

提高主动性、参与性和学习效果的PhET仿真教学软件

Educational simulations that enhance motivation, engagement, and learning

Carl E. Wieman^{1,1)} Wendy K. Adams^{2,†} Katherine K. Perkins³

(1 Department of Physics and Graduate School of Education, Stanford University, Stanford CA 94305, USA)

(2 Department of Physics and Astronomy, University of Northern Colorado, Greeley CO 80639, USA)

(3 Department of Physics, University of Colorado, Boulder CO 80309, USA)

丁小冬^{††} 译 葛惟昆 校

(清华大学物理系 北京 100084)

2014-04-25收到

† email: Wendy.Adams@unco.edu

†† email: dingza@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20140608

PhET 互动式仿真项目具有深厚的教学研究背景，拥有专业的开发团队，倡导教育资源的开放共享。作为一种源码公开的免费科学教育工具，它构思巧妙，制作精良，下载量超过1.1亿次，研究成果发表在美国 *Science* 等有影响力的刊物上。在充分利用这个教学工具的同时，为了更好地了解其设计思路，借鉴其宝贵经验，有效地改进我们的大课和实验教学以及教学软件开发，应《物理》编辑部的邀请，PhET的发起人Carl E. Wieman博士(斯坦福大学物理系以及教育学院研究生院教授，2001年诺贝尔物理学奖得主)，PhET项目前任联席主任Wendy K. Adams博士(北科罗拉多大学物理学与天文学系副教授、北科罗拉多大学科学教育项目(Science Education Programs)的负责人)和PhET项目主任Katherine K. Perkins博士(科罗拉多大学波尔多分校物理系副教授、科罗拉多大学科学教育计划(Science Education Initiative)的负责人)联合为《物理》撰文，与读者分享他们在物理教学研究中的成果和经验。——编者注

PhET 互动式仿真软件项目共开发了超过125个精心制作的仿真软件用于科学教育。这些仿真软件可以在线免费获取，直接在浏览器上运行，有77种语言版本，可以很方便地以多种形式纳入教学环节。对这些软件的设计、使用和有效性方面进行的深入研究表明，互动式仿真软件是一种独具特色、功能强大的教学技术手段，它们能非常有效地适用于宽广的范围，可以涵盖从

小学到大学各个阶段。它们之所以有效，最关键的原因是学生觉得仿真软件可以使他们能以有趣且主动的方式参与学习，有效地探索和学习科学知识，其思路过程非常类似于科学家从事科学研究。

1 引言

计算机和网络技术对我们的生活产生了巨大的影响。如何利用它

们来提升教学效果，也引发多方关注和思考。这里，我们介绍一种采用这种技术的独特的教学工具——应用于科学教育的互动式仿真软件。在多数情况下，新技术在传统教学中仅仅体现在新的信息传递工具的使用上，例如，面对电脑就可以聆听一堂课而不必面对面。但这种方式充其量也不过是以较低的成本达到与课堂教学同等的效果。与此相关的非常有限的研究工作表

1) Carl E. Wieman(卡尔·威曼)，美国物理学家和教育家，斯坦福大学物理系以及教育学院研究生院教授，2001年诺贝尔物理学奖得主。他对原子和光物理领域进行过深入的实验研究，他当前的关注重点是本科生的物理学和自然科学教育。他积极倡导“采用科学方法推进科学教育”，并率先利用实验技术手段来评估将不同教学策略应用于物理学和其他科学教学上的有效性。目前，他同时担任白宫科技政策办公室(OSTP)科学项目副主任。

明,采用这种技术并没有使教学效果取得明显的提高。相比之下,精心制作的互动式仿真软件,例如PhET,则提供了一种全然不同的学习方式。大量的研究工作表明,其教学效果相比传统方式具有明显的优势^[1, 2]。

PhET 互动式仿真软件项目(<http://phet.colorado.edu>)已经开发并测试完成了超过125个仿真软件。这些仿真软件广泛涉及了数学与自然科学领域,特别集中在物理学和化学方面。这些软件包含了自然科学在现实生活中的应用,例如激光和无线电波,也包含了量子力学和其他非常基本的科学概念。PhET 仿真软件适用于不同层次的学生。某些仿真软件,比如“电路实验”可以覆盖小学6年级到大学阶段(见图1)。

PhET 仿真软件的运行环境是标准的web浏览器,而且可以下载到本机。目前,我们正在进行这些软件的转换工作,以便能够同时支持触摸屏移动设备,包括支持Windows 8的触摸设备和平板电脑、手机这样的智能终端。仿真软件可以很方便地用于课堂演示和图示,辅以实验室操作和家庭作业。一个典

型的仿真软件是比较精细的程序,包含1—2万行源码,并经过对学生的反复测试。2013年,PhET 软件的下载量达到约4000万次,使用量的年增长率保持在50%。软件在设计时简化了软件界面文字的翻译工作,目前软件有77种语言,包含简体字和繁体字中文版,用户遍及全球范围的大学和中小学。

研究表明,要想拥有专家那样解决问题的能力和对科学的理解力,学生必须积极主动地培养这种能力^[3]。这需要刻苦努力,学生需要专注、主动,同时需要对学生的思考予以反馈。PhET 仿真软件可以凭借其他教学方法所不具备的优势,实现这个过程。对PhET 仿真软件的设计和应用,已经做了大量研究工作^[2, 4]。现在我们探讨一下PhET 项目所开发的仿真软件和利用它们做的一些教学研究。

2 PhET 仿真软件——一种教学模型

需要强调的是,这些教学仿真与科学仿真非常不同。它们是仅为教学目的而设计的,旨在使所面向

的群体达到预期的学习目标。这往往意味着要忽略一些科学细节,并采用许多近似处理。看待PhET 教学仿真软件最好的方式,是把它当作一种有益于教学的理想模型,就像科学模型是在特定条件下针对特定用途的一种表达方式一样。例如,可以用原子核的液滴模型来计算相应的散射截面,而忽略包括相互作用的夸克等正确理论,因为对于这个特定问题,这种简化方法更加有效。同理,我们的教学仿真软件也得益于这种类似的简化方法。它们抓住了事物的本质,其表述方式对于学生的学习最为有用,这比如实地描述实际的客观世界更为有用,因为它们规避了不必要的复杂因素,这与采用液滴模型的简化方法一样。例如,在“电路实验”的仿真软件中,电路搭建正确并接通电源后,在导线中就会显示出单一的移动的电子流(见图1)。

科学素养的一个重要标志,是具有迅速识别并忽略那些不重要的因素,从而把注意力集中到若干最相关的因素上的能力。这种专业能力源于充分的训练和经验的积累,它成为科学家如何正确地使用科研仪器和处理实验结果的关键因素。它能使科学家避免被复杂情况所迷惑,而能注意到最本质的因素,据此来判断仪器正常与否以及解读实验结果。由于剔除了实际情形中许多不必要的复杂因素,教学软件提供了一个专业的筛选器。通过操作仿真软件,学生能很快地对现象建立起专业的思维模式,因此,当面对难度更高的仿真实验内容,或操作真正的实验室仪器时,他们就不会举足无措,心烦意乱;他们会像专业科学家一样专注于重要的因素而略去繁枝末节,尤其是,仿真软

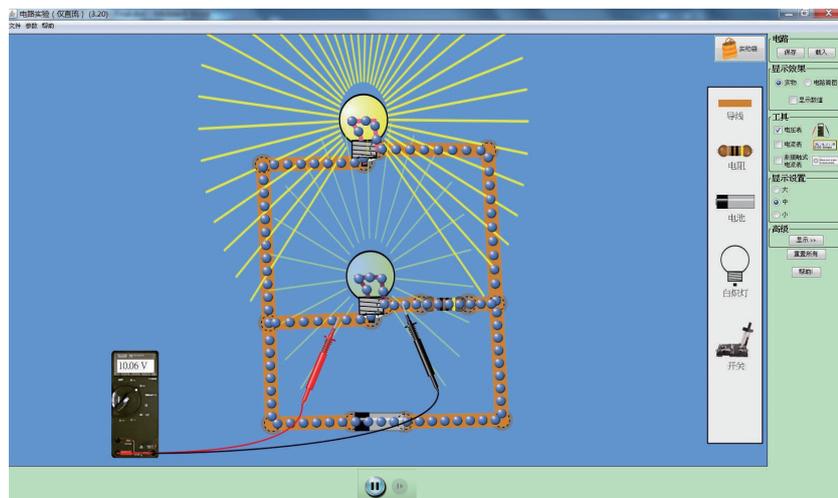


图1 电路实验(学生可以利用导线、电池、白炽灯、电阻和开关来搭建并测试自行设计的各种电路。电压表和电流表可用来测量电压和电流)

件让他们在1—2小时内就进入这种状态,其效率远远高于操作真实仪器所能达到的。

一个好的仿真软件,能发挥专家那样的辅助作用,能让学生有效地摆脱经验不足带来的局限,像科学家一样进行实验探索,却无需具备操控一台真正实验仪器所必须的经验 and 能力。学生与仿真软件的互动非常像是科学家在做科研实验。他们进行探索、试验并加深自己对科学概念的理解。仿真软件具有内在的谜题,并提供解决这些谜题的饶有兴趣的、互动的途径。

精心设计的仿真软件把学生的注意力集中在该课题的重要的概念上,避免概念混淆或使学生被不必要的、纷乱的信息所困扰。许多教材在这一点上出错,是因为教师不懂得,如果不分主次轻重地进行灌输,对于要理解全新的和不熟悉概念的学生来说是多么大的挑战。好的仿真比实际演示更能剔除那些不相关的和纷扰的信息,从而提高学习效率。一旦学生通过学习提供概念框架的仿真软件,从而理解了相关的课题,他们就不容易再被不重要的细枝末节所分心和困扰。

对于学生来说,掌握科学模型的本质和如何应用这些模型是非常重要的。仿真软件可以而且应当起到这方面的作用。当学生用仿真软件学习了某个概念,并且建立了研究目标的思维框架时,教师可以根据学生的理解情况来继续探讨这个模型的局限性。如果在学生理解基本概念之前就讨论其局限性,那么学生会感到混乱和困扰。

为了揭示模型的局限性,教师

可以说明这些模型不是严格替代现实世界,而是现实世界的简化但理想的描述,因为它抓住了在一定环境下事物的本质。在另一些条件下,这个模型可能会失效而被另一个更复杂的模型所取代,这与科学上的模型完全一样。许多仿真软件很明白地体现了这一点。例如,当“电路实验”刚启动时,导线和电池的内阻均为零,当学生理解了欧姆定律的基本概念后,再对电路中的内阻进行设置。

3 科学探索

学生使用仿真软件时,如果出现未曾预料的情况,类似于科学家做实验时的情形,学生们会关注此情况并试图弄明白,通过改变参数作进一步探索。他们对所发生的现象建立自己的心智模型,然后测试这个模型。经过不断摸索,他们头脑中的模型趋近于正确的科学模型。仿真软件经过精心设计和测试,确保能达到这种效果。即使学生在知识背景上存在很大差异,也都能够从仿真软件中进行有效学习,因为任何的改变都由学生来控

制,科学道理也可以直观和可视的方式展现出来。仿真软件可选择的难度等级,就像电子游戏中由玩家设置的难度等级一样。因此,不管水平如何,仿真软件都有与学生水平相适应的等级,都可以具有挑战性并且会取得成功。

而这与学生在实验室上课的方式非常不同。在实验课上,他们很少能做真正的实验研究。在典型的实验课中,学生知道实验结果是设计好的,所以他们的目标是尽快找到实验结果。而对如何真正从事实际的研究却不在考虑之列。这并不是学生的错——它是实验课的讲授和实验的设计方式带来的直接后果,是学生做出的自然而然的反应。下面,我们来探讨仿真实验是如何取得预期的教学效果的。

图2体现了PhET仿真实验所具有的共同特点:(1)用熟悉的物件来建立现实世界中的关联——这里就是白炽灯和条形磁铁;(2)让不可见的物体可见——线圈中电子的运动以及磁铁运动时磁场的变化;(3)对于一个科学过程,可采用多种方法表示——用移动的电子、白炽灯的亮度或电流表的读数来表示电流;

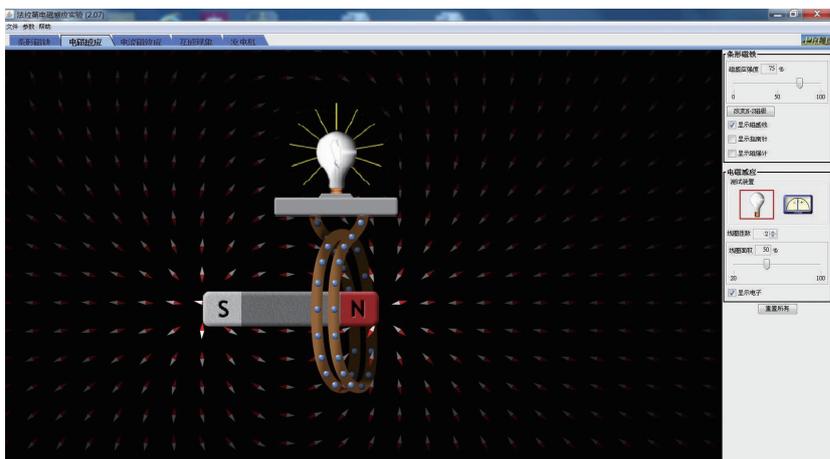


图2 法拉第电磁感应实验(在多个选项卡中,学生可以研究条形磁铁、电磁感应、电流磁效应、互感现象和水力发电)



图3 原子模型(学生使用电子、质子、中子的任意组合,来构建一个原子。第二选项卡是一个游戏,考察学生是否理解离子和原子的差异)

(4)许多重要参数可以直接改变——线圈的匝数,移动磁场强度的控制滑块,或改变线圈的面积;(5)用于定量测量的仪器——磁感应强度测量仪;(6)图像已经通过了学生测试,确保他们正确地观察和解释屏幕上所显示的图像;(7)建立了对于真实场景的简化模型,以提高教学效果。PhET仿真软件之所以能达到学习的目的,一个关键因素是学生受邀与仿真软件互动。所有重要参数的改变都很诱人且直观。当学生改变参数的时候,他们可以立即从图像上看到效果。通过反复测试,保证了学生所见的现象以及对所见现象的理解,与科学家在仿真软件中所见以及在科学上的解释相一致。这种互动性与可视性相结合的方式,对发展学生对相关的因果关系的直觉认识能力,以及使学生对仿真软件所表示的科学模型能正确理解,都有极大的帮助。

即使我们在现实世界中并不能直接观察到某些现象的许多特征(比如电子、质子、中子、电场、磁场和原理图等,如图3所示),但我们仍然可以用动态图像来描述科学家用于

理解这些现象的可视的心智模型。仿真实验所具有的让不可见的事物成为可见的能力,使学生能更快、更容易地学习相关概念。我们从大部分仿真实验中看到了这种作用,尤其令人惊异的是,它对学生理解与我们熟悉的自然现象似无明显关联的量子力学的基本原理特别有帮助^[5]。

4 学生面谈——界面的设计和测试

我们利用PhET仿真软件与250多名学生以有声思维(think-aloud)的方式进行了单独面谈。这些面谈揭示了学生是如何与仿真软件互动,为什么进行互动,这种互动又是怎样引导学生深入到学习过程中的^[6]。首先,我们发现仿真软件非常吸引人。学生(以及教师)像玩电子游戏一样自发地玩上几个小时。我们通过不断改进,确保在大部分玩的过程中都能取得好的教学效果。我们找到了仿真软件非常有趣(但学习思考过程太少)和教学效果好(不过有点枯燥,像家庭作业)之间的平衡。

我们总结出仿真软件之所以吸引人的几个共同特征^[6],许多都与

电子游戏的特征一样^[7]。其中包括:(1)由使用者直接操控的动态画面;(2)适度的挑战性,难易适中;(3)具有相当的复杂性,既引人入胜而又不会无所是从。其中第(2)和(3)项只有通过和学生反复交流和测试才能实现。许多仿真软件有多个选项卡,初级的难度最低,适合于初学者。水平较高的学生很快就会对初级的内容感到无聊,进而转向更为复杂和具有挑战性的内容上,而低年级学生会花较多时间在初级层次上,以免陷入困惑。

另一个重要特性是互动性。如果只限于观看,学生几乎不会去仔细思考到底发生了什么,不会了解其中的意义。只有在学生与软件互动,即在他们开始改变参数与观察变化、提出假说,向自己提出问题,并带着问题去主动寻求答案之后,学习的过程才真正开始。这与科学家的思维过程非常相似,而这种独特的教学优势是传统教学方法很难达到的。仿真教学从而具有非常独特的教学优势。

当学生进行这种自主性的探索时,可以看出他们从好的仿真软件中学到非常丰富的知识。比如,非理科专业、没有相关理论基础的学生,只花了不到一个小时的时间与“无线电波”仿真软件互动,就能对电磁场做出相当准确明白的解释。

我们对软件所进行的测试显示,具有专业理解力可以如何迅速地改变一个人对事物的感知。在“无线电波”仿真软件中,如果学生一开始就面对复杂的充满矢量符号的图像,他们总会一筹莫展,因此不喜欢这样的软件。但是如果一开始面对的是简单的启动界面——带有矢量符号的曲线,他们会很乐于

进行探索,并能很快理解随时间变化的电场和它是如何被移动的电荷所产生的。这样,当他们再看到复杂的充满矢量符号的图像时,他们就会理解它,发现它很有趣,很吸引人。

5 课堂研究——对学生学习活动的研究

PhET 项目也在不同教学场合下,使用仿真软件对学生的学习活动进行了相关研究。在量子力学课程中,采用“光电效应”仿真软件时,大约80%的学生掌握了概念,而采用传统的教学方法时,这个比例只有大约20%^[5]。采用“绳波”仿真软件进行课堂演示,在对概念的理解上要比传统的演示效果好得多^[4]。

在一项研究中,学生使用2个小时的“电路实验”仿真软件,与使用白炽灯、电池、导线和电表等电学仪器(与仿真软件中的相同)相比^[8],他们会做更多的即兴探索和实验研究。最重要的是,在期末考试中,这些学生对电流和电压概念的掌握程度高于同样情况下使用电学仪器的学生。

对于学生来说,一个重要的区别在于:用仿真软件进行实验与操作仪器不同,他们不必担心会损坏仿真软件,也不必担心会伤到自己。这是至关重要的一点,即仿真软件能帮助仪器操作经验不足的学生在进行“科学”探索时要安全和轻松得多,否则,许多的未知和忧虑会阻碍他们进一步学习。那些使用仪器的学生会经常停下来向助教提问,就源于这种困惑。使用仿真软件的学生则很少向助教提问,而是不断地与同伴讨论,并搭建许多不同的电路组合来验证他们的想法是否正确。另一个或许令人吃惊的现象是,学生更相信仿真结果的正确性,而在使用真实仪器做实验时,如果出现未曾预料的结果,他们的第一反应是仪器故障或人为的错误。我们对其他实验也做过这种比较。如同上面所指出的,学生们可能会被全然无关的细节所困扰,例如担忧一些诸如导线绝缘外皮的颜色是否会影响实验结果这样的问题。

在另一项研究中,是将“运动的图像”(软件名称,下同)、“弹道轨迹”和“能量滑板竞技场”的仿

真软件作为教学辅助,用在运动和能量的实验教学中。学生明确表示,仿真软件比实验仪器更有趣,它们更容易看清楚现象的发生过程。与“电路实验”一样,学生很少会用真实仪器进行实验探索。学生一再表示,仿真软件更好用,因为它们总是正确无误而且不会损坏,也不会像仪器那样会因为设置不当而工作异常。

经过精心制作和反复测试的仿真软件,提供了一种新颖、有效的科学教育工具。它操作性强,引人入胜,非常接近于实际的科学探索过程。它们能有效地改进人脑的认知过程,而这种过程是把科学观测变得更简单和更容易理解所必需的。因此,仿真软件不但是掌握科学知识的有力工具,同时也为学生今后从事真正的科学研究工作打下坚实的基础。

致谢 PhET 项目由 William 和 Flora Hewlett 基金会, O' Donnell 基金会, 美国国家科学基金会, Moore 基金会, 科罗拉多大学, C. Wieman 和 S. Gilbert 赞助。感谢全体 PhET 成员做出的极具价值的贡献。

参考文献

[1] Wieman C E, Adams W K, Perkins K K. *Science*, 2008, 322: 682
[2] see the research section of the PhET website. <http://phet.colorado.edu/new/research/index.php>
[3] Bransford J, Brown A, Cocking R (Eds.) *How People Learn: Brain, Mind, Experi-*

ence, and School. Washington, DC: National Academy Press, 2000
[4] Perkins K, Adams W, Dubson M *et al.* *The Physics Teacher*, 2005, 44(1): 18
[5] McKagan S B, Perkins K K, Dubson M *et al.* *American Journal of Physics*, 2008, 76(4): 406
[6] Adams W K, Reid S, LeMaster R *et al.*

Journal of Interactive Learning Research, 2008, 19(3): 397; 2008, 19(4): 551
[7] Malone T W. *Cognitive Science*, 1981, 5(4): 333
[8] Finkelstein N D, Adams W K, Keller C J *et al.* *Physical Review Special Topics-Physics Education Research*, 2005, 1(1): 010103