

PIV 测量技术在异重流运动特性实验中的应用

钟桂辉, 娄 厦, 刘曙光, 郭浩森
(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘 要: 异重流是国内外研究的热点之一, 也是水利工程专业“河流动力学”的重要教学内容。为加强学生对异重流运动特性专业知识的理解, 提高“新工科”教育理念下学生的创新素质和综合素质, 特设计出基于 PIV 测量技术的盐淡水异重流运动特性实验。学生通过拓展知识预习, 实验方案设计, PIV 测量技术学习, 异重流入侵过程观察, 以及异重流运动特性的结果分析, 实现了综合设计型实验的训练, 提高了解决实际问题的能力, 提升了实验创新水平。

关键词: 粒子图像测速技术; 异重流; 实验教学

中图分类号: N45 文献标识码: A doi:10.3969/j.issn.1672-4305.2022.03.005



Application of PIV measurement technology in the experiment of movement characteristic of density current

ZHONG Guihui, LOU Sha, LIU Shuguang, GUO Haomiao
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Density current is one of the research hotspots in the world, and it is an important teaching content of “River Dynamics” for hydraulic engineering specialty. To strengthen the students’ understanding of the characteristics of density current and improve the students’ innovative quality and comprehensive quality under the educational concept of “New Engineering”, the experiment of the movement characteristic of density current is designed, based on PIV measurement technology. Through expanding knowledge preview, experimental scheme design, PIV measurement technology learning, observation of density current intrusion process, and experimental result analysis of density current movement characteristics, the training role of comprehensive design experiment is realized, and it improves students’ ability to solve practical problems and the level of experimental innovation.

Key words: PIV; density current; experiment teaching

异重流是指两种密度相差不大、可以相混的流体,在条件适宜时因密度差异而产生的相对运动,在运动过程中不发生全局性的紊动和掺混。作为一种典型的两相流,异重流运动特点受到水-沙用以及多密度水体相互作用的影响,其潜入后的流速与和

含沙量分布与明渠水流完全不同。异重流概念抽象、内容宽泛、理论复杂,学生在学习过程中往往无法直观理解异重流产生和发展的条件及其数学描述方法的物理含义,是高校水利专业河流动力学课程的重点与难点。

图像测量技术是精准获取流体运动信息的有力工具^[1]。为进一步加强学生对异重流在水体中运动规律的理解,测量异重流前锋平均速度、潜入点附近的变化等,本文将先进的粒子图像测速技术(PIV)应用到异重流实验教学中,设计了基于 PIV 测量技术的盐淡水异重流运动特性实验,让学生深入了解异重流的运动过程、运动特性和形成机理,并

收稿日期:2020-06-23 修改日期:2020-08-10

作者简介:钟桂辉,博士,教授级高工,主要研究方向为水利工程、防洪工程。E-mail:04098@tongji.edu.cn

通讯作者:娄厦,博士,副教授,主要研究方向为水利工程、河口海岸工程。E-mail:lousha@tongji.edu.cn

基金项目:上海市重点课程建设项目(项目编号:0200104443);同济大学精品实验项目(项目编号:0200104468)。

使学生了解国内外先进仪器设备和行业发展趋势,提高学生的工程实践能力和创新能力,从而为培养“新工科”背景下的卓越工程师提供有力保证。

1 粒子图像测速技术(PIV)

粒子图像测速技术(Particle image Velocimetry,简称 PIV)^[2]是在传统流体测量的基础之上,利用图像处理技术发展起来的一种新的流动测量技术。它充分利用了激光技术、数字信号处理技术、芯片技术、计算机技术、图像处理技术等领域的最新研究成果,以无接触方式精确地测量平面内的二维和三维瞬态流场,为定性描述和定量研究流体运动提供了最理想的数据基础^[3-4]。

PIV 系统主要由激光光源、成像系统、图形系统三部分组成。其基本原理为:在待测流场中均匀地加入适量示踪粒子;然后用高强度的脉冲激光照射所需测量的流场区域;再由 CCD 相机采集两次或多次曝光的粒子图像;最后由图像处理系统对粒子图像进行处理,数字化的图像传送至计算机后,通过对图像矩阵进行自相关或者互相关运算,得到已知时间间隔内示踪粒子的运动位移,从而确定流场中各点的速度矢量。即:

$$u(x, t) = (\Delta x(x, t)) / \Delta t$$

式中: $u(x, t)$ 为速度, Δx 为时间间隔 Δt 内观测到的示踪粒子运动位移。

粒子图像测速技术(PIV)的优点:(1)无接触式速度测量,不会对速度造成影响,可同时测量一个面上的速度场,误差较小;(2)测量精度高,片光源面上速度精度0.1%,穿过片光源方向速度精度0.5%;(3)测速范围宽,0~1000m/s;(4)应用范围广,可用于微尺度流动测量(微米量级),也可用于风、水洞测量,多相测量;系统响应频率可达10kHz,极大提高PIV系统观测流场时间序列变化的能力;(5)同时观测流动的速度场和温度、浓度场等的各种矢量值。

2 异重流运动特性实验

2.1 实验背景

异重流是近年来国内外研究的热点之一^[5-7]。在一些情况下,异重流会对工程和环境造成极大的危害,如水库在汛期会产生延伸到坝址的异重流,形成异重流浑水楔淤积而影响水库库容,甚至会危害电厂进水口^[8-9];盲肠河段浑水异重流的渗入,会造成河道淤积严重,给通航造成危害^[10-11];江海连通运河中的船舶过闸时,海水中的盐分会在异重流作用下向淡水水域入侵,进而影响淡水水域的水质及

淡水生物的生存环境^[12-13]。但若合理利用异重流特性,它又可用于防渗、排沙、减淤及给排水工程设计与运用^[14-15]。因此,异重流研究对水库、航道等水利工程的施工、运营和管理具有重要意义。

2.2 实验设备及材料

2.2.1 实验水槽

考虑教学实验的直观性及可操作性,选择盐淡水异重流进行实验。主要实验设备由一长方体有机玻璃水槽构成,水槽长1.8m,宽0.22m,高0.3m,两侧分别连接进水系统及出水系统。水槽左侧为盐水混合室,中间设置铝制隔板,分隔左右两侧盐淡水。为消除实验初期隔板瞬间打开所产生的波动压力,两侧边壁分别设置消波海绵(如图1所示)。

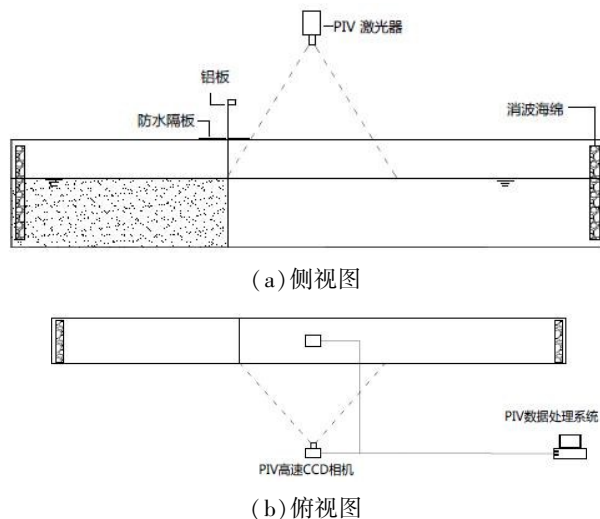


图1 实验水槽设备图

2.2.2 PIV 及其他测量设备

实验中的PIV设备由美国TSI公司生产,主要包括:图像采集卡(Xcelera-CL PX4),CCD相机(POWVIEW Plus 4MP),同步器(610036 Laser Pulse Synchronizer),激光器(YAG Lasers)等(如图2所示)。其他设备和材料包括食盐、盐度计、电子秤和示踪粒子。



图2 实验室全套PIV设备图

2.3 实验内容

精良的实验教学在工院校教学中具有不可替代的作用,一方面巩固和补充理论教学知识,拓宽学生知识面,另外还可以激发学生创新思维^[16-17]。结合异重流课堂教学内容和本专业特点,设计实验教学内容如下。

2.3.1 模型与设备的布置

实验前让学生参与模型和设备的布置,了解实验目的及实验内容,熟悉各仪器设备的使用方法和操作要领,锻炼学生的动手能力。

2.3.2 实验方案的确定

要求学生课前了解实际海水的盐度范围,并据此设计自己的实验方案,主要包括确定实验水深和盐度差范围。

2.3.3 实验水体配置

在水槽中注入清水,调整至实验水深;在实验水体中混入适当用量的示踪粒子,并均匀搅拌,调整示踪粒子浓度;在水槽中插入铝制隔板,用电子秤称取计算用量的食盐,加入水槽左侧进水侧,并搅拌均匀;使用盐度计测量盐水实际盐度并进行记录。

2.3.4 测量系统的标定

PIV 系统测试前需要进行标定,以确保实验数据的准确可靠。主要包括调整相机位置和光圈数,调整激光脉冲强度和激光投射平面厚度,选取实验观测区域并进行标度;通过测试实验,调整激光脉冲间隔、频率、相机采集频率和同步器工作频率等。

2.3.5 实验观测

启动 PIV 观测系统,同时抽去铝制隔板,观测不同实验方案下异重流的行进过程,重点观测异重流头部位置、形态、锋面夹角及流速。

2.3.6 盐淡水异重流特性的分析

利用 PIV 设备配套的 Insight 4G 数据分析软件,得到速度矢量数据,然后借助 PIV 系统中已有的 Tecplot 和 Matlab 模块软件,从流速场、涡量场、湍流强度等角度分析盐淡水异重流混合现象的内部机理和混合特性。

3 盐淡水异重流特性实验示例

3.1 实验预习

实验预习是否到位,直接决定实验的效率与质量。要求学生实验课前必须做好预习工作,预习内容包括:通过查阅文献及小组讨论,熟悉异重流对水库、河道、河口及其他工程的影响;了解异重流在工程中应用及当前异重流的研究进展;熟悉 PIV 测量系统的工作原理、基本步骤和操作技巧;了解 PIV

先进测量技术的研究现状和发展方向。通过预习引导学生将理论知识与工程及科研实践相结合,对课堂内容进行补充与延伸,培养学生科研兴趣和科学思维。

3.2 方案设计

实验方案的设计是实验教学的核心,也是实验教学的难点。要求学生在熟悉实验目的和实验内容的基础上,融合和掌握各学科专业知识,并将这些专业知识灵活运用到实验方案设计中。本实验项目要求学生了解实际条件下河口航道地区异重流发生的盐度条件,并结合实验室设备设计自己的实验方案。

通常学生选取 10cm、15cm、20cm、25cm 四种水深,每种水深选取不同的盐度差,盐度差涵盖范围为 5~35ppt,涵盖实际河口航道地区异重流发生盐度的条件。部分盐淡水异重流实验参数计算见表 1 所示。

表 1 盐淡水异重流实验参数表

序号	实验水深 (cm)	设计盐度 (ppt)	实测盐度 (ppt)	盐水密度 (kg/m^3)	混入盐量 (g)
1	10	5	4.98	3.87	68
2	10	10	9.92	7.74	136
3	10	15	14.96	11.61	204
4	20	20	19.92	15.48	544
5	20	25	25.02	19.35	680
6	20	30	29.9	23.22	816
7	20	35	35.04	27.09	952

3.3 实验过程观察

实验课的根本目标是以成熟的实验项目为载体,训练学生独立从事实验研究的技能。而实验技能是通过一次次实验过程中的模仿、练习、内化及提升的往复循环而获得的,所以实验教学的过程比实验结果更加重要^[18]。

异重流特性实验的目的之一是对异重流现象的描述分析,主要包括盐水侵入过程现象分析和盐淡水交界面形态分析两部分。实验过程中,需要特别强调 PIV 的操作步骤,因其使用方法较复杂,且激光器所发出的激光对人体尤其是眼睛视网膜的伤害较大。基于以学生为中心的实验指导思想,组织学生自行设计水动力条件及盐度差方案,调试和布设测量设备,调整示踪粒子浓度,精准称量盐度盐量。

学生通过示踪粒子观察异重流入侵的时空过程,异重流头部发生卷流形成的“突变”(如图3所示)。系统观察不同设计方案下盐淡水交界面的形态及锋面夹角。引导学生结合实验现象,探讨异重流的形成机理,并分析河口地区盐淡水异重流导致的航道淤积问题。启发学生发现问题、分析问题,培养学生的科研思维,为今后独立解决工程问题打下基础。

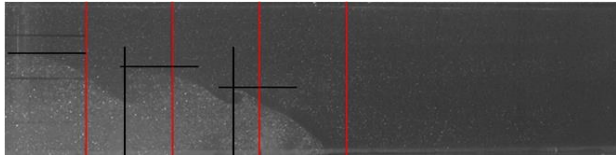


图3 水深20cm,盐度差15.03ppt情况下实测流场图($T=7.2s$)

3.4 数据处理及结果分析

粒子图像测速技术(PIV)的优势是可以同时测量包括旋涡运动、湍流特性、雷诺应力和表面二维扩散在内的完整速度场。这些流场文件需要通过PIV自带分析软件(Tecplot、Matlab等)提取并处理。分析软件学习和应用,能有效激发学生的学习热情,提升学生的专业技能和综合应用能力。学生通过数据的提取和处理,可以分析不同水深或不同盐度下异重流流速场(如图4所示)、异重流旋涡运动和涡量场以及湍流强度等(如图5所示)。另外,鼓励有兴趣的学生进一步分析异重流的水平流速场,垂向流速场,最大流速与盐度差的关系,以及异重流雷诺应力分布等。通过实验现象及实验结果分析,深入了解异重流形成的机理、入侵过程、流场分布特性及湍流混合机理等。

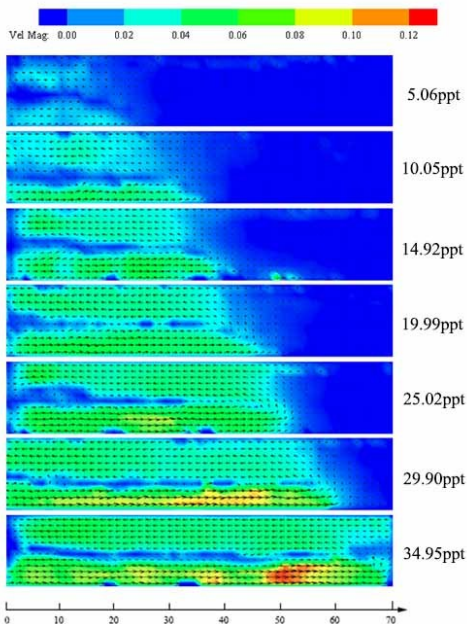


图4 水深15cm,不同盐度差情况下流场-流速云图($T_4=8s$)

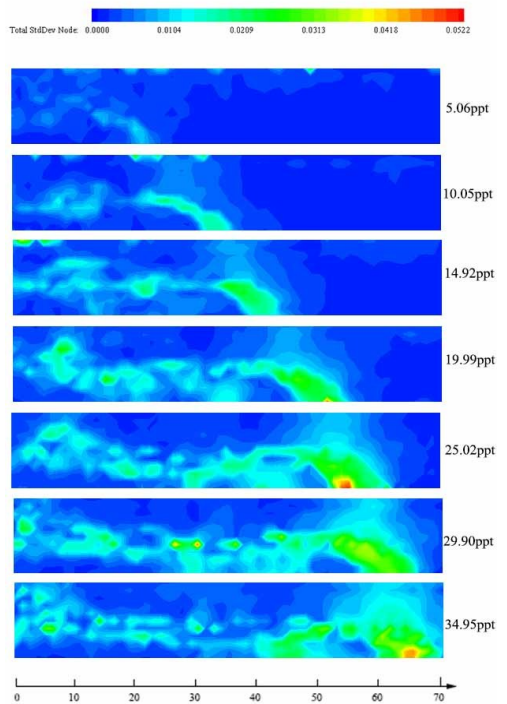


图5 水深15cm,不同盐度差异重流实验湍流强度云图($T=9.6s$)

4 结语

实验教学是人才培养的重要环节,在学生创新能力培养和综合素质提高方面有其独特的作用。实验教学中的实验项目应具有工程应用背景、采用业界主流的实验技术与实验方法、可以有效解决科研或工程中的实际问题,并可紧密跟随业界进步、动态融入。将工程或科学研究的实际问题转化为实验项目,能有效提高实验教学水平。

本文基于河流动力学中有关异重流教学内容,针对河口航道和河槽的淤积这一重大且又迫切需要解决的实际工程问题,以水深和盐水密度为基本变量,将先进的实验设备PIV应用于实验教学中,设计了基于PIV测量技术的盐淡水异重流运动特性实验项目。通过该实验项目,学生可以观察异重流的入侵过程,探究异重流在不同水深不同盐度下流速场分布、流旋涡运动、涡量场以及湍流强度等。既拓展学生的工程实践知识,提高学生对知识的综合应用能力和解决实际问题的能力,也激发了学生对新知识、新技术的追求欲望,培养学生的动手能力与创新能力,取得了较好的实验教学效果。

参考文献(References):

- [1] 杜海,孟娟,李木国,等. 图像测量技术在海洋工程管线振动模型实验中的应用研究[J]. 实验室科学,2019,22(5):39-44.



根据表 1 数据,在试验开始至结束时氮气腔室的氧气总增量 $N=0.008775\text{mol}$,结合式(1)以及 $t=97380\text{s}$,可求得氧气在砂浆试件中扩散系数为:

$$D_f = \frac{0.008775}{\int_0^{97380} \left[1259.2 \exp\left(-\frac{t}{17605}\right) + 40.74 \right] dt} \cdot 5.6 \times 10^{-3}$$

$$= 6.03 \times 10^{-8} (\text{m}^2/\text{s})$$

由文献^[14]可知,干燥条件下氧气扩散系数为 $7.8 \times 10^{-8} (\text{m}^2/\text{s})$,将两者进行对比后可以发现,随着湿度提高,氧气扩散系数降低,符合试验预期以及水泥基材料中氧气扩散的规律,试验结果真实可信。

4 结语

环境湿度变化对水泥基材料中的氧气扩散系数值具有较大影响,湿度增大会导致氧气扩散系数降低。本文介绍了一种氧气扩散系数的测试装置,并通过增设溶液池以放置不同物理性质的饱和盐溶液,以有效解决相对湿度控制的难题。该装置测试过程稳定,测试精度较高,且装置成本低、构造和测试过程简单,可以真正实现水泥基材料中氧气扩散系数的测定。将为耐久性试验和工程应用研究提供试验条件支持。

参考文献(References):

[1] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京:科学出版社, 2011.

[2] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京:科学出版

(上接第 20 页)

[2] Adrian R J. Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow—a review[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 1986, 7(2):127-145.

[3] 唐洪武. 现代流动测试技术及应用[M]. 北京:科学出版社, 2009.

[4] 陈根华,詹斌,王海龙,等. 粒子图像测速发展综述[J]. 南昌工程学院学报, 2019, 38(3):90-96.

[5] 张金良. 水库异重流研究与应用[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2019.

[6] Li T, Gao G M, Ma H B, et al. Theoretical Investigation into Plunging Point of Density Current in Reservoir[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 212-213(总):413-416.

[7] Xu Q, Moncrieff M W. Density Current Circulations in Shear Flows[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1994, 51(3): 434-446.

[8] 范家骅. 异重流对工程的影响[C]. 2006 年全国异重流问题学术研讨会论文集, 郑州:黄河研究会 黄河水利委员会.

[9] 范家骅. 异重流与泥沙工程:实验与设计[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2011.

社, 2003.

[3] 卢木. 混凝土耐久性研究现状和研究方向[J]. 工业建筑, 1997, 27(5):1-6, 52.

[4] 付传清,金贤玉,金南国. 人工环境中模拟海洋潮汐作用的试验装置[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(4):54-57.

[5] 张庆章,黄庆华,张伟平,等. 潮汐区海水侵蚀混凝土结构加速模拟试验装置[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(8):4-7.

[6] 耿欧,袁迎曙,朱辉,等. 混凝土氧气扩散性能的预测模型[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(4):471-474.

[7] Hussain RR, Ishida T. Influence of connectivity of concrete pores and associated diffusion of oxygen on corrosion of steel under high humidity[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 1014-1019.

[8] 付传清,何家豪,金贤玉,等. 带横向荷载裂缝钢筋混凝土梁的钢筋锈蚀形态研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(1):123-131.

[9] 张禾,姚坤,王飞. 一种测定塑性混凝土渗透系数的试验装置[J]. 水利水电技术, 2012(6):97-99.

[10] 戴维,付传清,刘佳敏,等. 水泥基材料渗透系数测定方法及试验装置[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(6):94-97.

[11] 桂强. 水泥基材料气体渗透性研究[D]. 北京:清华大学, 2016.

[12] 耿欧,袁迎曙,朱辉,等. 混凝土氧气扩散系数试验研究[C]//第五届混凝土结构耐久性科技论坛, 2006:191-194.

[13] Sercombe J, Vidal R, GalléC, et al. Experimental study of gas diffusion in cement paste [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(4):579-588.

[14] 周露泉,金南国,付传清. 水泥基材料氧气扩散系数测定[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(7):117-120.

[15] 付传清,周露泉,金南国. 用于测定水泥基材料中氧气扩散系数的试验装置:中国, ZL201720538840. 2[P]. 2017-12-08.

[16] 周露泉,金南国,付传清,等. 干燥条件下水泥基材料中氧气扩散预测模型[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(8):1133-1140.

[10] 乐培九. 引航道异重流运动及其淤积[J]. 水道港口, 1992(1):1-7.

[11] 王燕. 黄河口高浓度泥沙异重流过程:现场观测与数值模拟[D]. 青岛:中国海洋大学, 2012.

[12] 纪道斌,刘德富,杨正健,等. 汛末蓄水期香溪河库湾倒灌异重流现象及其对水华的影响[J]. 水利学报, 2010, 41(6):691-696, 702.

[13] 周可涵. 基于反坡异重流的盐水入侵及水环境影响研究[D]. 福州:福建师范大学, 2017.

[14] 房玉喜. 刘家峡水库异重流排沙标准的调整及实施效果分析[J]. 甘肃电力, 1997(4):1-8.

[15] 练继建,万毅,张金良. 异重流过程的梯级水库优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(1):18-23.

[16] 曹彪,付用军,杨子江,等. 基于岗位的工程力学实验内容改革与实践[J]. 实验室科学, 2018, 21(2):170-173.

[17] 王吉会,赵乃勤,李宝银,等. 创建实验教学新体系培养学生创新能力[J]. 实验室研究与探索, 2005, 24(3):8-9.

[18] 吕念玲,袁炎成,黄晓梅,等. 实验教学重在过程[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(6):154-156, 171.