

文章编号: 1001-4888(2018)04-0655-10

流体力学计算机仿真实验教学的开发与设计^{*}

沙毅, 李其朋, 李勇

(浙江科技学院 机械与汽车工程学院, 杭州 310023)

摘要: 为强化流体力学课程实验教学环节, 在分析目前流体力学实验教学9个主要问题基础上, 提出发展计算机流体力学仿真实验教学的必要性和新思路。为方便开发和制作结合科研性的多媒体实验仿真软件, 本文推出了14个传统和4个现代流体力学实验项目, 基本覆盖了流体力学课程知识点。通过发动机轴流冷却风扇性能计算机仿真实验开发研制, 阐明采用真机实验数据拟合方程式的方法生成仿真软件实验平台。经过实验数据对比, 表明风扇性能计算机仿真实验贴近真实实验。实践证明计算机仿真实验教学是一条具有现实意义的发展模式和快捷方法。

关键词: 流体力学实验; 实验教学; 计算机仿真; 轴流风扇; 皮托管

中图分类号: G642

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-18-050

0 引言

流体力学是一门建立在实验、理论和计算三大支柱上的典型的高度理论化、工程应用强的课程, 是机械、能源、化工、动力、建筑、生物、航天等专业重要的专业基础课或基础理论课程之一。德国等西方发达国家普遍将流体力学作为工科类、理科力学类及相关专业本科教育的必修课开设。在中国工程教育专业认证等活动中, 目前许多专业也规定必须开设流体力学课程, 故流体力学课程的普及率会不断提升。流体力学最大特点是理论性极强, 抽象概念多, 数学公式的演绎推导多, 故借助于实验加深和理解课程所学内容及培养学生科学研究动手能力无疑是一条重要的渠道^[1-6], 也应当是高素质复合型人才和创新型人才培养不可或缺的重要教学环节。

流体力学实验的目的在于使学生掌握流体测量的基本方法和基本技能, 验证和加深理解理论, 培养分析问题和解决问题的能力。但就中国目前的高等教育实际情况来看, 流体力学课程配备实验教学在许多高校困难较大, 难以实现。为提高教学质量, 国家教育部分别于2013年和2016年推出各100个虚拟仿真实验教学中心, 以弥补真实实验在实验条件、实验成本、交互性和安全性等方面的不足, 也可以与真实实验教学结合, 相互补充, 有效促进高校学生创新精神和实践能力的提高^[7]。仿真就是利用模型复现实际系统中发生的本质过程, 亦称模拟, 模型包括物理和数学的, 有静态和动态的, 有连续和离散的。

河海大学力学与水工程虚拟仿真实验教学中心是首批入选的100个国家级虚拟仿真实验教学中心之一, 从目前发表的成果来看, 主要集中在材料力学, 其他力学类的虚拟仿真实验教学也集中在材料力学、理论力学等固体力学范畴^[8-12]。国防科学技术大学力学与航天工程虚拟仿真实验教学中心是第二批入选的100个国家级虚拟仿真实验教学中心之一, 目前尚未看到发表的成果。笔者通过中国知网等进行查询, 只看到零星一两篇级别较低且没有实质性进步内容的流体力学实验虚拟仿真论文, 由此可以说明流体力学虚拟仿真实验尚处在发展起步阶段。本文正是在这样的背景下, 根据实际的需要, 结合浙

^{*} 收稿日期: 2018-03-17; 修回日期: 2018-04-13

基金项目: 浙江省高等教育教学改革研究项目(jg2015117)

通讯作者: 沙毅(1961—), 研究员。主要从事流体机械理论与设计、流体力学测试技术研究。Email: shayi01@sina.com

江省高等教育教学改革研究项目应用型“流体力学”教学内容及方法研究,在分析目前流体力学教学中所面临问题的基础上,着手从事流体力学计算机仿真实验教学的开发与设计,提出发展流体力学计算机仿真实验教学的改革思路,通过具体的实践探索,展现出一条因地制宜、因时制宜的创新发展模式,并以具体的案例加以说明。

1 发展流体力学计算机仿真实验教学的必要性

要发展创新,首先要明确理由及必要性,面对存在的问题,寻求切实可行的发展方向和解决问题的方法。流体力学课程实验教学改革所面临的问题和机遇主要有:

(1) 倡导学生参与科学研究。《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020)》指出,高等教育“要支持学生参与科学研究,强化实践教学环节,促进科研与教学互动,与创新人才培养相结合”。要促使学生参加流体力学科研活动,贯彻发展规划纲要精神,在科研设备难以普及的情况下,发展计算机仿真科研实验不失为一条有效的快捷途径。

(2) 网络教学与传统模式的转变。网络技术的发展使教育进入了崭新的慕课、网络公开课和翻转课堂时代,慕课即 Mooc 的缩写,译自 Massive Open Online Course;翻转课堂译自 Flipped Classroom 或 Inverted Classroom,也可译为“颠倒课堂”。这些课程的学习均带有公开参与、分散、分享、网上独立学习及先学后教的特点。针对实验性较强的流体力学课程,利用网络实现实验教学的功能传递是首先要解决的问题之一。

(3) 远程教育实验教学的实现。为偏远地区培养相关技术人才,是目前远程教育面临的一项主要任务。课程的理论可以通过网络的多媒体形式输送到远方,但流体力学实验室及技术设备无法移动到现场。

(4) 特色经济区域人才培养。为特色经济区域培训专门人才是行业教育面临的一项任务。以浙江温岭泵业块状经济转型升级区域为例,该行业集群 2008 年的统计数据是,全市共有泵业企业 3000 多家,其中整机企业 1200 家,规模以上企业 375 家,亿元规模企业 15 家,实现工业总产值 300 亿,但企业技术人员超过 90% 为非流体机械对口专业毕业生。笔者作为专家组成员在培训授课中将流体力学实验拍成录像实施观摩,取得了事半功倍的效果。

(5) 大众化高等教育迫使实验教学改革。中国在改革开放前主要实施的是精英教育,在校学生数量相对少。扩招使一些普通高校学生数量大幅度增加,流体力学实验资源明显不足。笔者所在学校的机械与汽车工程学院先后在机械制造 6 个班、车辆工程 2 个班、汽车服务 2 个班、材料成型 2 个班和能源环境 2 个班开设 48 学时流体力学或 32 学时工程流体力学课程。因实验设备的限制,目前只在能源环境工程专业独立设置流体力学实验课,其他专业教学大纲中一律不设实验学时。

(6) 实验设备的局限性。中国高校传统的流体力学实验设备大多精度高、形态“笨”而“大”,占用面积大、多为固定式,台套数少且大多为金属制品,这些设备的特点是经久耐用,水、气介质基本各为一半,大多可兼用从事科研活动。改革开放后这些设备部分被拆除,更换成轻便型的流体力学专项实验台。新型的实验设备基本采用水介质,大多采用可视性好的有机玻璃材料制造和调节方便的电控技术,时间稍长,有机玻璃容易变形甚至断裂或电控失效,这就造成教学大纲中规定的流体力学实验教学任务有时因设备损坏难以顺利完成。一般有机玻璃实验台的寿命比规定的设备更换周期短,这就需要开发永不损坏的计算机仿真实验随机替代真实实验。

(7) 技术先进实验设备成本过高。目前国内尚有一些技术先进、投资高的流体力学实验设备,普及困难、利用率低,但以计算机仿真的形式普及,相对成本要低的多。

(8) 目前中国的高等教育已实现重基础轻专业的转型,毕业生专业对口的要求已明显淡化,但也给工程技术人员提出了要不断学习、终身学习的要求。自学理论比较抽象的流体力学课程,通过计算机仿真实验,相对要容易轻松一些。

(9) 计算流体力学(CFD 技术)在中国已普及,在流场计算和数值模拟方面成果丰厚,但流体力学虚拟仿真却显得落后许多。

计算机技术的飞跃发展使计算机虚拟现实、交互式仿真等已延伸到教育领域,虚拟现实建模语言 VRML(Virtual Reality Modeling Language)以 Internet 作为应用平台,是一种集计算机网络、多媒体及人工智能为一体的系统开发工具和手段^[13-15]。鉴于上述 9 方面的主要问题和目前计算机多媒体及网络技术高度发达的现状,发展计算机流体力学仿真实验教学或展开网络实验教学无疑是一条有现实意义的必然之路。

2 流体力学计算机仿真实验教学开发项目

要发展计算机仿真流体力学实验教学,前提是要开发多媒体实验仿真软件工具,制作软件首先要以流体力学科研实验平台为模板确定实验仪器设备和实验项目。本文经过多方研究分析,从传统和现代两方面推出流体力学计算机仿真实验教学与实验项目。

2.1 传统流体力学实验教学与经典项目

原南京工学院牵头的一大批流体力学第一代教师,经过多年的研究和总结,确立了 18 个传统经典的工程流体力学实验教学项目,并且出版了规范性教材^[16]。该体系实验项目布局合理,典型性、代表性、实用性和逻辑性都较强,知识点全面,大体上水、气介质比例相当。所表现的系统性、完整性、统一性、客观性和规范性也较高,有量大、专业面广的使用记录。其最大特点是科研和教学融为一体,实验装置一般精度较高,借助风洞等科研平台,使用压力计、皮托管等辅助仪器就能完成实验,而且目前仍旧是流体力学测量技术的有效方法。淘汰落后的势流电比拟研究法等实验,考虑 PIV(粒子图像测速技术)与激光测速实验的重合性,笔者推荐表 1 所列 14 个中国传统流体力学常规测量性实验项目节选。

表 1 传统流体力学经典实验项目节选

Tab. 1 Project excerpt of classic fluid mechanics experiment

序号	实验名称	实验内容	实验设备及主要仪器	理论知识点
1	流体静力学基本方程式	理解流体静力学基本方程式物理意义和几何意义及表压力和真空概念;学习使用液柱式测压计;学习测量液体的密度。	静力学方程实验装置	静止状态不可压缩均质液体基本方程: $z + p/\rho g = \text{常数}$; 对于自由表面的液体: $p = p_0 + \rho g h_0$ 。
2	测速管校正	了解微压计结构、工作原理和使用方法;学习使用皮托管测量气流速度;掌握皮托管校测方法及确定校正系数。	小型低速风洞、皮托管、补偿微压计	高精度补偿微压计结构及工作原理;驻点、静压、动压和总压概念;测速管校正方程: $2(\rho_0 - p)\xi = \rho v^2$ 。
3	流态观察和临界雷诺数测定	观察流动的层流和湍流状态;测量上临界雷诺数 Re'_c 和下临界雷诺数 Re_c 。	液体流态实验装置	雷诺数 $Re = vd/\nu$; 上临界雷诺数 $Re'_c = 13800 \sim 40000$, 下临界雷诺数 $Re_c = 2320$ 。
4	管道沿程阻力	了解影响沿程阻力的因素;找出沿程阻力系数与雷诺数关系 $\lambda = f(Re)$, 学会实验数据拟合经验公式;学会涡轮流量计(或堰)测流量。	管道沿程阻力实验装置	相似原理导出: $h_f = f(Re, K/d) l v^2 / 2gd$; 沿程阻力系数: $\lambda = f(Re, K/d)$; 达西公式: $h_f = \lambda l v^2 / 2gd$ 。
5	管道湍流速度分布和局部阻力系数测定	测量圆管内湍流速度分布;测定管道截面突然扩大处的局部阻力系数;学习用速度分布计算流量以及测速管与微压计的联合使用。	风管实验装置、倾斜微压计	工业风管速度分布: $v/v_\tau = 5.75 \log(y/K) + 8.48$; 平均速度和流量计算: $v' = \sum v_i/n$, $q_v = \pi d^2 v'/4$; 局部能量损失计算式: $h_j = \xi v'^2 / 2g$ 。
6	伯努利能量方程式验证	测定并计算位置水头、压强水头、速度水头和总水头;绘制并分析压强和总水头线规律。	能量方程实验装置	伯努利能量方程: $z_1 + p_1/\rho g + \alpha_1 v_1^2 / 2g = z_i + p_i/\rho g + \alpha_i v_i^2 / 2g + h_{wi-i}$; 静止流体: $z + p/\rho g = c$ 。
7	流体粘度测定	理解微团相对运动粘性产生切向力的性质;明确影响粘度的主要因素是温度。	圆管层流装置、粘度计	哈根-泊肃叶定律: $q_v = \pi \Delta p d^4 / 128 \mu l$ 。
8	绕圆柱体压力分布	测量被绕流物体表面压力分布;了解绕圆柱体压力分布情况;确定绕流物体形状阻力来源。	小型低速风洞、皮托管	伯努利能量方程;绕圆柱体流动理论压力系数: $C_p = 2(p - p_\infty) / \rho v^2 = 1 - 4 \sin^2 \theta$ 。

(续表 1)

序号	实验名称	实验内容	实验设备及主要仪器	理论知识点
9	绕二维机翼压力分布	测量二维机翼表面压力分布;计算作用翼型上环量 Γ 、升力 F_L 和升力系数 C_L ;观察失速现象。	闭式环流风洞、测压排管	无因次压力系数: $C_{pi} = 2(p_i - p_\infty)/\rho v_\infty^2$;单位宽度翼型升力系数 $C_L = 2F_L/\rho v_\infty l \times 1$ 。
10	平板绕流边界层速度分布	测定平板边界层速度分布;测定边界层厚度沿流动方向变化;测定层流转换湍流边界层的过渡区。	小型低速风洞、坐标仪	边界层转捩特征雷诺数: $Re_c = Vx/\nu$; 速度分布: $y = f(v/V)$; 厚度分布: $\delta = f(v/V)$ 。
11	边界层对绕流物体阻力影响	绕流圆柱体边界层分离产生下游尾涡区,分离点后移减小阻力;研究尾涡区速度分布,由动量定理确定圆柱体阻力系数;掌握阻力测定方法。	小型低速风洞、坐标仪、倾斜微压计	流动方向阻力及阻力系数: $F_D = \int_{-h/2}^{+h/2} \rho v(V_\infty - v) dy$, $C_D = \frac{2F_D}{\rho V_\infty^2 A}$ 。
12	动量法测定机翼阻力	明确机翼阻力随冲角 α 的增大而增加;研究二维机翼尾涡区速度分布,根据动量定律确定阻力系数。	闭式风洞、坐标仪、微压计	机翼阻力及阻力系数: $F_D = \int_{-h/2}^{+h/2} \rho v(V_\infty - v) dy$, $C_D = \frac{2}{b} \int_{-h/2}^{+h/2} Y dy$ 。
13	水泵性能	在转速 n 下,测量计算泵 8~10 个工况点流量 q_v 、扬程 H 、轴功率 P_a 和效率 η 参数;绘制性能曲线。	水泵实验装置、扭矩仪	泵扬程: $H = (p_2 - p_1)/\rho g + (v_2^2 - v_1^2)/2g$;有效功率: $P = \rho g q_v H$;泵效率 $\eta = P/P_a$ 。
14	风机性能	在转速 n 下,测量计算离心风机 8~10 个工况点流量 q_v 、全压 p 、静压 p_s 、轴功率 P_a 和效率 η 参数;绘制性能曲线。	离心风机性能实验装置	风机全压: $p = (p_2 + 0.5\rho v_2^2) - (p_1 + 0.5\rho v_1^2)$;静压: $p_s = p_2 - p_1 - 0.5\rho v_1^2$;有效功率: $P = q_v p$;风机效率 $\eta = P/P_a$ 。

2.2 现代流体力学实验教学与实验项目

计算机技术的普遍应用标志着进入了现代化流体力学实验教学,这个时期注重开发研制具有经济性的、单纯从事教学活动的流体力学实验产品,而且以水介质实验台居多。教学实验的项目和功能基本上与传统流体力学实验相当,但精确度普遍不高。从 20 世纪 80 年代开始,浙江大学国家工科力学教学基地研发了大量流体力学实验仪器设备,部分融入了现代科学技术的内容,并出版了有代表性的流体力学实验教材^[17]。表 2 为笔者在传统设备的基础上所推荐的科研与教学并用型流体力学测量性实验项目节选^[18]。

表 2 现代流体力学实验项目节选
Tab. 2 Project excerpt of modern fluid mechanics experiment

序号	实验名称	实验内容	实验设备及主要仪器	理论知识点
1	PIV 流体喷雾场测量	获取喷雾形成的直径为 10~80 μ m 的雾滴运动图像,实现对周围气体卷吸及运动情况的测量;获得瞬息速度矢量分布、流线、涡量和速度云图。	PIV 测量装置、喷雾器	计算流场各点速度标准偏差;表征流体运动湍流特征: $k = (u_{rms}^2 + v_{rms}^2)/2$;分析涡量分布: $\omega = 0.5\Omega = 0.5\text{rot}v = 0.5\nabla \times v$ 。
2	双泵串联实验	测定计算 1#、2#泵 8~10 个工况点流量 q_v 、扬程 H 参数;分别绘制和分析单泵和双泵性能曲线。	双泵串联实验装置	双泵串联性能与单泵性能之间关系: $q_v = q_{v1} = q_{v2}$; $H = H_1 + H_2 = f(q_v) = f_1(q_v) + f_2(q_v)$ 。
3	双泵并联实验	分别测定计算 1#、2#泵 8~10 个工况点流量 q_v 、扬程 H 参数;分别绘制分析单泵和双泵性能曲线。	双泵并联实验装置	双泵并联性能与单泵性能之间关系: $H = H_1 = H_2$; $q_v = q_{v1} + q_{v2} = f(H) = f_1(H) + f_2(H)$ 。
4	流量、水位检测与自动控制系统实验	了解现代量测技术;掌握电磁流量计、涡轮流量计、压差式流量计及计算机控制测压传感器技术性能与使用方法;了解计算机数据采集与控制系统的结构组成及其功能;学习压力式水位计的安装、使用及压差传感器信号转变、显示方法。	电磁、涡轮、文丘里和孔板流量计及计算机数据采集系统	电磁、涡轮、文丘里和孔板流量计工作原理及测量误差、量程和相对精度原理;计算机数据采集/控制模块和上位计算机监控程序的组成;压力式水位计水位高低向压力大小转变及压力传感器电信号转变、处理原理。

3 计算机仿真研究型实验教学设计案例

实施流体力学计算机仿真实验教学的前提是具备计算机模拟工具,即仿真硬件和仿真动画软件,仿真硬件即为普通计算机,而制作仿真动画软件的基础是具备真实的实验装置,即在完成真实实验的基础上通过获取的实验数据编程仿真软件,以达到实验能反映客观现实的逼真效果。笔者在车辆工程专业工程流体力学课程中实施了计算机仿真车辆发动机轴流冷却风扇性能测试实验,现予以介绍。

3.1 发动机轴流冷却风扇性能实验

发动机气缸内燃烧会产生高温,就需要水套中的冷却液进行降温冷却以保持在适当的温度范围。风扇的作用是在冷却系统处于大循环状态下,对流经散热器的水实施外部对流散热,部分车辆也兼做空调散热器散热,一般采用低压、小功率轴流通风机。为了研究智能型轴流风扇性能及设计方法,实现节能降耗的目的,笔者建造了如图1所示发动机冷却系统实验装置,开展科学技术研究工作。本文节选465Q型发动机风扇性能实验进行阐述,所用仪器设备精度均达到科学研究档次。风扇主要几何参数为:风扇外径 $D_o=240\text{mm}$;轮毂直径 $D_w=88\text{mm}$;叶片数 $Z=5$ 片。

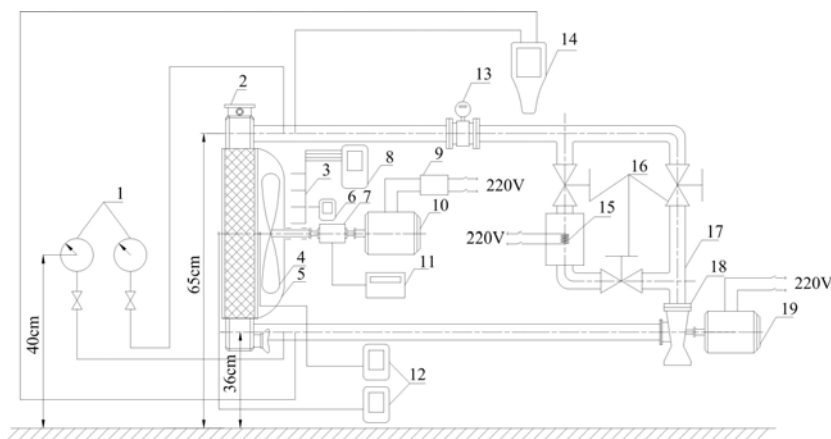


图1 发动机冷却系统实验装置

Fig.1 The measuring apparatus of engine cooling system

1-压力表 2块;2-散热器;3-皮托管 4根;4-风扇;5-散热器罩;6-热线风速仪;7-转矩转速仪;
8-数字式微压计 4块;9-变频器;10-风扇电动机;11-转矩转速显示仪;12-微压计 2个;13-涡轮流量计;
14-热电偶温度计;15-加热器;16-阀门;17-管道;18-冷却水泵;19-水泵电动机。

主要实验和计算步骤:(1)发动机中的风扇处于变速运转,由变频器调7档风扇转速;(2)扭矩仪进行7档风速下输入轴功率 P 和转速 n 测量;(3)倾斜式微压计测定风扇中心8mm前散热器中心点酒精液位值,换算成真空度 p ;(4)距风扇出风边10mm,沿半径布置测位1、 $R=47\text{mm}$,测位2、 $R=71\text{mm}$,测位3、 $R=95\text{mm}$,测位4、 $R=119\text{mm}$ 四皮托管测点,皮托管与数字式微压计相连,由压差可计算出测点轴向风速 v_a 。为校准皮托管测速,在半径 $R=71\text{mm}$ 处同时布置了一热线风速仪;(5)以半径为自变量,用皮托管4测位风速拟合成方程式 $v_a=f(r)$,以轮毂半径44mm为起点,风扇梢半径120mm为终点,积分即可得各种转速下风扇流量 $q_{v_i}=\int_{0.044}^{0.120} v_{ai} dA=\int_{0.044}^{0.120} v_{ai} 2\pi r dr$;(6)风扇后为大气压,散热器中心点真真空度乘以风扇流量即为风扇有效功率 $P_e=p\times q_v$;(7)有效功率 P_e 与轴功率 P 的比值为风扇效率 $\eta=P_e/P$ 。

表3为风扇速度测量与流量计算参数;表4为风扇转速变化性能测量与计算参数;图2为风扇变速流量、压强、轴功率和效率性能实验曲线。

3.2 计算机仿真软件实验平台生成原理

模拟实验操作和计算步骤与真机实验相同,关键问题是输入和输出参量及显示数据要贴切真实实验,反映客观实际。本文采取的办法是在真实实验数据(表3、表4及图2)基础上,通过数值分析方法拟

合出输出参量计算公式或约束方程,通过计算机后台计算处理显示在界面上,表 5 所示为模拟软件实验平台演绎过程。

表 3 风扇速度测量与流量计算
Tab.3 Fan velocity measurement and flow calculation

风扇转速 n $/(r \cdot \min^{-1})$	测位 1 速度 $v_{a1}/(m \cdot s^{-1})$	测位 2 速度 $v_{a2}/(m \cdot s^{-1})$	测位 3 速度 $v_{a3}/(m \cdot s^{-1})$	测位 4 速度 $v_{a4}/(m \cdot s^{-1})$	轴向风速拟合方程	风扇流量 q_v $/(m^3 \cdot s^{-1})$
1107.3		0.954	1.909	2.699	$v_{a1}=36.354r-1.600$	0.072
1500.7		2.699	4.47	6.330	$v_{a2}=75.646r-2.687$	0.155
1903.3	0.926	4.049	6.473	9.543	$v_{a3}=117.813r-4.531$	0.228
2301.7	1.410	4.690	7.725	11.531	$v_{a4}=139.158r-5.211$	0.282
2699.7	2.338	5.240	8.642	12.516	$v_{a5}=141.400r-4.552$	0.325
3100.4	2.699	6.882	10.221	14.473	$v_{a6}=161.088r-4.802$	0.366
3501.1	3.318	7.692	11.988	16.118	$v_{a7}=177.900r-4.987$	0.417

表 4 风扇转速变化性能测量与计算参数
Tab.4 Variable speed performance measured and calculated value of fan

风扇转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	风扇流量 $q_v/(m^3 \cdot s^{-1})$	扇前压强 p/Pa	轴功率 P/kW	有效功率 P_e/kW	风扇效率 $\eta/\%$
1107.3	0.072	-12.50	0.0031	0.0009	29.03
1500.7	0.155	-26.44	0.0080	0.0041	51.23
1903.3	0.228	-38.82	0.0143	0.0089	61.94
2301.7	0.282	-54.76	0.0222	0.0154	69.22
2699.7	0.325	-79.21	0.0341	0.0257	75.36
3100.4	0.366	-107.7	0.0499	0.0394	79.02
3501.1	0.417	-136.83	0.0695	0.0571	82.10

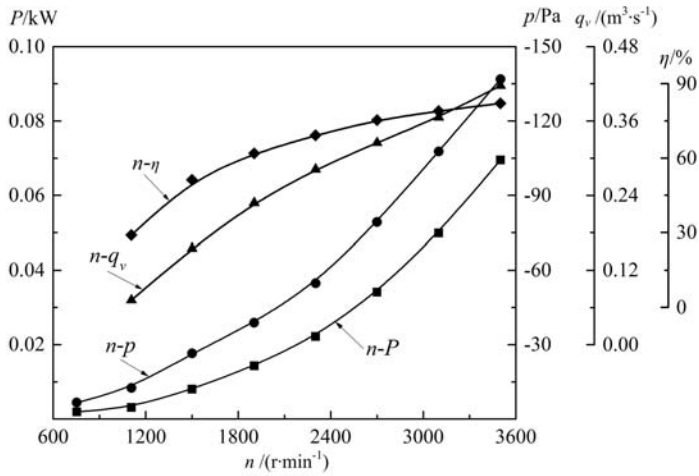


图 2 风扇变转速性能实验曲线
Fig.2 Variable speed performance test curves of fan

表 5 计算机模拟软件实验平台生成原理
Tab. 5 The forming mechanism of virtual computer experiment platform

步骤	调节输入参量及取值范围	计算公式或约束方程	输出参量及显示范围
I	皮托管布点数 j 、测位半径 R 及 风扇转速 n $j=4\sim 8; R=0.044\sim 0.120\text{m}$ $n=500\sim 5200\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$v_a=7.44264\times 10^{-7}n^2+130.09938R-9.37368$	风扇转速 $n, n=500\sim 5200\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 皮托管测点轴向风速 $v_{aj}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
II	风扇转速 $n, n=500\sim 5200\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$q_v=2.57896\times 10^{-4}n-0.17691-2.58065\times 10^{-8}n^2$	风扇流量 $q_v/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$
III	微压计测位距风扇中心 $L=8\text{mm}$; 风扇转速 $n, n=500\sim 5200\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$p=0.00582n-4.39049-1.24868\times 10^{-5}n^2$	风扇前压强 p/Pa
IV	风扇转速 $n, n=500\sim 5200\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$P=0.00839-1.47269\times 10^{-5}n+9.12237\times 10^{-9}n^2$	风扇轴功率 P/kW
V	风扇转速 $n, n=500\sim 5200\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$\eta=0.0006636n-0.2955128-9.9742\times 10^{-8}n^2$	风扇效率 $\eta/\%$

3.3 计算机仿真实验案例

如图 3 所示发动机风扇性能仿真实验模型,从 5 个方向展示了仿真实验系统结构。计算机仿真实验方案:安装布置 4 根皮托管测速和扇前 1 位微压计测压,电动机、变频器和扭矩仪调 0 后通电启动运行 10min,确定模拟实验装置运行平稳后实施风扇性能测量。

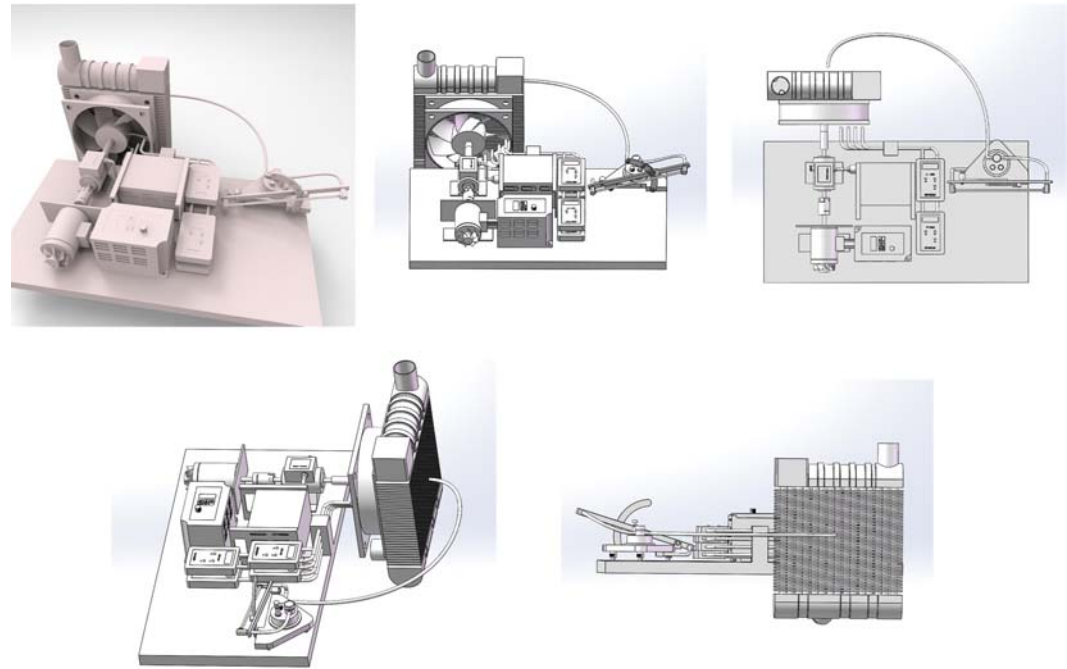


图 3 发动机风扇性能计算机仿真实验模型
Fig. 3 Engine fan performance computer virtual experiment model

表 6 为 465Q 型发动机风扇性能仿真实验转速 $n=3100\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 工况下模拟实验数据。表 7 为仿真实验结果与真机实验数据对比及误差。

3.4 主要效果和不足之处

笔者在流体力学教学中改革课程评价与考核体系,增设论文写作和流体力学产品设计大作业环节,公开答辩,学生推举代表参加评分,取得了非常好的学习效果。部分同学完成实验报告后受计算机仿真实验的启发,独立完成了一些机械相关的机构三维造型和动画设计写入大作业,如图 4~7 所示为学生成果部分案例。

表 6 计算机仿真模拟实验案例数据
Tab. 6 Computer virtual experiment case

界面调节、安装和输入数据				界面显示和输出数据				
风扇转速 n $/(r \cdot \min^{-1})$	微压计测位 L/mm	皮托管 布点数 j	皮托管测位 半径 R/m	轴向风速 $v_{ij}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	风扇流量 q_v $/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	扇前压强 p/Pa	轴功率 P/kW	风扇效率 $\eta/\%$
3100	8	4	$R_1=0.047$	$v_{a_1}=2.769$	0.375	-106.4	0.0504	80.31
			$R_2=0.071$	$v_{a_2}=6.635$				
			$R_3=0.095$	$v_{a_3}=10.501$				
			$R_4=0.119$	$v_{a_4}=14.367$				

表 7 计算机仿真实验结果与真机实验数据对比及误差
Tab. 7 Data contrast and error of computer virtual experiment with real test

项目	风扇转速 n $/(r \cdot \min^{-1})$	测位 1 速度 v_a $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	测位 2 速度 v_a $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	测位 3 速度 v_a $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	测位 4 速度 v_a $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	风扇流量 q_v $/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	扇前压强 p/Pa	轴功率 P/kW	风扇效率 $\eta/\%$
实测数值	3100.4	2.699	6.882	10.221	14.473	0.366	-107.7	0.0499	79.02
仿真数值	3100.0	2.769	6.635	10.501	14.367	0.375	-106.4	0.0504	80.31
相对误差 $\varepsilon=(x_0-x)/x_0$	0.000	-0.026	0.036	-0.027	-0.007	-0.025	0.012	-0.010	-0.016

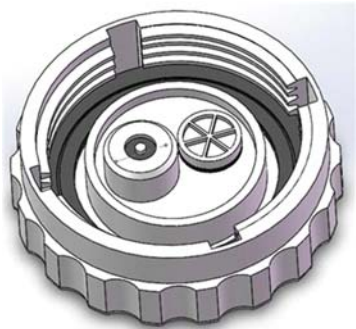


图 4 汽车膨胀水箱盖
Fig. 4 Tank cover for automobile

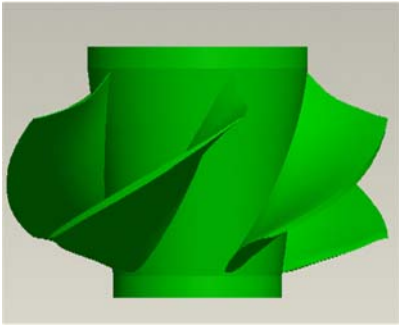


图 5 轴流泵叶轮
Fig. 5 Axial flow pump impeller



图 6 计算机 CPU 风扇
Fig. 6 Computer CPU fan

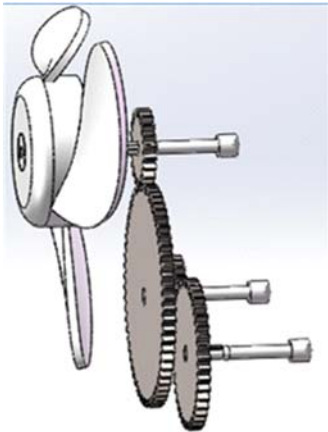


图 7 手摇风扇
Fig. 7 Hand fan

通过实践也发现计算机仿真实验教学的逼真效果有待加强,部分测量的技术细节有待解决和改进,比如本案在设定皮托管的位置和风扇转速后直接给出了风扇速度,中间由压强差的转换过程忽略掉了。

4 结束语

(1) 对比分析可以发现本文计算机仿真实验结果与真机实验数据十分接近,说明两者误差较小,模拟实验逼真度较大。通过发动机轴流风扇性能仿真实验让大量学生参与科研活动,使学生了解发动机风扇大致风速及能耗程度等,有一定的现实意义和优良的教学效果。本文课题组也有开发更多流体力学实验教学仿真项目的意向,希望能够积极推广,努力实现共享。

(2) 实践说明流体力学课程计算机仿真实验教学是一条切实可行,且又适合实情的发展途径,应当积极推广运用及发展,目前还处于发展初期,有条件的学校应当积极申报相关研究及开发项目或课题,组织人力、物力攻关以期取得更大进步。

参考文献:

- [1] 祝会兵,戴文琰,李建. 工程流体力学实验教学的改革与创新[J]. 宁波大学学报(教育科学版), 2008, 30(2): 107—109 (ZHU Huibing, DAI Wenyan, LI Jian. Reform and innovation of experiments teaching in engineering hydrodynamics[J]. Journal of Ningbo University (Education Edition), 2008, 30(2):107—109 (in Chinese))
- [2] 束秀梅,李华南,罗媛媛. 流体力学实验教学改革与实践[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(7):310—312 (SHU Xiumei, LI Huanan, LUO Yuanyuan. Reform and practice on experimental teaching of hydrodynamics[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2011, 30(7):310—312 (in Chinese))
- [3] 曹勇,孟静,陈旭. 流体力学自主实验教学模式探讨[J]. 实验室科学, 2017, 20(2):144—146 (CAO Yong, MENG Jing, CHEN Xu. Discussion on the independent hydrodynamics experimental teaching mode [J]. Laboratory Science, 2017, 20(2):144—146 (in Chinese))
- [4] Frederick Stern, Hyunse Yoon, Donald Yarbrough. Hands-on integrated CFD educational interface for introductory fluids mechanics[J]. International Journal of Aerodynamics, 2012, 2(2):339—370.
- [5] 邓辉,张志宏,顾建农. 面向应用创新型人才培养的流体力学实验教学改革[J]. 实验室科学, 2013, 16(5):72—74 (DENG Hui, ZHANG Zhihong, GU Jiannong. Teaching reforms of fluid mechanics experiment based on applied innovative-oriented talents training[J]. Laboratory Science, 2013, 16(5):72—74 (in Chinese))
- [6] 隋秀香. 石油工程专业流体力学实验课的新模式探讨[J]. 实验室研究与探索, 2012, 34(11):111—113 (SUI Xiuxiang. Discussion on a new model of hydromechanical experiment course in petroleum engineering[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2012, 34(11):111—113 (in Chinese))
- [7] 潘公宇,江浩斌,刘志强,等. 车辆工程专业虚拟仿真实验教学平台的设计[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(4): 1—5 (PAN Gongyu, JIANG Haobin, LIU Zhiqiang, et al. Design of virtual simulation experimental teaching system and platform of vehicle engineering specialty [J]. Experimental Technology and Management, 2017, 34(4):1—5 (in Chinese))
- [8] 雷冬,朱飞鹏,殷德顺,等. 力学虚拟仿真教学实验室建设的探讨[J]. 实验技术与管理, 2014, 31(12):95—100 (LEI Dong, ZHU Feipeng, YIN Deshun, et al. Discussion on construction of mechanics virtual simulation teaching laboratory[J]. Experimental Technology and Management, 2014, 31(12):95—100 (in Chinese))
- [9] 蔺海晓,岳高伟,杨大方. 材料力学虚拟演示实验的应用与教学[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(5):124—126 (LIN Haixiao, YUE Gaowei, YANG Dafang. Application and teaching of virtual demonstration experiment in material mechanics[J]. Experimental Technology and Management, 2012, 29(5):124—126 (in Chinese))
- [10] 黄斌,姚正军,王红杰,等. 材料力学性能检测虚拟实验的设计和开发[J]. 实验力学, 2005, 20(4):573—578 (HUANG Bin, YAO Zhengjun, WANG Hongjie, et al. Design and realization of virtual experiment for material mechanical performance testing[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(4):573—578 (in Chinese))
- [11] 黄俊,杜成斌,杨辉. 材料力学拉伸和扭转模拟实验课件的研发[J]. 实验技术与管理, 2008, 25(1):68—72 (HUANG Jun, DU Chengbin, YANG Hui. Development of simulation experiment courseware for material tension and torsion[J]. Experimental Technology and Management, 2008, 25(1):68—72 (in Chinese))
- [12] 胡超,程建钢. 《理论力学》多媒体仿真教学实验[J]. 力学与实践, 2003, 25(1):67—70 (HU Chao, CHENG

- Jiangang. Experiment of multimedia simulation teaching for theoretical mechanics[J]. Mechanics in Engineering, 2003, 25(1):67—70 (in Chinese))
- [13] HU Xiaoqiang. Fundamentals and applications of virtual reality technology[M]. Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2009:18—66.
- [14] Frederick Stern, Tao Xing, Marian Muste. Integration of simulation technology into undergraduate engineering courses and laboratories [J]. International Journal of Learning Technology, 2006, 2(1):28—48.
- [15] 沙毅. 流体力学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2016:11—360 (SHA Yi. Fluid mechanics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2016:11—360 (in Chinese))
- [16] 南京工学院编. 工程流体力学实验[M]. 北京:电力工业出版社, 1981:1—88 (Nanjing Institute of Science and Technology. Experiment of engineering fluid mechanics[J]. Beijing: Power Industry Press, 1981:1—88 (in Chinese))
- [17] 毛根海. 应用流体力学实验[M]. 北京:高等教育出版社, 2008:84—137 (MAO Genhai. Experiment of applied fluid mechanics[M]. Beijing: Higher Education Publish Company, 2008:84—137 (in Chinese))
- [18] 杨敏官, 王军锋. 流体机械内部流动测量技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2006:138—148 (YANG Minguan, WANG Junfeng. The flow measuring technique of fluid machinery[M]. Beijing: China Machine Press, 2006:138—148 (in Chinese))

Development and design in computer simulation experiment teaching of fluid mechanics

SHA Yi, LI Qi-peng, LI Yong

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: In order to strengthen the experiment teaching of fluid mechanics course, on the basis of analyzing nine main problems of fluid mechanics experiment teaching at present, this paper puts forward the necessity and new idea of developing computer fluid mechanics simulation experiment teaching. In order to facilitate the development and production of multimedia experimental simulation software combined with scientific research, 14 traditional and 4 modern fluid mechanics experiment projects are introduced in this paper, which basically covers the knowledge points of the course of hydrodynamics. Through the study and development of engine axial cooling fan performance computer simulation experiment, the method of using real machine experimental data fitting equation to generate simulation software experiment platform is expounded. Through comparison with experimental data, it is showed that the computer simulation experiment of fan performance is accurate. The practice proves that virtual simulation experiment teaching is a shortcut with practical significance.

Keywords: hydrodynamics experiment; experimental teaching; computer simulating; axial-flow fan; Pitot tube