附件 2

国家级虚拟仿真实验教学中心
申请书

复旦大学物理虚拟仿真实验教学中心

教育主管部门：教育部

学校名称：复旦大学

学校管理部门电话：021-65643480

开放共享访问网址：http://phylab.fudan.edu.cn/doku.php?id=vr:start

申报日期：2015 年 7 月 30 日

中华人民共和国教育部高教司制

填写说明

1. 申请书中各项内容用“小四”号仿宋体填写。

2. 表格空间不足的，可以扩展。

1. 基本情况

虚拟仿真实验教学中心名称	复旦大学物理虚拟仿真实验教学中心		
实验教学示范中心名称／级别（省级或国家级）	复旦大学物理教学实验中心／国家级	批准时间	2007 年

1.1 虚拟仿真实验教学中心的发展历程、建设概况

上世纪九十年代，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，钟万蘅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，大大促进了学生对这些内容的掌握。钟万蘅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，“物理 CAI 课件设计 I”（课号 PHYS130023.01）一直是我中心的特色课程，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，不仅经常能够经常开发制作一些虚拟仿真实验项目和课堂教学演示软件，还能锻炼学生计算机使用能力，特别是在制作软件的过程中，加深对哪些是描述物理体系的关键参数的理解，清晰物理体系随参数演化的物理图像，受到学生欢迎。

物理实验中心教师在日常教学中发现：因为缺乏必要的基础知识和相应的训练基础，学生在预习不充分时就开始做实验，不仅实验进度慢，而且不容易掌握实验内容，达到预期的训练效果，甚至出现因操作失误等导致仪器损坏。为此，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”。其中“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，这个软件不仅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是什么，并掌握如何通过监测仪表等及时发现自己的错误操作的方法，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训练的训练效果，还可以避免因为学生操作不当而不及时纠正，导

致真空系统的损坏的问题（高真空系统损坏后，不仅维修费时、费钱，还影响后续同学实验训练的开展）。

物理实验教学中心在 2007 年获批成为国家级实验教学示范中心以后（于 2012 年通过验收），教学团队一直致力于通过新实验建设拓宽实验教学的内容，通过开设新的实验课程来弥补原来课程体系的薄弱环节，通过教学方法、教学手段的改进来提升实验教学质量，保证实验课程建设的可持续发展。2008-2010 年，“大学物理实验”、“文科物理（理论与实验）”、“近代物理实验”三门课程先后获批成为国家级精品课程；新建设的“医学物理与实验”、“物理演示实验拓展”两门课程于 2012 年和 2014 年先后获批成为上海市精品课程。

在实验教学示范中心建设过程中，实验教学团队深刻体会到：影响实验教学效果首要因素是——学生实验前能否建立“物理模型”，能否把握研究对象、实验系统的关键特性是什么，能否理解实验方法的设计思路，从而明明白白地做实验。为此，实验中心开始进行在实验课上开展“物理建模”训练，引导学生在开始实验前，先对自己要研究的物理体系、使用的实验设备建立“模型”，并讨论自己所建模型的成立条件和适用范围，然后针对自己的实验内容，讨论自己的“模型”的输出结果会随着输入条件如何发生变化，进而去设计自己的实验方法，并预期在设定的实验条件下，实验现象和结果会是什么。在此过程中，实验教学中心的教师团队在各门课程的教学中制作了大量的教学视频，通过实验原理的介绍，实验关键步骤的阐述，引导学生在预习实验的过程中自主建立“物理模型”；教学视频还向学生强调实验操作的要点、引导学生注意观察实验现象并加强思考，努力实现“让学生明明白白地做实验”，来提高实验训练的效果；2013 年，“大学物理实验”、“文科物理（理论与实验）”、“近代物理实验”三门国家级精品课程升级成为国家级精品资源共享课。

为了进一步提升实验课程的教学效果，实验中心教师在指导学生进行课题探索时，要求学生使用数值计算软件和虚拟仿真软件得出预期结果，并和自己的实验结果作比较，如此进行教学的实验项目包括光栅光谱仪的设计与搭建、克拉尼图形实验和四极杆质谱实验等。为了帮助学生做好实验预习，实验中心还引进中科大霍剑青老师团队开发的大学物理虚拟仿真教学软件系统，该系统有虚拟仿真实验项目 40 个，用于支持“基础物理实验”、“物理实验上、下”等课程的修课学生在实验前预习工作；为了帮助选课学生加深对核磁共振原理和成像技术基础的理解，实验中心购入上海纽迈电子科技公司开发的虚拟核磁共振技术教学及实训系统。

为了能够让虚拟仿真技术在实验教学中发挥更大的作用，实验教学中心成立“复旦大学物理虚拟仿真实验教学中心”。复旦大学物理虚拟仿真实验教学中心已开展下列虚拟仿真实验教

学活动：

1. 自主开发教学效果良好的虚拟仿真实验：包括真空系统 CAI，听阈测量实验，固体物理 CAI，统计物理 CAI 和近代物理 CAI 等；
2. 实践了基于通用软件开展虚拟仿真实验教学，并和实际实验结果进行比较，发现这种“虚实结合”的模式有利于增进学生队物理的理解和掌握，有利于提高实验技能训练效果；
3. 引入了外单位设计开发的虚拟仿真教学软件系统，帮助学生预习和理解实验内容，并拓宽实验中心未开设的实验的接触面；

在今后的工作中，虚拟仿真实验教学中心将通过全中心师资力量的合理配置和互相协作，来高效率地解决如下课题：

1. 在不同年级、不同专业学生的实验课上，探索可以借助虚拟仿真技术来解决的关键问题和该技术在特定实验课上的合理使用模式；
2. 在物理系各个年级学生的物理实验课上，研究虚拟仿真技术在帮助学生快速高效地建立物理模型的过程中能够发挥的作用；
3. 继续开发建设虚拟仿真实验项目；
4. 努力收集开放的虚拟仿真实验教学的网络资源（特别是国外的优秀资源），建立可供国内同行共享的资源库；
5. 努力开展国际交流与合作，引入国外师资提高虚拟仿真实验建设的水平，提升虚拟仿真实验教学的效果。

在虚拟仿真实验教学的过程中，教学团队还将引入国外较成熟的测评工具，比较系统地开展虚拟仿真实验教学效果的研究，以指导实验中心今后的持续发展。

1.2 虚拟仿真实验教学中心建设必要性

国内学界普遍接受如下观点：国内高校毕业的本科生的理论基础比较扎实，但实验能力、创新意识与世界一流大学的优秀学生之间有较大差距。探索提升实验教学效果的有效方式、引导培养学生的创新意识的可行方案，是实验教师队伍近几年不懈努力的目标。

随着电子技术的不断发展，实验设备的“自动化”发展趋势，使得实验设备越来越趋向于“黑匣子”，这个大背景下，如何让学生掌握实验设备的工作原理，进而明白实验中得到的结

果，是我们迫在眉睫的需要解决的大课题。国外的物理实验教学中，有通过“模型化”教学提升学生的“物理素养”的成功经验，值得我们借鉴。

虚拟仿真实验教学是培养学生自主构建研究体系的物理模型、实验仪器的物理模型的最佳机会，有利于夯实学生的物理基础，促进创新能力的发展。物理实验研究的一个内容是通过观察体系在 “输入”条件有计划地改变时的不同行为来确定系统的特性。在此过程中，对研究的物理体系构建有效的模型，明确关键参数，并设计研究方案，是所有工作的基础。我们的学生在学习中善于解答书上的题目，而不懂如何去提出问题；在实验过程中，习惯于按操作指南去完成实验，而不去体会实验系统、实验步骤为何如此设计，实验现象出现的物理基础是什么，实验结果是否合理，还有哪些可以探索的问题等等。学生长期如此学习和做实验的结果是：自主探索意识的进一步减弱，创新意识和创新动力的缺失，以及创新能力的不足。但如何构建模型？如何在明白了体系已知特性的物理基础之后，再去深入地探究更多的未知特性？这些实际上都是创新工作的基础。为了让学生在理解的基础上，明明白白地做实验，通过实验训练不仅能按要求完成已给定的实验内容，还能提出自己的问题，开展自主探索，我们很有必要开展“模型化教学”，不仅让学生明白在实际工作中构建模型的重要性，也明了模型构建过程中的假设、近似和模型的适用范围，进而培养学生自主构建模型的能力。通过物理建模训练，有望切实提升学生的实验能力。而虚拟仿真实验教学则是训练学生自主构建物理模型的能力最有效的途径：在此过程中，学生可以“无成本”地改变各种实验条件，检验自己构建的模型的合理性及有效性，并预期实际实验研究过程中可能出现的问题，进而优化实际实验的设计及效率。在加深理解的基础上，学生可以通过虚拟仿真实验的摸索，有勇气在实际实验中进行更多书本之外的探索，从而激发创新意识，培养创新能力。

虚拟仿真实验教学是提高学生对实验课程兴趣和动力的有效途径。近年来的教学研究发现：大部分高中为了提高学生的高考成绩，普遍侧重通过“题海战术”提高学生的解题能力而不重视实验训练；大学生普遍重视绩点，经常来询问“为什么要我必修物理实验课”，对“产出投入比很低”的实验课没有兴趣，经常是抱着“应付了事”的态度；虚拟仿真实验教学通过多媒体技术可以非常高效地向学生展示物理的精彩和实验方法的奇妙之处，使用网络技术又便于学生根据自己的喜好选择自己感兴趣的内容，设定适合自己学习进度，从而帮助学生更好地做好实验预习，理解自己将要进行的实验内容和实验方法，进而提高他们对实验课程的兴趣和愿意积极投入的动力，从而提高实验训练的效果。

虚拟仿真实验教学是加深学生对实验理解的高效方式。近代物理实验的内容是探究微观

粒子（含离子、分子、原子、电子、光子等）在外场条件改变时的行为，不仅信号微弱，而且信号随条件变化的规律比较复杂，不少同学因缺乏物理过程比较直观的演示，很难理解自己观察到的现象和得到的结果，但这类实验中设计的物理思想和实验技术非常精妙。譬如，光泵磁共振实验，实验中采用的光泵技术，曾被授予诺贝尔物理学奖，大大促进了现代分子原子光谱技术的发展，是原子钟的技术基础。但在此实验中，光抽运信号会随扫场条件丰富而快速地变化，很多学生在学生做完讲义要求的步骤之后，仍不明白其中的原理。我们的教学团队于一年多前拍摄了该实验的教学视频，其中包含原理详解、技术关键和原子能级随参数变化的动画演示等内容；我们在随后的教学实践中，通过问卷调查了解这些教学视频是否有助于对学生掌握实验内容和实验技术？看过视频的同学中有95%的回答是“非常有帮助”或“有帮助”。这坚定了我们通过多媒体技术帮助学生更方便理解实验原理的信息，也激励我们投入更大的热情建设虚拟仿真教学实验。

虚拟仿真实验教学是拓宽实验教学的必经之路。前沿物理实验研究中，许多实验是在极端条件（如强磁、低温、高压、高真空等）条件下进行的，要在教学实验室中实现这些条件，高成本会限制实验教学的可持续发展，但若实验教学若不涉及这部分内容，会有远离前沿研究，无法体现实验内容也与时俱进的趋势；还有一些实验的开展则需要在特定的危险条件下进行，如核物理实验、放射防护实验，学生若长时间在这类环境下做实验可能会影响身体健康，但若不开展这类教学实验，则课程体系有不完整的遗憾。为了弥补以上缺陷，虚拟仿真实验教学是必由之路。精心设计的虚拟仿真实验完全可以让学生有身临其境的感觉，珍惜实验训练机会，培养基本的安全意识和良好的实验习惯，还可以极大地拓展教学实验的内容覆盖面，充实实验教学的内容，让学生的实验能力更加全面。

基于以上原因，复旦大学物理教学实验中心在近几年的实验建设中，努力整合资源，投入较为充足的人力物力，通过内部培训，赴国内外高水平学校进修、学习，协力提高教师队伍应用计算机开展虚拟仿真教学的能力，统一思想着力加强虚拟仿真实验教学在日常教学中的比例，并已取得可喜成绩：包括制作了了大量的实验教学的辅导视频，供学生在实验学习的不同阶段使用；自主开发了多个虚拟仿真实验教学项目，既锻炼了参与项目建设学生的能力，也拓宽了今后开展虚拟仿真实验教学的内容。但在此过程中，我也深切感受到了其他高校的实验教学中心也同样面临的难题：随着高校管理体制改革的深入，学校核批的实验中心专职教师和技术员队伍人数在减少。在这样的大背景下，我们既要做好常规的实验教学，又要在教学中引入新技术、拓展新内容，利用虚拟仿真技术提高教学质量和人才培养水平。

虚拟仿真实验教学中心建设的必要性主要体现在以下几个方面：

1. 建设虚拟仿真实验教学中心，可以合理制定和协调实验中心各门课程之间开展虚拟仿真实验教学的总体规划，使各门课程突出其教学内容和教学对象相一致的建设特色，从而加快实验训练体系推进虚拟仿真实验教学进度和效率；
2. 虚拟仿真实验教学中心，可以更合理地规划实验中心的师资布局和经费投入，使实验中心建设的人力和物力投入的效益最大化；
3. 建设虚拟仿真实验教学中心，可以从教师队伍整体的角度来评估我们知识、能力的薄弱之处，从而有目的地引入科研教师，以专职、兼职的方式参与虚拟仿真实验建设和日常教学，实现教研相长；
4. 建设虚拟仿真实验教学中心，有利于我们更有效地开展国际交流与合作；实际上，国际交流与合作不可能一蹴而就，很快就能有非常好的合作成果；我们需要以虚拟仿真实验教学中心为单位与国外类似的机构建立合作关系，沉下心来深耕细作，既注重实验教学内容的建设和教学效果的研究，更注重教师队伍建设，以期实现可持续的长远发展；
5. 建设虚拟仿真实验教学中心，还有利于更全面、深入地开展实验教学效果的研究，将中心的实验训练体系作为一个整体来评估，从而确定亟需革新的教学内容和需要改进的教学放学方法等等。

1.3 虚拟仿真实验教学中心特色与创新

本中心在建设的过程中，除了通常将虚拟仿真实验作为学生预习的辅助手段，或者用虚拟仿真实验来弥补实际中因高危、易耗、高成本等原因而无法开展实验外，还有如下特色：

1. 充分利用本中心教师与国外物理实验教师团队之间的广泛联系，建立国外现有的教学资源库，以多种形式开展国际交流与合作，加强虚拟仿真实验的建设和教学效果研究；
2. 充分利用科研上常用的虚拟仿真工具，包括多物理场模拟软件 COMSOL 和光学工程设计软件 TracePro、电子光学模拟软件 SimIon 等工程开发常用的设计模拟软件，开发相关的“虚实结合”型实验教学项目，将物理理论和实验教学中抽象的、不容易描述的内容用多媒体技术来呈现，方便学生对相关内容的理解和掌握，也培养学生自主建立物理模型的能力，并可以通过实验来检验自己建立的物理模型的有效性和合理性；这种教学模式能为学生搭建

通向科研实践的阶梯；

3. 在实验教学中，让学生自己通过数值计算、虚拟仿真、实验研究多种方式的探索，并比较这些方法的优缺点和得到结果的异同，从而加深对物理内容的理解和掌握，并洞察不同研究方法的精髓所在。

本中心在建设虚拟仿真实验教学中创新之处包括：

1. 强调“物理模型”在物理学习过程中的重要作用，通过虚拟仿真实验教学来强化物理建模相关的教学实践；并着力从低年级开始加强学生建模能力的培养，探索不同年级学生建模能力培养的侧重点和培养的有效模式，以便使学生在能“物理建模”这一工具情况下进行高年级物理实验训练，从而实现高质量的实验教学；
2. 在虚拟仿真实验教学中心开设“计算凝聚体物理”和“计算机辅助教学课件设计”课程，让学生具备自主建设虚拟仿真教学实验项目的能力；
3. 建设“肺呼吸模型”、“心血管循环系统模型”等交叉学科教学、训练所需的物理模型，支持这些学科的学生对自己所研究课题的“物理本质”的理解和掌握，从而提高所学知识、技能的应用能力。

2. 虚拟仿真实验教学资源

2.1 实验教学情况	实验课程数	面向专业数	实验学生人数/年	实验人时数/年
	11	27	近 3000	17 万

2.2 虚拟仿真实验教学资源（罗列实验项目、功能及效果，提供不少于三个典型实验项目的具体实验流程）

复旦大学物理虚拟仿真实验教学中心开设的虚拟仿真实验项目包括以下五个模块：

- 基于通用软件的虚拟仿真设计、模拟与实际实验研究相结合的教学实验项目，包括：积木式光栅光谱仪的设计与搭建；薄圆盘的克拉尼图形研究；四极杆质谱等实验；
- 自主设计的虚拟仿真教学实验项目，包括“真空系统实验 CAI”、“迈克尔孙干涉仪预习 CAI”、“固体物理 CAI”、“近代物理 CAI”和“统计物理 CAI”；以及训练学生自主开

发虚拟仿真实验的“物理 CAI 课件设计”和“计算凝聚体物理”课程；

- 引入的中科大霍剑青教学团队开发的“大学物理虚拟仿真实验”系统（此系统包含四十个实验项目）和上海纽迈电子科技有限公司开发的“虚拟核磁共振技术教学及实训系统”用于支持学生的实验预习；
- 自主开发的针对交叉学科-医学物理实验训练的“听阈曲线测量虚拟仿真实验”、“肺模型实验”等实验；
- 用于帮助学生做好实验预习的实验教学视频和演示实验视频（186 段）；

下面举例说明这些实验的内容、步骤和教学效果：

- **基于通用软件的虚拟仿真设计、模拟与实际实验研究相结合的教学实验项目**

➢ **积木式光栅光谱仪的设计与搭建**

实验内容：借助光学设计软件，搭建、调试满足自己需求的光栅光谱仪。

实验步骤：

（1）、首先确定自己的拟搭建的光栅光谱仪的性能指标：包括分辨率和背景噪声的水平等；

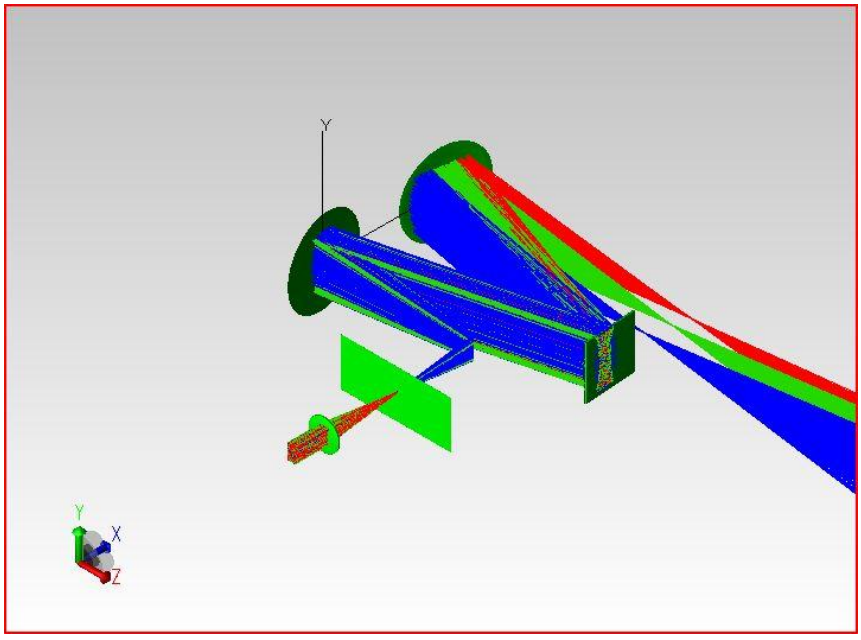

图 1、在设计软件中建立的光栅光谱仪原理图

（2）、然后，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数设置，设定输入条件，得到模拟的光谱图，然后根据自己的需要，对模型中个元件的参数（包括会聚透镜的面积、光栅的光栅常数，以及它们的空间参数等）设置进行调

整以得到趋近于自己的设计目标的光谱结果；

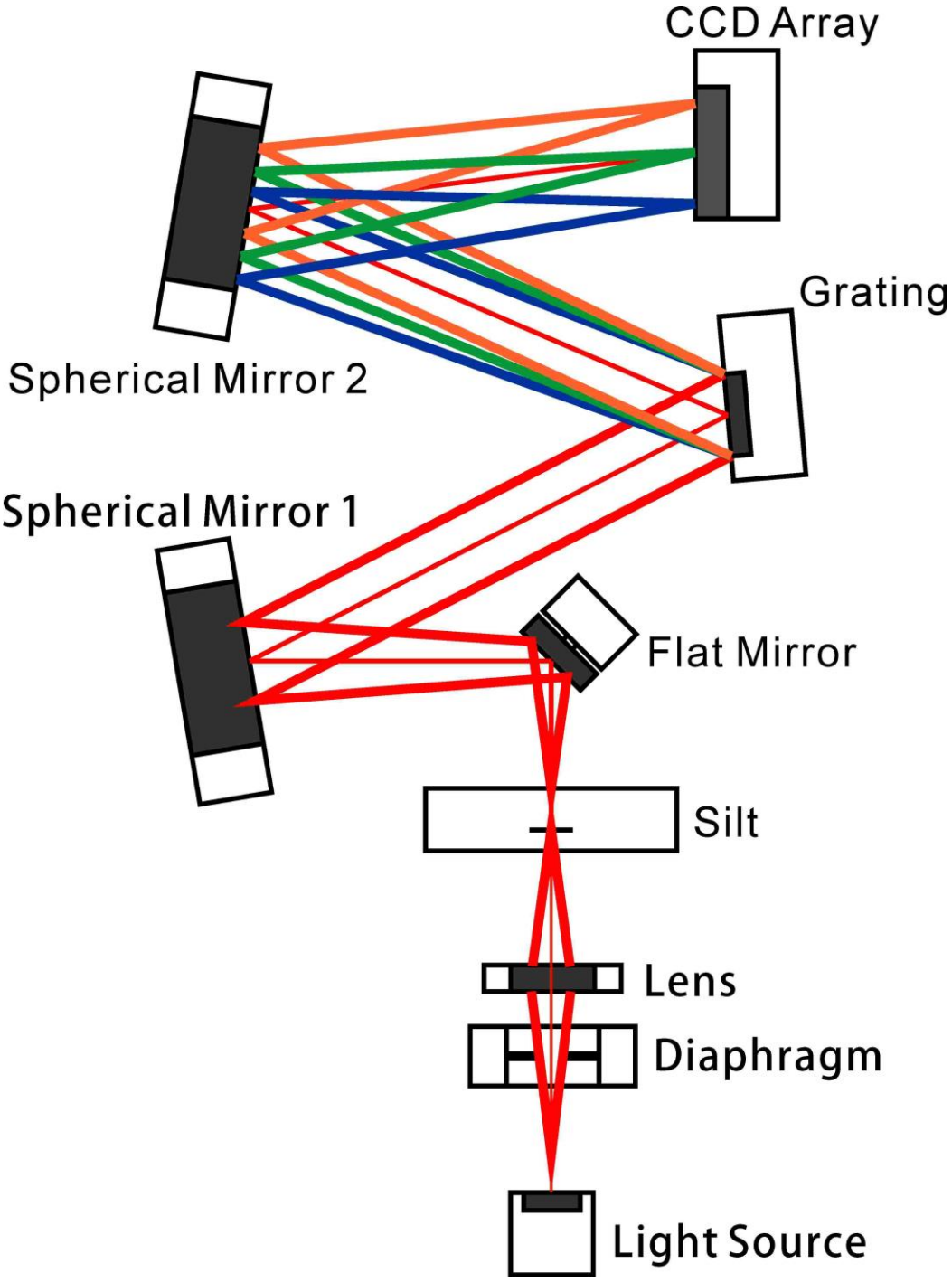

图 2、在光谱仪上搭建光栅光谱仪的实物模型图

（3）、根据自己设计的模型，在实验室选择相应的光学元件，在光学平台上搭建自己的光谱仪，比较自己的光谱仪的输出结果和软件模拟的结果；

（4）、利用设计软件对光谱仪的参数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的差异的产生原因，进而比较高效地完成光谱仪的调节和性能优化；在此基础上总结光学元件的调节实战经验。

思考题：

1. 影响光栅光谱仪分辨率的参数有哪些？
2. 球差产生的原因是什么？如何减小球差？
3. 要减小光栅光谱仪的背景噪声，可以采用哪些方法？

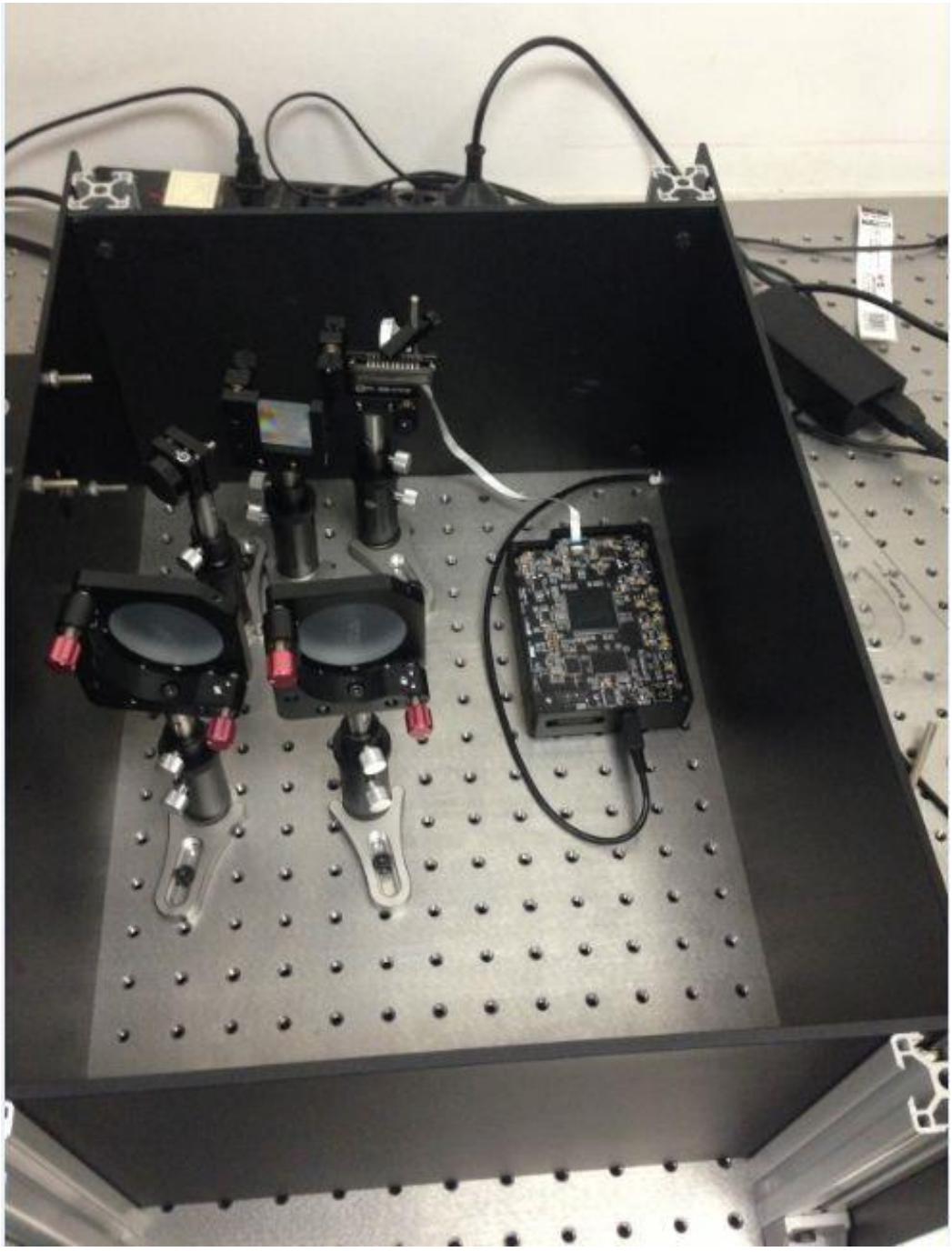

图 3、用实验室提供的光学元件搭建的光谱仪

教学效果：

本实验不仅能帮助学生加深光栅光谱仪工作原理的理解,还能提高学生的光学元件调节技能，以及光栅光谱仪的应用能力。

- **克拉尼图形实验**

实验内容：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之间的异同，利用模拟软件研究圆盘参数（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。

实验步骤：

（1）、学生利用 Comsol 软件建立薄圆盘的模型，尝试求其共振频率和共振模式；

（2）、利用实验室提供的设备，测量薄圆盘的实际共振频率，记录实际的二维驻波 Pattern；并比较其和模拟结果的异同；

（3）、通过数值计算得到薄圆盘的驻波解，探讨实验结果和模拟结果不同的原因；

图 4：实验中得到的一种薄圆盘克拉尼图形（左）和与此相应的 Comsol 模拟结果图（右）

思考题：

（1）、什么是有限元分析？有限元分析的精度和什么有关？

（2）、薄圆盘的共振频率与哪些因素有关？

（3）、薄圆盘的共振模式的解还与哪些物理问题的解相似？

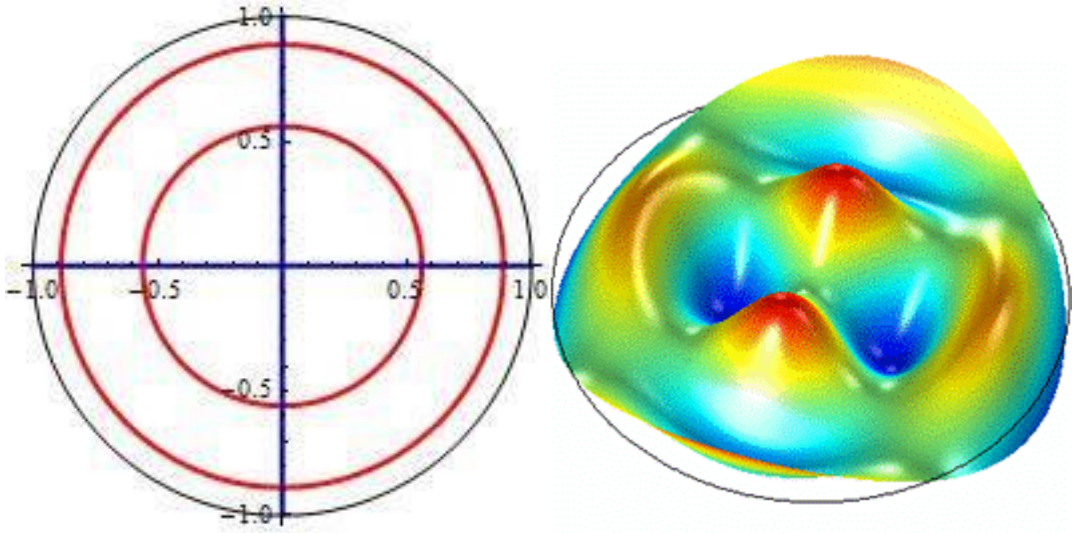

图 5：与上图对应的二维薄圆盘驻波解析解的节点分布、实际振动模式演示。

教学效果：

本实验不仅可以让学生看到“沙子如何整齐划一地在圆盘上跳舞”，还能让学生知道这背后的物理是什么，让学生了解这个实验得到的数值解还与哪些领域的物理问题相似。

- **四极杆质谱实验**

实验内容：用 SimIon 软件建立四极杆滤质器中的交变马鞍形四极电场，分析能被囚禁在其中的带电粒子需要满足哪些条件？

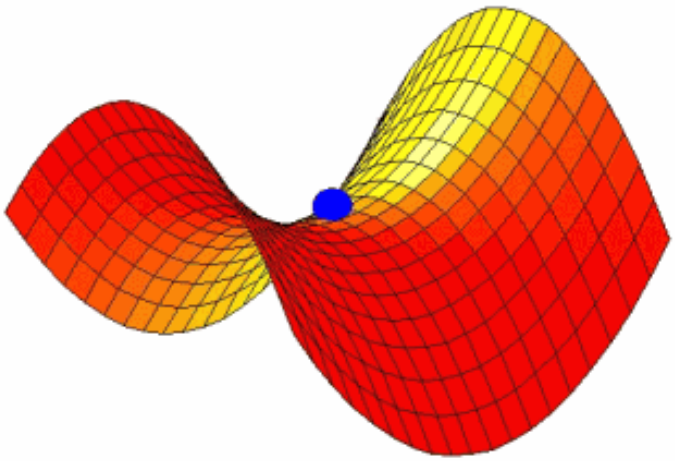

图 6：四极场囚禁带电粒子的模拟效果图。

实验步骤：

（1）、在 SimIon 软件中建立四极杆滤质器的模型；

（2）、设定参数，画出马鞍形电场；

（3）、确定能通过四极杆滤质器的带电粒子须满足哪些条件；

（4）、改变四极杆上的参数设置，探究滤质器输出质谱特性的变化。

教学效果：

质谱实验在现代生产、生活和研究中的应用非常广泛，而其中最常用的质量分离元件是四极杆滤质器，然而四极杆滤质器的工作原理很难理解，实验上，质谱仪的分辨和哪些参数有关也很难设计合适的实验内容来进行探究。本虚拟仿真实验不仅可以让学生直观地理解四极杆质谱的工作原理，以及影响四极杆质谱分辨率的参数。

- **引入的商业虚拟仿真实验软件包：**

➢ 由中科大教学团队开发的“大学物理仿真实验”系统（由科大奥锐公司销售）

“大学物理仿真实验”由中科大国家级教学名师霍剑青老师带领的教学团队开发，在中科大和其他国内高校使用后，普遍反馈教学效果优良。我中心引入此套软件，一方面是帮助同学做好预习，另一方面是扩充大学 1-2 年级学生能做的实验的覆盖面。“大学物理仿真实验”包括如下四十个实验项目：

1. 电子自旋共振实验
2. 分光计实验
3. 夫兰克—赫兹实验
4. 法布里—珀罗标准具实验
5. γ能谱实验
6. 光电效应测普朗克常数实验
7. G—M计数管和核衰变的统计规律
8. 检流计的特性实验
9. 凯特摆测重力加速度实验
10. 薄透镜成像规律研究实验
11. 力热学基本物理量及常用仪器介绍
12. 利用单摆测重力加速度实验
13. 霍尔效应实验
14. 居里温度的测量实验
15. 空气比热容比测定实验
16. 介电常数的测量实验

17. 电子荷质比的测定实验
18. 杨氏模量的测量实验
19. 不良导体导热系数的测定实验
20. 迈克尔逊干涉仪实验
21. 低真空实验
22. 螺线管磁场的测量与研究实验
23. 核磁共振实验
24. 偏振光的研究实验
25. 阿贝比长仪及氢氘光谱测量
26. 平面光栅摄谱仪及氢氘光谱拍摄
27. 热敏电阻温度特性实验
28. 示波器实验
29. 油滴法测电子电荷实验
30. 塞曼效应实验
31. 测动态磁滞回线实验
32. 热膨胀系数实验
33. 双臂电桥测低电阻实验
34. 超声波测声速实验
35. 气垫上的直线运动
36. 碰撞和动量守恒
37. 光学设计实验
38. R-C电路实验
39. 整流电路实验
40. 设计万用表实验

- **“虚拟核磁共振技术教学及实训系统”**

核磁共振成像技术在科学前沿研究、工业检测、医疗诊断中使用广泛，我们中心从 2009 年起和纽迈电子科技有限公司合作,共建了核磁共振成像教学实验室。学生对所学内容感兴趣，部分同学还能开展探索性课题的研究。但由于课时所限，加上核磁共振成像得到的图像质量取决于很多的因素,学生很难在较短的时间深入掌握样品中的核磁矩弛豫过程与所得信号之间的

关联，还需要去鉴别得到的图像是否真实地反映了样品的特性。为此，我们引入纽迈电子科技有限公司开发的“虚拟核磁共振技术教学及实训系统”。该系统包含虚拟仿真实验项目十六个，可用于同学在课前预习，也让同学课后利用课余时间探究更多内容：

1. 硬脉冲 FID 序列测量拉莫尔频率
2. FID 信号确定硬脉冲射频
3. 硬脉冲回波序列确定硬脉冲射频
4. 电子匀场
5. 采样参数对磁共振图像大小及形状的影响
6. 自旋回波权重像
7. K 空间对图像结构和细节分辨的影响
8. 电子学噪声及主磁场不均匀性对磁共振图像的影响
9. 快速自旋回波脉冲序列成像
10. 一维频率编码成像
11. IR 序列下 TI 时间对图像对比度的影响
12. IR 序列下的脂肪和水抑制成像
13. GRE 序列参数对 MRI 图像对比度的影响
14. 改进型 EPI 序列成像
15. 螺旋扫描 EPI 序列成像
16. 乙醇的化学位移

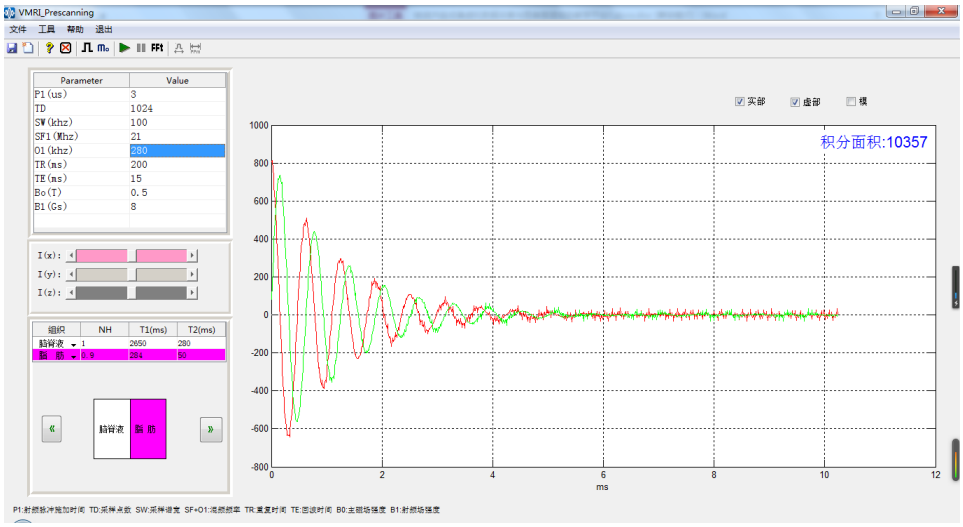

图 7、虚拟核磁共振技术教学及实训系统界面截图

- **自主开发的虚拟仿真实验**

➢ **虚拟仿真听觉听阈曲线测量实验**

实验内容：利用虚拟仿真听觉听阈软件，通过网络预习听觉听阈实验，学会利用虚拟仿真听觉听阈系统测量听觉范围和听阈曲线，掌握频率和声强的调节方法，熟悉各种不同频率的声音，为课堂上用实物仪器进行测量打下基础。

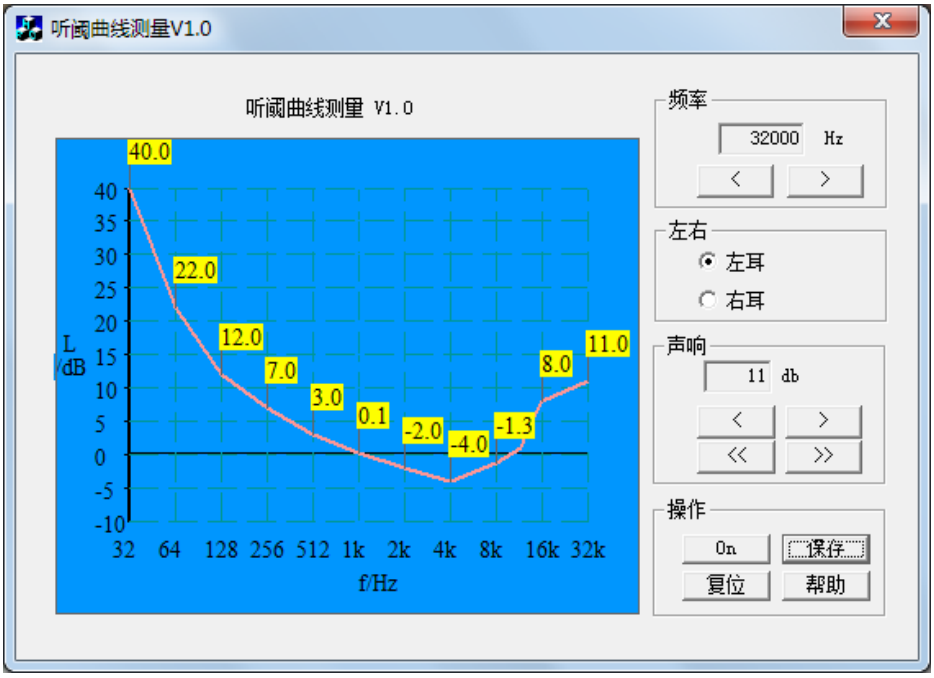

图 8　虚拟仿真听觉听阈测量系统界面

实验步骤 ：

（1）、下载并利用计算机或手机打开听觉听阈测量系统，自动跳出界面后，选定左耳或者右耳后，即可开始测量练习；

（2）、点击频率按钮，对应窗口跳出预先设定的最小频率 64Hz，再点击声强按钮，使声音强度不断增大直到刚能从耳机中听到 64Hz 纯音为止，并按确认键，系统自动记录下该听阈值，并在界面上显示该数据点。（若声音强度调节至 40 仍听不到声音，务必停止升高声音强度，需要检查系统工作不正常的原因。）

（3）、按照步骤（2）方法，依次调出 128、256、512、1000、2000、3000、4000、6000、8000、10000、12000Hz 的纯音，并测量相应听阈值；

（4）、各频率点听阈值测量完毕时，界面上听阈曲线完成；实验预习结束。

（5）、关闭系统。

➢ **真空系统虚拟仿真实验**

实验内容：正确操作真空控制单元，使真空室达到高真空状态。

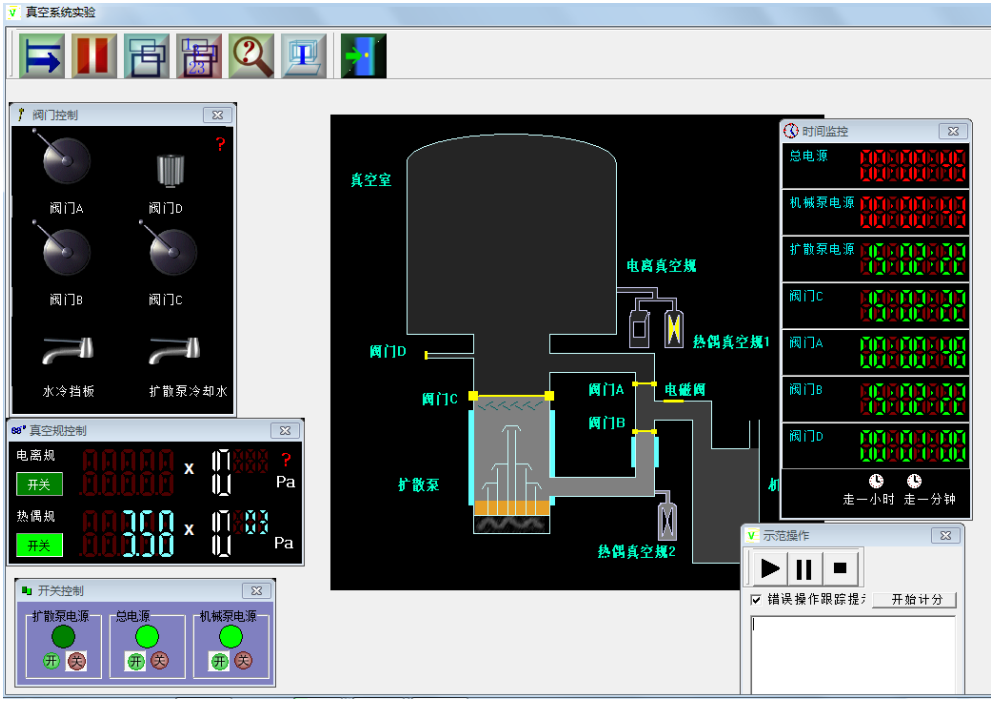

图 9、真空系统虚拟仿真实验界面截图

实验步骤：

（1）、熟悉界面上的所有符号；

（2）、按高真空操作的正确流程使真空室进入高真空状态。

思考题：

（1）、要使扩散泵能够正常工作，须满足哪些条件？

● **用于帮助学生做好实验预习的实验教学视频和演示实验视频**

➢ **“基础物理实验”课“X 光透视与 NaCl 晶体的结构分析”实验教学视频介绍：**

“X 光实验--X 光透视与 NaCl 晶体的结构分析”是面向全校理、工、医科学生开设的必修课“基础物理实验”课程中的一个教学实验。由于绝大多数学生在本科阶段只接受一个学期的物理实验训练，在设置“基础物理实验”教学内容时，我们除了选择传统的力、热、电、光实验以外，还开设了计算机实测及少数代表性的近代物理实验项目，其中“X 光实验”作为一个经典的近代实验，于 2003 年开设以来，一直受到学生的好评。

该实验的主要内容是：观察不同实验条件下 X 光的透射像，了解在 X 光的产生中高压及管流的作用，并解释实验现象；测量 NaCl 晶体晶面间距，掌握 X 光机的使用，仪器零点的调节，

对实验中出现的问题，能够学会分析，并且能够自己或在老师的帮助下解决。为了更好的帮助学生预习，让一年级同学也能较好地掌握该实验的基础，2013 年我们制作了实验的教学视频，并放在了实验中心网站上，龚同学使用。视频分两部分，实验原理讲解和实验操作讲解。

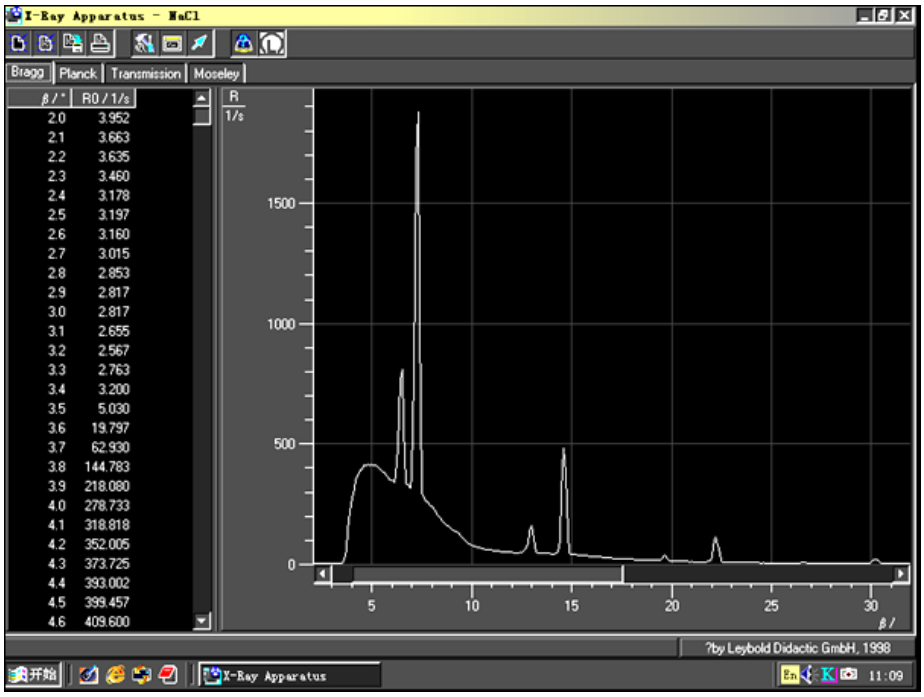

图 10、 NaCl 晶体的衍射曲线

“实验原理讲解”视频内容包括：

实验目的：了解 X 光产生的原理及应用，观察 X 光透射像，测量 NaCl 晶体的晶面间距；

实验背景：向学生介绍 X 光产生的历史；

实验原理：介绍 X 光产生的原理，什么是特征辐射与韧致辐射；布拉格公式以及如何利用 X 光来研究晶体结构；

实验装置：展示实验装置是由哪几部分构成及各部分的功能；

思考题：用于提示学生预习时应该思考哪些问题以及实验中可能会遇到哪些问题。

“实验操作讲解”视频内容包括：

实验操作过程演示：通过指导老师实际操作仪器的录像向学生展示实验的操作过程和实验时可以观察到的实验现象；

实验注意事项提醒：介绍实验时学生在取放氯化钠晶体的过程中应注意的事项及实验过程中射线防护相关的安全事项。

➢ **演示实验教学视频介绍**

为了提高中心已经开发的物理演示实验的利用率，教学团队已将大部分演示实验制作了教学视频，共享于实验中心网页，供课程教师和选课的同学，甚至是其他高校的老师和同学根据自己的兴趣来选择观看。

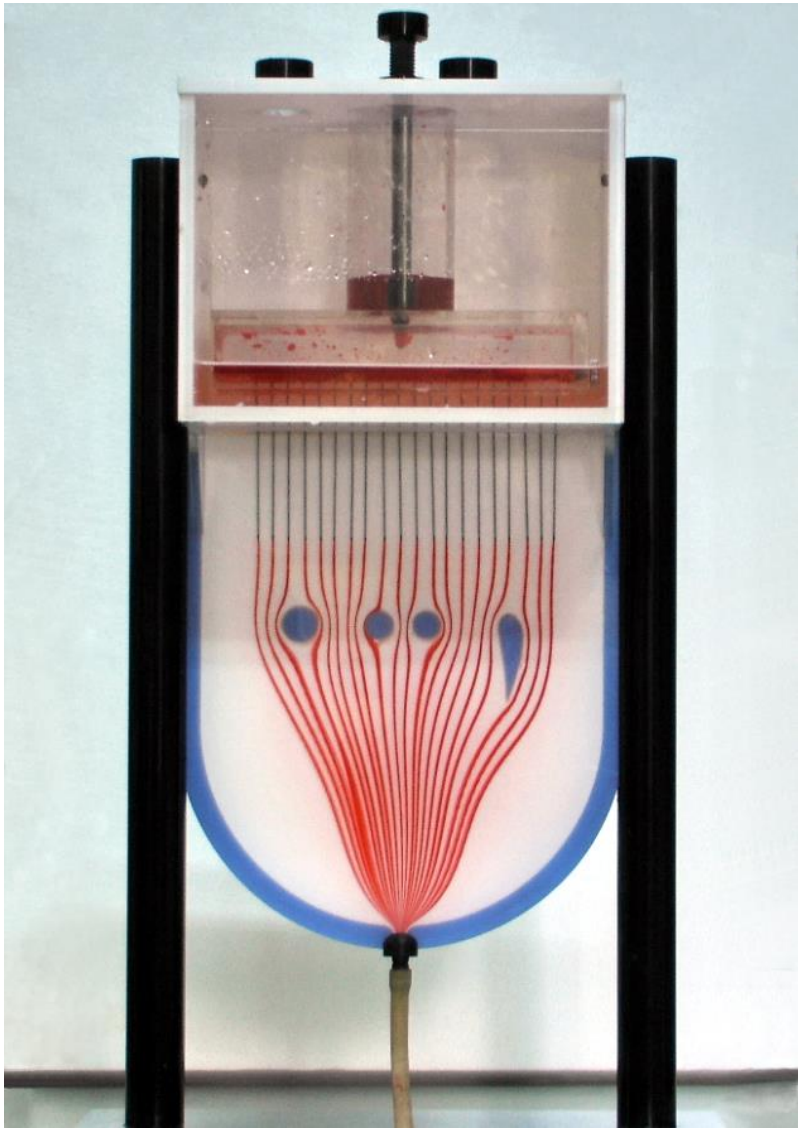

图 11、流线演示

（1）流线演示实验视频

通过录制教师实际操作流线演示仪后可以观察到清晰的流线，以及流线遇到障碍物时形状如何改变等实验现象，向学生展示什么是流线、以及流线存在的条件和流线发生变化的原因。

演示的意义：液体和气体统称为流体，流体力学是研究流体的宏观平衡、运动规律及与其相邻固体之间相互作用的一门学科，且又是水利学、空气动力学、磁流体动力学、化学流体力学、生物流体力学等学科的基础。流线是描述流体内速度场分布的一组曲线。在流体力学的教

学中，流线的概念很抽象，难理解，本流线演示视频给出了一种控制流体作定常流动的方法，可演示流体做定常流动时，流线的形状、流体遇到各种障碍物时流线形状的改变。

演示原理：通过控制红墨水和清水的流速，使两者做同一速度的定常流动，并在流体流动路径上放置不同形状的障碍物，从而演示出流线的存在以及流线遇到障碍物时形状的改变。

演示装置特点：便携带、便操作，流线清晰、稳定，可以在课堂上向学生演示流线的存在，流线存在的条件，流线遇到障碍物时形状如何改变等。

用于拍摄此视频的流线演示仪为复旦大学自主研制，获全国高校第八届物理演示教学仪器评比一等奖（2007 年 8 月，北京），并获批实用新型专利一项（专利号：2010206470760）

2.3 由科研成果(近五年)转化而来的实验教学内容

物理教学实验中心一直和课题组合作，努力将科研成果转化为教学实验。近五年，由科研成果转化而来的教学实验包括：

1. 实验中心和超构材料课题（MetaMaterial）组合作开发了电磁波偏振特性的调制实验和波导中亚截止波长的共振传输实验；这两个实验都要求学生先用 Comsol 软件对待研究的特定结构的人工材料进行建模，得出电磁波在这些人工材料中的传输特性，并基于这些结果确定实验方案，然后自己进行实验，比较实验结果和模拟结果之间的异同。
2. 实验中心和上海应用物理所得高频腔、合肥同步辐射国家实验室合作，开发了高频腔性能测定实验；
3. 实验中心和光子晶体课题组合作，开发了“法诺共振的力学模拟实验”，还自主研制了实验设备；
4. 实验中心和力学系的课题组合作，开发了“声音定向传播演示仪”，该仪器在全国高校第十一届物理演示实验研讨会仪器评比中获得一等奖；
5. 实验中心和医学院的课题组合作，开发了“听阈曲线测量”等实验。

2.4 合作企业的概况、参与程度和合作成果

物理教学实验中心一直重视与教学仪器开发的企业的合作，与多个行业内的标杆企业保持着深入合作关系，通过多年的努力，合作已取得令人可喜的成果，达到互惠共赢的目的：支持实验教学中心开发新实验、由企业进行产品推广。这些长期的合作企业包括：

1. 复旦天欣：物理教学实验中心一直与复旦天欣有极好的合作关系，在 2008 年前就联合开发了“医学物理”系列实验设备，参加第五届实验物理研究会教学仪器评比获二等奖。物理教学实验中心与复旦天欣合作开发并在全国评比中获奖的仪器多达 6 项；
2. 上海上大电子设备有限公司：物理教学实验中心与上海上大电子设备有限公司合作开发并在全国评比中获奖的仪器多达 9 项；
3. 上海纽迈电子：从 2009 年开始合作，复旦大学物理教学实验中心自 2009 年购买核磁共振成像仪之后，积极与上海纽迈电子开展分层次的实验教学，取得很好的教学效果；同时，实验中心老师指导学生拓宽仪器的应用领域：开发了用核磁共振成像仪测量接触角、进而研究液体与固体的浸润性等研究；
4. 上海寰彤：实验中心与上海寰彤合作开发“脉冲弧光等离子演示仪”获全国高校第八届物理演示实验研讨会仪器评比一等奖；
5. 宜准电子科技：实验中心和上海宜准电子科技先后合作开发了多功能脉冲分析仪和四极杆质谱实验教学系统，这两套设备分获全国高校第七届实验物理教学实验研讨会仪器评比二等奖和三等奖；
6. 复享仪器：实验中心和复享仪器一起合作开发“氢光谱演示仪”（获全国高校第九届物理演示实验研讨会仪器评比三等奖）和各种基于微型光栅光谱的教学实验项目。

2.5 目前教学资源共享的范围和效果

2007 年，复旦大学物理教学实验中心申请国家级实验教学示范中心之时，就建立了基于 Wiki 技术、人人可参与编辑、面向所有访问者开放的实验教学资源共享网。实验中心教师和

学生在网上分享自己的教学经验、学习心得，深入讨论各种问题，上传了各类教学视频（现有网络教学视频已达186段），甚至“直播”新实验建设的进程。网站开放至今约八年时间里，页面总访问量已超过四千四百余万次，近一年多时间的平均每日页面点击数超过4万次。在实验中心网站上开展多种实验教学活动和实验室管理，不仅活跃了实验教学气氛，改善实验教学效果，也促进了教学资源的积累、先进经验在兄弟院校之间的共享交流，得到国内物理实验教学同行们的认可。

受国家级实验教学示范中心物理学科组委托复旦大学物理教学实验中心于2014年10月组织了“基于 Wiki 的实验中心网站架构和使用培训”。培训班向参加培训教师介绍架构 Wiki 网站所需的技术并提供网站架构实战训练和指导，还分享网站日常使用过程中的维护和管理经验，得到包括来自北京大学、中山大学等高校的培训班参与者的一致好评。截至目前，东北师范大学、中山大学等高校已经开设了基于Wiki技术的实验教学网站。

物理教学实验中心还在上海市各高校中组织开展“特色实验培训：Arduino单片机在物理实验教学中的应用”，上海交大、华东理工大学、上海海洋大学和上海电机学院的老师参加了为期一天的培训。

实验中心教师积极参加国内外的物理教学会议和实验教学会议，每年都有数个邀请报告、口头报告、墙报来介绍中心在实验教学上取得的新进展。2012 年起，实验中心教师参加了五次美国物理教师协会组织的夏季或冬季年会，和美国同行有很多较深入的交流，也建立了固定的合作关系。

自实验中心获批成为国家级实验教学示范中心以后，每年都有十余所国内高校来实验中心访问、交流和进修；另外，至今来实验中心交流访问的国外高校已超过十所。

2.6 进一步实现共享的计划与安排

下一步的虚拟仿真实验教学资源共享计划如下：

1. 进一步完善现有虚拟仿真教学实验项目，新建面向近代物理实验教学的虚拟仿真实验教学项目5个：包括光泵磁共振仿真实验、信号处理和电子线路仿真实验、电子光学仿真实验、新型MetaMaterial设计仿真实验等；

2. 新建、完善医学物理实验虚拟仿真实验项目 5 个：包括医学影像技术虚拟仿真实验（3 个）、心血管虚拟仿真实验系统等；
3. 利用现有教学视频和虚拟仿真工具，实践翻转课堂式的实验课程混合教学：探索虚拟仿真教学资源如何更有效地融入现在的实验课程体系，以提高实验教学效果；同时研究国外先进的实验教学效果测评工具，自主开发适合我国实验教学状况的测评工具，并在网上共享这类测评工具；
4. 利用“计算凝聚态物理”、“教学课件 CAI”和“趣味物理问题探索”等课程在教学中深入开展物理建模相关的教学活动，提高学生的物理建模能力，同时提升学生自主开发虚拟仿真实验的能力。

3. 虚拟仿真实验教学队伍

3.1 虚拟仿真实验教学中心主任	姓名	乐永康	性别	男	年龄	42
	专业技术职务	教授	学位	博士	联系固话	021-65642365
	邮箱	leyk@fudan.edu.cn			手机号码	18917117272
	主要职责	全面负责虚拟仿真实验教学中心的建设与管理：包括统筹中心的建设规划，并负责建设规划的总体推进；负责建立国际、国内的合作交流渠道，选定合作研究的内容和人员安排；参与课程建设和教学，特别是与“物理建模”相关课程的教学；负责部分近代物理实验虚拟仿真实验项目的建设；组织落实虚拟仿真实验中心教学资源的共享与推广。				
	工作经历	于 2003 年在德国获得博士学位后回到母校复旦大学专职参与物理实验教学工作，先后执教《基础物理实验》、《物理实验下》、《设计性研究性物理实验》、《近代物理实验 I/A/II》等课程，是国家级精品课程《大学物理实验》、《近代物理实验》等课程的骨干教师；负责和参与的教育部教指委两个教学研究项目都获评优秀结题项目；2014 年 5 月起担任复旦大学物理教学实验中心主任；2014 年 1 月起担任美国物理教师协会仪器专业委员会委员，2014 年 8 月起担任全国高校实验物理教学研究会副理事长。				

	教研科研主要成果（科研成果限填 5 项）	发表科研论文和实验教学论文各十余篇，其中实验教学论文多为第一作者或通讯作者；自主研制的六台（套）教学仪器在国内评比中获奖，其中一台获一等奖，指导学生完成的实验教学论文曾在国内物理实验教学论文评比中获一、二等奖。“科研引领创新人才培养，构建物理实验教学新体系”(第二完成人)获 2013 年高等教育上海市级教学成果一等奖。2013 年在美国物理教师协会冬季年会上作邀请报告，2014 年两次在国内教学会议上作邀请报告；2015 年组织美国物理教师协会冬季年会”Remote Labs”分会场，参与组织美国近代物理实验协会”BFYII”会议。

3.2 教师基本情况		正高	副高	中级	其它	博士	硕士	学士	其它	专职	总人数	平均年龄
	人数	11	5	9	2	15	6	5	1	19	27	43
	占总人数比例	41%	19%	33%	7%	56%	22%	19%	4%	70%		

3.3 中心人员信息表

序号	姓　名	年龄	学位	专业技术职务	承担教学/管理任务	专职/兼职
1	乐永康	42	博士	教授	教学及管理	专职
2	龚新高	53	博士	教授	教学及管理	专职
3	杨中芹	42	博士	教授	教学与管理	专职
4	马世红	52	博士	教授	教学	专职
5	冀敏	59	学士	副教授	教学	专职
6	吕景林	56	学士	副教授	教学及管理	专职
7	童培雄	53	学士	高级工程师	教学	专职
8	俞熹	37	博士	副教授	教学及管理	专职
9	苏卫锋	38	博士	副教授	教学及管理	专职
10	姚红英	49	硕士	讲师	教学	专职
11	原媛	33	硕士	工程师	教学	专职
12	陈元杰	40	学士	工程师	教学	专职
13	白翠琴	36	硕士	工程师	教学	专职
14	岑剡	35	硕士	工程师	教学	专职
15	周诗韵	29	博士	讲师	教学	专职

16	魏心源	41	硕士	工程师	教学	专职
17	高渊	38	学士	助教	教学	专职
18	李爱萍	36	硕士	工程师	教学辅助	专职
19	潘正元	60		实验师	教学辅助	专职
20	侯晓远	56	博士	教授	教学	兼职
21	田传山	35	博士	教授	教学	兼职
22	陈唯	42	博士	教授	教学	兼职
23	李世燕	39	博士	教授	教学	兼职
24	谭砚文	39	博士	教授	教学	兼职
25	杨新菊	49	博士	教授	教学	兼职
26	季敏标	33	博士	教授	教学	兼职
27	何琼	40	博士	讲师	教学	兼职

3.4 虚拟仿真实验教学队伍实验教学水平和成果

复旦大学物理虚拟仿真实验教学中心的教师队伍以国家级实验教学示范中心的全体教师和常年讲授“计算凝聚态物理”和“物理 CAI 课件设计”的教师组成专职教师队伍，聘请经常在实验中心执教物理课程的科研教师为兼职教师，教师队伍的科研教学能力都很强，有自主开发高水平教学实验和虚拟仿真教学实验的经验。教师队伍中有正高职称的有 11 位，占比 41%。有博士学位的教师 15 位，占比 56%。这支教师队伍已中青年教师为主，能够保证虚拟仿真实验教学中心的长远发展。

复旦大学物理教学实验中心通过多年的努力，开设的本科生实验课程已全部成为国家级精品课程（三门）或上海市精品课程（五门），三门国家级精品课程又于 2013 年升级成为国家级精品资源共享课。这些都充分体现了虚拟仿真实验教学队伍的实验教学水平。

实验中心教师一直坚持新实验建设和自主研制教学仪器。从 2007 年成为国家级实验教学示范中心以来，实验中心教师独立研制或与仪器厂家联合研制、在全国性的教学仪器评比中获奖的教学仪器达到 26 台套，其中获得一等奖的仪器有 6 套；实验中心教师指导学生完成的实验教学论文在全国实验教学论文评比中，获一等奖 2 项，二等奖 5 项。

2013 年物理教学实验中心教师完成的教学成果**“科研引领创新人才培养，构建物理实验教学新体系”**获高等教育上海市级教学成果一等奖。

4. 管理与共享平台

4.1 校园网络及教学信息化平台（平台水平、主要功能）

复旦大学是较早开展校园信息化建设的高校，成立了校园信息化办公室统筹校园的网络和信息化建设，并从技术上支持学校开展信息化教学。目前，校园里的所有实验室、办公室和学生宿舍都有有线网和无线网络信号覆盖，学生通过网络访问教学资源通常方便。

物理教学实验中心于 2007 年申请成为国家级实验教学示范中心前就建立了基于 wiki 系统建成了实验中心的新网站（http://phylab.fudan.edu.cn），实现了开放式的教学互动机制，在实验教学和管理等方面发挥着重要作用。它有以下三大特点：

1. 广泛参与及透明性：一改以往的网站由专人负责维护和更新的做法，面向全体老师、选课同学，甚至是其他对实验感兴趣的人，都可在登陆后修改、补充和发表意见；学生可 以直接发帖提问，老师和其他同学都可以随时作答或进行讨论；实验教材的更新和补充 也可以由指导教师自行修改和维护；大大增强了网页的交互性和内容的有效性。

2. 开放性：发布实验中心的公开信息，转发与实验中心相关的校内外信息。学生通过平台可以了解实验中心的基本情况、实验课程（包括课程表）、教学大纲、实验任务要求、 实验多媒体课件并提供相关的参考资料及网站连接。

3. 互动性：学生可在线提交实验报告，发表实验体会，可以对实验教学提出建议和意见。教师可以进行答疑，开展专题讨论和调查教学情况。

实验中心在建设过程中一直大力支持该网站的建设和管理，于 2008 年前后购置了独立网络服务器，保障实验中心发展建设所需的网络资源空间，也保证全校师生和外单位用户访问网站时的通讯顺畅。2012 年之后，为了适应多媒体技术在实验中广泛使用的新趋势，实验中心开始筹建自己的教学视频专用服务器。目前，服务器还有足够的空间用于虚拟仿真实验教学。

同时，我们三门国家级精品资源共享课的教学资源还通过国家级精品资源共享课网站向所有对我们的实验教学感兴趣的用户共享我们课程建设的成果。实验中心开设的精品资源共享课开放资源链接列表：

国家级精品资源共享课“大学物理实验”：

http://www.icourses.cn/coursestatic/course_2460.html

国家级精品资源共享课“文科物理（理论与实验）”：

http://www.icourses.cn/coursestatic/course_5921.html

国家级精品资源共享课“近代物理实验”：

http://www.icourses.cn/coursestatic/course_5923.html

4.2 网络管理与安全

网站服务器由复旦大学信息办机房托管，提供防火墙等安全技术支持。为了保障网站内容的安全，实验中心已购置专门的服务器作为备份服务器，制定专门的安全备份机制：每天、每周、每月进行不同覆盖程度的备份。

实验中心网站(http://phylab.fudan.edu.cn)除了有专门的系统管理员负责设备更新、维护网站架构、系统安全、版面安排和内容设计等方面的工作外，实验中心的全体教师都熟悉网站内容编辑和维护，都是兼职管理员。由于实验中心教师都养成了经常访问网站、查看网站更新的习惯，实验中心网页虽然时时有人在更新，但中心教师对这些更新都非常了解，中心教师对网站上学生或其他用户提出的重要问题都能在几分钟内给出答复，有些与具体课程相关的特殊问题，则由课程负责人在一个工作日内做出答复。

也正是因为有这样的非常及时高效的管理模式，实验中心网站上极少有学生提出问题，没有人答复的情形；尽管我们的网站向所有的注册用户开放编辑权限，在网站建成开放至今的八年时间里，从未出现网络安全相关的问题。

5. 条件保障

5.1 虚拟仿真实验教学中心基础条件（仪器设备配置情况、环境、运行与维护等）

虚拟仿真实验教学中心在基础条件上依托于复旦大学物理学系雄厚的科研和教学环境，特别是：复旦大学物理教学实验中心（国家级实验教学示范中心），计算物质科学教育部重点实验室和应用表面物理国家重点实验室：

- 物理教学实验中心现有教学实验室用房面积约 2100 平方米，仪器设备约 1700 余台件，总值约 2 千万元，这些资源全部向虚拟仿真实验教学中心的所有教学活动开放共享；物理实验中心有完整的师资和教学辅助团队，能运行和维护好实验中心的所有设备，以保证虚拟仿真实验教学中心各项工作的顺利开展；
- 教育部重点实验室所建的用于高性能计算的大规模计算集群将向虚拟仿真实验教学中心的教学活动开放，学生在建立了自己的物理模型、完成计算程序的编写之后可以用这些高性能集群来得出实验结果并进行下一步研究和学习；
- 应用表面物理重点实验实向虚拟仿真实验教学中心的师生开放共享部分实验设备用于支持

虚拟仿真教学实验得开发，特别是多物理场虚拟软件 Comsol 和电子光学设计软件 SimION 等商业软件的使用权。

5.2 虚拟仿真实验教学中心管理体系（组织保障、制度保障、管理规范等）

虚拟仿真实验教学中心（以下简称“中心”）受学校（教务处）、院系（物理学系）的二级领导，设中心主任 1 人，副主任 4 人（分别主管教学、科研、师资队伍建设和网络建设等）。中心管理团队分工合作，协力推进“中心”的各项建设工作；虚拟仿真实验教学中心将沿用物理实验教学示范中心制定的较完善的规章制度。在人事管理上，这些制度强化了对教学工作的管理，突出创新新工作的工作量核算，提高了教师投身教学改革工作的积极性。 在教学质量管理上，有《实验教学质量检查内容》、《学生守则》和《关于必须严肃诚实对待实验数据的三项规定》等管理规范，以保证实验教学质量。在财务管理方面，实验教学示范中心根据学校的财务制度，制定了完整的适用不同金额，包含申请、审批等环节的财务管理规章。

5.3 虚拟仿真实验教学中心经费来源及使用情况

虚拟仿真实验教学中心的经费由学校教务处和物理学系共同承担，与物理实验教学中心的经费统筹后一起划拨，其中虚拟仿真实验中心的开支项目包括：

1. 每年的日常运行经费约 15 万元，主要用于虚拟仿真中心的教师参与国内外的会议交流和购买相关的资料、耗材等；
2. 根据实际需要申请的设备、软件采购费用，主要包括购买：网络服务器、通用设计软件和开设虚实结合的教学实验项目所需的部分真空零部件、光学元件，以及用于制作教学视频、开发虚拟仿真实验项目所需的摄像、摄影设备等；
3. 用于购买商业虚拟仿真实验软件包。

本次申请虚拟仿真实验中心，我们申请建设经费 100 万元，学校教务处配套 100 万元，主要用于建设新的虚拟仿真实验项目：包括购买 TracePro 等软件，支付学生参与虚拟仿真实验开发部分工作的劳务费。

6. 学校和教育主管部门意见

学校意见	我校物理教学实验中心自成为国家级实验教学示范中心以来，不断实践实验教学内容、模式和教学手段的创新，积极拓展国际交流合作，进一步加强有自己鲜明特色的实验教学课程体系和教学模式：依托我校物理学科丰厚的科研教学积淀，秉承厚基础重创新的传统，建设不断进取的教学团队，开发与时俱进的教学实验项目，取得了令人欣喜的丰硕成果。 随着多媒体技术的发展，物理教学实验中心的教师团队敏锐地注意到：多媒体技术可以助力实验教学质量的提高，并开始自主开发虚拟仿真教学实验，实践虚实结合的教学模式，探索虚拟仿真实验教学在培养学生物理建模能力方面的作用，进而成立了我校物理虚拟仿真实验教学中心。基于该中心目前已具备的良好基础和高效管理模式，这些新理念新举措的长期实践，必将成为促进我校物理实验教学快速发展的新引擎。 学校愿意为物理虚拟仿真实验教学中心的发展提供所有必要的支持，包括提供配套建设经费等。 在此，我们强烈推荐我校物理虚拟仿真实验教学中心申报国家级虚拟仿真实验教学中心。 负责人签字　　（公章） 年　月　日
教育主管部门意见	负责人签字　　（公章） 年　月　日