

陈启刚 陈槐 钟强 李丹勋 王兴奎 著

高频粒子图像测速系统 原理与实践

清华大学出版社

陈启刚 陈槐 钟强 李丹勋 王兴奎 著

高频粒子图像测速系统 原理与实践

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

高频粒子图像测速是一种采样频率高于流动有效频率 2 倍的全场、无干扰瞬态流场测量技术,是材料技术、激光技术、光学成像技术、数字图像处理技术及计算机技术交叉融合的产物。本书综合介绍了高频粒子图像测速系统的基本原理、硬件组成、主要算法及实际应用。首先回顾了粒子图像测速技术的发展历程,然后以研发一套高频粒子图像测速系统为主线,总结了示踪粒子、光源及光路、相机及镜头、光学成像及数字图像等基础知识,介绍了图像前处理、粒子图像分析及流场后处理的常用方法和算法实现,最后通过明渠紊流、方腔流和黏性底层三个典型应用实例,展示了高频粒子图像测速系统的应用实践。

本书可供流体力学、水利工程、船舶与海洋工程、宇航航空科学与技术、土木工程、环境科学与工程、交通运输工程、动力工程及工程热物理等专业技术人员及高等学校相关专业师生参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

高频粒子图像测速系统原理与实践/陈启刚等著. —北京:清华大学出版社,2017

ISBN 978-7-302-47803-4

I. ①高… II. ①陈… III. ①流速—计量—数字图像处理 IV. ①TB937-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 170608 号

责任编辑:张占奎 刘远星

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:14.75 彩 插:4 字 数:295 千字

版 次:2017 年 9 月第 1 版

印 次:2017 年 9 月第 1 次印刷

定 价:78.00 元

产品编号:070689-01



随着社会经济的快速发展,人们对水动力学、空气动力学等流体力学相关学科的依赖程度越来越高。从代表国家综合制造实力的航天器、飞机、高铁、潜艇、船舶等先进制造业,到反映国家综合建造水平的水利枢纽、特大桥梁、摩天大楼等传统建筑业,均要求对标的物所处的流动环境有越来越精细的定量认识。目前,准确获得流动定量信息的途径,主要为高精度数值模拟和实验测量。因此,开展流动测量技术的研究,对于促进流体力学学科发展,服务“中国制造 2025”“一带一路”等国家发展战略均具有重大意义。

粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)是 20 世纪 80 年代逐步发展起来的一种现代流动测量技术,它充分利用了现代材料技术、激光技术、数字成像技术、计算机技术和图像分析技术的最新发展成果,可以在不接触待测流体的条件下,精确地测得平面内的二维或三维瞬态流场。近年来,激光技术和高速摄像技术的快速发展,进一步推动 PIV 朝着高频、高分辨率、立体化测量方向发展,显著推动了紊流统计理论和相干结构理论的研究与应用。

本书作者所在课题组从 20 世纪末开始从事 PIV 技术的研究工作。在国家自然科学基金仪器专项基金等一批国家级科研项目的资助下,经过近 20 年的持续攻关,在高频 PIV 技术的研发和应用方面取得了较为丰硕的成果,得到了国内外同行的认可。本书是对长期实践中积累的基本理论、技术经验及应用实践的阶段性总结,是一部系统介绍高频 PIV 知识的中文学术著作。与国际上现有的 PIV 专著相比,本书更强调 PIV 技术的实用性。全书以研发和使用一套高频 PIV 系统为主线,首先阐述 PIV 系统的硬件构成及有关理论,然后基于粒子图像基本知识,从图像前处理、粒子图像分析和流场后处理三个方面介绍 PIV 常用处理方法和算法实现,最后以明渠紊流、方腔流和黏性底层三个典型应用为例,展示了高频 PIV 系统优异的性能和广阔的应用前景。

全书分为 7 章。第 1 章绪论,由陈启刚、钟强编写;第 2 章 PIV 硬件系统,由陈启刚、钟强、王兴奎编写;第 3 章粒子图像,由陈启刚、李丹勋编写;第 4 章粒子图像分析,由陈启刚、陈槐编写;第 5 章流场后处理,由陈启刚、钟强、陈槐、王兴奎编写;第 6 章高频 PIV 系统实践,由陈槐、陈启刚编写;第 7 章超高分辨率高频 PIV 系统,由钟强、王兴奎编写。全书由陈



启刚、李丹勋统稿。

由于作者的知识水平、实践范围及认识程度有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2017 年 1 月



第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 PIV 基本原理	5
1.3 PIV 发展历程	7
1.3.1 光源系统	7
1.3.2 成像系统	8
1.3.3 分析方法	8
1.3.4 标准配置	9
1.4 PIV 发展趋势	10
1.4.1 三维粒子图像测速技术	11
1.4.2 高频粒子图像测速技术	12
1.5 PIV 国际交流与合作	13
第 2 章 PIV 硬件系统	15
2.1 示踪粒子	15
2.1.1 跟随性	15
2.1.2 散光性	18
2.1.3 选择与使用	19
2.2 光源	20
2.2.1 激光	20
2.2.2 调 Q 技术	22
2.2.3 双脉冲激光系统	24
2.3 光路	26
2.3.1 高斯光束	26
2.3.2 片光光路	29



2.3.3	体光光路	31
2.3.4	导光设施	33
2.4	相机	35
2.4.1	CCD 相机	35
2.4.2	CMOS 相机	40
2.4.3	CCD 与 CMOS 相机对比	41
2.5	镜头	42
2.5.1	镜头与透镜	43
2.5.2	镜头的光圈	44
2.5.3	镜头的像差	45
2.5.4	镜头的景深	48
2.5.5	镜头的接口	49
第 3 章	粒子图像获取	51
3.1	成像原理	51
3.1.1	简单成像	51
3.1.2	成像分辨率	54
3.1.3	倾斜成像	59
3.2	粒子成像	65
3.2.1	衍射极限成像	65
3.2.2	单粒子成像	67
3.2.3	多粒子成像	68
3.3	拍摄粒子图像	70
3.3.1	图像曝光	70
3.3.2	图像像素化	72
3.3.3	成像噪声	74
3.4	形成数字图像	75
3.4.1	数字图像表示	75
3.4.2	BMP 图像文件	78
3.4.3	TIFF 图像文件	82
3.5	粒子图像合成	85
3.5.1	标准图像	85
3.5.2	流场及参数处理	86

3.5.3 粒子图像合成算法	87
第4章 粒子图像分析	89
4.1 图像前处理	89
4.1.1 背景剔除	89
4.1.2 图像增强	92
4.1.3 图像去噪	95
4.2 流场计算基本方法	97
4.2.1 概述	97
4.2.2 自相关算法	98
4.2.3 互相关算法	99
4.3 流场计算辅助方法	102
4.3.1 窗函数	102
4.3.2 亚像素插值	105
4.3.3 错误矢量剔除	107
4.3.4 流速矢量插补	109
4.4 流场计算高级方法	110
4.4.1 窗口平移	110
4.4.2 图像变形	112
4.4.3 多级网格迭代	115
4.5 特殊处理技术	116
4.5.1 非正方形窗口	116
4.5.2 固体边界处理	117
4.6 误差及优化准则	118
4.6.1 PIV 计算误差	118
4.6.2 判读窗口尺寸影响	120
4.6.3 粒子拖尾影响	124
4.6.4 PIV 优化准则	125
第5章 流场后处理	127
5.1 流场去噪	127
5.2 速度统计参数	128
5.2.1 平均流速	128

5.2.2	高阶速度矩	130
5.2.3	相关与能谱	131
5.3	流速导出变量	135
5.3.1	速度梯度	135
5.3.2	涡量	137
5.3.3	压力场	140
5.4	涡识别方法	143
5.4.1	方法推导	143
5.4.2	方法对比	145
5.5	样本参数分析	149
5.5.1	问题的提出	149
5.5.2	实验及方法	150
5.5.3	采样频率分析	151
5.5.4	采样历时分析	153
5.5.5	参数耦合分析	155
5.5.6	小结	156
第6章	高频 PIV 系统实践	158
6.1	系统搭建方法	158
6.1.1	激光器及光路	158
6.1.2	相机及镜头	160
6.1.3	测架	162
6.1.4	分析软件	163
6.2	系统测试	164
6.2.1	算法检验	164
6.2.2	综合检验	166
6.3	在明渠紊流研究中的应用	168
6.3.1	实验设备及水流条件	168
6.3.2	明渠紊流统计参数	170
6.3.3	涡的演化特征	172
6.3.4	横向涡对雷诺应力的贡献	177
6.3.5	横向涡与净力之间的关系	180
6.4	在方腔流中的应用	187

6.4.1 实验系统及实验条件	187
6.4.2 时均流场结构	189
6.4.3 大尺度环流	192
6.4.4 涡旋的空间分布	196
第 7 章 超高分辨率高频 PIV 系统	199
7.1 基本原理	199
7.2 硬件系统	200
7.2.1 摄像系统	200
7.2.2 光源系统	205
7.3 图像处理与计算方法	206
7.3.1 图像处理	206
7.3.2 粒子匹配算法	208
7.4 黏性底层测量中的应用	209
7.4.1 研究背景	209
7.4.2 实验条件	211
7.4.3 时均流速	212
7.4.4 紊动强度与雷诺应力	212
7.4.5 偏态和峰度系数	214
附录 A 主要符号对照表	216
参考文献	217

第1章 绪 论

1.1 引言

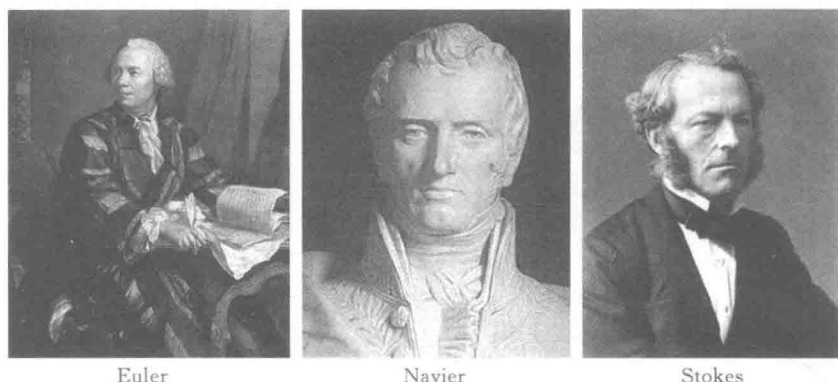
水是生命之源,水流是自然界最常见的流动形态,与人类的生产和生活密切相关。例如,海洋中的洋流促进了地球高低纬度地区的能量交换,是地球表面热环境的主要调节者;河道中的水流侵蚀和搬运地表岩土矿物,是地形地貌的主要塑造者,而大江大河也是现代社会重要的交通动脉;管道中的水流输送人类生产和生活所需的大部分水,是维系现代社会的“心血管系统”。

同其他物理现象的研究历程一样,人类对水流的研究经历从定性描述到定量刻画的过程,其主要转折点是 Euler 方程和 Navier-Stokes 方程的提出。Euler 方程又称理想流体运动方程,由瑞士力学家 L. Euler(1707—1783 年)于 1757 年提出,由于该方程未考虑真实流体的黏性,法国力学家 C. L. Navier(1785—1836 年)对其进行了推广,考虑了分子间的作用力,建立了只含有一个黏性常数的流体平衡和运动方程;1845 年,英国力学家 G. G. Stokes(1819—1903 年)从连续系统的模型出发,改进了 C. L. Navier 提出的流体力学运动方程,得到有两个黏性常数的黏性流体运动方程,即 Navier-Stokes 方程(以下简称 N-S 方程)。

一般情况下,水的可压缩性可以忽略,其对应的 N-S 方程为

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{U} &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} &= \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{U}\end{aligned}\quad (1.1)$$

式中, $\mathbf{U}=(U,V,W)$ 为瞬态流速矢量; $\mathbf{f}$ 为体积力矢量; p 为热力学压强; ρ 为密度; $\nu=\mu/\rho$ 为运动黏性系数; $\nabla=\frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i}+\frac{\partial}{\partial y}\mathbf{j}+\frac{\partial}{\partial z}\mathbf{k}$ 为哈密尔顿算子; $\nabla^2=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2}+\frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 为拉普拉斯



Euler

Navier

Stokes

图 1.1 流体力学大师

算子。

N-S 方程的结构形式表明,流速是水流运动的基本变量,在已知水体内各点流速矢量的基础上,即可求得压力、剪切应力、涡量等所有与水流运动状态有关的未知变量。但是,N-S 方程尽管结构比较简单,但却是典型的非线性偏微分方程,无法通过数学手段解析求解,因此,实验测量和数值计算是目前获得水流流速的主要途径。

在实验流体力学漫长的发展长河中,为了获得水流的运动速度,研究者相继制造了多种流速测量仪器。这些仪器诞生的年代各不相同,也各自具有不同的原理、特点和主要应用领域,大多数仍然在科研、教学和工程领域被广泛使用。

毕托管又称皮托管、测速管或风速管,是已知最早且至今仍被广泛使用的流速测量仪器,源于法国工程师 Henri Pitot 于 1732 年公开发表在《巴黎科学院院报》上的关于测压管的文章。法国科学家 Henry Darcy 于 1845 年对测压管进行了改进,使其成为一种专门的流速测量仪器。毕托管通常由静压探头和总压探头两部分组成,测速原理为

$$u = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}} \quad (1.2)$$

式中, p_t 为总压强; p_s 为静压强。在使用毕托管时,需要已知测量点的流动方向,此外,测压探头通常比水流紊动尺度大,因此,毕托管主要用于水流平均流速的测量。根据测速原理可知,毕托管主要是由两根空心细管组成,一根为总压管,另一根为静压管。测量流速时使总压管下端出口方向正对水流流速方向,静压管下端出口方向与流速垂直。根据结构形式的不同,可以将毕托管分为 L 形和 S 形两类,图 1.2 示意了一种典型的 L 形毕托管。



图 1.2 L 形毕托管

热线/热膜风速仪(HFWA)出现于 20 世纪初,主要包括金属细丝组成的热线探头或金属薄膜组成的热膜探头。金属细丝或薄膜中通过加热电流保持温度恒定,当探头周围的流

速发生变化时,细丝或薄膜的换热量就随之改变,从而产生电信号的变化,通过校准过程,测量电信号的变化量就可以得到实际流场的速度大小。由于热线探头中的细丝极易折断,在高超声速流动中多使用热膜探头(韦青燕,张天宏,2012; Huang et al., 1993b)。此外,由于水流中含有的杂质容易损坏热膜或热丝探头,HWFA 主要应用于气流测量。现代制造和电子技术的发展,不仅显著减小了 HWFA 探头的尺寸,还极大提高了探头响应频率,使得 HWFA 具有较高的响应频率和空间分辨率,可满足紊流测量的要求,但使用 HWFA 时需要将探头置于待测点,会对流场产生干扰。此外,HWFA 一次仅能对单点或几个测点展开测量。手持式热线风速仪如图 1.3 所示。

激光多普勒测速仪(LDV)是伴随着激光技术的兴起而产生的一种高精度流速测量技术。自 1960 年美国加利福尼亚州休斯实验室的科学家梅曼宣布获得人类历史上第一束激光起,实验流体力学迎来了快速发展阶段:1964 年,Yeh 和 Cummins(1964)发现利用流体中细微圆球散射的 He-Ne 激光束的多普勒效应可以实现流速测量,标志着 LDV 技术的开端;1965 年,美国布朗工程公司研制出第一台 LDV 设备(Foreman et al., 1965)。LDV 的基本原理为:将一束单色、相干、准直激光束经分光镜一分为二,两束光经透镜系统聚焦后相交于各自的束腰处形成测量体,当水流中的细微颗粒穿过待测体时,颗粒表面的反射光会发生多普勒频移,利用光电探测器测量探测反射光的拍频,即可获得待测体中细微颗粒的速度,由于细微颗粒跟随水流运动,认为其速度等于待测体处的水流流速(沈熊,2004)。根据激光发射探头与接收探头是否一体,可将 LDV 分为一体式和分体式两类,图 1.4 展示了一种一体式 LDV。由于是激光测量,对于流场没有干扰,测速范围宽,而且由于多普勒频率与速度是线性关系,和该点的温度、压力没有关系,因此,LDV 是目前世界上速度测量精度最高的仪器。

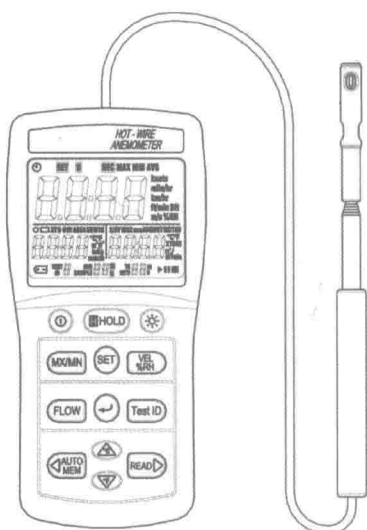


图 1.3 手持式热线风速仪

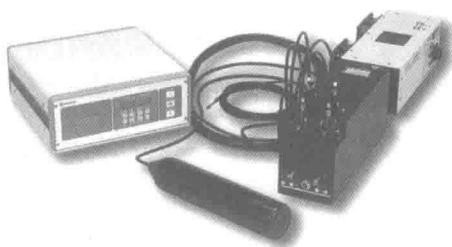


图 1.4 一体式激光多普勒测速仪

声学多普勒流速仪(ADV)是一种专门用于水流的流速测量仪器。第一款商用 ADV 由美国 SonTek 公司于 1994 年左右研制成功(Lohrmann et al., 1995),此后,许多研究者将其用于野外和室内水流的实验研究。ADV 的量测探头主要由一个发射探头和多个分布在发射探头周围的接收探头组成,发射探头发射的声束与接收探头接收的声束相交区域为测量体,测量体距发射探头顶端的距离一般为 5cm 或 10cm(肖洋等, 2002)。ADV 的工作原理为:发射探头发出两个时间滞后分离的声音脉冲,当脉冲通过测量体时,被随水体流动的细微颗粒反射,反射声波被接收探头接收,通过信号处理获得反射声波频率改变量,即可计算并重构出测量体处的三维速度分量。尽管 ADV 已成为一种普遍应用的流速测量仪器,许多研究表明,其输出信号包含水流紊动、剪切、多普勒噪声、信号混叠、仪器振动、壁面等的影响,因而需要经过复杂的后处理技术才可得到较为准确的流速分量(Chanson et al., 2008);此外,受声波波长的影响,ADV 测量体通常较大,使得脉动流速测量精度较低(Dombroski and Crimaldi, 2007)。图 1.5 示意了 SonTek 公司生产的一种声学多普勒流速仪。



图 1.5 声学多普勒流速仪

HWFA、LDV、ADV 等单点流速测量技术显著推动了流体力学的发展,特别是为研究紊流统计理论提供了坚实的实验基础。但是,根据单点流速无法计算流场中的瞬时速度梯度,因而无法求得水流作用于固体边界的瞬时作用力等关键变量。此外,至 Kline 等(1967)在紊流边界层中发现高、低速条带结构以来,紊流中存在相干结构(拟序结构)的基本事实已被普遍认可,对相干结构的研究也被认为是推动紊流研究进展的主要途径之一(Adrian, 2007)。根据 Robinson(1991)提出的定义,相干结构是指紊流中存在的一种三维流动区域,在这个区域内至少有一个基本流动变量(如速度、密度、温度等)与自身或其他变量在大于当地最小时间或空间尺度的范围内存在明显相关关系。显然,利用单点测量技术难以从流动中提取具有空间延展特征的相干结构(连祺祥, 2006)。

为了克服单点测量技术的不足,早期的研究大量使用流动可视化技术(Falco, 1977; Head and Bandyopadhyay, 1981),这种技术通过在流体中非均匀地施放气泡、染色液或烟雾等示踪物质来区别不同的流动结构,为定性认识相干结构提供了大量实验依据。随着计算机技术的快速发展,利用数值计算方法直接求解 N-S 方程在 20 世纪 80 年代末成为现实(Kim et al., 1987),利用直接数值模拟(DNS)提供的大范围、高分辨率、高精度三维流场数据,不仅可以准确计算出所有紊流统计参数作为实验数据的补充(Abe et al., 2001; Hoyas and Jiménez, 2006),更为定性描述和定量研究相干结构提供了最理想的数据基础(Schlatter and Örlü, 2010)。但是,受制于计算机技术和数值计算方法的发展,短期内还无

法将 DNS 技术应用于大尺度、高雷诺数、复杂边界紊流的研究(Wallace, 2009)。因此,开展高精度多点测量实验将是推动紊流基本理论研究的重要手段,而研发比单点测量技术更为先进的流速测量技术以满足相干结构的研究需求则显得尤为必要。具体而言,相干结构的特征对流速测量技术的测量能力提出了两点新的要求:一是要具有以足够空间分辨率同步测量流场中多个测点的二维或三维流速的能力,二是要具有以足够高的时间分辨率跟踪流动结构的动态演变的能力。

1.2 PIV 基本原理

粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术是一种可以无干扰地测量流体中瞬时速度场的测量技术,与单点测量仪器相比,PIV 可以同时测得二维平面或三维立体空间内多个测点的二维或三维流速矢量,是目前实验流体力学领域应用最为广泛的流速测量技术(Westerweel et al., 2013)。图 1.6 示意了一种利用 PIV 在雷诺数 $Re=15800$ 的明渠紊流中实测的二维瞬时流场,为便于观察,已使用 $y=0.4\text{cm}$ 处的平均流速对瞬时流场进行伽利略分解。图中流速矢量之间的间隔为 0.4mm ,流场中可明显观察到涡、喷射等典型的相干结构,充分显示了 PIV 所具有的多点、全场、高分辨率测量能力。除平面二维流场外,目前最新的 PIV 系统已可同时测量平面或立体空间内各点的三维速度分量。

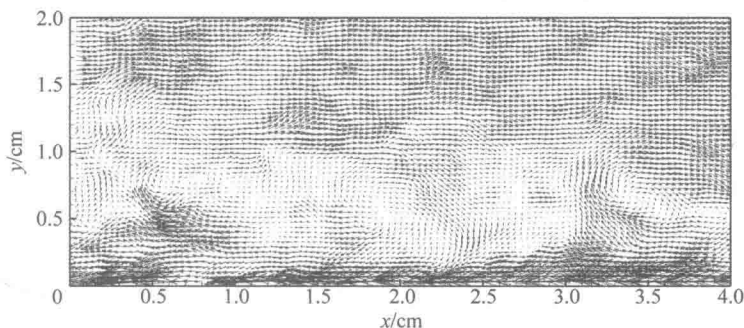


图 1.6 明渠紊流 PIV 实测二维流场

如图 1.7 所示,PIV 测量流体速度的基本原理和步骤是:在待测流体中施放跟随性较好的示踪粒子,将待测区域内的示踪粒子用强度均匀的片光照亮;使用高速相机以固定姿态和时间间隔 Δt 连续两次对被照亮的示踪粒子进行曝光,曝光后的图像分别记录在两张图片中;将图片划分为细小的判读窗口,通过对两张图片中相同位置的判读窗口进行互相关运算得到窗口内粒子的平均位移 Δx ,并根据已知的时间间隔 Δt 求得速度 $u = \Delta x / \Delta t$,该

速度即为判读窗口所覆盖的流体微团的运动速度。

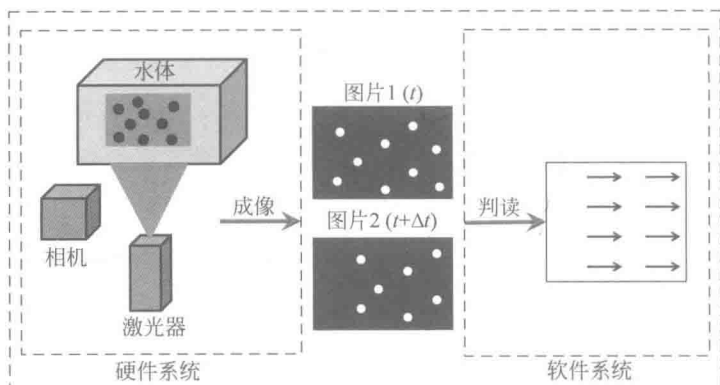


图 1.7 PIV 的基本原理

就其基本原理,PIV 起源于固体力学领域用于测量变形和位移等的激光散斑测速技术 (LSV),最早由 Barker 和 Fournery(1977)等用于测量管道中层流的运动速度。在现代实验流体力学领域,PIV 和 LSV 是两种具有不同适用范围的流速测量技术,为定量区分,Adrian (1984)定义流体中示踪粒子的源密度为

$$N_s = C\Delta z_0 \frac{\pi d_p^2}{4M_0^2} \quad (1.3)$$

式中, C 为单位体积流体中示踪粒子的个数; Δz_0 为片光厚度; d_p 为粒子图像的直径; M_0 为成像放大倍率。Adrian(1984)的分析表明,LSV 适用于示踪粒子的源密度远大于 1 的流动,为了满足这一条件,需要在待测流体中施放大量示踪粒子,这不仅会降低流体的透光性,也会改变流体的密度和黏性等物理特性;同时,粒子散斑图案容易因垂直于测量平面的运动而发生变形,导致前后两次曝光的图案不能准确匹配,不适合用于具有明显三维特征的实际流动。因此,尽管 LSV 在分析方法、硬件组成和测量精度等方面与 PIV 基本一致,但近年来在流体力学领域的应用已鲜有报道(许联锋等, 2003)。

另一种与 PIV 类似的流速测量方法是粒子示踪测速 (PTV) 技术。尽管原理与 PIV 类似,但 PTV 源于流体力学中应用较早的流动可视化技术(Adrian, 1991),最早利用 PTV 定量测量流体运动速度的研究报道可以追溯至 1917 年。PTV 使用与 PIV 相同的方法记录粒子图像,但需要通过对单个粒子图像进行识别和匹配以获得粒子的位移(李丹勋等, 2012),因而仅适用于粒子图像分布较稀疏的情况,若定义粒子图像密度为

$$N_i = \frac{CA_i\Delta z_0}{M_0^2} \quad (1.4)$$

式中, A_i 为判读窗口的面积,则 PTV 适用于粒子图像密度远小于 1 的流动。

上述几种典型粒子图像如图 1.8 所示。

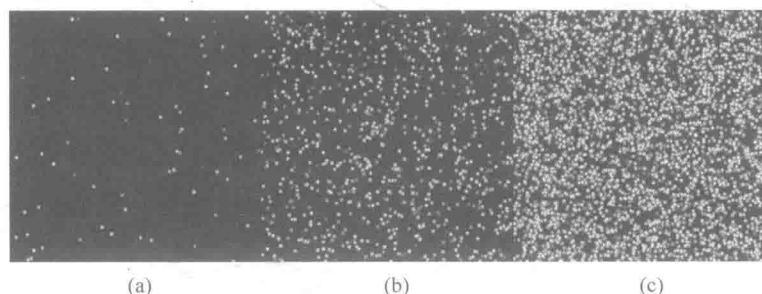


图 1.8 几种典型粒子图像

(a) PTV 图像; (b) PIV 图像; (c) LSV 图像

1.3 PIV 发展历程

根据 PIV 的基本原理,大致可以将 PIV 测量过程分为两个步骤:第一是粒子图像的获取,第二是根据粒子图像计算流速。与之相对应,一套完整的 PIV 系统通常由硬件设备和分析方法两部分组成(魏润杰和申功炘, 2002)。以下将以平面二维 PIV 系统为例分别对这两部分内容的研究历程和发展现状进行简要总结。

1.3.1 光源系统

PIV 的基本原理本质上要求使用强脉冲光源,且脉冲光应满足以下两点要求:一是脉冲的持续时间 δt 足够短,以避免粒子在曝光过程中出现拖尾;二是连续两次脉冲之间的时间间隔 Δt 可调,以提高 PIV 的动态测量范围(Adrian, 1991)。激光是 PIV 系统最常用的光源,根据工作方式的不同可分为连续激光和脉冲激光,其中,脉冲激光可用于低速至超声速流动的测量,而连续激光主要用于低速流动。为了使连续激光具有脉冲光源的特征,PIV 系统使用的连续激光器主要有三种工作模式:一是利用斩波器将连续光束等间隔截断为脉冲光束,再将其扩展为片光(Gray et al., 1991);二是将连续光束循环扫过测量区域(Rockwell et al., 1993);三是将连续光束直接扩展为片光(王龙等, 2008)。脉冲激光器方面,Nd:YAG(钕铝石榴石晶体)激光器和 Nd:YLF(掺钕氟化锂钪晶体)激光器是综合性能最满足 PIV 需求的两类激光器。其中,Nd:YAG 激光器的脉冲能量可达 100 mJ 量级,脉冲频率一般为 10 Hz;而 Nd:YLF 激光器的脉冲能量一般为 1~10 mJ,但频率可达 10