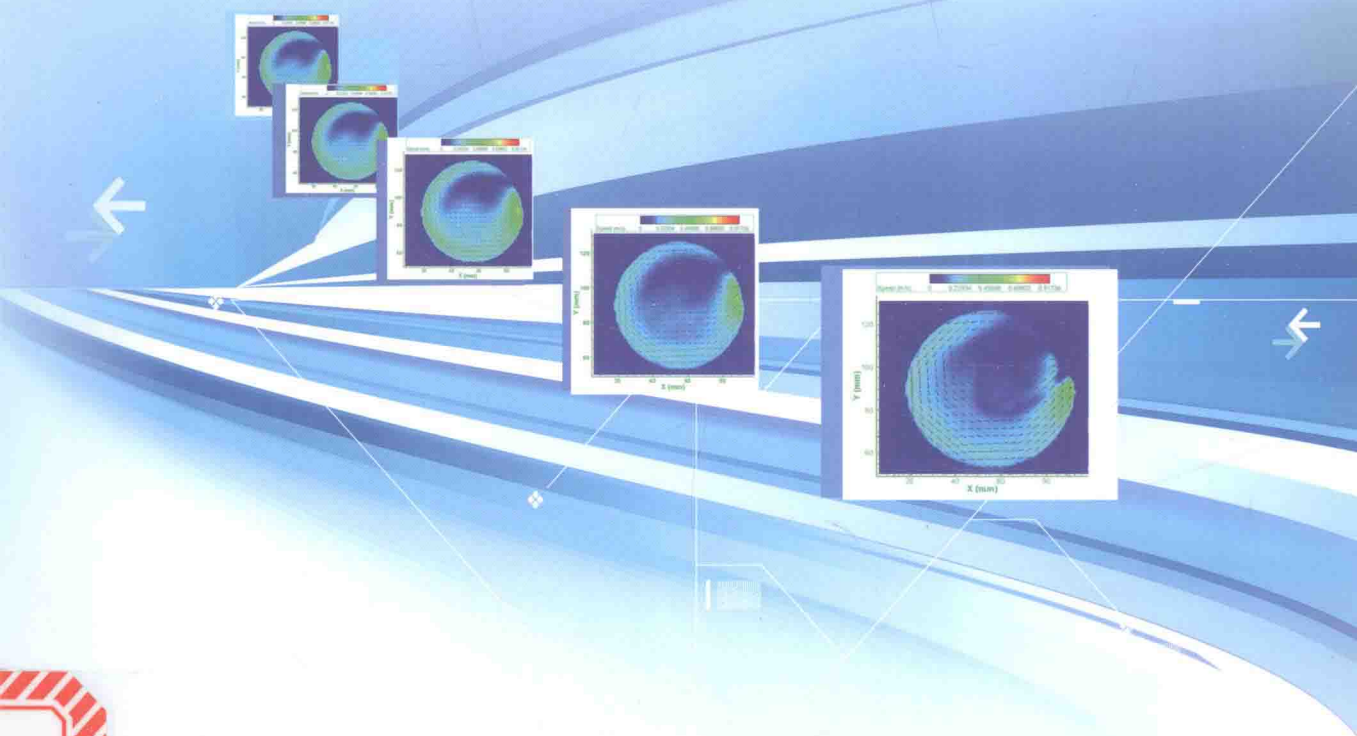


粒子图像测速技术_在 石油工程螺旋流中的应用

■ 王小兵 著



石油工业出版社

粒子图像测速技术 在石油工程螺旋流中的应用

王小兵 著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书全面介绍了粒子图像测速原理,以及利用粒子图像测速技术研究石油工程中常见螺旋流的实验方案和结论,兼顾理论性和实践性,对相关实验研究具有很强的指导性。全书共七章,主要包括粒子图像测速原理、垂直管中螺旋流的流动规律、聚驱井地面驱动螺杆泵井筒中螺旋流的流动特征、水力旋流器内部螺旋流场特征、螺旋流对聚驱井杆管偏磨的抑制作用、螺旋气锚液相旋转流场及气锚分气效率、结论。

本书可供石油高等院校相关专业教师、研究生,以及工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

粒子图像测速技术在石油工程螺旋流中的应用/王小兵著.
北京:石油工业出版社,2015.6

ISBN 978-7-5183-0581-0

I. 粒…

II. 王…

III. 流速—测量方法—应用—螺杆泵—螺旋流动

IV. TE933

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 296943 号

出版发行:石油工业出版社

(北京朝阳区安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010)64523579 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:9

字数:230 千字

定价:39.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术是 20 世纪 70 年代末发展起来的一种瞬时、动态、多点、非接触的流体力学测速方法,它可以为石油工程的工艺设计提供准确的技术参数。

随着石油工业的快速发展,图像处理技术、CCD 相机采集速率、双脉冲激光器制造等技术不断进步,粒子图像测速技术得到了前所未有的发展,已成为当今流体力学测量研究中的热门课题,常被应用于航空航天领域、水利工程、化工、汽车工业以及建筑环境等行业中。

因粒子图像测速技术涉及流体测量、激光及自动控制等学科,实验测试过程中的成像质量没有统一的标准,实验者在实验方案设计中的经验更为重要。笔者从事 PIV 测量技术研究已有 11 年,利用粒子图像测速技术对石油工程中的螺旋流进行过系统的实验研究。出版本书旨在介绍利用粒子图像测速技术研究复杂流体流动问题,将近几年石油工程中经典螺旋流的 PIV 实验方案、实验过程、实验结果及实验结论进行总结,帮助读者较好地进行相关实验研究。

本书共分为七章,第一章主要介绍粒子图像测速原理、互相关计算原理;第二章主要介绍粒子图像测速技术研究垂直管中螺旋流的实验方法、实验结果以及实验结论;第三章主要介绍粒子图像测速技术研究聚驱井地面驱动螺杆泵井筒中螺旋流的实验方法、实验结果以及实验结论;第四章主要介绍粒子图像测速技术研究水力旋流器内部螺旋流的实验方法、实验结果以及实验结论;第五章主要介绍粒子图像测速技术研究螺旋流对聚驱井杆管偏磨抑制机理的实验方法、实验结果以及实验结论;第六章主要介绍粒子图像测速技术研究螺旋气锚液相旋转流场及气锚分气效率的实验方法、实验结果以及实验结论;第七章是全书结论。

本书在撰写过程中,参阅了大量的国内外资料文献,在此谨向文献作者表示深深谢意。同时,感谢东北石油大学刘扬教授和韩洪升教授在百忙之中审阅书稿,提出了许多宝贵的意见。

由于笔者水平有限,书中难免有错误和不足之处,敬请读者批评指正。

笔者

2014 年 11 月

目 录

1 粒子图像测速原理	(1)
1.1 PIV 系统组成	(1)
1.2 PIV 计算原理	(12)
1.3 影响 PIV 计算精度的因素	(18)
1.4 本书中实验所用 PIV 系统	(19)
2 垂直管中螺旋流的流动规律	(21)
2.1 石油工程中的螺旋流	(21)
2.2 实验装置	(21)
2.3 实验材料及温度	(22)
2.4 PIV 实验注意事项	(22)
2.5 实验结果分析	(23)
2.6 螺旋流的压降特性	(33)
3 聚驱井地面驱动螺杆泵井筒中螺旋流的流动特征	(35)
3.1 螺杆泵的特点	(35)
3.2 地面驱动螺杆泵系统的组成和工作原理	(35)
3.3 用于提高采收率的聚合物特性	(36)
3.4 地面驱动螺杆泵抽油杆受力分析	(40)
3.5 实验装置	(41)
3.6 实验材料及温度	(42)
3.7 抽油杆的旋转效应对环形空间中流体流场的影响	(43)
3.8 抽油杆与油管环形空间中流体的轴向速度分布	(44)
3.9 抽油杆与油管环形空间中流体的压力梯度分布	(46)
3.10 抽油杆的旋转效应对环形空间中流体压力梯度的影响	(47)
4 水力旋流器内部螺旋流场特征	(51)
4.1 引言	(51)
4.2 水力旋流器中的涡旋运动	(52)
4.3 水力旋流器的工作过程	(53)
4.4 实验装置	(56)
4.5 实验材料及温度	(58)
4.6 水力旋流器旋流腔顶部旋流场特征	(58)

4.7	水力旋流器上锥段中流体流场特征	(63)
4.8	水力旋流器下锥段中流体流场的特征	(78)
5	螺旋流对聚驱井杆管偏磨的抑制作用	(90)
5.1	聚驱井中的杆管偏磨	(90)
5.2	聚合物溶液的黏弹性与法向应力	(90)
5.3	实验装置及温度	(91)
5.4	实验方法	(92)
5.5	抽油杆与油管环形空间中流体的速度瞬时特性	(92)
5.6	抽油杆与油管环形空间中轴向流的轴向速度分布规律	(95)
5.7	抽油杆与油管环形空间中螺旋流的轴向速度分布规律	(98)
5.8	螺旋流对环形空间中流体轴向速度梯度的影响	(101)
6	螺旋气锚液相旋转流场及气锚分气效率	(104)
6.1	气锚气液分离原理	(104)
6.2	实验装置与实验步骤	(105)
6.3	实验结果	(107)
6.4	不同螺杆螺旋气锚顶部轴向旋转速度比较	(126)
6.5	气锚气液分离实验	(129)
7	结论	(135)
	参考文献	(137)

1 粒子图像测速原理

粒子图像测速(Particle Image Velocimetry, PIV)是图像测速技术的一种。广义地说,凡是在流体中投放示踪粒子,并利用示踪粒子的图像来测量流体速度的这一类方法,都可以称为粒子图像测速技术。它能够获得视场内某一瞬时整个流动的信息,其他方法只能测量某一点的速度,如激光多普勒测速仪(Laser Doppler Velocimetry, LDV)等。而对于不稳定和随机流动,PIV 是其他方法无法比拟的。PIV 的出现和发展,解决了要同时获得整场瞬态信息和高分辨率信息的难题。PIV 是 20 世纪流动测试技术的重大发展,也是流动显示技术的重大发展。它将传统的模拟流动显示技术提升到了数字式流动显示技术,为流场的研究提供了新的技术手段。

PIV 得到飞速发展主要是由于瞬态全场测量的需要。自 20 世纪 80 年代初以来,国内外的学者开始研究各种定量流动显示方法和手段。同时,随着科学技术的发展,流动显示技术结合光学、图像处理和计算技术,将流动显示所获得的定性图像推向定量化。PIV 技术就是在传统流动显示技术基础上,利用图像处理技术发展起来的一种新的流动测量技术。其综合了单点测量技术和流动显示测量技术的优点,克服了两种测量技术的弱点,既具备单点测量技术的精度和分辨率,又能获得流动显示的整体结构和瞬态图像^[1,2]。

1.1 PIV 系统组成

PIV 系统一般包含五部分:光学照明系统、图像记录系统、同步器系统、示踪粒子和图像处理系统,如图 1.1 所示。



图 1.1 PIV 系统组成

(1)光学照明系统:产生片光源激光,照亮被测流场中的示踪粒子,以便 CCD 相机记录示踪粒子图像。

(2)图像记录系统:在同步器系统的控制下,利用 CCD 相机和高速视频采集卡与双脉冲激光同步记录示踪粒子图像。

(3)同步器系统:产生周期的脉冲触发信号,经过多个延时通道同时产生多个经过延时的触发信号,用来控制激光器、数字相机和图像采集板,使它们工作在严格同步的信号基础上,保证各部分协调工作。

(4)示踪粒子:示踪粒子是用来显示流体的流动状态,通过测量粒子的运动来获取流场信息。

(5)图像处理系统:通过图像处理、速度提取算法,获取流场的各种数据。

1.1.1 光学照明系统

流体测试的照明系统是为流动显示提供光源,常用的光源有白炽灯、闪光灯和激光器。在 PIV 实验中,一般使用双脉冲激光器来作为光源,通过片光源照亮被测面流场中示踪粒子,如图 1.2、图 1.3 所示。

二维 PIV 实验中,可利用片光源照亮感兴趣的流场空间中的示踪粒子,以便将其图像记录在 CCD 相机中,从而获得空间某个截面的流场图像。三维 PIV 实验中,由单张的二维示踪粒子图片无法获取三维的信息,往往需要通过多个截面的流场图像来表达整个流场的三维结构,这使得片光源逐渐成为 PIV 实验中一个重要的部分。

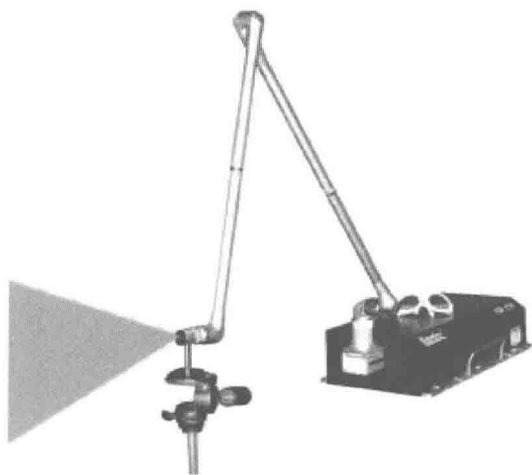


图 1.2 双脉冲激光器

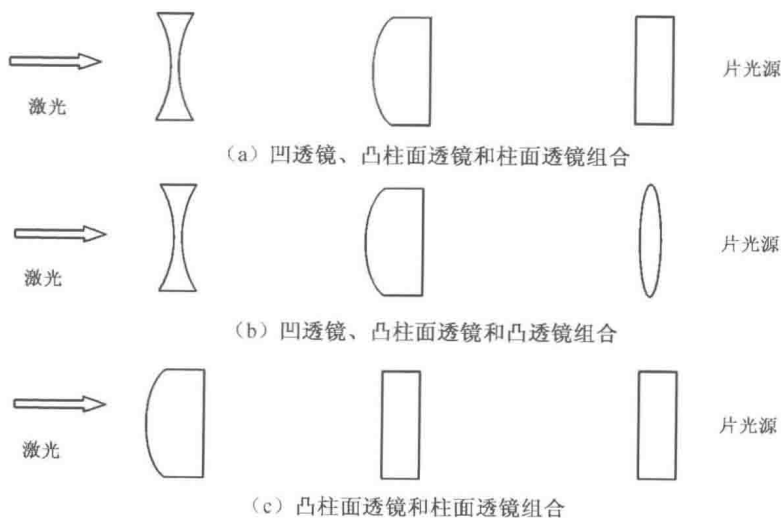


图 1.3 三个柱面镜组成的片光源

照射光的空间分布形式有体光和片光之分,体光照射的能量较为分散,对光源能量要求较高,而片光的能量相对集中。片光生成所需的基本元件是柱面透镜。当使用光束直径很细、发射角很小的激光器(如粒子激光器)时,柱面镜就能满足要求。对于其他激光器(如 Nd:YAG 激光器)光源,为了生成薄的高强度片光,需要不同种类透镜的组合,如图 1.3(a)所示。

组合球面透镜与两柱面透镜的系统更为常用,图 1.3(b)使用了球面透镜,因为该透镜在要求短焦距的情况下更容易加工和制造。片光的厚度主要由中间位置的圆柱体透镜焦距决定。

因为球面透镜不允许片光高度和厚度独立变化,要实现独立变化,可采用如图 1.3(c)所示的配置。另外,这种形式允许光束直径小的片光在任意位置生成。这种光路配置的单位面积的能量很高,当使用脉冲激光器时,激光束邻近区域必须保持封闭,以免尘土或小颗粒干扰片光的生成。

以上为产生片光源的基本元件,在 PIV 实验中常采用大功率双脉冲激光器经柱面透镜扩束的方法形成脉冲片光,一般不采用连续激光器,因为连续激光器不能与 CCD 相机同步配合,不能使 CCD 相机精确记录短时间间隔中的连续两幅示踪粒子的图像。但采用大功率脉冲激光器(如红宝石激光器、氩离子激光器等)时,由于其脉冲时间间隔范围有限,脉冲时间间隔不足以使该速度区内的一个粒子的运动位移大于其直径大小,而导致粒子两次曝光产生的图像部分重叠,给以后的互相关计算带来了麻烦,往往会出现计算错误,因而当测量流体低速流动时,采用大功率双脉冲激光器效果不好。对于低速流动测量的问题,可采用连续固体激光器与 CCD 相机的组合,北京立方天地科技发展公司于 2006 年成功开发出一款连续固体激光器——半导体激光器,如图 1.4 所示,其与 CCD 相机等组合成迷你 PIV,此系统能满足低速流体流动中流场测量问题。



图 1.4 半导体激光器

在实际的二维 PIV 实验时,往往希望片光的厚度很薄,一般小于 1mm,目的是使被照亮的空间流场中的不同示踪粒子尽量在一个平面上,以便在 CCD 相机中所成的像能代表同一个空间截面中的示踪粒子,保证了互相关计算结果的精确性。而对于三维的 PIV 实验,目前流行的做法是用两台 CCD 相机从不同方位记录被照亮流场的一个切面,类似于人的眼睛观察物体

一样,根据两台相机空间位置投影关系和视差,将两台 CCD 相机的两个二维坐标映射为空间一点的三维坐标,将两台 CCD 相机的两个二维位移场映射为空间一点的三维位移场,从而完成粒子空间位移场和速度场的建立。因而在进行三维 PIV 实验时,希望片光的厚度在 2~3mm 之间,可以采取片光厚度可调的片光头,或者配置一个薄的片光头和一个厚的片光头,实验时根据需要选择使用。

1.1.2 图像记录系统

早期 PIV 系统中的图像记录是将示踪粒子图像记录在感光底片上,然后利用扫描仪对示踪粒子图像进行数字化处理,但由于冲洗底片和数字化过程时间较长,不能即时得到处理结果,使用感光底片的方法逐渐被淘汰。随着电子技术的飞速发展,现在 CCD 相机的分辨率已经大幅度提高,4096×4096 高分辨率的 CCD 相机技术已经很成熟,同时 CCD 相机还可以单帧多次曝光或多帧单次曝光,能自动辨别图像的时间顺序,能够满足 PIV 系统对示踪粒子图像的要求。目前 PIV 系统中流行的配置是利用 CCD 相机来完成流场中示踪粒子的图像记录,CCD 相机的前端配上普通相机的镜头,即可完成示踪粒子图像的记录。目前常见的 4MCCD 相机和 5MCCD 相机如图 1.5 所示。



(a)SM-CCDB4M20相机



(b)SM-CCDB5M16相机

图 1.5 常见的 CCD 相机

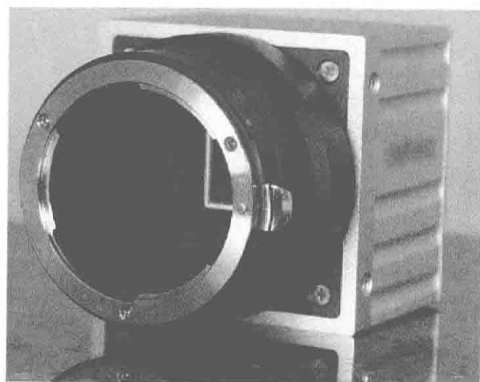


图 1.6 E4M15 型 CCD 相机

4MCCD 相机的分辨率为 2048×2048 (4M);像素尺寸 $7.4\mu\text{m}$;灰度等级 12bit;PIV 模式最小曝光时间间隔 $\leq 200\text{ns}$;采集速率 20 帧/s。

5MCCD 相机的分辨率为 2456×2056 (5M);像素尺寸 $3.45\mu\text{m}$;灰度等级 12bit;PIV 模式最小曝光时间间隔 $\leq 200\text{ns}$;采集速率 16 帧/s。

图 1.6 为本书实验中所用 E4M15 型 CCD 相机。

1.1.2.1 CCD 相机的工作原理

数字相机从产生到现在,从传输信号的方式上主要分为模拟和数字两种制式。其中,模拟制式数字相机采用普通的视频传输协议(PAL/NTSL),每秒采集 25 或 30 帧图像。这种制式的数字相机适合连续采集系列图像,但不能单幅触发采集图像,这样就无法与脉冲激光器配合进行精确的速度场测量。数字制式相机采用通用的数字信号传输协议 RS422 以及更新的 RS644,它最大的特点在于可以和外部触发信号配合实现与触发信号同步的图像采集,这样通过使用一定的时间延时控制就可以实现多台相机以及激光器的同步控制,能够精确地拍摄激光器的脉冲光所照射区域。数字相机从 CCD 芯片的构造上同样可分为三种:普通型(Full Frame)CCD 相机、帧转移型(Frame Transfer)CCD 相机和跨帧型(Frame Straddle 或 Inter-line Transfer)CCD 相机。

普通型 CCD 相机芯片每一个像素的感光比(Fill Factor)接近 100%,成像质量好,但其缺点在于这种芯片的曝光控制只能使用传统的机械快门,且帧与帧之间的延时长(在第一帧图像没有传输保存完毕之前不能进行第二帧的采集),这些都限制了这种芯片的 CCD 应用于 PIV 的测量。

帧转移型 CCD 相机芯片感光阵列的并行位置同时有同样大小的非感光存储区域,这样第一帧图像的信号可以瞬间转移到存储区域,紧接着进行第二帧图像的曝光,在第二帧图像曝光的时候,存储区域中的第一帧图像信号也同时进行传输。这种芯片的感光比接近 100%,而且通过帧转移的方式可以控制第一帧图像的曝光时间,这就实现了电子快门的功能(不需要机械快门控制曝光),这种方式已经基本接近 PIV 测量的要求。但是由于目前芯片制造工艺水平的限制,帧转移时间为毫秒量级,还无法实现对高速流场的测量。

跨帧型 CCD 相机结合了帧转移的方式,每一个像素分成了两部分,一部分作为感光元件,另一部分作为存储单元。这样第一帧图像拍摄完毕后,信号可以瞬间转移到存储单元中进行第二帧图像的拍摄,转移速度可以比帧转移型 CCD 相机快近 1000 倍(微秒量级,甚至几百纳秒),这样就弥补了帧转移型 CCD 相机速度不足的缺点,完全可以达到超高音速流场测量的要求。但同时这种结构也带来了感光比低的缺点(约 60%),对成像曝光量有一定影响。PIV 系统中一般使用的都是跨帧型 CCD 相机。

CCD 相机的突出优点是电荷为信号,而其他大多数电器是以电流或者电压为信号。CCD 的基本功能是电荷的存储和电荷的转移,电荷的存储是由光和电激励产生的信号电荷,当对 CCD 施加特定时序的脉冲时,其存储的信号电荷便开始定向传输。CCD 的工作过程主要包括信号电荷的产生、存储、传输和检测。

CCD 是在 MOS 晶体管基础上发展起来的,其基本结构是在 P 型或 N 型硅单晶衬底上生成一层二氧化硅(SiO_2),然后顺序沉积 n 个金属电极或多晶硅电极作为栅极,于是每个电极与其下方的二氧化硅和半导体间构成金属氧化物半导体结构,即 MOS 结构,这种结构再加上输入输出就成为 n 位 CCD。当电极上加有适当的正偏压(或负偏压)时,该电压形成的电场穿过二氧化硅薄层,并排斥 P 型或 N 型硅中的多数载流子,在二氧化硅和硅的界面电极下,产生一个只含有少数载流子的势阱,所加的偏压越大,该势阱就越深。如果在栅极上施加按一定规律变化、超过阈值的电压,则在 P 型硅表面形成不同深浅的势阱,一方面可以存储信号电荷,另一方面可以将信号电荷沿半导体表面传递出去。按脉冲电压相数的不同,可以将电极分为二

相、三相和四相,下面以三相为例进行说明。图 1.7 是三相 CCD 时钟电压与电荷传输关系图,三个 MOS 电容为一位,共有 n 位,每一位的三个栅极分别接到 ϕ_1 、 ϕ_2 和 ϕ_3 三相时钟驱动线上,三相驱动与信号电荷传输如图 1.7(a)所示,驱动电压的时序如图 1.7(b)所示。当硅晶体受到图像光照射而产生电子-空穴对后,少数载流子在电场作用下就被吸入到势阱中,显然,透射光越强,势阱中捕获的电荷量就越多。也就是说,势阱捕获电荷的多少与该处透射光的强弱成正比。这样就将图像转变为由积累电荷所描绘的电子图像,该电荷存储于 CCD 中,即完成了光电转换与存储信息的过程。

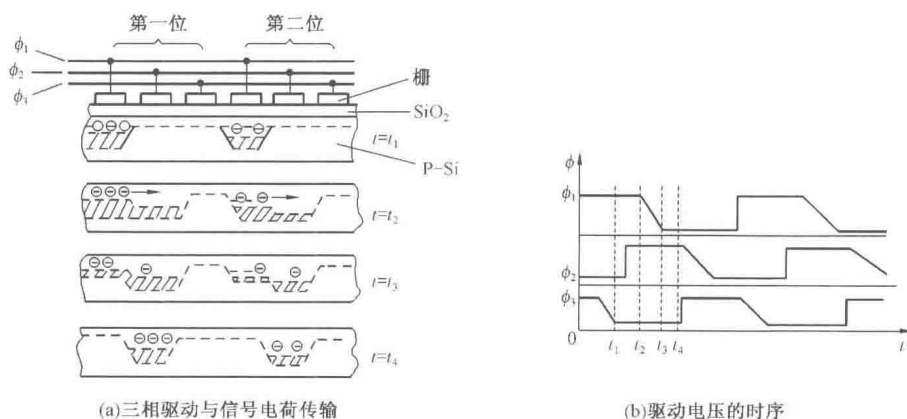


图 1.7 三相 CCD 时钟电压与电荷传输关系

为了读出存放于 CCD 中的电子图像,在图像排列的电极上加入交替升降的三相驱动时钟脉冲信号,该信号又称为寻址转移信号。三相驱动电压每作用一个周期,信号电荷就移动一位,不断重复此过程,这样可将信号电荷移出器件,这就是自扫描。依次类推,每经过一个时钟脉冲周期,电荷就完成一个像素的全过程。因此,三相驱动时钟脉冲保证了电荷作定向转移,也可以认为 CCD 同时具有移位寄存器的作用。在 CCD 的末端连接反向偏置的 PN 结(二极管)来收集电荷,并经放大后输出,就可获得图像信号。因而,CCD 同时具有感光 and 传递两种功能。然而在传递时 CCD 仍可能感光,因此必须将感光 and 传递在时间上分割开,用较长的时间(如 20~30ms)感光、积累电荷;用较短的时间(如几百毫秒)传递图像。这样,由于传递速度极快,传递过程中因感光而引起的图像模糊可以忽略不计。

当 CCD 用于记录图像时,光学图像通过光电变换变成电荷分布,这时,只有 ϕ_1 是高电平,因此只有在 ϕ_1 栅极下才形成深势阱,光电才能注入势阱中。这样,光学图像变成了电荷图像,并通过上述自扫描过程输出电信号^[5-7]。

1.1.2.2 PIV 实验中 CCD 相机的使用

CCD 相机的感光芯片属于光敏器件,严禁将数码相机镜头直接对准阳光或强光拍摄图像;严禁将 CCD 相机直接对准激光器片光源出光孔拍摄图像,否则会在 CCD 相机的感光芯片留下物理斑点,给以后的拍摄造成不便。同时,在使用过程中,CCD 相机与视频采集卡之间的数据线不允许进行热插拔,以免对 CCD 相机的感光芯片造成伤害。

当 PIV 系统中的 CCD 在室外或者有背景灯光(如日光灯)的室内进行拍摄时,会影响示

踪粒子的图像质量,此时需要在 CCD 相机的镜头前加装滤色片,用来滤掉背景光或杂色光,因为一般激光光源波长是 532nm,而滤色片可透过的光的波长为 $532\text{nm} \pm 10\text{nm}$,可以滤掉 95% 以上的杂色光。但使用了滤色片后,对 CCD 相机初始焦距和光圈调整带来了不便,所以一般是在 CCD 相机的焦距和光圈调节完成后,小心地换上带有滤色片的镜头进行实验。

1.1.2.3 CCD 相机使用过程中的噪声误差

CCD 相机在使用过程中存在的噪声不能忽略,其噪声有两个:一个是热噪声,另一个是读噪声。热噪声是由于 CCD 不能将由热运动产生的电子空穴对从由光电效应产生的电子空穴对中分离出来,这样导致的后果是无法将微弱的图像从噪声中分辨出来。热噪声随着温度的升高而增大,温度每升高 $6 \sim 7^\circ\text{C}$,热噪声约增加 1 倍。读噪声随着读出频率的增加而增加,一个 CCD 相机在一个完整的周期(1/25s 或 1/30s)内,每个像元产生的噪声相当于几百电子伏特。采用提高电荷电压的转换效率,降低读出频率以及冷却传感器等可以将读噪声降低到每个像元几个电子伏特的水平。

1.1.3 同步器系统

PIV 系统对粒子图像的计算,需要得到相邻时刻互相关的两张粒子图片。为了得到不同时刻的粒子图像,需要对粒子图像的记录设备和照明设备进行时间调制,常利用一台同步控制器来同时外触发控制双脉冲激光器和 CCD 相机,通过同步调整双脉冲激光器和 CCD 相机的跨帧延时,可以拍摄到不同时间间隔下的示踪粒子图片,即可实现流体从低速到高速流动的测量。

同步控制器可以同时控制 CCD 相机的触发、脉冲激光器、快门、线圈、开关控制器等各种装置,如图 1.8 所示,其控制双脉冲激光器、CCD 相机及视频采集卡之间的时序关系如图 1.9 所示。同步控制器提供周期的外触发 TTL 信号,激光器的两个氙灯经过一定的时间延时间隔点亮发光。当氙灯发光强度达到最大峰值时,经过适当延时的两路 Q 开关被同步控制器提供的延时信号触发,激光器发出具有一定时间间隔的双脉冲光。同时,数字相机也经过同步控制器提供的触发信号,使用软件设定第一幅图像的曝光时间,使得激光器的第一个脉冲光落在第一幅的曝光时间内;然后经过软件设定的跨帧时间,CCD 相机就可以进行第二幅图像的曝光,这时捕捉到的是激光器的第二个脉冲光。这样就实现了数字相机触发一次得到两帧图像捕捉双脉冲激光器脉冲光的功能。缩小激光器双脉冲之间的时间间隔(不小于数字相机的跨帧时间),就可以拍摄高速的运动流场图像,计算相应的速度场^[8]。



图 1.8 同步控制器

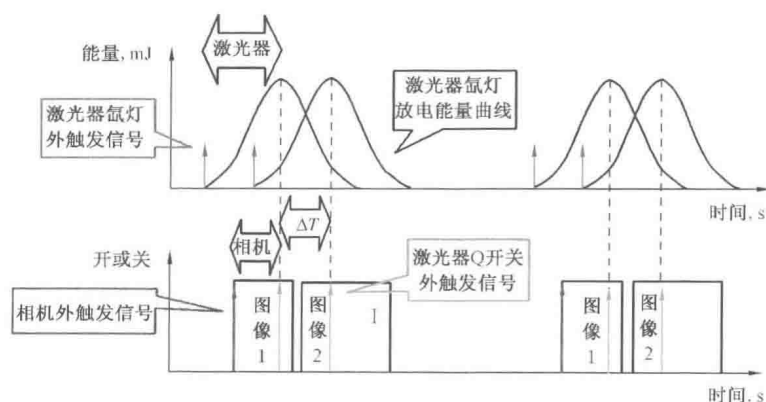


图 1.9 同步控制器控制时序图

1.1.4 示踪粒子

粒子图像测速技术是在被测量的流体中投放示踪粒子,利用连续的两张示踪粒子的图像来计算出示踪粒子的运动速度,实质是利用示踪粒子的速度来代替流场中相同位置处的流体速度。因而在 PIV 实验中,示踪粒子的跟随性和对光的散射性对实验结果的精度影响很大。

1.1.4.1 示踪粒子的流体运动特性

如果示踪粒子的密度和流体的密度不相等,由于重力的影响,示踪粒子的跟随性不好,示踪粒子的速度将不能代替流体的速度。假设示踪粒子是球形,不考虑粒子间的相互作用,粒子的直径足够小,对流体运动的扰动可以忽略,且其在流体中以较低的雷诺数沉降,根据 Stokes 定律,可以推导出示踪粒子在流体中的沉降速度或上浮速度。

当粒子的速度小于流体的密度时,粒子会上浮,利用 Stokes 定律,可知粒子受到向下的阻力 f_D 为:

$$f_D = 3\pi\mu d_p u_p \quad (1.1)$$

式中 f_D ——粒子受到向下的阻力;

u_p ——示踪粒子的沉降速度;

d_p ——示踪粒子的直径;

μ ——流体的黏度。

粒子所受向上的力是浮力和重力的合力 f_g 为:

$$f_g = \frac{1}{6}\pi d_p^3 (\rho - \rho_p) g \quad (1.2)$$

式中 f_g ——浮力和重力的合力;

ρ_p ——示踪粒子的密度;

ρ ——流体介质的密度;

g ——重力加速度。

粒子上浮时,最终处于平衡状态,即 $f_g = f_D$,得到:

$$3\pi\mu d_p u_p = \frac{1}{6}\pi d_p^3(\rho - \rho_p)g \quad (1.3)$$

可得示踪粒子的最终平衡上浮速度为:

$$u_p = d_p^2 \frac{\rho - \rho_p}{18\mu} g \text{ (方向向上)} \quad (1.4)$$

同样,当示踪粒子的密度大于流体介质的密度时,示踪粒子要沉降,沉降速度达到平衡时:

$$u_p = d_p^2 \frac{\rho_p - \rho}{18\mu} g \text{ (方向向下)} \quad (1.5)$$

因此示踪粒子在流体介质中的上浮或沉降速度为:

$$|u_p| = d_p^2 \frac{|\rho_p - \rho|}{18\mu} g \quad (1.6)$$

如果流体以恒定的加速度运动,且示踪粒子的密度大于流体介质的密度,那么根据式(1.6)可以推导出示踪粒子在流体介质中的滞后速度为:

$$u_g = u_p - u = d_p^2 \frac{\rho_p - \rho}{18\mu} a \quad (1.7)$$

式中 u_g ——示踪粒子相对于流体的滞后速度;

u ——流体速度;

a ——流体的加速度。

示踪粒子的沉降速度 u_p 与流体速度 u 服从以下指数方程:

$$u_p(t) = u \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_s}\right) \right] \quad (1.8)$$

其中,响应时间 $T_s = d_p^2 \frac{\rho_p}{18\mu}$ 。

如果流体的加速度不恒定,或者示踪粒子的沉降速度很大,示踪粒子的运动方程将很难解决,示踪粒子的运动方程将不再是简单的流体速度的指数衰减。只要示踪粒子的粒径足够小,对于一般情况下的流动现象观察而言,其响应时间是足够快的。例如,采用粒径 d_p 为 $100\mu\text{m}$,密度为 $1.02 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 的示踪粒子,则其响应时间为 $8.4\mu\text{s}$ 。

PIV 实验过程中,液体流动问题中的示踪粒子匹配问题比较容易解决,只要固体粒子的粒径足够小,固体粒子的密度就能与液体的密度相匹配。由于气体的密度比较小,气体介质中的示踪粒子匹配问题比较难以解决。由式(1.7)可知,示踪粒子与流体介质之间滞后速度的大小取决于它们的密度差和示踪粒子的粒径,为了保证示踪粒子足够好的跟随性,示踪粒子的粒径需要足够小,但是考虑到光的散射特性,示踪粒子的粒径越大,光照射到粒子上的散射性越好,因而在 PIV 实验中,示踪粒子的粒径选择十分重要。

1.1.4.2 示踪粒子的光学特性

在使用示踪粒子显示流动时,最终要用记录装置将流动现象以图片或数字图像的形式记录下来,而多数记录装置对粒子的散射光光强都有最低值限制,如果光强太低,则无法实现图像记录,且如果示踪粒子的散射光太弱,即使可以实现示踪粒子图像的记录,获得图像的信噪比也会很低。除了某些荧光粒子自身能发光外,一般的示踪粒子自身不能发光,而是通过散射其他光源照射到它表面的入射光来成像,因此粒子的散射特性对粒子成像及 PIV 的计算结果有着重要的作用。

为了保证示踪粒子的跟随性,通常采用的示踪粒子的粒径都很小,这种小粒径的示踪粒子在单色光的照射下,其散射光强符合米氏(Mie)散射理论。

1908 年,米氏在电磁理论的基础上,从麦克斯韦方程出发,对平面单色波被一个位于均匀媒质中、具有任意直径和任意成分的均匀球衍射,得出了一个严格的理论解,这就是著名的米氏散射理论。设粒子半径为 R ,复折射率为 $m=n-j\eta$,其中实部 n 为粒子的折射率,虚部 η 为粒子的吸收率。设入射光的波长为 λ ,引入 R 相对于 λ 的无量纲参数 q 来表示粒子大小,即 $q=\frac{2\pi R}{\lambda}$,并称 q 为粒径参数。在以粒子所在 P 点处为原点,以入射光方向为参考方向的极坐标系下,粒子在 $P(r,\theta,\varphi)$ 点处的散射光强 I 为:

$$I(\theta,\varphi) = \frac{I_0}{2k^2 r^2} f(\theta,\varphi,q) \quad (1.9)$$

$$f(\theta,\varphi,q) = I_1(q,\theta)\cos^2\varphi + I_2(q,\theta)\sin^2\varphi \quad (1.10)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

式中 I_0 ——照射到粒子上的入射光光强;

r ——粒子与 P 点的距离;

φ ——入射光振动面与散射面之间的夹角;

θ ——散射角;

$f(\theta,\varphi,q)$ ——散射函数;

I_1, I_2 ——米氏强度系数,它们是散射角(θ)、复折射率(m)及粒径参数(q)的函数。

可见,散射场中任意一点的散射光强与 q, m 及 θ 等都是有关的。对于特定的应用场合,如 q, m 一定时,散射光强就仅与 θ 有关,即在不同的方向上接收到的散射光强不同。

图 1.10 是根据米氏散射理论所作的波长为 532nm 的激光通过不同粒径的玻璃粒子的散射光强度。由图 1.10 可以看出,散射光强在空间分布上是不均匀的,在与入射光相同的方向上散射光的光强最强,在垂直于入射光方向上散射光的光强最弱。此外,随着示踪粒子粒径的增大,各个方向的散射光迅速增大,所以在保证流动不受示踪粒子影响以及跟随性的前提下,选择粒径较大的粒子对记录装置的感光效果是明显的^[9]。

在 PIV 实验中,记录装置接受的大多是垂直于入射方向上的粒子的散射光,无法利用前向的散射光,因此选择光散射性较好的粒子对 PIV 实验的计算结果有所帮助。另外,示踪粒子的形状对 PIV 计算结果也有影响,一般说来,粒径均匀的球形粒子比较好,因为球形

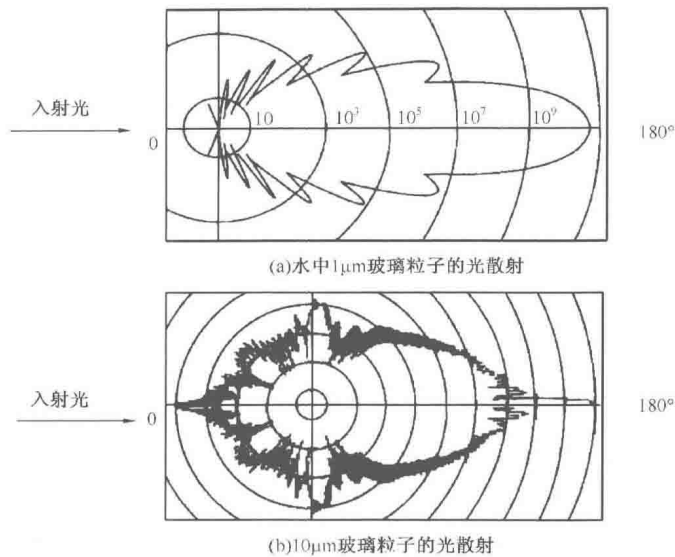


图 1.10 散射光强度图

粒子跟随流体一起运动时,在各个方向上的光的散射能力将不会发生变化,有利于粒子图像的记录。

1.1.4.3 示踪粒子选择的依据

对于不同流场的 PIV 测量,对示踪粒子的选择不尽相同,但总体而言示踪粒子一般应满足跟随性好、光散射性好和密度与介质相当的要求,具体选择时需要注意以下几个方面:

(1) 粒子直径。粒子直径影响粒子的跟随性和粒子对光的散射性,粒子的直径越小,其跟随性越好;但粒子的直径越小,其对光的散射性越差,为了增强粒子对光的散射性,需要选择直径大的粒子,以提高 PIV 粒子图像的质量。因此,应该综合考虑选择粒径大小合适的示踪粒子。

(2) 粒子密度。粒子的密度应该尽量接近流体的密度,以保证示踪粒子具有良好的跟随性。

(3) 粒子的光学特性和形状。应选择光散射性较好的示踪粒子。关于形状,大多数要求示踪粒子呈球形。

(4) 示踪粒子应满足无毒、无腐蚀、无磨损、化学性质稳定、清洁等要求。

(5) 荧光示踪粒子。进行两相流体、流体混合、近壁面实验和微观流体实验时,需要使用荧光粒子作为示踪剂,CCD 相机前面加装专门的滤色片,此滤色片只能透过荧光,不能透过激光。常见的荧光粒子有罗丹明 B 涂层微珠、耐尔蓝 A 涂层微珠。由于目前荧光粒子的价格较高,因而在视场大的实验中还不能广泛使用。

在 PIV 流场测试中,由于所测试的领域不同,对所选取的示踪粒子的种类和要求也有所不同,按流体的物态分为液体流场和气体流场,常用的示踪粒子见表 1.1、表 1.2。