

流场显示技术在流体力学中的应用和展望

中国科学院力学研究所 束继祖 李华煜

一 前 言

在现代科学研究中,实验技术是其最活跃的重要方面。现代科学研究首要的问题是
根据实验结果(而不是根据猜测)建立研究对象的物理模型,然后再进行研究分析。流
体力学研究中的流场显示技术,其任务就是把存在于透明介质(空气、水……等)中的
流动现象,(其中很多现象是直接看不见的。)不仅设法用图像显示出来,并力求做到
根据这些图像作流场某些物理量的定量测定。

自从一八八三年雷诺的流场显示实验发表以来(这个实验被追溯为流场显示技术的
开端),这门实验技术已有近百年的历史了,在科学发展上起了很大的作用。以气动力
学为例,一旦被研究的流动图案(流谱)显示出来以后,问题往往较快地被解决,无论
在理论研究和实验研究上都起了很大的推动作用^[1]。例如湍流、涡流、边界层等现象
都是首先被流场显示实验观察到的。

随着流体力学的发展,流场显示技术也不断地得到发展。1883年以后,这门技术
的原理性和技术性文献不断涌现,形成了一门独特的实验技术科学,到目前为止,仍
然显示了它的活跃和生命力。它的发展总是和科学发展、新技术的发展相联系的,例
如激光的出现促进了全息术的迅猛发展,而全息照相和全息干涉术又为流场显示领域增添
革命性的内容和发展,例如为解决三维流场的定量测量开拓了道路。

流场显示技术目前已被广泛应用于流体力学、空气动力学、爆炸力学、等离子体物
理、燃烧学、传热量、核子物理、大气物理、空间技术和化学反应工程等一系列领域
中。特别是在风洞实验中,流场显示是确定流谱等物理现象可靠而有效的方法。电子计
算机的发展,并没有降低流场显示的作用,因为只有更精确的物理模型才能使流体力学
有所发展,而空气动力学中的理论还远未完善,还需要流场显示继续提供数据。

流场显示现代的发展,不但提供了由于压力变化、温度变化、密度变化;速度变化和
离子浓度变化等物理量变化所描述的图案,并且有些方法还可提供定量的测量数据。在
数据的采集方式上,具有快速(10^{-6} — 10^{-9} 秒)、不扰动流动场、空间大信息量采集的
能力,是其他测量技术难以做到的。

流场显示技术内容十分广泛,本文只是力学发展规划中的一个调研报告,所以只是

结合流体力学方面来叙述流场显示的发展和对流体研究的作用。在第二节中,叙述了这门技术的内容和分类,介绍了一些古老的方法的原理和发展。在第三节中,介绍激光技术、全息照相、全息干涉、付氏光学信息处理、应用数学和现代化数据处理等专题,是本文的重点。第四节介绍流场显示技术中的高速摄影,重点介绍高速全息电影照相发展概况。第五节提出我们对实现赶超的起点和一些努力的方向等问题的一些初步意见。

在编写的过程中,我们感到要概括这个领域的内容和应用是十分困难的。特别是飞速发展的全息学和付氏光学信息处理,还处在兴旺发展时期,已经给流场显示带来革命性的变化但还必定会继续发生巨大影响,这种影响目前是很难估计的。由于我们水平有限、时间短促,本文是粗糙的,认识也是肤浅的。大胆地提出一些观点和建议,目的是和大家共同探讨,谬误在所难免,请批评指正。

二 流场显示技术概况

流场显示技术可分两大类:

I 在流场中掺入外来物质或注入能量的显示方法

1. 在流场中掺入外来物质方法

a. 利用颜料、烟雾、蒸发和羽毛等掺入物直接观察流动,这些技术虽然古老,但是方便易行、直观。直到七〇年代还被用来显示低速不可压缩流动,如剪切层(Shear layer flow)中的流动、涡系(Vortex systems)等。也用来显示超音速流²和现场大面积爆炸激波³等。

b. 用小粒子、气泡跟踪流动:掺入的小粒子可以是固体,也可以是液体。而在液体中激发产生气泡就是所谓气泡(氢气)跟踪技术⁴,它是 Clutter和 Smith 1961年提出来的,可用于显示边界层及边界层中的速度分布⁵。特别要指出的是:有些空气动力学问题,可以在水中进行模拟试验⁶,由于容易观察,容易得到定性的结果。气泡技术得到的流谱照片十分清晰,例如法国曾在水槽中模拟研究大型飞机起降时,产生威胁邻近飞机起落的涡流现象。

c. 用光敏或热敏化学染料显示流动:例如用热敏的酚兰和液晶,显示实验模型上由于气动加热产生的温度分布,显示边界层流动⁶。液晶可以分辨1℃的温度变化,比酚兰灵敏得多,特别适于边界层转捩的测量。这个技术在我国已有人作了探讨⁷。光敏染料可掺在工作液体(例如水中),使其形成光解溶液,在强光照射下分解出带有颜色的微团,(在激光照射下可以打出一串微小色团。)这些微团直径只有几个微米的大小⁸,这些微团就构成了可见的流谱。

2. 在流场中注入能量的方法

a. 引入火花、热量或热质点的显示方法:例如在不可压缩流体中加入热量,使被加热的扰动气流与未加热的周围气流产生密度差,用光学显示技术就能把流动情况显示出来。“热质点”显示方法采用周期性的脉冲电加热,并藉助于纹影仪显示⁹。电火花跟踪技术则是在流场中进行高压放电,形成电火花通道,流动则使放电通道变形,描划

出流场的速度剖面。这种技术曾用于：边界层观测、高超声速模型尾流观测、高超声速热冲风洞中的速度场测量^[10]。

b. 电子束和辉光放电显示测量方法：这两种方法用在稀薄气体流动的研究中，由于这两种显示引起气体的折射率变化甚微，一般的古典光学方法在这里应用十分困难，这两方法都能使流场有较好的显示。

电子束显示方法的简单原理：一束高能电子束穿过被研究的气体，由于快速电子和气体原子、分子间的非弹性碰撞，大部分气体分子被激发到高能态，然后通过自然辐射回到基态，在一定的条件下，这个辐射的强度正比于气体的密度。记录这个辐射还可得到流谱。这个技术包括：快速电子激发方法，直接辐射的显示方法、电子束余辉方法等内容。这种技术不但可对稀薄气体流场的激波位置和形状进行显示，而且还可进行流场密度的定量测量。^[11]

辉光放电显示技术原理：在低压气体中进行放电的同时，将有光的发射，其发射强度和波长（即颜色）是气体密度的函数。因此流场可用彩色的流谱照片来表示，光的强度变化和颜色的变化表征流场密度的变化。这个技术已成功地用在高超音速（ $M = 40$ ）风洞的流场显示中。^[12]

这两种技术我国都已有采用，在稀薄气体流场、高 M 数风洞中已经得到成功的照片。

II 光学显示测量方法

光学显示方法是流场显示技术中的重要部分，也是发展最快和应用最广的部分。基本上包括：阴影照相技术、纹影照相技术、干涉技术、全息照相、全息干涉以及付氏光学信息处理技术。

阴影、纹影、干涉等古典技术是上个世纪发展起来的技术，但在本世纪中发挥了巨大的作用。六〇年代出现了激光技术以后，这些古老的技术相应有所发展，对全息学则更有极大的推动。在这节中，我们对常规的光学技术作一简单介绍，重点在新的发展方面。而全息技术等新技术则移至第三节叙述。

a. 阴影照相技术：这方法一般认为是 V. Dvorak 于 1880 年创立的。它所需设备简单，易于实现，然而效果良好。现代阴影技术使用短的光脉冲光源（ 10^{-7} 秒）得到非常清晰的阴影图，可显示紊流区中的流动、尾迹流中的旋涡，边界层中的转换情况等流动细节。阴影图表征流场密度梯度的梯度 $\left(-\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2}\right)$ ，图像直观，因而目前仍被广泛应用。目前还发展了一种正面照明和阴影技术相结合的方法^[13]，不但可以获得阴影图，而且还可得到模型十分清楚的正面像。阴影图一般可在纹影仪上获得，只须去掉纹影仪焦平面上的空间滤波元件（刀口）即可。

b. 纹影照相技术：纹影方法一般采用“刀口”作为空间滤波器，它是把焦面上的一半频谱滤去的技术。现代的空间滤波方法还有多种，例如用退相法^[14]（Dephasing）和相衬法^[15]（phase—Contrast）可实现高灵敏度；采用线性滤波可得到较大的测量范围；采用波长滤波可得到彩色纹影图等等。纹影图表征流场密度的梯度 $\left(\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)$ 。

在纹影仪的基本设备光源入口狭缝处和在纹影仪的焦面上（“刀口”平面）上插入

光栅^[16]、双折射棱镜^[17]可实现干涉计量；插入两个对应的隔栅可实现莫尔条纹技术。由于这些技术的基本装置是纹影仪，一般通称纹影技术。

纹影技术是我国目前应用最广的一种显示方法。我国从1958年开始引进这一技术，二十年来从无到有地 为我国填补了一些空白；五八一六〇年间长春光机所和701所研制成功第一批纹影仪（58—Ⅱ型），同期长春光机所研制成功了我国第一台大型马氏干涉仪。六二一六四年701所和长春光机所进行了505—Ⅰ型纹影仪的研制工作，六七一六八年力学所和锦州光学仪器厂进行了640型纹影仪的研制，（这是我国生产、应用最多的一种型号。）七三年力学所研制成功了高频多脉冲Ar⁺激光光源^[18]，与高速转鼓照相机配合，实现了高速纹影照相。从纹影仪的设计生产来说，我国已有一定基础，目前已能生产大口径（500mm）的纹影仪，光学均匀性可达 $\frac{1}{10}$ 波长以上的精度。一机部已将锦州光学仪器厂，作为接受加工，定货和试制纹影仪的单位。但是在应用纹影技术上我国还是比较落后的，科学院力学所曾在这方面作过一些工作^[19]，但未得到普遍的推广和应用，目前应用的单位和部门都不够多。

c.干涉技术：在空气动力学中应用的古典干涉技术，以1891年提出的马氏干涉仪为代表，提供了对流场进行定量测量的可能。但仪器本身要求高精度的光学元件和机械调节机构，不但造价昂贵而且调整十分麻烦。由于激光全息照相的出现，可以方便地实现干涉计量，马氏干涉仪的应用已经不多了。

在本节中只讨论一些应用激光为光源的非全息性干涉技术的新发展。

i) 高灵敏度干涉技术：一般有限条纹干涉法的灵敏度通常认为只有 $\frac{1}{20}$ 波长左右，这个灵敏度对固体位移测量已经足够了，但对流场的测量则远远不够，例如很多低速、低密度变化的流场，高超音速风洞中的流场，稀薄气体流场，要求测量灵敏度在几分之一波长以上，所以如何提高灵敏度是这个领域中相当关心的问题。

法国德一法圣路易研究所的G.Smeets和A.George在渥拉斯特棱镜干涉仪的基础上发展了一种高灵敏度干涉技术^[20]，用补偿光路双曝光的办法，得到高质量的干涉图。

其高灵敏度的原因主要是应用了移相原理，他们证明了这种技术的灵敏度约为 $\frac{1}{500}$ 波长。采用相似的光路，用激光作光源，用光电二极管作接收元件对边界层进行定量测量，他们报导了实验的时间分辨率达0.1微秒，空间分辨率为 10^{-2}mm^{-1} ^[21]。（在很薄的边界层中测量了8个点。）1974年的十一届高速照相国际会议上，R.Schall在特邀报告中^[22]介绍了G.Smeets等人的工作，并指出，如果直接用光电元件（Optronic）记录，灵敏度还可提高1—2个数量级。在J.D.Trolinger的报告^[18]中提到，这种干涉技术的灵敏度达 0.01Å 。如果这种技术发展成熟，测量灵敏度问题就在极大范围内解决了，光学显示的应用范围将大大扩展，就有可能取代某些设备庞大、技术复杂的技术。

（例如电子束、辉光放电显示技术）但这里介绍的技术不是提高灵敏度的唯一途径，下节我们将讨论与全息术有关的其他提高灵敏度技术。

ii) 散斑（Speckle）干涉技术：这是七〇年代发展起来的新技术，最早用于固体

位移测量和振动分析，它补充了全息干涉计量的一些空白，得到了相当大的发展。散斑干涉中利用毛玻璃的微分干涉技术²³，可以检测透明物体的位相变化，在底板上每点的光强或颜色（白光光源时）的变化，对应着该区域中透明物体位相变化的斜率。这种技术应该可以用作流场显示，但目前尚未见到有关文献。

三 全息技术在流场显示中的应用

全息照相概念和第一个实验是英国科学家D.Gabor在1948年报告的。1962年美国E.N.Leith等用通讯理论处理全息技术，解决了一个重大的技术问题，使人们对早先不被重视的全息术重新感到兴趣。1963年Leith等人把激光引入全息术，从此全息术就得到迅猛的发展，在很多领域得到越来越多的应用，形成一个很有前途的新学科。

迄今为止，国际上对全息术的研究仍然非常活跃，发表的论文很多，很多杂志都设有全息术专栏。据报道，仅美国就有约100个公司和实验室从事全息术的研究，还有一个专营全息照相的专业公司——密执安GCO公司。美国经济研究所曾经断言：“到1980年时，生产全息照相技术产品的部门将成为美国激光工业中最大的部门”。法、英、西德、日本和苏联，对全息照相都开展了大量的研究工作。目前正是全息技术飞跃发展的时期，有关“流场全息显示”的原理性实验和理论工作，还原原不断地涌现。有人曾经断言：到2000年时，现行的大多数技术将要过时，而全息术则仍然是没有过时的技术。

据国外风洞测试中全息技术应用的一些报道，可以大致了解“流场全息显示”的发展概况：美Korad公司研制了KHI-I型双脉冲红宝石全息照相机，用于风洞流场测量，已经成为定型商品；阿诺德工程发展中心，从1967年起就用全息技术作风洞流场测量，三年内已在12个风洞中使用，研究了边界层干扰和分离、激波形成、尾流等一系列课题；美海军航空系统司令部和冯卡门气动力学研究室，都用全息技术作超音速和高超音速风洞流场的三维定量测量，并使用电子计算机进行数据自动处理；美联合飞机公司、通用动力公司、AEDC公司（田纳西州）、ARC公司（俄亥俄州）、美国海军军械中心等单位已实现风洞流场的全息显示和计量。此外，美阿波罗激光公司、Holobeam公司、Qundrad公司都有定型的双脉冲全息照相系统出售；Sandia公司还发展了一个四脉冲全息照相系统，可连记录四个物态。法国国家宇航局1967年开始在风洞上使用全息术，1972年发表了定量测量的技术和方法；法国里梅尔实验中心和马特拉导弹公司，研制了高速全息电影照相机，能连续拍摄十张全息图。（脉冲宽1 μ s，间隔1—2 μ s。）日本三菱公司、东京大学工学部和宇航研究所、东京芝浦电气株式会社、富士光机株式会社等都已研制生产了风洞用脉冲全息照相机。西德、苏联等国家亦已报导了用于风洞测量的定型全息照相机的生产。所有这些都说明这些国家在风洞流场测量方面，全息技术早已进入应用阶段，并越来越多地取代了落后的探头（如测压力、测温等）测量方法。

流场全息显示技术在我国大约是七三年开始进行研究。开展单位有国防科委29基地、701所、中国科大、力学所和安徽光机所等。目前大体还在初步阶段，只能起定性显示作用。中国科大和力学所曾经对定量计算进行了尝试，离开用于解决实际课题尚存在一定距离，水平相当于外国60年代中期的水平，相当十二、三年的差距。下面较为仔细地谈几个问题。

I、流场全息显示的特点

除光学方法不干扰流场、在极短瞬间采集大量空间信息等特点外，全息技术还有几个特点：

1. 不需要精密的光学元件：传统的光学方法要求光路上各元件（包括观测窗）都经精密加工，不然被测的流场形象将淹没在巨大的光学噪声之中。1966年 Heflinger 等人提出的全息时间差分干涉原理^[24]，可消除非精密加工光学元件带来的影响。其原理同样地被用以消除实验过程产生的固有误差。所以全息系统就有简单、易调整、造价低的特点。并且，这特点还是全息干涉能达到比马氏干涉仪更高精度的关键技术。更为重要的是，这一原理使形状不规则、光学质量不均匀的透明容器内部流动的显示得以实现，这是古典光学方法不可能做到的。例如 Witte^[25]报导了一个关于激波在T形接头处相互作用的研究，就是一个典型的例子。

2. 有光波储存器的作用：全息图具有记录光波全部信息的能力，因此，实验时带着短暂的流场信息的光波就被“冻结”储存起来。全息图再现时，这个三维光波能长时间精确地复现。因此就存在任意处理这个光波，得到多种信息形式的可能性^[26]。例如一张全息图就可得到阴影图、各种纹影和干涉图，以及其他光学处理方法所得到的信息图象。这样，就可以不必一次次地重复这个实验，从而节省了大量的劳动和资金。这对一些大型试验或其他难以多做，代价高昂的实验来说，具有很大的实际意义。

3. 存在对流场进行三维密度定量计算的可能性：漫射式全息图可有 40° 宽的视角的观察范围，在光路上加上特殊处理则可使视角增至 180° ，这样就完全可能据此进行三维定量计算了。普通光学方法只能记录某一特定视角的像，因而记录的信息量比全息方法记录到的少得多。

II、流场全息显示几个主要方面的发展概况

1. 全息记录的信息处理技术：

(1) 单曝光流场记录的全息图可以进行多种光学方法处理，上文已经谈到，这里不再重复。

(2) 由于风洞周围环境中的干扰较大，双曝光全息图不能在理想条件下进行，（即两次曝光光线不能走严格相同的路径。）从而引入较大的误差。于是就发展了消除此类误差的双全息图法^[27]和夹层全息图法^[28]等方法，由于可以调节，可以得到多种形式的干涉图，并消除大部分干扰误差。

(3) 近年来飞速发展的付氏光学，提供了光学信息处理的理论基础。它的主要思想是从记录到的信息空间中抽取需要的特征信息，扬弃不需要的光学噪声。它已经和正在取得很大的成效，是我们今后应注意发展的重要方向。

2. 三维密度场的定量测量

在全息术发展以前,马氏干涉仪曾被用于风洞流场进行二维定量测量,但由于技术条件要求较苛,一般误差也较大,因而限制了它的推广和发展。全息术出现以后,由于上述缺点被克服,可以达到1%左右的测量精度,因而越来越多地用以定量测量各种流场,使流场显示技术进入更为完美的定量发展新阶段。

全息术无疑可以用来解决二维和轴对称流场的定量测量,由于全息图特有的三维性质,给三维流场定量测量也提供了可能。目前文献仅报道了一些轴对称模型所产生的非对称流场(例如轴对称模型非零度攻角飞行时的流场。)的定量测量,对一般任意三维体所产生的流场的测定目前还未见到成功报道。(但显然并不存在原则上的困难。)由于三维问题的解决,显然又是流场显示技术进行了一步的标志。

由于全息术可以解决定量问题,66—73年间发展了一些把图象信息换算为物理数据的计算方法,亦即发展了全息图的计算研究。这些方法大体上有:付氏变换或拉氏变换为基础的方法、^[29]^[30]正交多项式展开的方法^[31],还有可以节省计算工作量的快速付氏变换的方法^[32]...等等。为了提供计算所必须的数据,必须在实验上加以配合,所采用的方法有:

(1)用漫射照明得到广角全息图:有人用平圆漫射器得到视角为 180° 的全息图²⁶,一张全息图就能提供三维流场计算所需要的全部数据。但是有人则认为这类办法得到的全息干涉图质量太差^[33],不适于定量分析。

(2)使模型绕风洞轴线转动,得到几张不同方位的全息图进行条纹计算^[34]。其计算方法在文献³⁴中有详细说明。

(3)用多方向全息干涉图法^[35],即用多路物光、一路参考光在一张全息图上记录多方向全息干涉图,再现时可以提供足够三维计算的数据。

3. 关于提高测量灵敏度的方法:大体有两个方面的工作:

(1)以有限条纹法为基础的方法:利用全息图的非线性效应,结合空间滤波发展了可以使条纹倍增的技术³⁶⁾³⁷⁾,文献所报道的原理性实验可使灵敏度增大至14倍。苏联Belozarov等人把这技术应用到低雷诺数($Re = 3.5 \times 10^3$)的风洞中^[38],可得到灵敏度增大4倍的效果,由于这个方法同时把误差也放大了,应用时受到限制,文献³⁸⁾认为4倍以上的灵敏度增加,噪声的放大已经到了不可用的程度。

(2)以无限条纹法为基础的方法:以前这类方法仅作定性用,但随着显微密度计技术的发展,也成了定量的方法。(前面提到的G.Smeets等的工作²⁰⁾,已经作到了定量的水平。)在全息技术中可用更简单的办法实现移相干涉,从而得到高灵敏度。我们在这方面做了一些工作:实验和分析。^[39]分析指出,移相最佳值在 π 附近而不是Smeets等人用的 $\frac{\pi}{2}$,即使用移相 $\frac{\pi}{2}$ 的办法,全息相技术也比Smeets工作的灵敏度高一倍,而且容易获得全场一致的灵敏度,而移相值在 π 附近时灵敏度更较之高5—6倍以上。

4. 电子全息技术:

除前面提到的用光敏元件和示波器显示图象信号等技术外,下面介绍一下基于电视滤波技术的电子散斑干涉仪(ESPI)的发展,七〇年代初,英国Loughborough大学的Butters和Leendertz等人研制成功ESPI,应用电视滤波技术,废除了全息干板的使用,直接在电视屏幕上得到干涉图形,因而测量过程可缩短到 $\frac{1}{25}$ 秒内完成,得到工业界、技术界的极大好评。后来发展成全息干涉仪,应用也从无损检验扩展到其他测量领域,其中也包括流场显示。目前英国、西德有定型产品出售。西德的HT-10型全息电子干涉仪可以完成全息照相二次曝光、实时法、时间平均法等功能,因为无须处理全息干板大大提高了测量效率,同时还便于与电子计算机联接,直接进行数据处理。

5. 数据处理的自动化问题:

流场密度场的计算要花费大量劳动,所以数据自动化处理技术是一个不容置疑的方向。国外很多实验室已经实现了数据自动化,大体的方法是:用光电扫描仪从全息图中读出流场信息,通过软件输入计算机进行处理。这种扫描仪有时称为扫描数字显微密度计。例如据文献报道^[33]:密度计能把密度分成256个等级,用专用的析象管把图面分成 1000×1000 个点阵进行记录,一张 4×5 吋²的底板仅需1—2分钟就可扫描完毕并记录于磁带上,再输入计算机进行处理。

6. 关于粒子流动场的显示测量

例如在风洞中模拟粒子云的气动实验,不但要对流场进行研究,而且还要观察流场中粒子的分布情况。在爆炸、等离子体、火箭燃烧室内的燃烧、引擎排气、大气研究、化学过程等现象的研究中,观测粒子已成为重要的需要。粒子测量已经在原子核反应、化学工程、火箭工程、发动机工程、天文学、环境污染研究等众多领域中发挥了作用。由于全息照相的三维特性,使得这个技术大大优于其他经典方法。早在1965年,就有人用它来观察计量粒子^[41],直到今天,还不断有所发展,例如Royer^[42]用双曝光全息术测量高速粒子的分布和速度。这技术的分辨率已在 10μ 以上,数据处理工作繁重,大多采用了自动化装置。

7. 其他流场显示问题:

以上讨论以风洞测量为主要代表,其原则可以推广应用到其他流场的显示中去,下面只谈几个特殊例子:

a. 燃烧、火焰和等离子体的研究:这是一些自身发光的研究对象,过去的光学方法对这类问题的处理由于缺乏强度足够的单色光颇感困难。由于全息照相采用了相干光源,并且有了高强度的激光,于是加上滤光片就容易克服这些困难,从而得到很大的应用。目前已达可定量测量的水平。表征等离子体电离程度的电子数密度也可由全息方法测出。

b. 旋转机械中的流场:例如燃汽轮机、涡轮叶片间的流动,用全息技术可获成功的显示。古典光学方法对之则比较困难。

c. 在水动力学上的应用:水一般认为是不可压缩流体,一般光学方法不能应用,但近年来有少量这方面的文献,例如Witte在分层静止的溶液中研究了潜艇模型开过后的

尾流^[25]，Achia在液体流动可视化研究中发展了一个实时全息—莫尔干涉仪^[43]，方法是在上游开设一条0.4mm宽的缝，向流场注入1.5%丙烯乙醇溶液，可以用干涉条纹方式观察到紊流现象的连续过程。

上面提到的几个方面，我国几乎全是空白，有关方面应该注意促进它的发展。

四、流场显示技中的高速摄影

把流场显示的资料用高速摄影方式记录下来，可以研究流场随时间变化的情况，是研究非定常流必不可少的手段，是捕捉高速过程的有效方法。每两年召开一次的国际高速摄影会议对流场显示方面相当重视，每届出版的论文集中都包括相当多流场显示方面的文章。（例如1970年在美召开的第九届会议中，流场显示方面的文章达22篇之多。）

本报告只介绍一下高速全息电影照相这个新领域的发展。这种工作分两方面：一种是全息图结合高速照相机实时拍摄法，一种是纯全息法。结合高速照相机的方法一般帧速较低，原因是全息照相再现效率低，损失很多光能，但是这种方法给出的是干涉图，和普通的高速照相有本质的区别。Raterink等用50mw氩氛激光作光源，用漂白全息图的办法增加再现效率，得到2000张/秒的火焰干涉电影照片，得到的资料可作定量分析^[44]。A.S.Dubovik（苏联）用红宝石激光作光源作实时法拍摄，总记录时间达0.6ms，帧速为 36×10^4 张/秒，时间分辨率达 3×10^{-6} 秒^[45]；在激光供能系统作了改进以后，总记录时可延至几个毫秒。纯全息法的基础是高重复频率窄脉冲激光技术的发展，一般帧速就决定于激光的重复频率。例如Lowe用旋转参考光的办法记录全息图，红宝石激光脉冲与转镜同步，一次可记录10张全息图，参考光间隔 9° ，光脉冲频率50K_{Hz}—200K_{Hz}^[46]。Gate等发展了一种重复Q开关脉冲组红宝石激光，频率20K_{Hz}，每次可得15张时间序列全息图，是用物光在全息干板上作圆周扫描得到的^[47]。此外，还有使全息干板高速转^[48]（2000转/秒）、利用声光偏转技术使光束旋转（帧速达80000张/秒）等方法来记录时间系列全息图。纯全息法还可以得到极高帧速，Novaro用空间延时线方法分光^[49]，一次可在一张干板上得到10张全息图，系统中没有运动部件，而帧速达3—4亿张/秒。

应该注意锁模激光器的发展，它能发出超高频的微微秒脉冲（ 10^{-12} 秒）系列，已经在生物、化学…等一系列领域中起了神奇的作用。可以预期，在流场显示领域中也会有重要的应用和发展。至少是，它给超高速全息记录提供了基础，例如Chabannes等利用它发展了一个帧速3亿张/秒的照相系统^[51]。这是个值得注意的领域，或许会给流场显示技术带来革命性的新内容。

高速全息电影照相是个极其重要的领域，目前发展尚不成熟，文献所见多是实验性和原理性的装置，尚有大量技术问题待解决和发展。

五、结 束 语

今后的科学发展需要流场显示技术提供更多、更精密的流场数据和流谱图象，从而建立更为精确的物理模型，结合电子计算机进行研究。

对于阴影、纹影、干涉等古典光学技术来说，虽然目前仍大量服务于各种技术领域，并由于结合激光得到一些新进展，（例如极短曝光时间的获得；光切面观察法^[18]使干涉仪的结构、调整大为简化……等等。）但终究未能使这些技术有根本性的变化。全息技术的发展则被公认有着革命性的意义，上述的古典光学技术最终可能会被全息或全息—空间滤波技术所代替。

从定测量来看，全息技术显然已在代替古老的 M—Z 干涉仪。从全息技术的三维性、时间差分干涉特性等方面来看，它显然优于其它方法。如果在精度等方面有进一步的发展，它还可能使风洞中的探头测量技术有被淘汰的趋势，目前也许正是这样的变革时期，应该引起有关方面极大的重视。美国阿诺德工程发展中心的 Trolinger 教授对这个问题的看法是：“在传统技术失效的领域中，应用全息照相的惊人巨大机会，正呈现在全息工作者和空气动力学工作者们的面前。”

“流场显示”是促进有关科学研究的重要手段，具有强大的生命力和发展前途。在现阶段，我国“流场显示”事业应如何开展，是值得探讨的问题。下面提出一些粗浅的看法供参考、讨论。

从比较先进的国家来看，“流场显示”已经形成一门应用广泛的独立的实验科学。例如美国密执安大学、冯卡门气动研究室、阿诺德工程发展中心，法国的德—法圣路易研究所等均设有相干光学研究实验室，研究光学显示和测量的理论和实验技术。为适应科研的飞跃发展，我国也应设立相应的研究组织，选择一两个研究所和高等院校为主，筹建有关研究实验室，与有关的科研课题密切配合，从发展“流场显示”学科出发，从事基本理论和实验技术的研究，为有关研究课题提供新的测量技术。还应考虑有专门机构组织推广应用，逐步实现测量技术的现代化。

在发展方向方面，我们建议充分重视具有革命性发展的全息技术和信息处理技术。这些技术的结合，很有可能取代以往的古典光学技术，是赶超的出发点。有关内容略叙如下：

1. 加强付氏光学的研究：要实现多种信息的取得，就得研究全息信息处理方法。付氏光学是信息处理的基础，它的发展已经给出很多令人鼓舞的成就，例如各种空间滤波技术，是值得注意的发展方向。

2. 重视三维流场的测量、解算工作：能够解决三维问题是全息技术的一项特点，但目前尚未完全解决，继续吸引着国际学者们的注意。如何从全息图获取足够的三维数据，是计算理论和实验方法相结合的问题，应该研究出对实验要求更简单、计算方法更简单、结果更准确的计算理论。

这并不排除付氏光学的反应，利用它可能设计出更简便的实验方法。

3.重视数据自动化处理的研究:它不单纯只是减轻科研人员的重复劳动的问题,它体现了高速推动有关科研发展和赶超的要求,具有极其深远的意义。

4.重视发展高速全息照相技术和全息机的研究,特别要重视微微秒光脉冲序列的应用研究。高速全息照相的发展,必将推动各种非定常现象的研究,例如湍流机理、进气道颤振、超高速粒子运动,激波与物体结构的作用,高温激波中的非平衡等等。

最后,我们希望上面这些粗糙的介绍,能够使关心这一技术的同志们有些帮助,并引起相应的注意,我们的目的就算达到了。

(本文编写时得到谈镐生、林同骥同志的关心和指导;徐朝仪、狄建华同志则为我们提供不少文献资料 and 具体帮助,在此表示衷心感谢。)

参 考 文 献

- [1] Werlé, H, *Annual Rev. of Fluid Mechanics*, 5 (1973), 361.
- [2] Goddard, V. P. et.al., *J. Aerosp. Sci.*, 26 (1959), 761.
- [3] Dewey, J. M., *Proc. Roy. Soc. S. A.*, 324 (1971), 275.
- [4] Schraub, F. A. et. al., *Aerosp Eng.*, 20 (1961), 24,74.
- [5] Clutter, D. W. et. al., *J. Basic Eng.*, 87 (1965), 429.
- [6] Klein, E. J., *Aeronaut. Astronaut.*, 6 (1968), 70.
- [7] 杨相皋,“液晶观察附面层转捩探索性实验小结”,701所内部报告(1977)。
- [8] Popovich, A. T. et. al., *Chem. Eng.Sci.*, 22 (1967), 21.
- [9] Dewey, J. M., *Proc. of 5th In. Cong. on Instr. in Aerosp. Simu. Faci.*, (1973), 119.
- [10] Kyser, J. B., *AIAA J.*, 2 (1964), 393.
- [11] Sebacher, D. I., *AIAA J.*, 4 (1966), 1858.
- [12] Horstmann, C. C., *AIAA J.*, 6 (1968) 2364.
- [13] Trolinger, J. D., *AGARD—AG—186* (1974) .
- [14] Royer, H., *Proc. 9th Cong on high—Speed Photography* (以后此论文集简称为H. S. P.) (1970), 410.
- [15] Bouyer, R. et. al., 3thH. S. P., 271.
- [16] Kraushuar, R., *J. O. S. A.*, 40 (1950), 480.
- [17] Francon, M., *Rev. Opt.* 31 (1952), 65—80.
- [18] 束继祖、刘方, (激光) 4. (1977.), P. 31.
- [19] 力学所十一室一组,“纹影仪的多用性”,航空学会学术报告(1965)。
- [20] Smeets, G. et.al., et 10th H. S. P., (1972) 244.
- [21] Smeets, G. et. al., *Proc. 9th Int. Shock—Tube Symp.* (1973) .
- [22] Schall, R., 11th H. S. P. (1974) .
- [23] 韩昌元,光学机械 4 (1976)
- [24] Helflinger, L. O. et.al., *J. A. P.* 37, 2 (1966), 642.

- [25] Witte, A. B., *Proc. Eng. Appl. of Hologra. Symp*, (1972) 220
- [26] Trolinger, J. D., *AEDC—TR—70—44* (1970) .
- [27] Havener, A. G. et. al., *Opt.—Electron*, 4, 4 (1972) .
- [28] Bramson, N., *App. Opt.* 13, 9 (1974) 2019.
- [29] Rowley, D. D., *J. Opt. S. A.*, 59, 1 (1969) 1496.
- [30] Junginger, H. G. et. al., *Opt. Commu.*, 5, 1 (1972) 1.
- [31] Maldonado, C., et. al., *J. O. S. A.*, 56, (1966) 1305.
- [32] Jones, H. W., *AD 781396* (1974) .
- [33] Strike, W. T. et. al., *AD—A007689*.
- [34] Zien, T. F. et.al., *Nol TR 74—96, AD—A009753* (1974) .
- [35] Sweeney, D. W. et. al., *Proc. Eng. Appl. Holo. Symp*, (1972) 237.
- [36] Bryngdahl, O. et al., *J. O. S. A.*, 58 (1968) 141.
- [37] Matsumato, K. et. al., *J. O. S. A.*, 60 (1970) 30.
- [38] Belozarov, A. F. et.al., 11th *H. S. P.* (1974) .
- [39] 李华煜、徐朝仪等,“论全息移相技术显示弱流场的能力”,将在《力学学报》发表。
- [40] Butters, J. N., *Opt. & Las. Tech.*, 9, 3 (1977) 117.
- [41] Thompson, B. J. et.al., *J. O. S. A.*, 55, (1965) 1566.
- [42] Royer, H., 11th *H. S. P.* (1974) .
- [43] Achia, B.U., *App. Opt.*, 11, 4 (1972) 953.
- [44] Raterink, H. J. et.al., 9th *H. S. P.*, 31—37.
- [45] Dubovik, A. S. et.al., 11th *H. S. P.*.
- [46] Lowe, M. A., 9th *H. S. P.*, (1970) 25.
- [47] Gate, J. W. C. et al., 9th *H. S. P.* (1970) 4 .
- [48] Smigielski, P. et. al., 9th *H. S. P.*, (1970) 321
- [49] Feldman, M., 9th *H. S. P.*, (1970) 16.
- [50] Novaro, M., 10th *H. S. P.*, (1972) 205.
- [51] Chabannes, F. et. al., 9th *H. S. P.* (1970) 69.