

1978 天津

激光多普勒测速技术 学术讨论会论文集

天津大学科技情报资料室

1978 天 津

激光多普勒测速技术学术讨论会论文集

出 版 天 津 大 学 科 技 情 报 资 料 室

编 辑 天 津 大 学 激 光 测 速 技 术 科 研 组

印 刷 天 津 大 学 印 刷 厂

发 行 天 津 大 学 科 技 情 报 资 料 室

一 九 七 九 年 七 月 出 版

字 数 114,400

印 数 2000

序 言

在科学研究和工业生产中，常常需要测量气体或液体的流速。传统的测量方法需在流体中插入探头，这样就干扰了速度场。用激光测流速没有这种缺点，并且能够测量很高和很低的速度，还可在高温、含粉尘和有腐蚀性的流体中进行速度测量。它的精度比较高，测点所占空间很小，是研究湍流和脉动流速的有力武器。因此，近年对激光流速计作了大量的理论和实验研究。1978年在天津召开的《激光多普勒测速科研成果鉴定及学术讨论会》对天津大学在激光流速计及测量技术方面的研究成果进行了鉴定，宣读了研究论文，其中有的在激光测速理论上作了重要探讨。在这次会议上，许多参加会议的代表也报告了自己的研究成果。这个论文集是在会议上宣读或交流的论文，可供有关人员学习参考。

天津大学副校长、教授

赵 今 声

1979.4.18

目 录

激光多普勒速度计的发展

.....浙江大学流体力学教研组 王智迅 (1)

双光束激光多普勒流速计研究

.....天津大学激光测速技术科研组 (19)

自制 JCY—1 型 丹麦DISA 55L—1型激光流速计的对比实验

.....天津大学 天津自动化仪表十厂 六机部七院十一所 (32)

激光测速仪光路设计中的几个问题

.....中国科学院力学研究所 刘玉民 (41)

激光测速的偏振干涉图式及其应用

.....清华大学 孙厚钧 宋传琳 (47)

应用偏振光的计数式激光流速仪

.....中国科学院力学研究所 谈洪 王永光 何跃翔 (70)

激光流速计中的频率跟踪器

.....天津大学 魏树华 郭晓明 (77)

频率跟踪器分析

.....中国科学院力学研究所 袁茂竹 (95)

激光多普勒效应流速测量术技应用于海流测量的海洋光学问题

.....中国科学院海洋研究所 钱正绪 (112)

用激光多普勒流速计测量圆管湍流及流量

.....天津大学 舒玮 王仕康 (117)

激光流速仪的原理及其在射流技术上的应用

.....北京工业大学射流研究室 罗志昌 靳彤 (127)

双光束激光流速计多普勒仪号的理论分析

.....天津大学 舒玮 王仕康 (145)

激光多普勒速度计的发展

浙江大学流体力学教研组 王智迅

激光多普勒测速系统测速是用一束单色激光照射到流体中的杂质质点上，测出其散射光的多普勒频移，然后确定流体的速度。这项技术比之热线风速计等主要的优点是它能测出流体中很小范围内的局部速度，而又不扰动原来的流动。本报告着重评论了这种光学方法的基本原理，光学系统和它的理论模型，讯号检测系统，分析了系统系数对信号强度，空间分辨力和测量精度等的影响，以及关于此光学方法现在的用处和将来可能的发展方向等。

“激光技术是六十年代开始发展起来的最活跃的科学技术领域之一，它的出现标志着人们掌握和利用光波进入了一个新阶段”，有力地促进各个学科的发展，利用激光具有优良的相干性方向性等特点，在精密测量、远距离测量等方面获得了广泛的应用。同样，它也成为流体力学新的强有力的测试手段，激光多普勒测速仪的出现就是重要的例子。

一、激光多普勒测速的特点

激光多普勒测速仪的基本原理是利用光学的多普勒效应和采用光外差技术。它是由光机系统和讯号处理系统两大部分组成，和传统的测速仪如皮托管、热线风速仪相比具有以下特点：

(1) 它是无接触测量，激光交点就是测量探头，如果略去激光的热效应（一般情况下完全可以忽略），测量过程对流场无干扰，且仪器的转换系数不受流体介质参数的影响，这对回旋流速场尤为适用，也可极方便地在恶劣环境中加强腐蚀性流体，高压高温气流等进行测量，引起化工和热能部门的兴趣。

(2) 空间分辨力极高，目前已超过了 $10^{-4}mm^3$ ^[1]，随着所用激光波长的减少，光路和聚焦元件性能的改进，还可进一步缩小，已可测直径 $10\mu m$ ，深度 $100\mu m$ 小部位流速。高的空间分辨力非常适用于边界层、薄层流体、狭通道流动等场合的测量。

(3) 动态响应快，速度讯号以光速传播，惯性极小，只要配合适当讯号处理仪器，可进行实时测量，是研究湍流，测量瞬时脉动速度的有效手段。

(4) 精度高、线性度好，基本上与流体其它特性（如温度压力、密度、粘度）无关，从原理上讲，通过光路计算和保证制造装配精度时，可不计光路系统的误差，系统测量精度可达很高，因而有可能用来校正其它类型测速设备。不过，测量湍流时，实际准确度与讯号质量、信号处理器以及流动特性有关，需对具体情况作具体分析。

由于频差与速度从低速到高速是一个关系式，不需要校正，在高湍流度做精确测量不会被非线性特性搞复杂，给计算和测试仪器的指示带来很大方便。

(5) 具有好的方向灵敏性, 光束分离器旋转测点不变, 可用以研究二维、三维流动和方便地测量任意方向速度分量。

(6) 测速范围大, 由于激光频率很高, 允许有很大的多普勒频差, 对应的速度也很大。目前已能测量零点几毫米/秒到数千米/秒。这是普通测速仪不能比拟的。

激光多普勒测速的局限性主要有:

(1) 被测流体要有一定的透光度, 管道要有透明窗口。

(2) 有时(高速)要人为加入光散射粒子, 否则会给测速带来困难, 并且讯号质量受散射粒子的限制。

(3) 被测流体高速时, 要求提高激光输出功率; 另外由于讯号频率高而使讯号处理困难。由于被测流体散射光强度太弱, 讯噪比太低, 以致有测不出多普勒讯号的场合。

(4) 有一定防振要求, 应使流体和光学系统不产生相对运动。

(5) 价格较贵。

尽管如此, 由于这项测速技术具有许多突出的优点, 能够测量常规手段无法测量的流体力学现象, 受到国内外普遍重视, 发展迅速, 已成为科研和实验室工作中有力的工具。并认为它具有广阔的应用前景。

二、激光多普勒测速仪现状

1964年由Yeh和Cummins^[2]进行最初实验以来, Forman等(1966年)^[3] Goldsfcion和Kreid(1967年)^[4] Pike等(1968年)^[5] Bonke等(1969年)^[6]作了发展, 从那以后许多学者对它进行了研究, 推动这一新技术不断向前发展。据估计近年世界各国关于激光多普勒测速的研究论文已发表数百篇。1972年9月在英国沙占普顿大学举办“流体测量中的光电系统”为题的讨论会^[7], 1971年在欧洲力学讨论会^[8]上许多学者交流了有关激光多普勒测速专题理论和实验许多方面的最新工作。1975年8月在丹麦哥本哈根, 之后又在法国多次召开该项技术的世界性讨论会, 仅在丹麦一次就有175人参加, 论文达700多页50篇^{[9][10]}, 先后出版了论述比较全面的几种专著^{[11]—[15]}, 对于激光多普勒测速的基本原理、方法、特点应用实例、测试技术以及所用的材料器件等, 均作了详述。至今关于这方面研究和应用情况的报告及产品介绍仍在不断发表。

70年代前后国外厂商开始向市场提供技术比较完备的作为科研仪器的产品, 并多次在国际展览会上展出。至今已见报导的有美国、英国、丹麦、西德、日本等国, 其中有些属某些大学和科研机构的实验室研制项目, 主要用于解决个别特殊场合下的流速测量问题, 取得了很高的效果。

现将国外市场上已有的基本工作原理相同但结构略有差异的激光多普勒测速仪产品数种简单介绍如下:

国别和型号	测速范围	精度	电频率范围
(美) TS1 1090	约1mm/S—500M/S		2KHz—50MHz
(英) 剑桥物理科学仪器公司	100μ/S—100M/S	±0.5%	100Hz—10MHz

(丹麦) DISA55L—I 型	3mm/S—300M/S	1%	2.25KHz—15MHz
DISA55L—II 型	3mm/S—300M/S	1%	2.25KHz—15MHz
注: 装有声光调制器, 调制激励频率 40MHz			
DISA55L90	2mm/S—2000M/S	1—2.5%	2KHz—100MHz
(奥地利) BBCGoeszLSE01	5.5mm/S—337.5M/S	0.1%	5KHz—16MHz
(西德) 勃拉特鲍维里康采恩实验室	1M/S—1000M/S		
(日本) 科学工业株式会社	不详		2.5Hz—20MHz

三、光学系统及其理论模型

理论模型:

光学系统可用两种不同的理论模型来阐明。一是基于多普勒效应, 采用光外差技术: 即当具有单一频率的单色的激光源与观察者处于相对运动状态时, 则观察者所接受到的频率将是变化的, 频率的变化量与相对速度成正比, 与振动源波长成反比。频率的变化它总是符合当光源与观察者相对运动使两者距离减小时, 频率增高, 反之频率减少。当光源是固定的, 但光波从运动的物体散射或反射而由固定的观察者接收时, 也可观察到类似现象。

不论波源运动或散射物体运动出现的多普勒频移 f_D 与速度有下面关系:

$$\frac{f_D}{f} \sim \frac{V_r}{a} \longrightarrow f_D \text{ 与 } \frac{V_r}{\lambda} \text{ 有关,}$$

V_r 是波源 (或散射物、反射物) 相对于观察者的速度。

a 是波 (声波或电磁波) 的传播速度, $a = f\lambda$ 。

f , λ 分别是波的频率和波长。

对于声波, 多普勒频移常常和源频率 f 有相同的数量级, 于是频移通常比带宽大得多, 并且容易检取, 又因频率低, 电讯号处理也简单。

对于光 (电磁波辐射), $a = c = 10^8$ 米/秒除极少例外, 总有 $V_r/c \ll 1$ 。光多普勒频移相对于源频率 (3×10^{14} 赫) 来说, 频率变化很小, 通常难于检取。普通光源常有比多普勒频移 (适当的速度时) 大得多的带宽 (例如普通光 $\Delta\nu$ 为 10^3 MHz) 多普勒频移不容易根据频带加宽的讯号测出。因此, 在激光出现前, 具有普通带宽的光源很难利用光学多普勒效应来检测速度, 通常只用于天文学上以决定高速运动的发光的天体运动的速率。

激光的出现, 使光外差技术才可用来测地上的普通速度。激光实质上是极窄频带的相干辐射源, 对 He—Ne 激光 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$, 光源频率 $\nu = 5 \times 10^{14} \text{ Hz}$, 光源带宽 $\Delta\nu = 10 \text{ Hz}$, TEM₀₀ 模。

以中等速度运动的发射体所引起的激光多普勒频移与光源频率相比仍然是很小的, 但与光源带宽相比则是大的, 因此能用光外差技术检测出来。通常通过光电检测器, 检测由于颗粒移动而发生多普勒频移的散射光 and 没有发生多普勒频移的光的差拍讯号。这种情况的几何图形, 如图 1 所示。根据多普勒效应:

$$f_P = f_i \left(1 - \frac{\vec{V} \cdot \vec{e}_i}{C} \right) \quad (1)$$

$\vec{e}_i$ 入射光方向上单位矢量

f_P 运动粒子接收到的频率

f_i 固定的入射光源频率

$\vec{V}$ 运动粒子 P 的速度

C 介质中的光速

$$f_s = f_P \left(1 + \frac{\vec{V} \cdot \vec{e}_s}{C} \right) \quad (2)$$

(1) 代入 (2) 得,

$$f_s = f_i \left(1 - \frac{\vec{V} \cdot (\vec{e}_i - \vec{e}_s)}{C} \right) \quad (3)$$

由光外差技术, 求 f_s 与 f_i 差频

$$f_D = f_s - f_i = -\frac{1}{\lambda} \vec{V} \cdot (\vec{e}_s - \vec{e}_i) \quad (4)$$

$(\vec{e}_s - \vec{e}_i)$ 称为多普勒强度方向, 上式的物理意义是:

多普勒频移的数值, 等于散射粒子的运动速度在多普勒强度方向上的分量与入射波波长之比。

光学系统的第二种理论模型是 1969 年 Rudd 根据干涉理论提出的干涉条纹效应, 他认为当两条相干光聚焦于一点时, 在该点附近的一个小区域内必将产生一组干涉条纹, 条纹的方向与两束光的角平分线平行 (图 2)。

设干涉条纹的间隔为 d , 由两列相干平面波相互干涉的布拉格条件, 得到

$$d = \frac{\lambda_0}{2 \sin \varphi} \quad (5)$$

其中 λ_0 是入射光波长

2φ 是入射光线夹角

粒子在垂直于干涉条纹方向上以速度 $\vec{V}_e$ 穿过条纹, 当粒子位于条纹的亮区时, 对光的

阻挡及散射最大, 当粒子位于条纹暗区时, 对光的阻挡及散射最小。因此在条纹之后接到的光讯号将是一个波动量, 其波动频率 f_D 正比于穿过条纹的速度, 而与干涉条纹的间隔成反比。即

$$f_D = \frac{V_e}{d} = \frac{2V_e}{\lambda_0} \sin \varphi \quad (6)$$

由干涉条纹效应得到的结果与由多普勒效应理论得到的结果是一致的。[对照公式(10)]
光路系统:

光路系统按接收散射光的位置分为前向散射、后向散射系统和前、后向散射通用系统。按同时可测量速度分量的维数, 可分为一维、二维、三维光路系统。

典型的光路有下列四种, 见图 (3) a)、b)、c)、d)

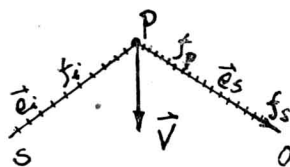
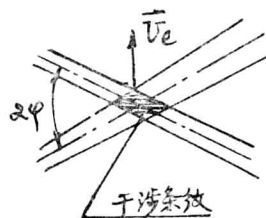


图1. 多普勒频移的几何图形



两束相干光相交于干涉条纹

图2

a) 双散射光束 (干涉条纹型)

激光束经由半透膜 M_1 和全反膜 M_2 组成的分光器后, 分成两束平行光, 再经过透镜 L_1 聚焦到流场中被测点 P , 两束光均被 P 点粒子所散射, 其散射光为光电倍增管 PM 的光阴极 S 所接收。同一频率的两束光, 从不同方向射到粒子上, 由于 $\vec{v}$ 与 $\vec{r}_{o1}$, $\vec{r}_{o2}$ 相对方向不同, 这两束光在 P 点发出的散射频率 f_{P1} , f_{P2} 不同, PM 收到的频率 f_{S1} , f_{S2} 也就不同了。

由图 3(a) 并根据公式 (3), 光电倍增管上 S 接收到 O_1 光束经 P 点散射后在 $\vec{r}_s$ 方向上散射光的频率为:

$$f_{S1} = f_0 \left[1 - \frac{\vec{V} \cdot (\vec{r}_{o1} - \vec{r}_s)}{C} \right] \quad (7)$$

同理, S 接收到 O_2 光束经 P 点散射后在 $\vec{r}_s$ 方向上散射光频率为

$$f_{S2} = f_0 \left[1 - \frac{\vec{V} \cdot (\vec{r}_{o2} - \vec{r}_s)}{C} \right] \quad (8)$$

f_{S1} 和 f_{S2} 在光阴极板上经光外差作用后, 得到的频差:

$$f_D = f_{S1} - f_{S2} = \frac{f_0}{C} \vec{V} \cdot (\vec{r}_{o2} - \vec{r}_{o1}) \quad (9)$$

参看图 3(a), 可以写成如下形式:

$$f_D = \frac{1}{\lambda_0} 2n \sin \frac{\theta}{2} \quad (10)$$

$$\text{或} \quad n = \frac{\lambda_0}{2 \sin \theta / 2} f_D = K f_D [KHz] \text{ CM/S} \quad (11)$$

式中 f_D 多普勒频差讯号

n 速度矢量在两束散射光矢量差方向上的分量

λ_0 激光的波长

θ 两束光的聚焦角

K 转换常数 $K = \frac{\lambda_0}{2 \sin \theta / 2}$ 当 λ_0 , θ 确定时, K 便是确定的常数。

b) 基准光束 (参考光束) 型

激光束分裂成两束光, 其中一束是弱光用作基准光, 另一束是强光用作照射光束, 它们聚焦相交于流体中测量位置组成测量体积, 基准光束被中性密度滤光片 M_3 衰减, 目的是使多普勒讯号有最佳的品质, 它由光电倍增管检拾。

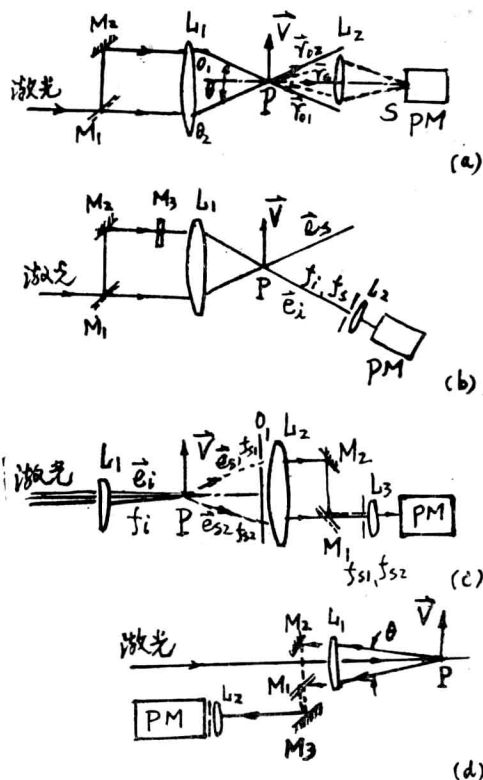


图 3 典型的光路系统

光电倍增管接收两束光讯号,一个没有产生频移(参参光束),一束产生频移(由微粒散射所形成的散射光束),这两讯号频率分别为 f_i 和 f_s ,这里, $f_s = f_i + f_D$,因此,两支光束在非线性元件光电倍增管上进行混频,从而产生拍频,进而把多普勒频移转换为电信号。光电倍增管发射带有频率等于差拍频率 f_D 的交流讯号,这里

$$f_D = f_s - f_i = -\frac{1}{\lambda} \vec{V} \cdot (\vec{e}_s - \vec{e}_i) \quad (12)$$

c) 双散射光束(对称外差)型

在双散射光束工作方式下,一束入射激光束直接聚焦于测量点上,光线被同一微粒在两个方向上散射,两支对称的散射光束通过置于大透镜前的双孔光阑圆盘,其余的散射光则被遮挡,此后,两支散射光被光束分裂器结合成单光束。

光电倍增管接收两束光讯号,每束不同方向的散射光来自同一入射光,两个讯号都产生相对于入射光束的频移

$$f_{s1} = f_i + \frac{1}{\lambda} \vec{V} \cdot (\vec{e}_{s1} - \vec{e}_i) \quad (13)$$

$$f_{s2} = f_i + \frac{1}{\lambda} \vec{V} \cdot (\vec{e}_{s2} - \vec{e}_i) \quad (14)$$

从光电倍增管输出的频率等于差拍频率

$$f_D = f_{s2} - f_{s1} = \frac{1}{\lambda} \vec{V} \cdot (\vec{e}_{s2} - \vec{e}_{s1}) \quad (15)$$

讯号的检测不依赖于入射光方向,这可以从多普勒频率 f_D 的表达式(15)中不包含 $\vec{e}_i$ 量看出,因此入射光方向可以反向,其结果将是相同的。[图3d)]

激光测速仪方向灵敏性对于测量二维流动流场是理想的,当测量两个互相垂直方向的流动速度分量时,双散射光系统提供了一个简单的方法,可以让两个互相成直角的平面检拾散射光。对于仅能在一侧对流动进行测量的对象,可以采用后向双散射光系统。只要激光功率足够大,甚至在这种情况下,由两套设备同时进行二维流动测量都是可以实现的,如果再加上一套侧向的双散射光束装置,便可实现三维流场测量了。

光学系统比较:

从激光测速发展过程来看,首先出现的是参考光束型,70年前国外主要用这种光学系统。之后,干涉条纹型克服了参考光束型某些弱点发展很快,被广泛应用,它的优点是:①调整比较容易,同时对振动也不像参考光束系统那样敏感。②式(9)中不出现 $\vec{r}_s$,这表明明散射光的频差与光电倍增管接收无关,也即同测量位置无关,因而使用不受现场条件限制,并且还可获得较高的分辨力。③被运动粒子散射的激光能量利用率高,讯噪比大约可比参考光束型高一个数量级。④在干涉条纹型中,进入光电检测器的散射光线来自两个具有同样强度射线交点的混合光线,它对所有尺寸的散射粒子都发生高效率的外差作用,从而避免了某种型式的讯号“脱落”,而在参考光束型中,高效率的外差作用仅仅发生在散射光束大致上和参考光束同样幅度的时候。测量是对尺寸基本相同的微粒的多普勒频率进行的,由于微粒尺寸的分散性,有时就会出现“讯号”脱落,它会给数据分析带来困难。

至于双散射光束型一般用得较少,它比起条纹型来没有明显的优点,但是可以用它来接

收二个互相垂直平面的两对散射光,同时测量两个速度分量。而旋转双孔光阑到任意角度,可接收测量平面上任意方向的两个速度分量。

后向散射光路布置同前向散射没有什什区别,因为对常用尺寸的散射粒子,后向散射收集的散射光强度比前向散射要小两个数量级,所以大多数情况下都使用前向散射,然而当采用前向散射型在某些情况下不可能时才用后向散射。

光束分离器

干涉条纹型和参考光束型都需要将一束激光分成两束,这个工作是由光束分离器完成的。图4列出了几种常见的光束分离器。其中图4(a)、b)、c)、e)、H)是不等光程分光,图4(d)、f)、G)是等光程分光,并且可以用移动棱镜位置的方法[对于(f)要外加凹透镜,移动凹透镜]连续改变光束间距,因而使用同一焦距的透镜,可以使流速和频差的比例系数改变,又等光程可以使讯号质量较好,这是它的一个优点。图4(f)使用Wollaston棱镜得到的两束光,是互相正交的偏振光,所以要通过偏光板使之合并。

总之,不论使用那种分光器,为保证两束分开的激光束完全相交,必须使用高精度的装置。

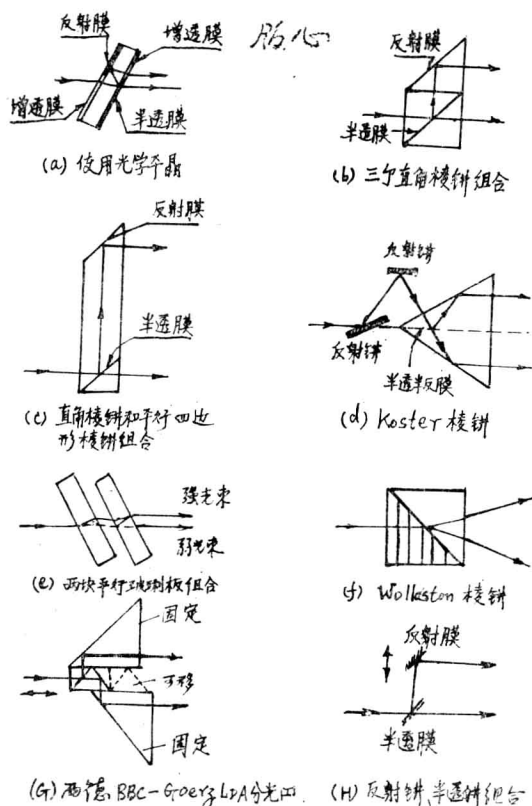


图4 各种形式的分光器

在上述光路的测量中,局部点的平均(或瞬时)速度它的方向是与两束入射光角平分线垂直的确定方向,但是正负方向不能确定。为此, L. jokson 和 Morikawa (1971年) [16][17]成功地利用晶体的布拉格衍射 (Bragg Reflection), 即光学频移装置——声光

调制器,来改变激光参考光束频率,制造了能区别正和负流速的激光多普勒流速计。这样零速度给出某一定值的频率,负速度频率比它低,正速度频率比它高,可用于反向流或高紊流流动的测量,丹麦 DISA 55L II 型就装备了 Bragg 元件。

近年来正在发展一种集成光学系统和积木组合式光学系统,它可以迅速地调整到所需的光学系统工作,调准精确,操作灵活,简单,现在国际市场上的产品多数都提了对三种型式光学系统中每一种以前向和后向散射工作的可能性,这样的光学单元使激光多普勒测速计可以被那些只有很少光学知识的人来使用,并可用于比通常试验室中更为不利的环境中。

H.H.Bosssel, W.J.Hiller 等人^[18]提出“噪音差动消除法”,他们使用了 Wollaston 棱镜的分光与偏振特性,用两个光检测器观察分开的讯号,用光学办法去消除夹杂于多普勒讯号中的噪音,这两讯号具有同样的多普勒频移,但是信号的相位相反,两个光检测器输出的电讯号,通过差动放大器,从而把 f_D 转移为电讯号。据称讯噪比可以显著地提高,从而不必昂贵复杂的讯号电子处理系统。

值得提出的是,激光多普勒测速仪同其他光学仪器例如法布里—珀罗 (Fabry-perot) 干涉仪^{[19][20][21]},纹影仪(激光的 Schlieren 干涉测量法)旋转光栅以及激光全息等结合起来使用,克服了用外差法或干涉条纹系统经历的某些检测困难,扩大了激光测速的用途。

激光测速使用的光源,通常采用相干性优良的 He-Ne 激光器,前向散射功率为 5mw,后向散射约 10mw 或更高。测高速气流或远距离测量常用氩离子激光器也有用二氧化碳激光器,功率为几瓦。

DISA 公司为解决高速气流含稀薄粒子和后向散射二维测量,特殊设计了二色光路(黄、绿)氩离子激光器(4 瓦)已经试制成功^[9]。

四、讯号检测系统

激光多普勒测速计的光学系统产生的讯号是既有幅度和频率的调制,还带有一系列噪音,间断、随机的讯号。讯号检测系统的任务就是从中提取那些反映流速的真实信息。

(1) 最早的讯号检测是采用容易现购的频谱分析仪,主要缺点是检测比较缓慢,速度分辨力比较低,只能测时均速度,它还会使瞬时讯号遗漏。当讯号频谱不对称时,会引入相应的误差。

(2) 滤波器组:即是一系列窄带滤波器的组合,相邻两滤波器的中心频率之差小于给定的测量误差,输入讯号同时输给所有的滤波器,再把各滤波器的输出互相比较,输出最大的滤波器之中心频率即是讯号频率。

(3) 光子相关器:光子相关器可直接作出检光器的输出信号按时间平均的自相关函数,以测量平均速度。原则上像滤波器组那样有效,专用于信息量只有一比特(有时没有光子,有时只有一个光子)的弱散射光情况,特别适用于按后向散射的接收方式测量高速气流的平均速度。

(4) 频率跟踪器:这是应用最广泛的一种系统,频率跟踪器输出电压和瞬时多普勒频率(因而也和瞬时流速)直接成正比。它实质上是“频率负反馈”系统,这种系统的讯噪比可大为

提高, 并提供了一个连续输出的讯号, 但当微粒浓度较低时, 可能出现讯号脱落, 于是就研制了各种“讯号脱落保护”装置使跟踪器的跟踪性能增强, 图5是丹麦DISA公司频率跟踪器系统基本单元的方框图^[22], 随时间而变的多普勒讯号, 在混频器和电压控制振荡器的输出相混合, 具有各种频率的输出讯号首先由第一窄带滤波器 ($I.F./A$) 滤去尽可能多的噪音, 然后由限幅器 I 消除多普勒讯号中固有的振幅脉动并馈送到灵敏的频率鉴别器, 频率鉴别器产生了一个正比于来自固定中心值 f_0 的 ($I.F.$) 频率偏移的直流输出, 经过适长的时间常数 T_0 的平滑和电流放大后, 所得的误差电压 v 被馈送到电压控制振荡器 ($V.C.O$) 的控制输入。反馈的结果是如果回路增益选择得适当, 振荡器的频率就跟踪在与多普勒讯号几乎保持固定差 f_0 的频率上, 于是电压 v 提供了一个“瞬时”多普勒频率的电模拟量, 因而也就是提供了流动速度的电模拟量。

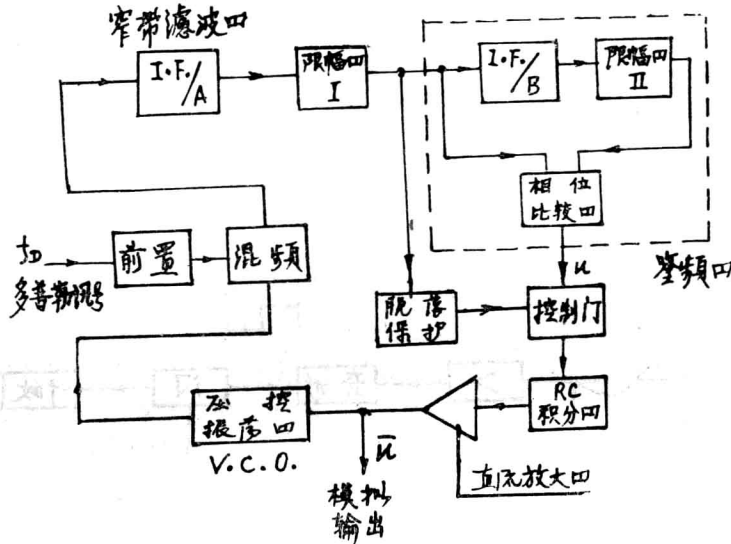


图5 频率跟踪系统基本单元的方框图

频率鉴别器由第二窄带滤波器 $I.F./B$ (也调谐到 f_0)，限幅器 II 和相位比较器组成， $I.F./B$ 仅仅让限幅器 I 的矩形波的基波分量通过。 $I.F./B$ 的电路是这样安排的：在谐振时它的输出滞后于输入 $\pi/2$ ，在高频时滞后大于 $\pi/2$ 小于 π ，在低频时滞后小于 $\pi/2$ 大于零。限幅器 II 产生一个和限幅器 I 相类似的固定振幅的矩形波。相位比较器完成了简单的模拟乘法，所以它的输出基本上是两倍于 $I.F.$ 频率的矩形波，其占空比随着输入的相位差而改变，输出的平均直流电平 $\bar{u}$ 正比于 $(\pi/2 - \varphi)$ ，其中 φ 是 $I.F./B$ 产生的相位滞后；于是对共振点中频 ($I.F.$) 以下的频率 $\bar{u}$ (随之 v) 为正，对共振点以上频率 $\bar{u}$ 为负，对 $f = f_0$ 时 $\bar{u}$ 为零。

方框图中的脱落检测器主要用于当多普勒信号中断时 (空隙) 产生一个讯号输出，控制门电路以便继续维持原来信号之间的跟踪关系。使整个系统的跟踪性能增强。这种线路比较先进，但线路复杂。

近来已经将讯号处理机的固定频率变为可变频移，以便适合多种测量，当需要详细了解在一个平均速度附近的流动波动时，可选择速度范围于刚足够覆盖实在的波动，增加了分辨

度和精确度。

另外,显示单元加入“校准因数”,使输出直接以 m/s 或 mm/s 为单位的平均速度(平均时间也可改变)数字显示,此外也可测其模拟输出电压来求瞬时流速。今后如果设法使输出讯号同专用计算机、打印机、描示仪配合使用将更加方便。

(5) 计数器式处理机:基本上是一种计时装置,测量已知数目周波数所对应时间,从而测出信号频率。

$$V = \frac{nd}{\Delta t}$$

式中 d —— 条纹间距

n —— 人为设计的,穿越条纹数

Δt —— 穿越 n 条纹所用的时间

V —— 速度

计数器讯号处理机的主体部份相当于一个高频的数字频率计,以被测讯号来开启和关闭门电路,以频率高于被测讯号频率若干倍的振荡器的信号作为时钟脉冲,以计数电路计下门开放和关闭期限通过的脉冲数,就可换算出被测讯号的频率或周期。它的原理方框图如图 6 所示

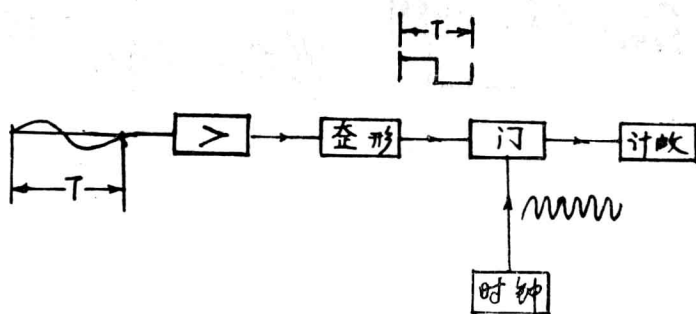


图 6 计数型讯号处理机原理方框图

由于是取样和保持型的仪器,不存在频率跟踪器所遇到的信号脱落问题,特别适用于低散射粒子浓度、高速流体的测试^{[9][23]}。频率跟踪器的显著弱点是,要求测量对象需先有一段速度史,计数型处理则不需要,所以可反映快速变化。但计数型要求的信噪比较高,据 DiSA 公司生产的两种仪器,对于频率跟踪器信噪比为 12db 时,就可获得极佳的处理,而对于计数型则需每 25db 左右方能进行处理。计数型多普勒讯号处理机的典型产品资料有 DiSA 55L90^[9],西德 BBC—Goerz Lse—01 型^{[24][25]}。

五、激光测速测试技术中的几个主要问题

随着激光测试技术的广泛应用,国外许多学者对激光多普勒测速的测试技术中许多重要问题,进行了比较深入的研究和试验并发表了许多综合评述或专论文献,现将所涉及的一些主要问题归纳如下:

(1) 单颗粒子和多颗粒子拍频讯号波形的研究^[26]。

(2) 散射光强度^{[27][28]}讨论关于满足测量要求的最小散射光强度和影响散射光强度的因素等。

(3) 讯噪比的研究包括 S/N 定义、影响因素、提高 S/N 方法, 最佳 S/N 问题^{[28][29][30][31]}。

(4) 测量体积及空间分辨力的研究包括确定仪器空间分辨力时应考虑的问题, 测量体积大小的求法以及如何提高空间分辨力等^{[32][33]}。

一般把光束相交形成的灵敏区称为测量体积, 它确定了测量的空间分辨力。空间分辨力指的是把一定波长的激光束在流体中聚焦所能达到的最小敏感体积, 在这些体积内的散射光均可被接收器所接收。空间分辨力越低, 多普勒讯号频谱就越宽, 对测量仪器的要求也就越高。空间分辨力越高, 对窄通道及附面层的测量是很有利的。测量体积的大小是由激光波长和发射器与接收器的光学系统决定的, 为了确保散射讯号的连续性, 测量体积中必须始终保持一颗以上的微粒存在, 因此测量体积区的大小必须和最小微粒浓度相配合。

(5) 动态响应特性及速度分辨力的研究, 通常同讯号处理机的性能有关^{[22][34]}。

(6) 散射粒子问题, 包括粒子大小、质量、种类、粒子浓度、粒子产生和测量以及对流动测量的影响等^{[35][36][29]}。没有存在适当的散射粒子浓度, 激光测速计往往不能工作。在多数情况下, 在流体中的粒子是自然分布状态, 例如普通水中的固体污染物, 但是, 在有些情况下, 为使讯号尽量连续, 信号质量尽量好, 以便测量更可靠, 尤其对于湍流或高速流动的测量, 加入适当尺寸和适当浓度的粒子也是经常需要的。通常认为, 粒子必须足够小以便能够跟随高频系统流动并达到足够的精度, 但粒径过小, 布朗运动的影响显著; 粒子也要足够大, 以便能检测散射光, 但粒径过大, 对流体的跟随性变坏。一般推荐的粒径是:

对于空气 $0.1 \sim 1.0 \mu$

对于液体 $1 \mu - 10 \mu$

另外, Dnrst 和 Whitelaw 认为, 信号的强度并不比例于颗粒的直径; 而颗粒的直径与干涉条纹间隔的比却与能否得到良好的信号有关系。例如, 和干涉条纹间隔相等的颗粒通过测量点时, 因散射光的强度不起伏而不能得到对应于流速的信号, 得到最好的信号的情况是在干涉条纹宽度为颗粒直径 2 倍的时候。

在测量体积中有多少颗粒子是必要的, 尚未定论。对此有各种各样的提法, 有的认为要有 $10 \sim 1000$ 个^[37]; 有的认为要在两个以下^[37]; 有的认为即使经常少到 1 个也可以^[38]; 有的则认为恰好有 1 个颗粒最好^[39]。总之, 粒子的浓度应足够高, 以能产生适当数量的散射光, 但也不能太高以致整个测试区产生光的漫射或者引起粒子污染以致掩盖了测量窗口。正确的浓度也依赖于讯号检测方式和测量的工作方式, 一般通过试验决定, 已知“双散射光学系统”要求较低的散射粒子浓度, 而“参考光束系统”则要求较高的浓度。

对不同的测量介质, 所需加的散射粒子也不一样, 例如:

被测介质	所加的散射粒子
水	滑石粉、聚苯乙烯, 脱脂牛奶等
油	氧化铁 (油化颜料)
空气	Dop、水蒸汽、硅油滴, 煤粉, 乙二醇蒸气等

火焰 氧化镁, 二氧化钛, 硅油滴, 二氧化硅等。

各种粒子发生器已有商品出售, 如 Dop 发生器 (美国), 水雾滴发生 (丹麦) 以及中国江苏常熟无线电元件厂产的 P75 型烟雾喷射器 (乙二醇蒸气) 等。

(7) 多普勒讯号的“加宽”问题, 如: 频率加宽的原因及其修正和消除^{[30][27][40]}—^[43]是近年来讨论比较多的问题。讯号加宽是测速误差来源之一。它可分为两种即:

A、物理性讯号加宽: 如速度场有速度梯度存在, 粒子的热运动等。速度梯度存在使散射体内各点速度不相同, 在不同部位的散射光频移就不一样, 在测量边界层时必须特别加以考虑。这种由于流场性质决定的加宽要经过大量试验加以修正。为了减少这种加宽, 尽可能采用小的散射体积。但这时 S/N 也相应减小, 取小的散射体积的好处容易被信号质量的损失所超过, 应权衡考虑。

选择适当尺寸的粒子, 它的热运动可以忽略, 而使加宽效应减少到不影响测量。

B、仪器加宽: 主要是孔径加宽, 由于光线是会聚的, 当入射光聚焦到被测体内, 它们之间的夹角不是一个 θ , 而有 $\Delta\theta$ 存在会引起误差。

另有脉冲加宽 (渡越时间加宽) 粒子穿过有限尺寸的测量体积, 要有一段渡越时间, 特别对于紊流在渡越时间 Δt 内速度也已经发生了变化, $V = V(t)$, 因而也有 $f_D = f_D(t)$, 这样引起频带加宽。

(8) 测量仪器结构的考虑包括测量窗口光学特性及防止污染问题;^[44]保证相干混频的条件;^{[34][43]}及入射角和散射角的选择原则等。归结为光学系统几何布置的最佳方案。^[28]

两路光束混合时要求散射和参考光的光程应相同或相差 $2L$ 的整数倍 (L 是激光器谐振腔的长度), 然而激光相干性很好, 激光所允许的光程差比非相干光要大得多, 当使用 He—Ne 激光器时一般是能够满足的, 但实验证明, 光程差匹配不好信号强度要损失, 文献^[45]列有相对信号幅度与光程差的关系曲线可资参考。

选取光束交叉角 θ 时, 仪器的量程负担、讯噪比、空间分辨力、测量灵敏度等之间存在着矛盾 (见右表), 因此 θ 不能取得太小或太大, 一般取 θ 几度到二十几度之间。

Jcnos 等人^[51]广泛研究了激光测速主要参数之间的关系, 用计算机计算结果图表包括了关于 S/N 光电倍增管的输出电流和功率必须掺入的粒子浓度、空间分辨力和散射角关系, 散射角和光电接收器的频率响应所决定的可以测定的粒子速度的上限等。

	$\theta \uparrow$	$\theta \downarrow$
空间分辨力	$\uparrow$	$\downarrow$
测量灵敏度	$\uparrow$	$\downarrow$
S/N	$\downarrow$	$\uparrow$
仪器量程负担	$\uparrow$	$\downarrow$
频率加宽	$\downarrow$	$\uparrow$

六、激光多普勒测速计的应用

激光多普勒测速法作为非接触测量、不扰动测量对象、高的空间和速度分辨力, 它能测量过去用皮托管、热线风速仪难以测量的对象, 而特别引人注目。尤其在研究边界层、湍流、两相流、特殊场合的流体力学等流动现象, 有着非常广泛的应用前景。最近的报告还表

明激光多普勒测速的应用范围正在扩大。

归纳起来, 已知的应用范围包括以下内容:

管内水流层流、层流过渡区速度分布的测量。

湍流的测量包括速度脉动, 湍流强度、雷诺剪应力、非常接近的两点流体脉动相关等。

亚音速、超音超喷气流速度测量。

旋涡的测量。

高分子化合物减阻的测量研究。

射流元件内部速度分布。

不可能接近的小领域 ($30\mu\text{M}$) 及边界层测试。

一些特殊流动现象如: 非牛顿型流体 (如血液流动) 二相流 (汽固、液汽、固液) 非常缓慢移动现象的测量研究等。

大气远距离的测量, 用 5 瓦 CO_2 激光器, 其最大作用距离已达 200 米到几公里。

燃烧气体火焰的流体力学研究如速度分布、测定燃烧气体的平均速度和紊流速度以及脉动火焰的瞬时速度等。

一些专用的激光测速计已制造出来了, 如用于风洞、水洞、海流测量、船舶研究及航空的激光多普勒速度计等。

还可以看到这样的趋向: 激光多普勒测速计从原先主要在实验室用于科研已发展到进入工厂直接用于生产如测铝板、钢板的轧制速度, 固体粉末输送速度, 天然气输送以及控制棉纱、纸、人造纤维的运动速度以提高产品质量。从原先一维向多维的激光多普勒测速计发展。从单一测速现在已发展到能同时测速度和温度、速度和浓度以及同时测速和测距的技术。激光多普勒测速计还可用来测转速 (后向散射)、测振动 (加声光调制器) 等。从低速往高速 (据称已能测 2000 米/秒), 从短距离往远距离以及同其它光学仪器 (如干涉仪、显微镜等) 相结合扩大用途等。

下面例举几个典型的应用:

1. 管道内水流^[45]

浙大流体力学与研究激光测速组测量了园形 (矩形) 玻璃管内的流速分布, 其实验装置图示于图 7。

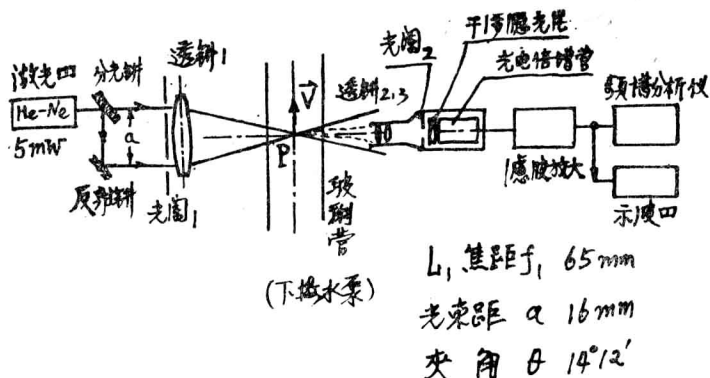


图 7 玻璃管内流速测量实验装置示意图