

文章编号:1001-5078(2024)09-01387-05

· 激光应用技术 ·

# 基于 TDLAS 的天然气管道泄漏范围重构方法

曹理想<sup>1,2</sup>, 文耀华<sup>1</sup>, 张伯君<sup>1</sup>, 周泽华<sup>2</sup>, 业成<sup>1</sup>

(1. 南京市锅炉压力容器检验研究院, 江苏 南京 210000; 2. 河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210000)

**摘要:**可调谐半导体激光光谱(TDLAS)技术因其出色的灵敏度、精度和抗干扰性的特性, 现已被广泛应用于场站天然气泄漏的监测工作。为克服单台 TDLAS 激光遥测仪无法获得泄漏气体扩散影响范围的局限性, 本文提出了一种基于多台 TDLAS 遥测仪协同的智能监测方法, 通过在不同斜平面内对泄漏气团进行扫描, 依据 Brianchon 定理获得不同斜平面内气体泄漏的外轮廓方程, 重构天然气的三维空间泄漏影响区域, 实时开展监测与预警。

**关键词:**天然气; TDLAS; 泄漏监测; Brianchon 定理

中图分类号: TN249; TP274 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.09.008

## Leakage area reconstruction of natural gas using TDLAS technology

CAO Li-xiang<sup>1,2</sup>, WEN Yao-hua<sup>1</sup>, ZHANG Bo-jun<sup>1</sup>, ZHOU Ze-hua<sup>2</sup>, YE Cheng<sup>1</sup>

(1. Nanjing Boiler and Pressure Vessel Inspection Institute, Nanjing 210000, China;

2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Tunable Diode Laser Spectroscopy (TDLAS) technology is now widely used for natural gas leakage monitoring at field stations due to its excellent sensitivity, accuracy and anti-interference properties. In order to overcome the limitation that a single TDLAS laser telemetry instrument cannot obtain the influence range of leakage gas diffusion, an intelligent monitoring method based on the collaboration of multiple TDLAS telemetry instruments is proposed in this paper. By scanning the leaked gas masses in different oblique planes, the outer contour equations of gas leakage in different oblique planes according to the Brianchon's theorem are obtained. The three-dimensional spatial leakage impact area of natural gas is reconstructed to carry out monitoring and early warning in real time.

**Keywords:** natural gas; TDLAS; leakage monitoring; Brianchon's theorem

### 1 引言

天然气是一种重要的化工原料和清洁能源, 具有热值高、污染小、价格低等优势, 广泛应用在燃气电厂、城市供热、化工工业生产等领域。天然气的主要成分是甲烷( $\text{CH}_4$ ), 其具有易燃易爆的特性, 一旦

发生爆炸事故, 往往造成重大的人员伤亡与巨大的财产损失。

天然气的泄漏监测一直是学术和工程界的研究热点。现阶段针对场区内的天然气泄漏检测仍然以人工巡检或定点安装传感器的方式

基金项目: 国家市场监督管理总局科技项目(No. 2022MK157); 江苏省重点研发计划项目(No. BE2023664)资助。

作者简介: 曹理想(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为化工设备健康监测技术。E-mail: 2629003261@qq.com

通讯作者: 张伯君(1983-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为特种设备安全。E-mail: zhangbojun1983@163.com

收稿日期: 2023-12-26

为主,主要采用催化燃烧与红外吸收技术,检测范围小、精度低、误报率高<sup>[1-2]</sup>,难以满足区域性的高精度智能监测需求。随着科技的发展,新兴的天然气泄漏监测技术如激光吸收光谱技术、声纹技术、红外光学气体成像技术、光纤传感技术等已经日益成熟,可根据实际应用场景有针对性的选取。除激光吸收光谱技术以外,声纹技术通过捕获泄漏位置产生的超声信号,能实现泄漏的报警与泄漏源的定位<sup>[3]</sup>,然而该技术易受环境噪音影响出现误报警,对于微量泄漏出现的微小声纹无法准确探测识别;红外光学气体成像技术能探测到,获得扩散气体的大致形貌,但无法知晓泄漏区域离传感器的实际距离,且设备价格十分昂贵<sup>[4]</sup>。分布式光纤通常需要在设备安装时敷设,使用后改装成本较高且光纤易断,难以保证长时间监测。

近年来,基于可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)原理的气体检测技术在国内外得到迅速发展<sup>[5-6]</sup>,该技术具有灵敏度高、抗干扰性强、响应时间短、精度高、可遥测的优点<sup>[7-9]</sup>,已被广泛应用于痕量气体监测中<sup>[10-12]</sup>。本文基于 TDLAS 原理,针对无风与微风环境,构建一种场区内天然气泄漏的智能监测与预警方法,通过云台搭载多台高精度激光甲烷遥测仪,协同扫描直至重构出场区的天然气泄漏空间影响范围,显著提升场区内危险气体泄漏的智能安全监管水平。

## 2 TDLAS 气体检测原理

TDLAS 技术基于分子吸收光谱的特性,通过调谐二极管激光器的波长,选择与待测气体分子吸收谱线相匹配的波长,使激光器的光能被气体分子吸收。通过测量激光器入射和透射光的强度差异,可以获得气体分子的浓度信息。作为光谱检测技术,遵循 Beer-Lambert 定律<sup>[13]</sup>,原理如图 1、2 所示。

根据 Beer-Lambert 定律可以得到下式

$$LC = -\frac{1}{\varepsilon} \lg \frac{I_t}{I_0} \quad (1)$$

其中, $I_0$  和  $I_t$  分别为激光入射光强与透射光强; $\varepsilon$  为甲烷气体对激光的摩尔吸光系数; $L$  为吸收路径长度; $C$  为待测气体浓度。由于光通过甲烷的吸收路径

长度  $L$  无法准确测量,通常将  $LC$  的乘积作为一个整体,表示甲烷气体柱浓度。



图 1 Beer-Lambert 定律示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Beer-Lambert law

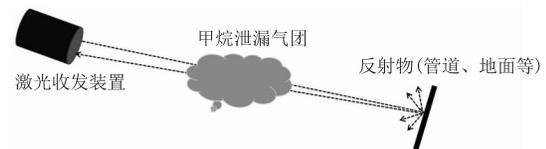


图 2 TDLAS 气体检测原理图

Fig. 2 Schematic diagram of TDLAS gas detection

## 3 监测方案

单台 TDLAS 遥测仪只能确定监测区域是否发生泄漏,无法获得泄漏气团与传感器的距离,也无法预测泄漏气团的大小和范围。针对以上情况,本文提出了一种基于多台 TDLAS 遥测仪协同扫描的方法,实现了无风及微风环境中天然气泄漏影响范围的智能重构与监测,此时泄漏气团在水平切面内近似圆形或椭圆形,斜切平面内近似椭圆形。

本方案由三台激光甲烷遥测仪以及云台附件组成。如图 3 所示,激光甲烷遥测仪 A 由云台搭载位于监测场区边缘中点高处,在同一高度另有两台遥测仪 B、C 由云台搭载位于 A 两侧相距  $l$  处。以 A 为原点,竖直向下为  $Z$  轴正方向,建立 A-XYZ 的空间直角坐标系。三台遥测仪从  $X$  轴正方向开始,沿顺时针方向  $180^\circ$  进行整个监测区域的俯视扫描,记

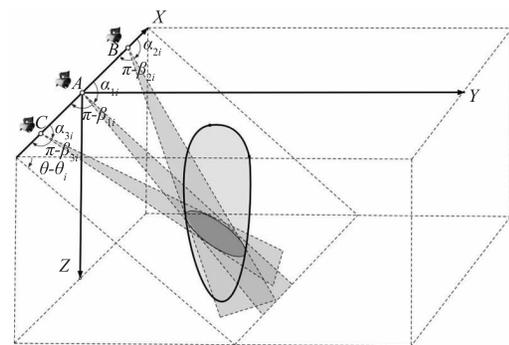


图 3 监测方法及所建空间坐标系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the monitoring method and the spatial coordinate system built

它们俯视扫查的斜切平面与水平面的夹角为  $\theta(0^\circ < \theta < 90^\circ)$ , 若第  $i$  次扫查时发现泄漏, 分别记录 A、B、C 三台遥测仪示数首次超过阈值时云台的转动角度  $\alpha_{1i}、\alpha_{2i}、\alpha_{3i}$  和首次低于阈值时的转动角度  $\beta_{1i}、\beta_{2i}、\beta_{3i}$ 。阈值可通过场区内甲烷遥测仪测得的最小可接受数值给出。

$\theta = \theta_i$  斜平面内的泄漏范围椭圆的几何关系如图 4 所示。以 A 为原点(0,0), 原  $X$  轴为  $x_i$  轴正向, 建立  $x_i$ -A- $y_i$  局部平面直角坐标系, 根据点 A(0,0)、点 B( $l,0$ )和点 C( $-l,0$ )坐标, 以及转动角度分别做出泄漏范围椭圆的 5 条外切直线  $AQ_{1i}、BQ_{2i}、AQ_{3i}、CQ_{4i}、BQ_{5i}$ , 它们的方程如下:

$$l_{AQ_{1i}}: y = k_{1i}x \tag{2}$$

$$l_{AQ_{3i}}: y = k_{2i}x \tag{3}$$

$$l_{BQ_{2i}}: y = k_{3i}x - k_{3i}l \tag{4}$$

$$l_{BQ_{5i}}: y = k_{4i}x - k_{4i}l \tag{5}$$

$$l_{CQ_{4i}}: y = k_{5i}x + k_{5i}l \tag{6}$$

其中:

$$k_{1i} = k_{AQ_{1i}} = \tan\alpha_{1i}, k_{2i} = k_{AQ_{3i}} = \tan\beta_{1i},$$

$$k_{3i} = k_{BQ_{2i}} = \tan\beta_{2i}, k_{4i} = k_{BQ_{5i}} = \tan\alpha_{2i},$$

$$k_{5i} = k_{CQ_{4i}} = \tan\beta_{3i}$$

进而求出这 5 条外切线的交点坐标, 即椭圆外切五边形的顶点坐标。

$$D_i: \begin{cases} l_{AQ_{1i}}: y = k_{1i}x \\ l_{BQ_{2i}}: y = k_{3i}x - k_{3i}l \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{k_{3i}l}{k_{3i} - k_{1i}} \\ y = \frac{k_{1i}k_{3i}l}{k_{3i} - k_{1i}} \end{cases} \tag{7}$$

$$E_i: \begin{cases} l_{AQ_{3i}}: y = k_{2i}x \\ l_{BQ_{2i}}: y = k_{3i}x - k_{3i}l \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{k_{3i}l}{k_{3i} - k_{2i}} \\ y = \frac{k_{2i}k_{3i}l}{k_{3i} - k_{2i}} \end{cases} \tag{8}$$

$$F_i: \begin{cases} l_{AQ_{3i}}: y = k_{2i}x \\ l_{CQ_{4i}}: y = k_{5i}x + k_{5i}l \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{k_{5i}l}{k_{2i} - k_{5i}} \\ y = \frac{k_{2i}k_{5i}l}{k_{2i} - k_{5i}} \end{cases} \tag{9}$$

$$G_i: \begin{cases} l_{CQ_{4i}}: y = k_{5i}x + k_{5i}l \\ l_{BQ_{5i}}: y = k_{4i}x - k_{4i}l \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{k_{5i} + k_{4i}l}{k_{4i} - k_{5i}} \\ y = \frac{2k_{4i}k_{5i}l}{k_{4i} - k_{5i}} \end{cases} \tag{10}$$

$$H_i: \begin{cases} l_{AQ_{1i}}: y = k_{1i}x \\ l_{BQ_{5i}}: y = k_{4i}x - k_{4i}l \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{k_{4i}l}{k_{4i} - k_{1i}} \\ y = \frac{k_{1i}k_{4i}l}{k_{4i} - k_{1i}} \end{cases} \tag{11}$$

上式(7)~(11)中  $D_i$ :  $AQ_{1i}$  与  $BQ_{2i}$  的交点;  $E_i$ :  $AQ_{3i}$  与  $BQ_{2i}$  的交点;  $F_i$ :  $AQ_{3i}$  与  $CQ_{4i}$  的交点;  $G_i$ :  $BQ_{5i}$  与  $CQ_{4i}$  的交点;  $H_i$ :  $AQ_{1i}$  与  $BQ_{5i}$  的交点。

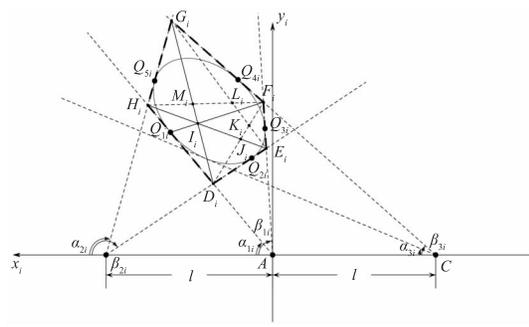


图 4  $\theta = \theta_i$  斜平面内局部坐标系示意图

Fig. 4. Schematic diagram of the local coordinate system in the  $\theta = \theta_i$  inclined plane

根据这 5 个顶点坐标可以确定椭圆各条对角线的方程和它们的交点坐标。寻找椭圆第一个切点。记对角线  $D_iG_i$  和  $E_iH_i$  的交点为  $I_i$  点,  $I_i$  点坐标如下:

$$\begin{cases} x = \left[ \frac{k_{3i}(k_{2i} - k_{7i})}{(k_{3i} - k_{2i})(k_{6i} - k_{7i})} - \frac{k_{3i}(k_{1i} - k_{6i})}{(k_{3i} - k_{1i})(k_{6i} - k_{7i})} \right] l \\ y = \left[ \frac{k_{3i}k_{6i}(k_{2i} - k_{7i})}{(k_{3i} - k_{2i})(k_{6i} - k_{7i})} - \frac{k_{3i}k_{7i}(k_{1i} - k_{6i})}{(k_{3i} - k_{1i})(k_{6i} - k_{7i})} \right] l \end{cases} \tag{12}$$

式中,  $k_{6i}$  为对角线  $D_iG_i$  的斜率,  $k_{7i}$  为对角线  $E_iH_i$  的斜率。

根据式(9)与式(12)确定直线  $F_iI_i$  的方程:

$$l_{F_iI_i}: y = k_{8i}x + \frac{k_{5i}(k_{2i} - k_{8i})}{k_{2i} - k_{5i}}l \tag{13}$$

其中,  $k_{8i}$  表示直线  $F_iI_i$  的斜率。

联立式(2)与式(13)确定直线  $F_iI_i$  与直线  $AQ_{1i}$  的交点坐标  $Q_{1i}$  为:

$$\begin{cases} l_{F_iI_i}: y = k_{8i}x + \frac{k_{5i}(k_{2i} - k_{8i})}{k_{2i} - k_{5i}}l \\ l_{AQ_{1i}}: y = k_{1i}x \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} x_{Q_{1i}} = \frac{k_{5i}(k_{2i} - k_{8i})}{(k_{2i} - k_{5i})(k_{1i} - k_{8i})}l \\ y_{Q_{1i}} = \frac{k_{1i}k_{5i}(k_{2i} - k_{8i})}{(k_{2i} - k_{5i})(k_{1i} - k_{8i})}l \end{cases} \quad (14)$$

根据 Brianchon 定理<sup>[14]</sup>, 交点  $Q_{1i}$  即为直线  $AQ_{1i}$  与椭圆的切点。使用以上方法可以依次求出其余 4 个切点的坐标, 根据这 5 个切点坐标可以确定唯一椭圆方程。

$$O_i x^2 + P_i xy + R_i y^2 + S_i x + T_i y + 1 = 0 \quad (15)$$

式中,  $O_i, P_i, R_i, S_i, T_i$  为系数。

增大原点处甲烷遥测仪扫描平面与水平面的夹角, 再次执行上述过程, 直至斜切面内原点处甲烷遥测仪示数始终低于阈值, 最终可获得该处甲烷泄漏气团的空间影响范围。

#### 4 结论

本文建立了一种基于 TDLAS 技术的场区天然气泄漏影响范围重构与监测预警方法, 适用于无风及微风环境, 泄漏气团在水平切面内近似圆形或椭圆形, 斜切平面内近似椭圆形的情况。通过云台控制高处架设的激光甲烷遥测仪在不同斜切平面内实时协同扫描, 发现泄漏后读取云台的转动角度, 依据 Brianchon 定理获得泄漏气团在不同斜平面内的外轮廓方程, 通过多个斜平面内数据叠加, 最终重构出甲烷泄漏的空间影响范围。本方法突破了单台 TDLAS 设备无法获得泄漏区域远近和影响范围大小的局限性, 使用成本低、适用性广、智能化程度高, 可望为甲烷泄漏后的安全预警和事故应急处置提供了强有力的技术支撑, 具有重要的工程运用价值。

#### 参考文献:

- [1] Qian Jiren, Zhang Fucheng, Ding Yan-jun, et al. Research on space dynamic distribution monitoring technology and application of natural gas leak based on TDLAS[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(3): 360–367. (in Chinese)  
钱济人, 张富诚, 丁艳军, 等. 基于 TDLAS 的天然气泄漏空间动态分布监测技术及应用研究[J]. *激光与红外*, 2022, 52(3): 360–367.
- [2] Shi Guoming. Gas leakage diffusion research and safety evaluation based on laser detection[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)  
时国明. 基于激光检测的气体泄漏扩散研究与安全评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [3] Sun Xu. Ultrasonic gas leak detector applied in natural gas distribution station [J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2018, 44(11): 188. (in Chinese)  
孙旭. 超声波气体泄漏检测仪在天然气分输站场的应用[J]. *化工设计通讯*, 2018, 44(11): 188.
- [4] Zhang Xu, Jin Weiqi, Li Li, et al. Research progress on passive infrared imaging detection technology and system performance evaluation of natural gas leakage[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S2): 53–65. (in Chinese)  
张旭, 金伟其, 李力, 等. 天然气泄漏被动式红外成像检测技术及系统性能评价研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(S2): 53–65.
- [5] Sun Pengshuai, Zhang Zhirong, Li Jun, et al. Research on methane gas detection technology for open natural gas leakage[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2016, 14(5): 62–67. (in Chinese)  
孙鹏帅, 张志荣, 李俊, 等. 开放式天然气泄漏甲烷气体检测技术研究[J]. *光学与光电技术*, 2016, 14(5): 62–67.
- [6] GDurry, J Li, I Vinogradov, et al. Near infrared diode laser spectroscopy of  $C_2H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$  and their isotopologues and the application to TDLAS, a tunable diode laser spectrometer for the martian PHOBOS-GRUNT space mission [J]. *Applied Physics B*, 2010, 899(1/2): 339–351.
- [7] Zhou Peili, Tan Wen, Peng Zhimin. On-line measurement of CO concentration in flue gas based on TDLAS in mixed sampling mode[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(11): 233–240. (in Chinese)  
周佩丽, 谭文, 彭志敏. 基于 TDLAS 的烟气中 CO 浓度混合取样式在线监测[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(11): 233–240.
- [8] Wang Yajing. Research on measurement of gas concentration distribution based on the tunable diode laser absorption spectroscopy technology[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)  
王亚京. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的气体浓度场检测技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [9] Xin F, Li J, Guo J, et al. Measurement of atmospheric  $CO_2$  column concentrations based on open-path TDLAS[J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1722.

- [10] Li Binghui. Parameter optimization of  $\text{SO}_3$  gas measurement based on tunable diode laser absorption spectroscopy technology[J]. Applied Laser, 2023, 12: 133 - 138. (in Chinese)  
李秉辉. 基于可调谐二极管激光吸收光谱技术的  $\text{SO}_3$  气体测量参数优化[J]. 应用激光, 2023, 12: 133 - 138.
- [11] Li Zhengyou, Yuan Mingjun, Xu Yang, et al. Imaging detection of methane gas leakage based on TDLAS technology[J]. Laser Journal, 2024, 2: 48 - 53. (in Chinese)  
李正友, 袁明君, 徐洋, 等. 基于 TDLAS 技术的甲烷气体泄露成像检测[J]. 激光杂志, 2024, 2: 48 - 53.
- [12] Liang Chengquan, Lyu Deshen, Zhu Haoliang, et al. Detection of methane concentration based on TDLAS technology and wavelet transform denoising algorithm[J]. Infrared Technology, 2023, 45(2): 209 - 216. (in Chinese)  
梁承权, 吕德深, 朱浩亮, 等. 基于 TDLAS 技术与小波变换去噪算法的甲烷浓度检测[J]. 红外技术, 2023, 45(2): 209 - 216.
- [13] Lu Weiye, Zhu Xiaorui, Li Yuesheng, et al. Comparison of direct absorption and wavelength modulation methods for online measurement of  $\text{CO}_2$  by TDLAS[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(7): 155 - 160. (in Chinese)  
卢伟业, 朱晓睿, 李越胜, 等. TDLAS 直接吸收法和波长调制法在线测量  $\text{CO}_2$  的比较[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(7): 155 - 160.
- [14] Mei Xiangming, Liu Zengxian, Ling Xiangyan, et al. Higher geometry[M]. Beijing: Higher Education Press, 1985. (in Chinese)  
梅向明, 刘增贤, 林向岩编. 高等几何[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.