

全国第二届气动实验非接触测量
学术交流会议论文集

上

1984年10月

杭 州

系统的研制和应用

沈 熙 于 和 生 王 宗 葆

张 景 怡 于 金 凤

清 华 大 学 工 程 力 学 系

摘 要

本文介绍了研制成功的编频分离型二维频移激光测速系统的基本组成和性能特点。该系统由光路系统、三器件声光频移系统、信号和数据处理系统等组成。具有性能可靠、信噪比较好、信息利用率高等优点，为测量二维流动提供了一套比较完整的技术和手段。应用此系统测量了非对称突扩管道中的湍流二维分离流场和气流绕矩形障碍物的上下游分离流场，得到了平均速度、湍流度、雷诺应力等分布。为研究复杂湍流分离流动提供了有价值的实验数据。

一、引言

激光多普勒测速是近二十年内发展起来的一门新技术。由于它具有非接触测量、测速范围广、精度高、动态响应快和空间分辨率好等优点，在涉及与流动研究有关的各个领域受到广泛重视，尤其象湍流、边界层、燃烧、多相流和原子能工程等复杂而特殊的流动状态，非此法难以实现有效的速度测量〔1〕。

为了解决普通一维激光测速仪的方向模糊问题，我们采用声光调制器作为频移器件，研制了双器件差动式频移激光测速系统〔2〕，为测量诸如高湍流度流动；交变、渐变、回流等过零流动；二维、三维等多维流动以及测量范围的最佳化提供了可能性。

对许多流动问题来说，仅仅测量一维速度分量是不够的。在不同方向上作多次一维测量可以得到二维流动参数。但这不仅会给实验和数据处理增添很大工作量，要保证实验的稳定和重复也是不容易的。至于不定常流动就非用二维测速系统不可了。

能够实现二维测量的LDV光路布置方案有多种。常见的一种是采用多谱线氦离子激光作为光源的色分离二维LDV光路〔3〕。虽然氦离子激光器功率高，适用于后向散射和气体测量，但是价格高、寿命短和使用不便影响了它的推广。显然，研制以氦氖激光器为光源的二维LDV对于大量低速应用来说是有实际意义的。

由于氦氖激光器只有单谱线可供实用，而且功率又比较小，如何提高光能利用率和二维分离性能、简化仪器结构等因素便成为方案考虑的重要内容。本文所介绍的编频分离型二维LDV方案是在经过多种方案比较的基础上选定的，我们认为它是现有的使用单色光源的二维LDV方案中性能较为优越的一种。

二、编频分离二维频移激光测速系统

我们研制的偏振分离型二维频移激光测速系统原理图示于图1。以下分别加以说明。

1、偏振分离二维光路

这种光路采用单色氦氖激光器，利用散射光的偏振特性实现二维速度的分离。

由于干涉原理可知，两束平面线偏振光如果偏振方向平行，则能完全干涉；如偏振方向互成不等于 $\pi/2$ 的角度，则能实现部份干涉；如偏振方向正交，则不能干涉。根据上述原因我们可使三束入射光具有图1中左下方所示的偏振方向和空间布置，即光束I、II和III的偏振方向分别与水平方向成 45° 、平行和垂直。由于光束I可以看成两个互相正交偏振光的合成，因此在控制体内会形成两组互相垂直的干涉条纹，图2是拍摄的照片。

要指出的是，控制体中干涉条纹方向只取决于两束相干光的空间位置，与偏振方向不是一回事。我们在图1中有意把光束I和II的偏振方向画得与条纹方向不同就是为了区别这一点。

当运动微粒通过控制体时，散射光中含有两种偏振方向互相正交的分量。它们的光强分别被两组干涉条纹的明暗所调制。如果在散射光接收光路中使用偏振光分离把这两种正交偏振光分开，就可以在两个通道的光检测器中得到光外差以后的多普勒信号电流，它们的频率分别为：

$$f_{DA} = \frac{2 \sin \theta / 2}{\lambda_0} \left| \bar{U}_A \right|$$

$$f_{DB} = \frac{2 \sin \theta / 2}{\lambda_0} \left| \bar{U}_B \right|$$

式中 θ 、 α 分别是光束I、II和I、II之间夹角， $\bar{U}_A$ 和 $\bar{U}_B$ 是A、B两个方向的分速度。

入射光路中两块 $1/4$ 波片用来获得与水平方向成 45° 的线偏振光，同时可使经偏振分光镜以后得到的两束互相垂直的偏振光强度相等。

2、三器件差动式频移布置

激光测速仪采用光学频移能大大扩展仪器的使用功能。在文献〔2〕中对此已有详细介绍。

为了适应国产光电器件响应较低的特点，我们将差动式频移方案用于二维三光束LDV光路。这是一种三器件的布置，在三束入射光的光路中分别插入三个频移器件，它们的工作频率可以根据需要采取各种配置。图1中 f_{SI} 和 f_{SII} 的频差就是A分量的频移量， f_{SI} 和 f_{SII} 的频差就是B分量的频移量。如果两者取等值频移量，则 f_{SI} 和 f_{SII} 也可取等值。频移驱动器的结构可以比较简单。

我们使用的声光器件是上海硅酸盐研究所协作研制的，材料采用钽酸铅($Pb_{10}O_4$)晶体。根据要求和可能，我们选择器件的中心工作频率为40兆赫。这是目前有可能达到的最低频率，也是国际上LDV比较通用的频移中心频率。在适当的驱动电压下，衍射效率可达70%以上。

根据一维（双器件）和二维（三器件）两种光路的需要，我们研制两种频移驱动器，可以分别配用双光束和三光束两种频移率。

频移驱动器的主要部份是由一组晶体振荡器组成的高频功率放大器。它能产生具有稳定工作频率和一定电压幅值的输出信号供声光器件作为驱动源。

根据所配用的 SXJP - 01 型频率跟踪器, 我们选择两组振荡器的频率作用于一维分量, 使得通过光阑后, 可以得到 4.5 千赫至 7.5 兆赫共 14 档不同的频移量, 以适应不同量程的需要。频移量可由面板上的琴键按钮方便地选择。如果需要, 还可以得到与这 14 个频移量接近的其他一些频移量。频移驱动器的频率稳定性为 0.1 千赫, 在 50 欧负载阻抗时, 输出电压可达 5 伏; 可以满足现用声光器件驱动功率的需要。

3、信号和数据处理系统

我们采用的信号处理器是 SXJP - 01 型频率跟踪器。它的测量范围可以从 2.25 千赫至 15 兆赫, 分成 7 个量程范围。输出方式有频率输出和模拟输出两种。频率输出虽然精度较高 (0.25%), 但一般不便于使用未得到动态数据。模拟输出精度较低一些 (1%), 它能输出 0 - 10 伏的模拟电压便于用作实时数据处理。

为了能用微处理机对激光测速仪频率跟踪器模拟输出进行数据处理, 我们研制了一种通用的数据处理软件。它已在国产 DJS-180 机上调试通过。做少量修改后也可移植到其他机型。

数据处理系统的硬件安排如图 3 所示。程序可以同时处理最多三个通道的信号 (一套一维系统取一套二维系统加一套一维系统)。同时处理两套或三套系统的信号可以实现湍流相关量的测量。

软件部份在编制时力求做到通用性, 可以对各种参数进行设置、修改及贮存。参数设置好后可以自动保存, 停机后再启动仍然有效。

本程序功能较全, 可以做多种统计分析, 包括平均速度 (M/S), 标准差 ($R \cdot M \cdot S$ 速度), 偏态系数 (三阶矩)、平坦系数 (四阶矩)、相关系数 (雷诺应力)、湍流度、速度概率密度函数 (绘制直方图), 并可做相关和谐分析。当建立结果文件时, 可将一个流动断面的分析结果贮存起来供给绘图仪自动绘出速度剖面。

程序有两种基本工作方式。一种是集中采样, 对应每一坐标点的速度建立一个原始数据文件, 再集中分析处理。这种方式要求容量较大的磁盘。另一种方式是采样后直接做统计分析, 输出结果, 不保存原始数据。适用于磁盘容量受到限制的情况。

程序备有供扩展功能用的接口, 可由用户根据需要编制独立的扩展程序块。

程序框图见图 4。在运行过程中, 程序随时给出操作提示, 并能显示当前位置, 以利各程序块的进入、退出及转移。

图 5 中 a、b、c 分别是程序起始屏幕、参数设置和统计结果显示。在统计过程中可以对采样值作筛选处理, 剔除偏离平均值太远的不合理数据。由计算机给出的分析结果都是最终结果, 不必再进行换算。

三、二维频移 L-D 系统的应用

1、测量非对称突扩管道中二维湍流分离流场。

流动模型用有机玻璃制造，流动介质是水。这是一种完全分离流。在自由剪切层中具有很高的湍流度。还存在着一个回流区，它与分离区长度密切相关。我们曾用一维频移LDV对分离区的流动参数进行详细的测量〔4〕，但由于得不到横向速度分量，无法确定回流中心的位置，我们也曾用模拟仪表处理二维频移LDV得到的模拟数据，比较精确而详细地得到了二维流场的平均速度，湍流度，速度概率密度函数，雷诺应力等分布〔5〕。较之国外发表的类似实验结果〔6〕更为精确，完整，分散性也小。但是由于模拟仪表数据换算的局限性，即便采用二维LDV，也要测量两次才能得到二维湍流度和雷诺应力分布。这样做不仅计算烦琐，也容易增大误差。

使用数字数据处理就没有上述的缺点，它可以直接进行坐标系统的变换，得到所需要的最终统计结果。图1是在雷诺数 $Re_H = 5900$ 条件下用计算机处理数据并直接绘图得到的轴向平均速度(7a)、轴向(7b)和横向(7c)湍流度以及雷诺应力(7d)分布。这些结果同使用模拟仪表得到的结果基本上是一致的。

图8 是用本系统对流动模型中有代表性的三个位置(1, 2和8点)进行测量得到的潜估计。从中可以看出湍流脉动速度中脉动频率的分配关系。显然，在自由剪切层中低频脉动的相对成分要比进口流动区大，而在回流区中又要比剪切层中大。

2、测量气流绕二维矩形障碍物的分离流动。

这种流动在工程上有一定实用意义〔7〕。流动状态比非对称突扩流动更加复杂。在障碍物的前部和后部都会产生回流和分离，实验测量比较困难。

我们在对水流的扩张流动进行了实验研究的基础上，进一步研究气流的湍流分离流动的测试技术。下面是在风洞中对矩形障碍物绕流流场的测试数据用激光测速通用软件得到的结果。

测量是在 $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 截面的风洞中进行的。为了得到足够的微粒，用自制的粒子发生器布粒，粒径在1微米左右。

我们使用不同高度的障碍物做试验，研究对分离区长度的影响。下面仅举障碍物高宽比为1:1的情况为例作简单介绍。

障碍物尺寸为 $18 \times 18 \text{ mm}$ 。在雷诺数 $Re_H = 8000$ 的条件下障碍物下游和上部的流动参数分布如图9中所示。

图9a中表示的是轴向平均速度和轴向湍流度分布。从中可以看到在上下游存在的回流区。

图9b表示横向湍流度分布。图9c是雷诺应力分布。图9d是采用不同标尺得到的平均速度向量分布，从中可以看出流场中流线的大致走向。分离区长度约为1.1倍凸起高度。

测量结果同文献〔7〕比较大致吻合。由于文献〔7〕只有一维测量结果，横向分量和雷诺应力等数据尚无法同已有结果比较。

三、结束语

流动模型、二维频移激光测速系为测量二维流动提供了从光学装置、信号处理到数据处理一套比较完整的技术和手段。实验者只要合理选择和设置好实验参数，就能直接从计算机得到各

终结果在很大程度上提高了信息的利用率和节省大量的实验和数据整理时间。经过多方面的测量和应用表明,这种系统具有性能稳定可靠,信噪比较好,对光电器件频响要求低和不需要复杂的频率合成装置等优点。尚有一些理论问题,如微粒光散射的校准作用问题需作深入的研究。但从我们的实际应用情况来看,这个因素并不成为影响使用的一个原则性问题。为了推广激光测速数字数据处理软件的应用,研究将此程序移植到其它微机型上去是有实用意义的。

参 考 文 献

- [1] Proceedings of the International Symposium on Applications of Laser Anemometry to fluid Mechanics, 1982, Lisbon
- [2] 沈熊、廖湖声, 采用光学频移的激光测速系统, 《激光》杂志, 1982, 10 期
- [3] 激光多普勒风速测量技术的原理和实践, 清华大学激光测速组译, 原著: P. Durst, A. Melling, J. H. Whitelaw, 1976
- [4] 沈熊、廖湖声, 应用频移激光测速系统测量高湍流度回流流动, 《力学学报》, 1982 年 5 期
- [5] X. Shen, H. S. Yu. and J. Y. Shang, Two Component Measurements in a Duct with a single Backward facing step Expansion, Proceedings of 2nd International Symposium on Applications of Laser Anemometry to fluid Mechanics, 1984, July, Lisbon
- [6] W. H. Stevenson and H. D. Thompson, Laser Velocimetry Measurements in Highly turbulent Recirculating flows, Engineering Applications of Laser velocimetry, 1982.
- [7] D. Crabbe D. P. G. Durao, J. H. Whitelaw, Velocity Characteristics Near the 2-D Rib, Proc. of turbulent shear flow Symposium, 1979.

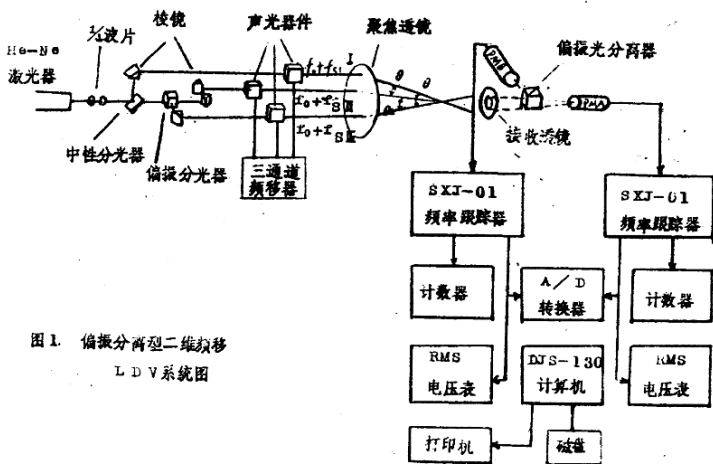


图1. 偏振分离型二维测速
LDV 系统图

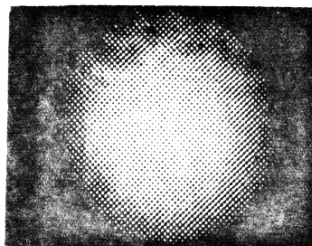


图2. 正交干涉条纹图形

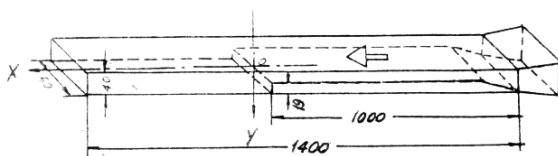


图6. 阶跃扩张流动模型

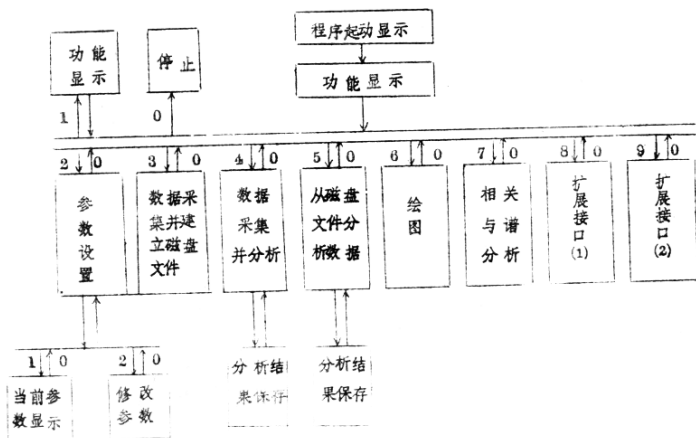


图4 程序框图 (箭头旁的数字为流程控制字)

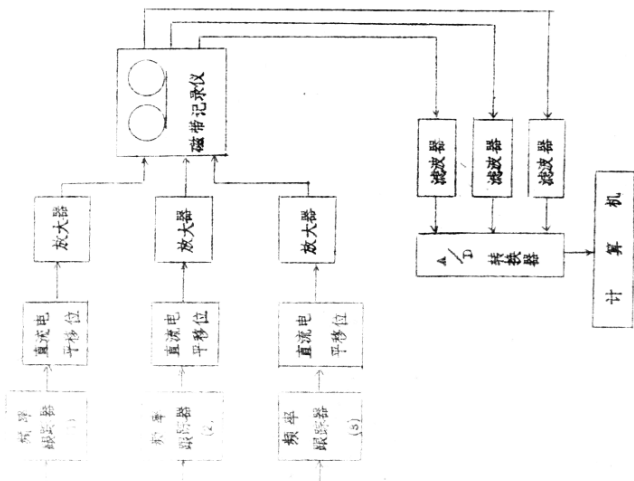


图3 硬件安排

(a)

UNITARY SYMBOLS OF THE UNIT

UNITARY PARAMETERS

ITEM	UNIT	VALUE
01 WAVELENGTH	0.00000	0.00000
02 FREQUENCY	0.00000	0.00000
03 COEFFICIENT	0.00000	0.00000
04 FOCUS DIST.	0.00000	0.00000
05 BEAR. ANGLE	0.00000	0.00000
06 FOCUS	0.00000	0.00000
07 FOCUS	0.00000	0.00000
08 GAIN	0.00000	0.00000
09 FOCUS	0.00000	0.00000
10 COEFF.	0.00000	0.00000

(b)

UNITARY PARAMETERS

01 WAVELENGTH	0.00000
02 FREQUENCY	0.00000
03 COEFFICIENT	0.00000
04 FOCUS DIST.	0.00000
05 BEAR. ANGLE	0.00000
06 FOCUS	0.00000
07 FOCUS	0.00000
08 GAIN	0.00000
09 FOCUS	0.00000
10 COEFF.	0.00000

(c)

图5. 数据处理屏幕装置显示

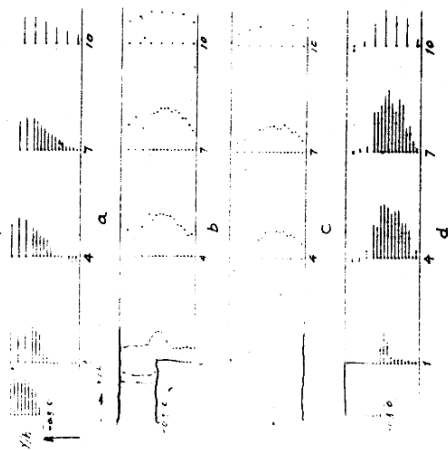


图7 非对称射流管道中端流分离流动 $Re_m = 5900$

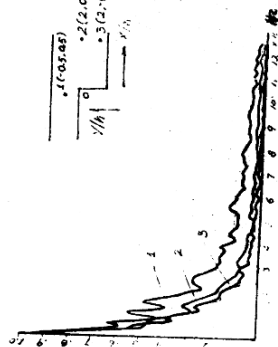


图8 非对称射流速度功率谱分布

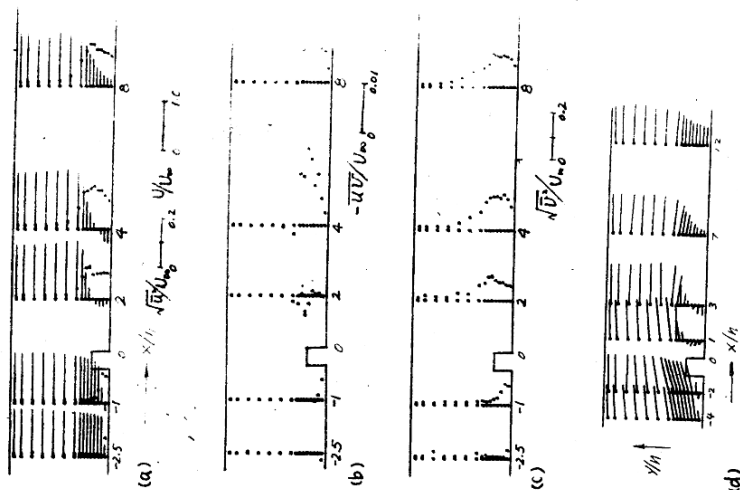


图9 气流绕矩形凸起物的分离流动 $Re_m = 3000$

603—1型红宝石激光全息照象机的初步应用

吴兴源

中国气动力研究与发展中心四所

一、引言

603—1型全息照象机，自1978年下达任务之后，经过设计、加工、装配调试，到1981年底正式安装到高超音速风洞上。经过1981年底和1982年底两次集中时间的试用，对整机性能，基本上获得了预期效果。试用中主要用双全息图技术，来考察全息暗盒和双全息图再现装置的功能，并用两次曝光法的无限条纹来观察平板模型的附面层分离情况，并以此来考察整机的各项性能。试用结果表明，在红宝石激光器的质量不太高的情况下，仍获得了较好的效果。

二、结构性能

603—1型全息照象机是在WY—3型纹影仪的结构基础上改装设计而成的。主要用于风洞试验中的流场显示。图1为其光学原理图。整套设备的附件较齐全，因而用途广泛。它不但能做激光阴影仪、激光纹影仪和激光全息和全息干涉仪使用，换上白炽灯或火花光源便可做常规纹影仪使用。其主要规格如下：

主反射镜： $f = 2400$ ， $\varnothing$ 透光 = 240；

仪器视场： $\varnothing 240$ ；

画幅尺寸：纹影仪 $\varnothing 24$ ；全息照象 $\varnothing 40$ ；

仪器行程：水平方向600；铅垂方向100；

整机所配主光源为脉冲红宝石激光器·叶绿素调Q·输出能量约0.05~0.1焦耳。参考光束采用平行光照射干板的方式。参考光路中配有控制相位变化的平面反射镜·这为获得两次曝光有限条纹干涉全息图和有相位控制实时再现全息图创造了条件。全息暗盒采用鼓轮式·里面可装60×90的全息干板六块。这对仪器操作人员极为方便·更换全息干板毫不费力·也无需紧张。这种暗盒的装卸或更换·经作熟练人员只需几秒钟就能完成。

整机附件还配有双全息图再现装置·它是一个具有六个自由度的机械式装置。有三个移动自由度和三个转动自由度的调节机构。这种装置完全能把参考全息图和试验全息图调整到它们之间的相对原始位置上。这时·只要转动后面试验全息图的两个角度自由度·便可获得各种各样的干涉图型的再现照片。这种装置还可再现单张的单次曝光全息图和两次曝光全息图。

三、双全息图装置的试用

双全息图技术是两次曝光技术的发展·但灵活得多。所得到的信息也丰富得多。这种技术在美国用得最普遍。

本设备在进行双全息图技术试验时·采用下列程序进行。首先是双全息图的记录·用鼓轮式全息暗盒进行。暗盒中的第一张干板作参考全息图·它在光路当中的位置比其余五张干板的位置靠前三毫米。

它在风洞来吹风前曝光（可以是无模型的空风洞，也可以有模型）。其余五张干板均作试验全息图，在流场建立并稳定后，依次曝光。这些曝光后的干板经处理后便成为可再现的全息图了。双全息图的再现是在双全息图再现装置上进行的。参考全息图是装在前面的一个调整架上，它具有铅垂移动、横向移动和绕光轴转动等三个自由度。试验全息图是装在后面的一个调整架上，它具有两个角度转动和沿光轴移动等三个自由度。这两张全息图同时被 $\phi 5.5$ 毫米平行的氦氖激光束照明，并通过六个自由度的调节，使之达到和记录时的相对位置。这时便能获得无限条纹的干涉照片。如果稍微调节试验全息图的两个角度转动自由度，便能获得各种花样的有限干涉条纹照片。

试验中，我们对上表面装有立方体凸块的平板模型进行了观察和全息记录。条件是 $M=5$ ， $\alpha=0^\circ$ ， $P_\infty=10$ 公斤/厘米²的情况下记录的。照片1为再现出的无限条纹干涉图；照片2为垂直于模型轴线的有限条纹干涉图；照片3为平行于模型轴线的有限条纹干涉图。从上述照片看出，干涉条纹的方向和间隔大小，可按操作人员的需要任意调节。说明了这种全息暗盒和双全息图再现装置的设计是成功而实用的。

四、附面层分离的观察

以前用常规纹影仪观察附面层分离时，往往由于照象机的曝光时间较长，分离点看不太清楚。尤其是附面层分离区的内部结构不得而知。这次通过603-1型全息照象机的全息干涉实验，情况就大有改

进。附面层的分离点看得清楚；分离区的回流现象形象化；凸块上的激波和膨胀区的干涉条纹也明显；分离激波和附面层的相互作用也明显可见。由此看出，全息干涉技术为形象地观察分离区的流态和定量分析分离区的压力分布，可以得到较好的结果。

照片4、5、6、7是用两次曝光法获得的干涉条纹干涉图。这些照片均在 $M=5$ ， $P_0=10$ 公斤/厘米²， $\alpha=0^\circ$ 的条件下拍摄的。其模型均为同一平板，而在其上表面安装上不同的凸出物。从这组照片可以清楚看到，尽管在同样条件下，由于安装上不同的凸出物，它们所引起的附面层分离情况却大不相同。照片4为平板上安装的有 45° 角斜面的立方块。它所引起的分离区较小，分离点距离凸出物壁面较短，分离开的紊流附面层很快又附着在 45° 斜面上。分离激波刚好撞在 45° 斜面顶点处的紊流附面层上，二者作用的结果，迫使附面层向前方弯折一个角度。平板表面的紊流附面层显得很清楚，而且很厚。分离区的回流现象很弱，显得不很明显。照片5为平板上安装的立方块。它所引起的分离区较大，分离点离开凸块壁面的距离比照片4上的远得多。回流现象比较明显，分离激波也离开了凸块。分离开的紊流附面层在立方块的垂直壁面上的四分之三高度处，又重新附着。照片6为平板上安装的带有 45° 斜面的长方条，其长度与平板的宽度相等，因此迎风面积大，光线通过这个区域的路径较长，所以显示效果较明显。它引起的分离区较大，分离点离开凸块壁面的距离要比照片4上的长一倍多。回流现象很清楚，离开平板表面的紊流附面层到 45° 斜

面的三分之二高度处才重新附着壁面，其分离激波已远离凸块。照片7为平板上安装的长方条，其长度也和平板宽度相等，所以它引起的分离最大，分离点已前移到视场边缘。回流现象最明显也最清楚，离开平板表面的紊流附面层撞在长方条上部尖棱处，几乎没有附着表面。分离激波也远远离开了长方条凸块，也和分离的附面层不再互相影响。总之，用全息干涉技术显示附面层分离，无疑对气动理论分析和选型试验都是有帮助的。

五、结束语

603-1型全息照象机安装到高超音速风洞上已经三年多了，也做过一些实验。对整机性能作过一定的考察，取得了一定预期结果，说明仪器主机性能是良好的。但是，由于种种原因，课题工作终止了近两年，还有许多工作要做，还有些问题应急需解决。

1. 自行设计的红宝石激光器的质量不高，也不稳定。如要获得供定量分析用的全息干涉照片，就必须更换成质量优良的全息级红宝石激光器。

2. 设备安装到风洞上后，由于各种原因，动态试验不多，对附面层转换以及更高速度的气流现象还未做过试验，因此，还需全面考查整机的性能。

最后，衷心感谢和我共同工作的周向东、冯绍枢和高汝河等同志，以及为本文扩印照片的孙孝芝、李小川同志和描图的孙兰萍同志。

六. 参考文献

1. J.D.Tralinger, "A Holographic Flow Visualization System" SPIE 14th Vol.2 P.499-510.
2. J.D,Tralinger "Aerodynamic Holography" AD709.764
3. W.T.Strike, J.E.O'Here. "Development of Holographic Interferometric Applications in The Supersonic and Hypersonic Wind Tunnels" AD A007 689
4. A.G.Havener 著, 赵宗续译, "应用脉冲激光全息相术进行超音速风洞研究" 《气动研究与发展》1978年第三期

P.54-119

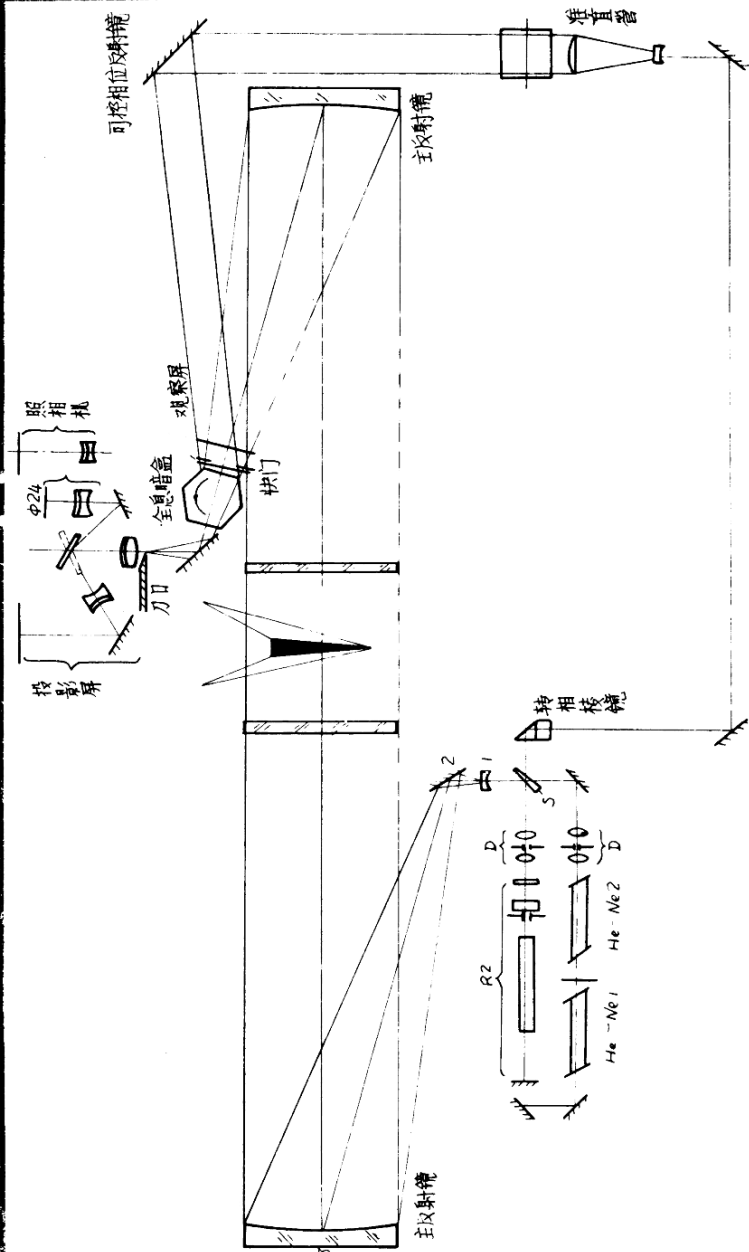


图 1 603-1 型红宝石激光全息照相机光学原理图

脉冲激光技术在流场显示中的应用

袁 格 金 璇

孙守昌 李超杰

北京空气动力研究所

一、前 言

在空气动力学试验中常需显示飞行体周围的气流状态，以分析高速气流对飞行体的影响，测量各种力学的或物理的参数，为正确设计飞行器提供实验依据。观测的对象是透明的位相物体，常用纹影法或阴影法等光学测量法来显示，这些现象有不少是瞬息变化非稳定的，需用高速摄影才能获得清晰的图象，脉冲激光具有非常短的脉冲，且有一定的能量，用作高速摄影光源可大大提高时间分辨率，它与纹影技术相结合可得激光纹影照片或激光阴影照片，清晰地显示高速飞行体的姿态及其周围瞬变的气流信息，如利用激光的良好相干性采用双曝光全息干涉术可定量测定气流的密度分布或温度分布，进而推算出其他力学参数，所以自激光技术发展以来，脉冲激光在空气动力学试验中得到大量应用，有着广阔的前景，尤其是全息干涉术，可使过去的定性观测发展到定量测定，使光学流场显示技术发生深刻的变化^[1,2]。

我所近年来在这方面做了一些工作，在超音速风洞及砲风洞中进行吹风试验，取得一些技术成果。下面作简要介绍。