



DOI: 10.12086/oe.2020.190280

气体光学检测技术及其应用研究进展

沈英, 邵昆明, 吴靖*, 黄峰, 郭禹泽

福州大学机械工程及自动化学院, 福建 福州 350116

摘要: 气体的快速识别与检测已成为国内外研究者迫切解决的重大问题。随着光学技术的快速发展, 气体光学检测技术以其高效率、多组分、高灵敏度等显著优势而成为气体检测领域的重要研究热点之一。本文介绍了气体光学检测技术的理论基础, 并按主动式与被动式两大类综述了各种典型气体光学检测技术的工作原理及应用进展。运用这些气体检测技术, 已经对几十种气体实现远距离、高灵敏度的连续实时监测, 完成了多种场景下对气体成分、浓度、温度等参数的测量, 有效减少了危险事故的发生。通过总结和分析现有气体光学检测技术仍存在的技术问题, 对未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 气体光学检测; 吸收光谱法; 主动式检测; 被动式检测; 光谱成像

中图分类号: O659.32; O433.1

文献标志码: A

引用格式: 沈英, 邵昆明, 吴靖, 等. 气体光学检测技术及其应用研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(4): 190280

Optical gas detection: key technologies and applications review

Shen Ying, Shao Kunming, Wu Jing*, Huang Feng, Guo Yuze

College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China

Abstract: Rapid identification and detection of gases is a major problem that needs to be solved urgently by researchers from worldwide. With the development of optical technology, optical gas detection technology has attracted great attention due to its remarkable advantages of high efficiency, multi-component detection ability and high sensitivity. In this paper, the theoretical foundation of optical gas detection technology is first introduced. Then the working principles and applications of various optical detection technologies for typical gases according to active and passive detection are reviewed. Using these gas detection technologies, dozens of gases have been continuously monitored at long distance with high sensitivity. The measurements of gas composition, concentration, temperature and other parameters in a variety of scenarios are realized, which effectively reduces the occurrence of dangerous accidents. By summarizing and analyzing the technical problems that still exist in the current optical gas detection technology, the future development trend is prospected.

Keywords: optical gas detection; absorption spectroscopy; active detection; passive detection; spectral imaging

Citation: Shen Y, Shao K M, Wu J, et al. Optical gas detection: key technologies and applications review[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(4): 190280

收稿日期: 2019-05-29; 收到修改稿日期: 2019-08-15

基金项目: 福建省科技厅引导性项目(2017N0013)

作者简介: 沈英(1982-), 女, 博士, 教授, 主要从事光学检测、光机电一体化与自动控制的研究。E-mail: yshen@fzu.edu.cn

通信作者: 吴靖(1986-), 男, 博士, 讲师, 主要从事光学测试、光学流动成像的研究。E-mail: wujing@fzu.edu.cn

版权所有©2020 中国科学院光电技术研究所

1 引言

随着全球经济的快速发展,人们对能源和化工原料的需求日益增加,虽然这些能源和化工原料为日常生活带来极大的便利和改善,但与之俱来的各个领域的气体泄漏事故却时有发生。常用的易燃易爆气体如石油气、甲烷和氯乙烯等可能会因泄露而引发爆炸、火灾等事故。2018年11月,河北省张家口市中国化工集团河北盛华化工有限公司氯乙烯气柜发生泄漏并扩散到厂区外公路上,遇明火发生爆燃,致多人死亡。类似这种气体泄漏事故还会导致巨大的经济损失。此外,一些无毒、无味和看似无害的气体,也会对人类生活环境造成极大危害。例如,通常用于电力系统的SF₆气体和诸如生产生活中排放的CO₂之类的气体将导致温室效应,造成全球气候变暖。

因此,发展气体检测技术,实现在各种场景下快速、定性、定量地识别和探测有害气体,防止危险事故的发生,成为当前研究人员迫切解决的问题。

传统气体检测主要是人工采样^[1]和预处理采样^[2]。传统化学测量方法,包括化学反应方法、电化学法、色谱及质谱相关技术,都属于人工采样的方式。人工取样后,将试样进行分离、富集和掩蔽,通过特定的化学反应或计量关系,只能在实验室对气体进行分析,或进行现场初步定性定量的分析。预处理采样是将预处理的测量气体输送到测量管中,并通过测量安装在管道两端的光学探头(红外或紫外探头)来测量气体的浓度。由于传统气体传感器的接触性原理,使其难以实现远距离精确测量,且大多数传统气体传感器(电化学气体传感器、PID气体传感器等)只能对目标气体进行单点监测^[3-4],难以满足大范围实时动态监测。

随着光谱成像技术的发展,光谱学方法发展日趋迅速,相比于传统的气体检测方法,光谱法不需要样品制备,具有快速、非侵入、高效和动态等优点,适用于现场快速检测和连续实时在线分析,成为各国研究和应用的热点。本文首先介绍气体光学检测技术的理论基础及工作原理,其次对气体光学检测的技术特点及应用领域进行了归纳对比,重点阐述了各检测技术的应用研究现状,最后对气体光学检测技术的发展与应用进行总结与展望。

2 理论基础

2.1 分子吸收光谱理论

分子中包含原子和电子,分子、原子和电子都是

具有能量且运动着的物质。分子内有三种形式的运动状态能量:电子的运动能量 E_e 、原子的运动能量 E_v 以及分子的转动能量 E_j ,则分子能量的总和 E 为

$$E = E_e + E_v + E_j \quad (1)$$

当一定频率的光穿过待测气体时,待测气体中的分子吸收一个具有一定能量的光子,完成较低能级基态 E_1 到较高能级基态 E_2 的跃迁,被吸收光子的能量必须与分子跃迁前后的能量差完全相等,否则不能被吸收。不同的分子受到辐射时有着不同的振动方式,所以结构不同的两种物质必然会有两种不同的吸收光谱。图1是根据HITRAN数据库模拟的几种常见气体分子的吸收谱线^[5]。

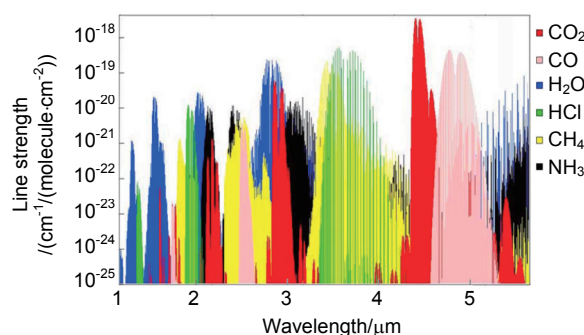


图1 常见气体分子的吸收谱线^[5]

Fig. 1 Absorption line of common gas molecules^[5]

2.2 Lambert-Beer 定律

朗伯-比尔(Lambert-Beer)定律^[6]是光谱吸收技术的基本理论来源。当一束单色光穿过物体时,由于光的反射、衍射以及物体中的散射介质对光的散射作用导致入射光的损耗,其原理如图2所示。气体浓度越大,对入射光的吸收衰减能力越强,其输出光强为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)LC] \quad (2)$$

式中: $I(\lambda)$ 为输出光强, $I_0(\lambda)$ 为输入光强, $\alpha(\lambda)$ 为待测气体在波长为 λ 处的吸收截面, L 为待测气体吸收路径的长度, C 为待测气体的浓度。本文所介绍的几种主动式气体检测技术都是基于Lambert-Beer定律而实现的。

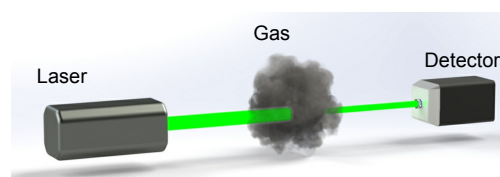


图2 光谱吸收原理图

Fig. 2 Principle of spectral absorption

2.3 层辐射传输模型

层辐射传输模型^[7]是被动式气体检测技术的理论基础。目标气体和背景的红外辐射在传输到检测系统期间受到环境辐射和大气的干扰,如图3所示,该模型将整个传输路径分成一系列匀质层,每个匀质层的光谱辐射都是其自身光谱辐射与传输到下一层的出射辐射之和,此时红外探测器接收到的出射辐射为

$$M_i = (1 - \tau_a \tau_b \tau_c) B_i + \tau_a \tau_b \tau_c M_{i-1} + \rho_i \quad (3)$$

式中: B_i 等效于第 i 层温度的黑体辐射, τ_a 、 τ_b 和 τ_c 分别是第 i 层目标、干扰物和大气的透过率, M_{i-1} 为前一层的出射辐射, ρ_i 为第 i 层内所有成分的散射。

为方便研究,假设各传输层的大气分布是均匀的,则可以将层辐射传输模型简化为三层辐射传输模型,如图4所示。从右至左第一层为背景层,第二层为目标气体层,第三层为大气层,此时红外探测器接收到的出射辐射:

$$M_1 = \tau_1 [(1 - \tau_2) B_2 + \tau_2 M_3] + (1 - \tau_1) B_1 \quad (4)$$

式中: τ_i 为第 i 层的透过率, B_i 为第 i 层温度的黑体辐射, M_3 为背景层发射到目标气体层的辐射。

3 气体光学检测技术分类

现有气体光学检测方法按有无外置光源可以分为主动式检测和被动式检测两种。

主动式气体检测通常使用红外或紫外激光作为外置光源,其检测方式都是基于待测气体对激光光源的辐射吸收来实现的,待测气体与背景之间不需要温差,信噪比高,稳定性好;但是由于配有激光光源等设备,使得其体积重量较大,系统结构复杂。典型的主动式气体光学检测技术包括可调谐二极管激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)技术、差分吸收激光雷达(differential absorption LiDAR, DIAL)技术、差分吸收光谱(differential optical absorption spectroscopy, DOAS)技术等。

被动式气体检测不需要光源,系统结构简单,根据待测气体与背景之间的温度差来探测气体,其可检

测光谱范围大,远距离探测能力强;但是信噪比较低,且被测气体和背景之间必须存在相对温差。典型的被动式气体光学检测技术包括被动式遥感傅里叶变换红外光谱(remote sensing Fourier transform infrared spectroscopy, RS-FTIR)技术和光谱成像(spectral imaging, SI)技术,表1分类对比了几种典型气体光学检测技术。

4 主动式气体检测技术

4.1 可调谐二极管激光吸收光谱技术

可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术由Hinkley^[8]在20世纪70年代提出,近年来因其高灵敏度、高选择性等特点而迅速发展。其利用待测气体对红外光谱的吸收特性,并基于朗伯-比尔定律,通过选择性吸收测量气体来定量分析激光能量的衰减,进而获得气体的成分和浓度。可通过对激光器加载变化的电流和工作温度来改变出射光波长,从而得到比多普勒线宽^[9]更窄的光谱分辨率来扫描一条独立的气体吸收线,实现对气体分子极难分辨的吸收谱线测量,待测气体的成分或浓度最终通过最小二乘法对所得谱线进行拟合而得到^[10]。

TDLAS技术可分为直接吸收光谱技术和调制光谱技术,其中,调制光谱技术又可分为波长调制光谱技术(WMS)^[11]和频率调制光谱技术(FMS)^[12],调制光谱技术可实现更小的吸光度探测(低至 10^{-3} 量级)。目前,TDLAS技术的主要缺点是激光器的波长范围较小,一定程度上限制了可探测气体种类,目前使用较多的光源主要包括以下几种:分布反馈(DFB)二极管激光器,输出功率在10 mW左右,带宽2 MHz左右,波长范围大概在 $0.73 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$,且无需制冷,可以带尾纤输出;垂直腔表面发射激光器(VCSELs),波长范围在 $1.4 \mu\text{m} \sim 2.3 \mu\text{m}$ 之间,与DFB相比具有较宽的调谐范围(约5 nm)和较大的电流调谐率($\Delta\lambda/\Delta I$);外腔二极管激光器(ECDL),波长范围在 $1.49 \mu\text{m} \sim 1.58 \mu\text{m}$ 之间,通常只适用于实验室;带间级联激光器(ICL),其工作波长短,波长覆盖范围达 $3 \mu\text{m} \sim 6 \mu\text{m}$;量子级联

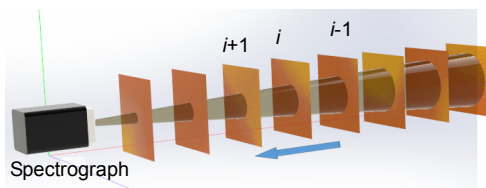


图3 被动遥测层辐射传输模型

Fig. 3 The multiplayer model of passive remote

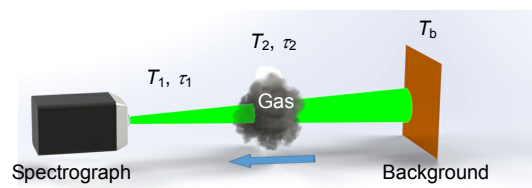


图4 被动遥测三层模型

Fig. 4 Three-layer model of passive remote sensing

表 1 典型气体光学检测技术对比

Table 1 Comparison of typical gas optical detection techniques

| 名称 | 优点 | 缺点 | 工作波段 | 应用领域 | |
|--------------|--------------------------------------|--|--|--|---|
| 可调谐二极管激光吸收光谱 | 环境适应性强； 选择性强； 易于小型化； 结果无需标定 | 光源波长范围小； 可同时测量气体种类少 | 近红外波段： (0.73 μm~3 μm)； 中红外波段： (2 μm~15 μm) | 大气环境监测； 工业过程检测； 流场诊断 | |
| 主动式检测 | 差分吸收激光雷达 | 测量结果偏差较小； 信噪比高； 可三维监测； 远距离遥感测量 | 易受大气折射率湍流的影响； 受人眼安全和可靠性的限制 | 紫外波段： (1.4 μm~4.2 μm) | 大气气溶胶云映射、 云雾测量； 污染气体测量； 天然气排放检测 |
| | 差分吸收光谱 | 系统实时性好； 价格便宜； 光程上的线测量 | 易受随机噪声干扰； 点位选取要求苛刻； 安装复杂 | 紫外波段： (0.19 μm~0.5 μm)； 可见光波段： (0.55 μm~0.7 μm) | 大气在线监测； 脱硫脱硝； 电厂烟气排放； 对 NO _x 、SO ₂ 和 O ₃ 检测效果显著 |
| 被动式检测 | 被动式遥感傅里叶变换红外光谱 | 无分光元件； 处理速度快； 无需光谱扫描； 可同时测量污染物种类多 | 易产生相位误差； 傅里叶变换计算耗时； 干净环境中痕量气体测量时灵敏度低； 系统需冷却 | 近红外波段： (0.75 μm~3 μm)； 中红外波段： (3.3 μm~40 μm)； 远红外波段： (40 μm~330 μm) | 污染物发射率测量； 腐蚀性气体测量； 温度和烟气测量； 温室气体测量； 挥发性有机物 (VOCs) 测量 |
| | 光谱成像 | 光谱分辨率极高； 连续的地物光谱信息； 极高的探测和识别能力； 可探测被测物的状态参量 | 系统结构复杂； 数据量庞大； 图像处理步骤复杂； 空间分辨率较低 | 紫外、可见光、近红外和中红外波段 (0.24 μm~12.5 μm) | 军事侦察识别； 温室气体监测； 水体监测； 植被识别； 资源勘探； 海洋遥感 |

激光器(QCL)，输出光功率大于 10 mW，光束发射角小于 6 mrad，带宽 7 MHz 左右，工作波长在 4.5 μm~17 μm 之间。

TDLAS 技术可探测的气体类型十分广泛，且易于小型化，适用于对 CO_x、SO_x、HX、烷烃类、水蒸气、O_x、硫化物及 NH₃ 逃逸的探测^[13-15]。不同波长的激光器可实现不同气体的探测，获得不同的检测限，其中对 H₂S 气体在波长为 7328 nm 中波红外处可达到该技术的最低检测限 8×10⁻¹²，精度偏差低至 2%，有效探测距离达 30 m。近几年，由于碳氢化合物类气体的泄漏引发了较多重大安全事故，研究者对此进行了大量研究。Deng 等^[16]利用基于 TDLAS 的波长调制谐波相结合的长光程反射结构检测技术实现对矿井中 CH₄ 浓度分别为 50 ppm、99.8 ppm 和 200 ppm 时随温度 -5 °C~50 °C 和压强 0~75 kPa 而变化的所测浓度变化，根据温度和压强对浓度的影响可以得到一个相关函数，以校正所测浓度偏差在 2% 以内。Wagner 等^[17]利用基于波长为 1535 nm 的光纤耦合分布反馈式二极管激光器(DFB-LD)的 TDLAS 技术首次实现了火焰环境中 C₂H₂ 的原位定量测量，该测量过程中无需校准。

Wang 等^[18]采用基于 VCSELs 和主成分分析法的 TDLAS 技术实现了 C₃H₈ 气体的爆炸预警，最小可探测浓度在 300 ppm 左右，相对偏差在 5% 以内。图 5 是 He 等^[19]研究的基于 WMS 的近红外双通道 C₂H₂ 检测系统装置结构图及测量结果。实验结果表明，该装置可连续 20 h 实现对 1000 ppm C₂H₂ 气体的长期监测，可保证相对偏差小于 2%，有效提高了运用 TDLAS 技术进行气体检测的测量精度。此外，TDLAS 技术还可以应用在生物医学工程领域的人体呼吸气诊断^[20]、深海溶解气体探测^[21]、航空发动机的燃烧流场诊断^[22]和液态水测量^[23]等领域。

随着测量环境的日趋复杂，TDLAS 技术未来主要从以下方向重点发展：处理算法更加成熟高效，测量的电子学系统、光学结构更加稳定，设备更加智能小型化，测量范围更广，检测限更低以满足不同领域需求等，将在工业、农业、安防等领域发挥越来越大的作用。

4.2 差分吸收激光雷达技术

差分吸收激光雷达(DIAL)技术是激光雷达技术的一种，最早由 Schotland 在 20 世纪 60 年代提出，早期

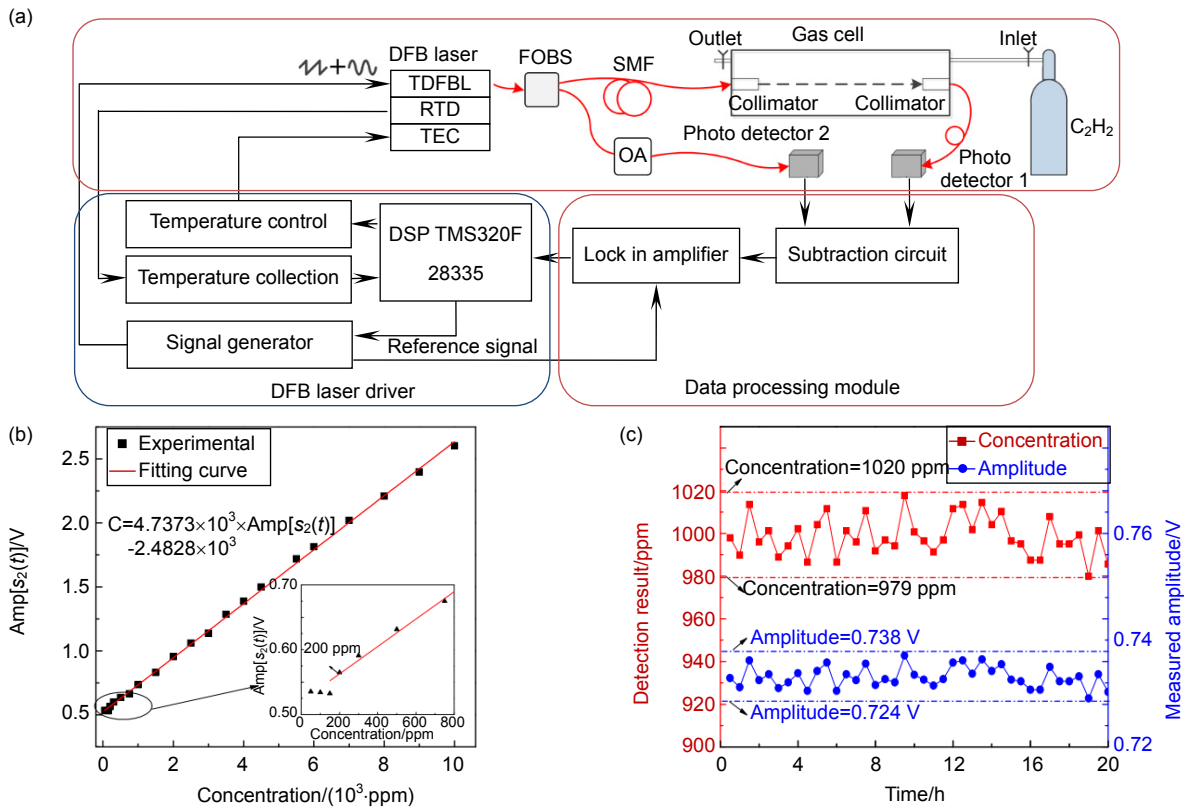


图 5 (a) 近红外 C₂H₂ 检测系统的结构; (b) 2f 信号幅值随 C₂H₂ 浓度的变化; (c) 对标准 1000 ppm C₂H₂ 的长期监测^[19]

Fig. 5 (a) Structure of the near-infrared C₂H₂ detection system; (b) Curve of the 2f signal's amplitude versus C₂H₂ concentration; (c) Long-term monitoring on the prepared standard 1000 ppm C₂H₂ sample^[19]

主要应用于大气水汽的探测。DIAL 技术原理如图 6 所示，激光器向待测气体发射两束波长差很小的短脉冲激光，其中一束波长 λ_D 位于待测气体分子吸收谱线内，气体分子的强吸收作用使得该路光束信号迅速衰减，另一束波长 λ_C 接近气体分子吸收谱线或在气体分子吸收谱线外，气体分子对该路光束信号吸收较少，系统中使用双激光器可以防止大气随机抖动所带来的测量误差。最后通过记录两束激光到达探测器的时间，利用时间反演得出光在气体中的传播距离，通过反射光强推导出激光穿过的气体浓度，探测距离可达几千

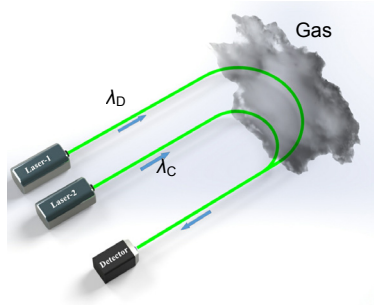


图 6 DIAL 系统原理

Fig. 6 Principle of differential absorption LIDAR system

米。当工作波长为 λ ，探测距离为 L 时，系统接收到的光功率为

$$P(\lambda, L) = P_0(\lambda) \eta(L, \lambda) \frac{S}{L^2} \cdot \frac{c\tau}{2} \rho_b(L) \delta_b(L, \lambda) \cdot \exp\left(-2 \int_0^L [\sigma(\lambda)N(r) + k_c(r)] dr\right), \quad (5)$$

式中： $P_0(\lambda)$ 是 t_0 时刻，波长为 λ 时激光发射的功率， $\eta(L, \lambda)$ 是探测器信号探测效率， S 为望远镜的面积， c 为光速， τ 为激光脉冲时间长度， $c\tau/2$ 是接收雷达折返信号的面积，其决定着系统空间分辨率大小。 $\rho_b(L)$ 是背散射系数为 $\delta_b(L, \lambda)$ 的散射物粒子数密度。大气中吸收分子粒子数密度为 $N(r)$ ，吸收截面为 $\sigma(\lambda)$ ，散射微粒衰减系数为 $k_c(r)$ ，指数部分反映了能量的吸收、衰减和后向散射。

1998 年，中国科学院安徽光机所研制出了国内第一台紫外 DIAL 装置，用于探测大气层中的 O₃^[24]。胡顺星等^[25]研制了一套用来探测背景大气 SO₂ 和 NO₂ 浓度的 DIAL 系统，该系统焦距为 750 mm，视场角 0.2 mrad~2 mrad，探测器有效面积为 25 mm×25 mm，如图 7 所示，通过获得 SO₂ 和 NO₂ 两种气体浓度理想的

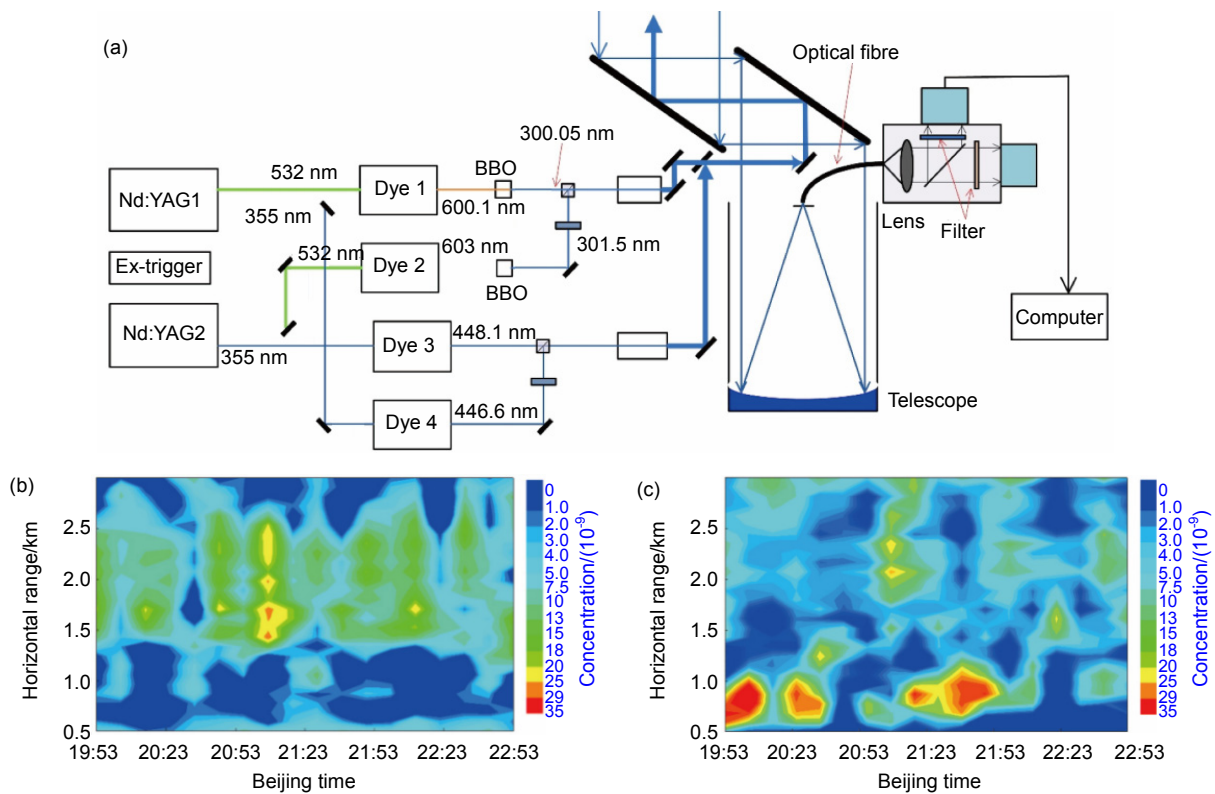


图7 系统原理图及测量结果。(a) SO₂/NO₂ 污染气体激光雷达系统框图;

(b) 激光雷达测量 SO₂ 的时间演化图; (c) 激光雷达测量 NO₂ 的时间演化图^[25]

Fig. 7 System schematic diagram and measurement results. (a) Schematic of SO₂/NO₂ DIAL system; (b) The evolution diagram of SO₂ measured by SO₂/NO₂ DIAL; (c) The evolution diagram of NO₂ measured by SO₂/NO₂ DIAL^[25]

激光波长对 448.1 nm/446.5 nm 和 300.05 nm/299.3 nm 来提高系统的探测精度,在空间分辨率为 15 m,时间积分为 30 min 时,可将大气 SO₂ 和 NO₂ 浓度测量误差分别控制在 $\pm 2.0 \times 10^{-9}$ 和 $\pm 5.0 \times 10^{-9}$ 的极小偏差范围内,测量距离可达 3.0 km 左右。

针对全球气候变暖,美国 NASA 兰利研究中心对基于 2 μm DIAL 技术的 CO₂ 探测系统进行了深入研究,2013 年提出了 2 μm 双脉冲积分路径差分吸收(integrated path differential absorption, IPDA)激光雷达,其采用高能量脉冲激光,提高了信噪比,并能够有效避免气溶胶和云雾的影响^[26]。2018 年 NASA 又对该技术进行了改进,相继研制出 2 μm 机载双脉冲、三脉冲 IPDA 系统,2 μm 机载双脉冲 IPDA 系统基于碲镉汞(MCT)电子发射雪崩光电二极管(e-APD)的高增益、高灵敏度和三维探测特性,对陆地和海洋上空的 CO₂ 进行了探测,机载三脉冲 IPDA 系统在双脉冲的基础上增加了一个低频信号 e-APD 通道,首次实现了基于 IPDA 系统的 CO₂ 和 H₂O 的同时测量^[27]。法国 Gibert 等^[28]研制出 2 μm 相干差分吸收激光雷达(coherent differential absorption LiDAR, CDIAL)系统,

通过选择较短的脉冲时间和较高的脉冲重复频率(PRF),提高系统的精度和时间、空间分辨率,实现对 CO₂ 吸收系数的远距离、高精度监测,1 km 探测范围内误差能够低至 2%。德国 Amediek 等^[29]研制出基于光参量振荡器(optical parametric oscillator, OPO)谐振腔的 1.57 μm 和基于机载 IPDA 的 1.645 μm 脉冲差分吸收激光雷达系统,其接收系统采用光电探测器,可实现 20 km 内 CO₂ 和 CH₄ 浓度的测量误差低至 0.5%,其中,对甲烷点源排放率分析得出了合理的结果($(26 \pm 3) \text{ m}^3/\text{min}$ 或 $(9.2 \pm 1.15) \text{ kt CH}_4/\text{yr}^{-1}$)。Meng 等^[30]提出了一种基于增频转换探测器(upconversion detector, UCD)的 DIAL 系统,如图 8 所示,UCD 建立在腔内泵系统上,该系统将 1064 nm 泵浦激光器与 1646 nm 激光雷达反向散射信号混合在一个 25 mm 长的周期性极化铌酸锂晶体中,通过光电倍增管(PMT)检测 646 nm 处的上转换信号,UCD 的噪声等效功率约为 127 fW/Hz^{1/2},在 IPDA 系统应用中明显优于 MCT 雪崩光电探测器,在对 CH₄ 的探测过程中,其差分吸收光学深度可达 3 km~9 km,测量相对误差低于 11%。

目前,DIAL 技术主要适用于紫外波段的以下气体

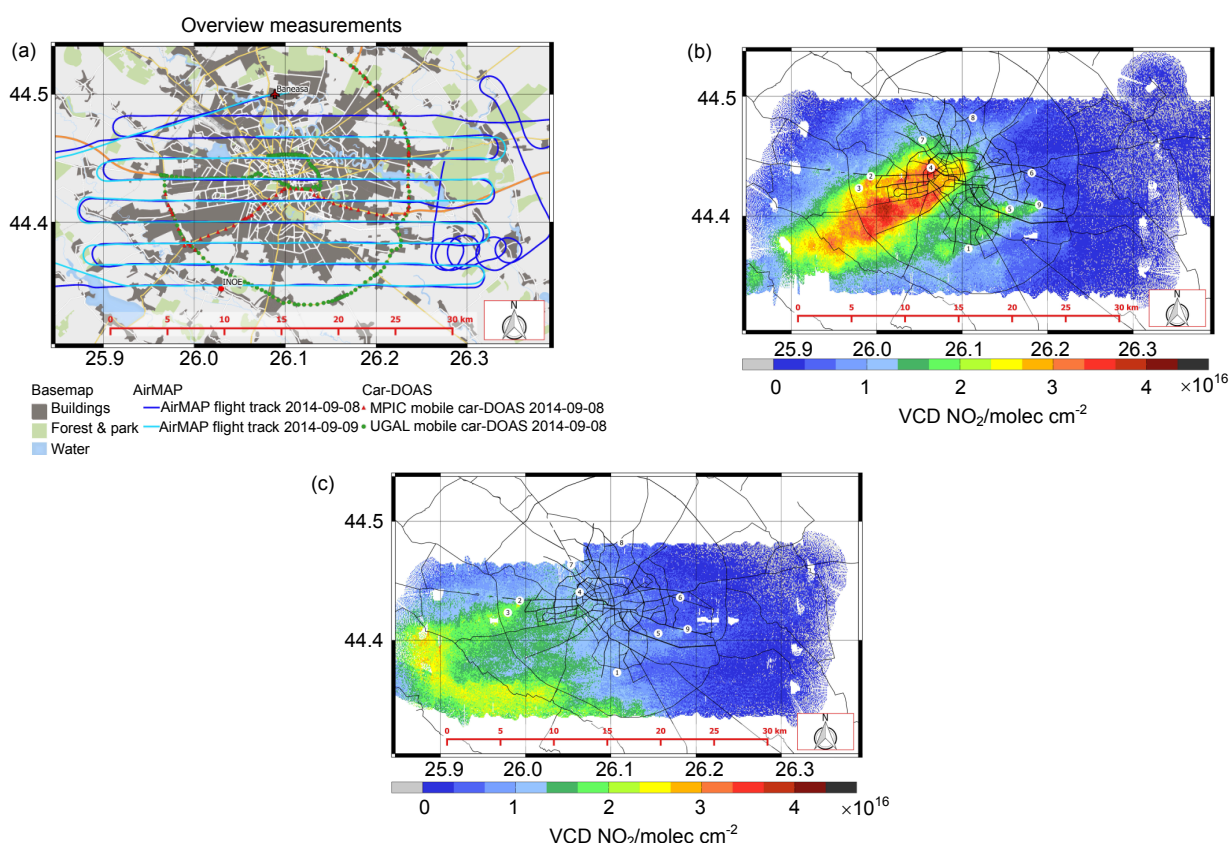


图 10 NO₂ 测量法及结果。(a) 布加勒斯特地图与测量概述；蓝色线代表测量轨迹，绿色圆点和红色三角形代表测量位置；(b) 第一天测得的几何修正后的 NO₂ 垂直柱密度；(c) 第二天测得的几何修正后的 NO₂ 垂直柱密度^[34]

Fig. 10 Measurement method and results of NO₂. (a) Map of Bucharest with an overview of the measurements ; Blue lines show the flight tracks , Circles and triangles mark the measurement locations; (b) Vertical column densities measured on first day; (c) Vertical column densities measured on second day^[34]

差分吸收光谱(MAX-DOAS)技术完成了对 O₃、NO_x、HCHO 等污染气体的精准监测^[38-40]；使用腔增强差分吸收光谱(CE-DOAS)技术实现了对 NO_x、CH₄ 和水蒸气的探测^[41-42]。

DOAS 技术主要适用于对 SO₂、NO₂、O₃ 以及多组分等污染气体的紫外和可见光波段检测，对应最低检测下限分别为 0.0016 mg/m³、0.018 mg/m³、0.031 mg/m³，最低浓度反演误差不超过 0.64%，系统成本较低，每台成本约 1~5 万左右。其采用传统的光源和光谱仪相结合的测量方式，在测量时的精度、信噪比和实时性等方面有着很大优势。目前大多数 DOAS 系统工作在紫外和可见光波段，为了拓宽该系统的气体检测范围，近年来基于红外波段的 DOAS 系统崭露头角，主要用于测量甲烷和二氧化碳等气体成分。硬件结构方面，为了在短时间内采集和平均多条吸收光谱数据，可采用快速扫描机构，以获得更高的信噪比。目前该技术在气体检测领域取得了重大进展，未来将在大气监测和其他领域发挥更重要的作用。

5 被动式气体检测技术

5.1 被动式遥感傅里叶变换红外光谱技术

傅里叶变换红外光谱(Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR)技术是 20 世纪 90 年代发展起来的气体光学检测技术，按有无外置光源可将 FTIR 技术分为主动式遥感 FTIR 技术和被动式遥感 FTIR 技术。被动式遥感 FTIR 技术因无外置光源而更加实用和方便，且能够实现对多组分气体的远距离实时监测。如图 11 所示，其无需外置光源，以自然环境为辐射背景，根据待测气体与背景之间的温度差，测得待测气体的红外辐射，最后根据气体对特定波长吸收峰的形状和大小经快速傅里叶变换后与数据库进行对比得到气体组分及浓度。

国内比较典型的是安徽光机所焦洋等提出的污染气体扫描式 FTIR 被动遥测系统，其光谱分辨率为 1 cm⁻¹，采集波段范围为 4000 cm⁻¹~600 cm⁻¹，视场角为 8 mrad，系统噪声等效辐射通量密度(NESR)为 5.3×10⁻⁹

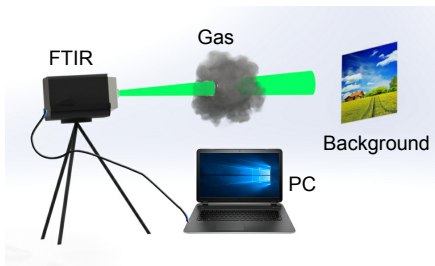


图 11 被动式遥感 FTIR 工作示意图

Fig. 11 Principle of passive remote sensing of FTIR

($W/cm^2 \cdot (Sr/cm)$), 通过将点探测光谱仪与二维扫描机构和可见光采集装置相结合, 有效地实现了对 $0.01 \text{ ppm} \cdot m \sim 126.59 \text{ ppm} \cdot m$ 浓度范围的 SF_6 浓度分布态势的探测, 并利用噪声等效柱浓度对系统灵敏度进行了衡量^[43-45]; 冯明春等使用基于 MODTRAN 模型的被动式 FTIR 技术探测到生物气溶胶的存在^[46], 测量光谱波段范围为 $1200 \text{ cm}^{-1} \sim 950 \text{ cm}^{-1}$, 扫描次数为 64 次, 仿真验证了该方法对气溶胶探测的可行性。南京航空航天大学的夏卿等首次将 Bruker Tensor27 型 FTIR 系统应用于航空发动机尾气(CO_2 、 CO 、 NO)的探测, 该系统配有直径 15 cm 的望远镜, 可探测 $4000 \text{ cm}^{-1} \sim 600 \text{ cm}^{-1}$

波段范围的光谱, 仪器分辨率为 4 cm^{-1} , 与传统方法相比测量结果可提升 30%左右^[47]。

森林火灾产生的烟雾对全球环境影响重大, 美国蒙大拿大学 Selimovic 等介绍了在美国密苏拉森林管理局火灾科学实验室进行的 107 次试验, 该实验使用 $401 \text{ nm} \sim 870 \text{ nm}$ 波段的被动式 FTIR 探测仪测量了烟雾中各痕量气体的排放因子^[48-49]。剑桥大学利用被动式 FTIR 技术探测了火山烟羽(水蒸气、 CO_2 、 SO_2 、 H_2S 、 HCL 等), 所用仪器的光谱分辨率为 0.5 cm^{-1} , 得到时间分辨率可达每秒 $6000 \text{ cm}^{-1} \sim 500 \text{ cm}^{-1}$ 的光谱, 通过多幅数据累加可使最小探测极限达 10^{-9} 量级。如图 12 所示, Schutze 等^[50]利用基于被动式遥感 FTIR 技术的车载 LI-COR 8100-A 装置对近地面大气 CO_2 进行了监测, 可以对样本进行 1 s 采样, 并结合 GPS 确定测量位置, 最大光谱分辨率可达 1 cm^{-1} 。

被动式遥感 FTIR 探测仪适用于对温室气体(CO_2 、 CH_4 、 SF_6 等)、环境污染物(CO 、 SO_2 、 NO_x 、 O_3 、 NH_3 等)、腐蚀性气体(HX)、烟气和挥发性有机物(VOCs)等具有红外活性的 380 多种气体进行探测, 分辨率最高可达 0.1 cm^{-1} , 波数精度大于 0.01 cm^{-1} , 检出限最低

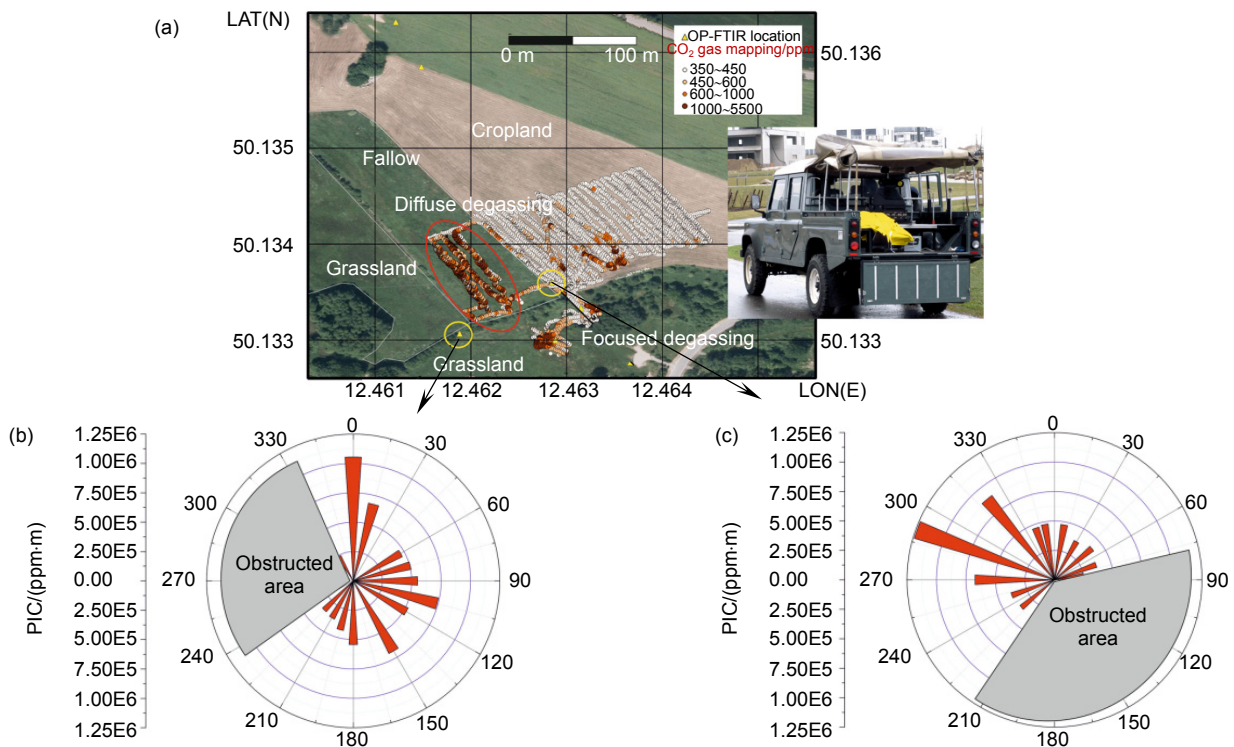


图 12 近地面大气 CO_2 测量系统。(a) 车载 OP-FTIR 光谱仪及应用场景; (b) 西南点 CO_2 浓度分布极坐标图; (c) 中心点 CO_2 浓度分布极坐标图^[50]

Fig. 12 Integrative investigations of near-ground surface atmospheric CO_2 conditions. (a) Application of the vehicle-mounted OP-FTIR spectrometer in different land; (b) Polar plot of the horizontal distribution of path integrated CO_2 concentration measured at the southwestern point; (c) Polar plot of the horizontal distribution of path integrated CO_2 concentration measured at the central point^[50]

可达 1 ppb，系统成本约为上述几种仪器的十倍之多。目前该技术的最大限制因素就是傅里叶变换计算耗时，导致系统响应较慢，因此开发出计算效率更高、计算结果更精确和智能化更强的分析算法成为被动式遥感 FTIR 技术的重点发展方向。

5.2 光谱成像技术

光谱成像技术是光谱学和成像技术的有机结合。如图 13 所示，在成像的同时，利用几百甚至上千个很窄的波段对同一个空间像元进行光谱扫描，通过获取二维空间信息和随波长分布的光谱辐射信息，生成三维数据立方体，对数据立方体进行处理后得到目标的三维特征及内部属性信息，因其可探测的深度性而有着广泛的应用领域^[51]。

光谱成像技术根据光谱分辨率不同分为三类，即多光谱成像技术、高光谱成像技术和超光谱成像技术，相关参数如表 2 所示；根据不同的分光原理，成像光谱仪可以分为棱镜色散型、光栅衍射型、滤光片型、干涉型、AOTF 分光型和 LCTE 分光型；特别在高光谱遥感成像仪中，光谱仪主要有光栅衍射型、时间傅里叶变换、空间傅里叶变换、声光调制滤光片、液晶可调谐滤光片(LCTF)和高光谱滤光片等六种。而在大气监测领域主要应用时间傅里叶变换光谱仪，在连续

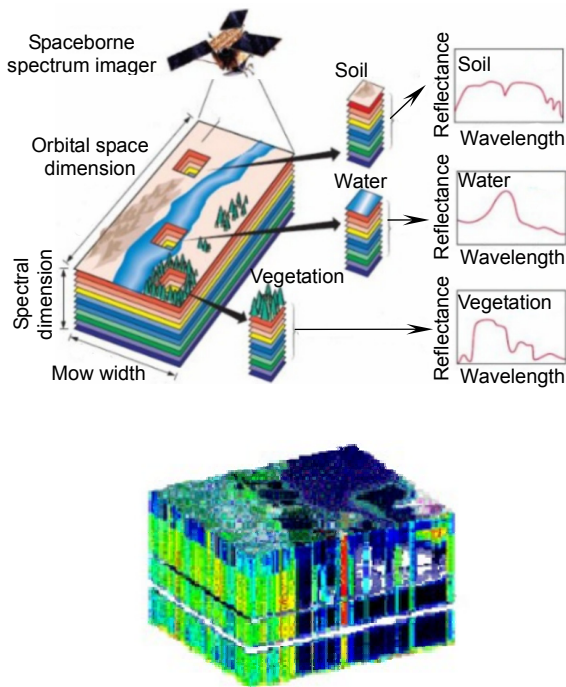


图 13 光谱成像技术应用原理及三维数据立方体示意图

Fig. 13 Principle of spectral imaging technology and schematic diagram of 3D data cubes

光源条件下，其光谱强度可由式(9)、式(10)来计算：

$$I(\psi) = \int_0^{+\infty} F(\nu) \cos(2\pi\nu\psi) d\nu, \quad (9)$$

式中： $F(\nu)$ 为复色光在波数 ν 下的光强， $I(\psi)$ 为光程差在 ψ 点的信号强度，对得到的干涉图式(9)进行傅里叶逆变换得到光谱图：

$$F(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\psi) \cos(2\pi\nu\psi) d\psi, \quad (10)$$

式中： $I(\psi)$ 为偶函数，故式(10)可表示为

$$F(\nu) = 2 \int_0^{+\infty} I(\psi) \cos(2\pi\nu\psi) d\psi. \quad (11)$$

随着传感器技术的快速发展，光谱成像技术，特别是高光谱成像技术，在气体检测领域引起了广泛关注^[52]。

图 14 列举了目前市场上几种典型气体红外成像检测仪及应用。Farley 等人最早在 SPIE 会议上介绍了加拿大 Telops 公司生产的野外便携式成像光谱仪 (field-portable imaging radiometric spectrometer, FIRST)，并分别对 SF_6 、 NH_3 ，以及 SF_6 和 NH_3 的混合气进行四十天的连续监测，结果表明该系统的精度偏差能保持在 2% 以内^[53-54]，其探测分辨率可达 320×256 ，光谱范围在 $8 \mu\text{m} \sim 12 \mu\text{m}$ 之间，光谱分辨率可达 0.25 cm^{-1} ；美国 GIT 公司研制的 Sherlock 系列成像光谱仪，其以成像多光谱传感技术^[55](image multispectral sensing, IMSS)为核心，空间分辨率可达 320×240 ，可检测最小泄漏率达 1 mL/min ，实现了对碳氢类化合物、 SF_6 、 CO_2 和 H_2S 等有害气体的检测^[56]；美国 PSI 公司研制的自适应红外成像光谱仪 (adaptive infrared imaging spectroradiometer, AIRIS)，该装置采用 HgCdTe 探测器，空间分辨率达 256×256 ，陆基和机载 AIRIS 可探测范围分别在 4.8 km 和 4.6 km 左右，并对泄露速率低至 1.4 kg/min 的 NH_3 进行了实验探测^[57]。

目前， $7 \mu\text{m} \sim 14 \mu\text{m}$ 长波红外高光谱成像技术 (longwave infrared hyperspectral imaging, LWIR-HSI)

表 2 三种光谱成像技术比较

Table 2 Comparison of three spectral imaging techniques

| | 多光谱成像 | 高光谱成像 | 超光谱成像 |
|-------|-----------------------|------------------------|------------------------------|
| 波段数 | ≤ 10 | 10 ~ 100 | 100 ~ 1000 |
| 光谱分辨率 | 0.1 cm^{-1} | 0.01 cm^{-1} | $\leq 0.001 \text{ cm}^{-1}$ |
| 图谱 | 分离 | 合一 | 合一 |
| 通道连续性 | 不连续 | 连续 | 合一 |

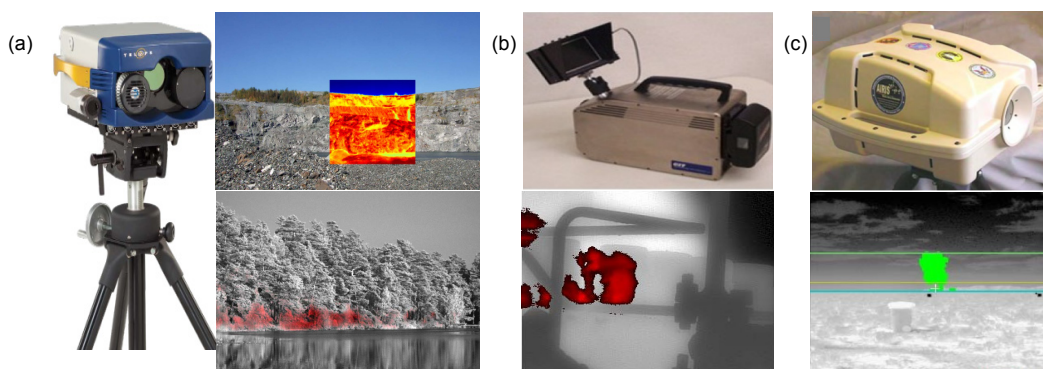


图 14 (a) FIRST 气体成像光谱仪及应用; (b) Sherlock VOC 气体成像光谱仪及应用;
(c) AIRIS-WAD 自适应红外成像光谱仪及应用

Fig. 14 (a) Gas imaging spectrometer and its application of FIRST; (b) Gas imaging spectrometer and its application of Sherlock VOC; (c) Gas imaging spectrometer and its application of AIRIS-WAD

基于气体排放物的强光谱特征而迅速发展起来^[58], 可实现对气体、资源及海洋等领域的探测。Kastek 等^[59]使用 Telops 公司生产的 HyperCAM LWIR 高光谱探测仪(其探测分辨率 320×256 , 光谱分辨率 $0.25 \text{ cm}^{-1} \sim 150 \text{ cm}^{-1}$), 在实验室中(泄露量为 5 mg/s , 浓度为 1%)得到了不同热对比度值下 CO_2 、 NO_2 吸收光谱特性的变化; 在外场试验中可探测 CO_2 最低浓度约 1% , 并成功探测到 60 m 远处浓度为 3% 的四氟乙烷(CH_2FCF_3)。土耳其中东技术大学的 Omruuzun 等^[60]提出了基于黑体辐射曲线补偿的 LWIR 高光谱成像仪, 其波段范围为 $1285 \text{ cm}^{-1} \sim 877 \text{ cm}^{-1}$, 光谱分辨率约 3.32 cm^{-1} , 谱带数为 124 , 对挥发的甲醇气体进行探测, 验证了基于消除像素特征突出部分的黑体辐射曲线补偿方法对提高气体分辨能力的有效性。德国汉堡大学的 Sabbah 等^[61]使用 HI 90 LWIR 成像仪, 对雾天 250 m 外的泄露 CH_4 进行监测, 得到不同光谱范围的亮温图, 该仪器通过使用 $5 \text{ pixel} \times 5 \text{ pixel}$ 大小的空间高斯滤光片对高光谱数据立方体进行预处理, 以消除光谱噪声影响, 有效

提高了气体云团的可分辨性; 同时对水面小船上泄露速率为 $8 \text{ g/s} \sim 10 \text{ g/s}$ 的 SF_6 气体进行了探测, 验证了该仪器对不同天气条件下不同气体的适用性, 如图 15 所示。昆明物理研究所的郑为建等设计出了基于时空调制干涉原理的 LWIR 时空调制高光谱成像实验装置 CHIPED-1, 其光谱响应范围可以达到 $11.5 \mu\text{m}$ 左右, 单次采样 NESR 可达 $5.6 \times 10^{-8} (\text{W}/\text{cm}^2) \cdot (\text{Sr}/\text{cm})$, 实现对 NH_3 、乙醚($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$)、 SF_6 及 VOCs 的高灵敏度光谱探测^[62-63], 证明了相对于宽波段热成像技术, CHIPED-1 在 VOCs 的二维光谱探测中具有灵敏度更高、抗干扰能力更强的优势。

随着技术的发展, 传统多光谱遥感成像及陆基高光谱遥感成像技术因受站点位置及空间分辨率较低的限制而难以满足对大气监测的精度要求, 对此, 星载高光谱遥感技术引起了国内外研究者的广泛关注。

国外研究人员早先涉足该领域。2009 年 1 月, 日本宇宙航空开发研究机构(JAXA)发射了全球第一颗温室气体探测卫星 GOSAT, 它配备了温室气体探测仪

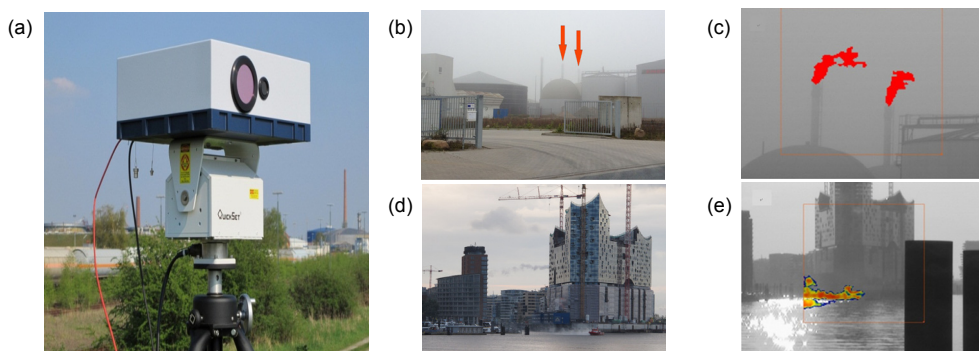


图 15 实验装置及结果图。(a) HI 90 高光谱成像仪; (b)~(c) 甲烷的探测场景及结果; (d)~(e) SF_6 的探测场景及结果^[61]

Fig. 15 Experimental set-up and its result. (a) Hyperspectral imager of HI 90; (b)~(c) Detection scene and result of methane; (d)~(e) Detection scene and result of SF_6 ^[61]

(TANSO)和云气溶胶成像仪(CAI)。在 0.75 μm~0.78 μm 波段探测 O₂ 浓度和卷云, 得出路径长度, 在 1.56 μm~1.72 μm 和 1.92 μm~2.08 μm 波段观测水汽、CH₄、CO₂和卷云, 在 5.5 μm~14 μm 波段再次获得水汽、CH₄和 CO₂等参数及 CH₄和 CO₂垂直廓线, 三个波段范围中光谱分辨率分别为 0.5 cm⁻¹、0.2 cm⁻¹和 0.2 cm⁻¹[64]。2018 年 10 月, JAXA 发射了 GOSAT-2 温室气体探测卫星, 与 GOSAT 相比, GOSAT-2 可以获得更多的有效观测次数, 信噪比更高。除此以外, 其上搭载的 CAI-2 观测仪还能够有效克服海面耀斑的影响, 实现对海洋上空气体的探测[65]。2014 年 7 月, NASA 发射了 OCO-2 卫星[66], 其载荷为高光谱与高空间分辨率 CO₂ 探测仪, 光谱通道数为 1016 个, 能够探测 0.758 μm~0.772 μm、1.594 μm~1.619 μm 和 2.042 μm~2.082 μm 三个吸收光谱通道, 地面幅宽为 10.6 km, 光谱分辨率分别为 0.5 cm⁻¹、0.3 cm⁻¹和 0.2 cm⁻¹, 该技术可以工作在星下、耀斑和目标三种观测模式下, 实现对不同应用场景下 CO₂ 的高分辨率测量[67]。美国计划将在 2023 年发射新一代搭载高光谱和红外载荷的对地观测卫星 HypIRI[68], 主要用于生态系统和碳循环等科学研究, 其光谱分辨率为 10 nm, 光谱通道数为 212 个, 光谱范围为 0.38 μm~2.5 μm, 地面像元分辨率和幅宽分别为 60 m 和 145 km。

近年来, 我国在星载高光谱遥感领域的研究也取得了重大突破, 空间分辨率、光谱分辨率和数据传输速度等一些技术指标已达到国际先进水平, 填补了我国运用星载高光谱遥感技术监测大气环境的空白。目前, 国内在该领域已研制成功且比较典型的技术有空间外差光谱仪(spatial heterodyne spectroscopy, SHS)、碳卫星高光谱 CO₂ 探测仪(TanSat CO₂ spectrometer,

TSCS)、风云三号高光谱温室气体监测仪(FY-3D greenhouse gases absorption spectrometer, GAS)、高分五号(GF-5)等四种, 表 3 列举了我国几种星载高光谱遥感技术的相关信息。其中 GF-5 是我国第一颗高光谱综合监测卫星, 可从紫外到长波红外波段获取高光谱高分辨率数据, 其上共搭载了六台载荷如图 16 所示, 并列出了观测卫星对地成像和大气探测工作谱段, 具有高精度、高灵敏度和高光谱分辨率的优势[69]。

光谱成像技术在气体检测领域主要适用于大气环境气体、温室气体、大气痕量气体和气溶胶等气体的监测, 因其更高的空间和光谱分辨率, 结合先进的后端成像处理技术, 可获得更高的气体浓度检测分辨率。未来光谱成像技术还需向以下方向更新改进: 构建更加全面的地物光谱数据库, 丰富数据采集手段; 健全清晰的地物全谱段和参量作用机制; 打造完整的遥感器指标论证技术; 核心分光元件应向多元化发展; 增加偏振信息获取技术, 实现光谱、图像和偏振信息一体化, 以更精准地获取物体的表面信息; 着重向小型化、集成化、轻量化方向发展; 智能化提高数据的采集及处理分析能力。基于此, 光谱成像技术不仅能在气体监测领域彰显优势, 还将广泛应用于国土资源勘探、城市遥感、水质及食品的鉴别、农业、海洋和生物医学成像等领域。

6 结 论

本文综述了各种典型气体光学检测技术的应用研究及发展现状, 首先介绍了气体光学检测技术的理论基础, 分类介绍了主动式和被动式气体光学检测技术的原理和特点, 然后介绍了各种气体光学检测技术的应用领域、研究现状及未来发展趋势, 对各种气体光

表 3 我国星载高光谱遥感技术

Table 3 Technology of spaceborne-based hyperspectral remote sensing of our country

| 名称 | 空间外差光谱仪 | 碳卫星 | 风云三号 | 高分五号 |
|------|---|---|--|---|
| 特点 | 光通量大; 无运动部件, 结构简单; 集成度高, 重量轻; 功耗小 | 采样率高; 可观测气溶胶; 检测精准度高; 可靠性和稳定性较好 | 反演精度高; 光谱通道数量较多; 光谱定标精度高 | 光谱分辨率高; 探测范围大; 可量化探测; 信噪比高 |
| 相关参数 | 光谱范围: 6325 cm ⁻¹ ~6360 cm ⁻¹ ; 光谱分辨率: 0.27 cm ⁻¹ ; 信噪比: 500 | 可工作在 760 nm, 1610 nm, 2060 nm 特征波段; 光谱分辨率: 0.04 nm | 光谱范围: 0.69 μm~15.0 μm; 地面分辨率: 0.25 km~4 km; 扫描范围: ±49.5° | 最高空间分辨率: 20 m; 可见光谱段光谱分辨率: 5 nm; 红外光谱段光谱分辨率: 0.03 cm ⁻¹ |
| 应用范围 | 大气中 CO ₂ 的探测 | 大气中 CO ₂ 和气溶胶的探测 | 大气温室气体 (CO ₂ 、CO、CH ₄ 等)的探测 | 大气 CO _x 、NO _x 、CH ₄ 、气溶胶、陆表生态环境监测、资源调查及地质填图等 |
| 时间 | 2010 年 | 2016 年 | 2017 年 | 2018 年 |

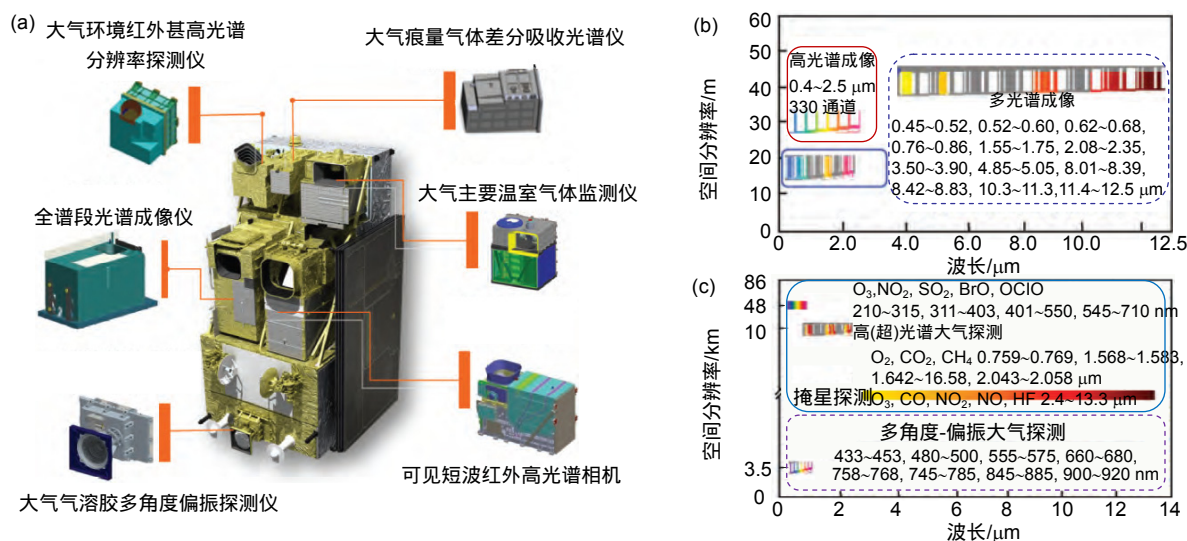


图 16 高分五号载荷及工作谱段。(a) 高分五号载荷配置;(b) 高分五号对地成像谱段;(c) 高分五号大气探测谱段^[69]

Fig. 16 Payloads configuration and spectral characteristics of GF-5. (a) Payloads configuration of GF-5 satellite; (b) Spectral characteristics of earth imaging instrument for GF-5; (c) Spectral characteristics of atmosphere sounding for GF-5^[69]

学检测技术进行了对比。虽然基于光谱学方法的气体检测技术出现了多种技术路径,并取得了重大成果,但仍面临着以下问题及挑战:

1) 现有的气体光学检测系统由于普遍采用单孔径镜头,因此存在系统结构复杂、体积大、视场小的问题,系统分辨率与探测视场之间的矛盾难以兼顾。对此,未来可采用多孔径前端系统对同一目标物体探测,从而有效缩小系统体积,增大系统的视场与分辨率。

2) 所需探测的气体组分越来越复杂,测量环境中要求具有较低的气体浓度检测能力,因此开发出气体探测专用的高灵敏度红外探测器,再配合图像处理等技术手段进行气体探测成为重要的研究方向。

3) 检测系统识别气体类型和数量的能力与系统的响应时间存在矛盾。如光谱成像技术,虽然可以实现单一系统对多种气体的探测,但数据获取、信息处理所需时间较长,无法满足气体检测的实时性要求。因此,在不增加系统复杂度的情况下,研制出既能同时识别多种气体,又能够保证响应速度的气体检测系统是未来的重要研究点。

4) 在提高系统硬件配置的同时,气体红外图像增强算法也有待提高。未来可将超分辨率重构算法应用于图像后端处理,该算法基于无先验知识贝叶斯模型的最大似然估计法,通过对多个镜头探测到的多幅低分辨率图像使用 SIFT 算法进行图像间的亚像素配准,可以重构出分辨率更高、视野更宽的气体云团图像,

可在一定程度上补偿系统硬件缺陷带来的不足。

综上所述,气体光学检测技术将会因其快速、高效、精准的优势而拥有更加广泛的应用前景,随着该技术领域的不断发展,人类将很大程度上可以有效避免有害气体所带来的危险事故。

参考文献

- [1] Luo S Q. Detection and analysis system for CO₂ gas based on TDLAS[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. 罗淑芹. 基于 TDLAS 的 CO₂ 气体检测分析系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [2] Liu W Q, Cui Z C, Dong F Z. Optical and spectroscopic techniques for environmental pollution monitoring[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2002, 15(5): 1-12. 刘文清, 崔志成, 董凤忠. 环境污染监测的光学和光谱学技术[J]. *光电子技术与信息*, 2002, 15(5): 1-12.
- [3] Shi W. *The Principle and Application of Hazardous Gas Detectors*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. 施文. 有毒有害气体检测仪器原理和应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [4] Wang S, Feng X L. Development of multigas analysis and identifying technology[J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 21(3): 78-81, 87. 王帅, 冯新泸. 多组分气体检测与识别技术进展[J]. *重庆工学院学报(自然科学版)*, 2007, 21(3): 78-81, 87.
- [5] Nie W, Kan R F, Yang C G, et al. Research progress on the application of tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 0911001. 聂伟, 阚瑞峰, 杨晨光, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展[J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 0911001.
- [6] Claps R, English F V, Leleux D P, et al. Ammonia detection by use of near-infrared diode-laser-based overtone spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(24): 4387-4394.
- [7] Flanigan D F. Limits of passive remote detection of hazardous vapors by computer simulation[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996,

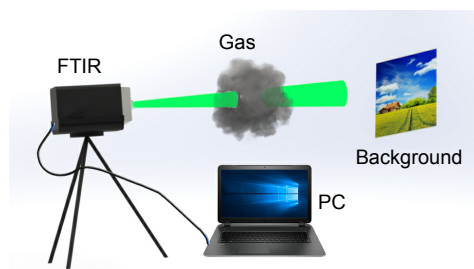
- 2763:** 117–127.
- [8] Hinkley E D. Tunable infra-red lasers and their applications to air pollution measurements[J]. *Opto-Electronics*, 1972, **4**(2): 69–86.
- [9] Schiff H I, Mackay G I, Bechara J. The use of tunable diode laser absorption spectroscopy for atmospheric measurements[J]. *Research on Chemical Intermediates*, 1994, **20**(3–5): 525–556.
- [10] Liu X, Wang L X, Jin W Q, et al. The development of optical remote measurement for hazardous gas leakage[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(10): 563–567, 572.
刘秀, 王岭雪, 金伟其, 等. 危险气体泄漏的光学遥测技术及其进展[J]. *红外技术*, 2009, **31**(10): 563–567, 572.
- [11] Reid J, Labrie D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers — Comparison of experiment and theory[J]. *Applied Physics B*, 1981, **26**(3): 203–210.
- [12] Chen P, Gang C, Tang J P, et al. High-speed mid-infrared frequency modulation spectroscopy based on quantum cascade laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, **28**(16): 1727–1730.
- [13] Deguchi Y, Kamimoto T, Wang Z Z, et al. Applications of laser diagnostics to thermal power plants and engines[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, **73**(2): 1453–1464.
- [14] Wang J, Yu D H, Ye H J, et al. Applications of optical measurement technology in pollution gas monitoring at thermal power plants[J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, **8197**: 819702.
- [15] Liu S Y, Tao Z, Jia X D. Towards aerial natural gas leak detection system based on TDLAS[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9299**: 92990X.
- [16] Deng J, Chen W L, Wang W F, et al. Study on online detection method of methane gas in coal mine based on TDLAS technology[M]//Wang X T. *Proceedings of the 11th International Mine Ventilation Congress*. Singapore: Springer, 2019.
- [17] He C G, Zhang Y J, Chen C, et al. Signal detection circuit design of HCN measurement system based on TDLAS[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **10157**: 1015710.
- [18] Yin W, Wei Y B, Chang J, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopy- based detection of propane for explosion early warning by using a vertical cavity surface enhanced laser source and principle component analysis approach[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, **17**(15): 4975–4982.
- [19] He Q X, Zheng C T, Liu H F, et al. A near-infrared acetylene detection system based on a 1.534 μm tunable diode laser and a miniature gas chamber[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, **75**: 93–99.
- [20] Wang Y, Nikodem M, Zhang E, et al. Shot-noise limited faraday rotation spectroscopy for detection of nitric oxide isotopes in Breath, Urine and Blood[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 9096.
- [21] Gonzalez-Valencia R, Magana-Rodriguez F, Gerardo-Nieto O, et al. In situ measurement of dissolved methane and carbon dioxide in freshwater ecosystems by off-axis integrated cavity output spectroscopy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(19): 11421–11428.
- [22] Xia H H, Kan R F, Xu Z Y, et al. Measurements of axisymmetric temperature and H₂O concentration distributions on a circular flat flame burner based on tunable diode laser absorption tomography[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, **10156**: 101560S.
- [23] Pan R, Jeffries J B, Dreier T, et al. Measurements of liquid film thickness, concentration, and temperature of aqueous urea solution by NIR absorption spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2016, **122**(1): 4.
- [24] Hu H L, Wang Z E, Wu Y H, et al. UV-DIAL system for measurements of stratospheric ozone[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1998, **22**(5): 701–708.
- 胡欢陵, 王志恩, 吴永华, 等. 紫外差分吸收激光雷达测量平流层臭氧[J]. *大气科学*, 1998, **22**(5): 701–708.
- [25] Hu S X, Chen Y F, Liu Q W, et al. Differential absorption lidar system for background atmospheric SO₂ and NO₂ measurements[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, **45**(9): 113–118.
胡顺星, 陈亚峰, 刘秋武, 等. 差分吸收激光雷达系统探测背景大气 SO₂ 和 NO₂[J]. *中国激光*, 2018, **45**(9): 113–118.
- [26] Singh U N, Yu J R, Petros M, et al. Development of a pulsed 2-micron integrated path differential absorption lidar for CO₂ measurement[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, **8872**: 887209.
- [27] Singh U N, Refaat T F, Petros M, et al. Evaluation of 2- μm pulsed integrated path differential absorption lidar for carbon dioxide measurement—technology developments, measurements, and path to space[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, **11**(6): 2059–2067.
- [28] Gibert F, Edouard D, Cénac C, et al. 2- μm Ho emitter-based coherent DIAL for CO₂ profiling in the atmosphere[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(13): 3093–3096.
- [29] Amediek A, Ehret G, Fix A, et al. CHARM-F-a new airborne integrated-path differential-absorption lidar for carbon dioxide and methane observations: measurement performance and quantification of strong point source emissions[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(18): 5182–5197.
- [30] Meng L C, Fix A, Wirth M, et al. Upconversion detector for range-resolved DIAL measurement of atmospheric CH₄[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(4): 3850–3860.
- [31] Platt U, Perner D, Pätz H W. Simultaneous measurement of atmospheric CH₂O, O₃, and NO₂ by differential optical absorption[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1979, **84**(C10): 6329–6335.
- [32] Yao J Q, Li R C, Zhao F, et al. Fast multi-gas remote monitor based on DOAS for fire emergency rescue[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2018, **29**(3): 314–317.
姚建奎, 李润宸, 赵帆, 等. 基于 DOAS 的消防应急救援多气体快速遥测仪[J]. *光电子·激光*, 2018, **29**(3): 314–317.
- [33] Gao Q, Weng W B, Li B, et al. Gas temperature measurement using Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)[J]. *Applied Spectroscopy*, 2018, **72**(7): 1014–1020.
- [34] Meier A C, Schönhardt A, Bösch T, et al. High-resolution airborne imaging DOAS measurements of NO₂ above Bucharest during AROMAT[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, **10**(5): 1831–1857.
- [35] Stutz J, Hurlock S C, Colosimo S F, et al. A novel dual-LED based long-path DOAS instrument for the measurement of aromatic hydrocarbons[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **147**: 121–132.
- [36] Lv M, Wang Y D, Chen C. Development of mid-infrared trace-CO detector with Long-Path Differential Optical Absorption Spectroscopy (LP-DOAS)[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, **37**(7): 2278–2282.
吕默, 王一丁, 陈晨. 采用长光程差分吸收光谱技术(LP-DOAS)的中红外痕量一氧化碳检测仪[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, **37**(7): 2278–2282.
- [37] Lee J, Kim K H, Kim Y J, et al. Application of a Long-Path Differential Optical Absorption Spectrometer (LP-DOAS) on the measurements of NO₂, SO₂, O₃, and HNO₂ in Gwangju, Korea[J]. *Journal of Environmental Management*, 2008, **86**(4): 750–759.
- [38] Kanaya Y, Irie H, Takashima H, et al. Long-term MAX-DOAS network observations of NO₂ in Russia and Asia (MADRAS) during the period 2007–2012: instrumentation, elucidation of climatology, and comparisons with OMI satellite observations

- and global model simulations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(15): 7909–7927.
- [39] Jin J L, Ma J Z, Lin W L, *et al.* MAX-DOAS measurements and satellite validation of tropospheric NO₂ and SO₂ vertical column densities at a rural site of North China[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **133**: 12–25.
- [40] Wang Y, Lampel J, Xie P H, *et al.* Ground-based MAX-DOAS observations of tropospheric aerosols, NO₂, SO₂ and HCHO in Wuxi, China, from 2011 to 2014[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(3): 2189–2215.
- [41] Varma R M, Ball S M, Brauers T, *et al.* Light extinction by secondary organic aerosol: an intercomparison of three broadband cavity spectrometers[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, **6**(11): 3115–3130.
- [42] Thalman R M. Development of Cavity Enhanced Differential Optical Absorption Spectroscopy (CE-DOAS) and application to laboratory and field measurements of trace gases and aerosols[D]. Colorado: University of Colorado, 2013.
- [43] Jiao Y, Xu L, Gao M G, *et al.* Investigation on remote measurement of air pollution by a method of infrared passive scanning imaging[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(7): 1754–1757.
焦洋, 徐亮, 高闰光, 等. 污染气体扫描成像红外被动遥测技术研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(7): 1754–1757.
- [44] Jiao Y, Xu L, Gao M G, *et al.* Scanning passive FTIR remote sensing system for pollution gas[J]. *Laser & Infrared*, 2013, **43**(9): 1021–1024.
焦洋, 徐亮, 高闰光, 等. 污染气体扫描式 FTIR 被动遥测系统[J]. *激光与红外*, 2013, **43**(9): 1021–1024.
- [45] Jiao Y. Study on remote sensing of pollutant gases by passive scanning imaging FTIR spectrometry[D]. Hefei: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
焦洋. 污染气体 FTIR 被动扫描成像遥测技术研究[D]. 合肥: 中国科学院大学, 2013.
- [46] Feng M C, Xu L, Liu W Q, *et al.* Investigation of detecting biological aerosol by passive fourier transform infrared spectroscopy technology based on MODTRAN model[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(1): 014210.
冯明春, 徐亮, 刘文清, 等. 基于 MODTRAN 模型使用被动傅里叶变换红外光谱技术对生物气溶胶的探测研究[J]. *物理学报*, 2016, **65**(1): 014210.
- [47] Xia Q, Zuo H F, Li S C, *et al.* Remote passive sensing of aero-engine exhausts using FTIR system[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(3): 616–619.
夏卿, 左洪福, 李绍成, 等. 航空发动机尾气的 FTIR 被动遥感[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(3): 616–619.
- [48] Selimovic V, Yokelson R J, Warneke C, *et al.* Aerosol optical properties and trace gas emissions by PAX and OP-FTIR for laboratory-simulated western US wildfires during FIREX[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(4): 2929–2948.
- [49] Selimovic V, Yokelson R J, Warneke C, *et al.* Aerosol optical properties and trace gas emissions by PAX and OP-FTIR for laboratory-simulated western US wildfires during FIREX[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(4): 2929–2948.
- [50] Schütze C, Sauer U. Challenges associated with the atmospheric monitoring of areal emission sources and the need for optical remote sensing techniques—an open-path Fourier transform infrared (OP-FTIR) spectroscopy experience report[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(10): 919.
- [51] Davis C O. Applications of hyperspectral imaging in the coastal ocean[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, **4816**: 33–41.
- [52] Gurram P, Kwon H. Ensemble learning based on multiple kernel learning for hyperspectral chemical plume detection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, **7695**: 76951U.
- [53] Farley V, Vallières A, Chamberland M, *et al.* Performance of the FIRST: a long-wave infrared hyperspectral imaging sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, **6398**: 63980T.
- [54] Farley V, Vallières A, Villemaire A, *et al.* Chemical agent detection and identification with a hyperspectral imaging infrared sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6739**: 673918.
- [55] Hinnrichs M, Massie M A. New approach to imaging spectroscopy using diffractive optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 1997, **3118**: 194–205.
- [56] Li J K, Jin W Q, Wang X, *et al.* Review of gas leak infrared imaging detection technology[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(7): 513–520.
李家琨, 金伟其, 王霞, 等. 气体泄漏红外成像检测技术发展综述[J]. *红外技术*, 2014, **36**(7): 513–520.
- [57] Cosofret B R, Chang S, Finson M L, *et al.* AIRIS standoff multispectral sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, **7304**: 73040Y.
- [58] Wurst N P, Meola J, Fiorino S T. Improved atmospheric characterization for hyperspectral exploitation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, **10198**: 101980B.
- [59] Kasteck M, Piątkowski T, Trzaskawka P. Infrared imaging fourier transform spectrometer as the stand-off gas detection system[J]. *Metrology and Measurement Systems*, 2011, **18**(4): 607–620.
- [60] Omruuzun F, Cetin Y Y. Endmember signature based detection of flammable gases in LWIR hyperspectral images[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, **9486**: 948612.
- [61] Sabbah S, Harig R, Rusch P, *et al.* Remote sensing of gases by hyperspectral imaging: system performance and measurements[J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(11): 111717.
- [62] Zheng W J, Lei Z G, Yu C C, *et al.* Research on ground-based LWIR hyperspectral imaging remote gas detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(2): 599–606.
- [63] Zheng W J, Lei Z G, Yu C C, *et al.* First results of ground-based LWIR hyperspectral imaging remote gas detection[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, **9298**: 929802.
- [64] Butz A, Guerlet S, Hasekamp O, *et al.* Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from GOSAT[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(14): L14812.
- [65] Oishi Y, Ishida H, Nakajima T Y, *et al.* Preliminary verification for application of a support vector machine-based cloud detection method to GOSAT-2 CAI-2[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**(5): 2863–2878.
- [66] Frankenberg C, Pollock R, Lee R A M, *et al.* The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2): spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(1): 301–313.
- [67] Bi Y M, Wang Q, Yang Z D, *et al.* Advances on space-based hyper spectral remote sensing for atmospheric CO₂ in near infrared band[J]. *Chinese Optics*, 2015, **8**(5): 725–735.
毕研盟, 王倩, 杨忠东, 等. 星载近红外高光谱 CO₂ 遥感进展[J]. *中国光学*, 2015, **8**(5): 725–735.
- [68] Chien S, Silverman D, Davies A G, *et al.* Onboard science processing concepts for the HypsIRI mission[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2009, **24**(6): 12–19.
- [69] Sun Y Z, Jiang G W, Li Y D, *et al.* Hyper-spectral observation satellite and its application prospects[J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, **34**(3): 1–13.
孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 等. 高光谱观测卫星及应用前景[J]. *上海航天*, 2017, **34**(3): 1–13.

Optical gas detection: key technologies and applications review

Shen Ying, Shao Kunming, Wu Jing*, Huang Feng, Guo Yuze

College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China



Principle of passive remote sensing of FTIR

Overview: With the development of economy, human demands for chemical materials are increasing. Although these chemical materials provide great convenience and improvement to our daily lives, gas leakage accidents in various fields happen frequently. Leakage of the commonly used flammable and explosive gases such as liquefied petroleum gas, methane and vinyl chloride may cause explosions or fires. Gas leakage accidents not only cause huge economic losses, but also can cause casualties. In addition, some non-toxic, odorless and seemingly harmless gases can also cause great harm to the environment. For example, SF₆ gas, which is commonly used in power systems, and gases such as CO₂ emitted in production will cause the greenhouse effect, resulting global warming. Therefore, developing gas detection technology that can achieve rapid, qualitative and quantitative identification and detection of harmful gases in various scenarios has become an urgent problem for researchers. With the development of spectral imaging technology, the spectroscopy method develops rapidly. Compared with the traditional gas detection method, the spectroscopy method does not require sample preparation, and is fast, non-invasive, highly-efficient and dynamic, thus suitable for rapid and continuous detection in various fields. Accordingly, the spectroscopy method has become a hot spot of research and application in various countries.

This paper first introduces the theoretical foundation of optical gas detection technology, and then reviews the working principle and application of various optical detection technologies for typical gases according to active and passive detection. Active detection methods include tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS), differential absorption LiDAR (DIAL), differential optical absorption spectroscopy (DOAS), etc. Passive detection methods include remote sensing Fourier transform infrared spectroscopy (RS-FTIR) and spectral imaging (SI). This paper focuses on the applications of optical gas detection methods mentioned above. In order to facilitate a deeper understanding of the application fields of each technology, we have detailed the types of gases, accuracy, detection limits, volume and cost that can be detected in each technical, and the latest application results of each technology are introduced in detail. Using these gas detection technologies, continuous and real-time monitoring with long distance and high sensitivity for dozens of gases have been achieved, measurements of composition, concentration, temperature and other parameters of gases in a variety of scenarios have been realized, thus effectively reducing the appearances of dangerous accidents. The future development tendency of optical gas detection technologies is prospected after summarizing and analyzing the existing technologies and their problems.

Citation: Shen Y, Shao K M, Wu J, *et al.* Optical gas detection: key technologies and applications review[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(4): 190280

Supported by Leading Project of Science and Technology Department of Fujian Province (2017N0013)

* E-mail: wujing@fzu.edu.cn