

第五届全国
实验流体力学
学术会议论文集

PROCEEDINGS OF THE FIFTH
CHINA NATIONAL CONFERENCE
ON EXPERIMENTAL FLUID MECHANICS

中国力学学会
THE CHINESE SOCIETY OF THEORETICAL
AND APPLIED MECHANICS
1995.9 四川松潘 SICHUAN SONGPAN

力学学会流体力学专业委员会 实验流体力学组

Division of Experimental Fluid Mechanics,
Chinese Society of Fluid Mechanics,
Chinese Society of Theoretical
and Applied Mechanics.

组 长(Head):魏庆鼎(Wei Qingding)

副组长(Deputy head):舒 玮(Shu Wei)

组 员(Members):连其祥(Lian Qixiang)

柳绮年(Liu Yinian)

罗明晖(Luo Minghui)

楼洪钊(Lou Hongdian)

明 晓(Min Xiao)

沈礼敏(Shen Limin)

苏文翰(Su Wenhan)

屠 兴(Tu Xing)

王国强(Wang Guoqiang)

许宏庆(Xu Hongqing)

徐伯勋(Xu Boxun)

张伯寅(Zhang Boyin)

第五届实验流体力学学术会议 组织委员会

Organizing Committee of 5CNCEFM

主 席(Chairman):乐嘉陵(Le Jialing)

副主席(Vice Chairman):魏庆鼎(Wei Qingding)

成 员(Members):连其祥(Lian Qixiang)

柳绮年(Liu Yinian)

楼洪钊(Lou Hongdian)

明 晓(Min Xiao)

屠 兴(Tu Xing)

许宏庆(Xu Hongqing)

罗明晖(Luo Minghui)

张伯寅(Zhang Boyin)

贺德馨(He Dexin)

叶希超(Ye Xichao)

秘 书(Secretary):石大兴 叶希超

前 言

第五届全国实验流体力学学术会议,经过一年来的筹备,于 1995 年 9 月 22 日—9 月 28 日在四川省松潘县召开。

会议征文通知发出后,得到了全国从事实验流体力学研究的单位和科技工作者的积极响应,经过评审收入论文 64 篇。论文内容广泛,涉及到从实验理论到实验技术,从基础研究到应用研究,而且互相交融。其共同特点:一是反映了近年来对流动现象的探索和对测试技术的研究成果,不断孕育着流体力学研究中的新概念、新思想和新理论;另一个特点是在应用上下功夫,不但促进了基础研究、理论研究的发展,而且亦推动了国民经济的发展。

全国科技大会的召开,为全面落实科学技术是第一生产力的思想,为实施科教兴国的战略、为我国科技事业的发展,展现了美好的蓝图。借助这股东风,让我们携起手来,为我国实验流体力学有一个新的更大的飞跃而努力拼搏!

编者 1995. 7

目 录

一、评述

1. 全场诊断和测试技术现状与展望..... 申功忻 马广云 康琦(1)✓
2. 二维密度场定量测量技术进展 乐嘉陵 叶希超(11)✓
3. 新型流动测量仪器评介 盛森芝 许宏庆 徐月亭(18)

二、基础研究

4. 剪切层内声锁频的魔鬼台阶现象 魏中磊 董宇飞(20)
5. 二维平板起动涡的后期三维流动 连其祥(25)✓
6. 圆湍射拟序结构的显示(一) 王希麟 李红华 谷红霞 赵军龙(33)
7. 强迫垂直振动流体的表面波运动图案研究 鄂学全 高宇欣(41)
8. 对撞射流的流动显示实验研究
..... 刘承晖 连其祥 麻树木 沈志刚 陈军 邢玉山(49)
9. 矩形窄道中紊动机理实验与分析 毛根海 吴寿荣 甘裁芷(55)
10. 进气道喘振研究..... 宋志安(63)
11. 极低湍流度下翼型边界层及近场尾流的雷诺应力测量试验研究..... ✓
..... 何克敏 郭渠渝 白存儒 屠兴(71)
12. 极低湍流度下对称翼型近场尾流中湍流切应力和湍流动能间的相关.....
..... 郭渠渝 何克敏 白存儒 屠兴(78)
13. 湍流度和雷诺数对附面层转换位置的影响.....
..... 卞於中 唐敏中 何克敏 白存儒(84)
14. 垂直圆柱局部波浪力实验..... 呼和敖德 齐桂萍 黄振华(91)
15. 应用 LDA 对斜平板后旋涡扩散流动的测试研究 阎旭 Mr. K. M. Lam(100)

三、风洞技术

16. 中国第一座桥梁风洞的研制..... ✓
..... 张伯寅 钮珍南 诸乾康 刘可器 项海帆 施宗城 林志兴(105)
17. 两种风力机风洞试验洞壁干扰修正方法的比较试验研究 江桂清 贺德馨(113)✓
18. 半模型实验的高效洞壁自适应方案 李华星 贺家驹 左培初 徐敏(125)
19. NF-3 风洞二元侧壁附面层控制方案选择.....
..... 周瑞兴 上官云信 郝忠详 胡玉贵(133)
20. 带锥度的十字型柱体风荷载研究 顾志福 魏庆鼎 张伯寅 孟宪忠(140)✓
21. 24 角形剖面的风洞试验研究及工程应用 田学诗(148)

22. 水工模型试验中的阻力相似 阎庆绂 阎英贤(158)
23. 腹式支撑干扰及其应用 唐良锐(166)
24. 再入体动导数试验技术 龚卫斌(175)
25. 脉冲风洞喷流干扰测力天平的设计与应用 毕志献 罗也凡(182)
26. FD-06 风洞模型转速测量技术..... 高恩玉 刘书伟(188)

四、飞行器流态与分析

27. 10°尖锥转捩诱导负荷的实验研究 楼洪钿(194) ✓
28. 翼尖喷气对矩形机翼表面压力分布的影响.....
..... 张景镇 熊筱珍 许清华 柳常新 李奉俊 金学奉(203)
29. 洞壁对过失速非定常三角翼破碎涡位置的影响 张文华 张庆利 周兴奎(210)
30. 俯仰振荡机翼上的旋涡流动及吹气控制流态显示实验研究 ... 秦燕华 沈礼敏(215)
31. 轨道器的流态观察试验 杨其德 陈久明 董广彪 梁贞桢(225)
32. 动态复杂流场显示 范洁川 唐敏中(234) ✓
33. 翼面动态压力测量 唐敏中 范洁川(243)
34. 俯仰振荡三角翼前缘涡破碎的流动显示 李京伯 张庆利(252)

五、多相流与两相流

35. 塞棒吹气时方坯结晶器中气泡运动的水模研究..... ✓
..... 柳绮年 周有预 方治家 任敦长 郑彩云 贾复(259)
36. 两种大气扩散试验模拟方法的比较 娄良石 赵凯 赵建光(268)
37. 面源扩散试验方法的研究 娄良石 赵凯 赵建光(272)
38. 振荡流中管线下方的砂床冲蚀 浦群 李坤(275)
39. 波浪与淤泥间的相互作用实验研究 张袁备 金镠 黄振华 呼和熬德(282)
40. LDV 测试技术在测量稀相气固并流上行和下行循环流化床两相速度中的应用
..... 杨国强 魏飞 汪展文 金涌 俞芷青(287)
41. 热膜流速仪在浮阀塔板局部流动特性研究中的应用.....
..... 刘富善 许宏庆 张雅芝 黄洁(295)

六、密度场

42. 三维流场干涉层析技术新进展 贺安之 阎大鹏 刘峰(304) ✓
43. 真实火箭燃气射流的实时显示及定量测试技术研究.....
..... 贺安之 阎大鹏 刘峰 王振东(310)
44. 柴油内燃机流场的莫尔偏折显示及计算 阎大鹏 王振东 刘峰 贺安之(314)

45. 激波过弯道绕流流场 叶希超 杨辉 乐嘉陵(319)
46. 双波长 Mach-Zehnder 干涉仪及其初步应用 蒋光裕 杨祖清(325)
47. 一种彩色纹影视频摄录像技术及其在高超声速推进风洞的应用
..... 徐中华 赵蓉新 杨祖清(330)
48. 跨声速涡轮平面叶栅密度场的测量 李静美 邓素卿 胡金铭(336)
49. 弹导靶阴影仪 孙启明 张长根(342)
50. 潜弹航行体内喷流流场的实验研究 何宝培 毕志献 郑永熙(348)
51. 流动显示技术及其在水工整体试验中的应用 朱晟 任佐泉(355)
52. 液晶膜流动显示技术的试验研究 赵宗辅 张其威(364) ✓

七、PIV 技术

53. 流场非均匀性对应用二维相关分析法的 PIV 技术精度的影响
..... 颜斌 魏庆鼎(372)
54. 采用乳化空气泡作示踪粒子的 PIV 测速技术 马广云 高庆春 申功忻(380)
55. PIV 技术在非定常流场测量中的应用 袁格 马顺利 金瑗(385)
56. 自由剪切流场的实验研究 许宏庆 吴嘉(389)

八、高焓测量

57. 激波风洞中高 P5 和高焓状态运行中的若干问题 袁生学(397) ✓
58. 热色液晶定量测热显示技术 吴宗善(403)
59. 非平衡电弧等离子体射流光谱学诊断实验研究 韩隆恒 岳斌 杨富荣(411)
60. 高温气流总焓测量方法 戚隆溪 王柏懿(420)
61. 化学示踪物在激波管实验中的应用 何宇中(426)
62. 在激波管中用稀疏波研究电离复合反应 范秉诚 何宇中 崔季平(429)
63. 粒子成像测速技术中粒子多次曝光象斑的匹配算法讨论 董守平(432)
64. PIV 图象粒子象斑的定位偏差评估的讨论 董守平 双凯(441)

全场诊断和测试技术现状与展望

申功忻 马广云 康琦
北京航空航天大学(100083)

一、引言

具有空间场分布(随空间位置不同而不同),并具有非定常特性(并非周期性,随机性)的物理现象是一种复杂而又普遍的反映自然本质的物理过程。随着人类改造自然的进展,了解上述现象和过程已成为科学能否取得突破性进展的关键。正如我们一直面临的湍流,复杂流动等许多流体力学问题。

过去几十年来,依靠传统观测诊断,以静态或以点的参数为主的现象和过程的方法和途径,尽管在系统化,微型化,提高测量,精准确度,取得大量数据集方面有很大提高,以致包括已有大型的数据采集系统和 LDV 激光测速仪^[1],但再也不能解决面临的上述问题,如同瞎子摸象一样。因而正如美国物理学 2000 年论证中明确提出和美国 NASA、21 世纪航空技术规划再次强调要制订一个强化计划那样,研究和开发一种理想的流体力学仪器,一种无干扰的高分辨力的,空间和瞬态的观测诊断上述现象和过程的技术,手段,仪表和系统已成为实验途径研究中最前沿的关键之一。

如果说几十年前,这种理想的流体力学实验手段仅是一种遥远的梦想。那末时至今日,随着科技进步,流体力学观测手段已经经历几代的变革,(从机械式仪表,机械电气式到以计算机为核心的数据采集处理控制系统),当今高科技,尤其计算机技术,激光等近代光学技术,信息、图象技术的迅猛发展,不仅促使人类社会发生根本性的变革,同样撞击着流体力学这门古老又至关重要的学科,高科技的渗透和交融,追求和实现这种理想的实验研究手段已成为可能,并已将是我们将面临的 21 世纪的挑战。

本文将着重讨论所谓的理想的实验观测手段的目标,特点和要求。综合介绍奔向目标的若干途径,并着重介绍全场测试技术粒子图象测速技术为主最新进展。以及讨论可能的发展趋势。

二、关于理想的流体力学实验观测手段

对于理想的或近乎理想的实验观测手段,其目标在能对湍流等有突破性的了解。美国物理学 2000 年有如下的描述:“理想的流体力学仪器是能够近似作点分辨力的非侵入式的,并能从相当大的流动容积内同时取得数据,并能显示出该容积内任意切面上的流动”。

综合考虑,可以认为,这种近乎理想的观测手段应具备如下功能和技术要求:

- (1) 非接触式的,对流动应几乎无干扰作用。
- (2) 既要能展示流动时空结构形态,又要能瞬时获取整个流场的定量数据。
- (3) 具有观测全尺度时空范围完整性和高时空分辨力的能力。(以剪切流为例如图(1)要求所示)
- (4) 能最直观,最丰富信息的形式表示,描述取得的观测结果。
- (5) 能实时或几乎实时地取得实验结果信息

(6) 低成本和方便使用性。

我们看到现状离理想的要求有多少差距。要求最关键, 最重要的是前三项。在追求理想的观测技术途径中已有了一些重要进展。一种统称之谓全场测量技术(FFM-Full Field Measurements)正在兴起, 正在努力向目标逼近。这也意味着以光学, 光电物理诊断方法为基础, 以图象系统, 乃至以多媒体系统为核心的第四代或第五代的流体力学观测技术、手段的到来。

近十余年来, 这是在全场观测技术取得重要进展的时期。首先流动显示, 可视化方面再度被重视, 并引入了许多新技术, 其中尤为激光片光, 激光扫描技术, 有了新的飞跃。不仅从整体上而且在比较精细的层次上, 不仅外观而且流动内部(切面)上可以揭示流动结构形态^[2,3,4]。这为全场观测技术奠定了重要基础。

全场观测技术, 参照 Adrian, Hesslink 等人的分类^[5,6,7], 正在采取的技术途径的分类如图(2)所示。总的说来分成以粒子示踪和分子示踪两大类。当然分子示踪作为全尺度观测具有本质的优点, 可能具有观测分子尺度的潜力。从流动显示角度讲, 已有不少贡献, 如在混合流动中提出了混合转换(Mixing transition)的新概念。但另一方面在定量测量方面, 测量的精度, 空间分辨力, 应用于流动的研究等方面还是以粒子为示踪子的技术较为成熟一些, 如 2D-PIV 的部分技术已组成仪器, 走向市场(TSI, DANTEC 公司等)。下面将介绍若干主要技术途径基本原理、技术、达到的水平, 应用及其发展趋向。

三、以粒子示踪为基础的全场观测技术

1. 粒子图象测速技术(PIV)

(1) 概述: 粒子图象测速技术源于固体应变位移测量的散斑技术, 因而最先称为激光散斑测速技术(LSV)。由单色光照射散布在流体中的粒子形成散斑, 用已知时间间隔的两次曝光记录散斑的位移, 由判读记录散斑位移底片形成的杨氏条纹, 确定位移的大小和方位, 由此确定流场多点的速度。从原理成为可以应用的技术, 首先要归功于由 Adrain 和 Merzkirch 的贡献^[3,5,8]。十年来, 由于判读技术的进展, 不必在流体中加入高浓度的粒子, 判读已不是流动的散斑图象, 而是粒子的图象, 因而名称演变为更通用的粒子图象测速技术。其工作原理图见图(3), 其中图(3)a 为 PIV 底片的形成原理, 以获取流场中一个切面上的瞬态速度场信息图, 3(b)为判读系统原理图。

(2) 光源: PIV 的多次曝光光源有多种方式。有连续 A_r^+ 激光器机械斩波式, 振荡镜式和旋转多面镜式^[32]; 有脉冲红宝石激光器^[9]; 直到最近较多采用的双 YAG 脉冲激光器组形式, 其优点是激光的能量利用合理, 脉冲窄(ns 级)而脉冲间隙时间有很大调整范围(几百 ns~几百 ms), 可以适用而于很宽的速度范围, 其激光器组系统如图(4)所示。测速范围可由 $0.1\text{cm} / \text{sec} \sim \text{几百米} / \text{sec}$ ^[11,27]。

(3) 纪录: PIV 底片用一般照相机(135 或 120 为主)纪录, 也有采用与光源同步的电影机。原则是相机的底片越大越好, 纪录的向量点数与底片面积成正比, 空间分辨力可大大提高。一般放大率 $M < 1$, 如加特殊的显微放大光路, 已可做到 $M = 6$, 可提高物理空间分辨力。

(4) 方向二义性: 无论杨氏条纹法或是自相关法判读, 都存在位移方向的二义性。通过旋转镜式偏置, 纪录相机匀速移动式偏置及两个脉冲光具有不同偏振方向(一为垂直偏振

光,一为水平偏振光)经过双折射透镜照相记录形成偏置等方法^[8]。最近又有人(Post)采用双色扫描光束技术直接,用以确定位移方向。但至今动态范围仍受到一定限制,尚未找到更好的方法。

(5)判读:粒子图象判读采用杨氏条纹光学法或自相关法,均已建有以计算机为核心的自动判读系统。判读点区一般为 $d_p \sim 0.5 \sim 1\text{mm}$, PIV 底片固定在由计算机控制的位移机构上,逐点自动判读。光学杨氏条纹法的判读速度要比自相关法快一些,但判读速度主要取决于采用的计算机的能力。用 PC 机, Sun 工作站, MicroVAX 不等,近年来采用平行计算技术,处理速度显著提高,如 Adrian 采用以 Sun370 工作站为主机用 i860 向量处理器并行工作,见图(5)已达 640 MFLOPS 峰值运算速度(可扩充到 256GFLOPS),采用自相关法,处理向量数目速度已达到 100 个/Sec^[10](杨氏条纹法 266 个/sec)。

(6)水平:PIV 技术目前达到的综合测量水平,总体上讲,可以在一个切面上测得瞬时 3500-14400 个点速度向量,其精度约 1%(个别达到 0.2%)与 LDV 相当。其物理测量容积也已与 LDV 相当,而且特殊处理还可更小。数据需要事后处理,一个切面的数据处理约从几分钟到几小时。

(7)发展趋向:处理数据正在采用新的方法,如用交叉相关法,修正速度梯度(在判读小区内速度不均匀)的影响等,提高速度测量的准确度。实验参考选择、优化方面也做了大量工作,包括采用计算机模拟等方法来确立各种参数的影响,将大大有助于实验设计和试验的成功率^[33,34]。

总之,2D-PIV 技术已走向实用化,一方面将进一步完善高分辨力取得 PIV 底片记录的技术,另一方面将进一步提高判读速度。达到比较方便地应用到流体力学各种实验研究中去。

(8)应用:PIV 技术目前已在湍流,分离涡初步应用中取得重要成果。在某些实验中,其空间分辨力已接近粘性尺度(低 Re 数下,2000 左右)^[9]。在 $Re = 7000$ 槽流中测得的主要湍流数据,如速度型湍流强度,波数谱,雷诺应力,均方根速度值,总剪切应力,高阶量(S 因子, F 因子)均与热线风速仪, LDV 和直接数值模拟 DNS 作了比较,相当一致,结果表明 PIV 可以取得可靠的数据^[11]。今后将会进一步广泛应用。

PIV 应用还存在不少技术问题。其中最主要的是,如何在干扰流动,几何上不失真条件下激光照明和纪录 PIV 底片。许多试验现场存在很多困难。

(9)其它:作者研究小组采用 WLBIV(白光气泡图像测速技术)^[13,14]及电影粒子图像测速技术,应用于绕后向台阶起动涡研究^[16]。取得了一系列起动涡无量纲特性的定量数据,包括涡的速度场和涡量场。其中采用的 WLBIV 技术,用闪光灯替代激光器,氧气泡技术的气泡不需另外布撒粒子,对低速水流中经济,优良应用 PIV 技术有所贡献。

在二维 PIV 技术发展中,还应该提到的一种所谓 DPIV 技术,(数字 PIV 技术),采用电视摄像机或 CCD 摄像机,不需经湿处理,直接记录粒子图象,用处理相继两帧数字图象的交叉相关取得速度向量。其中以 Gharib 和 Y.Hassan 的工作为例^[21,22,26],前者用 512×512 相机取得 3500 点/帧,处理误差约为 3.2%,处理速度为二小时多/帧(Sun 3/160 计算机)。随着 CCD 摄像机分辨力和帧速的提高,这也是 PIV 有吸引力的发展趋势之一。

2. 粒子跟踪测速技术(PTV)

(1) 概述:

本质讲 PTV 技术是 PIV 技术的延伸。两者不同在于, PIV 获取的速度来自观测容积内多个粒子位移(interrogation spot)的统计平均值, PTV 则直接取自单个粒子的位移。因而 PTV 的粒子浓度要低得多, 取得原始速度向量点的位置是随机分布的, (PIV 是按人为的网格分布的)需要用内插建立网格表示图。

PTV 的纪录有多种形式: 早期有带标记的多次曝光粒子图象记录在同一幅图象中。近年来又有由 CCD 摄像机获取的粒子运动图象序列作为纪录。具有无需湿处理, 又可根据图象序列确定速度方向等优点。但也受到当前 CCD 摄相系统水平等限制, 时间、空间分辨力还不高, 精度也不如 PIV。

(2) 主要技术关键

顾明思议, PTV 的关键技术主要是粒子的识别和跟踪。如何从一堆其外形无特殊标记的粒子图象中, 从这幅到下一幅中确定某一粒子的运动纪录序列。

识别跟踪的判别和计算方法目前已有多种, 包括四相继时步法(Four consecutive times/step), 光强(或浓度)分布型交叉相关法, 粒子分布型交叉相关法, 二值图交叉相关法以及四帧法(Four-frame method)^[18]。以上多种方法中可能以 1991 年 Hassan 首先提出的四帧法为好, 能较成功地跟踪粒子的长时间的轨迹。其方法的原理图见图(6), 目前已不仅应用于二维 PTV, 而且也成功地应用于三维 PTV 技术中。

(3) 应用: PTV 技术目前正在广泛应用于流体力学研究中。其中德国 C. Brucker 在涡破裂研究中, 即使采用的还是二维 PTV 技术, 通过对驻点位置变化的观测, 还是对三种涡破裂的形态有了更深刻的认识^[19,20]。

3. 三维粒子测速技术

无论测量一个三维空间的三维速度场, 或是在一个切面上的三维速度场, 都为当今研究热点^[23]。几年前还认为几乎不可能的, 至今也已有了不少重要进展。可以分为基于 PTV, PIV, 全息和特殊四种方法的努力。其中特殊方法是指 Gharib 采用的在相机镜头加一个三孔罩的立体摄相法(一个粒子有三个像。三像重合, 则粒子在焦平面内, 三像的分离度是粒子离焦平面的距离的函数)^[25]类似的途径。如图(7)所示该方法很直捷, 但处理数据不易计算机自动化处理, 这里不着重介绍。另外, 单纯的全息方法尽管原理上显而易见, 实用上至今还没有多大进展, 但结合 PIV 技术的全息 PIV(HPIV)技术已有若干进展, 我们将结合三维 PIV 技术一起讨论。

(1) 3D-PTV 技术进展

采用多台 CCD 摄像机(3 台以上, 4 台最理想), 从不同角度纪录照明的粒子流场。从理论上, 几何学模型, 粒子识别和轨迹跟踪数学方法, 跟踪成功率, 到实际应用于水槽湍流研究都作了成功的探索。其中典型的由 Maas^{[17][18]}和 Kazagi^[24]的工作, 均采用了三台摄像机(512×512, 25 帧/秒)方案, 其实验布置图如图(8)所示, 此外图(9)简要展示了多台相机安排与粒子投影线关系。也都基本采用了四帧法跟踪粒子轨迹。在一个立体容积中取得大约 800-1000 个点速度向量。采用 Sun / 490 工作站, 处理速度约为 20 秒/帧。但速度误差还没有给出。

如果采用高分辨力; 高帧速的摄像机, 其测量速度, 速度向量点数, 测速范围均可提高。此外处理速度仍然主要取决于计算机

(2) 3D-PIV 技术进展

目前已经探索的基本 PIV 技术的在一个切面上取得三维速度场的方法, 主要采用了立体摄影(二台相机)布局的方案, 主要由 Adrain^[12]和 shen^[27]的工作。两者都用双 YAG 脉冲激光器组系统, 原理图如图(4)所示, 用二台相机, 对同一切面(具有厚度)的流场, 同时取得左右两幅二次曝光的粒子图像底片, 分别对左右两幅底片进行判读, 分别得到左右两幅速度分布图, 由对应网格经匹配的左右原速度, 求取离面(Z 方向)速度分量和面内速度分量(x,y 方向)。数据处理均考虑了空气-水折射的影响, 最后得到该切面上的三维速度向量分布。Adrain 改造了传统相机采用了离光轴式的底片安排, 取得了全面积的底片曝光纪录, 也利于提高成像精度, 如图(10)所示。Shen 采用了空间点几何校正法减少系统误差, 对平行相机安排选取了最佳间距。

应该说目前 Arain 的工作代表了此领域最高水平, 对一园转盘水流动, ($100 \times 70 \times 1\text{mm}^3$)取得 3196 个点向量, 估计的位移精度为面内 0.2%, 面外 0.8%。其三维速度分布图如图(11)所示。

显然, 3D-PIV 的数据处理量更为巨大, 采用平行向量处理是一途径, Arain 的判读系统向量处理速度已达 640 MFlops。

此外, 立体摄影的布局也有人(索瑾, Yann G 等)采用单台相机底片左右分幅纪录的方式。

(3) 全息粒子图象测速技术(HPIV)

所谓的全息粒子图象测速技术, 即对全场的粒子采取二次曝光的全息纪录。在重建取得速度向量时采用 PIV 的技术, 即不是跟踪粒子轨迹的方法, 而仍是逐点判读判读小区(包括来自不同方向的图象), 并由此确定第三个方向的速度分量。

这里有 P. J. Bryanston-Cross(U.K), C.S. Moraits(丹麦), S.Green(加拿大)和 Adrain 等人的工作。其中 Adrain 采用了立体全息纪录和立体全息重建的方法, 每一时刻有二幅全息信息纪录, 二次曝光有四幅全息纪录。成功地取得同时十个面的总共 2000 个速度向量, 如图(12)所示。

4. 其它

由于示踪粒子的行为是粒子示踪流场关键, 特别要进行定量测量, 近年来引起关注, 研制了各种用于水流的示踪粒子, 包括有日本公司, TSI 公司的产品, 其密度在 $\rho = 1.05$ 附近的聚合物球状白色粒子, 也有表面具有荧光发光能力的粒子, 和密度更接近 1, 表面镀金属的空心玻璃球粒子。对作为气体的无浮力示踪粒子, 氮气泡也作了更深入的研究, 进行了直到 $Re = 1.5 \times 10^6$ 的实验与数值模拟比较:²⁹

在实时速度场测量方面(不需经湿处理)近年来也继续在做工作, 其中有 Y. Kobayashi 用铁电体液晶空间光调制器作为散斑图象相关系统用于实时速度场测量, 原理上可达到几百帧/秒^[28]。

四、结语

综上所述, 正如美国物理学 2000 年预言那样, 最近十年来, 在追求理想的流体力学观测手段的努力中, 已经取得了重要进展, 特别以粒子为示踪的 PIV、PIV 等技术中, 由二维已经突破了三维的若干关键技术。再经过多年的继续强化支持, 将不仅成熟三维技术, 并将攻克四维技术。作为跨世纪的全场观测技术, 不会很遥远, 一种理想的或者几乎

理想的测试手段定为实现,并将与CFD技术互相渗透,为我们深入认识流动的复杂全尺度时空结构和机理,最后突破湍流等问题提供了乐观的前景。再加上引入纳米机械等高新技术^[30],可以通过对物面的微观分布测量和反馈控制,实施对流场的控制。一个流体力学飞跃发展的时代也定会到来。

限于篇幅和水平,涉及的进展和引文有很多疏漏和省略,敬请谅解。

本文由国家自然科学基金重大项目[1939100-1-3]资助,有马广云,康琦等参加,特此感谢。

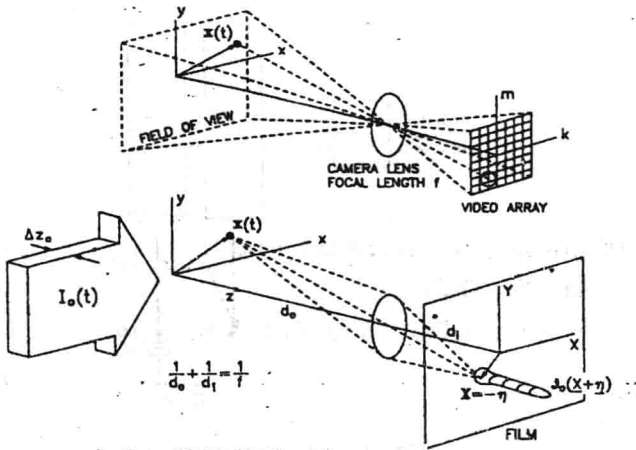
五、参考文献

- [1]R.J. Goldstein "Fluid Mechanics Measurements" HPS (1983)
- [2]A. Roshko "Uses of Flow Visualization in Research" Int. Conf. on Experimental Fluid Mechanics Chengda June 17-21[1991]
- [3]W. Merzkirch "Flow Visualization, 2nd ed" New York Academic [1987]
- [4]申功忻"激光空间流态显示及其应用"中国空气动力学学报No.3, 281-292, [1992]
- [5]R.J. Arain "Multi-point optical measurement of simultaneous vectors in unsteady flow—a review" Int. J. Heat & Fluid Flow 7.127-145 [1986].
- [6]R. J. Adrian "Particle Image Techniques for Experimental Fluid Mechanics" Ann Rev. Fluid Mech 23, 261-304 [1991]
- [7]L Hesslink "Digital Image Processing in Flow Visualization" Ann Rev, Fluid Mech, 20, 421-485 [1988]
- [8]R.J. Arain "Image shifting technique to resolve directional ambiguity in double-pulsed velocimetry Appl Opt 25, 3855-58 [1986]
- [9]Z. C Liu, RJ Arain etc "High resolution measurement of turbulent structure in a channel with PIV" Experiments in Fluids 10, 201-312 [1991]
- [10]C.D. Meinhart R.J. Adrian, etc "A parallel digital processor system for PIV" Meas Sci Technol 4, p619-626 [1993]
- [11]J. G. M. Eggels & R.J. Adrian, etc "Fully developed turbulent pipe flow: a comparison between direct numerical simulation and experiment" JFM vol 268, p175-209 [1994]
- [12]A.K. Prasad, R.J. Adrian "Stereoscopic particle Image velocimetry applied to Liquid Flows" Experiments in Fluids 15, 49-60 [1993]
- [13]申功忻, 马广云, 庄逢甘"白光气泡图象测速技术"航空学报Vol.4, 9, [1993]
- [14]G-X Shen, G-Y, Ma, "White Light Bubble Image Velocimetry" Recent Advances in Experimental Fluid Mechanics Int Pub P454-49 [1992]
- [15]G-Y Ma & G-X Shen "A high accuracy and fast automatic Processing method of Young's fringe pattern in PIV" Chinese j of Aeronautics Vol7,1, P17-22[1994]
- [16]G-X Shen, G-Y Ma "The Investigation on property and structure of a Starting Vortex Flow" 6th Int symp on Appl of Laser Tech to Fluid Mech 10.1 [1992]
- [17]H.G. Maas etc "Particle tracking velocimetry in three-dimensional flows" Part 1, Experiments in Fluids 15, 133-146 [1993]
- [18]H.G. Malik etc "PTV in 3D Flows" part II Experiments in Fluids 15, 279-294 [1993]

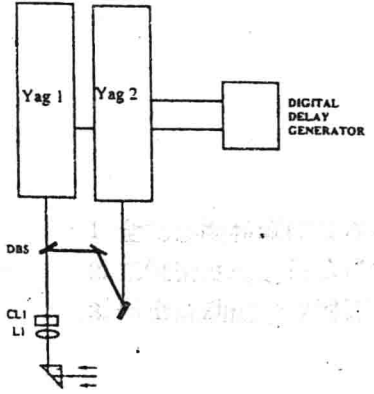
- [19]C. Brucker "Study of vortex breakdown by PTV partus Bubble-type" **Experiments in Fluids**13, 339-349 [1992]
- [20]C. Brucker "Study of Vortex breakdown by PTV part 2 Spiral-type" **Experiments in Fluids** 14, 133-139 [1993]
- [21]D. Dabiri & M. Gharib "Digital Particle Image thermometry: The method & implementation" **Experiments in Fluids** 11, 77-86 (1991)
- [22]Y. Hassan etc "Full-field bubbly flow velocity measurements by digital image pulse laser velocimetry" **Experiments in Fluids**11, 293-301[1991]
- [23]C-J. Chen etc "Quantitative Flow Visualization of 3-D Flows" **Flow Visualization VI** p3-11, (1992.10)
- [24]Y Sata & N. Kasagi "Improvement Toward High Meassment Resolution in 3-D PTV", **Flow VisualizationVI** P792-796 (1992.10)
- [25]M.Gharib, etc "3-D particle imaging with a single camera" **Experiments in Fluids** 12, 353-358 (1992)
- [26]D. Dabiri & M Gharib "Digital PIV" **Experiments in Fluids**10, 181-193(1991)
- [27]G-X Shen, etc "Steroscopic PIV applied to 3-D Vortex flow" 提交7th int, Symp on **Flow Visualization**"(1995.9)
- [28]Yuji Kobayashi etc "Real-time Velocity measurement by the ase of a speckle-pattern correlation systemm that in corporates a ferroelectric liquid-crystal spatial light modulator" **Applied Optics**33, No 14, P2785-94 [1994]
- [29]Michael F, etc "Neutrally buoyant bubbles used as flow tracers in air" **Experiments in Fluids**16, 394-400[1994]
- [30]C.M. Ho, etc "MEMS: Science & Technology" **ASME, FED**vol 197 39-49 [1994]
- [31]W.J. Yang "Handbook of Flow Visualization" [1989]
- [32]D. Rockwell "High Image-density PIV using Laser scanning technique" **Experiments in Fluids** 14 181-192(1993).
- [33]Huang, etc "Limitation and Improvement of PIV" (I) **Experiments in Fluids**15, 168-174 [1993]; (II) **Experiments in Fluids**15, 263-273 [1993]
- [34]G-Y Ma & G-X Shen "Analysis of the Experimental Parameters in PIV" **Proc of the 3D Asian Symp on Visualizatiion** G26 (1994,05)
- [35]Yamamoto "3D PTV Based on Binary cross-Correlation method" **JSME / Int.J**



图(1) (剪切层)空间尺度示意图

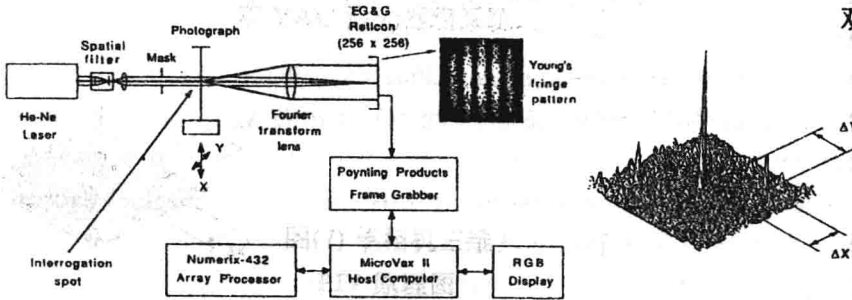


a) PIV 底片纪录示意图



图(4)作为 PIV 光源的

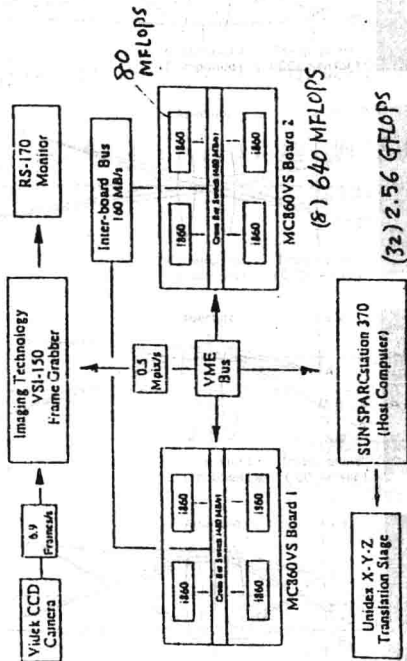
双 YAG 激光器组系统。



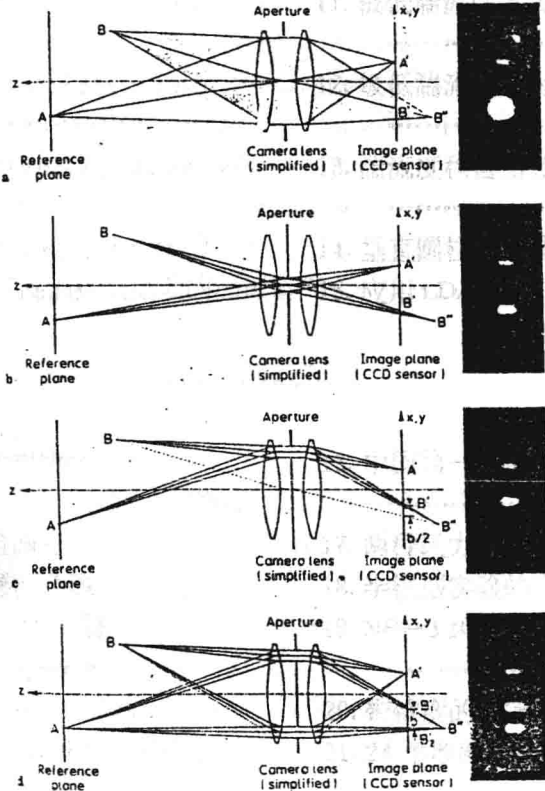
b) PIV 底片自动判读系统示意图

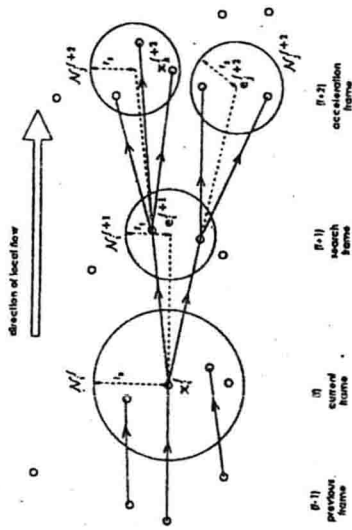
图(3) PIV 原理示意图

图(7) 单相机三维 PIV 原理图

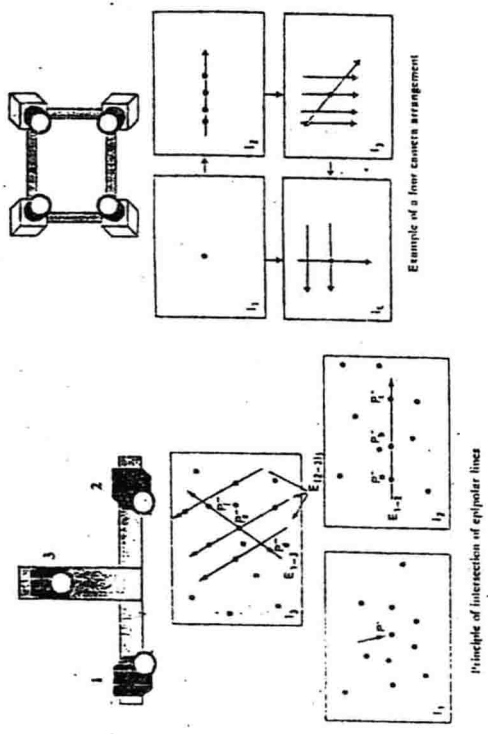


图(5) 采用平行处理器的判读系统



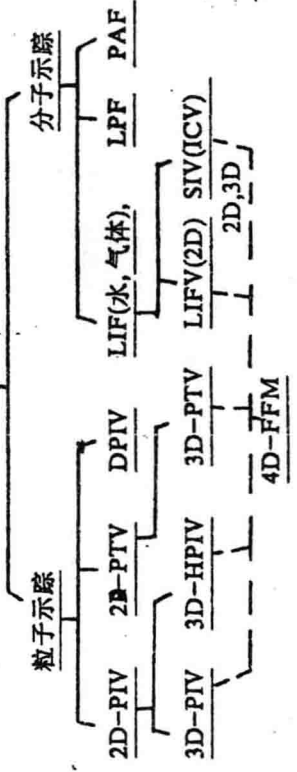


图(6) PTV 的四帧法跟踪粒子轨迹

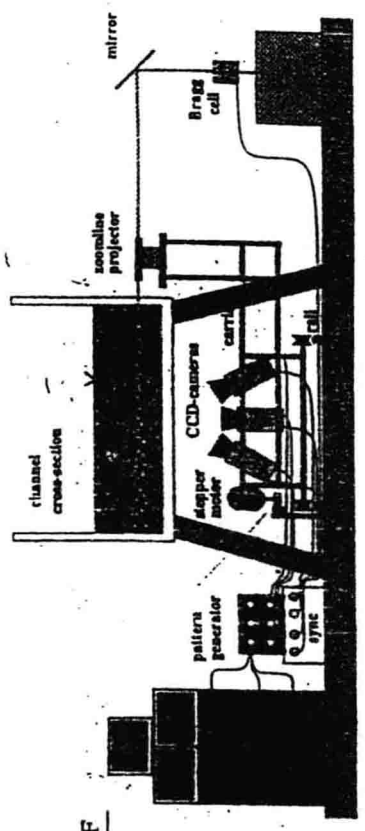


图(9) 多台相机纪录和粒子投影线关系。

激光片光(扫描技术)



图(2) 全场测试技术途径分类发展示意图



图(8) 三维 PTV 的实验布置实例

