

# “物理教育研究”及其对美国 高等学校物理教学的激励\*

刘兆龙<sup>1,†</sup> 罗莹<sup>2</sup> 胡海云<sup>1</sup>

(1 北京理工大学物理学院 北京 100081)

(2 北京师范大学物理系 北京 100875)

2013-12-13 收到

† email: zliu@bit.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20140707

## Research on physics education and its impact on physics teaching in USA universities

LIU Zhao-Long<sup>1,†</sup> LUO Ying<sup>2</sup> HU Hai-Yun<sup>1</sup>

(1 School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**摘要** “物理教育研究”是物理学的一个新学科分支，诞生于美国，研究的是物理学习的过程以及教学活动如何影响该过程。它采用科学的方法探测、甄别学生学习物理课程中普遍存在的共性困难，揭示学习物理知识的动力学过程，评价学习效果，并在此基础上建立关于物理学习的认知理论，用于开发新课程、新教学方法和新的教育研究工具。在美国国家自然科学基金的资助下，美国的“物理教育研究”这一新的学科分支迅速成长，取得了较多进展，并且将研究成果应用于美国高等学校的物理教学之中。在中国，“物理教育研究”还是一个相对陌生的研究领域。文章概述了“物理教育研究”在美国的发展历史与取得的进展，以及它如何促进美国大学物理教学的进步，希望该文能为发展中国的物理教育和提高中国的物理教学质量提供有益的参考。

**关键词** 物理教育研究，大学物理教学，教学改革

**Abstract** Physics education research (PER) is a new subbranch of physics that emerged in the United States. It studies how students learn physics, probes and analyses the common difficulties in learning and applying physics knowledge, examines learning gains, and evaluates various teaching technologies and methods. Based on the data acquired, theories on physics learning are developed. Under support mainly from the National Science Foundation of the USA, PER is becoming a fast growing field of scholarly research bearing fruits, which have been used in the teaching of physics in universities. Now, PER is still a new research field in China. This article aims to introduce the reader to the field of PER. Topics include its brief history, what it is, its various methods and recent developments, and its impact on college-level physics teaching. The achievements in PER in the US may be of value for the physics education reform in China.

**Keywords** physics education research, college-level physics teaching, instructional reform

\* 北京理工大学教育教学改革项目(批准号: 2013095)

## 1 引言

大学物理教育是物理界关注的焦点之一。改革开放以来,我国的大学物理教育在教学规模、教材建设、师资队伍建设、授课技术等方面取得了较大的进展。当展望物理教育的未来时,我们自然会放眼全球、特别是美国这个教育高度发达国家的物理教育。2011至2012年,中国(不含港澳台地区)赴美留学生达19.4万人,本科留学人数比前一年增加了31%<sup>[1]</sup>。美国成为我国学生出国留学的首选国家。那么,美国的大学物理教育教学与我国相比有什么特色呢?本文将简要地介绍“物理教育研究”(Physics Education Research,简称PER)这一新物理学分支在美国的建立和发展,及其给美国高等学校的物理教学带来的新生机。对比我国大学物理教育现状以及面临的困难,在此基础上提出相应的建议,希望本文能为我国高等物理教育实现可持续发展提供参考。

## 2 “物理教育研究”——物理学新学科分支的诞生

物理教育是高等学校教学的难点之一。物理课程不仅难度大,而且涉及的学生人数多。在美国,大学物理教育也曾面临困境。据美国物理联合会(AIP)1995年的统计,美国授予物理学士学位的人数在6年内下降了15%,达到37年来的最低值。又有其他数据显示,在学过大学物理课程的30万美国大学生中,不到5%的学生继续选学物理方面的课程;此外,美国高等学校中大学

物理课程的设置还受到其他学科学者的质疑<sup>[2]</sup>。面对危机,1996年美国物理教师协会(American Association of Physics Teachers,简称AAPT)发出了全面复兴美国物理教育的倡议。但是,路在何方呢?

早在20世纪70年代初,美国华盛顿大学物理系的Lillian Christie McDermott提出,物理教育要建立在研究的基础之上,通过科学分析并解决学生在学习物理课程中遇到的共性困难,提高学习效果。在美国国家自然科学基金的资助下,她开展了物理学习与教育方面的研究,成功地开拓了物理教育研究的新方向。由于对美国物理教育的突出贡献,她获得了Robert A. Millikan Lecture奖(1990年),Oersted奖章(2001年),2013年她又获得了Melba Newell Phillips奖<sup>[3]</sup>。除华盛顿大学外,美国的北卡罗莱纳州立大学、马里兰大学、科罗拉多大学、以及俄亥俄州立大学等也都开始进行物理教育方面的研究。PER的研究队伍具备了雏形,学科建设随之拉开序幕。

1994年秋季,在北卡罗莱纳州立大学召开了首次PER大会,商讨PER的研究对象和PER专业研究生的课程设置。更重要的是,PER的先驱者们在会议上起草了一份白皮书<sup>[4]</sup>,递与美国自然科学基金委员会。白皮书的题目为《给美国自然科学基金物理部的建议——支持将“物理教育研究”作为物理学的子学科》。白皮书论述了PER在美国的兴起以及PER在物理学中的重要地位,指出了PER走研究型发展之路的必要性和面临的困难。白皮书中建议美国自然科学基金物理部像支持其他物理研究一样支持PER,提出每年需要约200万美元的资助

基金。

1999年,萌芽中的PER等到了春天,这年美国物理学会(APS)发表了“关于物理教育研究的声明”,承认PER是成长中的研究领域,支持在美国高校物理系中设置PER研究方向。声明中指出:物理系将会受益于拥有PER这样一个严密的研究领域,PER会使教学质量得到提高<sup>[5]</sup>。此后,PER得到了美国自然科学基金的大力资助。据不完全统计,2006至2010年,美国自然科学基金至少资助了262个PER项目,经费约为7250万美元,占PER总经费的75%<sup>[6]</sup>。

PER的发展除了经费的保障外,还必须有相应的学术刊物做支撑。经过努力,《美国物理杂志》(*American Journal of Physics*)首先大量发表PER的研究成果;之后AAPT旗下的杂志《物理教师》(*The Physics Teacher*)也开始登载PER文章。为了使PER在物理学科中拥有被公认的高水平研究成果,美国物理学会与AAPT联手,于2005年开始出版电子期刊《物理评论专辑——物理教育研究》(*Physical Review Special Topics——Physics Education Research*)<sup>[7]</sup>。*Physical Review*是享有很高学术声誉的杂志,此杂志设置物理教育专题,使从事PER的教师可以得到正确的评价,并专注于这个研究方向。

有经费的资助,有高水平的学术刊物,又有科学且实用的研究方向,使PER在十几年的时间内在美国发展了起来,图1直观地显示了PER小组在美国的分布。美国大学中,做PER的教师有高级别的研究项目,可以指导研究生(包括博士生),并发表高水平研究论文,他们既是研究者,又是优秀的教师。



图1 PER研究组在美国的分布图<sup>[8]</sup>

PER的诞生给美国的物理教育与教学带来了生机,使美国成为全球高等物理教育的领跑国家。

### 3 “物理教育研究”的研究对象与方法

PER研究的对象是学习物理的过程以及教学活动如何影响该过程,采用科学的方法探测、甄别学生在学习物理课程中普遍存在的共性困难,揭示学生掌握物理知识的动力学过程,评价学习效果,并在此基础上建立关于物理学习的认知理论,用于开发新课程、新教学方法和新的教育研究工具。PER是围绕学生和学习过程进行的,在我国是一个相对陌生的研究领域。由物理学家开拓出来的PER继承了物理学研究传统与方法,强调观察、数据采集与分析,并重视应用。

PER有实验和理论两个研究方向。实验方面的主要工作是采用定性、定量或两者结合的方法,来测试、记录并了解物理学习过程。定性的实验研究是针对少量典型学生进行,通过对学生进行访谈与跟踪调查,记录物理学习(包括学生的思维)过程。为了实时地了解学生的思维,可采用“边想边说”实验,即要求学生看到教师给定的测试后,

不停地用语言表达头脑中的思路,直至给出解答。通过录像、录音等方法记录实验全过程,并予以保存。定量的实验研究主要面向大量学生,使用标准教学测量工具进行各种测试,了

解学生整体掌握知识的平均水平,以分析、评价学习效果。现在,PER已获得了大量相关实验数据。400多年前,开普勒基于第谷毕生积累的天文学数据,归纳出了著名的开普勒三定律。今天,PER也在积累着各种关于物理学习的数据,为揭示和控制物理学习过程进行准备。

开拓PER的物理学家们明白,如果没有理论研究,PER不过就是为提高学生学习效果的一系列反复实验。PER理论研究方面以马里兰州大学的Redish, Hammer和Elby等人的工作最为著名,他们研究学生在解决物理问题时的先天直觉是什么,学生头脑中的概念是怎样演化的等问题。当然,PER理论还处于起步阶段,它的发展依赖于更多的实验数据和理论研究的进一步深入。

### 4 “物理教育研究”给高等学校物理教学带来的新生机

PER使物理教学理念、教学技术与环境、教学方法、教材等方面获得了许多进步,本文集中介绍物理教学理念、教学技术与环境这两个方面的进展,因为这两个方面国内较少涉及,且与美国差异较大。

PER使物理教学走上了科学发

展之路。教学方法的改革和教学的内容安排等等都必须经过实际教学过程科学化测试和检验,并以学生的学习收益为最终判断标准。也就是说,衡量教学的成功与否,不仅在于教师讲授了什么,更重要的是在于学生到底学到了什么?只有被大量教学实验数据验证的、使学生获得更高学习收益的方法才是令人信服的。翻开美国的《物理评论专辑——物理教育研究》、《美国物理杂志》等期刊,可以找到对物理教学的各种测量。例如:通过分析6000名左右学生的学习收益,发现交互式教学方法的效果优于传统的讲授式方法<sup>[9]</sup>;哈佛大学Mazur小组用十年的数据表明,Mazur发明的同伴教学法(Peer Instruction,简称PI)能够使学生更好地掌握物理概念和解决问题<sup>[10]</sup>。一些测量结果还挑战了传统的教学观念。在大多数人看来,掌握知识对于发展学生的科学推理能力是非常重要的。然而对学生科学推理能力和知识状况的实际测量表明,以传授知识为目的的传统教学,对于培养科学推理能力没有帮助<sup>[11, 12]</sup>。对于学生学习收益的测量数据表明,采用传统讲授式方法,学生的学习收益很低<sup>[13]</sup>;有趣的是,测量结果还显示,学生的学习收益和学习困难基本上与任课教师没有关系<sup>[13, 14]</sup>。

早在1933年,美国著名教授F. K. Richtmyer写道:“教学,我说,是艺术,而不是科学,……教学绝不能被称为科学<sup>[15]</sup>”。这仍然是目前很多人对于物理教学的认识。PER使这个观点在20世纪末和21世纪初被更新了。Carl Wieman是美国科学院科学教育委员会主席,2001年诺贝尔物理学奖得主,他在《知识的诅咒——为什么对于教学的直觉



经常失效》一文中写道<sup>[16]</sup>：“聪明的物理界已经找到了在初始直觉失效的领域取得进展的方法，例如，原子结构的发现。这个方法在于细致地、客观地进行实验测量并利用得到的数据完善我们的认知和直觉。对于物理教学，这意味着要着眼于显示人们是如何学习的数据，着眼于显示学生是怎样学到或学不到物理知识的数据”。物理教学也要从已有的各种数据出发，而不能仅凭直觉。

PER 将科学理念注入于物理教学之中。PER 催生了各种标准教学测试工具的研发。就像可以利用电压表显示电压值一样，教学测量需要测试工具。这些测试工具实际上是针对某一部分物理知识的诊断性测试题目，其功能类似于物理实验中的各种测量设备。美国已经研发出来的测试工具有：FCI(测试牛顿力学概念)、BEMMA(测试电磁学概念)、LCTSR(测试科学推理能力)等等<sup>[17]</sup>。当然，教学测试工具的有效性也要经过测试才能被认可。FCI 刚刚研发出来后，教师们感觉题目设计过于简单，有侮于学生的智商，以致于不乐意使用它。但是，实测结果与教师们的预期并不一致。哈佛大学的测试就是一个典型的例子。哈佛大学物理系 Eric Mazur 教授偶然看到了 PER 的相关研究，对自己的学生进行了 FCI 测试，结果是学生的得分很低，甚至低于期中考试成绩。Mazur 教授认为，期中考试比 FCI 更难、更复杂。惊讶之余，Mazur 教授着手改变教学方法，发明了著名的同伴教学法<sup>[18]</sup>。此后，标准测试工具的开发受到重视。除了测量物理知识的工具外，还有一些工具用于测试学生的态度和期望与学习效果之间的关系，如科罗拉多大学关于学习科

学课程的态度测试 (CLASS)，马里兰大学的物理期望测试 (MPEX) 等。尽管对于教学测量工具的使用方法等方面还有一些批评意见，但是总体上认可了测量工具在物理教学研究中的重要作用。

伴随着测量工具的开发，教学测量方法也逐渐定型，如判定教学收益的前测—后测法，统计理论在物理教学研究中的应用等等。Hake 提出了一种测量学生学习收益的方法<sup>[9]</sup>。他利用测试工具，在学习开始前进行测量，称为前测，以了解学习开始前的情况；学习结束后，再次进行测试，称为后测。他定义学习收益  $g$  为  $g = \frac{\bar{s}_f - \bar{s}_i}{T - \bar{s}_i}$ ，其中  $\bar{s}_i$  为班级学生前测平均分， $\bar{s}_f$  为后测平均分， $T$  为测试题目的总分。 $g \geq 0.7$  为高学习收益， $0.3 \leq g < 0.7$  为中等收益， $g < 0.3$  为低收益。将其与统计方法结合，便可以对学习的效果进行规范测量。这个方法已经被物理教育界的许多人用来做教学研究。

PER 的研究结果表明，交互式教学在许多方面都优于传统讲授式教学。为了开展交互式教学，在美国开发出了一种新教学技术——课堂交互反馈系统，也叫做 clicker。北美大约有 800 所大学、百余万学生曾使用 clicker 在课堂上学习。课堂交互反馈系统利用无线电发射、接收系统以及配套软件，实现了课堂上多个学生与教师间的集体实时互动<sup>[19]</sup>。课堂上，教师首先设置问题，之后学生通过手持发射器发射

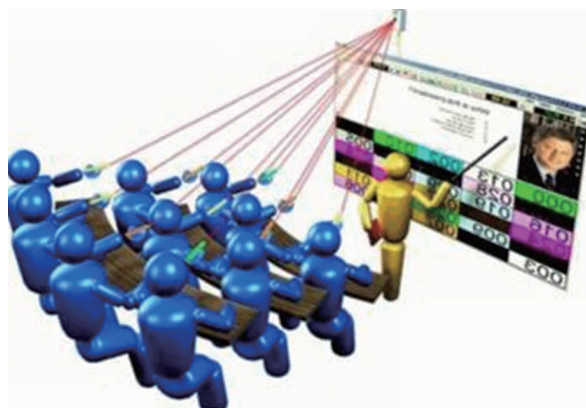


图2 clicker 工作原理示意图

答案，教师利用接收器接收来自学生的多路反馈信号(如图2)。经过计算机处理接收信号后，全体学生的结果被实时地显示在教室的大屏幕上，同时每个学生的反馈信息均被记录下来，逐节课积累后，形成各个学生的电子学习档案。该教学技术不仅支持了大班互动教学，而且还促进了教学方法和教材的改革，目前，课堂交互反馈系统中的题目已经出现在了美国大学物理教材中，供教师和学生使用<sup>[20]</sup>。

交互式教学的实施还导致了教室布局的变化，以讲台为焦点的传统教室布局被更改，代之以圆桌为主体，集讲授、课堂演示和学生小组学习等功能为一体的多媒体教室。北卡罗莱纳州立大学物理课教室布局如图3所示<sup>[21]</sup>。目前，麻省理工学院的 TEAL 教室，俄亥俄州立大学的 PALET 教室等均采用了类似的教室布局。此外，在美国还开发出了物理工作室、网络作业系统、三维立体演示等方面的教学技术。

## 5 结束语

近 20 年来，PER 带动了美国物理教育的发展，使美国大学物理教育走出困境。在美国自然科学

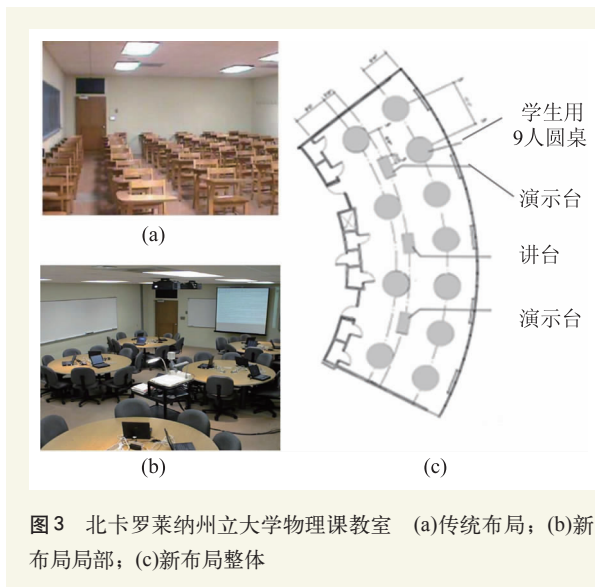


图3 北卡罗莱纳州立大学物理课教室 (a)传统布局; (b)新布局局部; (c)新布局整体

基金等经费的资助下, 高等学校中一些从事纯教学工作的教师转型为研究者。相比之下, 这20年来, 我国大学物理教育却一直在进行“改革”。改革主要集中于教师和教材方面, 忽略了对学生学习物理过程

师由于从事PER而回归科研队伍的趋势相反, 近年来我国许多高等学校物理学院(系)教师队伍中被分离出来了所谓“纯教学型”教师, 尽管他们承担教改项目、编写教材、进行教学研究工作, 也有一些教师

本身规律的深入研究, 似乎在延续着那个“名师出高徒”的古老信念。美国的大学物理教育为学生建造了脚手架, 供学生自己向上攀登。我国的物理教育似乎是要设法由教师将学生“抬举”起来。此外, 与美国高等学校从事物理教学的

开始进入PER研究的行列, 但是, 由于很难得到高级别的、经费充足的物理教学研究项目, 所从事的教学研究工作不能得到认可, 只能靠承担更多的授课学时来完成额定工作量。在研究经费上, 物理教育方面的自主选题研究几乎得不到我国自然科学基金的资助。自然科学基金项目中国家基础科学人才培养基金只受理获教育部批准的少数基地负责人的申请。这种状况导致了物理教学研究工作和研究队伍的萎缩。“物理教育研究”在美国的崛起与发展提示我们: 物理教育是艺术, 更是科学。将“物理教育研究”作为物理学的一个新分支学科, 以这个新分支学科的建设来带动物理教学的发展, 进而提高教学质量, 或许对我国也是一条振兴物理教育的可持续发展之路。

## 参考文献

- [1] [http://www.jyb.cn/world/cglx/201211/t20121122\\_518773.html](http://www.jyb.cn/world/cglx/201211/t20121122_518773.html)
- [2] <http://www.aapt.org/Events/crossroads.cfm>
- [3] [http://www.aapt.org/aboutaapt/mcdermott\\_phillips\\_pr20130226.cfm](http://www.aapt.org/aboutaapt/mcdermott_phillips_pr20130226.cfm)
- [4] <http://www.ncsu.edu/per/Articles/NSF-WhitePaper.pdf>
- [5] [http://www.aps.org/policy/statements/99\\_2.cfm](http://www.aps.org/policy/statements/99_2.cfm)
- [6] [http://proceedings.aip.org/resource/2/apcpcs/1413/1/211\\_1?isAuthorized=no](http://proceedings.aip.org/resource/2/apcpcs/1413/1/211_1?isAuthorized=no)
- [7] <http://www.ncsu.edu/per/Articles/Call-ToAAPT.pdf>
- [8] <http://www.per-central.org/>
- [9] Hake R. Am. J. Phys., 1998, 66 (1): 64
- [10] Crouch C H, Mazur E. Am. J. Phys., 2001, 69(9): 970
- [11] Bao L *et al.* Science, 2009, 323: 586
- [12] Bao L, Fang K, Cai T F. Am. J. Phys., 2009, 77(12): 1118
- [13] Halloun I, Hestenes D. Am. J. Phys., 1985, 53(11): 1043
- [14] McDermott L C. Am. J. Phys., 1993, 61(4): 295
- [15] Richtmyer F K. Am. J. Phys., 1933, 1 (1): 1
- [16] <http://www.aps.org/publications/apsnews/200711/backpage.cfm>
- [17] <http://www.ncsu.edu/per/TestInfo.html>
- [18] 埃里克·马祖尔著, 朱敏, 陈险峰译. 同伴教学法. 北京: 机械工业出版社, 2011
- [19] 刘兆龙等. 实验技术与管理, 2013, 30 (2): 150
- [20] Alan Giambattista, Betty McCarthy Richardson, Robert C. Richardson 著, 刘兆龙改编. College Physics: With an Integrated Approach to Forces and Kinematics. Vol. 1&2. 北京: 机械工业出版社, 2013
- [21] <http://perusersguide.org/items/detail.cfm?ID=4353>