

doi:10.3788/gzxb20154401.0112004

基于法布里-珀罗干涉仪的瑞利散射测速技术研究

陈力, 杨富荣, 苏铁, 鲍伟义, 齐新华, 陈爽

(中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 基于法布里-珀罗干涉仪的干涉瑞利散射测速技术原理, 结合种子注入 Nd:YAG 脉冲激光器、ICCD 相机和高光谱分辨法布里-珀罗干涉仪, 建立了一套干涉瑞利散射速度测量系统, 系统的速度测量准确度为 10 m/s. 对拉瓦尔喷管产生的超声速自由射流开展干涉瑞利散射速度测量, 得到气流的流动速度为 366 m/s. 在不需要外加任何示踪粒子的条件下, 利用流场气体分子本身的瑞利散射, 实现了对超声速流场速度的非接触测量.

关键词: 法布里-珀罗干涉仪; 瑞利散射; 超声速流动; 速度; 测量

中图分类号: O436; O353.5

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)01-0112004-4

Interferometric Rayleigh Scattering Velocimetry Using a Fabry-Perot Interferometer

CHEN Li, YANG Fu-rong, SU Tie, BAO Wei-yi, QI Xin-hua, CHEN Shuang
(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: The working principles of Interferometric Rayleigh scattering velocimetry using a Fabry-perot interferometer is presented. An interferometric Rayleigh scattering velocimetry apparatus consisted of a high resolution F-P interferometer, an injection-seeded Nd:YAG laser and an intensified CCD was developed. In theory, the measurement uncertainty of velocity is 10 m/s, the recommendations for system improvements were given. Non-intrusive measurement of velocity in unseeded gas flow is performed to demonstrate this technique, flow velocity of 366 m/s was obtained in a supersonic free air jet flow.

Key words: Fabry-perot interferometers; Rayleigh scattering; Supersonic flow; Velocity; Measurement

OCIS Codes: 120.0120; 120.2230; 120.3180; 120.5820; 120.7250

0 引言

流体的流动速度是流场最为基本的物理量, 对流动特征的认识很大程度上取决于速度场的获得, 因此速度场测量在实验流体力学和空气动力学研究中具有十分重要的意义. 流场速度测量技术从 20 世纪 40 年代起已经作为一种专门的学问而存在, 1914 年, 人们在热交换原理基础上发明了热线热膜流速计 (Hot Wire/hot Film Anemometry, HWFA)^[1], 为湍流的测量和研究做出了贡献, 但这项技术是接触式测量, 对流场存在一定的干扰. 随着激光技术的发展和激光多普勒原理的发现, 在 20 世纪 60 年代, 人类第一次将激光

技术和流场速度测量联系起来^[2], 发明了激光多普勒测速仪 (Laser Doppler Velocimetry, LDV), 实现了对流场速度的非接触测量. 激光多普勒测速技术以准确度高、线性度好、动态响应快、测量范围大、非接触测量等特点, 在流体力学各分支中获得了广泛应用^[3], 但该技术速度测量时需要添加示踪粒子, 受粒子添加技术及示踪粒子本身跟随性的影响, LDV 在高速非定常流动的速度测量中受到较多的限制. 为适应超声速、高超声速复杂流动速度测量需求, 20 世纪 90 年代, 出现了一种干涉瑞利散射 (Interferometric Rayleigh Scattering, IRS) 测量技术, 其通过对流场气体分子瑞利散射的光谱分析, 在不需要外加示踪粒子条件下, 实

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11272337) 资助

第一作者: 陈力 (1980—), 男, 助理研究员, 硕士, 主要研究方向为光谱诊断、流动显示. Email: chenli_03@163.com

收稿日期: 2014-05-26; **录用日期:** 2014-08-03

<http://www.photon.ac.cn>

现了对流场速度等参量的非接触测量^[4-12]. 由于 IRS 技术不需要外加示踪粒子, 同时具备测量参量多(可同时测量速度、温度、数密度)、准确度高、线性度好、动态响应快、测量范围大、非接触测量等特点, 在流场测量, 尤其是超声速、高超声速非定常复杂流动测量中应用潜力巨大. 本文介绍了基于法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉仪的 IRS 测速技术的基本原理, 并结合窄线宽脉冲激光光源和 ICCD 相机, 建立了 IRS 实验系统, 实现了对超声速射流速度的非接触测量.

1 基本原理

当一束激光投射到流场中时, 会伴随光散射现象, 由于可见光波长远大于气体分子线度, 因此流场气体分子弹性散射属于瑞利散射范畴, 如图 1. 当流场气体分子存在一定运动速度时, 散射光将相对于入射激光发生一定的频移, 频移的程度反应了流场的速度信息; 由于流场气体分子本身大量的无规则热运动, 瑞利散射谱线也将明显展宽, 谱线的宽度包含着流场的温度信息; 此外, 瑞利散射信号的强度直接反应了流场的密度信息, 因此可以通过对包含着丰富信息的瑞利散射信号的准确测量和分析, 实现对流场的速度、密度和温度的定量测量.

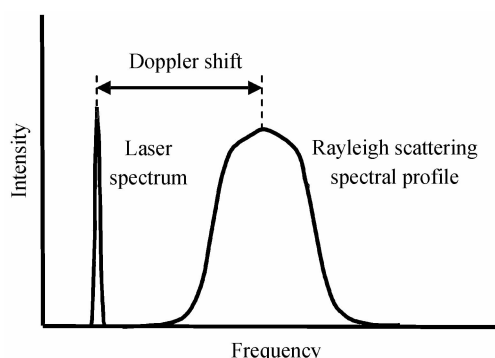


图 1 流场气体分子瑞利散射光谱线型

Fig. 1 Rayleigh scattering spectral profile from gas molecules

根据多普勒效应, 当激光光源和气体分子发生相对运动时, 经运动气体分子散射后的激光相对于入射激光将产生一定的多普勒频移 $\Delta\nu_D$, 其大小与运动气体的速度 V 、散射光与入射光之间的夹角 θ 有关(图 2), 可表示为

$$\Delta\nu_D = \frac{1}{\lambda} (\mathbf{S} - \mathbf{L}) \cdot \mathbf{V} = \frac{2 \sin \frac{\theta}{2}}{\lambda} V_k \quad (1)$$

式中 λ 为入射激光波长, \mathbf{S} 为散射方向单位矢量, \mathbf{L} 为激光入射方向单位矢量, V_k 为流场速度 \mathbf{V} 在 $\mathbf{S} - \mathbf{L}$ 方向的分量. 由式(1)即可通过测量激光的多普勒频移来获得流场的速度信息.

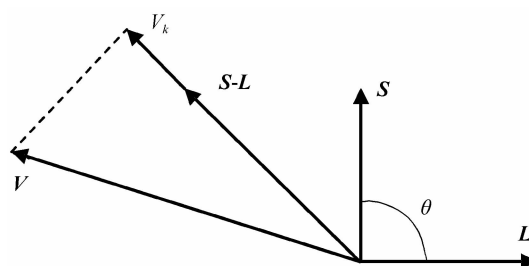


图 2 多普勒频移几何示意图

Fig. 2 Geometry of doppler shift

对于波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 的激光, 当散射光与入射光之间的夹角 $\theta = 90^\circ$ 时, 利用式(1)估算出 $V_k = 100 \text{ m/s}$ 引起的多普勒频移为 265 MHz , 其对应的波长偏移只有 0.00025 nm . 为准确测量流场速度引起的多普勒频移量, 获得高精度流场速度, 采用多光束干涉原理的 F-P 干涉仪.

F-P 干涉仪利用多光束干涉产生细锐条纹且条纹十分清晰明锐, 是研究光谱线超精细结构的强有力工具^[13]. 根据 F-P 干涉仪的工作原理, 当波长为 λ 的单色激光经光学透镜形成平行光照射到 F-P 干涉仪后, 透过 F-P 干涉仪的多光束将在像平面形成非常明锐的干涉圆环, 形成亮环的条件为

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} nh \cos i = 2k\pi \quad (2)$$

式中: δ 为相邻两束透射光之间的相位差, n 为干涉仪介质折射率, h 为两平面之间的距离, i 为光束与光轴的夹角, k 为整数. 对于波长 λ , 当成像透镜焦距为 f 时, 第 k 级亮环的半径可近似表示为

$$r_k \approx \sqrt{2 - \frac{k\lambda}{nd}} f \quad (3)$$

当流场速度引起的多普勒频移, 使得进入 F-P 干涉的激光波长由 λ 变为 $\lambda + \Delta\lambda$ 时, 第 k 级亮环的半径可近似表示为

$$r'_k \approx \sqrt{2 - \frac{k(\lambda + \Delta\lambda)}{nd}} f \quad (4)$$

由式(3)和(4), 通过测量干涉圆环半径 r_k 及 r'_k , 即可获得 $\Delta\lambda$, 进而获得流场速度 V_k .

2 实验研究

2.1 实验装置

基于 F-P 干涉仪的瑞利散射测速装置主要由激光光源、散射光收集传输光路、F-P 干涉仪、同步时序控制器及 ICCD 相机组成. 如图 3 所示, 激光器为种子注入 Nd:YAG 激光器, 提供波长为 532 nm 的窄线宽脉冲光源, 激光器输出的激光经透镜 L_1 会聚后照射被测流场, 流场的散射光经透镜组 L_2 和 L_3 耦合进入一芯径 $400 \mu\text{m}$ 的光纤, 经光纤传输后的散射光通过透镜 L_4 形成平行光后照射 F-P 干涉仪, 由透镜 L_5 将多光

束干涉形成的干涉圆环成像至 ICCD 相机,整个速度测量装置的同步时序控制由一台 DG535 实现.当流场速度为 0 时,进入 F-P 干涉仪的散射光的波长与激光器输出的激光波长均为 λ ,在不考虑气体分子热运动引起瑞利散射谱线展宽的条件下,其在 F-P 干涉仪像平面将形成一系列同心干涉圆环;当流场存在一定速度时,由多普勒效应,进入 F-P 干涉仪的散射光波长将变为 $\lambda + \Delta\lambda$,其在 F-P 干涉仪像平面形成同心干涉圆环半径将随之改变,图 4 给出了波长分别为 λ 和 $\lambda + \Delta\lambda$ 的单频激光器在 F-P 干涉仪像平面形成的不同级次干涉圆环的示意图,实验中,通过分析同一级次干涉圆环半径的变化,即可获得流场速度引起散射光波长(频率)的改变量,进而获得流场的速度.

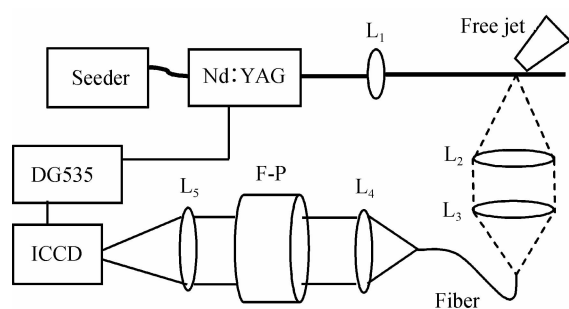


图 3 干涉瑞利散射测速装置

Fig. 3 Experiment schematics of interferometric Rayleigh scattering velocimetry

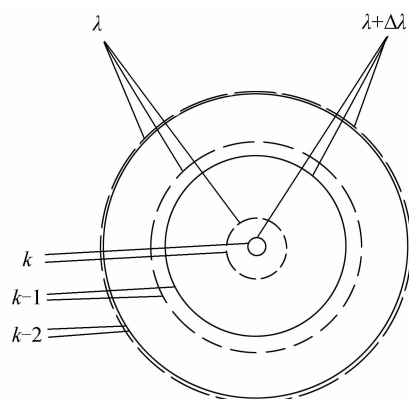


图 4 不同波长激光经 F-P 干涉仪形成的同心干涉圆环

Fig. 4 Concentric rings from F-P interferometer with different wavelength

2.2 系统速度测量准确度的理论分析

在图 3 所示的基于 F-P 干涉仪的瑞利散射测速系统中,种子注入 Nd:YAG 激光器输出的激光线宽小于 100 MHz, F-P 干涉仪的通光口径为 25 mm,端面反射率 97%,自由光谱范围约 10.267 GHz,成像透镜 L_5 的焦距为 1000 mm.为分析系统的速度测量准确度,模拟计算了不同波长的激光,经过 F-P 干涉仪多光束干涉后,在像平面上的光强分布.为减少计算时间,仅计算了干涉图像一维强度分布,计算中,散射光与入射激光的夹角为 90° ,激光光源线宽为 50 MHz.由于气体分

子本身热运动的影响,收集到的瑞利散射谱线相对于入射激光将有明显展宽,在超声速流动实验中,气体分子的瑞利散射光谱展宽可近似用高斯线型描述.

图 5 给出了中心波长分别为 532.000 0 nm、532.000 025 nm、532.000 05 nm,半宽为 2.4 GHz 的三束激光经 F-P 干涉仪成像后,中心级次干涉条纹光强的一维分布.从图 5 中可以看到,受气体分子热运动影响,像平面干涉条纹较宽;随着激光波长增加,中心级次干涉圆环半径变小,无论是直接找干涉强度极大值,还是通过干涉条纹半宽获取干涉条纹的极大值位置,均能够获得 0.000 025 nm 波长间隔(相当于 $V_k = 10$ m/s 引起波长改变量)的两束激光在像平面引起的干涉条纹偏移量约 $14 \mu\text{m}$,而系统中 ICCD 的像元尺寸为 $13 \mu\text{m}$,完全能够将两束激光区分开.即现有基于 F-P 干涉仪的瑞利散射测速系统的速度测量准确度约为 10 m/s,通过提高 F-P 干涉仪的反射率,使用像源尺寸更小的 ICCD 相机等措施,还可进一步提高系统的速度测量准确度.

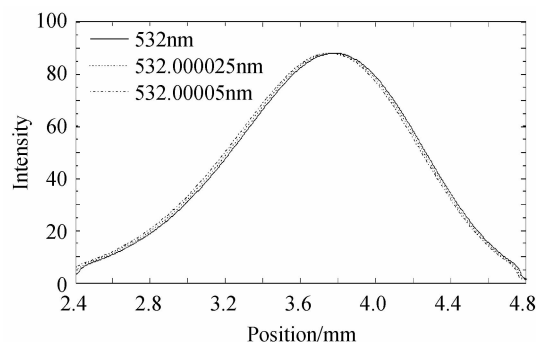


图 5 气体分子瑞利散射 F-P 干涉图一维强度分布计算结果

Fig. 5 Theory intensity profile of F-P interferogram from molecules Rayleigh scattering

2.3 超声速流场速度测量实验

利用图 3 所示的基于 F-P 干涉仪的瑞利散射测速装置,在实验室开展了超声速流场速度测量实验.实验时,高压压缩空气气源经过一出口直径为 5 mm 的拉瓦尔喷管形成超声速自由射流,喷管的轴线方向与入射激光之间的夹角为 45° ,散射光收集方向与入射激光成 90° 夹角,经超声速气流散射的瑞利散射信号经光纤传输并形成平行光后,进入 F-P 干涉仪形成多光束干涉,干涉图像由 ICCD 相机记录.对于静止流场,散射光的中心频率与入射激光相同,当流场存在一定速度时,由于多普勒效应,散射光的中心频率相对于入射激光频率将会产生一定偏移.为了准确测量出流场速度引起的频率偏移量,实验前首先采集了环境空气及悬浮于空气中的灰尘粒子散射光经 F-P 干涉仪后形成的干涉圆环,其中心频率与入射激光相同,被定义为参考信号;当拉瓦尔喷管稳定工作后,采集超声速射流散

射光经系统后形成的干涉圆环,通过将流场瑞利散射光形成的干涉圆环同参考干涉圆环相比较,即可获得流场速度引起的频率偏移量.图 6(a)和图 6(b)分别给出了参考激光和超声速流场瑞利散射光经 F-P 干涉仪成像后形成同心干涉圆环,图 6(c)进一步给出了同心圆环圆心所在行在水平方向的强度分布,由图 6(c)得出散射光相对于入射激光的频率偏移量为 973MHz,进一步解算出被测流场气流速度约为 366 m/s.

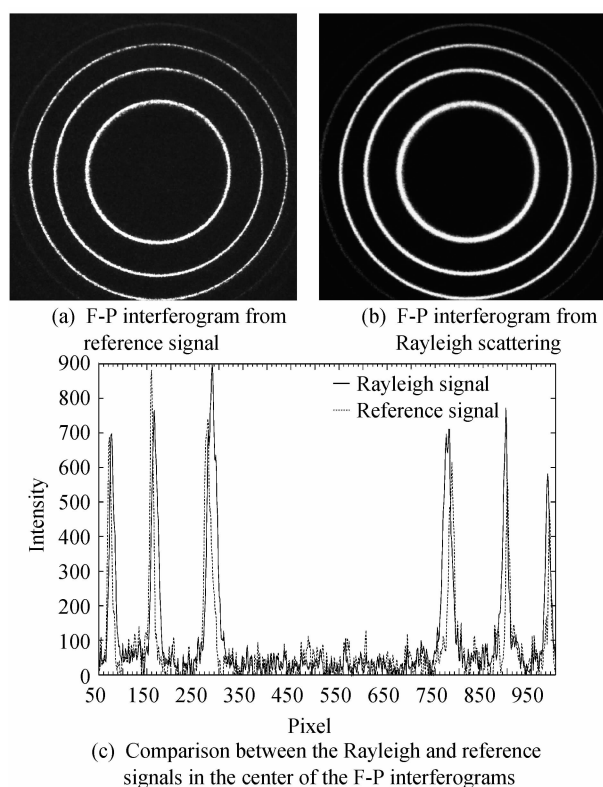


图 6 参考激光和超声速流场瑞利散射干涉同心圆环对比图
Fig. 6 Comparison between the F-P interferograms from reference signal and Rayleigh scattering

3 结论

利用种子注入 Nd:YAG 脉冲激光器提供的窄线宽激光光源,结合具有超高光谱分辨本领的 F-P 干涉仪和 ICCD 相机,设计了一套干涉瑞利散射速度测量系统.通过理论分析,现有系统的速度测量准确度为 10 m/s,通过提高 F-P 干涉仪的反射率,使用像源尺寸更小的 ICCD 相机等措施,可进一步提高系统的测速准确度.开展了基于 F-P 干涉仪的瑞利散射速度测量

实验,在不需外加任何示踪粒子的条件下,实现了超声速流场速度的非接触测量.

参考文献

- [1] 盛森之,徐月亭,袁辉靖. 热线热膜流速计[M]. 北京:中国科学技术出版社,2003:3-8.
- [2] YEH Y, CUMMINS H Z. Localized fluid flow measurements with an He Ne laser spectrometer [J]. *Applied Physics Letters*, 1964, **4**(10): 173-178.
- [3] 沈熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:184-280.
- [4] LOCK J A, SEASHOLTZ R G, JOHN W T. Rayleigh-brillouin scattering to determine one-dimensional temperature and number density profiles of a gas flow jet[J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(15): 2839-2848.
- [5] SEASHOLTZ R G, ZUPANC F J, SCHNEIDER S J. Spectrally resolved Rayleigh scattering diagnostic for hydrogen-oxygen rocket plume studies[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1992, **8**(5): 935-942.
- [6] SEASHOLTZ R G, BUGGELE A E, REEDER M F. Instantaneous flow measurements in a supersonic wind tunnel using spectrally resolved Rayleigh scattering[C]. SPIE, 1995, international symposium on optical science, engineering, and instrumentation, San Diego, July 9-14.
- [7] SEASHOLTZ R G, BUGGELE A E, REEDER M F. Flow measurements based on Rayleigh scattering and Fabry-Perot interferometer[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1997, **27**(6): 543-570.
- [8] SEASHOLTZ R G, GREER L C. Rayleigh scattering diagnostic for measurement of temperature and velocity in harsh environments[C]. AIAA, 1998, AIAA-98-0206, 36th Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, 1998.
- [9] BIVOLARU D, DANEHY P M, *et al.* Direct-view multi-point two-component interferometric Rayleigh scattering velocimeter [C]. AIAA, 2008, AIAA-2008-0236, 46th Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January 9-12, 2008.
- [10] BIVOLARU D, DANEHY P M, LEE J W. Intracavity Rayleigh-Mie scattering for multipoint, two-component velocity measurement[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(11): 1645-1647.
- [11] BIVOLARU D, DANEHY P M, LEE J W, *et al.* Single-pulse multi-point multi-component interferometric Rayleigh scattering Velocimeter[C]. AIAA, 2006, AIAA-2006-0836, 44th Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January 9-12, 2006.
- [12] MIELKE A F, CLEM M M, ELAM K A. Rayleigh scattering measurements using a tunable liquid crystal Fabry-Perot interferometer[C]. AIAA, 2010, AIAA-2010-4350, 27th Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, Chicago, Illinois, 2010.
- [13] 郭永康. 光学[M]. 北京:高等教育出版社,2005:180-186.