

后向散射激光多普勒测速装置

孙 渝 生

(上海市激光技术研究所)

提 要

本文描述一台后向散射激光多普勒测速装置及其设计思想。这一装置已成功地在实验室运转,它由一台 20 毫瓦单模运转的 He-Ne 激光器、一个发送和接收的光学头部和一台信号处理机组成。现在,已接收到了 580 毫米距离的后向多普勒信号。

这里所介绍的是一台差分式后向散射激光多普勒测速装置及其设计思想。差分式激光多普勒速度计的光路如图 1 所示。根据激光发送装置和光电接收器的位置,又可分为前向接收方式(图 1(a))和后向接收方式(图 1(b))。

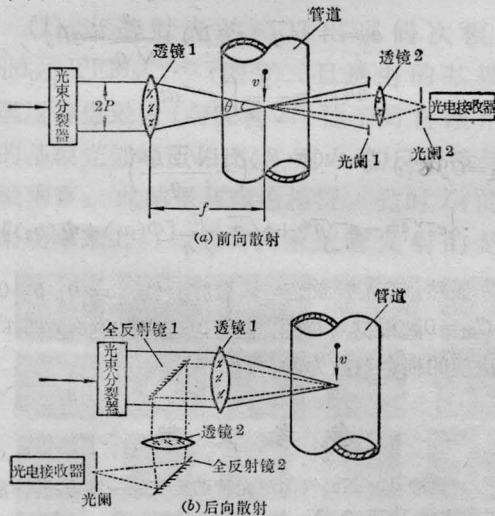


图 1 差分式激光多普勒速度计
(虚线表示散射光)

我们的实验装置由激光源、激光发送系统、接收装置以及信号处理机组成。由于采用了如图 1(b)所示的光路结构,将激光发送系统与接收装置合并在一个单元之中,整个实验装置的设计要求是以后向接收方式测

量水流或其它流体、固体的运动速度,目前后向测量距离为 580 毫米,测速范围: 0.5~25 米/秒,仪器精度: 1~2%,测量方向: 一维。下面分别描述这一装置的两个组成部分。

1. 激光光源

我们知道,瑞利散射光的强度与波数的四次方成比例,波长愈短,散射光愈强。但是,多普勒频率不确定性随波数也同等程度地增加。一般来讲,波长短些较好。但是由于多普勒频率与波长成反比,所以在速度较高时,多普勒频率也较高,这样对信号处理装置的要求也相应提高。在这里,我们选择了工作稳定可靠的 6328 埃横向单模氩-氖激光器。

由于后向散射光很微弱,因此希望激光管的输出功率尽可能地高,以得到尽可能强的后向散射信号。要提高激光器的输出功率,就必须增加激光管的长度,但这样一来,就可能出现更多彼此之间频率更加靠近的轴向模振荡。对于任一腔长为 L 的激光器,其轴向模之间的频率间隔可以依照下列关系来计算:

$$\Delta f_M = \frac{c}{2L} \quad (1)$$

式中: c 为光速。

收稿日期: 1978 年 11 月 15 日。

如果激光器运转在阈值附近,那末有效增益曲线的带宽 Δf_g 是不知道的,因此不能计算激发模的数目,而只能从激光器的技术指标得知。然而为了得到高输出的激光功率,多数激光器都将很好地工作在阈值之上,这就使有效增益曲线的线宽趋近于活性介质的原子跃迁的线宽,从参考文献[1]可以得到在 0.6328 微米的 Ne 多普勒线宽 $\Delta f_D = 1700$ 兆赫。这样,从下列关系式就可以算出轴模数目:

$$m = \frac{\Delta f_D}{\Delta f_M} \approx \frac{\Delta f_D \cdot 2L}{c} \quad (2)$$

在考虑激光光源时,应该选择激光器的腔长,使其产生的纵模间隔大大地高于被测的多普勒频率。在一旦选定了多轴模激光器的同时,还应考虑到其轴模对激光辐射时间相干性的影响,从而对光束分裂器的设计提出要求,在本装置中采用了输出功率为 20 毫瓦以上的外腔式氦-氖激光器,腔长约 1.2 米,轴模间隔为 125 兆赫。

2. 光学头部

这里,采用了如图 1(b) 所示的光学结构。由前节已知,对于同一激活介质,增加腔长,将有较高的激光输出功率,但也使激发轴向模的数量增加,而轴向模较多的激光器只有当二束入射光处于零光程的条件下,才能充分发挥其成效。如果二束光存在有限的光程差,在多轴模的情况下,多普勒信号的幅度将由于光程差的存在而衰减。因此,在设计分束器时,应当考虑到使其二束光到达测量区的程差尽量相等,以避免由于轴模数的增加而引起的信号衰减。本装置采用如图 2 所示的柯斯特棱镜进行分光以达到这一目的。棱镜的设计和加工应保证分出来的二束光相互平行,强度相等。某些理论研究指出^[2]: 差分式激光多普勒速度计的信噪比将随入射到测量区二束光之间的相对偏移而指数地下降,这一关系指出: 差分式激光多普勒速度计的信噪比对二束入射光的不平行度和发送系

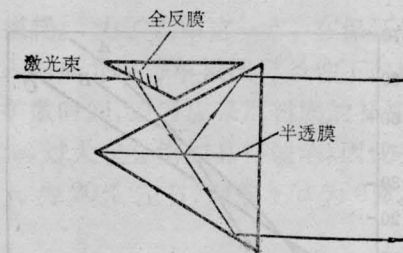


图 2 柯斯特棱镜分束器

统的聚焦性能是非常敏感的。在同一篇文章中又指出: 当二束光的强度比为 0.4:1 时,其信噪比将减少到二束光强度相等时的一半。所以这对柯斯特棱镜分束器半透膜的分束性能提出了要求。这里,二束光的强度比高于 0.7:1。

由于设计这一装置的目的是为了测量具有一定截面的流体速度分布,所以选取聚焦透镜 1 的焦距较长,为 580 毫米。为了收集到较多的后向散射光,透镜 1 和 2 的有效通光孔径也设计得较大。整个光学结构尺寸的设计使得 1 米/秒的速度相当于 200 千赫的多普勒频率。

光学头部中的另一重要部分是光电接收器。从图 1(b) 可见由二束入射光相交的测量区散射出来的后向散射光由透镜 1 收集,并变为平行光,再由全反射镜 1 反射,通过透镜 2 会聚,并经由反射镜 2 的反射到达光电接收器。

在可见光区域,能用于测速仪的光电探测器有三种^[3]: 光电倍增管、硅光二极管和雪崩管。光电倍增管具有很低的暗电流,其主要特色是噪声很低,增益很高;光电二极管虽然有很高的量子效率,但是其暗电流较大;雪崩管与普通的光电二极管具有几乎同样的特性,放大倍数较高。在 30 兆赫的信号带宽之内,这三种探测器的信噪比与入射光功率的关系示于图 3。如果带宽低于 100 兆赫,在入射光功率很低的情况下(约 10^{-7} 瓦以下),光电倍增管是较为理想的接收器件;但在入射光功率较高的情况下($10^{-7} \sim 10^{-5}$ 瓦),雪

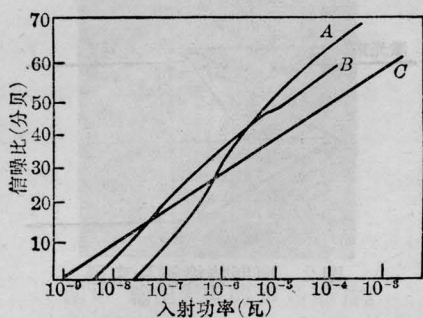


图3 信噪比随入射光功率的变化

A. 光电二极管; B. 雪崩二极管; C. 光电倍增管

崩管的信噪比就比较高了。在更强的入射光功率下($>10^{-5}$ 瓦), 则要数光电二极管为最佳了。一般对于前向散射的光学系统, 其散射信号功率较强, 可以选用光电二极管。本装置中, 由于接收较远距离的后向散射信号, 而在较小角度的(小于 10°)接收范围内, 后向散射信号的强度比前向散射信号的强度低几百倍, 所以光功率很弱, 因此采用光电倍增管作为接收元件。

为了使由于测量区的微粒子所产生的多普勒电流信号最大, 使噪声尽可能小, 光电倍增管前的光阑孔径应该等于二束光相交所组成的测量区在光阑平面上所成的象。光阑太小将使有效的信号降低; 而光阑太大, 则将引入不必要的噪声。在本装置中, 为了进一步滤去进入光阑的背景杂散光, 在光电接收器前面加了一块 6328 埃的干涉滤光片。

所有的光学元件和接收元件都安装在一个牢固的头部之中(见图 6), 它们能够微调, 但一经调好, 就被牢固地锁定, 使它们之间的相对位置保持不变。

3. 信号处理装置

由光电倍增管接收到的多普勒频移必需被准确地测量并记录下来, 或者直接按速度的形式用数字显示。为了达到这一目的所发展起来的信号处理装置有频谱分析仪、频率跟踪器、计数型处理机等。在本装置中, 采用频率跟踪器作为信号处理装置, 它把多普勒信号从各种各样的噪声中检测出来, 并经过

变换以速度的形式显示。频率跟踪器的优点就是能够用于信噪比较低的情况, 并能在较大范围内对变化的速度进行跟踪, 亦便于实时显示。

频率跟踪器的方框图如图 4 所示, 这是一个自动频率跟踪的反馈环, 其原理简述如下: 从光电倍增管收到的多普勒信号 f_D 首先送入前置放大器, 为了提高信噪比, 设计前置放大器使其通带等于被测流体的多普勒频率的范围, 以尽可能去除不必要的噪声。放大后的信号进入混频器, 混频器的另一输入信号来自一个机内的压控振荡器, 其频率用 f_{VCO} 表达。混频器的输出将含有频率成分 $f_{VCO} - f_D$ 和 $f_{VCO} + f_D$ 。应当这样地设计环路, 使得当 $f_{VCO} - f_D$ 等于第一中频放大器谐振中心频率 f_{IF} 或处于其附近值时, 环路处于锁定状态。这时第一中放输出信号的频率 $f_{VCO} - f_D$ 近似等于 f_{IF} , 这一输出信号进入限幅器 I, 由限幅器 I 输出频率相同、空度比为 1 的方波信号, 又进入第二中频放大器。这是一个串联谐振的中频放大器, 其谐振中心频率也是 f_{IF} , 它的输出信号与输入信号同频率, 但有一相移, 由第二中放输出的信号又进入第二限幅器, 从第二限幅器也得到一个方波。它的频率与第一限幅器的输出方波相同, 但是二个方波信号有一个相位差, 第二限幅器方波输出的空度比也为 1。

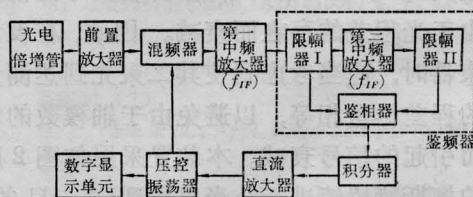


图4 信号处理系统—频率跟踪器框图

现在分析一下二个限幅器输出方波的位相关系及其在回路中所起的作用。先看一看第二中频放大器的特性(图 5), 因为它是一个串联谐振电路, 所以当输入信号频率等于它的谐振频率时, 增益最高。此时输出频率

不仅与输入相同，而且其位相比输入信号滞后 $\frac{\pi}{2}$ ；当输入信号频率高于回路谐振频率时，输出信号滞后的位相将大于 $\frac{\pi}{2}$ ；而当输入频率低于回路谐振频率时，输出信号滞后的位相将小于 $\frac{\pi}{2}$ 。而第二限幅器输出的方波位相也同样随之变化。现在把第一限幅器和第二限幅器的二个输出方波送到鉴相器中去进行比较。那末第一限幅器、第二中放、第二限幅器和鉴相器就组成了一个鉴频器。这个鉴频器的功能如下：当限幅器 I 输入信号的频率正好等于中频频率 f_{IF} 时，鉴相器对二个方波进行比较的结果是在积分电路上产生一个平均值为零的直流电压；当输入频率低于中频 f_{IF} 时，整个鉴频器也就是鉴相器输出平均值为正的直流电压；而当输入频率高于中频 f_{IF} 时，整个鉴频器也就是鉴相器输出平均值为负的直流电压。

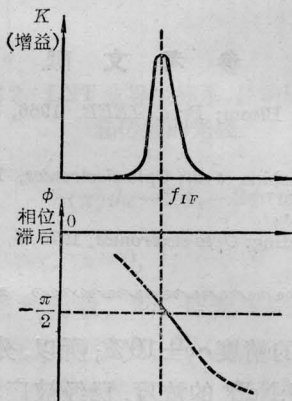


图5 第二中频放大器的
幅频特性及相频特性

把鉴频器在积分电路上平均的直流电压送至直流放大器进行放大，并通过直流放大器进行电平变换。将其输出去控制那个压控振荡器，使压控振荡器的输出频率与这一控制电压成较好的线性关系（线性度优于 $1\sim 2\%$ ），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回路就构成了。

在整个回路对变化的多普勒频率进行跟踪时，回路的工作状态如下：当输入频率 f_D 有一变化时，回路的功能将迫使压控振荡器的输出频率也相应地变化，使 f_{VCO} 始终近似地比输入的多普勒频率 f_D 高一个中频频率 f_{IF} 。如果 f_D 增加，则必然使混频器的输出 $f_{VCO} - f_D$ 有一下降趋势。这时鉴频器的输入频率也下降，从而使它输出一个比原来状态高的直流电压，经直流放大器放大后，迫使压控振荡器输出 f_{VCO} 上升，使它与 f_D 仍然相差一个接近于 f_{IF} 的频率。相反，如果 f_D 下降，则经过回路的反馈作用，必定迫使 f_{VCO} 下降，使它与 f_D 之差保持一个接近于 f_{IF} 的频率。这样 f_{VCO} 或者与其成线性关系的直流电压就能用来代表多普勒频率或者流体的速度了。

这里必需注意的是： f_{VCO} 与 f_D 之差，除了在回路的一个工作点之外，并非是一个严格的固定不变的中频 f_{IF} ，而是有一个小的误差。正是由于有了这一小的误差，所以才有一个鉴频器的直流输出来控制压控振荡器的输出频率，使其跟随 f_D 的变化。所以说，这是一个有差系统。在设计这一系统时，必需注意到，不能使这一误差超过仪器所规定的数值。回路闭环增益越高，系统误差越小，但闭环增益太高将使整个回路不稳定。

总之，频率跟踪器的整个闭环回路，使得带有噪声的多普勒信号得到“澄清”，把不连续的由流体中微粒子产生的信息变换成连续而清晰的振荡波形，而且具有跟随其变化的能力，所以也称其为跟踪滤波器。

最后，把压控振荡器输出的频率信号送入一个数字显示单元，再用数字的形式直接将速度显示出来。压控振荡器的输入电压直接代表多普勒频率和速度，而流体中速度的波动，也将由这一模拟电压所反映出来。

以上对后向散射的激光多普勒测速装置的三个主要部分作了叙述，整个装置的外型见图6。目前已在实验室用它对一个小水筒

模型中的水流进行了速度测量。水筒的测量段是一根内径为 $\phi 35$ 毫米的玻璃管, 其一侧被磨去而镶上一块平的普通窗玻璃, 由头部射出的二束激光束通过这一窗口聚焦在玻璃管中部。小水筒是一个闭合的水流循环装置, 其流动由一个用三相调压器控制的水泵带动, 调节三相调压器的电压, 就能调节水流的流速, 其速度从较低的值开始, 达6米/秒左右为最高。水筒中的循环水用一般自来水。对于后向散射, 可适当加入极少量的微粒子, 直径在几个微米左右为好, 浓度约 10^{-5} 的量级左右。

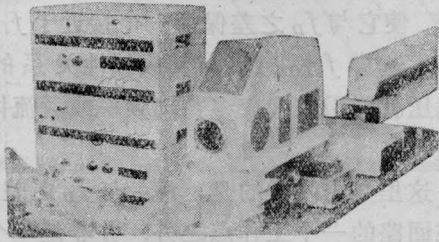


图6 后向散射激光多普勒测速装置

现在已用频率跟踪器对于0.5米/秒至6米/秒左右的水流速度产生的多普勒频率进行了跟踪, 当被测流速变化时, 跟踪器的输出频率亦能很快地跟随流速的变化, 跟踪器前置放大器输出的多普勒信号波形以及跟踪滤波器输出的压控振荡器波形示于图7, 可

* ~~~~~ *

(上接第40页)

实际毛坯不一定是等径生长的。熔体中的 Nd^{3+} 分布也不一定均匀。熔体对流或者非准静态生长都会导致实际分布与理论公式的偏离。图3中, 有些晶体显然偏离了幂指数关系。这说明实际测量是很有必要的。

FC-126原料中掺有0.1%的碳, 在110毫米长的毛坯中, Nd^{3+} 浓度保持高水平, 原因不太清楚。

有关 Nd^{3+} 浓度对激光性能影响的问题, 可参阅文献[3]和[4]。

速度快、方法简单, 是这种测定的优点。

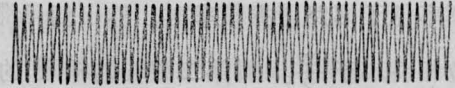
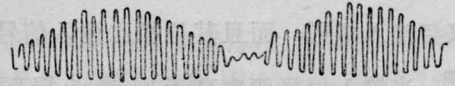


图7

上图: 多普勒信号波形
下图: 压控振荡输出波形

见整个激光多普勒测速实验装置在这一工作条件下已能满意地运转。

小结

激光测速仪原理简单, 能用来测定各种各样的流体速度, 而且具有许多其它仪器不可能具备的特点, 特别是用热线风速仪或毕托管难以测定的场合, 如紊流、高温流、附面层等, 用这一方法就更能显出其优点。因此, 作为实用的装置, 其发展前景非常广阔, 其发展速度也必然是令人注目的了。

参 考 文 献

- [1] A. I. Bloom; *Proc. IEEE*, 1966, **54**, No. 10, 1262.
- [2] H. Mishina *et al.*; *Opto-electronics*, 1973, **5**, No. 6, 517.
- [3] L. Lading; *Opto-electronics*, 1973, **5**, No. 2, 175.

所得结果的精度 $\sim \pm 10\%$; 所以, 分光光度法测定YAG: Nd^{3+} 的浓度, 已经被广泛地采用。在解释YAG棒的性能、研究毛坯浓度均匀化和发光浓度猝灭时, 在计算某些光谱特性时, 都使用了这种测量方法和测定结果。

参 考 文 献

- [1] T. Kushida *et al.*; *Phys. Rev.*, 1968, **167**, 289.
- [2] 《晶体生长的理论基础》(讲义), 南京大学物理教研室, 1976年, 第2、8页。
- [3] D. A. Pinow; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1970, **QE-6**, No. 4, 223.
- [4] R. F. Bert; *Laser Focus*, 1973, **9**, No. 8, 51.
- [5] R. R. Monchamp; *J. Cryst. Growth*, 1971, **11**, 310.