

基于多角度投影激光吸收光谱技术的 两段式速度分布流场测试方法*

王传位 李宁[†] 黄孝龙 翁春生

(南京理工大学, 瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094)

(2019年8月12日收到; 2019年10月15日收到修改稿)

针对具有明显速度梯度的非均匀流场速度分布在线测试难题, 提出了基于多角度投影的激光吸收光谱多普勒速度分布测试方法, 利用多角度投影吸收光谱信息低频能量相对变化对两段式速度分布区间长度与对应速度值进行耦合求解. 建立不同投影角度下吸收光谱平均频偏值与不同速度区间频偏差值之间的函数关系, 提出了基于傅里叶变换的光谱信号低频能量变化分析方法, 解决了不同速度梯度条件下光谱信号微弱变化检测难题. 采用 7185.6 cm^{-1} 波段 H_2O 特征谱线结合三条投影光路实现了对于两段式速度分布模型的快速重建, 研究了投影角度以及不同幅值噪音对速度分布计算的影响. 分析表明该方法对于具有明显速度梯度的流场中高速区速度值重建结果最佳, 相对误差 0.9%, 同时测量噪音对高速区速度值重建结果影响最小. 投影角度增大有利于增强重建方程中不同速度区间光谱频偏差值对速度区间长度比值的灵敏度, 提高测量精度. 考虑到系统测量空间分辨率限制, 0° , 30° , 60° 是较为理想的光路分布角度. 研究结果对于推动激光吸收光谱技术在发动机诊断及气体动力学研究中的应用具有重要意义.

关键词: 激光吸收光谱, 多普勒效应, 傅里叶变换, 速度分布

PACS: 78.20.Ci, 52.70.Kz, 47.40.Rs

DOI: 10.7498/aps.68.20191223

1 引言

气流流速是空气动力学研究的基础参数之一. 实现流场速度的准确测量不但对于飞行器验证试验等具有重要意义, 同时高速燃气速度测试也是发动机研制和性能提升的关键. 作为一种灵敏度高、响应速度快、可靠性和环境适应性强的非接触式气体测试技术, 在过去的几十年间可调谐半导体激光吸收光谱 (TDLAS) 已经成功地应用于燃气温度、组分浓度、速度等参数同步在线测量, 并且通过与 CT 技术相结合可实现燃气多参数二维重建, 在爆轰发动机、冲压发动机等新一代超音速发动机研制

与关键参数测试中发挥重要作用^[1-8].

目前 TDLAS 技术应用时均假定流场速度分布均匀, 以近红外波段 H_2O 吸收谱线为监测对象, 在此基础上利用双光路投影设计与多普勒频偏计算方法可以得到实时流场速度值. 例如阚瑞峰等对激光吸收光谱多普勒测速技术进行了综述^[9], 并开展了针对高速风洞的流速测试研究^[10]. 利用 7242.37 cm^{-1} H_2O 特征吸收谱线针对直径 60 cm 实验风洞进行试验, 内部气流马赫数 6.5, 总温 1700 K, 总压 7.2 MPa, 实现了对 2050 m/s 流速的测量^[11]. 姚路等^[12]利用 7185.6 cm^{-1} H_2O 特征吸收谱对火箭撬固体推进剂装药燃烧羽流流速进行测量, 实现了对 1100 m/s 流速的测量.

对于具有明显速度梯度的流场研究对象, 这种

* 国家自然科学基金 (批准号: 11372141, 11472138)、中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: 30919011258) 和江苏省自然科学基金青年基金 (批准号: BK20190439) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: phoenixkyo@163.com

方法测量结果将存在较大的误差. 部分学者针对低速区对于高速区速度测量的影响进行了大量的研究, Li 等^[13,14]研究了超然冲压发动机高速流动环境下低速边界层对核心区速度测量的影响, 发现尽管边界层的存在将导致二次谐波 (2f) 波形发生扭曲, 但该方法有利于减少速度边界层对于核心区测量结果的影响. Chang 等^[15,16]分析了边界层对于二次谐波信号的影响并提出了针对 2f/1f 信号的修正方法, 实现了 1630 m/s 流场速度的在线测量.

本文研究不再将低速区作为测量的干扰因素, 而是通过光学系统与信号处理相结合同步求解高速区与低速区的速度值及长度. 同步获取非均匀流场速度分布信息具有较大难度, 目前仍缺乏理论指导, 主要难点在于: 1) 非均匀气体浓度或温度分布测量可根据吸收光谱信号在投影光路的叠加效应并结合 CT 重建算法加以求解, 但激光吸收光谱的多普勒频偏不存在这样的累积效应, 因此难以借鉴类似方法进行解决. 近期 Gamba^[17] 和 Qu 等^[18,19]提出了基于吸收光谱线型变化的分析方法, 针对多普勒频偏效应下的吸收线型信息进行计算进而得到流场速度分布, 这是另一条速度分布重建探索途径. 2) 对于气体速度测试而言其多普勒频移量为 10^{-2} — 10^{-3} cm^{-1} (低速情况下多普勒频移量仅为 10^{-4} cm^{-1} 量级), 因此要求测试系统具有较高的光谱分辨率. 3) 由于低速区与高速区的多普勒频偏量差值小, 因此如何从投影光路光谱信息分析出低速区与高速区的相关信息是一个难题.

本文提出了一种针对具有明显速度梯度的两段式速度分布测试新方法. 该方法采用多光路投影方式获取不同角度下的带有频偏信息的光谱数据, 利用频谱分析方法获取高速区与低速区之间的频偏差值, 建立不同投影角度下吸收光谱平均频偏值与不同速度区间频偏差值之间的函数关系, 通过耦合求解同步获取高速区和低速区的区间长度与对应的速度值. 该方法可为激光吸收光谱技术应用于两段式速度分布测试提供理论指导, 具有重要理论研究意义和工程应用前景.

2 基于 TDLAS 技术的速度测试原理

2.1 基于多普勒效应和 TDLAS 技术的速度测试原理

TDLAS 技术以分子吸收光谱理论为基础, 当

一束频率为 ν 、强度为 I_0 的激光穿过均匀流场时, 入射光强 I_0 与透射光强 I_t 满足 Beer-Lambert 定律:

$$I_t(\nu) = I_0(\nu) \exp(-PXS(T)\phi(\nu)L), \quad (1)$$

式中, P 为待测气体压强; X 为吸收气体的组分浓度; $S(T)$ 为气体特征谱线在温度为 T 时的吸收强度, 对于特定气体分子吸收谱线, 其谱线强度仅是温度的函数; L 为激光在待测气体介质中的光程; $\phi(\nu)$ 是归一化特征谱线线型函数, 表征光谱吸收率随波数 ν 的相对变化. 对于非均匀分布光路, 其光谱吸收率可以采用离散化方式表示为

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} -\ln\left(\frac{I_t(\nu)}{I_0(\nu)}\right) d\nu = \int_0^L P(l)X(l)S(T(l))dl. \quad (2)$$

根据激光多普勒效应, 当气流速度在激光传输方向上有速度分量时, 运动的气体分子接收到的光子表现频率与实际激光发射频率之间有一定偏移, 二者的频率差值即为多普勒频移^[20], 流速与多普勒频移满足如下关系式:

$$\Delta\nu = \frac{V_{\text{gas}} \cos \theta}{c} \nu_0, \quad (3)$$

式中, θ 是气体流动方向与激光传输方向的夹角, ν_0 是未经过待测气体吸收时的谱线中心频率. 对于均匀流动的气体速度测量, 可采用交叉双光路布置方式, 如图 1 所示. 源于同一激光器的两束激光分别以不同入射角通过气流, 利用二者之间的多普勒频移, 可由下式计算出气流速度:

$$V = \frac{c}{\nu_0(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)} \Delta\nu_{12}. \quad (4)$$

其中 $\Delta\nu_{12}$ 是两束激光穿过待测气流后的频率差值.

2.2 两段式速度分布流场计算方法

对于均匀流场速度分布的测试, 多普勒频移量正比于气体流速. 当流场速度分布不均匀时, 激光在低速区和高速区的频移量不同, 测量得到的吸收光谱信号实际是由不同频移量、不同吸收强度的吸收光谱信号的叠加而成, 叠加后的光谱宽度增加, 呈现非对称性, 采用单谱线拟合将导致较大误差, 因此无法采用 (4) 式直接计算非均匀流场速度分布.

当高速流场速度分布非均匀时, 则高速区与低速区所引起的频偏不同, 因此无法直接进行计算. 本文以两段式速度分布模型为例, 阐述非均匀流场速度计算方法. 两段式速度分布流场多光路投影测试系统示意图如图 2 所示. 流场两端为流场的低速

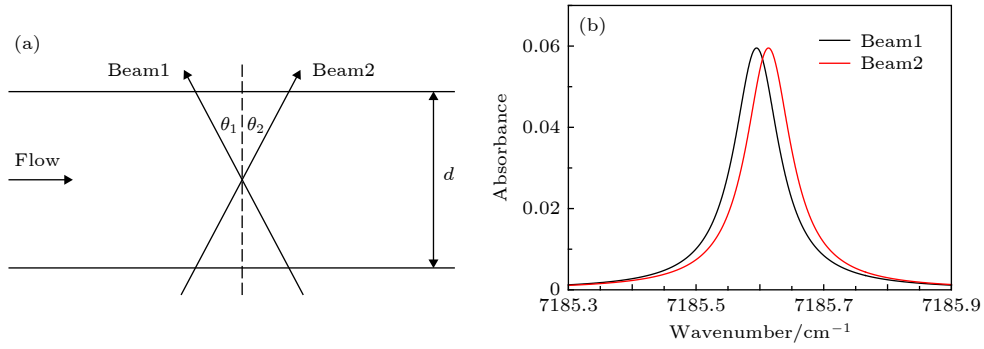


图 1 基于多普勒效应的激光吸收光谱测速原理 (a) 激光吸收光谱多普勒测速系统示意图; (b) 吸收光谱信号多普勒频偏示意图
Fig. 1. TDLAS-based Doppler velocimetry: (a) Diagram of velocity measurement system; (b) diagram of frequency shifts between absorption signals.

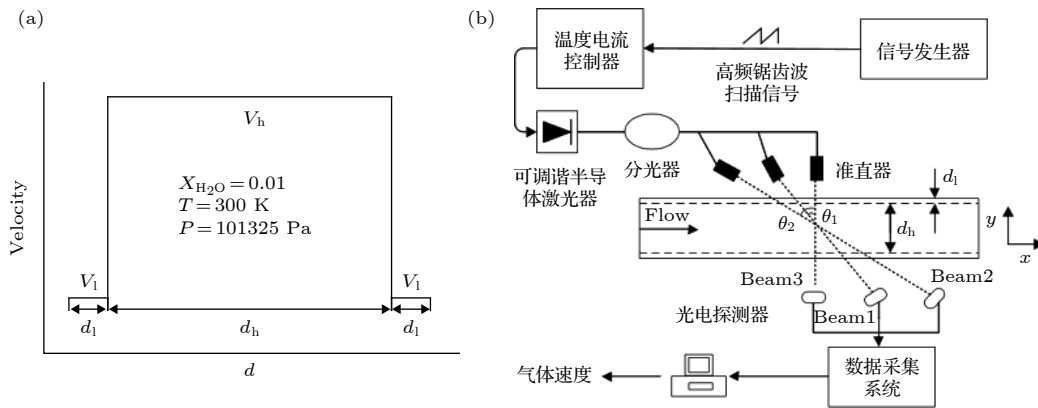


图 2 两段式速度分布模型与多光路测试系统示意图 (a) 速度分布流场模型示意图; (b) 激光吸收光谱速度分布测试系统示意图
Fig. 2. Model and multiple projection system design for two-stage velocity distribution: (a) Velocity distributions assumed in the analysis; (b) illustration of optical system for TDLAS velocity distribution measurement.

区, 速度为 V_l , 长度为 d_l ; 中间为高速区, 速度为 V_h , 长度为 d_h . 流场模型中温度压力气体组分等参数均匀分布, 气体沿 x 轴方向流动. 信号发生器发出高频锯齿波扫描信号, 加载至温度电流控制器内, 驱动可调谐半导体激光器波长对特征吸收谱线进行快速扫描. 输出激光信号由光纤连接至测试现场, 由分光器分为 3 路, 光路 1 和光路 2 为两条测试光路, 光路方向与气流速度法线的夹角分别为 θ_1 和 θ_2 ; 光路 3 为参考光路, 光路方向与气流速度垂直, 提供后续计算时的基准信号. 透射过流场后的激光信号由光电探测器接收, 通过数据采集系统记录并进行后续分析.

激光透射过不同的速度区间后得到的吸收光谱信号, 是由不同频偏位置光谱吸收率信号叠加而成. 为了便于表达, 本文提出了平均频偏量 $\Delta\nu$ 概念, 代表吸收光谱经过高速区和低速区后总体频偏量:

$$A_l \times \Delta\nu_l + A_h \times \Delta\nu_h = (A_l + A_h) \times \Delta\nu, \quad (5)$$

式中, A_l 是低速区气体的光谱信号的光谱吸收率

积分值; $\Delta\nu_l$ 是低速区气体流动引起的频率偏移; A_h 是高速区气体吸收光谱信号的光谱吸收率积分值; $\Delta\nu_h$ 是高速区气体流动引起的频率偏移.

由于经过高速区和低速区后的吸收光谱其谱线峰值难以确定, 因此无法采用常规拟合方法确定 $\Delta\nu$. 本文提出对叠加后光谱信号进行傅里叶变换, 与参考光路中吸收信号进行傅里叶变换并对比, 通过分析其相位差值计算得到平均频偏量 $\Delta\nu$. 将 (4) 式代入 (5) 式可得

$$\frac{V_l}{c} \nu_0 \sin \theta + \frac{A_h}{A_l} \frac{V_h}{c} \nu_0 \sin \theta = \left(1 + \frac{A_h}{A_l}\right) \Delta\nu_\theta. \quad (6)$$

虽然不同光路入射角度 θ 不同, 但 A_h/A_l 相同, 均等于高速区长度与低速区长度比值, 即 $d_h/(2d_l)$. 定义 $\Delta\nu_{h-l,\theta}$ 为光路入射角 θ 时高速区气体吸收光谱信号相对于低速区气体吸收光谱信号的频率偏移差值:

$$\frac{V_h}{c} \nu_0 \sin \theta - \frac{V_l}{c} \nu_0 \sin \theta = \Delta\nu_{h-l,\theta}. \quad (7)$$

对于不同入射角度光路而言, 高速区气体吸收光谱信号相对于低速区气体吸收光谱信号的频率偏移差值比值仅与入射角度相关:

$$\frac{\Delta\nu_{h-1,\theta_1}}{\Delta\nu_{h-1,\theta_2}} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}. \quad (8)$$

求解速度分布的核心在于获取 $\Delta\nu_{h-1,\theta}$. 对于不同角度光路上测量得到的光谱吸收率信号, 影响其光谱信号轮廓的因素不仅包括各个速度区间长度, 还包括不同速度区间之间的速度差值. 本文提出采用参考光路信号对不同角度下的光谱信号幅值进行归一化处理, 将归一化后不同角度下光谱信号幅值作为衡量光谱信号轮廓变化值 E_θ . 理论上可以通过多种建模方法进行归一化处理, 考虑到光谱信号属于脉冲信号, 进行傅里叶变换后可以得到一窄带宽频谱信号, 该频谱低频部分对于光谱吸收信号轮廓是非常敏感的. 因此, 本文采用不同角度下光谱吸收信号傅里叶变换后的低频部分积分值比值, 作为衡量光谱信号轮廓变化的变量 E_θ :

$$E_\theta = \frac{\int_0^{f_0} I_\theta(t)e^{-i\omega t} dt}{\int_0^{f_0} I_{\theta\text{ref}}(t)e^{-i\omega t} dt}, \quad (9)$$

式中, $I_\theta(t)$ 是入射角度为 θ 时测量光路光谱吸收信号, $I_{\theta\text{ref}}(t)$ 为参考光路的光谱吸收信号. 对于非均匀流场测量而言, 光谱信号轮廓变化受测量光路投影角度、流场分布等参数影响. 考虑到光谱时域信号为脉冲信号, 因此其傅里叶变换后为具有一定带宽的低频宽谱信号. 该低频宽谱信号仅仅对光谱信号轮廓变化敏感, 而对噪音等高频信号具有很好的过滤功能. 通过对不同测量光路获取的低频宽谱信号进行积分, 获取低频段能量差异, 可以很好地描述非均匀流场中光谱信号轮廓变化情况, 进而反演出流场分布情况. (9) 式通过将测量光路与参考光路中低频宽谱信号能量值进行对比, 进一步消除两段式速度分布流场在不同投影角度测量光路光谱信号中低速区与高速区长度比值的差异. 分析经过不同速度区间叠加后的光谱信号特征可知, E_θ 与速度区间长度比值 A_h/A_l 以及不同速度区间光谱信号频率频移差值 $\Delta\nu_{h-1,\theta}$ 相关:

$$E_\theta = f\left(\frac{A_h}{A_l}, \Delta\nu_{h-1,\theta}\right). \quad (10)$$

根据 (9) 和 (10) 式速度模型建立 E_θ 与 A_h/A_l 和 $\Delta\nu_{h-1,\theta}$ 之间函数关系, 分析得到各种不同工况下

E_θ 变化规律, 如图 3 所示. 结合 (8) 式可以推算出速度区间长度比值 A_h/A_l , 代入 (6) 和 (7) 式最终求解得到 V_h 和 V_l .

$$V_h = \frac{\Delta\nu_\theta c}{\nu_0 \sin\theta} + \frac{\Delta\nu_{h-1,\theta} c}{\left(1 + \frac{A_h}{A_l}\right) \nu_0 \sin\theta}, \quad (11)$$

$$V_l = \frac{\Delta\nu_\theta c}{\nu_0 \sin\theta} - \frac{(A_h/A_l)\Delta\nu_{h-1,\theta} c}{(1 + A_h/A_l) \nu_0 \sin\theta}. \quad (12)$$

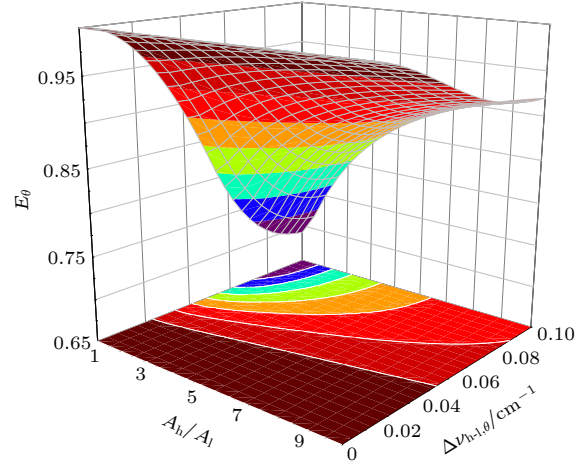


图 3 E_θ 与 A_h/A_l 和 $\Delta\nu_{h-1,\theta}$ 的函数关系图

Fig. 3. Function diagram of E_θ , A_h/A_l and $\Delta\nu_{h-1,\theta}$.

3 结果与讨论

3.1 速度分布计算结果分析

速度分布模型和探测光路布置方式如图 2 所示, 两条光路入射角度 θ_1 和 θ_2 分别为 30° 和 60° . 在流场气体温度为 300 K、压力为 101325 Pa、 H_2O 气体摩尔浓度为 0.01 条件下, 选用 7185.6 cm^{-1} H_2O 特征谱线, 对两段式速度分布模型进行重建研究. V_h 为 1000 m/s, V_l 为 300 m/s, 高速区与低速段长度分别为 8 cm 与 2 cm, A_h/A_l 比值为 4.

首先分析本文提出的平均频偏量 $\Delta\nu$ 计算方法与 (5) 式计算结果存在的误差. 针对图 3 中的速度模型计算叠加后光谱信号, 通过利用傅里叶变换获取叠加后的光谱信号相位变化信息, 与 (5) 式中直接计算结果进行对比, 结果如图 4 所示.

在低速区与高速区速度差值为 100—1000 m/s、低速区与高速区光谱吸收率积分值比值 A_l/A_h 在 0—1 范围内, 随着速度差值的增加, 利用 (5) 式计算的平均频偏量 $\Delta\nu$ 与叠加后光谱傅里叶变换相位

分析结果的相对误差逐渐增大. 对于给定速度差值工况下平均频偏量 $\Delta\nu$ 相对误差最大值出现在 A_h/A_l 为 0.4 附近, 表明当低速区面积不可忽略且叠加后光谱非对称性较大时平均频偏量 $\Delta\nu$ 相对误差最大. 但理论计算表明平均频偏量与叠加后光谱傅里叶变换相位分析结果误差小于 0.00051%, 表明采用 (5) 式计算平均频偏量 $\Delta\nu$ 是准确可行的.

对利用速度分布模型得到的光谱吸收率信号添加幅值 0.5% 的噪音, 以模拟实际测量中存在的

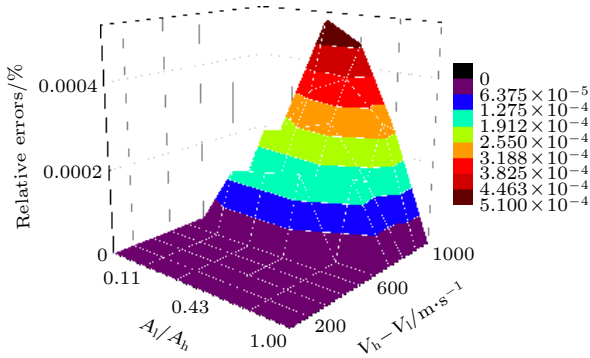


图 4 不同工况下平均频率偏移计算误差结果

Fig. 4. Relative error of average frequency offset under different conditions.

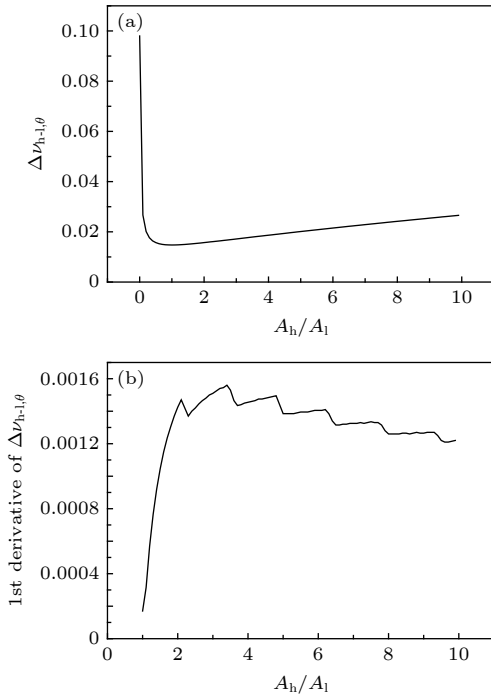


图 5 60°光路投影条件下 $\Delta\nu_{h,\theta}$ 与 A_h/A_l 的关系 (a) $\Delta\nu_{h,\theta}$ 随 A_h/A_l 的变化; (b) $\Delta\nu_{h,\theta}$ 一阶导数随 A_h/A_l 的变化

Fig. 5. Function relationship between $\Delta\nu_{h,\theta}$ and A_h/A_l at 60° optical path: (a) $\Delta\nu_{h,\theta}$ varies with A_h/A_l ; (b) 1st derivative of $\Delta\nu_{h,\theta}$ varies with A_h/A_l .

噪音干扰. 对光谱吸收率数据进行多次平均等信号处理, 图 5 为 60°光路投影条件下 E_θ 值所对应的 A_h/A_l 和 $\Delta\nu_{h,\theta}$ 之间函数关系以及一阶导数关系.

利用 (8) 式对 30°和 60°两条光路下相同 A_h/A_l 所对应的不同 $\Delta\nu_{h,\theta}$ 进行对比, 计算得到的结果如图 6 所示. 30°和 60°两条光路下高速区 V_h 值分别为 1009.48 m/s 和 336.87 m/s, 相对误差分别为 0.9% 和 12.3%. 高速区长度为 7.8 cm, 相对误差为 2.5%. 总体而言, 计算结果高速区速度值与模型之间的相对误差更小. 如果采用传统 TDLAS 双光路测试方法进行计算, 利用 (3) 式得到的气体流速为 860.05 m/s, 可见针对于两段式速度分布流场, 本文方法可以大幅度提高测量准确性.

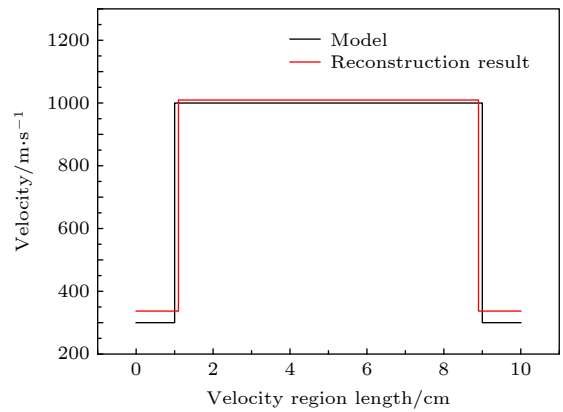


图 6 模型与计算结果对比图

Fig. 6. Comparison of model with calculation results.

将 (11) 和 (12) 式进行对比可以发现, V_l 计算过程中误差传递明显大于 V_h 值, 因此相同误差条件下高速区间速度计算结果更加精确. 另一方面, 如图 5 所示, A_h/A_l 与 $\Delta\nu_{h,\theta}$ 在一定范围内呈近似线性关系, 因此当 A_h/A_l 明显大于 1 时, 利用 A_h/A_l 与 $\Delta\nu_{h,\theta}$ 两者比例关系求解 V_h 值时受噪音影响较小.

3.2 速度分布计算光路投影角度分析

选取几种典型的光路投影角度组合对图 2 中的速度分布模型进行计算, 其他参数与 3.1 节相同, 结果如表 1 所列.

结果表明, 增大 θ_1 和 θ_2 以及两者之间的差值有利于提高测试精度, 当激光入射角度较小时, 低速区速度值误差可达 18.92%, 高低速区长度误差达

到 16.32%。首先, 增大 θ_1 和 θ_2 后, 两条测试光路吸收光谱经过两段式速度分布流场叠加后与参考光路光谱相比所得的变量 E_θ 值均大幅度减小。图 7 给出了不同 E_θ 条件下所对应的 A_h/A_l 与 $\Delta\nu_{h-1,\theta}$ 之间函数关系。可以看出 E_θ 值越小则 $\Delta\nu_{h-1,\theta}$ 对变量 A_h/A_l 的敏感性越强, 从而可以抑制噪音对测量的影响, 进而提高重建精度。

表 1 不同角度组合下的计算结果
Table 1. Calculation results under different angle combinations.

投影角度		计算误差		
$\theta_1/(\circ)$	$\theta_2/(\circ)$	$L_h/\%$	$V_h/\%$	$V_l/\%$
10	20	16.23	7.07	18.92
10	40	15.84	6.88	18.71
10	60	15.84	6.84	18.78
10	80	15.84	6.81	18.84
20	40	15.21	6.58	18.15
20	60	8.74	3.71	12.08
20	80	4.75	2.01	7.35
30	60	2.52	1.07	4.16
30	80	1.74	0.73	2.96
40	60	1.37	0.58	2.36
40	80	1.01	0.42	1.77

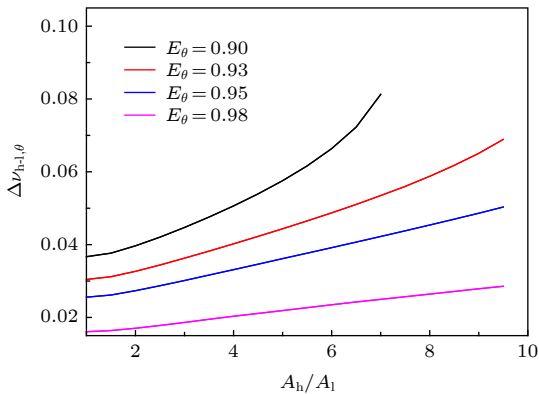


图 7 不同 E_θ 条件下 A_h/A_l 和 $\Delta\nu_{h-1,\theta}$ 之间函数关系
Fig. 7. Relationship between A_h/A_l and $\Delta\nu_{h-1,\theta}$ at different E_θ .

另一方面, 增加两条光路之间的角度差值则有助于提高经过两段式速度分布流场后吸收光谱信号的差异, 使得求解两条光路不同 E_θ 值条件下的方程 (10) 相关性减弱, 进而有利于提高抗干扰能力。

尽管增大 θ_1 和 θ_2 可以提高 $\Delta\nu_{h-1,\theta}$ 对 A_h/A_l 变化敏感性, 使得高速区和低速区速度值以及相应区

间长度重建误差快速降低, 但过大的角度意味着测试系统所需更长的测试距离, 使得该系统测量的空间分辨率下降。因此, 测试系统光路布置需整合考虑, 30° 和 60° 是较为理想的光路分布角度。

3.3 速度分布模型对计算结果的影响

为了研究不同速度分布模型对速度分布重建结果的影响, 分别选取几种不同的高速区和低速区速度值以及相应区间长度的参数组合, 其他参数如 3.1 节所述。结果如表 2 所列。

表 2 不同速度下的计算结果
Table 2. Calculation results at different velocity.

模型流场参数			计算结果相对误差		
$V_h/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$V_l/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	A_h/A_l	$V_h/\%$	$V_l/\%$	$L_h/\%$
1000	100	4	0.17	7.47	0.31
1000	100	1	4.74	53.32	14.44
800	300	4	1.60	20.14	4.08
800	300	1	9.56	37.01	17.53
600	300	4	4.32	62.07	19.41
600	300	1	15.15	77.73	36.63

概括而言, 高速区速度误差依然是最小的。以 V_h 为 1000 m/s、 V_l 为 300 m/s 的模型工况为例, 高速区速度计算误差小于 5%, 但低速区速度误差可达 53.32%, A_h/A_l 误差可达到 14.44%。

在相同 A_h/A_l 条件下高速区与低速区速度差值越大, 重建结果误差越小。这主要是由于较大的速度差值使得叠加后的光谱轮廓发生更加明显的变化, 使得 E_θ 值减小, 所对应的平均频偏量 $\Delta\nu_\theta$ 和频率偏移差值 $\Delta\nu_{h-1,\theta}$ 亦明显增大, 有利于对于谱线信息的分辨, 结果如图 8 所示。同时 $\Delta\nu_{h-1,\theta}$ 对变量 A_h/A_l 的敏感性越强, 从而可以提高重建精度。

在高速区与低速区速度相同条件下, 随着高速区与低速区长度比值 A_h/A_l 减小, 频率偏移差值 $\Delta\nu_{h-1,\theta}$ 变化不大, 但对应的平均频偏量 $\Delta\nu_\theta$ 有所降低, 同时叠加后的光谱轮廓有所变化, E_θ 值略有减小。但当 A_h/A_l 降低至 2 以下时, $\Delta\nu_{h-1,\theta}$ 对 A_h/A_l 变化敏感性迅速下降, 噪音对测量结果影响增加。

3.4 噪音对计算结果的影响

通过对各个光路中添加不同幅值的噪音信号, 分析噪音对速度分布重建结果的影响, 如图 9 所示。模型参数如第 3.1 节所述, V_h 为 1000 m/s,

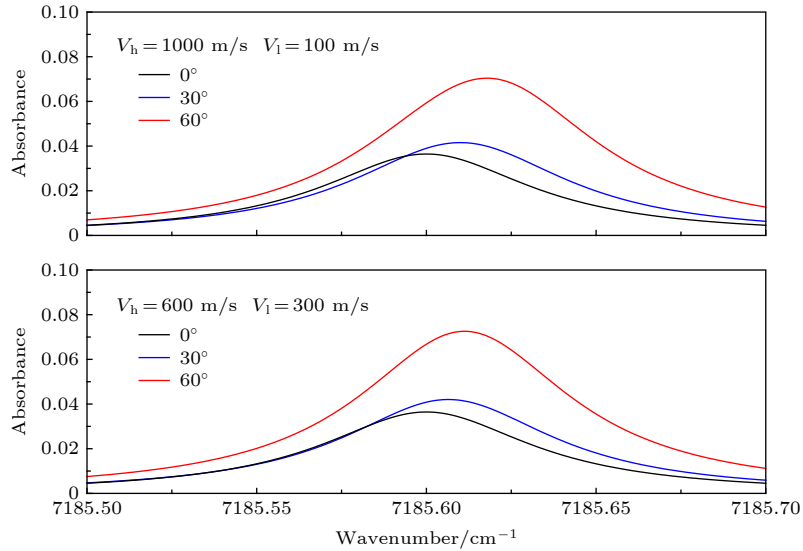


图 8 不同速度模型条件下投影光路光谱信号特征

Fig. 8. Absorbance features at projection in different velocity models.

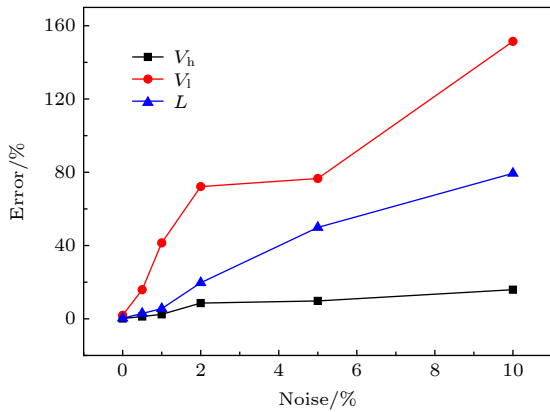


图 9 噪音对速度分布测量的影响

Fig. 9. Effect of noise on velocity distribution measurement.

V_l 为 300 m/s, 高速区与低速段长度分别为 8 cm 与 2 cm, A_h/A_l 比值为 4.

结果表明, V_h 受噪音影响最小. 在精确测量时 (噪音小于 1%), V_h 相对误差不超过 3%; 在幅值 5% 噪音干扰下, V_h 相对误差仍可控制在 10% 之内. 但 V_l 受噪音干扰明显, 在幅值 1% 噪音干扰下, V_l 测量结果为 175.69 m/s, 相对误差达到了 41.4%. 高速区长度计算结果对于误差也较为敏感, 在幅值 1% 噪音干扰下高速区 L_h 测量结果为 8.6 cm, 相对误差达到了 6%, 但在幅值 5% 噪音干扰下相对误差达到了 50%.

如前所述, 当 A_h/A_l 明显大于 1 时, A_h/A_l 与 $\Delta\nu_{h-l,\theta}$ 呈近似线性关系, 因此即使 A_h/A_l 在计算过程中受噪音影响产生变化, 但对于 V_h 值影响有限. 但对于 V_l 的计算而言, 其受 $\Delta\nu_{h-l,\theta}$ 值影响较大, 因

此对于测量噪音更加敏感. 因此, 该方法对于高速区速度计算结果更加精确.

高速区长度是通过 (10) 式中函数关系进行求解的, 提升 E_θ 对于速度区间长度比值 A_h/A_l 以及不同速度区间光谱信号频率频移差值 $\Delta\nu_{h-l,\theta}$ 的敏感性可以降低不同速度区间长度计算结果误差, 因此后续建立更为合理函数关系式 (10) 是解决问题的关键.

4 结 论

为实现两段式速度分布流场的速度测量与分析, 提出了基于多角度投影的激光吸收光谱多普勒速度分布测试方法. 建立了不同投影角度下吸收光谱平均频偏值与不同速度区间频偏差值之间的函数关系, 提出了基于傅里叶变换的光谱信号低频能量变化分析方法, 有效降低了测试信号对噪音的敏感性, 提高了测试方法的准确性, 解决了不同速度梯度条件下吸收光谱信号微弱变化检测难题. 利用多角度投影吸收光谱信息低频能量相对变化对两段式速度区间长度与对应速度值进行耦合求解. 结果表明, 该方法对于具有明显速度梯度的流场中高速区速度值重建结果最佳, 相对误差 0.9%. 投影角度增大有利于增强重建方程中不同速度区间光谱频偏差值对速度区间长度比值的灵敏度, 提高测量精度. 考虑到系统测量空间分辨率限制, 0° , 30° 和 60° 是较为理想的光路分布角度. 测量噪音对高速

区速度值重建结果影响最小, 提升 E_θ 对于速度区间长度比值 A_h/A_l 以及不同速度区间光谱信号频率频移差值 $\Delta\nu_{h-l,\theta}$ 的敏感性可以有效降低噪音对不同速度区间长度重建结果的影响. 研究结果对于推动激光吸收光谱技术在发动机诊断及气体动力学研究中的应用具有重要意义.

参考文献

- [1] Zhang D, Zhao H, Yang J A 2019 *Optik* **186** 155
- [2] Zhang W, Shen Y, Yu X L, Yao Z P, Wang M, Zeng H, Li F, Zhang S H 2015 *J. Propul. Technol.* **36** 651 (in Chinese) [张伟, 沈岩, 余西龙, 姚兆普, 王梦, 曾徽, 李飞, 张少华 2015 *推进技术* **36** 651]
- [3] Yang B, Qi Z M, Yang H N, Huang B, Liu P J 2015 *J. Combust. Sci. Technol.* **21** 516 (in Chinese) [杨斌, 齐宗满, 杨荟楠, 黄斌, 刘佩进 2015 *燃烧科学与技术* **21** 516]
- [4] Lv X J, Li N, Weng C S 2016 *Spectrosc. Spect. Anal.* **36** 624 (in Chinese) [吕晓静, 李宁, 翁春生 2016 *光谱学与光谱分析* **36** 624]
- [5] Hanson R K 2011 *Proc. Combust. Inst.* **33** 1
- [6] Li H, Farooq A, Jeffries J B, Hanson R K 2007 *Appl. Phys. B* **89** 407
- [7] Hong Y J, Song J L, Rao W, Wang G Y 2018 *J. Exper. Fluid Mech.* **32** 43 (in Chinese) [洪延姬, 宋俊玲, 饶伟, 王广宇 2018 *实验流体力学* **32** 43]
- [8] Liu P J, Wang Z X, Yang B, Wei X G 2017 *Spectrosc. Spect. Anal.* **37** 532 (in Chinese) [刘佩进, 王志新, 杨斌, 魏祥庚 2017 *光谱学与光谱分析* **37** 532]
- [9] Kan R F, Xia H H, Xu Z Y, Yao L, Ruan J, Fan X L 2018 *Chin. J. Lasers* **45** 1 (in Chinese) [阚瑞峰, 夏晖晖, 许振宇, 姚路, 阮俊, 范雪丽 2018 *中国激光* **45** 1]
- [10] Zhang L, Liu J G, Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J, Xu Z Y, Chen J 2012 *Acta. Phys. Sin.* **61** 034214 (in Chinese) [张亮, 刘建国, 阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 许振宇, 陈军 2012 *物理学报* **61** 034214]
- [11] Xu Z Y, Kan R F, Ran J, Yao L, Fan X L, Liu J G 2016 *Light, Energy Environ Congr. ETu2 A.4*
- [12] Yao L, Yao D L, Yi J H, Kan R F, Yang Y J, Xu Z Y, Ruan J, Liu J G 2016 *Chin. J. Explos. Propellants* **39** 35 (in Chinese) [姚路, 姚德龙, 仪建华, 阚瑞峰, 杨燕京, 许振宇, 阮俊, 刘建国 2016 *火炸药学报* **39** 35]
- [13] Li F, Yu X L, Cai W W, Ma L 2012 *Appl. Opt.* **51** 4788
- [14] Li F, Yu X L, Gu H B, Li Z, Chen L H, Chang X Y 2011 *17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference* San Francisco, USA, April 11–14, 2011 p2214
- [15] Chang L S, Strand C L, Jeffries J B, Hanson R K 2011 *AIAA J.* **49** 2783
- [16] Chang L S, Jeffries J B, Hanson R K 2010 *AIAA J.* **49** 2687
- [17] Gamba M 2015 *53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting Kissimmee, USA, January 5–9, 2015* p1222
- [18] Qu Q W, Cao Z, Xu L J, Liu C, Chang L Y, McCann H 2019 *Appl. Opt.* **58** 205
- [19] Qu Q W, Gao S, Chang L Y, Xu L J 2019 *Appl. Phys. B* **125** 128
- [20] Xiang R, Wang C, Lu L 2019 *J. Opt* **48** 384

Two-stage velocity distribution measurement from multiple projections by tunable diode laser absorption spectrum^{*}

Wang Chuan-Wei Li Ning[†] Huang Xiao-Long Weng Chun-Sheng

(National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(Received 12 August 2019; revised manuscript received 15 October 2019)

Abstract

A novel approach to using tunable diode laser absorption spectrum (TDLAS) is developed for nonuniform velocity distribution measurement by Doppler effect. An analysis of the energy in direct absorption spectrum at low frequencies is made by Fourier transform, because the TDLAS method offers the advantages in using Beer law to deal with coupling relations between velocity distribution and corresponding length of velocity region. By comparing with traditional TDLAS-Doppler velocity measurement, advantages of this approach to the more exact solution of core flow velocity by signal process without using extra lasers and detectors are explored. Following the published theory, between velocity regions at multiple projections the absorbance about average in frequency offsets and the absorbance about difference in frequency offsets are incorporated into an improved fitting model. A solution to obtaining changes of absorbance energy at low frequencies by Fourier transform is used to demonstrate the ability to recover minor change in absorbance under different conditions, inferring a better method to realize the simultaneous measurement of velocity distribution. The influences of these parameters, such as projection angles and noise during absorption, are investigated by the multiple projection simulations at rovibrational transitions of H₂O near 7185.6 cm⁻¹ from three projections. This approach is validated in a two-stage velocity distribution model, demonstrating the ability to exactly measure core flow, with a precision of 0.9% RMS (root mean square). The high velocity in the core flow is less influenced by the random noise in absorption due to nearly linear relationship between the difference in frequency offsets and the ratio of length of velocity region. Some satisfied results can be obtained when larger angles of projection are arranged. The combination of 0°, 30°, and 60° will be a reasonable optic design considering the limitation of spatial resolution. In conclusion, the novel approach to velocity distribution measurement based on TDLAS-Doppler from multiple projections has great potential applications in engine diagnosis and gas dynamic research.

Keywords: tunable diode laser absorption spectroscopy, Doppler effect, Fourier transform, velocity distribution

PACS: 78.20.Ci, 52.70.Kz, 47.40.Rs

DOI: [10.7498/aps.68.20191223](https://doi.org/10.7498/aps.68.20191223)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11372141, 11472138), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 30919011258), and the Young Scientists Fund of the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20190439).

[†] Corresponding author. E-mail: phoenixkyo@163.com