

Development and Application of Multifunctional Testing Equipment for Fluid Mechanics and Fluid Machinery

Wenjie Cheng Chunlei Shao Jianfeng Zhou

School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu, 211186, China

Abstract

Fluid mechanics is a core course in mechanical engineering majors, aimed at cultivating students' ability to analyze and solve practical engineering problems. In response to the problems encountered in the experimental teaching of courses such as fluid mechanics and fluid machinery, a small comprehensive device has been developed based on similarity theory to replace the existing pump experimental device with a relatively single function, and a virtual simulation experimental section has been introduced to achieve virtual complementarity. Practice has shown that experimental devices developed based on similarity criteria and dimensionless parameter conversion can effectively replace the original experimental devices and solve problems such as limited experimental space and low student participation; The combination of virtual experiments and physical experiments helps students to conduct more targeted physical experiments after consolidating theoretical knowledge. This experimental teaching reform can effectively improve students' experimental results and make a good contribution to the teaching of engineering fluid mechanics.

Keywords

fluid mechanics course; renovation of experimental equipment; virtual simulation experiment; reform of teaching

流体力学及流体机械多功能试验装置开发及应用

程文洁 邵春雷 周剑锋

南京工业大学机械与动力工程学院, 中国·江苏·南京 211186

摘要

流体力学是机械类专业的一门核心课程, 该课程旨在培养学生分析和解决实际工程问题的能力。针对当前流体力学及流体机械等课程实验教学环节出现的问题, 基于相似理论开发了小型综合化装置, 以替代现有功能较单一的泵实验装置, 并引入虚拟仿真实验环节以实现虚拟互补。实践表明, 基于相似准则及无量纲参数转化, 研究开发的实验装置能够较好地替代原实验装置, 并能够很好地解决实验空间有限、学生参与度不高等问题; 虚拟实验与实体实验相结合有助于学生在巩固了理论知识之后, 更加针对性地进行实体实验。该实验教学改革可以有效地提高学生实验效果, 为工程流体力学教学做出较好的贡献。

关键词

流体力学课程; 实验装置改造; 虚拟仿真实验; 教学改革

1 引言

教育部在《关于一流本科课程建设的实施意见》中提出, 要聚焦新工科建设, 体现产业技术与学科理论融合, 建设一批培养创新型、复合型人才的一流本科课程^[1]。我校《工程流体力学》课程于2023年被认定为国家级一流本科课程, 该课程是众多工科专业(机械、化工、材料等)的专业基础课程^[2], 是研究流体平衡、运动规律及其应用的一门技术科学^[3]。该课程旨在培养学生分析和解决实际工程问题的能力, 树立严谨的工程理念^[4]。实验教学是高等教育的重要组成部分之一, 与理论教学相辅相成^[5]。工科专业实验课的任务是

让学生运用理论知识进行生产实践, 培养学生具有独立分析和解决实验中遇到问题的能力, 为后续进行科学研究打下坚实的基础^[6]。然而现如今工科课程的教学过程中, 往往对理论教学的重视程度明显高于实验教学^[7]。另外, 由于种种原因限制, 学生在实验教学中的主体作用也不能很好地体现^[8], 这是工科类专业实践课程中需要重点解决的问题。

在新工科概念下, 虚拟仿真技术的构建是不可或缺的环节, 如何提升实验教学质量, 提高学生解决复杂工程问题的能力以满足工程认证教育的要求, 是当前实验教学亟须解决的问题^[9,10]。虚拟仿真实验能够提高高等学校实验教学信息化程度, 是高等教育未来的发展趋势, 对高等教育质量的提高产生积极重要的作用^[11,12]。流体力学虚拟实验的实现能够有效缓解学校在经费、场地、器材等方面面临困难和压力, 开展网上虚拟实验教学能够突破传统实验对“时、空”的限

【作者简介】程文洁(1982-), 女, 中国江苏连云港人, 博士, 副教授, 从事流体工程、密封与测试技术等研究。

制,学生和教师都可以随时进入虚拟实验室进行实验操作。

2 实验现状及存在问题

2.1 实验项目开展情况

2017年,在江苏省品牌专业建设经费的资助下,我院建设了6套多功能流体力学综合实验台,用于开展流体力学实验,实验装置如图1所示。该装置实验项目的开设让学生能够深入了解流体流动规律,并能够根据流体的三大守恒原理解决相应的工程问题。

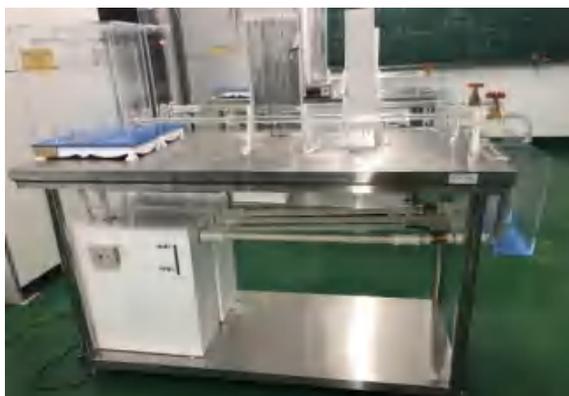


图1 流体力学实验台

2.2 目前存在问题

在实验教学过程中发现,空间有限(图2)是目前存在的较棘手问题。由于流体力学每套设备的功能比较单一,实验任务的完成需要在多台不同设备上同时开展。为了尽可能容纳更多的实验设备,实验室的布置往往比较密集。由此带来的问题较多,如拥挤的空间严重影响学生的学习体验,影响他们对于实验内容的理解和掌握;设备的摆放受空间限制,增加了设备损坏的风险;学生对实验操作过程不熟悉,实体实验仓促且结果不够理想,实验教学质量难以保证^[13]。针对现有问题制定了改造方案:①对现有实验装置进行多功能小型化的改造;②将虚拟仿真实验内容纳入实验环节。



图2 实验课现场图片

3 实验装置的多功能小型化开发

3.1 理论依据

相似理论广泛应用于泵的设计与实验,适用于难度较大、较难实现的实验过程(如真机尺寸较大)。基于相似理论,我们对工程流体力学实验用的泵设备进行缩小改造。定义改造前的泵为原型泵,改造后的泵为模型泵,引入 π 定理及无量纲准则,相似准则公式如下:

$$\pi_1 = \frac{Q}{D^3 n} = \phi \quad (1)$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{D^2 n \rho} = \frac{\nu}{D^2 n} = \frac{1}{Re} \quad (2)$$

$$\pi_3 = \frac{gH}{D^2 n^2} = \Psi \quad (3)$$

其中, D 为叶轮直径, m ; Q 为流体流量, m^3/h ; n 为叶轮的转速, r/min ; π_2 为雷诺数 Re 的倒数; Φ 为比流量; μ 为粘度, $Pa \cdot s$; ρ 为密度, kg/m^3 ; ν 为运动粘度, m^2/s ; g 为重力加速度, m/s^2 ; H 为扬程, m ; Ψ 为比扬程。

基于上述公式,以泵的几何相似为前提,同时保证原型泵与模型泵的雷诺数、比流量和比扬程都相等,则两泵相似。为了满足三个参数的相等,原型泵与模型泵还需要满足下列几个关系式:

$$D_m = D_p \times \left(\frac{\mu_m / \mu_p}{\rho_m / \rho_p} \right)^\xi = D_p \times \left(\frac{\nu_m}{\nu_p} \right)^\xi \quad (4)$$

$$n_m = n_p \times \left(\frac{\mu_m / \mu_p}{\rho_m / \rho_p} \right)^{1-2\xi} = n_p \times \left(\frac{\nu_m}{\nu_p} \right)^{1-2\xi} \quad (5)$$

$$Q_m = Q_p \times \left(\frac{\mu_m / \mu_p}{\rho_m / \rho_p} \right)^{1+\xi} = Q_p \times \left(\frac{\nu_m}{\nu_p} \right)^{1+\xi} \quad (6)$$

$$H_m = H_p \times \left(\frac{\mu_m / \mu_p}{\rho_m / \rho_p} \right)^{2-2\xi} = H_p \times \left(\frac{\nu_m}{\nu_p} \right)^{2-2\xi} \quad (7)$$

其中,下标 p 表示原型泵,下标 m 表示模型泵;上标 ξ 表示模型化方案系数。

通过上述关系换算,对原型泵及模型泵内的流体流动进行计算比较,并对泵性能曲线进行比较,具体比较方法见文献^[14,15]。

3.2 改造后的小型泵实验装置

小型泵实验装置实物图如图3所示,基于原有实验装置进行等比例缩小,整套装置占地面积不足 $1m^2$ 。新装置的过流部件采用有机玻璃制造,整个流域的流动均实现了可视化。优势如下:①能够实现在一套设备上完成《工程流体力学》课程的全部实验任务;②涵盖《过程流体机械》课程的部分实验环节;③节省空间。

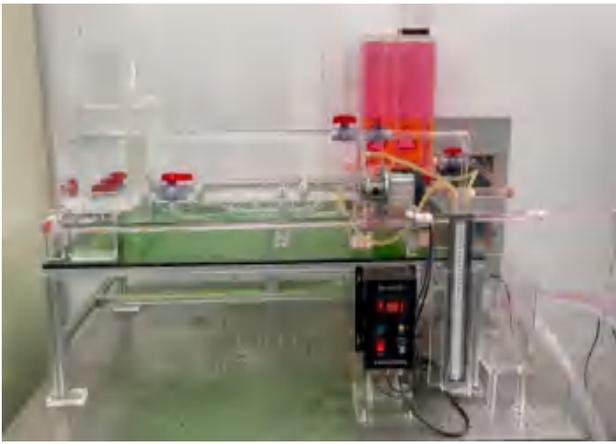


图3 工程流体力学实验装置改造

4 虚拟仿真实验开设

针对《工程流体力学》课程的实验教学,搭建了流体力学虚拟实验平台,该平台涵盖包含伯努利方程综合性、文丘里、雷诺实验等,集动画、数据处理、分析等功能于一体的实验。以文丘里实验为例,其实验目的是让学生通过确定文丘里流量计最大允许过流量的设计性实验,体验理论分析和实验相结合的研究过程。如图4所示,在文丘里虚拟实验中,可以看到溢流水箱、稳压水箱、文丘里流量计和实验管道。然后逐步完成数据的记录和成果分析,在分析中可以看到实验次数、各测压管的水头值、烧杯接入的水量和测量时间,最终能够生成 $\Delta h \sim Q$ 、 $\mu \sim Re$ 等性能曲线。

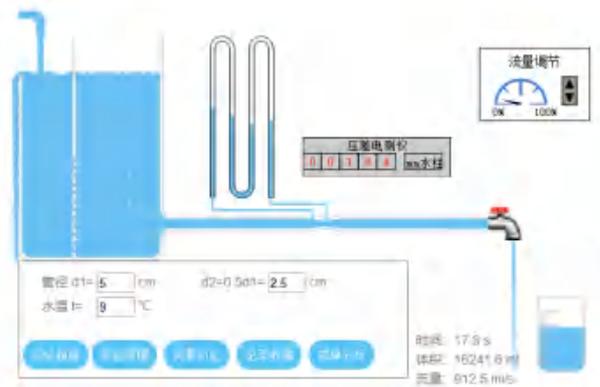


图4 文丘里虚拟仿真实验操作界面

5 虚实结合实验结果对比

将传统的实验模式与现代化的技术手段相融合,使得两种实验教学手段取长补短,能够较好地提高实验教学的效果^[16]。以雷诺实验为例,其实验的目的是让学生通过观察层流、湍流的流态及转换过程,测定临界雷诺数并掌握圆管流态判别准则。

在仿真实验界面中,可以看到溢流水箱、稳压水箱和实验管道等部分,将红色液体注入系统中,观察红色液体的流动状态不断发生变化,对应着紊流向层流的改变,如图5所示。学生在实验过程中记录红色液体的分布形状,通过调节阀门开度记录流量参数,最终再通过公式计算得出雷诺数,作为流态的判断依据。该实验过程能够有效地促进学生将理论知识向实际应用转化。

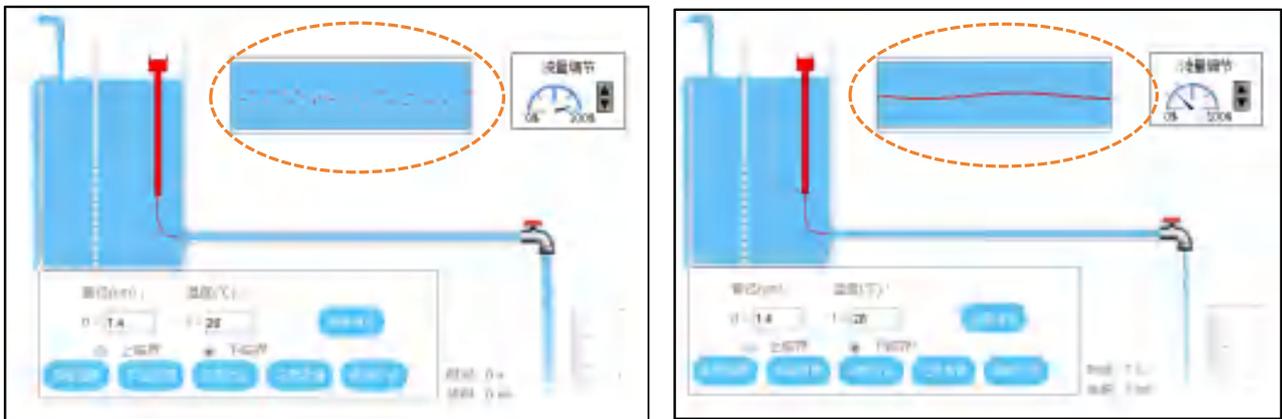


图5 雷诺实验虚拟仿真界面流态的变化

6 结论

工程流体力学是机械大类专业核心课程,开展切实的课程实验教学改革十分重要。论文针对现有流体力学课程实验环节存在的诸多问题,如设备较单一、实验室空间有限、学生参与度不高等问题,对现有实验设备及模式进行了改革,基于相似准则开发了小型综合化泵装置,并加入虚拟仿真实验环节实现了实验的虚拟结合。该实验改革可以有效地提高学生实验效果,为工程流体力学教学做出较好的贡献。

参考文献

- [1] 王晓哲,刘丽萍,雷丽,等.“新工科”背景下《工程流体力学》实验教学模式的研究[J].教育现代化,2021,8(72):47-50.
- [2] 李玉秀,蔡伟通,李淑铭,等.工程流体力学教学改革探讨[J].云南化工,2023,50(5):160-162.
- [3] 杜广生.工程流体力学(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2014.
- [4] 陈为林,刘军,卢清华,等.机械电子工程专业“工程力学”教学改革与实践[J].教育教学论坛,2022(20):69-72.

- [5] 李芳芳,田浩彬.浅谈工科实验教学中存在的问题及改进方案[J].科技教育,2020(4):137-139.
- [6] 蒋变玲,陈琼,赵亮,等.“新工科”背景下高校工科专业实验课程教学改革探索[J].农产品加工,2023(5):98-100.
- [7] 戎瑞,吴正人,孙冬雷.“工程流体力学”虚拟实验平台的建设与实践[J].实验室科学,2020,23(4):135-138.
- [8] 任欢,周广超,张蔓.机械设计实验教学改革探索与实践[J].工程技术,2018(3):30-32.
- [9] 葛利玲.材料科学与工程基础实验教程[M].2版.北京:机械工业出版社,2019.
- [10] 刘莉.一流教学实验室建设与思考[J].实验室研究与探索,2020,39(3):233-235.
- [11] 熊宏齐.虚拟仿真实验教学助理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.
- [12] 李平,毛昌杰,徐进.开展国家级虚拟仿真实验教学中心建设提高高校实验教学信息化水平[J].实验室研究与探索,2013,32(11):5-8.
- [13] 王军,董成斌.工程流体力学课程虚拟仿真实验[J].实验科学与技术,2023,21(6):85-88.
- [14] Wenjie Cheng, Chunlei Shao, Jianfeng Zhou. Unsteady study of molten salt pump conveying mediums with different viscosities[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019,137: 174-183.
- [15] Wenjie Cheng, Boqin Gu, Chunlei Shao, et al. Hydraulic characteristics of molten salt pump transporting solid-liquid twophase medium[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017,324:220-230.
- [16] 张晓春,夏双,周书颖.“虚实结合”的电工实验教学改革[J].创新教育,2018,23:207-208.