



传统大学物理教学的困境及成因分析

张 萍¹ DING Lin^{2,3} 张 静²

⁽¹⁾ 北京师范大学物理学系, 北京 100875; ⁽²⁾ 长江大学物理与光电工程学院, 湖北 荆州 434023;

⁽³⁾ 俄亥俄州立大学教育学院, 美国俄亥俄 哥伦布 43210

摘 要 在课程改革的教师培训中, 直接教给教师一些新的教学方法的做法并不有效, 教师们常常坚持认为传统教学方法是最有效的教学方法。为此, 我们基于目前大学物理教学中的困境, 结合国际上认知科学研究和物理教育研究的相关结果, 剖析传统教学方法受到课堂注意力保持、记忆保持和只能实现低阶学习目标的限制, 研究和阐述传统大学物理课程教学中在概念理解、问题解决以及物理认知论 3 个方面存在的问题及原因, 让教师深刻理解传统教学方法的局限性从而认识到教学方法改革的必要性, 提高了教师培训的效果。

关键词 教学方法改革; 大学物理教学困境; 物理教育研究; 教师培训

IMPASSE OF CONVENTIONAL PHYSICS EDUCATION AND ITS UNDERLYING MECHANISMS

ZHANG Ping¹ DING Lin^{2,3} ZHANG Jing²

⁽¹⁾ Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875;

⁽²⁾ School of Physics and Optoelectronic Engineering; Yangtze University, Jingzhou Hubei 434023;

⁽³⁾ Department of Teaching and Learning, The Ohio State University, Columbus OH 43210, USA

Abstract When it comes to training in-service teachers on curriculum reforms, direct dissemination of new pedagogies often fails to be successful. Many teachers are likely to maintain such a view that conventional classroom teaching is the single most effective approach to education. To that end, this manuscript is designed to synthesize results from international research in cognitive sciences and physics education to address the difficulties of traditional teaching. Specifically, we analyze three key limitations resulted from conventional classrooms: learners' short attention span, limited memory retention, and low cognitive level of learning outcomes. We also situate discussions in the context of college-level physics teaching to identify and analyze the underlying mechanisms of student difficulties in conceptual learning, problem solving and epistemological understanding. It is through a series of theoretical and practitioner discussions that the authors hope to aim for teachers' increased recognition of

收稿日期: 2018-10-24

基金项目: 全国教育科学“十二五”规划 2015 年度教育部重点课题“借鉴与创新: 哈佛大学翻转课堂教学模式与创新应用的实证研究”(课题批准号: DIA150291; 湖北省 2017 年高等学校省级教学研究项目“基于形成性评价的混合式学习活动设计与实践研究”(2017276)的阶段成果。

作者简介: 张萍, 女, 教授, 研究方向为物理教育研究和科学教育研究, zhangping@bnu.edu.cn。

通讯作者: DING Lin, 男, 俄亥俄州立大学教育学院终身教授, 北京师范大学客座教授, 长江大学楚天学者特聘教授, 研究方向为物理教育研究和科学教育研究, Ding.65@osu.edu。

引文格式: 张萍, DING Lin, 张静. 传统大学物理教学的困境及成因分析[J]. 物理与工程, 2019, 29(1): 25-30, 34.

the drawbacks in conventional teaching and their elevated motivations for pedagogical change.

Key words pedagogical reform; difficulties of traditional physics education; physics education research; teacher training(professional development)

哈佛大学前校长德里克·博克(Derek Curtis Bok)说:“没有人能够通过命令教授们如何教得更好来改善教学,你不可能强迫教授们使用新的教学法。教授们必须明白他们原来的教学方法到底在哪里出了问题,必须理解并且接受一种不同的教学方法,同意并且愿意使用新的教学法,然后才会去运用它。”^[1]研究和反思传统大学物理教学中存在的问题,认识到问题的存在和原因是教师转变教学理念和明确如何进行教学方法改革的首要环节。

1 传统大学物理教学的困境

大学物理是针对理工科专业(非物理专业)的学生开设的物理课程,传统的教学法是教师按照教科书体系讲授其中的全部内容,通常教师会对教材做精细的加工,力求将每个概念和定律所涉及的方方面面都讲给学生,并且在课堂上尽可能生动地讲授自己准备的内容,希望通过自己的努力使学习内容易于学生学习和记忆。

依据学校不同,教学的效果和遇到的问题不同,在一些大学,大多数学生很努力地学习物理课程,但是教师常常发现自己在课堂上已经讲得很清楚的概念和题目,只要题目问题情景稍稍发生变化,学生就会表现出不知所措。而在另外一些学校,情况更糟糕:学生描述到“偌大的阶梯教室几乎每个座位都坐满了人,但所有人都在低头做自己的事情,没有一个人听讲。老师滔滔不绝地讲课,费尽全力不过上演了一出独角戏。”这里描述的情形也许不能代表所有的学校,但是很多一线教师都反映说他们的学生(非物理专业)认为物理非常难学、物理知识对自己将来的专业学习没有用、大多数学生本身对学习物理就没有兴趣。

通常情况下,教师都具备足够的职业责任感,不会对学生视而不见。但是由于学校对教师的要求越来越多,迫使教师疲于奔命,很少有时间反思和改进自己的教学,对于一个长期使用传统教学方法的教师来说,大多数教师都认为自己具有多年的教学经验,正在使用的教学方法是有效的。然而,大量已有的研究表明:讲授式为主的教学方

法的局限性导致上述问题的存在。下面我们从认知科学研究和物理教育研究的视角说明传统大学物理教学的困境原因。

2 认知科学研究视角:传统教学方法的局限性

以讲授为主的传统教学法的优势在于:教师提供了一种明晰、直接的途径帮助学生掌握学科知识。目前在很多学校教师的绩效取决于学生能够在标准化考试中取得很好的成绩,所以能否高效地向学生传授知识变得非常重要,讲完教材中的所有知识内容,让学生学会(记住)这些知识,在考试中取得好的成绩,是教学的重要目标。但是,认知科学研究表明传统教学法存在一些局限性,下面强调3个主要的方面。

2.1 讲授法只在实现低阶学习目标方面有效

按照布鲁姆的“教育目标分类法”,在认知领域的教育目标可分成:(1)知道(knowledge);(2)领会(comprehension);(3)应用(application);(4)分析(analysis);(5)综合(synthesis);(6)评价(evaluation),前3个是低阶目标,后3个是高阶目标。教育研究表明,传统的讲授为主的教学方法,只能实现低阶目标。布莱(Bligh)发现讲课只在传播信息方面有效,并且其效果与阅读等方法相当,不会更有效^[2]。迈克卡(Mckeachie)和库利克(Kulik)的研究表明:在促进事实学习方面,讲课优于讨论。在促进更高层次的推理能力、积极性和学习动机3个方面,讨论优于讲授^[3]。史密斯(Smith)对大学的多个学科的教学研究发现学生之间的相互作用促进学生批判性思维发展和积极思考的习惯,减少死记硬背^[4]。

2.2 学生课堂注意力保持时间有限

讲授式教学方法的前提条件是学生上课听讲,并且能“记住”。然而研究表明:随着讲课的进行,学生听课的注意力越来越低。斯图尔特(Stuart)和卢瑟福(Rutherford)对1353名学生的课堂注意力进行调查,数据表明:在课程开始后学生的注意力迅速集中,在10~15分钟时达到高峰,然后逐步下降,他们的研究结论是:使用讲授

法的课程最长时间应该限制在 30 分钟^[5]。彭纳(Penner)的研究结果是:学生在开始上课的 15 分钟内注意力保持率是 41%,30 分钟时的注意力保持率是 25%,40 分钟时注意力保持率为 20%^[6]。我们在教师培训中对中国大学的 2036 名教师进行调查,有 52%的教师认为,在自己讲课的过程中,有一半以上的学生的注意力可以整节课都保持在课堂上,但是在对 1321 名 985 学校的学生调查的结果是:83%的学生表示他们的课堂注意力保持率(学生听课时间占课堂总时间的比率)低于 50%,没有学生表示自己的课堂注意力保持率是 100%。由于教师的数据和学生的数据之间存在巨大差异,我们使用课堂观察的研究方法,对一些课堂秩序非常好的班级中的 89 名学生进行实地观测,得到他们课堂注意率保持率的平均值是 41%。这一结果表明,使用讲授法的教师往往过高地估计了学生对他们讲授内容的关注程度,事实是,即使是比较好的学生来到教室,平均地说也只有大约一半的时间在认真听课。认知心理学给出的解释是,人的注意力持续集中时间是有限的,平均在 15 分钟左右。布莱综述了 50 年中近百个关于大学教学的研究得出结论是:与单纯听老师讲课的学生相比,积极参与讨论的学生更集中注意力、更活跃、更深思熟虑,他们会花更多的时间对学习材料做综合和整理。^[2]

2.3 记忆保持时间有限

教师期望通过自己的精心讲授,学生能快速地记住这些信息。事实上,学生记忆的效果和记忆保留的时间都与教师们的主观期望相去甚远。学生在一节课结束时只能记住 42%的课堂信息,一周后仅能回忆起 20%的信息,一个月或者一年以后,学生保留和记忆的内容会更少^[7]。认知科学研究表明,长时记忆(long-term memory)是生成性、情景依赖、有结构并相互关联的,仅仅通过倾听教师的详细讲解很难形成长时记忆。因为人类记忆的局限性,详细讲解大量知识要点的教学方法收效甚微。

综上所述,传统的讲授方法更适合低认知水平的信息传递,这些信息需要学生听懂和记忆,但是在实施的过程中存在着课堂注意力保持和记忆保持两方面困难。为此,哈佛大学前校长埃利奥特(Eliot)在就职演说中曾说过:“填鸭式地传授知识就好像奋力把水撒在筛网里,即便水的质量再

好,还是哗哗流走了。”^[8]

3 物理教育研究视角:传统大学物理教学中存在的问题

物理教育研究(physics education research 简称 PER)是用科学研究方法研究物理教育中的实际问题,寻求有效解决方案,提高物理教育教学质量。PER 是物理学、认知心理学和教育学等多学科交叉的学科。国际上 PER 发展大约有 50 年的历史,取得了丰富的成果^[9]。借鉴国际上的相关研究,我们研究了导致传统大学物理教学困境的主要原因,包括概念理解(conceptual understanding)、问题解决(problem-solving performance)和物理认识论(epistemological views of physics)3 个方面。

3.1 概念教学中的问题

学生带着已有的概念走进课堂。这些概念往往与课程中的科学概念不一致,并具有顽固性,不易通过传统的教学方式消除,因而又被称为“迷思概念”(misconception)。物理迷思概念广泛地存在于学生中,这些迷思概念的存在造成新课程学习的障碍。学生头脑中的大部分概念框架来自于自己的日常生活经验,例如:基于一串钥匙比一张纸下落快的观察,学生中存在“重的物体比轻的物体下落快”的迷思概念。这些迷思概念可以解释学生日常生活中所观察到的许多现象,因此在学生头脑中根深蒂固,当教师按照科学体系讲授科学概念时,学生很难接受科学概念,因为在现实中很难消除空气阻力,观察到树叶和石头以相同的速度下落,从而理解所有物体都以相同速度下落的科学概念。即使是哈佛大学的学生在学习大学物理课程时也存在同样的问题,在一次力学的测试中,有一个题目问大卡车和小汽车碰撞时的它们之间的相互作用力哪个大,一个学生问课程的教授埃里克·马祖尔(Eric Mazur):“马祖尔教授,我是用你教给我的结果回答这个题目(牛顿第三定律的)还是用我自己的想法(大车施加给小车的力更大)?”^[10]马祖尔教授非常震惊地意识到在完成大学物理课程学习后,即使是成绩优秀的学生对知识的理解也竟是如此肤浅!在大学物理课程的教学,教授常常是按照物理的科学体系讲授课程,即使是有着多年教学经验的教师对学生的

迷思概念及其顽固性都缺乏认识。海斯顿斯(Hestenes)和威尔斯(Wells)等人的研究表明:“迷思概念的存在使得学生听不懂物理课,从而导致他们强行记忆一些没有关联的片段,做着没有意义的作业,使很多学生有厌学情绪。”^[11]

我们在课程改革的过程中让学生基于概念测试题进行小组讨论,通过聆听和分析学生讨论的录音,研究发现学生中存在许多错误概念。^[12]其中很多都出乎教师的意料,并且我们研究还发现有些错误概念也广泛地存在于教师中。使用传统教学方法讲授大学物理课程的教师很少了解学生的想法,教学过程中也缺少针对学生错误概念的讲解,教师按照科学体系讲解课程时,通过文字和语言把科学概念传递给学生,教师很清楚地知道自己讲了什么,但是却不知道学生是如何想的。学生被动地接受信息,当接受到的信息自己的想法不一致时,他们很少有机会表达自己的观点,坚持己见和冥思苦想通常是高风险的,为了考试得到一个好成绩,最“高效”的方法就是认同教师的讲解并记住它们,但是自己的想法依然存在,考试获得好成绩并不意味着对课程真正意义上的理解,学生不断获取专业知识是一个艰苦和长期的过程,传统的教师在向学生灌输经由自己精心筛选、包装的知识时,很少关注学生的情感、想法和观点,在这样学习的环境中,学生是被动地学习,常常没有兴趣、动机不强。

3.2 问题解决教学中的问题

戈德堡(Goldberg)和本多尔(Bendall)研究表明:“传统教学中,学生都把记忆性的、以公式为中心的问题解决方法作为学习物理的正统工具,他们缺少面对陌生环境利用所学的概念和定律进行推理的能力,因为他们的知识只是由零散的、少量的事实和公式组成,当遇到陌生的环境时,学生外显的还是他们的错误概念。”^[13]我们利用教室交互系统(classroom response system 简称 CRS or Clickers),设计使用配对题测试的方法,对中国学生进行测试,每对测试题涉及的物理规律和概念本质相同但问题情景不同,其中一个题目可以通过公式计算得出结果,另一个题目无需公式计算或者不能直接使用公式,图1和图2是CRS系统显示出的其中一对测试题的内容和测试结果。

我们使用这个配对题对大学物理专业四年级的学生进行测试,配对题中第一个题目学生回答

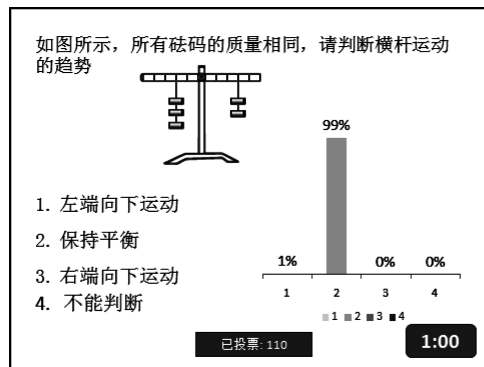


图1 杠杆原理测试题1和测试结果

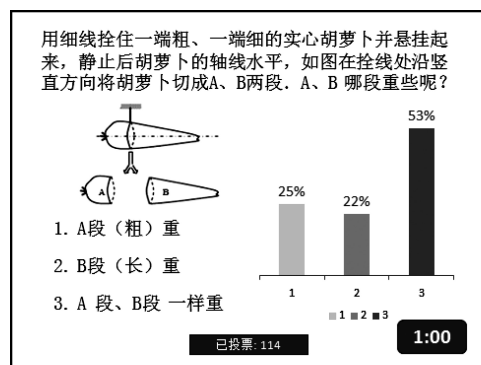


图2 杠杆原理测试题2和测试结果

的正确率是99%,这个题目涉及的杠杆原理是初中物理课程中的简单内容,对应的公式是 $F_1 L_1 = F_2 L_2$,这对于物理系的大学四年级学生来说实在是太容易了。配对题中的第二个题目——我们称之为胡萝卜问题,需要用到的物理规律与第一题是一样的,仅仅是物理情景发生了一些变化,它不能直接使用公式,需要先有一个简单的建模过程,测试结果只有25%的学生答对。其中有53%的学生错误地选择了两边的胡萝卜一样重的选项——外显出他们存在“两边平衡即等重”的错误概念。一个物理专业即将毕业的大学生居然不能用自己学过的一个简单的物理原理(杠杆原理)为自己选出一个大的(质量大)胡萝卜,这样的测试结果,值得物理教师反思:我们的教学是否真的有效?

传统的大学物理教学中,讲题、做题是教学中的重要环节之一,学习例题、做课后习题以及考试前“刷题”成了学习物理通过考试获得好成绩的有效策略,这些题目大多是训练学生使用公式求解方程,很少用到关于构建模型、提出假设、数量级估计……这些科学思维中的重要和基本的方法。我们的调查显示:许多学生更愿意使用习题解答

而不是习题集(没有答案)来复习物理课程,因为这样可以快速地获得解题策略来减少认知负荷降低学习成本,比起自主探索和在试错的过程中进行努力尝试,阅读和记忆更为轻松,同时也避免出错给自己带来的“负能量”。通过听教师详细讲解和利用习题解答刷题,学生通常可以获得很好的考试成绩,并自认为已经很好地掌握了物理知识,然而当他们发现自己所学的知识很难迁移到新问题情景中用于解决新问题时,会产生严重的挫败,认为学习物理没有用。

3.3 学生物理认识论的负向移动

20 多年来国际物理教育研究一直关注于研究学生的物理认识论——关于对物理的本质和物理学习方法的认知,学生对物理学本质的认知以及学习物理的态度对他们的学习会产生直接和重大的影响。例如:学生认为物理是由大量的概念组成,这些概念之间互不关联,在物理学习中,他们死记硬背大量的物理概念和机械地使用物理公式。相反,物理学专家坚信物理是由一些最基本的定律构成,大量的物理概念和原理都是以这些基本定律为核心,他们认为在物理学习时必须深度理解物理概念和原理与这些基本定律之间的本质联系。我们研究表明:使用传统的教学方法,教师常常“高效”地带领学生直接找到答案,可是学习物理时间越长,累积物理知识越多,对物理的认知水平却负向移动——学生的观点更加远离物理专家的观点,更向新手方向移动^[14,15]。因为,单纯地知识累加,无法让学生理解物理学是复杂的、一致的、简洁的和有组织的理论体系。国际上的一些研究结果与我们的一致^[16-19]。

事实上,大多数学生从传统的大学物理课程中获益很少。哈克(Hake)使用力的概念测试量表(force concept inventory 简称 FCI)对美国 62 所大学的 6542 名学习大学物理课程的学生进行研究,结果表明,使用传统教学法讲授物理课程,最好的学习结果是学生获得标准化增益(normalized gain)只有 23%。而使用互动教学方法学生的学习收益可以提升到 48%。^[20]

4 改革教学方法培养创新人才

目前大学物理教学中存在的一些问题,部分原因来自教师正在使用的传统的教学方法。在灌

输为主的教学方法中,教师按照课程的科学体系对课程内容进行精细加工,然后教给学生,希望学生学习并记住大量的教学内容,然而多数学生在考试后只能记住一些零星的知识,若是没有机会运用这些知识,残存的记忆也将消失。因此,仅仅学会知识对学生意义不大,因为知识很快就会被遗忘,教育的意义不在于知识本身而在于当知识忘了还剩下的那些东西。人们对具体信息的记忆往往很快消褪,与之相反的是兴趣、继续学习的能力和解决问题的能力等更容易维持。技术的进步,信息储存和重复性的劳动都可以由机器替代,和机器相比人的优势在于人具有创新能力——解决新问题的能力,因此在教学中培养学生分析、应用、综合、评估这些高阶思维能力是非常重要的。

多数教师都认同在传授知识同时培养学生能力和情感态度的教学目标,却很少思考如何做才可以实现这些目标。在课程改革中教师们讨论最多的是非物理专业的学生学习大学物理的必要性,大学物理课程应该讲授哪些内容,需要多少课时。然而教育研究结果表明:改革大学课程设置和教学内容对实现这些目标作用不大,改革教学模式和教学方法才是最有效的办法。因此国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)中提出:“创新人才培养模式。适应国家和社会发展需要,遵循教育规律和人才成长规律,深化教育教学改革,创新教育教学方法,探索多种培养方式,形成各类人才辈出、拔尖创新人才不断涌现的局面。注重学思结合,倡导启发式、探究式、讨论式、参与式教学,帮助学生学会学习。激发学生的好奇心,培养学生的兴趣爱好,营造独立思考、自由探索、勇于创新的良好环境。”

从 2010 年开始,结合我国教学实际问题,从创新人才培养目标出发,我们在大学物理课程教学过程中借鉴国际上先进教学经验^[21],研究设计出符合我国教育教学规律的翻转课堂教学模式——同伴教学法^[22],构建适合中国国情的大班课堂教学的互动和合作学习模式^[23]。同伴教学法是将教学任务中最容易的部分即知识的传递前移到课堂外让学生自主学习,实现低阶学习目标,充分利用课堂上教师和学生之间,学生和学生之间面对面的机会进行积极的社会化互动和合作学习,实现深度学习和能力培养(高阶学习目

标)^[24]。在教学设计中关注学生错误概念、激发学生主动学习、使用形成性评价。在 8 年的教学方法改革和实践中我们使用科学的量、质结合的研究方法对教学方法改革的效果进行实证研究, 研究结果表明: 大学物理课程知识学习中应用同伴教学法, 在激发学生学习兴趣, 实现学生自主学习、合作学习, 培养学生创造性思维、高水平推理、批判性思维等能力和培养创新人才方面都取得很好效果, 有效解决了传统大学物理教学中的问题^[14, 25-27]。近年来, 越来越多的物理教育实践者意识到传统教学方法的局限性, 在大学物理课程中进行教学方法改革, 取得了很好的教学效果。^[28, 29]

5 结语

一线教师通常很少关注教育研究者的研究成果, 更不会将其应用于自己的教学实践, 甚至很多教师认为自己从事教学工作多年自然是教育专家, 他们中有些人不认同教育研究是一个专业性很强的领域, 他们常常从非专业的角度对教育研究领域的研究成果指手画脚, 给出不当评论。由于这种不信任, 很少有教师愿意尝试将教育研究成果直接应用于自己的教学改革中。^[24]因此, 在课程改革的教师培训的过程中, 必须首先从专业性角度, 提供大量有证据和数据支撑的研究结论, 让他们理解传统教学存在困境和原因, 引发更多的教师通过反思而突破自我, 思考“怎样的教育才是好的教育。”

参 考 文 献

- [1] 曲铭峰, 龚放. 哈佛大学与当代高等教育——德里克·博克访谈录[J]. 高等教育研究, 2011(10): 1-19.
QU M F, GONG F. Harvard university and contemporary higher education——Interview with Derek Curtis Bok[J]. Journal of Higher Education, 2011(10): 1-19. (in Chinese)
- [2] BLIGH D. What's the use of lectures? [M]. England: Jossey-Bass Publishers, 1985: 105-106.
- [3] MCKEACHIE W J, KULIK J A. Effective college teaching [J]. Review of research in education, 1975, 3(1): 165-209.
- [4] SMITH D G. College classroom interactions and critical thinking[J]. Journal of Educational Psychology, 1977, 69(2): 180-190.
- [5] STUART J, RUTHERFORD R J D. Medical student concentration during lectures[J]. Lancet, 1978, 2(8088): 514-516.
- [6] PENNER J G. Why many college teachers cannot lecture [M]. Springfield, IL: Thomas, 1984.
- [7] GARDINER L F. Redesigning higher education. Producing dramatic gains in student learning. Eric digest[J]. Achievement Gains, 1994, 23(2): 46-50.
- [8] BOK D. Our underachieving colleges: A candid look at how much students learn and why they should be learning more [M]. NJ: Princeton University Press, 2008.
- [9] DING L, 张萍. 美国物理教育研究: 历史回顾和前瞻[J]. 物理与工程, 2018, 28(1): 29-34.
DING L, ZHANG P. Foundations and frontiers of physics education research in the U. S[J]. Physics and Engineering, 2018, 28(1): 29-34. (in Chinese)
- [10] MAZUR E. Peer Instruction: A user's manual[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1997.
- [11] HESTENES D, WELLS M, SWACKHAMER G. Force concept inventory[J]. Physics Teacher, 1992, 30(3): 141-158.
- [12] 张萍, 齐薇等. 基于 Peer instruction 教学方法研究大学生物理错误概念[J]. 物理与工程, 2014, 03: 56-59.
ZHANG P, QI W. Detecting the undergraduates' misconceptions of physics using Peer Instruction[J]. Physics and Engineering, 2014(3): 56-59. (in Chinese)
- [13] GOLDBERG F, BENDALL S. Making the invisible visible: A teaching/learning environment that builds on a new view of the physics learner[J]. American Journal of Physics, 1995, 63(11): 978-991.
- [14] ZHANG P, DING L, MAZUR E. Peer Instruction in introductory physics: A method to bring about positive changes in students' attitudes and beliefs[J]. Physical Review Physics Education Research, 2017, 13, 010104.
- [15] ZHANG P, DING L. Large-scale survey of Chinese pre-college students' epistemological beliefs about physics: A progression or a regression? [J]. Physical Review Physics Education Research, 2013, 9, 010110.
- [16] ADAMS W K, PERKINS K K, PODOLEFSKY N S, et al. New instrument for measuring student beliefs about physics and learning physics: The Colorado learning attitudes about science survey[J]. Physical Review Special Topics-Physics Education Research, 2006, 2, 010101.
- [17] REDISH E F, SAUL J M, STEINBERG R N. Student expectations in introductory physics[J]. American Journal of Physics, 1998, 66: 212.
- [18] SAHIN M. Effects of problem-based learning on university students' epistemological beliefs about physics and physics learning and conceptual understanding of Newtonian mechanics[J]. Journal of Science Education & Technology, 2010, 19(3): 266-275.
- [19] DING L, ZHANG P. Making of epistemologically sophisticated physics teachers: A cross-sequential study of epistemological progression from preservice to in-service teachers[J]. Physical Review Physics Education Research, 2016, 12(2).

(下转第 34 页)

参 考 文 献

- [1] 库尔森 C A, 杰弗里·A. 波[M]. 北京:地震出版社, 1988: 73-76.
- [2] 杨宝胜, 董荣风. 弹簧的质量对弹簧振子角频率的影响[J]. 物理通报, 1986(4): 8-9.
YANG B S, DONG R F. The effect of mass of a spring on the angular frequency of spring oscillator[J]. Physics Bulletin, 1986(4): 8-9. (in Chinese)
- [3] 刘大鹏, 关荣华. 弹簧质量对弹簧谐振子圆频率的影响[J]. 大学物理, 1995, 14(10): 22-24.
LIU D P, GUAN R H. The effect of mass of a spring on the angular frequency of harmonic oscillator[J]. College Physics, 1995, 14(10): 22-24. (in Chinese)
- [4] 林抒, 龚镇雄. 普通物理实验[M]. 北京:人民教育出版社, 1981: 37-42, 119-126, 319-323.
- [5] 梁灿彬, 曹周键, 陈陟陶. 量纲分析简介(系列文章首篇)[J]. 大学物理, 2017, 36(12): 52-56.
LIANG C B, CAO Z J, CHEN Z T. Introduction to dimensional analysis(The first article in this series)[J]. College Physics, 2017, 36(12): 52-56. (in Chinese)
- [6] 孙博华. 量纲分析以及应用[J]. 物理与工程, 2016, 26(6): 11-20.
- SUN B H. Dimensional analysis and applications[J]. Physics and Engineering, 2016, 26(6): 11-20. (in Chinese)
- [7] BUCKINGHAM E. On physically similar systems; Illustration of the use of dimension equations[J]. Phys. Rev., 1914, 4(4): 345-376.
- [8] BUCKINGHAM E. The principle of similitude[J]. Nature, 1915(96): 396-397.
- [9] 赵凯华. 定性性与半定量物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 1995: 64-66.
- [10] 马逢时, 保良材. 应用概率统计[M]. 北京:高等教育出版社, 1989: 133-139.
- [11] 周国全. 对称操作与量纲方法求刚体转动惯量[J]. 物理与工程, 1996, 16(2): 12-15.
ZHOU G Q. Computing rotational inertia of rigid body by symmetric operation and dimensional theory[J]. Physics and Engineering, 1996, 16(2): 12-15. (in Chinese)
- [12] 周国全, 祁宁, 潘玮深. 量纲方法与 Π 定理之应用一例——低阻尼 RLC 电磁振荡周期的二级修正[J]. 大学物理, 2018, 37(9): 11-14+16.
ZHOU G Q, QI N, PAN W S. An application example of the dimension method and Π -theorem[J]. College Physics, 2018, 37(9): 11-14+16. (in Chinese)
- (上接第 30 页)
- [20] HAKE R R. Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses[J]. American Journal of Physics, 1998, 66: 64-74.
- [21] 张萍, Mazur E. Peer Instruction—哈佛大学物理课程教学新方法[J]. 中国大学教学, 2010, 08: 69-71.
ZHANG P, MAZUR E. Peer Instruction—A new pedagogy for physics education at Harvard University[J]. China University Teaching, 2010, 08: 69-71. (in Chinese)
- [22] 张萍. 基于翻转课堂的同伴教学法[M]. 北京:人民邮电出版社, 2017.
ZHANG P. Flipped classroom—based Peer Instruction [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2017. (in Chinese)
- [23] 张萍, 涂清云, 周静, 等. 大学物理课堂互动教学模式的研究——基于“教室应答系统”的构建[J]. 中国大学教学, 2011, 07: 21-23.
ZHANG P, TU Q Y, ZHOU J, et al. Research on interactive physics instruction with CRS[J]. China University Teaching, 2011, 07: 21-23. (in Chinese)
- [24] 张萍, Ding L, 张文硕. 翻转课堂的理念、演变与有效性研究[J]. 教育学报, 2017, 13(1): 46-55.
ZHANG P, DING L, ZHANG W S. Flipped classroom: Theory, development history and effectiveness[J]. Journal of Education Studies, 2017, 13(1): 46-55. (in Chinese)
- [25] 张萍, 刘宇星. 同伴教学法在大学物理课程中的应用[J]. 物理与工程, 2012, 01: 41-43.
Zhang P, Liu Y Y. Using Peer Instruction to teach an intro-
- ductory physics[J]. Physics and Engineering, 2012, 01: 41-43. (in Chinese)
- [26] 张萍, 涂清云. 改革教学模式促进学生物理学习态度正向发展[J]. 中国大学教学, 2014, 02: 37-40.
ZHANG P, TU Q Y. Positive shift in student attitudes toward learning physics by using innovative pedagogies[J]. China University Teaching, 2014, 02: 37-41. (in Chinese)
- [27] 张萍, 涂清云, 莫艳萍. 课堂中的合作学习——同伴教学法对物理概念学习的促进作用[J]. 中国大学教学, 2012, 06: 56-59.
ZHANG P, TU Q Y, MO Y P. Cooperative learning in classroom——Enhancing conceptual understand in physics using peer instruction [J]. China University Teaching, 2012, 06: 56-59. (in Chinese)
- [28] 王青. 小班教学与翻转课堂:《费曼物理学II》的十年教学实践——纪念费曼先生百年诞辰[J]. 物理与工程, 2018, 28(4): 20-38.
WANG Q. Small group teaching and flipped classroom 《feyman physics II》ten year's teaching experiment-to commemorate the centenary of the birth of Richard Phillips Feynman[J]. Physics and Engineering, 2018, 28(4): 20-38. (in Chinese)
- [29] 安宇. 为什么传统的课堂讲授模式需要改变[J]. 物理与工程, 2018, 28(6): 21-23.
AN Y. Why the conventional classroom teaching mode needs to be changed[J]. Physics and Engineering, 2018, 28(6): 21-23. (in Chinese)