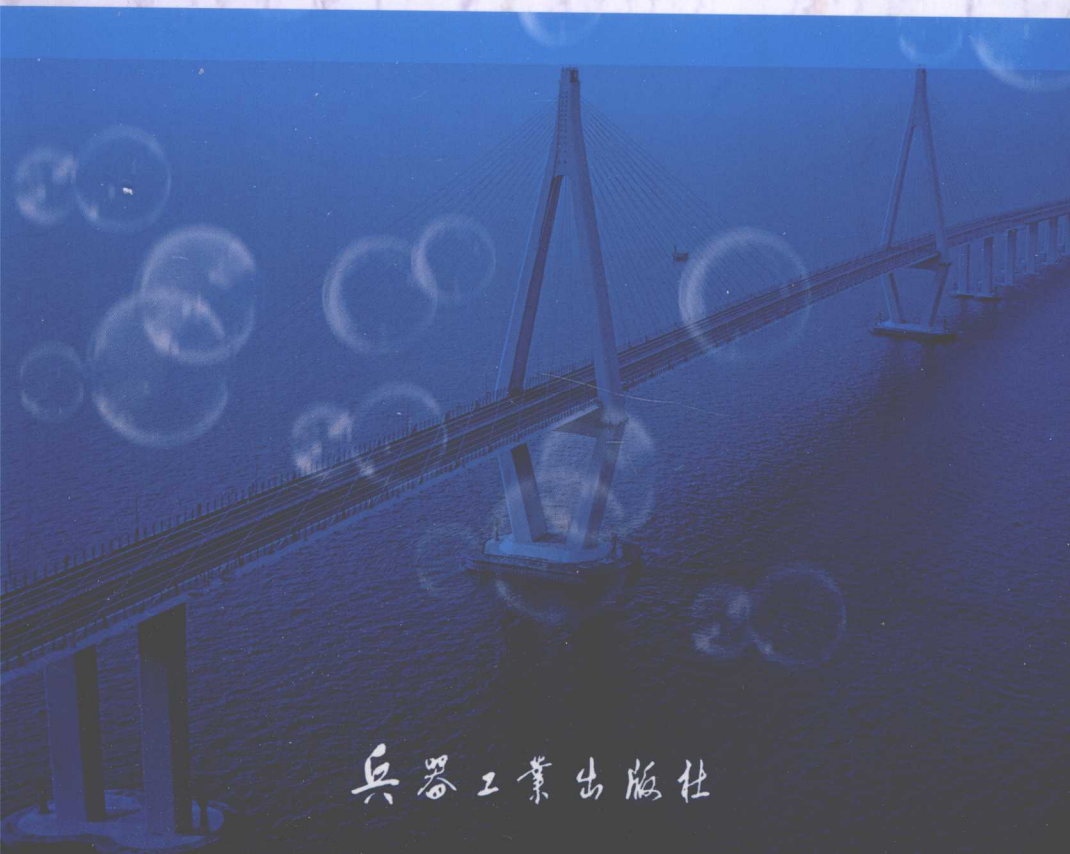


Digital Image Measurement Methods for
Gas-liquid Two-phase Flow

许联锋 | 著

水气两相流动的

数字图像测量方法



兵器工业出版社

内 容 简 介

数字图像测量是流场流动测量的一种重要方法。本书结合作者的研究成果,重点介绍了水气两相流动的数字图像测量方法。主要内容包括数字粒子图像测速技术(DPIV)的基本原理及软、硬件的系统构成;速度场的重建方法及其改进;小波分析在图像测量中的应用;水气两相流场两相同时测量的图像测量方法;数字图像测量方法在水垫塘模型流场测量中的应用。

本书可供环境科学与工程、热能与动力工程、水利工程、实验力学等专业的研究设计人员及师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水气两相流动的数字图像测量方法/许联锋著. —北京:
兵器工业出版社, 2009. 11
ISBN 978-7-80248-455-9

I. 水… II. 许… III. 气体-液体流动: 两相流动-数字图像-测量方法 IV. TB937

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 192599 号

出版发行: 兵器工业出版社
发行电话: 010-68962596, 68962591
邮 编: 100089
社 址: 北京市海淀区车道沟 10 号
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京兵工印刷厂
版 次: 2009 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

责任编辑: 周宜今
封面设计: 李尘工作室
责任校对: 郭 芳
责任印制: 赵春云
开 本: 787×1092 1/16
印 张: 13
字 数: 173 千字
定 价: 30.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

水气两相流动既是一种普遍存在的自然现象，也是环境、水利、化工、能源、材料等工程及工业领域中一种十分重要的流动现象。例如水利工程中的掺气水流可以用来减免泄水建筑物的空蚀破坏；化学工程中的水气两相流动可以加速反应装置中的物质混合、热量交换以及化学反应过程；环境工程中可以采用水气两相流动控制水库和湖泊中的分层结构以及改善水质。因此研究水气两相流动现象具有重要的理论意义与实用价值。

但是，由于水气两相流动具有紊动、相间相互作用、瞬变界面、三维等异常复杂的流动特征，所以至今还缺乏普适性理论与数值预测模型，实际上实验测量在解决工程应用上的两相流动问题及建立两相相互作用理论上具有非常关键的作用。传统的实验测量方法如激光多普勒测速技术（LDV）和相位多普勒测速技术（PDA）等均为单点测量方法，无法得到瞬时全场流动的定量信息及各相流动参数在同一个时刻的空间上的分布，且无法实现两相速度的同时测量。因此，开发一种能够同时对水气两相流动进行全场在线测量的方法与技术就显得尤为重要。

作者作为国家自然科学基金项目“掺气水流气相运动特性的图像测量方法研究”（50079020）的主要完成人及北京市教委科技计划项目“水气两相流动的数字图像测量方法研究”（KM200810038001）的项目主持人，对水气两相流动数字图像测量系统的硬件构成和软件算法等进行了广泛而深入的研究，期间完成了博士论文“水气两相流动的数字图像测量方法及应用研究”。在对博士论文进行再提炼和加工的基础上，撰写了本专著。

全书共分7章。第1章绪论指出了水气两相流测量方法研究的重要意义,并对现有的水气两相流测量方法的特点及存在的问题进行了综述,指出数字图像测量技术在水气两相流测量中的潜在优势。

第2章简要介绍了数字粒子图像测速技术(DPIV)的基本原理,并对图像测速技术的五个关键技术环节(光源与摄录系统、示踪粒子的选择、图像采集与处理系统、粒子匹配方法及数据的后处理)进行了详细分析,结合实验室的具体条件,建立了一套适合本文研究的硬件和软件系统。

第3章对PIV技术中的核心问题——速度场的重建方法进行了总结,在对几种传统PIV算法进行深入分析的基础上,融合了它们的优点而发展了一种新的速度提取算法——预估搜索法(PSA),实验证明该法具有求解速度快、计算精度高的优点。

第4章应用模极大值原理,设计了一种基于小波变换的图像去噪算法,实践表明该算法可以有效地提高图像测量的精度。借鉴分层匹配的思想,应用小波技术将原始图像分解成分辨率由低到高的子影像集影像金字塔,实现了从粗到精的粒子图像匹配方案。

第5章设计了水气两相流动的典型试验装置(气泡射流试验),建立了本文的水气两相流测量与分析系统;详细考察了取得可供分析的水气两相流流动图像的流体流动条件及不同照明光源与摄影技术的组合方案;采用图像去噪、灰度变换、直方图变换以及非均匀背景修正技术等提高了原始图像成分的清晰度,使图像变得更便于计算机分析和处理;采用动态阈值分割技术,将气泡粒子准确地从背景中分离出来,实现了气泡参数(粒径、掺气浓度)的统计功能;提出了一种混合格式的两帧粒子跟踪测速算法(2-HPTV),该算法具有计算精度高,对摄像机硬件要求低等优点;提出了水气两相流中气泡粒子与代表液相的示踪粒子之间的区别方法,实现了两相的分离;分别采用PSA算法和2-HPTV算法实现了水气两相流速的同时测量。

第6章针对水利工程中的水流入射水垫塘现象,采用本文给出的粒子图像测速方法,对模型水垫塘中不同工况下的淹没射流流场

进行了测量,获得了速度场、湍动能场以及涡量场等有用参数,实现了水气两相流两相速度的同时测量,获得了气泡粒径、掺气浓度等参数。

第7章对本文主要结论及成果进行了总结,对进一步工作进行了展望。

由于作者水平有限,错误难免,诚请批评指正,不胜感激!

在本书即将完稿之时,作者深深感谢曾经指导、帮助和鼓励过作者的师友和学生。首先,作者感谢自己的博士生导师李建中教授和陈刚教授,是他们提供了一个研究国家级课题的宝贵机会,使作者有幸迈入图像测速这一两相流体动力学的前沿阵地,并展现个人的能力。在攻读博士期间,两位导师对科学孜孜不倦的追求,严谨求实的治学态度和独到创新的学术思想,使作者受益匪浅,愿以他们作为毕生学习的榜样。作者的同事邵建斌、金上海以及研究生张明亮、丁洁瑾在实验中提供了支持与帮助,在此一并致谢。

感谢妻子、儿子及家人的理解与支持,使作者能够全身心地投入到科学研究与本书的写作中。

本书得到国家自然科学基金(50079020)及北京市教委科技计划项目(KM200810038001)的资助,特此感谢!

许联锋

2009年5月于北京

目 录

1 绪论	1
1.1 课题背景与意义	1
1.2 国内外两相流测量方法研究现状	3
1.3 图像测速技术综述	9
1.3.1 PIV 技术的基本原理	9
1.3.2 PIV 技术的分类	9
1.3.3 速度提取算法	11
1.3.4 PIV 技术的新进展	18
2 DPIV 技术原理与测速系统的建立	24
2.1 PIV 技术的系统构成	24
2.2 光源	26
2.3 图像采集系统	27
2.4 示踪粒子及其发生与布撒技术	30
2.4.1 示踪粒子的跟随性	30
2.4.2 粒子成像的可见性	32
2.4.3 粒子布撒均匀度和浓度要求	34
2.5 实验参数的选择	35
2.6 本文系统的建立	37
2.6.1 光源及光路设计	37
2.6.2 摄像子系统	40
2.6.3 图像处理系统	46
2.6.4 数据后处理系统	48
2.7 本章小结	51
3 速度场重建方法及其改进	52

3.1	光学杨氏条纹法	52
3.2	自相关分析法	54
3.3	速度方向二义性问题及其解决方法	56
3.3.1	粒子图像预偏置法	57
3.3.2	颜色(亮度)差别鉴别法	57
3.3.3	连续性方程鉴别法	57
3.4	互相关分析法	58
3.4.1	空域互相关分析法(全场搜索法)	58
3.4.2	基于快速傅里叶变换的图像诊断方法	64
3.4.3	改进的 DPIV 互相关算法——预估搜索法	70
3.5	人工模拟图像生成技术	75
3.5.1	人工模拟图像的目的	75
3.5.2	粒子图像的生成方法	76
3.6	亚像素拟合技术分析	78
3.6.1	多项式拟和	79
3.6.2	高斯曲线拟合	81
3.6.3	亚像素拟合技术的性能比较	82
3.7	本章小结	85
4	小波分析在图像测速中的应用	86
4.1	引言	86
4.2	小波变换与多尺度分析	88
4.2.1	小波变换的定义及其特点	88
4.2.2	离散小波变换	90
4.2.3	小波变换的多尺度分析	90
4.2.4	小波变换的快速算法	93
4.2.5	二维信号的 Mallat 算法	97
4.3	小波分析在图像去噪中的应用	99
4.3.1	小波去噪原理	99
4.3.2	去噪算法的设计	101
4.3.3	实例分析	103

4.4 小波分析在速度场测量中的应用	105
4.4.1 基于小波变换的多分辨率图像匹配的基本思想	105
4.4.2 基于小波变换的多分辨率图像匹配算法的总体框架	106
4.4.3 计算量分析与实验结果	109
4.5 本章小结	111
5 水气两相流场的图像测量方法研究	112
5.1 引言	112
5.2 实验模型设计	113
5.2.1 实验模型的制作原则	113
5.2.2 模型装置简介	114
5.2.3 图像采集系统	116
5.3 实验研究方案	116
5.3.1 光源的选择与布置	117
5.3.2 实验步骤及注意事项	119
5.4 实验结果定性分析	120
5.5 图像的预处理	121
5.5.1 图像去噪	121
5.5.2 灰度变换	122
5.5.3 直方图变换	124
5.5.4 非均匀背景的修正	126
5.6 气泡粒径与浓度的测量	128
5.6.1 气泡图像的识别	128
5.6.2 气泡参数的统计方法	134
5.7 稀疏气泡速度的测量——粒子跟踪测速技术 (PTV)	139
5.7.1 粒子跟踪测速技术的基本原理和步骤	140
5.7.2 传统的4帧粒子跟踪测速算法 (4-PTV)	141
5.7.3 一种新的基于相关的粒子跟踪测速方法——2-HPTV	142

5.8	水气两相流两相速度同时测量的图像方法研究	146
5.8.1	两相流 PIV 测试技术中的相分离方法	147
5.8.2	水气两相速度同时测量的实施步骤	151
5.9	本章小结	152
6	图像测量方法在水垫塘模型流场中的应用	154
6.1	引言	154
6.2	实验模型设计	155
6.2.1	实验模型的设计原则	155
6.2.2	模型装置简介	155
6.3	实验研究方案	156
6.3.1	光源的选择及照明摄像系统的布置	156
6.3.2	实验研究方案	158
6.3.3	实验步骤	159
6.4	实验数据的获取方法	160
6.4.1	速度场的获取	160
6.4.2	流线图的获取	160
6.4.3	涡量图的获取	160
6.4.4	湍流特征的提取	161
6.5	实验结果分析	162
6.5.1	水垫塘淹没射流流场分析	162
6.5.2	水垫塘水气两相流浓度场与速度场的测量	172
6.6	本章小结	177
7	总结	178
7.1	主要结论与成果	178
7.2	进一步设想	180
	附图	181
	参考文献	186

1 绪 论

1.1 课题背景与意义

气液两相流作为两相流中的一种,广泛应用于动力、化工、核能、石油、冶金等领域。早在1907年,气液两相流就被用来减少波浪对建筑物的破坏作用。此后,在工程中也得到越来越广泛的应用。例如,在河口用气泡幕防止盐水的侵袭;控制水库和湖泊中的分层结构以及改善水质;加速反应装置中的物质混合、热量交换,以及化学反应过程;防止水路和港口结冰,为水生物增氧等。在水利工程中,当水流速度较高时,空气将掺入水体中,形成水气两相流。最常见的例子如:明渠水流自掺气、水垫塘射流掺气等。另外,为了避免建筑物受到空蚀破坏,人们常通过设置强迫掺气设施,向水中掺气。这些系统的性能如何,在很大程度上取决于气泡运动以及气泡与液相之间的相互作用。但气液两相流动是一种最复杂的两相流动,因为它具有可变形的界面和一个可压缩的气相,这类流动的研究甚多,开展的最早,但由于其难度大和受生产水平的制约,一直发展不快^[1-3]。很多年来,气泡流动系统的设计主要基于经验或经验数据进行的,目前还没有关于两相气泡流动中相间相互作用的精确的完整描述^[4]。因此,必须开发能够获得两相流动的定性和定量的测量技术,这些技术可以提供检验理论模型及数值模拟技术所需的信息。目前,虽已开发出一些两相流计算机程序,但这些程序中的模型封闭问题仍需要大量的实验数据来校验。

与普通流体动力学相似,研究两相流问题的方法可以分为理论研究和实验研究两方面。但由于许多两相流动现象、机理和过程目

前还不甚清楚,许多工程设计都只能依靠大量观察和测量建立起来的经验关系式,因此,实验研究和测量在两相流领域目前仍占据着无可替代的首要位置^[5]。

实验研究的水平在很大程度上依赖于实验仪器的测试精度。在过去的20年里,为了更好地了解这类流动的物理机理及动力学特性,测量技术也取得了很大进展。以流速测量为例,传统的皮托管测速成本低、操作简单,但它的动态性能差,对流场扰动大,精度不高。热线热膜流速计(Hot Wire/Film Anemometer, HWFA)结合了现代迅猛发展的电子技术,测量精度和频响都大大提高了,但如果流场范围较小,与探头大小可比时,测量的空间分辨率受到限制,且此时对流场的影响很大。相比之下,激光多普勒测速仪(Laser Doppler Velocimetry, LDV)在测量较小的流场时显示出它的非接触式测量的优点,具有极好的时间分辨率和空间分辨力,可做三维测速,已经成为流速测量的标准技术并得到了广泛应用。相位多普勒测速仪(Phase Doppler Anemometer, PDA 或 PDPA)不仅能像 LDV 那样给出粒子的速度,而且可以给出粒子的粒径,在两相流动的测量中得到了广泛的应用^[6]。然而,它和 LDV 以及热线流速仪一样,都只是单点测量技术,很难将其所获得的数据和控制相间动力学特性的物理学机理联系起来,难以实现对流场的全场、瞬态测量^[7]。20 世纪 80 年代发展起来的粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)则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成长起来的最新流动测试手段。它不仅能显示流场流动的物理形态,而且能够提供瞬时全场流动的定量信息,使流动可视化研究产生从定性到定量的质的飞跃。PIV 的突出优点表现在^[8]:①它突破了空间单点测量(如 LDV)的局限性,实现了全场瞬态测量;②它实现了无扰测量,而用毕托管或 HWFV 等仪器测量时对流场都有一定的干扰;③容易求得流场的其他物理量,由于得到的是全场的速度信息,可方便地运用流体运动方程求解诸如压力场、涡量场等物理信息。因此,该技术在流体测量中占有重要的地位。

目前,单相二维 PIV 技术已接近成熟,并广泛应用于湍流等复杂流动的测量中。两相数字图像处理技术比单相困难得多,其不仅要分辨代表同一相的颗粒在已知时间间隔里移动位移,而且要将代表不同相的颗粒区分开来。两相颗粒之间会发生碰撞、遮挡甚至翻转,代表两相流动的颗粒如果光学性能不同,会给在同一底片上成像带来很大困难。由于代表两相的颗粒密度不同,其中一相的颗粒很容易跑出片光照射的区域使在观测区域找不到相关点。颗粒的粒径与浓度要用特殊方法处理,用一般的片光取不到相位信息,故两相测量的图像数字处理技术尚处于起步与发展之中。目前,只有少数学者开始在气液、液固等低速简单流动中进行可行性研究(王希麟,1998)^[9]。因此本书利用水气两相流的有关理论,结合模型实验,采用现代图像测量手段及运动估值方法(粒子图像测速技术)研究同时测量水、气两相流速的测量技术,对于加深对两相流动机理的理解,提高实际两相流系统的效率以及发展新的两相流数值模拟技术具有重要的意义。

1.2 国内外两相流测量方法研究现状

目前国内外水气两相流的测量方法主要有以下 4 种:①电导探针法(Two-tip Conductivity Probe);②激光多普勒测速技术(LDV);③相位多普勒测速技术(PDA);④图像测量技术。表 1-1 从原理、优缺点等方面对这 4 种方法作了简明的概括。

陈祖茂(1994)^[10]利用电导探针法对多相鼓泡体系中气泡的尺寸、气泡上升速度,局部含气率及气泡频率进行了测定。Brattberg 和 Chan-son 等^[11]利用电导探针法测量了二维水射流掺气中气泡的浓度、水气混合物的平均速度以及气泡的频率。该法的原理如图 1-1 所示,当上升的气泡穿过探针时,由于气液两相电导率的差异,电路中将产生两个具有时间间隔的脉冲信号(分别由两个探头产生的),探针中两个探头端点的上下距离是固定的,距离除以脉冲信号的时间间隔即可得到气泡的上升速度。探针法可以测到气泡的穿刺长度(速度乘以脉冲宽度),或简称玄长,为了获得气泡的直径可通过摄像法对探针进行

表 1-1 四种主要的水气两相流测量方法

方法	原理	优点	缺点	备注
电导探针法 [陈祖茂等 (1994) ^[10] , Brattberg 等 ^[11]]	当气泡上升时, 由于水气两相电导率的差异, 两个探头将先后产生具有某一时间间隔的脉冲信号, 两探头间的固定距离除以两脉冲信号间的时间间隔, 即可求得气泡的上升速度	仪器成本低, 可以测气泡的速度、局部含气率及气泡频率	只能针对分散相气泡进行有关参数的测量, 而无法获得水相的速度。对流场有干扰。精度低	点测量技术得到的是某一点的统计数据, 很难将测得的数据与控制相间动力特性的物理机制联系起来
激光多普勒测速 (LDV) [戴光清等 (1997) ^[3] , 李玲等 (1998) ^[4]]	利用激光多普勒信号的频移求速度。利用 LDV 信号处理器的增益与门限的配合调节, 使信号处理器仅对某一粒径范围内的粒子信号产生感应, 从而测出该粒径范围内的粒子速度	频响快, 无接触测量, 精度高	两相速度的测量是分开 (先后) 进行的, 相间的耦合效应差	
相位多普勒测速 (PDA) [朱友益等 (1999) ^[5]]	速度: 激光多普勒信号的频率信息 (频移)。 粒径: 激光多普勒信号的相位信息 (相位差)。 两相测速: 同 LDV	频响快, 无接触测量, 精度高。实现了粒径与速度的同时测量	同 LDV 要求粒子的形状近似为球形, 否则将产生较大的误差	
图像测速 [车得福等 (1994) ^[6] , 周洁等 (1996) ^[7] , 王炬等 (1999) ^[8] , 王希麟等 (1998) ^[9]]	对流场中的示踪粒子及分散相粒子 (气泡) 进行拍照, 通过人工或计算机图像处理与分析技术获得同一粒子在不同图像上的位置, 即可求得该粒子在该时段内的位移, 除以时间, 即可获得流速。 由分散相粒子在像平面的大小乘以成像比尺, 即可获得粒子的真实尺寸, 由粒子所占据的像素个数除以整幅图像的像素个数即得施测截面的浓度	可直观的显示流场的流动结构。不仅可进行速度测量, 而且可进行粒径及浓度的测量	受计算机及摄像机硬件的限制, 目前时间分辨率较低	
				全场测量技术; 得到的是某一瞬时全场的流动数据; 可使人们更好地理解湍流的流动结构, 特别适合于研究过渡状态及非恒定流情况

标定,建立了气泡直径与穿刺长度的关系式。从电导探针法的测量原理可知,当探针正对气泡的运动方向时,可获得较精确的结果,而当探针与气泡运动速度方向有较大夹角时,将会产生较大的误差甚至得到完全错误的结果。另外探针不可避免地会对流场产生干扰。

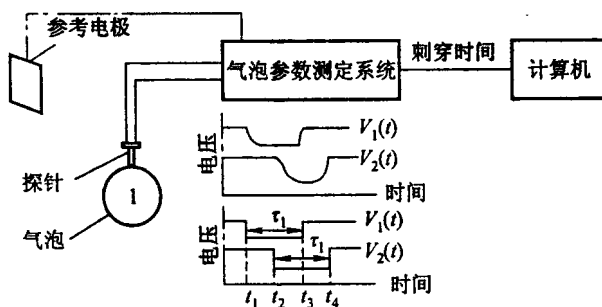


图 1-1 电导探针测定气泡参数原理图^[10]

李会雄 (1996)^[12]对水平管内气水两相旋流的速度进行了测量,文中指出,应用 LDV 对气-水两相旋流进行测量时,液膜内流动参数的测量可像对单相介质一样进行,但对气相速度的测量过程中,当测点距离气液界面较近时,多普勒信号的数据采集率较高,可获得有效的多普勒信号;随着测点向管轴心的移动,数据率逐渐地降低,甚至采集不到信号,文章将其归结为两激光束受气液界面干扰的加重。但实际上这可能是由于没有针对水中微粒及气泡的不同光学特性对 LDV 信号器的增益及门限进行很好的调节所致。

戴光清等 (1997)^[13]采用激光多普勒测速仪对掺气射流水气两相流进行了测试研究。该文对掺气水流中气泡速度的测量主要是通过选择和调节激光测速仪的信号处理器 BSA (猝发频谱分析仪) 或 Counter (计数型信号处理器) 中的增益、高压及“门限”(Oversize Reject Level) 来实现的。其基本原理是:由于流体中粒子的尺寸差异,相应的散射光强弱也不相同;一般而言,粒子直径越大,其信号幅值也越大。BSA 与 Counter 类似,都有一个信号触发电平(位)。若信号太弱以致其幅值电压低于触发电平,则该信号不能被采集;

反之,若信号太强,其幅值电压高于预先设置的“门限”,此信号也将被拒之“门”外(如图1-2所示)。这样通过调节信号处理器上的增益量或高压,就可人为地增大或减小被测信号的幅值电压,进而可区分水气两相流中清水和气泡的速度信号,即可分别得到清水或气泡的速度值以及相应的紊动特征量。这种方法的特点就是巧妙地运用信号处理器的增益与门限的配合调节,实现了对不同直径气泡的速度测定。但这一方法的缺点就在于一旦信号处理器的增益与门限值确定,它仅能测定某一狭窄直径范围内的气泡流速,但在气泡流动中,往往由于气泡的合并、破碎等,直径的范围较大,为了测定不同直径范围气泡的速度,这种方法需要不断地利用示波器来选择合适的增益与门限值,给操作带来不便。

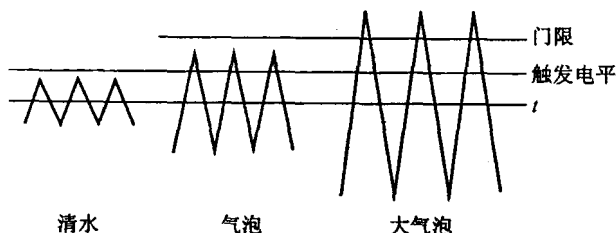


图 1-2 气泡速度信号接收示意图^[13]

李玲(1998)^[14]利用 LDV 对方管内气固两相流动速度进行了测量。文中指出,由于 IFA750 信号处理器无法区分大、小粒子所产生的频率不同的信号,故而无法实现两相场的同时测量。实验中,采用对两相场进行分别测量。开始先不加入烟气(气体流场的示踪粒子),测固相颗粒参数,然后再加入烟气,测量气相参数。采集气相参数时,由于颗粒相的存在,致使测量结果成为气固两相的平均值。为了剔除固相信号,在未加入烟气前,首先调整光电倍增器电压、激光器功率、信号处理器设置等参数,使得没有任何信号产生,即此时固体粒子产生的信号采集不到。在此条件下再加入大量烟气,测量有固相存在时的气相速度。气相与颗粒相信号是否被正确区分,可通过使用两者速度直方图来检验。

以上两个文献可以看出, LDV 可以通过对信号处理器参数的调整, 实现对两相速度的测量, 但这种两相速度的测量是分开进行的(非同时进行), 因此相间的耦合效应差。

在激光多普勒测速仪(LDV)基础上, 利用相位多普勒原理发展而成的相位多普勒技术, 是利用随流体而运动的粒子同时测量粒子速度与粒径的泛称, 是一种两相流测量仪器。在欧洲习惯上称 PDA, 即相位多普勒风速计(Phase Doppler Anemometer)的简称, 在美国及其他一些国家, 习惯上叫 PDPA, 即相位多普勒粒子分析仪(Phase Doppler Particle Analyzer)的简称^[15]。它和粒子图像测速技术(PIV)并称为目前世界上最先进的两种可以精确地测出两相流中粒子的流速的测试方法(杜斯特. F., 梅林, 1992)^[16]。PDA 的测速原理仍采用激光测速的基本方法, 即根据多普勒频移来获取流速参数, 尺寸大小则是根据多普勒效应的相位差信息获得。赵志洲(1999)^[17]对 PDA 技术的原理及测试系统作了较详细的介绍, 朱友益(1999)^[18]利用 PDA 技术测试了浮选柱液-气两相流中气泡的流速分布, Tricia 等^[19]利用 PDA 技术测量了二维水跃下游的流速剖面及气泡尺寸的分布。PDA 的一个缺点是对测试对象(模型)的尺寸、位置和形状等有着种种限制和要求^[20-22]。如它要求所测量的粒子必须接近于球形, 一般要求球形度大于 80%, 否则将产生较大误差, 另外标准 PDA 所能测量的粒径有限(0.5 ~ 10000 μm), 对于粒径超过 10000 μm 的大颗粒(或气泡)的测量必须像 LDV 那样调整光电倍增器电压、激光器功率、信号处理器设置等参数, 操作较繁。另外它和 LDV 一样同属点测量技术, 只能提供两相流中单点的信息以及时间平均意义上的流动结构, 而不能同时提供每一相的、瞬时的、全场的流速数据。

图像法测量流体运动由来已久, 但发展缓慢, 这主要是由于摄像机技术和计算机硬件都比较落后, 自动化处理软件的开发也没有跟上。对这种测量方法的关注和投入不足。近年来由于光电技术的突飞猛进和计算机技术的快速发展, 为图像测量方法提供了难得的机遇, 图像测量方法的潜在优势(图像中包含了流动系统中各相的

丰富的流动信息)正在向现实优势转化。国内一些学者也开始进行这方面的研究。车得福(1994)^[23]采用摄录像设备记录了气泡的生成及脱离运动过程,利用录像机的慢放功能,采用人工计数的方法研究了气泡的生成频率,结合气体流量计读数,求得气泡脱离容积的大小,按球形假定,算出气泡的脱离直径。周洁(1996)^[24]用CCD摄像法测量了下喷环流反应器内的气泡行为,王烜(1999)^[25]探讨了数字图像处理技术在固-液两相流实验中的应用,采用LDV技术对液体速度场进行了测量,通过摄像和数字图像处理技术对稀疏悬浮颗粒在紊流中的运动特征(速度和轨迹)进行了分析。文中同时指出,在向液体中加取颗粒时,为保证摄像的效果和避免颗粒对流场的干扰以及颗粒间的互相影响,加入的颗粒应尽可能的少,以保证符合稀疏两相流动的条件。

以上图像法测速中,都只是针对两相流中的分散相进行了测量,而没有实现两相(分散相和连续相)的同时图像测量,并且这种测速往往都是在稀疏两相流动条件下进行的,说明图像测量法在两相测速尤其是高分散相密度时仍存在较大困难。国内已有一些学者对两相流场粒子图像测速技术进行了有益的探索。王希麟(1998)^[9]采用粒子图像测速技术(PIV)对液固两相流同时测量进行研究,实验中,以粒径约为 $5\mu\text{m}$ 氧化铝粉示踪液相,用粒径约为 1.5 mm ,相对密度约为 1.265 的小米示踪固相,用外带同步的两个CCD镜头通过光学镜头组对同一流场测量域取像,两个CCD取像起始时间间隔精确可调。通过分辨粒径大小的方法将代表不同相的粒子图像分离开来,经过同样的相关处理得到了两相流动速度矢量图,并就两相测速技术的有关方面进行了有益的探讨。关于气液两相流的两相速度同时测量,国内尚未见这方面的报道,这大概是由于,一方面气泡与示踪液相的固体粒子在光学性能存在较大差异,这给在同一张照片上同时捕捉到示踪粒子与气泡的清晰图像造成了一定的难度;另一方面,气泡不像固体悬浮颗粒那样具有固定的形状,在运动过程中,气泡会发生变形、生长、合并、破碎等现象,增加了问题研究的难度。