

多普勒-斐索效应使人们对距地球任意远的天体的运动的研究成为可能,这只要分析一下接收到的光的频谱就行了。1868年,英国天文学家 W.哈金斯用这种方法测量了天狼星的视向速度(即物体远离我们而去的速度),得出了 46 km/s 的速度值。

激光多普勒测速原理

激光测速的原理大致是这样:激光束射向流动着的粒子,粒子发出的散射光的频率改变了,通过光电装置测出频率的变化,就测得了粒子的速度,也就是流动的速度。激光测速的最主要的优点是对流动没有任何扰动,测量的精度高。

设一束散射光与另一束参考光(或两束均为散射光,但散射方向不同)的频率分别为 f_{s_1}, f_{s_2} , 它们到达光探测器阴极表面的电场强度分别为:

$$E_1 = E_{01} \cos(2\pi f_{s_1} t + \varphi_1)$$

$$E_2 = E_{02} \cos(2\pi f_{s_2} t + \varphi_2)$$

式中, E_{01}, E_{02} 分别为两束光在光阴极表面处的振幅; φ_1, φ_2 分别为两束光的初始相位。两束光在光阴极表面混频,其合成的电场强度为:

$$E = E_1 + E_2 = E_{01} \cos(2\pi f_{s_1} t + \varphi_1) + E_{02} \cos(2\pi f_{s_2} t + \varphi_2)$$

光强度与光的电场强度的平方成正比:

$$I(t) = k(E_1 + E_2)^2 = \frac{1}{2}k(E_{01}^2 + E_{02}^2) + kE_{01}E_{02} \cos[2\pi(f_{s_1} - f_{s_2})t + \varphi]$$

式中, k 为常数, φ 为两束光初始相位差, $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, 如两束光相干,则 φ 为常数。其中,第一项是直流分量,可用电容器隔去,第二项是交流分量,其中 $(f_{s_1} - f_{s_2})$ 正是我们希望得到的多普勒频移。多普勒频移与物体运动速度 V 的关系为:

$$f_{s_1} - f_{s_2} = \left| \frac{V}{\lambda} [\cos(\mathbf{K}_i, \mathbf{v}) - \cos(\mathbf{K}_s, \mathbf{v})] \right|$$

式中: $\mathbf{K}_i$ 是激光的传播矢量, $\mathbf{K}_s$ 是散射光传播矢量, $\mathbf{v}$ 是物体运动速度方向单位矢量, V 是物体运动速度。

这就是多普勒测速的基本原理。

激光多普勒测速特点

激光多普勒测速与传统的测速仪相比具有如下优点:

1. 属于非接触测量:激光会聚点就是测量探头. 测量过程对流场无干扰,这对回旋流场尤为适用。也可很方便地在恶劣环境中如火焰、腐蚀性流体内进行测量。

2. 空间分辨率极高:目前测点可小于 10^{-4}mm^3 , 随着所用激光波长的减小,光路和聚焦元件性能的改进,还可以进一步缩小。已可测出直径 $10 \mu\text{m}$ 中小部位流速。高的空间分辨率经常使用于边界层、薄层流体及狭通道场合的测量。

3. 动态响应快:速度信号以光速传播,惯性极小,只要配以适当的信号处理机,可进行实时测量,是研究涡流、测量瞬时脉动速度的新方法。

4. 测量精度高:测量所采用的公式是一个精确的物理关系式,基本上与流体的其他特征(如温度、压力、密度及黏度)无关,通过光路计算和保证制造精确后,可不考虑光路系统误差,系统测量精度很高,因而可用他来校正其他类型测速仪器。

5. 测量量程大:因为频差与速度成简单线性关系,不论低速或高速都不需校正,他允许有很大的频移,目前已能测 $0.1 \text{mm/s} \sim 2000 \text{m/s}$ 的速度,这是普通测速仪不能比拟的。

6. 测量速度方向的灵敏性好:因光束分离器旋转时测点不变,所以可方便地测量任意方向的速度分量,并可用作常量二维流动的测量研究。

激光多普勒测速仪本质上是利用检测流体中和流体以同一速度运动的微小颗粒的散射光来测定流体速度的仪器,由此也带来一定的局限性。

1. 被测流体要有一定的透明度,管道要有透明窗口。

2. 在测纯净的水或空气速度时,必须由人工掺入适当的粒子作散射中心。

3. 流速很高时要求提高激光输出功率,由于信号频率很高而使信号处理困难。

4. 价格较贵。

5. 使用时要有一定的防震要求,并使管道和光学系统无相对运动。

尽管如此,由于他有许多独特的优点,现已成为科研和实验室工作中的有力工具,并具有广阔的应用前景。

激光多普勒测速的应用

1. 多普勒雷达 利用多普勒效应制成的雷达称为脉冲多普勒雷达。其工作原理可表述如下:当

雷达发射一固定频率的脉冲波对空扫描时,如遇到活动目标,回波的频率与发射波的频率出现频率差,称为多普勒频率。根据多普勒频率的大小,可测出目标对雷达的径向相对运动速度;根据发射脉冲和接收的时间差,可以测出目标的距离。同时用频率过滤方法检测目标的多普勒频率谱线,滤除干扰杂波的谱线,可使雷达从强杂波中分辨出目标信号。所以脉冲多普勒雷达比普通雷达的抗杂波干扰能力强,能探测出隐蔽在背景中的活动目标。

天气雷达的工作原理:雷达不停发出微波脉冲,经大气中的雨点反射,通过量度这些反射回来的讯号,就能探测到大气中的降雨。一般来说,反射回来的讯号越强,雨势就越大。至于雨区与雷达之间的距离,则可利用微波往返雨区所需的时间而计算出来。

近年来多普勒天气雷达越趋普及,它能够量度雨点移近(或远离)雷达的速度。多普勒雷达原理可利用救护车响号的声调转变来解释:当救护车走近时,声调会升高;远离时,声调会降低。换句话说,救护车移近得越快,声调越高。多普勒雷达利用同一原理:雨点移近雷达的速度越快,反射回来的微波频率(即声调)就越高。透过这个频率转变,可导出雨点移近雷达的速度,从而替乘载这些雨点的风力提供了很好的估算。这种雷达能非常有效地监察出现的恶劣天气,例如热带气旋、雷暴和大雨。

2. 多普勒测速仪 可以精确测算出船只航行的速度,使现代大型船舶进出港口变得十分容易。它可以精确而方便地测出船舶的航行速度。一般的船用测速仪只能测出船与海水之间的速度,而不能测得船与海底的相对速度。由于海水是随风浪而动的,有时即使船速很小,但风浪很大时,船相对于海底的速度仍然很大,这就给船舶靠岸造成了很大的困难。

利用多普勒效应制成的多普勒导航声纳可以精确地测得船舶的对地速度,而且精确度达到0.01节,完全符合船舶靠岸要求。多普勒导航声纳的换能器安放在船底的前半部,让它向斜前方或斜后方发射窄波束。由于船在朝前行驶,因此从起伏不平的海底反射回来的回波频率将产生一定的偏移。

根据测速仪测出的频移大小,就可以得到轮船航行的对地速度。有时为减少船只摇晃程度及海底地形起伏对回波频移的差异,可在船底朝四个方向

发射声波,这样可以测得船舶航行的精确对地速度。船长可以依据船体航行的对地速度状况来控制船行的方向、速度等,以保障船只,尤其是大型船舶只能安全靠岸。

多普勒测速仪也广泛应用于高速公路的车辆速度测量中。

3. 血液流动的研究 近年来迅速形成的力学分支——生物力学,他把血液流体力学作为一个重要的研究课题,推动了激光多普勒测速的研究。它是利用多普勒效应原理,对运动的脏器和血流进行探测的仪器。其中,经颅多普勒是一个有效的无创伤性的脑血管检查方法,属超声检查范围,因此对受检查者毫无创伤和痛苦。许多脑血管检查方法如放射性核素的脑血流量测定、脑血管造影、数字减影血管造影等均具有一定创伤性及并发症,经颅多普勒安全、无创伤性。适宜于普通的临床应用。经颅多普勒检测检查全面,能分别检测颅内脑底动脉环上及颅外各血管及其分支,还有测定各支血管的各个节段,对每支血管可进行跟踪检测,其最大的分辨能力为1mm,如能进行细致的检测可发现脑血管上的微细的病变。经颅多普勒检测除能反映脑血管的器质性疾病,如脑动脉硬化、脑血管狭窄、脑血管畸形等外,还能较大幅度反映许多脑血管检查方法所无法得到的脑血管的功能性变化。

4. 超音速风洞中激光测速 激光风速计在风洞中的使用不如在测量液流中那样普遍,其一是风洞不易建造,其二是空气中尘埃下沉,很少甚至不可能产生自然的散射中心,而在液体中由于存在着细小的尘埃,总是很自然地形成散射中心。因此在风洞中必须掺入少量烟尘等微粒,这就使得这种系统变得复杂。美国阿诺德工程发展中心应用激光多普勒测速技术对一英尺超音速风洞中激波附面层,机翼外挂物等多种系统进行了测量,获得了很好的结果。

激光多普勒测速技术应用范围相当广泛,除了上述用途之外,还可以用于振动测量、固体表面速度的测量、大气风速的测量以及湍流的测量等,其特点是快速无惰性,不接触被测表面,因此不会损伤被测表面,精度与可靠性较高。而且该项技术已经由实验研究进入实用化,在各个部门的应用正在不断扩大。

(郑州解放军信息工程大学理学院数理系450001)