

曝气池中气液两相流粒子图像测速技术

万 甜¹ 程 文¹ 刘晓辉²

(1. 西安理工大学环境科学研究所 陕西 西安 710048; 2. 北京市工业设计研究院 北京 100055)

摘要 :在粒子图像测速原理的基础上研究了基于快速傅立叶变换的粒子图像测速算法 ,并编制算法程序进行验证。通过试验研究了气液两相流在曝气池试验装置中的流动情况 ,应用粒子图像测速技术对装置中 3 种状态下气液两相流的运动参量进行测量 ,获得了各种流体运动参数 ,并应用粒子图像测速程序进行计算分析。试验结果表明当气液两相流处于状态 3 时 ,气泡在装置中具有最长的停留时间和较大的速度紊动强度 ,氧转移速率和效率大大提高 ,这为曝气池选型提供了依据。

关键词 :气液两相流 ;粒子图像测速 ;快速傅立叶变换 ;曝气池

中图分类号 :O359⁺ .1 文献标识码 :A 文章编号 :1006-764X(2007)06-0099-04

PIV technology for study of gas-liquid two-phase flow in an aeration tank//WAN Tian¹ , CHENG Wen¹ , LIU Xiao-hui²
(1. Environmental Research Institute , Xi 'an University of Technology , Xi 'an 710048 , China ; 2. Beijing Industrial Design and Research Institute , Beijing 100055 , China)

Abstract : A study was performed on the PIV algorithm based on fast Fourier transformation (FFT) , and the PIV program was compiled and verified. The states of the gas-liquid two-phase flow in aeration tank experimental equipment were investigated. The fluid parameters of the gas-liquid two-phase flow in three different states were measured by use of PIV technology , and the measured data were analyzed with the PIV program. The result shows that , for the gas-liquid two-phase flow in state 3 , the residence time of bubbles in the tank is the longest , the turbulent intensity is high , and thus , the oxygen transferring speed and efficiency are greatly improved. The study provided a basis for design of aeration tanks.

Key words : gas-liquid two-phase flow ; PIV ; fast Fourier transformation ; aeration tank

气液两相流是人们日常生活中常见的一种物质流动 ,广泛应用于工程和环境领域中。但迄今为止人们对气液两相流中的许多问题(如湍流、非定常流动等)都了解甚少 ,对两相流相互作用、两相传质、两相传热的机理不甚清楚 ,而在许多工程应用中又迫切需要解决这些问题^[1-3]。为解决这些问题并积累可靠的两相全场信息来验证其在计算流体动力学中的数学模型 ,对气液两相流场进行测量以得到全场信息是非常重要的^[4]。粒子图像测速技术(particle image velocimetry , PIV)是 20 世纪 80 年代发展起来的 ,在流动显示的基础上 ,充分吸收现代计算机技术、光学技术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的定量信息 ,使流动可视化研究产生了质的飞跃。单相 PIV 技术目前已在湍流、分离涡和射流等试验研究的应用中取得了重要成果^[3,5]。气液两相流 PIV 技术是单相 PIV

技术的延伸与发展 ,在单相 PIV 技术发展的基础上给出气泡直径与浓度分布 ,是研究气液两相流的流动特性尤其是非定常流动的新的有力工具^[5]。

曝气在活性污泥处理方法中起着重要的作用 ,而曝气池中气液两相流流动规律对曝气作用的影响至关重要^[6]。气液两相流的流动结构是多样且随机的 ,两相流运动形态及分布将会影响曝气池在水处理过程中的处理效果 ,而气泡的直径和分布也会对曝气效率产生影响 ,因此研究气液两相流在曝气池中的速度场分布以及对分散相粒径与浓度的图像测试分析有助于提高曝气池的处理效率。本文利用粒子图像测速技术试验研究曝气池试验装置中气液两相流流动现象并用粒子图像测速算法进行具体分析计算 ,为曝气池的选型提供了依据。

1 粒子图像测速方法

粒子图像测速技术的基本原理是在流场中撒入

跟随性和散射性良好的近似无扰示踪粒子,以粒子速度代表其所在流场内相应位置处流体的运动速度,用强光照射流场中的一个测试平面,摄像记录下2次或多次曝光的粒子位置,用图像分析技术得出各点粒子的位移。由位移和曝光时间间隔可得到流场中各点的速度矢量,并计算出其他运动参量,从而得出流体局部的运动规律^[3-4]。

多相流 PIV 算法包括数字图像预处理、测速算法测速和数据后处理。

数字图像预处理主要考虑电子噪音对图像的干扰,需要对粒子图像进行降噪处理。本文采用中值滤波。这是一种典型的低通滤波器,其目的是在保护图像边缘的同时去掉噪声,较易去掉孤立的点、线的噪声,同时保持图像的边缘效果。

本文采用基于快速傅立叶变换(fast fourier translation, FFT)时间变化的离散二维信号场序列,利用信号分析法,通过引入 FFT 算法计算连续 2 幅图像中相应位置处 2 查询窗口的互相关函数得到查询区域中各粒子的平均位移^[3]。对于连续 2 幅图像中同一位置处两相同尺寸的采样窗口 $f(m,n)$ 和 $g(m,n)$, $g(m,n)$ 可看作是 $f(m,n)$ 经线性转换后叠加噪声而成,若忽略噪声的影响, $g(m,n)$ 具有如下数学描述:

$$g(m,n)=f(m,n)s(m,n) \tag{1}$$

式中 $s(m,n)$ 为位移函数, m 和 n 表示数字图像查询窗口中的像素位置。由卷积定理得

$$S(\mu,\nu)=\frac{F^*(\mu,\nu)G(\mu,\nu)}{|F(\mu,\nu)|} \tag{2}$$

式中 $F(\mu,\nu)$, $G(\mu,\nu)$ 是由 $f(m,n)$ 和 $g(m,n)$ 经傅立叶变换得到, $S(\mu,\nu)$ 是 $s(m,n)$ 的傅立叶变换, $F^*(\mu,\nu)$ 为 $F(\mu,\nu)$ 的复共轭。由于 $|F(\mu,\nu)|$ 仅影响 $S(\mu,\nu)$ 的大小,则式(2)可以简化为

$$\Phi(\mu,\nu)=F^*(\mu,\nu)G(\mu,\nu) \tag{3}$$

对 $\Phi(\mu,\nu)$ 作傅立叶逆变换得到灰度互相关平面函数 $\varphi(m,n)$ 。检测 $\varphi(m,n)$ 的峰值位置,该位置与查询窗口中心的距离即为窗口内粒子的平均位移。

对测速数据后处理的主要目的是精确定位互相关峰位置、提高数据精度并计算全场运动参量。本文采用高斯亚像素拟合来精确定位互相关峰位置、局部种植检验识别和修正错误矢量。由于得到的是全场速度信息,可方便地运用流体运动方程求解其他运动参量。

2 粒子图像测速程序的编制及校验

粒子图像测速程序的编制采用了面向对象的程

序设计语言 Visual C++ 6.0 作为软件开发平台来实现,由基于 FFT 的灰度分布互相关算法编写了 Windows 应用程序。

对程序进行校验时,取查询窗口的大小为 32×32 像素,窗口偏移量为 16 像素,通过程序对两幅标准粒子图像处理得到位移场,由 Tecplot 软件画出位移矢量图并和标准位移矢量图比较,如图 1 所示。整个流场的性能可通过公式(4)估算:

$$C=\frac{\sum(\varphi_{th}\varphi_R)}{\sqrt{\sum\varphi_{th}^2\sum\varphi_R^2}} \tag{4}$$

式中: φ 为灰度互相关平面函数;下标 th 表示理论值(真实值);下标 R 表示计算值。 C 的值介于 0~1 之间,当 $C=1$ 时,计算流场完全类似于实际流场。计算真实流场与计算流场的相关系数得 $C_u=0.773$, $C_v=0.756$,若不考虑流场中流速大且涡旋结构尺度小的地方,得相关系数 $C_u=0.926$, $C_v=0.915$ 。再考虑对错误矢量的去除算法,基于快速傅立叶变换的灰度分布互相关测速算法可以达到一般流场的测速精度。

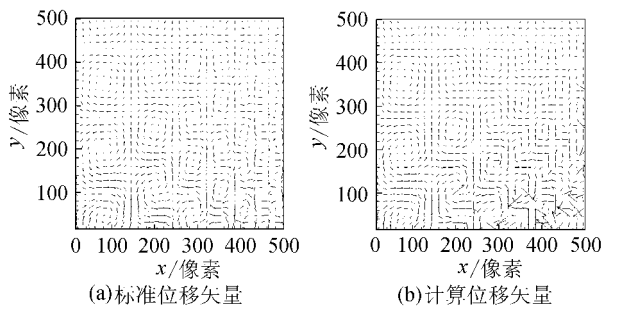


图1 位移场处理结果对比

3 曝气池中气液两相流试验研究

本试验的目的是研究曝气池试验装置中气液两相流流动特性,整个试验设备由试验装置和量测装置两部分组成,试验装置如图 2 所示。

通过改变曝气池试验装置中的气流速度和水深,发现曝气池试验装置中气液两相流呈现 3 种流动状态。研究这 3 种状态下的气液两相流,由每秒 30 帧的数字图像记录 40 s,分别在 3 种状态下处理 1 200 帧连续的图像来计算气泡瞬时速度场、时均速度场、时均流线、时均涡量、 u 方向(水平方向)和 v 方向(垂向)的紊动强度、总紊动强度参数并记录所对应的空气流量和横纵比。表 1 为这 3 种状态下的试验条件。表中 Q 为气流量, H 为没有气泡时的初始水面高度, R 为装置中通过图像处理测定的平均气泡半径。

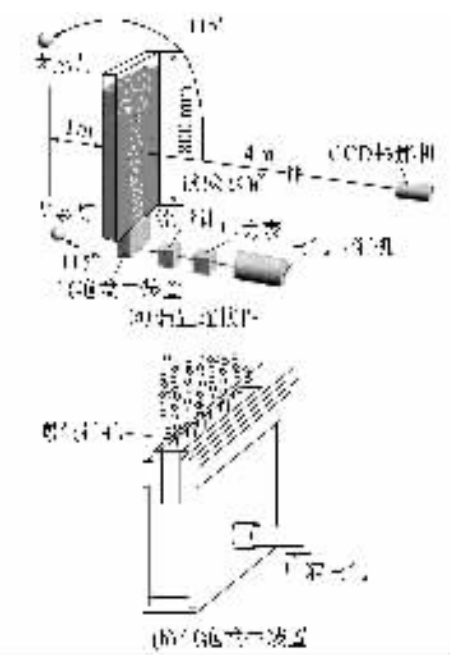


图2 试验装置

表1 试验条件

状态	$Q/(10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	H/m	R/mm	横纵比	空隙率/%
1	0.99	0.451	0.69	1:1.5	3.4
2	7.04	0.617	1.57	1:2	14.6
3	8.88	0.310	1.84	1:1	17.2

注:液体为自来水,运动黏滞系数为 $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,密度为 1000 kg/m^3 ,气体为空气,密度为 1.28 kg/m^3 ,温度为 $13 \sim 15^\circ\text{C}$ 。

4 结果分析与讨论

对曝气池中不同状态下的图像进行处理,得到结果如下。

4.1 状态1

瞬时流场气泡集中于装置的中部,两侧没有涡旋结构,气泡快速溢出装置,停留时间很短,在水平方向气泡羽流发生周期振动,这可由气泡羽流的缓慢振动解释。当侧向气泡发生羽流振动时,羽流内某点的

气泡速度会在垂向变化。图3为状态1的时均流场,时均涡量反映涡旋转的方向,左边为逆时针旋转,右边为顺时针旋转。总紊动强度最大值出现在羽流两侧,大小为 0.13 m/s ,主要表现为 v 向紊动。

4.2 状态2

由于剧烈的紊动,瞬时流场中气泡羽流不稳定,底部伴随着曲折运动,上部由于许多气泡循环地出现,气泡羽流被破坏,其两侧出现不稳定的涡旋结构,部分气泡溢出装置,部分进入涡旋结构,停留时间增大,气泡运动的方向也在迅速发生改变。图4为状态2的时均流场,时均涡量反映了涡的旋转方向,总紊动强度最大值出现在羽流上端中心位置处,大小为 0.17 m/s ,既有 u 方向紊动,又有 v 方向紊动。

4.3 状态3

状态3类似浮射流。瞬时流场中气泡沿装置的中心线上升,在羽流两侧有两个环流圈呈“冷却塔”涡旋流动结构,小部分气泡溢出装置,大部分则进入两侧稳定的涡旋结构。与状态1和状态2相比,停留时间最大。图5为状态3的时均流场,涡以对称且相反的方向旋转,结构稳定,速度紊动有所降低,总紊动强度最大值出现在羽流中心,大小为 0.15 m/s ,主要表现为 v 方向紊动。

5 结 论

a. 基于快速傅里叶变换的灰度分布互相关粒子图像测速技术可以高效、快速地处理粒子图像,得到流场中速度矢量及其他运动参量,全场相关系数可达到 0.8 左右。

b. 在曝气池试验装置中,气液两相流所处的状态与横纵比、气流速度有关,气液两相流处于状态3时,气泡在装置中有最大的停留时间和较大的速度紊动强度,气泡在混合液中强烈扩散、搅动,使气液

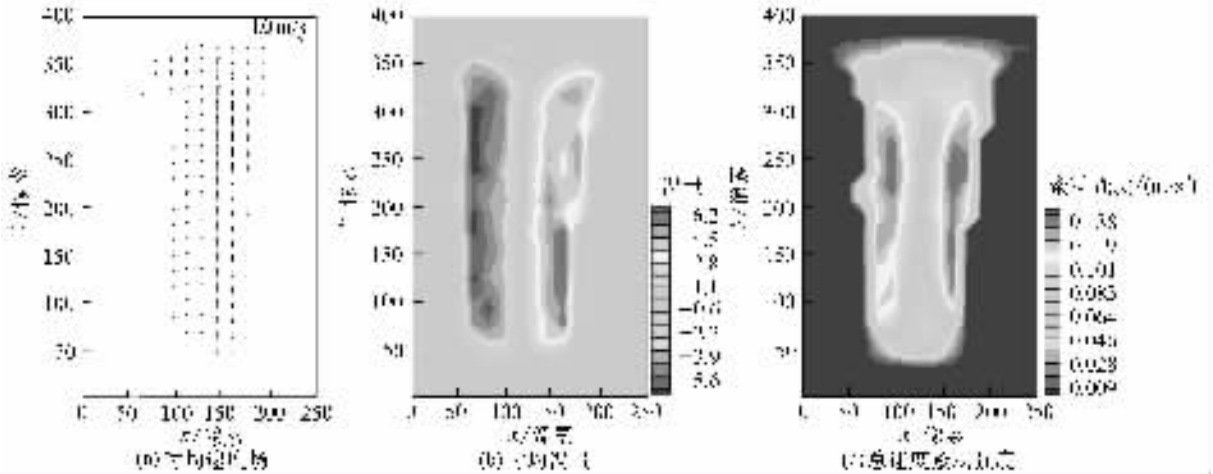


图3 状态1时均流场

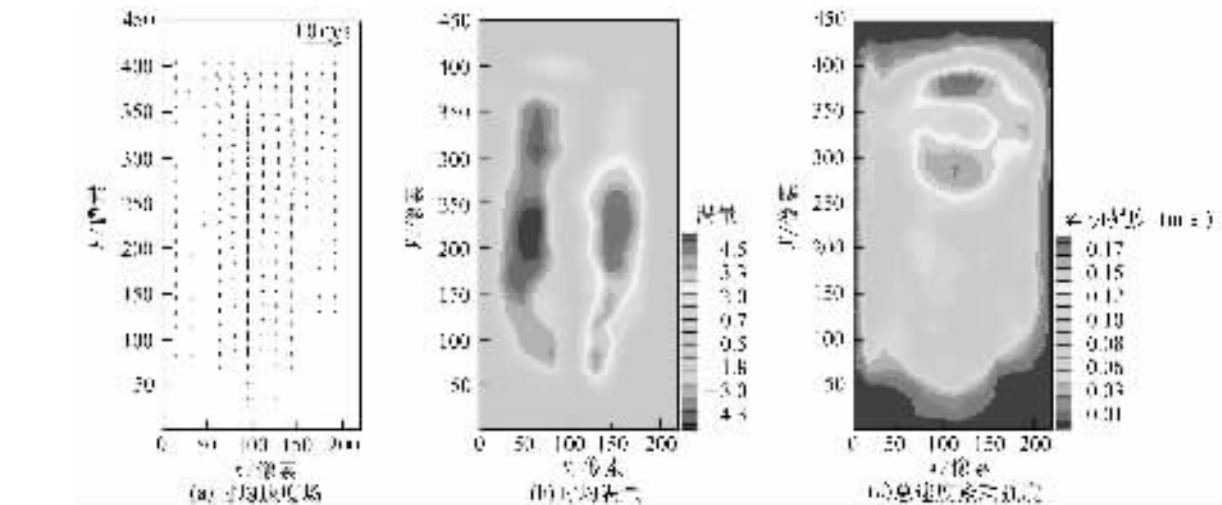


图4 状态2时均流场

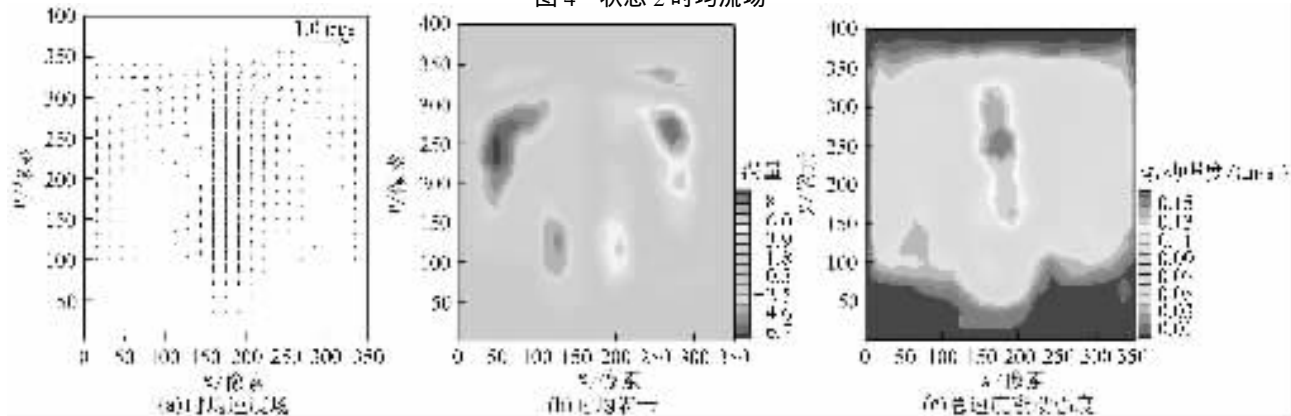


图5 状态3时均流场

两相流处于剧烈混合、搅拌状态,使氧转移速率和效率大大提高,故曝气池的选型应使气液两相流呈状态3的流动情况。

c. 基于快速傅里叶变换的粒子图像测速技术可以高效、快速地处理粒子图像得到流场,但在流速和流速梯度较大的区域应用这种方法检测流场较易产生错误矢量,因此在这些区域应当对算法进行改进。

参考文献:

- [1] 康琦,申功忻.全场测速技术进展[J].力学进展,1997,27(1):106-120.
- [2] 冯旺聪,郑士琴.粒子图像测速(PIV)技术的发展[J].仪器仪表用户,2003,10(6):1-3.
- [3] 许联锋,陈刚,李建中,等.粒子图像测速技术研究进展[J].力学进展,2003,33(1):533-540.
- [4] 王希麟,张大力,常轶,等.两相流场粒子成像测速技术(PTV-PIV)初探[J].力学学报,1998,30(1):121-125.
- [5] 何旭,高希彦,梁桂华,等.基于互相关算法的粒子图像测速技术[J].大连理工大学学报,2003,43(2):164-167.
- [6] 程文,宋策,周孝德.曝气池中气液两相流的数值模拟与实验研究[J].水利学报,2001(12):32-35.
- [7] HASSAN Y A, ORTIZ-VILLAFUERTE J. Multiphase flow studies using particle image velocimetry [R]. Germany: International Symposium on Particle Image Velocimetry 2001.

(收稿日期 2007-06-25 编辑 骆超)

·简讯·

河海大学获准创办英文期刊

Water Science and Engineering

国家新闻出版总署已正式批复同意河海大学创办英文期刊 *Water Science and Engineering*。该刊为季刊,面向国内外公开发刊,国内统一连续出版物号为 CN32-1785/TV。*Water Science and Engineering* 的办刊宗旨是:以党和国家的方针政策为指导,弘扬科学精神,探索水科学规律,创新水工程技术,反映水科学研究领域的最新成果,交流水工程建设的新技术和新经验,促进水资源的可持续利用,发扬学术民主,促进国际交流,为我国的经济建设、社会发展服务。

Water Science and Engineering 主要刊登国内外水科学研究、水工程建设、水资源保护、水生态修复等方面的研究成果及技术论文,报道国内外相关的学术会议及技术交流等消息动态。稿件来源以国内高等院校、科研院所、规划设计和工程建设单位从事水科学研究、水资源保护、水工程建设的专家、教授、工程技术人员和大专院校师生等用英文撰写的高水平稿件为主,兼收国内外来稿。主要读者对象是与水科学、水工程、水环境有关的研究人员、工程技术人员及高校师生。

(本刊编辑部供稿)