

中国力学学会

第二届全国流动显示

学术会议论文集

1986年 10月·黄山

中国力学学会

第二届全国流动显示

学术会议论文集



1986年 10月·黄山

编者的话

流动显示作为一种实验方法,虽然已有一百余年的历史,但是近些年来随着科研生产的突飞猛进,流动显示技术也有了新的发展,已被广泛地应用于许多科研生产领域。

在国际上,为了加强学术交流,自1977年起每隔三年召开一届国际流动显示学术会议。今年召开了第四届学术会议。我国自1982年4月在厦门召开了全国第一届流动显示学术会议以来至今已四年了,今年十月在黄山召开第二届学术会议。在这四年期间,流动显示已在我国科学研究和生产领域中得到了广泛的应用和发展并结出了丰硕的果实。

在此,我们将来自国内一些有关单位的论文汇集在一起,编印成册,供参加会议的国内科学工作者们交流讨论,共同提高以促进流动显示工作的发展。当然值得提出的是,由于我们对国内情况了解不够,这些论文不足以代表国内水平的全貌,尚有许多优秀论文未能收入本论文集。另外由于时间的仓促,本论文集中大部分文章未经本人校阅,难免有不少错误,请读者原谅。

本论文集收入的论文近50篇。其中显示技术包括:烟线法、油流法、电解法、光学方法、激光全息照象、彩液法、粒子示踪法以及数学图象处理等方法。从研究内容看包括物体绕流、分离流、旋涡流、分层流、渗流、湍流、两相流、非牛顿流、及显示技术在工程流体及其他方面的应用。

中国力学学会

第二届流动显示学术会议筹备组

连其祥 罗明晖 张伯寅

鄂学全 魏庆鼎 吴 烽

一九八六年十月二十七日

1	流动显示技术及其现代发展概况	束继祖	1
2	煤油/烟黑/胶纸粘贴油显示技术及其应用	邓学莹 刘志忠	16
3	油流技术显示激波风洞试验流场中不同 凸起物诱起的流动图谱	杨祖清	22
4	烟丝——光脉冲装置显示漩涡初探	闻庆东	28
5	烟线方法在流动显示中的应用 ——两个并列圆柱双稳态现象的研究	孙 仁 魏庆鼎	32
6	萤光微丝技术在探索空间涡特性方面的一些应用	汪子兴	37
7	并列双矩形柱偏斜流动显示	林胜天 张伯寅 孙天凤	43
8	具有自由液面圆柱绕流的实验研究	张俾俊	56
9	多柱绕流中旋涡运动的流动显示	李晨兴 颜大椿	59
10	二维平板起动涡的一些观测	黄 政 连其祥	65
11	绕方柱非定常三维紊流流动显示	彭廷玉 王九瑞 呼和敖德	71
12	柱体端部绕流的流动显示	朱新桂 段 渠	77
13	三维边界层分离区的实验研究	周建和 张金钟	83
14	振动水翼尾流中的旋涡结构	徐伯勋 党 杰 陈娟芳	91
15	钝头体的头部流动特征显示	陈娟芳 徐伯勋 徐 洁	97
16	细长体大迎角流动的显示和分析	夏雪瀚	102
17	并列双柱双稳态特性	呼和敖德 林胜天 张伯寅 孔天凤	106
18	用空气隙错位干涉仪测高温梯度场	靳 刚 夏生杰 雀德华	113
19	用于流场断层显示的激光片光源	夏生杰 靳 刚 雀德华	117
20	激光蒸汽屏技术在FD-08亚跨音速风洞中的应用	吴志贤 李 聪	120
21	FD-06风洞激头—蒸汽屏实验技术研究	洪金林	129
22	光—电转换数字记录激光干涉仪	胡金铭 解京昌 束继祖	137
23	双波长激光干涉诊断等离子体密度分布的若干问题	曹尔妍 张 勇	140
24	风扇绕流的可视化及流场特性研究	蒋旭平	143
25	多功能实时光学流场显示仪	倪 刚	146
26	用聚焦阴影法显示高超音速模型边介层	刘文元	150
27	口径为80毫米的小型台式纹影仪	李桂春	153
28	全息干涉术显示自然对流温度场	胡金铭 邓素卿 束继祖	157
29	显示模型有攻角变化的流场的全息干涉技术	吴兴源	161
30	密度分层流体中湍流及内波流谱显示法	鄂学全	167
31	分层流体中尾涡和内波实验研究	张蝶丽	178
32	粒子示踪法测量湍流结构	柳 琦 年	178
33	静水槽孤立波实验研究	吴 烽 林多敏 杨月桂	184
34	一种非定常流动的显示测量方法, 条件采样和平均技术 以及在人工湍流斑实验研究中的应用	申功灼	191
35	渗流的微观模拟技术及其在三次采油中的应用	黄延章 周娟 田根林 张 健	200
36	循环气幕的流态诊断	李强民	205
37	两相射流的流场显示	郑之初	210

38	离心泵内部流态的显示和研究.....	钟声玉	蒋旭平	215
39	流动显示技术在新型纺纱研究中的应用.....	张道生	汪云明	220
40	氢气泡技术显示高聚物稀溶液减阻流场.....	吴玉刚	廖其莫	224
41	氢气泡示踪图象的计算分析.....	国澄明	周建和	227
42	氢气泡示踪法图片处理系统.....	杨兆选	国澄明	234
43	4米×3米低速风洞流场压力彩色图象显示技术.....	邵传和	陈 锋	238
44	数字图象技术在二维流体速度场测量中的应用.....	许宏庆	柯京龙	244
45	动态机翼尾流场的流动显示实验研究.....	李积德	田小杰	252
46	三维空间形体在二维空间上的图象显示.....		刘文彦	263
47	四圆柱绕流的流动显示.....	客进友	冯 桐	270
48	计算机形成彩色图象流动显示技术.....		李秉录	276

流动显示技术及其现代发展概况

束 继 祖

中国科学院力学研究所

一、历史的回顾:

流动显示作为一门实验技术已经有100年的历史了。它是建立在“百闻不如一见”的信念上发展起来的。人类在探求世界奥秘的科学研究中,首要的问题是客观的存在和如何揭示事物发展的规律,建立起正确的物理模型。作为流体力学的研究,就是要弄清楚各种流动的物理特性。存在于透明介质(空气和水)中的流动现象,通常用肉眼是看不到的,如果把流动现象显示出来,是流动显示技术的任务。

流动显示应用的领域主要在科学研究和工程技术发展两个方面。在科学研究中,流动显示的作用是提供正确的流谱,建立起正确的物理模型,为研究课题提供实验依据。例如,1883年O. Reynolds [1]用染料注入一条长的水平管道中的水流中,观察到了由层流转到湍流的现象,提出了相似定律和雷诺数的概念。1904年L. Prandtl用微小粒子作示踪物质,获得了一张沿平板的流谱图,提出了边界层的概念。1888年E. Mach用纹影仪摄取了第一张子弹在空气中的超声速飞行的流谱照片,揭示了激波现象。1892年, E. Mach的儿子L. Mach建立起了后人称之为Mach-Zehnden干涉仪[2],开始了应用光学干涉计量定量地研究激波现象。干涉术用于流场显示,研究气动现象,应该归功于E. Mach和J. Von Weizsäcker [3],早在1878年他采用一种称之为Jamin (1856年建成)的平晶干涉仪研究由电火花产生的激波现象。

在工程技术发展方面,流动显示技术主要是为产品的合理化,高效率、低能耗,安全运行等方面提供合理的设计和改造数据和量数。特别是对航空飞行器的流动分析上起着重要的作用。典型的应用例子有:飞机翼型和控制面及其颤振,旋转压缩机中气流的分离,气蚀现象,燃烧室中的燃烧过程,热交换器的传热传质性能,心血管的流动特性,激波的传播,等离子体的浓度与温度分布等等。

流动显示对科学和工业生产的进步起着重要的推动作用。已形成一支强大的队伍,服务于科学研究和工业发展上。由日本T. Asanuma教授倡导的第一届国际流动显示会议,1977年10月12—14日在东京大学召开以来,每三年一届的国际会议盛况一届胜于一届。第一届会议的参加国只有七个,它们是:美国、联邦德国、法国、加拿大、印度、新西兰和日本,共收集论文五十篇。日本有25篇,占50%。其次为美国有9篇,联邦德国7篇。

第二届会议是于1980年9月9—12日在联邦德国的普尔大学召开。大会主席为W. Merzkirch教授。参加国有17个,收集的论文116篇,其中联邦德国占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3篇。

第三届会议是于1983年9月6—9日在美国密执安大学召开。大会主席为物文(W. J. Yang)教授,收集了由17个国家提供的共150篇论文。其中美国占60篇,日本24篇,法国18篇,联邦德国16篇,加拿大10篇,中国5篇,英国3篇,苏联、新加坡、意大利各占2篇。

第四届会议是于今年(1986年)8月26—29日在法国巴黎召开的,大会主席是C. Veret博士,共收集了来自19个国家的161篇论文。其中日本占34篇居首位,法国29篇,美国27篇,联邦德国25篇,中国14篇列第五位。

历届。特别是自第二届国际流动显示会议之后的论文，基本上反映了流动显示技术的发展，以及在科学研究和工程技术发展应用中水平。本文以历届国际流动显示会议的资料和或个人收集到的文献为背景材料，谈谈我个人的看法，作为抛砖引玉。由于水平有限谬误难免，只供参考，欢迎批评。

二、流动显示的基本原理

流动显示是将存在于透明流体介质中的流动现象显示出来变得可见，为此人有称之为可视化技术。光是显示（可视化）技术的基础。首先我们要讨论光波与流体流动之间的相互作用。一束光射入流场后，一部份光以透射的方式穿出流场，一部份以散射的形式向外发射，另一部被吸收。穿出流场的这两部份光的特性，由于被流场所调制，带有流动状态的信息，而不同于入射光。载于光波上的流动信息可用两种不同的方式获取（图1）。

1、接收穿过流场的透射光与入射光的状态进行比较。这就是阴影仪、纹影仪、干涉仪的测量方式。全息干涉术虽也属于这种类型，但与古典的干涉术（如Mach-Zehnder干涉仪）有明显的不同。产生干涉的两光波（参考光波与测量光波），在全息干涉中它们在空间上是一致的，而在时间上是分隔。由于这个特性，全息干涉可消除光路中存在的固有光学缺陷。而在古典的干涉术中，相互干涉的两光波在空间上是分离的，而在时间上却是一致的。

透射光带有的流动信息是光线在整个流动中沿其轨迹的积分量。

2、记录流体中某个位置上时某特定方向上的散射光。散射光带有流场中散射粒子的流动状态，记录的信息是当地的参数。这有利于三维流场的分析。

无论是散布在流体中的分子或是示踪粒子都起着散射质点的作用。散射光的强度在很大程度上决定于散射粒子的尺度。光在散射粒子上的散射可分为弹性散射和非弹性散射二种。弹性散射，即入射光与散射粒子之间无能量交换。非弹性散射，即入射光与散射粒子之间有能量交换，因而散射粒子内能有变化，散射光的频率通常与入射光是不同的，例如，Raman散射带有散射物分子的热力学状态参数。

所谓的外添示踪物质的流动显示方法，显然属于这类观察记录散射光的方式。宏观上观察从烟或染料粒子上的散射光是定性的全场显示技术。如果定量地分析从单个粒子上散射光的性质，问题就变成定量的了。例如建立在Doppler频移基础上的激光测速等等。

某些物质的粒子在某种光波长的照射下发射出一种特殊的光辐射，从而大大地提高了这种测量方法的信噪比，这就是荧光示踪粒子法。荧光带有流动参数：密度、压力、温度等信息量。

表1和表2分别列出了这两种信息采集手段相应的测试方法。

三、流动显示技术近代发展概况

要把这个问题谈清楚是很不容易的。在这里只就几个具体的问题，从技术上作个介绍。希望能起到抛砖引玉的作用。

1、三维非对称流场干涉图的光量计算研究。

对三维非对称流场干涉图进行定量计算研究不是近年来的事情。由于全息干涉术和计算机技术发展，特别是计算机层析术（Computer Tomography）的应用，推动了这项工作的进展。将促进干涉计量的广泛应用。

三维非对称流场干涉图的定量计算，其实质是如何求解方程

$$Q(x, y) = \frac{K}{\lambda} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} (\rho(x, y, z) - \rho_0) dz \quad \dots (1)$$

式中 $D(x, y)$ 是干涉图中提供的测量数据函数。三维密度场 $\rho(x, y, z)$ 函数其测量结果反映在干涉图中是个二维的数据分布函数。求解上述积分方程，首先的一个问题是如何从已知的二维数据数值中求得三维分布的密度值。第二个问题是方程式右边的积分是沿光路轨迹的线积分，必须知道光在实验场中的轨迹。因此这个方程中含有二个未知数。

光在非均匀折射率场中传播轨迹不是直线，其折射情况决定于流场密度分布 $\rho(x, y, z)$ 。但对大多数的气动实验来说，光线在实验场中的轨迹偏离直线传播的位置不大，允许假设光在实验场中不折射，而按原来的入射方向直线传播穿过实验场，问题就得到了简化，就可把问题考虑在求解 $x = \text{常数}$ 的一个个剖面中的密度分布而解决。

把实验场（流场）中 $x = \text{常数}$ 的某个剖面分割成 N 个小单元（图2），假设每个单元中的密度为常数，即第 K 单元中的密度为 ρ_K 。平行于 z 轴穿过流场的光线 η_1 所带有的信息量是它穿过 ν 个这样单元中的密度值之和 $\sum_{i=1}^{\nu} \rho_K$ ，这个量由条纹函数 $D(\eta_1)$ 给出

$$D(\eta_1) = \frac{K}{\lambda} \sum_{i=1}^{\nu} (\rho_K - \rho_0) \zeta_{\nu} \quad \dots\dots (2)$$

ζ_{ν} 为第 ν 个单元中光线的轨迹长度。

流场被分割成 N 个单元，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。对于一任意三维场来说，需要 180° 视角范围上的测量数据，才能满足求解的需要。如果流场具有某种对称性，测量方位随之对称性的完整而减少，因为某些单元中的密度值和形状是相等的缘故。在轴对称的情况中，测量方位减少到只需要垂直于对称面的一个方向。为此，轴对称流场可以看做为只是这个问题中的一个特殊情况。

60年代中期由 Cormack 和 Hounsfield 建立起来的用于医学成像中的计算机层析术（Computer Tomography）是依据二维投影象再建三维物象的方法。从干涉图中测量到的二维数据场 $D(x, y)$ ，再建三维密度场 $\rho(x, y, z)$ 分布，在处理方式上是一致的。

Tomography 的数学概念，最早出现在 1916 年出版的 Radon 数学解析中。它是 Computer Tomography 的基础。在干涉图的计算中，首先将干涉条纹函数方程进行所谓的 Radon 变换(4)，类似于对轴对称流场干涉计算中的 Abel 变换。再用计算机进行计算。

C. M. Vest 和 D. T. Radulovic 的工作(5)具有创导性。他们研究了相距一定距离的两个加热圆盘在水中的热对流场，这是一个非轴对称场，但在某些方位上的对称性相当完善。对于这样一个流场，需要在 90° 范围的方位上采集测量数据，为了获得一个截面上的温度分布（图3），建立了如式(2)这样的 933 个代数方程，用网格法（gridmethod）(6)进行运算求解。

美国 Stanford 大学的 Hesselink 和 Snyder 给第三届流动显示会议提供的论文(7)，对直叶直旋叶下的流场进行了三维层析计算，实验数据是由 NASA 的 AVRADCOM 实验室提供的。另外美国军事航空力学实验室也作了同样的工作（图4）。Stanford 大学的工作主要在计算机运算和开发软件上。他们给第四国际会议提供的论文(8)，对一三维湍流混合射流的浓度测量进行了研究。

作为计算三维流场干涉图的各种方法，近年来大量的推出，如付氏变换法（Fourier Transform Method），卷积反投影法（Convolution back projection），筛选反投影法（Filtered back Projection），迭代法（Iterative Procedures）等等。但总的来说，至今实际的经验和实际应用太少，各种方法的实际应用范围和精确度有待于考验。在这方面最终的目的是希能建立起一套完整的通用的计算机程序，如应用于计算轴对称流

场那样方便实用。

在强折射率场中,光线的折射是不可忽视的,干涉图的计算必须考虑光在测试场中的轨迹。显然,计算要困难得多。此时表示干涉图中的光程方程,必须从更普遍的关系式中推导,即从费尔马(Fermat)原理出发,得到下面一组描写在折射率场中传播轨迹的微分方程(9):

$$\frac{d^2x}{dz^2} = \left(1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2\right) \cdot \frac{1}{n(x,y,z)} \left(\frac{\partial n}{\partial x} - \frac{\partial n}{\partial z} \cdot \frac{dx}{dz}\right) \quad \dots (3a)$$

$$\frac{d^2y}{dz^2} = \left(1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2\right) \cdot \frac{1}{n(x,y,z)} \left(\frac{\partial n}{\partial y} - \frac{\partial n}{\partial z} \cdot \frac{dy}{dz}\right) \quad \dots (3b)$$

只有在特殊的条件下方程才有解。

对于二维流场($n = n(x, y)$),如加热平板附近的热边界层,电解反应中平板电极附近的浓度边界层;密度分层流场。在这类流场中,光只在一个方向上折射。这样问题就可以在 $x = \text{常数}$ 的剖面中来研究。显然,如果已知 $x = \text{常数}$ 平面中的折射的精确分布 $n = n(y)$,借助于方程(3b)就可求出光在折射场中的精确轨迹。然而这是办不到的,问题的实质就在于求解 $n = n(y)$ 。实际的处理方法,只能预计,也就是假设光在流场中的轨迹的某些特征,事先预设一个折射率函数,例如对热边界层来说,假设折射率分布为一线性函数 $n = n(1 + ky)$,推出的光的轨迹是抛物线(10),并且得到了方程(3b)的完全解。Beack等人(11)提出用一个四次多项式来表示 $n(y)$,多项式中的三个待定参数是用迭代法从干涉图中确定的。首先选取一组假设的数值作为待定参数,计算而得到的干涉数据与实际的干涉图进行比较,改变这组参数再计算,再比较,尽量地减少计算与真实干涉之间的差,使问题朝着确定解的唯一方向发展。这个方法看来是精确得多,但计算十分繁琐,也只适用于简单流场。

在轴对称的情况下,对这个问题的处理就更困难了。在这方面,S. Y. Cha和C. M. Vest所作的工作(12)具有代表性。对于折射率分布 $n(r)$ 为单调函数的流场,光的路径长度被写成适合于Abel反演的形式,但只局限于折射率分布是平滑无间断的流场。总的说来,到目前为止,这个问题仅仅只是在数学上的模拟,而无实际的应用经验。

2、片光技术(Light Sheet):

片光技术作为剖析三维流场的一种显示方法,由于激光普遍应用,近年来发展很快。在第三届国际流动显示会议上,片光技术是作为一个专题安排的。

片光技术接收的是流场中示踪粒子上散射的光,作为流动显示全场观察方法它是属于定性的手段,但它是一种剖析法,不同于一般的外加示踪粒子显示方法,是分析三维流场的有力手段之一。

应用大功率的激光(如 Ar^+ 固体脉冲激光)作为光源,不但使光学装置变得简单,而且有效光强度大,除了便于观察或摄影外,还带来了一些新的技术,将在以下具体的技术中述说。图5a为这种技术在风洞实验中的装置及布局。激光器(Ar^+ 激光)架在风洞实验段的上面。全反射镜和把激光束扩展成片光束的玻璃棒安放在一个移动的小车上,以变化照明显示截面。散射粒子(烟)通过管道在实验段上游注入流场。图5b为三角翼飞机模型下流某横截面上旋涡对的显示。图5c为不同截面上涡对的组合图,清楚地显示了涡的发展过程和涡流的轴线发展(13)。

片光通过流场散射光所带的信息,作为单个散射粒子来接收和处理,是一种定量的测量方法。激光多普勒测速是个典型的例子。下面将要介绍的两种速度场的测量方法——散斑照相和多普勒干涉图案,是建立在单个粒子散射信息处理上的全场技术。

3、散斑照相术 (Speckle Photography):

自从激光得到普遍应用之后,散斑现象受到极大的重视。早在60年代散斑就被用来测量物体表面位移、应力及应变。到70年代散斑照相在固体力学实验研究中已发展到高度和成熟的阶段。散斑照相应用于流体力学实验,开始于70年代初。经过的10多年发展,散斑照相用于测量流场速度分布、密度分布,以及从散斑图中再现流场显示图的方法越来越得到广泛应用[14]。

(1) 密度(温度)场的测量:

实验装置的光路布置如图6所示。激光束经扩束和准直后照射在毛玻璃屏上。被测物放在距毛玻璃屏为 l 处。照相物镜 L 将毛玻璃成象在记录平面 PH 上。毛玻璃在光路中的作用是作为散斑参考图案系统。

采用二次曝光法来比较有流场存在和无流场时的散斑图案的差别,从中获得光线在测试流场中的折射角 ε 。第一次曝光是在静场的情况下进行的,记录在 PH 上的是毛玻璃上随机分布的散斑图。在流场建立运行中进行第二次曝光。毛玻璃上的散斑分布通过流场的调制将产生与流动信息有关的变化,而被记录在同一干板 PH 上。记录在 PH 上的一一对应的散斑对,由于光在流场中的折射,它们之间相差一个小的位移量 $\Delta 1$ 。如果成象是1:1的话,流场中1点的折射角 ε_1 由下式给出

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta 1}{l}$$

式 l 为已知量, $\Delta 1$ 是用一细激光束照射散斑图某点上得到杨氏干涉条纹的宽度而计算出来的(图7)

$$\Delta 1 = \frac{\lambda \cdot z}{S_1}$$

S_1 为1点再现的杨氏干涉条纹系的宽度,这样就得到了1点的折射角 ε_1 。这样就可逐点的测出全场的折射角分布 $\varepsilon_1(x_1, y_1)$ 来。折射角 ε_1 与流场中的密度 ρ 的关系为[9]:

$$\varepsilon_x(x, y) = k \int \partial \rho(x, y, z) / \partial x \, dz$$

$$\varepsilon_y(x, y) = k \int \partial \rho(x, y, z) / \partial y \, dz$$

图8为一本申灯火焰干涉图及其相应点上杨氏干涉条纹,即散斑测量结果[15]。

(2) 速度场分布的测量:

从上所知,在不同的两个时刻记录下的同一粒子的两个位置,用杨氏干涉条纹可精确地定出该粒子在 Δt 时间间隔的位移量 Δ 。粒子在 Δt 这段时间上的平均速度为

$$v = \Delta / \Delta t$$

将激光通过一组柱面透镜扩展形成一片薄薄的平行光穿过被测流场,如图9所示。流场中仅仅只有这个截面被照亮。若流场中有足够的散射示踪粒子,激光在这些粒子上的散射构成了散斑图。用照相的方法,在同一块记录板上记录下时间间隔为 Δt 的两幅散斑图,即记录下了该截面上的速度分布信息。用图7的方法逐点逐点确定出 $\Delta 1$,就得到了该截面上的速度场分布。速度的大小正比于 Δ 值。速度的方向是垂直于杨氏干涉条纹的方向。当然,这种方法是建立在粒子的速度等于流场流动速度的假设上的。

散斑照相的特点是建立在当地信息分析上的全场采集测量技术,提供的测量数据密集度高,

一幅直径为100mm的散斑图可提供 10^4 个测量点的数据值。

用空间滤波 (Spatial filtering) 技术对散斑图进行全场再现, 可得到类似于流动显示的图案 [16], 所得到图案是散斑对等位移分量的等值线。对于二维密度场来说就是等密度 (或温度) 梯度线; 对于速度场来说, 就是某个方向上速度分量的等值线。如何提高再现图的质量, 是今后努力的一个方向。

常规的测速方法, 包括激光测速仪, 热线风速仪在内, 所获得的测量值只是某个时刻流场中某一点的速度, 远不能满足对湍流场的研究。散斑照相测速获得的是某个时刻流场中某个截面上的速度分布。将对湍流研究提供进一步的实验数据, 以及相关信息, 有助于对湍流的研究。

4. 激光诱导荧光法 (LIF):

激光与散布在流场中的示踪粒子相互作用产生能量交换, 使示踪粒子内能变化, 诱导出荧光发射, 将大大地提高测量与显示的信噪比。常用的方法是在流场中加入碘分子 (以蒸气引入流场), 用 Ar^+ 激光照射诱发 [17]。不能只把这种方法看作是自身发光的示踪粒子显示技术。激发出来的荧光信号是流场物理参量压力、温度、速度和密度的函数, 适当地选择调谐激励激光的输出线宽, 就可分别单独实现对流场中的某个物理参量的定量显示, 如密度场显示, 压力场显示, 速度场显示, 温度场显示。若激励激光束是以片光的形式射入流场的, 显示结果是一个平面上的分布, 也就是说显示是层析的结果, McDaniel 和 Hanson [18] 对这个主题作了全面的介绍和分析。这种方法与计算机技术相结合将为流场显示技术展开一个新的方向。

5. 多普勒干涉图案显示速度场:

运动粒子上散射的多普勒频移光波带有速度信息, 通过干涉的方法可以得到速度场的分布。德一法圣路易研究所的 F. Seiler 和 H. Oertel [19] 用了一个不等臂长的特殊的迈克逊干涉仪, 其目的是把散射光的多普勒频移变化量, 通过干涉的手段转换成相位变化, 由干涉图中的条纹飘移量来确定流场速度。这张干涉图就是速度场的显示图。具体光路如图 10a, 一束薄激光片光束照亮流场的某一截面 Σ , 为了获得足够强度的散射光, 流场中必须添加微小的粒子。干涉仪是由分束器 T, 两块反射镜 S_1 和 S_2 , 以及一块玻璃块 G 组成。从物面 Σ 来的散射光通过透镜 L_1 , 由分束器 T 分成等强度的两束光, 由 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。干涉仪的臂长 ℓ_1 和 ℓ_2 必须满足下式:

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

式中 n 为玻璃块 G 的折射率。在象平面 Σ' 上, 干涉仪两臂的光程差为:

$$\Delta \phi = 2 \frac{n^2 - 1}{n} \ell$$

相位的变化可以写成:

$$\frac{\Delta \phi}{2\pi} = \frac{\Delta \phi}{\lambda} = \nu \frac{\Delta \phi}{c}$$

λ 为光波波长, ν 为光波频率, c 为光速。微分得到

$$d\left(\frac{\Delta \phi}{2\pi}\right) = \frac{\Delta \phi}{\lambda} \cdot \frac{d\nu}{\nu}$$

这就建立起了频率与相位的关系。这就是测量的基础。从式中可以看到, 若要把微小的频率变

化变成可见的相位变化(干涉图), $\Delta\phi$ 越大越好, 也就是说, 干涉仪两臂之间的光程差越大测量灵敏度越高。

图 10b 为两个同心的二氧化碳气射流的多普勒频移干涉图。光源为 1 瓦输出功率的 Ar^+ 激光器, 以片光的形式照射流场, 因而表示的是一个截面上的速度分布。根据条纹疏移量, 得出外环射流与内部射流中心速度之差 $\Delta u = 220$ 米/秒。

6. 光—电信号转换激光干涉仪:

根据记录方式的不同, 所得到的流场信息表现方式也是不同的。全场记录所提供的信息在空间上是连续的, 而在时间上是不连续的, 因为全场记录是某个特定时刻 t_1 或是按一定时间间隔 Δt_1 来进行的。

如果光信号是用光电探测器(如光电管等光敏器件)来接收, 得到的信息量是时间的连续函数, 但只是空间某点上的测量值, 与全场记录恰好形成互补关系。

这种干涉仪(图 11), 首先由德—法圣路易研究所的 G. Smeets [20] 提出。激光束由 Wollaston 稜镜分裂成 $2N$ ($N=1, 2, 3, \dots$) 束细光束, 通过实验试流场, 称为“光探头”。光电二极管把光信号转为电信号输入示波器显示, 或送入微机进行处理, 这种干涉仪的特点是:

- 灵敏度高, 可分辨 $0.1 \text{ \AA}$ 的光程变化量;
- 测量结果是时间的连续函数, 有助与动态现象的分析;
- 便于采用微机, 图象处理等技术。

中国科学院力学研究所的胡金铭和解京昌等向本届大会提交了“光—电转换数字记录激光干涉仪”的报告, 不再重复。

7. 图象处理及计算机产生数字流谱:

近十多年来由于微型计算机的飞跃发展, 和功能的完善, 使图象处理技术达到了空前的水平。图象处理技术与流动显示的结合, 不但加速了对流谱的分析, 而且也提供了更精细和准确的信息, 为流动显示的应用起到了推动作用。

自第三届国际流动显示会议起, 涌现出大量的文章。

用计算机产生数字流动显示图, 是常规流动显示方法的逆过程, 即把流场中的物理参数的各种数据, 通过图象技术得到标志某个物理量特征的图案。输入到计算机的数据, 可以是来自光学、探头的测量和理论计算。

用实验测量数据, 通过计算机技术和彩色电视显示技术得到流场显示图的先驱, 应该是美国 Maryland 大学的 A. E. Winkelmann [21]。我国哈尔滨空气动力学研究所在这方面也取得了很大的成就。

由理论计算数字产生的数字流谱, G. Hasen 和 J. Graham 的工作 [22], 可以算作一个典型的代表。通过计算机把 Navier—Stokes 流动解用图象表示出来。图 12 为一张航天飞机模型 $M=3$ 时的 Navier—Stokes 流动解的数字流场显示图。和用纹影仪所得到的流场显示图十分相象, 真可以假乱真。但对这类图象的解释要持慎重的态度, 这是因为计算数字流谱图常常是一个积分过程的产物, 其结果并不是唯一的解, 即不同的流动参数可能产生同样的(或是几乎相同的)流谱图。另外, 计算数字流谱图中的差异与相应流动情况中的差异并不是线性关系, 即两个计算数字流谱图中相似性涉及到大量的相关流场中的差异。

由计算根据理论计算数字(如 Navier—Stokes 流动解), 或是从出实验中获得的测量数据产生流谱的方法不属于流动显示技术的范畴。但是它为流体力学研究开辟了一个新的尺度。

四、结束语：

自60年第一台激光器问世以来，激光及激光应用技术的发展十分迅速。首先便D. Gabor在1948年发明的全息照相得到飞速的发展和推广应用，特别是61年E. N. Lieth和J. Upatnieks提出旁轴全息照相术，大大地提高了全息术的信噪比，使全息术进入实际应用。全息干涉术在很多方面优于古典的干涉术，特别是在三维信息再现的能力上。计算机层析法自60年代中期在医学成像处理分析中得到成功后，随着计算机技术与图象处理技术的发展，用干涉术对三维流场进行定量显示计算于70年代中期得到初步成功，吸引着不少科学家对这个领域的极大兴趣。

散斑照相，激光诱导荧光术，激光多普勒技术…等，都是由于激光的发展和应用，在这20多年来得到发展的技术，它们的最大特点也就在于有助于三维流场的显示和分析。也许可以说在近20多年中，流动显示技术的发展主要在解决三维流场显示计量方面取得了很大的进展。但还有很多问题有待于今后的努力。

参 考 文 献

1. O. Reynolds: An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinous and the law of resistance in parallel channels.
Phil. Trans. Roy. Soc. London, Vol. 174, 1883
2. L. Mach: Uber einen Interferenz-Refraktor. Z. Instrumentenkunde 12, 89-93, 1892
3. E. Mach and J. Von Weltrubsky: Uber die Formen der Funkenwellen. Sitzungsber. Kaiserl. Akad. Wiss. Wien, Math.-Naturwiss. II. Abt. 178, 551-567, 1878
4. C. M. Vest: Formation of images from projections: Radon and Abel transforms. J. Opt. Soc. Am. 64, 1215-1218, 1974
5. C. M. Vest and P. T. Radulovic: Measurement of three-dimensional temperature fields by holographic interferometry. In Applications of Holography and Optical Data Processing. Pergamon Press, Oxford, 214-249, 1977
6. D. W. Sweeney and C. M. Vest: Reconstruction of 3-D refractive index fields from multi-directional interferometric data. Appl. Opt. 12, 2649-2664, 1973
7. L. Hesselink and R. Snyder: Three-dimensional tomographic reconstruction of the flow around a revolving helicopter rotorblade; A numerical simulation. Proceedings of 3rd international symposium on flow visualization. Ann Arbor, USA, Sept. 6-9, 1983
8. R. Snyder and L. Hesselink: 3-D density measurements With interferometric tomography. Proceedings of 4th ISFV, Paris, France, August 26-29, 1986
9. W. Merzkirch: Flow Visualization. Academic Press, New York, 1974
10. E. E. Anderson etc: Estimating the refractive error in optical measurements of transport phenomena. Appl. Opt. 14, 185-188, 1975
11. K. W. Beach etc: Light-deflection effects in the interferometry of one-dimensional refractive-index fields. J. Opt. Soc. Am. 63, 559-566, 1973
12. S. Y. Cha and C. M. Vest: Computer Tomography of strongly refracting objects. SPIE Vol. 358, 149-155, 1982
13. C. Veret: Flow Visualization by Light-Sheet. Proceedings of 3rd ISFV. Ann Arbor, USA. Sept. 6-9, 1983
14. U. Wernekinck and W. Merzkirch: Measurement of natural convection by speckle photography. Proceedings of 8th International Heat Transfer conference, San Francisco, USA. August 17-23, 1986
15. Shu Ji-zu and Li Jian-yi: Speckle photography used for measuring temperature gradient distribution of a flame. will be published in Experiments in Fluids.
16. M. Francon: Laser Speckle and Applications in Optics. Academic press, New York, 1979
17. K. Teshima: Visualization of supersonic jets using Laser Induced Fluorescence of I2. Proceedings of 4th ISFV, Paris, France. August 26-29, 1986
18. J. C. McDaniel and R. K. Hanson: Quantitative planar visualization in gaseous flow field using Laser Induced Fluorescence. Proceedings of 3rd ISFV, Ann Arbor, USA. Sept. 6-9, 1983

19. F. Seiler and H. Oertel: Visualization of velocity fields with Doppler-pictures. Proceedings of 3rd ISFV. Ann Arbor, USA, Sept. 6-9, 1983
20. G. Smeets: Flow diagnostics by laser interferometry. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-13, NO.2 1977
21. A. E. Winkelmann and C. P. Tsao: A color video display technique for flow surveys. AIAA Paper 82-0611
22. G. Hasen and J. Graham: Computer generated graphic display of Navier-Stokes flow solution. Proceedings of 3rd ISFV. Ann Arbor, USA. Sept. 6-9, 1983
23. R. Smith, D. Speray and E. everton: Visualization of computer generated flow fields. Proceedings of 3rd ISFV. Ann Arbor, USA Sept. 6-9, 1983
24. 胡金铭、解京昌、束铨祖: 光电转换数字记录激光干涉仪, 第二届全国流动显示会议论文集, 中国力学学会主办, 1986年10月27-31日, 中国、黄山。

(ISFV: International Symposium on Flow Visualization)

表1:

光的变化量		测量方法	应用范围
振 方 频	幅	吸收法	固-液-二相流
	向	阴影、纹影	可压缩流、传热等
	率	多普勒纹影 和干涉图象	运动相位体 速度场显示
	相 位	干涉法	可压缩流、传热、等离子等

表2:

散射类别	弹性散射	非弹性散射
从分子上散射	Reyleigh 散射	Raman 散射
从示踪粒子上 散射	多普勒测速 激光双焦点 散斑照相 外加示踪粒子流场 显示	荧光示踪 粒子

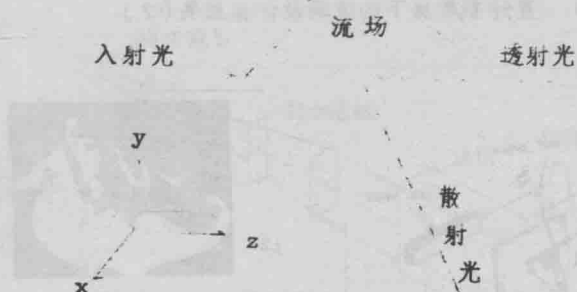


图1 光波与流场的相互作用

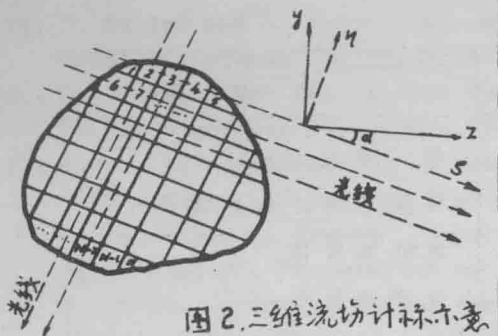


图2 三维流场计算示意图

图2 三维流场计算示意图

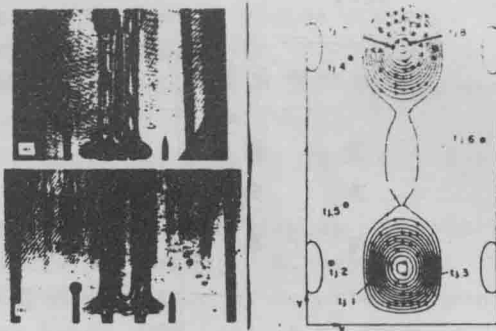


图3 非对称热流场及计算结果〔5〕

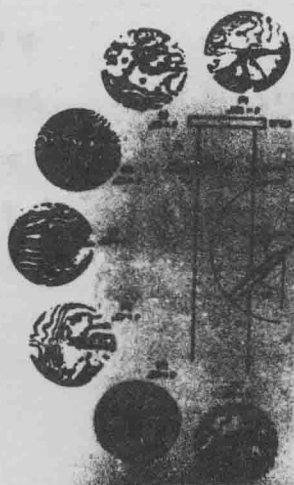


图4 直升机旋翼下的流场及计算结果〔7〕

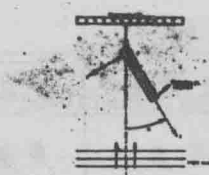
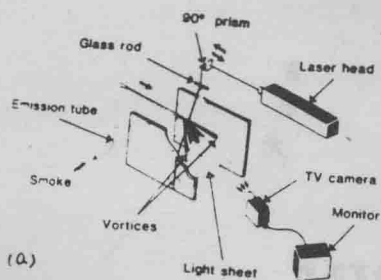
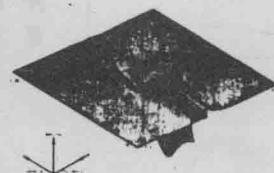


Figure 1. Data acquisition configuration.



(b)



(c)

图5 片光技术装置与显示结果〔13〕