

文章编号: 1005-0329(2014)02-0037-06

技术综述

粒子追踪测速 (PTV) 技术及其在多相流测试中的应用

杨福胜¹, 张早校¹, 王斯民¹, 川口靖夫²

(1. 西安交通大学, 陕西西安 710049; 2. 东京理科大学机械工学科, 日本野田 278-8510)

摘要: 粒子追踪测速即 PTV 方法是近年来受到较多关注的一种多相流全场测试技术。本文通过文献综述总结了该方法的最新进展, 涵盖了其试验装置构成、多相流图像数据的处理、粒子匹配算法的分类及特点等专题内容, 着重对粒子匹配进行了讨论。最后结合工程应用实例分析了使用该方法时应注意的问题。

关键词: 多相流; 分散相; 粒子追踪测速; 匹配算法

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1005-0329.2014.02.009

Particle Tracking Velocimetry and its Application to the Measurement of Multiphase Flow—A Review

YANG Fu-sheng¹, ZHANG Zao-xiao¹, WANG Si-min¹, Kawaguchi Yasuo²

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Mechanical Engineering, Tokyo University of Science, Japan Noda, 278-8510)

Abstract: As a full field measurement technique in multiphase flow, Particle Tracking Velocimetry (PTV) receives wide attentions in recent years. The progresses on this method from literature review was summarized, including the experimental set-up, the processing of the image data on the multiphase flow, the classification and characteristics of the particle matching algorithms. The last topic is highlighted due to its particular importance. Finally, some notions on applying the technique are pointed out for a few specific cases.

Key words: multiphase flow; disperse phase; particle tracking velocimetry; matching algorithm

1 前言

多相流动是自然界及工业生产(特别是过程工业)中最普遍的现象之一。研究多相体系中各相的运动及其作用规律兼具理论及现实意义, 各种测试方法层出不穷, 粒子追踪测速方法(PTV)就是其中颇具特色的一种。该方法就是通过追踪单个粒子的运动轨迹计算其速度, 属于 Lagrange 类方法, 因此能够实现较高的空间精度, 近年来在流动测试领域得到了广泛的应用。

2 粒子追踪测速方法

粒子追踪测速可通过 2 种方式实现: 分析顺序采集的、曝光时间较短的多帧图像数据, 匹配同一物理粒子计算其位移(速度), 或计算较长曝光时间下的粒子光学轨迹长度^[1,2]。尽管后者成本低、实时性强、操作简便, 但其精度和处理复杂流动的能力尚未得到认可, 目前研究实践中前者仍占绝对主流, 本文围绕这一类 PTV 技术展开。此处的“粒子”既可以是连续相的示踪剂、也可以是分散相, 一些具体处理上的差别将在后文介绍。

2.1 数据采集

PTV 测速的硬件系统由流体通道、示踪剂或分散相注入设备、光源、图像采集设备、通信设备

等构成。流体通道即研究的流场,一些典型的例子包括风洞、水槽等;满足一定要求的微小固体颗粒、液滴及气泡均可作为连续相的示踪剂,将其注入流场之中一般需要专门的设备。当然,由于PTV方法最终处理的对象是数字图像,因此光源及图像采集设备是硬件系统的核心。光源的种类包括激光、卤素灯光、LED灯光及X射线等,其中以激光较为常用,可分为连续和脉冲形式;为了对光源产生的光进行处理,使之满足波长、方位及形状的要求,PTV测试系统中还常安装滤镜、反射镜和透镜等光学元件。图像采集设备主要是CCD和CMOS型的各种数字相机,近年为满足高速流动测试的要求,帧率较高的高速数字照相机的应用不断增加。

PTV测速可在2D平面或3D空间内进行,前者只需要一台相机,采集图像时相机光学主轴垂直于平面光源;后者能够对流场进行更精细的刻画,但在硬件配置和数据处理方面要求更高。3DPTV的硬件架构包括2相机系统、3相机系统、4相机系统和1相机-多反射镜系统等^[3]。有研究者指出,只有采用3台或更多的相机才能有效地避免同步图像粒子空间匹配的模糊性。单相机-多反射镜系统基本可实现多相机系统的功能^[4],然而减少了硬件费用、省却了数据同步,值得进一步探索与发展。

Kraizer等提出了一种实时PTV技术^[5],与传统方法不同,该技术中数字相机利用现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)将图像数据进行前处理,仅将处理后的“粒子”特征信息而非图像数据通过网卡在线传递给电脑进行后续计算,避免了繁重的传输任务,降低了硬件的要求、提高了处理速度,适合与远程控制和宽带网络结合使用。

2.2 数据处理

2.2.1 前处理

(1) 图像离散噪声去除

关于数字图像噪声的去除技术已经较为成熟,主要可通过高通滤波或减去背景等方式实现,此处不与赘述。

(2) 粒子特征信息的提取

PTV测速是针对单个粒子进行的,因此需要尽可能保留测试粒子的主要特征信息,包括中心坐标、尺寸、亮度、颜色、亮度动量等。

在提取特征参数之前,首先要进行粒子的识

别及分割,最简单的办法是单阈值法^[6],鉴于单阈值法在处理包含重叠粒子和非均匀光照的图像方面具有比较明显的局限性,研究者们又提出了多阈值法及动态阈值法等^[7],在一定程度上改进了分割效果。数字掩模法是另一种较为常用的方法^[8],主要用于均匀、尺寸已知的粒子图像的识别分割。此外,侵蚀/膨胀方法是近来较受关注的一种方法,Cardwell通过处理实例证明了该法鲁棒性较强,能够可靠地分割复杂的粒子图像^[6]。

获取粒子的形心坐标和尺寸的简易方法是通过像素计数法得到粒子的尺寸,再通过计算其亮度重心得到形心坐标。Adrian和Yao指出^[9],对于满足衍射约束、尺寸约为 $10\mu\text{m}$ 的球形粒子图像,其亮度近似符合二维高斯分布。在这个结论的基础上,研究者提出了一系列方法确定粒子的形心和尺寸,包括三点拟合法和最小二乘拟合法^[10,11]、四点拟合法及积分拟合方法等^[12],计算精度不断提高。

2.2.2 粒子匹配

即确定前后帧图像中的同一物理粒子(称为时间匹配),或确定3D装置多个同步图像中的同一物理粒子(称为空间匹配或三维重构),这一环节是PTV方法的核心,因此相应方法一直是学界关注的重点。对于时间匹配,算法中利用的粒子特征信息越多,准确匹配的可能性越大^[6,13];然而,鉴于多特征信息匹配计算工作量偏大,目前多数算法仍主要通过位置信息进行粒子匹配,根据实施方式可大致分为3种:

(1) 相关类算法

其原理与粒子图像测速(PIV)的相关算法相似,区别在于PTV关联的窗口以单个粒子、而非规则分布的节点为中心划定。另外,在进行相关计算前常需对图像进行二值化处理,因此又称为二值图像关联方法BICC^[14]。

(2) 基于临近运动的经验算法

这一类算法是目前流体测试应用中的主流,依据的经验准则主要包括:最大速度约束、速度连续变化、邻近区域运动相似、匹配一致等。其早期典型代表是所谓的四帧算法,实施较为复杂,且无法处理两帧PTV的图像数据,为此Baek和Lee等引入了松弛算法^[15],并迅速在PTV测试领域得到推广,其主要步骤如下:

1) 针对前一帧图像中的粒子 i ,根据最大位移阈值 R_m 确定可能与其匹配的最后一帧图像中的

候选粒子集 S_m , 同时根据另一距离阈值 R_n 确定前一帧图像中与粒子 i 邻近、发生相似运动的参选粒子集 S_n ;

2) 考虑粒子无匹配的可能性, 根据概率归一化原理初始化粒子 i 与候选粒子集 S_m 中的元素 j 匹配的概率 P_{ij} ;

3) 当粒子 i 与 j 匹配时对应位移矢量 R_{ij} , 假设粒子 k 为 i 的参选粒子集中的一个元素, 则当 k 与后一帧图像中的粒子 l 匹配对应的位移矢量 R_{kl} 与 R_{ij} 之差的模小于阈值 R_p 时, 则认为后一匹配的存在强化了前一匹配成立的可能, 由一个迭代关系式给出 P_{kl} 对 P_{ij} 的影响;

4) 设置匹配概率阈值 P_t , 当 $P_{ij} > P_t$ 时, 认为该匹配成立, P_{ij} 不再变化, 如此经过多次迭代得到前一帧及后一帧图像中粒子的完全匹配情况。

在上述松弛算法的基础上, 后续还有多位学者在其实施细节方面进行了改进, 如 Ohmi 和 Li 等修正了无匹配概率更新及阈值 R_p 确定的规则^[7], 但是 Pereira 等认为这些修正对匹配效果的影响有限^[16]。此外, Brevis 等设计了一种新的耦合算法^[17], 其思路是以相关类算法为预估、松弛算法为校正, 从而结合了两者的各自在处理稀疏和密集粒子匹配方面的优势。

(3) 整场优化算法

与前两类算法关注局部区域的粒子匹配不同, 此类算法针对整个测试流场定义了一个与全部粒子匹配相关的目标函数, 接下来通过各种优化方法获得最终的匹配收敛解。

Ruhnau 等构造了一种基于变分的 PTV 匹配算法^[18], 其目标函数在最邻近差分之外引入全局正则化连续泛函, 保证了匹配流场具有光滑性, 原则上强化了所追踪的向量场的结构化特征, 从而减少了伪矢量的出现、简化了后续处理环节。

图论技术: 应用范围不仅限于流体中的 PTV 测速^[19], 还包括一些随机运动的分析, 包括显微颗粒的布朗运动、微生物的运动等^[20]。其主要思路是构造前后两帧图像全部粒子的关联矩阵 G , 元素 G_{ij} 的值为 1 代表前帧的粒子 i 与后帧的粒子 j 相匹配, 否则取值为 0。定义粒子匹配的费用泛函 Φ , 当粒子匹配的变化导致 Φ 减小时, 认为其合理并接受该变化, 计算收敛后相应的 G 就表征了 PTV 粒子匹配的完整结果。最简单的费用函数即为前后两帧粒子位移的总平方和。

人工神经网络: 这是一类模仿人体神经元处

理信息的人工智能技术, 研究者已设计了自组织图形网络、ART-2 网络、Hopfield 网络等^[21] 多种网络形式用于实现 PTV 粒子的匹配, 证实了方法的可行性及有效性。作为一种通用优化方法, 人工神经网络在 PTV 方法实施的多个环节均有应用价值, 除粒子的时间匹配外, 还包括空间匹配和流场的后处理等^[22,23]。

遗传算法: 即模仿生物种群进化的优化技术, 初始“种群”通过“繁殖”、“交叉”、“变异”等操作, 对环境适应性强, 表现为适度函数极大或极小的“个体”胜出, 成为优化解, 对于 PTV 算法优化解即为前后帧全部粒子的最佳匹配^[24,25]。

模拟退火算法: Stellmacher 和 Obermayer 提出了一种新的 PTV 粒子匹配方法^[26], 其费用函数同时将匹配矩阵和流场参数作为优化变量。作者的优化算法为两层嵌套结构, 匹配矩阵的优化采用模拟退火方法, 而流场参数的优化则通过分析或梯度方法实现, 两者交替进行。算例表明该方法在处理粒子密度较大、局部流场变化剧烈的问题时具有独特的优势。

蚁群算法: 属于一种模拟蚁群觅食过程路径优化的仿生算法^[27]。对于 PTV 中的粒子匹配, 其主要思路是使大量“蚂蚁”个体连续通过前帧和后帧的全部粒子形成完整路径, 在“蚂蚁”通过较优的片断路径(即粒子匹配, 以粒子 i 和粒子 j 的匹配为例)时相应的“信息素”得到加强, 即使得下一个迭代轮次蚂蚁个体从粒子 i 出发时选择 j 完成片断路径的概率增大。蚁群算法的优点是其对于计算参数不敏感, 具有很强的鲁棒性^[27]。

空间匹配的方法通常可以分为 2 种: 极线法和 3-D 坐标算法^[28], 其中极线法是常用和标准化的方法。对于 2 个同步相机而言, 其原理可以描述为: 如果粒子 P 在相机 1 中的图像 p_1 已知, 那么其被相机 2 捕捉的图像 p_2 一定落在极线(p_2, e_2) 上, 表达式为:

$$\tilde{p}_1^T F_{12} \tilde{p}_2 = 0 \quad (1)$$

式中 F_{12} ——两相机之间的基础矩阵

由于测量和校准误差的存在, 式(1)可改为:

$$\tilde{p}_1^T F_{12} \tilde{p}_2 \leq \varepsilon \quad (2)$$

三维坐标算法是将 2 个相机编为一组, 首先利用三角化方法得到每组相机的粒子中心三维坐标值, 然后比较不同组的计算结果, 满足一定的阈值条件认为相应空间匹配成立。

2.2.3 流场计算

(1) 伪矢量去除

通过粒子匹配过程产生的错误速度矢量称为伪矢量,需要在分析之前去除。伪矢量的辨别通常基于平均值及中值滤波的原则。此外,Young等提出了一种基于光滑运动模型的伪矢量判别的框架方法^[29]。但是,上述方法用于分散相测速时存在以下问题:1)分散相粒子分布不均匀,稀疏区域很难进行滤波计算;2)当分散相与连续相密度相差较大时,由于惯性及体积力作用,分散相粒子间运动关联较弱,突兀变化不能作为判定伪矢量的依据。为此西安交通大学王元课题组提出了一种双向匹配法则^[30,31],即通过双向计算(前帧到后帧、后帧到前帧)建立冗余匹配集,找出重复率高的匹配、去除分歧匹配,最后计算出伪矢量比例很低的结果。此外,通过连续测量消除伪矢量也是可行的^[32],因为当连续曝光的时间间隔较短时,粒子速度的时间延续性比空间协调性更可靠,错误匹配结果易于识别并剔除。

(2) 连续流场及导出量的计算

当通过示踪剂测量流场时,往往需要根据已知点的速度推算未知节点的速度及导出量(如涡度),插值计算就很必要了。传统的插值方法(如双线性、Gauss 距离权重等)实施简便、计算量较小,但往往无法得到导出量的估计,且不满足连续性等要求。Liburdy 和 Young 等提出了一种针对三维 PTV 数据的插值方法^[33],包括粒子的速度向量估计、子区域的近似函数确定、流场及导出量计算等三个步骤,其核心是在有限元方法的框架下,得到符合物理和数学约束条件的速度函数。Ido 等提出了一种对 PTV 数据进行后处理的新方法^[34],首先通过 Laplace 方程或双二次椭圆方程对速度数据进行均匀网格上的重置,再修正重置数据使之满足连续性方程。Labonte 尝试了使用移除伪矢量的 PTV 速度数据训练传统的反传(BP)人工神经网络,从而使之逼近实际的流体力学函数,将速度估计推广到整场范围^[23]。

在获得粒子连续运动轨迹后,不仅可以计算其瞬时速度,原则上还可通过二次求导确定其加速度,这也是 PTV 方法相对 PIV 方法的优势之一。但是,若直接由粒子位置的数值微分计算加速度,其结果往往包含放大的粒子定位偏差,从而呈现显著的波动。因此,在实践中常采用的处理方法是先对粒子轨迹进行曲线拟合,再对曲线方

程求导得到加速度^[35]。

3 应用举例

3.1 风沙输运

风沙输运是日益严重的沙漠化问题中的关键物理现象。鉴于该现象十分复杂、很难通过理论方法准确描述,采用不同手段、包括 PTV 方法进行的试验研究备受重视。其中以高速照相机或摄像机和连续光源进行的连续时间 PTV 测量主要用于沙粒跃移及爬流运动规律、特别是沙粒间及沙粒与反射表面间作用的研究^[36,37];而以普通 CCD/CMOS 数字照相机和脉冲光源进行的沙粒速度的两帧 PTV 测量,可方便地与空气相的速度测试手段(如皮托管、PIV 等)结合,获得两相的运动信息^[38-40],对分析相间的双向耦合作用很有帮助。风沙输运的 PTV 测量一般在竖直平面内进行,尽管有学者指出沙粒严格上属于三维运动^[36];另一个值得注意的问题是跃移底层的沙粒分布密度非常大,相互之间的碰撞频繁、运动不规律,导致这个区域“粒子”(即沙粒)的匹配较为困难。

3.2 气泡流动

含气泡的多相流动在化学及环境工程中较为常见,在强化传热和流动减阻等多种场合都有应用。尽管气泡和沙粒同属分散相,但前者一般尺寸较大、透明、存在变形和重叠、运动速度较慢,因此其 PTV 测速的实施细节与后者差别明显。通常的处理步骤是去除图像噪声后^[41-44],确定气泡的轮廓、对图像进行二值化,计算各气泡的几何中心,最后进行相应“粒子”的匹配。由于气泡尺寸大、速度慢,正确匹配难度不大;但是之前的图像处理过程相比沙粒复杂,另气泡变形会在测速结果中引入误差^[42],这些在实践中都需要注意的。

4 结语

粒子追踪测速(PTV)是一种应用广泛的新兴多相流测试技术,其精度与数据采集、处理的多个环节有关,在实践中应结合测试对象特征确定具体实施步骤和方法。

参考文献

[1] Baldassarrel A, De Lucial M, Nesi P, et al. A vision-

- based particle tracking velocimetry [J]. *Real-Time Imaging*, 2001, 7:145-158.
- [2] Liu C, Tao L. Two-dimensional digital particle tracking velocimetry algorithm based on the image of particle trace[J]. *J Coastal Res.*, 2007, SI 50:415-419.
- [3] Maas H G, Putze T, Westfeld P. Recent developments in 3D PTV and tomo-PIV[M]. in W Nitsche and C Dobriloff (Eds.); *Imaging Measurement Methods*, 2009, Springer, 53-62.
- [4] Putze T. Quality analysis of flow field data determined by 3D PTV in gas flows[C]. *Proceedings of 12th International Symposium on Flow Visualization*, Gottingen, Germany, Sep. 10-14, 2006.
- [5] Kraizer M, Ratner D, Liberzon A. Real-time image processing for particle tracking velocimetry [J]. *Exp. Fluids*, 2010, 48:105-110.
- [6] Cardwell N D. Investigation of particle trajectories for wall-bounded turbulent two-phase flow [D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, US, 2010.
- [7] Ohmi K, Li H Y. Particle-tracking velocimetry with new algorithms[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, 11: 603-616.
- [8] Takehara K, Etoh T. A study on particle identification in PTV particle mask correlation method[J]. *J Visualization*, 1998, 1(3):313-323.
- [9] Adrian R J, Yao C S. Pulsed laser technique application to liquid and gaseous flows and the scattering power of seed materials[J]. *Appl. Opt.*, 1985, 24(1): 44-52.
- [10] Marxen M, Sullivan P E, Loewen M R, et al. Comparison of Gaussian particle center estimators and the achievable measurement density for particle tracking velocimetry[J]. *Experiments in Fluids*, 2000, 29:145-153.
- [11] Nobach H, Honkanen M. Two-dimensional Gaussian regression for sub-pixel displacement estimation in particle image velocimetry or particle position estimation in particle tracking velocimetry [J]. *Exp. Fluids*, 2005, 38:511-515.
- [12] Brady M R, Raben S G, Vlachos P P. Methods for digital particle image sizing (DPIS): Comparisons and improvements[J]. *Flow Measurements and Instrumentation*, 2009, 20: 207-219.
- [13] Mikheev A V, Zubtsov V M. Enhanced particle tracking velocimetry (EPTV) with a combined two-component pair-matching algorithm[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2008, 19: 085401.
- [14] Li Z Q, Wang Y, Zhang Y. Analysis of force acting on sand particles by using a high-speed digital camera [C]. *Proceedings of 3rd International Congress on Image and Signal Processing (CISP 2010)*, 2010, 2501-2504.
- [15] Baek S J, Lee S J. A new two-frame particle tracking algorithm using match probability [J]. *Exp. Fluids*, 1996, 22:23-32.
- [16] Pereira F, Stuer H, Graff E, et al. Two-frame 3D particle tracking[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, 17: 1680-1692.
- [17] Brevis W, Nino Y, Jirca G H. Integrated cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry[J]. *Exp. Fluids*, 2011, 50:135-147.
- [18] Ruhnau P, Guetter C, Putze T, et al. A variational approach for particle tracking velocimetry [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2005, 16:1449-1458.
- [19] Dailziel S B. Decay of rotating turbulence: some particle tracking experiments[J]. *Appl. Sci. Res.*, 1992, 49:217-244.
- [20] Shalzarini I F, Koumoutsakos P. Feature point tracking and trajectory analysis for video imaging in cell biology[J]. *Journal of Structural Biology*, 2005, 151: 182-195.
- [21] Labonte G. A new neural network for particle-tracking velocimetry[J]. *Exp. Fluids*, 1999, 16: 340-346.
- [22] Ohmi K, Joshi B, Panday S P. A SOM Based Stereo Pair Matching Algorithm for 3-D Particle Tracking Velocimetry[C]. Huang D S et al. (Eds.); *ICIC 2009, LNAI 5755*, Berlin: Springer, 2009, 11-20.
- [23] Labonte G. Neural network reconstruction of fluid flows from tracer-particle displacements [J]. *Exp. Fluids*, 2001, 30:399-409.
- [24] Kimura I, Hattori A, Ueda M. Particle pairing using genetic algorithms for PIV[J]. *J Visualization*, 2000, 2(3/4):223-228.
- [25] Ohmi K, Panday S P. Particle tracking velocimetry using the genetic algorithm[J]. *J Visualization*, 2009, 12(3):217-232.
- [26] Stellmacher M, Obermayer K. A new particle tracking algorithm based on deterministic annealing and alternative distance measures[J]. *Exp. Fluids*, 2000, 28: 506-518.
- [27] Panday S P, Ohmi K, Nose K. An improved ant colony optimization based particle matching algorithm for time-differential pairing in particle tracking velocimetry [C]. Huang D S et al. (Eds.); *ICIC 2010, LNAI 6216*, Berlin: Springer, 2010, 342-349.

- [28] Bihole P H. Large scale particle tracking velocimetry for 3-dimensional indoor airflow study [D]. National Institute of Applied Sciences of Lyon, Lyon, France, 2009.
- [29] Young C N, Johnson D A, Weckman E J. A model-based validation framework for PIV and PTV [J]. *Exp. Fluids*, 2004, 36:23-35.
- [30] 张洋, 王元, 李志强. 结合双向法则的松弛迭代粒子追踪测速法 [J]. *空气动力学学报*, 2010, 28(3): 250-254.
- [31] 张洋, 王元, 王大伟. DT-PTV 离散相伪矢量的概率择优式剔除算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(5):119-123.
- [32] Kasagi N, Nishino K. Probing turbulence with three-dimensional particle-tracking velocimetry [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1991, 4:601-612.
- [33] Liburdy JA, Young EF. Processing of three-dimensional particle tracking velocimetry data [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1992, 17:209-227.
- [34] Ido T, Murai Y, Yamamoto F. Postprocessing algorithm for particle-tracking velocimetry based on ellipsoidal equations [J]. *Exp. Fluids*, 2002, 32:326-336.
- [35] 李志强, 王元, 张洋. 跃移沙粒运动参数的数字图像分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(7):109-113.
- [36] Zhang W, Kang J H, Lee S J. Visualization of saltation sand particle movement near a flat ground surface [J]. *J Visualization*, 2007, 10(1):39-46.
- [37] Wang Y, Wang D W, Wang L, et al. Measurement of sand creep on a flat sand bed using a high-speed digital camera [J]. *Sedimentology*, 2009, 56:1705-1712.
- [38] Zhang W, Wang Y, Lee S J. Simultaneous PIV and PTV measurements of wind and sand particle velocities [J]. *Exp. Fluids*, 2008, 45:241-256.
- [39] Ho T D, Valance A, Dupont P, et al. Scaling laws in aeolian sand transport [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106: 094501.
- [40] Yang FS, Aoshima D, Otakeguchi K, et al. Experimental study on the local turbulence modulation in a horizontal particle laden flow with rigid fence [C]. *Proceedings of 7th ISMF*, Xi'an, China, Oct. 26-30, 2012.
- [41] Kitagawa A, Hishida K, Kodama Y. Flow structure of microbubble-laden turbulent channel flow measured by PIV combined with the shadow image technique [J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 38: 466-475.
- [42] 周云龙, 李洪伟, 范振儒. 基于 PTV 法对油气水三相流流场的测定 [J]. *化工学报*, 2008, 59(10): 2505-2510.
- [43] 周怒潮, 邵虎跃, 贺小华. 刮板结构对薄膜蒸发器内气液两相液膜流场影响分析 [J]. *压力容器*, 2013, 30(4):33-38.
- [44] Lelouvetel J, Nakagawa M, Sato Y, et al. Effect of bubbles on turbulent kinetic energy transport in downward flow measured by time-resolved PTV [J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 50:813-823.

作者简介:杨福胜(1981-),男,讲师,主要从事氢化物热应用、气固反应器及两相流实验相关研究,通讯地址:710049 陕西省西安市咸宁西路28号 西安交通大学化工学院过程装备系。

(上接第32页)

- [3] 丰仓富太郎. 高运动粘度离心泵的性能改善 [J]. *涡轮机械*, 1979, 7(2):12-17.
- [4] 曹广军, 薛敦松, 李昂, 等. 德国离心油泵运动粘度换算图及其数学表达式 [J]. *工程热物理学报*, 2002, 23(4):13-16.
- [5] 陈晓玲, 薛敦松, 张武高. 粘性油泵性能换算 [J]. *流体机械*, 1998, 26(9):23-27.
- [6] 李文广, 胡泽明. 离心高粘度泵的性能试验 [J]. *流体机械*, 1996, 24(2):3-5.
- [7] 陈晓玲, 张武高, 朱宏武, 等. 输送粘性油时转速对离心泵性能的影响 [J]. *石油机械*, 1999, 27(1):28-31.
- [8] 陈晓玲, 张武高, 黄震. 离心泵输送粘性流体时叶轮出口宽度的设计 [J]. *上海交通大学学报*, 2002, 36(11):1693-1696.
- [9] 曹广军, 吴玉林, 刘树红. 离心油泵输送粘性流体空蚀性能实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2006, 27(5):784-786.
- [10] 王永强, 郭宏彬, 薛胜雄, 等. 大罐群机械清洗的对策与实践 [J]. *流体机械*, 2013, 41(1):49, 54-57.
- [11] 任启乐, 郭宏彬, 庞雷, 等. 大直径旋转磨料水射流除鳞除锈技术研究 [J]. *流体机械*, 2012, 40(12): 18-21, 68.
- [12] 苏吉鑫, 陈正文, 王永强, 等. 船用消防射流泵流场的数值分析 [J]. *流体机械*, 2010, 38(6):34, 39-42.
- [13] 赵万勇, 赵爽. 离心泵叶片设计经验系数取值范围分析 [J]. *流体机械*, 2012, 40(4):39-42, 52.
- [14] 苏文献, 韩超. 大型储罐屈曲失效及修复的有限元模拟 [J]. *压力容器*, 2011, 28(1):55-61.
- [15] 王福军. 计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

作者简介:庞雷(1983-),男,硕士,工程师,主要从事储罐机械清洗技术研究及工程应用,通讯地址:230031 安徽省合肥市市长江西路888号合肥通用机械研究院流体机械研究所。

粒子追踪测速 (PTV) 技术及其在多相流测试中的应用

作者: [杨福胜](#), [张早校](#), [王斯民](#), [川口靖夫](#), [YANG Fu-sheng](#), [ZHANG Zao-xiao](#), [WANG Si-min](#), [Kawaguchi Yasuo](#)

作者单位: [杨福胜,张早校,王斯民,YANG Fu-sheng,ZHANG Zao-xiao,WANG Si-min\(西安交通大学,陕西西安,710049\)](#), [川口靖夫,Kawaguchi Yasuo\(东京理科大学机械工学科,日本野田278-8510\)](#)

刊名: [流体机械](#)

英文刊名: [Fluid Machinery](#) 

年, 卷(期): 2014(2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_ltjx201402009.aspx