

实体模型表面流场、河势测量中图像技术应用研究进展

唐洪武^{1,2}, 陈 诚^{1,2}, 陈 红^{1,2}, 黄建通^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 介绍了粒子图像测速技术(PIV)引入水流研究的历程, 结合近 10 年来图像技术的应用及发展情况, 讨论了将图像技术应用到流场及河势测试中的图像识别、边缘检测等关键问题的研究进展, 并对相关的测试理论进行了探讨. 指出, 对河工模型表面流场测量中的图像畸变矫正、示踪粒子在三维水流中的跟随性、浑水条件下表面流场的测量以及河势的实时自动提取方面还有待进一步深入研究, 将图像技术获得的流场、河势信息与数值模拟相结合实现实时混合模拟是今后的研究方向.

关键词 PIV 河工模型 河势 流场测试

中图分类号 P333.9

文献标识码 A

文章编号 1000-1980(2007)05-0567-06

目前, 水流研究主要采用图像处理技术中的粒子图像测速技术 PIV (particle image velocimetry). PIV 技术本质上是流场显示技术的新发展^[1-4]. 流场显示技术是试验流体力学的一个重要组成部分, 它将表征流场特征的不可见信息, 借助于光学等特殊显示技术, 变成可以直接进行观察的流动图案, 把流动的某些性质加以直观显示, 从而提供直观的瞬时全场的流动信息, 但其很难提供详细的定量结果. 随着人们对瞬态流场测试和了解流动结构的需要, 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的方法和手段, 同时, 随着科学技术的发展, 流动显示技术结合光学、图像处理及计算机技术, 将流场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的基础上, 利用图像处理技术发展起来的一种新的流动测量技术. PIV 技术综合了单点测量技术和显示测量技术的优点并克服了其技术弱点, 既具备了单点测量技术的精度和分辨率, 又能获得流场显示的整体结构和瞬态图像.

传统的流动测速仪器主要有 毕托管、微型旋桨流速仪、热线流速仪、超声波测试技术、激光流速仪. 但上述测量仪器都是单点测量, 与它们相比, PIV 技术是一种无干扰、瞬态、全流场的速度测量方法, 同时由全流场的速度信息可以得到其他物理量信息, 如流线图、压力场和涡量场等. PIV 技术克服了以往流场测试中单点测量的局限性, 能够进行瞬态流场的测试, 使得粒子图像测速技术在流体研究中得到广泛的应用. 迄今为止, 在二维全场测速技术中, PIV 技术是最成熟的一种新技术, 已迅速变为测速的标准方法, 其产品已走向市场, 如美国的 TSI 公司、德国的 Lavision 公司以及丹麦的 Dantec 公司均有成套产品推出, 国内也有 PIV 技术的研究成果, 如天地立方公司就致力于商业 PIV 技术的研发.

近年来, PIV 技术在实体河工模型中得到了广泛的应用^[5-8]. 实体河工模型主要用于对原型所反映出来的自然现象进行反演、模拟和试验, 从而揭示原型的内在规律, 是解决江河治理及大型水利水电工程泥沙问题的主要手段. 由于河工模型尺寸大, 观测的范围广, 对于动床模型和非定常流动模型, 床面和边界形态均在不断变化之中, 因此, 在河工模型试验中采用全场实时测速技术实现对实体河工模型中表面流场的自动测量十分必要. 为了解决这个问题, 国内科研人员已开发出应用于大型河工模型表面流场测量的粒子示踪测速系统: 清华大学研制的 DPTV 系统、中国科学院力学研究所研制的 DPIV 系统、河海大学研制的大型物理模型图像测速系统等. 另外, 利用图像处理技术实现对河势的自动提取, 对于研究河势的变化特性以及河床演变规律, 也具有十分重要的意义和作用.

收稿日期 2006-11-03

基金项目 国家自然科学基金资助项目(50479068) 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-0494) 江苏省研究生科技创新计划资助项目(1306014)

作者简介 唐洪武(1966—), 男, 江苏建湖人, 教授, 博士, 主要从事河流模拟、工程水力学及现代流体测控技术等研究.

目前,我国对物理模型研究手段的应用十分重视,随着模型黄河、模型长江、模型珠江等的兴建,对提高模型的研究水平和质量就显得更为必要.随着研究问题的深入,对粒子图像技术在水流研究中的应用提出了更高的要求,同时,数字流域、数字河流等的建设也要求不断提高图像处理技术的研究水平,从而更好地将河工模型与数学模型结合起来,实现真正意义上的合交模型(Hybrid Model),以提高河流工程的理论研究水平和量测技术.本文着重综述图像技术在河工物理模型流场河势测试研究中的应用情况,并提出适合我国学者现状研究情况的努力方向.

1 河工模型表面流场、河势测量研究进展

1.1 河工模型中表面流场测速技术研究进展

在河工模型试验中,表面流场的观测是一项重要的测量内容.早在1996年,唐洪武^[1]就应用图像处理技术对河工模型中快速自航船模船尾流场及航道断面流场进行实时测量,并得到较好的效果.王兴奎等^[8]将研制开发的图像处理系统应用于三峡坝区泥沙模型试验的流场量测,在流场中施放示踪颗粒,采用摄、录像的方法记录颗粒的运动轨迹,经过图像处理得出全试验段的表面流速和流态.田晓东等^[9]开始将DPIV技术应用于潮汐流动表面流速的测量,根据数字信号分析原理,对连续的两幅图像进行分析,寻找互相关函数的峰值,成功地实现了非恒定流流速的测量.田文栋等^[10]开发了多CCD的DPIV系统,并应用到南水北调穿黄等工程.罗小峰等^[11]将PIV技术应用于潮汐河口河工模型试验中,并开发了操作简便的PIV数据处理分析系统.章蔚红等^[12]使用PIV技术对水垫塘试验模型单股淹没射流流场进行了测量,得到流场的流态及其特征参数(等流函数线、涡量、湍动能).

上述河工模型表面流场中所应用的图像处理技术,实质上是在传统PIV技术的基础上延伸和发展而来的LSPIV(large scale particle image velocimetry)技术,这种技术与传统的PIV技术的区别主要在于:(a)LSPIV的测量区域比PIV大得多.因为测量区域较大,通常摄像头架设的位置离测量区域较远,为了满足图像处理的要求,所采用的示踪粒子粒径较大.(b)LSPIV通常用于测量水流表面流场,照明系统通常采用普通光源(甚至可以是自然光).FUJITA等^[13]分析了LSPIV的整个处理过程,包括图像采集、图像增强、图像矫正、图像处理、流场信息输出,并且将LSPIV应用于研究模型溢洪道下游的水流掺气过程、通过模型河流交汇处的冰输运过程及原型河流的河漫滩水流流动过程,结果表明LSPIV技术是一种简单而且可信的方法.Meselhe等^[14]将LSPIV技术应用于低流速、低水深的水流研究,并指出由于测量区域较大,比较难做到投放粒子均匀分布.如投放密度过小,可能会发生查询窗口中的粒子离开或窗口外的粒子进入窗口的情况而导致错误矢量的增加.而投放密度过大,也会因为窗口中的粒子过于饱和产生错误矢量.另外,采样时间过短,可能会因为粒子位移过小而导致对粒子的位移测量不准确,反之采样时间过长,可能会出现粒子跑出查询窗口的情况.所以,示踪粒子投放密度及采样时间对测量结果好坏影响较大.

由此可见,图像处理技术在河工模型表面流场的测量中已经得到了广泛的应用,但仍需要对相关的技术问题如示踪粒子识别、图像采集、图像处理等进行更深入的研究,才能更好地提高测量精度.

1.2 河工动床模型河势测量技术研究进展

河工模型另一重要的测量内容是河势的测量.河势是指河道水流的平面形式及发展趋势,包括河道水流动力轴线的位置、走向以及河弯、岸线和沙洲、心滩等分布与变化的趋势.河势演变主要指河道水流平面形式的变化.我国大量河流含沙量高,特别是像黄河这样的多沙游荡性河流,河道含沙量大,河床冲淤变化迅速,河势变化剧烈,通过对河势变化的研究有利于揭示这些河流泥沙的冲淤特性.

GPS技术^[15]近年来被应用于对河势的测量中.GPS定位技术具有精度高、作业周期短的优势,使用GPS接收机与测深仪结合,将每个采样点的三维坐标数据输入计算机,通过专用软件处理就可以得出水下地形数字化地图.颜惠庆等在长江口航道治理工程中,利用GPS-RTK测量技术进行无验潮水深测量,实现了对导堤附近河势的监测^[16].

实体河工模型是对河流河势、河床演变等河流变化特性进行研究的重要手段,但目前对动床河工模型河势的测量,主要靠人工,不但工作量很大,而且由于测量时不可能实时分析,不利于对河势变化的研究,因此,寻求一种高效的河势测量方法具有重要的意义.随着计算机图像处理技术的发展,已有研究者尝试通过图像处理的办法来进行实体模型河势的测量.毛野等^[16]运用基于普通相机的近景摄影测量三维图像解析技术针对

镇江段微尺度模型研究河道采砂对长江镇江段河床演变的影响,得到镇江段河床演变的趋势.陈红^[17]将图像测速技术应用到动床河工模型河势的测量中,结合边缘检测技术、轮廓提取思想和神经网络技术建立了一套河势提取方法.该方法首先利用边缘检测算子对流场图像进行处理,然后进行轮廓提取.由于提取过程中存在边缘断点,用建立 3 层感知器神经网络模型的方法解决了自动断点跟踪问题,从而实现了河势的自动提取.

将边缘检测技术应用于动床河工模型河势的自动测量,对河势的研究起到了十分重要的作用,但目前该技术的研究尚处于探索的阶段.

2 有关图像测试理论的研究

2.1 表面流场测试理论

2.1.1 测量原理

粒子图像测速(PIV)应用于测量表面流场的基本原理是:在模型水流表面散播跟随性好的示踪粒子,跟随水流运动,利用 CCD 摄像头记录一定时间间隔的流场图像,再进行图像处理,提取示踪粒子像,在相邻 2 幅流场图像中进行粒子匹配,计算出流场中各点的流速向量,再推求其他运动参量(包括流场速度向量图、速度分量图、流线图等).

2.1.2 PIV 速度提取算法

对于流场,表征其运动状态的最直接的物理量就是速度向量.要得到速度向量,最简便的方法是能从图像中提取粒子的位移,然后除以时间 Δt ,得到该段时间内的平均流速.当 Δt 足够小时,即为 t 时刻的瞬时速度.对实体河工模型表面流场的速度提取算法主要有:PIV 灰度图像相关法和粒子轨迹跟踪法(PTV).

2.1.2.1 PIV 灰度图像分布相关法

在对图像进行速度提取的处理中,一般采用的是图像相关的方法^[3].根据相关原理的不同,可以分为自相关和互相关 2 种.

a. 自相关.在图像处理中,相关主要用于模板或原型匹配方面.双曝光粒子图像是第 1 次曝光图像 $f_1(x,y)$ 和第 2 次曝光图像 $f_2(x,y)$ 的叠加.将双曝光粒子图像进行自相关运算,可检测出粒子间的位移.自相关运算的公式如下:

$$R(m,n) = \sum_0^{N-1} \sum_0^{N-1} f_1(x,y)f_2(x+m,y+n)$$
 (1)

其中图像的大小为 $N \times N$.由式(1)求出一系列的 R 值,当 R 获得最大值时,表明 $f_1(x,y)$ 和 $f_2(x,y)$ 在该位置是最佳匹配位置.查问区的图像 $f(x,y)$ 被认为是第 1 个脉冲光所形成的图像 $f_1(x,y)$ 和第 2 个脉冲光形成的图像 $f_2(x,y)$ 叠加的结果.当查问区足够小时,就可以认为其中的粒子速度都是一样的.自相关分析^[4]经过 2 次傅立叶变换,即第 1 次得到杨氏干涉条纹类似的结果,第 2 次得到位移场.进行自相关运算时,图像中的判读小区域在自身图像中寻找与其相似度最大的区域,相关处理 2 次曝光粒子图像中的无效粒子被认为是相关处理中的背景噪声,影响判读识别的准确性,致使零位移(速度)无法判读.另外,自相关存在速度方向二义性问题.

b. 互相关.互相关技术原理是分别在 t_1 和 $t_1 + \Delta t$ 时刻图像的相应位置取一个查询窗口(假设该查询窗口对应的流场微团内部在短时间间隔内没有相对运动,微团只做平动),计算并找出 2 个窗口的互相关函数峰值,即可得到窗口内粒子的平均位移和方向.位移除以时间即是速度.将该速度向量赋于窗口中某个固定点,即得到流场中该点的速度信息.

给定二维函数 $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$,它们的互相关函数如下:

$$R_{fg}(\Delta x,\Delta y) = f(x,y)g(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)g(x+\Delta x,y+\Delta y)dx dy$$
 (2)

式中 $\Delta x,\Delta y$ 是粒子图像在水平和竖直方向上的位移.式(2)反映了 $f(x,y)$ 和 $g(x,y)$ 函数间相互匹配的程度.其离散形式如下:

$$R(n,m) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(X,Y)g(X+n,Y+m) \quad (n = 1,2,3,\cdots,N-1;m = 1,2,3,\cdots,M-1)$$
 (3)

$f(X,Y)$ 和 $g(X,Y)$ 分别表示 $t_1,t_1 + \Delta t$ 时刻查询窗口图像函数, $g(X,Y)$ 是 $f(X,Y)$ 经过 Δt 时间后的形态,

$f(X,Y)$ 和 $g(X,Y)$ 对应的图像窗口相似程度越大, $R(n,m)$ 的值就越大,当 $R(n,m)$ 值达到最大时,即可得到 $f(X,Y)$ 经过 Δt 时间后的相对位移,即水流质点在 Δt 时刻的位移,进而计算得到 t_1 时刻的速度.

互相关算法能自动识别速度方向,速度测量范围较大,但其计算量大,很多研究者对其进行了改进,如Willert等^[18]提出的FFT快速傅立叶变换、Huang^[19]改进法、Hartley变换^[20]等.表1对各种PIV算法进行了说明.

表1 PIV算法
Table 1 PIV algorithms

分 类	原 理	特 点
自相关	将双曝光粒子图像进行自相关运算,求最大自相关系数	零位移(速度)无法判读,存在速度方向二义性问题
互相关	在2幅图像的查询窗口中求最大互相关系数	可以自动判读速度方向,速度测量范围比自相关大得多,但计算量较大
FFT快速傅立叶变换	将数字化图像看作是随时间变化的离散的二维信号场序列,利用信号分析的方法,引入快速傅立叶变换FFT算法,通过计算两幅相继图像中相应位置的两个小区域的互相关函数得到图像中小区域上粒子图像平均位移大小和方向.	计算量比互相关大幅减少,计算速度快,但没有考虑粒子进入或跑出查询窗口等情况
Huang改进法	在FFT的基础上,针对FFT存在的缺陷,提出了一种迭代方法,将与第1幅图像中相应位置在第2幅图像中的查询窗口扩大,通过迭代的方法查找出第1幅图像的查询窗口在第2幅图像中的最佳位置,从而得到更精确的位移.	精度比FFT高,但计算时间较长
Hartley变换	Hartley变换是类似于Fourier变换的积分变换,其正反变换的积分核相同,具有Fourier变换的大部分特性,且实序列的Hartley变换仍是实序列,避免了变换过程中的冗余性,能成倍地节约内存空间.	计算量比FFT要减少近一半,从而其计算速度将提高1倍.

2.1.2.2 PTV方法

PTV方法是直接跟踪流场中示踪粒子的运动,具有准确直观的特点,避免了PIV方法中的平均效应.常用的PTV方法有4帧法^[21],它是利用示踪粒子的运动学特征,用运动学规律去挑选可能的粒子运动轨迹,剔除不可能的粒子运动假设.另一种常用的方法是2帧法^[22],该方法基于在2帧连续图像上的示踪粒子应满足4个基本特征:(a)图像中粒子运动不能超过最大限制速度;(b)粒子运动速度变化小;(c)在同一个小区域的粒子表现出相同的运动;(d)兼容匹配,即同一帧图像中的两个粒子不能与另一帧图像的同一个粒子相匹配.同时,该方法是基于对粒子匹配概率和不匹配概率的重复估计进行粒子图像匹配的.Kim等^[23]对两帧法进行了改进,并提出了将PIV与PTV方法相结合的混合自适应的PTV方法,即先利用PIV的计算结果计算两帧法PTV所需的参数,然后进行两帧法PTV计算,克服了以往两帧法PTV将球形匹配应用于整个流场而无法反映出局部流动结构变化,特别是速度梯度较大处流场变化的缺点,并且大大减少了错误向量.近年来,研究人员开始引入人工神经网络来改进PTV算法.Knaak^[24]等建立了Hopfield神经网络,尝试通过找到能量函数最小值的方法,来实现对位移场光滑性、粒子匹配唯一性等粒子跟踪匹配条件的约束限制,从而进行PTV计算.该方法计算结果比最邻近法好很多.Grant等^[25]建立的神经网络与Knaak完全不同,该网络是一种竞争网络,通过竞争方式选出相匹配的粒子图像.

PTV方法适合于流场中粒子浓度较小的情况.当粒子浓度较大时,不同粒子的曝光轨迹会相互黏连、交错,致使粒子轨迹跟踪测量失败.但示踪粒子浓度小限制了流场速度测量的信息量,某些流场点的速度信息会因无示踪粒子存在而无法获取.

2.2 河势提取理论

2.2.1 原理

河势提取主要是应用边缘检测技术实现对河势边界进行自动识别和提取.所谓边缘就是图像中灰度发生急剧变化的区域边界.边缘广泛存在物体与背景之间、物体与物体之间、基元与基元之间.根据灰度变化的剧烈程度,边缘一般分为2种:(a)阶跃边缘,它两边的像素的灰度值有着显著的不同;(b)屋顶状边缘,它位于灰度值从增加到减少的变化转折点.边缘存在两个特征:灰度的变化率和方向,用梯度向量的幅度和方向表示.在图像中,河势边界就是由于水流与河岸交界处灰度发生剧烈变化形成,因此,通过研究寻求适合提取河势边界的边缘检测方法,便可实现对河势边界的自动识别和提取.

2.2.2 边缘检测方法

边缘提取方法是利用边缘邻近一阶或二阶方向导数变化规律,考察图像的每个像素在某个邻域内灰度变化的方法,具体有阈值法及其改进算法、种子算法和边缘检测算子法等.阈值法及其改进算法的原理是选

取一个适当的灰度值将前景色和背景色分开.该算法在处理前景色和背景色有明显差别的图像时效果较好,处理速度快,但处理对比度弱、噪声大的图像时误差较大.虽然可将图像划分为多块,再根据每块图像灰度分布动态地选择阈值,但由于实际采集的图像对比度、信噪比变化大,其通用性、处理效果往往较差,同时分块处理还会影响到处理速度.种子算法是在图像中先选择一个种子像素,在其邻域查找与该种子像素具有相同或类似分布特征的像素,然后以找出的像素作为新种子循环下去.种子算法的难点是判别两个像素邻域的相似程度即确定种子的生长规则,这直接影响到边缘图像的检测精度.边缘检测算子法是利用边缘检测算子对图像进行运算处理得到边缘图像,具有简单实用、处理速度快等优点.边缘检测算子种类很多,如 Kirsch, Robert, Prewitt, Sobel, Gauss-Laplace 等算子.

随着信号处理、模糊数学、几何学等基础理论的发展,越来越多的新技术被引入到边缘检测方法中^[26-30],主要有:(a)基于形态学的边缘检测算法;(b)基于小波变换和小波包的边缘检测方法;(c)基于模糊理论的边缘检测方法;(d)基于分形几何的边缘检测算法.基于形态学的边缘检测算法不像微分算法对噪声敏感,同时提取的边缘也比较平滑,易于用并行处理方法有效地实现,从而提高处理速度,而且硬件实现也较容易,但是其提取边缘的平滑性较差,抗噪声能力不强.基于小波变换和小波包的边缘检测方法目前是研究的热点,只要小波母函数和阈值选择恰当,利用小波变换提取图像边缘可以达到很好的效果.基于模糊理论的边缘检测其优势就是自身的数学基础,主要缺点是计算要涉及变换以及矩阵求逆等较为复杂的运算,另外在增加了对比的同时,也增强了噪声.分形几何理论的历史不长,且仍在不断的发展中,其在边缘检测方面的能力也得到了证实,但是该算法容易受到噪声的干扰,而且对于分形维数的确定也有待于进一步研究.

河工模型边界存在3个比较明显的特征:(a)连续性,即边界是连续的,即使在某些地方出现了断点,但仍存在一种连续的趋势;(b)边界突变幅度较小;(c)经过边缘检测处理后,边界点及其附近的灰度值与水面的对比度都达到最大.陈红^[17]首先利用边缘检测算子对流场图像进行处理,然后进行轮廓提取.为解决提取过程中存在边缘断点的问题,建立了3层感知器神经网络模型解决了自动断点跟踪问题,从而实现了实体动床河工模型河势的自动提取.

3 结 语

a. 存在的问题.(a)河工模型测量区域较大,摄像头架设较高,由此而产生图像畸变矫正问题.(b)对于动床河工模型,由于模型沙的存在,在浑水条件下表面流场测量理论的应用受到挑战.(c)河工模型中的流场通常具有强烈的三维性,示踪粒子在强三维性水流的运动跟随性的校正问题.(d)实体动床河工模型中河势的动态变化要求对其进行实时自动测量,这对图像处理技术提出了更高的要求,如何通过改进边缘检测算法等手段进行河势的实时动态提取,需要研究者开展更深入的研究.

b. 今后的研究方向.(a)必须进一步加强对流体及河势测试理论如粒子三维运动研究、边缘检测、粒子识别理论等研究,为测量技术提供理论支持,更好地将现代计算机技术、图像处理技术等先进手段与测试理论相结合,提高测量水平.(b)如何提高 PIV 技术及河势提取的精度和速度,仍是今后研究的主要目标.(c)通过图像技术获得的流场、河势信息进一步与数值模拟结合,实现实时混合模拟,最终建立相应研究问题的数学模型.(d)综合应用数学、流体力学、光学及计算机等多学科交叉知识完善测试理论并推广应用于更多的工程实际.

参考文献:

- [1] 唐洪武.复杂水流模拟问题及图像测速技术的研究[D].南京 河海大学,1996.
- [2] 盛森芝,徐月亭,袁辉靖.近十年来流动测量技术的新发展[J].力学与实践,2002,24(5):1-13.
- [3] 施业.流动图像测速若干技术问题的研究[D].南京 河海大学,1997.
- [4] 吴龙华.粒子图像测速(PIV)应用于大型工程水流模型的关键技术研究[D].南京 河海大学,1996.
- [5] 黄建成,惠钢桥.粒子图像测速技术在河工模型试验中的应用[J].人民长江,1998,29(12):21-23.
- [6] 田文栋,魏小林,盛宏至.DPIV 系统在河工模型试验中的应用研究[J].水动力学研究与进展,2001,16(2):209-215.
- [7] 田文栋,魏小林,刘青泉,等.河工模型试验中的 DPIV 技术及其应用[J].泥沙研究,2000(3):30-54.
- [8] 王兴奎,庞东明,王桂仙,等.图像处理技术在河工模型试验流场量测中的应用[J].泥沙研究,1996(4):21-26.

- [9] 田晓东,陈嘉范,李云生,等. DPIV 技术及其应用于潮汐流动表面流速的测量[J]. 清华大学学报:自然科学版,1998,38(1): 103-106.
- [10] 田文栋,魏小林,刘青泉,等. 河工模型试验中的 DPIV 技术及其应用[J]. 泥沙研究,2000(3): 50-54.
- [11] 罗小峰,陈志昌. 粒子测速系统在潮汐河口河工模型试验中的应用[J]. 水利水运工程学报,2003(3): 70-73.
- [12] 章蔚红,张明亮,陈刚,等. PIV 技术在水垫塘试验模型淹没射流中的应用[J]. 西安理工大学学报,2004,20(1): 26-30.
- [13] FUJITA I, MUSTE M, KRUGER A. Large scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications[J]. Journal of Hydraulic Research,1998,36(3): 397-413.
- [14] MESELHE E A, PEEBA T, MUSTE M. Large scale particle image velocimetry for low velocity and shallow water flows[J]. Journal of Hydraulic Research,2004,130(9): 937-940.
- [15] 吕美新,吕镔. GPS 技术在水利工程中的应用[J]. 芜湖职业技术学院学报,2005,7(3): 61-62.
- [16] 毛野,黄才安,陈建华,等. 长江镇江段河道采砂的影响及其控制利用的试验研究[J]. 泥沙研究,2004(3): 41-45.
- [17] 陈红. 实体模型表面流场、河势数字图像测试方法及应用研究[D]. 南京: 河海大学,2005.
- [18] WILLERT C E, GHARIB M. Digital particle image velocimetry [J]. Experiments in Fluids,1991 (10): 181-193.
- [19] HUANG H T, FIEDLER H E, WANG J J. Limitation and improvement of PIV: part I limitation of conventional techniques due to deformation of particle image patterns[J]. Experiments in Fluids,1993,15: 168-174.
- [20] 孙鹤泉,沈永明,王永学,等. PIV 技术的几种实现方法[J]. 水科学进展,2004,15(1): 105-108.
- [21] GUEZENNEC Y G, BROKEY R S, TRIGUI N, et al. Algorithms for fully automated three-dimensional particle tracking velocimetry[J]. Experiments in Fluids,1994,17: 209-219.
- [22] BAEK S J, LEE S J. A new two-frame particle tracking algorithm using match probability[J]. Experiments in Fluids,1996, 22: 23-32.
- [23] KIM H B, LEE S J. Performance improvement of two-frame particle tracking velocimetry using a hybrid adaptive scheme[J]. Measurement Science and Technology,2002,13: 573-582.
- [24] KNAAK M, ROGLHUBBERS C, ORGLMEISTER R. A hopfield neural network for flow field computation based on particle image velocimetry/particle tracking velocimetry image sequences[C]//Proc 1997 Int Conf on Neural Networks (ICNN '97) Held at Houston Texas. San Francisco: IEEE,1997: 48-52.
- [25] GRANT I, PAN X. An investigation of the performance of multi-layer neural networks applied to the analysis of PIV images[J]. Experiments in Fluids,1995,19: 159-166.
- [26] 李骞,陈占伟. 图像边缘检测新技术及其应用[J]. 许昌学院学报,2006,25(2): 42-46.
- [27] 陈永强,陆安生,胡汉平. 基于分形的图像分析方法综述[J]. 计算机工程与设计,2005,26(7): 1781-1783.
- [28] 王宇,王乘,刘吉平. 一种基于数学形态学的遥感图像边缘检测算法[J]. 计算机工程与应用,2003(30): 91-93.
- [29] 孙慧,周红霞,李朝晖. 图像处理中边缘检测技术的研究[J]. 电脑开发与应用,2002,15(10): 7-9.
- [30] 杨述斌. 图像边缘检测技术概述[J]. 武汉化工学院学报,2003,25(1): 72-76.

Review of image processing technique applied to measurement of surface flow field and river regime of physical model

TANG Hong-wu^{1,2}, CHEN Cheng^{1,2}, CHEN Hong^{1,2}, HUANG Jian-tong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the development and application of the particle image velocimetry (PIV) in recent 10 years, an introduction was given to the development process of PIV technique for water flow research, with focus on advances in research of some key problems, such as image recognition and edge detection in flow field and river regime measurement. Some related theories about measurement were discussed. It is pointed out that the rectifying method of image distortion, the follow property of trace particles, the surface flow field measurement in silt-laden water, and the real-time automatic extraction of river regime should be emphasized in further research, and that the combination of PIV technique with numerical simulation to realize real-time synthetic simulation is the future research direction.

Key words: PIV; river model; river regime; flow field measurement