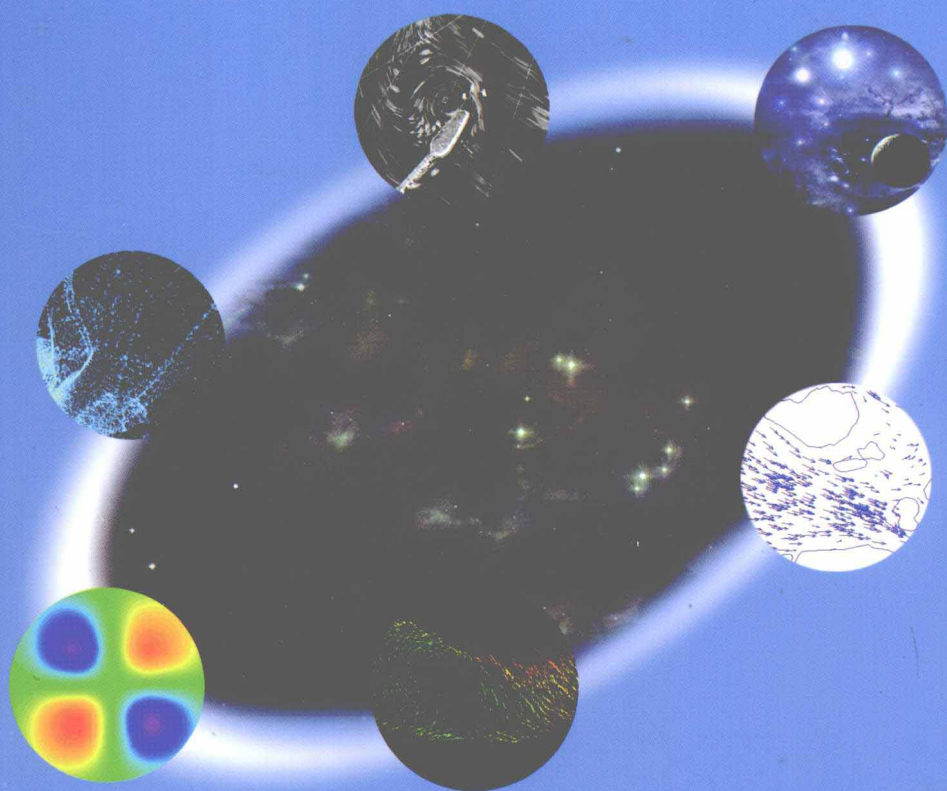


粒子示踪测速技术 原理与应用

李丹勋 曲兆松 禹明忠 王殿常 王兴奎 编著



科学出版社

粒子示踪测速技术原理与应用

李丹勋 曲兆松 禹明忠 王殿常 王兴奎 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

粒子示踪测速(particle tracking velocimetry, PTV)技术是一种基于数字图像处理技术的新型流速测量方法,测量效率和精度都比较高,本书综合介绍了PTV的原理及实际应用。首先简要阐述了数字图像的基础知识,列举了PTV数字图像编程的基本方法,对比了PTV的粒子匹配算法,分析了PTV的测量误差,最后对单镜头平面PTV、多镜头二维PTV及立体PTV的特点及应用分别进行了详细介绍。

本书可供工程力学、水利工程、土木工程、交通工程等专业技术人员及高等学校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

粒子示踪测速技术原理与应用/李丹勋等编著. —北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-035878-3

I. ①粒… II: ①李… III. ①流速-测量方法 IV. ①TB937

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第253708号

责任编辑:余 丁 沈 建/责任校对:朱光兰

责任印制:张 倩/封面设计:陈 敬

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年11月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012年11月第一次印刷 印张:19 3/4

字数:382 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

流体测量技术对于刻画流体运动特征、揭示流体运动规律具有重要作用,而流速测量是流体测量中最基本的内容之一。自然界中最重要的流体是空气和水,二者皆为生命之源,离开其中任何一项,人类的生存繁衍就将即刻停止。正是由于这种密切的依存关系,人类从远古时代就开始对空气和水的流动进行观察和测量。自 19 世纪以来,随着实验流体力学的建立和发展,流速测量进入了快速发展阶段,科技工作者不断开发新型测量设备,众多流速测量技术得到了广泛应用,如旋桨流速仪、超声流速仪、热丝(膜)流速仪、激光多普勒流速仪等,这些现代测速技术对推动流体力学的进步作出了巨大贡献。在这些测速技术中,旋桨流速仪、热丝热膜流速仪和激光多普勒流速仪均属于单点测量技术,测量效率普遍较低;超声流速仪能实现对垂线流速分布的同步测量,但无法完成对二维平面流场的瞬态同步测量,无法对流场进行多维时空相关分析,不适应于对紊流结构的深入探索。

从 20 世纪 70 年代发展起来的粒子图像测速技术 (particle image velocimetry, PIV),是在流动显示的基础上,充分吸收现代计算机技术、光学技术以及图像分析技术的研究成果而发展起来的新一代流动测试技术,能够测量二维流场的瞬时全场流速分布,而且具有较高的分辨率,在紊流的脉动特征、相干结构等研究方面具有很大优势。经过数十年的发展,PIV 技术取得了巨大进步,在实际研究中得到了广泛的应用,目前关于 PIV 技术已有专著出版。

与 PIV 相对应的一个图像测速技术分支是粒子示踪测速 (particle tracking velocimetry, PTV)。在气固、液固等两相流动中,离散的固相颗粒运动特性非常重要,基于图像相关的 PIV 技术无法辨别单个颗粒的运动,而能够追踪颗粒位置的 PTV 技术则体现出显著的优势。PTV 技术可以对单个粒子的运动轨迹进行描绘,不仅能够测量二维流场,而且容易扩展到三维流场的测量当中,其应用日益广泛。传统上学术界常常把 PTV 视为 PIV 的一个分支,目前国内外尚未见有关 PTV 技术的著作出版。

和 PIV 相比,PTV 不论在硬件方面还是在软件方面都有自己鲜明的特点。本书作者结合过去 20 年开发使用 PTV 系统的经验,对 PTV 技术的原理和应用进行了详细介绍。全书分为 8 章。第 1 章为概述,由李丹勋、王龙、王兴奎编写。第 2 章为数字图像基础,由李丹勋、赵超编写。第 3 章为数字图像编程基础,由周才磊、庄锦洪编写。第 4 章为 PTV 匹配算法的对比分析,由胡涛、李丹勋、庄锦洪编写。第 5 章为 PTV 误差分析,由李丹勋、禹明忠、庄锦洪编写。第 6 章为单镜

头平面二维 PTV 系统, 由王殿常、禹明忠、李丹勋编写。第 7 章为多相机平面二维 PTV 系统, 由曲兆松、禹明忠、王兴奎编写。第 8 章为三维立体 PTV 系统, 由唐立模、王兴奎编写。全书由李丹勋、王兴奎统稿。

限于作者的知识水平、实践范围及思考深度, 书中肯定存在遗漏、不足之处, 恳请读者批评指正。

作 者

2012 年 3 月 5 日

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 粒子图像测速技术	4
1.2.1 粒子图像测速技术基本原理	5
1.2.2 粒子图像测速技术分类	5
1.2.3 PTV 系统的组成	7
1.2.4 典型 PTV 系统示例	14
第 2 章 数字图像基础	16
2.1 图像的基本概念	16
2.1.1 图像的定义	16
2.1.2 图像的分类	16
2.1.3 数字图像的基本参数	17
2.2 数字图像采集方法	20
2.2.1 数字照相机	20
2.2.2 数字摄像机	26
2.2.3 模拟摄像机 + 计算机图像采集卡	28
2.3 数字图像存储方法	31
2.3.1 存储器	31
2.3.2 文件存储格式	32
2.4 数字图像处理基础	37
2.4.1 图像增强与平滑	38
2.4.2 图像分割	42
2.4.3 图像边缘检测与提取	45
2.4.4 图像几何参数计算	46
第 3 章 数字图像编程基础	47
3.1 图像编程概述	47
3.1.1 图像编程内容与编程环境	47
3.1.2 数字图像基础	48
3.1.3 位图基础: DDB 与 DIB	49

3.1.4	建立 CDib 类	52
3.2	图像的显示、读取与存储	55
3.2.1	设备上下文、调色板和灰度直方图	55
3.2.2	图像的存取编程	57
3.2.3	显示图像	60
3.3	图像的二值化	62
3.3.1	简单的灰度变换	62
3.3.2	非零元素取一法	63
3.3.3	固定阈值法	64
3.3.4	双固定阈值法	65
3.4	图像的阈值分割	67
3.4.1	阈值分割概述	67
3.4.2	直方图门限选择	68
3.4.3	半阈值选择分割	70
3.4.4	迭代阈值分割	71
3.5	图像的轮廓提取	73
3.5.1	轮廓提取概述	73
3.5.2	轮廓提取法	74
3.5.3	边界跟踪法	75
3.6	图像测量	78
3.6.1	图像区域标记	78
3.6.2	面积测量	83
3.6.3	周长测量	84
3.6.4	质心测量	86
3.7	绘图基础	87
3.7.1	创建自己的图像	87
3.7.2	圆形	88
3.7.3	矩形	91
3.7.4	三角形	92
3.8	模拟图像的数字化编程	98
3.8.1	图像数字化设备	98
3.8.2	图像采集卡编程	100
3.8.3	示例	103
第 4 章	PTV 匹配算法的对比分析	105
4.1	常用 PTV 匹配算法的原理	105

4.1.1	单独研究单个粒子的 PTV 算法	106
4.1.2	结合附近粒子研究单个粒子配对的 PTV 算法	108
4.2	PTV 匹配算法的评价方法	120
4.2.1	评价标准与评价方法	120
4.2.2	标准图像	121
4.3	常用 PTV 匹配算法的对比分析	123
4.3.1	水平粒子流动	123
4.3.2	波浪型粒子流动	128
4.3.3	漩涡型粒子流动	134
4.3.4	不同流场处理结果的讨论分析	138
4.4	本章小结	139
4.4.1	PTV 算法呈多样化趋势	139
4.4.2	不同的 PTV 算法的计算效率差异较大	139
4.4.3	不同 PTV 算法的计算精度差异较大	141
第 5 章	PTV 误差分析	144
5.1	PTV 误差概述	144
5.1.1	主要误差来源	144
5.1.2	PTV 误差分析方法	147
5.2	镜头变形的校正	150
5.2.1	试验方法和组次	150
5.2.2	测量结果	151
5.2.3	校正分析	153
5.3	流速梯度引起的误差分析	155
5.3.1	引言	155
5.3.2	平均速度与均方根速度	156
5.3.3	简单流动中误差估计	158
5.3.4	明渠紊流测速的误差分析	158
5.3.5	小结	163
5.4	浓度梯度引起的误差分析	163
5.4.1	误差形式	163
5.4.2	误差分析	165
5.4.3	误差估计	167
5.4.4	确定合适的窗口尺寸	169
第 6 章	单镜头平面二维 PTV 系统	171
6.1	系统的组成	171

6.1.1	硬件系统	171
6.1.2	软件系统	172
6.2	应用实例 I: 泥沙颗粒的脉动特性	185
6.2.1	实验系统与水流条件	185
6.2.2	轻质沙的脉动特性	190
6.2.3	玻璃砂的脉动特性	201
6.3	应用实例 II: 近壁区颗粒的运动特征	207
6.3.1	引言	207
6.3.2	实验系统与水流条件	208
6.3.3	颗粒的运动轨迹	213
6.3.4	颗粒纵向运动速度分布	216
6.3.5	颗粒垂向运动速度分布	219
6.4	明槽水流中颗粒运动的力学机理	221
6.4.1	纵向受力	222
6.4.2	垂向受力	222
第 7 章	多相机平面二维 PTV 系统	225
7.1	引言	225
7.2	硬件系统	226
7.2.1	采集模块	227
7.2.2	传输模块	227
7.2.3	控制模块	228
7.3	软件系统	228
7.3.1	系统结构	228
7.3.2	采集模块	229
7.3.3	后处理模块	229
7.3.4	标定模块	230
7.4	系统特点	231
7.4.1	时间同步	231
7.4.2	示踪粒子	232
7.4.3	局域网扩展	234
7.5	三维表现	236
7.5.1	流场数据的三维可视化表现	236
7.5.2	流场可视化设置	237
7.5.3	流速查询	238

7.5.4	流场数据与三维场景的一体化表现	239
7.6	多相机 PTV 系统应用	239
7.6.1	三峡坝区泥沙模型试验	239
7.6.2	连云港核电站泥沙模型试验	242
7.6.3	上海洋山港模型试验	244
7.6.4	株洲航电枢纽模型试验	246
7.6.5	港珠澳大桥总体方案深化研究及工程物理模型试验	247
第 8 章	三维立体 PTV 系统	249
8.1	引言	249
8.2	系统组成及其特点	250
8.2.1	系统组成	250
8.2.2	采集数字图像序列	251
8.2.3	粒子匹配	254
8.2.4	摄像机标定及坐标转换	255
8.2.5	测量精度及误差分析	259
8.3	推移质颗粒平均运动规律	261
8.3.1	试验方法	261
8.3.2	试验条件	261
8.3.3	颗粒的纵向速度	264
8.3.4	颗粒摩擦系数	269
8.4	推移质颗粒运动的紊动特性	270
8.4.1	计算方法	271
8.4.2	实测资料	271
8.4.3	颗粒的纵向紊动特性	273
8.4.4	颗粒的垂向紊动特性	275
8.4.5	颗粒的横向紊动特性	277
8.4.6	推移层内的平均紊动特性	278
8.5	推移质运动速度的概率密度分布	280
8.5.1	概率密度分布沿垂向的变化	280
8.5.2	概率密度分布的偏态系数和峰态系数	282
8.5.3	概率密度分布平均特性的影响因素	285
8.5.4	小结	289
8.6	推移质单步运动的统计规律	289

8.6.1	颗粒运动形式	289
8.6.2	实测资料	290
8.6.3	典型跃移颗粒单步运动分析	291
8.6.4	单步运动参数的概率密度分布	293
8.6.5	跃移速度的概率密度分布	296
8.6.6	小结	299
参考文献		300

第1章 概 述

1.1 引 言

从阿基米德建立液体平衡理论到现在,流体力学已经有了两千多年的历史。流体力学发展的历史,也可以说是一部流体测量技术发展的历史。流体运动具有复杂性和多变性,在理论分析存在困难时,流体测量技术对于发现流体运动特征、揭示流体运动规律具有决定作用。

流速测量是流体力学研究最基本的工作之一,这里流速指的是流体运动的速度。流体主要包括气体和液体两种,空气和水是人们最常见的气体 and 液体。空气和水皆为生命之源,离开其中任何一项,人类的生存繁衍就将即刻停止。正是由于这种密切的依存关系,人类从远古时代就开始对空气和水的流动进行观察和测量。流速是描述流体运动最直观、最重要的指标之一,也是流体力学方程中的基本参数之一。进入 19 世纪以来,随着实验流体力学的建立和发展,流速测量进入了快速发展阶段,科技工作者不断开发新型测量设备,众多流速测量技术得到了广泛应用。

流速是矢量,要测定流速,需要量测其瞬时大小及方向;将一定时间内测得的瞬时值统计平均后,则可求得流速的时均值大小。

流速测量的方法多种多样,但任何一种方法都有局限性,有一定的适应范围。在实际工作中,需要根据被测流场的具体特点,根据测量的目的和要求来选择合适的方法(仪器)。一般来讲,评价流速测量方法有四个主要指标——测量范围(量程)、测量精度、采集频率和测速维数。

测量范围指的是仪器能够测得的最小流速和最大流速之间的范围,对于特定的仪器来讲,常称为仪器的量程。自然界中流速分布的范围非常广,最高流速和最低流速差别极大。例如精密微量注射泵中的流体速度最低可至 10^{-8}m/s 以下,特殊地层渗流速度甚至更低至 10^{-9}m/s 。高速流体的例子也比比皆是,例如水库溢洪道泄洪时水流流速可达 30m/s 以上,超强台风(16 级以上)中心的最大风速超过 50m/s ,而在用于导弹、人造卫星、航天飞机的模型实验的风洞中,气流速度超过音速形成超音速气流。若采用凝结温度极低的氦气作实验气体,风洞气流马赫数可达到 40 以上,速度超过 10^4m/s 。极低和极高流速的测量都存在很大的困难,需要使用专门的仪器设备。

测量精度是指仪器测量的精确细密程度,即测定值与真值相符合的程度,也称

为精确度或准确度。测量的精度常常由与其概念相反的测量不精确度来表示,指包括所有系统误差和随机误差在内的综合极限误差,用来表达测量结果与真值间差别的程度。任何流速测量设备都不可能达到绝对精确,总会存在由各种原因导致的误差。为使流速测量结果准确可靠,应深入了解测量仪器设备的原理与适用性,正确评估系统误差的影响,尽量减小随机误差。

采集频率指的是仪器设备在工作状态下数据采集输出频率。对于恒定流而言,由于流速不随时间变动,所以测量仪器的采集频率高低只影响试验效率,并不影响测量结果的精度。对于非恒定流,由于流动状态时刻都在变化,若仪器的采集频率较低,则难以测得真实的瞬时流速场。在一般明渠流动中,流场脉动频率基本在 100Hz 以下,根据两倍频率采样定理的要求,测量设备的采集频率至少为 200Hz 才能捕捉流动的脉动特征。

测速维数指的是测得流速在 x 、 y 、 z 三个方向的分量数。自然界或实验室内的实际流速大都是三维的,早期仪器设备只能测单向一维流速,目前三维流速仪已经逐渐成熟并得到广泛应用。

流速测量方法纷繁多样,为便于选择比较,表 1-1 对各种流速测量仪器进行了简单分类。需要指出的是,仪器量程大小、测量精度高低、测量频率大小等分类准则是相对的,不是绝对的。例如,在一般水流流动研究中,超过 10m/s 的流速通常就称为高速水流;而在气体流动中,高速流动的门槛要明显高一些。

表 1-1 流速测量方法分类

分类准则	具体分类		
测量范围	低速	中速	高速
测量精度	低精度	中精度	高精度
测量频率	低频	中频	高频
测速维数	一维	二维	三维
测量原理	机械式	光电式	声学式
测量模式	直接式	间接式	
	单点式	平面式	
	接触式	非接触式	

水流流速测量的仪器和方法多种多样,其适应范围各不相同,下面做一简要介绍。

1) 毕托管测速法

毕托管测速法是根据水流能量方程,得到速度与压强差之间的关系,可得到量测点的时均流速值。其主要优点是使用简单,但精度较低。

2) 悬浆流速仪测速法

水流的冲击力作用于旋桨推动转子转动,根据转子单位时间内的转数,可间接

测得流速。根据测定转数的方式不同,悬浆流速仪可分为电阻式、电感式和光电式等。悬浆流速仪属于单点、低频、一维、接触式测量方法,对被测流场干扰较大。由于存在摩擦阻力矩,在被测流速较小的情况下,悬浆不能启动,因此该方法无法测出较低的流速,不适合实验室高精度测量。

3) 超声流速仪测速法

超声流速仪的工作原理是多普勒效应,根据发出辐射波和接收到的反射波之间的频移(频率差),可以计算出流速大小。若超声波使用微波波段,可以很好地在空气中传播,衰减较小。

超声流速仪有多种类型。最简单的是单点流速测量,一组收发换能器只能测量一个点的流动速度,测量效率较低。声学多普勒剖面流速仪(acoustic Doppler current profiler, ADCP)能够接收不同水深处返回的声波,根据各自的多普勒频移,用矢量合成法,可以测出一条测速垂线上各点的流速。若将仪器装在船上,驶过整个断面,在各个垂线处测量,可以快速测得整个断面上的流速分布。

与机械转子式流速仪不同,超声流速仪没有可动部分,不需要复杂的维护保养,因此其可靠性很高,也不受水中漂浮物的影响。其测速迅速,精度也较高,测速范围很广,而且适合长时间自动运行,实现流速长期自记。

4) 热线测速仪测速法(HWA)

热线流速仪的基本原理是将一根细的金属丝放在流体中,通电流加热金属丝,使其温度高于流体的温度(因此将金属丝称为“热线”),当流体沿垂直方向流过金属丝时,将带走金属丝的一部分热量,使金属丝温度下降。通过测量热线两端的电压,即可确定流速。

热线测速仪的优点是体积小,对流场干扰小,适用范围广,频率响应高,测量精度高,重复性好;其缺点在于探头对流场造成一定干扰,而且热线容易断裂,维护困难。

5) 激光多普勒测速仪测速法(LDA 或 LDV)

激光流速仪是通过示踪粒子的速度与激光多普勒频移信号之间的线性关系得到速度。激光测量测速范围宽,对于流场没有任何干扰,是目前速度测量精度最高的仪器之一。

激光多普勒测速的工作原理可以用干涉条纹来说明。当聚焦透镜把两束入射光会聚后,由于激光束良好的相干性,在会聚点上形成明暗相间的干涉条纹,条纹间隔与光波波长成正比,与半交角的正弦值成反比。当流体中的粒子从条纹区的方向经过时,会依次散射出一列散射光波,光强随时间变化,称为多普勒信号。经过条纹区粒子的速度越高,多普勒频移就越高。将垂直于条纹方向上的粒子速度除以条纹间隔,再考虑流体的折射率,就能得到多普勒频移与流体速度之间的线性关系。

激光多普勒测速仪系统从功能上分为光路部分与信号处理部分, 其中光路部分采用He-Ni激光器或 Ar 离子激光器, 提供高功率的 514.5nm、488nm、476.5nm 三种波长的激光。带有频移装置的分光器将激光分成等强度的两束, 经过单模保偏光纤和光纤耦合器, 将激光送到激光发射探头, 调整激光在光腰部分聚焦在同一点, 以保证最小的测量体积, 这一点就是测量体即光学探头。接受探头将接收到的多普勒信号送到光电倍增管转化为电信号, 然后处理并发大, 配套系统软件可以进行数据处理工作得到流速值。

激光流速仪的主要技术指标如下: 测速维数 1~3 维, 测速精度 0.1%, 最大测量速度超过 10^4m/s 。

6) 激光多普勒动态粒子分析仪测速法 (PDA)

PDA 由发射光路系统、接收光路系统、信号处理系统、全自动 1~3 维位移系统、计算机及应用软件等部分组成, 可实现对液体流动或气体流动中的球形粒子、液滴或气泡的尺寸、速度和浓度的实时同步无接触测量, 可进行测量的粒子尺寸范围从微米级到厘米量级。

相位多普勒原理是用于流速测量的 LDA 系统的多普勒原理的引伸, 具有精度高、可信度高和易于使用的特点, 使其适用于科技和工业上绝大多数的应用场合。其测量范围与精度如下:

- (1) 粒子尺寸测量范围: $0.5\sim13000\mu\text{m}$ (根据光路配置与布置而定)。
- (2) 粒子尺寸测量精度: 0.5%。
- (3) 测量范围: 根据光路系统的布置可达到音速以上或更高。
- (4) 速度测量精度: 0.5%。

1.2 粒子图像测速技术

旋桨流速仪、超声流速仪、热丝流速仪、热膜流速仪、激光多普勒流速仪等现代测速技术的发展对推动流体力学的发展作出了巨大贡献, 但在这些测速技术中, 旋桨流速仪、热丝热膜流速仪和激光多普勒流速仪均属于单点测量技术, 测量效率普遍偏低; 而超声流速仪只能实现对垂线流速分布的同步测量, 难以完成对二维面流场的瞬态同步测量, 无法对流场进行多维时空相关分析, 不适用于对紊流结构的深入探索。

从 20 世纪 70 年代发展起来的粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术是在流动显示的基础上, 充分吸收现代计算机技术、光学技术以及图像分析技术的研究成果而发展起来的新一代流动测速技术, 能够测量二维流场的瞬时全场流速分布, 而且具有较高的分辨率, 在对紊流的脉动特征、相干结构等研究方面具有很大优势。经过数十年的发展, PIV 技术得到了巨大进步, 在实际研究中得到了

广泛的应用。

与 PIV 技术相对应的一个图像测速技术分支是粒子示踪测速 (particle tracking velocimetry, PTV) 技术。在气固、液固等两相流动中, 离散的固相颗粒运动特性非常重要, 但基于图像相关的 PIV 技术无法辨别单个颗粒的运动, 而基于颗粒位置相关的 PTV 技术则体现出显著的优势。PTV 技术可以对单个粒子的运动轨迹进行描绘, 不仅能够测量二维流场, 而且容易扩展到三维流场的测量当中, 其应用日益广泛。

1.2.1 粒子图像测速技术基本原理

图像测速技术是由流动显示技术发展而来的, 而流动显示技术是一种定性获得流体流动图形的技术, 已有一百多年的历史。流体力学中的许多重要发现, 例如紊动猝发现象, 最初都得益于流动显示技术的应用。与流动显示技术不同的是, 图像测速技术不仅要定性地表现出流体的流动图形, 还要定量地取得全流场的流速数据。与传统的流速测量手段相比, 图像测速技术不干扰流场, 而且处理的信息量大, 可同时进行多点测量, 迅速地获取全流场的流速数据。

图像测速技术的工作原理是在流体中散播标记物(一般为粒子、气泡或分子标记物), 将反映标记物运动的图像记录在胶片或录像带上, 通过图像处理和分析得到标记物在时间 Δt 内的位移 S , 从而得到流场速度 V , 即

$$V = S/\Delta t \quad (1-1)$$

以微细颗粒来作为标记物 (示踪粒子) 的图像测速技术一般称为粒子图像测速技术。

1.2.2 粒子图像测速技术分类

粒子图像测速技术按照不同的标准可以分成不同的类别。目前主要有以下几种分类方法。

1. 按粒子密度分类

根据示踪粒子浓度的大小不同, 可把粒子图像测速技术分为三种模式:

1) 激光散斑测速技术 (LSV)

当流体中示踪粒子的浓度很大时, 示踪粒子的图像在成像面上互相重叠, 无法区分和识别单个粒子。但在相干光源的照射下, 随机分布的粒子图像之间的随机相差会产生激光散斑, 因此可以利用散斑的特性来计算流体的速度, 此种模式通常被称为激光散斑测速技术。

2) 粒子跟踪测速技术 (PTV)

当流体中示踪粒子的浓度很低时, 示踪粒子的图像在成像面上基本上不重叠, 因此能够跟踪单个粒子的运动, 通过测量它们的位移来确定流体的速度, 此种模式

通常被称为粒子跟踪测速技术。对于 PTV 技术目前尚未见完整和系统的专著。

根据图像记录方式的不同,PTV 可以分成单帧单脉冲、单帧多脉冲和多帧单脉冲三种形式。

(1) 单帧单脉冲方式:对单帧图像进行操作,使用一个单独的矩形脉冲来形成粒子的曝光轨迹,粒子的曝光轨迹表现为一条短线。

(2) 单帧多脉冲方式:对单帧图像进行操作,使用多个瞬时脉冲来形成粒子的曝光轨迹,粒子的曝光轨迹表现为一系列的点。

(3) 多帧单脉冲方式:采用摄像机进行连续拍摄,得到多帧连续图像序列,使用一个单独的矩形脉冲来形成粒子的曝光轨迹,粒子的曝光轨迹表现为连续图像序列中相对应的点。

在这三种形式中,单帧单脉冲方式最简单,不需要进行粒子匹配,但是相应的测量误差也比较大,而且得到的流场图无法辨别流动方向。单帧多脉冲方式比单帧单脉冲方式要复杂得多,需要对多次曝光的粒子进行正确的匹配,测量精度也比单帧单脉冲方式高一些,但它依然无法辨别流体的流动方向,而且不同时刻的粒子图像可能会发生重叠,会影响到粒子图像分割和粒子匹配的准确性。多帧单脉冲方式是最复杂的一种,可以在一段时间内持续跟踪示踪粒子的运动,所以测量精度更高,而且它不仅可以获得粒子速度的大小,还可以判断出粒子速度的方向,完全避免了方向模糊以及粒子图像重叠的问题。由于多帧单脉冲方式具有显著的优越性,所以在 PTV 技术中获得了更多的应用。

3) 粒子图像测速技术 (PIV)

当流体中示踪粒子的浓度介于 LSV 和 PTV 之间时,示踪粒子的浓度不足以产生激光散斑现象,也难以跟踪单个示踪粒子的运动,此时只能通过测量某一小区域(诊断窗口)中粒子的平均位移来得到该区域中心处的流体速度,此种模式即通常意义上的粒子图像测速技术。

目前,针对一般的流体测量需求,已开发出商业化的 PIV 系统,如美国的 TSI 公司、德国的 Lavision 公司和丹麦的 Dantec 公司等均有定型的商业化 PIV 系统出售,国内 PIV 技术自主开发和应用起步较晚,目前尚无得到广泛认可的具有自主知识产权的国产 PIV 系统。

对于 PIV 技术已有不少专著出版,如 Springer 出版的 *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide* 和 Kluwer Academic Publishers 出版的 *Particle Image Velocimetry: Progress Towards Industrial Applications*。

2. 按成像介质分类

根据成像介质的不同,粒子图像测速技术可以分为 G-PIV/PTV (graphic PIV/PTV velocimetry) 和 D-PTV(digital PIV/PTV) 两种。