

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2024.01.011

欢迎按以下格式引用:付小莉,操金鑫,张洪.“两性一度”指向下流体力学荣誉课程建设探索[J].高等建筑教育,2024,33(1):85-92.

“两性一度”指向下流体力学荣誉课程建设探索

付小莉,操金鑫,张洪

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:文章根据“两性一度”标准,确定了流体力学荣誉课程在教学大纲重塑、教学方法创新、师资队伍建设和学生选拔和考核要求等方面的目标和原则,提出了以问题驱动为抓手、以基本概念为支点、以学习产出为导向、以虚拟仿真实实践教学为拓展的荣誉课程特色。以连续方程四种形式及其与不同流动模型之间的关系为重点内容,以虚拟仿真平台中计算流体力学技术案例和现代流体测量技术进展综合性作业为典型,指出了“高阶性、创新性和挑战度”三标准在课程教学内容、虚拟教学平台和学生学习产出中的要求体现,相关探索可为工科流体力学荣誉课程及其他力学荣誉课程建设提供参考。

关键词:“两性一度”;流体力学;荣誉课程;教学改革;虚拟仿真

中图分类号:G642.3

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2024)01-0085-08

就教育这个有机整体而言,课程是其最基础的细胞单元,也是教师传道授业解惑的重要平台^[1]。教育部原部长陈宝生在“新时代全国高等学校本科教育工作会议”上首次提出“金课”概念,即提高大学生的学业挑战度,合理增加大学本科课程难度、拓展课程深度,扩大课程的可选择性,激发学生的学习动力和专业志趣,真正把“水课”变成有深度、有难度、有挑战度的“金课”。淘汰“水课”、打造“金课”,切实提高课程教学质量的举措表明国家高度重视课堂教学在人才培养中的重要作用,标志着我国高等教育的发展已经进入了提高质量、提升内涵发展的新时代^[2]。打造“金课”需要一定的标准,2018年11月24日,时任教育部高等教育司司长的吴岩在第十一届“中国大学教学论坛”上提出了“金课”的评价标准为“两性一度”,即高阶性、创新性、挑战度。所谓“高阶性”,就是知识、能力、素质的有机融合,培养学生解决复杂问题的综合能力和高级思维。其中,复杂问题一般是非结构性问题,即缺乏标准答案,学生难以直接运用已有知识解决;高级思维指的是综合性、系统性、创新性思维。所谓“创新性”,即课程内容能够反映前沿性和时代性,不能墨守成规,要与时俱进;教学形式呈现先进性和互动性,不是满堂灌,不再单纯是“我讲你听”的方式;学习结果具有探索性和个性化,不

修回日期:2021-05-12

基金项目:国家自然科学基金(51878504);同济大学教学改革与建设:《流体力学》课程建设资助项目

作者简介:付小莉(1979—),女,同济大学土木工程学院副教授,博士,主要从事水力学及流体力学计算教学研究,(E-mail)xifu@tongji.edu.cn。

是简单告诉学生什么是对或错的,而是培养他们的探究精神和充分展现他们的个性化特点^[3]。所谓“挑战度”,即课程一定要有难度,需要学生和教师一起“跳一跳”才能够得着。换言之,学生需要花费一番力气才能完成学业,这一点最直观地体现在教学评价上。

为全面贯彻落实全国教育大会精神,促进学校“双一流”建设及一流本科人才培养工作,努力满足国家和社会经济发展对拔尖人才的迫切需要,提升高等教育培养质量,助推本科教学内涵建设,全面振兴本科教育,在借鉴国内外著名大学荣誉课程经验的基础上,同济大学特制订了《同济大学荣誉课程及荣誉计划建设指南(2020—2021年)》(以下简称《指南》)。《指南》遵从因材施教、分类指导的原则,面向一批学有余力、对未来发展有较高要求的学生,通过精心设计系列成体系的核心荣誉课程链,激发和培养学生探究科学前沿的兴趣和创新思维,帮助学生掌握具有“高阶性”“创新性”和“挑战度”的专业知识,以及运用科学方法解决复杂问题的能力,让学生最终成为具有卓越综合能力的荣誉学生。荣誉课程是“荣誉计划”的教学培养载体,是贯彻落实同济大学社会栋梁与专业精英拔尖人才培养目标的具体实施途径之一,也是“强基计划”“本研一体化”人才培养体系中的重要组成。因此,荣誉课程建设需满足“两性一度”的“金课”标准,做到教学理念先进、拔尖人才培养目标明确、教学设计科学严密和教学内容与时俱进,以及成绩评价体系多元化,能在卓越荣誉学生培养上形成合力。另外,荣誉课程之间应形成创新体系,贯通专业重点知识链和课程链,制定成熟的荣誉课程建设计划,以实现荣誉学生培养目标。

流体力学荣誉课程作为土木工程荣誉课程链及荣誉计划中的一环节,是面向土木工程、环境工程、水利工程等众多工科专业的一门重要专业基础必修课^[4-6],主要研究不可压缩流体的平衡与流动规律,学生通过掌握该课程的既定知识点,可为后续专业课程奠定必要的力学基础。本文以建设“金课”为契机,以培养学生宽厚的基础知识、高度的创新思维能力、深厚的学术研究素养及广泛的实践应用技能为目标,以学生个性化和多样化的学术兴趣和发展需要为导向,以高难度、高挑战性为要求,试图探讨将流体力学打造成高质量荣誉课程的思路和实施路径。

一、流体力学荣誉课程建设的目标和原则

教学大纲重塑。为了区别普通课程,流体力学荣誉课程教学大纲应具备先进性,具有前沿知识深度和难度,富有挑战性,需在深度、难度、广度上有明显区别(表1),且体现在教学大纲设置上。

教学方法创新。课程教材选用上与时俱进,知识体系能反映当前最新进展。教学设施的先进性体现在教学内容、方法和手段上,以及考试方法方面,与智慧教室具有较好的相容性。通过线上线下教学融合方式,采用课堂讲授+慕课+案例展示的教学方法,对15~20人的小班进行授课,并设置小组讨论环节,有利于授课教师快速提炼基本知识点,拓展课程前沿知识和内容深度,扎实学生对课程基本知识的掌握,并为学生的自主性、研究性学习提供最新、最全面的文献阅读资料。

师资队伍建设。流体力学荣誉课程授课团队教师都具有高级职称,除了课堂授课教师,还专门配备线上教学辅导教师1名和课外助教1名。授课团队教师学术造诣高,教学能力强,具有国际化视野和优秀的教学及科研经历。

学生选拔和考核要求。为了遴选真正对专业学习兴趣浓厚、有志于将来从事本领域前沿工作,以及学有余力的专业“菁英苗子”进行荣誉计划培养,修读流体力学荣誉课程的学生需同时满足以下条件:具有创新思维,对力学有浓厚兴趣,学习平均绩点等于或大于3.5,大学期间力学和数学成绩优秀等。在考核方面,更注重平时过程考核,采用成绩评价体系多元化方式。例如,慕课线上答题、案例展示、设计虚拟仿真实验、期末笔试等多种考核结果都将计入最终成绩。

表1 流体力学荣誉课程和同类课程在教学大纲上的比较

	流体力学荣誉课程	流体力学普通课程
前沿性	以理想和粘性流体力学基础理论为主线,注重理论在当今实验和计算流体力学发展中的核心支撑作用,深入联系当今土木工程发展中的重要流体力学问题,培养学生的流体力学科学思维方法、工程应用素养,并塑造前沿的学术视野	课程教学内容属流体(水)力学经典理论,形成于19世纪末以前,未能反映当前流体力学理论和方法的前沿进展,未能反映其在今土木工程流体难题中的应用
深度	要求掌握流体静力学、动力学基本原理,具备实验流体力学、计算流体力学知识基础,并能够将上述原理和方法用于一般土木工程流动问题的分析、试验和计算中	对流体力学基本概念、基本方程的土木工程应用场景理解不深,与前沿的试验和计算流体力学方法结合不够紧密,较难应用于实际问题的识别、判断和分析
广度	在系统讲解理想流体力学基本原理和粘性流体运动、湍流、流体阻力的基础上,广泛引入土木工程相关流体问题的案例教学(理想旋涡流动、平面势流、边界层理论基础、明渠流、堰流、渗流、水波动力学等),提高解决实际工程流体力学问题能力	仅涉及流体基本物理性质,流体静力学、动力学基本方程,流动阻力、水头损失和量纲分析的基本概念
难度	基于物质导数概念和雷诺输运定理推导建立流体动力学理论框架体系,对前修数理课程(矢量和张量运算、Gauss公式和Stokes公式等)难度要求较高,帮助学生建立完整的理想流体和粘性流体力学理论基础	仅关注积分形式的流体动力学基本方程及其应用,学生对方程的适用范围和应用条件只能机械记忆,难以深入理解

二、流体力学荣誉课程特色

荣誉课程教学要求精讲多练,增加课外学习训练任务,为学生提供更多自主思考和探索的空间,营造开放、协作、自主的学习氛围和批判性的学习环境。课程能够使学生掌握基础知识、追踪科技前沿,开发学生的创新思维,让学生学会把课本、课堂的知识融会贯通,并为后续专业课学习奠定流体力学理论基础,最终应用于实践和工程设计。

以问题驱动为抓手。通过在课堂上引入流体力学发展史中的经典案例和目前国内外相关领域前沿动态,促使学生不断提出问题、分析问题、解决问题,让学生产生悬念般的学习期待和迫切的学习动机,从而激发学生的创新意识。

以基本概念为支点。课程涉及对基本概念、基本方程(组)和定解条件的学习,对各个板块的内容教学需从基本概念出发,并最终回到基本概念,以实现学生对基本概念的融会贯通。根据概念的难易程度分类进行专项测试和小组比赛,让学生在碰撞中实现对基本概念的深度学习。另外,通过探究式教学,培养学生利用基本概念思考共性问题的能力。

以学习产出为导向。通过学生对共性问题和基本概念的理解,在课堂研讨、探究汇报、案例分析等教学环节中分阶段进行学习产出,从而实现对学生解决复杂工程问题能力、创新能力、工程思维和科学素养等方面的培养。

以虚拟仿真实践教学为拓展。虚拟仿真一般采用计算流体力学的方法来求解实际问题,计算流体力学作为目前流体力学科学研究的主流手段,它以有限体积法、有限元法、有限差分法等算法为基础,通过编写计算机程序进行数值计算和通过计算机进行计算结果的形象化展示。本课程在教学计划中适当补充一些计算流体力学的基础理论、模拟技术及软件应用内容,通过布置学生设计任务和开发虚拟仿真小程序的形式来体现课程的“高阶性”“创新性”和“挑战度”,并实现“本硕一体化”的教学培养理念^[7]。

三、流体力学荣誉课程建设的教学内容及案例分析

流体力学能使学生掌握液体平衡和运动的一般规律及其相关概念和理论;掌握流体力学基本方程及应用条件,并理解其物理意义;掌握流体力学基本分析方法,并运用所学知识来解决工程技术问题的能力^[8]。流体力学课程教学内容分为三部分:第一部分为连续介质的假定、量纲分析和相似原理等概念和应用内容;第二部分为静力学、动力学原理和应用、计算流体力学的基础理论、模拟技术等内容;第三部分为流动形态、水流阻力和水头损失的概念和计算方法及其工程应用等内容。为了突出本课程的“两性一度”,需要在内容上的深度、广度和难度上都有所体现,具体见表1。本文针对“高阶性”“创新性”和“挑战度”的教学要求,引用几个教学过程中的典型案例进行探讨。

(一) 高阶性案例——连续方程四种形式及其与不同流动模型之间的关系

作为流体力学经典三大方程之一的连续方程是质量守恒定律在流体力学中的应用,它建立了流速与流动面积的关系。一般流体力学课程只要求学生掌握守恒型微分形式的推导及应用(图1中的方程3),而本课程还需要掌握连续性方程的守恒型积分形式(方程1)、非守恒型积分形式(方程2)、非守恒微分形式(方程4)的推导和相互转化等原理(图1)。这些知识概念晦涩难懂,一般放在研究生阶段的高等流体力学中学习。为了理解这4种形式之间转换的逻辑关系,需先牢固掌握以下知识点:连续介质假定、流体运动描述的 Lagrange 方法和 Euler 方法及其相互转换的概念;物质导数(运动流体微团的时间变化率)、速度散度及其物理意义、空间位置固定的有限控制体模型;随流体运动的有限控制体模型;空间位置固定的无穷小微团模型;随流体运动的无穷小微团模型的概念等。最重要的是,可以通过讲授连续性方程的推导来强化一个普适性原则,即为了能得到流体流动的基本方程(包括连续性方程),需遵循以下过程。

(1)从物理定律出发选择合适的物理学基本原理。

- a. 质量守恒;
- b. 力=质量×加速度(牛顿第二定律);
- c. 能量守恒。

(2)将这些物理学原理应用于适当的流动模型。

(3)从这种应用中导出体现这些物理学原理的数学方程式。

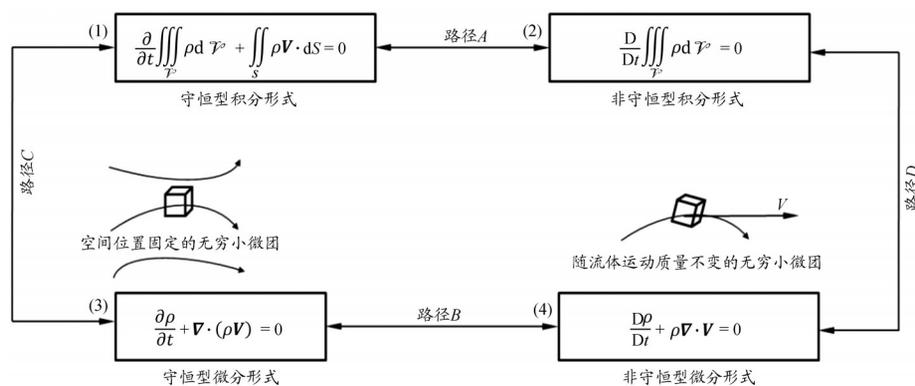


图1 连续性方程的不同形式及其与不同流动模型之间的关系

在建立了以上基本概念后,学生需继续了解图1方程中不同形式之间的转化关系。结合图1,我们看到四种不同形式的连续性方程,每个都是使用不同的流动模型推导而来。在这些不同的形式中,有两个是积分方程,两个是偏微分方程;有两个是守恒形式的,两个是非守恒形式的。这四个

并不是完全无关的方程,相反,它们是同一个方程(即连续性方程)的四种不同形式。四种形式中的任何一个都可以由其他任何一种形式演算导出,这在图1中用路径A—D表示。为了更好地理解流动控制方程的意义和重要性,需要帮助学生理解这些不同路径的细节。

首先,考察如何从积分方程形式得到偏微分方程形式,也就是图1中的路径C。

由于推导方程1所用的控制体空间位置是固定的,方程1中积分的积分限是常数,因此时间导数 $\partial/\partial t$ 可以置于积分号内

$$\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iint_S \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (3-1)$$

应用向量分析中的散度定理,方程(3-1)中的面积分可以表达为体积为

$$\iint_S (\rho \mathbf{V}) \cdot d\mathbf{S} = \iiint_V \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) dV$$

于是,我们得到:

$$\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \iiint_V \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) dV = 0 \quad (3-2)$$

或者

$$\iiint_V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) \right] dV = 0 \quad (3-3)$$

由于有限控制体是在空间任意选取的,方程(3-3)中积分等于0的唯一可能就是被积函数在控制体内处处为0。于是,从方程(3-3)中可以得到:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (3-4)$$

方程(3-4)正是图1中方框(3)所示的偏微分方程形式的连续性方程,可演示从方框(1)中的积分形式得到方框(3)中的微分形式过程。需注意的是,由于方框(1)和方框(3)中的方程都是守恒形式,上面的演算并没有改变这种守恒形式。

另外,在考虑把守恒形式变为非守恒形式的演算时,对于标量与向量乘积的散度,可参考向量恒等式:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) \equiv (\rho \nabla \cdot \mathbf{V}) + (\mathbf{V} \cdot \nabla \rho) \quad (3-5)$$

也就是说,一个标量与一个向量乘积的散度等于标量与向量散度的乘积加上向量与标量梯度的点积,该等式可以在任何一本向量分析的教材中找到。因此,将方程(3-5)代入方程(3-4),我们得到:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla \rho) + (\rho \nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (3-6)$$

方程(3-6)左端的前两项则是密度的物质导数,因此,方程(3-6)变为

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (3-7)$$

而方程(3-7)则正是图1的方框(4)中的方程,通过对图1中方框(3)所示的守恒形式的偏微分方程进行演算,可得到方框(4)所示的非守恒形式的偏微分方程。那么,是否能够通过对方框(2)所示的方程进行演算得到方框(1)所示的方程呢?答案是肯定的。具体情况如图1中用路径A表示。

通过流体力学荣誉课程中对连续方程四种形式及其与不同流动模型之间关系的学习,可以得出结论:一方面,图1方框所示的四个不同方程并不是完全无关的方程,而是同一个方程(连续性方程)的四种不同形式,但图中所示的每种形式都来自一个特定的、与每一个方程相联系的流动模型;另一方面,不同形式的基本原理,以及如何推导出控制方程的不同形式,不再限于连续性方程,同样

的处理也被用在后续对动量方程和能量方程的推导过程中。

(二) 创新性案例——虚拟仿真技术在课程中的应用

近年来,随着互网络和虚拟现实等技术在教育领域的应用,国内部分高校相继开展了仿真技术和基于网络的虚拟实验和教学应用的研究。为提高信息化背景下高等学校实验教学质量和实践育人水平,教育部更是从2017年起开展了示范性虚拟仿真实验教学项目的建设。相比物理模型实验,数值模拟具有可重复性好、条件易于控制,更加自由、灵活等优点,其不仅打破了时间和空间的壁垒,使实验更加高效快捷,也大大节约了实验成本,是未来实验发展的大趋势。数模和物模相结合的教学方式,形成了线上线下教学的个性化、智能化教学新模式,有助于形成教学效果优良、开放共享有效的高校信息化实验教学新体系^[9]。

流体力学荣誉课程课时有限,需注重流体力学基础和重塑实验教学内容教学,打造面向土木工程和水利工程专业的线上线下流体力学实验及工程案例教学平台。随着数值模拟技术的不断发展,对于流体力学中常见的流动现象与理论知识,可应用数值模拟技术,以直观的方式将流动现象展示出来。课程将计算流体力学技术应用在流体力学教学过程中,通过让学生自主编程或利用软件对基本流动现象进行数值分析,可将课堂所讲授的抽象概念和理论进行可视化或动画演示,大大促进了学生对基础理论的深入理解和应用。同时,也可将流体力学的知识应用于与专业相关的实际问题分析和简单设计中,以激发学生主动学习的兴趣,培养学生创新思考能力和科研能力,进而达到改善教学效果的目的^[10]。

同济大学土木工程学院流体力学实验教学团队,在日常教学中通过不断积累和研究,借助先进的信息技术和智慧教室平台对水槽实验进行了全新的教学设计,开发了“波浪运动特性”虚拟仿真实验系统(图2)。系统选用时下最流行的光滑粒子流体动力学方法(SPH)进行建模,该技术采用Lagrange法,使每个流体质点上均承载着各自物理量,且以质点为单位进行后期渲染,因此仿真精度更高,渲染效果最细腻、真实。此外,系统建设中不仅注重实验数据的高精度和实验流程及硬件的高度仿真,还以学生为中心,在实验操作中增加了诸多引导和互动。例如,将抽象的理论借助动画短片进行演绎和阐释,帮助学生提高对知识的理解和掌握;实验关键环节设置引导问答,启发学生自主思考;实验设计中通过定性定量的实验探讨,让学生根据实验结果,独立设计和分析解决港口平面布置中的相关流体力学问题;设立开放性思考题,实现激发学生思维创新。

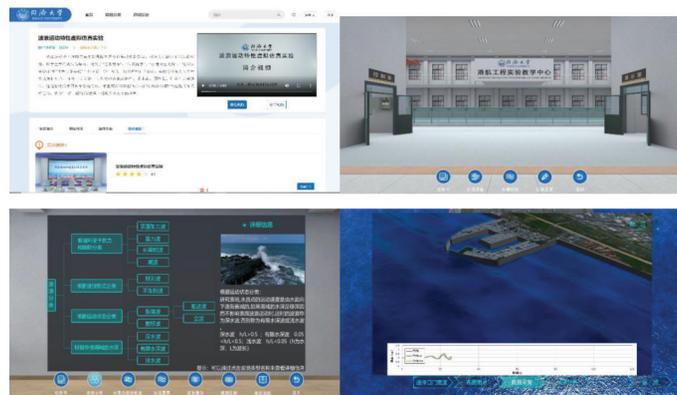


图2 波浪运动特性虚拟仿真实验平台

此外,课程还鼓励学生充分利用现代技术,积极开阔视野和思维。例如,采用计算流体力学与传统实验教学相结合的方式,自主设计开发虚拟仿真实验,以帮助学生巩固相关基本理论知识和锻炼学生形成独立思考的习惯,拓展将基础理论应用于工程实践的能力^[11]。以图3—图5展示的流体

力学线下实验中的局部水头损失实验为例,3~5名学生为一组,分别采用CFD模拟多种突变管道内流动情况,利用可视化功能真实展现局部阻力发生过程,实现线下教学实验和数模实验相互校正,使实验结果更精确。图4为经过可视化处理后,在不同进口流速条件下管道边界突然扩大处和突然缩小处的速度云图,学生从图中可直接观察到管道边界形状急剧改变时,管内流态的变化情况、漩涡区发生位置及其影响范围,同时结合流线相关概念,通过观察流线的疏密判断流速的大小。可见,虚拟仿真实验可将理论以更为生动的方式展现出来,从而加深学生对局部水头损失机理的理解。



图3 线下教学实验局部水头实验仪

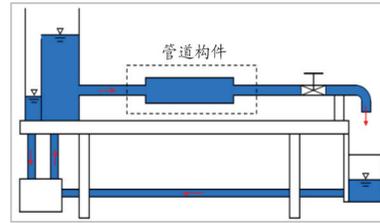


图4 局部水头损失实验装置简图

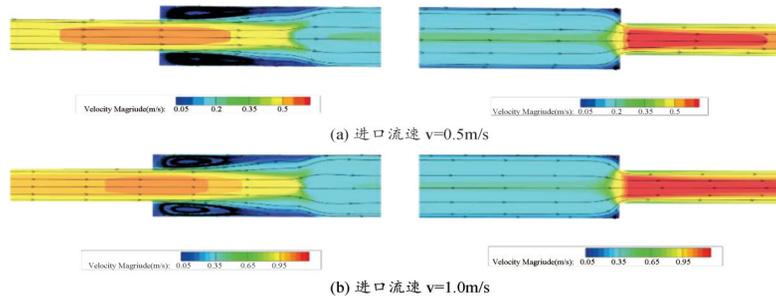


图5 不同进口流速下,管道边界突然扩大处和突然缩小处速度云图

(三) 挑战度案例——现代流体测量技术进展

传统的流体力学实验教学内容主要是验证型实验,包括雷诺实验、水静力学实验、文丘里实验、毕托管实验等,采用的测量设备和技术也较为陈旧。随着现代科学技术的高速发展,流体力学测量技术也日新月异。就流体力学中最基本的变量——流速测量而言,在过去的几十年里,国内外学者基于不同的技术和方法研发了多种流速测量仪器,主要包括转子式流速仪、多普勒流速仪、电磁流速仪、粒子流速仪等(图6)。本课程依托同济大学土木工程防灾国家重点实验室风洞实验室、力学国家级实验示范中心、土木工程国家级实验示范中心、水利港口综合实验室等大中型教学及科研综合示范平台,给学生创造了近距离使用各类现代流体测量设备和技术的机会。通过布置具有挑战性的课外综合性作业,使学生能采用科学方法对复杂工程问题进行研究,包括设计实验和数据收集、处理及分析,以及解释数据等内容。学生还可结合各类创新创业项目和导师制项目,以及各类力学竞赛活动,根据自身的想法进行实验方法的创新与优化,进而达到提升学生创新实践能力的目的。

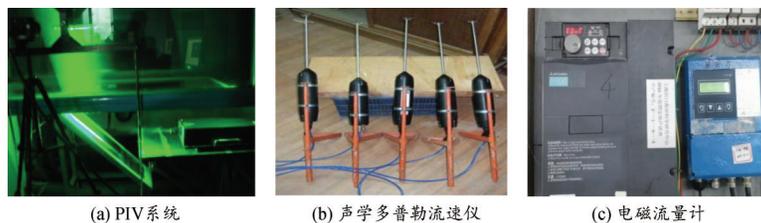


图6 流速测试仪器

四、结语

“两性一度”指向下的荣誉课程建设是培养拔尖人才、提升本科教学质量的必然要求。本文以流体力学课程为例,探讨了荣誉课程的建设目标重塑、基本原则和主要特色,并阐述了实际教学中内容高阶性、方法创新性和产出挑战度的具体案例和做法。相关探索可为工科流体力学课程的教学改革及其他力学类荣誉课程建设提供参考。

参考文献:

- [1] 徐颖秦,陶洪峰,刘艳君,等.“问题驱动+能力提升”卓越课程建设与实践——以自动控制原理课程建设为例[J]. 大学教育,2016,5(11):125-126,156.
- [2] 李竹青,李平,刘莹,等.“双一流”高校挑战性学习课程的探索与实践[J]. 高等教育评论,2019(2):99-108.
- [3] 杨延.“卓越课程”创新型教学模式的构建与研究[J]. 黑龙江高教研究,2014,32(2):16-18.
- [4] 孙智一,吴晓蓉. 计算流体力学数值模拟方法的探讨及应用[J]. 水利科技与经济,2008,14(2):126-128.
- [5] 郭空明,师阳,徐亚兰. 工程流体力学课内实践教学的探索和展望[J]. 高教学刊,2021(4):81-84.
- [6] 邓梓龙,徐泽,张程宾. 基于MATLAB GUI的工程流体力学可视化教学与上机实验[J]. 实验技术与管理,2020,37(2):136-139,143.
- [7] 谢翠丽,倪玲英. 计算流体力学在工程流体力学课程中的应用与实践[J]. 力学与实践,2017,39(5):503-505,495.
- [8] 吴宗铎,严谨,吴光林. 流体力学课程中抽象概念的可视化讲解[J]. 教育教学论坛,2018(19):162-163.
- [9] 于岩斌,芮君,程卫民,等. 数值实验在流体力学实验教学中的应用探讨[J]. 力学与实践,2019,41(5):615-619.
- [10] 王贞涛,徐荣进,王晓英. 流体力学精品课程教学改革与实践[J]. 高等建筑教育,2014,23(2):74-77.
- [11] 郝艳红. 本科流体力学课程中引入CFD内容的探索与实践[J]. 高等建筑教育,2019,28(4):85-89.

Construction for honor course of fluid mechanics under high order, innovative and challenging standard

FU Xiaoli, CAO Jinxin, ZHANG Hong

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: According to the high order, innovative and challenging standard, the construction objectives and principles of the honor course of fluid mechanics are determined in terms of teaching syllabus reconstruction, teaching method innovation, teaching team construction, student selection and assessment requirements and so on. The characteristics of this honor course includes: problem-driven as the starting point, basic concept as the fulcrum, learning output as the guidance and virtual simulation practice teaching as the expansion. Four forms of continuous equations and their relationship with different flow models, computational fluid dynamics technology in virtual simulation platform and progress of modern fluid measurement technology are taken as examples to illustrate the high-order requirement in course content, innovative requirement in virtual study platform and challenging requirement in students' learning output. Such attempt can provide reference for the construction of honor courses of fluid mechanics and other mechanics in engineering discipline.

Key words: high order, innovative and challenging; fluid mechanics; honor course; teaching reform; virtual simulation

(责任编辑 崔守奎)