

探索课程教学与科学研究的融合,促进教研相长

肖井华 杨胡江 李海红

(北京邮电大学 理学院,北京 100876)

摘要: 结合理工科“大学物理实验”课程的教学和实践平台,以培养创新人才为目标,实现了科学探究与课程学习的有机融合.通过开展课程内外的实践创新活动,本科生与教师一起自主研发系列创新实验并在国际教学研究期刊上发表高水平的论文,使学生获得融课程学习和科学研究于一体的高峰体验,同时在基础实践课程中推动了教研相长.

关键词: 本科生科研;探究式科学教学;物理实验

中图分类号: O 4 - 34 文献标识码: A 文章编号: 1000-0712(2014)06-0033-08

探究式科学教学(Inquiry-oriented Science Teaching)是指教师在理解“科学探究”精神的基础上,在自由创设的、有结构的、能促进学生认知与情感发展的教学情境中让学生自己动手、动脑,主动获取科学知识和发展探究能力的一种教学方式^[1].这种教学模式将传统的课程教学与科学研究相融合,要求师生在教学中运用科学过程与方法做类似于科学家们所进行的那种真实的科学探究.在大学创新人才培养过程中,探究式科学教学模式是培养学生科学精神、探究能力和创新能力的有效途径.《国家中长期教育改革和发展纲要(2010—2020)》中明确指出“支持学生参与科学研究,强化实践教学环节”,这有力地促进了国内高校本科生创新活动的开展,例如各级大学生创新创业计划、各高校的本科生科研基金等.这些计划鼓励和支持了大学生参与科学研究,对拔尖创新人才培养模式的探索起到很好的推动作用^[2].近些年来,我们基于“大学物理实验”课程教学和物理实验教学中心实验平台,将本科生课程教学与科研能力培养有机结合,深入实践探究式科学教学模式,探索了一条创新人才培养的有效途径.

1 秉持教学与科研相融合的理念,促进教研相长

纵观世界名校,本科生科研训练与其学术水平

已经成为衡量国际高水平大学的标志.本科生科研训练始于美国麻省理工学院(MIT)1969年开始实施的“本科生研究机会计划”^[3,4].在本科生科研理事会(CUR)、全美本科生科研大会(NCUR)、卡内基教学促进基金会、美国科学基金会等组织的推动下,现在美国几乎所有的研究型大学都在开展某种形式的本科生科研计划.进入21世纪以后,本科生科研计划在国内外得到了空前的重视.很多高校都制定了各自的大学生科研规划和资助办法,逐步探索本科生创新的培养机制.现在国内有些高校的探索已经取得了一些成果,其中具有代表性的是中南大学的在校本科生刘路攻克国际数学难题“西塔潘猜想”,这对学科的发展做出了原创性的贡献.让本科生在学习理论知识和基本技能的同时,积极参与到科研活动中去,不断丰富实践知识,培养创新意识,激发探索未知领域的好奇心,同时锻炼团队交流与独立工作的能力,一方面能使他们所学的理论知识得到充分的巩固和提高,另一方面是创新人才培养的必然要求.

目前本科生科研训练一般分为两种模式:一是直接参加科研团队,让本科生跟着博士、硕士研究生一起做科研,从“学徒”开始,利用导师及研究生的“传帮带”和参与团队的科研项目来提升本科生的创新能力,逐步扩展学生的科技视野;另一种是将教学与科研结合起来的教研融合,在课程学习过程中,

收稿日期:2013-06-21;修回日期:2013-11-25

基金项目:国家自然科学基金面上项目(11375033)、中央高校基本科研业务费专项资金(2013XZ02,2012PT06)、北京邮电大学教学研究与改革项目(探索开放教学模式,加强探究式物理实验对大学生创新实践能力的培养)资助

作者简介:肖井华(1965—),男,江西省井冈山市人,北京邮电大学理学院教授,博士生导师,主要从事非线性物理及复杂系统的研究工作以及物理实验教学.

充分发挥本科生的奇思妙想,并适当地与前沿科学技术相结合,深入探究与课程相关的一些问题,提高学生发现问题、分析问题和解决问题的能力.相比于前者,将课程学习与科研相结合具有科研台阶低、师生互动性强、课程学习与知识运用相结合的优点,每一个项目的成功都会使本科生和教师获得很强的成就感,能吸引和激励更多的本科生参与到探究式科学学习中去.与此同时,课程教学与科研相结合对改善目前科研与教学分离的大环境也有着重要的意义.探究式科学教学模式的关键在于,通过将教学与科研相结合,在富有理论知识和实践经验教师的带领下,基于课程的合理规划,安排学生分组自选研究题目、收集整理资料、设计和实施研究方案、撰写研究报告,从而形成整个教学和科研的有机体.在这个过程中,教师围绕教学、研究过程中的各个环节给予全方位的指导,并提出修正和改进意见;学生则在教师的引导下,结合自身兴趣,充分发挥自己的想象力,再现经典科研成果的思维路径,甚至在这个学习和探索的过程中有新的发现.

“大学物理实验”课程在大学既是一门基础实践课程,同时又与前沿科学技术紧密结合,在传统课程与科学研究相结合上,有着其他课程无可比拟的先天优势.首先,实验教学过程中经常会遇到许多“异常情况”,学生的“误操作”或者仪器装置的误差等都会出现一些“出乎意料”的现象.引导学生深入挖掘这些实验现象,就有可能收获一些意想不到的结果.再者,实验室都会有备份的设备仪器及一些可以利用的空间,能给学生的创新性研究提供优良的硬件支持.此外,实验课上教师与学生的零距离接触,也是理论教学无法比拟的优势,能使老师与学生之间培养起更深的感情,一些经验丰富的实验技术人员及时的帮助、关怀与鼓励能激发出学生更多的潜能.最后,由于本科生的科研创新活动一般来自于自发的兴趣,功利性小,当他们揭开了科学研究的神秘面纱后,就会爆发出很强的好奇心,也为学生在本

科阶段中种下了创新求索的种子,为接下来的创新型拔尖人才培养,奠定了基础.

2 探索科研实践与课程学习的深度融合

近年来,我们积极探索科研实践与传统课程学习的有机融合,在本科生探究性实践教学工作中做了大量工作,积累了一定的经验.

在实验项目的选取上,我们重点选择一些物理图像清晰,只要具备大学1~2年级的知识即可完成的实验作为研究对象,因而实验投入少、成本低,实验设计和分析巧妙,形成了自己的特色.从这些题目入手,可以大大降低本科生对科学研究的神秘感,使其尽早接触科学研究,了解科研的基本方法,培养创新思维和能力.

在教学过程中,我们注重发现一些有想法和能力强的学生,吸引和鼓励他们参与开发物理实验仪器和教学改革,利用一些很普通的设备,如单摆、声速测定仪、音乐节拍器、 $1/4$ 波片、混沌电路等,取得了非常丰富的教学成果.

2.1 从生活中来——摆球照相^[5]

单摆在物理实验教学中是一个非常基础的实验,一般的定量研究都局限在小角度平面单摆的情况,但还没有一种简单的测量装置来精确测量摆球的复杂运动情况,测量手段的匮乏成为了人们深入研究单摆的最大障碍.我校国际学院电信工程与管理专业2009级的两名本科生用一个简单的乒乓球解决了这个难题.他们在一个乒乓球中装入电池并用沙子将乒乓球填实,在其表面安置LED,自制了一个发光的摆球.在黑暗的房间中,将摆球悬挂在房顶,利用数码单反相机的B门功能从下方长时间(约300s)曝光拍摄发光摆球,即可得到摆球的运动轨迹.图1给出了不同初始切向速度下摆球运动的漂亮轨迹.该办法虽然简单,但却非常实用:不仅可以获得漂亮的轨迹图,还可以将理论分析与实验相结合.

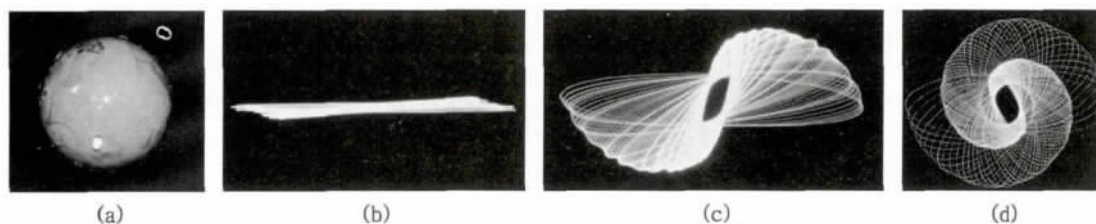


图1 发光摆球(a)及其在不同初始条件下的运动轨迹(b)~(d)

2.2 课堂“误操作”产生的新现象——超声信号畸变^[6]

空气中声速的测定是大学广泛开设的物理实验课程。在声速的测定实验中, 学生使用压电陶瓷(超声探头)来实现电信号到超声波的转换。正常情况

下, 应该将一个 40 kHz 的正弦信号加载到超声探头上。但是在课堂上, 一个学生“误”将正弦信号切换到 40 kHz 方波信号上, 发现本来规则的方波发生了畸变, 如图 2(b) 所示。

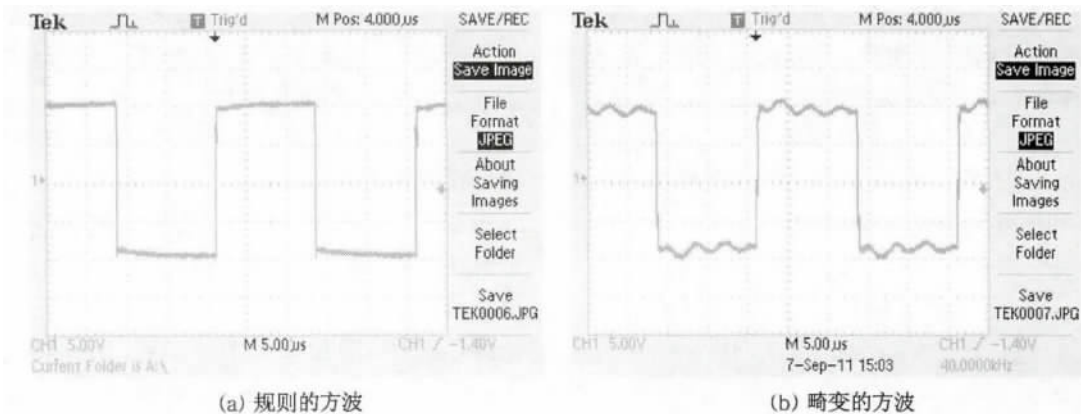


图 2

经过仔细的思考和实验验证, 我们发现压电陶瓷会强烈吸收 268 kHz 左右的高频信号, 从方波信号的傅里叶展开可知, 当方波缺少了它的高次谐波分量, 会出现波形失真。学生的一个偶然“误操作”, 只要不放过它, 就能拓展出新的实验内容——用超声探测器研究 Gibbs 现象。

2.3 将经典物理实验拓展到探究性试验——驱动摆和节拍器^[7-9]

早在 1665 年德国科学家惠更斯就发现耦合摆钟的同步现象(图 3(a))^[10]。现在耦合摆和驱动摆已成为一个常见的物理演示实验仪器, 演示受迫振

动的基本规律。当驱动频率在系统的固有频率附近时, 会形成共振, 振动幅度达到最大。但是一般的驱动摆都采用一个摆长可调的单摆作为驱动, 因而驱动时间很短, 可控性受限。我们改用步进电机来驱动不同摆长的单摆, 改变步进电机的驱动频率就可以观察到幅频效应和相频效应。进一步, 如果能将相邻的不同摆长的单摆耦合起来, 又会出现什么有趣的现象呢? 学生们经过反复尝试, “奇思妙想”地用小磁钢将相邻的单摆耦合起来, 使单摆在摆动过程中互相吸引或者排斥, 形成耦合的驱动单摆, 如图 3(b) 所示, 就可以研究耦合强度对单摆的影响。

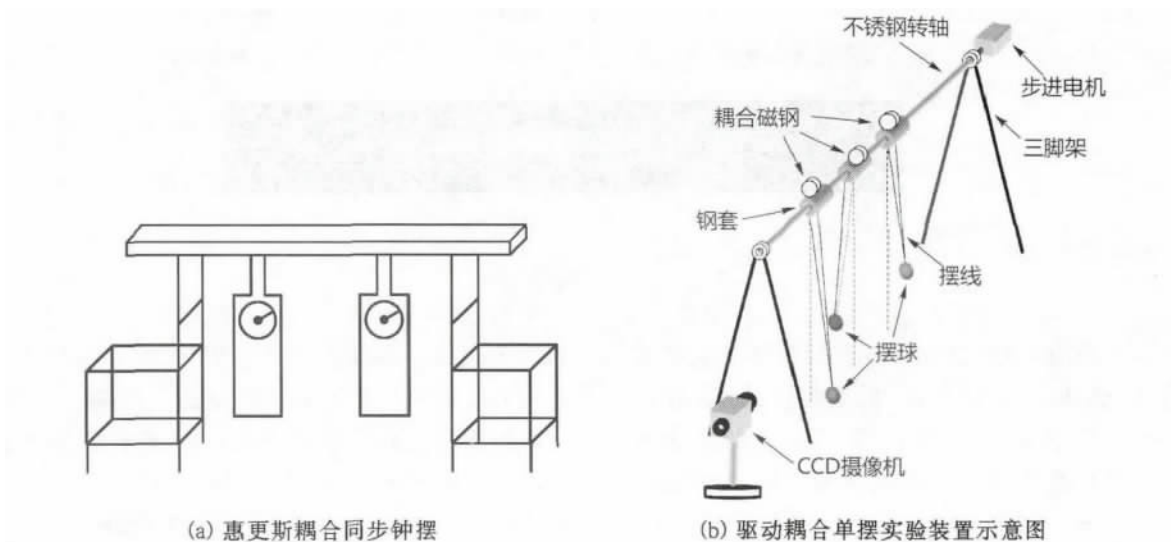


图 3

另外一种耦合机械摆是将几个音乐节拍器(弹钢琴时用来定乐曲节奏快慢的机械装置,与摆钟结构类似,可看作摆长可调的倒摆)放在同一个木板上,木板下用两个圆筒支撑.当节拍器摆动时,由于动量守恒,必然导致木板左右晃动,因此节拍器之间会互相影响,如图4所示.在不同的条件下,可以看到它们之间会形成完全同步、反向同步、准周期、相同步等各种动力学状态,实验现象非常丰富.通过讨论多个节拍器在滚筒与地面的摩擦力变化时对产生同相同步和反相同步的影响^[9],发现摩擦力较大时,产生反相同步的概率不断增加.

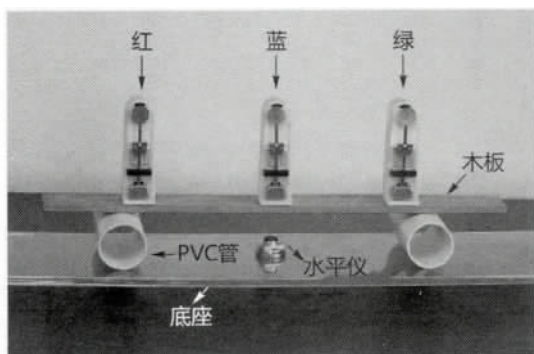


图4 PVC管上的音乐节拍器的同步实验

2.4 复杂实验现象的深入浅出——毛细管中的光学^[11-43]

干涉与衍射实验是大学物理实验的重点内容,各种缝孔的衍射也是研究光的波动性的必修内容.然而只学习和验证各种规则缝孔的衍射现象就显得枯燥乏味.一根医院里验血用的玻璃毛细管,其结构较复杂,光学现象非常丰富,非常适合培养学生的动手能力和分析问题的能力.

如图5所示,经一束 He-Ne 激光照射后,装有液体的毛细管(图5(a))会出现复杂的衍射光强分布现象.为了简化计算,先将黑墨水充入玻璃毛细管中,就看到如图5(c)的具有中心对称的光强分布.经过分析,毛细管的干涉可看作是两个虚点光源(图5(b))形成的干涉条纹,由此将复杂的干涉分析简化为学生们在“大学物理”课程中就很熟悉的双棱镜虚点光源模型,深入浅出、学以致用.用双虚点光源模型测得的毛细管的外径与读数显微镜直接测量的结果相比,误差小于0.1%.若毛细管内装有透明液体,以上的分析思路也适用,可进一步测量液体的折射率等等参数,但是光程的计算将复杂得多.

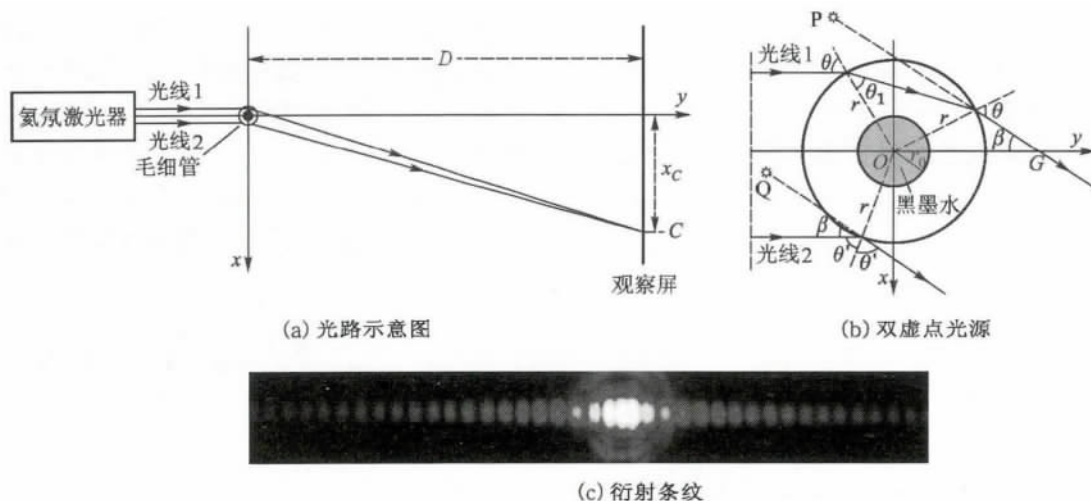


图5 毛细管的远场衍射

沿用上面的光路,如果将观察屏足够靠近装有透明液体(例如酒精、甘油等)的毛细管,如图6(a)所示,用一只白色的聚酯快餐汤碗(直径约为10 cm)来观察光强的分布,却可观察到图6(b)的阶跃型光强分布.利用光线追踪法,仔细分析图6(b)

的A、B、C 3个阶跃点的产生机制,可得这些光强阶跃临界点的角度与毛细管管壁的折射率、内外径之比和液体的折射率有关.测量出这些角度,就可以计算出以上管壁折射率、内外径之比和液体的折射率等参数.该实验仪器简单,测量精度较高.

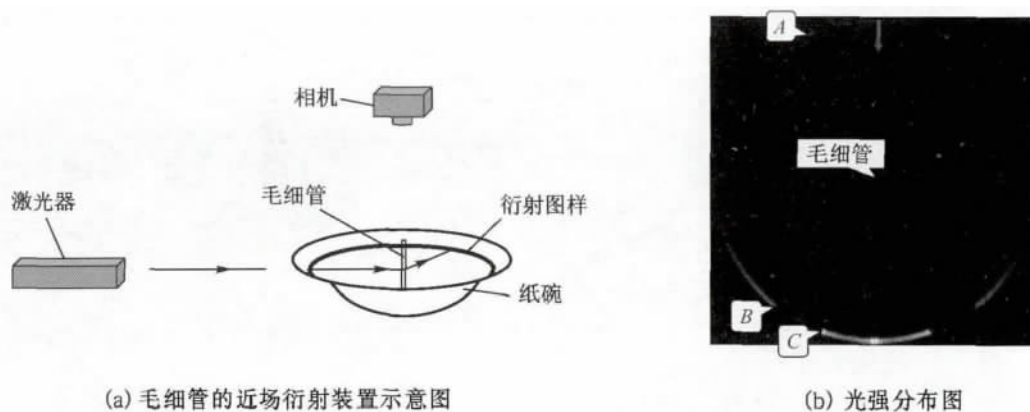


图 6

2.5 揭开“黑匣子”里的秘密——波片的厚度和级次^[14]

在光的偏振实验中, 要想获得很好的圆偏振是非常困难的, 尤其是大学物理实验中使用的 $1/4$ 波片精度一般都不高, 得到的大多是椭圆偏振光, 如图 7(a) 所示. 经过分析, 发现波片的厚度误差可能是主要的原因, 但是, 又如何能验证这一想法呢? 由于波片已被封装, 无法进行直接测量, 通过反复测试,

学生们想到使光线斜入射进入波片的方法, 并将波片在分光计上连续旋转以改变入射角, 即可得出波片的绝对厚度和级次. 光路分析如图 7(b) 所示, 斜入射时引起出射光的光程差比正入射时大, 从而改变了波片的相位差. 经过简单的理论分析, 即得到光程差与入射角的关系, 从而可以测量波片的绝对厚度和级次. 这种方法的实验精度很高, 可使偏振实验有一个非常好的拓展内容.

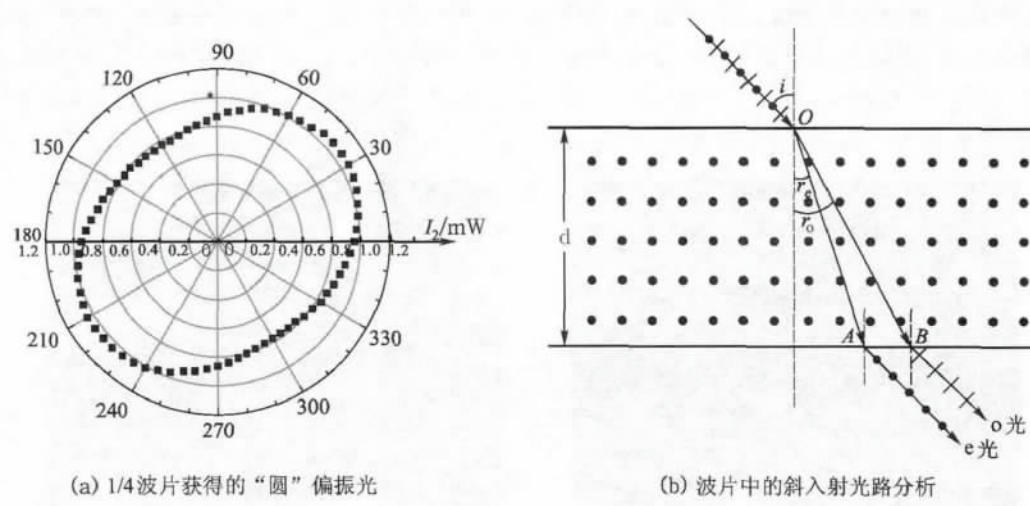


图 7 光的偏振实验的改进

2.6 价廉实用的测量装置——鼠标探测到扭摆中的混沌^[15]

机械摆的混沌运动是一个十分有趣的实验, 目前已有的记录扭摆混沌轨迹的装置是外加一个位移传感器, 而精密的位移传感器不仅昂贵, 而且也会影响到系统的平衡性, 所以在现有的大多数扭摆仪器中, 都是通过光电门来记录最大振幅和周期, 无法满足连续记录扭摆混沌运动轨迹的实验需要. 为解决

这问题我们用本科生常用的霍尔元件和光电鼠标自搭了一套摆角测量的系统(图 8(a)), 不仅能够实时测量扭摆的摆角, 而且通过计算机软件可对扭摆混沌运动进行实时的图像跟踪和记录(图 8(b)). 鼓励学生利用身边常用的器件来开发用于物理实验的测量技术, 既让学生感受到熟悉和巧妙, 同时也拓展了学生的创新思维.

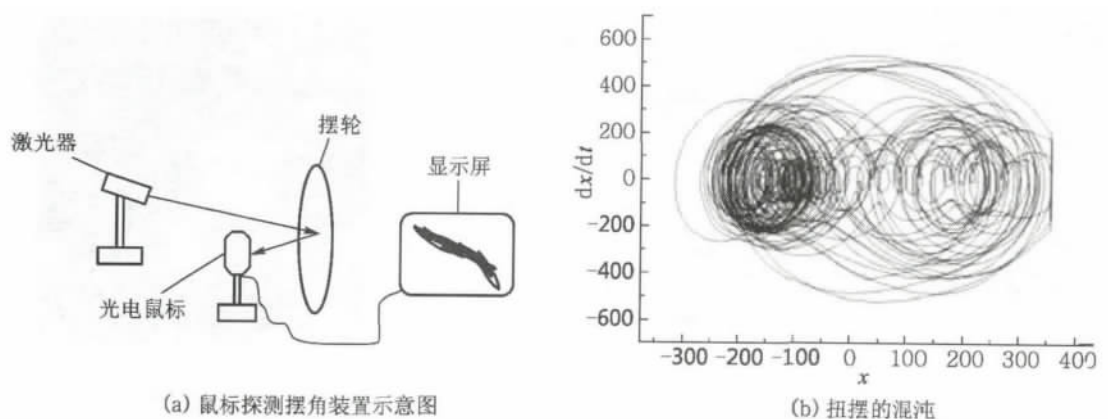


图8 鼠标采集的扭摆中的混沌

2.7 “计算物理”与“物理实验”两门课的融合——电光效应中锥光干涉图样的数值模拟

在物理实验中,有些实验现象非常复杂,例如分析心肺节律同步信号^[16],也有些实验现象比较简单,但与理论的结合难度较大,这就给学生的理解增加了难度.前面提到的复杂单摆、耦合摆实验,仅有实验技巧和图像的记录是不够的,还需加强理论分析和对相关问题的一般性解释.在光学实验中,也有一些实验现象简单,但理论分析并不容易,如毛细管的干涉、衍射现象和光强分布就需要用到光线追踪法计算光程差.当然,光学实验中更常见的是光学图像很复杂,理论分析就更难了.比如,在常规的迈克耳孙干涉实验或法布里-珀罗干涉实验中,学生往

往对干涉条纹变化规律的理解不够深刻;晶体的电光效应实验中,干涉图样非常复杂,要从理论和公式上分析这些干涉图样,即使是单轴晶体的干涉图样,也必须经过较多的光路分析和计算才能得到;对于双轴晶体的干涉图样,更是难以入手.为了解决这些问题,我们发现,如果采用计算物理的数值模拟方式来仿真这些现象,可以降低理论分析的难度,使得这些问题迎刃而解,而且物理图像清晰,参数的设置和变化更加广泛.图9给出了一个学生模拟电光晶体加偏压后的干涉图样与实验结果的对比图,可以看出,理论与实验非常吻合.通过这种方式,可以很好地帮助学生理解这些现象,也能够大大提高学生学习计算物理课程的兴趣.

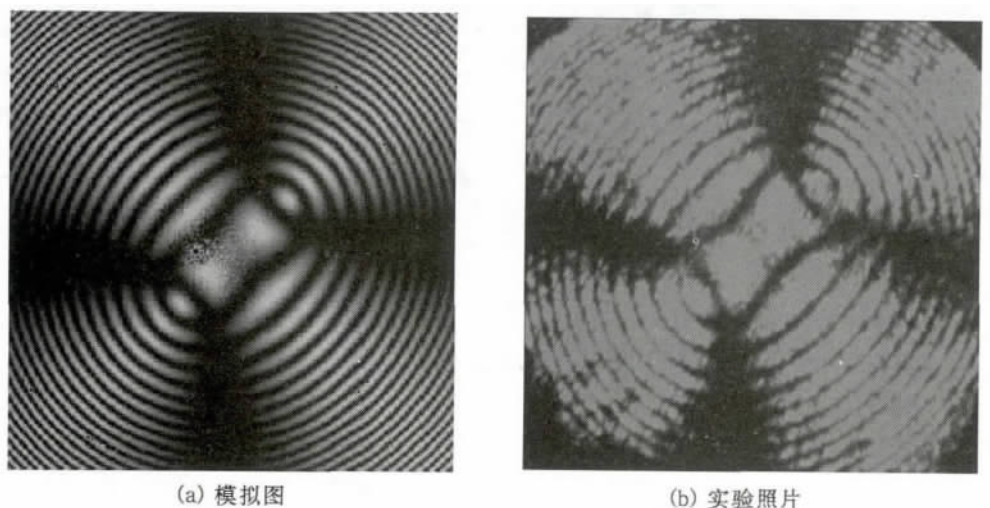


图9 电光晶体加电压后的锥光干涉

2.8 移植最新科研成果到基础物理实验中——混沌加密通信^[17]

随着科学技术的发展和教学改革的深入,混沌加密通信实验已经逐步进入了大学物理实验室.由

于混沌信号具有非周期性、宽频谱、类噪声和长期不可预测等特点,所以在保密通信领域有着明显优势.我们结合本校信息通信的学科特点,与成都世纪中科共同开发了混沌通信实验仪,实现了模块化的多

种混沌加密实验内容,具体包括:自搭 Chua 电路,认识混沌信号特点;测量非线性电阻的伏安特性曲线;电路混沌的同步实验;模拟信号加密通信实验;数字信号加密通信实验(键控模式)等5项.在该套实验装置中,考虑到学生实验需要良好的可视性和对比性,我们采用 LabVIEW 软件和数据采集卡自编了一套软件.利用采集卡的8个通道,可同时观察和记录

不同系统的相图、加密前的信号、加密后的信号等,在计算机上同时可看到不同混沌的相图和信号的频谱,大大简化了实验设备的需求(替换了3个示波器),提高了实验效率.该实验将我校的学科特色与基础物理实验教学结合起来,激发了学生学习物理实验的兴趣(见图10).

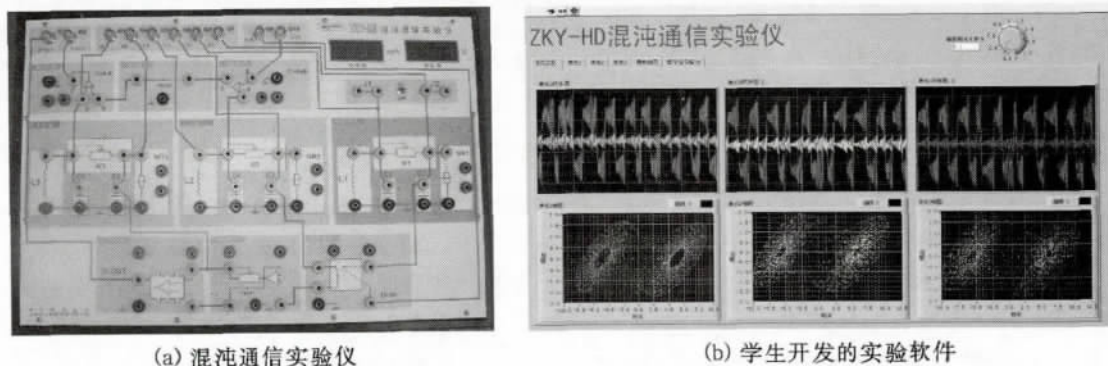


图10

3 教学实践效果

近年来,我们在“大学物理实验”课程教学过程中开展的探究式科学教学实践,结合计算物理工具和方法及现代测试技术,以兴趣为驱动,以创新为导向,指导本科生参与物理实验教学研究,取得了丰硕的教学成果.在最近两年时间里,通过研究新颖、异常的物理实验现象,我们指导本科生在国际顶级物理教学研究期刊《欧洲物理杂志(European Journal of Physics)》上发表了6篇论文^[5-8,11,14],在《美国物理杂志(American Journal of Physics)》上发表了关于利用毛细管衍射测量液体折射率的文章^[12].另外还在《Chaos》和《Applied Optics》等国际SCI期刊上发表了论文^[9,13].与此同时,我们还带领本科生积极参与到物理实验教学仪器的开发和研制工作中,在全国物理实验教学仪器评比中获得1个一等奖和1个二等奖的好成绩,在全国物理实验学生论文的评比中获一等奖1项.在教学仪器研发过程中,我们申请国家发明专利4项,已授权3项.混沌加密通信实验仪已在国内30余所高校中推广使用.最为重要的是,通过有意识的系列训练,学生的动手能力和创新意识得到了很好的锻炼和加强.在近3年的北京市大学生物理实验竞赛中,我校获得“三连冠”的成绩——一等奖获奖人数和项目数都是所有参赛学校的第一名.

虽然我们在本科生探究式科学教学模式的研究

与实践方面取得了初步的成效,但教研融合并非易事,还有许多问题亟待解决.例如,如何保障稳定的教师队伍?如何逐步扩大科研训练计划的受益面,直至所有的本科生都能有机会接触科学研究?如何使本科生科研训练获得学校和教育部门的足够重视,搭建更加完善的科研平台等.这些问题都需要我们今后深入地探索,需要教学政策和制度的支持和保障,需要本科生科研训练计划的持续推进.科研与教学的融合,不能只停留在理念上,还需要有更多的实证探索,学术研究和教学的一体化需要有更多的从实际问题入手的内容.

致谢:感谢北京邮电大学青年教师创新基金和北京邮电大学大学生创新计划的资助,感谢参与探究式课程学习的本科生:曹寅文、宋慎义、李昂、曾静宜、仇琛、杨天宇、侯志博、游智鸿、胡一川和易正磊等同学,感谢实验中心蒋达娅、王世红、赵晓红、朱洪波、代琼琳、陈建军、尚玉峰和王鑫等老师和技术人员的参与和帮助.

参考文献:

- [1] 丁邦平. 探究式科学教学:类型与特征[J]. 教育研究, 2010, 369(10): 81-85.
- [2] 夏定元,徐华中,李琦,等. 构建基于问题研究的实验教学新体系[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(6): 8-10.
- [3] 王世斌, 郝海霞, 余建星, 等. 高等工程教育改革的理念与实践——以麻省、伯克利、普渡、天大为例[J]. 高

- 等工程教育研究 2011(1):18-23.
- [4] 刘宝存. 美国大学的创新人才培养与本科生科研[J]. 外国教育研究 2005(12):39-43.
- [5] Yang H J ,Xiao J H ,Yang T Y ,et al. A simple method to measure the trajectory of a spherical pendulum [J]. Eur J Phys 2011 32: 867-872.
- [6] Yang H J ,Zhao X H ,Wang X ,et al. An undergraduate experiment for the measurement of the speed of sound in air: phenomena and discussion [J]. Eur J Phys 2012 , 33: 1197-1206.
- [7] Li A ,Zeng J Y ,Yang H J ,et al. A laboratory experiment on coupled non - identical pendulums [J]. Eur J Phys , 2011 32: 1251-1257.
- [8] Hu Q ,Liu W Q ,Yang H J ,et al. Experimental study on synchronization of three coupled mechanical metronomes [J]. Eur J Phys 2013 34: 291-302.
- [9] Wu Y ,Wang N CH ,Li L X ,et al. Anti - phase synchronization of two coupled mechanical metronomes [J]. Chaos , 2012 22: 023146.
- [10] Marcin K ,Krzysztof C ,Przemyslaw P ,et al. Synchronization of clocks [J]. Physics Reports 2012 517: 1-69.
- [11] Hou Z B ,Zhao X H ,Xiao J H. A simple double - source model for interference of capillaries [J]. Eur J Phys , 2012 33: 199-206.
- [12] You Z H ,Jiang D Y ,Hou ZH B ,et al. Analysis of light scattered by a capillary to measure a liquid's index of refraction [J]. Am J Phys 2012 80 (8) : 688-892.
- [13] You Z H ,Jiang D Y ,Jakob S ,et al. Characteristics and applications of two - dimensional light scattering by cylindrical tubes based on ray tracing [J]. Applied Optics 2012 51(35) : 8341-8349.
- [14] Hu Y C ,Yi Z L ,Yang H J ,et al. A simple method to measure the thickness and order number of a wave plate [J]. Eur J Phys 2013 34: 1167-1173.
- [15] Jiang D Y ,Xiao J H ,Li H H ,et al. New approaches to data acquisitions in torsion pendulum experiment [J]. Eur J Phys 2007 28: 977-982.
- [16] 曹寅文 ,宋慎义 ,肖井华. 运动后人体心肺节律同步关系及信号的耦合方向[J]. 物理学报 2010 59(7) : 5163-5168.
- [17] 李海红 ,代琼琳 ,王世红 ,等. 一种简单的基于蔡氏电路的数字加密通信实验 [J]. 大学物理 2006 25(9) : 39-42.

The exploration on the integration of teaching and scientific research to advance them promote each other

XIAO Jing-hua ,YANG Hu-jiang ,LI Hai-hong

(School of Science ,Beijing University of Posts and Telecommunications ,Beijing 100876 ,China)

Abstract: To train the innovative talents ,we have realized the integration of teaching and scientific research based on the course of “College Physics Experiments” for the natural science or engineering undergraduates. Through innovation practice activities in and out laboratory courses ,the undergraduates together with their teachers researched and developed a series of innovative experiments and published some of their works with high level on the international teach - researching journals. These works deliver to those undergraduates ,who have made efforts , a peek experience and advance teaching and scientific research to promote each other in the fundamental practice courses.

Key words: scientific research for the undergraduates; inquiry - oriented science teaching; physics experiments