

实物与虚拟仿真相融合的空气动力学课程实验教学

柴振霞, 林伟, 王鹏, 聂万胜, 蒋浩, 李臻
航天工程大学宇航科学与技术系, 北京 100400

摘要: 本文主要介绍了现有条件下空气动力学课程开展的特色实物实验教学, 分析了传统教学手段的特点。为提高教学效果, 将虚拟仿真实验引入空气动力学实验教学中, 探索了虚实结合的空气动力学实验教学方法。

关键词: 空气动力学; 实验教学; 虚拟仿真; 实验室实地教学

Experimental Teaching of Aerodynamics Course Integrating Real Object and Virtual Simulation

Chai Zhenxia, Lin Wei, Wang Peng, Nie Wansheng, Jiang Hao, Li Zhen

Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 100400

Abstract: This paper presents an overview of the distinctive physical experiments featured in Aerodynamics course and offers an analysis of the attributes of conventional teaching methodologies. To enhance teaching effectiveness, virtual simulation experiments have been integrated into aerodynamics experimental teaching, exploring a hybrid aerodynamics experimental teaching method that combines virtual and physical elements.

Keywords: aerodynamics; experimental teaching; virtual simulation; laboratory field teaching

引言

实验是空气动力学课程中不可或缺的组成部分, 它不仅能够帮助学生将抽象的空气动力学理论具体化、形象化, 还能加深学生对流体力学基本原理的理解和掌握, 对学生知识构建、能力培养和综合素质的提升都发挥着至关重要的作用^[1]。

因风洞等实验设备价格昂贵、占地面积大、操作复杂、数量少等因素, 空气动力学实验教学过程中学生很难得到充分锻炼, 教学效果亟待提高^[2-4]。虚拟仿真实验教学依托虚拟仿真实验平台开展, 具有直观性、低成本、高交互性等特点, 能够弥补传统实物教学的不足^[5-8]。利用虚拟现实技术将大型设备置于计算机中, 突破了时间空间限制, 让学生得到更加充分的锻炼和实践^[9-13]。课程组结合现有实验条件及用人单位对应用型人才的需求现状, 将虚拟仿真实验融入《空气动力学》实验教学, 探索将虚拟仿真实验与实验室实地教学的有机融合, 通过优化设计实验内容, 充分锻炼学生的实践能力和创新能力, 提升教学效果, 提高人才培养质量。

一、实物实验教学

依托低速低湍流度风洞, 开展低速翼型测压实验等, 为学生提供真实的、直观的实验体验。另外, 巧妙设计了基于音速喷嘴的激波/膨胀波相交与反射实验, 并采用纹影设备对流动图像进行采集和显示。对于简单的流体运动, 借助演示仪进行演示实验, 加深学生对抽象概念的理解, 如翼型绕流中的流线、迹线等; 三维旋涡等。

(一) 基于低速风洞的翼型表面压力测量实验

在课程低速翼型课堂理论讲解之后, 基于低速风洞设计并实施了低速翼型表面压力测量实验, 将理论知识用于工程实践中, 帮助学生消化再吸收。具体内容包括: 实验目的和要求、实验装置介绍、实验原理及数据处理。该实验的主要目的是带领学生认识低速风洞的基本结构和工作原理, 熟悉两种测定风速的方法(热线风速仪和风速管), 熟悉压力测量系统的工作原理, 最终测

量不同攻角下翼型表面压强的压力分布, 绘制表面压力分布图, 如图1所示。

通过翼型测压实验, 学生可以直观了解风洞的基本结构、工作原理、速度和压力测量系统, 熟悉风洞实验的基本流程, 锻炼数据处理和分析能力。

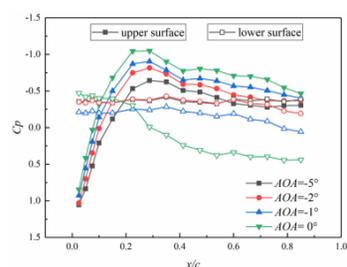


图1 S1223翼型表面压力分布

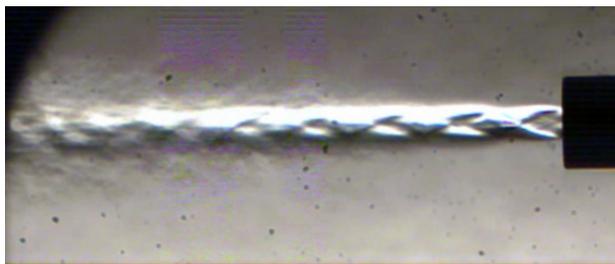
(二) 激波、膨胀波相交与反射实验

课堂讲授过程中, 激波、膨胀波相交与反射、拉瓦尔工况的调节是教学难点。而要开展“激波、膨胀波相交与反射实验”“拉瓦尔喷管多种运行工况的调试”等实验教学则需要具备超声速气流环境, 但是目前实验室没有配备超声速风洞, 即使有超声速风洞其操作过程也比较复杂, 难以实地开展。虽然调节模型火箭发动机工作条件也能产生超声速气流甚至马赫盘, 但同样因

高温、高压风险难以实地开展。

为了获得超声速气流，课程组巧妙利用高压气罐和超声速喷嘴，组成了一套超声速气流产生装置，并加工了设计室压 1.5MPa、1.1MPa、0.7MPa 的 3 个不同口径的喷嘴用于对比实验。通过调节喷嘴入口处的压力，可以改变喷嘴出口处的流速，获得不同的流动结构。采用高速相机和纹影设备可以拍摄得到不同入口压力下的纹影图，如图 2 所示。可以看出，压力由低变高，出口的由斜激波变为膨胀波。

在该实验设置下，学生调节不同喷管的室压以及高速相机，充分体验拉瓦尔喷管的设计工况以及不同工况之间的调节，在喷管出口，得到激波、膨胀波的相交与反射工况。通过分工配合，完成实验报告所需数据记录，并在课下完成实验报告。实验过程中，学生切实感受到超声速流动带来的震撼，利用纹影显示技术清楚的观察了激波、膨胀波在不同设计压力下的流动状态，对拉瓦尔喷管的不同运行工况有了直观的认识，加深了对课堂知识的理解和掌握。



>图 2 欠膨胀工况流动图像

(三) 演示实验

1. 流谱流线演示实验

在流体运动学部分学习了流体运动的几何描述：迹线和流线，给出了流场的定义，但是概念比较抽象，学生不容易理解。采用浙江大学毛根海教授团队设计的自循环流谱流线演示实验仪^[14]，可以清晰展示机翼绕流及升力方向的流线、迹线，演示十余种势流图谱与相关原理。该演示仪以自循环多流道组成显示屏，以化学溶液为工作流体，流、迹线由电控染色显示，经显示屏后，能自动消色，可长期自循环工作。通过流速调节器可以改变翼型的来流速度，观察不同流速下的流谱。

2. 三维旋涡实验

在有旋流动部分介绍了强迫涡和自由涡流动，根据数学推导可知刚性涡像刚体一样旋转，自由涡除原点外是无旋的，同样比较抽象，学生难以想象。采用如下三维涡演示实验仪^[15]可以直观的看到不同涡的流动特征，可以观察到强迫涡就像一刚体绕中心轴旋转，而自由涡与龙卷风的形态相似。而实际上龙卷风是以强迫涡为涡核、以自由涡为涡核外流场的组合涡，即兰金涡。通过演示实验，一方面可以增强课堂的趣味性，另一方面帮助学生理解课堂内容。

二、虚拟仿真实验教学

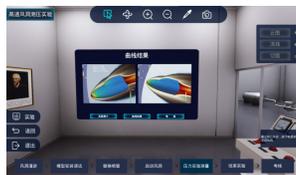
通过上述实物实验发现，由于实验设备数量少，采用分组实验的方式效率比较低，大部分学生仍以观看为主，少部分能进行设备操作。且“平板边界层速度剖面测量实验”等开展实地实验

条件和设备较为复杂，同样存在台套数不足等问题。为此，建设了虚拟仿真硬件环境和平台，开展了空气动力学虚拟仿真实验教学，弥补传统实地实验的不足，教学效果显著提升。

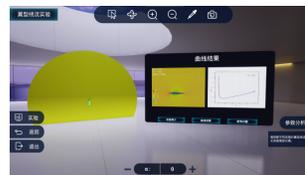
目前，已完成三轮次虚拟实验教学，学生在探索和交互中学习风洞的设计原理和真实风洞基本操作流程，身临其境的观察风洞内部、典型流动特征，加深对课堂知识的理解，巩固空气动力学课程的教学效果。

与以往实物实验不同的是，学生们面前不再是冷冰冰的气动仪器装备，而是大屏幕、计算机和崭新的 VR 设备。虚拟实验讲授环节，老师通过大屏介绍虚拟仿真实验系统的总体建设情况和本次实验课的教学目的、原理和要求，并对三个实验模块的主要内容和功能进行了详细讲解和演示操作。

虚拟实验实操环节，学生分成若干组依次同时在不同的设备上按操作流程完成实验项目，并触发关键节点、完成随堂测验。展示了两组学生在超大屏系统硬件的支持下开展高超声速风洞测压实验，就像在玩“穿越火线”游戏一样，遵循系统提示一步步开展具体操作：环绕检查风洞，进入设备间拿取模型，打开风洞测试段安装模型，更换喷管，关闭试验段舱门，进入控制间打开总电源、开启阀门，调节上有压力，改变来流温度，观察实验结果等。真实实验中的流程被逐一搬到了虚拟系统里，尤其是一些以往需要脑补或者大量后处理才能显示的结果，可以近乎实时的呈现到眼前。学生可以根据风洞实验要求选择对应的低速、高速和数值风洞，一组在高超声速风洞开展双椭圆测压实验，如图 8 所示，另一组则可在数值风洞开展低速翼型测压实验，如图 9 所示。



>图 8 双椭圆测压实验



>图 9 低速翼型测压实验

同一实验内容学生还可以体验 VR 版本的操作。如果说屏幕前的裸眼实验还让人有着现实和虚拟的割裂感，戴上 VR 眼镜后，学生便置身于一个完全独属于自己的实验室。在这个虚拟空间，学生可以进入风洞内部观看风洞结构，观察模型表面及周围的流动情况，大胆尝试各种实验操作，没有危险，不怕损坏实验设备，可以重复多次的开展相同试验操作，直至熟练。

在每个实验模块中，系统均会记录学生的关键操作步骤并上传至数据库。对有严格顺序关系的关键操作步骤采取出错提示并记录的方式，确保实验顺利进行，训练学生正确规范的使用风洞。实验结束后，学生进入随堂测验环节，以客观题的形式考核学生对空气动力学相关知识的掌握情况。实验报告由学生课后撰写，主要考察报告内容的准确性、完整性以及学生认识的深刻性。

三、虚拟实验教学与实验室实地教学的有机结合

学生通过虚拟实验环节，认识了大型风洞设备的内部结构和运行原理，熟悉了整个实验操作流程，清楚地观察到流线、迹线、旋涡等流动现象，以及模型在流体中受力情况。另外，在线虚拟仿真平台可便捷地使用个人计算机登录使用，没有时间空间

限制,方便学生在课后多次熟悉和强化知识点和操作。在此基础上,组织学生到实验室开展实物实验操作,此阶段主要以提问形式回顾实验原理、目的和数据分析等内容,强调设备操作流程和注意事项,绝大部分的时间留给学生操作运行设备。

通过虚实结合,显著提升了教学质量,主要体现在:一是学生有更多的时间运行操作设备,充分锻炼了操作能力;二是虚拟实验能够让学生认识各种风洞设备的内部结构,有助于增强对设备运行原理和操作的认知;三是虚拟风洞和数值仿真使得流体流线可视化、直观化,加深了学生对实验流场的认识。

四、结束语

空气动力学实验教学充分利用了现有实验设备,开展了独具特色的实验室实践教学实验,锻炼了学生的动手操作能力。由于

受设备数量、课堂时间的限制,学生难以完成全流程实验操作。虚拟仿真实验具有实验直观性、低成本、高互动性等优势,将其引入到空气动力学实验教学中,课程组首次探索了虚实融合的空气动力学实验教学方法。教学中学生通过虚拟仿真实验平台可以充分了解风洞结构及其实验流程,评估改正实验操作,完成随堂测试和实验报告,为真实风洞实验打下坚实基础,保证学生有更多的时间运行操作设备,充分锻炼操作能力,切实提高了教学效果。同时在虚拟仿真实验过程中可引导学生发现问题,优化实验,充分调动了学生参与实验的积极性和主动性,从而更好地理论联系实际。

参考文献

- [1] 刘伟,姚莉,杨小亮,易仕和.国内外“空气动力学”课程实践教学的对比分析[J].军事高等教育研究,2010,33(1):68-71
- [2] 冈敦殿,王东方.基于在线虚拟风洞的空气动力学实验教学[J].科教导刊,2020年11月.
- [3] 肖国权,尹泽裕,高存年.基于虚拟风洞的流体力学实验教学实践研究[J].时代汽车,2021年6月.
- [4] 李文华,王景芹,赵靖英.交互模式下虚拟仿真教学的探索和研究——以“电器可靠性技术”课程为例[J].教育教学论坛,2022年3月.
- [5] 王卫国,胡今鸿,刘宏.国外高校虚拟仿真实验教学现状与发展[J].实验室研究与探索,2015年5月.
- [6] 杨秀洋,胡文华,徐晓秋.液压专业课程的虚拟仿真教学[J].液压与气动,2021年11月.
- [7] 莫春美,李甜,杨汉宁.基于虚拟仿真的“多层次四平台”力学类课程体系探索与实践[J].现代职业教育,2022年3月.
- [8] 王路珍,孔海陵,余斌,等.工程力学实验教学改革与虚拟仿真实验平台建设[J].实验室科学,2021,24(5):153-155
- [9] 缪志伟,马栋梁.与虚拟仿真实验相融合的结构力学课程教学创新与实践[J].教育教学论坛,2020(18):384-385.
- [10] 易平,仲伟秋,黄丽华.美国大学计算机软件辅助力学课程教学模式探讨[J].高等建筑教育,2012(4):132-135
- [11] 韩永平.浅谈大学物理实验教学设计中虚拟仿真实验的应用[J].科技视界,2020(25):26-27.
- [12] Li, Y., Li, C., Wang, Y. et al. Design and development of immersive 3D virtual simulation experiment teaching platform for internet of things. Multimedia Tools and Applications (2024). <https://doi.org/10.1007/s11042-024-20209-8>
- [13] 周威,何苗,任小明,沈阳,陈磊.虚拟仿真技术在高校工程实践教学中的探索与应用[J].创新教育研究,2022,10(1):154-159.
- [14] 杭州源流科技有限公司.自循环流槽流液演示实验[EB/OL].<https://fluid.net.cn/product/showproduct.php?id=29>
- [15] 杭州源流科技有限公司.三维旋涡实验[EB/OL].<https://fluid.net.cn/product/showproduct.php?id=29>