

基于 TDLAS 的天然气管道泄漏空间动态分布 监测技术及应用研究

钱济人¹, 张富诚², 丁艳军³, 李永华², 徐 阶¹, 刘 标¹, 彭志敏³

(1. 浙江浙能天然气运行有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 华北电力大学动力工程系, 河北 保定 071000;
3. 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084)

摘 要: 天然气泄漏污染空气, 易造成爆炸事故, 危害人身安全, 长期泄漏造成资源浪费, 因此天然气泄漏监测成为天然气站亟待解决的问题。相较于其他各种测量原理, 可调谐激光二极管吸收光谱(TDLAS)技术因其响应迅速、非接触式测量等优点, 广泛应用于开放环境下天然气泄漏监测。目前天然气站一般采用多点多线布置多个开放式激光气体遥测仪监测或采用多个扫描式激光气体遥测仪巡航监测的方案, 监测区域范围小、漏洞大。本文基于 TDLAS 的奇次谐波信号建立吸收率函数在线重构算法, 提出了一种天然气泄漏空间监测方法及系统, 该系统基于 GIS 平台对天然气站进行三维建模, 将监测数据融合处理, 采用空间浓度场反演算法, 在动态扫描后生成整个场站的浓度动态分布图。该系统实施后的试验结果表明, 天然气泄漏监测系统响应迅速、灵敏度高、报警联动及时, 三维场景及浓度动态分布图显示直观, 泄漏点判断准确。

关键词: 天然气泄漏; 吸收率函数重构; 空间监测; 浓度动态分布图; 泄漏点

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2022.03.009

Research on space dynamic distribution monitoring technology and application of natural gas leak based on TDLAS

QIAN Ji-ren¹, ZHANG Fu-cheng², DING Yan-jun³, LI Yong-hua², XU Jie¹, LIU Biao¹, PENG Zhi-min³

(1. Zhejiang Zheneng Natural Gas Operation Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;
3. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Natural gas leakage pollutes the air, which is easy to cause explosion accidents and endanger personal safety. The long-term leakage results in waste of resources. Therefore, natural gas leak monitoring has become an urgent problem to be solved in natural gas stations. Compared with other measurement principles, tunable laser diode absorption spectroscopy (TDLAS) technology has been widely used in natural gas leak monitoring in open environments due to its rapid response and non-contact measurements. At present, natural gas stations generally adopt a multi-point and multi-line arrangement of multiple open laser gas telemeters for monitoring or use multiple scanning laser gas telemeters for cruise monitoring. These programs have small monitoring scopes and large loopholes. Based on the odd har-

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2019YFB2006002); 华能集团总部科技项目“基础能源科技研究专项(一) (No. HNKJ20-H50)”资助。

作者简介: 钱济人, 本科, 主要从事天然气站场技术研究创新工作。E-mail: qianjir63@qq.com

通讯作者: 彭志敏, 博士, 副研究员, 主要研究方向为光谱诊断理论与技术。E-mail: apspect@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2021-05-07

monic signal of TDLAS, the online reconstruction algorithm of recover absorption shape is established, and a space monitoring method and system for natural gas leakage is proposed. The system is based on a GIS platform to perform three-dimensional modeling of natural gas stations. The monitoring data is fused and processed. The spatial concentration field inversion algorithm is used to obtain the concentration dynamic distribution map of the entire station after each dynamic scan. The test results show that the natural gas leakage monitoring has rapid response, high sensitivity and timely alarm linkage. In addition, the monitoring system also provides a clear three-dimensional scene and a concentration dynamic distribution map with the leakage points accurately observed.

Keywords: natural gas leakage; recover absorption shape; space monitoring; concentration dynamic distribution map; leakage point

1 引言

随着社会环保意识的增强,天然气作为一种绿色清洁能源,因其热值高、燃烧污染小、价格低廉等优势,广泛应用于燃气电厂、城市供热、化工工业生产等领域^[1]。天然气依靠管道输送,在输送的过程中,由于焊接、振动、气流冲刷管道弯头、压力变化及腐蚀等多种原因造成管道、法兰、阀门及螺纹处天然气泄漏。天然气的主要成分为甲烷(CH_4),占比 90% 以上,其无色无味,与空气混合形成易爆炸的混合危险气体,虽然其毒性不高,但是容易造成急性缺氧中毒,同时 CH_4 是一种温室气体,较于 CO 其温室效应更加严重^[2-3]。若天然气站发生天然气泄漏,不仅会浪费大量天然气,带来较大的经济损失,污染大气环境,还容易造成爆炸事故,危害人身安全。天然气在送达用户前需经过天然气分输站的分配,许多天然气分输站为无人场站,长期处于无人监管的状态。目前针对天然气无人站分输站天然气泄漏主要采用传统人工定期巡检方式,检测方法主要包括人耳辨音、喷洒肥皂水和手持便携式检测仪等。但传统人工定期巡检无法快速准确判断泄漏点位置信息且难度大、效率低,易造成极大的安全隐患和经济问题。

目前,天然气泄漏监测成为亟待解决的问题,因此应用于天然气站的天然气泄漏检测设备随之发展起来,主要测量原理有超声波法、红外法、电化学法和气相色谱法等。管道及阀门发生天然气泄漏时,会产生一定频率的超声波,超声波是一种弹性机械振动波,传播具有较强指向性,可聚成定向狭小的线束,其随着传播距离的增加而迅速衰减,利用超声波的该特性可实现泄露检测及泄露点大致位置推断。但是超声波法检测极限距离会受到泄漏压力、孔径和角度等因素的影响,泄漏检测距离小,很难实现天

然气站整个工艺区内的微量泄漏监测^[4-5]。红外法利用气体红外吸收光谱得到气体的浓度信息,该法受外界环境中的热源和光源影响较大,工业现场测量效果达不到预期效果。电化学法采用电化学传感器测量浓度,属于单点式测量,其电极使用寿命非常短,传感器自身存在“中毒”问题,需经常性进行标定,其自由扩散式的取样方式响应速度慢,且受风向影响比较明显。气相色谱法利用色谱柱和检测器对混合气体先分离、后检测,检测器将样品组分准变为电信号,通过电信号大小分析出待测气体浓度,但是该方法需要采样及预处理,系统复杂,容易受到其他气体干扰,不适合天然气场站开放环境测量^[6]。

近年来,随着半导体激光技术发展,基于可调谐二极管吸收光谱(TDLAS)原理的气体分析技术在国内外得到迅速发展^[7-8],相较于上述原理技术,该技术具有波长选择性强、响应速度快、测量精度高、灵敏度高优点^[9-10],可实现微泄漏遥感检测。目前天然气泄漏监测方案多采用云台扫描式激光气体遥测仪,该方案在天然气无人站内布一台或多台扫描式激光气体遥测仪进行预置位巡航监测,预置位多选在各个阀门与管道连接处。另外,也有监测方案采用多点多线布多个开放式激光气体遥测仪,通过多条平行激光穿过工艺区进行定点检测,实现天然气站部分区域的“线监测”。这些方案采用单台监测设备存在监测区域范围小,漏洞大,无法实现整个天然气场站的泄漏监测;采用多台监测设备可进行多点多线监测,但配件消耗量大,数据处理复杂,后期维护量大。不论采用单台或多台监测设备,只能实现天然气泄漏的“线监测”,无法实现较大区域的“面监测”及整个场站“空间监测”,不能反演天然气泄漏整个空间的动态浓度分布。

本文拟基于 TDLAS 的波长调制法,通过各次谐

波信息重构吸收率函数,提高测量精度,研发适用于天然气站易燃易爆的开放光路环境下 CH_4 激光气体遥测仪;提供一种天然气泄漏空间监测报警系统,该系统方案采用高杆云台与导轨分别搭载高精度激光气体遥测仪进行实时监测,并基于 GIS 平台进行三维建模,通过监测数据融合处理生成天然气空间浓度动态分布图,泄漏浓度超过预设报警阈值时,结合空间浓度动态分布图判断泄漏位置。

2 TDLAS 测量原理

2.1 Beer-Lambert 定律

TDLAS 测量技术采用窄带可调谐二极管激光器发射出的激光作为光源,扫描气体分子特定波长的单条吸收谱线,通过分析待测气体吸收激光前后光强变化程度得到气体浓度,作为光谱检测技术,遵循 Beer-Lambert 定律,其具有非接触式、波长选择性强、抗干扰能力强、精度高、响应速度快等优点,测量原理如图 1 所示。

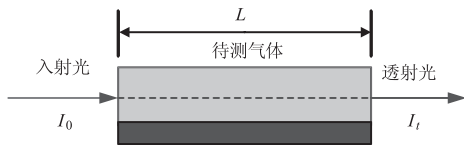


图 1 Beer-Lambert 定律示意图
Fig. 1 Schematic diagram of Beer - Lambert law

一束频率为 ν 的单色激光穿过长度为 L 的气室内待测气体介质时,被待测气体选择性吸收,激光光强发生衰减,激光的透射光强 I_t 和入射光强 I_0 满足 Beer-Lambert 定律,其表达式如下所示^[11-12]:

$$\begin{aligned}\tau(\nu) &= \frac{I_t}{I_0} \\ &= \exp[-PS(T)XL\phi(\nu)] \\ &= \exp[-\alpha(\nu)]\end{aligned}\quad (1)$$

式中, $\tau(\nu)$ 为激光透射率函数; I_0 为激光入射光强; I_t 为激光透射光强; P 为气体的总压力 (atm); X 为待测气体浓度; L 为激光在待测气体中传播的距离,即光程 (cm); $S(T)$ 为气体分子吸收谱线的线强度,只与气体温度 T 有关 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$); $\alpha(\nu)$ 为气体的吸收率函数, $\alpha(\nu) = PS(T)XL\phi(\nu)$; $\phi(\nu)$ 为线型函数 (cm), 在整个吸收频率上线型函数满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(\nu) d\nu = 1$ 。

2.2 波长调制法重构吸收率函数

直接吸收法和波长调制法是 TDLAS 技术长期

发展形成的两种主要测量方法。直接吸收法在实际测量中会受到颗粒物浓度、激光强度波动等因素的影响,使吸收率难以拟合,致使测量气体浓度出现误差。波长调制法可通过注入的高频调制信号有效降低系统背景噪声信号干扰,可提高测量的信噪比和灵敏度^[13-14]。但是,传统的二次谐波法测量气体浓度需要复杂的标定实验,测量成本和难度高; $2f/1f$ 免标法受吸收率条件的限制,其无法在恶劣工业环境得到广泛应用。鉴于直接吸收法和波长调制法的优缺点,本文利用各次谐波信号中丰富的吸收率函数信息,建立一种基于波长调制法的吸收率函数在线重构算法,提高了 TDLAS 技术在复杂工业现场的测量精度和可靠性。

波长调制法是在低频扫描信号上注入频率为 ω 高频正弦调制信号,此时激光的瞬时频率 ν 和瞬时入射光 I_0 为^[15-17]:

$$\begin{cases} \nu = \bar{\nu} + a \cos(\omega t) \\ I_0 = \bar{I}_0 (1 + i_1 \cos(\omega t + \psi_1) + i_2 \cos(2\omega t + \psi_2)) \end{cases}\quad (2)$$

式中, $\bar{\nu}$ 为激光平均扫描频率; $\bar{I}_0$ 为平均光强; a 为频率调制幅度,单位为 cm^{-1} , $a = m \delta_\nu$; m 为调制系数; δ_ν 为谱线半高半宽; i_1 和 i_2 为线性和非线性强度调制系数; ψ_1 和 ψ_2 为线性和非线性强度调制和频率调制的相位差。

由式 (1) 可知此时的激光透过率函数表达式为:

$$\begin{aligned}\tau(\bar{\nu} + a \cos(\omega t)) &= \frac{I_t}{I_0} = \exp[-\alpha(\bar{\nu} + a \cos(\omega t))] \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cdot \cos(k\omega t)\end{aligned}\quad (3)$$

式中, A_k 为激光透过率函数的各次谐波幅值,其表达式为:

$$\begin{cases} A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos\theta) \cdot d\theta \\ A_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos\theta) \cdot \cos(k\theta) \cdot d\theta, k = 1, 2, 3, \dots \end{cases}\quad (4)$$

根据锁相放大器工作原理,将参考信号和光电探测器输入的光强信号相乘,可推导锁相放大器输出的各次谐波 X 和 Y 轴信号的表达式如下:

$$\begin{cases} X_k = \frac{G}{2} \cdot [F_{k1} \cdot \cos\theta_k - F_{k2} \cdot \sin\theta_k] \\ Y_k = \frac{G}{2} \cdot [F_{k1} \cdot \sin\theta_k + F_{k2} \cdot \cos\theta_k] \end{cases}\quad (5)$$

式中, G 为系统的光电放大系数, 在实际测量中可忽略强度调制非线性项 i_2 , 因此 F_{k1} 和 F_{k2} 的表达式如下:

$$\begin{cases} F_{11} = \bar{I}_0 \left[A_1 + i_1 \left(A_0 + \frac{A_2}{2} \right) \cos(\psi_1) \right] \\ F_{12} = -\bar{I}_0 \left[i_1 \left(A_0 - \frac{A_2}{2} \right) \sin(\psi_1) \right] \\ F_{k1} = \bar{I}_0 \left[A_k + \frac{i_1}{2} (A_{k-1} + A_{k+1}) \cos(\psi_1) \right] \\ F_{k2} = -\bar{I}_0 \left[\frac{i_1}{2} (A_{k-1} - A_{k+1}) \sin(\psi_1) \right], k = 2, 3, \dots \end{cases} \quad (6)$$

当没有气体吸收时, $A_0 = 1, A_k = 0 (k = 1, 2, 3, \dots)$, 此时一次谐波 X 和 Y 轴的背景信号如下, 其中 $S_{1, \text{back}}$ 为一次谐波背景信号幅值。

$$\begin{cases} X_{1, \text{back}} = \frac{G \bar{I}_0 i_1}{2} \cos(\theta_1 - \psi_1) \\ Y_{1, \text{back}} = \frac{G \bar{I}_0 i_1}{2} \sin(\theta_1 - \psi_1) \\ S_{1, \text{back}} = \sqrt{(X_{1, \text{back}})^2 + (Y_{1, \text{back}})^2} = \frac{G \bar{I}_0 i_1}{2} \end{cases} \quad (7)$$

在公式(5)中, 当奇数次谐波 X 和 Y 轴分别乘以 $\sin \theta_k$ 和 $\cos \theta_k$ 并且相减后, 同时再将其除以一次谐波背景信号, 则有:

$$\begin{cases} \text{fun}_1 = \frac{X_{1f} \cdot \sin \theta_1 - Y_{1f} \cdot \cos \theta_1}{S_{1, \text{back}}} \\ \quad = \sin(\psi_1) \cdot \left[A_0 - \frac{A_2}{2} \right] \\ \text{fun}_{2k-1} = \frac{X_{2k-1} \cdot \sin \theta_{2k-1} - Y_{2k-1} \cdot \cos \theta_{2k-1}}{S_{1, \text{back}}} \\ \quad = \frac{\sin(\psi_1)}{2} \cdot [A_{2k-2} - A_{2k}], k = 2, 3, 4, \dots \end{cases} \quad (8)$$

经过一系列的公式处理推导后可得到:

$$\text{Fun}_k = \sum_{n=1}^k (-1)^{n-1} \cdot \text{fun}_{2n-1} = \sin \psi_1 \cdot \Lambda_k \quad (9)$$

式中, Fun_k 根据奇次谐波 X 和 Y 轴信号得到; Λ_k 为激光透过率函数和调制系数 m 的函数, 其公式为:

$$\begin{aligned} \Lambda_k &= \tau(\bar{\nu}) + (-1)^{k-1} \cdot \\ &\quad \sum_{n=k}^{\infty} \frac{a^{n+k}}{(n+k)!} \frac{a^{n-k}}{(n-k)!} \frac{k}{n \cdot 2^{2n}} \tau^{(2n)}(\bar{\nu}) \\ &= \frac{\text{Fun}_k}{\sin \psi_1} \end{aligned} \quad (10)$$

当 k 趋近于无穷大时, 高阶项影响为零, 因此

可得:

$$\Lambda_k \Big|_{k \rightarrow \infty} = \tau(\bar{\nu}) = \exp[-\alpha(\bar{\nu})] \quad (11)$$

根据公式(10)和(11), 当 $\sin \psi_1 \neq 0$ 时, 可得到吸收率的重构公式如下:

$$\alpha(\bar{\nu}) = -\ln \left(\frac{\text{Fun}_k}{\sin \psi_1} \right) \Big|_{k \rightarrow \infty} \quad (12)$$

上述的吸收率重构算法解决了目前波长调制法难以测量吸收率函数的问题, 根据此重构算法的吸收率函数可直接确定待测气体的浓度、温度等参数。

2.3 开放光路测量方法

激光光谱检测技术是一种非接触式吸收光谱技术, 具有可高空开放测量、响应迅速、灵敏度高等特点^[18], 因此利用该测量技术可在天然气站开放环境下测量天然气管道及阀门泄漏的扩散云团, 得到整个扩散云团的浓度, 及时响应天然气站的泄漏情况。其测量工作原理如图2所示。

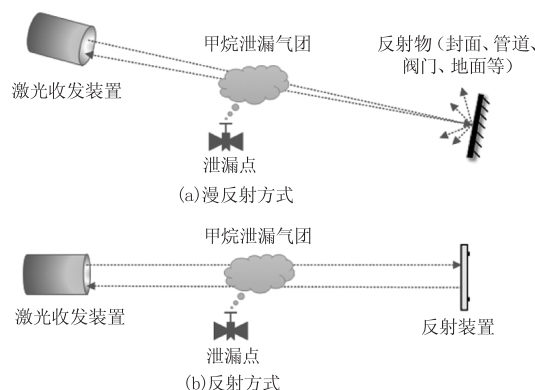


图2 开放光路测量方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of open optical path measurement method

利用气体对光谱的选择吸收特性, 激光收发装置对外发射特定波长范围(被测气体不同, 中心波长也不相同)的探测激光, 该探测激光遇到反射装置, 部分激光被反射返回到收发装置的探测单元; 或者遇到如管道、阀门、地面、墙面等反射物, 经漫反射后部分激光返回到探测单元, 在光束路径内, 如果有被测气体泄漏形成的气团, 该气团中甲烷将对探测激光产生吸收, 未被吸收前的光强与被吸收后光强的比值与气团的浓度成函数比例关系, 通过计算该比值反演出气团的浓度。

目前激光在线气体监测设备多采用封闭光路, 用抽取的方法将待测气体取样到测量腔或者多次反射池中进行测量。这种测量方式精度很高, 但是想

监测大面积区域的 CH_4 气体浓度,就需要将封闭光路变为开放光路。开放光路需应对太阳光、灯光等环境光影响,太阳光可能造成光电探测器饱和,检测不出正常信号,灯光会带来工频干扰。此外,开放光路环境下测量还会受到雨、雪、大雾等恶劣天气影响。本文基于开放光路 TDLAS 测量原理,解决了光信号探测、环境光去除、测量系统环境适应性等关键问题,研发出了激光气体遥测仪,实现了开放环境中微量 CH_4 泄漏检测。

3 监测方案

目前应用于天然气站的监测方案多采用云台扫描式和开放式激光气体遥测仪,在天然气无人场站内布一台或多台扫描式激光气体遥测仪进行预置位巡航监测,或采用多点多线布多个开放式激光气体遥测仪,通过多条平行激光穿过工艺区进行定点检测,这些方案仅实现天然气站部分区域的“线监测”,监测漏洞大。现基于研发的激光气体遥测仪提供一种天然气泄漏监测方案,实现天然气站整个工艺区天然气泄漏空间动态监测。

整体方案由立柱云台扫描式监测方案与导轨可移动平台开放式监测方案组成,主要包括激光气体遥测仪、云台、气动升降立柱、导轨和可移动平台等设备。立柱云台扫描式监测方案如图 3 所示,激光气体遥测仪与摄像头一体化集成与云台之上,云台放置于气动升降立柱上法兰,云台可进行水平 360° 和垂直 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 的旋转运动。气动升降立柱由依次连接的多节气缸组成,采用空气压缩机通过底部进气嘴对气缸充气,每节气缸完全升起后,连接处的插销自锁自动锁死,其底部还设有撑腿便于固定。云台搭载激光气体遥测仪位于工艺区高位按设定预置位点巡航实现“线监测”,摄像头可辅助观察现场巡航点实时状况。

导轨可移动平台开放式监测方案如图 4 所示,激光气体遥测仪设于可移动平台内,可移动平台安装在导轨上,拖链与可移动平台连接,可移动平台的动力来源防爆伺服电机可在导轨上精准往返运动,因此内置的激光气体遥测仪可实现大区域实时动态“面监测”。导轨由多跟立柱架高,立柱上方的调平座可调节导轨高度及水平度以满足监测要求,可移动平台同时设有原点传感器实现回原点和限位功能。

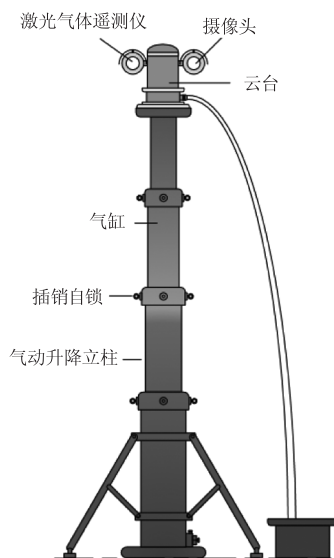


图 3 立柱云台扫描式监测方案

Fig. 3 Scanning monitoring program based on column and PTZ

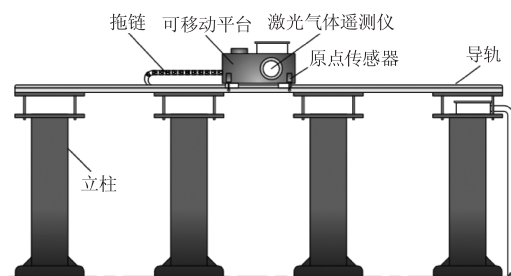


图 4 导轨可移动平台开放式监测方案

Fig. 4 Open monitoring program based on guide rail and movable platform

气动升降杆立柱布置于天然气站工艺区合适目标位置,云台带动激光气体遥测仪按设定预置位点巡航实现“线监测”;导轨布置于天然气站工艺区的一侧,可移动平台带动激光气体遥测仪沿天然气站工艺区的一侧往返运动,进行天然气站内气体浓度采集,实现大区域的“面监测”。将处于高位的扫描式激光气体遥测仪的“线监测”与水平往返运动的开放式激光气体遥测仪的“面监测”结合,实现整个天然气场站的“空间监测”,两者的监测及控制数据均上传至服务器终端进行处理。天然气泄漏空间动态监测整体方案如图 5 所示。

4 天然气泄漏空间监测系统

根据上述整体监测方案开发了一套天然气泄漏空间监测系统,实现现场硬件设备控制及通信数据采集,基于 GIS 平台对天然气站进行三维建模,将两个激光气体遥测仪的浓度监测数据融合处理,采用

空间浓度场反演算法,在每一次动态扫描后生成整个场站的 CH_4 空间浓度动态分布图。当系统获取天然气站内某一位置的 CH_4 浓度超过预设报警阈值时进行实时报警,并结合空间浓度动态分布图判断天然气泄漏位置,从而协助场站人员立即做出响应,高效处理天然气泄漏事故。

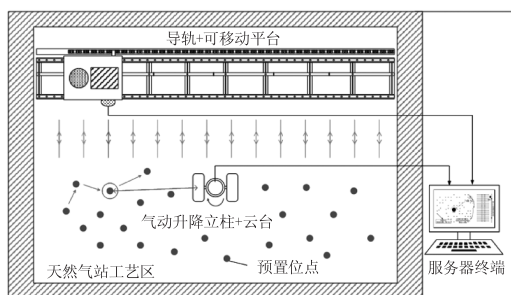


图5 天然气泄漏空间动态监测整体方案

Fig.5 Overall plan of natural gas leakage space dynamic monitoring

天然气泄漏空间监测系统整体构架自上而下分为边缘层、网络层和系统应用层三个层次,如图6所示。边缘层实现对硬件设备系统的控制,控制导轨系统的可移动平台按照特定目标指令进行移动,可实现使能、回原点、手动移动、自动往返运动、限位等功能;控制云台系统按照特定角度和速度进行移动,可设置预置位点和巡航方式。同时控制云台遥测仪和导轨遥测仪按照特定的数据采集频率进行数据采集,完成数据采集后进行数据打包并通过网络进行数据上传。网络层负责智慧管网与边缘层进行通信,在本系统中采用MQTT作为智慧管网与边缘层进行通信,边缘层控制系统作为一个MQTT客户端,订阅相关任务和发布采集数据及系统运行状态等。系统应用层主要由智慧管网中的空间泄漏监测子系统构成,作为系统与用户之间的交互界面,用户通过空间泄漏监测系统,实现各项功能应用。

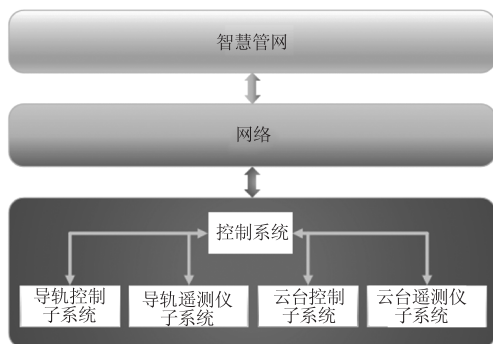


图6 系统整体构架

Fig.6 Overall system architecture

系统交互界面显示场站三维视图、设备列表、报警列表、泄漏监测视图、实时状态及数据和实时视频等信息。三维视图直观展示天然气站的情况,用户可实现场景放大、缩小、漫游、旋转及按指定方向移动;泄漏监测视图展示了通过浓度反演算法得到的浓度动态分布图;用户可在空间泄漏监测系统设置导轨运行速度、周期、云台移动角度、预置位点及报警阈值,控制导轨与云台的运动状态,查看实时状态数据及报警信息,其主要包括遥测仪光强、浓度、导轨速度、位移、云台坐标、限位报警等数据信息。

图7为天然气泄漏空间监测系统在某天然气站试验的监测系统界面。在天然气站多点放置标气瓶,控制可移动平台及开放式激光气体遥测仪以 0.1 m/s 水平往返运动,控制云台及扫描式激光气体遥测仪按预置位点巡航扫描,系统根据监测数据实时生成浓度动态分布图。从图中可以看出不同的泄漏浓度区间对应不同的颜色,当监测到定点标气瓶的天然气泄漏时,立即反馈泄漏浓度数据并报警联动,该区域浓度动态分布图呈红色,根据该浓度动态分布图、可移动平台及云台的位置信息可判断出泄漏点位置。系统响应迅速,监测准确可靠,可帮助运行人员及时做出响应。



图7 天然气泄漏空间监测系统界面

Fig.7 Natural gas leakage space monitoring system interface

5 结论

本文对天然气泄漏监测的必要性及现有测量原理进行了分析,根据现有天然气场站天然气泄漏监测方案弊端,提出了一种天然气泄漏空间监测方法,通过现场系统方案实施与泄漏监测试验,得出以下结论:(1)现有多点多线布多个开放式激光气体遥测仪监测方案或云台扫描式激光气体遥测仪巡航监测方案只能实现“线监测”,然而天然气站阀门、管道众多,上述方案监测漏洞极大,本文所提供的立柱云台结合导轨可移动平台监测方案解决了该问题。可移动平台搭载开放式激光气

体遥测仪在导轨上往返运动,实现了天然气站的“面监测”,布置于合适位置的立柱云台搭载扫描式激光气体遥测仪从高点按预置位点巡航,两者的“线监测”与“面监测”相结合实现整个天然气站的“空间监测”,该方案使用设备少,全覆盖,基本无监测漏洞。(2)基于该方案所构建的天然气泄漏空间监测系统实现了天然气泄漏空间监测,可精确控制各设备运行。由于采用 TDLAS 测量原理及重构算法,系统响应速度快、精度高,根据监测数据实时更新浓度动态分布图,显示直观,监测到异常泄漏立即报警,根据报警时可移动平台与云台的坐标数据,并结合浓度动态分布图准确判断泄漏位置。该系统确保场站人员及时高效处理天然气泄漏事故,从而保证天然气站安全运行。

参考文献:

- [1] Li Jingcui, Bi Kun, Du Dongmei, et al. Detection simulation of micro leakage fluid field of natural gas pipeline [J]. Computer Simulation, 2017, 34(10): 361–366. (in Chinese)
李景翠, 毕琨, 杜冬梅, 等. 天然气输气管道微泄漏流场检测仿真 [J]. 计算机仿真, 2017, 34(10): 361–366.
- [2] Jiang Yalong, Cai Tingli, Zhu Yuquan. Methane monitoring system based on absorption spectroscopy of tunable diode laser [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2011, 25(3): 265–271. (in Chinese)
蒋亚龙, 蔡霆力, 祝玉泉. 可调谐半导体激光吸收光谱甲烷浓度监测系统 [J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(3): 265–271.
- [3] Zhu Yuquan, Qiao Lifeng, Zhang Qixing, et al. Design of a natural gas leak detection system with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009, 39(4): 429–434. (in Chinese)
祝玉泉, 乔利峰, 张启兴, 等. 基于 TDLAS 的城市天然气管道泄漏检测系统 [J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(4): 429–434.
- [4] 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.
- [5] Wang Chunnan, Li Xiang, Xu Tingting, et al. Analysis of the influencing factors of leakage detection based on ultrasonic principle in natural gas station [J]. Process Automation Instrumentation, 2018, 39(3): 92–94, 102. (in Chinese)
王春楠, 李向, 许挺挺, 等. 天然气站场超声波原理泄漏检测影响因素分析 [J]. 自动化仪表, 2018, 39(3): 92–94, 102.
- [6] Han Xiaolei. The study of technique for natural gas leak detection Based on TDLAS [D]. Qingdao: China University of petroleum (East China), 2009. (in Chinese)
韩小磊. 基于 TDLAS 的天然气泄漏检测技术研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009.
- [7] Sun Pengsuai, Zhang Zhirong, Li Jun, et al. Research on open methane gas detection technology for 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.
- [8] Durry G, Li J S, Vinogradov I, 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, 99(1–2): 339–351.
- [9] Qu Z C, Werhahn O, Ebert V. Thermal boundary layer effects on line-of-sight tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) gas concentration measurements [J]. Applied Spectroscopy, 2018, 72(6): 853–862.
- [10] Zhou Peili, Tan Wen, Peng Zhimin. On-line measurement of CO concentration in flue gas based on TDLAS through mixed sampling mode [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(11): 236–243. (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): 236–243.
- [11] Lan Lijuan. Research on the in situ gas absorption line-shape measurements based on TDLAS [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)

- 蓝丽娟. TDLAS 中波长调制法测量线型函数理论与实验研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
- [12] Zhao Kaihua, Zhong Xihua. Optics [M]. Beijing: Peking University Press, 1984. (in Chinese)
- 赵凯华, 钟锡华. 光学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1984.
- [13] Du Y J, Peng Z M, Ding Y J. High-accuracy sinewave-scanned direct absorption spectroscopy [J]. Optics Express, 2018, 26(22): 29550 – 29560.
- [14] Goldenstein C S, Hanson R K. Diode-laser measurements of line strength and temperature-dependent lineshape parameters for H_2O transitions near $1.4 \mu m$ using Voigt, Rautian, Galatry, and speed – dependent Voigt profiles [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2015, (152): 127 – 139.
- [15] Klein A, Ebert V. Vcsel-based laser hygrometer using rapidly time division multiplexed direct absorption and wavelength modulation spectroscopy [C]//Laser Applications to Chemical, Security and Environmental Analysis, 2014.
- [16] Goldenstein C S, Spearrin R M, Jeffries J B, et al. Infrared laser – absorption sensing for combustion gases [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2016, (60): 132 – 176.
- [17] Peng Z M, Ding Y J, Che L, et al. Odd harmonics with wavelength modulation spectroscopy for recovering gas absorbance shape [J]. Optics Express, 2012, 20(11): 11976 – 11985.
- [18] Wu Guozhong, Li Qian, Wang Yushi, et al. Research progress of spectra detection technology of diffusion cloud in natural gas pipeline leakage [J]. Contemporary Chemical Industry, 2015, (7): 1721 – 1724. (in Chinese)
- 吴国忠, 李茜, 王玉石, 等. 天然气管道泄漏扩散云团光谱检测研究进展 [J]. 当代化工, 2015, (7): 1721 – 1724.