



海洋工程环境流体绕流虚拟仿真实验项目 建设及教学

赵洪洋, 贺治国, 林颖典, 杨志国, 黄煜

(浙江大学海洋学院, 舟山 316021)

摘要: 利用三维建模和渲染技术构建海洋工程环境流体绕流虚拟仿真实验系统并进行实践教学, 旨在通过实验教学提升学生理论联系实际能力和创新源动力。实验系统设置认知学习模块、在线测试环节、流体绕流演示实验和定量研究实验模块。基于粒子图像测速(PIV)技术在精密实验玻璃水槽开展圆柱绕流原型实验, 基于大尺度粒子图像测速(LSPIV)技术在嘉绍大桥现场开展桥墩绕流原型实验, 并将实验操作过程和实测数据嵌入实验系统, 使学生在仿真实验中掌握绕流理论和实操技能, 构成层次递进的教学内容。采用“教、练、考、用”4个阶段逐步教学方法以及多维考核方式, 调动学生实验的积极性, 培养严谨求实的实验态度, 促进从理论知识到实践应用的有效迁移, 实现了以实践创新能力培养为中心任务的教学目标。

关键词: 海洋工程; 流体绕流实验; 虚拟仿真; 实践创新; 粒子图像测速

中图分类号: G482

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240017

Construction and Teaching of the Virtual Simulation Experiment Project for Fluid Flow around Ocean Engineering Environment

ZHAO Hongyang, HE Zhiguo, LIN Yingdian, YANG Zhiguo, HUANG Yu

(Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Using the three-dimensional modeling and rendering technology, a virtual simulation experiment system for fluid flow around marine engineering environments is built and used for the practical teaching, which aims to enhance students' ability to connect theory with practice and stimulate their innovative thinking through experimental teaching. The experimental system includes modules for cognitive learning, online test, fluid flow demonstration experiment, cylinder flow experiment, and bridge pier flow experiment. Based on the particle image velocity measurement (PIV) technology, a prototype experiment of flow around a circular cylinder is finished in the precision experimental hydraulic flume, and a prototype experiment of flow around a circular pier of Jiashao Bridge is finished based on the large-scale particle image velocity measurement (LSPIV) technology. Then the project embeds the experimental operation process and measured data into the experimental system, so that students can master the theory of flow around and practical operation skills in the simulation. These experiments constitute progressively organized teaching contents. The teaching method follows a stepwise four stages, namely, teaching, practice, assessment, and application, and incorporates multidimensional assessment methods to motivate students' enthusiasm for experimentation, cultivate a rigorous and practical experimental attitude, facilitate the effective transfer of theoretical knowledge to practical application, and achieve the teaching goal of fostering practical innovation capabilities as the central task.

Key words: ocean engineering; fluid flow experiment; virtual simulation; practice and innovation; particle image velocity measurement

流体力学是高校许多工科专业的基础核心课, 学习流体力学理论知识和实验方法是相关专

业学生的一项重要任务, 其中实验教学在流体力学中占据重要地位, 实现了从理论讲授到实际操

收稿日期: 2023-11-23

基金项目: “十三五”浙江省级虚拟仿真实验教学项目; 海南省重点研发计划项目(ZDYF2022SHFZ045); 浙江大学实验技术研究项目(SYBJS202310)。

作者简介: 赵洪洋, 硕士, 实验师, 主要从事流体力学实验教学、海洋工程实验研究相关工作。E-mail: zhaohong-yang@zju.edu.cn

作的转换,是不可或缺的实践环节^[1]。然而传统的流体力学实验主要研究雷诺实验、伯努利方程实验等管道内流问题,更倾向于验证和巩固理论知识,在启发学生探究和创新、积累工程经验方面相对不足^[2]。因此,在现有实验内容基础上,课题组积极探索建设研究综合型实验项目,并考虑到自然中常见的流体绕流现象以及绕流理论对航空航天、海洋工程等领域发展的重要推动作用^[3-6],将流体力学中的绕流理论引入实验教学,能激发学生学习和动力,让学生在实验室和野外现场开展绕流实验,实现从课堂到实验室再到工程实际的紧密联系,是对原有教学内容与方法的有效补充,对培养学生实践和创新能力具有重要意义^[7-8]。但在水槽实验室和野外现场开展绕流实验教学,受实验设备昂贵、实验周期长、人身安全等因素限制无法进行^[9-10]。

在《关于2017—2020年开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设的通知》(教高厅〔2017〕4号)文件精神指导下,将信息技术融入高等教育教学成为趋势^[11]。目前,虚拟仿真技术已在流体力学实验教学中有所应用,通过仿真实验,学生可以模拟流体力学实验,观察流体的运动规律和力学特性,深入理解流体力学基本原理和应用^[12-13],但在专业实践和科研训练方面并没有相关的仿真实验。因此,课题组结合海洋领域专业背景,在浙江大学海洋学院精密实验玻璃水槽完成圆柱绕流实验,并赴嘉绍大桥实验现场完成桥墩绕流流场实测工作,将真实实验的操作过程和实测数据等信息嵌入到仿真实验系统,开发了海洋工程环境流体绕流虚拟仿真实验系统并进行实践教学。通过虚拟仿真技术让学生漫游在虚拟现实中学习绕流理论和真实实验全过程,掌握实验原理和方法,突破了诸多因素的限制,同时将专业知识与工程应用相结合,拓展了学习视野,对培养学生的专业实践能力具有前瞻性,符合“新工科”背景下专业技术人才的培养方向^[14-16]。

1 项目建设目标

随着海洋强国战略的实施,更多海洋工程装备投入使用,如船舶、海洋平台等在海洋环境中工作的装备,研发与设计无一不考虑水动力性能。流体力学相关理论知识及其应用是水动力性能研究基础,是海洋领域专业技术人才必备技

能。流体力学是海洋学院本科的专业必修课,其实验教学是培养学生实践动手能力和创新能力的重要途径和基本方法。建设海洋工程环境流体绕流虚拟仿真实验系统并实践教学是流体力学实验教学改革措施之一,仿真系统融合了信息技术、流体动力学理论、仪器工作原理及使用、工程应用等内容,研究流体外流问题的力与运动规律。实验研究方法可用于多学科领域的流场研究,如研究物理海洋领域的大尺度涡和水利工程领域的河口冲刷问题,为加快推进海洋强国强军战略的人才培养助力。

项目建设内容包括将绕流特性可视化的演示实验、基于粒子图像测速技术的圆柱绕流实验和基于大尺度粒子图像测速技术的嘉绍大桥桥墩绕流实验。通过实验提高学生的专业实践能力,达到以下4个教学目标:

1)学会定性分析绕流现象及其影响规律,为物体与流体之间的力与运动规律及水动力特性研究提供支撑;

2)学会定量研究流体要素和物体特征参数对流场的影响机理并掌握研究方法;

3)实验数据后处理采用光学自相关法或互相关法,将拍摄的两帧或多帧图像匹配并矢量计算图像中粒子位移得到流场结果,提升学生对数据分析处理能力;

4)为学生提供科研实践训练平台,提高理论分析与实践研究相结合的科研能力,培养实践创新意识。

2 项目整体设计

2.1 系统架构及教学内容

项目采用3D仿真、HTML5和WebGL技术,借助Unity3D、3D Studio Max、Maya和Photoshop建立仿真实验系统整体架构。每一层架构都为其上层提供支撑服务,直至完成具体虚拟实验教学环境的构建。由上至下层级为应用层、仿真层、通用服务层、支撑层和数据层。教学内容包含定性分析实验和定量研究实验,仿真实验系统设有认知模块(包括实验简介、实验原理、实验目的和仪器设备介绍等)、在线测试模块、流体绕流演示实验(包括圆柱、椭圆柱和不同来流方向的方柱绕流演示)、圆柱绕流实验和嘉绍大桥桥墩绕流实验,教学过程及内容如图1所示。

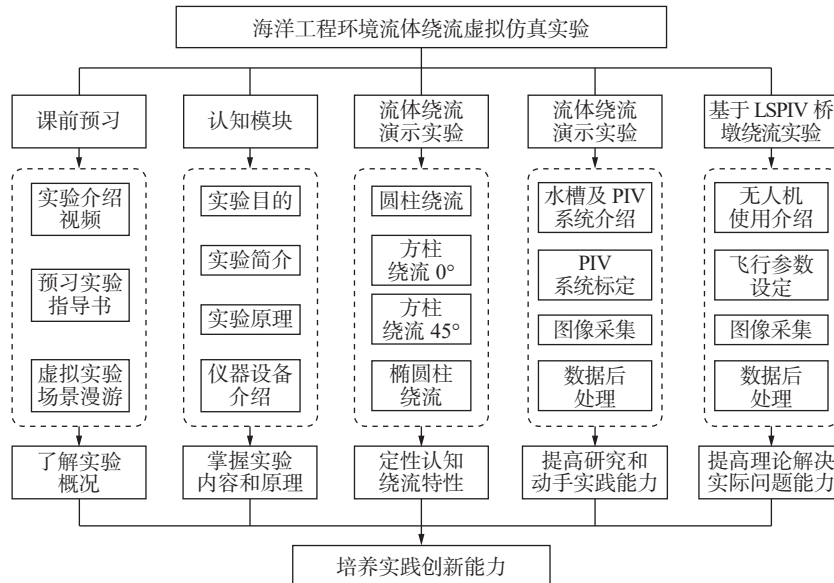


图 1 仿真实验教学内容框架图

2.2 绕流实验原理

1) PIV 圆柱绕流实验

利用 PIV 技术进行绕流流场测量，技术路线包括图像采集、图像预处理、相机参数及图像标定、图像匹配计算、流场结果后处理。圆柱绕流实验系统由工作站、精密实验玻璃水槽、电荷耦合器件图像传感器(charge coupled device, CCD)相机及其控制器、激光器及其控制器、圆柱、PIV 示踪粒子等组成，如图 2 所示。水槽采用 3 面可透的玻璃结构，可根据不同的流速工况制造稳

定的水流，与置于水流的圆柱形成绕流，在水中加入 PIV 示踪粒子，通过激光发出的平面光源照射粒子，利用粒子的荧光特性可以被 CCD 相机清晰拍摄，相机通过连续两次或多次曝光，粒子图像被记录 CCD 相机上，将图像划分为大量网格窗口，采用光学自相关法或互相关法^[17]，在两帧图像寻找匹配窗口，窗口中心点的位移和方向即表征窗口内粒子的位移和方向，间接反映流体质点的运动，以此方法获得实验中圆柱周围流场分布。

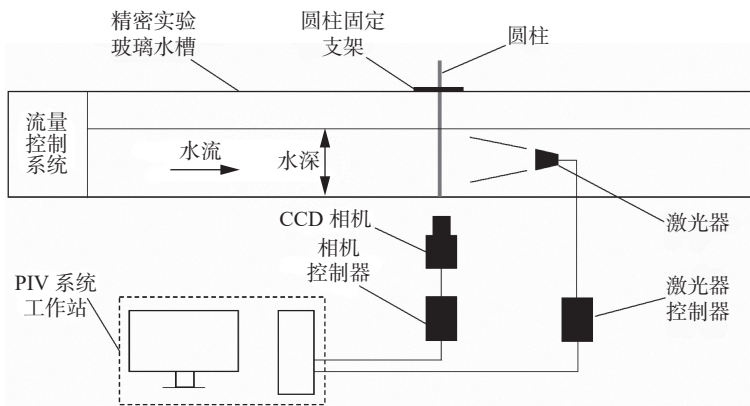


图 2 圆柱绕流实验系统布置示意图

2) 桥墩绕流实验

嘉绍大桥桥墩绕流实验采用 LSPIV 技术，该技术适用于野外大范围表面流场测量，不依赖激光光源，示踪物一般选用水面波纹、泡沫和杂质等，其图像和数据处理方法与传统 PIV 相似，但需要考虑拍摄图像畸变校正问题。实验拍摄终端采用高性能无人机，一般无法由桥墩正上方垂直

向下拍摄，只能在桥墩周围水面的斜上方拍摄。为简化流场分析处理过程，在拍摄区域建立平面直角坐标系，以桥墩轴线在水面的交点为坐标原点， x 轴和 y 轴位于水平面，流场后处理软件算法中设置水流主流方向为 y 轴负向，无人机拍摄位置在 y 轴正上方。无人机与桥墩空间位置、拍摄方位及角度如图 3 所示。

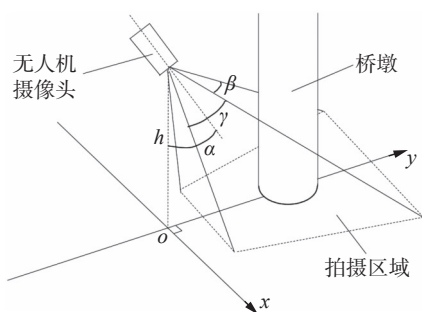


图3 嘉绍大桥桥墩拍摄及坐标系示意图

图3中 h 为无人机距离水面高度; α 为云台方向角度(相机拍摄方向), β 和 γ 为相机的水平视角和垂向视角。 h 和 α 可在遥控器界面实时显示, β 通过查询相机技术参数得知, γ 通过拍摄图像的分辨率计算得知。得知以上参数后,通过光学光路反演变换可计算出在平面直角坐标系下图像显示区域内的真实坐标数据,以此方法完成图像畸变校正和图像标定,再利用流场后处理软件计算图像显示区域的流场数据。

2.3 核心要素仿真

1) 实验场景

通过三维建模及渲染技术构建海洋学院精密实验玻璃水槽实验现场和嘉绍大桥桥墩绕流实验现场,将所有真实仪器设备信息、实测数据导入实验系统,仿真实验操作步骤与真实实验完全相同。学生在虚拟实验现场无死角漫游体验,提升沉浸感与体验感,切身感受流体绕流仿真实验与真实实验的强一致性。系统还会与真实实验一样提示异常参数和错误示范等,使学生通过仿真实验学会解决真实设备遇到的相关问题。

2) 实验仪器设备

对精密实验玻璃水槽、PIV和LSPIV系统等的各组成仪器均进行全视角等比例三维建模,大到设备外观形貌,小到设备型号、厂家信息等都要进行仿真展示,让学生对实验所用设备能追根溯源,有利于学生了解设备性能和工作原理,熟练掌握专业技术知识和实操技能,开展后续相关研究。

3) 测试平台搭建过程

将仿真实验中所有仪器设备、结构物体、辅助工具单独建模,进行三维空间全方位展示,并搭配文字介绍功能用途,学生可以更直观形象地查看设备。仿真系统中设备模型平铺显示在界面上便于调用,还可进行大小缩放展示细节部分,学生按照教学指导在仿真系统中自己完成测试平

台的搭建过程。实验中流速、流量和水深等工况以及结构物形状、仪器设备参数均可在系统中设置更改,与真实实验操作一样。

2.4 实验教学过程

1) 课前预习

在课前将仿真实验系统链接发给学生,学生在系统上观看实验视频介绍,下载实验指导书并进行预习。通过视频介绍和实验指导书学习实验操作流程,初步了解实验原理和操作方法,按照指导书布置的任务进行学习和实验准备,促使学生自主思考并提出问题,以便在课上讨论。

2) 演示教学

进入仿真实验系统主界面,如图4所示,系统有学习模式和考核模式。两种模式为平行架构,区别在于学习模式仅供学生在线交互操作训练实验熟练度,而考核模式可以在学生实验结束后根据其实验情况评定分数。教师介绍实验系统主要功能模块以及关键的理论与技术问题,使学生掌握实验原理、实验目的、仪器设备工作原理及使用方法等内容,同时启发学生思考和讨论,促进学生形成自身的知识结构和思维方式。



图4 仿真实验系统主界面

3) 在线测试

学生经过学习模式下的学习和实训后进入实验系统考核模式。在考核模式中首先完成在线测试,此环节共10道选择题,其交互操作界面如图5所示。主要考核学生对实验原理和一些实操技能的掌握情况,如图5中测试题考察了学生对流体绕流模型实验中雷诺数计算的掌握情况。

4) 演示实验

在考核模式下完成在线测试后进入演示实验,通过演示实验可以更生动形象地让学生掌握典型形状绕流物体的绕流特性。在演示实验中,学生可以选择圆柱、椭圆柱和方柱形绕流物体,并设置雷诺数,观察绕流物体周围流速和压力分

布情况。如图 6 所示为长轴 40 mm、短轴 20 mm，来流方向与长轴平行的椭圆柱在雷诺数 100000 时的绕流场云图。结果显示，在此雷诺数下椭圆柱周围边界层发生分离，并伴随涡街产生。

4) 圆柱绕流实验

在考核模式下完成演示实验后进入 PIV 圆柱绕流实验，该实验模块操作界面如图 7 所示，图中正在进行激光器、CCD 相机的位置和角度调

试。该实验还包括测试平台搭建、精密实验玻璃水槽调试、PIV 示踪粒子抛洒、流场处理软件调试及数据后处理等 10 步操作。在完成以上操作后，根据拍摄粒子运动图像计算处理得圆柱周围流速矢量，如图 8 所示，圆柱周围 12 cm×18 cm 的计算区域平均流速为 0.05 m/s，圆柱尾流区域伴有涡流。同时系统还可导出计算区域的流速云图和涡量云图等流场数据。

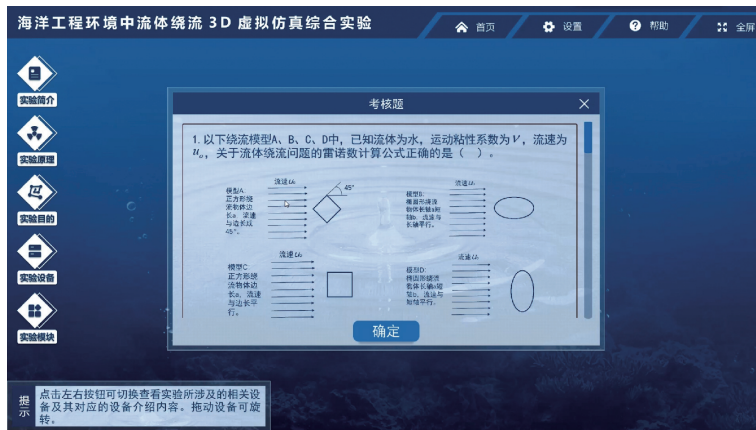


图 5 仿真实验系统在线测试界面



图 6 椭圆柱绕流结果显示图

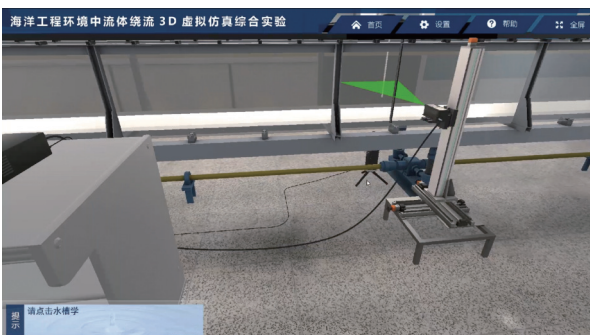


图 7 圆柱绕流实验操作界面

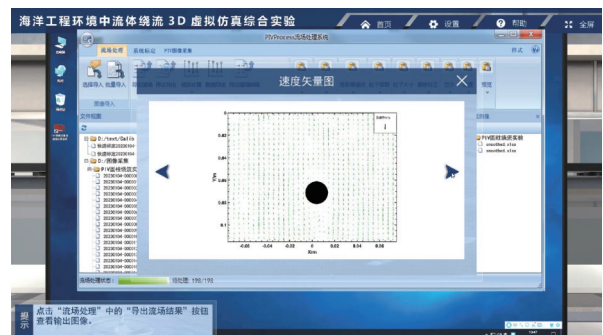


图 8 圆柱绕流流场矢量图

5) 嘉绍大桥桥墩绕流实验

在考核模式下完成圆柱绕流实验后进入LSPIV桥墩绕流实验,实验模块操作界面如图9所示,为正在进行无人机飞行模式调试。该实验还包括无人机和遥控器调试及参数设定、飞至拍摄区域(近嘉绍大桥南岸桥墩)拍摄图像、图像预处理及标定、流场处理软件调试及流场计算等8步操作。在完成以上操作后,根据无人机拍摄的桥墩周围水流图像计算处理得某个时刻该桥墩周围流速矢量,如图10所示,直径3.8 m桥墩周围40 m×32 m的计算区域最大流速为2 m/s,桥墩尾流区域伴有涡流。同时系统还可导出计算区域的流速云图和流场数据。



图9 嘉绍大桥桥墩绕流实验模块操作界面

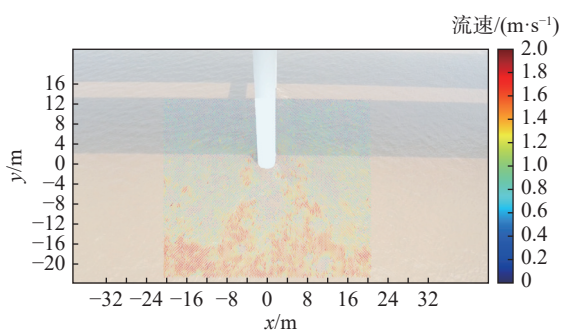


图10 桥墩绕流流场计算结果图

6) 仿真实验结果评价

考核模式下的交互操作为考核内容,其中在线测试每题1分,答错不扣分;演示实验考查学生操作完成情况,共有4个模型,每个模型7种雷诺数,共28种工况的流场演示,全部完成得15分,缺少一个工况扣0.5分;圆柱绕流实验和桥墩绕流实验包含37个交互操作评分细则,全部操作正确得75分,如某个动作首次操作错误,仍可按系统的正确提示继续实验,但执行扣2分或

3分规则。学生在完成仿真实验的所有操作过程和测量后可以在得分汇总界面查看仿真实验整体得分。某学生除了“实验圆柱安装固定”操作错误外,其他环节全正确的得分情况汇总界面如图11所示。

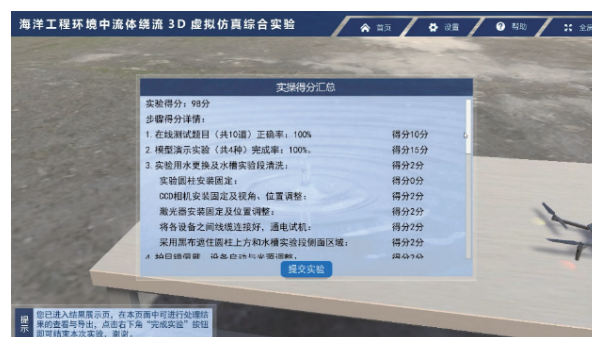


图11 仿真实验得分情况汇总界面

3 实验教学特色

3.1 实验教学模式创新

将以培养实践创新能力为中心的理念融入仿真实验教学全过程,采用“教、练、考、用”4个阶段逐步开展教学。“教”是指教师由浅入深地讲授实验内容和仿真系统,引导学生自主思考,使学生了解实验原理和操作方法并巩固理论知识,符合对未知事物的认知规律;“练”是指允许学生在仿真系统的学习模式下反复练习并强化理论内容和操作技能,逐渐培养学生知识体系和实验操作熟练度,符合动手实践能力的养成规律;“考”是学生在考核模式下独立完成在线测试、演示实验和定量实验的操作过程,仿真系统对学生的交互操作情况评价打分,使教师了解学生实验情况并进行针对性教学;“用”是将所学知识用于实践,桥墩绕流实验体现了将绕流理论与工程实际相结合,使学生掌握科研和工程上流场的测量方法,形成“课堂—实验室—工程实际—实践应用”逐层递进的教学模式。

3.2 注重实验过程的多维考核方式

实验成绩的评定办法对学习导向、学习热情和学习效果有重要影响。因此,课题组将考核思维贯穿实验教学全过程,通过在线测试检验学生的实验预习以及对实验原理和操作要点的掌握情况;在上机交互操作环节运用系统的评价标准对学生的在线测试、演示实验、定量实验操作过程以及数据测量进行评分;根据学生在仿真实验交

互操作后提交的演示实验和定量实验结果分析报告再进行人工评价打分,以考查学生对实验的理解和绕流特性影响规律的认识。最后采用“人-机”综合评价方法,将仿真实验交互操作和实验结果分析报告分别按 60% 和 40% 的权重系数评定实验综合成绩,既适应了线上线下混合式教学,又促使学生在各实验环节积极研究问题,讨论实验方案,调动了主观能动性。

4 教学效果

海洋工程环境流体绕流虚拟仿真实验系统自投入使用以来,已为海洋学院 220 名本科生提供教学服务。仿真系统数据统计显示每个学生平均在线交互操作 4 学时,实验内容的设计、仿真度和体验感等均获得师生正面评价,实验的呈现方式更加生动形象,理论知识和操作方法的讲授更加新颖,学生的参与度、实验态度和积极性较传统流体力学实验显著提高。“课堂—实验室—工程实际—实践应用”的教学模式以圆柱绕流实验和桥墩绕流实验研究为依托载体,使学生掌握流场实测方法,并将绕流理论知识与桥墩冲刷、海塘堤脚冲刷等问题联系起来,同时学生还利用所学实验方法与操作技能用于学校周围水流流场测量,分析计算获得流场数据,使学生理论水平和专业实践能力进一步提升,这是传统的“课堂—实验室”教学模式难以实现的。通过实践获得成就感,学生对自身专业的认可度得到提高。

5 结束语

项目利用三维建模和渲染技术构建了海洋工程环境流体绕流虚拟仿真实验系统,设置认知模块、在线测试、流体绕流演示实验、PIV 圆柱绕流实验、LSPIV 嘉绍大桥桥墩绕流实验,通过实验培养了学生科学的思维方法,提升了动手实践能力,激发了创新创造潜力,达到了预期教学效果。项目通过重构实验教学内容以及注重实验过程的多维考核,确立了“教、练、考、用”4 个阶段逐步展开的教学方法,形成了“课堂—实验室—工程实际—实践应用”层次递进的教学体系,是原有教学模式和内容的有效补充。未来将继续完善实验系统,开发更多虚拟仿真实验内容,为专业技术人才培养提供学习和科研训练平台。

参考文献

- [1] 赵洪洋,胡鹏,杨志国,等.以能力培养为核心的流体力学实验教学改革[J].实验室科学,2021,24(6):100-103.
- [2] 赵洪洋.多元化实验教学模式研究[J].实验科学与技术,2021,19(2):123-127.
- [3] 毛根海,邵卫云,张燕.应用流体力学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [4] 宋磊,刘曾,孙江龙,等.基于直立圆柱的水动力实验教学设计与实践[J].实验技术与管理,2021,38(9):198-203.
- [5] 徐万海,马焯璇.倾斜圆柱结构涡激振动研究进展[J].力学学报,2022,54(10):2641-2658.
- [6] 赵红晓.多圆柱绕流的数值模拟及力学分析[J].实验室研究与探索,2023,42(7):130-135.
- [7] 沈超,付小莉,李卫超.波浪运动特性虚拟仿真实验的探索与实践[J].实验室研究与探索,2021,40(7):180-184.
- [8] 周晓燕,农春仕,张海洋.木质复合材料结构设计与制造虚拟仿真实验的开发及应用[J].实验技术与管理,2023,40(4):144-149.
- [9] 熊宏齐.虚拟仿真实验教学助推理论教学与实验教学的融合改革与创新[J].实验技术与管理,2020,37(5):1-4.
- [10] 荣臻.高超声速风洞虚拟仿真实验教学项目设计与实现[J].实验室研究与探索,2022,41(8):272-277.
- [11] 教育部办公厅.教育部办公厅关于 2017—2020 年开展示范性虚拟仿真实验教学项目建设的通知[EB/OL].http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201707/t20170721_309819.html,2017.
- [12] 吴正人,戎瑞,董帅,等.“流体力学”及“泵与风机”课程的虚拟仿真实验系统研究与实践[J].教育教学论坛,2020(49):374-375.
- [13] 徐东华,魏安,钟碧良,等.高校流体力学课程虚拟仿真实验教学模式创新研究[C]//2023 年第七届国际科技创新与教育发展学术会议论文集(第二卷).香港:香港新世纪文化出版社有限公司,2023:3.
- [14] 张宁,赵毅强,兰旭博,等.“新工科”背景下关于虚拟仿真实验的几点思考和建议[J].实验技术与管理,2020,37(3):185-188.
- [15] 郑庆华.新工科建设内涵解析及实践探索[J].高等教育研究,2020(2):25-30.
- [16] 周端明,沈燕培.习近平科技创新重要论述指引新工科建设的方向[J].高等工程教育研究,2021(4):1-7.
- [17] 曹列凯.大尺度表面流场测量技术研发与应用[D].北京:清华大学,2019.