

## 虚实结合的物理实验教学

乐永康, 龚新高, 苏卫锋, 吕景林, 冀 敏  
(复旦大学 物理学系, 上海 200433)

**摘要:**实验教学如何借助虚拟仿真技术有效地提升教学效果,是实验教学界普遍关注的课题。本文结合自主开发的教学实验项目,介绍我校开展虚实结合的物理实验教学的理念和实践——一种既实又虚的实验教学新模式:在不削弱现有实验训练强度的基础上,通过虚拟仿真实验帮助学生对实验内容,特别是其中的难点,有更深入、更全面的理解,以期学生能掌握实验背后的物理及实验设计思路等。

**关键词:**虚拟仿真技术;虚实结合;教学模式;教学效果

中图分类号:G642.423 文献标识码:B 文章编号:1005-4642(2017)01-0039-05

“教育部办公厅关于开展2015年国家级虚拟仿真实验教学中心建设工作的通知”<sup>[1]</sup>明确要求“虚拟仿真实验教学中心建设应充分体现虚实结合、相互补充、能实不虚的原则,实现真实实验不具备或难以完成的教学功能。在涉及高危或极端的环境,不可及或不可逆的操作,高成本、高消耗、大型或综合训练等情况时,提供可靠、安全和经济的实验项目。”对“虚实结合、相互补充、能实不虚”的建设原则,不少同行理解为虚拟仿真实验主要是替代或补充实际的实验教学,进而开始怀疑:削弱现行的实际实验教学的强度,实验教学的效果还能保证吗?本已有较明显不足的学生实验能力是否会进一步弱化?还能支持他们的长远发展吗?这或许是近几年获批成立的虚拟仿真实验教学中心中,工程类和实训类明显占优势,而基础学科类明显偏少的一个原因<sup>[2-4]</sup>。然而,现有的实验课时数不明显少于国外高校且已经比较系统化的实验训练,学生的实验能力还存在较大的提高空间,现行的实验训练在课程设计、教学实践的某些环节应该存在着亟需改进和优化之处。如此,我们不妨从另一个角度来理解虚拟仿真实验的建设原则:能否在现行的实验教学体系的基础上,充分挖掘虚拟仿真技术的优势,尝试去解决实际实验教学中存在的深度、广度上,以及对学生能力发展的促进作用等方面的不足?很显然,这需要“虚实

结合”的实验教学,既实又虚——基于现有的实验项目,开发的虚拟仿真实验内容,不仅仅是帮助学生预习,更重要的是帮助学生提高对实验的理解和掌握,进而改善实验训练的效果,提升学生的实验综合能力。

本文将结合具体的实验案例,介绍复旦大学物理虚拟仿真实验教学中的建设理念和教学实践:既实又虚的实验教学模式。

### 1 复旦大学物理虚拟仿真实验教学的建设历程和现有课程体系

上世纪90年代,复旦大学物理学系在全国较早开展计算机辅助教学(CAI)研究<sup>[5-6]</sup>,钟万衡老师带领研究团队编制固体物理、统计物理、近代物理等课程内容的虚拟仿真软件,将气体扩散、晶格振动模式、斯特恩-盖拉赫实验等学生较难理解的内容通过科学的计算,以动画、可任意转动的立体模型等形式展现出来,促进了学生对这些内容的掌握。钟万衡老师的团队制作的教学软件在全国评比中多次获奖。在此之后,专门开设的“物理CAI课件设计”一直是我校的特色课程,该课程要求学生通过实践来学习、掌握Photoshop, Flash, DreamWeaver, 3DMAX等虚拟仿真课件制作工具和C++, Visual Basic, Delphi, Java等常用编程语言,不仅能够经常开发制作一些虚拟仿真实

收稿日期:2016-09-08

作者简介:乐永康(1973—),男,浙江舟山人,复旦大学物理学系教授,博士,研究方向为物理实验教学和科学仪器研制。



验项目和课堂教学演示软件,还能锻炼学生的计算机使用能力,特别是在制作软件的过程中,所讨论问题的物理图像会更加清晰。在 2000 年前后,沈元华老师带领团队开发用于帮助学生做好实验预习的虚拟仿真实验,包括“迈克耳孙干涉仪预习 CAI”和“真空系统实验 CAI”。“迈克耳孙干涉仪预习 CAI”通过录像、动画等多媒体手段,对实验的原理、仪器的构造和调节方法等作了较为详细的介绍,帮助学生更高效地做好实验预习,提高学生实验室做实验的效率和对实验内容的掌握。“真空系统实验 CAI”建立虚拟实验环境中的高真空实验系统,为各真空部件和操作单元设计独立的状态表及相互联系,允许学生对各操作单元进

行独立操作,并模拟、记录、展示“当前操作”长时间运行的结果,该软件可以让学生了解正常的操作流程,明白各种错误操作会导致的仪器损坏,并掌握如何通过监测仪表等及时发现自己的错误操作,以便及时纠正。“真空系统实验 CAI”教学软件的使用不但提高了高真空实验的训练效果,还可以避免因为学生操作不当而不及时纠正导致真空系统的损坏。

经过二十余年的开发积累和教学实践,我们已建成了特色鲜明的虚拟仿真实验教学体系,包括“虚拟仿真实验开发课”、“虚实结合的实验教学”、“医学物理虚拟仿真实验”和“互联网远程控制实验”4 个模块,课程体系框架如图 1 所示。

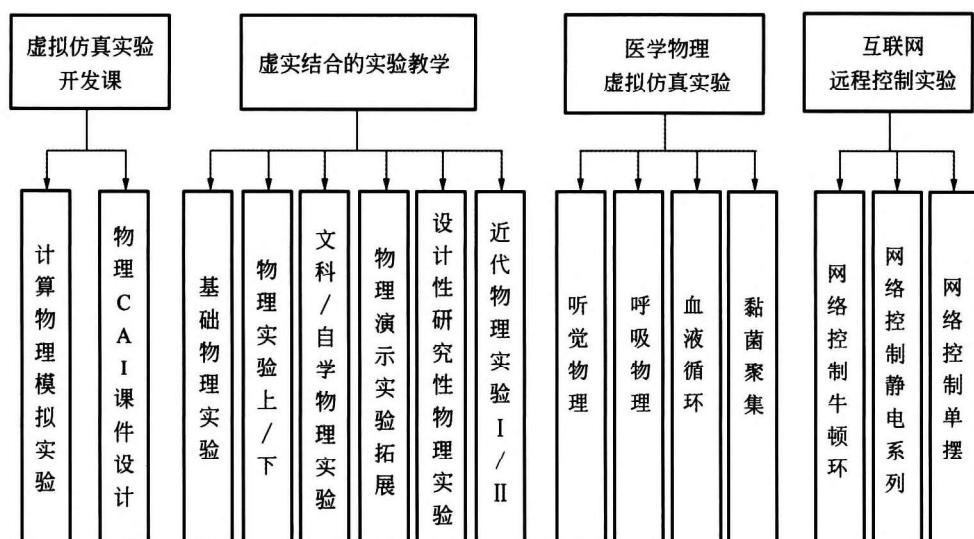


图 1 物理虚拟仿真实验教学的课程体系<sup>[7]</sup>

### 1.1 专门开设“虚拟仿真实验开发课”

虚拟仿真实验课包括“物理 CAI 课件设计”和“计算物理模拟实验”,训练学生自主开发虚拟仿真实验的能力。该课程要求学生基于分子动力学模拟和第一性原理计算,运用计算图像显示技术,针对 1 个或多个物理知识难点,结合当前凝聚态物理研究前沿,设计虚拟仿真实验,帮助学生了解并领会计算物理基本内涵与技巧,初步掌握计算物理处理实际问题的思路与策略,为训练与提高科研能力打下基础。基于这些课程,在独立开发虚拟仿真实验的过程中,学生能较好地掌握如何构建物理模型,对描述物理体系的关键参量的理解更加深入,物理体系随参量化过程的物理图像也更清晰。这些课程受到学生的普遍欢迎。

### 1.2 在实验课程的日常教学中,引入多款通用的设计、仿真软件,深入开展虚实结合的实验教学新模式

虚实结合的实验教学除了可以补充实验课程内容上的不足(很难可持续地开展易耗、高成本、高危性质的教学实验),或者帮助学生做好实验前的预习准备,提高实验课的效率,更可以借助自主开发的实际实验和虚拟仿真相结合的实验项目,发挥实验操作训练和虚拟仿真各自的优势,深入挖掘实验现象背后的物理实质,直观地展示知识难点,详尽地剖析实验技术的精髓,加深学生对实验的理解,让学生在充分理解的基础上做好实验,还能“无成本”地拓宽和加深实验教学的内容,提高实验综合能力培养的水平。在实验教学中引入

的虚拟仿真软件包括:电路仿真软件 MultiSim 和 OrCAD;光学系统设计仿真软件 TracePro 和 Zemax;机械 3D 设计软件 SolidWorks、ProE;电子光学仿真软件 SimIon;多物理场模拟软件 Comsol;荷能离子轰击固体表面的模拟软件 SRIM 和 Trim-DYN;高能粒子和物质相互作用模拟软件 Geant 4.

### 1.3 自主建设的医学物理模拟实验

为了揭示人体的物理奥秘,利用物理知识开展精确医学诊疗,为医学生开设“医学物理与实验”新课程,自主研制了听觉物理、呼吸物理以及血液循环等虚拟仿真系统。研制的苹果手机应用软件“Love-Ears”,可以随时随地进行与听觉物理相关的虚拟实验;肺呼吸物理仿真模型可以模拟肺的粘弹性及病理特征,进行肺顺应性曲线的模拟测量<sup>[8]</sup>;正在建设的血液循环虚拟仿真系统,可以模拟各种心血管疾病形成的物理因素。

### 1.4 自主建设的互联网远程控制实验

“网络控制牛顿环实验”和“网络控制静电实验”允许学生在任何时间通过网络操作实验设备,得到实验结果;在建的“网络控制单摆实验”则允许实时测量重力加速度随海拔和纬度的变化。

## 2 虚实结合的实验教学案例

### 2.1 积木式光栅光谱仪的设计与搭建实验

光栅光谱仪是使用非常广泛的科学仪器<sup>[9-11]</sup>,我们的实验教学体系中也有多个与光栅光谱仪相关的教学实验项目,包括“光栅光谱仪的应用”和“氢光谱与类氢光谱实验”,但学生对光栅光谱仪的结构如何、分辨率与信噪比跟哪些因素有关等内容掌握得不深入、不全面,而在二维平面上光学元件调节技能方面的欠缺更是明显;为此,我们专门开发了虚实结合的“积木式光栅光谱仪”的设计与搭建实验”。

实验要求学生借助 TracePro、Zemax 等光学设计软件,选择光学元器件,设计、搭建、调试满足自己需求的光栅光谱仪(如:波长分辨率优于 1 nm 等)。学生在确定光谱仪性能指标后,在 TracePro、Zemax 等光学工程设计软中建立光栅光谱仪的模型,然后调节模型中各元件的参量设置,设定输入条件,得到模拟的光路图,然后根据自己的需要,对模型中各元件的参量(包括会聚透镜的面积、光栅的光栅常量以及它们的空间参量)

设置进行调整,得到趋近于自己的设计目标的光谱结果。图 2 是学生在 Zemax 软件上设计光栅光谱仪时的屏幕截图。

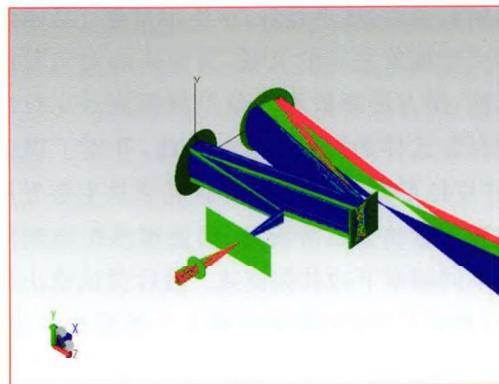


图 2 在 Zemax 软件中建立的光栅光谱仪原理图

基于自己设计的模型,学生可以在实验室选择相应的光学元件,在光学平台上搭建光谱仪,比较自己的光谱仪的输出结果和软件模拟的结果;再利用设计软件对光谱仪的参量设置进行尝试性调节,以寻找实际光谱仪输出结果与模拟结果之间产生差异的原因,进而高效地完成光谱仪的调节和性能优化,完成满足自己设定指标的光栅光谱仪。图 3 是学生搭建的光栅光谱仪的实物图。

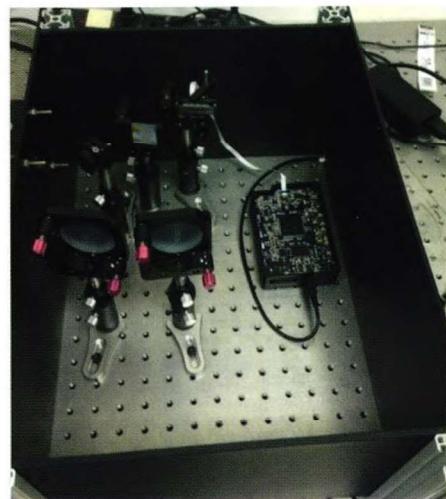


图 3 学生用实验室提供的光学元件搭建的光栅光谱仪

本实验不仅能加深学生对光栅光谱仪工作原理、结构设计的理解,还能提高学生的光学元件多自由度调节方面的技能,并拓宽光栅光谱仪的应用能力。

### 2.2 克拉尼图形实验

共振是日常生活和科学的研究中经常遇到的现

象,其数学描述比较复杂,特别是实际体系较为复杂的边界条件往往使波动方程的数学求解变得很困难,甚至无法得出解析解,而解析解往往也是用特殊函数表达,很不直观,学生很难建立数学解与实际实验现象之间的关联,进而影响对实验内容的掌握,用方形薄板和三角形薄板演示克拉尼图形就存在这样的问题<sup>[12-13]</sup>. 为此,开发了虚实结合的“克拉尼图形”实验. 实验要求学生首先用压电陶瓷片驱动金属薄圆盘,借助细沙粒得到薄圆盘在不同频率下的共振模式. 然后尝试给出其数学解,并在 Comsol 软件中建立二维圆盘的模型,得到其共振模式,比较并分析实验测量结果与模拟结果、解析解之间的异同,进而利用模拟软件研究圆盘参量(如材料、大小、厚度等)变化时,圆盘共振频率和共振模式如何变化.

图 4(a)显示了直径 600 mm、厚度为 3 mm 的薄铝盘在某一频率信号驱动下显示的克拉尼图形. 当圆盘处于某种共振模式时,洒在圆盘上的细沙最后聚集到圆盘振幅最小的区域,构成规则的克拉尼图形. 在出现这些图形之前,或者驱动频率改变使圆盘的共振从一种模式转向另一种模式时,学生能看到“沙子如何整齐划一地在圆盘上跳舞”构成规则图形. 图 4(b)通过 Comsol 模拟得到的圆盘上振幅小于最大振幅的 10% 区域(深色区).

图 5(a)是上述实验条件下薄圆盘驻波解给出的振幅为零的节点分布,图 5(b)则是实际振动的图像. 需要注意:振动幅度与圆盘直径的显示比例不同. 图 5 中 2 幅图中的最外圈黑线都表示圆盘的边界.

这一实验不仅可以让学生更清晰地“看到”克拉尼图形背后的数学,还能向学生直观地演示波动方程解析解中的特殊函数.

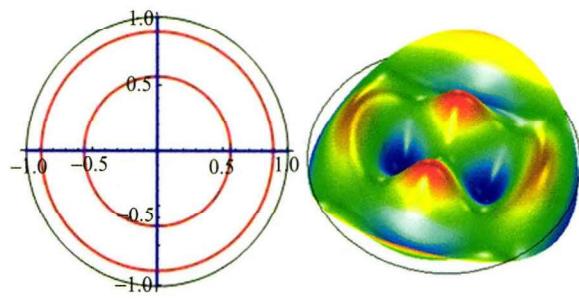


(a) 实验图形



(b) Comsol 模拟

图 4 薄圆盘的克拉尼图形



(a) 节点分布 (b) 实际振动模式

图 5 与图 4 对应的二维薄圆盘驻波解析给出的振幅为零的节点分布和实际振动模式

### 3 总结和展望

虚实结合的实验教学可以让学生更好地理解实验现象背后的物理实质,从而明明白白地做实验,而不是机械地参考实验讲义完成实验. 虚拟仿真技术在实验教学中的合理使用,可以帮助学生自主建立物理模型,把握研究对象、实验系统的关键特性,理解实验方法的设计思路,学习合理地评估实验结果,有望明显改善实验教学的效果. 2015 年,我们申报国家级虚拟仿真实验教学中心获得批准. 在今后的建设过程中,我们将建设更多的虚实结合的实验教学案例,更全面地实践“虚实结合”的实验教学模式,为切实提高学生的实验能力继续探索.

### 参考文献:

- [1] 教育部办公厅关于开展 2015 年国家级虚拟仿真实验教学中心建设工作的通知 [EB/OL]. [http://www.moe.edu.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201506/t20150618\\_190671.html](http://www.moe.edu.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201506/t20150618_190671.html).
- [2] 教育部公示首批 100 所国家级虚拟仿真实验教学中心入选名单 [EB/OL]. <http://www.gdi.com.cn/?p=3091#>.
- [3] 教育部办公厅关于批准清华大学数字化制造系统虚拟仿真实验教学中心等 100 个国家级虚拟仿真实验教学中心的通知 [EB/OL]. [http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201501/t20150109\\_189310.html](http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201501/t20150109_189310.html).
- [4] 教育部办公厅关于批准北京大学考古虚拟仿真实验教学中心等 100 个国家级虚拟仿真实验教学中心的通知 [EB/OL]. [http://www.moe.edu.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201602/t20160219\\_229805.html](http://www.moe.edu.cn/srcsite/A08/s7945/s7946/201602/t20160219_229805.html).
- [5] 钟万衡,申文俊. 固体物理学 CAI 课件简介 [J]. 大

- 学物理,1999,18(3):36-37.
- [6] 钟万衡,李洪方,张军鹰,等. 热学计算机辅助教学软件简介[J]. 物理与工程,2004,14(1):53-54.
- [7] 国家级物理虚拟仿真实验教学中心网站:<http://phylab.fudan.edu.cn/doku.php?id=vr:start>.
- [8] 冀敏,苏卫锋,李爱萍,等. 肺呼吸物理模型测量肺顺应性的教学实验[J]. 物理实验,2014,34(1):22-26.
- [9] 刘亚青,范品忠,徐至展. 平焦场光栅光谱仪的新用法[J]. 光学学报,2000,20(7):879-882.
- [10] 亓洪兴,陈木旺,吕刚. 基于光栅光谱仪的激光诱导等离子体光谱探测技术研究[J]. 激光杂志,2006,27(4):29-30.
- [11] 陈思,柯福顺,乐永康. 光栅光谱仪的标定[J]. 物理实验,2012,32(3):44-46.
- [12] 呼格吉乐,邱为钢. 振动模式的可视化[J]. 大学物理,2010,29(6):40-42.
- [13] 方奕忠,王钢,沈韩,等. 方形薄板二维驻波的研究[J]. 物理实验,2014,34(1):33-36.

## Physics experiment teaching integrated with virtual-reality technology

LE Yong-kang, GONG Xin-gao, SU Wei-feng, LU Jing-lin, JI Min

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** With the help of virtual-reality technology, how can the outcome of lab training be significantly improved? This has been a recent hot topic in the community. Based on several independently developed projects, we reported on the philosophy and practice of the virtual-reality integrated physics teaching labs in our university. Benefiting from the powerful features of virtual-reality, we could reveal the underlying physics related to the labs to our students, especially those proved previously to be difficult for students. This new model of lab training may lead to improved and more satisfactory teaching outcomes.

**Key words:** virtual-reality technology; virtual-reality integrated teaching; teaching model; teaching outcome

[责任编辑:任德香]

### 欢迎订阅 欢迎投稿

《物理实验》创刊于1980年,是教育部主管、东北师范大学主办的学术期刊,是教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会的会刊。

《物理实验》主要刊载物理实验成果,交流物理实验教学改革的新思想、新方法、新动态。开设的栏目有:前沿动态,近代与综合实验,普通物理实验,专题(包括竞赛、物理学史、专题实验讲座、国外实验介绍、实验误差、学科教学论、典型实验剖析、实验技术与技巧、问题与讨论等),实验讲坛,典型教学案例,互联网+物理,学生园地,基础教育,优秀自制仪器。适合于物理实验工作者,大、中学校的物理教师,理工科的本科生、研究生及教学仪器研制人员阅读。

《物理实验》愿为广大作者提供交流信息的窗口,展示成果的园地,为广大读者提供丰富的精神食粮,为广大仪器生产厂家提供展示成果的舞台。

《物理实验》杂志为月刊,全国各地邮局均可订阅,邮发代号为12-44。若错过邮局订阅时间,可直接与编辑部联系。

《物理实验》编辑部