

Modern Flow Measurement
Technology and Application

唐洪武 等 编著

现代流动测试

技术及应用



科学出版社
www.sciencep.com

Modern Flow Measurement
Technology and Application

唐洪武 唐立模 陈红 肖洋 陈诚 编著

现代流动测试 技术及应用

科学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要阐述了当前应用于水流流动测量中的各种现代测试技术;系统总结了传统的流动显示方法,并具体介绍了近年来在实验室研究中比较常用的热线热膜测速技术、激光多普勒测速技术、声学多普勒测速技术、激光诱导荧光技术、粒子图像测速技术、大型实体模型表面流场及河势分析测试技术等六种最具代表性的现代流动测试技术;准确、扼要地分析了各种技术的测量原理、系统构造和工作特点,并侧重于使用技术和实用描述;另外,还辅以丰富的应用实例,阐明了这些技术在各自适用领域内的优越性和实用性。

本书兼有学术研究论著和技术应用的特点,可供从事流动测量的科技人员、实验工作者,以及高等院校相关专业的本科生、研究生和教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代流动测试技术及应用/唐洪武等编著. —北京:科学出版社, 2009
ISBN 978-7-03-021821-6

I. 现… II. 唐… III. 水流动—水动力学—测试 IV. TV131.65

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 061247 号

责任编辑:李 敏 王 倩 / 责任校对:钟 洋

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年2月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009年2月第一次印刷 印张: 18 1/2 插页: 6

印数: 1—1 500 字数: 400 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈科印〉)

前 言

研究流体力学问题、揭示流体运动的内在规律，都离不开实验研究技术的进步。流动测试技术是开展实验研究的必要工具和得力臂助，尤其是近年来日益发展的各种现代流动测试技术，对发现流体运动规律，揭示流动的内在本质具有决定性的作用。

本书主要着眼于水流流动测量中的现代测试技术，系统总结了传统的流动显示方法，并具体介绍了近年来在实验室研究中比较常用的热线热膜测速技术、激光多普勒测速技术、声学多普勒测速技术、激光诱导荧光技术、粒子图像测速技术、大型实体模型表面流场及河势分析测试技术等六种最具代表性的现代流动测试技术。行文以总揽各种技术的特点为宗旨，概括了各种技术的原理和工作特点，并结合作者具体的研究应用实例，总结介绍了各种技术的实际应用方法和适用范围，对从事流动测量方面研究的实验科技人员以及高等院校相关专业的师生均具有重要的参考价值。

不同于以往大多数同类专著的是，本书的内容并不囿于单一的特定技术介绍，而是总括了六种当前公认较为先进的现代测试技术，逐一进行了细致分析，并将作者多年的应用经验介绍给读者。限于篇幅，每种技术的理论深度自然不及各专门丛书来得深入，同时极力避免繁琐的数学方程和公式定律推导，但仍力求全面、完整，使得读者可以从本书中了解当前流动测试技术的现状，纵览各种技术的优缺点；同时，本书的编写也着重偏向于实验应用，并给出各种技术成功应用的实例，便于读者迅速学习和掌握适用于自己研究工作特点的流动测试技术。

本书的研究得到了国家自然科学基金项目“多沙河流实体模型表面流场、河势测试理论与分析技术研究”(50479068)、“墩柱周围床面冲刷机理及四面体透水框架群防护特性研究”(50779014)、“含植物河道紊流结构及泥沙运动、污染物扩散输移机理研发”(50879019)、教育部“新世纪优秀人才支持

计划”(NCET-04-0494)、水利部“948”国外先进技术引进项目“水流粒子图像测试系统研究”、江苏省高校研究生科技创新计划等的资助。本书在编写的过程中,得到了河海大学徐友仁教授的全程指导,肖洋、陈诚等参加了部分章节的整理工作。此外,本书引用了华明博士、詹咏博士、高柱博士、吴龙华博士、陈雄波博士、顾正华博士、房世龙博士、吕升奇博士、闫静博士、丁兵博士、张向东博士、陈玛丽硕士、赵淳逸硕士、李舍梅硕士、刘云硕士等的论文和在读期间的研究成果,还得到冷元宝教授、严忠民教授、黄建通高工、周耀庭教授、陈界仁教授、朱立俊教授、王志良高级实验师、徐夕荣高工、王得祥讲师、李最森博士、刘涛博士等的帮助,并参考了众多国内外同行的文献,在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平所限,书中难免存在一些不当之处,敬请广大读者批评指正。

唐洪武

2008年12月于南京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 流动测试的内涵	1
1.2 流动测试技术的研究意义	1
1.3 流动测试技术的发展历程	2
1.4 流动测试技术的前沿	7
第 2 章 流动显示技术	10
2.1 发展历程	10
2.2 流动显示方法	11
2.3 显示设备和装置	33
2.4 数字图像处理	42
2.5 流谱图数据处理	49
第 3 章 热线热膜测速技术	57
3.1 概述	57
3.2 测量原理	58
3.3 系统构成	67
3.4 标定	72
3.5 应用模式	74
3.6 测量影响因素	78
3.7 应用研究	79
第 4 章 激光多普勒测速技术	82
4.1 发展历程	82
4.2 测量原理	84
4.3 光学系统	88
4.4 信号处理技术	95
4.5 速度方向鉴别和频移	104
4.6 多维 LDV 光路	108
4.7 光纤在 LDV 系统中的应用	113
4.8 LDV 的误差分析	120

4.9	LDV 的应用	124
4.10	激光多普勒技术的新进展	135
第5章	声学多普勒测速技术	142
5.1	发展概况	142
5.2	测量原理	143
5.3	系统构成	144
5.4	速度信息的提取与分析方法	146
5.5	ADV 的特点及测量精度	153
5.6	ADV 的应用	155
5.7	ADCP 的发展及应用	165
第6章	激光诱导荧光技术	173
6.1	概述	173
6.2	测量原理及系统构成	174
6.3	浓度场测量	184
6.4	温度场测量	185
6.5	速度场测量	185
6.6	应用研究	186
第7章	粒子图像测速技术	199
7.1	概述	199
7.2	测量原理及系统结构	200
7.3	示踪粒子的选择	203
7.4	速度提取算法	204
7.5	误差分析	215
7.6	三维 PIV	216
7.7	全息粒子图像测速技术	222
7.8	Micro-PIV	224
7.9	两相流 PIV	231
7.10	应用实例	232
第8章	大型实体模型表面流场及河势分析测试技术	241
8.1	背景	241
8.2	表面流场测量	244
8.3	河势测试方法	259
8.4	误差分析	272
8.5	表面流场及河势测量系统在模型黄河试验中的应用	273
参考文献		280
彩图		280

第1章 绪论

1.1 流动测试的内涵

测试是具有试验性质的测量,是以确定被测对象属性量值为目的的探索性认识过程,具有探索、分析和研究的特征。

流动测试技术涵盖了流动测量(flow measurement)和流动显示(flow visualization)两个方面,主要通过试验的方法来研究流体的流动及热量、质量的传输等与流体运动相关的现象。

流动测量的任务是获得流体传输的定量信息,由于流速分布是确定流体运动的主要特性之一,无论在原型观测还是模型试验中,流速这一物理参量都具有重要意义,它既是进行理论分析的出发点,也是验证理论的着眼点,同时还为工程实践提供可靠依据,因此流动测量主要体现为流体运动速度的测量。流动显示也称流动可视化,就是将流体在流动过程中所产生的难以用肉眼看到或者虽然可以看到但不易精确测量流动状况的物理现象,采用某些特定的设备(如摄像头、片光源、示踪剂、计算机等)和方法,以直观的形式显示出来,并可进行记录,进而根据所得资料(如流动谱图)进行定性或定量分析,给出该流动现象的物理解释。流动测量和流动显示相辅相成,是流体力学研究的重要组成部分。通过各种流动显示和测量实验,可以了解复杂的流动现象,探索其物理机制和运动规律,为人们发现新的流动现象、建立新的概念和物理模型提供依据。

本书主要着眼于水流流动测量和流动显示定性、定量技术,力图对该方向上现代流动测试技术的发展做深入探究。

1.2 流动测试技术的研究意义

对水流运动的研究,现已成为一门博大的学科体系,与整个科学技术的进步和工农业的发展息息相关。迄今为止,水力学的研究方法主要可以概括为以下几种:

- 1) 直观的现象观察分析;
- 2) 基本物理特性的样本试验和局部试验;

- 3) 基本运动数学物理方程的建立和分析;
- 4) 现场实体观测;
- 5) 物理比尺模型试验;
- 6) 数学模型数值计算;
- 7) 物理模型与数学模型相互耦合的合交模型试验。

以上所述次序大致符合历史发展的进程,但各种方法并不是随着时间的推移而简单地取代嬗替,不是一个新生,另一个消亡,而是既互相结合交叉,又各自发展改进,不断提高,各种方法都始终保持着生机和活力。不过,由于在实际的流体力学问题中,流动现象极为复杂,即使经过简化,也不一定能加以定量的理论分析;能列出方程并给出边界条件,进而得到解析解的,也只是少数。对水力研究者来说,特别在复杂水流的动力学研究中,数学模型在边界条件、初始条件和参数的确定、三维问题等方面尚有不少困难。因此,实验研究仍然是解决多数流体力学问题的主要方法。

开展实验研究离不开实验仪器和测试手段。测量仪器是人类感官的延伸和扩展,是获取感性认识的工具和物质条件。现代流体力学、空气动力学、热力学、气象学、医学,以及环境工程、化工、航天、水电、能源、燃烧工程等都提出了一系列复杂的流动问题,其中包括高速流、低速流、旋转流、涡流、湍流、管道流、燃烧流、爆破流、冲击流、振荡流、反向流、多相流、大攻角流等,这些流动都需要人们提供新的测量方法和仪器,以适应空间多点化、瞬态多相化的测量要求。

流体力学发展的历史,同时也是流体测量仪器发展的历史,尤其是测速技术的发展,对发现流体运动规律,揭示流动的内在本质具有决定性的作用。流体力学发展到今天,对紊流本质规律的探索仍是研究工作的重点。对紊流的研究,尤其是对紊流相干结构的研究,遇到的最大问题之一就是对紊流瞬时流场的测量问题。由于缺乏足够可信的测量数据,本来极为复杂的紊流研究工作就更加困难,因此探索准确、全面获取流体运动信息的测试技术,就成为现代流体力学研究不得不面对的课题。

1.3 流动测试技术的发展历程

科学上的发现和技术上的发明是从对事物的观察开始的,而对事物的精细观察,就要借助于仪器进行测试,特别是在自然科学和工业生产领域更是如此。作为自然科学的一个分支,水力学领域的研究也不例外。

流动速度是描述流动现象的主要参数,研究流场,首先就是要研究速度场。

因此流速测量是研究流动现象必不可少的一个重要环节。

1.3.1 流动测速技术

早在1732年,法国工程师毕托(Pitot)就发明了毕托管来测量水流的流速。毕托管是建立在一维管道流理论基础之上、通过测量压力来获取流速的,它反映了机械力学发展时期的技术状况。不过毕托当时所用的管子只能测出水流的总压,必须从中减去静压才能算出流速。通常我们所称的毕托管,是普兰特(Prandtl)于1905年提出的装置,它可以同时测出总压和静压。毕托管的主体是一根一端弯曲的细管,将其开口端放在流场中,并正对着流体流动的方向,当液体流入细管中后不再流动,其全部动能转换为势能。实测时,只要将毕托管测量得到的高度值,代入转换公式即可算出流速,如需考虑流体流动的能量损失,则必须将转换公式中加入校正系数,该系数与毕托管的大小、粗细、形状及加工工艺等情况有关,一般由实验确定。实际应用时,毕托管必须正对水流方向,当流速小于 0.1m/s 时,其测量结果误差较大。总体来看,用毕托管测速简单、方便、成本低、易于掌握,在工业生产中应用广泛;不过它的动态性能差,精度不高,一般只用于估计流速的大致范围,或用作深入测量的前导。

同样基于机械能转换理论的还有旋桨流速仪。其基本原理是将固定在传感器支架上的旋桨置于水流中的施测点,旋桨正对水流方向,由于动水压力作用产生转动,水流流速越大,旋桨转动越快。采用适当的传感器和计数器,记下单位时间转数,就可根据率定曲线求出流速。旋桨流速仪电路包括传感器和计数器两部分,根据使用的传感器不同,一般分为三类:电阻式、电感式、光电式。微型旋桨流速仪由于具有不错的精度和性价比,在生产和实验研究中获得了广泛的应用,但它只能进行时均流速的测量,无法准确获得脉动量,而且当对测量结果精度要求较高时,便难以满足需要。

传统的毕托管和旋桨流速仪均不能提供流动的紊动信息,这就制约了流体力学紊流研究的进一步发展,迫切需要一种新的流动测速技术在这方面做出突破。在这样的背景下,热线技术实现了从平均速度测量到脉动速度测量的跨越,成为流动测速技术发展过程中的一大飞跃。

热线热膜测速技术(hot wire/film anemometry, HWFA)的原理性实验是1902年由Shakepear在伯明翰完成的,但限于当时的技术条件,该工作没有继续下去。到1914年,金(King)提出了无限长线和流体之间的热对流理论,推出了著名的King公式,这才奠定了HWFA的理论基础。HWFA建立在热交换原理的基础上,反映了热力学理论和电子技术的发展。在流场中,放置一根通有电流的细而短的金属丝,在只考虑强迫对流的热交换作用下,金属丝的温度会随其周围流体

的流速而变,这种变化和流速之间可以建立一一对应关系,通过检测这种变化即可得到流速。根据使用探针形态的不同,一般分为热线流速仪和热膜流速仪。热线热膜流速仪具有空间和时间分辨率高、背景噪声低、测量范围大、对流体干扰小等优点,在流体实验特别是空气动力学实验中得到了广泛应用。到目前,结合了现代电子技术的 HWFA 测量频响和精度都大大提高了,由于它的探头可以通过长导线引入工作环境恶劣的流场,因而能够用于复杂流场的较高精度测量;不过如果流场范围较小、与探头大小可比时,测量的空间分辨率将受到限制,而且此时探头对流场的影响很大,凸显了接触式测量方法的不足。

鉴于以往的测速技术都有部分器件直接介入流体中,或多或少地对所测流场产生了干扰,因此,众多研究者开始探寻能够不干扰流场的非接触式测速技术,试图在不引入误差的情况下观测流体的真实运动。伴随着这方面的探索,声、光技术逐渐进入流动测速领域,并迅速发展成为主导方向。

利用声波进行水下测量源于 1917 年朗之万开发的声呐技术,这之后各种速度测量方法相继出现,如时间差法、射束位移法、相位差法、多普勒方法等,其中多普勒方法因其对速度变化更为敏感而获得了广泛的应用。声学多普勒流速仪(acoustic Doppler velocimeter, ADV)测量方法的理论基石是多普勒效应。1842 年,奥地利科学家多普勒发现:当观察者向着声源运动时,所接收到的声波会比他在不动的情况下来得频繁,因此,听到的是较高的声调;相反,如果观察者背着声源运动,听到的是较低的声调。假如声源运动而观察者不动,其效应也相同,这就是多普勒现象。后来,人们将这种频率变化称为多普勒频移。多普勒频移与声波的波长成反比,与声学系统的几何参数及粒子的运动速度成正比。当确定波长和几何参数后,只要设法检测出多普勒频移,就可以确定运动的速度。在实际应用中,一般遇到的粒子速度与声速相比要小得多,相应的多普勒频移也就很小,因此,不能直接使用上述原理作为实用的测量方法,而通常采用脉冲相干处理技术。由于 ADV 测量的位置一般距离探头有一段距离,可以近似忽略探头对所测部位水流的干扰,将其归属为非接触式测量方法。ADV 具有三维速度测量、精度高、无需率定、操作简便等优点,不过由于流体本身的性质(如温度、盐度及压力等)对声速有较明显的影响,在利用 ADV 测速时需要准确计算相应条件下的声速才能减少测量误差。

利用多普勒效应测量速度并不是声波的专利。爱因斯坦 1905 年在他的狭义相对论中指出,光波也具有类似的多普勒效应。只要物体会散射光线,就可以利用多普勒效应来测量其速度。激光多普勒流速仪(laser Doppler velocimeter, LDV)为完全的非接触测量,它利用流场中粒子的 Mie 散射,测量散射光相对于原入射激光的多普勒频移量,计算粒子的运动速度。LDV 具有极好的时间分辨率

和空间分辨率,测量精度超过了其他任何方法,因此,它的研究和应用得到迅速发展,如今已成为流速测量的标准技术。然而受制于激光本身的光学性质,LDV在试验应用中对研究条件(如透光度、颗粒浓度等)有较高的要求。

在科学研究中,上述几种方法的共同缺点是只能完成流场的单点(或数点)测量,虽然可实现瞬时测量,但对于复杂非定常流场来说,全流场的瞬时测量结果更有意义。然而这些方法在向多点测量发展时,或多或少地受到了限制,难以实现实用的瞬时全场多点测量系统,于是人们把目光投向了流动显示技术。

1.3.2 流动显示技术

流动显示技术至今已有100多年的历史,它既可用于研究水体表面的流动现象,也可在一定条件下(如水体不是很混浊)用来研究水体内部质点的运动现象。其最大优点是进行非接触测量,对被测对象的流动不产生影响,测量资料更为可靠,并能够提供直观的瞬时全场流动信息,对于研究整体流场的特性有着极大的优势,因而成为实验流体力学发展中一个长盛不衰的研究课题。

人们对流动显示技术本身的理解也在不断地更新。最初流动显示仅仅是作为人们研究一些实验现象的观察手段。例如,1883年雷诺(Reynolds)将染料注入一细长的水平管道中,观察到了由层流转捩到湍流的现象,进而推动了相似定律和雷诺数概念的提出;1888年E. Mach用纹影仪(schlieren)首次摄取到子弹在空气中的超音速流谱照片,揭示了激波现象等。此外,利用烟线、色线、丝线等不同示踪物质的定性流动显示方法相继涌现,这些显示技术为流体力学的研究提供了可靠的可视化物理模型。

1892年,L. Mach研制了被后人称为Mach-Zehnder的干涉仪,使干涉计量术进入了流动显示的领域,开创了流动显示的定量实验技术。这之后,对测量结果的全场显示成为人们研究分析的重要依据,特别是很多逐点的测量结果由于缺乏时间上的同步性,需要借助全场结构上的信息来加以对照,这同时也说明了逐点测速方法受到显示结果的限制,从结构上很难有新的定量发现,如何从显示结果中直接提取定量信息逐渐成为流动显示的发展方向。

光学和计算机图像处理技术的迅速发展,大大提高了流动显示技术的实用程度。传统的显示方法得到很大改进,以前只能提供定性信息的一些手段,现在逐步走向定量化;激光全息术、光学层析术、散斑、干涉、粒子图像测速等方法的出现和发展,为实现瞬时、高分辨率和定量化的空间流场显示提供了可能的途径。

氢气泡技术是水洞实验中常见的一种流动显示方法,在20世纪50年代就已经提出。它是用一根精细的金属丝作为阴极,对它施加一定的电压和电流,由于

水被电解,沿着金属丝就会形成一排气泡,采用片光照明后,便可通过摄影记录气泡随水流运动的走向。经过多年的发展,现在氢气泡技术不但能够进行定性的流动显示,而且可以应用于流场的定量测量。不过,在湍流流动中,由于气泡迅速随湍流扩散,使用氢气泡方法进行流场测量仅限于流动速度小于 30cm/s 的低速流动。

激光诱导荧光技术 (laser induced fluorescence, LIF) 是 20 世纪 70 年代发展起来的,它的测量基础是荧光信号强度与物质浓度之间存在线性关系。将荧光物质添加到流体中,在激光的激发下,产生反映流动特性的荧光信号。通过识别和分析这些信号,可以认识流动现象和获得流动特性。与图像处理方法结合起来,该技术既可以定性揭示流动的内部结构,也可以用于浓度场、温度场、压力场等参量的定量测量。但是, LIF 的荧光物质大多具有一定的毒性,而且在进行定量处理时目前还只能通过标定曲线来完成,因此,这限制了它的测量精度。

粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV) 是粒子示踪法流动显示技术从定性到定量逐步发展起来的一门测速技术。第一次对这种技术进行系统研究的是 Adrain, 他将 PIV 按示踪粒子成像浓度分为激光散斑技术 (laser speckle velocimetry, LSV)、PIV 和粒子跟踪测速技术 (particle tracking velocimetry, PTV)。PIV 以流动显示为基础,利用在流体中散播跟随性好的示踪粒子,在片光的照射下,通过图像记录装置获得包含粒子运动信息的图像,经过图像处理得到粒子的速度,粒子的速度信息即反映了对应流体质点的运动信息。随着现代计算机、芯片、图像处理和 CCD 技术的发展,PIV 技术有了很大进展,特别是二维测量系统,已广泛应用到流体测试中,带来了巨大的社会 and 经济效益,三维 PIV 测量系统也已开始在科学研究中体现出优势。但是 PIV 靠测量流体中示踪粒子的速度来获得流体速度,对示踪粒子的跟随性要求高,示踪粒子在流场中的浓度分布也影响到相关运算效果,而且 PIV 涉及光学、图像处理等技术,其技术本身的发展有赖于各方面科技的进步。

层析 (tomograph) 技术是 1967 年出现的,开始用于医疗诊断和材料的无损探伤,即所谓计算机化断层显像 (computed tomograph, CT), 20 世纪 80 年代中期开始用于流动显示。它是一种先进的计算机辅助流动显示技术,从多方位对流场进行观测,由所得到的“投影”数据重建三维图像,主要用于对三维流场的结构分析。目前已用于重建流场中某些标量的空间图像,如温度、密度、浓度分布等。

光学层析是流动显示中最常用的。阴影、纹影、干涉法等都可以用来得到多方位的“投影”,应用较多的是采用干涉仪与计算机层析结合起来显示和测量三维流场。利用常规的干涉仪层析技术可得到三维密度场和浓度场,利用全息干涉层

析技术还可以得到三维温度场。不同断面的图像可以在不同瞬时得到,也可以在同一瞬时用多方位的干涉照相得到,前者只能用于定常流,后者亦可用于非定常流。不过,层析技术用于流动显示目前仍处于研究阶段,由于多方位照射不是一次完成的,或受时间分辨率的限制,一般还只能用于定常流。如果采用同一瞬时多方位高速层析照相(时间间隔小于 $300\mu\text{s}$),可望扩展到用于非定常流。

随着现代科学技术的发展,流动显示技术用于定量研究已成为现实并日益发展为一个具有巨大潜力的新兴方向。在学术上,国际流动显示会议、中日流动显示学术会议和国际流动动态测量及其应用会议等为各国学者提供了交流的契机,其论文和报告集中地反映了国内外在流动显示技术及应用方面的成果。

从目前流动测量技术的应用来看,非接触式的测量方法越来越受到青睐,并促进了声、光及电子技术在流动测量领域的应用和发展;同时,传统的流速、流场测量方法也仍然保持着活力,各种测量技术在不同的领域和应用环境中各有所长,互为补充。目前常用的流动测试技术的比较见表1-1。

表1-1 常用的流动测试技术的比较

测试技术	测量方式	适用范围/(mm/s)	测量体	跟随粒子
毕托管	接触式	>80	单点	不需要
旋桨流速仪	接触式	>25	单点	不需要
氢气泡技术	非接触式	<300	全场	需要
HWFA	接触式	$<3 \times 10^5$	单点	不需要
LDV	非接触式	$0.01 \sim \text{超音速}$	单点	需要
ADV	非接触式	$0.1 \sim 2\,500$	单点	需要
LIF	非接触式	标定范围	全场	需要
PIV	非接触式	>0.1	全场	需要

1.4 流动测试技术的前沿

当前,科学技术正在经历以光电子和电子计算机为龙头的第三次革命的迅猛发展时期,新的技术、新的产品、新的信息形成速度之快,数量之巨,令人瞠目。与此相应的和科学进步密切相关的流体力学实验及模拟技术也在进行着一次深刻的变革,即进行非定常、空间、多参量、无接触、快速、定量的测试,其中最引人注目的,当属声学多普勒测流剖面仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)、多普勒激光全场测速技术(Doppler global velocimetry, DGV)和三维粒子图像测速技术(3D PIV)。

ADCP根据多普勒原理,应用矢量合成法,遥测流速的垂直剖面分布,可以

真实地反映流场,并且一次可以测量一个剖面上若干层水流速度的三维分量和绝对方向。由于ADCP具有上述优点,它的出现立即引起了海洋界的高度重视。到现在,ADCP测流技术已相当成熟,代表了当今测流技术的先进水平,已被国际海洋学委员会定为4种先进的观测仪器之一,在生产和科学研究领域中有着广阔的应用前景。不过ADCP在测量中存在盲区,需要通过插值计算获取全断面信息,而且声速本身受水体各种性质(如温度等)影响,也会导致测量结果的不确定性。

前已述及,激光多普勒测速主要用于流场的单点测量,虽然不少研究人员曾努力研制成一些用于多点流场测量的装置,但由于这些系统的分光和接收系统结构十分复杂,调整困难,在实用中未能得到推广。20世纪90年代初,出现了一种应用多普勒频移原理测量流场速度的新方法,与粒子图像测速技术类似,它能同时测量一个平面流场中各点的一维速度,通过变更不同的光学几何配置,就可以得到该平面场的三维速度;对多个平面逐一测量,便可得到全场的三维速度,因此该技术被广泛称为多普勒全场测速技术。DGV虽然解决了LDV不能实现的三维测量,但是也增加了频率稳定性、温度等因素的干扰,导致其测量范围和测量精度均不及LDV,因此DGV的进一步发展,还有赖于各种元器件性能和技术水平的提高。

对于三维流场的测量,目前公认精确度比较高的技术应是三维粒子图像测速技术。前面介绍的二维PIV方法采用的是片光光束照明方式,关于三维PIV的测量方法目前主要有全息照相(摄像)法、立体照相(摄像)法等。全息摄像技术是使用激光光束照明颗粒场,并通过一束与照明光束同源的连续的参考光波进行干涉的方式,将散射光记录在全息记录媒体(胶片或磁盘)上,得到的全息图像包含了曝光瞬间冻结的三维颗粒场信息,然后通过分层再现,从该全息图像重建颗粒场的真实空间坐标。立体摄像技术是使用两个以上摄像机从不同方向对示踪粒子的运动进行摄像,根据成像几何学对不同摄像机摄取的粒子图像进行匹配,计算得到单个粒子的三维空间坐标。从测量效果来看,全息摄像技术具有较高的空间分辨率,不存在粒子图像重叠的问题,缺点是存在散斑噪声,采用的光学系统也比较复杂和昂贵,目前尚难以得到广泛的应用。相对来说,立体摄像技术更易于实现,而且对光照的要求也比较低,可以比较容易地得到粒子的三维运动轨迹,但其弱点在于粒子密度较高时粒子成像会出现重叠,从而导致较低的分辨率,而且对多个摄像机的系统进行坐标标定也比较复杂,有待于进一步的改进。

此外,随着粒子图像测速技术的发展,PIV技术在实体河工模型中逐渐获得了广泛应用。在河工模型试验中,往往关注整个模型水域内的流速分布,也就是

流速场的测量。在恒定流情况下,由于水流条件恒定,流速测量一般要求得到某种特定工况下的平均流速场,作为该种工况下的平均流速场;但在非恒定流工况下,流速的测量就要求能够得到瞬时流速场,并给出流速场随时间的变化过程,这就给流速测量手段提出了新的要求。同时,对于动床模型和非定常流动模型,床面和边界形态以及水流的平面走向均在不断的变化之中,特别是对于高含沙河流模型而言,由于人工测量时不可能做到实时分析,不利于对河势变化的研究,迫切需要寻求一种高效、快速的河势测量方法。在这样的背景下,国内许多研究者将传统的 PIV 技术进行了延伸,并逐渐发展成 LSPIV (large scale particle image velocimetry),它可以对模型表面流场进行无接触的瞬时测量,并同步获取模型的河势信息,为河工模型试验研究提供便利条件。与传统的 PIV 技术相比,LSPIV 的测量范围更大,采用的示踪粒子也较大,这就在粒子跟随性方面提出了很高的要求;并且,在对大型模型进行测量时,还存在多摄像机采样的同步、图像的自动搭接以及干湿边界(尤其是心滩)的自动识别等许多问题。这些不足决定了 LSPIV 目前还只是处于研究阶段,要系统地推广和应用还需要进一步的努力。

作为一门应用科学,流动测试技术在许多学科领域中发挥着重要作用,不仅在流体力学、空气动力学、水力学、热工学、农业科学、林业科学、气象学、化学、地质学、医学、生态学领域,而且在环境保护工程、水利工程、航空航天工程等领域都需要对各种流动进行测量,这也推动着流动测试技术本身的不断发展与完善。

本书主要着眼于水流流动测量中的现代测试技术,具体介绍了近年来比较常用的热线热膜测速技术、声学多普勒测速技术、激光多普勒测速技术、激光诱导荧光技术、粒子图像测速技术以及大型实体模型表面流场及河势分析测试技术,并辅以应用实例,希望能够为从事本方向研究的实验技术人员、教师和学生提供帮助。

第2章 流动显示技术

大部分气态或液态的流体都是透明介质，它们的运动用人眼直接观察往往是不可见的。为了辨认流体的运动，必须提供一套使流动可视化的技术，这就是流动显示技术得以广泛应用而又不断发展的基础。

流动显示的一般模式是将流体在流动过程中所产生的难以用肉眼直接观察的物理现象，通过某种特殊的技术以直观的形式显示出来，变成可以直接观察到的流场图案，即流谱图，借此描述有关的流动状态及流动的发展过程，有些显示方法还能给出流动参数的定量结果。此外，流动显示技术本身也是解决实际工程问题的重要手段。因此，流动显示技术对流体力学基本现象的发现和认识、流体力学理论研究、新的概念和物理模型以及数学模型的建立等都具有十分重要的意义。

2.1 发展历程

流动显示技术已有 100 多年的历史，它是随着流体力学的发展而发展起来的。雷诺数的定义、普兰特边界层概念的提出、卡门涡街的研究、湍流拟序结构的发现等，许多流体力学研究中具有跨阶段意义的成果，都是以流动显示的结果为基础的。可以说，流动显示技术的发展对流体力学的发展起着巨大的推动作用。

另外，流动显示技术的发展与科学技术的发展又是密不可分的。在科学技术还比较落后的情况下，学者们仅能通过流动显示对流动现象获取定性的认识；但十几年来，由于工程实践的需要，以及近代光学、激光技术、电子技术、计算机技术、信息处理技术的发展，特别是计算机图像处理技术的发展，不仅提高了显示图像的质量，而且提高了数据处理的速度和精度，逐渐形成了以粒子图像测速、激光诱导荧光等为代表的新一代流动显示技术，获得了精确的定量测量能力，实现了复杂流动的空间结构的瞬态显示与测量，对复杂流动的研究具有重要价值。

流动显示技术随着科学技术的发展不断地完善：测量的速度范围从低速自然流向超音速发展；研究对象从恒定流向非恒定流过渡；应用领域从实验室走向现场测量，并向非接触示踪法扩展；测量成果从定性显示发展到定量分析，特别是与计算机技术结合，对流动显示系统进行实时控制、图像处理和数据处理，把二