

基于光路自动准直的甲烷遥测技术

季文海, 宋迪, 焦月, 马龙岩, 李国林*

中国石油大学(华东)控制科学与工程学院, 山东 青岛 266580

摘要 针对目前甲烷遥测装置因光学准直固定, 在不同检测环境使用时不能进行动态调整的问题, 在光路准直设计中引入了电控可变焦透镜, 实现了光路自动准直。测试结果表明, 针对不同的检测距离和辅助目标, 通过改变电控可变焦透镜的驱动电流可实现快速变焦, 在动态调节激光光束发散效果的同时可使遥测装置的接收光功率最大化, 其接收光功率相比无变焦透镜接收光功率可提高 1.7 倍以上, 同时可提高检测系统的信噪比。针对变焦透镜在遥测应用中出现的新问题, 如重力效应引起的光束偏转效应, 提出了形变模型, 并进行了理论计算和仿真分析。使用甲烷气袋进行泄漏模拟测试, 通过 Allan 方差分析得到: 当积分时间为 18 s 时, 极限标准差达到 1.51×10^{-6} 。对装置进行实地测量, 测试距离为 52.2 m, 检测到楼道空气中存在 4.95×10^{-6} 浓度(体积分数)的甲烷气体。该研究展示了使用电控可变焦透镜实现光路自动准直和优化在气体泄漏遥测装置中的可行性与应用价值。

关键词 测量; 甲烷遥测; 自动光学准直; 电控可变焦透镜; 光束重力偏转效应

中图分类号 TN21

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1812001

Methane Telemetry Based on Optical Path Automatic Collimation

Ji Wenhai, Song Di, Jiao Yue, Ma Longyan, Li Guolin*

*College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China),
Qingdao, Shandong 266580, China*

Abstract To solve the problem that a methane telemetry device can not be dynamically adjusted when it is used in different detection environments due to its fixed optical collimation, an electronically controlled zoom lens is introduced into the optical path collimation design to achieve automatic optical path collimation. Test results show that for different detection distances and auxiliary targets, the fast zoom can be achieved by changing the driving current of the electronically controlled zoom lens. The receiving optical power of the telemetry device can be maximized while dynamically adjusting the laser beam divergence effect. Compared with the non-zoom lens, the receiving optical power can be increased by more than 1.7 times, and the signal-to-noise ratio of the detection system is improved. In view of the new problems of the zoom lens in telemetry applications, such as beam deflection caused by the gravity effect, a deformation model is proposed, and theoretical calculation and simulation analysis are carried out. A methane gas bag is used to conduct a leak simulation test. Through the Allan variance analysis, we obtain that when the integration time is 18 s, the limit standard deviation is 1.51×10^{-6} . The field measurement for the device is conducted, the test distance is 52.2 m, and the methane gas with the concentration (volume fraction) of 4.95×10^{-6} is detected in the corridor air. The research demonstrates the feasibility and the application value of using an electronically controlled variable focus lens to realize automatic collimation and optimization of the optical path in a gas leakage telemetry device.

Key words measurement; methane telemetry; automatic optical collimation; electronically controlled zoom lens; optical beam gravity deflection effect

OCIS codes 120.0280; 220.3620; 220.3630

收稿日期: 2020-05-07; 修回日期: 2020-05-27; 录用日期: 2020-06-09

基金项目: 山东省重点研发计划(2019GGX104103, 2019GHY112084)

* E-mail: liguolin@upc.edu.cn

1 引 言

伴随着清洁能源政策的推行,天然气在我国得到广泛应用。然而天然气泄漏引起的事故也频频发生,严重地危害着人们的生命安全^[1-2],而且甲烷的温室效应比二氧化碳更强^[3]。甲烷遥测技术在降低天然气泄漏事故的发生频率方面具有重要意义^[4-5]。由于燃气管网纵横交错,甲烷泄漏遥测装置需要具有一定的移动性以实现动态检测^[6-7]。泄漏早期甲烷浓度(体积分数)低,提高信号幅度是增加信噪比和实现灵敏检测的关键。现场的测试环境、空气湍流、目标距离、辅助目标反射面的光学特性等都会影响光电探测器的信号幅度,从而降低其对气体浓度的测量精度^[8]。

优化光学系统设计可以提高光信号的收集效率、增加甲烷遥测装置的灵活性及准确性。丁武文等^[9]在系统测量光路中插入了一个充满已知浓度甲烷气体的参考气室,提高了系统在低甲烷浓度条件下的信噪比;张卓和张丽英^[10]通过圆锥体集光器提高了回波光接收效率;宫卫华^[11]通过云台设备实现了望远镜探头随云台同步旋转,进而实现了望远镜探头与角锥反射镜的自适应瞄准;姜治深等^[12]设计

了遥测望远镜收发系统,该系统便于户外携带,能够在 40 m 距离处探测甲烷气体的浓度。目前可以根据不同测试环境进行调节的设计,如云台式设计,实际上是通过调试控制设备实现瞄准,其光学结构仍然是固定的,且体积较大。如果从光学结构本身进行改进,如采用自动变焦器件设计自动准直的光学系统,可以提高遥测装置的动态适应特性。

电控变焦透镜正是符合这种需求的新型光学器件,它通过驱动电流调节屈光度,并具有温度补偿功能,它响应快、功耗低,无机械运动部件,在变焦眼镜、手机相机、内窥镜和显微镜等诸多领域中已得到广泛应用并且效果良好^[13-14],其在空间探测方面也有广泛的应用前景^[15]。因此本文提出在移动式遥测装置的激光出射准直光路中引入电控变焦透镜,实现自动准直,通过改变发射光束的准直性能来扩大遥测的动态范围,提高回收效率^[16]。

2 实验装置

2.1 遥测装置

遥测装置采用波长调制的可调谐半导体激光技术(WMS-TDLAS)^[17-18],实验装置如图 1 所示。

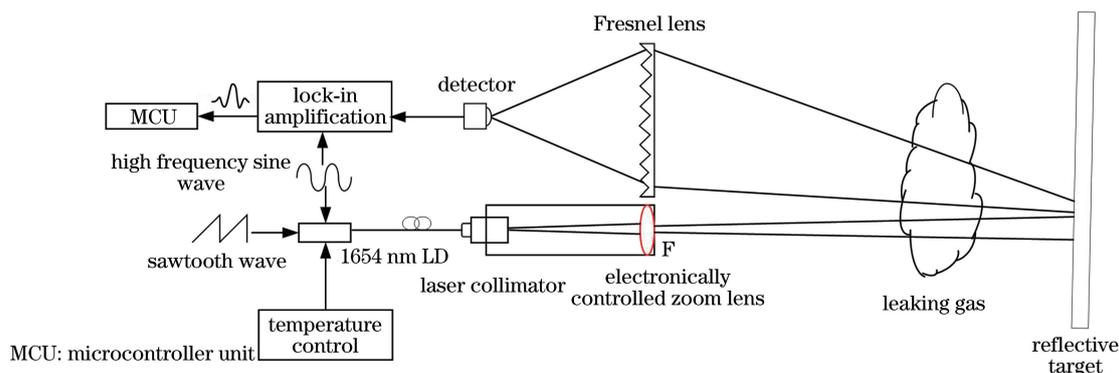


图 1 遥测装置示意图

Fig. 1 Diagram of telemetry device

甲烷在 1653.7 nm 的吸收最强,吸收峰相对孤立,且不受空气中二氧化碳和水汽的吸收谱线的干扰,该特性便于准确测量甲烷浓度。光源采用蝶形封装的分布式反馈(DFB)激光器(SN: E21394, 徐州旭海光电公司,中国),其中心波长为 1653.7 nm,输出功率为 5 mW。激光器的驱动信号为扫描锯齿波(10 Hz)与高频调制正弦波(7.8 kHz)相叠加的信号。通过比例、积分、微分(PID)温度控制器 WTC3243 锁定激光器的温度,调节激光输出的中心波长至 1653.7 nm。对进入锁相放大模块的 InGaAs 探测器的光电流信号进行前置放大和滤波,

得到反映透射光功率的直流(DC)信号;采用二倍频的正弦波(15.6 kHz)作为参考信号进行解调,得到反映吸收强度的二次谐波信号 $2f$ 作为浓度反演的输入,如图 2 所示。

采用倒装望远镜结构实现遥测装置的激光准直输出,将电控可变焦透镜(EL-10-30-Ci-VIS, Optotune 公司,瑞士)引入准直系统。变焦透镜使用透明的弹性薄膜将光学液体(折射率为 1.3)限制在工作腔中,通过液体的压力控制薄膜面型的变化。当光学液体流入工作腔时产生一个正压力,弹性薄膜因受到压力差的作用向外凸起,形成凸透镜;反

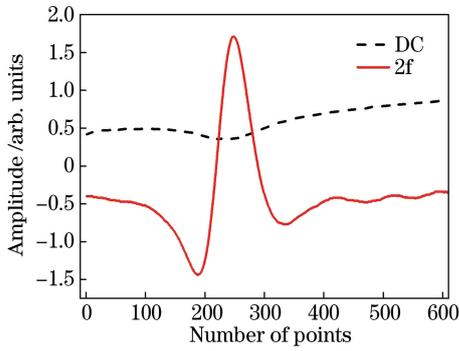


图 2 检测装置光功率(DC)信号和光谱(2f)信号
Fig. 2 Optical power (DC) signal and spectrum (2f) signal of detection device

之,当光学液体从工作腔抽出时,产生负压力,形成凹透镜,从而实现焦距调节。激光器发出的光经过单模光纤进入光纤准直器中,在准直器后加入电控可变焦透镜。若存在甲烷泄漏,则出射光经泄漏气团的吸收后到达辅助反射目标,其表面产生漫反射。InGaAs 探测器位于菲涅耳透镜(焦距为 100 mm)的焦点,用于接收漫反射的回波。

2.2 浓度反演

在室外环境中检测低浓度的甲烷泄漏时,各种噪声较大,光谱信号极易淹没于噪声之中。因此对 2f 进行多次平均和 Savitzky-Golay (S-G)^[19-20] 滤波,以提高遥测系统的抗噪能力。微控制单元(MCU)芯片接收模拟数字转换器(ADC)采集的 DC 和 2f 信号,每条光谱含 1000 个采样点。首先对 DC 和 2f 信号进行 10 次平均,接着采用 12 阶多项式、窗口数为 25 的 S-G 滤波处理 2f 信号。扫描过程中激光输出的光功率随驱动电流的变化而变

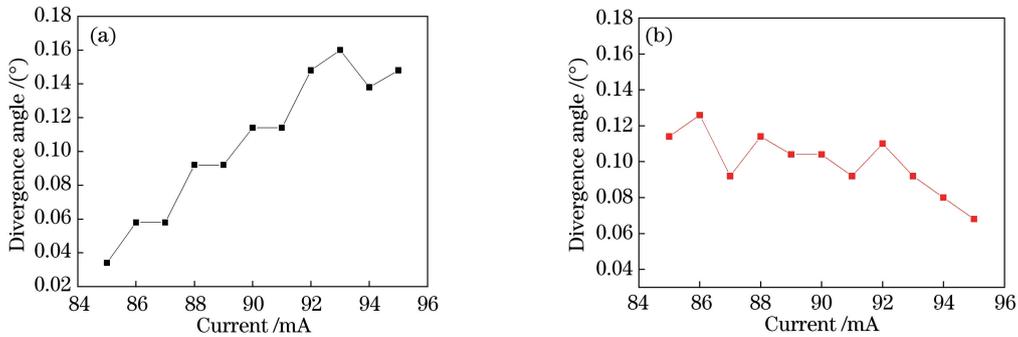


图 3 不同驱动电流下的光束发散角。(a) W 方向;(b) V 方向

Fig. 3 Laser beam divergence angle under different driving currents. (a) In W direction; (b) in V direction

由图 3 可知,在测试电流范围内光束在 W 和 V 方向的发散角度均较小,且随着电流的变化而变化。调节电流时变焦透镜的稳定时间约为 10 ms,因此可以针对不同的检测情形迅速调整激光的发散特

化,解调出来的 2f 信号受光功率的影响,导致 2f 信号具有非对称性,对 2f 和 DC 信号进行归一化处理可消除光功率波动对 2f 信号的影响。

最小二乘(CLS)曲线拟合方法是依据光谱反演气体浓度普遍采用的算法^[21],其模型表达式为

$$Y = k_0 + k_1 R_1 + k_2 R_2, \quad (1)$$

式中:Y 为实时光谱; R_1 和 R_2 为参考光谱,在本装置中, R_1 为固定浓度的甲烷气体的光谱, R_2 为氮气背景下的光谱,即光谱基线; k_1 为回归系数,是待测气体浓度相对参考谱甲烷浓度的比值; k_0 为光谱上移或下移量; k_2 为光谱基线的幅度变化比例。

3 准直特性测量与仿真分析

本文通过实验测试了在倒装望远镜结构中引入电控变焦透镜后的改进效果,即出射光束的动态调节性能和回波光收集效率的提高。

3.1 激光光束的动态调节

使用光束质量分析仪(BA7-IR3E, Duma Optronics 公司,以色列)在不同传播距离上测量光斑的直径变化,计算光束的发散角。电控变焦透镜的变焦范围为 $-1.5D \sim 3.5D$ (D 为屈光度),当驱动电流为 79.94 mA 时,屈光度约为 0。对比 1670 mm 处变焦透镜对光斑尺寸($1/e^2$ 峰值光强处)的影响,发现变焦透镜引起光斑在 W 和 V 方向(x、y 坐标轴旋转 45° 后)的变化小于 10%。这说明电控变焦透镜在屈光度为 0 时对激光光束的近场光斑的影响不大。在 85~95 mA 范围内改变透镜驱动电流,步进为 1 mA。在距离透镜 440 mm 和 1670 mm 处分别测量光斑直径,计算光束发散角与驱动电流的关系(图 3)。

性,这样得到的动态响应效果好,且不引入外部噪声。

3.2 接收光功率和信噪比的提高

为了验证电控变焦透镜在甲烷遥测装置中对接

收光功率的优化作用,首先固定测试条件,调节驱动电流以获得最佳收集效率。选择厚度为 5 cm、浓度为 0.5% (氮气背景) 的甲烷气袋和 4.5 m 的遥测距离,以 DC 信号的最大值作为接收光功率的指标。无可变焦透镜时,接收功率的变化趋势如图 4 中虚线所示。加入可变焦透镜并改变驱动电流时,光功率的变化趋势如图 4 中实线所示。加入可变焦透镜后,在驱动电流为 25 mA 时接收光功率最大,比没有透镜的情况提高了 3.6 倍。引入变焦透镜会带来插入损耗,测试发现插入损耗在 51% 左右且不随驱动电流的变化而变化。但是变焦透镜带来回波功率的增加,抵消了插入损耗带来的负面影响。

将无可变焦透镜且甲烷浓度为 0 时的光谱信号作为此时的本底噪声,其幅值为 0.041,计算得到 0.5% 浓度的甲烷的光谱信号的信噪比约为 29.47;加入变焦透镜并调整驱动电流为 25 mA (回波光功率最大),仍以甲烷浓度为 0 时的光谱信号作为本地噪声,其幅值为 0.035,计算得到 0.5% 浓度的甲烷的光谱信号的信噪比约为 36.58,信噪比提高了约 1.24 倍。

测试不同距离 (4.5 m 和 50 m) 和不同甲烷浓度 (0.1%, 0.5% 和 1.0%) 时的优化效果。根据每

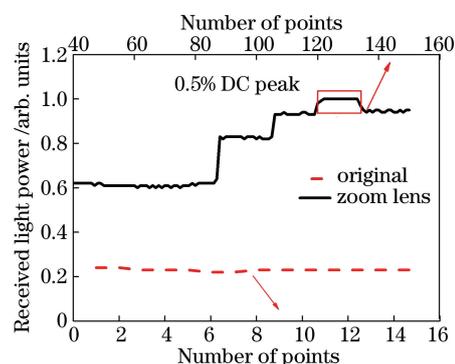


图 4 接收光功率的变化

Fig. 4 Changes in the received optical power

种情况下的接收光功率与透镜驱动电流的曲线,获得最佳驱动电流,以及最佳驱动电流条件下光功率的提高倍数和光谱信号信噪比的提高倍数,如表 1 所示。由表 1 可知,不同遥测距离的最佳驱动电流并不是固定的,因此加入电控变焦透镜后,需要根据不同的检测距离及不同的环境动态调节驱动电流,以增大信号幅度,从而扩大动态范围,同时发现,电控可变焦透镜在提高接收功率的同时,可提高光谱的信噪比。这都体现了可变焦透镜在移动式遥测应用中的优越性。

表 1 电控变焦透镜对接收光功率的提高效果

Table 1 Improvement effect of electronically controlled zoom lens on receiving optical power

Test distance /m	Concentration of sample /%	Optimal driving current /mA	Increased times of receiving optical power	Improvement times of SNR
4.5	0.1	25	1.7	1.69
	0.5	25	3.6	1.24
	1.0	10	2.4	1.10
50	0.1	85-89	2.8	1.28
	0.5	86-89	2.0	1.36
	1.0	91-95	2.0	1.09

3.3 光束的重力偏转效应

在发散实验中发现,变焦透镜除了可压缩光束发散角和提高接收光功率,还可使光束发生偏转,使

光斑中心下移。不同驱动电流下光斑的中心位置的移动距离不同,图 5 展示了在 44 cm 和 167 cm 处光斑的中心位置与驱动电流的关系曲线。光斑中心的

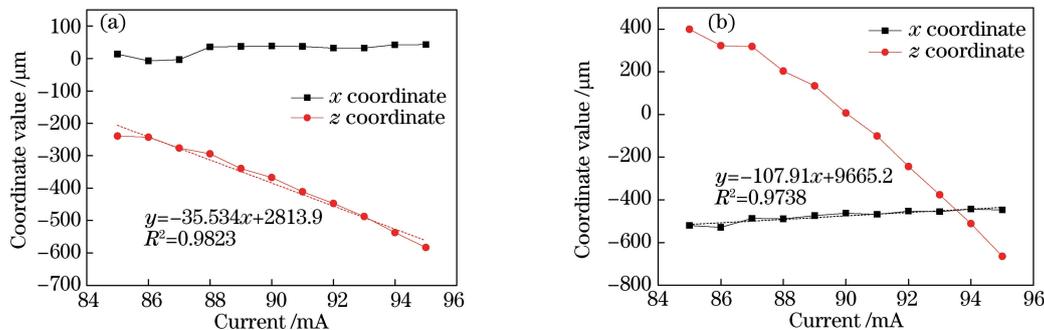


图 5 光斑中心位置的变化图。(a) 44 cm 处;(b) 167 cm 处

Fig. 5 Variation of spot center position. (a) At 44 cm; (b) at 167 cm

x 坐标没有明显变化,分别稳定在 $30\ \mu\text{m}$ 和 $-470\ \mu\text{m}$ 。 $44\ \text{cm}$ 处光斑中心的 z 坐标(垂直方向)随驱动电流的变化系数为 $-35\ \mu\text{m}/\text{mA}$; $167\ \text{cm}$ 处光斑中心的 z 坐标的变化系数为 $-108\ \mu\text{m}/\text{mA}$ 。

这种光束偏转效应是由充液型透镜的重力影响所致。在重力的影响下,当透镜竖直放置时,光轴在水平方向,透镜外膜在重力作用下下垂,发生形变。电流越偏离无焦电流($79.94\ \text{mA}$),则屈光度越大,焦距越短,透镜的弹性膜越凸出,曲率半径越小,受到重力的影响越大,光束偏转和光斑中心下移越明显。根据图 5,当驱动电流在 $85\sim 95\ \text{mA}$ 范围内, $50\ \text{m}$ 处光斑中心的下移距离小于 $3.7\ \text{cm}$ 。根据 $87\ \text{mA}$ 驱动电流下的光束发散角推算得到远场光斑直径为 $4\sim 7\ \text{cm}$ 。光斑中心的下移对遥测效果产生的影响有限,可通过微调激光器的出射角度来补偿,也可以将变焦透镜水平放置,再加一个双面反射的直角棱镜将垂直光束折转为水平光束输出,从而避免重力效应。

3.4 重力效应的建模与仿真分析

然而,在成像系统中,光束偏转和光斑中心的下移会影响成像质量,因此有必要对重力对光束发散

的影响进行理论分析和建模仿真。变焦透镜的仿真结构如图 6(a)所示,它包括两个盖玻片(序号 1 和 3)和弹性膜折射表面(序号 2)。利用(2)式并按照 Optotune 透镜的参数在 MATLAB 中计算出表面点的三维分布,在 SolidWorks 程序中绘制光学表面模型,然后导入 ZEMAX 生成透镜有效工作面(序号 2)。根据产品手册,在无重力的理想情况下变焦透镜可视为球透镜(曲率半径为 r),其半球面的三维分布如图 6(b)中点 $B(x, y, z')$ 所在的实线曲线所示,按照薄透镜公式并根据折射率和球面半径可以推导出薄透镜的焦距。球面受到重力的影响时,会发生下垂,而水平方向($yo z$ 面内)上则不受重力的影响,如图 6(b)中点 $A(x, y, z)$ 所在的曲线所示。其中受重力影响的垂直形变量 $\Delta z = z - z'$ 。根据杠杆形变理论,杆臂上某点的形变量与受力和力臂之积即力矩成正比。透镜表面上的点所受重力是该点所处高度 z 的线性函数,力臂是该点到轴的垂直距离即 x 。假设重力的影响系数用常数 k 表示,则 $\Delta z = kz x$ 。通过 $z' = z + \Delta z$ 将形变点 A 还原成未形变的球面点 B , A 点满足

$$x^2 + y^2 + (z + kz x)^2 = r^2 (x > 0). \quad (2)$$

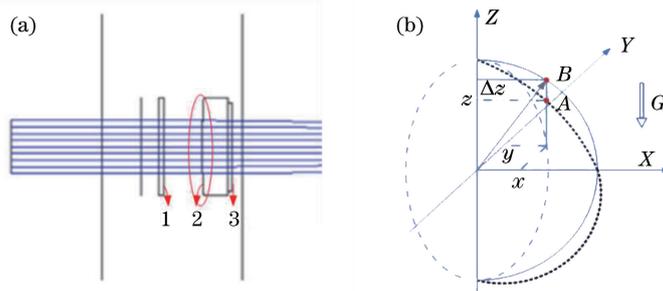


图 6 ZEMAX 仿真中的变焦透镜。(a)变焦透镜结构;(b)变焦透镜表面受重力影响的形变模型

Fig. 6 Zoom lens in ZEMAX simulation. (a) Structure of zoom lens; (b) deformation model of zoom lens surface affected by gravity

根据实际 DFB 激光器设定光源发散角(与 W 方向的夹角为 20° ,与 V 方向的夹角为 22.5°),在非序列模式下按照光源、准直透镜、变焦透镜、探测器的传播路径进行模拟。准直透镜采用普通透镜(74UV-FC,西安磊鑫激光科技,中国),焦距为 $5\ \text{mm}$,准直镜与激光器的距离为 $5.03\ \text{mm}$ 。

具体建模过程如下:1)以曲率半径 $r = 5\ \text{mm}$ 的球面为例,其焦距为 $167\ \text{mm}$;重力影响系数 k 采用初始值 0.0001 ,将其代入形变曲面公式,利用 MATLAB 获得曲面各点的三维坐标;2)将三维坐标导入 SolidWorks,利用网格化曲面功能建立曲面模型;3)将曲面模型导入 ZEMAX 软件进行光线

追迹,用操作数函数 NSDD 获得光斑尺寸和位置。考虑变焦透镜的通光孔径为 $10\ \text{mm}$,在仿真过程中只计算曲面中 (x, y) 在半径为 $5\ \text{mm}$ 的圆内的点。固定驱动电流为 $95\ \text{mA}$ (焦距 $f = 1876\ \text{mm}$),计算不同的 k 值与光斑中心坐标的关系,发现光斑中心在 x 方向(水平)没有发生明显移动,在 z 方向(竖直)发生下移,这与实验现象吻合。偏移量 Δz 与 k 之间近似呈线性关系。实验观测到的光斑中心下移量为 $665.2\ \mu\text{m}$,对应的 k 约为 0.00013 。在距离可变变焦透镜 $1670\ \text{mm}$ 处,对三个驱动电流下的焦距进行仿真。表 2 为光束偏转角的实测值与仿真值的对比。由表 2 可知,偏转角

实测值为 $-0.023^\circ \sim 0.014^\circ$, 仿真值与实测值的最大差值为 0.003° 。

陈帅^[22]发现偶次非球面模型比简单的球面模型更符合实际的膜表面形状, 则有

$$\omega = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+n)c^2r^2}} + \sum_{i=2}^N a_{2i}r^{2i}, \quad (3)$$

式中: ω 为薄膜的挠度; r 为薄膜表面相对中心处的径向距离; c 为薄膜中心处曲率; n 为锥面系数; a_{2i} 为系数, 通过对透镜的曲面进行数值拟合获得; r^{2i}

为对偶次非球面模型的标号为 $2i$ 的偶数项; N 为多项式的截止阶数。不同的 n 值对应不同的曲面类型(扁球面、椭球面、球面等)。(3)式中等号右侧第一项为一般的二次非球面方程, 其余项为二次抛物面方程。将(3)式代入(2)式中, 重新计算不同焦距时重力效应引起的偏转角。仿真中, n 值在 $0 \sim 0.1$ 之间变化, n 值取 0.03 时, 仿真结果与实验数据最接近, 对比发现非球面模型的偏转角误差降低了一个数量级, 如表 2 所示。

表 2 不同模型、不同焦距的偏转角实测值与仿真值

Table 2 Measured and simulated values of deflection angle for different focal lengths of different models

Current /mA	Focal length /cm	Measured angle /($^\circ$)	Spherical model		Aspherical model	
			Simulation angle /($^\circ$)	Error /($^\circ$)	Simulation angle /($^\circ$)	Error /($^\circ$)
85	374.5	0.01369	0.01300	-0.00069	0.01357	-0.00012
92	220.8	-0.00835	-0.00738	0.00097	-0.00842	-0.00007
95	187.6	-0.02282	-0.02572	-0.00290	-0.02297	-0.00015

4 遥测分析

4.1 浓度标定

首先使用甲烷气袋进行浓度标定, 以便准确测量泄漏浓度。在光路末端放置角反射镜, 角反射镜与非涅耳透镜相距 0.5 m 。将浓度为 1% 、 0.5% 、

0.1% 的甲烷气袋分别悬于角反射镜前。激光器的扫描电流为 $20 \sim 80 \text{ mA}$, 对应的波长扫描范围可以完全覆盖甲烷在 1653.7 nm 处的吸收峰, 得到三个浓度下的 $2f$ 光谱, 如图 7(a) 所示。计算不同浓度的 $2f$ 谱峰峰值(p-p), 得到它与甲烷积分浓度的关系曲线如图 7(b) 所示, 拟合优度为 0.9947 。

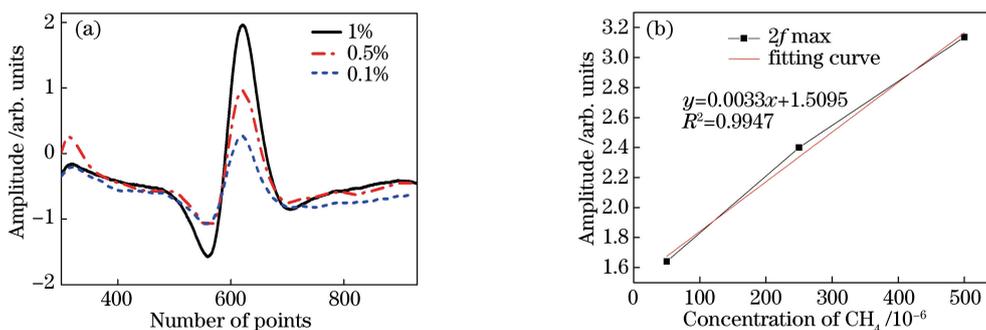


图 7 浓度标定。(a)不同浓度甲烷的 $2f$ 光谱图;(b) $2f$ 信号峰峰值与积分浓度的关系

Fig. 7 Concentration calibration. (a) $2f$ spectra of methane at different concentrations;

(b) relationship between peak-peak value of $2f$ signal and integral concentration

4.2 稳定性分析

采用甲烷浓度为 5×10^{-3} 的密封气袋, 先采集 35 组光谱, 计算得到峰峰值均方根为 0.0419 。峰值位置稳定在第 624 个点附近, 均方根为 1.304 , 这证明遥测仪的横向与纵向漂移都很小。连续测量约 0.5 h , 采集 2126 组数据, 结果如图 8(a) 所示, 测量浓度的读数范围是 $4984.06 \times 10^{-6} \sim 5014.75 \times 10^{-6}$, 标准差为 5.67×10^{-6} 。对测试读数进行 Allan 方差分析, 得到 Allan 标准差与积分时间双对数曲线, 如图 8(b) 所示。当积分时间 τ 为 1 s (采样

时间)时, 检测系统的 Allan 标准差(1σ)为 3.74×10^{-6} 。当积分时间增加到 18 s 时, 极限标准差达到最小, 为 1.51×10^{-6} 。

4.3 遥测实验

实验楼中有几个用于油气研究的实验室, 为检测楼道中的空气中是否存在实验过程扩散的甲烷, 将遥测装置置于楼道的一端, 辅助目标和气袋置于另一端, 如图 9(a) 所示。图 9(b) 展示了遥测装置的光学器件, 其中 1 为非涅耳透镜, 2 为准直镜, 3 为可变焦透镜。根据探测器收集的回波信号幅度自动调

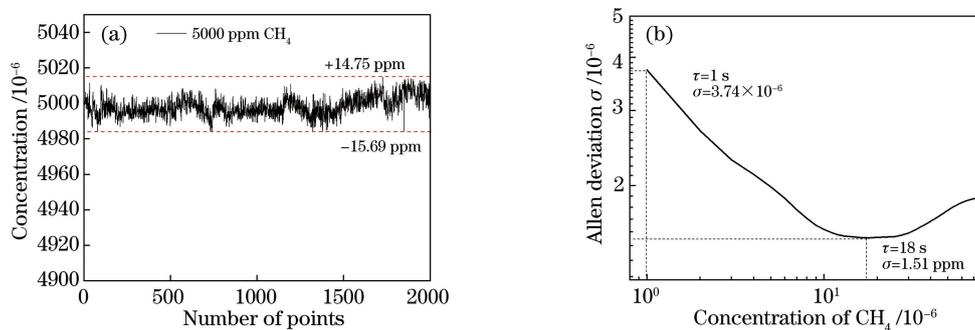


图 8 稳定性测试。(a) CH₄ 浓度读数;(b) Allan 方差曲线

Fig. 8 Stability test. (a) CH₄ concentration reading; (b) Allan variance curve

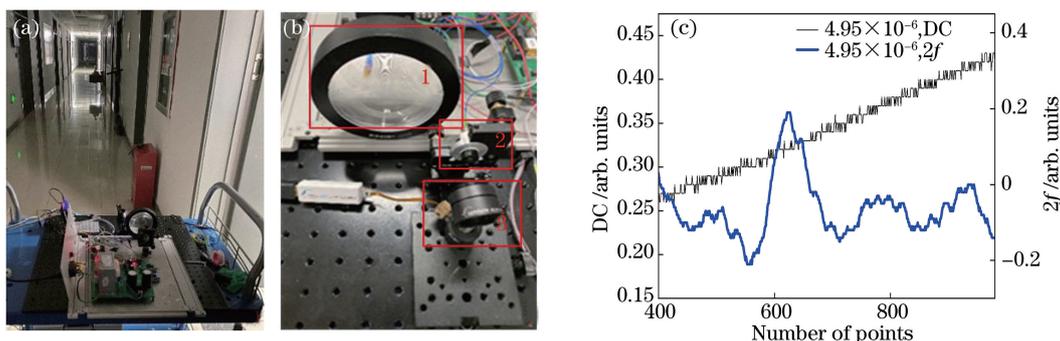


图 9 遥测装置和结果。(a)测试楼道中的甲烷泄漏;(b)遥测装置的光学器件;(c) 4.95×10^{-6} 浓度甲烷测试光谱图

Fig. 9 Telemetry device and results. (a) Test for methane leaking in corridor; (b) optical devices of telemetry device;

(c) test spectrum for methane concentration of 4.95×10^{-6}

节变焦透镜的驱动电流,使接收功率最大。选择 0.1% 的甲烷浓度作为参考,根据(1)式的线性回归,计算楼道内的路径积分浓度,两天的测试结果如表 3 所示。除去甲烷气袋对路径积分浓度的贡献,得到第一天的甲烷浓度约为 7.40×10^{-6} ,第二天的甲烷浓度约为 4.95×10^{-6} 。一般空气中的本底甲烷浓度约为 1.76×10^{-6} ,楼道内甲烷浓度明显高于一般

空气中的本底甲烷浓度,这印证了楼道内在开展油气实验。第二天有大风,楼道中的甲烷容易扩散,因此浓度降低。采集第二天更低浓度甲烷的检测光谱信号,如图 9(c)所示。由图 9(c)可知,检测装置在检测低浓度甲烷时,二次谐波的光谱结构仍清晰可见,测试证明了基于电控变焦透镜的光路自动准直的甲烷遥测装置用于实际中甲烷泄漏检测时具有高灵敏度。

表 3 现场测试结果

Table 3 Field test results

Test No.	Test distance /m	Integral concentration / 10^{-6}	Average concentration / 10^{-6}
1	100.0	740.0	7.40
2	104.4	516.9	4.95

5 结 论

研究了基于光信号自动优化的甲烷遥测装置,在光学准直系统中引入电控可变焦透镜,通过动态改变可变焦透镜的焦距压缩激光器的发散角,提高遥测装置的光接收效率。实验结果显示,不同的驱动电流(透镜焦距)对光束的发散作用不同。针对不同的检测情形,利用透镜对电流的快速响应迅速调整激光的发散特性,该方法具有很好的动态响应效

果;同时发现存在最优的发散特性可使遥测装置的回波光功率的接收率提高至少 1.7 倍,并提高了检测系统的信噪比。对实验过程中存在的光束重力偏转效应进行了测量分析,提出了形变模型并进行了 ZEMAX 仿真,发现仿真结果与测试结果较好地吻合。在稳定性测试中,当积分时间为 18 s 时,装置读数达到极限标准差(1σ),即 1.51×10^{-6} 。在楼道内检测到空气中 4.95×10^{-6} 浓度的甲烷气体,测试距离达到 52.2 m,这证明了该装置适用于甲烷泄漏遥测。

参 考 文 献

- [1] Pan M Z, Qi H X, Li Z W, et al. Airborne inspection of natural gas pipeline [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(6): 410-414.
潘明忠, 亓洪兴, 李正文, 等. 一种适于直升机平台的天然气管道泄漏监测技术 [J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(6): 410-414.
- [2] Li J, Lu X T, Yang Z H. Remote system of natural gas leakage based on multi-wavelength characteristics spectrum analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5): 1249-1252.
李静, 鲁旭涛, 杨泽辉. 基于多特征波长光谱分析的天然气泄漏遥测系统 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(5): 1249-1252.
- [3] Vengosh A, Jackson R B, Warner N, et al. A critical review of the risks to water resources from unconventional shale gas development and hydraulic fracturing in the United States [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8334-8348.
- [4] Al-Saidi I A. Using a simple method: conversion of a Gaussian laser beam into a uniform beam [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(2): 75-79.
- [5] Cui F X, Li D C, Wu J, et al. Adaptive feature extraction algorithm based on Lasso method for detecting polluted gas [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0530003.
崔方晓, 李大成, 吴军, 等. 基于 Lasso 方法的污染气体自适应探测算法 [J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0530003.
- [6] Zhang S, Liu W Q, Zhang Y J, et al. A mobile sensor for remote detection of natural gas leakage [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(2): 570-574.
张帅, 刘文清, 张玉钧, 等. 一种移动式遥测天然气泄漏检测仪 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(2): 570-574.
- [7] Li Z W, Qi H X, Xiao G H, et al. Airborne infrared laser radar inspection technique for natural gas pipeline leakage [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2398-2402.
李正文, 亓洪兴, 肖功海, 等. 机载红外激光雷达监测天然气管道泄漏技术 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(12): 2398-2402.
- [8] Pang T, Wang Y, Xia H, et al. Full scale methane sensor based on TDLAS technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(9): 0912003.
庞涛, 王煜, 夏滑, 等. 基于 TDLAS 技术的全量程激光甲烷传感器 [J]. *光子学报*, 2016, 45(9): 0912003.
- [9] Ding W W, Sun L Q, Yi L Y. High sensitive scheme for methane remote sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(10): 100702.
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): 100702.
- [10] Zhang Z, Zhang L Y. TDLAS-based methane telemetry technology [J]. *Journal of Changchun University*, 2011, 21(3): 9-12.
张卓, 张丽英. 基于 TDLAS 的甲烷遥测技术 [J]. *长春大学学报(自然科学版)*, 2011, 21(3): 9-12.
- [11] Gong W H. Research on key technologies of gas remote sensing based on open path tunable diode laser absorption spectroscopy [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
宫卫华. 基于开放光路可调谐半导体激光吸收光谱技术气体遥测关键技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [12] Jiang Z S, Wang F, Xu T, et al. CH₄ gas remote sensing by a transceiver system based on TDLAS technology [J]. *Energy Engineering*, 2012(3): 1-5.
姜治深, 王飞, 许婷, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的甲烷遥测方法的研究 [J]. *能源工程*, 2012(3): 1-5.
- [13] Zhang Y, Zhang X, Shi G W, et al. Applications of liquid lenses in zoom systems [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 46-56.
张鹰, 张新, 史广维, 等. 液体透镜在变焦系统中的应用 [J]. *中国光学*, 2013, 6(1): 46-56.
- [14] Chu X, Zhu L Q, Meng X C, et al. Quick focusing method in bionic vision based on the liquid lens [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(2): 203-209.
褚翔, 祝连庆, 孟晓辰, 等. 一种基于液体透镜的仿生视觉快速调焦方法 [J]. *激光与红外*, 2017, 47(2): 203-209.
- [15] Lu W, Fu D Y, Sun Y P, et al. Initial approach about application of liquid lens in space exploration [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2007, 28(1): 25-29.
卢威, 傅丹鹰, 孙燕萍, 等. 液体镜头技术应用于空间探测的初步探讨 [J]. *航天返回与遥感*, 2007, 28(1): 25-29.
- [16] Ji W H, Song D, Li G L. Automatic collimation optical remote measurement system: CN107167812A [P]. 2017-09-15.
季文海, 宋迪, 李国林. 一种自动准直的光学遥测系统: CN107167812A [P]. 2017-09-15.
- [17] Dong L, Tittel F K, Li C G, et al. Compact TDLAS based sensor design using interband cascade lasers for mid-IR trace gas sensing [J]. *Optics Express*, 2016,

- 24(6): A528-A535.
- [18] Li G L, Dong E T, Ji W H. A near-infrared trace CO₂ detection system based on an 1, 580 nm tunable diode laser using a cascaded integrator comb (CIC) filter-assisted wavelength modulation technique and a digital lock-in amplifier [J]. *Frontiers in Physics*, 2019, 7: 199.
- [19] Li J S, Deng H, Li P F, et al. Real-time infrared gas detection based on an adaptive Savitzky-Golay algorithm [J]. *Applied Physics B*, 2015, 120(2): 207-216.
- [20] He J F, Liu W Q, Zhang Y J, et al. A denoising method for backscatter signal of laser ceilometer based on Hilbert-Huang transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0201001.
- 何俊峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 基于希尔伯特-黄变换的激光云高仪后向散射信号去噪方法 [J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0201001.
- [21] Ji W H, Lü X C, Hu W Z, et al. Application of TDLAS technology to multicomponent detection in olefin production process [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1837-1845.
- 季文海, 吕晓翠, 胡文泽, 等. TDLAS 技术在烯烃生产过程中的多组分检测应用 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(8): 1837-1845.
- [22] Chen S. Study on the variable focus liquid lens using PDMS membrane [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- 陈帅. PDMS 薄膜型可变焦液体透镜研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.