

全国第二届气动实验非接触测量
学术交流会议论文集

1984年10月

杭 州

全国第二届气动实验非接触测量学术交流会报告B册目录

编号	作 者	题 目
B01	束继祖	流动显示技术发展近况
B02	谭显祥	超高速相机底片系统的光度性能
B03	徐友仁(2人)	透明基片上小液滴表面形状和接触角测量的光学方法
B04	孙启明(2人)	差分干涉定量测量在风洞实验中的应用
B05	汪永江(5人)	氯化亚铜激光器用作高分辨率、无快门高速摄影
B06	黄 福	高速扫描阴影技术
B07	冯天植(2人)	风洞彩色纹影技术研究(II)
B08	彭延玉	弹道靶炮口附近速度测量和照相同步技术
B09	马家骧(3人)	一种简易的正交立体光路
B10	马宗魁(5人)	近景立体摄影测量在气动实验中的应用
B11	孙启明(2人)	FY-400型阴影仪定位精度的分析
B12	严帆昌(2人)	彩色纹影初步研究
B13	王惠华	四喷管底部流动纹影实验
B14	杨祖清	高超音速试验设备中的高速摄影术
B15	倪 刚	505—I纹影干涉仪
B16	刘元文	用单向放大法显示边界层转换
B17	李桂春	新型多功能流场显示照相记录仪

编号	作 者	题 目
B18	梁金寿(4人)	利用 F—P 扫描干涉仪测量电弧射流中发光粒子的速度
B19	陈瑞祎(3人)	发动机气缸中气体流动的高速摄影记录
B20	陈 瑞 祎	变密滤波片纹影技术探讨
B21	史新昌	彩色纹影技术在二元翼型实验中的应用
B22	付凤霞	在侵彻力学中高速摄影图象数据处理方法和讨论的几个问题
B23	陈旭龙	∅ 500 大型彩色纹影仪
B24	罗明辉	Modrs 法在水槽中应用初探
B25	牛广有	多次闪光纹影摄影

流动显示技术发展近况

(从第三届国际流动显示会议谈起)

束 继 祖

中国科学院力学研究所

一、概况

自1977年以来,国际流动显示会议已经召开了三届。第一届是于1977年10月12日—14日,在日本东京大学召开。大会主席为Asanuma教授。到会的有美国,西德,法国,加拿大,印度,新西兰和日本。收集到的文献一共五十篇,日本25篇,占50%,其次为美国9篇。西德7篇。

第二届国际流动显示会议是于1980年9月9日—12日,在西德的鲁尔大学召开的。大会主席为Merzkirch教授,有17个国家参加,比上一届多出十个。论文集中收集了116篇论文。其中西德26篇,日本25篇,美国20篇,法国14篇,加拿大6篇,英国5篇,中国有3篇文章。

第三届会议是于1983年9月6日—9日在美国密执安大学召开。大会主席为美籍华人杨文楷教授。收集到来自17个国家的150余篇论文,其中美国60篇,日本24篇,法国18篇,西德16篇,加拿大10篇,中国5篇,英国3篇,苏联、新加坡、意大利各二篇。

B13 B14 B22

到会注册登记的代表共222人,美国116人,日本35人,西德19人,加拿大18人,法国17人,意大利4人,中国2人,英国2人,捷克2人,埃及2人,以色列、新加坡、波兰和新西兰各1人。苏联有两篇文章,但没有派人出席会议。实际到会人数超过这个数字。一方面是因为在本届会议期间,安排了一个为期一天的学习班。会议名义上是四天,其实把所有的报告全部安排在前三天中。第四天作为学习班用。学习班的内容为光学显示方法,由Merzkirch教授和Vest教授主讲。上午由Merzkirch教授讲古典的光学方法,下午由Vest教授讲全息方法。凡参加学习班的人每人交学费150美元。

第三届国际流动显示会议的论文分应用与方法两大类。在应用方面分以下专题:

生物医学	11篇	大气和海洋	3篇
涡和尾迹	15篇	分离流	12篇
流交流	5篇	超声速流	5篇
传热	8篇	射流	5篇
流动机械	5篇	激波	3篇
船舶与波浪	4篇	燃烧	10篇
气动力学	4篇	管流	4篇
表面流动	4篇	特殊问题	6篇
边界层	3篇	其他	4篇
分层流	3篇		

在方法方面分以下专题：

示踪法	5 篇	片光法	4 篇
干涉法	6 篇	烟技术	3 篇
化学反应法	5 篇	图象处理	12 篇
计算机产生流动显示图	7 篇		

从这 150 余篇论文来看，基本只反映了流动显示近年来在科学研究和工程技术发展中的应用及水平。更重要的是使我们看到了，计算机与流动显示相结合，将出现一个新的浪潮，把流动显示这门技术推向一个新的高度。

流动显示这门技术所涉及到的学科范围极其广泛。包括机械、力学、物理、化学、数学、电子学、光学、计算机技术……等等。流动显示技术的发展总是与他们密切相关的。反过来流动显示又推动了科学在这些领域中的发展。这就是流动显示在科学研究和工程技术中的作用和反作用。就拿近十多年来说，60年代中期，由于激光的普遍应用，推动了全息术的发展，在流动显示中就出现了全息热潮，这个热潮一直延续到70年代。从70年代中直到现在，由于微型计算机的飞跃发展，微机的功能不断完善，以及彩色图象技术在微机上的实现，大大地推动了图象处理技术，以致用计算机直接产生流动显示图的技术。这门划时代的技术，在本届会议中得到了充分地反映，专门的论文就有19篇之多。在应用方面的论文中，采用微机处理图象和

数据的也占有相当的数量。

流场显示已被广泛用来作为了解事物的第一步手段，它具有提供全场流动信息的特点。因而，无论在科学上还是在工业上都具有很大的吸引力。在国际上已经形成了一支强大的队伍。国外有些大学已把流动显示作为一门课来讲授。经常举行短期学习班，为工厂企业部门培训专门人才。美国Bershafer, vest, 杨文楷和西德Merzkirch教授，组成了一个国际性的讲学团，以流动显示为主题。1982年8月他们在美国密执安大学举行过一次学习班，历时三天。

流动显示技术发展到今天已有100年的历史了，从现在的角度来看，可以把流动显示分为以下三个发展阶段：

第一个阶段：即用照相的方法来记录和处理图象的方法。这里包括着所有常规显示方法，如向流场中注入示踪物质，注入能量，光学显示方法，全息术等。它们都是用银盐记录图象。

第二个阶段：用微机对图象进行数字化处理。近10年来微机和图象技术迅速发展，使流动显示技术，特别是在图象数据处理方面，带来了革命性的进展。

第三个阶段：用计算机直接产生（彩色）流动显示图象。这是紧跟着第二个阶段发展起来的。常规的流动显示方法，总是设法从图象中获取定量的结果，而目前这个方法正好是一个逆过程——从数据中产生显示图象。

常规的显示方法已被普遍地应用在科学研究, 工程技术、产品改进等方面。流动显示与计算机, 特别是与微机的结合, 不但加速了对问题的分析, 而且提供了更深入的分析结果。全息干涉术与计算机层析法相结合, 基本上解决了三维非对称场的定量计算。

下面就几个具有代表性的问题, 作个简要的介绍。

三 介绍几种显示方法

1. 片光照明显示方法 (light-Sheet):

法国国家气动研究院 (ONERA) 的 Veret 博士, 应邀在会上作了“片光显示方法”的专题报告。他带去了一部电影, 在整个报告中他没有说多少话, 用电影片向到会者介绍了全部工作, 十分生动直观, 效果非常好。

实验的布局如幻灯片 1 所示。激光器架在风洞实验段的上面。全反棱镜、玻璃棒安装在可移动的小车上, 移动小车可改变照明截面。玻璃棒可绕垂直轴旋转, 以得到任意方向上的照明。所用的激光器有两种, 一为输出功率为 4 W 的 Ar^+ 激光器, 另一为倍频的 YAG 激光器, 光脉冲宽度为 10 ns, 重复频率为 10 次/秒。

幻灯片 2: 三角翼机模型下流某个横截面上的旋涡。

幻灯片 3: 不同截面上涡的组合图, 显示了涡的发展过程, 并可看到涡流轴线的发展。

用连续输出的 Ar^+ 激光器照明。曝光时间为 $1/100$ 秒, 涡流中的湍流脉动由于时间分辨率 (曝光时间) 不够而被抹平了。用毫微秒级的曝光可清楚地显示出湍流脉动。

幻灯片4：用倍频YAG激光器、显示出的三角形平板下流的涡，旋涡内的湍流脉动可见。如果把这张图经过数字图象处理，再由计算机画出来，湍流脉动将显得更清楚。

特别要指出的是：片光照明与烟雾结合的显示方法，可获得十分清楚的湍流图象。采用片光层析法可对三维流场进行分析。

幻灯片5：表示了用电光照明与烟雾结合研究湍流边界层的例子。图(a)为纵向截面，突然加入一个顺压梯度时的变化情况。图(b)和(c)分别在在b和c处横截面上的流动情况。

这种片光层析法，已被美国Stanford大学用来定量分析三维流场。他们作了个很意思的工作。用片光垂直于主流方向照明绕圆柱流动的尾流。注入烟作为示踪散射粒子，烟粒子足够的小，认为它的运动速度完全代表着流动速度。用高速照相机记录下流场中烟粒子散射的光强，它代表着这个截面上的流动，用扫描显微密度计对图象进行数字化处理。再由计算机把这些数字数据加工成显示信息。为了获得的信息量，必须对整个流场进行这样的层析。用摄影的方法，把整个空间得空间信息转变成360个二维投影图象，显示在荧光屏上(CRT)，并且记录在35mm的胶片上。把这360个图象制作成彩虹全息图，用白光再现，旋转全息图，再现在眼前的是一幅活生生的三维流动，不但是三维空间 X 、 Y 、 Z 的函数，而且是时间的函数，四维空间(X 、 Y 、 Z 、 t)场的再现了出来。在大会上进行了演示。

2点—线辉光放电显示

可以说是在片光技术的启发之下，发展出一种称之为点—线辉光

放电显示技术。日本 Kobe 大学的 Kinura 和 Nishio 向大会提供了题为：“用点—线电极放电技术显示激波”的论文。放电所形成的辉光是个平面，和片光技术一样，可以得到不同纵向或横向截面上的流动图案，也可用来对三维流场进行层析。

幻灯片 6：尖楔模型纵向激波的形状和位置，它和一般光学显示方法（阴影，纹影）所得到的图象一样。

幻灯片 7：为上述模型横截面上的激波形状。这是一般光学显示方法无法办到的。

对于有限宽度的平板来说，由于边缘效应的影响，流动不是二维的。

幻灯片 8：所显示的图象，充分地说明了这个问题。平板横截面上的激波产生了弯曲。可以用这种方法研究边缘效应。

3. 用多普勒图象 (Doppler - Picture) 显示速度场

德—法圣路易研究所，是从事高超音速研究相当保密的研究单位。该所所长 H. Oertel 教授，不但是气动学专家，而善长光学显示测量技术，在他手下形成了一批光学显示测量方面的专家。如大家所知道的，发展激光差分干涉仪的 Sueets 和 George。

Oertel 和 Seiler 向本届大会提交的论文题为：“用多普勒图象显示速度场”。但很可惜这两位都没有到会。问题的出发点是由于通常的多普勒测速仪，受到频率计的限制。很难实现高速测量，而提出了多普勒图象的方法。

为了得到多普勒图景, 采用了一个不等臂长特殊的迈克逊干涉仪, 如幻灯片 9 所示。其目的是把散射光的频率变化转换成相位差, 这个相位差由干涉图中的条纹飘移量给出。

在幻灯片 9 中, 一束薄激光片切入流场。流场中必须有足够数量的细小的示踪粒子, 以获得足够强度的散射光。把测量面上的散射光收集进入迈克逊干涉仪, 它是由分束器 T, 两块反射镜 S_1 和 S_2 , 和一块玻璃块 G 组成。从物面 Σ 来的散射光通过透镜 L_1 , 由分束器 T 分成两束光, 被 L_1 分别聚焦在 S_1 和 S_2 上。再通过 L_2 把物面 Σ 在 S_1 和 S_2 上的象转换到象平面 Σ' 上。臂长 ℓ_1 和 ℓ_2 必须满足下式:

$$\ell_2 - \ell_1 = \frac{n-1}{n} \ell \quad (1)$$

n 为玻璃块 G 的折射率。

在象平面 Σ' 上, 而光束的光程差为:

$$\Delta\Phi = 2 \frac{n^2 - 1}{n} \ell \quad (2)$$

象平面上光强 B 与相位的关系为:

$$B = B_0 \cos^2 \left(\frac{\Delta\Phi}{2} \right) \quad (3)$$

相位可写成:

$$\frac{\Delta\Phi}{2\pi} = \frac{\Delta\Phi}{\lambda} = v \frac{\Delta\Phi}{c} \quad (4)$$

微分 (4) 式得:

$$d \left(\frac{\Delta\Phi}{2\pi} \right) = \frac{\Delta\Phi}{\lambda} \frac{dv}{v} \quad (5)$$

这就建立起了频率与相位的关系式。从(5)式中可以看到,若要把微小的频率变化变成可见的相位变化, $\Delta\Phi$ 越大越好,也就是说,干涉仪两臂之间的光程差越大灵敏度也就越高。

相位变化在干涉图中以相对条纹变化量 $\frac{\Delta S}{S}$ 给出, (5)式可改写成:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta\Phi}{\lambda} \frac{d v}{v} = \frac{\Delta\Phi}{\lambda} \frac{v - v_0}{v_0}$$

和一般多普勒测速仪一样,最终的速度由下列公式给出,

$$\frac{v}{c} = \left(\frac{\lambda}{\Delta\Phi} \frac{\Delta S}{S} \right) \cdot \frac{1}{\cos r_1 + \cos r_2}$$

c 为光速, r_1 为流向与光的方向之间的夹角; r_2 为流向与观察(或测量)方向之间的夹角。

幻灯片 10: 为两个同心的 CO_2 射流的多普勒图。光源为 1 W 输出功率的 Ar^+ 激光器。根据条纹飘移量,计算出外环射流与内部的核心射流之间的速度差 $\Delta u = 220$ 米/秒。

幻灯片 11: 为两个超音速射流的例子。上图总压 $P_0 = 8$ 巴, 出口压力 $P_e = 1$ 巴, 计算速度为 521 米/秒, 从多普勒图中测得的速度为 506 米/秒。下图总压 $P_0 = 5$ 巴, 出口压力 $P_e = 0.64$ 巴, 计算速度为 474 米/秒, 从多普勒图中测得的速度为 458 米/秒, 理论与测量值相差 3%。

4. 全息散斑干涉测量湍流场速度分布

全息散斑干涉最早是应用在测量固体表面位移。其原理为: 用全

息照相的方法，记录下变形前与变形后物体表面上相应点上的散斑图，在记录平面上形成散斑对。在再现过程中，应用杨氏干涉的原理，定出散斑对之间的位移量和方向。在流体力学中是同样的方法，记录下不定时间上，流体中示踪粒子上散射光，从而建立起散斑对。通过再现定出位移量和位移方向。当地的速度就等于位移除两次曝光的间隔时间。

这个方法的优点是一次可获得全场的信息，借助微型计算机处理数据，可获得湍流相关等流动参数。被认为是显示研究湍流现象最好的方法。西德鲁尔大学热力学与气动力学研究所，从1982年开始了这项研究工作。

三、图象处理 (Image Processing):

近十多年来由于微型计算机的飞跃发展，使图象处理技术达到了空前的水平，在科学研究，生物医学、工程设计起着十分重要的作用。从本届会议的论文中，已充分反映了这个新起的浪潮。图象处理技术与流动显示技术的结合越来越紧密，在前面的介绍中已能看到这点，不但加速了对流谱的分析，而且给分析提供了更精细的信息。用计算机层析法 (Computer Tomography)，基本上解决了三维非对称流场的定量计算。

通常的图象处理过程如下：

1. 对所研究的流场摄取显示图象：

2. 将图象信息转换成能供数字转换器运转的电信号;

3. 数字图象转换器对象素进行数字化处理;

4. 通过计算机和特定的软件, 获得所需要的物理量。

其工作原理如幻灯片 12 所示 (或图 1)。

幻灯片 13: 为片光一烟显示的平板湍流边界层流动。

幻灯片 14: 为上图经过数字图象处理后的图象, 把流动结构显示更加清楚了。

四 计算机产生 (彩色) 流场显示图象 (Computer Generated Graphics):

用计算机产生 (彩色) 流场显示图的方法, 如前所述, 它是常规流场显示方法的逆过程。即: 从计算数据中, 通过 (彩色) 图象技术得到标志着某个物理量特征的流场显示图象。输入到计算机里的信号数据, 可以是实验数据, 也可以是理想分析计算。采用把实验数据与理论分析计算相结合的方法, 可获得更加精确的流谱。

传统的流动显示在准备和进行实验上, 要花费很多的时间, 而只能涉及到流场的一个局部, 和整个过程的有限瞬间, 不能充分地显示出流动的全貌, 给图象解释带来了一定的困难。相比之下, 用计算机进行流场实验, 可直接得到任意截面, 任意方向上的流谱图象, 以及需要的任何流动参数的图象。

通过实验测量数据, 用计算机作出流动显示的典型例子。算是美

国 Maryland 大学 A·E·Winkelmann 的工作。请看幻灯片 15 和 16。

我们把美国空军莱特航空实验室飞行力学室 G·Hasen 和 J·Graham 向大会提交的论文：“计算机产生 Navier-Stokes 流动解的图象显示”，作为计算机采用理论解析数据作出的流谱显示图的例子。幻灯片 17。中这两张图是计算机根据，轴对称超声速射流的 Navier-Stokes 解，划出来的流动显示图。左图为马赫线图，我们称之为 Hard Copy。右图为流场的彩色显示图，用不同的颜色表示不同的马赫数，这张图十分类似于一般地光学显示图，称之为 Soft Copy。如果这样的一个问题，用实验来获得这些数据，从设备的建立，实验处理结果，所需要的时间可想而知要长得多。而这样的一个问题在很短的期间里，用计算机实现了。

随着计算机和计算技术的发展，可展望计算机产生彩色流动显示图的技术，将在各种流动机械，飞行器，船舶，汽车，热交换器，化工流程等的研究设计上起着重要的作用。

三 三维非对称流场的计算

三维流场的计算主要是数学问题，其实质在于如何解下面这个方程。

$$D(x, y) = \frac{K}{\lambda} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} [\rho(x, y, z) - \rho_0] dz$$

$D(x, y)$ 是我们获得的数据场，如干涉图，是二维（平面）函数，而

密度场 $\rho(x, y, z)$ 是三维(空间)分布函数, 首先的一个问题是, 如何从已知的二维数据函数求得三维空间分布的物理量。第二个问题是积分量是沿光路轨迹的线积分, 必须知道光在实验场中的轨迹。因而这个积分中有两个未知数。

光在折射率非均匀场中的传播轨迹不是直线, 其折射情况决定于 $\rho(x, y, z)$ 的变化。但对很多气动实验来说, 由于光线偏离直线传播的位置不大, 允许假设光在实验段中不产生折射, 而按原来的方向直线传播, 问题得到了简化。当然这是与事实不符的, 特别是在强折射场(如边界层、驻点压力较高的滞止区等)中, 这个假设就不成立了。

对于轴对称场来说, 上缘积分可以用 Abel 反演求解, 或是按照 Shardin 提出的数字求解法求解, 即把问题简化到 $x = \text{常数}$ 的平面上来考虑, 并把这个平面上的流场分割成 N 个同心环, 假设每个环中的密度为常数, 经过坐标转换后, 问题变得只有一个未知数, 只需要一张干涉图就满足了计算条件。

对于三维非对称流场来说, 同样存在上述两种求解的方法。在光穿过实验场时不产生折射的假设下, 问题同样可以在 $x = \text{常数}$ 的一个平面中考虑(图 2)。把物场分割成 N 个单元, 假定每个单元中的折射率为常数, 即第 K 单元中的密度为 ρ_K 。平行于 S 轴穿过实验场的一条光线(n_i)所带有的信息量为它穿过 v 个这样的小单元中的密度

值之和 $\sum_1^V \rho_v$ ，这个量由条纹函数 $D(\eta_i)$ 给出

$$D(\eta_i) = K \sum_1 \left(\rho_v - \rho_0 \right) \zeta_v$$

ζ_v 为第 v 个小单元中，光线的轨迹长度。

流场被分割成 N 个小单元，有 N 个未知数，需要建立起 N 个这样的方程，问题才能求解。显然，一张干涉图所提供的信息量是不够的。对于一个任意三维密度场来说，需要 180° 视角范围上的测量数据。如果物场具有某种对称性的话，测量方位随着对称性的完整而减少。这是因为某些小单元中的密度和形状是相等的。在轴对称的情况中，减少到只剩一个方向上的测量数据。为此，轴对称流场是这个问题中的一个特殊情况。

下面简单地介绍一下，计算机层析法 (Computer Tomography) 的概念，及其在干涉计量中的应用。

前面已经提到，干涉图中所表征的信息量是沿光路轨迹上的线积分。计算机层析法是求解这个线积分方程有效的手段。Tomography 的数学概念，最早出现在 1916 年出版的 Radon 数学解析这本书中。1956 年 Bracewell 把它用于无线电天文学中。60 年代中期，Cormach 和 Hounsfield 把它应用于医学成像，为此获得了诺贝尔奖金。

用 Computer Tomography 对三维密度场进行计算，其实质是对三维场进行一个剖面一个剖面地层析计算。在轴对称场中，应用的是