利用TDLAS技术开展碳氢燃料高速燃气参数测量*

杨 斌^{1,2,3},潘科玮^{3,4},黄 斌³,刘佩进³,何国强³

(1. 上海理工大学 颗粒与两相流测量研究所,上海 200093;
2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室(上海理工大学),上海 200093;
3. 西北工业大学 燃烧、热结构与内流场国家级重点实验室,陕西西安 710072;
4. 上海航天动力技术研究所,上海 201109)

摘 要:可调谐二极管激光器吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TD-LAS)广泛应用于碳氢燃料燃气参数(温度、组分浓度和气流速度)实时在线和非接触测量。针对碳氢 燃料火箭基组合循环(Rocket Based Combined Cycle, RBCC)发动机的高速燃气参数测量,设计了双交 叉光束(7444.352+7444.371)/7185.597cm⁻¹谱线对扫描波长-时分复用双线直接吸收光谱技术(Direct Absorption Spectroscopy, DAS)系统,将其应用于RBCC地面实验高速燃气参数在线测量,同时获得了 燃气温度、H₂O组分浓度和速度等多参数,并将测量结果与数值模拟计算结果对比,相对偏差不超过 12%,这为RBCC发动机燃烧组织优化和结构优化提供重要依据。

关键词:测量技术;激光光谱技术;燃烧诊断;火箭基组合循环发动机
中图分类号: V438 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2015) 08-1236-06
DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2015. 08. 017

Measurements of High-Speed Hydrocarbon Fuel Combustion Gas Using TDLAS

YANG Bin^{1,2,3}, PAN Ke-wei^{3,4}, HUANG Bin³, LIU Pei-jin³, HE Guo-qiang³

Institute of Particle and Two-phase Flow Measurement, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
 Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering (University of Shanghai for Science and Technology), Shanghai 200093, China;
 Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermal-Structure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

4. Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) is widely used for online and non-intrusive measurements of multiple parameters (temperature, species concentration and velocity) of hydrocarbon fuel combustion gas. Two crossed-beam scanned-wavelength Direct Absorption Spectroscopy (DAS) system with (7444.352+7444.371) /7185.597 cm⁻¹ line-pair was developed for high-speed hydrocarbon fuel combustion gas measurement in Rocket Based Combined Cycle (RBCC). And it was applied to the online measurements in ground-test of RBCC. Temperature, H₂O concentration and velocity were obtained, and the relative deviation compared with CFD results was less than 12%. This work can provide important reference data for the combustion organization and structure optimization of RBCC.

Key words: Measurement technique; Laser Spectroscopy; Combustion diagnostics; Rocket based combined cycle engine

^{*} 收稿日期: 2014-07-11; 修订日期: 2014-07-28。 作者简介:杨 斌(1985-)男,博士,讲师,研究领域为燃烧与多相流在线测量技术。E-mail: yangbin@usst.edu.cn

1 引 言

碳氢燃料燃烧是内燃机、航空发动机、火箭发动 机等众多动力装置的主要动力来源。碳氢燃料燃气 参数是表征燃烧情况与发动机性能的重要参数之 一,对于燃烧组织和发动机性能优化都具有重要参 考价值。长期以来,表面接触式测量手段是最为直 接和普遍的手段,然而对于高速燃气来说,传统接触 式测量手段存在容易干扰流场、需要附加保护结构 从而降低测量时间和空间分辨力、需要对测量结果 进行修正等问题^[1]。近些年随着激光器技术和光谱 学的发展,激光光谱测量技术为燃烧诊断注入新的 活力^[2],其中,可调谐二极管激光器吸收光谱技术 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TD-LAS)是实现碳氢燃料燃气参数在线测量最为有力的 技术之一[3~5],具有实时在线、非接触、高灵敏度、快 时间响应等优点,并且还可实现温度、组分浓度、速 度和流量等多参数的同时测量,因而迅速成为燃烧 诊断技术研究的热点之一。

本文正是基于这一背景,针对碳氢燃料火箭基 组合循环(Rocket Based Combined Cycle,RBCC)发动 机的高速燃气参数测量,设计了可实现温度、H₂O组 分浓度和速度参数测量的双交叉光束TDLAS系统, 并将其应用于组合发动机地面试验系统,获得碳氢 燃料高速燃气多参数变化情况,并对测量结果进行 分析,为发动机性能评估提供依据。

2 测量原理

TDLAS技术将入射激光的波长调制到特定组分的吸收光谱频域,通过测量入射激光束光强经待测 区域后的衰减量,来实现气体参数的测量。

2.1 Beer-Lambert 定律

如图1所示,TDLAS技术的基本原理是Beer-Lambert定律。调制激光的频率为v[cm⁻¹],使其与气体吸收组分跃迁频率相同,入射激光光强为 I_0 ,通过待测区域后,激光能量被吸收,透射光强为 I_i 。定义传播分数 T_v ,入射光强与透射光强满足Beer-Lambert定律

$$T_{v} = \left(\frac{I_{i}}{I_{0}}\right)_{v} = \exp(-k_{v} \cdot L) = \exp\left(-p \cdot X_{abs} \cdot S_{i}(T) \cdot \phi \cdot L\right) \quad (1)$$

 k_v 为光谱吸收系数,L为光程,定义光谱吸收率 $\alpha_v = k_v L$,p为压强, X_{abs} 为吸收组分浓度, ϕ 为线型函数,S(T)为谱线强度^[6],S(T)与温度T存在如下函数 关系

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T}\right) \exp\left[-\frac{hcE'}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-hcv_0}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(\frac{-hcv_0}{kT_0}\right)\right]^{-1}$$
(2)

式中h为Planck常数,c为真空中光速,k为 Boltzmann常数,E'为低能级能量, T_0 为296K, v_0 为 吸收光谱的谱线中心频率,Q(T)为吸收组分的配分 函数^[7]。为便于后文叙述,定义积分吸收率A为

$$A = \int \alpha_{v} dv = p \cdot X_{abs} \cdot S(T) \cdot L$$
(3)



2.2 参数测量原理

TDLAS技术利用双线技术开展双吸收谱线吸收 光谱测量,通过双线积分吸收率比值得到温度,从而 计算出组分浓度,根据多普勒效应,通过测量双交叉 光束谱线漂移量计算速度。

TDLAS 双线测温法原理如图 2 所示,通过实验获得双谱线中心吸收光谱,求得双线积分吸收率(即图中吸收光谱面积)。



Fig. 2 Schematic of two-line thermometry using TDLAS

由于双线经过同一光程,在相同压强和组分浓度下,双线积分吸收率比值可化简为谱线强度比值 *R*,*R*为温度的单值函数。

$$R = \frac{A_1}{A_2} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = f(T)$$
(4)

因此,气体温度由测量的双线积分吸收率比值 推断得到

$$T = \frac{\frac{hc}{k} \left(E_{2}^{'} - E_{1}^{'} \right)}{\ln \frac{A_{1}}{A_{2}} + \ln \frac{S_{2}(T_{0})}{S_{1}(T_{0})} + \frac{hc}{k} \frac{E_{2}^{'} - E_{1}^{'}}{T_{0}}}$$
(5)

由此,便可根据积分吸收率定义式(3)计算吸收 组分摩尔浓度

$$X_{\rm abs} = \frac{A}{p \cdot S(T) \cdot L} \tag{6}$$



(b) Typical experiment data

Fig. 3 Schematic of velocity measurement using TDLAS

TDLAS技术速度测量是基于多普勒效应,如图 3 所示,两束激光交叉通过流场,由于气流的作用,吸收光谱的谱线中心将发生频移,该频移量 Δv 与 气流速度 u 的关系如下式

$$\Delta v = v_0 (2\sin\theta) \frac{u}{a} \tag{7}$$

式中 v_0 为吸收谱线中心, θ 为两激光束夹角的

一半。因此,通过实验测得的多普勒频移量 Δv 便可获得流场气流速度。

3 实验系统

碳氢燃料燃烧中,H₂O 是主要的生成物之一, H₂O 可以很好表征发动机中燃烧发生的位置、时间 和程度,并且 H₂O 在通信用二极管激光器工作波段 具有较强吸收,因此,H₂O 常作为 TDLAS 技术目标组 分^[8~14]。通过对大量光谱数据进行优选,确定 (7444.352+7444.371)-7185.597cm⁻¹作为碳氢燃料燃 气参数测量 TDLAS 系统双线谱线对。

根据TDLAS参数测量原理,本文采用扫描波长-时分复用策略设计了双交叉双线TDLAS系统如图 4 所示。利用双通道信号发生器(Tektonix AFG3022B) 产生交错锯齿波(CH1: 0~1.5V; CH2: 0~2.0V; *f*= 1kHz)控制激光控制器(ILXLightwave Inc LDC-3900; CH1: 30.2℃,0mA; CH2: 26.1℃,0mA)输出电流,从而 调制二极管激光器(NTT Electronics Corporation; CH1: 1343nm; CH2:1392nm)。激光器输出激光经2× 1耦合器耦合后,通过光纤传输至实验现场后,再由 1×2分路器形成两束激光,经准直器准直后交叉通过 待测流场,再经凸透镜后由探测器接收,其中光束1 垂直于流场方向,光束2与光束1成30°夹角。探测 器电压信号由数据采集系统(NI PXI- 1042, 1000kHz)记录。

将该TDLAS系统应用于模拟 Ma=6.0 飞行状态 的直连式组合发动机地面试验系统^[15],开展高速燃 气参数测量,设计实验测量段安装于发动机喷管出 口处,发动机喷管出口尺寸139×150mm,激光光程距 离底面63mm,实验系统实物照片如图5所示。

发动机实验控制时序如图6所示。以空气阀打 开时刻为时间零点,5.0s时刻加热火箭点火工作,二 次燃料6.5s时刻喷入,7.0s时刻一次火箭点火工作, 实验发动机稳定工作3.0s后,于10.0s时刻关机, 12.0s时刻关闭空气阀,完成实验。



Fig. 4 Experiment system of measurement for high-speed combustion gas



Fig. 5 Photo of system installation



Fig. 6 Sequence diagram of experiment

4 实验结果及其分析

4.1 发动机启动前后探测器信号

由于高速燃气极其复杂,对信号进行时均处理 后进行分析更具代表性,如图7所示,为发动机启动 前后探测器信号。由此可知,发动机启动后,碳氢 燃料燃烧生成H₂O,探测器信号出现吸收,并且可 以看出由多普勒效应产生的交叉光束吸收峰值出现 频移。



(b) RBCC engine working

Fig. 7 Detector signal of typical time

4.2 高速燃气参数测量

根据 Beer-Lambert 定律,将探测器信号利用零吸 收翼拟合的方法^[16]进行处理,获得双谱线附近吸收 光谱,由此计算出燃气温度变化情况,如图 8 所示。 可知,发动机加热阶段在 6.0s 左右开始,持续 2.0s 左 右结束,8.0s 左右时刻发动机启动,12.0s 左右时刻熄 火。0~6.0s 与 12.0~14.0s 时间段由于探测器未出现 吸收信号无实际意义,因此,H₂O 组分浓度和速度计 算采用 6.0~12.0s 时间段数据,计算结果分别如图 9, 10 所示。



Fig. 8 Measurement curve of temperature in engine working stage



Fig. 9 Measurement curve of H₂O concentration



4.3 测量结果与数值模拟结果对比

对实验工况下发动机内流场进行数值模拟[17.18],

T/K700 1000 1300 1600 1900 2200 (a) Temperature X_{H-0} 0.06 0.08 0.10 0.12 0.14 0.16 (b) H₂O concentration V/(m/s)100 300 500 700 900 1100 1300

(c) Velocity

Fig. 11 Numerical simulation results of internal flow field in experiment conditions

取距离底面 63mm 线上的参数分布情况进行分析,如图 12 所示,由于 TDLAS 技术测量结果为参数 在光程上的积分平均值,将分布曲线取平均后与发 动机稳定工作段测量平均值进行对比,可知,TDLAS 测量结果与数值模拟结果相对偏差不超过 12%。



Fig. 12 Comparison of measurement using TDLAS with CFD results

5 结 论

通过本文研究,得出如下结论:

(1)本文利用 TDLAS 技术,设计了双交叉光束 (7444.352+7444.371)/7185.597cm⁻¹谱线对扫描波长-时分复用双线 DAS 系统,实现了碳氢燃料高速燃气 温度、H₂O 组分浓度与气流速度的在线测量。

(2)通过对比实验工况下 RBCC 流场 CFD 计算结 果, TDLAS 参数测量结果与 CFD 计算结果相对偏差 不超过 12%, 验证了测量结果具有可信度。

(3)本文TDLAS测量结果虽为光程平均值,但据 此仍可以了解发动机内碳氢燃料燃烧情况,评估发 动机性能,并为发动机燃烧组织和结构的优化提供 重要参考。

参考文献:

- [1] Alan C. Eckbreth. Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species [M]. London: Taylor & Francis Books, Inc., 1996.
- McKenzie R L. Progress in Laser Spectroscopic Techniques for Aerodynamic Measurements: an Overview [J].
 AIAA Journal, 1993, 31(3): 465-477.
- [3] Allen M G. Diode Laser Absorption Sensors for Gas-Dynamic and Combustion Flows [J]. Measurement Science & Technology, 1998, 9(4): 545-562.
- [4] Hanson R K, Jeffries J B. Diode Laser Sensors for Ground Testing[R]. AIAA 2006-3441.
- [5] Ronald K Hanson. Applications of Quantitative Laser Sensors to Kinetics, Propulsion and Practical Energy Systems [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 1-40.
- [6] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HI-TRAN 2008 Molecular Spectroscopic Database [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2008, 2009(110): 533-572.
- Gamache R R, Kennedy S, Hawkins R, et al. Total Internal Partition Sums for Molecules in the Terrestrial Atmosphere [J]. Journal of Molecular Structure, 2000, 517-518: 407-425.
- Pilar Arroyo M, Timothy P Birbeck, Douglas S Baer, et al. Dual Diode-Laser Fiber-Optic Diagnostic for Water-Vapor Measurements [J]. Optics Letters, 1994, 14(19): 1091-1093.
- [9] Li H, Farooq A, Jeffeires J B, et al. Near-Infrared Diode Laser Absorption Sensor for Rapid Measurements of

Temperature and Water Vapor in a Shock Tube[J]. Applied Physics B-Lasers and Optics, 2007, 89: 407-416.

- [10] Liu J T C, Rieker G B, Jeffries J B, et al. Near-Infrared Diode Laser Absorption Diagnostic for Temperature and Water Vapor in a Scramjet Combustor[J]. Applied Optics, 2005, 44(31): 6701-6711.
- [11] Rieker G B, Hejie Li, Xiang Liu, et al. Rapid Measurements of Temperature and H₂O Concentration in IC Engines with a Spark Plug-Mounted Diode Laser Sensor
 [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31: 3041-3049.
- [12] 李 飞,余西龙,顾洪斌,等.超燃燃烧室气流参数
 诊断[J].力学学报,2011,43(06):1061-1067.
- [13] 陶 波, 胡志云, 王 晟, 等. TDLAS技术测量燃烧
 流场温度研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(02):
 401-404.
- [14] 许振宇,刘文清,刘建国,等.基于可调谐半导体激 光器吸收光谱的温度测量方法研究[J].物理学报, 2012,61(23):232-239.
- [15] 李宇飞. RBCC 引射/亚燃模态热力调节机理研究[D]. 西安:西北工业大学, 2007.
- [16] Xin Zhou. Diode Laser Absorption Sensors for Combustion Control[D]. California: Stanford University, 2005.
- [17] 潘科玮,何国强,刘佩进,等. RBCC 混合燃烧模态 一次火箭对燃烧稳定影响[J]. 推进技术,2010,31 (5):544-548. (PAN Ke-wei, HE Guo-qiang, LIU Pei-jin, et al. Influence of Combustion Stabilization by Primary Rocket under Commix- Combustion Mode in RBCC[J]. Journal of Propulsion Technology, 2010,31 (5):544-548.)
- [18] 潘科玮,何国强,刘佩进,等.RBCC发动机燃料喷注 位置变化对混合燃烧模式燃烧的影响[J].航空动力 学报,2011,26(8):1900-1906.

(编辑:史亚红)