

多普勒全场测速技术的进展*

张洪军^{1,†} 吕进²

¹ 中国计量学院计量测试工程学院, 杭州 310018
² 上海理工大学光电子信息工程学院, 上海 200093

摘要 多普勒全场测速 (Doppler global velocimetry) 是一种基于分子滤波原理来测量散射光多普勒频移, 从而测量平面内流动速度场的技术, 主要应用于流体力学、空气动力学和燃烧学实验研究中, 尤其适用于较高马赫数流场测量. 研究人员也称其为平面多普勒测速 (planar Doppler velocimetry)、吸收-滤波平面多普勒测速 (Absorption filtered planar Doppler velocimetry)、滤波瑞利散射技术 (filtered Rayleigh scattering) 等. 本文对多普勒全场测速技术的工作原理、结构组成、数据处理、发展趋势等进行了比较全面的介绍.

关键词 多普勒全场测速, 平面多普勒测速, 分子滤波, 流动测量, 散射

1 引言

20 世纪 60 年代以来, 许多种光学测量技术在流体力学和燃烧学研究中获得了应用, 例如 Schlieren 光学系统, X 光技术, 激光多普勒测速仪 (laser Doppler velocimetry, LDV), 粒子成像测速仪 (partical image velocimetry, PIV), 分光技术 (spectroscopic techniques) 等. 这些非接触式流动测量技术大大推动了流体力学和燃烧学的发展^[1~3].

在基于激光的流动测试技术中, 目前应用最广的技术之一是 LDV, 其发展比较成熟, 早已进入商业化应用阶段. LDV 面临的重大问题在于这是一个单点测量技术, 不能进行瞬时流场结构的测量. 另外, 用于大型风洞测量时, 光路校正比较困难, 而且当发射光和接收光镜头距离比较远时, 信号强度减弱会影响测量速度范围, 这些不足之处在一定程度上限制了其应用. 将激光束变成激光面并对该激光面空间点上的流动参数进行同时测量, 则为基于激光的全场测速技术.

在进一步论述之前, 有必要讨论一下全场测速技术的分类. 从速度测量的原理来划分, 各种非接触式全场测速技术可分为两大类^[4]: (1) 依赖时间、位移转换的直接测速方法, 即通过测量一定时间间隔内流体体元的位移, 根据定义直接计算速度; (2) 利用

多普勒效应的间接测量方法, 即通过测量流体体元运动引起的光波频率等变化, 间接获得速度. 另外, 按表征流体体元所用的示踪物质不同, 可分为粒子示踪和分子示踪技术.

目前应用最广的平面速度场测量技术是粒子成像测速 (PIV). PIV 采用粒子示踪, 通过测量两个相邻时间图像中粒子的位移 (时间间隔已知) 来进行速度测量 (因此 PIV 属于第一类全场测速方法). 对于高速流动来说, 为了满足跟随性要求, 示踪粒子要非常小, 这导致粒子的散射光可能太弱以至于难以一般为 PIV 系统中的检测镜头所正常检测到. 另外, 垂直于片光的速度分量可能破坏 PIV 图像之间的相关性. 这是因为第 1 幅图像中某个粒子由于向外的运动在第 2 幅图像中离开了片光, 这个问题在强三维流场中不可避免会遇到. 当然, 人们已经找到了解决的办法——立体图像/全息 PIV 系统, 以及其它三维技术^[4~7]. 全息 PIV 系统可以提供真正意义上全场测量, 但是立体镜和全息照相等 PIV 扩展技术使得测量系统和数据处理变得相当复杂^[8,9]. 还有一个问题, 如果要获得流场的平均速度分布, 就要采集和处理大量的 PIV 图像. 尽管现代计算机性能大为提高, 这也是一项很费时的工作, 而且其所需存储大量的数据往往会超出计算机的存储能力.

分子示踪技术中, 激光诱导荧光 (laser induced

收稿日期: 2005-07-13, 修回日期: 2007-07-18

* 浙江省科技支撑和引导计划资助项目 (2007C21076)

† E-mail: zhanghongjun@cjlu.edu.cn

fluorescence, LIF) 测速技术比较具有代表性 [4,5]。LIF 测速技术工作原理有基于位移 - 时间关系和多普勒效应两种, 其中基于多普勒效应的 LIF 受到了更多的重视, 正如文献 [4] 中所描述: “这种激光诱导荧光全场测速技术是一种分子吸收线频移与荧光辐射线强度变化相结合的综合处理方法。当用窄带激光照射运动的流体时, 由于多普勒效应使流体中的分子吸收线发生多普勒频移, 从而引起分子吸收激光效率的改变, 这一效应反映在荧光辐射中就是辐射线的强度发生变化。因此, 分子吸收线的多普勒频移量可通过探测其宽带荧光辐射的强度变化来获得。”这种方法不仅能够测量流体流动速度, 还可以进行压力、密度和温度测量, 具有良好的发展前景。这种方法在实际应用中的主要限制是分子吸收线和激光光谱的匹配问题。一般在气流场的研究中用吸收线在可见光谱范围的分子(或原子), 只有某些种类物质能够满足这一要求, 如碘、钠等。而在大尺度开放流场测量中, 这些示踪物质的添加会受到各种各样的条件限制(如毒性、腐蚀性、环境污染等)。另外, 这种方法速度分辨率较低, 不适合于低速测量。

20 世纪 90 年代出现了一种新的多普勒全场测速技术 (Doppler global velocimetry, DGV)^[10,11], 这是一种基于分子滤波原理来测量散射光多普勒频移从而进行流动速度场测量的技术。DGV 使用一个窄带激光来照亮流场中的某一平面。流场图像经过分子滤波器后由一相机采集(信号图像)。同时该图像在不经过滤器的情况下被另外一个相机——参考相机所采集(参考图像)。分子滤波器内装有吸收分子, 该分子具有和激光光谱相匹配的吸收带, 这就形成了一个具有有限长度斜边的透射率曲线, 通过滤波器的光谱强度和光的频率有关。流场中粒子运动所产生的多普勒频移会使得信号相机接收到的光强发生变化。这样粒子移动引起的多普勒频移就可以通过信号图像与参考图像光谱强度的相对变化得到, 而反过来粒子速度(即流动速度)可以由频移计算出。

对于 DGV 来说, 图像分辨率不是非常重要, 这对于一些光学变形不可避免的情况非常具有吸引力。由于 DGV 不是通过个别示踪粒子的运动来获得某点速度, 因此对于大型设备内流场测量具有优势, 同时 DGV 在高马赫数测量方面优于 PIV 技术, 而且可以对激光平面内各点的三维速度进行快速的采集和处理(几乎是在线的)。

对于这种基于分子滤波原理的测量技术有许多不同的称谓, 如平面多普勒测速仪(planar Doppler velocimetry, PDV^[12,13])、滤波平面测速(filter planar velocimetry)^[14]、吸收 - 滤波平面多普勒测速(ab-

sorption filter-planar Doppler velocimetry)^[15]、滤波瑞利散射技术(filtered Rayleigh scattering)^[16]、多普勒全场测速(Doppler global velocimetry, DGV)^[10,11]。尽管每一种称谓强调了该项技术的某一方面特点, 但是从文献中看, DGV 这个名称比较贴切, 而且其英文缩写与其它技术不会形成混淆。DGV 是一项新技术, 从产生到现在只有十几年的时间, 但是发展非常快, 也是目前流体力学测量技术研究的一个热点。DGV 技术为全场高速流动(例如超音速流动)、流场内多参数实时测量提供了一个新的、强有力的工具, 对空气动力学、燃烧学等研究具有非常重要的意义。本文将对 DGV 的工作原理、结构组成、数据处理、应用和发展趋势进行比较全面的介绍。

2 DGV 工作原理

2.1 基本原理

DGV 的基本工作原理是测量运动粒子散射光的多普勒频移。与 PIV、LDV 等测量技术一样, DGV 测量中也需要示踪粒子(尽管流体中自然存在一些散射分子或粒子, 但是其散射强度一般满足不了测量要求)。当激光被移动粒子散射时, 会产生多普勒频移, 根据多普勒频移公式有:

$$\Delta f_D = \frac{1}{\lambda}(\hat{o} - \hat{i}) \cdot \mathbf{V} \quad (1)$$

其中, \hat{o} 和 \hat{i} 分别是接收和发射光单位矢量, \mathbf{V} 是流动速度矢量, λ 是入射光波长。图 1 给出了几个方向的几何关系。

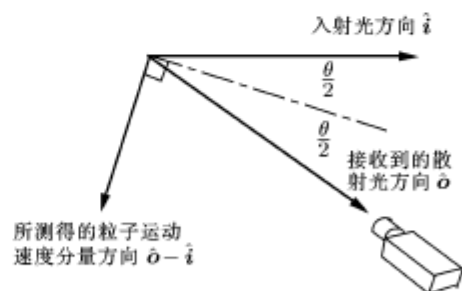
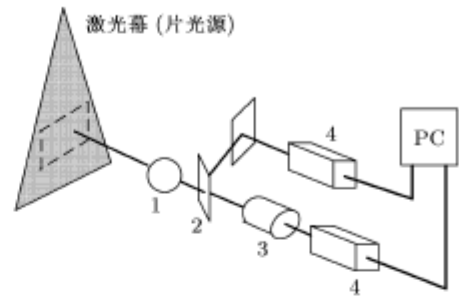


图 1 多普勒频移几何关系

DGV 使用一个窄带激光来照亮流场中的某一平面(图 2)。平面上流场图像经过分子滤波器后由一相机采集(称为信号相机和信号图像)。同时, 该图像在不经过滤器的情况下被另外一个相机——参考相机所采集, 称为参考图像。分子滤波器是一个两端开窗的玻璃圆筒, 内装吸收分子, 该分子具有能够与激光光谱相匹配的吸收带, 这就形成了一个具有有限长度斜边的透射率曲线(图 3(a))。图 3 中 I_v/I_{0v} 是

分子滤波器的光谱透射率, I_v 定义为通过滤波器后的光谱强度 (在频率 v 处), I_{0v} 为滤波器之前的光谱强度. 通过滤波器的光谱强度是散射光的光谱强度与滤波器分子吸收线的卷积. 举个例子, 假设激光频率 f_0 刚好处于透射率曲线的中点. 散射光由于多普勒频移其频率发生变化使得透射率发生变化 (增大或减小). 信号相机的每一个像素记录了积分光谱强度, $I = \int I_v dv$. 参考相机采集了未通过滤波器的流场图像, 即未经滤波器的积分光谱强度 I_0 ($I_0 = \int I_{0v} dv$). 某一像素上信号光强度 (I) 除以参考光强度 (I_0) 就得到通过滤波器的积分透射率 (T_R). 图 3(b) 给出了以积分透射率为自变量, 频移 (或频率函数 ζ) 为因变量的变化图. 实际测试中, 一旦每个像素点上的透射率通过两个相机信号对比得到后, 多普勒频移就可以根据滤波器的频率函数计算出, 根据公式 (1), 该像素上的流动速度也可以由频移计算出. 公式 (1) 指

出, 所测量的多普勒频移与入射光方向和观察者 (散射光接收探头) 方向有关. 由此出发, 采取进一步措施就可以进行多分量测量——从不同角度来观察, 或从多个角度来照射流场 [17,18].



1-偏振镜; 2-分光镜; 3-分子滤波器; 4-CCD 相机

图 2 DGV 光学系统示意图

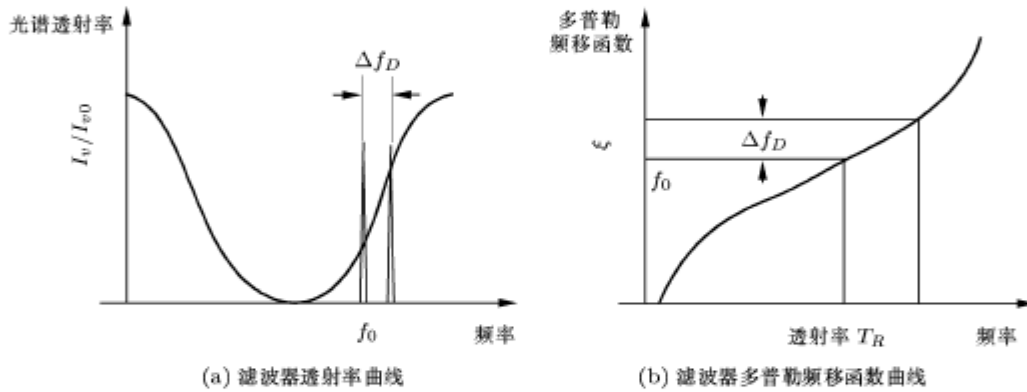


图 3

2.2 粒子和分子散射

为了更好地理解 DGV 技术, 有必要介绍一下粒子和分子散射.

所有的分子滤波技术都是针对流体中示踪粒子或分子的散射光. 散射是在入射光线遇到粒子或分子的干扰而产生的. 当散射发生时, 光能的一部分以粒子为中心朝各个方向辐射出去. 图 4 给出了目前分子滤波测量技术中普遍存在的两种散射——粒子瑞利/米氏 (Rayleigh/Mie) 散射和分子瑞利 (Rayleigh) 散射. 通常根据粒子相对尺寸分为米氏散射和瑞利散射 (尽管米氏散射理论完全可以涵盖瑞利散射范围). 一般定义米氏散射粒子直径大于入射光波长 (λ) 的 $1/10$, 瑞利散射定义为粒子直径小于入射光波长 (λ) 的 $1/10$ [19].

根据粒子大小, 粒子散射可以为米氏散射也可以是瑞利散射. 在米氏范围, 散射光强度分布是一个有主方向的叶子形状 (图 4(a)). 这些散射光的分布形状将依赖于粒子尺寸、入射光波长和偏振. 需要指出

的是, 如果是线偏振光, 则米氏散射在与入射光偏振垂直的方向趋近于零; 如果是瑞利散射, 散射图案是以偏振方向为中心轴的纺锤形 (图 4(b)). 对于分子滤波技术, 不仅散射光强度重要, 其他相关信息, 如偏振、光谱成分等, 都不能忽视.

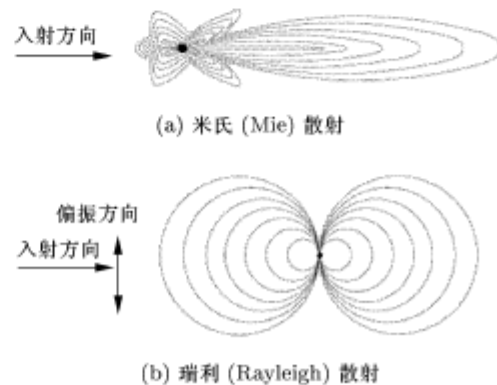


图 4 粒子散射光强度分布示意图

对于粒子散射, 两个光谱特性比较重要: (1) 散射光光谱基本不会由于热运动而变宽, 因此, 同入射

光的光谱宽度几乎相同 (图 5(a)); (2) 粒子的 Mie 或 Rayleigh 散射伴随多普勒频移 (由公式 1 确定).

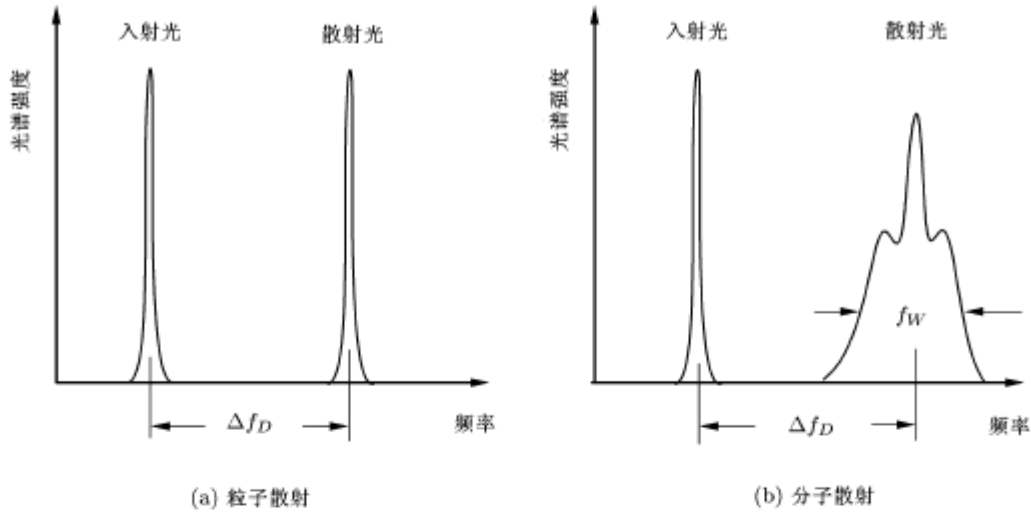


图 5 粒子散射和分子散射谱线的区别

另一种用于分子滤波技术是分子 Rayleigh 散射. 分子散射光处于这一区域, 如果入射光为线偏振光, 则散射光图案为纺锤形 (如图 4(b)). 对于瑞利散射, 散射光强度和散射粒子当量直径的 6 次方成正比, 和入射光波长的 4 次方成反比 [19]. 由于如此依赖于波长, 所以当采用更短的波长时, 可以大大提高散射光的信号强度.

与粒子散射不同, 分子散射受流体分子热运动的影响, 分子散射光的光谱与入射光光谱相比发生改变 (图 5(b)), 产生“热加宽”. 散射光强度和分子浓度成正比. 瑞利散射的频率带宽是温度 (分子热运动) 的函数 [20]

$$f_w = \frac{2 \sin(\theta/2)}{\lambda} \sqrt{\frac{8kT \ln(2)}{M}} \quad (2)$$

其中, λ 是入射光波长, θ 是入射光和散射光矢量之间的夹角, k 是波尔兹曼常数, T 是气体温度, M 是分子量. 散射光谱的谱形受 y -参数控制, y -参数是分子浓度的函数, 决定布利渊 (Brillouin) 散射是否发生. 关于 y -参数的计算可参阅文献 [13].

因为分子散射谱线形状与温度、浓度等有关, 所以分子散射技术可以用来进行流场中温度、浓度等热力学参数测量. 而就目前速度场测量来说, 很多研究者采用的是粒子散射 [21,22], 这是因为除了超音速流动以外, 流动速度引起的频移比分子散射“热加宽”的频率宽度小 (例如, 使用 Nd:YAG 激光, 速度频移为 2.66 MHz/m·s, 而大气压力下温度加宽为 1.83 GHz [21]), 不利于频移检测. 但是, 必须指出的是, 对于超高速流动, 分子散射和分子示踪流速测

量技术优势明显, 这也是 DGV 与 PIV 相比的主要优点之一.

2.3 碘分子吸收

碘蒸气比较适合于分子滤波的需要. 碘分子的吸收谱线如图 6 所示, 图 6(a) 选取的是适合于氩离子激光的波数范围; 图 6(b) 选取的是适合于

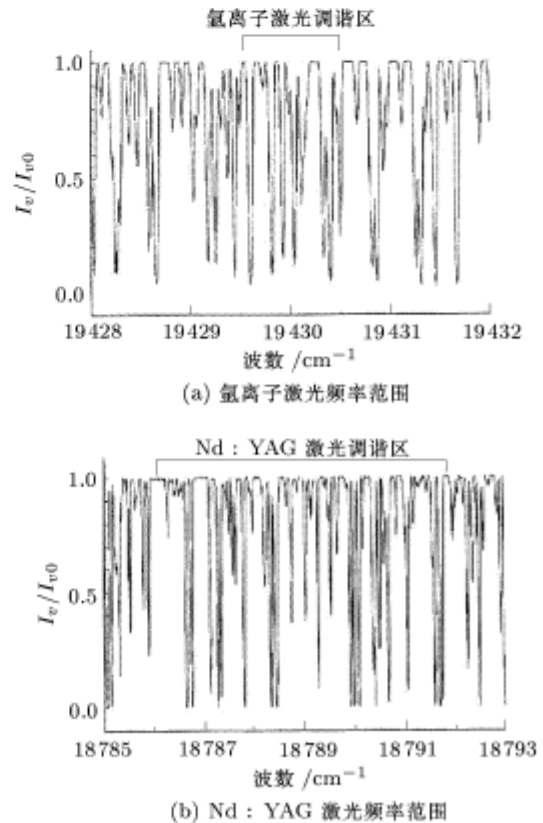


图 6 碘分子的吸收谱线

Nd:YAG 激光的波数范围. 从图 6 可以看出, 碘分子吸收谱线上有很多的“吸收井”可以用, 只要选择合适的激光频率, 使之与某个“吸收井”相匹配就可以制成适合于 DGV 系统的分子滤波器. 图 7 是一个实际碘分子滤波器的透射率曲线^[23], 这个“吸收井”的左侧斜线与氩离子激光的频率 (波长为 514.5 nm) 刚好匹配. 图 7 中虚线标明了 DGV 激光的工作频率, 当由于散射粒子运动而产生多普勒频移时, 散射光的频率发生变化, 相当于虚线右移 (频率增大) 或左移 (频率减小), 透射光的强度就发生了变化 (变暗或者变亮). 除了碘分子与上述两种激光组合适合于 DGV 应用以外, 还有其它很多种物质的吸收线和激光组合可以用于 DGV 技术. 例如汞和钛 - 蓝宝石激光 (253.7 nm)^[24]、铯和双倍紫翠玉激光 (388.9 nm)^[25] 等. 这些组合的使用并不广泛, 本文不做更多地介绍.

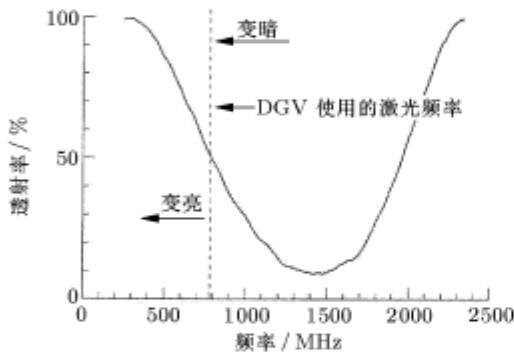


图 7 碘蒸气滤波器的透射率曲线 (频率与氩离子激光匹配)^[23]

2.4 示踪粒子

与其他流动光学测量技术一样, DGV 技术中对于示踪粒子的要求有两个方面: (1) 跟随性要求. 示踪粒子跟随流体流动, 其运动轨迹能够反映流动的湍流脉动特性; (2) 散射光强度要求. 粒子散射光强度应足够强, 能够满足 CCD 等检测设备的要求. 通常粒子越小, 跟随性越好; 粒子越大, 散射光强度越强, 因此, 在 PIV 技术中上述两个方面的要求一般需要折衷一下. 对于 DGV 技术来说, 尽管粒子散射效率也比较重要, 但是由于 DGV 不是针对单个粒子进行测量的, 因此对于粒子散射强度要求没有 PIV 那么严格, 可以采用粒径更小的示踪粒子, 这就意味着 DGV 在高速流动测量方面比 PIV 更有优势.

关于粒子的跟随性, Melling^[26] 和 Bryanston-Cross 等^[27] 做过研究. 对于 $M=1.2$ 的流动, 要求粒子直径为 $0.5\mu\text{m}$ 的量级 (比重为 1). 要达到 10kHz 湍流脉动测量 (误差小于 1%) 的要求, 粒径大约为

$0.8\mu\text{m}$ (比重为 1). Melling^[26] 发现聚苯乙烯乳液可以用作示踪粒子. Bryanston-Cross 等^[27] 在一项 PIV 测量研究中采用 $0.5\mu\text{m}$ 聚苯乙烯粒子作为示踪粒子, 能为满足 $10\sim 20\text{mJ/}$ 激光脉冲的检测要求, 并且所测量的流速达到 450 m/s. Komine 等^[28] 计算了 DGV 对激光脉冲的能量要求, 计算结果表明 0.1mJ/ 脉冲的激光能量就可以满足 DGV 的要求. 在 Nobes 等^[17] 的研究中采用了 $0.6\mu\text{m}$ 的粒子.

在超高速流动测量中应采用纳米尺度的示踪粒子. Lempert 等^[29] 对 $M=2.5$ 的流动边界层进行了研究, 实验中采用了 CO_2 气体, CO_2 凝结时可以产生 100nm 左右的粒子, 被 1mJ/ 脉冲的激光照射后其散射光为 CCD 相机采集. Wu 等^[30] 在对 $M=2.5$ 的激波 - 边界层相互作用的研究中采用的 CO_2 冰雾粒子尺寸在 10 nm 左右.

当然, 如果采用分子示踪, 跟随性已经不是需要考虑的问题. 有关分子示踪方面的研究很多, 而且不仅仅是针对 DGV 技术, 象激光诱导荧光流动显示技术 (LIF)^[31]、分子标记测速技术 (molecular tagging velocimetry, MTV)^[32] 等领域都有分子示踪的相关研究. 分子示踪测试技术是一个非常活跃的研究方向, 具有广阔的应用前景^[4], 由于不是本文的重点, 这里不做具体介绍.

3 DGV 系统组成

图 8 示意性给出了一个典型的 DGV 系统. 这个系统包括激光器和片光光学系统、频率检测系统、图像采集相机及辅助光学器件. 这是一个一维速度分量测量系统. 在阐述这 3 个子系统之前, 先讨论一下分子滤波器设计.

3.1 滤波器设计

图 9 给出了一个多用途碘滤波器的设计^[2,13]. 滤波器是一个玻璃圆筒, 两端加上光学玻璃窗口. 一个侧臂和一个冷端盲头从筒壁上伸出. 碘晶体放置于滤波器内, 然后用一个真空泵将滤波器抽真空. 圆筒部分用加热带缠绕并作绝热处理, 保持一定的加热温度 ($340\text{K}\sim 380\text{K}$), 通常是通过一个闭环控制系统来实现温度恒定. 滤波器筒体温度控制不要求很精确, 只要保证碘不粘在窗口上即可. 与筒体相连的侧臂保持在一个较低的温度, 一般 $310\text{K}\sim 325\text{K}$. 由于滤波器工作时对侧臂温度特别敏感, 通常通过一个精密系统来保持温度恒定 (如恒温水浴). 滤波器上的冷端盲头用来调节碘蒸汽分压 (摩尔浓度), 以便获得理想的透射率曲线.

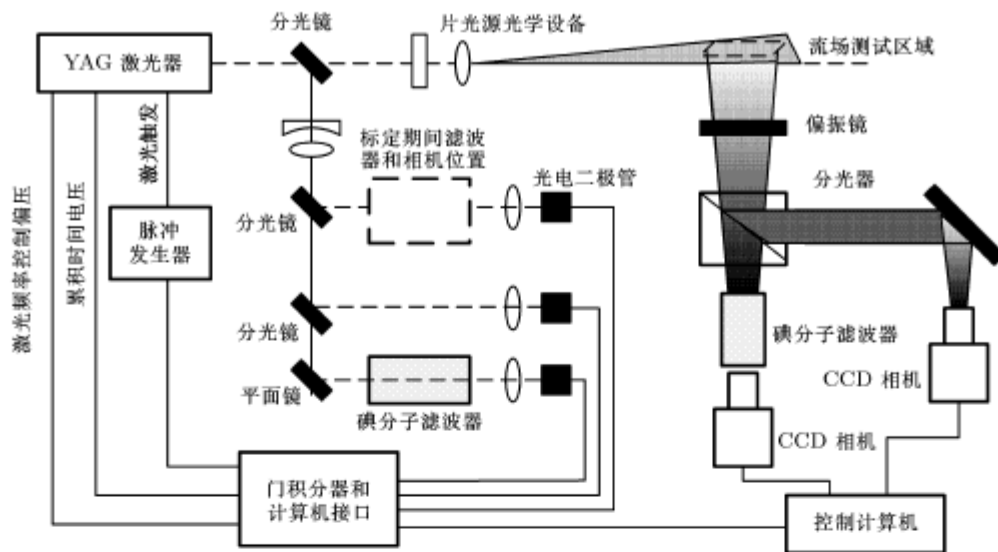


图 8 典型的 DGV 实验测试系统

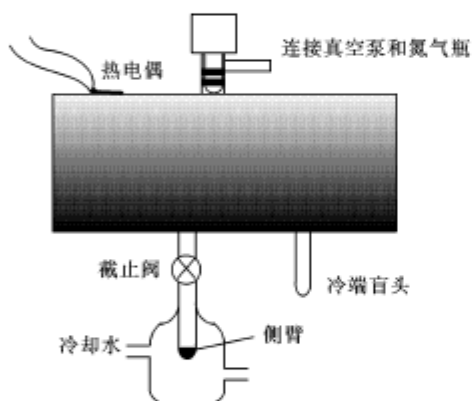


图 9 碘滤波器结构示意图

当固态和气态碘达到平衡后，关闭侧臂阀，使侧臂与滤波器主体分开。此时，筒体内没有碘晶体，因此摩尔浓度是固定的。因为其中的碘都是气态的，所以这样的滤波器称为饥饿（非饱和）型的。还有研究者用更加简单的滤波器——侧臂不切断，这种滤波器称为饱和型的，需要由水浴或其他设备来进行连续温控以保持摩尔浓度不变和稳定的透射率曲线。实际情况中，饱和型的滤波器容易制造，并且可以避免阀泄漏的问题。但是，饱和型的滤波器更容易受环境条件变化的影响。

滤波器的直径根据相机镜头的收集角度来确定，满足图像不变形、不发虚要求的情况下，直径应足够小以避免在窗口中心点发生碘晶体凝结而改变碘分子的摩尔浓度。滤波器的长度应足够长，从而使浓度梯度尽量小。典型的滤波器直径为 7.5cm，长度为 10~20 cm。

3.2 激光器和片光光学系统

有两种激光器被广泛用于基于碘分子滤波器的 DGV 系统中，即氙离子激光器和倍频 Nd:YAG 激光器。另外，还有其他一些激光器有小范围应用，主要在近红外和紫外波长区域^[33]。

3.2.1 氙离子激光器

氙离子激光用于 DGV 时，使用 514.5nm 的波长线。氙离子激光是连续激光，因此没有相机和光电二极管同步的问题。由于 DGV 用的是片光，而不是能量集中的光束，而且通常是采集侧面散射的光线，因此，散射信号比较弱，激光功率的要求必须考虑。当采用一个标准具工作在单一频率时，氙离子激光器功率只能输出 20%~25%。一般可以通过模态跳频来改变激光频率，即通过加热或者斜放标准具来改变其厚度，典型的跳频范围为 70~130 MHz。

氙离子激光在获得滤波器透射率曲线时会遇到一定麻烦。这是因为：为了获得该曲线，要改变激光频率，而这只有通过机械的方法调整标准具才能实现。实际应用中透射率曲线上只有几个点的透射率可以实验测定，因而需要采用某种拟和曲线的方法来近似得到透射率曲线。研究人员采用的曲线拟和方法是基于碘吸收理论曲线或近似分析函数^[34,35]。这一问题也可以通过采用定制的频率反馈检测和控制的氙离子激光器加以解决。

尽管对于氙离子激光可以用圆柱透镜来生成片光，但是此片光和原激光束一样为高斯强度分布。因此，许多研究者采用旋转多棱镜的方法来获得氙离子激光的片光。只要转动速率足够高，这个系统可以提供比透镜系统更加均匀的片光。这种方法的缺点是不适合于高速流场测量。

由于氩离子激光是连续的,采集的信号是相机曝光时间积分的结果,这使得瞬时测量比较困难——这是因为信号强度会随曝光时间缩短而降低。然而,这有利于减少图像散斑(因为在每次曝光期间散斑图案会改变)。当采用内部空腔的标准具时,氩离子激光具有内在的窄带性,带宽大约 10MHz。

3.2.2 Nd:YAG 激光器

另外一种 DGV 常用的激光器是 Q - 开关倍频注入种子式 Nd:YAG 激光器。这种激光器产生一个波长 532nm,持续时间大约为 10 ns 的激光脉冲。对于这种激光,必须采用圆柱和球形透镜来生成片光,这是因为激光脉冲时间太短,任何空间扫描的办法都无法获得片光。因为脉冲激光束功率很大,所以实验风洞上需要质量较高的玻璃窗,以防止被激光烧蚀。Nd:YAG 激光频率是由注入种子(一种连续激光)来控制的。种子激光提供一个窄带(带宽约 10 MHz)激光束,该激光束直接通过 Nd:YAG 振荡器和放大器。因为种子激光的强度比振荡器同期发射的光高出几个量级,其频率更容易用 Nd:YAG 棒放大。经振荡器和放大器得到带宽为 50 MHz 的红外线(1064 nm),经过倍频后波长为 532 nm,带宽增大到 100 MHz。种子激光和主激光频率由注入种子激光系统温度控制电路的偏压来调节。典型的种子激光系统允许频率改变达 100 GHz。通过调整偏压,以小到 2 MHz 的频率间隔进行重复扫描,可以很容易获得透射率曲线。一般用一个电位计来控制偏压放大系数。调整时应做到使电源引起的偏压起伏不至于影响激光器的频率稳定。在振荡器腔内安装标准具的实验研究表明, Nd:YAG 很短的脉冲时间允许非稳态流动测量,而不需象氩离子激光那样需要做时间平均。然而,由于激光散斑影响,数据图像的噪声比较大。

3.3 频率监测系统

由于 DGV 是基于散射光多普勒频移引起的频率变化来进行速度测量的,所以首先必须知道激光的频率。无论是氩离子激光还是 Nd:YAG 激光都有频率漂移问题。除了漂移以外, Nd:YAG 激光器中用来使主频和种子频率重叠的空腔镜的抖动,会给不同脉冲之间带来高达 20 MHz 的频率变化;氩离子激光器必须要有模态跳频,而这也带来频率脉动。一般风洞工作环境中一天内的温度变化可能达 20K,周围还有较强烈的机械振动和声学噪音,以及冷却水温度和压力的波动。所有这些影响都不利于保持激光频率的恒定。因此,必须借助专门系统对激光器工作频率进行不间断监测和控制。最常见的方法是使用一个额外的分子滤波器,这个滤波器与环境隔离,并尽可能做到性能稳定,这个滤波器可视为一个绝好的频率参

考。理想情况下,这个滤波器和相机镜头前的信号滤波器一起标定时,可以得到两个互相关联的透射率曲线。有些参考滤波器只是监测长时间的频率漂移,而还有一些参考滤波器可以实时记录每幅图像对应的频率^[36~42]。

图 8 中使用的是一种典型的参考滤波器频率监测系统。采集数据时,一部分激光束引向激光频率监测系统。频率监测系统将激光束再分成二部分,其中一部分穿过碘滤波器。两束光对准不同的光电二极管,这两个光电二极管信号的比值就是滤波器的透射率。对于脉冲激光系统,直接的光电二极管读数测量可能受光电二极管线形和背景光的影响。解决这一问题的一般方法是采用积分电路,给出一个比脉冲信号稍长一点的开启时间。每一幅图像都要给出参考系统的频率,以便对测试中频率的波动进行修正。如果有多个光路和光电二极管,这一系统可以同时多个碘分子滤波器进行标定。这样,每一个镜头前的滤波器和频率参考系统中的滤波器可以在同一个激光频率扫描下进行测量并互相联系起来。

很多情况下(特别是亚音速范围),为了使测量达到可以接受的精度,激光系统中的频率监测是必需的。尽管频率监测系统各种各样,目前应用最广泛的是为监测功能提供单独的光路和单独的滤波器。虽然增加了数据采集的复杂性,需要额外的碘滤波器和相应的光电二极管器件等,但是由于频率监测不需要相机图像而提高了系统的灵活性。

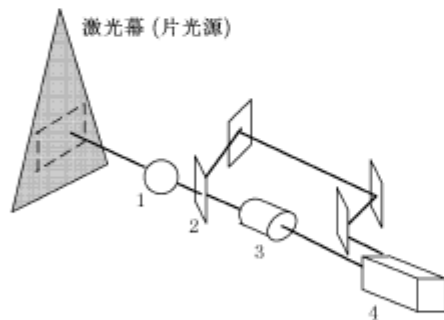
3.4 相机和接收光学系统

图 8 同时给出了典型 DGV 相机和接收光学系统。偏振影响是 DGV 光学系统中所必须解决的一个问题。偏振影响会给测量信号带来随机和偏移误差。这些影响的出现是由于散射过程的去偏振效果,以及散射光平行和垂直偏振相对强度的空间变化。由于大多数分光设备对于偏振不同的入射光分光比不同,导致系统比较敏感。有 3 种办法可以解决这个问题。第 1 种,采用两个平行放置的相机和不同的分光器,这样消除了对偏振的敏感性,但是同时系统变得容易受散射光强度(与粒子尺寸有关)变化的影响;第 2 种,采用非偏振分光器。这种分光器降低了偏振的敏感性,对偏振不同的来光反射和透射比例更加恒定;第 3 种,在分光镜前面放置一个偏振镜,只允许一种偏振光分量进入接收光学系统。图 8 显示了一种典型的偏振镜和分光镜的组合。当采集粒子散射光的时候,应该知道激光的偏振方向,这样米氏散射强度可以得到优化,偏光镜的放置方向才能正确。这种布置中每个相机有各自独立的光路,这些光路可以和光路的长度和视角相匹配,还能保证信号在两个相机之间协调分配。

倘若信号图像对频率敏感,则在信号相机的光路里放置一个碘滤波器,在参考相机的光路里放置一个中性强度滤波器.这样布置,是为了平衡到达两个相机的信号强度.如此设置可以使两个相机的工作范围相匹配,使得参考相机不至于达到饱和.在每个相机之前,有一个对应于工作激光波长的带通滤波器,用来尽可能降低背景光的影响.

图 8 显示的是一个二相机设置方案.在这种设置中,信号相机通过滤波器拍摄某一流场,而参考相机在不通过滤波器的情况下也拍摄同一流场.由示踪粒子浓度和激光强度等不均匀引起的光强变化可用参考相机拍摄的图像进行归一化处理.两个相机在光路和镜头方面的轻微差别可以根据二者对同一白卡区域拍摄的图像进行修正.

有些研究者采用了单相机系统取代了图 8 中的双相机系统^[12,14,43,44].图 10 示意性给出单相机接收光学系统设置.很显然,单相机分光图像系统降低了系统造价,但是,不足之处是分辨率降低了一半,图像分区总是导致一些图像重叠^[8].如果照亮的区域只是局限在取景流场中心区域的一小部分(例如射流),相机孔径减小了,被测流场的部分区域可以被遮蔽,使其他区域变成黑色,这样重叠部分可以变成黑色,互相影响就可以非常小.



1-偏振镜; 2-分光镜; 3-分子滤波器; 4-CCD 相机

图 10 单相机 DVG 测量系统

4 数据处理

DGV 测量中数据处理是实时的,因此处理速度要快.但是,对比 PIV, DGV 数据处理工作量要少许多,目前的计算机性能完全可以满足要求.为了获得准确的数据, DGV 系统必须进行标定. DGV 系统的标定和后续的数据处理一般按以下几个步骤进行:

(1) 碘滤波器的标定.测定碘滤波器的透射率随频率变化的函数曲线;

(2) 图像标定和映射.修正信号相机和参考相机

之间的强度(偏移和增益)和空间差异,同时修正透视和放大比例;

(3) 确定速度.根据几何信息(相机位置、片光原点、成像流场的坐标系)和相机图像,并结合标定数据来确定平面内的速度.

4.1 碘滤波器的标定

碘滤波器标定的目的是确定透射率随频率变化的函数关系.当使用 Nd:YAG 激光器时,可以提供几个兆赫兹频率间隔的激光输出.在整个激光频率范围内(大约 100 GHz)调谐激光,就测出了碘滤波器的透射率变化曲线.如果调谐通过几个吸收线,并将这些吸收线的频率同已知的值进行比较就可以知道绝对频率.还有一些其他方法来进行频率标定,其中包括使用标准具^[14],波长计^[45],以及与另外一个稳定激光器外差的方法^[46].一般来说,透射率数据重复性还是不错的,甚至一年时间内变化都不大,但为了确保激光、滤波器、光电设备正确工作,频率扫描巡检工作在每天测量开始和结束时分别做一次.

当使用氩离子激光器时,频率是通过倾斜或加热内腔标准具来调节的,这样比 Nd:YAG 激光器的激光频率扫描误差要大得多.对于这种粗糙的频率扫描办法,在透射率曲线上必须采用曲线拟和来对测量点之间的点进行插值^[35].另外一种频率标定方法是采用一个转盘来提供已知的频移^[34].

分光器、光路系统、光电二极管性能上的差异意味着信号和参考光强度比的测量数值差异.为了方便透射率标定曲线的后续应用,使用当地最大透射率进行归一化处理.最大透射率对应的频率也记录下来.如此处理,归一化的透射率在 0~1 范围内变化.

4.2 DGV 图像标定和映射

因为 DGV 技术是基于光强度测量,所以必须保证在整个过程中每个像素点上强度测量的准确性.一般要把背景图像拍摄下来,在信号图像中把背景图像减去.这一步骤可以把风洞壁、窗口和模型表面发出的漫射光和反射光去掉,并且可以解决相机暗电流问题.参考光和信号光的数据图像分别记为 R_D 和 S_D ,其背景图像分别记为 R_B 和 S_B ,那么, R'_D 和 S'_D 是做背景光和暗电流修正后的数据图像

$$R'_D = R_D - R_B \quad (3a)$$

$$S'_D = S_D - S_B \quad (3b)$$

白板修正也可以用来解决两个相机之间的光路差异问题.具体操作中将一张白板放在片光的位置,激光调谐到吸收线以外,作为一个标定的最大值.因为只是用于进行与频率无关的相机-相机修正,白板照亮地方的光不需要非常均匀,激光在白板上

强度波动可以通过信号图像和参考图像的比较得以去除。含有高频空间变化(例如光点或散斑)的强度波动在此过程中不能被彻底去除,若要减少白板图像的散斑,光路中需要一个光学扩张器。这些标定图像一般称为“绿卡”图像,用来区分“白卡”平板区域修正图像。当采用白光平板区域修正来做图像归一化,碘滤波器对宽带“白光”的透射率一般同实际测试中吸收线附近的透射率最大值不一样。不同的研究者使用各种方法来获得这些图像。有的研究者使用激光照亮的白板(如前所述),还有的研究者使用片光与实际测量中相同的示踪粒子。如果能保证最大透射率频率附近的透射率变化不大,示踪粒子的速度小到所产生的频移可以忽略,则这些图像可以在运行情况下采集。这种方法具有吸引人的地方,即标定相机的条件与实际测量采集数据的条件完全一样。

用于白板区域标定的一系列参考和信号相机的图像 R_G 和 S_G 记录并做平均,相应于同样设置的背景图像也记录下来。减去背景图像的修正平板区域图像为

$$R'_G = R_G - R_B \quad (4a)$$

$$S'_G = S_G - S_B \quad (4b)$$

信号和参考相机的数据必须完全对应绘制,以便对碘滤波器透射率进行像素对像素的测定。尽管在系统准备阶段已经对信号和参考相机进行了校正,但是两个光路不可能完全一样,导致两个图像不可避免地存在一些差异。另外,对于三维测量,每对相机的透视比例、放大倍率差异必须去除。通常将所有图像都绘制在一个流场的正交图中。将一个有圆孔的纸卡(靶板)放在测试平面内,供每一个相机拍摄图像,这些圆孔为所有的图像提供了一个纽带,可以放在同一个坐标系中。对于多维 DGV 系统,希望这个靶板材料为透明的,以便圆孔在各个方向都能看到。这些图像一般进行数字化处理,确定圆孔的中心,这样就创建了一个对应于源图像圆孔中心的有序的坐标系 (x'_i, y'_i) 。第 2 个坐标系 (x_i, y_i) 是对应于圆孔中心的靶板平面正规映射视图。一般采用双线性插值确定源像素在映射图像中位置。像素在源图像 (x'_i, y'_i) 和映射图像 (x_i, y_i) 坐标之间的关系为

$$x' = a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 \quad (5a)$$

$$y' = a_5 x + a_6 y + a_7 xy + a_8 \quad (5b)$$

其中,每个亚区域的系数 a_i 通过求解两组联立方程来确定,这些方程是通过“纽带孔”建立起来的。这些节点定义了子区域的 4 个角。方程是

$$\begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ x'_3 \\ x'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & x_1 y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & x_2 y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & x_3 y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & x_4 y_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} \quad (6a)$$

和

$$\begin{bmatrix} y'_1 \\ y'_2 \\ y'_3 \\ y'_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & x_1 y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & x_2 y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & x_3 y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & x_4 y_4 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \end{bmatrix} \quad (6b)$$

这里,点 (x'_i, y'_i) 和 (x_i, y_i) 是已知的结点, (x'_i, y'_i) 是映射图中点 (x_i, y_i) 在源图像中的位置,一般不是整数。因此,映射图像点的强度赋值是最接近的四个像素点的加权平均值。这种双线性映射方法一般分段用于以 4 个圆孔为边界的小方块区域中。映射系数通过圆孔靶板图像确定后,将用来映射所有数据图像。这个映射过程产生了新的图像 $S''_D, R''_D, S''_G, R''_G$,而这些图像中透视扭曲和放大倍率的差异已经被去除。

4.3 频移的确定

一旦完成图像映射,下一步就是确定每个像素点对应的滤波器的透射率。将信号图像除以参考图像得到透射率,并用白板图像进行归一化。这样就得到了滤波器对应于每个像素的透射率 T_R

$$T_R = (S''_D/R''_D) \times (R''_G/S''_G) \quad (7)$$

根据某个像素的透射率 (T_R) 就可以确定所接收光的频率,未发生频移的激光的频率可以由参考系统得到,这两个频率的差就是散射光多普勒频移。多普勒频率转换为速度

$$V = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta)} [\zeta(T_R) - f_0] \quad (8)$$

DGV 系统中的频移(方括号中的项)可以由频率函数 ζ 和频率 f_0 表达。频率函数的自变量 T_R 来自于标定并映射后的 DGV 图像和参考图像。频率函数可视为以透射率为自变量,频率为因变量的吸收曲线。激光频率 (f_0) 由频率监测系统来确定。这个方程的左侧是系统测量方向上的速度分量,其中, θ 定义为激光传输方向和散射方向的夹角。对于多分量测量系统,每一对参考光-信号光重复上述过程,就可以得到多个速度分量。

5 DGV 的发展和應用

DGV 研究开发和应用的文献非常多,对这一领域的研究作完整的综述是比较困难的,这里仅对部分

比较重要的研究工作进行简要的介绍。下面将分成两部分来介绍：(1) 在设备开发方面的研究；(2) 该技术在具体流场测量中的应用。

5.1 设备开发

DGV 最早由 Komine, Meyers 等^[10,11,47] 引入空气动力学测量。他们开发了两种 DGV, 一种使用的是连续的氩离子激光, 测量 33 ms 曝光时间内的平均速度; 另外一种采用 Nd:YAG 激光, 测量激光脉冲 15 ns 时间内的平均速度。Komine 和 Brosnan^[10] 的系统采用 6 个相机来解决 3 速度分量的同时测量问题。用这一系统对一近音速射流进行了测试, 测试中以 1.5 μm 橄榄油雾为示踪粒子。Meyers 和 Komine^[11] 的单分量系统使用了连续激光, 特意安装了一个图像归一化模拟电路, 使透射率可以实时显示出来。这些工作描绘出了 DGV 的基本思想, 概念性地证明了 DGV 技术的可用性。

采集图像的相机有好几种配置方式。最初, Komine 等^[47] 采用分开的参考和信号相机来记录未经过滤波器和经过滤波器的图像, 用一个透镜和一个分光镜将光线导入两个相机。最初, 他们开发一个实时模拟电路来进行信号归一化, 并借助滤波曲线获得速度。这种设置要求光路对焦非常精确以使得两个图像之间像素和像素一一对应。这个系统也有实时流动显示功能, 但是数据不能进行后处理。Meyers 和 Komine^[11] 将此系统进行了改进, 每个图像都进行单独的数字化处理, 允许图像进行映射、标定和光顺, 允许进行数据后处理。尽管这样导致测量时间加长, 但是使用者可以方便地进行数据处理, 允许采用一些处理方法, 这样可以减小测量误差。Elliott 等^[14] 和 Arnette 等^[48] 把两个相机平行放置, 省略了分光镜。这样, 参考光和信号光强度得以增强, 消除了分光的非一致。因为散射在瑞利区域内, 散射光在不同角度的变化可以计算出, 所以这个系统是可以接受的。

Smith 等^[15] 和 McKenzie^[12] 将参考图像和信号图像合并在一个相机上, 他们称之为分图像设置。Clancy 等^[43] 也采用了这种设置。这样可以节省系统投资, 但是给流场测量带来一定限制。其他研究者给出了双相机系统, 系统中将分光镜放在参考相机和信号相机之前。McKenzie^[49], Beutner 等^[37] 使用了非偏振分光镜和偏振元件来减小米氏区域粒子散射的偏振不均匀影响。

DGV 技术在多速度分量测量方面具有优势。自从早期的 DGV 开发阶段, 人们就认识到进行多分量速度同时测量的可能性, 最初的 Komine^[10] 系统就表明了 DGV 进行多分量测量的潜力。当然, Komine^[10]

的测量装置比较复杂, 要使用 3 个参考和信号系统, 这些相机从不同的角度拍摄图像, 每个相机分别感测不同方向的多普勒频移, 从而可以测量不同方向的速度分量。应该指出, 单分量系统测量的速度分量总是不在片光的平面内, 一般也不和风洞或模型的坐标一致。Clancy^[50] 通过实验说明合理放置相机可以减少激光漂移给速度测量带来的误差。后来 Crafton 等^[18] 的 3 分量测试系统也采用了这种布置方式。另外一个测量多分量平均速度的办法是用一套参考相机和信号相机系统依次在 3 个方向的平面内照亮^[51]。这要求 3 个激光面重叠, 增大了实验操作的难度; 然而, 由于只需一套记录系统, 因而降低了造价。2004 年, Nobes 等^[17] 对图像采集系统进行了进一步改进。他们的 3 分量系统中只用两个相机, 3 个信号图像和参考图像分别通过 3 个光纤束 (每束有 500 \times 600 根光纤) 引入到两个 CCD 阵列上, 并通过第 4 个光纤束来实现对激光频率的监测。

仪器的测量精度是每一个研究和使用者所非常关心的问题, 多数 DGV 开发者在估测他们所开发 DGV 的测量精度方面投入了大量精力。确定绝对误差的一个常用的办法是来测量一个已知流场 (例如转盘)。Meyers 和 Komine^[11] 是第 1 个采用转盘的, Elliott^[14] 也是比较早进行这方面研究的, 他用转盘证明了他的一维 DGV 系统的可行性。他得到的绝对精度跟速度范围无关, 为 10 m/s。与前面讨论过的一样, 大部分误差来自脉冲和脉冲之间的激光频率变化, 在早期的 DGV 系统中没有考虑解决这一问题。Elliott^[14] 还对系统进行测量误差的理论分析, 指出主要的误差来自光斑和相机噪音引起的随机强度变化、最小显著误差 (least-significant-errors)、角速度误差和激光频率的不稳定。

McKenzie^[12] 采用一个一维点测量系统来测量速度为 5~56 m/s 的转盘的速度。这个系统完全可以跟踪频率的变化。速度变化的 RMS (root mean square) 值为 2.5 m/s。这一变化在 10 m/s 以上的速度范围内都一样。这在他使用的光电二极管数字截断误差之内。在后来的平面测量研究中, 他发现在同样的速度范围内, 测量速度的 RMS 值为 2~5 m/s, 他将此确定为测量的分辨率^[49]。在平面测量中, 激光光斑是测量误差的一个来源 (使用 Nd:YAG 激光器和慢扫描相机), 这同 Elliott^[14] 的结论一样。

使用氩离子激光器, Naylor 和 Kuhlman^[38] 针对转盘进行二维平面测量实验, 得到的速度误差为 2 m/s (名义速度范围是 32.2 m/s)。Beutner 等^[37] 也采用转盘实验来研究一个 DGV 系统的性能, 系统中含有光圈可变的相机。这些测量中都使用两个含有非饱和碘滤波器和 16 位相机的光路系统。测量偏差

为 2 m/s, 主要来自相机和碘滤波器的标定过程. 正如所料, RMS 误差随光圈变化, 也和数据后处理中数字滤波有关. 在最佳的配置下, 可以测量速度小于 2m/s 的运动. McKenzie 指出转盘测量结果可能不能代替实际示踪粒子测量的结果, 这主要由于偏振和二次散射; 然而, 他发现转盘测量和一个低速注入示踪粒子的湍流测量结果是一致的. 同样, Beutner 等^[37] 对一个空风洞进行测量, 结果表明偏移误差和 RMS 误差同转盘测量结果很接近.

由于影响 DGV 测量精度的因素非常多, 设备研制过程中往往不能将这些因素一一考虑, 不同的研究者得到的测量误差相差很大, 表 1 列出了一些研究工作中给出的测量误差. 偏移误差在 0.4~35 m/s(相对误差 0.7%~8.5%), 随机误差在 0.3~30 m/s(相对误差 1.1%~11.7%), 总的误差一般在 5% 左右. 通过研究者的努力, 目前对 DGV 测量误差的主要来源已经有了比较全面的认识, 近几年开发的 DGV 系统测量绝对误差一般在 0.5~1.0 m/s 之间^[1].

表 1 不同研究工作的测量误差

| 速度 /m·s ⁻¹ | 偏移误差 [绝对 (m·s ⁻¹)/ 相对] | 随机误差 [绝对 (m·s ⁻¹)/ 相对] | 测量误差 [绝对 (m·s ⁻¹)/ 相对] | 参考文献 |
|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------|
| 600 | 30/5% | 30/5% | | [48] |
| 18.9 | 1~1.5/5.3%~7.9% | 0.35~0.95/1.9%~5% | | [37] |
| 20.2 | 0.5/2.5% | 1.3/6.4% | | [36] |
| 380 | 15/3.9% | 15/3.9% | | [14] |
| 500 | 35/7% | < 20/4% | | [52] |
| 60 | 2~5/3.3%~8.3% | 2/3.3% | | [49] |
| 59 | 5/8.5% | 4/6.8% | | [53] |
| 60 | 0.4~0.7/0.7%~1.2% | 4~7/6.7%~11.7% | | [41] |
| 80 | | | 3.9/4.9% | [35] |
| 47 | | 1.6/3.4% | | [54] |
| -20~20 | | 0.5/>4% | | [55] |
| 410 | | 16/3.9% | | [18] |
| 31 | | | 2/6.5% | [56] |
| 0.3~0.8Ma | | 0.4~0.6/- | | [57] |
| 20~28 | | 0.3/1.5%~1.1% | | [58] |

5.2 流场测量

当 DGV 在测量精度、准确性和可靠性方面达到一定水平以后, 应用这一技术来进行流体力学研究的工作逐渐开展起来. DGV 在高速射流、超音速和亚音速大型风洞研究中有较多应用^[2,15,18,57,59~63]. 随着 DGV 技术的逐渐成熟, 其应用范围也越来越广. 本文只给出高速射流和超声速风洞测量两个实际应用例子, 以便使读者对 DGV 技术有更直观的印象.

Smith 等^[15] 采用 DGV 测量超音速未扩散射流. 图 11 给出了瞬时速度 (图 11(a) 和图 11(b)) 和平均速度 (图 11(c)) 以及 RMS 值 (图 11(d)). 射流从一个超音速喷嘴喷出, 速度为 $M = 1.9$. 单分量速度测量在与流动方向呈 45° 角的方向上进行. 瞬时图像显示了在剪切层区域大尺度湍流结构和周围空气相互作用. 瞬时图像显示出一些激波的存在, 然而, 在平均速度图像中, 由于激波和扩张菱形引起的

速度变化在射流内核心区很清楚. Smith^[15] 采集了 1000 多幅图像, 这样可以计算平均值及 RMS 值. RMS 图像清楚显示了剪切层以及与激波或扩张相互作用引起的湍流脉动. 另外, 采用相关的方法, 可以利用 DGV 提供的空间信息研究射流内湍流结构的发展.

与其它技术相比, DGV 的最大优点之一是适于测量超音速流动, 这是因为 DGV 测量的绝对误差是常量, 与流速无关, 因此, 流速越大, 相对误差越小. Meyers^[60] 在 NASA Langley 实验室使用风洞研究了 75° 三角翼在不同攻角、不同马赫数时的流场. 该风洞测试截面为 1.2 m×1.2 m, 马赫数范围为 1.5~4.6. 与其它 DGV 超音速风洞测量一样, 自然产生的凝结水蒸气液滴 (大约为 0.2 μm) 被用为散射介质. 图 12 显示了攻角为 24° 时, 其上方的横向平面内流场. 测量在 95% 弦长的地方, 自由流速度为 $M = 2.8$. 图 12 中可以清楚地看到所形成的涡和复杂的激波及膨胀波.

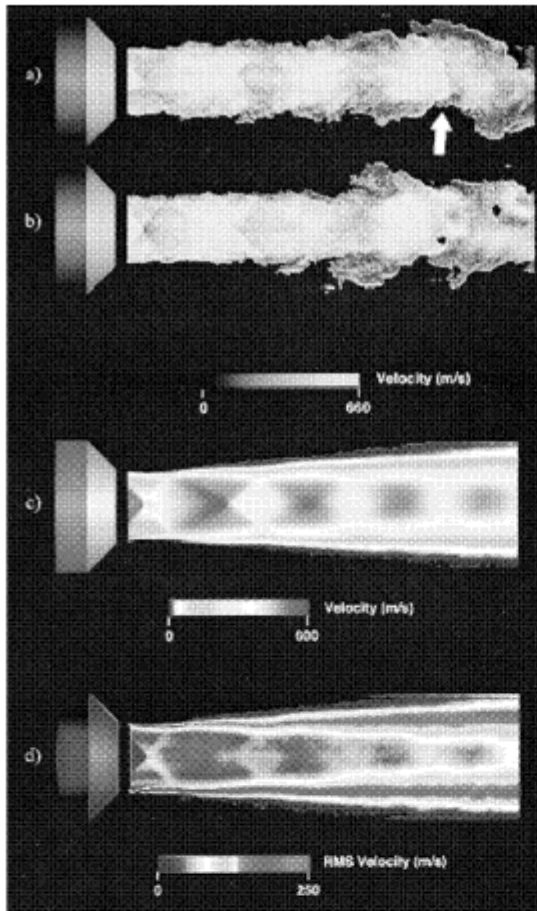


图 11 超音速射流 ($M = 1.9$)。 (a), (b) 瞬时流场; (c) 平均流场; (d) RMS 值^[15]

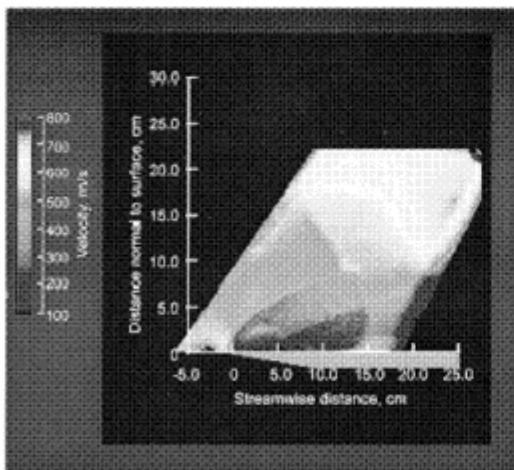


图 12 DGV 测量的 75° 三角翼流动速度场, 测量在 95% 弦长位置进行, $M=2.8$ ^[60]

6 DGV 技术的主要问题和的发展趋势

6.1 存在的主要问题

经过十几年的发展, DGV 技术已经逐渐成熟, 在高速射流、通道内部高速流动、超音速风洞和大

型风洞测量等领域都获得了实际应用. 但是, 目前的 DGV 系统还存在不少问题:

(1) 测量误差还比较大

影响 DGV 测量误差的因素非常多, 目前的很多研究工作都是针对如何提高测量精度的, 但这也是一项艰巨的工作. 例如: 分子滤波器的温度对透射率的影响非常大, 一般用水浴来保持恒温, 但是温度波动还是难免的, 而温度波动 0.1°C 就会导致 3 m/s 的速度测量误差;

(2) 激光光源仍需改进

由于 DGV 工作基于多普勒频移, 激光频率的稳定非常重要. 但是, 很多因素都会导致激光频率发生变化, 例如: 温度、压力、机械振动等. 可以采取将激光器与环境隔绝的办法尽量保持激光频率恒定, 但是很难做到完全隔离, 因此需要随时监测和记录工作激光的频率, 增加了系统和数据处理的复杂性.

(3) 图像采集系统设备复杂、造价昂贵

CCD 相机和光路系统是 DGV 系统中比较复杂也是比较昂贵的部分. 特别是在进行多分量测量时, 需要多套信号和参考相机及其光路系统, 设备投入大.

(4) 实验操作复杂

目前的 DGV 系统除了设备复杂以外, 操作也比较繁琐. 单是标定就包括了滤波器标定和图像标定两部分. 如果是采用多个相机和光路系统来进行多分量测量, 光路调校、相机调整、系统标定等都是非常费时、烦琐的工作.

6.2 发展趋势

DGV 的发展过程也是找出误差源、消除误差源和不断简化系统、简化操作的过程^[64]. DGV 技术的发展趋势包括了 DGV 系统的改进、节省测量时间, 以及多个流体参数测量的实现 (例如温度、密度、浓度、压力等).

Amette 等^[65] 提出用双颜色系统来简化光学系统设置. 双颜色系统中使用 Nd:YAG 激光器, 并进行分光, 将 50% 的激光用于驱动一个染料激光器改变激光频率, 变成红色激光 (618 nm). 然后把两个激光束合并起来, 形成一个激光薄片穿过测量区域. 示踪粒子的散射光经过碘滤波器后被一个高分辨率的彩色 CCD 相机采集. 流动速度引起的片光中绿色激光多普勒频移使其进入或者离开碘吸收井, 这样, 所记录的红色信号就可以用来对窄带绿色片光的散射光进行归一化. 由于相机把两种光分别记录下来, 就可以计算出透射率、多普勒频率和流动速度. 尽管这种技术有一些实施优点, 如: 不需要映射过程和参考相机, 但是仍然需要标定红光和绿光像素的感光度,

以及红光和绿光的强度. 这项技术还有待于进一步发展和完善. 最近, Charrett 等^[55]提出了一种双频 DGV, 采用一个相机, 简化了系统. 前面已经提到, Nobes 等^[17]对图像采集系统进行了进一步改进, 他们的系统中只需一个滤波器和一对相机, 实现了 3 分量测量, 大大降低了系统的复杂性, 代表了 DGV 图像采集系统的改进方向.

利用分子滤波瑞利散射信号 (filtered rayleigh scattering, FRS) 可以测量其他的热力学参数, 这是 DGV 技术很重要的一个功能扩展. 瑞利散射包含了流体的温度、密度、速度、压力、组分等信息. 在测量比较弱的瑞利散射光时, 分子滤波也用来降低未发生频移的背景或粒子散射信号^[66]. Miles 和 Lempert^[16,67]首先提出利用 FRS 技术来测量热力学性质. Forkey 等^[68]采用 FRS 技术测量了马赫数 2.0 的轴对称射流中的多项热力学参数. 为了测量多个热力学参数, Nd:YAG 光幕照亮测试平面, 激光频率慢慢扫描通过吸收线, 采集这些图像. 每个像素的测量值是瑞利散射信号和碘滤波器吸收线的卷积的光谱. 通过瑞利散射模型的卷积和碘吸收曲线, 就可以得到热力学性质. 采用 FRS 与 PIV 相结合的方法可以实现速度场温度场的测量^[69]. Bookey 等^[70]采用窄带相干瑞利散射技术进行了火焰温度测量, 温度测量不确定度达到 $\pm 3\%$. 分子散射技术还可以用于组分测量, 进行湍流混合过程研究^[71]. 由于激光调谐和相机扫描速度的限制, FRS 技术局限在平均量测量; 但是, 随着相机和激光技术的发展, 将可以进行瞬时测量^[72]. 由于多普勒频移跟散射光矢量方向有关, 不同角度上的强度变化和调谐激光通过滤波器吸收线有相同的效果. Elliott 和 Samimy^[73]将变形光学系统扩展到瞬时温度、密度、压力和速度的同时测量. 另外一个获得瞬时特性的方法是降低系统对一些参数的敏感度, 具体细节可参见文 [74,75].

7 结束语

本文综述了一种基于分子滤波原理的平面速度场测量技术, 介绍了该技术的理论背景、典型系统组成和获得正确测量所必须的图像处理技术. 目前 DGV 发展的趋势显示测量误差小于 0.5 m/s 是可能的. 将来的发展趋势主要集中在: 降低测量的系统误差、提高测量的方便性、发展节省时间的测量技术和多个热力学参数同时测量.

参考文献

1 Lawson N J. The application of laser measurement techniques to aerospace flows. *Proc Instn Mech Engrs*, 2004,

218: 33~57
 2 Kuhlman J, Burton L, Scarberry T. Doppler global velocimetry data in circular jets. *Meas Sci Technol*, 2002, 13: 1154~1162
 3 盛森芝, 徐月亭, 袁辉靖. 近十年来流动测量技术的新进展. *力学与实践*, 2002, 24: 1~14
 4 康琦, 申功妍. 全场测速技术进展. *力学进展*, 1997, 27: 106~120
 5 McDaniel J C, Hiller B, Hanson R K. Simultaneous multiple-point velocity measurement using laser-induced fluorescence. *Opt Lett*, 1983, 8: 51~53
 6 康琦. 体视 3D-PIV 技术及其初步应用. [博士论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1995
 7 刘頔, 张金钟, 舒玮. 单镜头三维粒子成像测速. *实验力学*, 1994, 9: 225~231
 8 Raffel M, Willert C, Kompnchans J. Particle image velocimetry—a practical guide. New York: Springer, 1998. 1~12
 9 Samimy M, Wernet M. A review of planar multiple-component velocimetry in high speed flows. *AIAA J*, 2000, 38(4): 554~555
 10 Komine H, Brosnan S J. Instantaneous, three-component, Doppler global velocimetry. *Laser Anemometry*, 1991, 1: 273~277
 11 Meyers J F, Komine H. Doppler global velocimetry: a new way to look at velocity. *Laser Anemometry*, 1991, 1: 289~296
 12 McKenzie R L. Measurement capabilities of planar Doppler velocimetry using pulsed lasers. *Appl Opt*, 1996, 35: 948~964
 13 Elliott G S, Beutner T J. Molecular filter based Doppler velocimetry. *Progress in Aerospace Sciences*, 1999, 35: 799~845
 14 Elliott G S, Samimy M, Arnette S A. A molecular filter based velocimetry technique for high speed flows. *Exp Fluids*, 1994, 18: 107~118
 15 Smith M W, Northam G B, Dummond J P. Application of absorption filter planar Doppler velocimetry to sonic and supersonic jets. *AIAA J*, 1996, 34: 434~441
 16 Miles R B, Lempert W R. Flow diagnostics in unseeded air. AIAA Paper 90-0624, 1990
 17 Nobes D S, Ford H D, Tatam R P. Instantaneous three-component planar Doppler velocimetry using imaging fiber bundles. *Exp Fluids*, 2004, 36: 3~10
 18 Crafton J, Carter C D, Elliott G S. Three-component phase-averaged velocity measurements of an optically perturbed supersonic jet using multi-component planar Doppler velocimetry. *Meas Sci Technol*, 2001, 12: 409~419
 19 McCartney E. Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles. New York: Wiley, 1976
 20 Fabelinskii I L. Molecular Scattering of Light. New York: Plenum Press, 1968
 21 Miles R B, Lempert W R, Forkey J N. Laser Rayleigh scattering. *Meas Sci Technol*, 2001, 12: 33~51
 22 Boguszko M, Elliott G S. Property measurement utilizing atomic/molecular filter-based diagnostics. *Progress in Aerospace Sciences*, 2005, 41: 93~142
 23 Meyers J F. Development of Doppler global velocimetry as a flow diagnostics tool. *Meas Sci Technol*, 1995, 6: 769~783
 24 Finkelstein N, Gambogi J, Lempert W R, et al. The development of a tunable, single-frequency ultraviolet laser source for UV filtered Rayleigh scattering. AIAA Paper 94-0492, 1994
 25 Shimizu H, Lee S, She C. High spectral resolution lidar system with atomic blocking filters for measuring atmospheric

- parameters. *Appl Opt*, 1983, 22: 1373~1381
- 26 Melling A. Seeding gas flows for laser anemometry. AGARD CP 399, 1985, paper 15
 - 27 Bryanston-Cross P J, Epstein A. The application of sub-micron particle visualization for PIV (particle image velocimetry) at transonic speeds. *Prog Aerospace Sci*, 1990, 27: 237~265
 - 28 Komine H, Brosnan H, Long W H, Stappaerts E A. Development of a flight research instrumentation system for application to noninvasive measurements of the flow-field. NASA CR 191490, 1994
 - 29 Lempert WR, Wu P F, Miles R B. Filtered Rayleigh scattering measurements using a MHz repulse-burst system. AIAA 97-0500, 1997
 - 30 Wu P, Lempert WR, Miles R B. Megahertz pulse-burst laser and visualization of shock wave/boundary layer interaction, *AIAA J*, 2000, 38: 672~679
 - 31 Hu H, Koochesfahani M M. A novel method for instantaneous, quantitative measurement of molecular mixing in gaseous flows. *Experiment in Fluids*, 2002, 31: 202~209
 - 32 Pitz R W, Wehrmeyer J A, Ribarov L A, et al. Unseeded molecular flow tagging in cold and hot flows using ozone and hydroxyl tagging velocimetry. *Meas Sci Technol*, 2000, 11: 1259~1271
 - 33 Grinstead J H, Finkelstein N D, Lempert WR. Doppler velocimetry in a supersonic jet by use of frequency modulated filtered light scattering. *Opt Lett*, 1997, 22: 331~333
 - 34 Naylor S, Kuhlman J. Results for a two-component Doppler global velocimeter (DGV). AIAA Paper 99-0268, 1999
 - 35 Beutner T J, Elliott G S, Mosedale A, Carter C D. Doppler global velocimetry applications in large scale facilities. AIAA Paper 98-2608, 1998
 - 36 Beutner T J, Williams G W, Baust H D, et al. Characterization and applications of Doppler global velocimetry. AIAA Paper 99-0266, 1999
 - 37 Naylor S, Kuhlman J. Accuracy studies of a two-component Doppler global velocimeter. AIAA Paper 98-0508, 1998
 - 38 Beutner T J, Baust H D. Recent developments in Doppler global velocimetry global velocimetry. In: Proceedings of AGARD Symposium on Advanced Aerodynamic Measurement Technology. AGARD-CP-601, Paper 8, 1998
 - 39 Smith M W. Application of a planar Doppler velocimetry system to a high Reynolds number compressible jet. AIAA Paper 98-0428, 1998
 - 40 Reinath M S. Doppler global velocimetry development for the large wind tunnels at Ames research center. NASA TM 112210, 1997
 - 41 Thurow B, Jiang N, Lempert W, Samimy M. Development of megahertz rate planar Doppler velocimetry for high speed flows. *AIAA J*, 2005, 43(3): 500~511
 - 42 Clancy P S, Samimy M. Two component planar Doppler velocimetry in high speed flows. *AIAA J*, 1997, 35: 1729~1738
 - 43 Clancy P S, Samimy M, Erskine W R. Planar Doppler velocimetry: three-component velocimetry in supersonic jets. AIAA Paper 98-0506, 1998
 - 44 Shirley J A, Winter M. Air-mass flux measurement system using Doppler-shifted filtered Rayleigh scattering. AIAA Paper 93-0513, 1993
 - 45 Forkey J N. Development and demonstration of filtered Rayleigh scattering - a laser based flow diagnostic for planar measurement of velocity, temperature, and pressure: [dissertation]. New Jersey: Princeton University, 1996
 - 46 Komine H, Brosnan S J, Litton A B, Stappaerts E A. Real time Doppler global velocimetry. AIAA Paper 91-0337, 1991
 - 47 Arnette S A, Samimy M, Elliott G S. Two component planar Doppler velocimetry in the compressible turbulent boundary layer. *Exp Fluids*, 1998, 14: 323~332
 - 48 McKenzie R L. Planar Doppler velocimetry performance in low-speed flows. AIAA Paper 97-0498, 1997
 - 49 Clancy P S. Development and application of three-component planar Doppler velocimetry for high speed flows: [dissertation]. Columbus: The Ohio State University, 1997
 - 50 Roehle I. Three dimensional Doppler global velocimetry in the flow of a fuel spray nozzle and in the wake region of a car. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1997, 7: 287~294
 - 51 Elliott G S, Mosedale A D, Gruber M, et al. The study of a transverse jet in a supersonic cross-flow using molecular filter based diagnostics. AIAA Paper 97- 2999, 1997
 - 52 Morrison G, Gaharan Jr C A. Uncertainty estimates in DGV systems due to pixel location and velocity gradients. *Meas Sci Technol*, 2001, 12: 369~377
 - 53 Wernet M P. Planar particle imaging Doppler velocimetry: a hybrid PIV/DGV technique for three-component velocity measurements. *Meas Sci Technol*, 2004, 15: 2011~2028
 - 54 Meyers J F, Joseph W L, Schwartz R J. Characterization of measurement error sources in Doppler global velocimetry. *Meas Sci Technol*, 2001, 12: 357~368
 - 55 Charrett T O H, Ford H D, Nobes D S, Tatama R P. Two-frequency planar Doppler velocimetry (2v-PDV). *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(11): 4487~4496
 - 56 Willert C, Stockhausen G, Klinner J, Beversdorff M. On the development of Doppler global velocimetry for cryogenic wind tunnels. In: 10th International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities (ICIASF), Gottingen, Germany, 25-29 Aug. 2003
 - 57 Müller H, Eggert M, Pape N, et al. Time resolved DGV based on laser frequency modulation. In: 12th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid mechanics, Lissabon/Portugal, 12-15 July 2004
 - 58 Kendall M A F, Quinlan N J, Thorpe S J, et al. Measurements of the gas and particle flow within a converging-diverging nozzle for high speed powdered vaccine and drug delivery. *Exp Fluids*, 2004, 37: 128~136
 - 59 Meyers J F. Application of Doppler global velocimetry to supersonic flows. AIAA Paper 96-2188, 1996
 - 60 Roehle I, Willert C E. Extension of Doppler global velocimetry to periodic flows. *Meas Sci Technol*, 2001, 12: 420~431
 - 61 Willert C, Roehle I, Schodl R, et al. Application of planar Doppler velocimetry within piston engine cylinders. In: Proceedings of the 11th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2002. 1~10
 - 62 Kuhlman J, Collins P, Scarberry T. Two-component point Doppler velocimetry data in circular jets. *Meas Sci Technol*, 2001, 12: 395~408
 - 63 Meyers J F, Joseph W L. Identification and minimisation of errors in Doppler global velocimetry measurements. In: Proceedings of the 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2000. 1~12
 - 64 Arnette S A, Carter C D. Two-color planar Doppler velocimetry. *Am. Inst. Aeronaut. Astronaut J*, 2000, 38(11): 2001~2006
 - 65 Baumgartner M L, Erbland P J, Etz M R, et al. Structure of a Mach 8 turbulent boundary layer. AIAA Paper 97-0765, 1997
 - 66 Miles R B, Lempert W R. Two-dimensional measurement of density, velocity, and temperature in turbulent highspeed

- air flows by UV Rayleigh scattering. *Appl Phys*, 1990, 51: 1~7
- 67 Forkey J N, Finkelstein N D, Lempert W R, Miles R B. Control of experimental uncertainties in filtered Rayleigh scattering measurements, AIAA Paper 95-0298, 1995
- 68 Most D, Leipertz A. Simultaneous two-dimensional flow velocity and gas temperature measurements by use of a combined particle image velocimetry and filtered Rayleigh scattering technique. *Appl Opt*, 2001, 40(30): 5379~5387
- 69 Bookey H T, Bishop A I, Barker P F. Narrow-band coherent Rayleigh scattering in a flame. *Optics Express*, 2006, 14(8): 3461~3466
- 70 Dibble R W, Long M B. Investigation of differential diffusion in turbulent jet flows using planar laser Rayleigh scattering. *Combustion and Flame*, 2005, 143: 644~649
- 71 Lempert W R, Wu P F, Zhang B, et al. Pulse-burst laser system for high-speed flow diagnostics. AIAA Paper 96-0179, 1996
- 72 Elliott G S, Samimy M A. Rayleigh scattering technique for simultaneous measurements of velocity and thermodynamic properties. *AIAA J*, 1996, 34: 2346~2352
- 73 Hoffman D, Münch K U, Leipertz A. Two-dimensional temperature determination in sooting flames by filtered Rayleigh scattering. *Opt Lett*, 1996, 21: 525~527
- 74 Elliott G S, Glumac N, Carter C D, Nejad A S. Two-dimensional temperature field measurements using a molecular filter based technique. *Combust Sci Technol*, 1997, 125: 351~369
- 75 Elliott G S, Glumac N, Carter C D. Molecular Rayleigh scattering applied to combustion and turbulence. AIAA Paper 99-0643, 1999

THE PROGRESS OF THE DOPPLER GLOBAL VELOCIMETRY*

ZHANG Hongjun^{1,†} LÜ Jin²

¹College of Metrology Technology and Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China

²College of Optics and Electronics Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract Doppler global velocimetry (DGV) uses molecular/atomic filter principle to determine Doppler shift of light scattered from particles in a plane defined by a laser sheet, thus provides instantaneous measurements of the flow velocity in the plane. DGV has a great potential in the investigations in the areas of fluid mechanics, aerodynamics, and combustion, especially, in the high Mach-number flow. This technique has attracted interests of many researches, as is called planar Doppler velocimetry (PDV), absorption filtered planar Doppler velocimetry, filtered Rayleigh scattering (FRS). This paper reviews DGV in terms of its principle, structures, data processing, and future development.

Keywords Doppler global velocimetry, planar Doppler velocimetry, molecular filter, flow measurement, light scattering

* The project supported by Plan for Zhejiang Province Science and Technology Development (2007C21076)

† E-mail: zhanghongjun@cjlu.edu.cn