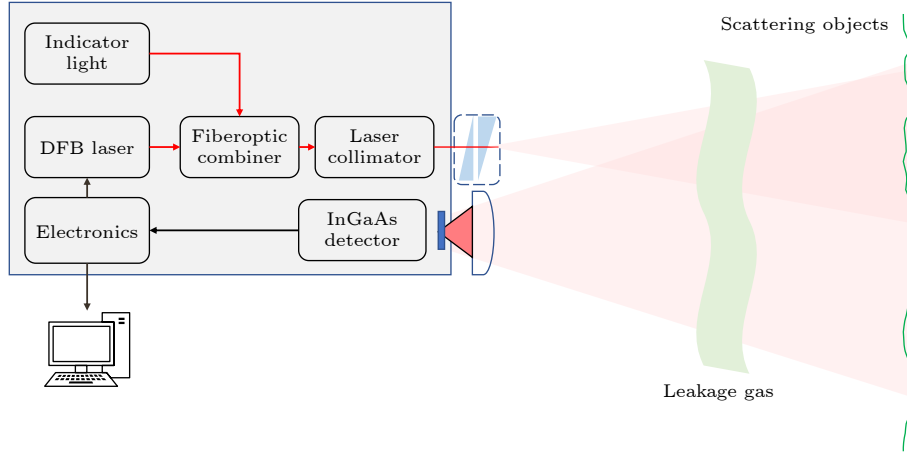


图 6 基于双楔形扫描镜的甲烷气体成像系统原理图

Fig. 6. Schematic diagram of methane gas imaging system based on dual wedge scanning mirrors.

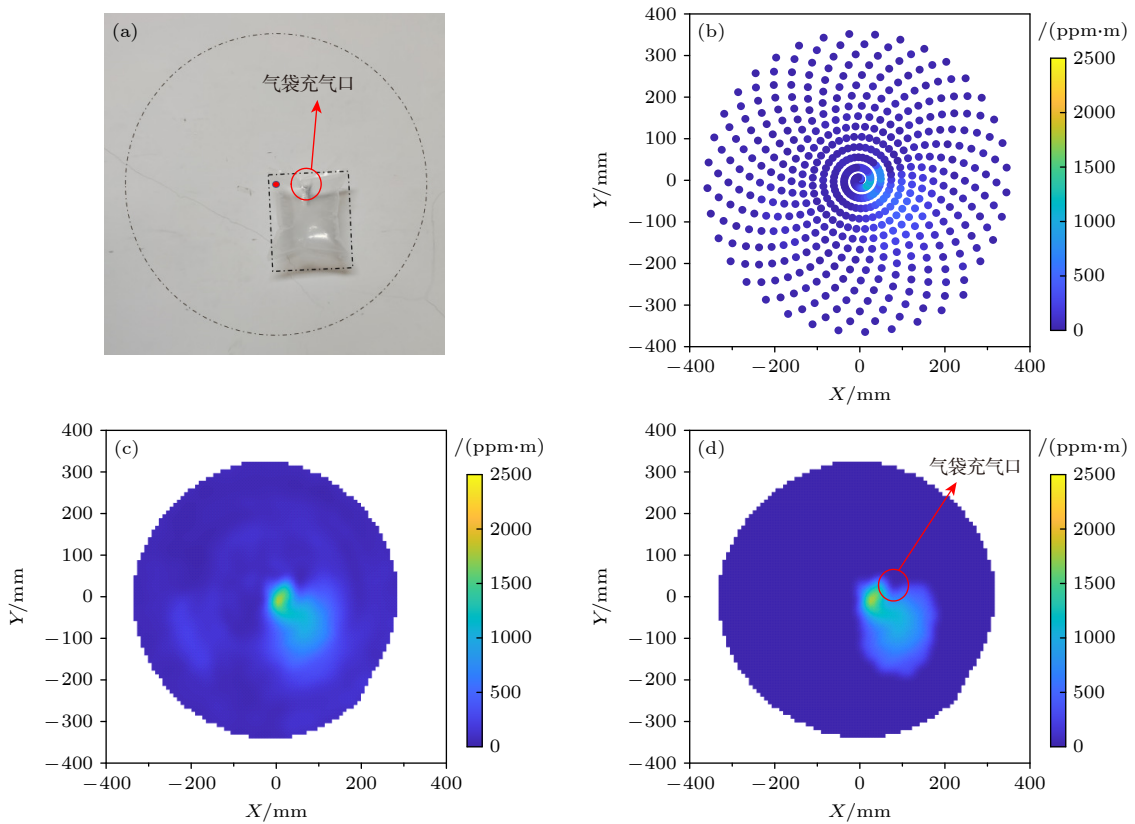


图 7 甲烷气体成像过程 (a) 实际扫描区域; (b) 散点图成像; (c) 二维邻域插值算法成像; (d) 滤波处理成像

Fig. 7. Methane gas imaging process: (a) Actual scanning area; (b) scatter plot imaging; (c) 2D neighborhood interpolation algorithm for imaging; (d) filter processing imaging.

成图 7(c) 所示的强度图; 对强度图进一步滤波、平滑等处理, 获得更清晰、准确的甲烷气体成像图. 如图 7(d) 所示, 图中甲烷气袋中存在较为稀薄的小区域, 根据成像图中的信息可判断为气袋充气口处, 体现了该成像是具备较好的空间分辨率.

图 7(b) 是由原始的光斑位置信息和浓度数据生成的散点图, 后续需要进行插值、平滑、滤波等操作. 在进行气体成像浓度标定之前会简单对数据进行处理, 过滤掉一些异常值 (即与周围浓度值相差较大的数据), 并通过插值、平滑算法填补这些异常值. 图 7(a) 中气袋内的甲烷浓度为 5%, 而气袋中心较厚区域的厚度约为 5 cm. 根据理论计算, 气袋较厚区域的甲烷路径浓度的最大值约为  $5 \times 10^4 \text{ ppm} \times 0.05 \text{ m}$ , 即  $2500 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ . 因此在成像过程中, 将  $2500 \text{ ppm} \cdot \text{m}$  作为甲烷浓度标定的最大值. 如图 7(c) 所示, 想要生成最终的甲烷气体成像情况, 需要设置滤波阈值, 将低于浓度阈值的数据滤除才可得到图 7(d) 最终的成像结果. 实验中, 甲烷气袋边缘处约为 0.5 cm 的厚度, 其理论检测值为

$50000 \text{ ppm} \times 0.005 \text{ m}$ , 即  $250 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ .

但是光束并不是理想的单根线, 所以气袋边缘处光束穿过气袋的厚度需要再分析. 如图 8 所示, 红色箭头表示激光束, 光束理论穿过气袋边缘的厚度约为 0.5 cm, 但整个光束实际的厚度范围并不是固定的, 光束穿过气袋边缘的厚度范围为 0—1 cm, 对应的甲烷气体的路径浓度范围是  $5 \times 10^4 \text{ ppm} \times (0-0.01) \text{ m} = (0-500) \text{ ppm} \cdot \text{m}$ . 所以在该甲烷气袋成像中, 最低检测下限设定为小于  $500 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ , 并且把图 7(c) 强度图的滤波阈值设置为  $500 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ .

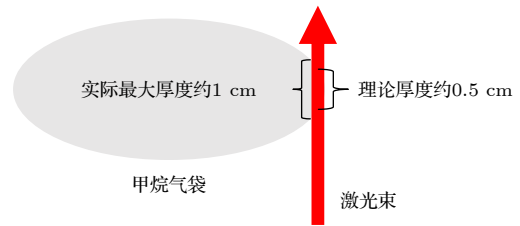


图 8 实际光束穿过气袋边缘位置的图解

Fig. 8. Diagram of actual beam passing through the edge of the airbag.

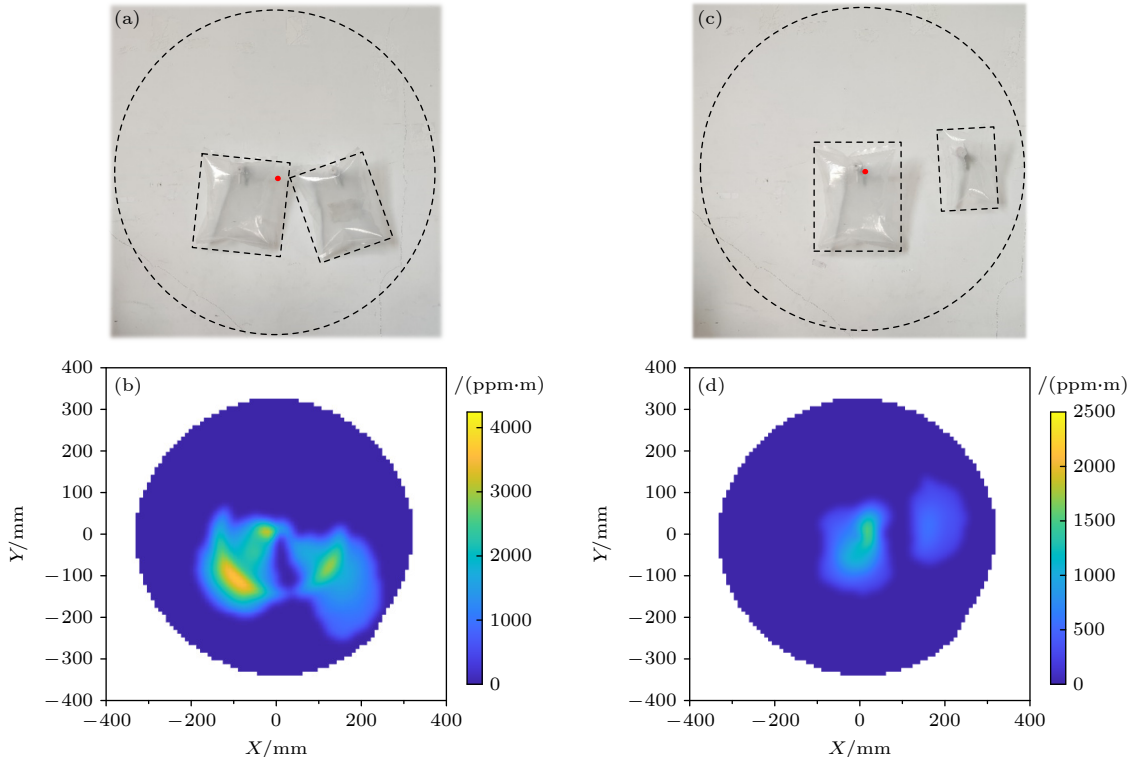


图 9 甲烷气袋的成像对比实验 (a) 相同气袋充不同浓度的甲烷气体; (b) 相同气袋充不同浓度的甲烷气体成像图; (c) 不同气袋充相同浓度的甲烷气体; (d) 不同气袋充相同浓度的甲烷气体成像图

Fig. 9. Imaging comparative experiment of methane gas bags: (a) Filling the same gas bag with different concentrations of methane gas; (b) imaging images of methane gas with the same gas bag filled with different concentrations; (c) filling different gas bags with methane gas of the same concentration; (d) imaging images of methane gas with different gas bags filled with the same concentration.

经过后续的成像验证后也能够较好地还原出如图 7(d) 所示的甲烷气体成像结果. 通过对比图 7(a) 和图 7(d), 不仅能够清晰地呈现出甲烷气袋的成像轮廓, 还可以精确还原出气袋充气口部分较低浓度的情况 (气袋充气口位置的气体含量较少, 对应的浓度检测值也会较低), 体现了该成像系统较好的分辨率.

为了进一步验证该成像系统的成像方法的可靠性, 进行了双气袋的对比实验. 实验中, 甲烷浓度的标定以及气袋边缘的滤波方式与前文描述的方法相同. 如图 9(a) 所示, 两个气袋的尺寸皆为  $20\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ , 最大容积为  $0.5\text{ L}$ , 左边气袋的甲烷浓度为  $8.5\%$ , 右边气袋的甲烷浓度为  $5\%$ , 通过本文介绍的双楔形扫描镜甲烷成像方法对其扫描成像, 其成像结果如图 9(b) 所示, 最终结果图的确能够较为明显观察出不同浓度气袋的成像区别: 左边浓度较大的气袋的颜色映射值比右边的气袋颜色映射更深, 可判断左边气袋中甲烷气体对应的路径浓度值更大. 如图 9(c) 所示, 把相同浓度的甲烷气体充到不同尺寸的气袋中, 其中大气袋的尺寸为  $20\text{ cm}\times 15\text{ cm}$ , 最大容积为  $0.5\text{ L}$ , 小气袋的尺寸为  $15\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ , 最大容积为  $0.25\text{ L}$ , 两个尺寸的气袋中充的甲烷浓度都为  $5\%$ . 成像结果如图 9(d) 所示, 图中大气袋所在位置的颜色映射更深, 因为大气袋相比小气袋更厚, 相同浓度下的路径浓度值也更大. 上述双气袋对比实验也验证了该甲烷成像方法的可靠性, 通过成像结果可以看出该甲烷成像系统: 1) 能够较为准确地判断甲烷气体的位置; 2) 能够较为准确地实现甲烷浓度的定量测量.

## 5 结 论

为了满足天然气泄漏的实时监测和快速定位需求, 本文提出了一种甲烷气体成像方法, 该方法将双楔形扫描镜的扫描方式和 TDLAS 技术相结合. 通过双楔形扫描镜控制系统, 可以控制激光束的偏转, 将常见的甲烷气体“点”测量的方式转换成“面”测量的方式, 并使用迭代反解算法优化光束的扫描轨迹, 从而提高扫描效率. 将收集的气体浓度信息与对应的光束偏转角度信息相匹配, 实现甲烷气体的散点图成像. 通过插值、滤波和滑动窗等算法, 我们对甲烷气体成像结果进行优化处理, 实现

了更易于观察的甲烷气体二维成像. 这种方法可以提供更直观的判断, 使观测人员能更快速方便地确定甲烷气体的泄漏量和泄漏位置. 通过气袋成像实验, 验证了该成像系统的路径浓度检测下限可小于  $500\text{ ppm}\cdot\text{m}$ , 位置分辨率小于  $6\text{ cm}$ . 并通过后续的双气袋对比实验, 针对不同路径浓度的气袋进行对比成像, 验证了该甲烷成像方法的可靠性. 这种成像方法为油气站场泄漏监测提供了一种有效的解决方案, 能够及时发现泄漏位置, 并为后续的泄漏量评估提供量化依据, 为后期油气站场碳排放的量化处理提供了新的参考思路.

## 参考文献

- [1] Wang X Q, Wang B Q, Wang B, Lin Y H, Guo C X 2018 *Petroleum Planning Eng.* **29** 1 (in Chinese) [王小强, 王保群, 王博, 林燕红, 郭彩霞 2018 石油规划设计 **29** 1]
- [2] Zhang Z R, Sun P S, Pang T, Li Z, Xia H, Cui X J, Wu B, Xu Q M, Dong F Z 2018 *Opt. Precis. Eng.* **26** 1925 (in Chinese) [张志荣, 孙鹏帅, 庞涛, 李哲, 夏滑, 崔小娟, 吴边, 徐启铭, 董凤忠 2018 光学精密工程 **26** 1925]
- [3] Dong G H, Zhao L B, Cao Y L, Liang Y, Ge L Z, Ma T L, Meng S J 2023 *Contr. Instrum. Chem. Indust.* **3** 283 (in Chinese) [董高华, 赵廉斌, 曹永乐, 梁恽, 葛凌志, 马铁量, 孟书进 2023 化工自动化仪表 **3** 283]
- [4] Qi L R, Xing L L, Liu Y, Wang Y J 2022 *Urban Gas* **4** 9 (in Chinese) [祁丽荣, 邢琳琳, 刘瑶, 王一君 2022 城市燃气 **4** 9]
- [5] Zhu Y W 2023 *Pipeline Technique and Equipment* **2** 19 (in Chinese) [朱云伟 2023 管道技术与设备 **2** 19]
- [6] Pang T, Wang L, Xia H, Zhang Z R, Tang Y Q, Dong F Z 2016 *Acta Photon. Sin.* **9** 104 (in Chinese) [庞涛, 王煜, 夏滑, 张志荣, 汤玉泉, 董凤忠 2016 光子学报 **9** 104]
- [7] Xu J, Li J, Li Y F, Cheng Y, Tan J F, Liu D, Zhou Z 2023 *Laser Optoelectron. Prog.* **6** 376 (in Chinese) [徐俊, 李云飞, 程跃, 檀剑飞, 刘东, 周振 2023 激光与光电子学进展 **6** 376]
- [8] Sun P S, Zhang Z R, Li J, Xia H, Han H, Li Z, Tan D J, Ma Y B, Dong F Z 2016 *Opt. Optoelectron. Tech.* **5** 62 (in Chinese) [孙鹏帅, 张志荣, 李俊, 夏滑, 韩萃, 李哲, 谭东杰, 马云宾, 董凤忠 2016 光学与光电技术 **5** 62]
- [9] Fox T A, Barchyn T E, Risk D, Ravikumar A P, Hugenholtz C H 2019 *Environ. Res. Lett.* **14** 053002
- [10] van Well B, Murray S, Hodgkinson J, Pride R, Strzoda R, Gibson G, Padgett M 2005 *J. Opt.* **7** s420
- [11] Wainner R T, Green B D, Allen M G, White M A, Stafford-Evans J, Naper R 2002 *Appl. Phys. B-Lasers O* **75** 249
- [12] Lagueux P, Tremblay P, Morton V, Chamberland M, Farley V, Kastek M, Firmanty K 2017 *Meas. Autom. Monit.* **63** 65
- [13] Hu Y Y, Xu L, Shen X C, Jin L, Xu H Y, Deng Y S, Liu J G, Liu W Q 2021 *Appl. Opt.* **60** 9396
- [14] Zhao Q, Nie X, Luo D, Wang J, Li Q, Chen W 2022 *Photonics* **9** 992
- [15] Gibson G M, Sun B Q, Edgar M P, Phillips D B, Hempler N, Maker G T, Malcolm G P A, Padgett M J 2017 *Opt. Express* **25** 2998
- [16] McRae T G, Kulp T J 1993 *Appl. Opt.* **32** 4037
- [17] Fan D P, Zhou Y, Lu Y F, Hei M, Xiong F C, Li K 2013 *Chin. Opt.* **2** 136 (in Chinese) [范大鹏, 周远, 鲁亚飞, 黑墨, 熊

- 飞湍, 李凯 2013 *中国光学* **2** 136]
- [18] Sun L Y 2016 *M. S. Thesis* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [孙琳洋 2016 硕士学位论文 (成都: 电子科技大学)]
- [19] Marshall G F 1999 *Conference on Optical Scanning - Design and Application* Denver, Colorado JUL 21–22, 1999 p74
- [20] Garcia-Torales G 2022 *Conference on Advances in 3OM - Opto-Mechatronics, Opto-Mechanics, and Optical Metrology Timisoara, ROMANIA Timisoara, December 13–14, 2021* p121700H
- [21] Qin C M 2021 *M. S. Thesis* (Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [秦聪明 2021 硕士学位论文 (成都: 中国科学院大学, 中国科学院光电技术研究
- 所)]
- [22] Sun J F, Liu L R, Yun M J, Wan L Y, Zhang M L 2006 *Opt. Eng.* **45** 043004
- [23] Roy G, Cao X Y, Bernier R, Roy S 2015 *Appl. Opt.* **54** 10213
- [24] Zeng H W, Li S, Zhang Z Y, Wu Y 2019 *Opt. Precis. Eng.* **27** 1444 (in Chinese) [曾昊旻, 李松, 张智宇, 伍煜 2019 光学精密工程 **27** 1444]
- [25] Sandoval J D, Delgado K, Fariña D, de la Puente F, Esper-Chaín R, Martín M 2022 *Appl. Sci. Basel* **12** 21
- [26] Titchener J, Millington-Smith D, Goldsack C, Harrison G, Dunning A, Ai X, Reed M 2022 *Appl. Energy* **306** 118086
- [27] Gibson G, van Well B, Hodgkinson J, Pride R, Strzoda R, Murray S, Bishton S, Padgett M 2006 *New J. Phys.* **8** 26

## Methane gas spectral imaging method based on dual wedge scanning mirrors\*

Wang Xia-Chun<sup>1)2)</sup> Zhang Zhi-Rong<sup>2)3)4)†</sup> Cai Yong-Jun<sup>5)</sup> Sun Peng-Shuai<sup>2)</sup>  
Pang Tao<sup>2)</sup> Xia Hua<sup>2)</sup> Wu Bian<sup>2)</sup> Guo Qiang<sup>2)</sup>

1) (*Science Island Branch, Graduate School of University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

2) (*Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science Chinese, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

3) (*Key Lab of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

4) (*Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China*)

5) (*PipeChina General Academy of Science & Technology, Langfang 065000, China*)

( Received 4 December 2023; revised manuscript received 28 December 2023 )

### Abstract

With the increase in the number of oil and gas pipelines laid in China, more attention needs to be paid to pipeline maintenance work. At present, the main methods of detecting natural gas leaks in oil and gas transmission stations include manual inspections, opposing natural gas detection equipment, and cloud desktop natural gas detection equipment. Hand held natural gas detection equipment is used for manual inspection, which requires regular manual inspection. However, the response speed is poor and gas leaks cannot be detected in a timely manner. The opposed laser gas detection method can only detect the presence of gas on the beam path. If a larger area of leakage detection is desired, more equipment needs to be installed, resulting in a greatly increase in hardware costs. The existing cloud desktop laser gas detection method controls the deflection of the laser beam through the cloud platform to achieve leak detection at various points in the area to be tested. However, the rotation speed of the cloud platform is slow, and a complete detection cycle takes dozens of minutes, and only the presence of gas can be detected. For accurate leak location, manual on-site survey is also

\* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2022YFB3207601, 2021YFB3201904), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11874364, 41877311, 42005107), the “Spark” Fund Project of Hefei Institutes of Physics Science, Chinese Academy Sciences (Grant No. YZJJ2022QN02), and the Outstanding Youth Research Project of Anhui Provincial Department of Education, China (Grant No. 2022AH020098).

† Corresponding author. E-mail: zhangzr@aiofm.ac.cn

required to further determine the leak location. In order to meet the needs of the real-time monitoring and rapid positioning of oil and gas pipeline leaks, in this work, a fast and accurately controlled dual wedge scanning mirror system is designed, which combines tunable semiconductor laser absorption spectroscopy technology to convert the gas measurement laser beam from point measurement to surface measurement, thereby obtaining the two-dimensional distribution of gas, which is conducive to subsequent analysis and positioning of gas leakage sources. By using the inverse solution iterative optimization algorithm, the angle of the wedge mirror is controlled to obtain an efficient and uniform beam scanning trajectory. The deflection direction and detection position of the laser beam are fused with the corresponding methane concentration information, and a methane concentration data containing position information is constructed. In order to quantitatively verify the measurement accuracy and spatial resolution in the experiment, a standard air bag is used to simulate the methane leakage distribution. The results show that the minimum detection limit of the system can be lower than  $5 \times 10^{-4}$  m, and the spatial resolution can be less than 6 cm. At the same time, this method can adjust the scanning step node based on the measurement distance of the oil from gas station, thereby achieving adjustable imaging resolution. This imaging method provides a new idea for accurately positioning and detecting the methane leakage location and amount.

**Keywords:** tunable diode laser absorption spectroscopy, methane gas detection, double wedge scanning mirror, gas imaging

**PACS:** 42.62.Fi, 88.20.fq, 42.79.Bh, 07.07.Df

**DOI:** [10.7498/aps.73.20231906](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231906)

## 基于双楔形扫描镜的甲烷气体光谱成像方法

王夏春 张志荣 蔡永军 孙鹏帅 庞涛 夏滑 吴边 郭强

## Methane gas spectral imaging method based on dual wedge scanning mirrors

Wang Xia-Chun Zhang Zhi-Rong Cai Yong-Jun Sun Peng-Shuai Pang Tao Xia Hua Wu Bian  
Guo Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 114202 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231906

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231906>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于激光吸收光谱技术的在线层析成像算法

Online tomography algorithm based on laser absorption spectroscopy

物理学报. 2023, 72(5): 054206 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221935>

#### 基于改进波长调制光谱技术的高吸收度甲烷气体测量

Measurement of methane gas with high absorbance based on modified wavelength modulation spectroscopy

物理学报. 2023, 72(1): 010701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221725>

#### 基于Tikhonov正则化参数矩阵的激光吸收光谱燃烧场二维重建光路设计方法

Development of beam arrangement design for tunable diode laser absorption tomography reconstruction based on Tikhonov regularization parameter matrix

物理学报. 2020, 69(22): 227801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201144>

#### 基于分数阶Tikhonov正则化的激光吸收光谱燃烧场二维重建光路优化研究

Optimization of beam arrangement for tunable diode laser absorption tomography reconstruction based on fractional Tikhonov regularization

物理学报. 2023, 72(3): 037801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221731>

#### 傅里叶红外光谱气体检测限的定性分析

Qualitative analysis of gas detection limit of Fourier infrared spectroscopy

物理学报. 2022, 71(9): 093201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212366>

#### 基于连续量子级联激光器的1103.4 cm<sup>-1</sup>处NH<sub>3</sub>混叠吸收光谱特性研究

NH<sub>3</sub> aliasing absorption spectra at 1103.4 cm<sup>-1</sup> based on continuous quantum cascade laser

物理学报. 2020, 69(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191832>