

WT-LDV0100

激光多普勒测速综合实验系统

《实验教学讲义》



WT. 067. 001

四川西测科技有限公司

地址：四川省成都市双流区白衣上街二段177号 邮编：610100

2018年3月

激光多普勒测速实验

1842 年奥地利人多普勒 (J.C.Doppler) 指出: 当波源和观察者彼此接近时, 收到的频率变高; 而当波源和观察者彼此远离时, 收到的频率变低。这种现象称为多普勒效应, 可用于声学、光学、雷达等与波动有关的学科。不过, 应该指出, 声学多普勒效应与光学多普勒效应是有区别的。在声波中, 决定频率变化的不仅是声源与观察者的相对运动, 还要看两者哪一个在运动。声速与传播介质有关, 而光速不需要传播介质, 不论光源与观察者彼此相对运动如何, 光相对于光源或观察者的速率相同。因此, 光学多普勒效应有更好的实用价值。1960 年代初激光技术兴起, 由于激光优良的单色性和定向性及高强度, 激光多普勒效应可以用来进行精密测量。

1964 年两个英国人 Yeh 和 Cummins 用激光流速计测量了层流管流分布, 开创激光多普勒测速技术。激光多普勒测速仪 (laser Doppler velocimeter, LDV), 是利用激光多普勒效应来测量流体或固体速度的一种仪器。由于它大多用于流体测量方面, 因此也被称为激光多普勒风速仪 (laser Doppler anemometer, LDA)。也有称做激光测速仪或激光流速仪 (laser velocimeter, LV) 的。1970 年代便有产品上市, 1980 年代中期随着微机的出现, 电子技术的发展, 技术日趋成熟。在剪切流、内流、两相流、分离流、燃烧、棒束间流等各复杂流动领域取得了丰硕的成果。激光测速在涉及流体测量方面, 已成为产品研发不可或缺的手段。

一、实验内容

1. 学习理解激光多普勒效应;
2. 搭建双光束 LDV 测速光路, 理解其工作原理;
3. 了解计数器式信号处理器的激光多普勒测速仪的工作原理;
4. 掌握一维流场流速测量技术。
5. 液体, 气体、固体速度场测量。
6. 扩展实验: 将发射部分和接收部分可做成两个整体, 直接放在实验台上, 可用于科研和创新设计性实验上使用。

二、实验原理

1. 多普勒信号的产生

如图 1 所示, 由光源 S 发出频率为 f 的单色光, 被速度为 v 的粒子 (如空气中的一粒细小的粉尘) P 散射, 其散射光 Q 点的探测器接收。由于多普勒效应, 粒子 P 接收到的光频率为

$$f' = \frac{f}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \left(1 + \frac{v}{c} \cos \theta_1 \right) \quad (1)$$

其中 c 为光速。同样由于多普勒效应, 在 Q 点所接收的粒子 P 的散射光频率为

$$f'' = \frac{f' \sqrt{1-v^2/c^2}}{1 - (v/c) \cos \theta_2} \quad (2)$$

那么 Q 点接收的频率为

$$\Delta f = f'' - f' = \frac{fv}{c} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (3)$$

如果粒子 P 以速度 v 进入两束相干光 S 和 S' 的交点, 并在 Q 点接收散射光, 如图 2 所示, 由于 S 和 S' 是方向不同的两束光, 在 Q 点将产生两种接收频率。对光束 S 的频率差同式 (3), 对于光束 S' 的频率差为

$$\Delta f' = \frac{fv}{c} (\cos \theta'_1 + \cos \theta_2) \quad (4)$$

最后得到两种频率之差

$$f_D = \Delta f - \Delta f' = \frac{2v}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos \beta \quad (5)$$

其中 λ 是相干光的波长， f_D 是多普勒信号频率。在一定光路条件下， $\frac{2}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ 是一个常熟，于是式 (5) 可写成

$$f_D = \alpha \cos \beta \cdot v \quad (6)$$

其中 α 是光机常数。可见，当 β 为定植时（粒子运动方向不变）， f_D 与粒子的速度成正比关系。因此，只要测量出 f_D 就可以得到速度 v 。

这种用两束光相交与测量点的 LDV 方式称为双光束 LDV 或差动 LDV，是一维流场测量最常用的方法。

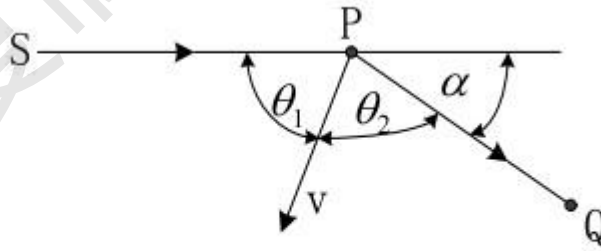


图 1 多普勒信号的产生

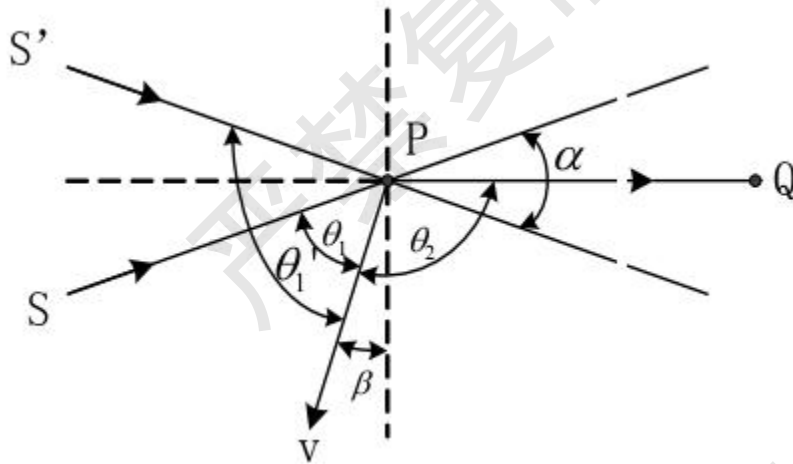


图 2 双光路多普勒信号的产生

2、 f_D 信号的接收

这里以双光束 LDV 光路为例，讨论 f_D 信号的接收。

为了使问题简化，设 β 为 0，即粒子运动方向与两束光夹角平分线垂直，见图 2。注意到光路的对称，两束光在 Q 点散射光的角频率差，由式 (4) 和 (5) 可知 $\Delta\omega' = -\Delta\omega$ 。在两束光功率相等时，Q 点的接收的光强分别为

$$E_1 = E_0 \cos[(\omega + \Delta\omega)t + \varphi_1] \quad (7)$$

$$E_2 = E_0 \cos[(\omega - \Delta\omega)t + \varphi_2] \quad (8)$$

其中 ω 为相干光的角频率。光敏探测器，如 APD(雪崩光敏二极管)，的输出电流与入射光强的平方成正比。探测器的输出电流为

$$I(t) = kE^2 = k(E_1 + E_2)^2 \quad (9)$$

其中 k 为表征探测器灵敏度的系数。将式 (7) 和 (8) 代入式 (9)，整理后

$$I(t) = kE_0^2 [1 + \cos(2\Delta\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) + \cos(2\omega t + \varphi_1 + \varphi_2) + \cos(2\omega t + 2\Delta\omega t - 2\varphi_1) + \cos(2\omega t + 2\Delta\omega t + 2\varphi_2)] \quad (10)$$

由式(10)可知,光电流 $I(t)$ 应由直流分量、差频项 $2\Delta\omega$ 、倍频项 2ω 频率成分组成。但由于探测器能够输出的光电流信号频率远远低于相干光的频率,因此在光电流 $I(t)$ 中只能出现差频项 $2\Delta\omega$ 和直流分量。探测器输出的光电流为

$$I(t) = kE_0^2 [1 + \cos(2\Delta\omega t + \varphi_1 - \varphi_2)] \quad (11)$$

根据上式即可测量出多普勒信号频率 f_D ,得到粒子的速度。

由于激光束横截面上光强为高斯分布,粒子只有进入两光束相交的区域才能产生散射,一个粒子的信号波形如图3所示。前面所说的直流分量实际上是一个低频分量,由图中的虚线表示。频率为 f_D 的波迭加到这个低频分量上,波形的包络线近似高斯曲线。

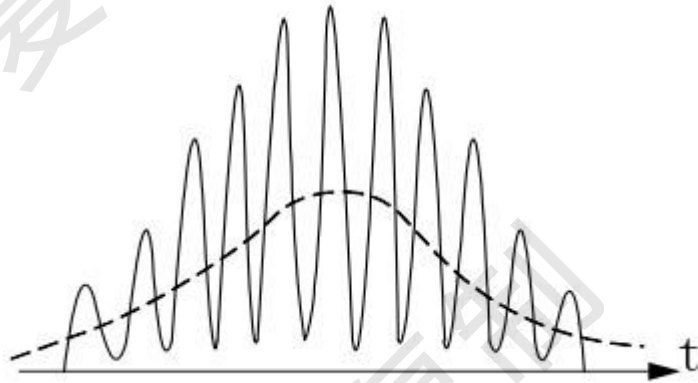


图3 一个粒子产生波群

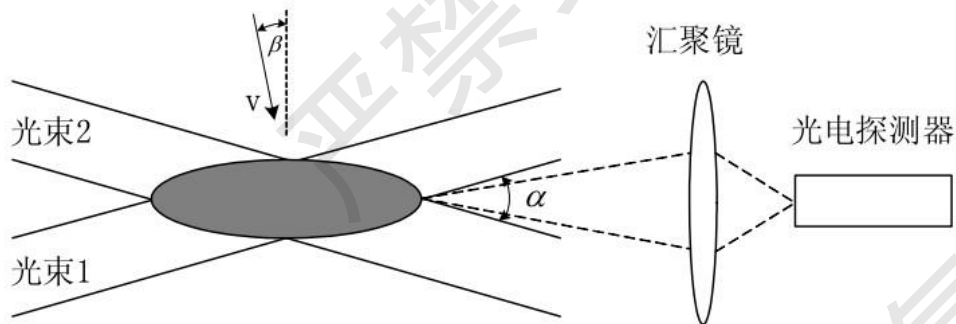


图4 双光束 LDV 光路图

3. 用干涉条纹区解释双光束 LDV

对于双光束 LDV 有一种不涉及多普勒效应的简单解释。见图4 两束相干光相交,由于干涉现象,会产生一个干涉条纹区,条纹间距为

$$S = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha/2)} \quad (12)$$

如果一个尺寸小于条纹间距的粒子,以速度 v 进入条纹区,由于光强明暗相间的结果,每当粒子运动到明场时将散射出一个光脉冲;通过条纹区,将散射出一串光脉冲。通过简单的计算,可知脉冲串的频率为

$$f_D = \frac{2v}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos \beta \quad (13)$$

结果和式(5)完全一样。

用干涉条纹区解释双光束 LDV,比较简单,但不能解释多普勒信号的波形特点。可以证明,无论从任何方向接收条纹区的散射光,其多普勒信号的频率 f_D 都是相同的,其波形特点也是相

同的。因此可以用一组透镜将来自条纹区的散射光汇集于一点，以大大提高接收信号的强度。

4. 散射粒子的速度代表流体的速度

在流体中，有许多尺寸为微米级的小粒子，其质量很小，运动速度可以跟得上流体的速度变化。足够多的粒子流经流场中的某一点时，虽然它们的速度会有差别，但速度的统计平均就可以代表场点的流速。

5. 多普勒信号处理

多普勒信号分为频谱分析法、频率跟踪解调法、计数法等几种处理方法。在本实验中，首先对多个单列波群分别做频谱分析，得到一系列普勒信号频率 f_{Di} ；再计算这些频率 f_{Di} 的统计平均值，如求算术平均值，得到表示流速的频率 f_D ；最后由式 (13) 得到流速 v 。

为了波群号携带的噪声和干扰，需要对信号进行滤波等处理。当一个粒子进入条纹区时，探测器输出的信号经放大、滤波后，成为一个上下对称的、包络线近似高斯曲线的多普勒波群。其中高通滤波器(LPF)用来消除“基座”，即前面说的多普勒信号直流分量。低通滤波器(HPF)用来消除信号由于干扰和噪声迭加上的“毛刺”。

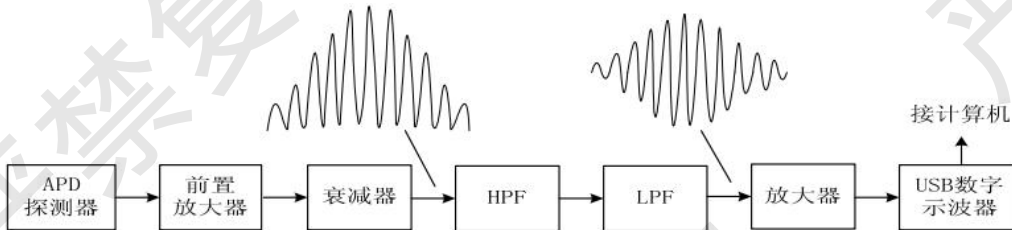


图5 LDV 信号处理方框图

图6是经信号处理后的单个粒子的波群信号，一般在粒子较少的气体流速测量中往往会得到这样的信号。波群信号下面是它的频谱曲线，这里只显示出了基频，右侧的图表显示基频及各次谐波的幅度值。其中的基频就是该波群的多普勒频率 f_{Di} 。

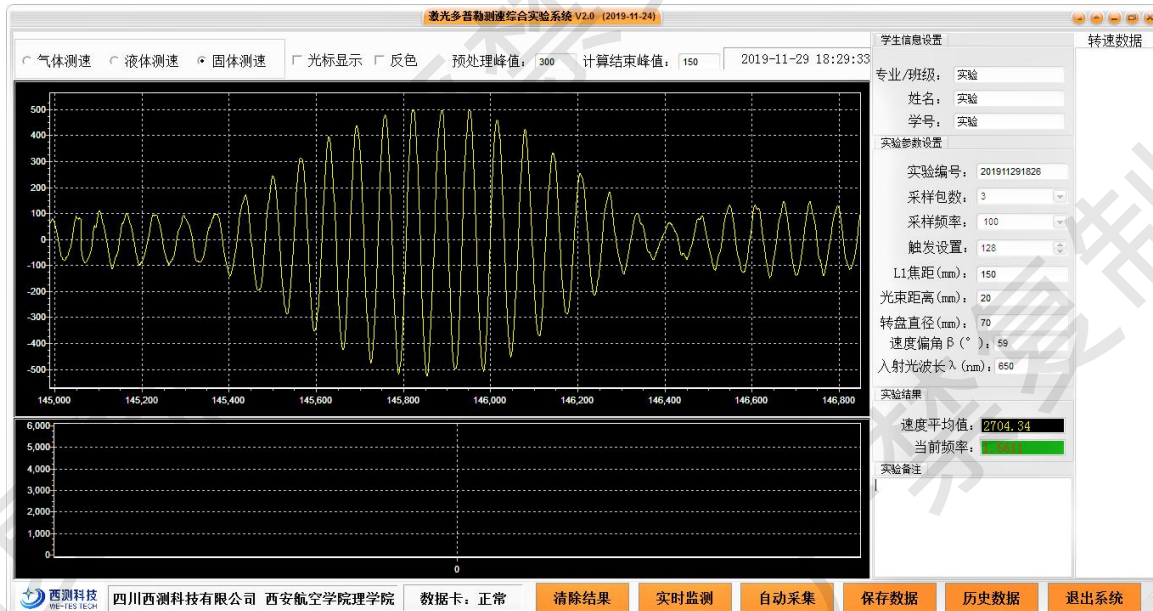


图6 单个粒子信号

四、实验装置及步骤

1. 激光流速仪光路部分
2. LDV 信号处理器
3. 数字示波器
4. PC 机
5. 流场

光路采用典型的双光束 LDV 布局，如图 7 所示。

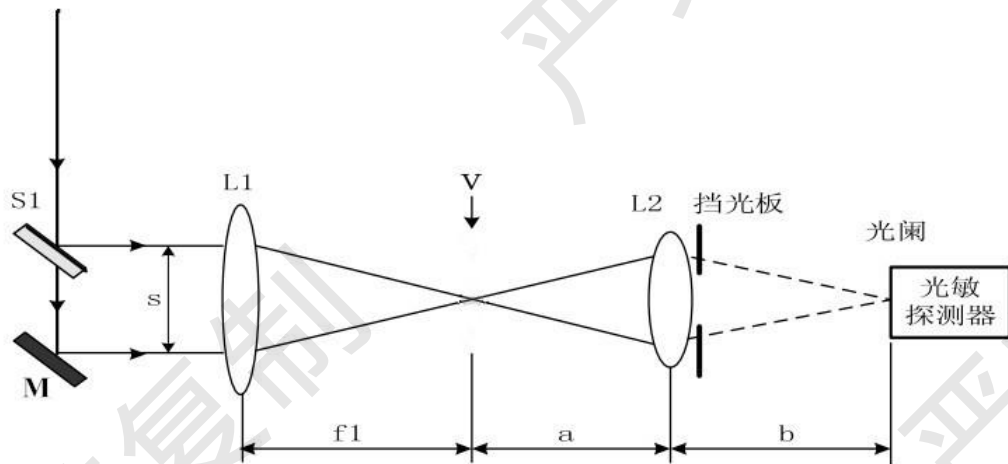


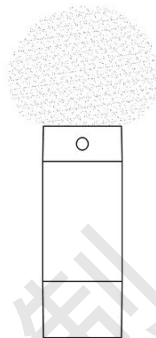
图 7 气体、液体 实验光路图

其中 M 是全反射镜，S1 是 1:1 分光镜，L1 是焦距 $f_1=150\text{mm}$ 的凸透镜，L2 是焦距 $f_2=50\text{mm}$ 的凸透镜，挡光板用来遮住两束直射光。测量气流，只要将吹风机对准条纹区即可。

实验步骤

(一) 测气体流速

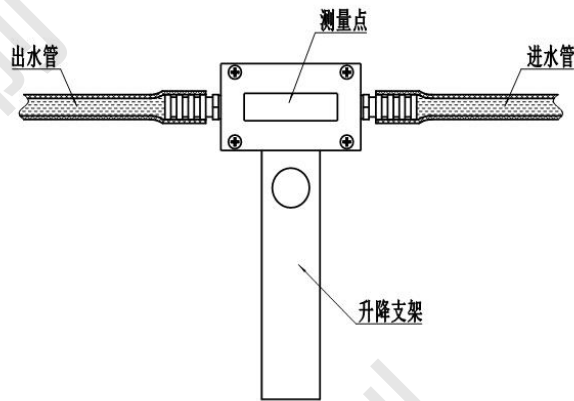
1. 搭建光发射部分。按照图 7 搭建调整光路。相互平行两束光的间距 $S=20\sim 25\text{mm}$ 。将白屏放到透镜 L1 焦距处，仔细调整 S1、M 和 L1 的角度、高度和距离等，使两光点重合。再将检查镜放到 L1 焦点处，白屏放到前方约 1m 处，观察两光点是否严格重合及条纹情况，微调 L1 和扩束镜的位置，同时通过微调 M 反射镜支架上的两个调节螺丝，得到清晰竖直的条纹区，使条纹区尽量大。
2. 调整接收部分。将透镜 L2 和光敏探测器的位置如图 7 所示，可取 $a=2b=2*f_2=100\text{mm}$ 。仔细调整透镜 L2 和光敏探测器，使两光点交于探测器小孔内的探测窗上。
3. 将挡光板（可变光阑）放在在透镜 L2 和光敏探测器之间，调节档光板通光孔径的大小，挡住两束直射光。
4. 将信号处理器的 APD 电压调到 85V 到 95V 之间的某一值，衰减器预置到合适的状态（-2db、-4db、-8db、-16db 这四个按键单独使用或任意搭配起来用）根据预估流速范围设定 HPL。启动信号处理器、示波器和产生流场的风扇和颗粒物附件。
5. 观察多普勒波形，调整信号处理器的各项设置和示波器，出现理想波形。如果未出现波形，应关上信号处理器电源，重复步骤 2~6。
6. 通过改变风扇电压档位，产生流速，每种流速记录 30 个波群的频率值，并记录各次测量的实验条件。



气体流速组件图

(二) 测液体流速

1. 测气体流速的光路不变，将测气体流速实验中的风扇和颗粒物附件，换成液体测量附件，实验光路图见图7。
2. 打开水泵的开关，改变水泵的电压，产生流速，每种流速记录 30 个波群的频率值，并记录各次测量的实验条件。



液体流速组件示意图

(三) 转盘线速度的测量

- 1、 固体转盘测速光路图，如上图所示，。操作过程中保护光学器件不磕碰，不要手摸镜片。
- 2、 激光器中心距离光学平台高度 240~260mm，光线水平。半反镜距离激光器头部约 120~180mm。
- 3、 通过调整半反镜和全反镜磁力座的位置、入射点、入射角度，确保两束光尽量平行，且两束光的距离为 20~25mm。
- 4、 透镜 L1 距离反射点 120~180mm。
- 5、 距离透镜 L1 150mm 处，放置“参考透镜”，在参考透镜后面 0.8~2 米的位置，放置白屏（或者纸板、纸箱或者借助墙壁），观察两束光相交情况，微调“参考透镜”，使两个光斑较小且有明暗条纹，微调全反镜倾角旋钮，让两个光斑重合。（该步很关键）
- 6、 移走“参考透镜”，将固体转盘放置上去，让两束光的交点刚好在装盘外圆上。（该步很关键）
- 7、 通过将白纸挡在转盘反射光区域，大致确定散射光的方向，放置透镜 L2 和光探头。调整透镜和光探头位置、角度，让散射光汇聚到光探头上。
- 8、 注意 1~7 步，每确定一个光学器件的位置后，磁力座开关要旋转到“ON”锁紧。需要移动调整时，旋至“OFF”。

- 9、数据处理：读取电机转速，转盘直径 $D=70\text{mm}$ ，
- $$v = \frac{n \times \pi \times D}{60 \times 1000}$$

n 为转速，rpm，转每分； D 为转盘直径：mm，毫米

v 转盘外圆线速度：m/s，米每秒

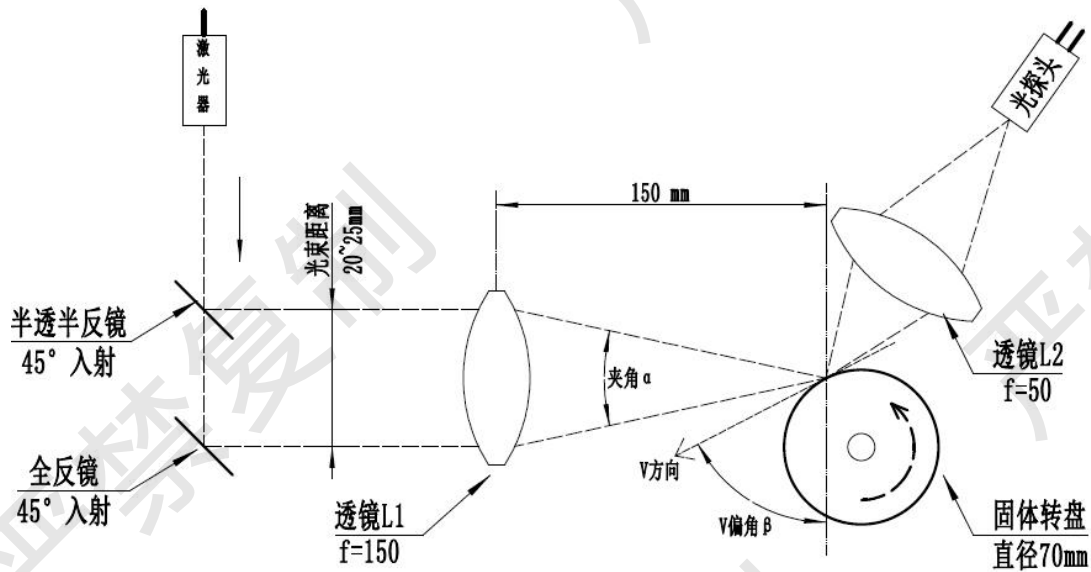


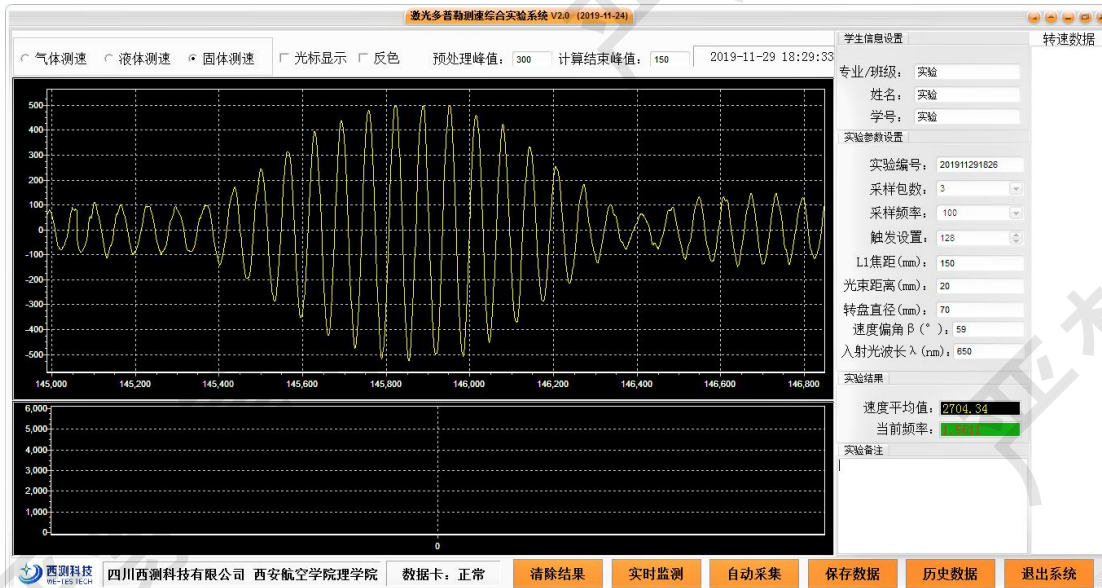
图 8 固体测速光路图

注意事项

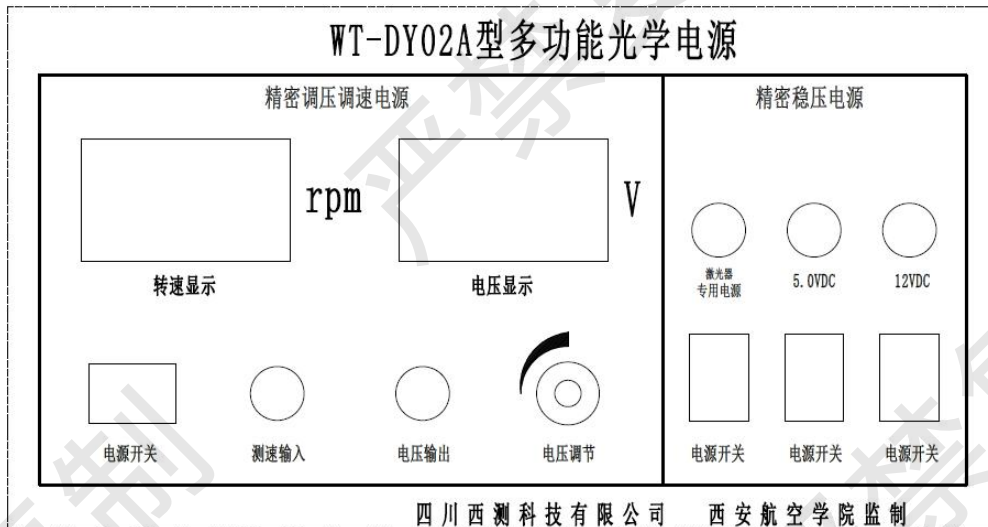
1. 调整光路时不得开信号处理器电源，必须装好挡光板，挡住两束光，才能开信号处理器。
2. 注意对光学器件的保护，不得触碰、严禁擦拭各光学面。
3. 调整光路时防止磕碰，不要拧松支杆和镜架等处的连接螺纹。

五、仪器和软件操作

- 1、 打开前面板左下角“电源开关”，通过电位器把电压设置到 3~5V。将电机 DC 线插入光学电源“电压输出”上。
- 2、 打开系统主机后面板的总电源，调节左下角电位器，使电压显示 80~85V。
- 3、 “衰减参数设置”4 个按键全部按下，滤波参数调节设置到“500K”档位。
- 4、 启动计算机软件，点击“实时监测”，观察采集的波形。（按住鼠标左键，往右下角移动“画框”，所选定区域放大显示。按住鼠标左键，往左上角移动画框，曲线复位。按住鼠标右键移动鼠标，曲线平移）
- 5、 如果信号波形在显示区域（纵坐标 0-255）峰值小于 200，可以释放（-2/-4/-8 dB）的衰减开关。目标是多数波形的峰值在 200 左右，个别峰值达到 255。
- 6、 如果所有衰减设置按钮都按下，信号峰值仍有大部分达到 255，可以调小系统主机电压到 75V，或者光探头前移，使聚焦的部分光进入光探头。
- 7、 如果波形毛刺较多或者干扰严重，需要重新调整光路。重点是第 5、6、7 步，直到出现理想的高斯包络波形。

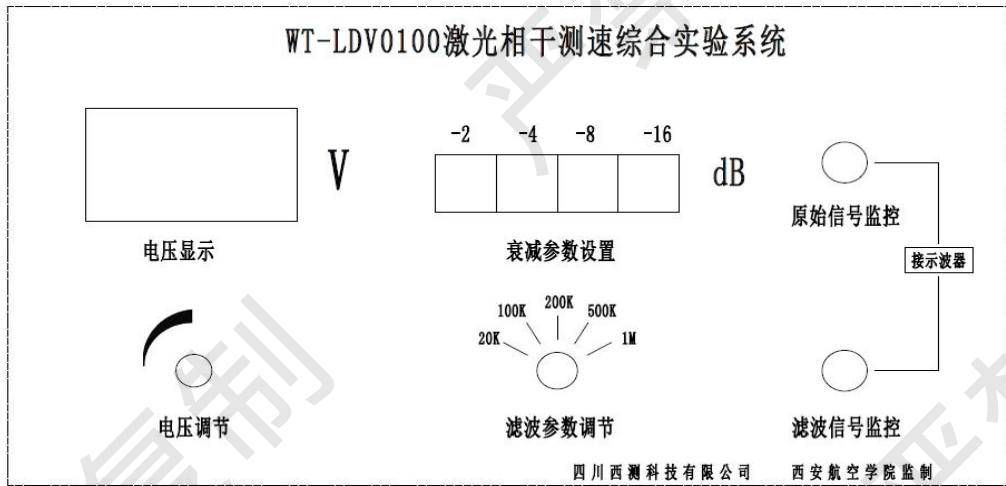


按照如下要求连接线



(该仪器后面简称“光学电源”)

- 1、将激光器连接线航插，插入“激光器专用电源”插座上。
- 2、将电机组件上的4芯航插头，插入“测速输入”插座上。(电机组件上的DC连接线，暂时不插入“电压输出”处。待光路调节好后，在插入以启动电机旋转)
- 3、打开光学电源后面板的电源总开关和激光器开关。



- 4、
- “激光相干测速综合实验系统”仪器，后面简称“系统主机”
- 5、将“光探头组件”的BNC线和4芯航插线，插到“系统主机”的后面板位置。
- 6、如果用示波器做实验，将示波器COM口用BNC线连接到“滤波信号监控”接口处。
- 7、如果用计算机做实验，把计算机连接线的USB口连接到计算机，另一端连接到“系统主机”后面板对应位置。

六、回答问题

1. 为什么要实验步骤 2 的最后强调“装好挡光板，挡住两直射光”？
2. 图4-12 中两光束间距 S 为什么不能太大？
3. 欲测量高速气体，对仪器有哪些要求？在使用相同信号处理器的情况下，如何改变光路以提高待测流速上限？

参考文献

1. 陈云林 刘依真. 近代物理实验, 北京: 北京交通大学出版社, 2010.
2. L.E.Drain.The Laser Doppler Technique, John Wiley & Sons Ltd, 1980.
3. 沈熊.激光多普勒技术及应用, 北京: 清华大学出版社, 2004

严禁复制

严禁复制

严禁复制

严禁复制

严禁复制

严禁复制

严禁复制