

文章编号: 1000-8055(2023)01-0116-11

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20210451

基于波长调制技术的燃烧室出口温度分布 TDLAT 测试方法

刘重阳^{1,2}, 许振宇³, 黄 安³, 宋文艳¹

- (1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;
2. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621300;
3. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所
环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

摘 要: 为给未来高推质比航空发动机燃烧室出口温度分布测试作技术储备,以某单管燃烧室为研究对象,采用可调谐半导体激光吸收层析成像(TDLAT)技术,在 0.5~0.8 MPa 压力环境下,研究了基于波长调制(WMS)技术的燃烧室出口温度分布测试方法的工程适用性。结果表明:通过多光路正交测量的方式,利用扣除背景的归一化波长调制光谱模型、变量轮换迭代反演及计算层析(CT)技术,可以实现具有时空分辨性的燃烧室出口温度分布式测量;场分布重建结果能够较正确地反映出燃气温度和 H₂O 气体积分数随进口参数变化的趋势与特征;受燃烧流场的不均匀性、光谱模型建立与光谱参数标定的不准确、反演与重建算法的不完善等因素的影响,TDLAS 测温均值低于热电偶测量结果,相对误差在 15%~23% 之间,测量数据的准确度距工程应用需求还有一定的差距。

关 键 词: 吸收光谱; 波长调制技术; 燃烧室; 出口温度分布; 重建
中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

TDLAT measurement method for outlet temperature profile of combustor based on wavelength modulation spectroscopy technology

LIU Chongyang^{1,2}, XU Zhenyu³, HUANG An³, SONG Wenyan¹

- (1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Sichuan Gas Turbine Establishment,
Aero Engine Corporation of China, Mianyang Sichuan 621300, China;
3. Key Laboratory of Environmental Optics and Technology,
Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to make technical reserves for measurement of combustor outlet temperature profile of high thrust-weight ratio aero-engine in future, the computed tomography technology of tunable diode laser absorption tomography (TDLAT) technology was applied, and the engineering adaptability of measurement method based on wavelength modulation spectroscopy (WMS) technology was studied in a single can combustor under the pressure of 0.5—0.8 MPa condition. The results showed that the measurement of combustor outlet temperature profile could be achieved with time and spatial resolution applying the grid method of orthogonal intersection of multiple light path, using the normalized WMS model whose background was subtracted, the iterative inversion method of variables and the computed

收稿日期: 2021-08-14

基金项目: 四川省科技计划项目(2018JY0432)

作者简介: 刘重阳(1980—),男,博士生,主要从事航空发动机燃烧室试验测试技术研究。

引用格式: 刘重阳, 许振宇, 黄安, 等. 基于波长调制技术的燃烧室出口温度分布 TDLAT 测试方法[J]. 航空动力学报, 2023, 38(1): 116-126.
LIU Chongyang, XU Zhenyu, HUANG An, et al. TDLAT measurement method for outlet temperature profile of combustor based on wavelength modulation spectroscopy technology[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(1): 116-126.

tomography (CT) technology; the trends and characteristics of gas temperature and H_2O concentration distribution vs. the changes of inlet parameters could be better shown from the reconstruction results; the mean value of TDLAS temperature measurement were lower than that of thermocouple measurement, and the relative error was between 15% and 23%, which was ascribed to the non-uniform flow field, the inaccuracy of spectral model and spectrum parameter calibration, and the imperfections of inversion and reconstruction algorithm, etc, there was still a certain gap between the accuracy of measurement data and the requirements of engineering application.

Keywords: absorption spectroscopy; wavelength modulation spectroscopy technology; combustor; outlet temperature profile; reconstruction

出口温度分布品质作为航空发动机燃烧室的重要性能指标,它不仅反映了燃烧室工作过程的组织完善程度,而且对涡轮部件耐久性与寿命起着决定性的作用^[1-2]。影响燃烧室出口温度分布的因素很多,包括燃烧室进口流场参数、燃油分布、掺混空气的流动及掺混段的几何参数等,目前很难从纯理论的角度进行计算和分析。所以通过试验得到燃烧室出口温度分布数据是燃烧室研制过程中必不可少的关键环节。

然而随着航空发动机推质比的提高,燃烧室出口热点温度已达 2 300 K 以上^[3-4],目前主流的接触式测温技术已面临瓶颈。其中标准分度的铂铑 10-铂(S型)和铂铑 30-铂铑 6(B型)热电偶已达使用上限^[5],在 2 000 K 以上环境下长时间使用时,探针偶丝结点和保护管(或屏蔽罩)会发生熔化、烧蚀、断裂等现象,且测量精度难以保证。燃气取样分析测温为间接测量技术,其可测上限高,但系统和环境对测温结果的影响因素较多,理论解析模型大幅简化,校准和误差分析难度大^[6]。此外接触式测温对流场存在干扰和分辨率低的固有局限性导致其发展受限。因此,当前急需探寻更加先进的航空发动机燃烧室出口高温燃气温度及分布测试技术。

可调谐半导体激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)技术作为一种高分辨率红外吸收光学测量技术,可以有效克服传感器点式测量和干扰被测流场的不足,具有灵敏度高、响应速度快、测量结构简单、多参量同时测量和抗干扰能力强等诸多优点^[7-8]。近年来国内外诸多研究机构采用该技术对各类流场开展了大量的诊断应用研究,所测参数涉及气体温度、组分体积分数、流速、压强、场分布等。其中针对燃烧流场的温度和组分测量,TDLAS技术在超燃领域应用较为成熟,但在航空发动机燃烧流场测量方面应用较少^[7-9]。

目前,TDLAS技术主要包括直接吸收(direct absorption, DA)和波长调制(wavelength modulation spectroscopy, WMS)两种技术手段^[10-11]。直接吸收技术需要获取谱线的完整吸收信息,主要应用在吸收较强,所选吸收线相对孤立,受临近干扰吸收比较弱,信噪比较大的流场环境。波长调制技术通过增加频率为 f 的高频调制,解调 nf 的谐波信号来测量流场参数,不需要直接吸收技术必需的无吸收基线信号,且其检测灵敏度高于直接吸收 1~2 数量级^[12],对原始吸收光强较弱的测量同样具有较高的信噪比,1 f 归一化的 nf 信号可消除非吸收光强损耗带来的影响,能够使 TDLAS 技术更好地适用于高温高压的恶劣流场环境。

此外,为测量非均匀燃烧场气体参数二维分布,TDLAS与计算层析(computed tomography, CT)技术相结合发展了可调谐激光吸收层析成像(tunable diode laser absorption tomography, TDLAT)技术^[13],即根据不同角度下光线经过待测流场后的衰减激光信号,结合 CT 算法得到被测流场的分布图像,已在多类燃烧流场的诊断研究中得以应用^[14-18]。本文针对未来高推质比航空发动机燃烧室出口温度分布测量需求,以某单管燃烧室为研究对象,选择燃烧产物之一的 H_2O 作为目标分子,探索基于 TDLAS 的波长调制(WMS)技术,通过多光路正交测量的方式,以及利用提取的1 f 归一化2 f 信号直接与吸收模型得到的谐波信号比较反演流场温度和 H_2O 体积分数,实现具有时间和空间分辨性的燃烧室出口温度分布式测量方法,为技术进一步工程应用奠定基础。

1 理论与原理

1.1 基本理论

TDLAS技术基于 Beer-Lambert 吸收定律,频率为 ν 强度为 $I_0(\nu)$ 的入射光经过气体吸收后的透射光强为:

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\alpha_\nu] = I_0(\nu) \exp\left[-\left(\frac{p}{101325}\right) XLS(T)\phi(\nu)\right] \quad (1)$$

其中 α_ν 为光谱吸收光度; p 为环境静压,单位为 Pa; X 为目标吸收气体占总气体的摩尔数比, L 为吸收光程,单位为 cm; $S(T)$ 为吸收线强,单位为 cm^2/Pa , $\phi(\nu)$ 为面积归一化的吸收线型函数。

吸收谱线强度 $S(T)$ 只与温度 T 有关,关系为

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

其中 T_0 为参考温度 296 K; $Q(T)$ 为吸收分子的配分函数; h 为普朗克常数,单位为 J·s, c 为光速,单位为 cm/s; k 为玻耳兹曼常数,单位为 J/K。

波长调制技术是在直接吸收波长扫描基础上增加高频调制,将吸收信息转移到高频解调,利用谐波信号反演流场信息,对低频噪声具有良好的抑制。激光器波长(或出光频率)调制的同时伴随激光器光强调制,激光器的出光频率和光强随时间的变化关系一般描述为

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

$$I_0(t) = \bar{I}_0(t) [1 + i_0 \cos(\omega t + \varphi_1) + i_2 \cos(2\omega t + \varphi_2)] \quad (4)$$

其中 $\bar{\nu}(t)$ 、 a 、 ω 分别为激光器中心波长、调制深度和角频率, $\bar{I}_0(t)$ 为激光器低频扫描光强, i_0 、 i_2 分别为归一化的光强一次、二次调制振幅, φ_1 、 φ_2 为相应的初相位。

结合式(3)、式(4),光强信号为调制频率 ω 的函数,谐波项包含了调制和吸收信息,一般常用 1、2 次谐波,即 $1f$ 、 $2f$ 信号,高次谐波幅值迅速降低。在弱吸收下, $1f$ 主要成分为光强的线性调制幅值, $2f$ 与吸收强度、光强幅值近似成正比变化,考虑现场测量中窗片污染等效效应可能造成光强的起伏,通常采用 $1f$ 进行强度归一,记为 $S_{2f/1f0}$ 。

由式(4)可知光强存在非线性调制项,在无吸收时也会产生本底谐波信号,利用波长调制技术反演流场参数时,扣除背景的 $1f$ 归一化 $2f$ 信号可表示为

$$S_{2f/1f-0} = \sqrt{\left(\frac{X_{2f}(t)}{R_{1f}} - \frac{X_{2f}^0(t)}{R_{1f}^0}\right)^2 + \left(\frac{Y_{2f}(t)}{R_{1f}} - \frac{Y_{2f}^0(t)}{R_{1f}^0}\right)^2} \quad (5)$$

其中 X_{2f} 、 Y_{2f} 表示经锁相放大器解调得到的 $2f$ 的 X 分量和 Y 分量信号, X_{2f}^0 、 Y_{2f}^0 表示 $2f$ 的 X 分量和 Y 分量的背景信号, R_{1f} 、 R_{1f}^0 分别表示双通道解调得到的 $1f$ 信号和背景。

1.2 测量原理

1.2.1 $1f$ 归一化波长调制光谱信号 $S_{2f/1f-0}$

初始无吸收光强可以直接测量获得,波长调制光谱模型的关键是准确计算透过率函数,包括激光器波长标定、吸收线谱线参数与模型、谐波解调 3 个部分。

激光器波长标定,利用标准具的干涉条纹自由谱范围(free spectral range, FSR)进行相对波数的标定,绝对波数根据吸收谱线位置进行校准,如图 1 所示为温度与 H_2O 测量系统 3 个传统分布反馈(distributed feedback, DFB)式激光器的干涉信号,DFB2 的局部干涉峰如放大图例所示。对干涉峰位置进行搜索,构成“位置-干涉峰序号”序列,

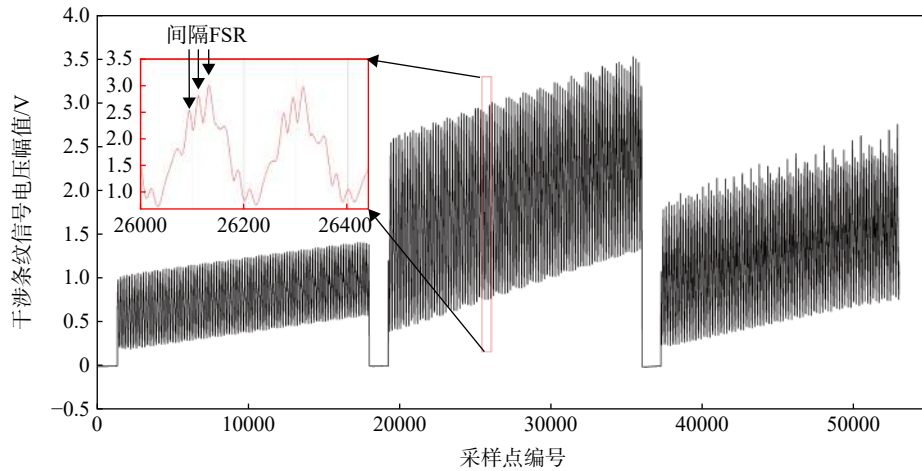


图 1 温度与 H_2O 测量系统标准具干涉信号

Fig. 1 Interferometric signal of etalon for temperature and H_2O measurement system

结合 FSR 值标定的吸收相对频率如图 2 所示, 激光器出光频率与光强变化方向相反, 相位略大于 π 。

采用带通滤波器方法, 对实测光强信号, 或者有无吸收光强结合假定吸收信息模拟的透过率仿

真的吸收信号, 进行谐波解调。如图 3 所示, 将原始信号与模拟的参考 $1f$ 、 $2f$ 正交 X 、 Y 正弦信号相乘, 然后采用低通滤波器进行滤波, 获取各阶次的谐波信号正交分量, 计算幅值 R 。

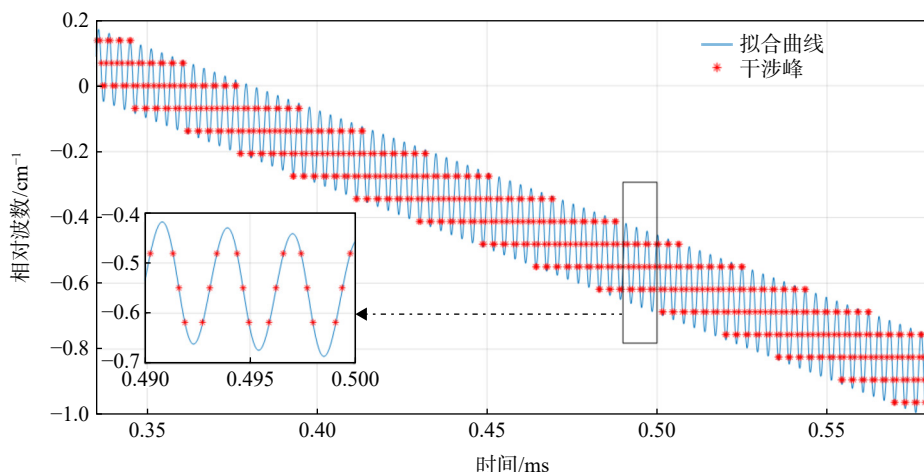


图 2 基于干涉条纹标定的激光器出光相对频率与时间关系拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve of relationship between relative frequency and time from the calibrated laser based on interference fringes

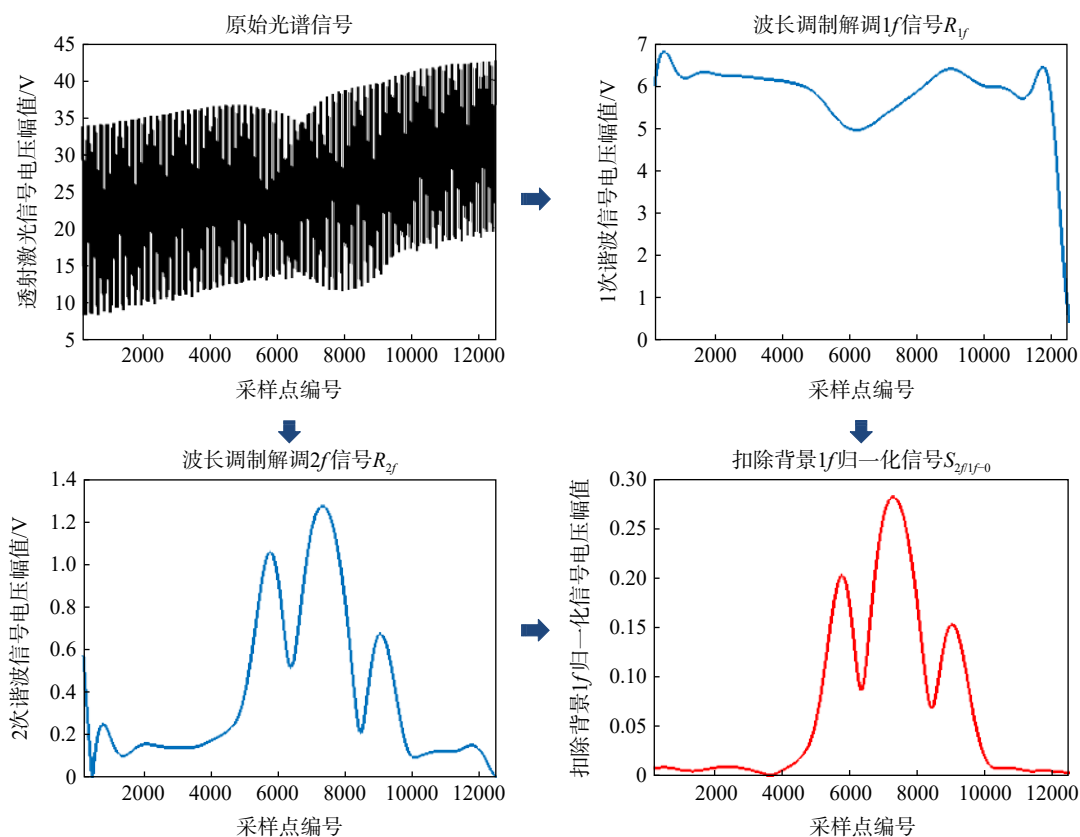


图 3 吸收光谱波长调制信号解调过程

Fig. 3 Demodulation procedure for wavelength modulation signals of absorption spectroscopy

1.2.2 变量轮换温度、体积分数反演方法

在光谱模型建立和测量方法基础上, 需要将实测光谱信号与预估温度、 H_2O 体积分数信息的模拟光谱信号进行对比, 寻找最优值使两者相吻

合, 即反演方法。采用固定压强下变量轮换法进行温度、 H_2O 体积分数反演。

变量轮换法算法流程如图 4 所示, 核心思想为: 首先固定体积分数值为当前预估值, 产生不

同温度下的模拟 $S_{2f/f=0}$ 光谱, 将 2 个吸收的峰值比与实测结果比较, 估计最优温度 T^* , 然后依据当前最优温度 T^* , 比较模拟光谱与实测光谱的峰值, 按比例更新体积分数值为 X^* , 使模拟与实测峰值相等; 判断是否满足收敛条件, 收敛则退出迭代循环, 不收敛则将体积分数值预估值更新为 X^* , 重复上述变量轮换迭代过程。

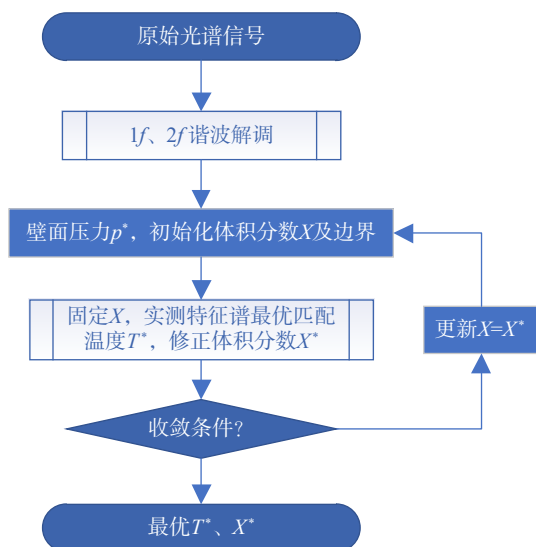


图 4 变量轮换法温度、体积分反演流程

Fig. 4 Process of iterative inversion method of variables for temperature and volume fraction

1.2.3 分布式测量

燃烧流场非均匀时, 对每一个测量波长, 沿测量光路 n 的积分吸光度可以写成沿路径的积分形式。在实际测量中, 如将整个测量区域进行离散化网格处理(如图 5 所示), 网格总数为 J , 假设每个网格内温度、组分体积分数和压力状态均匀, 则任意光路的测量结果可以理解为光路所经过各

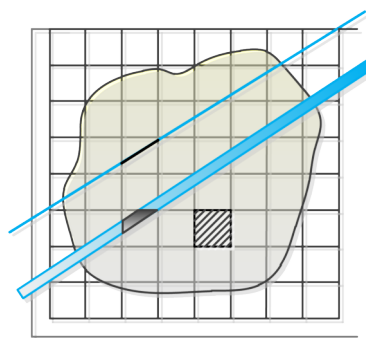


图 5 场分布重建离散网格划分与光路示意图

Fig. 5 Discrete grid and light path diagram of field distribution reconstruction

网格段处被分子吸收后的累加, 各段贡献的权重为测量光路与网格相交的光程长度, 不经过的网格对吸收贡献为 0 cm。

2 试验件与测量装置

为实现燃烧室出口温度分布测量, 以某双级旋流多点喷射单管燃烧室(图 6)为对象开展测试研究, 其出口通道截面直径 $\varphi=120$ mm。为便于实施, 设计方形出口测量段用于安装 TDLAS 光纤准直/接收模块和探头, 并采用 4×4 的二维光束布局。各光路按 ch0~ch7 依次编号, 如图 7 所示, 激光准直头间距 32 mm, 边缘光束与圆形出口相交的光程长度是 52.3 mm。为便于试验过程中对燃烧室状态进行调节, 以及与 TDLAS 测量结果进行对比, 在其测量截面下游约 50 mm 处布置有 2 支 5 点 B 型温度耙测量燃气总温。

试验中, 采用带 N_2 吹扫的探头, 并持续通入 N_2 以吹除光纤准直/接收模块与壁面过渡件之间的空气段, 以消除由于其受热和未知水汽对测量

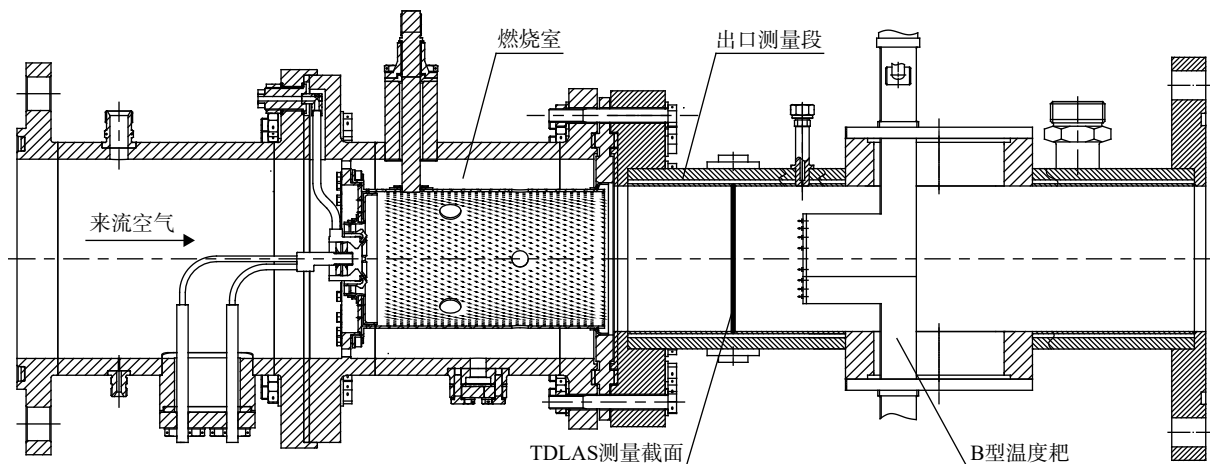


图 6 燃烧室试验件及测量位置示意图

Fig. 6 Diagram of combustor test piece and measurement position

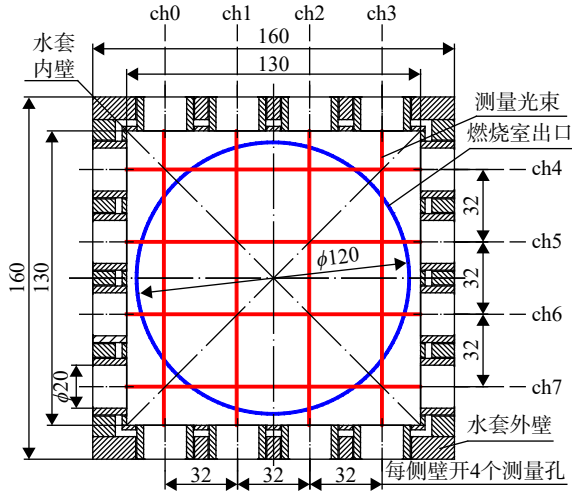


图 7 场分布测量光路布局示意图(单位: mm)

Fig. 7 Light path arrangement diagram of field distribution measurement (unit: mm)

产生的影响。同时接收端采用 600 μm 直径大纤芯光纤, 以增强对流场湍流效应致使光束偏转效应的容忍。现场光纤探头安装和过渡件结构如图 8 所示。

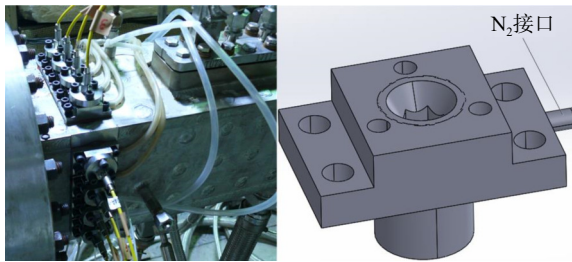


图 8 光纤探头和过渡件

Fig. 8 Fiber-optic probe and transition piece

3 试验结果与分析

3.1 试验状态和流程

根据试验件性能, 选取不同的试验状态, 即构造不同温度和压力环境下的燃烧流场环境, 探索 TDLAS 测试方法的适用性, 具体状态如表 1 所示。表中 T_3 为燃烧室进口空气平均总温, p_3 为进口空气平均总压, $q_{m,3}$ 为进气流量, α 为燃烧室总余气系数。

TDLAS 系统主要由光源主机和信号处理两部分组成, 主机部分包含 3 只不同波长的近红外半导体激光器(DFB 蝶形封装, 由扫描信号和调制信号相叠加产生中心波长分别为 1392、1469 nm 和 1343 nm 的激光), 3 只激光器采用分时复用方式出光, 经偏振光合束器(polarization beam combiner, PBC)合束再分束的激光经探头发射和

表 1 试验状态参数

Table 1 Test state parameters

工况编号	T_3/K	p_3/kPa	$q_{m,3}/(\text{kg/s})$	α
1	547.5	499.0	0.550	3.44
2	560.8	498.0	0.578	5.06
3	574.2	650.0	0.704	4.41
4	578.0	664.0	0.705	3.95
5	593.7	797.6	0.855	5.32
6	597.8	809.0	0.878	6.42

接收, 信号由光纤传输到耦合探测器, 光信号转换为电信号后经放大增益电路接入采集卡, 系统原理如图 9 所示。每只激光器的扫描频率为 3.3 kHz, 均采用正弦调制方式, 调制频率均为 322 kHz, 系统的时间分辨为 0.9 ms。

试验前, 首先在实验室内对相位、激光频率、激光光强、调制深度等光谱参数进行标定, 在高温炉上设置不同的温度段, 建立固定压强下 $2f/1f$ 信号峰值之比与温度、 H_2O 体积分数的对应关系, 如图 10 所示。然后在试验现场调节各路激光发

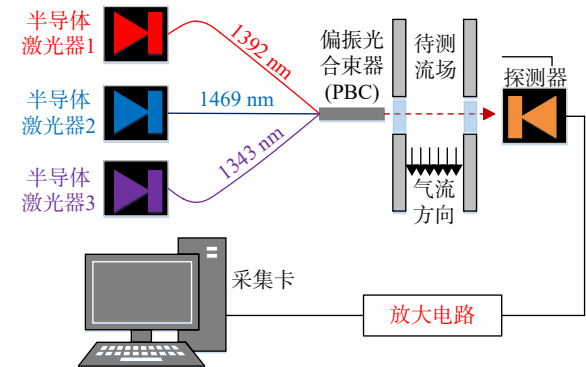
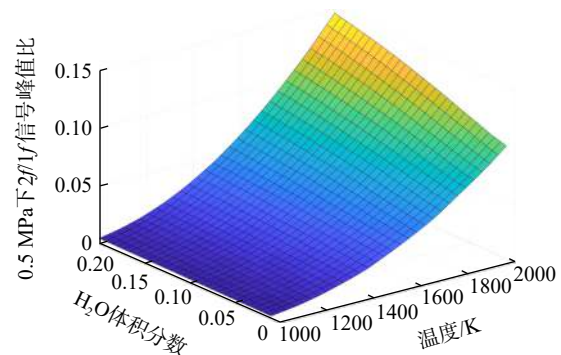


图 9 TDLAS 主机系统原理图

Fig. 9 Schematic diagram of TDLAS system

图 10 固定压强下 $2f/1f$ 信号的峰值比与温度、 H_2O 体积分数的关系Fig. 10 Peak ratio of $2f/1f$ signals under certain pressure condition varies with temperature and H_2O volume fraction

射、接收至最优后,向燃烧室出口喷入氮气进行背景吸收谱采集,用于扣除背景空气吸收。调节燃烧室出口流场至预定状态后进行吸收光谱信号采集,同时段记录压力传感器和热电偶测得的气流压力和温度。最后,通过将测量和模拟的吸收线对的谐波信号进行直接比较和轮换迭代来获得水气体积分数和燃气温度。

3.2 试验结果

按照表1,调节燃烧室的工作状态,待工况稳定后进行数据采集。采集过程中壁面过渡件内探头与窗片之间保持氮气吹扫,每个工况下采集约100组数据点。

初始采集时, ch0、ch3 通道发生了光路对准失准的问题。例如图11所示绘制的原始光强和解调 $S_{2f/1f-0}$ 信号, 可以看到 ch0、ch3 通道测得的光强远低于 0.1 V, 其光谱严重畸变。对第一个激光器原始光强放大, 发现光谱上均叠加有显著毛刺噪声, $S_{2f/1f-0}$ 信号已经完全淹没了吸收峰。据此数据, ch0、ch3 通道无法进一步反演出流场温度

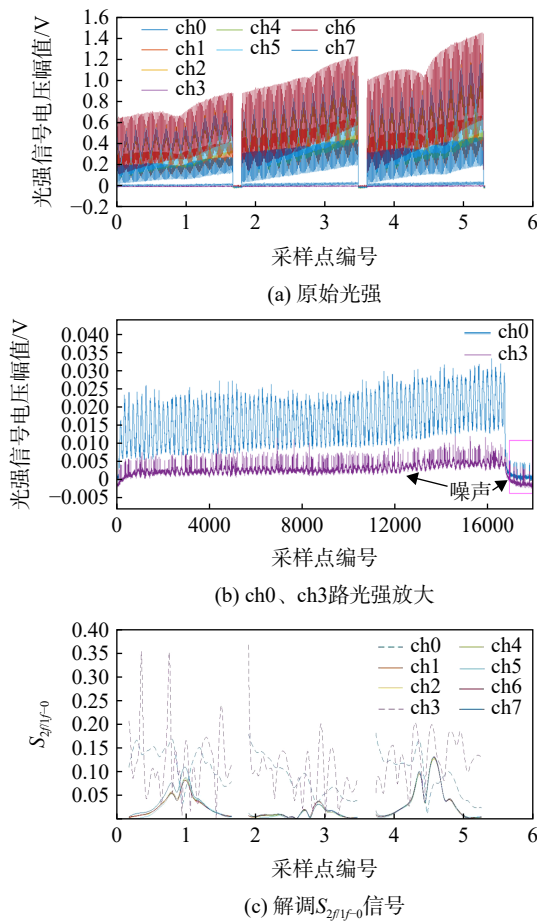


图11 各通道初始光强信号与解调 $S_{2f/1f-0}$ 信号

Fig. 11 Initial light intensity and demodulation $S_{2f/1f-0}$ signals of each light path

和 H_2O 气体积分分数信息。分析原因可能是探头窗片被污染, 靠近壁面的气流速度梯度较大、气流密度不均, 或者用于安装激光探头的安装座和过渡件在高温气流环境下热变形、抖动等原因导致光线偏折引起。

随后, 对强度较低通道的发射、接收探头进行了微调, ch0 路光强恢复至较高值, 但 ch3、ch7 通道幅值整体仍较低, 受试验现场高温高压环境的影响无法对其进行更有效地改善, 但信号强度已达 0.1 V 以上, 满足测试的基本要求。

图12~图14为表1中3个不同压力状态下测得的光路部分数据段的光强和对应处理的温度、 H_2O 体积分数结果。从图上可看到, ch3、ch7 通道的数据较其他通道波动大, 但随着燃烧室工作压力的升高, 两个通道的数据波动幅度逐渐放缓。这可能是因为环境压力升高后, 燃烧流场的对流、换热和组分分布更趋于均匀, 近壁面的流场对光谱的影响减弱了。

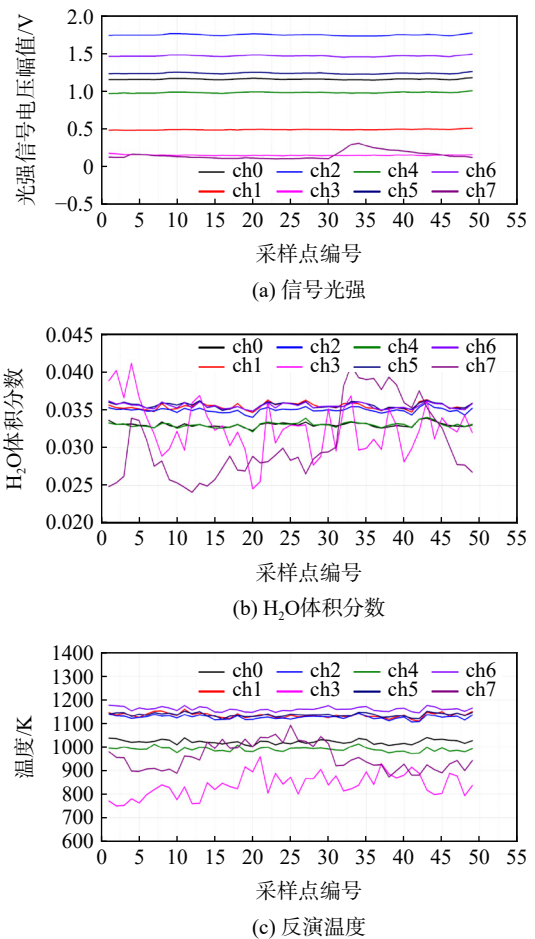
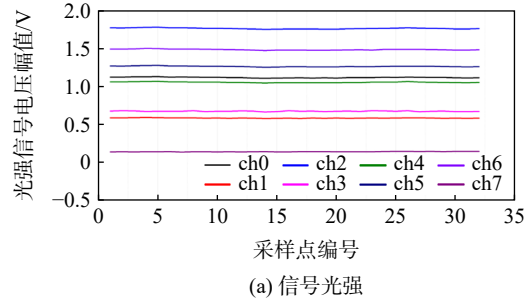
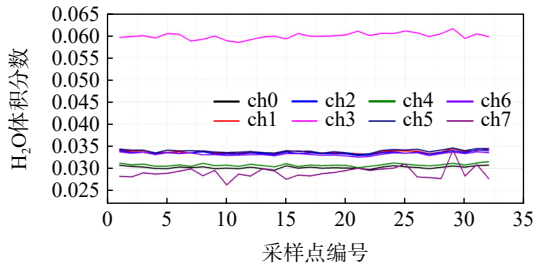
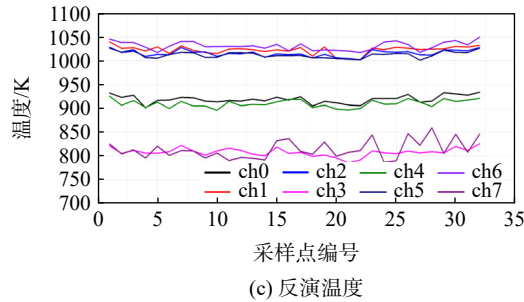


图12 各通道信号光强及反演结果(工况1)

Fig. 12 Laser signal intensity and iterative inversion results of each light path (case 1)



(a) 信号光强

(b) H₂O 体积分数

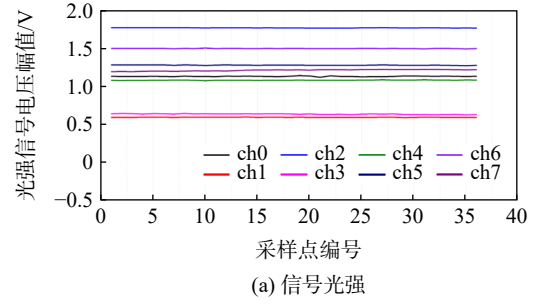
(c) 反演温度

图 13 各通道信号光强及反演结果(工况 3)

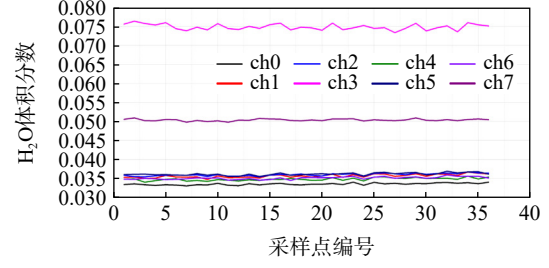
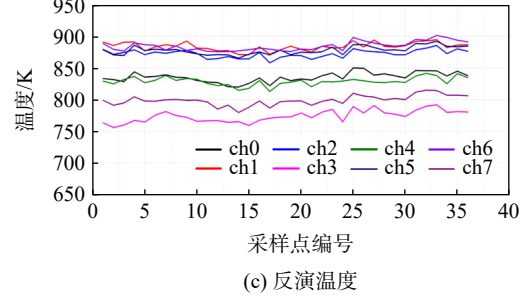
Fig. 13 Laser signal intensity and iterative inversion results of each light path (case 3)

根据试验中采集的多路光束下的波长调制吸收光谱信号,利用“变量轮换迭代法”实现温度和水 H₂O 体积分数的反演(压强利用壁面静压测量结果获取),再结合层析算法,对每个吸收波长重建出 $S_{2/\lambda-0}$ 分布,然后逐网格利用变量轮换温度、体积分数反演方法计算,获取流场温度、H₂O 体积分数分布。部分状态结果如图 15 所示。从图上可看到,不同状态下,燃烧室出口的温度和 H₂O 气体体积分数分布趋势大体一致,均呈现中心温度和 H₂O 气浓度分布高,四周低的不均匀分布状态,尤其是靠近边壁附近的梯度较大。区别仅在于数值和范围,随着余气系数的增大,燃烧室出口的温升降低,这与理论分析和数值计算的分布趋势也基本一致。

表 2 为各光路反演的燃气温度平均值与两支温度靶测量的均值(静温)的对比。其中 T_{tdlas} 为 TDLAS 测量值, T_{probe} 表示温度靶测量值, $\Delta = T_{\text{tdlas}} - T_{\text{probe}}$ 为两者的绝对误差, $\sigma = |\Delta|/T_{\text{probe}} \times 100\%$ 表示



(a) 信号光强

(b) H₂O 体积分数

(c) 反演温度

图 14 各通道信号光强及反演结果(工况 6)

Fig. 14 Laser signal intensity and iterative inversion results of each light path (case 6)

T_{tdlas} 相对于 T_{probe} 的相对误差。从数值上总体来看, TDLAS 与温度靶测量结果均反映出了燃烧室出口平均温度随进口温度和总余气系数变化的一致趋势。但数值上 TDLAS 测量结果较电偶温度偏低,最大偏差为 23%,大部分误差在 20% 以内。目前该误差水平距工程应用要求还有一定的差距。

3.3 误差分析

从本文所采用的测试方法和研究过程来看,影响 TDLAS 测量误差的因素较多,且机理复杂难以量化评定,主要有以下几个方面:

1) 模型中光谱参数带来的误差。目前仅在实验室内对线强进行了标定,对于强吸收线采用实验室标定光谱参数来替代 HITEMP(high-temperature molecular spectroscopic database)中的数据以减小误差,其他较弱谱线的参数仍采用 HITEMP 中的数据进行模拟光谱计算。其中线强和压力展宽是在实验室低压下标定获得的,未在高压下检验。由于高压下非洛伦兹效应可能致

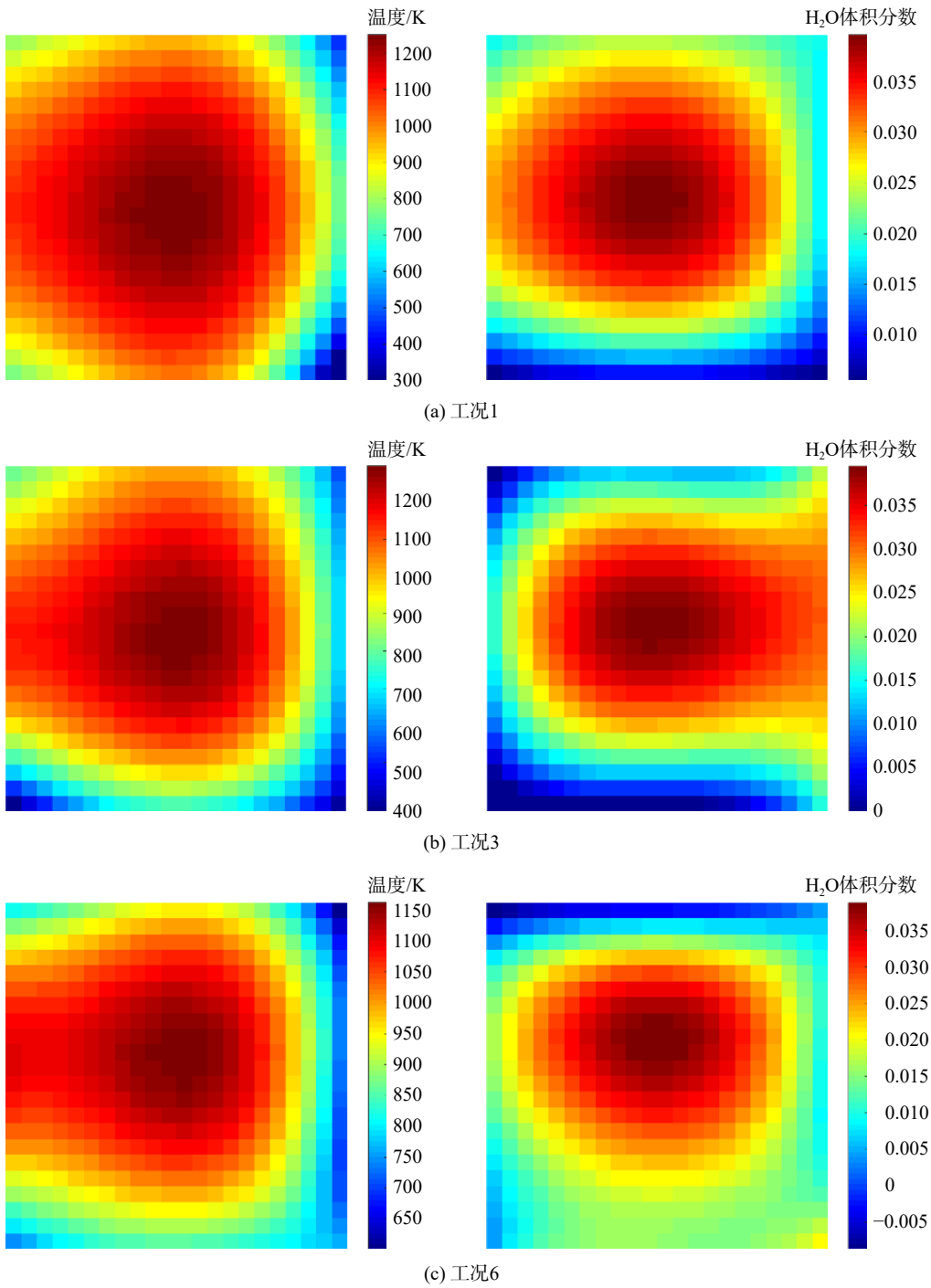


图 15 燃烧室出截面温度与 H₂O 体积分数分布重建结果

Fig. 15 Reconstruction results of temperature and H₂O volume fraction distribution of combustor outlet

表 2 试验结果对比

Table 2 Comparison of test results

工况编号	$T_{\text{tdlas}}/\text{K}$	$T_{\text{probe}}/\text{K}$	Δ/K	$\sigma/\%$
1	1 130.0	1 415.4	-285.4	20.2
2	991.3	1 177.1	-185.8	15.8
3	1 019.2	1 270.0	-250.7	19.7
4	1 057.2	1 359.1	-301.9	22.2
5	929.7	1 153.1	-223.4	19.4
6	878.0	1 047.4	-169.3	16.2

使光谱模型存在预测误差,从而使温度测量结果产生固有方向偏移,本文试验测量的温度表现整体偏低。

2) 燃烧室出口流场的不均匀性会带来随机误差,导致反演结果偏高或偏低。有研究表明:吸收光谱温度测量结果在吸收较弱(H₂O 气体体积分数偏低)的区域重建误差被放大,影响最终温度的重建结果^[19]。但是目前非均匀流场的判定标

准尚不统一, 针对非均匀流场作用下的光谱线型分析研究较少, 需要建立有效的模型和计算方法^[20]。

3) 光程中非燃烧流场内的水汽吸收带来的误差。试验前虽采用高纯氮气吹扫了测量截面通道, 并进行了背景吸收谱的采集, 以及采集时对壁面过渡件内探头与窗片之间也进行了氮气吹扫, 但是仍无法保证通道内完全充满氮气。尤其对于吸收中心为 $7\,185\text{ cm}^{-1}$ (波长为 $1\,392\text{ nm}$) 的吸收线, 其低态能级约为 $1\,045\text{ cm}^{-1}$, 在常温时吸收较强。当常温空气中的吸收信息被带入到吸收信号中, 导致边缘吸收信号有所增加, 从而使得边缘温度值偏差较大。

4) H_2O 气体积分数和温度反演以及场分布重建计算方法带来的误差。目前基于 TDLAS 的二维重建算法主要有代数迭代重建算法 (algebraic reconstruction technique, ART) 和 模拟退火 (simulated annealing, SA) 算法两类。对给定双峰温度场的重建仿真研究结果表明: 代数迭代重建算法重建结果的最大偏差高达 22%, 模拟退火算法的最大偏差为 5.5%^[21]。

5) 环境对信噪比的影响间接带来的误差。由于燃烧室出口处炭黑、窗片污染、机械抖动、探头安装座热变形导致光束偏折等非吸收损耗使信号降低, 致使解调得到的用于反演温度的谐波信号信噪比不高, 增加反演结果误差。此外试验过程中由于高压展宽使吸收谱线更“平坦”, 进一步降低了谐波信号信噪比。

4 结 论

本文以某航空发动机单管燃烧室为研究对象, 采用 TDLAT 技术, 初步探索了燃烧室出口温度二维分布的测量方法, 并验证了该方法的原理可行性和工程适用性, 获得以下结论:

1) 综合利用多光路正交布局、扣除背景的 $1/f$ 归一化波长调制光谱模型 $S_{2f/1f-0}$ 、变量轮换迭代反演温度和 H_2O 气体积分数及 CT 重建算法等技术, 在最高试验压力 0.8 MPa 下, 能够实现燃烧室出口温度分布式测量, 该套测试方法是合理可行的。

2) 测量结果能够较正确地反映出燃烧室出口平均温度随进口参数变化的趋势与分布特征, 较传统接触式测量具有较强的时空分辨性。但是在提高测量数据的准确度方面距工程应用需求还有一定的差距。

3) 高温高压条件下燃烧室出口温度分布的准确反演和重建与燃烧流场的不均匀性、光谱模型建立与光谱参数标定的不准确、反演与重建算法的不完善等都有一定的关系。

本文仅是对基于波长调制技术的 TDLAT 测试方法工程适用性的初步探索, 后续需要对更高压强、更高温度下的流场测试进行验证。同时在提高测试数据的准确度或减小测量误差等方面, 如工程环境下的谱线标定和光谱数据库的建立、补充和完善, 以及在增大空间分辨率的光路布局设计等方面, 再进行针对性的应用研究。

参考文献:

- [1] 彭云晖, 林宇震, 刘高恩. 三旋流器燃烧室出口温度分布的初步试验研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(4): 554-558.
PENG Yunhui, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. A preliminary experimental study of pattern factor for a triple swirler combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(4): 554-558. (in Chinese)
- [2] 吴超, 徐让书, 蒲宁, 等. 某型航空发动机燃烧室出口温度场数值模拟[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2009, 26(2): 1-4.
WU Chao, XU Rangshu, PU Ning, et al. Numerical simulation of an Aero-engine combustor exit temperature field[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2009, 26(2): 1-4. (in Chinese)
- [3] 韩冰, 王明瑞, 李亚娟, 等. 燃气分析法在高温升全环燃烧室出口温度场试验中的应用[J]. 航空发动机, 2017, 43(5): 79-84.
HAN Bing, WANG Mingrui, LI Yajuan, et al. Application of gas analysis method on high temperature rise full annular combustor outlet temperature field test[J]. Aeroengine, 2017, 43(5): 79-84. (in Chinese)
- [4] 王明瑞, 王振华, 韩冰, 等. 航空发动机主燃烧室高温测试技术[J]. 航空发动机, 2016, 42(5): 87-93.
WANG Mingrui, WANG Zhenhua, HAN Bing, et al. High temperature measurement technology for main combustion chamber of aeroengine[J]. Aeroengine, 2016, 42(5): 87-93. (in Chinese)
- [5] 赵俭, 杨永军, 秦存民, 等. 瞬态超高温气流温度测量技术初探[J]. 计量技术, 2008, 28(增刊1): 26-35.
ZHAO Jian, YANG Yongjun, QIN Cunmin, et al. Tentative study on transient superhigh gas temperature measurement technology [J]. Metrology and Measurement Technology, 2008, 28(Suppl.1): 26-35. (in Chinese)
- [6] 赵俭. 高温气流温度测量与校准技术[J]. 计量技术, 2018, 38(6): 42-47.
ZHAO Jian. High gas temperature and calibration technology [J]. Metrology and Measurement Technology, 2018, 38(6): 42-47. (in Chinese)
- [7] 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): 61-76.
KAN Ruifeng, XIA Huihui, XU Zhenyu, et al. Research and progress of flow field diagnosis based on laser absorption spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 61-76. (in Chinese)
- [8] 祝仰坤. 波长调制吸收光谱的关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
ZHU Yangkun. Research on key technology of wavelength modu-

- lation spectroscopy[D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [9] 戴斌, 阮俊, 许振宇, 等. 基于TDLAS技术的燃烧室出口温度场测量[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2015, 28(4): 49-56.
DAI Bin, RUAN Jun, XU Zhenyu, et al. Measurement of combustor exit temperature field based on tunable diode laser absorption spectroscopy technology[J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2015, 28(4): 49-56. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] RIEKER G B, JEFFRIES J B, HANSON R K, et al. Diode laser-based detection of combustor instabilities with application to a scramjet engine[R]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(1): 831-838.
- [12] 张步强. 高温高压流场温度激光光谱测量方法研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2019.
ZHANG Buqiang. Research on the method of measuring the temperature of high temperature and high pressure flow field by laser spectroscopy[D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [13] EMMERMAN P J, GOULARD R, SANTORO R J, et al. Multi-angular absorption diagnostics of a turbulent argon-methane jet[J]. *Journal of Energy*, 1980, 4(2): 70-77.
- [14] 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 Yanji, SONG Junling, RAO Wei, 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. (in Chinese)
- [15] 黄安, 许振宇, 夏晖晖, 等. 波长调制吸收光谱技术的燃气轮机燃烧室温度组分二维分布测量方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(4): 1144-1150.
HUANG An, XU Zhenyu, XIA Huihui, et al. Measurement method of two-dimensional distribution of temperature and components in gas turbine combustor based on wavelength modulated absorption spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(4): 1144-1150. (in Chinese)
- [16] RIEKER G B, JEFFRIES J B, HANSON R K. Calibration-free wavelength modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(29): 5546-5560.
- [17] 屈东胜, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于波长调制光谱技术的气体温度和组分浓度场二维重建测量方法研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 275-284.
QU Dongsheng, HONG Yanji, WANG Guangyu, et al. Two dimensional reconstruction measurement method of gas temperature and component concentration fields based on wavelength modulation spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 275-284. (in Chinese)
- [18] 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): 196-206.
WANG Xingping, PENG Dong, LI Jiasheng, et al. Two dimensional reconstruction of combustion flow field using wavelength-modulation absorption spectra[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 196-206. (in Chinese)
- [19] GUHA A, SCHOEG I M. Tomographic imaging of flames: assessment of reconstruction error based on simulated results[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(2): 350-390.
- [20] 洪延姬, 宋俊玲, 王广宇, 等. 激光吸收光谱测量非均匀燃烧流场研究进展[J]. *航空学报*, 2015, 36(3): 724-736.
HONG Yanji, SONG Junling, WANG Guangyu, et al. Review on research of non-uniform combustion field measurement using laser absorption tomography technique[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(3): 724-736. (in Chinese)
- [21] 彭冬, 金熠, 翟超. 基于TDLAS的二维温度场重建算法[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1111002.1-1111002.9.
PENG Dong, JIN Yi, ZHAI Chao. Reconstruction algorithms for 2D temperature field based on TDLAS[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2016, 43(11): 1111002.1-1111002.9. (in Chinese)

(编辑: 王碧珺)