

激光与光电子学进展

激光吸收光谱 2D 和 3D 成像测量技术及其应用研究进展

李金义^{1*}, 赵航¹, 杨晓涛^{2**}, 赵烁³¹天津工业大学控制科学与工程学院天津市电气装备智能控制重点实验室, 天津 300387;²哈尔滨工程大学动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;³国家管网集团东部原油储运有限公司, 江苏 徐州 221008

摘要 激光吸收光谱(LAS)技术因其高灵敏度、高精度以及非接触测量等优势,被广泛应用于气体流场检测。在燃烧诊断、泄漏检测和定位等应用场景中,对空间分布测量提出了需求。基于LAS技术发展而来的激光吸收层析成像(LAT)技术和激光吸收成像(LAI)技术不仅能够实现流场的2D/3D成像,而且在实现高的时间分辨率的同时对实际工程中的复杂环境有很好的适应性,未来仍是相关领域研究的重点。本文简要概述了LAS技术的基本原理以及LAT技术和LAI技术的成像方法;重点介绍了近十年LAT技术和LAI技术的国内外研究和应用现状,包括线性和非线性LAT测量技术、LAI技术的2D/3D成像技术;最后对基于LAS的2D/3D成像技术的未来发展趋势进行了展望。

关键词 仪器,测量与计量;激光吸收光谱;层析成像;激光吸收成像;燃烧诊断;2D/3D测量

中图分类号 O433.1;TH744

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1900005

Research and Application Progress on Laser Absorption Spectroscopy Technology for 2D and 3D Imaging Measurement

Li Jinyi^{1*}, Zhao Hang¹, Yang Xiaotao^{2**}, Zhao Shuo³¹Tianjin Key Laboratory of Intelligent Control of Electrical Equipment, School of Control Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;²College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang China;³Eastern Crude Oil Storage and Transportation Co., Ltd., National Petroleum and Natural Gas Pipe Network Group, Xuzhou 221008, Jiangsu, China

Abstract Laser absorption spectroscopy (LAS) technology is widely used in gas flow detection due to its advantages of high sensitivity, high precision, and non-contact measurement. In the application scenarios of combustion diagnosis, leakage detection, and localization, the demand for spatial distribution measurement has been presented. Laser absorption tomography (LAT) and laser absorption imaging (LAI) based on LAS technology can not only realize the two-/three-dimensional (2D/3D) imaging of flow field but also have good adaptability to the complex environment in practical engineering with high time resolution, which will still be the focus of research in related fields in the future. Here, the basic principles of LAS technology and the LAT and LAI methods were discussed. Moreover, the research and application states of the LAT and LAI methods at home and abroad in the past decade were mainly introduced, including linear and nonlinear measurements of LAT and 2D/3D imaging of LAI. Finally, the perspectives and trends of LAS-based 2D/3D imaging technology were reviewed.

Key words instruments, measurement, and metrology; laser absorption spectroscopy; tomography; laser absorption imaging; combustion diagnosis; 2D/3D measurement

1 引言

气体流场的浓度和温度测量在很多领域都有广阔

的应用,包括大气环境监测^[1]、污染气体排放控制^[2]、危险气体泄漏检测^[3]、燃烧流场诊断^[4-6]等。实际的流场通常是非均匀分布的,比如在燃烧流场中,由于气流的

收稿日期: 2021-08-27; 修回日期: 2021-09-18; 录用日期: 2021-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(52176064)、天津市自然科学基金(20JCYBJC00160)

通信作者: *lijinyi@tiangong.edu.cn; **yangxiaotao@hrbeu.edu.cn

动、混合、化学反应、热传导等因素,气体浓度和温度等会存在比较明显的梯度,对气体流场的 2D 空间成像有助于分析燃烧的反应机理,以实现燃烧流场理论模型和数值模型进行验证等。在泄漏检测应用中,泄漏气体的高空间分辨率成像有助于泄漏点的准确定位。对气体流场进行成像能够使人更直观地观察和研究流场状态,因此,流场的各种成像方法研究成为近年来该领域科研人员的热门方向。

通过利用发射、散射、折射和吸收相互作用,几种非侵入式光学测量技术已被用来对气体流场进行成像。一些代表性的光学成像技术主要包括化学发光、激光诱导荧光(LIF)、瑞利散射、拉曼散射、激光吸收光谱(LAS)等。化学发光检测技术因其简便性和非侵入性而具有吸引力,但其只能对几种特定组分进行检测,并且不易进行定量分析^[7-9];LIF方法具有空间分辨率高的优点,但因其高光学复杂性而导致其无法在工程上被广泛应用^[10-12];瑞利散射是一种简单的检测流场分子数密度和温度的方式,但其不具备选择性^[13-14];拉曼散射为无固有偶极矩的气体提供了检测手段,系统构成简单,但散射信号很弱,通常需要非常高功率的光源^[15-17]。LAS技术采用激光作为光源,并通过检测激光沿气体流场传输后强度的变化来测量流场信息^[18]。LAS实现流场成像主要包括两种方式:一种是激光吸收层析成像(LAT),该技术是将可调谐激光吸收光谱(TDLAS)技术与计算机层析成像(CT)技术相结合,即可调谐激光吸收层析成像(TDLAT)技术,其具有高度定量、组分特异性和免校准等优点,典型的TDLAT系统是通过排布多个不同角度的激光收发装置或使用运动机械控制单个收发装置从不同角度和位置扫描测量,以覆盖整个待测气流截面,进而实现流场的 2D 成像,因此,TDLAT的时间和空间分辨率往往受到限制^[19-20];另一种是激光吸收成像(LAI),该技术是在LAT技术的基础上发展而来,通过使用高速红外相机代替传统的光电探测器实现信号采集,其系统相对简单,并具有极高的空间分辨率,有效地解决了LAT技术在空间分辨率方面的不足,对于复杂流场测量研究具有重要意义。

总体而言,基于LAS技术的 2D/3D 流场测量方法相较于其他方法具有不可比拟的优势,也更适用于实际流场的测量。本文在简述 TDLAS 技术的基本原理以及 LAT 技术和 LAI 技术的成像方法的基础上,重点综述了近十年国内外 LAT 技术和 LAI 技术在流场检测方面的研究和应用现状,并对基于 LAS 的成像技术的未来发展方向进行了展望,旨在为相关领域的研究人员提供参考和借鉴。

2 LAS 技术基本原理

LAS 进行流场的 2D/3D 成像主要依托于 TDLAS 技术,以半导体激光器为光源,利用其窄线宽、可调谐

的特点,获取被测物质的吸收光谱,通过光谱分析进行相关物理量(组分浓度、温度、压力、流速等)的反演和重建。而对于 TDLAS 技术用于流场 2D/3D 测量时,以直接吸收光谱(DAS)技术和波长调制光谱(WMS)技术最为常用。

2.1 DAS 技术

DAS 技术作为最直接的 LAS 技术,最早是由 Hanson 等^[21-22]将其应用到实际的燃烧环境中进行实验。目前,DAS 技术具有易于实现、无需校准、时间分辨率高、数据处理简便的优点,仍被广泛应用于各个领域进行流场温度、组分的测量^[23-24]。其定量测量的理论基础是 Beer-Lambert 定律^[25],原理是:当激光的频率 ν 与气体分子的某一跃迁产生共振时,入射光的能量就会因吸收而减弱,如图 1 所示。由 Beer-Lambert 定律可知,对于单色平行光,入射光强 I_0 与透射光强 I_t 的关系为^[26-27]

$$\frac{I_t}{I_0} = \exp(-k_\nu L) = \exp[-P\chi S_\nu(T)\phi_\nu L], \quad (1)$$

式中: k_ν 为光的吸收系数; P 为气体总压强; χ 为吸收气体的摩尔分数; ϕ_ν 为气体吸收谱线的线型函数; $S_\nu(T)$ 为 ν 谱线在温度 T 时的线强; L 为光程。

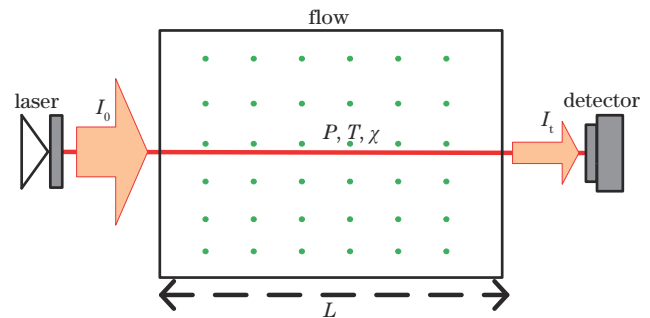


图 1 DAS 技术示意图

Fig. 1 Schematic diagram of direct absorption spectroscopy (DAS) technology

由于线性函数的归一化特性,光谱的积分吸光度 A 即吸收谱线覆盖的面积可由下式计算:

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} -\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right) d\nu = P\chi S(T)L, \quad (2)$$

进而可以求出待测气体流场组分的浓度、温度、压强等信息。

2.2 WMS 技术

背景噪声总是会干扰探测器信号,并且在具有强湍流、机械振动和光散射的恶劣环境中变得更加严重^[28]。以降低时间分辨率为代价,一些研究工作试图通过在扫描周期序列中平均探测器信号来提升信噪比^[29]。但受光束转向和背景光散射的影响,整个测量周期内普遍存在基线波动,从而导致基于多次扫描平均的方法无效。

WMS 技术是一种抗噪性能良好的流场参数测量技术,其原理是:利用激光器的温度调谐和电流调谐特

性,使激光器的波长工作在待测气体的吸收峰附近,然后对激光器同时施加低频的锯齿波扫频和高频正弦调制信号,其中低频锯齿实现波长扫描以覆盖待测气体吸收谱线,高频正弦实现对激光波长的调制,经流场气

体吸收后对探测信号进行解调得到气体吸收的谐波信号用于推断流场的组分浓度和温度等参数。由于背景噪声一般频率较低(通常为 $1/f$ 噪声),WMS 技术在很大程度上提高了信噪比,如图 2 所示。

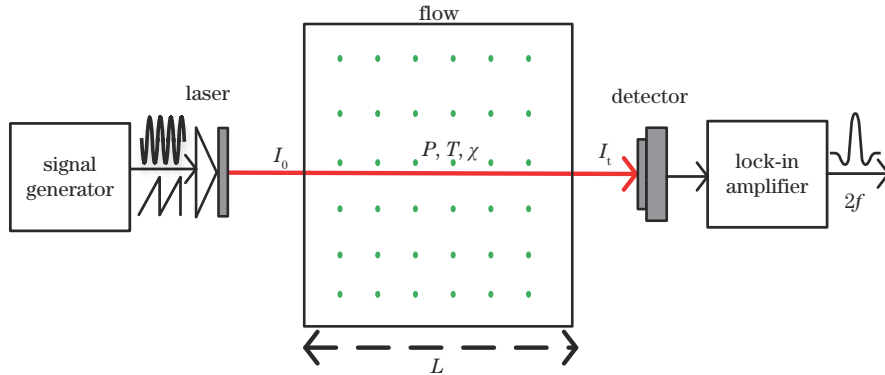


图 2 WMS 技术示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wavelength modulation spectroscopy (WMS) technology

在波长调制测量中,激光器注入电流受正弦信号调制后,激光器将产生频率调制(FM),如下式所示:

$$\nu(t) = \bar{\nu} + a \cos(\omega t), \quad (3)$$

式中: $\bar{\nu}$ 为激光的中心频率; a 为调制幅度; ω 为角频率; t 为时间。同时,激光器的光强也被调制(IM),并且 FM 和 IM 之间有一个相位偏移,另外激光器的出射光强随注入电流呈非线性变化,如下式所示:

$$I_0(t) = \bar{I}_0 \left[1 + i_0 \cos(\omega t + \Psi_1) + i_2 \cos(2\omega t + \Psi_2) \right], \quad (4)$$

式中: \bar{I}_0 是激光器在 $\bar{\nu}$ 处的平均光强; i_0 和 i_2 分别为线性 $1f$ 强度调制幅度和非线性 $2f$ 强度调制幅度; Ψ_1 为 FM/IM 线性相位偏移; Ψ_2 为 FM/IM 非线性相位偏移^[30]。为了消除背景信号并简化计算,在实际工程应用中,选

择忽略各谐波信号中的非线性调制项,得到 $1f$ 和 $2f$ 的吸收信号 R_{1f} 和 R_{2f} 分别为

$$R_{1f} = \sqrt{X_{1f}^2 + Y_{1f}^2} \approx \frac{G\bar{I}_0}{2} i_0, \quad (5)$$

$$R_{2f} = \sqrt{X_{2f}^2 + Y_{2f}^2} \approx \frac{G\bar{I}_0}{2} H_2(\nu_0, m), \quad (6)$$

式中: X_{1f} 、 Y_{1f} 和 X_{2f} 、 Y_{2f} 分别为 $1f$ 和 $2f$ 谐波信号分量; G 为光电检测模块增益; $H_2(\nu_0, m)$ 为调制后的傅里叶系数。为了有效消除光路、激光器等其他因素变化等造成的光强抖动,利用检测到的 $1f$ 吸收信号对相应的 $2f$ 吸收信号进行归一化处理,得到 $2f$ 吸收信号峰值与 $1f$ 吸收信号平均中值的比值 $Z_{2f/1f}$ 为

$$Z_{2f/1f} = \frac{R_{2f}}{R_{1f}} \approx -\frac{1}{i_0} \frac{S(T)P\chi L}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sum_i \phi_i(\nu_0 + m \cos \theta) \cos 2\theta d\theta, \quad (7)$$

式中: m 为调制深度; θ 为相位角。从式(7)可以看出,WMS- $2f/1f$ 信号可以消除由光散射、光束反射、机械不共轴、烟尘和光学窗口污染等造成的无吸收损耗。当激光器参数 i_0 、 Ψ_1 测得后,选择至少两条谱线,通过与仿真信号进行多谱线拟合,即可实现对气体浓度、温度的免标定测量。

3 TDLAT 技术

上述 LAS 技术的基本原理是从一维测量的角度介绍的,然而,实际的流场往往非常复杂并且不均匀、不对称,传统的一维测量手段并不能满足检测需求,因此,促进了 2D TDLAT 技术的发展。从 TDLAT 测量技术及层析成像重建算法角度出发,现有的 2D TDLAT 技术可以分为线性 TDLAT 技术和非线性 TDLAT 技术。

3.1 线性 TDLAT 成像

3.1.1 线性 TDLAT 基本原理

线性 TDLAT 是通过求解线性方程组来实现的。原则上,线性 TDLAT 扫描的数学公式与在临床诊断中广泛应用的 CT 技术的公式相似。

对线性层析成像进行分析,感兴趣区域(ROD)被离散为 N 个单元,如图 3 所示。在每个单元中,假设压力 P 、温度 T 和气体浓度 X 等参数为常数。根据式(2),从第 i 束激光获得的采样积分吸光度 $A_{\nu,i}$ 可以表示为

$$A_{\nu,i} = \sum_{j=1}^N \alpha_{\nu,j} L_{ij} = \sum_{j=1}^N [PS(T)X] \nu_j L_{ij}, \quad (8)$$

式中: i 和 j 是激光束和网格的序号; $\alpha_{\nu,j}$ 是第 j 个网格中的吸光度; L_{ij} 是第 j 个网格内第 i 个激光束的吸收路径长度。通过在两个预先选择的跃迁 ν_1 和 ν_2 处进行层析成像重建,根据重构后的 $\alpha_{\nu_1,j}$ 和 $\alpha_{\nu_2,j}$ 的比值重构出第 j

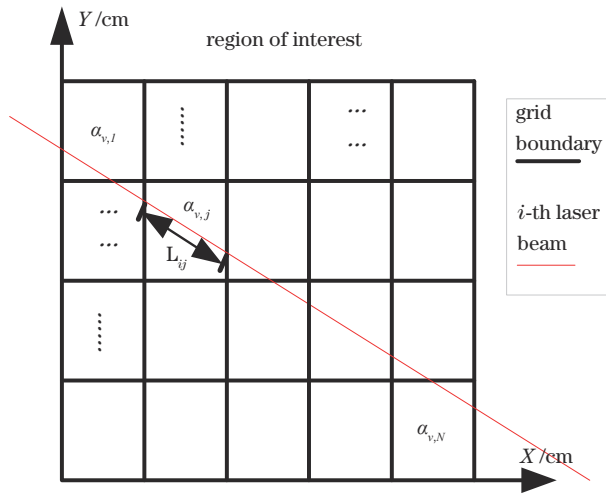


图3 线性TDLAT技术示意图

Fig. 3 Schematic diagram of linear TDLAT technology

个网格中的温度 T_j 。

通常,重建图像的质量通过精度和空间分辨率来评价。前者表示重建图像与真实图像的接近程度,后者表示重建图像的精细程度。对于线性TDLAT技术,主要可以从以下两个方面来提高重建图像的质量,即高效的层析重建算法和光路布置优化。

3.1.2 线性TDLAT成像重建算法

在TDLAT检测技术中,测量结果的准确性非常依赖重建算法。用于处理满秩但不适定问题常用基于Radon变换解析解的滤波反投影(FBP)算法^[31-32]。如果可从测量对象获得大量投影,则FBP算法可以获得良好的重建效果。它的缺点之一是投影需要以规则间隔的角度排列以允许傅里叶变换。因此,建议将FBP用于光学访问充足且许多投影可以沿任意方向自由排列的应用中^[33]。

相比之下,代数重建(ART)算法更适合于处理不完整和不规则的采样,因为ART算法是迭代的,具有从有限的视线(LOS)重建图像的能力,并且具有较强的鲁棒性,还可以将先验信息(例如平滑度或有界性)纳入公式以提高重建精度,这些都有助于克服燃烧应用中经常遇到的层析成像的不适定性问题。夏晖晖等^[34]以水汽作为目标气体,采用DAS测量方式,探测了甲烷空气预混平焰炉燃烧区域水汽的吸收光谱信号,通过ART算法对燃烧场温度和水汽浓度分布进行了模拟重建和实验研究,模拟重建采取 5×5 共25个网格的正方形重建区域,模拟28条激光束从不同的角度方位穿越重建区域,结果显示温度场和水汽浓度场的重建偏差均在1%以内。Wang等^[35]提出了一种使用TDLAS技术和ART算法的层析成像方法,数值评估表明,即使噪声强度达到吸收信号的3%,该系统也能够检测温度和水汽浓度分布。殷可为等^[36]从理论上研究了将TDLAS技术应用于燃烧场温度和气体浓度2D分布重建,并在此基础上编写了修正型ART算法程

序,通过引入初始分布,大大提高了重建质量。

为了达到更好的重建效果,传统的ART算法并不能满足要求,Jeon等^[37]提出了3种改进的ART算法,并与ART算法进行了比较,证明了3种改进算法的性能,以及各自的优势。该方法有望提高TDLAT的实用性。在接下来的几年当中,该课题组利用之前所提出的算法分别实现了对 CH_4 -air预混火焰和 C_3H_8 -air预混火焰燃烧流场的2D分布成像,并将现有的2D测量单元的结构扩展到3D,通过使用总共96条光路,对温度和浓度场进行了3D测量^[38-40]。Xia等^[41]提出了一种新型的两步ART技术,精确重建了燃烧场的温度和水汽浓度,数值仿真表明,与传统算法相比,所提出的两步ART分别大大提高了组分浓度和温度的重建精度。实验结果也证明了测量系统和两步ART技术在火焰监测和燃烧诊断等应用中的良好性能。上述工作都是在传统ART算法基础上对算法进行改良,Bao等^[42]开发了一种新的算法,被称为相对熵层析成像重建(RETRO)算法,与同时代数重建(SART)算法相比,RETRO算法显著提高了重建温度图像的质量,对TDLAS测量噪声表现出出色的鲁棒性。

当应用于流场的在线监测时,上述算法较低的计算效率无法与巨大的数据吞吐量相匹配。近年来兴起的深度学习算法已被逐步应用于流场重建过程。深度学习能够大幅缩短重建时间、节约计算资源。Yu等^[43]提出了一种基于机器学习算法的高效反演方法,该方法可以从上述基于迭代算法的重建中提取有用的信息,并构建有效的神经网络作为替代模型来快速预测重建。司菁菁等^[44]研究了燃烧场的空间层次化离散方法,进而为TDLAT系统设计一种基于残差网络(ResNet)的层次化温度层析成像方案(HTT-ResNet)。该方案可以根据有限数据实现燃烧场的温度图像的完整重建,并对计算资源与燃烧场不同空间区域的成像分辨率进行优化配置,着重实现ROI内温度分布的高空间分辨率成像。

3.1.3 线性TDLAT成像光路布置

然而,考虑到实际燃烧室的结构和可靠性,在计算机层析成像中使用的完整和规则的采样对于TDLAT技术是不切实际的^[45-46]。尤其是在发动机的燃烧诊断中,对光束布置提出了很高的要求,对于常规的光束排列,即平行和扇形光束排列,由于准直器和探测器的物理尺寸所施加的限制,常规的光束排列在多缸发动机和燃气轮机发动机等特殊应用中通常不能满足要求。合理的光束布置有助于提高重建图像的质量,从而使线性TDLAT在在线和原位燃烧诊断中具有竞争力。

Terzija等^[47]在光路布置方面进行了研究,在光路布置受限条件下,设计了一种不规则的光路分布方案,如图4所示。系统中共用了27组激光光源和探测器,相较于传统的平行光束分布和扇形束投影分布,在同样多的光路数下,有效地提高了温度和组分浓度重建

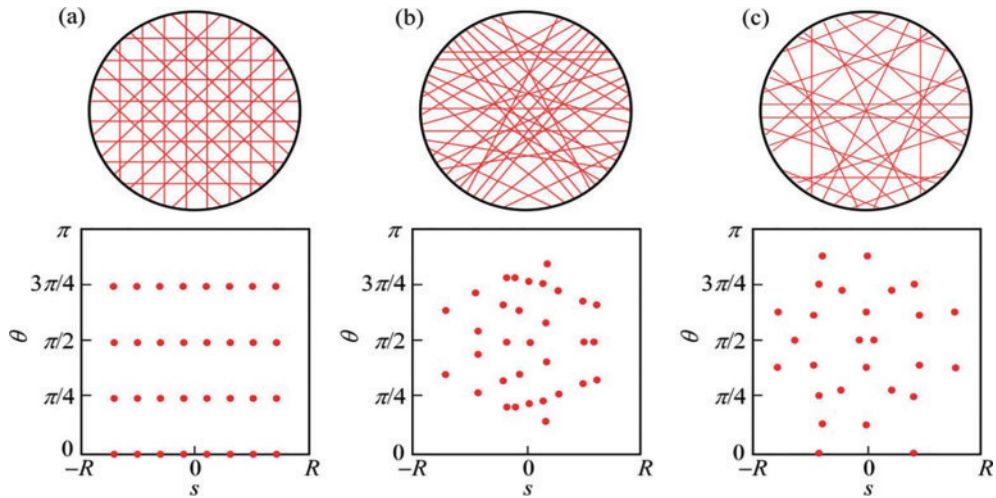


图 4 光束排列和相应的正弦图^[47]。光束排列适用于(a)32条规则几何光束;(b)32条未优化不规则几何光束;
(c)27条优化不规则几何光束

Fig. 4 Beam arrangements and corresponding sinogram plots^[47]. Beam arrangements are suitable for (a) 32 beams with regular geometry; (b) 32 beams with unoptimized irregular geometry; (c) 27 beams with optimized irregular geometry

精度,这对于实际应用具有重要意义,尤其是在发动机的燃烧诊断过程中。但这种方法是启发式的,缺乏扎实的数学基础。Twynstra等^[48]从数学上证明了所谓的分辨率矩阵和单位矩阵之间的Frobenius距离与重建误差直接相关,基于分辨率矩阵的数学特性,提出了一种更系统的预测光束排列性能的方法。最近,Liu等^[49]对光路的布置进行研究的同时分析了光路布置对空间分辨率的影响,提出的方案量化了在角度和线性尺寸上改变成像空间样本数对空间分辨率的影响,并且可用来设定最高效的光路布置,对边长10 cm的ROI能够实现约3 mm的空间分辨率测量,同时使系统复杂度降低。此外,该方法可以推广到其他物理约束阻碍密集图像空间采样的场景,如锅炉和发动机的燃烧诊断。

国内方面,宋俊玲等^[50]研究了投影角度和投影光线数目对温度场和浓度场重建结果的影响,并将温度

场重建结果与热电偶测量结果进行比较,结果表明,采用4个投影方向时,温度场重建结果与热电偶测量结果除中心低温区域外基本符合。当光线数目减少时,通过在两条光线间增加虚拟光线,代入到迭代算法中,增加光线数目,提高了温度场和浓度场的重建效果。Liu等^[51]开发了60个投影的扇束LAS层析传感器,同时重建了温度和水浓度的2D分布。Zhou等^[52]对圆形截面大马赫数超燃冲压发动机进行了光学诊断,使用多视角同步成像研究了不同喷射方式产生的不同火焰结构并使用TDLAS确定直喷燃烧器的有效工作时间。Zhang等^[53]引入了用于激光吸收光谱层析成像的紧凑型硬件系统,以固定的短时光谱扫描和可调节的帧速率来监测动态火焰演变,在传感器中,五边形的5个边各安装了12个光电探测器,如图5所示。来自每个顶点的扇形激光束投影到对侧及其两个相邻侧的一半。与传统的从每个顶点到仅对侧的投影方案相比,

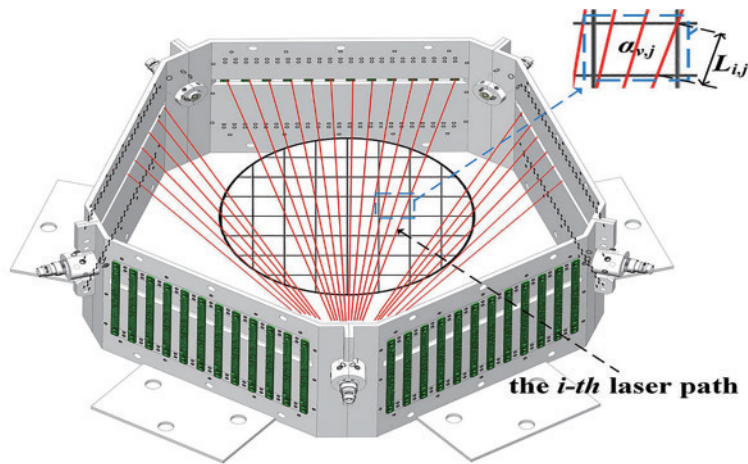


图 5 具有 5 个扇形光束的五边形 LAS 传感器示意图^[53]

Fig. 5 Schematic of pentagon LAS sensor with five fan beams^[53]

该设计减小了传感器尺寸并提高了空间分辨率。Xia 等^[54]利用 Radon 变换计算不同路径的投影,基于滤波反投影算法重建温度分布。系统由 13 个投影角和每个角度 11 条平行光线组成,获得了分辨率为 20×20 的分布图。研究表明,重建误差随投影角度和平行光线

的减小而增大,重建精度更依赖于每个角度的平行光线数,而不是投影角度数。该工作提出了一个可行的公式,用于少量投影和射线的重建研究,从理论上为后续实验验证奠定了基础。对上述关于光束布置方案进行的比较,如表 1 所示。

表 1 不同光束布置重建效果比较

Table 1 Comparison of reconstruction effects of different beam arrangements

| Beam arrangement type | Layout | Application scenario | Reconstruction effect | Reference |
|------------------------|---|-----------------------------|---|-----------|
| Orthogonal or sectoral | Mechanical scanning | Burner | Basically in line with thermocouple measurement results | [50] |
| Irregular arrangement | 27 groups of beams are arranged irregularly | Engine combustion diagnosis | Normalized image error values around 3% after 25 iterations | [47] |
| | Optimize an array of 32 beams | Laboratory | Reconstruction error 0.24 | [48] |
| | 4×25 beam arrangement | Engine combustion diagnosis | Spatial resolution of 3 mm or less | [49] |
| | A pentagon LAS sensor with five fan beams | A flat flame burner | A full frame rate up to 2 kHz | [53] |
| | 13 projection angles and 11 parallel rays | Numerical simulation | Low error reconstruction | [54] |

虽然现有的线性 TDLAT 技术能够通过光束布置优化等方式来实现某些光束排布受限的气体流场场景的测量,即采用不规则的光束排列来最大限度地提高空间采样效率,但这增加了实验设置的复杂性。此外,线性 TDLAT 技术在本质上是受限的,因为它只能在要重建的物理量沿 LOS 可积分时应用。这些要求极大地限制了线性 TDLAT 与更先进的吸收技术的结合。此外,在气体流场测量中,可调谐二极管激光器是主流的激光源,但其在近红外波段的光谱范围有限,使其很难同时测量多个组分。

3.2 非线性 TDLAT 成像

3.2.1 非线性 TDLAT 基本原理

随着宽带激光光源技术和相关波长复用技术的发展,基于快速扫描获得宽光谱范围内的吸收信息,Ma 等^[55]提出了非线性 TDLAT 方法。其原理是通过宽带波长扫描来增加光谱采样,以弥补空间采样的不足。与线性 TDLAT 成像不同,非线性 TDLAT 成像通过求解一组涉及多个待测参数的非线性方程,直接实现推断待测流场的分布。非线性层析成像的基本原理如图 6 所示。

在特定波长处的吸光度,例如 λ_i 不仅包含来自 λ_i 本身的贡献,还包含来自其他以不同波长为中心的跃迁的贡献,例如 λ_{i-1} 、 λ_{i+1} 和 λ_{i+2} 。 λ_i 处的吸光度峰值表示为

$$p(l_j, \lambda_i) = \sum_q a_q^{j,i}(T_q, X_q, P_q) = \sum_q \sum_k S(\lambda_k, T_q) \cdot X_q \cdot \phi(\lambda_k - \lambda_i, T_q, X_q, P_q) \cdot P_q \cdot \Delta, \quad (9)$$

式中: q 是第 j 条光束穿过的网格序号; $a_q^{j,i}$ 是第 q 个网格的吸光度; T_q 、 X_q 和 P_q 分别为第 q 个网格中的温度、浓度和压力; λ_k 是第 k 个跃迁的中心波长; Δ 是网格间距。

基于非线性层析成像旨在重建 ROI 上的流场参

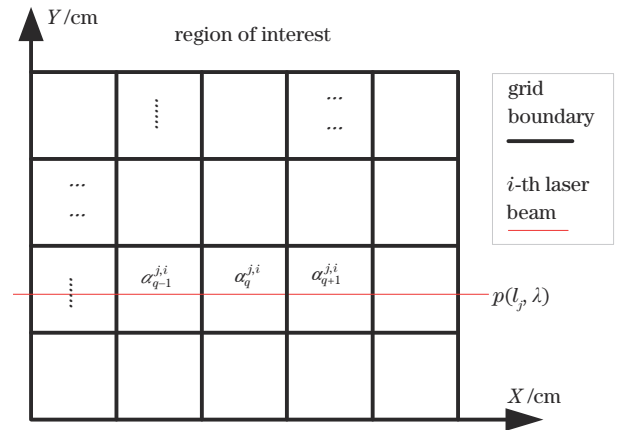


图 6 非线性 TDLAT 技术示意图

Fig. 6 Schematic diagram of nonlinear TDLAT technology

数分布,并且可以将其公式化为代数非线性最小化问题,其代价函数定义为

$$D(T_q, X_q, P_q) = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I [1 - p_c(l_j, \lambda_i, T_q, X_q, P_q) / p_m(l_j, \lambda_i)]^2, \quad (10)$$

式中: J 和 I 分别表示激光束总数和谱线总数; $p_m(l_j, \lambda_i)$ 是第 j 条光束在 k 处的测量投影; 而 $p_c(l_j, \lambda_i, T_q, X_q, P_q)$ 是基于重建的 T_q 、 X_q 和 P_q 计算得到的投影。可以看出,函数 D 表示重建的温度、浓度和压力与实际分布之间的接近程度。寻求重建的分布旨在最小化基于其计算的投影与测量的投影之间的差异。

3.2.2 非线性 TDLAT 研究进展

与线性 TDLAT 技术形成一组以局部吸收系数作为变量的线性代数方程不同,非线性 TDLAT 技术生成的是非线性代数方程组。因此,线性 TDLAT 技术中介绍的重建算法都不再适用。非线性层析成像问题

通常被转换为优化问题,因此可以结合附加信息来缓解非线性方程组的欠定问题,并引导优化过程朝着更合理的物理解迭代。然而,优化过程,即成本函数的最小化问题,是一个非常复杂的工作,因为其涉及数百甚至数千个变量,这些变量在解空间中创建了数百万个局部最小值。因此,需要一个强大的全局优化算法来有效地逃避局部最小值并落在全局最小值附近。模拟退火(SA)算法已被证明适用于非线性 TDLAT 的优化问题^[56-58]。

WMS 在灵敏度和抗噪声性方面优于 DAS,但由于其基于谐波检测的非线性性质,导致不适用于线性 TDLAT 的重建算法^[59-60]。为了解决这一问题,研究人员提出了非线性 TDLAT 与 WMS 相结合,使其能够应用于恶劣环境的流场 2D 重建。Cai 等^[61]提出了一种多路吸收层析成像技术,该技术使用免校准 WMS 和可调谐半导体激光器,在恶劣的燃烧环境中同时对温度和组分浓度进行成像。其次,对于非线性 TDLAT 技术而言,如何确定和利用信息最丰富的谱线对成功

实现该技术至关重要。Qu 等^[62]提出了一种从候选集中选择谱线最优组合的方法。选择给定温度区间内选定谱线的 Gram 行列式作为优化问题的代价函数,然后通过枚举候选谱线的所有可能组合,使其最大化,该方法为选择最优谱线组合提供了定量依据,并有助于提高多光谱吸收层析成像的成像质量。在多参数场同时重建过程中,存在严重的病态和串扰问题。为了缓解非线性层析吸收光谱方程的病态问题,Shi 等^[63]提出的基于协方差矩阵自适应算法的进化策略缓解了温度与组分浓度之间严重的串扰问题,提高了重构组分浓度分布场的准确性。最近, Yu 等^[64]提出了一种非线性层析成像方法,它可以充分利用非线性依赖关系,采用具有代表性的 2D 温度和流速模型给出了概念证明的数值演示,仿真结果证实了非线性声层析成像在重建温度和速度场分布方面的可行性。在实际应用方面,到目前为止,非线性 TDLAT 技术最具代表性的应用是航空推进发动机(General Electric J85)的燃烧诊断^[65],如图 7 所示。

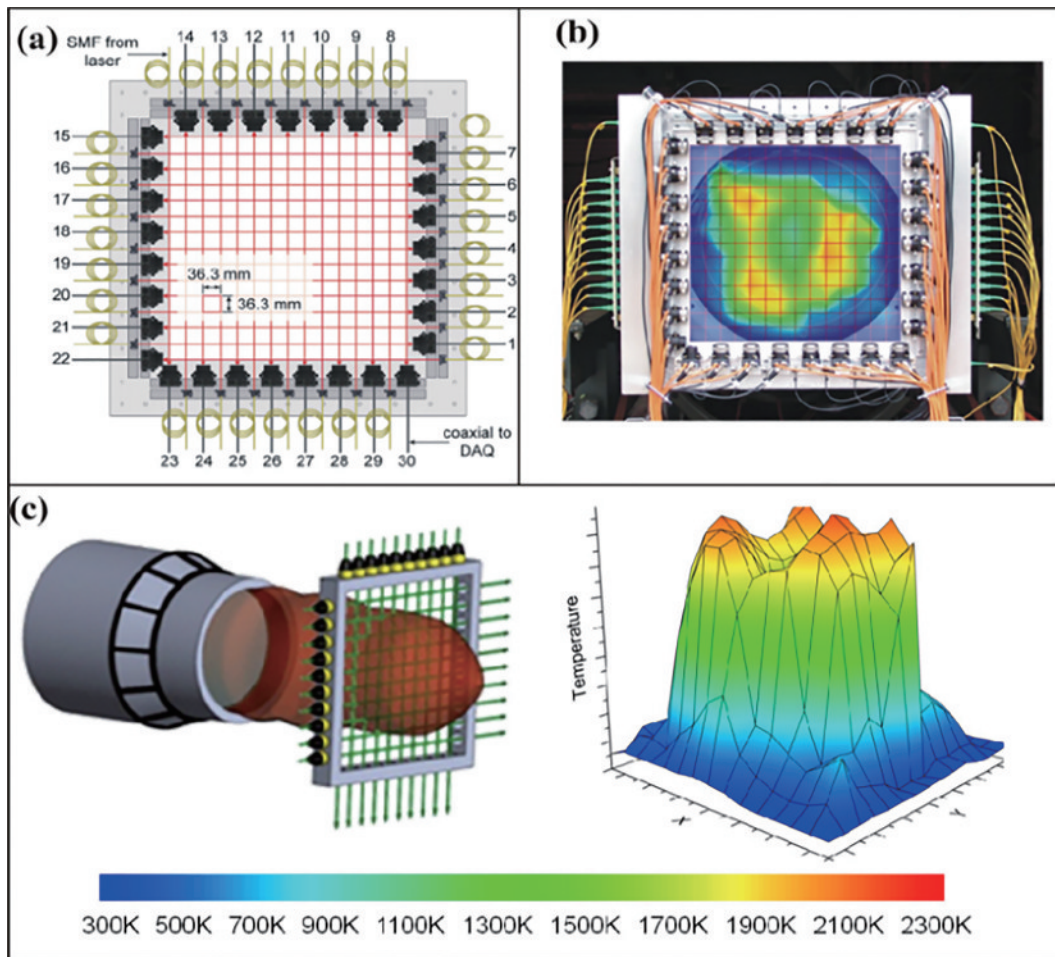


图 7 高光谱层析成像(HT)传感器在 J85 发动机排气流中的应用^[65]。(a)包含 30 个光束 HT 传感器实验装置;(b)光学测试部分硬件;(c)排气中测量平面的位置示意图以及在该位置测量样本的温度 2D 分布

Fig. 7 Application of hyperspectral tomography (HT) sensor in exhaust flow of J85 engine^[65]. (a) Experimental device containing 30 beams of HT sensors; (b) optical testing hardware; (c) schematic diagram of position of measurement plane in exhaust gas and sample measurement of 2D distribution of temperature measured at this position

3.3 TDLAT 技术比较和局限性

虽然非线性 TDLAT 技术相较于线性 TDLAT 技术具有诸多优点,但非线性 TDLAT 技术需要扫描范围更宽的激光光源和具有中等带宽的光电二极管探测器,这无疑将大幅度提高成本。此外,在实现非线性 TDLAT 成像时,需要复杂的计算来适应宽带吸收光

谱,这远远超出了系统的在线处理能力,不得不使用处理能力更强大的计算机离线进行^[66]。在某些燃烧场景中,如热电厂和锅炉设施等燃烧场景,使用非线性 TDLAT 成像是切实际的,因为燃烧过程非常需要实时监测并进行优化控制。线性和非线性 TDLAT 技术在理论和系统实现方面的比较如表 2 所示。

表 2 线性和非线性 TDLAT 技术的比较

Table 2 Comparison of linear and non-linear TDLAT technologies

| Characteristic | Linear TDLAT | Non-linear TDLAT |
|------------------------|--|---|
| Number of transitions | 1 or 2 | Multiple |
| Tomographic algorithms | ART and FBP | Algebraic non-linear minimization with regularization |
| Sensitivity | Mid | High |
| Computational cost | Low | High |
| Incorporation with WMS | Invalid | Valid |
| Beam arrangements | Complicated, careful consideration of beam arrangements required | Relatively simple with orthogonal views |

TDLAT 技术由于需要在光路中布置大量的激光收发装置,不可避免地会增加成本,并且这导致 TDLAT 技术主要使用近红外波长相对便宜的通信级光纤(例如光纤、多路复用器、分束器)和探测器^[67];另一方面,TDLAT 技术用于 2D/3D 测量时,多用于燃烧流场等场景,以燃烧主要产物(如 H₂O、CO₂等)为目标气体,由于这些气体组分浓度很高,通常采用近红外波段的半导体激光器,覆盖气体的倍频或合频吸收谱线即可满足检测要求。因此 TDLAT 技术大多被限制在近红外波段,在燃烧相关的气体浓度、灵敏度和空间尺度上监测的气体种类数量受到严重限制。

近年来,Liu 等^[68]为了克服这种限制,开发了使用中红外波长的 TDLAT 技术来对温度、CO₂进行层析成像。Nau 等^[69]提出了一种利用 4.48 μm 的脉冲量子级联激光器同时重建 CO、CO₂和低压火焰温度 2D 分布的实验装置。然而这些工作都是依赖于 LOS 的机械扫描,导致检测系统的时间分辨率显著降低,只能达到秒到分钟级别;同时,由于光束尺寸的限制,空间分辨率也被限制在毫米量级。对于高速变化和具有陡峭梯度的燃烧流场而言显然是不够的,因此迫切需要开

发具有更高时空分辨率的气体流场 2D 成像技术^[70-72]。

4 LAI 技术

中红外波段是绝大多数气体的本征吸收区,吸收线强一般比近红外强 2~3 个数量级,可实现高灵敏的检测需求(如微量燃烧产物检测、气体泄漏检测等),然而中红外 TDLAT 为实现多光路成像,通常采用机械扫描式测量,不但增大了系统复杂度,而且导致时间分辨率受限。LAI 技术是对单一光束处理后进行成像测量,恰好弥补了 TDLAT 技术的这一缺陷,下面对 LAI 技术的基本原理以及其 2D/3D 成像进行综述。

4.1 LAI 技术基本原理

目前开发的 LAI 技术是利用中红外光学设备,通过成像可调谐中红外激光辐射的背光流场来大幅度提高重建流场图像的空间分辨率。如图 8 所示,LAI 方法与移动 LOS 扫描方法、多投影 TDLAT 技术相比,主要不同之处包括两部分:一是对单一光束进行扩束处理;二是使用高速红外相机代替传统光电探测器。首先是通过扩束镜将光束直径扩大为原来的 10 倍左右,然后穿过气体流场,最后到达红外相机的探测器阵

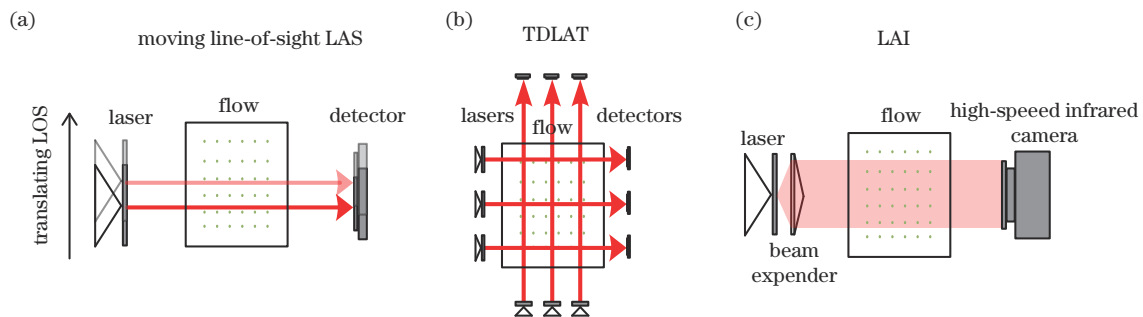


图 8 3 种成像方法对比。(a)移动 LOS 扫描;(b)多投影 TDLAT 技术;(c) LAI 方法

Fig. 8 Comparison of three imaging methods. (a) Moving line-of-sight (LOS) scanning; (b) multi-projection TDLAT technology; (c) LAI method

列上。高速红外相机连续采集穿过流场的信号光,将连续采集的图像中对应位置像素的光强信息顺序连接便可得到吸收信号,进而可求出流场温度、浓度等信息。

对于 LAI 技术,在红外相机的探测器阵列上有数千甚至数十万个像元,而每一个像元相当于一个光电探测器,空间分辨率不是由光束大小决定的,而是由像元大小决定的。时间分辨率不仅受到相机帧率的限制,还受相机采集得到的图像质量的影响,这是因为相机帧率决定信号采集的速率,而图像质量直接影响吸收信号的质量。为了提高测量精度,往往不得不进行多组信号的平均,必然导致时间分辨率降低,若采集的图像质量良好,从图像中获取的吸收信息能够直接满足精确测量的要求,便可提高检测的时间分辨率。

4.2 LAI 技术 2D 成像

LAI 技术产生光谱分辨率和空间丰富的数据集,从中可以利用层析成像重建生成定量的组分和温度分布。Wei 等^[73]使用中红外波长激光器(3~5 μm)对典型小直径火焰(<1 cm)中的燃料、中间体和燃烧产物进行成像。对轴对称层流火焰中 C_2H_6 (3.34 μm)、 CO (4.97 μm)和 CO_2 (4.19 μm)实现 1D 测量和 2D 重建。与 TDLAT 技术相比,不仅简化了光学布置,还可以显著提高时空数据带宽(约 400 条 LOS 同时采样)和空间分辨率(约 50 μm)。然而由于激光具有强相干性,

在通过光学系统时会产生严重的衍射效应,而衍射效应会引起图像伪影^[74-75]。这使得无法使用相机直接实现气体流场的 2D 成像,只能通过将相机分辨率设置为 200 pixel \times 2 pixel,燃烧器安装在由步进电机控制的垂直平移台上,以提供纵向空间分辨率,最后再通过层析成像技术才能实现待测流场的 2D 测量。

Tancin 等^[76]设计了一套去衍射系统,如图 9 所示,成功消除了衍射引起的爱里斑,并且应用此装置实现了层流火焰温度和 CO 浓度的 2D 吸收成像。该研究表明,中红外 LAI 能够在轴对称火焰中直接实现火焰温度和 CO 的 2D 成像,而无需机械移动 LOS,虽然需要多帧平均来提高最终图像质量,使得时间分辨率为 0.1~1 s,但据此可以实现高精度 2D 成像,且空间分辨率高达 140 μm 。与使用机械平移的传统中红外 TDLAT 技术相比,该技术减少了约 1000 倍的数据采集时间,与受激光直径限制的 TDLAT 技术相比,空间分辨率提升了 10 倍左右。Strahl 等^[77]更专注于 LAI 技术的工程应用,利用 TDLAS 技术与中红外成像相结合,对 CH_4 气体泄漏进行灵敏且定量的可视化测量。这项工作通过 3270 nm 带间级联激光器和红外摄像机测量 2 m 范围内的甲烷泄漏检测。实现了通过高达 125 Hz 的帧速率图像序列对低至 2 mL/min 的甲烷泄漏率进行可视化监测。气体羽流和泄漏可以通过 DAS 在单个图像中定位和量化,像素灵敏度约为 1×10^{-6} m。

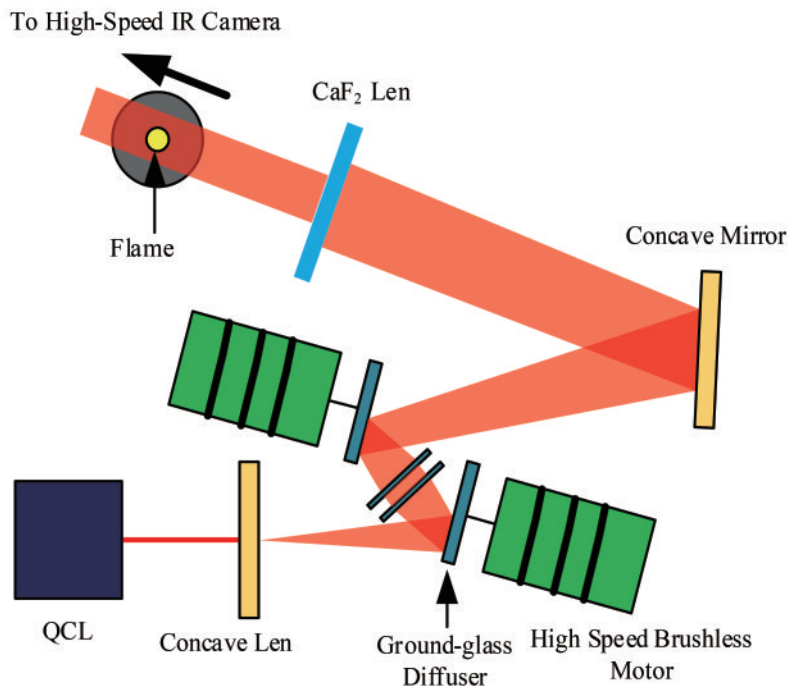


图 9 用于破坏激光相干性并提供无衍射 LAI 的光学装置^[76]

Fig. 9 Optical setup used to break laser light's coherence and provide diffraction-free LAI^[76]

4.3 LAI 技术 3D 成像

流场的 3D 成像,能够揭示其 3D 信息,对于实际气体流场测量具有重要意义。Wei 等^[78]使用 Tikhonov

正则化的线性层析成像方法将火焰温度和组分浓度的中红外 LAI 扩展到 3D。使用 4.85 μm 附近的量子级联激光器和 4.19 μm 附近的带间级联激光器对双峰火

焰交替进行背光照射。在 11 个不同的投影角度采集 2D 图像,产生 50688 条独立的 LOS,以大约 $70\ \mu\text{m}$ 的像素分辨率捕获场景。尽管获取了 11 个投影角的 2D 图像,但 3D 重建结果仍然具有较为严重的图像伪影。

为了减轻 3D 重建图像伪影,该团队在随后的工作中采用基于深度学习的有限视角反演方法对火焰中

CH_4 进行激光吸收 3D 成像。使用 $3.16\ \mu\text{m}$ 附近的带间级联激光器对双峰火焰进行背光照射,在高速红外相机上以 6 个不同的投影角度收集 2D 图像,产生总计 27648 条独立的 LOS,以像素分辨率约 $70\ \mu\text{m}$ 捕获场景(如图 10 所示)。结果表明,神经网络反演比线性层析成像能够以更少的投影角度更准确地预测火焰结构,并降低了计算负荷^[79](如图 11 所示)。

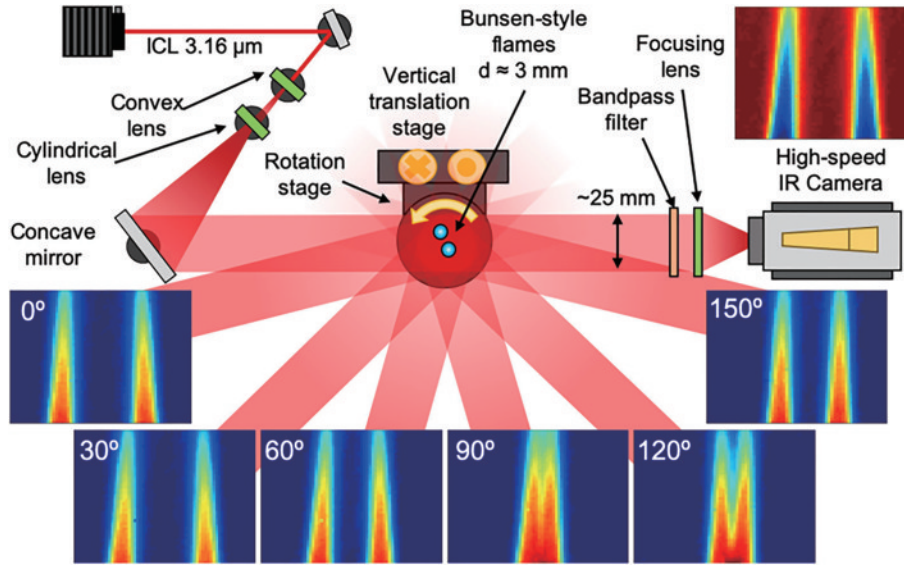


图 10 带间级联激光器光路调整和图像获取以及本生式火焰的各个角度 CH_4 的投影吸光度图像^[79]

Fig. 10 Interband cascade laser (ICL) alignment and transmission image and projected absorbance images of CH_4 shown with respective angle of Bunsen-style flames^[79]

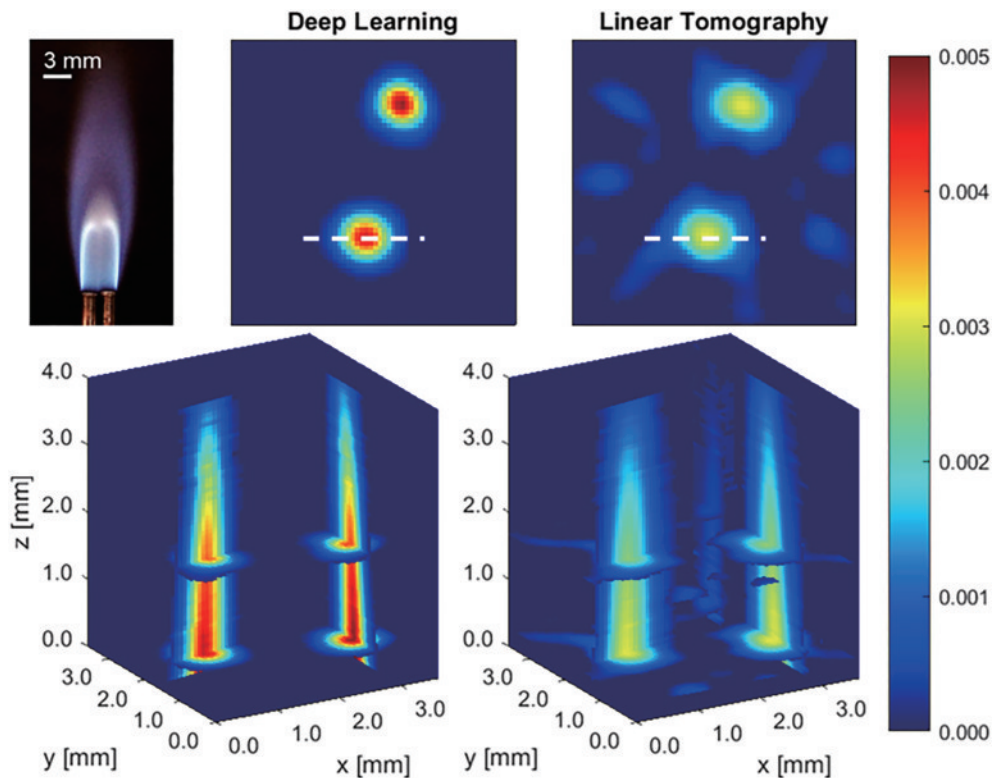


图 11 基于深度学习和层析成像重建效果对比图^[79]

Fig. 11 Comparison of reconstruction effects based on deep learning and tomography^[79]

最近,该团队又开发了一种用于激光吸收层析成像的深度学习方法,以有效整合与流场热化学和传输相关的物理先验信息^[80]。利用经训练的神经网络执行激光吸收图像的层析成像反演,以预测火焰中的温度和组分场。通过数值仿真和在台式层流火焰中的实验测试对该方法进行了评估。目标流场包括一个空间卷积的层流双峰火焰,在 4.85 μm 附近的量子级联激光器的可调谐激光的背景下探测 CO 的吸收。2D 图像以 11 个不同的投影角度收集,产生了 50688 条独立的 LOS,以大约 70 μm 的像素分辨率捕获场景。引入了卷积神经网络以有效生成温度和组分浓度分布。与传统的线性层析成像方法相比,基于学习的反演方法能够以较少的投影角更准确地预测火焰的种类和温度场,缩短收敛时间。

LAI 技术相较于 LAT 技术最大的优势在于其将后者的空间分辨率提升了约 2~3 个数量级,达到微量级,这对于具有陡峭梯度的燃烧场而言意义重大^[81],它可以更好地揭示燃烧流场的内部燃烧状态,有利于提高燃烧效率,降低有害物质的排放。然而,受限于相机的帧率,LAI 通常基于 DAS 技术,而无法借助 WMS 技术的抗噪声优势提高测量灵敏度。

5 总结与展望

对近 10 年来 LAI 技术的进展进行了综述。LAI 技术因其能够实现气体流场的 2D/3D 测量而显示出巨大优越性。TDLAT 技术相较于 LAI 技术有着更高的时间分辨率以及测量精度,LAI 技术显示出比 TDLAT 技术更高的空间分辨率,并且可扩展至中红外波段,可对更多种类的气体流场组分进行高空间分辨率的测量,尤其对于燃烧诊断技术的发展具有重要意义。综上所述,LAI 技术在实际流场测量中,依然存在一些不足和亟待解决的问题。

1) 针对 TDLAT 技术而言,其目前主要受限于两个方面:首先是有限的光谱测量范围导致其无法实现多组分同时测量问题,随着基础光学和光学工程的发展将提高激光光源,特别是中红外激光光源的性能,将有助于实现气体流场多组分同时 2D 成像测量;其次是以有限的光束布置完成气体流场的高精度高空间分辨率测量问题,实际流场空间是有限的,激光准直和探测器尺寸,导致投影光线数量受限,直接影响了重建精度以及测量空间分辨率,随着非线性层析成像技术的成熟以及深度学习等重建算法的进一步优化,将有助于以有限的视场角完成实际流场的高精度高空间分辨率测量。此外,非线性层析成像可以与波长调制光谱相结合,无需校准并具有高灵敏度。

2) 对于 LAI 技术而言,红外相机的成像水平直接影响 LAI 2D 测量的时空分辨率。在空间分辨率方面,由于相机帧率限制,为满足检测需求,采样点数量必须达到测量要求,不得不将像素分辨率降低来提升相机

的帧率,而像素分辨率的降低直接导致了 LAI 空间分辨率的大幅度降低。对于时间分辨率,受到多个因素的影响:一是相机帧率,相机帧率的提升可增加单位时间内获取图像的数量,进而提高时间分辨率;二是图像质量,捕获的图像受到随机噪声和系统噪声的影响,检测结果会产生较大误差,不得不进行多组信号的平均来提升测量准确度,不可避免地降低了激光吸收成像的时间分辨率;三是流场 3D 成像重建算法研究,现有的 3D 重建算法在重建速度和重建精度方面还有待进一步提升,高效快速的重建算法将有助于提升 LAI 的时间分辨率。未来,随着相机技术的发展和研制成本的降低,可使用多台相机对湍流火焰实现微米级和千赫兹以上量级的高时空分辨率测量。

参 考 文 献

- [1] Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J, et al. A high sensitivity spectrometer with tunable diode laser for ambient methane monitoring[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(1): 54-57.
- [2] Zhang W, Wu Z Y, Yu Q X. Photoacoustic spectroscopy for fast and sensitive ammonia detection[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(11): 677-679.
- [3] Wang Y, Wei Y B, Liu T Y, et al. TDLAS detection of propane/butane gas mixture by using reference gas absorption cells and partial least square approach[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(20): 8587-8596.
- [4] Xin M Y, Song J L, Rao W, et al. An efficient regulation approach for tomographic reconstruction in combustion diagnostics based on TDLAS method[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(12): 3158-3166.
- [5] 李金义, 孙福双, 张宸阁, 等. 调谐激光吸收光谱技术在燃煤电厂中的应用及展望[J]. 激光杂志, 2020, 41(4): 8-17.
Li J Y, Sun F S, Zhang C G, et al. Application and prospect of tunable laser absorption spectroscopy in coal-fired power plants[J]. Laser Journal, 2020, 41(4): 8-17.
- [6] 王海青, 林伟, 全毅恒, 等. 基于激光的燃烧场温度诊断方法综述[J]. 气体物理, 2020, 5(1): 42-55.
Wang H Q, Lin W, Tong Y H, et al. Review of laser-based temperature diagnosis methods for combustion field [J]. Physics of Gases, 2020, 5(1): 42-55.
- [7] Lee J G, Kim K, Santavica D A. Measurement of equivalence ratio fluctuation and its effect on heat release during unstable combustion[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000, 28(1): 415-421.
- [8] Hardalupas Y, Orain M. Local measurements of the time-dependent heat release rate and equivalence ratio using chemiluminescent emission from a flame[J]. Combustion and Flame, 2004, 139(3): 188-207.
- [9] Stojkovic B D, Fansler T D, Drake M C, et al. High-speed imaging of OH* and soot temperature and concentration in a stratified-charge direct-injection gasoline engine[J]. Proceedings of the Combustion Institute,

- 2005, 30(2): 2657-2665.
- [10] Jiang L Q, Gu C, Zhou G Z, et al. Cellular instabilities of n-butane/air flat flames probing by PLIF-OH and PLIF-CH₂O laser diagnosis[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 118: 110155.
- [11] Qi H L, Sun R, Peng J B, et al. Experimental investigation on the ignition and combustion characteristics of pyrolyzed char and bituminous coal blends[J]. *Fuel*, 2020, 281: 118732.
- [12] Mathews G C, Goldenstein C S. Wavelength-modulated planar laser-induced fluorescence for imaging gases[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5278-5281.
- [13] Pu J P, Sutton J A. Quantitative 2D thermometry in turbulent sooting non-premixed flames using filtered Rayleigh scattering[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(19): 5742-5751.
- [14] Zhao F Q, Hiroyasu H. The applications of laser Rayleigh scattering to combustion diagnostics[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1993, 19(6): 447-485.
- [15] Wehrmeyer J A, Cheng T S, Pitz R W. Raman scattering measurements in flames using a tunable KrF excimer laser[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(10): 1495-1504.
- [16] Roy S, Gord J R, Patnaik A K. Recent advances in coherent anti-Stokes Raman scattering spectroscopy: fundamental developments and applications in reacting flows[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(2): 280-306.
- [17] Fuest F, Barlow R S, Chen J Y, et al. Raman/Rayleigh scattering and CO-LIF measurements in laminar and turbulent jet flames of dimethyl ether[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(8): 2533-2562.
- [18] Li J Y, Yu Z W, Du Z H, et al. Standoff chemical detection using laser absorption spectroscopy: a review [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2771.
- [19] 洪延姬, 宋俊玲, 饶伟, 等. 激光吸收光谱断层诊断技术测量燃烧流场研究进展[J]. *实验流体力学*, 2018, 32(1): 43-54.
- Hong Y J, Song J L, Rao W, et al. Progress on tunable diode laser absorption tomography technique for combustion diagnostics[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2018, 32(1): 43-54.
- [20] Cheong K P, Ma L H, Wang Z, et al. Influence of line pair selection on flame tomography using infrared absorption spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 2019, 73(5): 529-539.
- [21] Hanson R K, Kuntz P A, Kruger C H. High-resolution spectroscopy of combustion gases using a tunable IR diode laser[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(8): 2045-2048.
- [22] Hanson R K. Shock tube spectroscopy: advanced instrumentation with a tunable diode laser[J]. *Applied Optics*, 1977, 16(6): 1479-1481.
- [23] Stacewicz T, Bielecki Z, Wojtas J, et al. Detection of disease markers in human breath with laser absorption spectroscopy[J]. *Opto-Electronics Review*, 2016, 24(2): 82-94.
- [24] Jatana G, Geckler S, Koeberlein D, et al. Design and development of a probe-based multiplexed multi-species absorption spectroscopy sensor for characterizing transient gas-parameter distributions in the intake systems of I.C. engines[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 240: 1197-1204.
- [25] Swinehart D F. The beer-lambert law[J]. *Journal of Chemical Education*, 1962, 39(7): 333.
- [26] Hanson R K, Spearrin R M, Goldenstein C S. *Spectroscopy and optical diagnostics for gases*[M]. Cham: Springer, 2016.
- [27] Wolfgang D. *Laser spectroscopy*[J]. Heidelberg: Springer, 2014.
- [28] Liu C, Xu L J. Laser absorption spectroscopy for combustion diagnosis in reactive flows: a review[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2019, 54(1): 1-44.
- [29] Li J S, Yu B L, Zhao W X, et al. A review of signal enhancement and noise reduction techniques for tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2014, 49(8): 666-691.
- [30] Li H J, Rieker G B, Liu X, et al. Extension of wavelength-modulation spectroscopy to large modulation depth for diode laser absorption measurements in high-pressure gases[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(5): 1052-1061.
- [31] Pan X C, Sidky E Y, Vannier M. Why do commercial CT scanners still employ traditional, filtered back-projection for image reconstruction? [J]. *Inverse Problems*, 2009, 25(12): 1230009.
- [32] Wondraczek L, Khorsandi A, Willer U, et al. Mid-infrared laser-tomographic imaging of carbon monoxide in laminar flames by difference frequency generation[J]. *Combustion and Flame*, 2004, 138(1-2): 30-39.
- [33] Schleicher E, da Silva M J, Thiele S, et al. Design of an optical tomograph for the investigation of single- and two-phase pipe flows[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(9): 094006.
- [34] 夏晖晖, 刘建国, 许振宇, 等. 基于代数迭代算法的燃烧火焰温度场和气体浓度场重建研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35(10): 2697-2702.
- Xia H H, Liu J G, Xu Z Y, et al. Reconstruction research for gas concentration and temperature of flame based on algebraic reconstruction technique[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(10): 2697-2702.
- [35] Wang F, Wu Q, Huang Q X, et al. Simultaneous measurement of 2-dimensional H₂O concentration and temperature distribution in premixed methane/air flame using TDLAS-based tomography technology[J]. *Optics Communications*, 2015, 346: 53-63.
- [36] 殷可为, 胥颀, 张龙, 等. TDLAS 技术用于燃烧场气体温度和浓度重建研究[J]. *光电工程*, 2016, 43(12): 20-27.
- Yin K W, Xu D, Zhang L, et al. 2D reconstruction for gas temperature and concentration based on TDLAS[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(12): 20-27.
- [37] Jeon M G, Doh Y, Kamimoto T, et al. Performances of new reconstruction algorithms for CT-TDLAS[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 15: 1148-1160.
- [38] Jeon M G, Doh D H, Deguchi Y. Measurement

- enhancement on two-dimensional temperature distribution of methane-air premixed flame using SMART algorithm in CT-TDLAS[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(22): 4955.
- [39] Jeon M G, Hong J W, Doh D H, et al. A study on two-dimensional temperature and concentration distribution of Propane-Air premixed flame using CT-TDLAS[J]. *Modern Physics Letters B*, 2020, 34(7): 2040020.
- [40] Jeon M G, Doh D H, Deguchi Y, et al. Evaluation of 3D measurement using CT-TDLAS[J]. *Modern Physics Letters B*, 2019, 33(14): 1940018.
- [41] Xia H H, Kan R F, Xu Z Y, et al. Two-step tomographic reconstructions of temperature and species concentration in a flame based on laser absorption measurements with a rotation platform[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 90: 10-18.
- [42] Bao Y, Zhang R, Enemali G, et al. Relative entropy regularized TDLAS tomography for robust temperature imaging[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 4501909.
- [43] Yu T, Cai W W, Liu Y Z. Rapid tomographic reconstruction based on machine learning for time-resolved combustion diagnostics[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(4): 043101.
- [44] 司菁菁, 付庚宸, 程银波, 等. 基于层次化离散与残差网络的可调谐二极管激光吸收光谱层析成像[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43: 1-8.
- Si J J, Fu G C, Cheng Y B, et al. Tunable diode laser absorption tomography based on hierarchical discretization and residual network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43: 1-8.
- [45] Wright P, Terzija N, Davidson J L, et al. High-speed chemical species tomography in a multi-cylinder automotive engine[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2010, 158(1): 2-10.
- [46] Wright P, Garcia-Stewart C A, Carey S J, et al. Toward in-cylinder absorption tomography in a production engine [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(31): 6578-6592.
- [47] Terzija N, Davidson J L, Garcia-Stewart C A, et al. Image optimization for chemical species tomography with an irregular and sparse beam array[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(9): 094007.
- [48] Twynstra M G, Daun K J. Laser-absorption tomography beam arrangement optimization using resolution matrices [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(29): 7059-7068.
- [49] Liu C, Tsekenis S A, Polydorides N, et al. Toward customized spatial resolution in TDLAS tomography[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(5): 1748-1755.
- [50] 宋俊玲, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于激光吸收光谱技术的燃烧场气体温度和浓度 2D 分布重建研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(24): 240702.
- Song J L, Hong Y J, Wang G Y, et al. Two-dimensional reconstructions of gas temperature and concentration in combustion based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(24): 240702.
- [51] Liu C, Xu L, Chen J, et al. Development of a fan-beam TDLAS-based tomographic sensor for rapid imaging of temperature and gas concentration[J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22494-22511.
- [52] Zhou G X, Zhang X, Li J P, et al. Optical diagnostics in a detonation-driven direct-connected circular combustor fueled with hydrogen for Mach 10 scramjet[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(54): 27801-27815.
- [53] Zhang H Y, Cao Z, Zhao W S, et al. A compact laser absorption spectroscopy tomographic system with short spectral scanning time and adjustable frame rate[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(10): 8226-8237.
- [54] Xia H H, Xu Z Y, Kan R F, et al. Numerical study of two-dimensional water vapor concentration and temperature distribution of combustion zones using tunable diode laser absorption tomography[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 72: 170-178.
- [55] Ma L, Cai W W, Caswell A W, et al. Tomographic imaging of temperature and chemical species based on hyperspectral absorption spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8602-8613.
- [56] Cai W W, Ewing D J, Ma L. Application of simulated annealing for multispectral tomography[J]. *Computer Physics Communications*, 2008, 179(4): 250-255.
- [57] Cai W W, Ma L. Applications of critical temperature in minimizing functions of continuous variables with simulated annealing algorithm[J]. *Computer Physics Communications*, 2010, 181(1): 11-16.
- [58] Corana A, Marchesi M, Martini C, et al. Minimizing multimodal functions of continuous variables with the "simulated annealing" algorithm: corrigenda for this article is available here[J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1987, 13(3): 262-280.
- [59] 臧益鹏, 许振宇, 夏晖晖, 等. 基于免标定波长调制技术的高温谱线参数测量方法[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1011001.
- Zang Y P, Xu Z Y, Xia H H, et al. Method for measuring high temperature spectral line parameters based on calibration-free wavelength modulation technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1011001.
- [60] 王兴平, 彭冬, 李佳胜, 等. 基于波长调制吸收光谱的燃烧流场 2D 重建[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 0711002.
- Wang X P, Peng D, Li J S, et al. Two-dimensional reconstruction of combustion flow field using wavelength-modulated absorption spectra[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0711002.
- [61] Cai W W, Kaminski C F. Multiplexed absorption tomography with calibration-free wavelength modulation spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(15): 154106.
- [62] Qu Q W, Cao Z, Xu L J, et al. Optimal selection of spectral lines for multispectral absorption tomography[J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(9): 1-9.
- [63] Shi J W, Qi H, Zhang J Y, et al. Simultaneous measurement of flame temperature and species concentration distribution from nonlinear tomographic absorption spectroscopy[J]. *Journal of Quantitative*

- Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 241(5): 106693.
- [64] Yu T, Tian B, Cai W W. Development of a beam optimization method for absorption-based tomography[J]. Optics Express, 2017, 25(6): 5982-5999.
- [65] Ma L, Li X S, Sanders S T, et al. 50-kHz-rate 2D imaging of temperature and H₂O concentration at the exhaust plane of a J85 engine using hyperspectral tomography[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 1152-1162.
- [66] Blume N G, Ebert V, Dreizler A, et al. Broadband fitting approach for the application of supercontinuum broadband laser absorption spectroscopy to combustion environments[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(1): 015501.
- [67] 王兴平, 彭冬, 李佳胜, 等. 基于波长调制吸收光谱的燃烧流场 2D 重建[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0711002.
Wang X P, Peng D, Li J S, et al. Two-dimensional reconstruction of combustion flow field using wavelength-modulated absorption spectra[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0711002.
- [68] Liu X C, Zhang G Y, Huang Y, et al. Two-dimensional temperature and carbon dioxide concentration profiles in atmospheric laminar diffusion flames measured by mid-infrared direct absorption spectroscopy at 4.2 μm [J]. Applied Physics B, 2018, 124(4): 1-10.
- [69] Nau P, Koppmann J, Lackner A, et al. Quantum cascade laser-based MIR spectrometer for the determination of CO and CO₂ concentrations and temperature in flames[J]. Applied Physics B, 2015, 118(3): 361-368.
- [70] 刘晶儒, 胡志云. 基于激光的测量技术在燃烧流场诊断中的应用[J]. 中国光学, 2018, 11(4): 531-549.
Liu J R, Hu Z Y. Applications of measurement techniques based on lasers in combustion flow field diagnostics[J]. Chinese Optics, 2018, 11(4): 531-549.
- [71] 阚瑞峰, 夏晖晖, 许振宇, 等. 激光吸收光谱流场诊断技术应用研究与进展[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0911005.
Kan R F, Xia H H, Xu Z Y, et al. Research and progress of flow field diagnosis based on laser absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0911005.
- [72] Cai W W, Kaminski C F. Tomographic absorption spectroscopy for the study of gas dynamics and reactive flows[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2017, 59: 1-31.
- [73] Wei C Y, Pineda D I, Goldenstein C S, et al. Tomographic laser absorption imaging of combustion species and temperature in the mid-wave infrared[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 20944-20951.
- [74] 赵志国, 冯建武. 光源相干性对衍射场的影响[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2001, 20(2): 41-42.
Zhao Z G, Feng J W. The influence of light source coherence in the diffraction field[J]. Journal of Yanan University (Natural Science Edition), 2001, 20(2): 41-42.
- [75] 穆丹丹, 朱永田, 张凯. 天文光纤机械扰模器调制环形光场的实验研究[J]. 应用光学, 2012, 33(5): 996-1001.
Mu D D, Zhu Y T, Zhang K. Modulation of annular light distribution by mechanical fiber scrambler[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5): 996-1001.
- [76] Tancin R J, Spearrin R M, Goldenstein C S. 2D mid-infrared laser-absorption imaging for tomographic reconstruction of temperature and carbon monoxide in laminar flames[J]. Optics Express, 2019, 27(10): 14184-14198.
- [77] Strahl T, Herbst J, Lambrecht A, et al. Methane leak detection by tunable laser spectroscopy and mid-infrared imaging[J]. Applied Optics, 2021, 60(15): C68-C75.
- [78] Wei C Y, Schwarm K K, Pineda D I, et al. Volumetric laser absorption imaging of temperature, CO and CO₂ in laminar flames using 3D masked Tikhonov regularization [J]. Combustion and Flame, 2021, 224: 239-247.
- [79] Wei C Y, Schwarm K K, Pineda D I, et al. Deep neural network inversion for 3D laser absorption imaging of methane in reacting flows[J]. Optics Letters, 2020, 45(8): 2447-2450.
- [80] Wei C Y, Schwarm K K, Pineda D I, et al. Physics-trained neural network for sparse-view volumetric laser absorption imaging of species and temperature in reacting flows[J]. Optics Express, 2021, 29(14): 22553-22566.
- [81] 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, 2017, 60: 132-176.