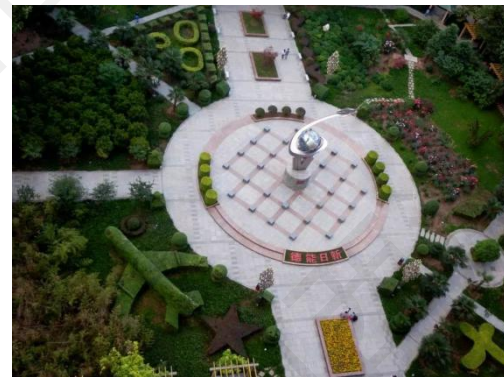




四川西测
SICHUAN XICE

四川西测科技有限公司

Sichuan Xice Science and Technology Limited Company



激光多普勒测速综合实验系统

高起点 分体式 模块化





目 录

- 01 背景知识
- 02 结构及原理
- 03 产品特点
- 04 推广及应用
- 05 教学效果



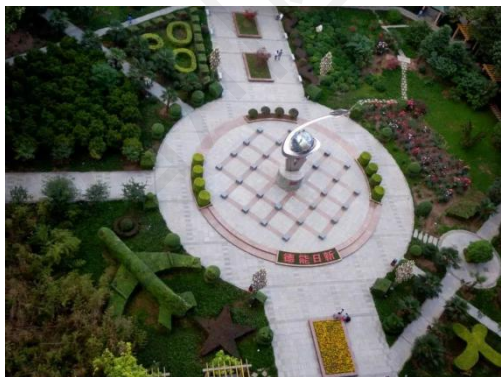
四川西测
SICHUAN XICE



01



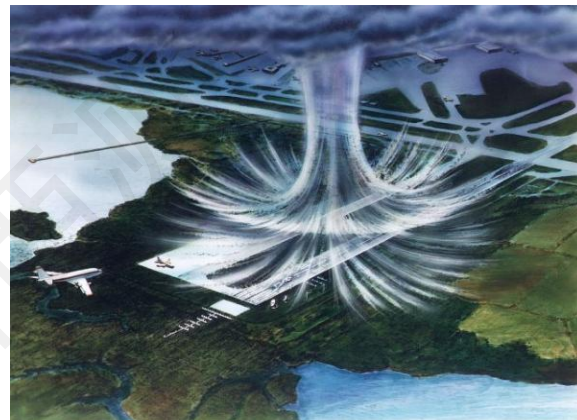
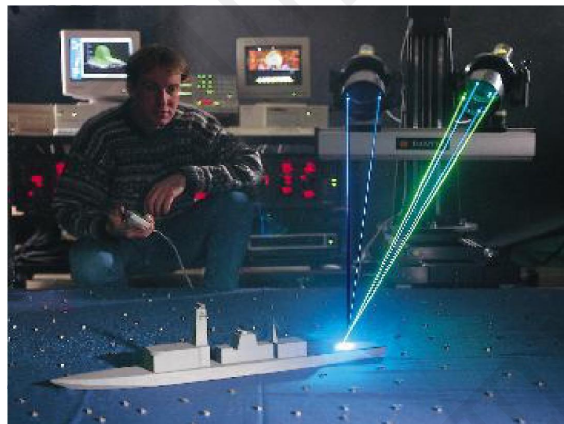
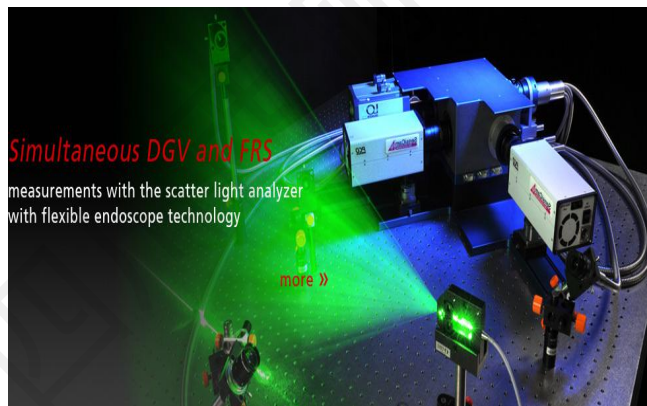
背景知识





LDV背景

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。

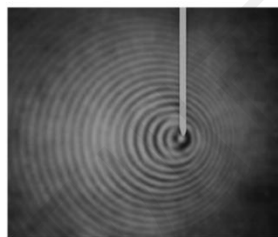




LDV技术

LDV实验是以现代技术为手段，与实际应用紧密结合而又能充分体现物理思想和方法的实验项目。它涉及到较多物理知识包括光学、流体力学，电子技术和计算机数据处理等。一般LDV设备昂贵，且不符合实验教学要求。因此我们开发出这种新型设备，目的在于使学生在掌握物理学基本原理的基础上，学习用基础光学器件设计、搭建与调试光路的方法，学习数据处理等。本实验设备适合近代物理实验、近代光学实验和大学物理实验拓展等。

多普勒效应

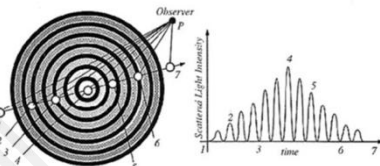
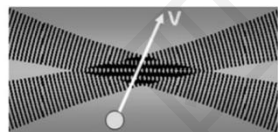


水波

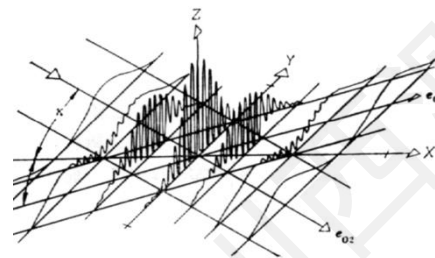


声波

8.3.1 多普勒电信号的形式



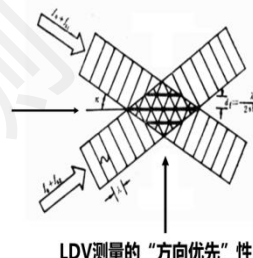
多普勒电信号的形式



双光束控制体中的光强分布

8.2.3 信号采集和处理

>> 光学频移



LDV测量的“方向优先”性

根据散射粒子必须通过的最少条纹数 N_{cr} , 可以计算出可测速度向量的极限方向角, 越小则测量的“死区”越大。

$$f_s \geq f_D$$



西安航空学院
XI'AN AERONAUTICAL UNIVERSITY



02



结构及原理





多普勒效应原理

一、多普勒信号的产生

如图1所示，由光源发出频率为 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）散射，其散射光Q点的探测器接收。由于多普勒效应，粒子接收到的光频率为

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

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

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



多普勒效应原理

一、多普勒信号的产生

如果粒子以速度 v 进入两束相干光 θ_1 和 θ_2 的交点，并在Q点接收散射光，如图2所示，由于 θ_1 和 θ_2 是方向不同的两束光，在Q点将产生两种接收频率。对光束 θ_1 的频率差同式 (3)，对于光束 θ_2 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， α 是一个常熟，于是式 (5) 可写成

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



多普勒效应原理

一、多普勒信号的产生

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

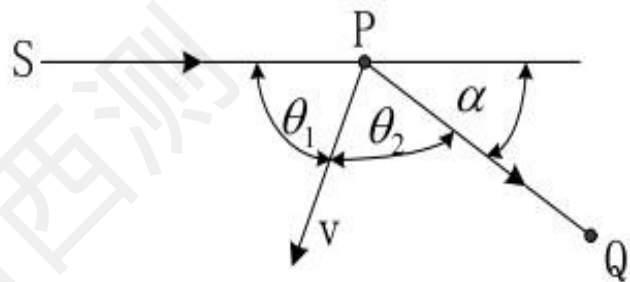


图1 多普勒信号的产生

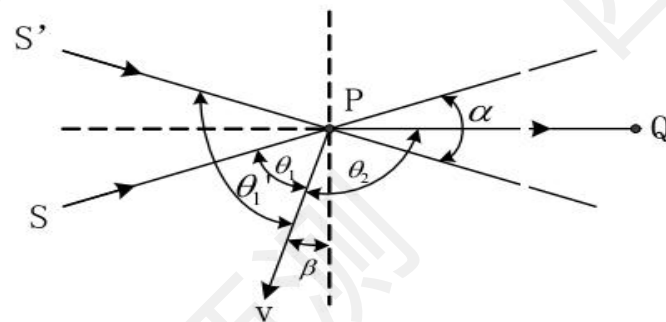


图2 双光路多普勒信号的产生



多普勒效应原理

2. f_D 信号的接收

这里以双光束光路为例，讨论信号的接收。为了使问题简化，设为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

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



多普勒效应原理

由式(10)可知,光电流应由直流分量、差频项、倍频项频率成分组成。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,因此在光电流中只能出现差频项和直流分量。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,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。

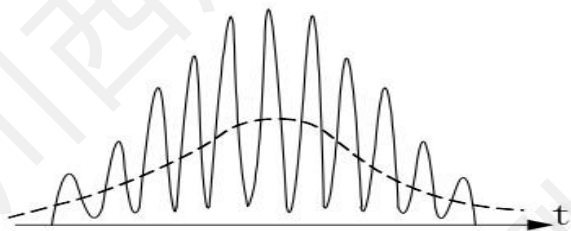


图3 一个粒子产生波群

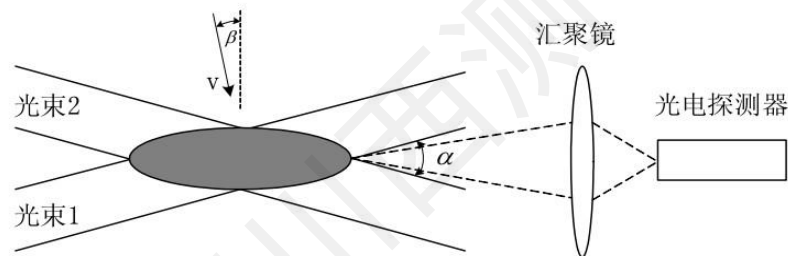


图4 双光束LDV光路图



多普勒效应原理

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。



多普勒效应原理

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；再计算这些频率的统计平均值，如求算术平均值，得到表示流速的频率；最后由式(13)得到流速。

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”。



多普勒效应原理

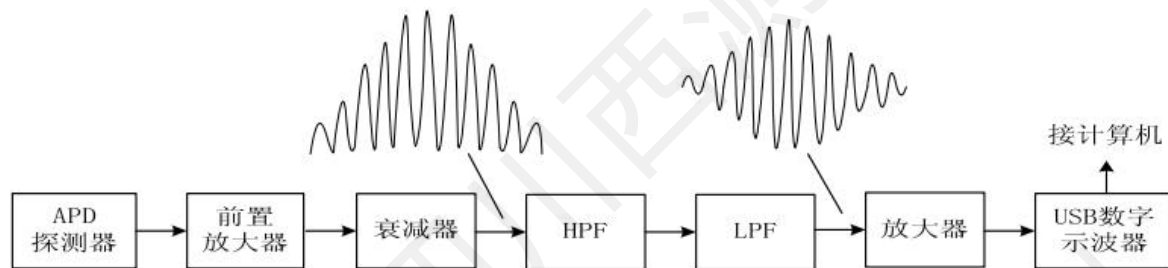


图5 LDV 信号处理方框图

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

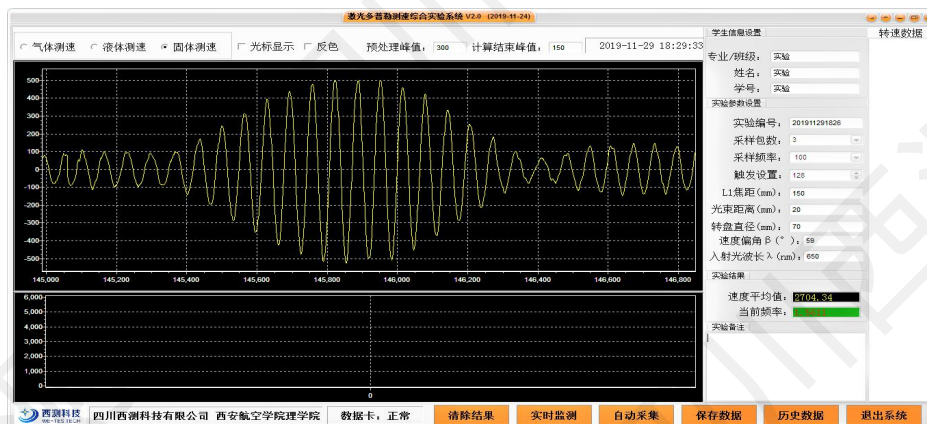
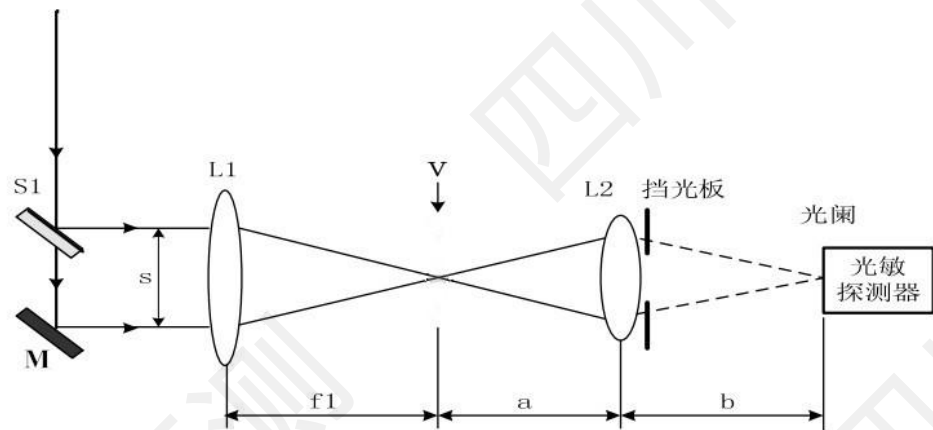


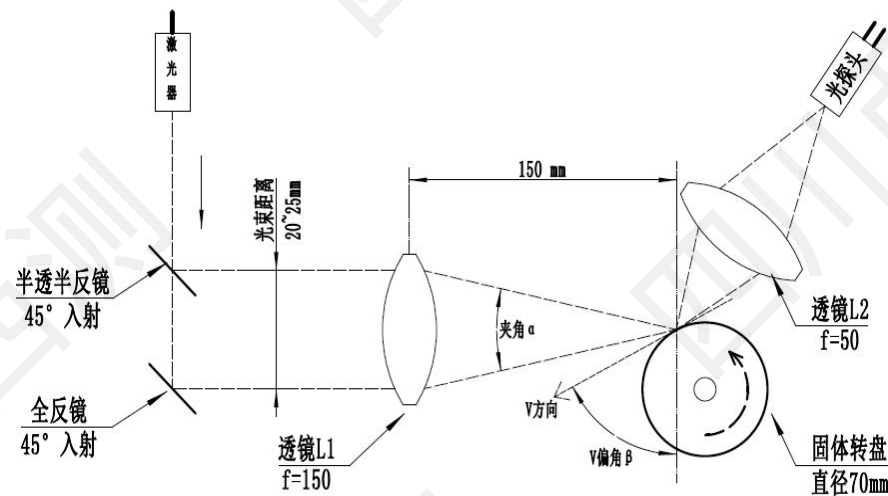
图6 单个粒子信号



多普勒效应原理



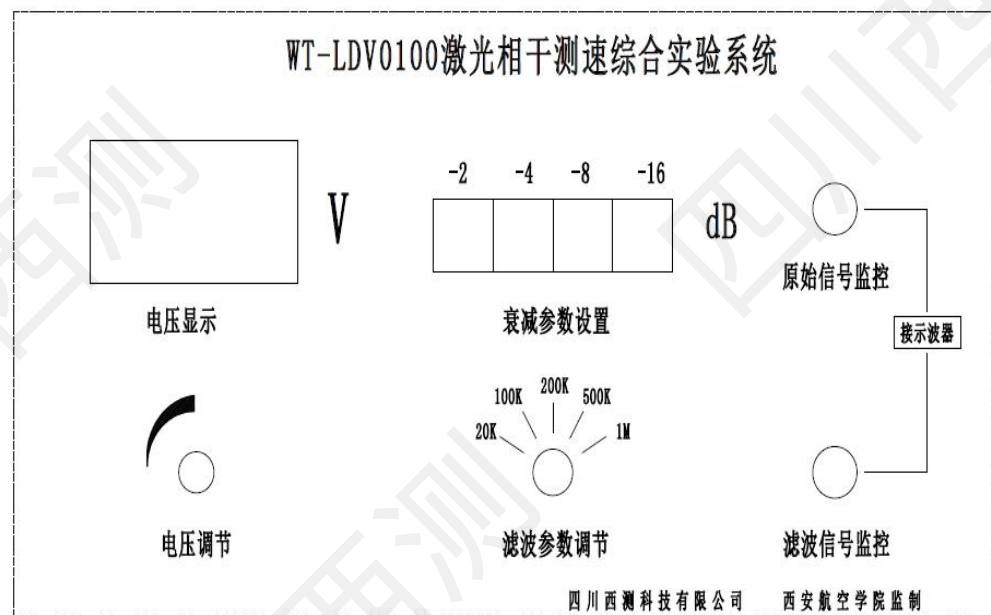
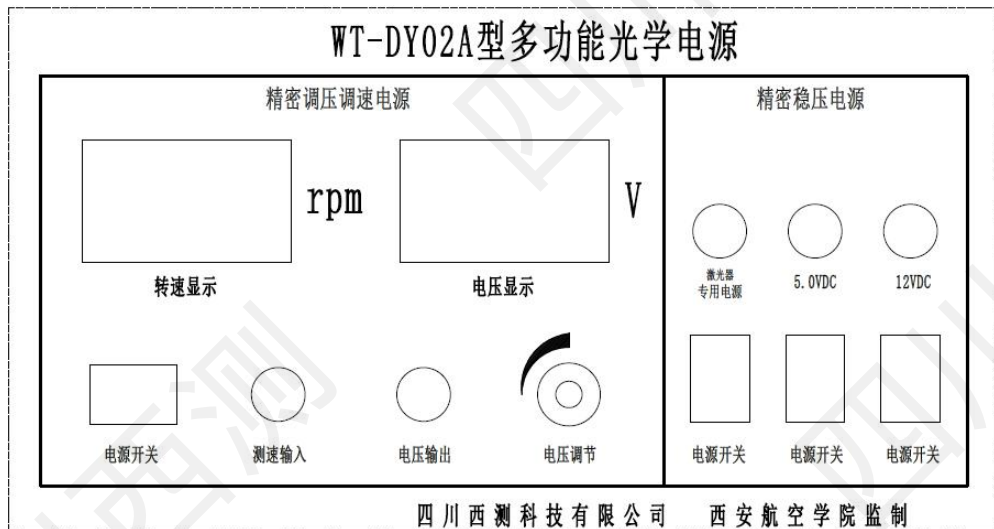
气体、液体 实验光路图



固体测速光路图

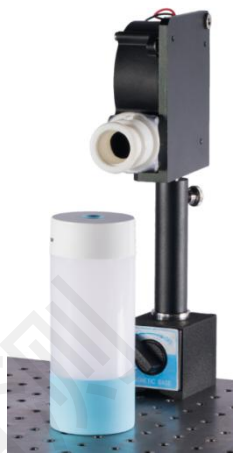


结 构





结 构



气体测速组件



固体测速组件



液体测速组件



西安航空学院
XI'AN AERONAUTICAL UNIVERSITY



03



产品特色





产品特色

实验内容方面

- 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。多功能光学电源、实验主机、液体组件、固体组件、气体组件、光学平台、光学成套器件、

内容丰富、涉
及知识点多，
实验方法新。

LDV技术、信号处理
技术，对后续科研
奠定了基础。



产品特色

教学性

有完善的实验教材，为4学时实验。教学效果良好。并在非物理类学生物理实验拓展课程中使用，学生反映开阔了眼界，了解了新技术，对物理实验有了新认识。多普勒现象是大学物理课中的一项内容，过去不便进行定量实验，本实验对多普勒现象进行定量分析，解决了实验难题。另外学生能够了解LDV是一种非接触测量流速的方法。根据我们的教学实践，LDV实验完全可以融入大学物理实验公共课程。有完善的实验讲义和教学资料。

科学性

LDV实验知识点较多，涉及到力学、光学和数据处理等方面。流速是一个力学问题，古典测量方法是皮特管法，近代有了热线风速仪，这些都是接触测量。LDV是基于现代光学的非接触测量方法，光学方面的知识点有，光的干涉、相干长度、光的多普勒频移、光的检测方法等理论。在PC上做数据处理，在实验中对当代检测技术有了认识。目前这在大面积物理实验中是不多见的。LDV实验将课本上抽象的理论计算变成生动的光路、波形图和流速分布图表。学生通过搭建、调整光路、设置电路参数、数据处理等即锻炼了科学实验的动手能力，又掌握了其中的科学原理。

启发性

1842年，通过声学实验，J.C.Doppler发现了多普勒效应，后用于声学、光学、雷达等与波动有关的学科。1960年代初激光技术兴起。1964年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。古老的物理思想、成果在新技术层出不穷的今天不断发扬光大。我们在计算机时代即不应忽视物理学、物理实验的威力，又要将新技术融入到传统的实验教学中。



西安航空学院
XI'AN AERONAUTICAL UNIVERSITY



04



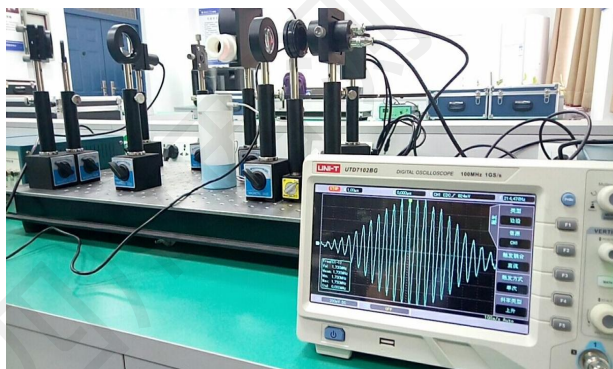
推广及应用

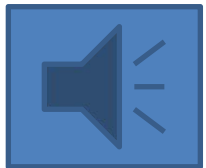




推广及应用

该装置已获得国家专利，通过技术转让的方式通过四川西测科技有限公司实现产品化。截止目前已有内蒙古大学、重庆师范大学、新疆大学、太原理工大学等高校应用于实践教学当中。

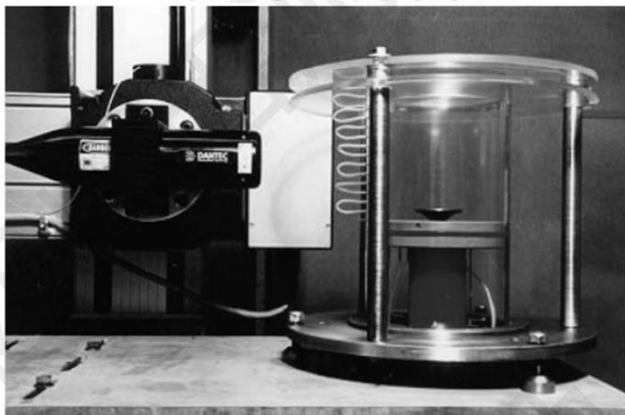




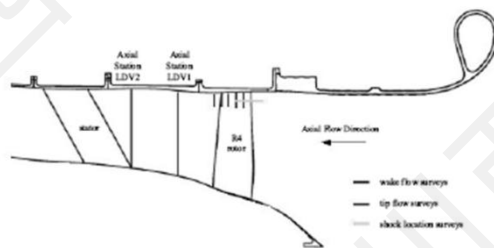
推广及应用

它是目前光通信领域内使用的最重要光源，并且在CD、VCD、DVD播放机、计算机光盘驱动器、激光打印机、全息照相、激光准直、测距、及医疗等许多方面都获得了重要应用。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。

L Measurement of flow in a valve model



LDV的应用示例



实验模型和测量截面布置

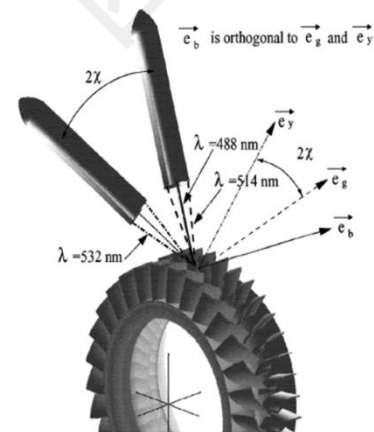


Fig. 2 View of the laser probes fixed on the robot arm and the three-dimensional laser probe system.



西安航空学院
XI'AN AERONAUTICAL UNIVERSITY



05



教学效果





教学效果

大学物理、近代物理、应用物理、光电信息科学与工程、光电检测

- 1.实验涉及运用到物理光学、激光原理、流体力学、光电检测、示波器的使用及图像处理等，专业知识，学生自主搭建测气体、液体流速光路、固体转速光路，实验内容丰富、新物理概念、和新实验方法，充分体现了物理实验的教学思想。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。
- 2.实验数据重复性好，已在近代物理、光电专业、应用物理等专业开展，部分已在创新设计性实验室针对非物理专业的学生投入实验。
- 3.有利于学生动手实践训练，实验结果的重复性和稳定性好，教学效果好。
- 4.本LDV作为实验仪器，测速范围较大，在测量液体和气体的过程中均得到良好的多普勒频率信号，使用中不必添加散射粒子；防护性能好，不易损坏，非常适合物理实验和光信息技术实验。有完善的实验讲义和教学资料。
- 5.我们在实验教学的条件下，搭建这样的装置成本高，用于教学也不方便。通过半导体激光器、反射波、透镜、转盘、透镜、光电探测器(雪崩光电二极管)这样的光路系统来测量转盘的线速度，来模拟激光多普勒效应在工业上的应用，转速连续，且成本低，经过LDV型号、前置放大器、衰减器、HPF、LPF、放大器、USB数字示波器的处理，测量误差小、精度高能达到预期效果，实现掌握一维流场流速测量技术。转换成教学装置涉及知识面广、有利于学生动手实践和拓展设计实验。



教学效果

学科竞赛

毕业论文
设计

创新设计性
实验

大学物理、近代物理、应用
物理、光电信息科学与工程、
光电检测