基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的高速气流流速测量方法研究*

张亮 刘建国† 阚瑞峰 刘文清 张玉钧 许振宇 陈军

(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)

(2011 年 5 月 16 日收到; 2011 年 6 月 6 日收到修改稿)

以激光 Doppler 效应为原理, 结合可调谐半导体激光吸收光谱技术的窄线宽、可调谐优势, 可实现高速气流流速的实时在线检测. 介绍了流速测量的基本原理和方法, 搭建了双光路流速测量系统, 利用 DFB 激光器对位于 1398 nm 处的水汽吸收线进行 10 kHz 快速扫描, 获得高速气流的实时光谱信息, 并根据两路吸光度曲线之间的 Doppler 频移来反演气流流速. 介绍了频率标定和 Doppler 频移测量的方法. 在风洞上进行了流速测量验证性实验, 将流速测量结果与理论计算结果进行了对比, 二者之间符合得较好, 初步证明了该方法的可行性. 分析了系统的性能及可能引起流速测量误差的因素, 以便系统进一步优化.

关键词: 可调谐半导体激光吸收光谱, Doppler 频移, 流速

PACS: 42.87.–d, 07.07.Df

1 引 言

可调谐半导体激光吸收光谱 (TDLAS) 技术利用半导体激光器的窄线宽和可调谐特性对气体分子的特征吸收谱线进行快速扫描和测量, 实时反演出气体流速、温度、浓度和压强等信息. 该技术具有非侵入式、响应迅速、灵敏度高、抗干扰能力强、测量结果重复性好、适用于恶劣的测量环境等优势, 已经在环境监测、工业过程检测等领域得到应用 [1]. 近年来, 将 TDLAS 技术应用于燃烧过程监测和发动机关键性能参数检测等领域的研究逐渐升温. Kent[2] 将气体流速和浓度测量相结合, 实现了气体通量的监测; Shawn[3] 将 TDLAS 技术用于超音速气流流速测量, 利用水汽吸收线测量到四千多米每秒的高速气流 [3]; 美国空军 WPAFB 实验室和 Southwest Sciences, Zolo Technologies 公司合作, 将该技术用于高超音速国际飞行研究实验 (HIFiRE), 并开发出多参数同时测量的 TDLAS 小型化便携系统 [4].

气流流速是高速流场的重要参数之一, 它的准确测量对于空气动力学理论研究和工程设计验证实验至关重要. 传统的流速测量方法, 比如皮托管差压法、热线风速计法等, 以接触测量为主, 主要缺点是响应慢, 对流场有干扰, 不适合高速气流测量; 粒子散射和粒子成像测速法虽然是非接触测量方法, 但都需要在气流中添加悬浮示踪粒子, 用示踪粒子的速度近似表示气流的速度, 这就要求示踪粒子有很好的跟随性. 但理想的单分散悬浮体不容易实现, 会导致流速测量本身存在一定的误差, 且两种方法都使用高功率的脉冲激光作为光源, 无法实现系统小型化, 容易引起流场温度和组分浓度的改变, 这对其他参数测量会产生影响. 因此, 需要采用新的非接触测量方法才能实现高速气流的准确测量. 本文采用基于 Doppler 效应和激光吸收光谱技术的流速测量方法, 在风洞上利用自行搭建的双光路系统进行了流速测量的初步验证性实验, 为高速气流流速的测量提供了新方法并积累了一定的经验.

* 中国科学院战略性先导科技专项 (批准号:XDA05040102) 和国家重点基础研究发展计划 (973 计划)(批准号:2010CB234607) 资助的课题.

† E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

© 2012 中国物理学会 Chinese Physical Society

2 流速测量原理

如图 1 所示, 根据激光 Doppler 效应 [5], 当气流流速在激光传输方向上有速度分量时, 会造成气体分子吸收光子时的激光接收频率与实际激光发射频率之间有一偏移, 二者频率之差即 Doppler 频移. 频移大小可由如下公式计算:

$$\Delta\nu = \frac{V_{\rm gas}\cdot\cos\theta}{c}\cdot\nu_0, \tag{1}$$

其中 θ 为激光传输方向与气流流速方向之间的夹角, c 为光速, ν_0 为没有频移时气体吸收线的中心频率. 由 (1) 式可知, 频移大小与气流流速成正比. Doppler 频移在 TDLAS 上反映为气体特征吸收谱线的移动, 因此可以通过测量吸收谱线之间的频移来计算气流流速.

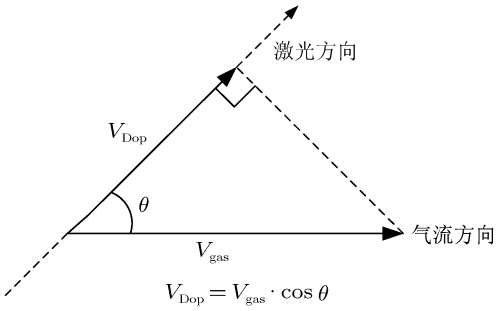

图 1 激光 Doppler 效应

吸收光谱的基本原理基于 Beer-Lambert 定律 [6]. 一束光强为 $I_0(\nu)$ 的单色光通过长度为 L 的吸收介质后, 在接收端测得的强度为 $I(\nu)$, 设 $T_{\rm v}$ 为光强透过率, 则有:

$$T_{\rm v} = \frac{I(\nu)}{I_0(\nu)} = \exp[-S(T)\phi(\nu-\nu_0,T)P\chi L], \tag{2}$$

其中, $S\left(\mathrm{cm}^{-2}\cdot\mathrm{atm}^{-1}\right)$ 为气体吸收线的线强, 仅为温度 T 的函数; $\phi\,(\mathrm{cm})$ 为归一化的吸收线线形函数, 是频率和温度的函数; $P\,(\mathrm{atm})$ 为总压; χ 为吸收气体占总气体的摩尔份数, 即体积浓度; $L\,(\mathrm{cm})$ 为吸收光程长. 采用直接吸收法测量时, 通常用吸光度 $\alpha_{\rm v}$ 来描述气体对光的吸收特性, 定义为 $\ln\dfrac{I_0(\nu)}{I(\nu)}$, 有:

$$\alpha_{\rm v} = -\ln\frac{I\,(\nu)}{I_0\,(\nu)} = -\ln T_{\rm v} = S(T)\phi(\nu-\nu_0,T)P\chi L. \tag{3}$$

3 流速测量方法

TDLAS 从信号检测方法上主要分为两种方法: 直接吸收法和调制法. TDLAS 调制法虽然有较高的信噪比和检测灵敏度, 但信号经过锁相放大器时会有一相位延时, 该延时使得到的谐波信号和时/频转换关系在时域上不一致. 由于时/频转换关系是非线性的, 该延时将导致 Doppler 频移测量和流速反演产生一定的误差. 因此, 在开展 TDLAS 流速测量时, 实际采用较简单的波长扫描直接吸收法.

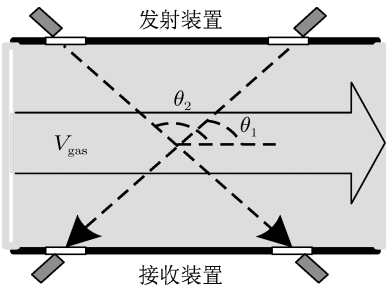

图 2 双光路流速测量装置示意图

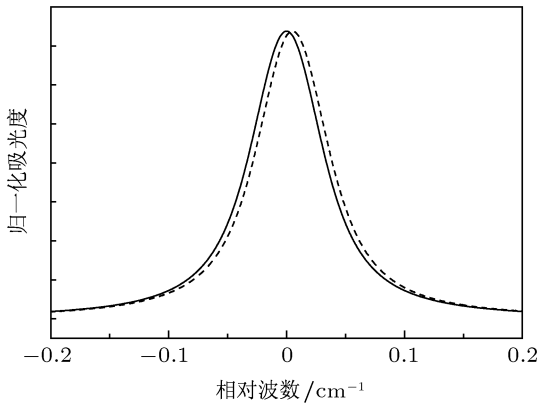

图 3 模拟的两路吸光度曲线之间的 Doppler 频移

TDLAS 流速测量一般采用双光路方式. 让来源于同一光源的两束激光分别以不同的夹角通过气流, 利用二者之间的 Doppler 频移来反演气流流速. 双光路方式能够消除激光器自身波长漂移对 Doppler 频移测量的影响, 且在相同气流流速下能够提高频移分辨率和测量精度. 如图 2 所示, 两束成一定角度入射的激光穿过高速气流后产生了频移 $\Delta\nu_{12}$, 则气流速度与入射角度和频移之间的关系为

$$V_{\rm gas} = c\Delta\nu_{12}/\left[\nu_0\left(\cos\theta_1-\cos\theta_2\right)\right], \tag{4}$$

其中 $V_{\rm gas}$ 为气流流速, θ_1, θ_2 为图 2 中所示的夹角.

采用波长扫描直接吸收法测量时, 常根据两路吸光度曲线之间的 Doppler 频移大小来反演气流流速. 图 3 所示为模拟的两路吸光度曲线之间的频移.

4 流速测量系统

水汽广泛存在于空气中且是碳氢燃料的主要燃烧产物之一, 适合于不同检测环境的可选谱带范围也比较宽, 因此成为相关领域光学测量的理想目标气体. 实际选择吸收线时既要有足够的吸收线强、能提供较高的信号信噪比, 又要使吸收线附近没有其他吸收气体的干扰. 综上, 系统选用 1398 nm 处的水汽振 - 转吸收线进行高速气流流速测量. 搭建的流速测量实验系统如图 4 所示.

流速测量系统主要包括两部分: 置于主控室的控制部分和置于监测现场的测量探头. 系统的工作过程为: DFB 激光器通过温度控制模块和电流控制模块设置中心工作波长, 同时在电流控制模块上叠加 10 kHz 的高频锯齿信号实现波长的快速扫描, 从而获得高速流场的实时光谱信息. 从激光器尾纤出射的激光经光纤分束器分为三束, 其中一束经光纤干涉计后由探测器探测, 得到干涉信号用于频率标定; 另外两束激光经光纤由主控室传输到测量现场, 经准直器准直后, 分别以与气流流速成 45° 和 135° 夹角的方向倾斜发射. 两束光均由探测器接收, 将光信号转化为电信号后, 由同轴电缆回传至放在主控室中的主机箱. 三路信号经放大后, 由多通道高速数据采集卡同步采集并由工控机保存, 数据经流速反演软件处理后给出实时的高速气流流速信息. 因为气流流速在两路激光传输方向上均有速度分量, 所以气体分子在接收两路激光时都会产生 Doppler 频移, 根据两路吸收谱线之间的 Doppler 频移大小来反演气流流速. 对于本系统, 流速和 Doppler 频移之间的关系为

$$\begin{aligned} V_{\mathrm{gas}}\,(m/s) &= c\Delta\nu_{12}/[\nu_0(\cos 45^\circ - \cos 135^\circ)] \\ &= 988.7\Delta\nu_{12}(\mathrm{GHz}). \end{aligned} \tag{5}$$

流速测量实验在小型风洞上进行. 风洞的实验段带有观察窗, 以便激光穿透高速气流进行流速测量.

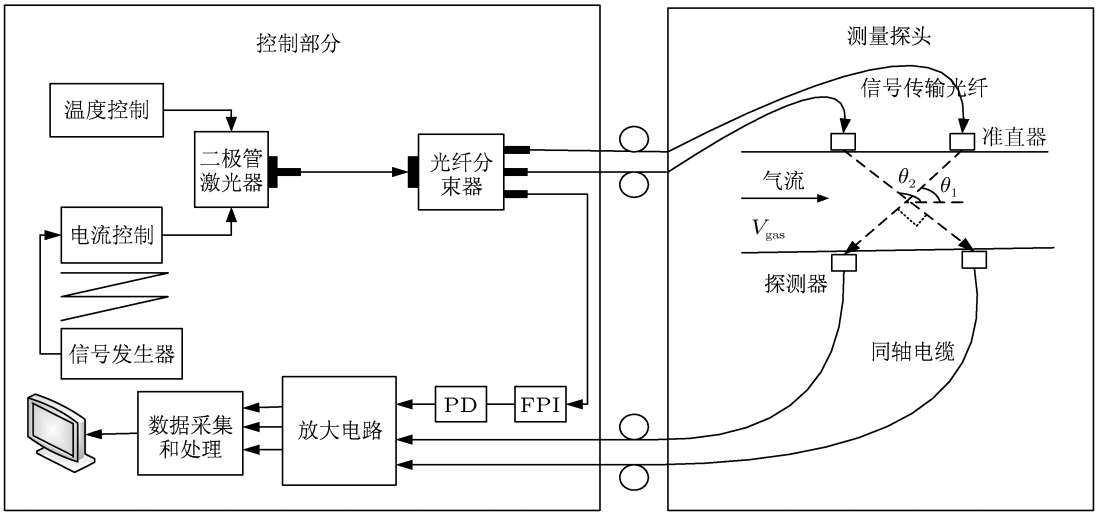

图 4 TDLAS 流速测量系统示意图

5 数据处理

实验过程中, 对采集到的信号每 10 个周期进行一次累加平均, 再经过平滑处理后, 得到的波长扫描直接吸收信号如图 5 所示. 每个扫描周期内, 激光器在最后一段时间不出光, 是为了测量背景信号. 探测器探测的直接吸收信号扣除背景信号, 剩余部分才代表实际的透射光强.

直接采集得到的光谱信号是时域上的信号, 而一些期望得到的参数, 比如吸光度、Doppler 频移等, 又是和频域相关的. 因此, 对得到的光谱信号进行从时域到频域的转换, 即频率标定, 是进行流速

反演的必要前提, 而干涉计是实现这一转换的关键光学器件. 实验中选用的光纤干涉计的自由光谱范围 (FSR) 为 315 MHz. 图 6 所示为经过该干涉计的干涉信号.

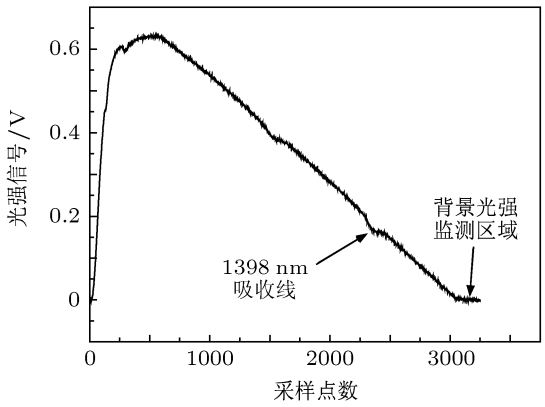

图 5 直接吸收信号

如图 7(a) 所示, 得到透射光强曲线 $I(t)$ 后, 需要选取吸收线附近无吸收区域进行低阶多项式基线拟合 [7], 以得到入射光强 $I_0(t)$. 对于 Voigt 吸收线形, 在中心频率外 4 倍线宽处, Voigt 线形值会降至中心频率处的 1%, 这可以作为选取基线拟合范围的准则. 通过计算 $\ln\left[I_0\left(t\right)/I\left(t\right)\right]$ 得到时域吸收信号, 这时信号基线变平, 消除了光强随注入电流的变化, 如图 7(c) 所示.

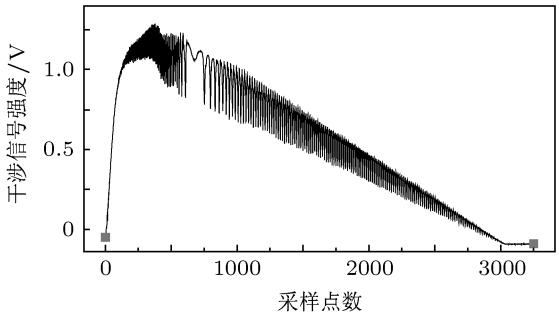

图 6 干涉信号

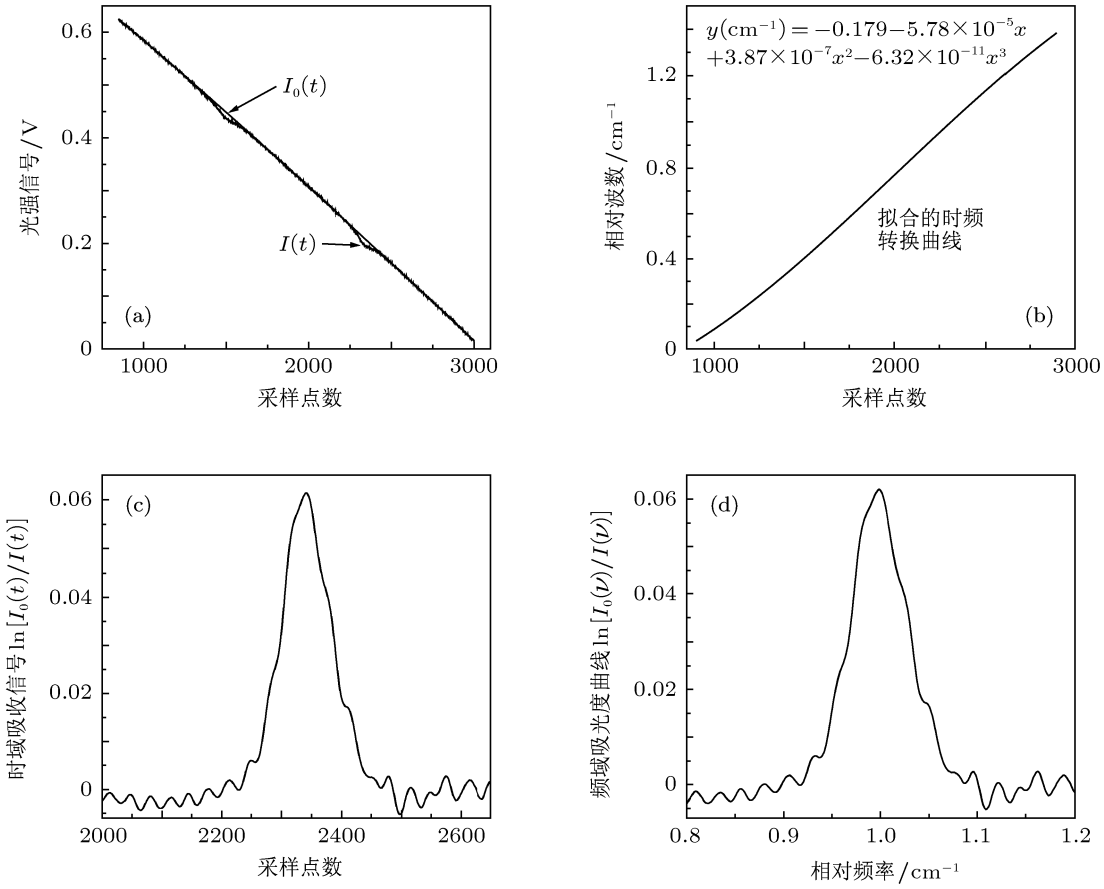

图 7 (a) 拟合的基线; (b) 时频转换曲线; (c) 时域吸收信号; (d) 对应的频域吸光度曲线

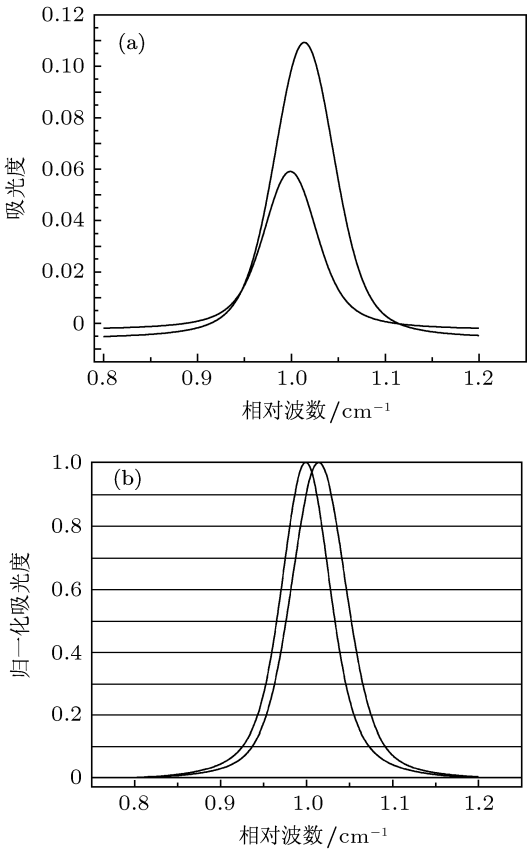

图 8 两路吸光度曲线在归一化前 (a) 后 (b) 对比图

频率标定的过程首先需要确定干涉信号的峰位置. 峰位置横坐标用采样点 (广义, 不一定是整数) 表示, 代表时间; 纵坐标用 FSR 标记, 代表相对频率 (可以 Hz 或 cm^{-1} 为单位, 由 cm^{-1} 变换到 Hz 只需乘以光速 c). 干涉信号所有峰位置都确定后, 会得到一个时间和相对频率的相关序列, 对该序列用低阶多项式拟合, 得到的多项式函数即时频转换关系, 如图 7(b) 所示. 由拟合结果可知, DFB 激光器的时频转换关系并不是完全线性的. 根据该关系可计算时域吸收曲线上任意采样点对应的相对频率, 得到频域吸光度曲线 $\ln\left[I_0\left(\nu\right)/I\left(\nu\right)\right]$, 如图 7(d) 所示.

为了测量 Doppler 频移, 在得到两路吸光度曲线后, 需要对它们进行 Voigt 线形拟合. Voigt 线形拟合在文献 [7] 中有详细的介绍, 这里不再赘述. 对于直接吸收法, 将两路吸光度曲线峰值之间的频率间隔作为 Doppler 频移, 理论上这是最准确的频移测量方法. 但实验中发现, 噪声和其他一些不确定因素限制了峰值单点测量的精度, 故一般不采用该方法. 此外, 互相关法也是常用的频移间隔测量方法, 但计算比较耗时, 无法满足系统实时反演高速气流流速的要求, 而且两路吸光度曲线之间存在线形失真, 互相关频移计算效果不是很好, 实际也没有采用. 本文所采用的一种相对简单且精度较高的方法是: 对两路吸光度曲线进行归一化处理得到相同幅值的信号, 按幅值对吸光度曲线进行十份等间隔划分, 这样就会在两路信号之间找到 19 对对应点, 对每对对应点分别进行频移测量, 最后取平均值作为 Doppler 频移. 这种全光谱频移提取法, 相对峰值单点测量法, 频移测量精度得到很大提高; 相对互相关法, 计算速度和效果也得到较大改善. 图 8(a),(b) 分别为两路吸光度曲线在归一化前后的对比图, 图 8(b) 中也示意了谱线等间隔划分和频移测量点选取的方法. 两路归一化吸光度曲线之间 19 对对应点分别进行频移测量后, 经过平均得到平均 Doppler 频移 $\overline{\Delta\nu}$, 代入 (6) 式即可计算光学路径上的平均气流流速 $\overline{V}_{\mathrm{gas}}$.

$$\overline{V}_{\mathrm{gas}}\left(\mathrm{m/s}\right)=988.7\overline{\Delta\nu}_{12}(\mathrm{GHz}) \tag{6}$$

6 实验结果及分析

图 9(a) 所示为一次实验过程中风洞气流流速达到相对稳定时得到的两路直接吸收信号, 可以明显看到由气流流速导致的时域内吸收线之间的移动; 图 9(b) 为对应的两路吸光度曲线, 可以明显看到频域内二者之间的 Doppler 频移. 经流速反演程序实时计算, 该时刻对应平均 Doppler 频移为 1.04 GHz, 平均气流流速为 1028 m/s. 根据该次实验风洞工作状况, 经 CFD 理论计算得到的流速值为 1060 m/s, 流速测量值与理论计算值之间的误差为 32 m/s. 图 10 所示为该次实验完整的流速曲线.

对于当前 TDLAS 流速测量系统, 激光器的调谐范围为 48 GHz (对应 2450 个采样点), 可以分辨的最小频移为 19.6 MHz, 对应的气流流速约为 20 m/s. 这意味着对于该系统, 受数据采样频率的限制, 流速测量的最高精度为 20 m/s. 如果再加上其他误差来源, 实际测量误差还要大于该值, 这与前面的分析结果相一致. 经过分析, 造成流速测量误差的原因及解决办法如下: 1) 电信号远距离传输, 引入的噪声降低了测量精度，可以在测量现场, 利用光纤耦合、光纤传输的方式取代探测器探测和同轴电缆传输的方式；2) 测量区域以外的静止

区域引起吸收线形的失真, 实验时, 激光发射和接收装置应尽量靠近两侧观察窗, 使静止区域尽可能的短且最好用干燥氮气吹扫; 3) 当前系统采用 30 MHz 的采样频率和 2 MHz 线宽的激光器, 受采样频率和线宽的限制, 在频率标定和 Doppler 频移测量时都还存在一定的误差，预计采用采样速率更高的数据采集卡和线宽更窄的激光器, 可以提高系统分辨率和流速测量精度; 4) 分束器分束比会随着激光波长的变化而变化, 导致得到的两路吸光度曲线之间产生线形失真, 可以利用水汽多条吸收线同时进行流速测量, 以减小分束器非线性效应的影响.

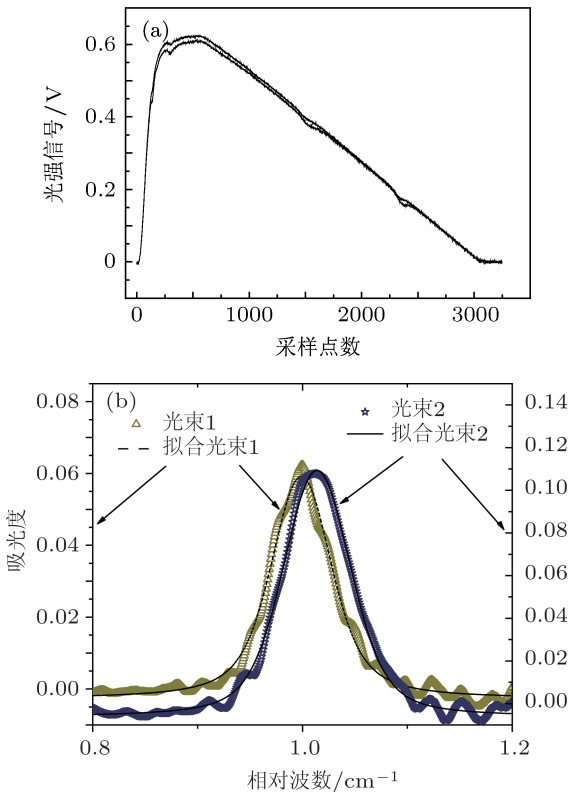

图 9 (a) 时域内吸收线的移动; (b) 频域内吸光度曲线的频移

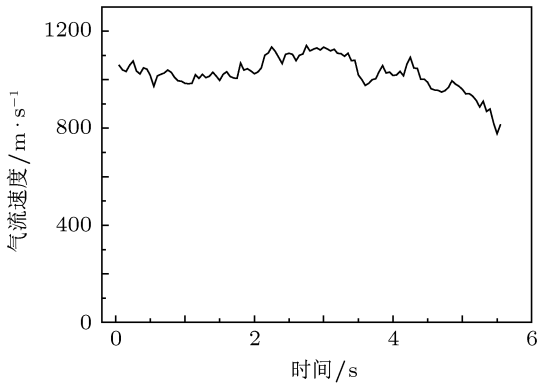

图 10 风洞流速曲线

7 结 论

本文主要介绍了基于 Doppler 效应和 TDLAS 技术的高速气流流速测量方法, 利用搭建的双光路系统在风洞上进行了流速测量初步验证性实验. 通过对两路吸收谱线进行频率标定、吸光度反演和计算二者之间 Doppler 频移来实现流速测量. 实验结果表明, 基于该方法的流速测量系统能够实现对高速气流流速的实时在线检测. 下一步工作重点为: 1) 提高流速测量精度, 减小系统测量误差; 2) 进行多点流速测量和流速场分布反演方法研究; 3) 进行气体组分浓度的测量研究, 从而实现气体通量的测量.

[1] Curl R F, Tittel F K 2002 *Annu. Rep. Prog. Chem. Sect.* **98** 219

[2] Kent L 2005 Development of a real-time diode laser mass flux sensor for simultaneous measurement of density and velocity of oxygen *Ph. D. Dissertation* (Stanford: Stanford University)

[3] Shawn D W 2000 Development of a tunable diode laser probe for measurements in hypervelocity flows *Ph. D. Dissertation* (Stanford: Stanford University)

[4] Todd B, Skip W 2006 *42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* Sacramento, California, 9–12 July 2006 4395

[5] Li G C 2004 *Optical Instrumentation for Wind Tunnel Testing* (Vol.1) (Beijing: National Defense Industrial Press) pp118–143 (in Chinese) [李桂春 2004 风洞实验光学测量方法 (第 1 版) (北京: 国防工业出版社) 第 118—143 页]

[6] Zhou X 2005 Diode-laser absorption sensors for combustion control *Ph. D. Dissertation* (Stanford: Stanford University)

[7] Xu Z Y, Liu W Q, Kan R F 2010 *Spectrosc. Spect. Anal.* **30** 2201 (in Chinese) [许振宇, 刘文清, 阚瑞峰 2010 光谱学与光谱分析 **30** 2201]

On the methodology of measuring high-speed flows using tunable diode laser absorption spectroscopy*

Zhang Liang Liu Jian-Guo† Kan Rui-Feng Liu Wen-Qing Zhang Yu-Jun
Xu Zhen-Yu Chen Jun

(*Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences , Hefei* 230031, *China*)

(Received 16 May 2011; revised manuscript received 6 June 2011)

Abstract

Based on the laser Doppler effect, real-time and on-line measurements of velocity in high-speed flows can be realized using tunable diode laser absorption spectra (TDLAS). The fundamental theory and the method to measure the velocity are presented. A dual-beam system used in the experiments is described. The water vapor absorption feature at 1398 nm is utilized to detect the flows generated within a wind tunnel. The DFB laser is quickly tuned at a rate of 10 kHz to obtain the spectra of the transient flows by using scanned-wavelength direct absorption spectroscopy. The ways to calibrate the frequency and calculate the Doppler shift (DS) are also introduced. The measured velocity is compared with the calculated velocity, and they are in good agreement with each other, which proves that the way combining DS with TDLAS to measure the velocity in high-speed flows is reasonable. The system capability and possible factors to induce measurement deviations are analyzed to improve the system performance in the future.

Keywords: TDLAS, Doppler shift, velocity

PACS: 42.87.–d, 07.07.Df

* Project supported by the "Strategic Priority Research Program" of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA05040102) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB234607).

† E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn