

# 用修正的 RELIEF 方法测量高速空气 流瞬时速度的理论研究\*

郑义\*\* 姚建铨 吴峰 房晓俊 施祥春  
(天津大学激光与光电子研究所, 天津 300072)

**摘 要** 修正了拉曼激发激光感应电子荧光(Raman Excitation pulse Laser-induced Electronic Fluorescence 简称 RELIEF)方法, 以实现对亚音速和超音速空气流多点瞬时速度的测量。测量精度优于 2%。

**关键词** 修正的拉曼激发激光感应电子荧光方法, 高速空气流, 瞬时速度, 标记线。

## 1 引 言

随着激光技术的发展, 从八十年代开始, 风洞流场诊断的光学方法成为研究的热门课题。其中大多数方法需要向流场中注入其它粒子, 影响了测量精度, 甚至不适用于高速流场的测量。Miles 等人<sup>[1~3]</sup>提出的拉曼激发激光感应电子荧光方法克服了这个问题。该方法利用 532 nm 和 580 nm 的高功率激光共线同时泵浦高速空气流中的氧分子, 通过受激拉曼激发实现氧分子基态中的  $X^3\Sigma_g^-(v''=0)$  到  $X^3\Sigma_g^-(v''=1)$  的禁戒跃迁, 由于氧分子  $X^3\Sigma_g^-(v''=1)$  态的寿命长(27 ms), 可以作为高速空气流运动的标记继续运动。然后 ArF 准分子激光(1934 nm)与 532 nm 和 580 nm 激光反向以片形式照射高速空气流, 这样处于  $X^3\Sigma_g^-(v''=1)$  态的氧分子被激发到 Schumann-Runge 带中的  $B^3\Sigma_g^-(v'=7)$  振动态, 从而辐射荧光, 用带像增强器的 CCD (ICCD) 相机摄下一系列的荧光标记线, 通过测量这些标记线间的位移得到高速空气的二维空间平均速度等。但是拉曼激发激光感应电子荧光方法中所用的 Quantel Model YG592 调 Q Nd:YAG 激光的重复频率是 10 Hz, 因此两相邻标记线之间间隔是 ArF 准分子脉冲与调 Q 倍频 Nd:YAG 激光脉冲间的延迟时间加上 100 ms, 拉曼激发激光感应电子荧光方法不能用于非稳定高速空气流瞬时速度的测量。本文对拉曼激发激光感应电子荧光方法作了改进, 以实现亚音速和超音速空气流多点瞬时速度的测量。

## 2 修正的拉曼激发激光感应电子荧光方法

为了去掉两相邻标记时间间隔中的 100 ms, 作者提出用序列脉冲倍频 Nd:YAG 激光代

\* 国家自然科学基金资助。

\*\* 现在地址: 山东曲阜师范大学物理系。

收稿日期: 1995年7月2日

替 REFLIEF 方法中的调 Q 倍频 Nd : YAG 激光。序列脉冲激光器的脉冲周期为 15 μs，脉冲个数为 5。序列脉冲激光照射高压氧气池，产生受激拉曼散射激光(580 nm)，拉曼激光的强度  $I_r$  由下式计算<sup>[4,5]</sup>；

$$I_r(z, t) = \frac{c}{8\pi N} k_1 k_2 |E_L|^2 z \left( e^{-2\Gamma_0^0} \{ I_0^0 [4k_1 k_2 z p(\tau)]^{1/2} - I_1^0 [4k_1 k_2 z p(\tau)]^{1/2} \} + 2\Gamma_0^0 \int_0^\tau d\tau' [I_0^0 \{ 4k_1 k_2 z |E_L|^2 [p(\tau) - p(\tau')] \}]^{1/2} \right) \quad (1)$$

式中  $I_n$  为  $n$  阶虚宗量贝塞尔函数， $k_1$ 、 $k_2$  为耦合常数， $E_L$  为泵浦光(532 nm)的电场强度， $z$  为介质的作用长度， $\tau = t - z/c$  为作用时间， $p(\tau) = \int_0^\tau |E_L(\tau')|^2 d\tau'$ 。

拉曼激光和由氧气池中透射的倍频 Nd : YAG 序列脉冲激光经延时线同步，然后靠反向偏转镜对在高速气流的一个横截面内共线往返 6 次泵浦高速空气流，实现氧分子  $X^3\Sigma_g^-(v'' = 0)$  态到  $X^3\Sigma_g^-(v'' = 1)$  态的拉曼激发。氧分子的受激拉曼激发可由分子数跃迁速率  $n_{v''J''}$  表示<sup>[6]</sup>；

$$n_{v''J''} = \frac{256\pi^2 N c^2}{h^2 \omega_i^5 t_p} \frac{d\sigma}{d\Omega} \frac{\Gamma_0^0(\omega_L - \omega_s)}{[\omega_0^0 - (\omega_L - \omega_s)^2]^2 + \Gamma_0^0(\omega_L - \omega_s)^2} \int_0^{t_p} I_L I_r dt \quad (2)$$

式中  $d\sigma/d\Omega$  为氧分子的微分散截面， $N$  为氧分子数密度， $c$  为光速， $h = 2\pi\hbar$  为普郎克常数， $t_p$  为 532 nm 激光的脉宽， $I_L$ 、 $\omega_L$  分别为 532 nm 激光的强度和频率， $I_r$ 、 $\omega_s$  分别为 580 nm 激光的强度和频率， $\omega_0^0$ 、 $\Gamma_0^0$  分别为  $X^3\Sigma_g^-(v'' = 1)$  和  $X^3\Sigma_g^-(v'' = 0)$  能级间的本征频率和频率加宽。

序列脉冲激光中的第五个脉冲发射后，ArF 准分子激光以片状形式与序列脉冲激光正交照射高速空气流，从而在交叉点处获得荧光。每个荧光点的光强由下式计算<sup>[5]</sup>；

$$P_f = \frac{\lambda}{\lambda_f} \frac{L^2}{H} E(v) \frac{\pi e^2}{m_e c^2} n_{v''J''} \frac{S_{J'J''} T_{J'J''}}{2J'' + 1} \frac{A_{21}}{A_{21} + Q_r + Q_{sp}} \quad (3)$$

式中  $\lambda$ 、 $E(v)$  分别为 ArF 准分子激光器的激光波长和脉冲能量  $\lambda_f$  为荧光的平均波长， $m_e$ 、 $e$  分别为电子的质量和电量， $A_{21}/(A_{21} + Q_r + Q_{sp})$  为 sternvolumer 因子， $S_{J'J''}$  为 Honl-London 因子， $T_{J'J''}$  为振动项相互作用的修正系数，常取  $1^{[5]}$ ， $J'$ 、 $J''$  分别为氧分子上、下能级的转动量子数。这一系列的荧光点由 ICCD 相机摄下。各仪器启动的时序关系如图 1 所示。这样在 ArF 准分子激光片所在平面上，每 5 个荧光点间的位移就给出一个被测点的二维瞬时速度，同时可得到六个被测点的二维时速度，通过平移准分子激光照射位置，可以测得高速空气流不同位置处的二维瞬时速度。

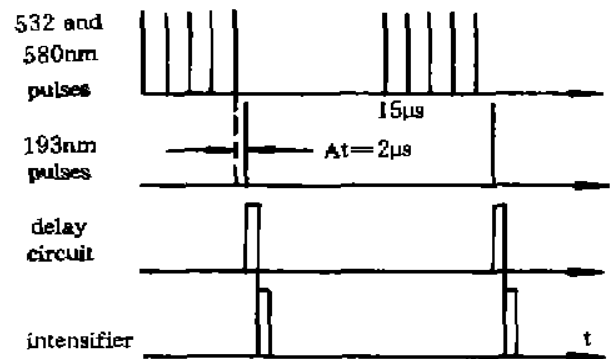


Fig. 1 The starting time orders among of all apparatus

### 3 主要仪器参数的确定

#### 3.1 ICCD 照相机的参数

对于带门电路像增强的 ICCD(CCD)，考虑实验要求及产品价格等因素，选择的带门电路的像增强器的流明增益  $G = 0.318 \times 10^6$  nit/lx，门路脉宽 100 ns，有效通光孔径  $\varnothing 17.5$  mm，

CCD 的灵敏度  $S_0 = 0.3 \text{ lx}$ , 因此要求像增强的光亮度  $B_0$  为:  $B_0 = S_0/G = 0.943 \times 10^{-6} \text{ nit}$ , 那么要求氧分子的荧光功率  $P_f$  由下式计算<sup>[5]</sup>:

$$P_f = \frac{1}{K_M} \frac{\pi^2 F_N^2 B_0}{T_L} L^2 \sin^2 \theta \quad (4)$$

式中  $F_N$  为荧光收集系统透镜的相对孔径倒数,  $T_L$  为光学透过率,  $K_M = 683 \text{ lx/W}$  为光功率当量,  $L$  为  $193 \text{ nm}$  激光作用在荧光截面上的长度,  $\theta$  为荧光截面法线与透镜光轴之间的夹角。

选  $F_N = 2.8$ ,  $T_L = 0.2$ ,  $L = 0.5 \text{ mm}$ , 透镜焦距为  $15 \text{ cm}$ , 对于尺寸为  $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$  的风洞, 最远测试点处的  $\sin \theta = 0.2218$  可求出氧分子荧光功率应达到  $P_f = 9.983 \times 10^{-16} \text{ W}$ 。

### 3.2 ArF 准分子激光器的参数

由氧分子的吸收光谱可知 B(4)-X(0) 的跃迁对 B(7)-X(1) 跃迁是很大的背景干扰<sup>[1,5]</sup>, 为了克服干扰, 就要求 ArF 准分子激光器输出的激光是窄线宽的, 线宽为  $1 \text{ cm}^{-1}$ , 激光波长可调谐, 调谐范围为  $192.8 \sim 193.8 \text{ nm}$ , 其脉冲能量的选择要考虑到荧光饱和强度和氧分子的高解能量 ( $1.9 \text{ J/cm}^2$ ), 假定光学系统的透过率为  $50\%$ , 那么 ArF 准分子激光器输出的激光脉冲能量为  $100 \text{ mJ}$ 。

### 3.3 序列脉冲倍频 Nd:YAG 激光器的参数

假定风洞速度范围为  $0.7 < M < 2.1$  ( $M$  为马赫数), 选择该激光器输出的激光脉冲间隔为  $15 \mu\text{s}$ , 为抑制高压氧气受激拉曼散过程中受激布里渊散射及减少其热效应和给高速空气带来的热效应等, 选  $532 \text{ nm}$  激光脉宽为  $2 \text{ ns}$ , 假定拉曼池长  $2 \text{ m}$ , 工作气压  $60 \text{ MPa}$ , 并考虑到受激拉曼激发  $Q$  支压力加宽和频移等, 取  $\Gamma_0 = 0.783 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\omega_0 = 1555 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\omega_L - \omega_s = 1554.768 \text{ cm}^{-1}$ , 联立方程 (1) ~ (4), 可求出  $532 \text{ nm}$  激光的脉冲能量为  $24.61 \text{ mJ}$ , 为提高信噪比, 选  $532 \text{ nm}$  序列脉冲激光的脉冲能量为  $40 \text{ mJ}$ 。

## 4 测量精度分析

影响速度测量精度因素有: 序列脉冲激光的脉冲间隔的抖动, 延时控制器的时间抖动, 荧光光斑大小的变化限制了 ICCD 相机的分辨率等。

序列脉冲时间间隔的抖动在  $1 \mu\text{s}$  量级, 并且通过取 5 个荧光点速度的平均, 引起的最大误差  $\Delta_1 = 1.48\%$ 。

延时控制器的时间抖动可做到  $2 \text{ ns}$ , 故它产生的误差可忽略。

限制 ICCD 相机分辨率的荧光光斑的大小主要由分子扩散决定。假定序列脉冲激光在高速气流中最初的聚焦光斑宽度  $w_0 = 0.2 \text{ mm}$ , 由于扩散作用, 经时间  $t$  后, 光斑宽度变为  $w$ :

$$w = (w_0^2 + 4tD)^{1/2} \quad (5)$$

式中  $D$  为分子扩散系数, 假定光斑可分辨的大小为  $0.1 w$ , 那么速度测量误差  $\Delta_2$  为:

$$\Delta_2 = 0.1 w/vt \quad (6)$$

式中  $v$  为空气流速度。假定 ICCD 启动与 ArF 激光脉冲的时间延迟为  $2 \mu\text{s}$ , 那么测量一个截面所用的时间  $t = 17 \mu\text{s}$ , 在  $1 \text{ MPa}$  下, 空气的扩散系数  $D = 0.21 \text{ cm}^2/\text{s}$ , 在  $0.7 < M < 2.1$  的速度范围内, 最大误差  $\Delta_2 = 0.50\%$ 。因此速度测量的误差  $\Delta = (\Delta_1^2 + \Delta_2^2)^{1/2} = 1.56\%$ 。

**结 论** 通过理论计算证明, 修正的拉曼激发激光感应电子荧光方法克服了拉曼激发激光感应电子荧光方法中的两标记线间的时间间隔过长的问题, 能够实现对亚音速和超音速空气流

的多点二维瞬时速度的高精度、快速测量，具有极大的实用价值。该课题得到了航空部有关专家和领导的重视，被列为航空部合作项目，具体实验正在进行之中。

衷心感谢航空研究院樊玉辰高工、刘家杰高工，航空部 611 所胡同研究员，航空部 626 所李光里高工，宋志安高工在课题研究所给予的指导和帮助。

### 参 考 文 献

- [1] R. Miles, C. Cohen, J. Connors *et al.*, Velocity measurements by vibrational tagging and fluorescent probing of oxygen. *Opt. Lett.*, 1987, 12(11): 861~863
- [2] R. B. Miles, John Connors, Edward Markovitz *et al.*, Instantaneous supersonic velocity profiles in an underexpanded sonic air jet by oxygen flow tagging. *Phys. Fluids (A)*, 1989, 1(2): 389~393
- [3] R. B. Miles, J. J. Connors, E. C. Markovitz *et al.*, Instantaneous profiles and turbulence statistics of supersonic free shear layers by Raman excitation pulse laser-induced electronic fluorescence velocity tagging of oxygen. *Experiments in Fluids*, 1989, 8: 17~24
- [4] Y. R. Shen, *The Principles of Nonlinear Optics*, John Wiley Sons, Inc., 1984
- [5] 郑义, 基于序列脉冲-O<sub>2</sub> 拉曼激发激光感应电子荧光(YRELIEF)法用于风洞流场测量的研究。博士学位论文, 天津:天津大学精仪系, 1993 年

## Study on Instantaneous Velocity Measurement of High Speed Air Flow by Modified RELIEF Method

Zheng Yi      Yao Jianquan      Fang Xiaojun  
Shi Xiangchun      Wu Feng

(*Institute of Laser and Opto-Electronics, Tianjin University, Tianjin 300072*)

(Received 2 July 1995)

**Abstract** The Raman excitation plus laser-induced electronic fluorescence (RELIEF) method has been modified, so that it can be applied in measuring the multiple points instantaneous velocities of a supersonic or subsonic air flow. The measurement accuracy is better than two per cent.

**Key words** the modified RELIEF method, high speed air flow, instantaneous velocity, tagged line.