

激光多普勒测速及其应用

孙 渝 生

(上海激光技术研究所)

测量气体和流体速度的传统方法是采用毕脱管或热线风速仪,其做法是在被测速度场中放置一个传感器,然后将它感受到的与速度有关的信号送到二次仪表进行处理,得到速度的信息。然而,在流场中放置一个物体,其本身就意味着要干扰流场,从而影响测量精度,而且这些方法在测量狭小流场如附面层、射流元件等方面就无能为力,它不可能测量比传感器的体积还要小的流速场速度分布。

近年来发展了一种新型的测速技术,无需接触被测流体,只要让几束细光束穿过流动的气体或液体,就能测出流体的流动速度,这就是激光多普勒测速技术。

六十年代中期,Yen 和 Cummins^[1]首次利用激光的多普勒效应测量了流体的速度,他们用一台激光测速装置测量了水管中层流的速度分布。1966年,Foreman 等人写了第一篇有关激光风速仪的论文。从那以后,许多学者对这一技术进行了研究,刊出几百篇研究论文。1972年9月,在英国沙占普顿大学举办了以《流体测量中的光电系统》为题的学术讨论会,1975年8月,先是在丹麦哥本哈根,后来又在法国召开有关这项新技术的世界性讨论会。自八十年代起,已规定在葡萄牙里斯本每二年召开一次有关这一技术的学术会议。与此同时,工程师们已研制出了各种各样的光学系统和信号处理系统。自七十年代中期以来,国内外先后出现了作为科研仪器的新产品——激光多普勒测速仪。

一、激光多普勒测速的原理

在声学领域内,多普勒效应早为人们熟知,

是十九世纪德国物理学家多普勒首先观察到的现象:一个向着声源运动的观察者所遇到的声波频率比他静止不动时所遇到的声波频率要高,而对于一个离开声源运动的观察者来说,所遇到的声波频率就比他静止不动时所遇到的低。如果声源运动,而观察者静止,也会产生类似的效应。

爱因斯坦在他的狭义相对论中早就指出:在光波领域中也存在着类似的多普勒效应,而且可以利用这一效应来测量运动物体的速度。当光射向一个运动着的物体时,从观察者(或光电接收器)看来,由运动物体散射的光将产生频率变化,它与物体的运动速度、方向、入射光的波长、方向和观察者的位置有关,如果后几个因素都是已知,那么只要测得频率变化,就能推算出物体的运动速度。采用激光器作为入射光源,由于它的单色性好,使得入射光的频带足够窄,这样就可以比较方便地区别人射光和运动物体散射光的频率,或区别出不同方向入射的两种入射光所产生的散射光之间的频率差,从而确定运动物体的速度。

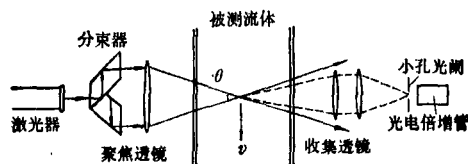


图1 激光多普勒测速光路原理图

最常用的激光测速仪的光路原理图如图1所示。由激光器射出的激光束被分束器分成两束强度相等、相互平行的光束。此光束通过聚焦透镜,会聚于流体中的被测点。当流体中以相同速度随流体运动的微粒在两光束所决定的

平面中从垂直于两入射光束角平分线的方向流经测点时,其散射光将相对于入射光产生频移,由于两入射光束的入射方向不同,因此它们各自产生的频移量不同.可以证明:不论从哪个方向接收,两束入射光产生的散射光的频率差都为^[2]

$$f_D = \left(\frac{2n}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \right) \cdot v, \quad (1)$$

其中 v 表示垂直于光轴方向并位于两入射光平面内的流体速度, n 为被测流体的折射率, λ 为激光束波长, θ 为两入射光束之间的夹角, 而 f_D 则称为多普勒频率.

光波的频率是很高的,约为 5×10^{14} Hz,但由于物体运动而产生的光波的相对频移却不超过 $2v/c$, 这里 v 是运动速度, c 是光速. 如果物体以 1m/s 的速度运动,其最大频移也只不过为 3.3MHz . 目前,世界上还没有一种仪器能直接准确地测量光的频率,更不用说分别测量两束如此相近的光的频率然后再进行相减了.

但是,如果把具有相对频移的两束光送到一个具有平方律检波特性的光电接收器上去,那么光电接收器的输出电流会随两束光的频率差而发生变化,这就是光外差,或称为光混频. 目前所使用的光电接收器,如光电倍增管、硅光二极管、雪崩二极管等都是理想的平方律检波器,用它们来收集散射光,就能把光学多普勒频移变为电流的变化. 在图 1 中,每当被测流体中的一个散射微粒经过测点时,光电接收器的光电倍增管就输出一列包络波,经电路放大后的包络信号如图 2 所示,包络中各波形的频率即等于多普勒频率,从(1)式可见,多普勒频率

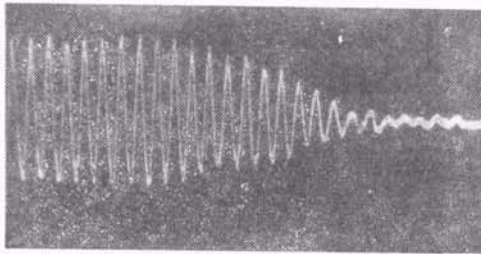


图 2 多普勒信号

正比于流体的流速. 测试时,一系列的这类包络波形成了多普勒信号,而这些信号中就蕴含着速度信息. 用各种电路对这类信号进行处理,就能得到流体的流速.

二、光学系统

以上所介绍的如图 1 所示的光路是最常用的,通常称之为双散射型光路.

另一种常用的也是最早使用的光学系统,是参考光束型. 它把激光束分成两束,但只让其中一束射向流体. 由流体散射的光将产生频移. 取其中某一方向的散射光并将它与另一束不经过流体的光束(称为参考光)在光电接收器阴极面上进行差拍,也能产生多普勒信号,可以证明,其多普勒频率也正比于流体流速.

图 1 的光路中,激光发送部分与接收部分列于流体两侧,接收器接收的是前向散射光,因此称为前向散射方式. 也有一种是发送与接收位于流体同一侧的后向散射方式. 后向散射光很弱,较难处理,但它更适用于流体只有一侧具有透明窗口的场合. 因为后向接收的光学系统是组装在一个牢固的光学单元之中,那么只要改变这一光学单元的位置,就可方便地改变流体中被测点的位置,这对于大型水工模型的流场测量特别合适.

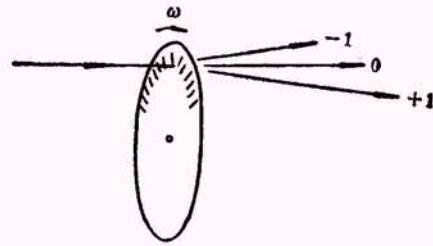


图 3 旋转光栅分束和频移原理图

目前,已制成了更复杂并且具有更多功能的光学系统. 例如,用一个旋转圆光栅作为分束器,就能使仪器具有辨别流向的功能. 如图 3 所示^[3],当一束入射激光射向一个圆盘光栅时,通过光栅出射的光束除原来方向的零级衍射光外,还将产生 $\pm 1, \pm 2, \dots, \pm N$ 级的衍射

光。当光栅旋转时,除零级衍射光外的各级衍射光都将产生频移^[4],它的第 N 级衍射光的频移量 f_s 由下式表示:

$$f_s = \pm N\omega_s N_t, \quad (2)$$

其中 N 为衍射光级次, ω_s 为圆盘光栅的转速, N_t 是圆盘光栅的总刻线数。各级衍射光的频率是增还是减,决定于旋转光栅的转动方向。在图3所示的条件下,+1级衍射光的光频比入射光频率高,而-1级衍射光频率比入射光的低。当旋转光栅转速不变时, ± 1 级衍射光之间产生固定频率差。若只取用 ± 1 级衍射光,用透镜将它们会聚于被测流体作为入射光束,那么当流体速度为零时,光电接收器将收到频率为固定频移的多普勒信号。当流体有速度时,将收到频率低于或高于固定频移的多普勒信号,它们的频率与固定频移之差为多普勒频率,其高低则取决于流体流动方向。因此,采用这种光路可以测出速度的大小,并能判别方向。同样,利用超声调制器(布喇格盒)产生频移,也能达到这一目的。

从以上所述光路可见:二路入射光只能测量一个方向上的流速,因而称为一维测速。如果采用三束入射光(偏振方向相互垂直)^[5],或利用氩离子激光器射出的双色光来产生四束入射光,则可以测量二维速度场,即同时测出垂直于光轴平面内任一方向的流速。同理,国外已把偏振、双色及频移等技术结合起来进行三维速度场的测量。

三、信号处理

激光多普勒测速仪所接收到的多普勒信号,不同于一般光学仪器的光电信号,它是一连串不连续的包络波。它们的出现也是随机的,有时又是频率调制的。各包络的幅度以及包络中所包含的信号周期数基本上都不一样。此外,还叠加上各种原因所产生的噪声,其信噪比还随测量对象及各种因素而变化。由此可见,一般的电子仪器不能满意地处理如此复杂的多普勒信号。

根据多普勒信号的特点,已研制出各种信号处理系统,在实际应用中,测量系统类型的选择依赖于输入信号的特性以及所需要的数据精度和显示方式。下面对各种方法作概略的介绍。

1. 频率跟踪器^[6]

从光电倍增管输出的多普勒信号 f_D 经前置放大器放大滤波后,输入一个混频器,同时跟踪器中压控振荡器输出的信号 f_{vco} 也被送入混频器,在混频器输出的信号中有 $f_{vco} - f_D$ 以及 $f_{vco} + f_D$ 两种频率成分。当 $f_{vco} - f_D$ 正好等于后面中频放大器的中心频率 f 或在其附近值上,它就能通过中放,并进入鉴频器。把鉴频器输出的直流电压放大后再进行电平变换,将其输出去控制那个压控振荡器,使它的输出频率与这一控制电压成严格的线性关系,再把压控振荡器的输出馈入混频器。至此,整个频率自动反馈控制系统的跟踪环路就构成了。环路工作时,能自动调节压控振荡器的输出频率,使它始终“跟踪”来自光电倍增管的多普勒频率,并与它保持一个近似恒定的差值,这样压控振荡器的输出频率就等价地代表了不连续的多普勒信号,而与它的输出频率保持直线关系的输入电压就能代表流体的流速。

频率跟踪法测量精度高达1~2%,特别适合于低信噪比液流的测量,测速范围为3mm/s~300m/s。

2. 计数型处理机

这种方法又称为周期计时测定法,主要是测出多普勒包络信号中的周期来确定多普勒频率的数值。其优点是完全不存在由于粒子在测量区内停留时间有限所引起的频率加宽误差,因而可以不必限制空间分辨率的提高,同时只需要低浓度散射粒子产生少量包络波,便可正确检测出多普勒频率,这一方法最适合于高速气体或者散射微粒稀少的场合。与频率跟踪法一样,计数型处理机的测量精度也可高达1~2%,与计算机连接,还可得出平均速度等参数,测速范围几mm/s—2000m/s。

3. 法布里-珀罗干涉仪

实质上这是一台光学频谱分析仪, 球面共焦法布里-珀罗干涉仪的透过率峰值波长 λ 与两球面镜之间的距离 d 之间存在着线性关系。如果用压电陶瓷使间距受锯齿波电压的控制, 则干涉仪的透过率峰值波长 λ 与电压成线性关系。这样, 根据透过的峰值波长便可对运动粒子的散射光进行光谱分析, 从而确定多普勒频率。这种方法适用于测量极高速度的场合, 但速度下限却受到限制, 一般以测量每秒百米以上的速度为宜, 而且只适用于参考束型光学系统的信号处理。

4. 频谱分析仪

这类仪器一般有现成产品, 用它可以直接观察多普勒信号的频谱, 这对于两相流来说更加直观, 这一方法不适合于高湍流度的场合, 测量精度也相对低一些。

5. 滤波器组

它由多个谐振频率依次递增的串联 LC 电路并联组成。当把经过放大的多普勒信号送到这一滤波器组上时, 谐振频率最接近于信号频率的那个 LC 电路上将出现最高的电压, 只要对各电容器上的电压进行扫描分析, 找出最高电压的串联 LC 电路, 便能确定多普勒信号的频率。这种方法适用于信噪比较低的不利条件, 但可测频率不能太高。

6. 光子计数相关法

其基本原理是对信噪比很低的多普勒信号进行相关运算, 求其自相关函数, 这样可以大大削弱噪声的影响, 从而取出淹埋在强噪声中的弱信号。这种方法的优点是它适用于比其它方法所允许的信噪比低得多的不利条件。但速度测量范围较低。

四、激光多普勒测速的特点

与传统的方法如毕脱管、热线风速仪相比, 激光多普勒测速技术具有以下优点:

1. 它是非接触性测量, 测量时不影响流场分布, 可以用以测定有毒、高温或具有腐蚀性的气体、液体的速度。

2. 测速精度高: 其速度测定精度主要取决于多普勒信号的处理, 目前已研制出的仪器精度一般都达 1—2%。由于光机装置没有机械磨损部分, 所以只要光学元件的相对位置一经固定, 就不必经常进行校正。

3. 空间分辨率高: 由于激光束可以聚焦在很小的区域内, 所以可以测量很小体积内的流速, 目前已可测直径为 $10\mu\text{m}$, 深度为 $100\mu\text{m}$ 的小体积流速, 这十分适合于测量边界层、细小管道和血管中的血流。

4. 测速范围广: 其测速范围主要取决于信号处理机, 目前世界上已有的产品和实验装置的测速范围低至 0.05cm/s 以下, 高达 2000m/s 以上。

5. 动态响应快: 速度信号以光速传播, 惯性极小。采用某些信号处理机如频率跟踪器等, 可以进行实时测量, 是研究湍流、测量脉动速度的有效手段。

6. 可同时进行多维测量, 并具有良好的方向灵敏度。光学系统的设计, 可以满足二维或三维流场的测量, 并能方便地辨别流向, 这是其它传统的测速方法难以解决的。

五、激光测速技术的应用和推广

由于激光测速具有许多优点, 因而引起人们极大的兴趣, 其应用范围也日益扩大。首先, 它广泛地应用于空气动力学和流体力学, 用来测量风洞、水筒、水工模型、射流元件等各场合中流体的流场分布和有关的物理量, 它也适用于边界层流体的测量和二相流的测量。近来, 已能测量亚音速、超音速喷气流的速度, 所以被用来研究喷气过程、燃烧过程, 为燃气轮机、气缸、锅炉、原子能反应堆等方面的设计研究提供实验数据和测试结果^[7-10]。

以往, 锅炉水模中的流速场是无法测试的, 一般只能用注入示踪带色液体的方法来观察流型。此法既不能判别锅炉各部位的真实流动状况, 又不能确切测定流速。1981年, 上海激光技术研究所与上海锅炉厂协作, 首先把这一技

术用于锅炉水模的流场测量^[8]。1984年,上海激光技术研究所又用新研制成功的二维激光多普勒测速仪更精确地测量了另一锅炉水模型中的流场分布^[9],这一水模型用有机玻璃制成,为实物的百分之一大小。这次测量探明了锅炉运转时产生积灰的原因,提出了改进措施。除了对原模型进行测量外,还对另一种结构改型的水模型的相应积灰区中的流场作了一次对比性测量,为改进锅炉提供了数据。

上海激光技术研究所也曾用所研制的激光测速仪精确地测定了核电站核堆烧料组件实体模型水路的速度分布^[10]。燃料组件的棒束之间宽仅3.3mm,长达200mm,以前没有一种工具能测量它们之间的流速分布,原因是间距太小,接触式传感器无法放入。然而,在这种场合激光测速技术显示了它独特的优点。

激光多普勒测速技术不仅用来测量流体,还可用于测量许多固体或粉状物的运动速度^[11],可用来测量金属板材(或纸张、布匹)的运动速度、光导纤维的移动速度等,甚至以测速仪为传感器,可反过来控制钢材轧带速度和纤维拉制速度。

利用激光测速仪对固体的测量,可导致许多特殊的应用。例如,低速回转台的转速极低,转动过程中有抖动现象,以前也缺乏较好的测量方法。如果在它的台面上放上一块直径很大而质量很轻的圆盘,用后向散射激光测速仪测量圆盘边上的线速度,那么测速仪信号处理机频率跟踪器就能提供一个正比于圆盘角速度的模拟电压,它不仅代表了角速度,也能实时反映角速度的变化^[12]。

在一般激光测速仪测角速度的基础上加以改进,引入相当于零速度的频移量,就能测量一个微电机转轴从静止到正常运转过程中的瞬态变化过程^[12]。同理,利用类似的原理和专门研制的装置,可以测量受冲击物体的瞬态运动过

程,例如枪弹或炮弹从枪膛或炮筒射出时的速度变化过程。

利用二维激光多普勒测速仪的光学系统,可以直接测量垂直于光轴的平面内的振动^[13];将测速仪的光学系统加以发展,目前正在研制一种测振装置,可以以很高的灵敏度测量垂直于光轴方向上的振动,借助于新研制的采用微处理机的信号处理系统,可以同时以很高的精度测出物体的振动幅度和频率。这一仪器也属于非接触测量装置,特别适用于不能带负载的振动体测量和高温、带腐蚀性气体、液体中振动体的测量和振动体的远距离监测,也可用来与振动台配套使用。

此外,还值得一提的是:激光测速仪也可用来测量长度,因为将速度积分,就得到长度。为此,可以专门配置合适的光学系统和信号处理系统。这对于工业生产过程中的在线测量可能很有用。结合其它技术,还可进一步扩大激光测速技术的用途,可同时测量浓度、粒子大小等其它物理参量。

现在,激光多普勒测速技术已逐渐在国民经济各部门得到实际应用,并取得了良好的效果。这一技术也还在不断地深入发展,进一步显示它广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Yen. H., Cummins H. Z. *Appl. Phys. Lett.*, 4 (1964), 178.
- [2] 孙渝生, *激光*, 6-5(1979), 34.
- [3] 孙渝生等, *应用激光*, 4-2(1984), 69.
- [4] F. Durst and M. Zare, *Appl. Opt.*, 13-11 (1974), 2562.
- [5] 孙渝生等, *计量学报* 6-2(1985), 135.
- [6] 孙渝生, *仪器仪表学报*, 4-4(1983), 431.
- [7] 孙渝生等, *激光与红外*, No. 3 (1981), 50.
- [8] 孙渝生等, *锅炉技术*, No. 10 (1981), 22.
- [9] 张才根等, *锅炉技术* No. 8(1984), 1.
- [10] 孙渝生等, *原子能科学技术*, No. 2 (1983), 189.
- [11] 孙渝生等, *四川激光*, 3-1(1982), 14.
- [12] 孙渝生, *光学学报*, 4-3(1984), 243.
- [13] 孙渝生等, *中国激光*, 11-3(1984), 173.