

激光吸收光谱层析成像及复杂燃烧场动态监测

曹章*, 高欣, 陆方曠, 徐立军**

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 燃烧是工业界广泛使用的一种能量转换机制, 实时掌握燃烧场燃烧状况对优化燃烧条件和探究燃烧规律具有重要意义。激光吸收光谱(LAS)技术作为一种测量灵敏度高、响应迅速的非接触测量手段, 与计算层析成像(CT)技术相结合, 可同时实现火焰温度和组分浓度分布的可视化测量, 并进一步分析燃烧反应规律。近年来, LAS 技术以其测量系统简单、环境适应性好等优势, 在复杂燃烧场参数诊断领域得到了广泛应用。综述了激光吸收光谱层析成像技术及其在复杂燃烧场动态监测中的应用, 主要从激光吸收光谱层析成像传感器、数据采集系统、层析成像算法和复杂燃烧场实时动态监测等方面进行介绍。

关键词 激光吸收光谱; 计算层析成像; 燃烧场; 动态监测; 温度; 组分浓度

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1904002

1 引言

燃烧是复杂的物理化学变化, 燃料中的化学能通过燃烧反应转变为热能, 形成高温高压的燃烧产物, 进而推动机械设备做功, 实现热能到机械能的转变。然而, 燃料的燃烧效率和工作温度范围决定着燃烧设备的工作性能及使用寿命; 且燃烧过程中不可避免地生成的碳氧化物、氮氧化物等污染物, 严重危害人类健康和全球环境^[1-4]。需要探究复杂燃烧场的燃烧反应规律, 为实时掌握燃烧状况、调整燃烧条件、优化燃烧设备设计提供理论依据^[5-8]。掌握燃烧反应规律的关键在于获得燃烧场温度、组分浓度等测量数据。燃烧反应常发生在高温高压的恶劣环境, 且测量空间布局受限, 给燃烧场参数测量带来严峻挑战。

对复杂燃烧场的参数测量方法主要分为接触式和非接触式两类。接触式测量方法会干扰流场且时空分辨率受限^[9-10], 而非接触式测量方法不干扰燃烧场, 可有效还原被测燃烧参数的真实状态。非接触测量方法中, 激光测量方法受燃烧场环境影响较小、测量实时性高, 已被广泛应用于复杂燃烧场参数测量。激光测量方法主要包括辐射图像法^[11-12]、自发拉曼散射法(SRS)^[13-14]、相干反斯托克斯拉曼散射光谱法(CARS)^[15-17]、激光诱导光栅光谱法(LIGS)^[18-19]、光声光谱法(PAS)^[20-21]、平面激光诱导荧光法(PLIF)^[22-23]和激光吸收光谱法(LAS)^[24-25]等。

相对于其他非接触式燃烧诊断技术, LAS 技术具有非侵入式测量、高选择性、多参数检测、环境适应性

强及适合工业化应用等优势, 且测量结果几乎不受燃烧产物和微小颗粒的影响, 测量精度高。1977 年, 斯坦福大学 Hanson 课题组^[26]首次利用可调谐二极管激光器实现了燃烧场中 CO 分子的吸收光谱测量, 揭示了 LAS 技术在燃烧监测与诊断领域的应用前景。此后, LAS 技术得到了快速发展, 被应用于燃烧场温度^[27-29]、浓度^[30-32]、压强^[33-36]和速度^[37-40]等参数的测量中。除二极管激光器外, 垂直腔面发射激光器(VCSEL)^[41-42]、傅里叶锁模(FDML)激光器^[43]、带间级联激光器(ICL)^[44-45]和量子级联激光器(QCL)^[46-47]等红外激光器均可作为激光吸收光谱测量的光源, 实现对 CO₂^[46]、H₂O^[48]、CO^[49]、NO^[50]、NO₂^[51]、HCl^[52]等多种燃烧产物分子的探测。LAS 技术与计算机层析成像(CT)技术相结合, 可实现标准燃烧装置、发动机燃烧室中燃烧场温度、组分浓度等典型参数分布的成像测量^[53-58], 为燃烧基础研究、燃烧过程控制和燃烧室结构设计等提供指导。

近年来, 国内外研究单位对 LAS 技术在复杂燃烧场动态监测方面进行了大量研究, 取得了系列研究成果。本文介绍了单路 LAS 技术的原理与发展现状和 LAS 仪器的研制及应用, 概述了 LAS 成像技术的发展和燃烧场参数分布监测应用情况, 并展望了 LAS 技术在复杂燃烧场动态监测领域的发展趋势。

2 单路 LAS 技术的原理与发展

2.1 基于吸收光谱的温度浓度测量原理

LAS 单路测量原理如图 1 所示。激光穿过被测

收稿日期: 2022-06-02; 修回日期: 2022-07-09; 录用日期: 2022-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(62031002, 61827802, 61961130393)

通信作者: *zh_cao@buaa.edu.cn; **lijunxu@buaa.edu.cn

气体后,利用入射光强 I_0 和透射光强 I_t 可以得到气体的吸收光谱:

$$\alpha(\nu) = -\ln \left[\frac{I_t(\nu)}{I_0(\nu)} \right] = p \int_0^L X_{\text{abs}}(x) S [T(x)] \phi_{\nu}(\nu) dx, \quad (1)$$

式中: p 为总压, atm (1 atm $\approx 1.01 \times 10^5$ Pa); x 表示

光路上某点的坐标, cm; $X_{\text{abs}}(x)$ 为 x 处的气体浓度; $T(x)$ 为 x 处的温度, K; $S [T(x)]$ 为被测气体吸收谱线的线强度, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$; $\phi_{\nu}(\nu)$ 为被测气体吸收光谱的线型函数, cm。

由式(1)可以看到,吸收光谱中包含了气体的温度和浓度等信息,因此可以利用 LAS 技术进行气体温度及浓度的测量。

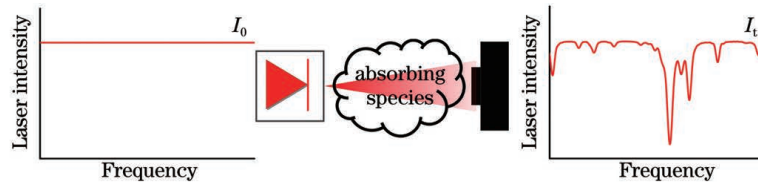


图1 LAS测量原理

Fig. 1 Schematic diagram of measurement of LAS

激光吸收光谱的经典测量方法主要有三种,即直接吸收光谱法(DAS)、波长调制光谱法(WMS)和幅度调制光谱法(AMS)。下面将分别介绍其测量原理及具体应用。

2.2 常见的激光吸收光谱方法与应用

2.2.1 DAS 光谱测量技术

DAS是直接从透射激光光强中提取气体吸收光谱,进而进行温度及气体浓度计算的方法^[59],测量原理如图2所示。

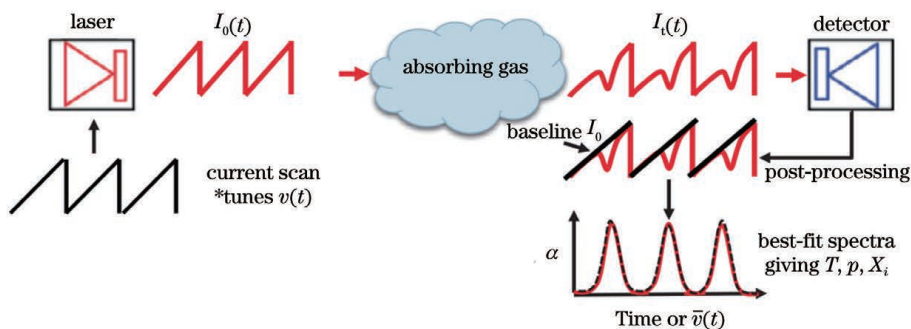


图2 直接吸收光谱法测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of direct absorption spectroscopy

通过 DAS 得到气体的吸收光谱后,可利用比色测温法实现温度测量。对于被测气体吸收光谱中

的某一条吸收谱线,该谱线的线强度 $S(T)$ 可表示为

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T} \right) \exp \left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \times \left[\frac{1 - \exp(-hc\nu_0/kT)}{1 - \exp(-hc\nu_0/kT_0)} \right], \quad (2)$$

式中: T_0 为参考温度, K, 通常取 296 K; $Q(T)$ 为配分函数; h 为普朗克常数, $\text{J} \cdot \text{s}$; c 为光速, cm/s ; E'' 为该谱线对应吸收跃迁的低能级能量, cm^{-1} ; k 为玻尔兹曼常数, J/K ; ν_0 为该吸收谱线中心处的波数, cm^{-1} 。

由 $S(T)$ 的公式可知,其包含的参数中,只有温度 T 受外界影响,其余参数均由该谱线自身性质决定。因此可同时测量被测气体的两条吸收谱线 ν_1 和 ν_2 , 并对吸收谱线的吸收率进行积分,利用线型函数归一化的特性,即 $\int_{-\infty}^{+\infty} \phi_{\nu}(\nu) d\nu = 1$, 得到积分面积 A_1 和 A_2 (假设气体均匀分布):

$$A_i = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha_i(\nu) d\nu = p X_{\text{abs}} S_i(T) L \int_{-\infty}^{+\infty} \phi_i(\nu) d\nu = p X_{\text{abs}} S_i(T) L. \quad (3)$$

由此可得 A_1 和与 A_2 的比值

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{p X_{\text{abs}} S_1(T) L}{p X_{\text{abs}} S_2(T) L} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)}. \quad (4)$$

根据式(4)可得, $\frac{S_1(T)}{S_2(T)}$ 是只与温度有关的参数,可根据该比值推算得到气体的温度。获得温度 T 后,可推算出其中一条吸收谱线的线强度 $S_1(T)$,进而计算得到气体浓度:

$$X_{\text{abs}} = \frac{A_1}{p S_1(T) L}. \quad (5)$$

除了比色测温法外,另一类通过气体的吸收光谱计算气体参数的方法为光谱参数非线性拟合方法,利用吸收光谱的线型函数来计算温度及气体浓度。吸收光谱的线型函数描述了吸收光谱的形状,一般用 Voigt 线型 $\phi_\nu(\nu)$ 表示:

$$\phi_\nu(\nu) = \frac{2\ln 2 \Delta\nu_C}{\pi^{3/2} \Delta\nu_D^2} \times \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-y^2)}{\left(\frac{\sqrt{\ln 2} \Delta\nu_C}{\Delta\nu_D}\right)^2 + \left[\frac{2\sqrt{\ln 2}(\nu - \nu_0)}{\Delta\nu_D} - y\right]^2} dy, \quad (6)$$

式中: $\Delta\nu_D$ 表示线型函数的高斯半高宽(FWHM),受气体温度 T 影响; $\Delta\nu_C$ 表示线型函数的洛伦兹半高宽,受气体分压 pX_{abs} 影响。

定义参数 a 来描述温度与压力对 Voigt 线型的影响程度:

$$a = \frac{\sqrt{\ln 2} \Delta\nu_C}{\Delta\nu_D}. \quad (7)$$

当 $a \rightarrow 0$ 时,温度 T 影响更明显,Voigt 线型接近理想的高斯线型;当 $a \rightarrow \infty$ 时,分压 pX_{abs} 影响更明显,Voigt 线型接近理想的洛伦兹线型^[60]。若气体的温度 T 、分压 pX_{abs} 及光路长度 L 已知,可完整描述吸收光谱。利用非线性拟合方法,使得具有 Voigt 线型的吸收光谱的仿真数据逼近实验测得的吸收光谱,可从拟合结果中得到气体的温度及浓度参数。

2006年,斯坦福大学的 Liu 等^[61]使用比色法,测量了位于 7429.72 cm^{-1} 和 7454.45 cm^{-1} 处的 H_2O 的吸收谱线,实验采用管式炉作为加热装置,加热范

围 $350 \sim 1000 \text{ K}$,利用所选的吸收谱线对得到的测温平均偏差为 2.0 K 。2015年,中国科学院安徽光学精密机械研究所的姚路等^[62]选用洛伦兹线型作为吸收光谱的线型,利用 Levenberg-Marquardt 非线性拟合算法拟合得到吸收谱线的积分面积,实现大气痕量 CO 的浓度测量,LAS 测量结果与 CO 点式分析仪结果具有良好的一致性。2017年,浙江大学的 Wu 等^[63]利用 H_2O 位于 7153.75 cm^{-1} 和 7154.35 cm^{-1} 处的吸收谱线,通过单个分布反馈(DFB)激光器测量了平焰燃烧炉的不同火焰的烟灰体积分数、温度和 H_2O 浓度,DAS 测量结果与用热电偶等方法得到的结果一致。2018年,香港中文大学的 Ma 等^[64]采用比色法,使用单个 DFB 激光器测量了位于 4029.52 cm^{-1} 和 4030.73 cm^{-1} 处的 H_2O 的吸收谱线,对平焰燃烧炉的燃烧场进行了温度测量,比色法测温结果与热电偶测温结果高度一致。2021年,中国科学院力学研究所的 Fang 等^[65]使用 DAS 测量了混合火箭发动机出口的 H_2O 的吸收谱线,使用比色测温法及对应的浓度测量方法测得了发动机出口的温度及 H_2O 浓度,测量过程覆盖了发动机的点火、燃烧和关机全过程,并将 LAS 测量结果与计算流体动力学(CFD)仿真结果结合,分析发动机的工作状态,展示了 LAS 技术在辅助混合火箭发动机设计方面的应用潜力。

2.2.2 WMS 光谱测量技术

WMS 是直接透射激光光强中提取气体吸收光谱的谐波分量,进而进行温度及气体浓度计算的方法,如图 3 所示。

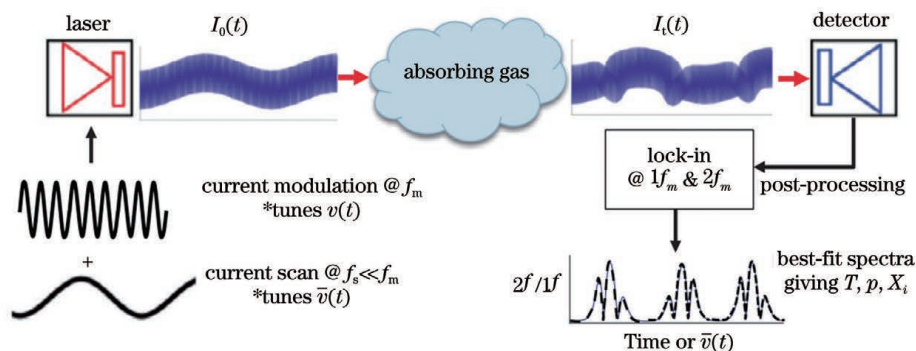


图 3 波长调制光谱法原理图

Fig. 3 Schematic diagram of wavelength modulation spectroscopy

用高频正弦波调制激光器的输出波数,可得随时间变化的激光输出波数为

$$\nu(t) = \bar{\nu}(t) + d_m \cos(2\pi f_m t), \quad (8)$$

式中: $\bar{\nu}(t)$ 为未调制时的激光波数; d_m 为调制深度;

f_m 为调制频率。

通过提取 WMS 信号的二次谐波($2f$)和一次谐波($1f$),可以得到归一化的 WMS 二次谐波信号,记为 $2f/1f$ 信号:

$$\frac{H_2}{i_0} = \frac{S(T) \cdot p \cdot X_{\text{abs}} \cdot L}{i_0 \cdot \pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \phi(\bar{\nu}_0 + d_m \cos \theta) \cdot \cos 2\theta \cdot d\theta. \quad (9)$$

该信号同样包含了谱线强度、气体浓度等参数,可以使用比色测温法及对应的气体浓度测量方法进行测量。同样地,也可以使用非线性拟合的方法,令仿真的WMS的 $2f/1f$ 信号逼近实验测得的 $2f/1f$ 信号,得到温度和气体浓度值。

2014年,斯坦福大学的Spearrin等^[47]使用WMS测量了超燃冲压发动机燃烧室内CO在 2059.9 cm^{-1} 和 2060.3 cm^{-1} 处的吸收谱线 $2f/1f$ 信号,并用比色法实现了超燃冲压发动机燃烧室内燃烧场的温度测量,测量的温度范围为 $800\sim 2200\text{ K}$ 。2018年,天津大学的Du等^[66]提出一种调制幅度变化的WMS方法,对柴油发动机工作过程中的 H_2O 和 NH_3 的吸收谱线进行了测量;在测量 H_2O 时,利用非线性拟合的方式,使仿真的WMS信号逼近实验测得的WMS信号,得到吸收光谱的谱线中心 ν_0 ,积分面积 A 以及洛伦兹半高宽 $\Delta\nu_c$,进而利用比色法及相应的气体浓度测量方法得到温度、压力及 H_2O 浓度;在测量 NH_3 时,根据得出的温度及压力,使用线性拟合方式拟合WMS信号,得到 NH_3 浓度;测量结果与热电偶及电化学传感器的测量结果一致, NH_3 浓度、 H_2O 浓度、温度及压力的测量误差分别为 8.4% 、 8.0% 、 5.3% 和 7.0% 。2018年,清华大学的Du等^[67]提出了一种高灵敏度、无需标定的方法——波长调制-直接吸收光谱法(WM-DAS),该方法通过提取调制激光强度的特征频率来实现。该方法结合了用无标定DAS测量绝对吸收度的优点和WMS增强的噪声抑制和高灵敏度。

2019年,清华大学的He等^[68]以激光管作为实验平台,利用WMS测量了点火延迟阶段和燃烧反应过程中的 CO_2 浓度,先缓慢上升然后快速上升的浓度变化情况与实际化学链反应相符合。2021年,东南大学的Wang等^[69]根据WMS的谐波公式推导,提出了一种基于偶次谐波的无校准波长调制光谱精确算法;该算法由更精确的Voigt函数模型解析推导而来,不仅可以测量时间减少到毫秒级,而且可以适用于不同程度的线型展宽;实验验证了该方法的有效性,气体温度相对误差小于 2.4% 。2021年,中国科学院力学研究所的Li等^[70]提出了一种用于气体传感的线性免标定波长调制光谱(LCF-WMS)技术,该技术通过结合发射强度和背景信号的自然对数,消除了强度、强度调制和调制相位的影响,获得了沿视线可积的谐波信号,从而实现了无标定测量。2021年,普渡大学的Mathews等^[36]使用WMS测量了旋转爆轰发动机的环面的温度及 H_2O 浓度,使用了非线性拟合方法,将洛伦兹半高宽 $\Delta\nu_c$ 、温度 T 以及 H_2O 浓度 X_{abs} 作为变量,将 $2f/1f$ 信号及 $4f/1f$ 信号用于仿真与实验数据的拟合,实现了 $300\sim 2500\text{ K}$ 温度范围内的测量,展示了WMS方法在高速燃烧场参数动态测量上的潜力。

2.2.3 AMS光谱测量技术

除DAS与WMS之外,还有一种使用外调制方法实现吸收光谱提取的LAS技术,即AMS,其原理如图4所示。

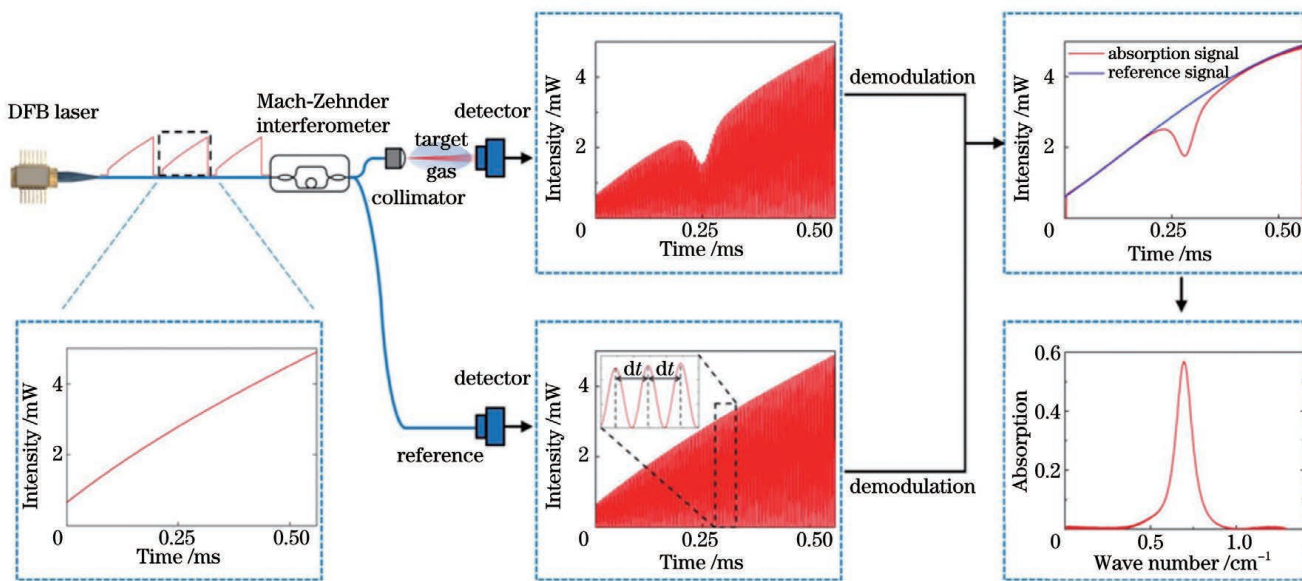


图4 幅度调制光谱法原理图

Fig. 4 Schematic diagram of amplitude modulation spectroscopy

在AMS中,迭代调整激光器的注入电流使激光在目标气体吸收谱线处线性扫描,两束覆盖不同吸收谱线的激光经过光纤合束器,并通过干涉仪产生载波信号。通过光纤分束器后的激光,一束经过准直镜后穿过目标气体,另一束不通过气体而直接到达探测器。

对两个激光信号进行计算得到两个吸收谱线的积分吸收面积,进而获得目标气体温度。该方法实现了波长无调制情况下的光强调制,可在提高抗噪性能的同时提取直接吸收光谱,使得在所测的 $300\sim 370\text{ K}$ 范围内,温度测量最大误差降低到 4 K ^[24]。

2012年,曼彻斯特大学的 Karagiannopoulos 等^[71]使用半导体光放大器(SOA)实现了 AMS 方法,完成了 H₂O 的直接吸收光谱测量。2021年,北京航空航天大学徐立军(Xu)等^[24]通过马赫-曾德尔干涉仪的频谱移动来实现 DAS 抗噪性。DFB 激光器的驱动电流被调谐用于线性波数扫描,然后是锯齿爬升激光信号。激光信号通过干涉仪,用兆赫级的高频载波信号调制锯齿信号,使其远离背景噪声。在不同温度下的数值模拟和实际实验中验证了所提出方法的抗噪

性。与 DAS 的性能比较表明,所提出的方法在嘈杂的背景中获得了更精确的温度值。

3 LAS 层析成像仪器研制

LAS 是一种基于视线效应的测量技术。为克服其只能获得流场内平均信息的不足,需在同一测量平面内增加不同角度的光路,以获得流场内的二维分布,其测量原理如图 5 所示。通过获取在空间不同位置上的视线投影数据,对待测区域进行重建。

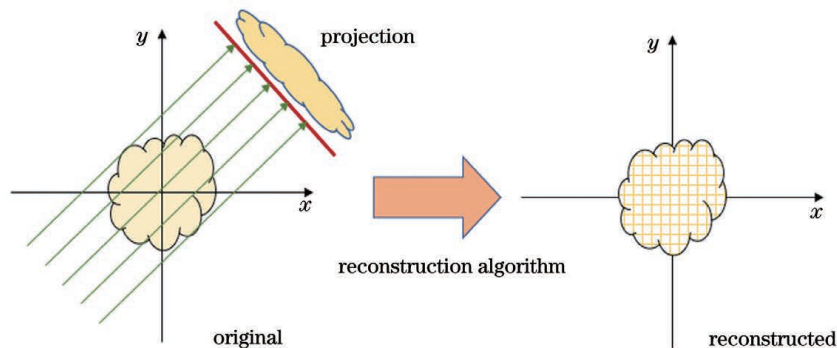


图 5 利用多路 LAS 的层析成像测量原理

Fig. 5 Principle of multipath LAS tomography measurement

3.1 光学传感模块

求解气体参数二维分布问题时,在大部分情况下,投影光线的数目小于被测区域离散的网格数目,此时求解方程为病态方程。为了提高重建结果质量,在光学测量模块中,光线分布的设计尤为关键,研究者会设计尽可能多的光线穿过流场区域。但是,在实际的燃烧流场测量中,由于实验空间有限,无法安装大量的测量设备,研究者通常采用移动旋转或光线固定模式来弥补一次投影光线数目的不足。

3.1.1 移动扫描式结构

2004年,帝国理工学院的 Gillet 等^[72]研制了用于测量燃气轮机燃烧室模型中碳氢燃料气体分布的成像装置。设计的平移扫描装置如图 6 所示,该测量方案利用装置的等距平移,实现了投影方向数目为 13、每

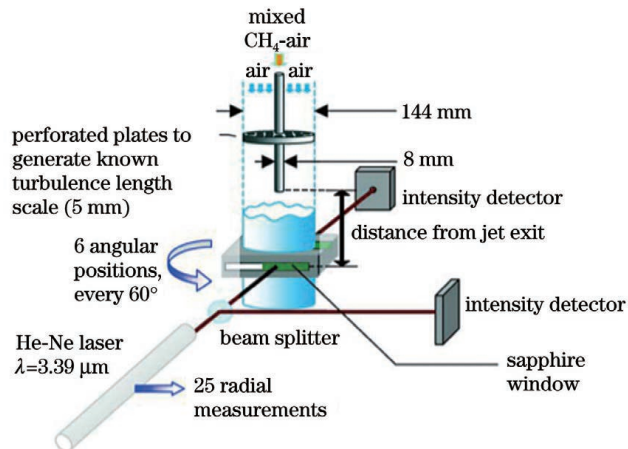


图 6 Gillet 等^[72]设计的平移扫描装置

Fig. 6 Translational scanning device designed by Gillet et al.^[72]

个投影方向上投影光线数目为 25 的平行光分布方式测量。

2010年浙江大学的 Wang 等^[73]研制了小型气体温度和组分浓度分布成像测量系统,如图 7 所示。利用 4 个高速旋转平台产生 4 束夹角为 11° 的扇形光束,在 0.1 s 内完成对被测区域的扫描,获得 400 组投影数据,实现了对气体参数截面分布的高速成像。

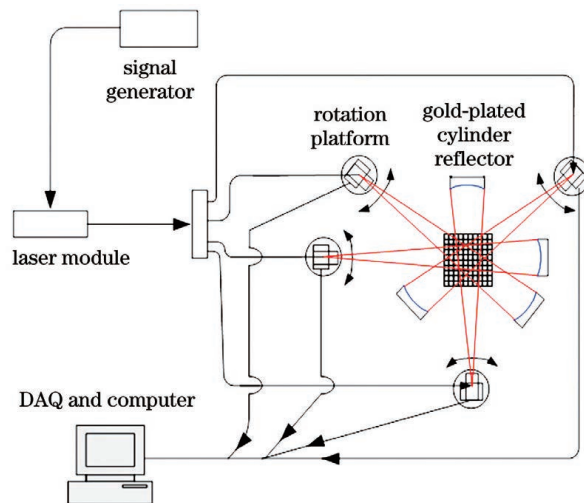


图 7 Wang 等^[73]设计的扫描式测量结构

Fig. 7 Scanning measurement structure designed by Wang et al.^[73]

2011年,英国曼彻斯特大学的 Kasyutich 等^[74]研制可用于监测各种反应流应用中化学物质和温度分布的激光吸收光谱成像传感系统,如图 8 所示。该系统中有两个支架可在直径 97 cm 的圆形轨道上独立移动,其中一个支架上安装了二极管激光器和扫描镜,

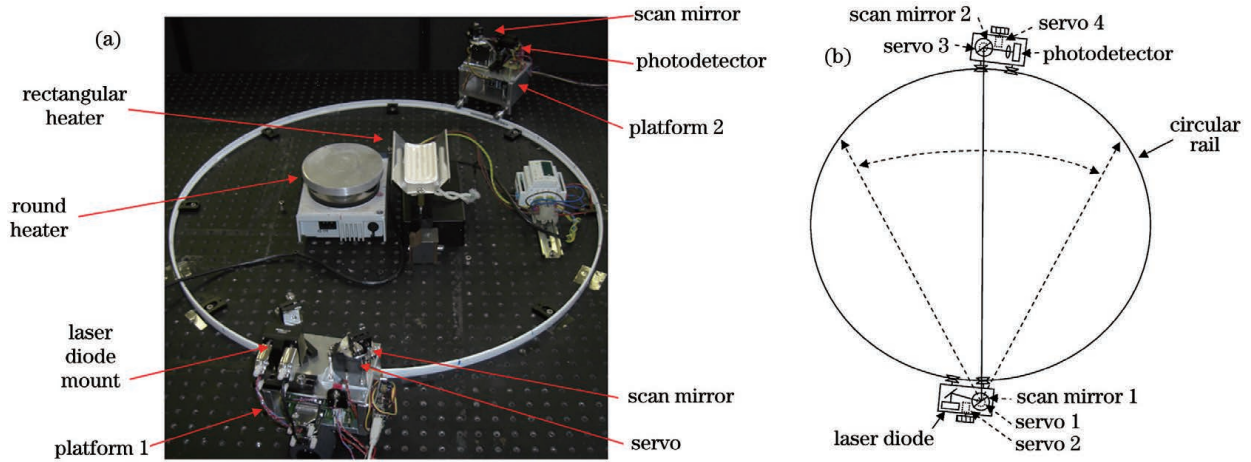


图8 Kasyutich等^[74]设计的扫描旋转结构。(a)系统装置图;(b)扫描示意图

Fig. 8 Scanning rotation structure designed by Kasyutich et al.^[74] (a) System installation diagram; (b) scanning diagram

光电探测器和第二个扫描镜安装在另一个可移动支架上。扫描镜的位置由程序通过4个伺服电机控制,在圆的5个等间距位置实现了11个激光束投影的测量。

2013年,装备学院的Song等^[75]搭建了如图9所示的等距平移测量装置,对300~1100K范围的红外

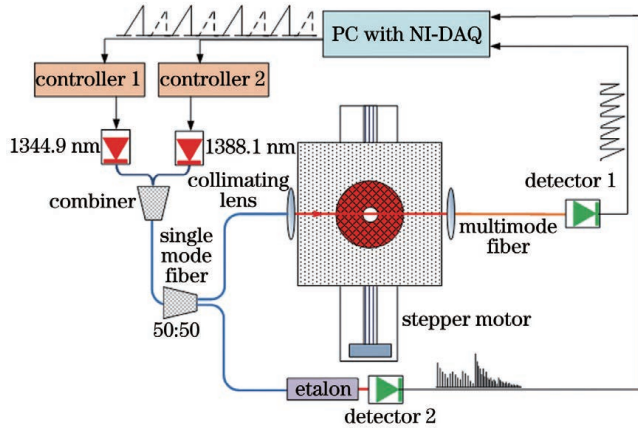


图9 Song等^[75]设计的试验装置图

Fig. 9 Test device designed by Song et al.^[75]

燃气炉温度场进行了重建,并研究了投影角度、光线数目和虚拟光线对重建结果的影响。

2013年,美国弗吉尼亚大学的Busa等^[76]搭建了多路系统,如图10所示。探测器和激光发射装置被固定在一侧的旋转台上,通过自动调节反射镜形成扇形光束,对被测区域进行了扫描。完成一次投影后,同时旋转探测器和接收器,再次利用扇形光束扫描,实现了不同角度下被测区域的测量。

3.1.2 固定式结构

移动旋转装置需要机械运动部件,在实际应用中容易受到机械振动的影响,且无法实现对非定常流场的瞬时测量。

2009年,克莱姆森大学Ma等^[77]研制了基于时分复用(TDM)技术的超光谱测量系统并进行了实验,实验装置如图11所示。实验选取6条测量光线,固定安装在矩形框架上,对1333~1377 nm的H₂O吸收光谱范围进行扫描,对包含当量比为0.5的H₂-空气混合气体火焰6个区域进行了重建。2013年,他们又采用垂直和水平各有15条平行测量光线的布局,测量了J85航空发动机H₂O的温度和组分浓度出口截面分布^[78]。

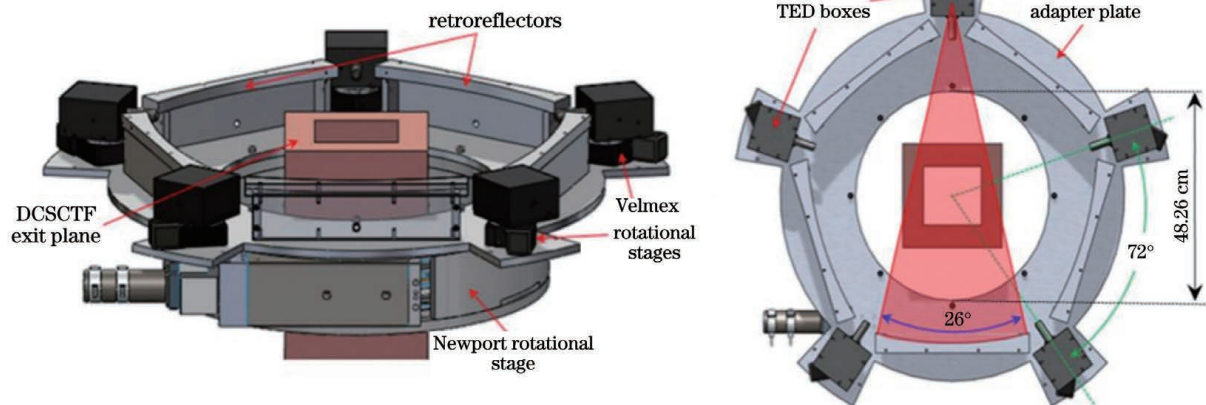


图10 Busa等^[76]搭建的超声速实验台。(a)传感器安装示意图;(b)扩束扫描示意图

Fig. 10 Supersonic experiment platform set up by Busa et al.^[76] (a) Schematic diagram of sensor installation; (b) schematic diagram of beam expansion scan

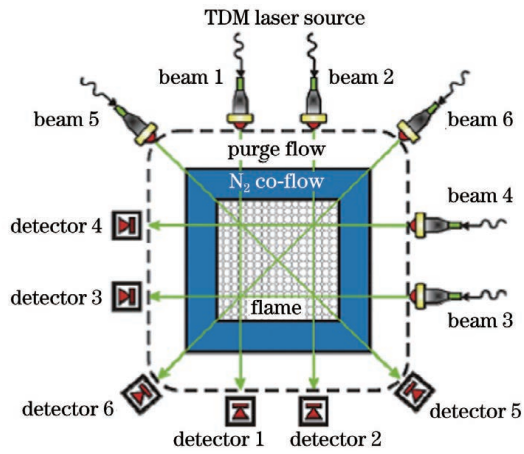


图 11 基于时分复用的多光谱的传感器结构
Fig. 11 Multispectral sensor structure based on TDM

2010年,曼彻斯特大学 Wright 等^[79]针对被测对象分布,设计了27条非规则光线的固定光路平台,对

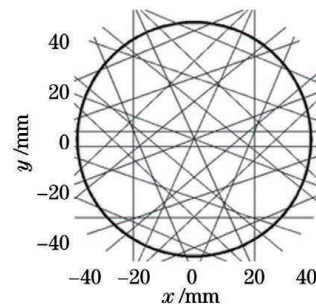


图 12 非规则 27 路的固定光路传感器
Fig. 12 Sensor with 27 fixed optical paths irregularly designed

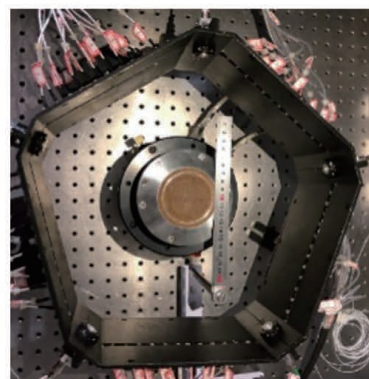
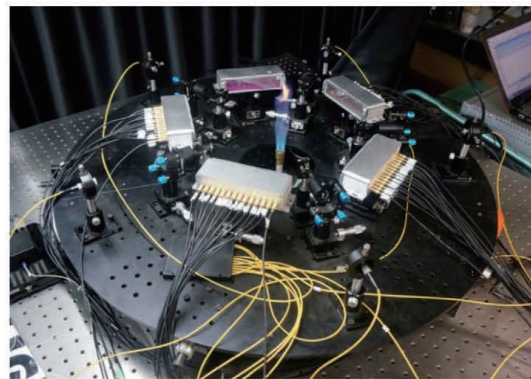
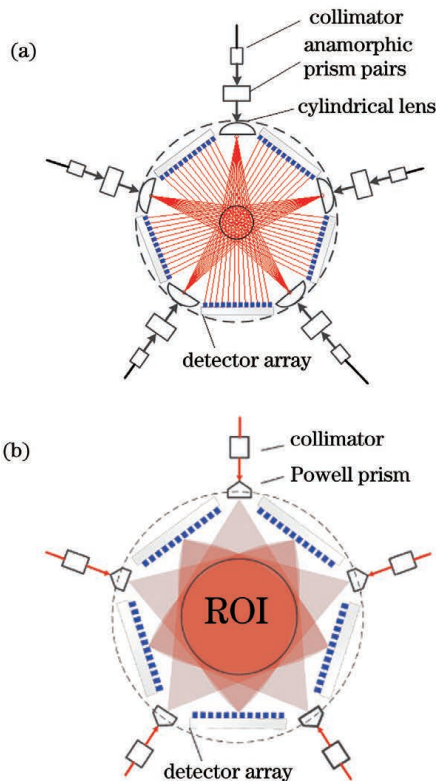


图 13 Liu 等^[80]设计的扇形束多路传感器。(a)初级传感器结构;(b)优化传感器结构

Fig. 13 Fan-beam multipath sensor designed by Liu et al.^[80] (a) Primary sensor structure; (b) optimized sensor structure

内燃机的燃料蒸气组分浓度截面进行了二维成像,传感器光路布局如图 12 所示,结果较好地反映了内燃机的燃烧过程。

2015年北京航空航天大学徐立军课题组 Liu 等^[80]采用扇形光路,结合 DAS 来对具有轴对称性质的火焰进行监测,对于不具备轴对称性质的火焰,研制了五角度传感器来对不同性质的火焰进行监测,并在平面燃烧炉测量中进行测量实验。之后,为进一步扩大测量区域,又优化了传感器结构,在原有传感器的基础上改造光路布局,探测得到的测量值数量增加至原来的 2 倍,感兴趣区域(ROI)面积在原有的基础上扩大 2.9 倍。设计的扇形束多路传感器如图 13 所示。设计了基于直接吸收法的层析成像并行采集系统,测量了声激励本生灯火焰中的温度、水分子浓度二维分布,从 LAS 层析成像系统中重建的温度分布提取的 120 Hz 频率分量与声激励频率高度吻合。

除此之外,基于多边形的对射式的双路传感器近年来也有新的研究。2021年航天工程大学宋俊玲等^[81]设计了基于自由曲面透镜和透镜阵列相结合的燃烧场高密度光学测量环。该测量环采用两层结构,发射端分别位于每条边的边缘位置,激光准直透镜和

自由曲面透镜形成扇形光束,穿过被测流场后,经过楔形镜偏转和聚焦透镜聚焦,进入接收光纤后传送至探测器。设计的双层对射传感器如图14所示。测量环接收单元实现了 $5\text{ cm}\times 7\text{ cm}$ 测量空间内88条光线的密集排列。

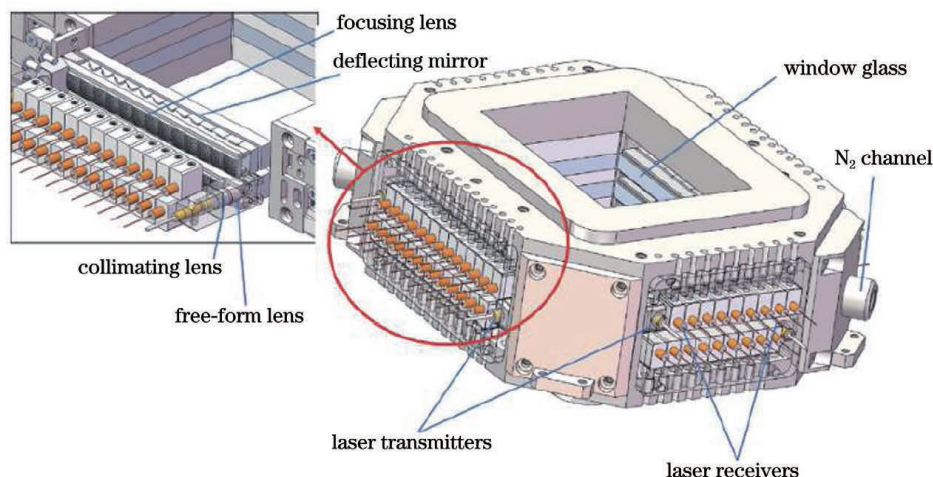


图14 宋俊玲等^[81]设计的4角度双层对射式传感器

Fig. 14 Four-angle double-layer antithesis sensor designed by Song et al.^[81]

3.2 电路模块

LAS成像系统通常具有数十路同步采集通道,以同时采集层析成像传感器的探测光强信号。多路并行采集产生了高吞吐量的数据,需对这些数据进行实时处理和缓存。现场可编程门阵列(FPGA)拥有极高的可编程性,可将系统控制、并行数据采集、信号处理、数据传输等多个功能集成到一个芯片,常用作这类系统的主控芯片^[82-83]。目前LAS层析成像多路数据采集系统主要包括可短时高速采集高帧率原始信号的系统及能够长期监测但帧率较低的系统。

对于第一种系统,通常需将大容量内存芯片集成到数据采集卡上,来缓存多路高速模拟/数字转换器(ADC)采集的数据^[84-85]。2017年北京航空航天大学徐立军课题组的Jing等^[85]针对五角度层析成像系统设计的60路数据采集系统中,每块数据采集卡上设计了512 MB容量的SDRAM芯片,在四通道ADC以5 MSA/s的速度采样的情况下,可以缓存约3.5 s的数据。2020年,徐立军课题组的Zhang等^[86]实现了图15所示可调采样间隔的系统,主要通过调整数据采集和激光扫描间隔实现可变帧率,以适应不同工况的测量需求。

第二种系统的思路是,如果能够将系统帧率降低,实现实时数据传输,就能够进行长期不间断测量。在这类系统中,采集到的光谱数据在FPGA中被预处理,提取出对后续计算有用的关键参数,就可以大大降低数据量,实现数据实时上传和计算。例如,爱丁堡大学Fisher等^[87]在2018年介绍的LAS数据采集系统的并行数据采集可产生高达107.52 Gbit/s的数据量,如图16所示;但由于其在FPGA数据采集卡上应用了数

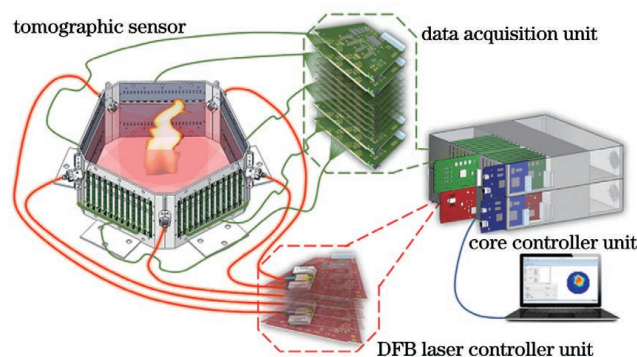


图15 Zhang等^[86]研制的可变帧率采集系统

Fig. 15 Variable frame rate acquisition system developed by Zhang et al.^[86]

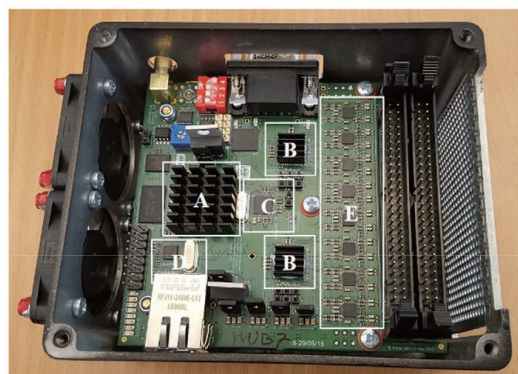


图16 Fisher等^[87]提出的在线实时数据处理系统

Fig. 16 Online real-time data processing system proposed by Fisher et al.^[87]

字锁相放大器处理并抽取数据,数据量大大减小,可以使用百兆以太网实时传输,系统在线处理帧率达到了100 frame/s,可测量数十赫兹的火焰瞬态抖动现象^[57]。

4 LAS 成像技术的原理与发展

LAS 技术作为一种非侵入的流场参数诊断技术,具有响应快、环境适应性强、测量灵敏度高优势,近年来被广泛应用于复杂燃烧场诊断领域参数动态监测中,并得到了迅速发展。LAS 技术利用单一激光路径的光谱数据可以获得燃烧参数沿着测量路径的平均值,包括火焰温度、组分浓度、压力等参数信息,但不具备空间辨识能力。在实际复杂燃烧环境中,由于侧壁换热、热对流现象和气体扰动等原因,燃烧场内参数分布普遍具有不均匀特性。为了获得流场内燃烧参数分布的空间信息,以满足工业应用对复杂燃烧场参数测量的需求,将 CT 技术与 LAS 测量技术相结合,利用多个角度、多条激光路径上的光谱数据,实现复杂燃烧场参数分布的可视化测量。

层析成像算法是根据激光光谱数据获得高精度、高空间分辨率参数分布的关键。目前基于激光吸收光谱的层析成像算法根据吸收光谱与层析成像之间是否线性,可以分为线性重建方法和非线性重建方法。线性重建算法中,先获取每一条激光路径上燃烧场参数的分布信息再层析成像,是直方图求解方法;而先对探测值层析成像获取谱线信息,再进一步求解燃烧场参数信息,则是双线法测量方法,也是目前线性重建算法的主要思想。同时,线性重建算法又可分为以 Radon 变换为理论基础的解析重建算法和以解线性方程组为主要思想的迭代重建算法。下面分别介绍典型成像算法在 LAS 层析成像中的应用。

4.1 复杂燃烧场参数解析重建算法

解析类重建算法具有重建速度快且重建精度高的优点。当激光光谱数据量足够且投影角度完备时,解析类重建算法可得到高精度的重建分布图像。

一些标准燃烧装置产生的火焰被认为是轴对称的,或者在某种程度上可近似认为是轴对称分布的。一般情况下,平焰燃烧炉所产生的稳定、参数分布均匀的层流火焰被认为是轴对称分布的,在火焰不同高度处横截面的温度和气体组分浓度亦均匀分布,常被用于火焰标定、火焰稳定和传热过程分析。火箭尾喷口的火焰是另一种具有典型轴对称属性的火焰。尾焰包含着未在火箭发动机燃烧室中完全燃烧的燃料,这些

燃料从具有轴对称特性的火箭尾喷管中喷出,与空气中的氧气进行二次反应,并在尾焰回流区域形成轴对称的温度和气体浓度分布。

对于具有圆轴对称性的火焰参数分布重建,不同投影角度的光谱数据一致,可采用简化二维层析成像模型,采集一个视角的激光光谱数据,求解获得燃烧场火焰温度和组分浓度等分布信息。

美国德克萨斯大学 Villarreal 等^[88]采用一维层析成像算法实现了对常压平焰燃烧炉火焰中的轴对称温度和 CO_2 浓度分布的重建。他们将平焰燃烧炉安装在可移动平台上,通过平移平焰燃烧炉,使激光光束穿过火焰的不同位置,进而获取投影数据;对用于快速 Abel 反演的 Dasch 算法进行了修正,以提高算法在边界处非零梯度的重建性能。实验中对每条实验记录约进行 200 次扫描,并进行平均,单个测量点时间小于 3 s。通过 Abel 逆变换重建得到了对称轴上 19 个测量点的温度和浓度值,重建温度范围 1300~2000 K,浓度范围约为 0.03~0.09。进行 Abel 逆变换前,通过对不同中心频率的吸收光谱数据进行样条插值,显著减少了重建域内部的畸变。

然而,通过可移动平台获取不同激光路径光谱数据的时间分辨率较低,无法实现火焰参数的实时监测。北京航空航天大学刘畅(Liu)等^[89]将一路准直激光穿过柱透镜从而产生扇形激光束,有效地简化了一维 LAS 层析成像系统的结构。通过插值的方法,根据系统机械结构将扇形激光束投影数据重排为平行激光束投影数据,如图 17 所示。扇形激光穿过半径为 3 cm 的被测圆形区域,透射光强被 15 个等间距光电探测器接收。选择一半投影数据通过样条插值得到 40 个投影数据,结合反卷积一维层析成像方法对距离炉盘高度 1 cm 处的轴对称温度和气体浓度分布进行重建,实现了径向特征参数空间分辨率 0.075 cm 的测量。由于 Abel 方程属于第一类 Volterra 积分方程,病态性严重,在成像过程中结合改进的正则化方法,可有效降低结果对测量噪声的敏感性。之后,又将 WMS 与一维层析成像方法相结合,对火焰轴对称温度和气体浓度分布进行重建。通过光路设计将一维层析成像的分辨率提高了一倍,使重建结果能更精确地反映轴对称温度和气体浓度分布^[90]。

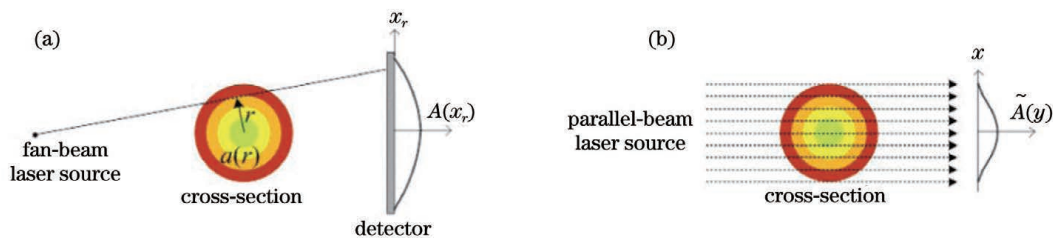


图 17 扇形束重排为平行束几何示意图。(a)扇形激光束;(b)等效的平行激光束

Fig. 17 Schematic diagram of the rearrangement of fan-beam geometry into parallel-beam geometry. (a) Fan-beam geometry; (b) equivalent parallel-beam geometry

根据被测参数的轴对称分布特性,可以将对称轴一侧的数据映射到另一侧;而为了提高测量结果的空间分辨率,在将一侧数据映射到另一侧时,令两侧激光光谱数据在空间上相互交叉,双倍分辨率光路布局如图18所示。采用三点 Abel 逆变换方法求解得到对称轴上参数分布,重建结果的空间分辨率提升为传统一维层析成像方法的2倍。当相邻激光束的最小间距为5.6 mm、被测区域半径为35 mm时,实现空间分辨率2.8 mm的层析成像。

对于非轴对称分布的火焰特征参数分布,仅根据单一角度的激光光谱数据无法准确获得参数分布。可以在不同角度布置探测器以接收多角度激光光谱数据,利用解析方法重建获得参数分布。

马来西亚敦胡先翁大学 Mohamad 等^[91]获得2个投影角度共12条正交激光路径上的光谱数据,采用滤波反投影(FBP)算法重建了本生灯燃烧截面上直径3 cm、分辨率为0.5 cm×0.5 cm的参数分布图像。他们的本生灯测量系统如图19所示。

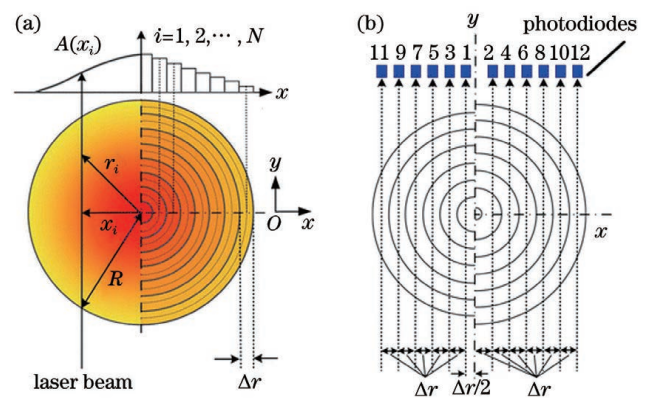


图18 轴对称温度和气体浓度分布双倍分辨率重建光路布局。(a)传统光路布局;(b)双倍分辨率光路布局

Fig. 18 Resolution-doubled reconstruction optical path layout for axisymmetric temperature and gas concentration distributions. (a) Conventional optical path layout; (b) resolution-doubled optical path layout

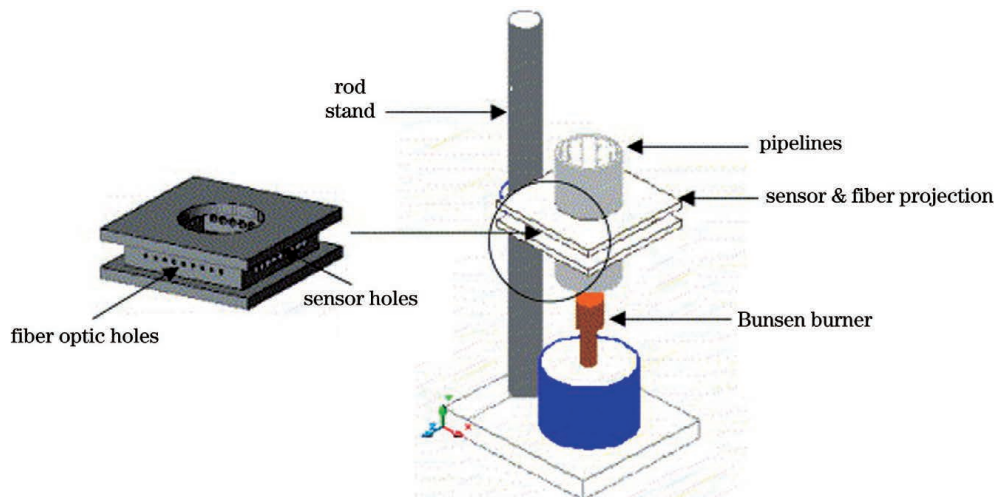


图19 Mohamad 等^[91]的本生灯火焰测量示意图

Fig. 19 Schematic diagram of Bunsen burner flame measurement proposed by Mohamad et al.^[91]

他们控制本生灯燃烧器的燃料流量,在燃料流量半开和全开状态下,分别重建获得了不同燃烧状况下水蒸气浓度分布的变化情况。系统能够定位火焰位置和火焰大小,但测量结果的空间分辨率较低。

路易斯安那州立大学 Guha 等^[92]分别利用 Abel 逆变换和 FBP 算法对比了 DAS 和 WMS 的性能;分别根据 DAS 数据和 WMS 数据,利用 Abel 逆变换重建获得了沿火焰径向约70 mm范围的温度和浓度分布,20个测量点处的重建温度和浓度值与设定值较为一致,但 DAS 由于噪声影响而导致解算值偏差增大。FBP 算法用于对非对称属性的流场参数分布重建,只要激光光谱数据量足够,即可重建得到高精度的分布图像。将火焰径向方向29个测量点处的重建温度和浓度值与设定值进行比较,计算误差在研究范围内都较小,只是信号强度变小时重建误差增大。由于两条

吸收谱线不同的吸收特征,在温度和浓度重建图像中,火焰边缘附近存在明显伪影。

2011年,弗吉尼亚大学 Busa 等^[93]将 LAS 层析成像技术用于超燃冲压发动机燃烧室中的水通量测量。实验中通过旋转扇形束获得72个角度扇形束数据,在近1 h采集时间内共采集1800条激光光路数据,利用 FBP 算法反演获得了超音速燃烧隧道出口处的温度和水蒸气浓度二维空间分布,重建空间分辨率为1.56 mm/pixel。结合粒子图像测速仪获得的速度测量值,可直接得到超音速燃烧隧道出口处的水蒸气通量,与已知的注入水蒸气量进行比较,证明了该技术的有效性。之后,该团队又将 LAS 成像系统应用于美国航空航天局(NASA) Langley 燃烧器并进行了多项测试。对于不透明物体的测量系统图和重建结果如图20所示^[76]。重建物体形状和方向与测量系统中物

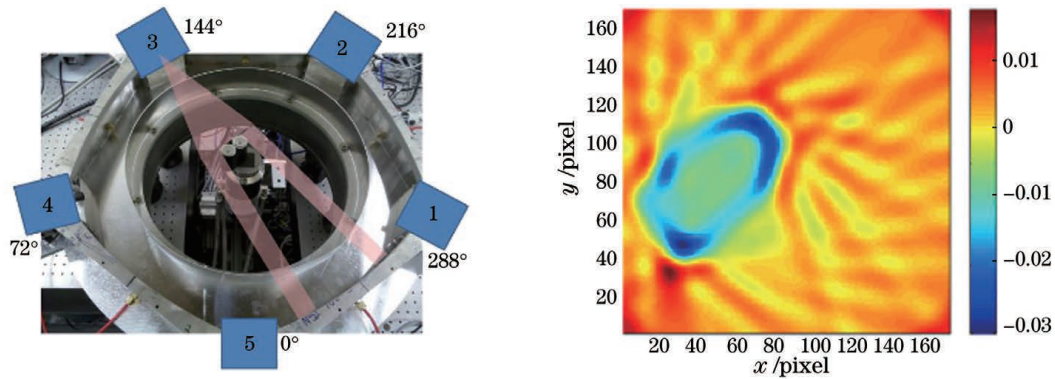


图 20 LAS 系统应用于 NASA Langley 燃烧器示意图。(a)测量系统图;(b)不透明物体重建图
Fig. 20 Schematic diagram of LAS system applied to NASA Langley burner. (a) Measurement system;
(b) tomographic reconstruction of opaque object

体的真实情况一致。

解析重建算法的成像精度和分辨率主要取决于测量数据量。当测量数据量较少或测量数据含有较多噪声时,解析重建方法往往无法获得令人满意的重建结果。需要对解析重建方法进行改进,才会在投影角度受限或投影数据中噪声较大时,仍然可以得到高质量、高分辨率的重建图像。

4.2 复杂燃烧场参数迭代重建算法

迭代类重建算法的基本思想是将待重建的图像离散化,并根据数学模型建立一组未知向量的线性方程式,结合测量数据求解线性方程组。扇形束激光投影的离散数学模型和坐标系如图 21 所示,与解析类重建

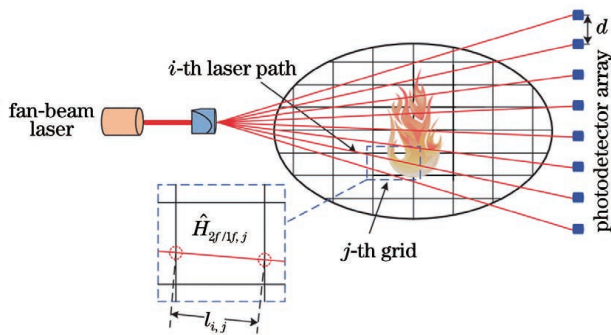


图 21 扇形束激光投影的离散数学模型和坐标系
Fig. 21 Schematic of fan-beam laser projection from one view and discretization configuration

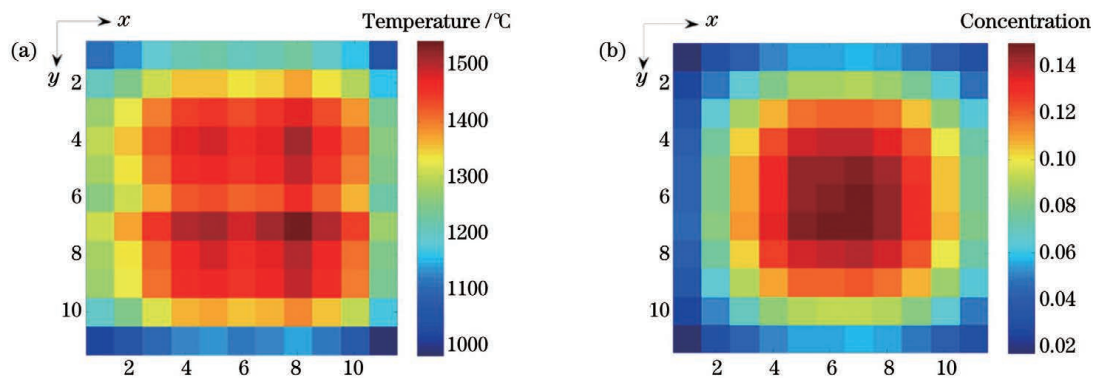


图 22 两步 ART 算法对平焰燃烧器火焰重建结果。(a)温度分布;(b)浓度分布
Fig. 22 Reconstruction results for flat-flame burner flame via two-step ART algorithm. (a) Reconstructed temperature distribution; (b) reconstructed concentration distribution

算法相比,迭代类重建算法在数学建模过程中,将真实的成像几何结构和成像物理效应考虑其中,更适合解决实际成像问题,得到的重建图像精度更高。

浙江大学岑可法课题组的 Wang 等^[73]利用 4 个高速旋转平台搭建了四角度扇形束激光吸收光谱测量系统,通过旋转平台在 100 ms 内获得不同角度、不同吸收频率的 400 个光谱数据,并使用代数重建算法(ART)对面积为 $16\text{ cm} \times 16\text{ cm}$ 的目标区域内参数分布进行逆问题求解,重建得到了被测流场 NH_3 的浓度和气体温度分布,空间分辨率为 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 。然而,扫描式测量系统耗时较长,之后 Wang 等^[94]进一步提出了四角度固定光线测量系统,可以在 $1\text{ }\mu\text{s}$ 内采集得到四个投影角度共 24 条激光路径的数据,利用 ART 算法重建获得了平面火焰在不同当量比下 4×4 个离散网格内的温度和浓度分布。

中国科学院安徽光学精密机械研究所 Xia 等^[95]提出了两步 ART 迭代重建算法,并应用于火焰温度和水蒸气浓度分布的精确重建。2 个正交方向的激光对直径为 6 cm 的燃烧器产生的火焰进行测量,采集 22 个通道的激光光谱数据,在通过 ART 迭代方法获得温度分布后,再将求解温度值代入数学模型中,继续通过 ART 迭代算法求解浓度为未知量的线性方程组,在 11×11 网格的有限空间分辨率下,该方法求解的温度和浓度分布如图 22 所示。与原始方法相比,所

提出的方法提高了重建精度。

北京航空航天大学徐立军课题组的 Liu 等^[80]设计了具有高时空分辨率的扇形束 LAS 层析成像传感器,所使用的 DFB 激光器在采用时分复用时,时间分辨率可以达到 5 kHz。对于水分子的每条吸收谱线,5 个角度共采集得到 60 个测量数据。采用修正 Landweber 算法重建了直径 6 cm 的被测区域内的温度和水蒸气浓度

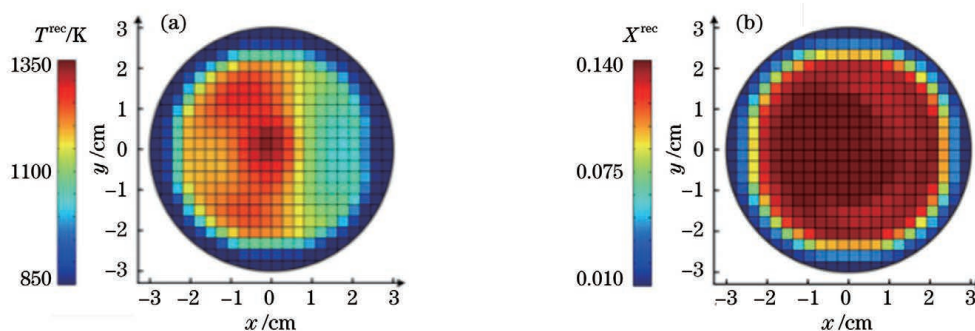


图 23 修正 Landweber 算法对炉盘两侧放置铁块实验装置的重建结果。(a)温度分布;(b)浓度分布

Fig. 23 Reconstruction results by putting two cubes on burner plug via modified Landweber algorithm. (a) Reconstructed temperature distribution; (b) reconstructed concentration distribution

之后,徐立军课题组又设计了基于 WMS 的 LAS 层析成像传感器,系统测量时间分辨率为 2 ms,并行等效数据上传速率为 40 MB/s。采用联合代数重建算法(SART)重建火焰温度 and 组分浓度分布。SART 算

法根据探测的激光光谱数据,动态重建受扰动的平焰燃烧炉火焰温度和水蒸气浓度分布随时间的变化趋势,如图 24 所示。更进一步地,SART 算法重建获得了高温标准风洞出口的温度和水蒸气浓度分布^[84]。

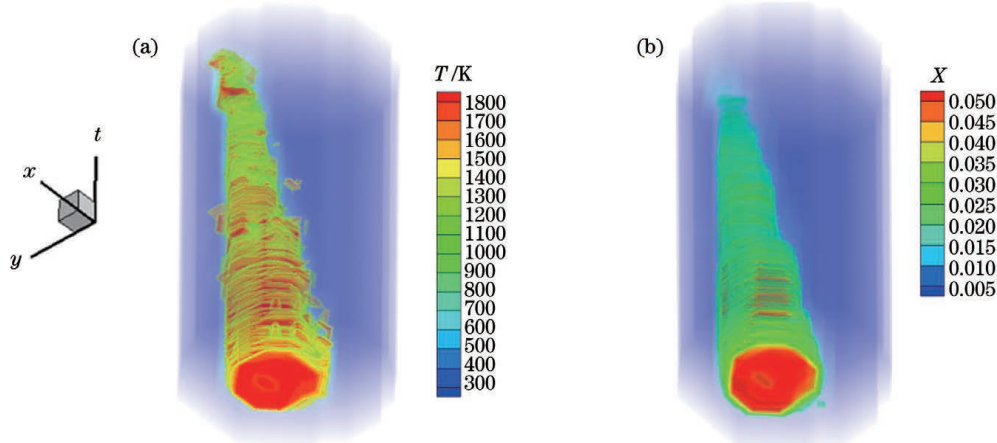


图 24 钢尺移动过程中平焰燃烧炉火焰重建结果。(a)温度二维分布随时间的变化;(b)水蒸气浓度二维分布随时间的变化

Fig. 24 Reconstruction results for flat-flame burner flame over whole moving process of steel ruler. (a) Temporal variation of 2D temperature distribution; (b) temporal variation of 2D distribution of water vapor's molar concentration

该课题组又充分利用火焰温度连续分布的特性,通过有限项 Zernike 正交多项式拟合连续分布,将待求解量从离散网格灰度值转变为 Zernike 多项式拟合系数向量,有效减小了待求解未知数个数,并实现了燃烧场参数的高空间分辨率重建,空间分辨率为 $2.57 \text{ mm} \times 2.57 \text{ mm}$ 时的温度和误差误差小于 10%^[96]。将该成像方法应用于本生灯声波激励火焰中,可明显分辨出火焰脉动基频及外加声波频率。

加拿大滑铁卢大学 Daun^[97]提出了基于拉普拉斯平滑矩阵的 Tikhonov 正则化重建方法,并应用于有限激光光谱数据的层析成像问题。比较了 27 条、32

条和 33 条激光路径不同光束布局下,重建区域在 50×50 离散网格内的重建结果。所提出的重建方法仅涉及一个待定参数,而通过奇异值谱确定正则化参数可以获得较为精确的结果。相比于 Landweber 算法的重建结果,Tikhonov 正则化重建方法的抗噪声能力更强,重建分布精度更高。

爱丁堡大学 Bao 等^[98]针对传统双线法测量原理,提出了一种相对熵图像重建方法 RETRO,采集得到 4 个角度共 32 条平行光束穿过直径 18 cm 待测区域的光谱数据,每个像素尺寸为 $0.45 \text{ cm} \times 0.45 \text{ cm}$,重建得到了火焰温度和浓度二维分布。通常,被测燃烧场

温度分布是从两条谱线吸收率分布的比值中提取得到的,而由于方程的欠定性导致每条重建谱线吸收率分布都含有噪声,这些噪声会使重建图像中出现伪影。为此,在目标函数中引入了相对熵正则化,将两条吸收谱线吸收率比值作为平滑约束,求解目标函数最小值。与 SART 重建结果进行对比,所提出的算法提高了重建精度。之后,该课题组利用深度神经网络的训练优势和学习能力,提出了一种用于 LAS 成像的质量分层温度成像网络,实现了重建精度和重建效率上的平衡^[99]。利用 32 个探测器采集数据,重建得到了整个成像区域共 7592 个均匀像元处的温度值,每个像元的

尺寸为 3.6 mm×3.6 mm。

4.3 复杂燃烧场参数非线性重建算法

在宽带光源和相关的光波复用技术的推动下,通过获取宽光谱范围信息实现重建的非线性重建算法也得到了快速发展。其主要思想是通过宽带波长扫描增加光谱信息,缓解空间采样上的不足。这类算法在复杂测量环境中具有不可替代的优势。图 25 展示了非线性成像方法的数学模型,覆盖多个跃迁波长的光束穿过测量区域,并得到投影光谱,而特定波长得到的吸收值不仅包含它本身对投影光谱的贡献,还包含其他波长对投影光谱的贡献^[100]。

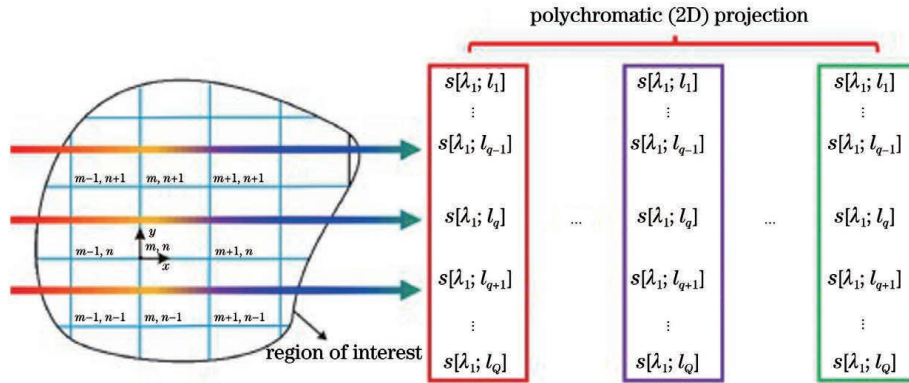


图 25 非线性成像方法的数学模型

Fig. 25 Mathematical model for nonlinear tomography

2013 年, Ma 等^[78] 设计了多角度扇形束传感器,并将其应用于弗吉尼亚大学的超音速燃烧设施以及 NASA 直连超音速燃烧试验装置。他们利用高光谱激光器和光纤技术,设计了基于傅里叶锁模激光器的 LAS 层析成像系统,利用两个投影角度共 30 条激光

路径的数据,采用模拟退火算法动态监测了 J85 航空推进发动机出口温度和水蒸气浓度分布随时间的动态变化,时间分辨率高达 50 kHz,重建空间分辨率为 36.3 mm×36.3 mm。传感器安装示意图及重建温度分布如图 26 所示。

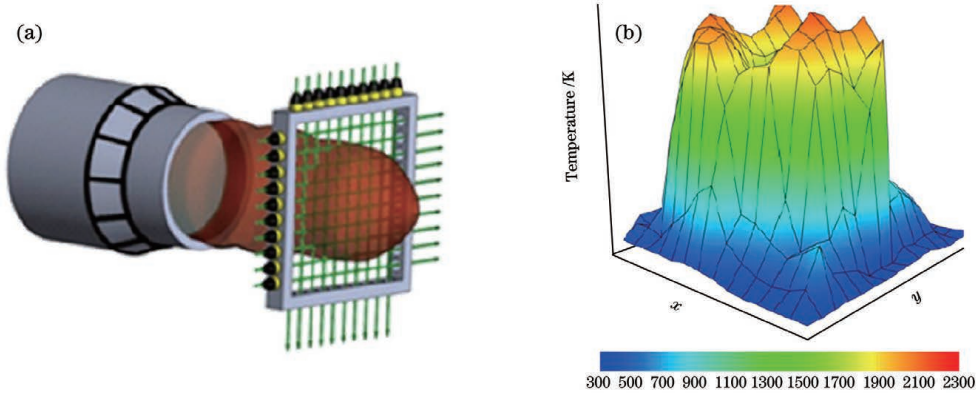


图 26 航空推进发动机出口传感器安装示意图及重建温度分布。(a) 安装示意图; (b) 重建温度分布

Fig. 26 Installation schematic of tomographic sensor at aero propulsion engine exit and reconstructed temperature distribution.

(a) Installation schematic; (b) reconstructed temperature distribution

2014 年,上海交通大学蔡伟伟(Cai)等^[101] 利用模拟退火算法对构建的非线性模型进行最优化求解。将多路复用的激光源拆分成多个光束,以降低时间分辨率为代价使得激光穿过不同位置的测量区域并被探测。通过重建分布和实际分布的紧密性和正则化项的组合描述非线性重建算法,将参数分布的平滑信息作

为正则化项,并采用模拟退火算法对温度和浓度分布进行成像。实验中利用两个方向上共 30 个探测值,可以得到 150 个非线性方程,利用模拟退火算法求解得到 450 个值。然而,通过模拟退火等优化算法求解非线性方程组时间成本较高。为解决这一问题,2018 年,他们又提出了一种基于卷积神经网络的重建方法,

充分利用大量的测量数据建立高效的神经网络,利用15000组样本数据,实现燃烧场参数在 40×40 网格区域内的快速预测^[102]。通过与模拟退火算法的成像结果进行比较,证实基于卷积神经网络的成像方法可以有效降低计算成本。

每种成像方法都在某些复杂燃烧场参数监测中具有独特优势,或能实现快速成像,或能在激光测量值一定时,获得高质量的燃烧场参数分布信息。表1对比了用于复杂燃烧场参数监测的不同成像方法的成像范围、空间分辨率等信息。

表1 用于复杂燃烧场参数监测的不同成像方法对比

Table 1 Comparison of different tomographic methods for monitoring complex combustion field parameters

Algorithm category	Algorithm	Measured combustion field	Imaging region	Number of measured values	Spatial resolution
Analytical tomographic algorithms	Abel inversion ^[88]	Flame of flat-flame burner	Radial position of flame	19 measured values	—
	Onion-peeling deconvolution ^[89]	Flame of circular burner	Circular region with radius of 3 cm	15 measured values	0.075 cm
	Abel inversion ^[90]	Flame of a flat-flame burner	Circular region with radius of 3.5 cm	12 measured values	0.28 mm
	Back projection ^[91]	Flame of Bunsen burner	Circular region with diameter of 3 cm	12 measured values in two orthogonal directions	0.5 cm \times 0.5 cm
	Abel inversion and FBP ^[92]	Simulated flame	About 7 cm and 6 cm along radial direction of flame	20 measured values; 29 measured values	—
	FBP algorithm ^[93]	Exit of scramjet combustor	—	1800 measured values	1.56 mm per pixel
Iterative tomographic algorithms	ART algorithm ^[73]	Heated ammonia	Region of 16 cm \times 16 cm	400 measured values from four angles	1 cm \times 1 cm
	ART algorithm ^[94]	Flat flame	—	24 measured values from four fixed angles	4 \times 4 subgrids
	Two-step ART algorithm ^[95]	Flame of flat-flame burner	Region with diameter of 6 cm	22 measured values in two orthogonal directions	0.545 cm \times 0.545 cm
	Modified Landweber ^[80]	McKenna flat-flame burner	Circular region with radius of 3 cm	60 measured values from five fixed angles	0.78 cm
	SART algorithm ^[84]	Flame of McKenna burner and exit of wind tunnel	Circular region with radius of 9 cm	120 measured values from five fixed angles	—
	Zernike sparse fitting ^[96]	Flame of Bunsen burner and exit of wind tunnel	Circular region with radius of 9 cm	120 measured values from five fixed angles	Pixel size 0.257 cm \times 0.257 cm
	Tikhonov regularization ^[97]	Simulated flame	—	27, 32 and 33 measured values from different beam layouts	50 \times 50 subgrids
	RETRO ^[98]	Flame of laboratory-made combustion device	Circular region with diameter of 18 cm	32 measured values from four angles	Pixel size 0.45 cm \times 0.45 cm
Nonlinear tomographic algorithms	Quality-hierarchical temperature imaging network ^[99]	Flame of laboratory-made combustion device	Circular region with diameter of 18 cm	32 measured values from four angles	Pixel size 3.6 mm \times 3.6 mm
	Simulated annealing algorithm ^[78]	Exit of J85 engine	—	30 measured values from two angles	36.3 mm \times 36.3 mm
	Convolutional neural networks ^[102]	Simulated flame	—	15000 groups of sample data	40 \times 40 subgrids

5 LAS层析成像在燃烧场监测中的应用

5.1 实验室火焰

日本德岛大学 Deguchi 等^[103]搭建了基于 LAS 技术的测量系统,用于测量柴油发动机排气的二维温度分布,分别使用本生灯燃烧器和柴油发动机对系统进行验证;日本德岛大学 Choi 等^[56]利用甲烷作为燃料,将 8 束激光通过本生灯甲烷火焰横截面得到重建数

据,验证了乘法代数重建算法在数据重建中的性能;敦胡先翁大学 Mohamad 等^[91]采集获得 2 个投影角度共 12 条正交激光路径上的光谱数据,采用 FBP 算法获得了燃烧室内被测截面上分辨率为 6×6 网格的参数分布图像。北京航空航天大学黄昂(Huang)等^[104]用基于片上神经网络的激光吸收强度谱层析成像方法,测量了声激励的本生灯火焰,实验设置如图 27 所示。

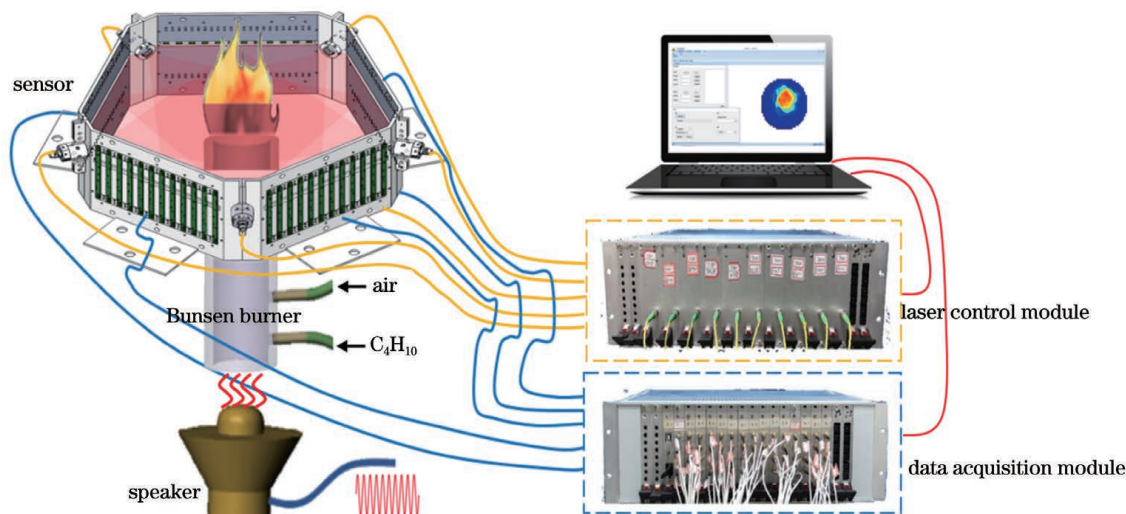


图 27 本生灯火焰动态监测实验设置

Fig. 27 Bunsen burner dynamic monitoring experimental setup

北京航空航天大学的刘畅(Liu)等^[80]利用 McKenna 平焰燃烧器产生火焰,如图 28 所示,验证其设计的扇形束 LAS 温度浓度层析成像传感器。弗吉尼亚大学的 Bryner 等^[105]通过平焰燃烧器验证了其系统对于温度和 H_2O 浓度的重建;该系统后应用于超音速设施 UVaSCF 的飞机以及 NASA Langley 直连超音速燃烧试验装置^[76,93]。Villarreal 等^[88]采用可调谐二极管激光器在轴对称常压平焰燃烧器中进行吸收层析成像,同时测量了甲烷-空气火焰中的温度和 CO_2 浓度分布。

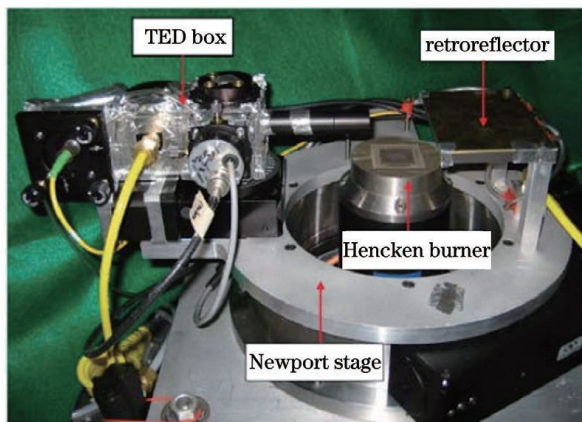


图 28 使用 McKenna 平焰燃烧器产生火焰的实验装置

Fig. 28 Experimental setup to produce flame with McKenna flat-flame burner

5.2 现场实验

5.2.1 飞行实验

半导体激光器的小型化和鲁棒性为 LAS 传感器的飞行应用创造了条件。美国空军研究实验室(AFRL)和澳大利亚防御科学技术委员会(DSTO)合作发起的 HIFiRE 工程为验证 LAS 传感器的飞行性能提供了机会^[106]。其中,HIFiRE 1 LAS 飞行实验在高超音速飞行器上测试了 LAS 传感器的可行性。使用两个波长在 760 nm 附近的激光器设置了两套独立的 LAS 传感器,分别使用 DAS 和 WMS 方法测量进入燃烧器的 O_2 质量流量。之后,HIFiRE 2 LAS 飞行实验对燃烧产物核心流中温度和水蒸气浓度的时间和空间分布进行监测。传感器包含两个激光器,每个激光器的输出分成 4 束,两个激光器的 8 束光在燃烧室出口屏幕组成 3×5 的网格,通过层析成像技术得到被测流场燃烧参数的空间分布。

5.2.2 航空发动机

2013 年,美国弗吉尼亚理工大学的 Ma 等^[78]测量了通用电子 J85 航空发动机出口处气体(H_2O)的温度和浓度分布,测量系统示意图如图 29 所示。

2016 年,南京理工大学的吕晓静等^[107]采用多谱线吸收光谱技术对脉冲爆轰发动机的燃气管外流场温度分布进行了测量,所使用的层析成像传感器如图 30 所示。激光器以 10 kHz 的频率扫描了 H_2O 的 4 条吸收谱线,在发动机管口 20~200 cm 处设置了 8 个测

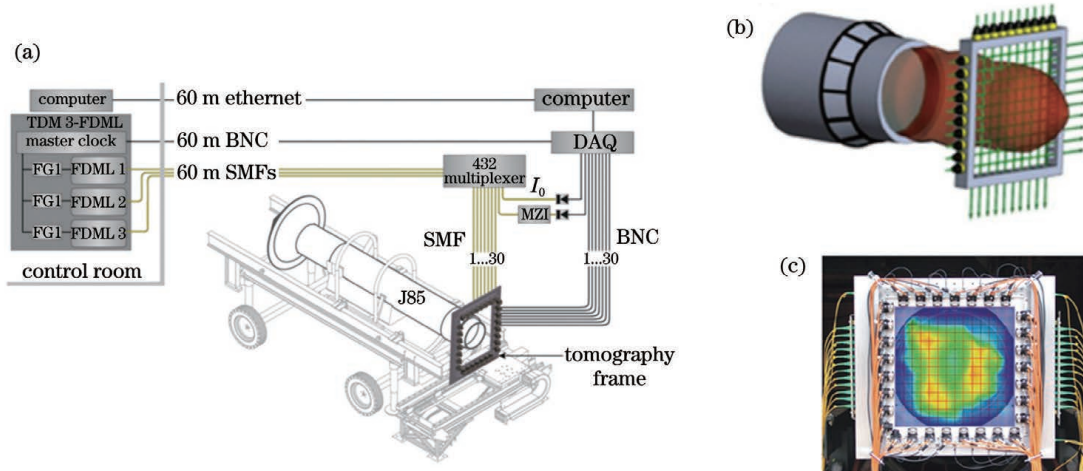


图 29 J85 航空发动机出口二维测量系统示意图和实物照片。(a)测量系统示意图;(b)光学系统示意图;(c)光学系统照片
Fig. 29 Schematic diagram and physical photo of J85 aero-engine exit 2D measurement system. (a) Schematic diagram of measurement system; (b) diagram of optical system; (c) physical photo of optical system

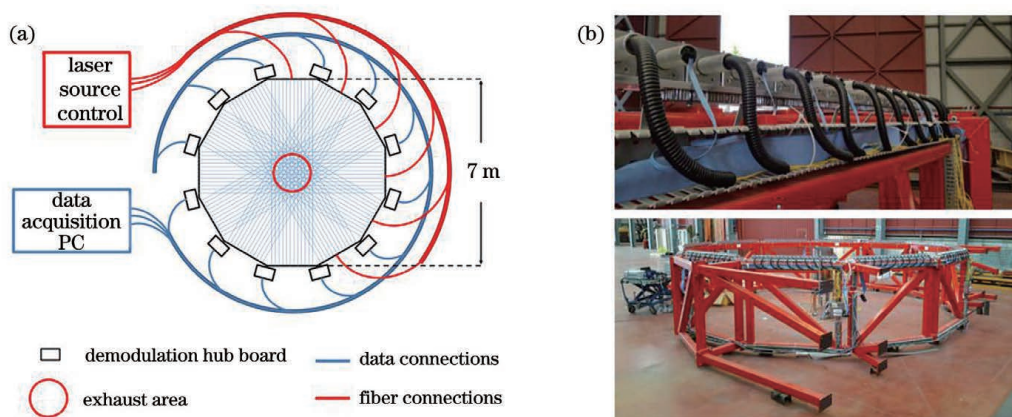


图 30 航空发动机尾喷口浓度场层析成像传感器。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 30 Aero-engine tail nozzle concentration field laminar imaging sensor. (a) Schematic diagram; (b) designed sensor

试点,得到了爆轰过程不同时刻管外流场燃气温度的分布重建,实现了爆轰发动机管外较远处流场的在线诊断。Fisher 等^[57,108]初步将波长调制法应用于层析成像,实现航空发动机尾喷口横截面 CO_2 浓度分布重建,然而,该系统仅扫描了一条吸收谱线,无法获得温度分布。

5.2.3 燃煤锅炉

美国 Zolo 公司的 ZoloBOSS 产品融合了 LAS、激光合束技术和层析成像技术,用于燃煤锅炉燃烧后的组分浓度分析^[109],通过控制系统,可以准确地控制风煤比例,控制炉腔内部温度,优化炉腔内部 CO 、 O_2 等成分的组分,从而将炉腔内部的空气和燃煤比例控制在优化目标区域内。ZoloBOSS 系统是 LAS 技术的首个成熟的商业产品,其在燃煤锅炉的应用中解决了激光自动对准技术、设备远程监控等工程设计问题。但在层析技术方面,仅采用简单的加权平均法,仅能粗略评估锅炉的燃烧情况。

5.2.4 内燃机

Kawazoe 等^[110]将其系统应用于内燃机,以研究碳氢化合物燃料的分布情况。Wright 等^[111]研制了测

量汽车发动机内碳氢燃料的层析成像系统。Wright 等^[79]将化学组分层析成像(CST)应用于多缸汽车发动机中,能够高速连续地将碳氢燃料在燃烧室中的分布情况进行成像,其光路设计及 27 条光线成像结果如图 31 所示。Carey 等^[112]通过一种适用于气态烃分布测量的层析成像技术实现了内燃机燃烧室内的汽油蒸气分布的测量。

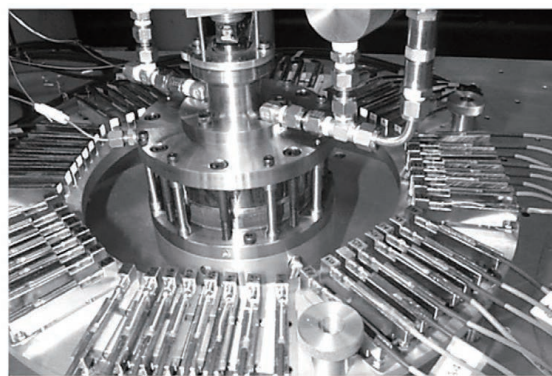


图 31 Wright 等^[79]采用的模拟气缸实验设备

Fig. 31 Simulated cylinder experimental equipment used by Wright et al. ^[79]

5.5.5 风洞

2020年,北京航空航天大学的赵文帅(Zhao)等^[84]提出了基于可调谐半导体激光的吸收光谱层析成像系统,同时重建了动态火焰中的温度和物质浓度分布。在McKenna燃烧器和风洞出口分别进行实验,其中高温标准风洞出口的实验装置如图32所示,获得了温度和水蒸气的浓度分布。风洞出口排气流成像结果与11种不同工况下的温度变化趋势一致,验证了在恶劣工况下系统的鲁棒性。

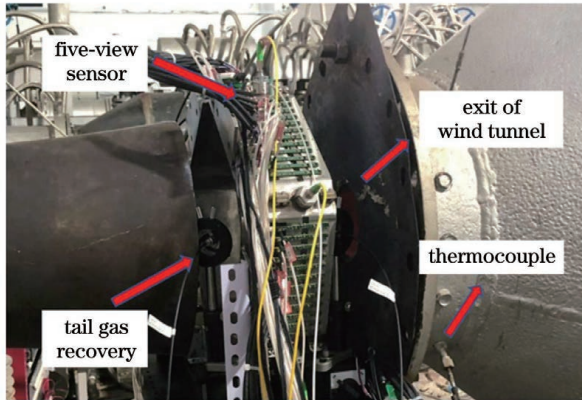


图32 风洞出口安装五角度传感器实验装置

Fig. 32 Experimental setup with five-angle sensors at exit of wind tunnel

6 结束语

经过数十年世界各国研究人员的不懈努力,LAS技术在光谱获取方法、数据采集系统和图像重建算法等关键技术方面均获得长足进步,在实验室和工业现场均取得重要进展。但仍有进一步发展的必要,具体包括宽谱光源的研制及应用、极端环境的光谱数据获取、少角度投影下的重建模型、融合燃烧模型的新型图像重建方法以及适合超高动态的传感系统等。仍需要进一步深入研究LAS技术,以满足航空发动机、超高速飞行器、超高速风洞等重大装备中宽温度范围、高速度动态和多组分分布的测试需求。

参 考 文 献

[1] 张立芳,王飞,蔚昊,等. 基于波长调制的数字滤波技术的降噪研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(7): 0730001.
Zhang L F, Wang F, Wei H, et al. Denoising of digital filtering based on wavelength modulation spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(7): 0730001.

[2] Wenig M, Spichtinger N, Stohl A, et al. Intercontinental transport of nitrogen oxide pollution plumes[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2003, 3(2): 387-393.

[3] de Marco A, Poncia G. A model of combustion chambers, including nitrogen oxide generation, in thermal power plants [J]. Control Engineering Practice, 1999, 7(4): 483-492.

[4] Yang W J, Zhou J H, Liu M S, et al. Combustion process and nitrogen oxides emission of Shenmu coal added with sodium acetate[J]. Energy & Fuels, 2007, 21(5): 2548-2554.

[5] 邓瑶,唐雯,李峥辉,等. 基于直接吸收峰峰值标定的气体浓度反演方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58

(3): 0330002.

Deng Y, Tang W, Li Z H, et al. Gas concentration inversion method based on calibration of direct absorption peak value[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0330002.

- [6] Livebardon T, Moreau S, Gicquel L, et al. Combining LES of combustion chamber and an actuator disk theory to predict combustion noise in a helicopter engine [J]. Combustion and Flame, 2016, 165: 272-287.
- [7] Tachibana S, Saito K, Yamamoto T, et al. Experimental and numerical investigation of thermo-acoustic instability in a liquid-fuel aero-engine combustor at elevated pressure: validity of large-eddy simulation of spray combustion [J]. Combustion and Flame, 2015, 162(6): 2621-2637.
- [8] Liu Q L, Baccarella D, Lee T H. Review of combustion stabilization for hypersonic airbreathing propulsion [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2020, 119: 100636.
- [9] Ren X Y, Zeng D, Wang Y, et al. Temperature measurement of a turbulent buoyant ethylene diffusion flame using a dual-thermocouple technique [J]. Fire Safety Journal, 2021, 120: 103061.
- [10] 王明瑞,肖阳,韩冰,等. 燃气分析法测量航空发动机五头部燃烧室温度场[J]. 航空动力学报, 2016, 31(9): 2049-2054.
Wang M R, Xiao Y, Han B, et al. Temperature field test for aeroengine combustor with five nozzles based on gas analysis [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(9): 2049-2054.
- [11] Gilibert G, Lu G, Yan Y. Three-dimensional tomographic reconstruction of the luminosity distribution of a combustion flame [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(4): 1300-1306.
- [12] Cheng Q, Zhang X Y, Wang Z C, et al. Simultaneous measurement of three-dimensional temperature distributions and radiative properties based on radiation image processing technology in a gas-fired pilot tubular furnace [J]. Heat Transfer Engineering, 2014, 35(6/7/8): 770-779.
- [13] Haller T W, Varghese P L. Measurements of pressure broadening of N_2 in the anisotropic tensor component of spontaneous Raman spectra [J]. Combustion and Flame, 2021, 224: 166-176.
- [14] Raffius T, Schulz C, Ottenwälder T, et al. Flame-temperature, light-attenuation, and CO measurements by spontaneous Raman scattering in non-sooting diesel-like jets [J]. Combustion and Flame, 2017, 176: 104-116.
- [15] Bohlin A, Nordström E, Carlsson H, et al. Pure rotational CARS measurements of temperature and relative O_2 -concentration in a low swirl turbulent premixed flame [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 3629-3636.
- [16] Magre P, Collin G, Pin O, et al. Temperature measurements by CARS and intrusive probe in an air-hydrogen supersonic combustion [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44(21): 4095-4105.
- [17] 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.
- [18] Lednev V N, Sdvizhenskii P A, Stavertiy A Y, et al. Online and *in situ* laser-induced breakdown spectroscopy for laser welding monitoring [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2021, 175: 106032.
- [19] Iwata K, Koide H, Imamura O, et al. Experimental measurement of atomic composition in sooting luminous flame by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Energy, 2019, 188: 115959.
- [20] Ma Y F, He Y, Tong Y, et al. Quartz-tuning-fork enhanced photothermal spectroscopy for ultra-high sensitive trace gas detection [J]. Optics Express, 2018, 26(24): 32103-32110.
- [21] Li C G, Dong L, Zheng C T, et al. Ppbv-level ethane detection using quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy with a

- continuous-wave, room temperature interband cascade laser [J]. *Sensors*, 2018, 18(3): 723.
- [22] Wang L, Jiang Y, Qiu R. Experimental study of combustion inhibition by trimethyl phosphate in turbulent premixed methane/air flames using OH-PLIF [J]. *Fuel*, 2021, 294: 120324.
- [23] Malbois P, Salaün E, Rossow B, et al. Quantitative measurements of fuel distribution and flame structure in a lean-premixed aero-engine injection system by kerosene/OH-PLIF measurements under high-pressure conditions [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 5215-5222.
- [24] Xu L J, Hou G Y, Qiu S, et al. Noise immune TDLAS temperature measurement through spectrum shifting by using a Mach-Zehnder interferometer [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 7004009.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Hanson R K, Falcone P K. Temperature measurement technique for high-temperature gases using a tunable diode laser [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(16): 2477-2480.
- [28] Zhou X, Jeffries J B, Hanson R K. Development of a fast temperature sensor for combustion gases using a single tunable diode laser [J]. *Applied Physics B*, 2005, 81(5): 711-722.
- [29] Xu L J, Liu C, Jing W Y, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopy-based tomography system for on-line monitoring of two-dimensional distributions of temperature and H₂O mole fraction [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(1): 013101.
- [30] Arroyo M P, Hanson R K. Absorption measurements of water-vapor concentration, temperature, and line-shape parameters using a tunable InGaAsP diode laser [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(30): 6104-6116.
- [31] Wagner S, Fisher B T, Fleming J W, et al. TDLAS-based *in situ* measurement of absolute acetylene concentrations in laminar 2D diffusion flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32(1): 839-846.
- [32] 李亚飞, 刘志伟, 张天羽, 等. 近红外激光二氧化碳传感系统的研制及应用 [J]. *光学学报*, 2020, 40(5): 0514003.
- Li Y F, Liu Z W, Zhang T Y, et al. Development and application of near-infrared laser carbon dioxide gas sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0514003.
- [33] Cai W W, Kaminski C F. A tomographic technique for the simultaneous imaging of temperature, chemical species, and pressure in reactive flows using absorption spectroscopy with frequency-agile lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(3): 034101.
- [34] Wood M P, Ozanyan K B. Simultaneous temperature, concentration, and pressure imaging of water vapor in a turbine engine [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(1): 545-551.
- [35] Goldenstein C S, Spearrin R M, Hanson R K. Fiber-coupled diode-laser sensors for calibration-free stand-off measurements of gas temperature, pressure, and composition [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): 479-484.
- [36] Mathews G C, Blaisdell M G, Lemcherfi A I, et al. High-bandwidth absorption-spectroscopy measurements of temperature, pressure, CO, and H₂O in the annulus of a rotating detonation rocket engine [J]. *Applied Physics B*, 2021, 127(12): 165.
- [37] Philippe L C, Hanson R K. Laser diode wavelength-modulation spectroscopy for simultaneous measurement of temperature, pressure, and velocity in shock-heated oxygen flows [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(30): 6090-6103.
- [38] Qu Q W, Cao Z, Xu L J, et al. Reconstruction of two-dimensional velocity distribution in scramjet by laser absorption spectroscopy tomography [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(1): 205-212.
- [39] Grauer S J, Steinberg A M. Linear absorption tomography with velocimetry (LATV) for multiparameter measurements in high-speed flows [J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 32676-32692.
- [40] Huang X L, Li N, Weng C S, et al. *In situ* measurement on nonuniform velocity distribution in external detonation exhaust flow by analysis of spectrum features using TDLAS [J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(1): 014703.
- [41] Witzel O, Klein A, Meffert C, et al. VCSEL-based, high-speed, *in situ* TDLAS for in-cylinder water vapor measurements in IC engines [J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 19951-19965.
- [42] Kaebe B D, Robins N P, Boyson T K, et al. 1.6 MHz scanning rate direct absorption temperature measurements using a single vertical-cavity surface-emitting laser diode [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(20): 5680-5687.
- [43] Caswell A W, Roy S, An X L, et al. Measurements of multiple gas parameters in a pulsed-detonation combustor using time-division-multiplexed Fourier-domain mode-locked lasers [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(12): 2893-2904.
- [44] Yang X T, Fei H Z, Xie W Q. NO_x emission on-line measurement for the diesel engine based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Optik*, 2017, 140: 724-729.
- [45] Ma L H, Lau L Y, Ren W. Non-uniform temperature and species concentration measurements in a laminar flame using multi-band infrared absorption spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(3): 83.
- [46] Wei M, Kan R F, Chen B, et al. Calibration-free wavelength modulation spectroscopy for gas concentration measurements using a quantum cascade laser [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(5): 149.
- [47] Spearrin R M, Goldenstein C S, Schultz I A, et al. Simultaneous sensing of temperature, CO, and CO₂ in a scramjet combustor using quantum cascade laser absorption spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(2): 689-698.
- [48] Pogány A, Klein A, Ebert V. Measurement of water vapor line strengths in the 1.4–2.7 μm range by tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 165: 108-122.
- [49] Ren W, Farooq A, Davidson D F, et al. CO concentration and temperature sensor for combustion gases using quantum-cascade laser absorption near 4.7 μm [J]. *Applied Physics B*, 2012, 107(3): 849-860.
- [50] Spearrin R M, Schultz I A, Jeffries J B, et al. Laser absorption of nitric oxide for thermometry in high-enthalpy air [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(12): 125103.
- [51] Sur R, Peng W Y, Strand C, et al. Mid-infrared laser absorption spectroscopy of NO₂ at elevated temperatures [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 187: 364-374.
- [52] Weng W B, Larsson J, Bood J, et al. Quantitative hydrogen chloride detection in combustion environments using tunable diode laser absorption spectroscopy with comprehensive investigation of hot water interference [J]. *Applied Spectroscopy*, 2022, 76(2): 207-215.
- [53] Spearrin R M, Li S, Davidson D F, et al. High-temperature *iso*-butene absorption diagnostic for shock tube kinetics using a pulsed quantum cascade laser near 11.3 μm [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3645-3651.
- [54] Klingbeil A E, Jeffries J B, Hanson R K. Design of a fiber-coupled mid-infrared fuel sensor for pulse detonation engines [J]. *AIAA Journal*, 2007, 45(4): 772-778.
- [55] Choi D W, Doh D H, Jeon M G. The development of the simultaneous reconstruction of 2D temperature and concentration using a 6-peaks algorithm for CT-TDLAS [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34(5):

- 2067-2074.
- [56] Choi D W, Jeon M G, Cho G R, et al. Performance improvements in temperature reconstructions of 2-D tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) [J]. *Journal of Thermal Science*, 2016, 25(1): 84-89.
- [57] Fisher E M D, Tsekenis S A, Yang Y J, et al. A custom, high-channel count data acquisition system for chemical species tomography of aero-jet engine exhaust plumes [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(2): 549-558.
- [58] 王兴平, 彭冬, 李佳胜, 等. 基于波长调制吸收光谱的燃烧流场二维重建[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.
- [59] 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.
- [60] Varghese P L, Hanson R K. Collisional narrowing effects on spectral line shapes measured at high resolution [J]. *Applied Optics*, 1984, 23(14): 2376-2385.
- [61] Liu X, Jeffries J B, Hanson R K, et al. Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature [J]. *Applied Physics B*, 2006, 82(3): 469-478.
- [62] 姚路, 刘文清, 刘建国, 等. 基于 TDLAS 的长光程环境大气痕量 CO 监测方法研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0215003.
Yao L, Liu W Q, Liu J G, et al. Research on open-path detection for atmospheric trace gas CO based on TDLAS [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0215003.
- [63] Wu Q, Wang F, Li M Y, et al. Simultaneous *in-situ* measurement of soot volume fraction, H₂O concentration, and temperature in an ethylene/air premixed flame using tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Combustion Science and Technology*, 2017, 189(9): 1571-1590.
- [64] Ma L H, Ning H B, Wu J J, et al. *In situ* flame temperature measurements using a mid-infrared two-line H₂O laser-absorption thermometry [J]. *Combustion Science and Technology*, 2018, 190(3): 393-408.
- [65] Fang S H, Wang Z Z, Lin X, et al. Characterizing combustion of a hybrid rocket using laser absorption spectroscopy [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 127: 110411.
- [66] Du Z H, Yan Y, Li J Y, et al. *In situ*, multiparameter optical sensor for monitoring the selective catalytic reduction process of diesel engines [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 267: 255-264.
- [67] Du Y J, Peng Z M, Ding Y J. Wavelength modulation spectroscopy for recovering absolute absorbance [J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 9263-9272.
- [68] He D, Peng Z M, Ding Y J. Time-resolved CO₂ concentration and ignition delay time measurements in the combustion processes of n-butane/hydrogen mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 207: 222-231.
- [69] Wang Y H, Zhou B, Liu C. Calibration-free wavelength modulation spectroscopy based on even-order harmonics [J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 26618-26633.
- [70] Li R J, Li F, Lin X, et al. Linear calibration-free wavelength modulation spectroscopy [J/OL]. *Microwave and Optical Technology Letters*. DOI:10.1002/mop.33063.
- [71] Karagiannopoulos S, Cheadle E, Wright P, et al. Multiwavelength diode-laser absorption spectroscopy using external intensity modulation by semiconductor optical amplifiers [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(34): 8057-8067.
- [72] Gillet B, Hardalupas Y, Kavounides C, et al. Infrared absorption for measurement of hydrocarbon concentration in fuel/air mixtures (MAST-B-LIQUID) [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(11/12): 1633-1653.
- [73] Wang F, Cen K F, Li N, et al. Two-dimensional tomography for gas concentration and temperature distributions based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, 21(4): 045301.
- [74] Kasyutich V L, Martin P A. Towards a two-dimensional concentration and temperature laser absorption tomography sensor system [J]. *Applied Physics B*, 2011, 102(1): 149-162.
- [75] Song J L, Hong Y J, Wang G Y, et al. Algebraic tomographic reconstruction of two-dimensional gas temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2013, 112(4): 529-537.
- [76] Busa K, Ellison E, McGovern B, et al. Measurements on NASA Langley durable combustor rig by TDLAT: preliminary results [C] // 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 7-10, 2013, Grapevine, Texas, USA. Virginia: AIAA Press, 2013: 696.
- [77] Ma L, Cai W W, Caswell A W, et al. Tomographic imaging in practical combustion devices based on hyperspectral absorption spectroscopy [C] // 2009 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2009 Conference on Quantum Electronics and Laser Science Conference, June 2-4, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2009.
- [78] 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.
- [79] 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.
- [80] Liu C, Xu L J, Chen J L, 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.
- [81] 宋俊玲, 姜雅晶, 饶伟, 等. 超声速燃烧场高密度光学测量环设计方法研究 [J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(10): 20210063.
Song J L, Jiang Y J, Rao W, et al. Design of a high-resolution optical measuring ring for supersonic combustion flow field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20210063.
- [82] Hosseinabadi A H H, Black D G, Salcudean S E. Ultra low-noise FPGA-based six-axis optical force-torque sensor: hardware and software [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(10): 10207-10217.
- [83] Horvat R, Jezernik K, Čurković M. An event-driven approach to the current control of a BLDC motor using FPGA [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(7): 3719-3726.
- [84] Zhao W S, Xu L J, Huang A, et al. A WMS based TDLAS tomographic system for distribution retrievals of both gas concentration and temperature in dynamic flames [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(8): 4179-4188.
- [85] Jing W Y, Cao Z, Zhang H Y, et al. A reconfigurable parallel data acquisition system for tunable diode laser absorption spectroscopy tomography [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(24): 8215-8223.
- [86] 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.
- [87] Fisher E, Tsekenis S A, Yang Y, et al. An embedded processing design for 192-channel 10-40 MS/s aero-engine optical tomography: progress and continued DAQ characterisation [C] // 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), May 14-17, 2018, Houston, Texas, USA. New York: IEEE Press, 2018.

- [88] Villarreal R, Varghese P L. Frequency-resolved absorption tomography with tunable diode lasers [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(31): 6786-6795.
- [89] Liu C, Xu L J, Cao Z, et al. Reconstruction of axisymmetric temperature and gas concentration distributions by combining fan-beam TDLAS with onion-peeling deconvolution [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2014, 63(12): 3067-3075.
- [90] Liu C, Xu L J, Li F Y, et al. Resolution-doubled one-dimensional wavelength modulation spectroscopy tomography for flame flatness validation of a flat-flame burner [J]. *Applied Physics B*, 2015, 120(3): 407-416.
- [91] Mohamad E J, Rahim R A, Ibrahim S, et al. Flame imaging using laser-based transmission tomography [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, 127(2): 332-339.
- [92] Guha A, Schoegl I M. Tomographic imaging of flames: assessment of reconstruction error based on simulated results [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(2): 350-359.
- [93] Busa K, Bryner E, McDaniel J, et al. Demonstration of capability of water flux measurement in a scramjet combustor using tunable diode laser absorption tomography and stereoscopic PIV [C] // 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 4-7, 2011, Orlando, Florida, USA. Virginia: AIAA Press, 2011: 1294.
- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] Gao X, Cao Z, Li H Y, et al. Sparse Zernike fitting for dynamic LAS tomographic images of temperature and water vapor concentration [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-14.
- [97] Daun K J. Infrared species limited data tomography through Tikhonov reconstruction [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111(1): 105-115.
- [98] 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.
- [99] Si J J, Fu G C, Cheng Y B, et al. A quality-hierarchical temperature imaging network for TDLAS tomography [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 4500710.
- [100] 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.
- [101] Cai W W, Kaminski C F. Multiplexed absorption tomography with calibration-free wavelength modulation spectroscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(15): 154106.
- [102] Huang J Q, Liu H C, Dai J H, et al. Reconstruction for limited-data nonlinear tomographic absorption spectroscopy via deep learning [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 218: 187-193.
- [103] Deguchi Y, Yasui D, Adachi A. Development of 2D temperature and concentration measurement method using tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, 2012(9): 543-549.
- [104] Huang A, Cao Z, Wang C R, et al. An FPGA-based on-chip neural network for TDLAS tomography in dynamic flames [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 4506911.
- [105] Bryner E, Busa K, McDaniel J, et al. Spatially resolved temperature and water vapor concentration distributions in a flat flame burner by tunable diode laser absorption tomography [C] // 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, January 4-7, 2011, Orlando, Florida, USA. Virginia: AIAA Press, 2011: 1291.
- [106] Brown M, Barhorst T. Post-flight analysis of the diode-laser-based mass capture experiment onboard HIFiRE flight 1 [C] // 17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, April 11-14, 2011, San Francisco, California, USA. Virginia: AIAA Press, 2011: 2359.
- [107] 吕晓静, 李宁, 翁春生. 基于多谱线吸收光谱技术的脉冲爆轰发动机管外流场测试研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(3): 624-630.
- Lü X J, Li N, Weng C S. The diagnostics of detonation flow external field based on multispectral absorption spectroscopy technology [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(3): 624-630.
- [108] Fisher E M D, Benoy T. Interleaving and error concealment to mitigate the impact of packet loss in resource-constrained TDLAS/WMS data acquisition [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(2): 439-448.
- [109] Zolontech [EB/OL]. [2022-05-25]. <https://www.zolontech.com/>.
- [110] Kawazoe H, Whitelaw J H. Computer tomography of infra-red absorption and its application to internal-combustion engines [M] // Adrian R J, Durao D F G, Heitor M V, et al. *Laser techniques for fluid mechanics*. Heidelberg: Springer, 2002: Chapter 5, Section 1.
- [111] 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.
- [112] Carey S J, McCann H, Hindle F P, et al. Chemical species tomography by near infra-red absorption [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2000, 77(1/2): 111-118.

Laser Absorption Spectral Tomography for Dynamical Combustion Monitoring

Cao Zhang^{*}, Gao Xin, Lu Fanghao, Xu Lijun^{**}

School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract

Significance Combustion involves very complicated physical and chemical reactions of fuels. Chemical reactions transform the fuel energy into thermal energy, accompanied by high temperature as well as combustion products at high pressure. The thermal energy then drives mechanical devices for mechanical movements and greatly promotes the industrial development. However, the combustion efficiency and the working temperature range of the fuel determine the performance and service life of the combustion equipment. Also, the combustion process inevitably generates carbon oxides, nitrogen oxides and other pollutants, which can seriously damage human health and the global environment. It is essential to explore the reactions of complicated combustion fields and reveal their states in real time for combustion optimization and intrinsic exploitations.

The distributions of temperature field and gas component concentration inside the combustion reveal the combustion performance more intuitively. The transient changes of the flame temperature directly reflect the stability of the combustion process, and are closely related to the combustion efficiency, gas pollutant emission and unburned carbon loss. The gas component concentration distribution is also an important indicator of the fuel combustion efficiency and combustion cleanliness. For the combustion reaction mechanism and combustion performance improvement, the online monitoring of temperature and gas component concentration is the prerequisite. However, these reactions often occur in harsh environments with high temperatures and pressures, and the confined layout of the measurement space poses a serious challenge to these measurements.

With the development and innovation of lasers, laser spectroscopy has been widely used in combustion monitoring and turns to be one of the important tools for combustion diagnosis. The continuous vibration in the combustor, the radiation from the violent fluctuation of the flame, and the high-speed turbulence of the flow all bring great distortions into the detection of optical intensities. Meanwhile, the actual combustion process changes very drastically, and the flame parameters, such as temperature, gas fraction concentration, and flow rate, are non-uniformly distributed in the confined space. If only the projections along a single laser path are measured, the spatial resolution along the path is missing and it fails to reveal the distribution along the path. For multi-dimensional imaging of gas parameters in the combustion field, absorption data from multiple laser paths across the region of interest are used to reconstruct the distributions inside by tomographic techniques.

In recent decades, laser absorption spectroscopy (LAS) has been widely used in combustion diagnosis, benefiting from the development of low-cost and easy-to-use distributed feedback laser diodes. As a non-contact method with high sensitivity and rapid response, LAS has been combined with computed tomography (CT) methods for cross sectional imaging by using spectral data from multiple laser paths at multiple angles. In this way, real time visualizations of flame temperature and gas component concentration distributions are realized for postprocessing of the combustion reaction mechanism. LAS is also a preferable technology in complicated combustion diagnosis due to its advantages of simple structure and good environment adaptability.

Progress Laser absorption spectroscopy tomography and its application in monitoring of dynamic and complex combustion field are reviewed. Firstly, the measurement principles of common LAS methods, including direct absorption spectroscopy (DAS), wavelength modulation spectroscopy (WMS) and amplitude modulation spectroscopy (AMS), are briefed. The application of these measurement techniques to the intrinsic parameter monitoring in combustion field along a single laser path is also described. Secondly, the state-of-the-art of optical sensing module and circuit module is illustrated for LAS tomography instruments. For combustion field of interest in different cases, tomographic sensors in terms of moving scanning sensors and fixed angle sensors are compared for specific applications. Also, data acquisition systems for the tomographic images are included, such as systems of high frame rate raw signals at high speed for a short period of time and systems at a low frame rate for a long period of monitoring time. Then the principle and development of LAS imaging technology are introduced. Image reconstruction methods, e. g., analytical method, iterative method and nonlinear method are presented to monitor the intrinsic parameters of complex combustion field. These methods have unique advantages in certain applications, such as fast solution speed or high solving accuracy. Finally, the specific

applications of LAS tomography in laboratory flames and harsh field experiments are briefed.

Conclusions and Prospects Laser absorption spectroscopy has made great strides in spectral acquisition methods, data acquisition systems, image reconstruction algorithms and other key techniques, and has got progress in the application of combustion field parameters monitoring in both laboratory and industrial sites. However, there still exist urgent needs for further developments and thorough investigations, including but not limited to the development of wide spectrum laser sources, spectral data acquisition in extreme environments, image reconstruction models in cases of very few angular projections, new image reconstruction methods incorporating combustion models, and sensor systems suitable for ultra-high dynamics, etc. Further in-depth studies are expected to meet the increasing demand for onsite applications over wide temperature ranges, high velocity dynamics and multi-component distributions.

Key words laser absorption spectroscopy (LAS); computed tomography (CT); combustion field; dynamic monitoring; temperature; fraction concentration