

基于费曼理念构建更具吸引力的大学物理课程

程运华 钟小丽 邓文基

(华南理工大学物理与光电学院, 广东 广州 510640)

摘 要 为了解决大学物理课程缺乏吸引力的普遍问题,我们基于“费曼理念”开展了课程教学改革。主要措施包含三个方面:第一,通过加强绪论和课外阅读,从一种具有趣味性、美感和人文历史风格的通识文化的角度引入课程学习;第二,按照“费曼风格”重构课程内容,把物理知识通过各种类比、比喻、对话和讲故事的风格来讲述,使之更有吸引力;第三,基于“费曼学习法”的理念,激励学生“主动输出”所学知识来教会别人,包括同桌讲解、上台讲解、录制视频和撰写科普文章等方式。实践表明,上述改革措施增强了课程吸引力,有效提升了课程的教学质量。

关键词 费曼理念;费曼学习法;主动输出;大学物理

BUILDING MORE ATTRACTIVE COLLEGE PHYSICS COURSES BASED ON FEYNMAN'S CONCEPT

CHENG Yunhua ZHONG Xiaoli DENG Wenji

(School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640)

Abstract In order to enhance the attractiveness of college physics courses, we carried out the reform based on the “Feynman concept”. It mainly includes three measures. Firstly, by strengthening the introduction and extracurricular reading, introduce the course learning from a general cultural perspective with interest, beauty and humanistic and historical style; Secondly, reform the course content according to the “Feynman style” and explain the physical knowledge through various analogy, metaphor, dialogue and the way of telling stories to make it more attractive; Thirdly, based on the concept of “Feynman learning method”, encourage students to make “active output” to teach others, including explaining to the next table, teaching on stage, recording videos and writing popular science articles. Practices show that the above-mentioned reform strategies have enhanced the attraction of the course and effectively improved the teaching quality of the course.

Key words Feynman concept; Feynman learning method; active output; college physics

为了适应当前科技创新与国际竞争的新形势,国家的“双一流”建设更加强化了人才培养的核心地位和一流本科教育的基础性地位。而课程作为本科教育的最基本单元,是人才培养的核心要素。以学生发展为中心、以提升教学质量为抓

手、以“立德树人”为主要培养目标的新时期课程建设是当前我国高等教育的重中之重。

大学物理是工科类专业一门重要的通识性必修基础课,在自然科学和工程技术应用中具有先导地位,在培养创新人才方面具有独特的作用。

收稿日期: 2022-02-24

基金项目: 2021 年广东省高等教育教学研究和改革项目(基于“费曼学习法”建设大学物理课程);华南理工大学 2021 年度教改项目;2019 年广东省高等教育教学研究和改革项目(面向“新工科建设 F 计划”的大学物理“一流课程”建设)。

通讯作者: 邓文基,男,教授,长期从事物理学理论研究和教学,主要研究领域为凝聚态理论,phwjdeng@scut.edu.cn。

引文格式: 程运华,钟小丽,邓文基. 基于费曼理念构建更具吸引力的大学物理课程[J]. 物理与工程, 2022, 32(2): 7-13.

Cite this article: CHENG Y H, ZHONG X L, DENG W J. Building more attractive college physics courses based on Feynman's concept [J]. Physics and Engineering, 2022, 32(2): 7-13. (in Chinese)

课程旨在培养学生用科学的思维和方法分析和解决问题的能力。学生除了掌握物理学中最基本的概念和规律,并在基本研究方法、实验技能、运算能力和独立工作能力等方面得到初步的训练之外,还应了解物理学与其他科学技术的关系,以及物理中所蕴含的精神文化^[1]。

1 课程现状:缺乏吸引力

作为研究大自然运行规律的基础自然科学,物理对绝大多数有好奇心的理工类专业学生天然具有较强的吸引力,很多考上理工类专业的学生对物理一开始都具有较高的热情和兴趣,对物理课的学习也都抱有一种比较高的期待。在他们眼中,大学物理课能为他们提供一种与普通人不一样的看待世界的角度、视野和方法。他们期望在课堂上能学习到比中学物理更加美妙和高深的物理知识。但遗憾的是,这种天然的利好并未导致学习大学物理的普遍热情,很多高中热爱物理的同学对大学物理失去学习兴趣,导致学习成绩下降。

之所以造成这种局面,首先是教学内容和教学方法方面的问题。总结起来主要有三个方面:(1)当前工科大学物理内容主要以力学、热学、光学和电磁学等经典物理为主,只包含少量近代物理内容,这与高中相比变化不大,课本内容不能与时俱进,与专业和应用联系不够密切,缺乏新鲜感。(2)部分内容的难易安排不合理,有的简单直白的内容篇幅过大,而有些抽象和难点问题讲解不到位,晦涩难懂。而整体来讲,内容深度却又不够,缺乏挑战度。(3)大学物理一般都是大班授课,老师讲学生听,师生之间缺乏互动,学生只是被动地接受,知识留存率低,课堂效果差。

其次,在学生的主观方面也存在一些问题。很多经历中学题海战术的学生进入大学后,对物理的认识还停留在高中的水平,认为物理就是一些模型和技巧构筑起来的一个散装品,缺乏对物理定律本质的深入理解和物理理论的系统认知。同时,很多人又期待能比高中时更加自由地学习自己感兴趣的内容,普遍存在眼高手低的缺点,对一些看起来简单但枯燥的物理知识和理论没有深入理解,而碰到较抽象或者艰深的问题时,又会因为缺乏独立思考和钻研精神而止步不前,加上大学课程学时普遍较紧张,学起来压力较大,最终导

致学习物理的原始动力和兴趣逐渐消失殆尽。

我们看到,所有这些问题虽然各不相同,但最终表现一样——课程缺乏吸引力。什么样的课程才可能是具有吸引力的呢?多年来,我们一直在探求这个问题的答案,并进行了各种尝试。实践表明,一种基于“费曼理念”而建立起来的课程教学改革与实践,逐渐发挥了很好的作用。

2 改革的理念

作为量子电动力学的创始人之一,诺贝尔奖获得者理查德·费曼(Richard Feynman, 1918—1988)(见图1)非常重视教学工作,他在物理教学方面具有鲜明的个性特色,被认为是20世纪对物理教学贡献最大的两位顶尖物理大师之一(另一位是苏联物理学家列夫·朗道)^[2]。



图1 费曼

本文教改工作的理论基础正是费曼的物理教学理念,后续简称“费曼理念”。什么是“费曼理念”?简单地说就是费曼对于物理学的观点以及他所倡导的学习方法的有机结合体。本文接下来就来介绍这个理念的两个部分。

2.1 费曼眼里的物理学是什么

费曼指出,学习物理除了帮助学生学会怎样测量、计算和应用之外,还能帮助学生认识自然界的美妙,感受世界的稳定和实在,并获得一种科学的思维方法^[3]。他曾写道:“我讲授物理的主要目的,不是为你们参加考试做准备——甚至不是为你们服务于工业或军事做准备,我想尽力让你们欣赏这个美妙的世界以及鉴赏物理学家看待它的方式。”^[4]

因此,在物理学大师费曼的眼中,物理学与绝大多数人心目中的物理学不一样。他认为物理学是一种有趣的,追求美的,有温度的文化。而认识到这一点,将有助于同学们放下思想包袱,以积极的态度自信地面对物理课程的学习。

“有趣”意味着物理学能激起人们探索的欲望,因此必然导致创新。我们知道,小孩子天生好奇,对任何不懂的事物喜欢不断地提问,面对物理

学,就好像重回孩童看世界的年纪。著名理论物理学家、麻省理工学院物理系教授文小刚认为,创新就是孩子的游戏^[5]。正是物理学的“有趣”这一属性,为人们从事物理研究提供了动力的源泉。学习者充分意识到这一点,必然增强学习自信心;而教师意识到这一点,更有责任和信心努力挖掘和还原物理学本来的趣味性,不断提升课程的吸引力。

“追求美”为物理研究指引方向。物理规律都是用尽可能最简洁优美的形式来表达的,因此物理学家常常会用美学的标准构建物理图像。这种美包含对称、简洁、统一等多方面的美学特征。杨振宁先生坚信,大自然那深层的美都在于各种各样的和谐与对称,因此物理学必然也是美的,而在狄拉克看来,物理学只要追求美就足够了^[6]。美的物理学当然天生具有吸引力,知悉这一点,有助于提升学习的积极主动性,关注数学形式上的美感,会使人更深刻地理解物理学的统一性,用全局的眼光看物理。

“有温度的”揭示了物理学背后的人文和历史属性。物理学不是冷冰冰的数学公式和自然规律的堆砌,而是由众多富有思想力的物理学家们集体创作的一部人文大片。理解这一点,我们在学物理的过程中,能透过那些物理发现所经历的故事,看到科学巨匠们跳动的脉搏,感受到背后蕴藏的思想力、创造力和人格魅力。同时,这还能使人认识到物理学的发展道路是曲折的,有助于建立一种不迷信权威、敢于质疑的科学品质^[7]。

2.2 怎样学习物理才更有效

费曼认为,如果你要学习一种新知识,你要尽可能地想办法,用最简单通俗的语言将它教给一个没有学过这个知识的人。在这个过程中,你将经历“自学→初次传授→卡壳→回顾甚至重新学习→条理化和简化→再传授”的过程。将学习者的身份换成教学者,重复回顾的过程中会主动发现知识盲点;在概念简化的过程中能提炼知识要点,将知识形象化,具体化和持久化。这就是著名的“费曼学习法”。它的核心思想是通过“主动输出”来促进学习,具体说就是通过教会别人来达到高效率学习的目的。

实际上,很多著名科学家都有类似观点。例如爱因斯坦曾经说:如果你不能简单地说清楚,那说明你还没有完全明白。而卢瑟福说过一句话,大概意思是,如果你不能跟你实验室擦地板的清

洁工解释清楚自己是做什么的,那就说明你自己还不知道自己是干什么的。微软公司创始人比尔·盖茨也同样认为,如果你想学习一项新技能或知识,最好的方法是反复尝试去讲给一个零基础的人听,在这个过程中不断重新学习,并持续改进自己的讲法,直到让他听懂为止。

在我们自学和上课过程中,很多时候只是被动地学习——通过听讲、阅读和看演示等,虽然表面上也在不停吸收,但是实际上都是浮光掠影、浅尝辄止,没有真正理解,甚至根本记不住那些基本概念,更不要说运用,学习深度远远不够。

而费曼式的学习则通过讨论、实践、讲授等“主动输出”来达到深度学习的目的。“主动”是指充分发挥个体的主观能动性;而“输出”则指通过教学、写作、讲解展示自己的学习成果。通过有效的“主动输出”可以很大程度地突出学生的中心地位,提高学习的获得感和学习效果。在教学中,教师采用适当的策略激励学生输出所学内容,可以激发学生的主动性,将来自于外部的压力变为一种内在的自我驱动力。同时,“输出”不仅是一个把输入进行自我整理、消化、重构的环节,还可以让学生的学习方式从简单被动转换为主动探究,让知识体系更加条理化,并加深理解。

费曼在他的授课中始终秉持这种观念。由他的课程内容整理而成的《费曼物理学讲义》被公认为是一套难度大、水平高的物理教材。全书具有明显的“费曼风格”——语言通俗易懂,充满趣味性,多用类比、比喻和故事来帮助读者理解抽象的物理问题。这套教材就是费曼本人实践“费曼学习法”的成果。自2008年起,清华大学物理系王青教授等人采用这套教材开设了“费曼物理学”课程,取得了很好的教学效果^[8-9]。当然,这套教材的难度远远超过当前工科大学物理教学大纲要求的难度。但作为“费曼理念”的代表作,它的写作风格和讲解物理问题的方式非常值得我们借鉴。我们在过去多年的教学工作中,无数次翻阅这一套教材,受益匪浅。

3 实践措施

受费曼理念的启发,我们认识到,应该从物理学内在本质和特点出发,与学生一道,认识和把握大学物理课的学习目的,并以此为基础,改造课程内容的形式,结合更加有效的教学方法,不断增强

大学物理课程的吸引力。据此思路,在过去的3年以来,我们在校大学物理课程教学中进行了改革。我们的措施主要有以下三个方面。

3.1 加强绪论课和课外阅读

按照费曼对于物理学的观点,物理学将帮助学生认识自然界的美妙,感受世界的稳定和实在,并获得一种科学思维方法的训练。为了让学生充分意识到这一点,我们扩充了绪论课的学时,从一种文化的角度引入大学物理课程,阐述了物理与哲学、数学的联系和区别,以及艺术与物理学的关系。还通过一些具体实例,包括理论和实验发现过程和人物成长故事等,刷新了学生对物理学的认识。我们为学生推荐一些课外读物,例如教师撰写的科普文章和一些优秀的物理类公众号文章,还包括一些著名的物理学家的科普作品,例如费曼的代表作之一《物理定律的本性》、伽莫夫的《从一到无穷大》、爱因斯坦的《物理学的进化》和赵凯华的《定性与半定量物理学》等。

3.2 按费曼风格改造学习内容

在过去的教学中,我们强烈地感受到,当用较为通俗的语言——即所谓的“人话”或“大白话”,把物理知识和内容通过各种比拟、对话和讲故事的风格来讲述,学生更加感兴趣,更愿意听,能更好地接受和理解。

一个典型的案例是,为了解释光电效应中为什么一般不会出现多个光子被一个电子吸收的情况,我们将电子比喻成一个很爱花钱的人,他现在想存钱买一台电脑,只有当他获得的钱够买一台电脑时,他才会成功地买到电脑,否则,他的钱就会被花光。也就是说,他没有可能等到下一笔收入到账后,将两笔钱加起来拿去买电脑。这就好比有的人,口袋里有点钱儿之后,他就待不住了,迫切想花掉他的钱,这类似于处在激发态的原子,极其不稳定,随时准备丢掉一部分能量而落到低能级。所以金属中的电子几乎没有机会吸收两个光子而成为光电子——除非两个光子几乎同时被电子吸收,这种特殊的现象就是双光子的光电效应。对此问题有兴趣的同学,可鼓励他们进一步了解,例如参看清华大学张三慧教授编写的大学物理教材的量子物理部分有关“多光子吸收”的拓展内容^[10]。

类似以上这种形象的解释方式,引起了学生们的强烈兴趣,这促使我们努力将更多的物理现象和规律用这种比喻和故事的方式讲解。目前,

我们的授课课件中已经积累了百余个类似的案例,我们希望不断地改进讲法,精益求精,使之更加合理,更容易被接受和理解。

除了对上课课件的改造之外,我们按照“费曼风格”,对一些物理问题,尤其那些抽象难懂的内容,精心撰写一些专题文章。通过用浅显、通俗、有趣和逻辑清晰的文字,附上动画和视频,呈现给读者更富有吸引力的学习内容。其中部分文章发布在课程公众号(微信公众号ID:wuliboke)上,受到校内外读者的欢迎。随着关注人数增长,单篇平均阅读量达到3000以上。其中一些文章被多个国内具有较大影响力的公众号转载。我们还录制了各种物理专题的小视频达120多个,如图2所示。通过这些视频,将课程中那些难于理解的内容讲清讲透,拓展课堂空间,让学生能利用课余时间反复观摩,最终完全理解所学内容。

3.3 激励主动输出

首先需要说明的是,教师讲课本身就是一种主动输出,同样会导致教师对所讲内容的理解加深,甚至纠正之前的错误理解。按照费曼理念,我们讲课更加注重语言的通俗性和趣味性,更多以“问题驱动”的方式来引导课堂的推进。加上备课时已依据费曼风格改造了授课课件内容,所讲内容也会更有吸引力。

除了教师正常讲课环节外,按照“费曼学习法”中的“主动输出”理念,我们在教学中,强调和激励教师和学生一起就所理解的问题主动输出。学生方面,这种输出主要包括同桌讲解、上台讲解、录制视频和写科普文章这四种形式。而教师方面,主要是录制视频(见图2)和撰写物理类通俗性的科普文章。

同桌讲解活动会在课堂上不定期开展,教师一般安排几分钟的时间,让同桌之间就刚才听到的内容互相给对方讲出来。我们鼓励同学们尝试将复杂的物理概念和规律用一句话形象地表述,并称之为“一句话物理”。例如有同学解释热能做功不能像机械能那样达到100%的效率时说:“因为热能是大量无规则运动的粒子的动能总和,这些粒子没法齐步走,没法集中力量干好一件事,所以做功自然就无法达到100%的效率了。”有同学为了解释点电荷之间的库仑力是沿着点电荷之间连线方向时说:“既然空间具有轴对称性,沿垂直于轴的方向不可能有力,否则就破坏了轴对称性。”再例如,在解释为什么康普顿散射实验中会

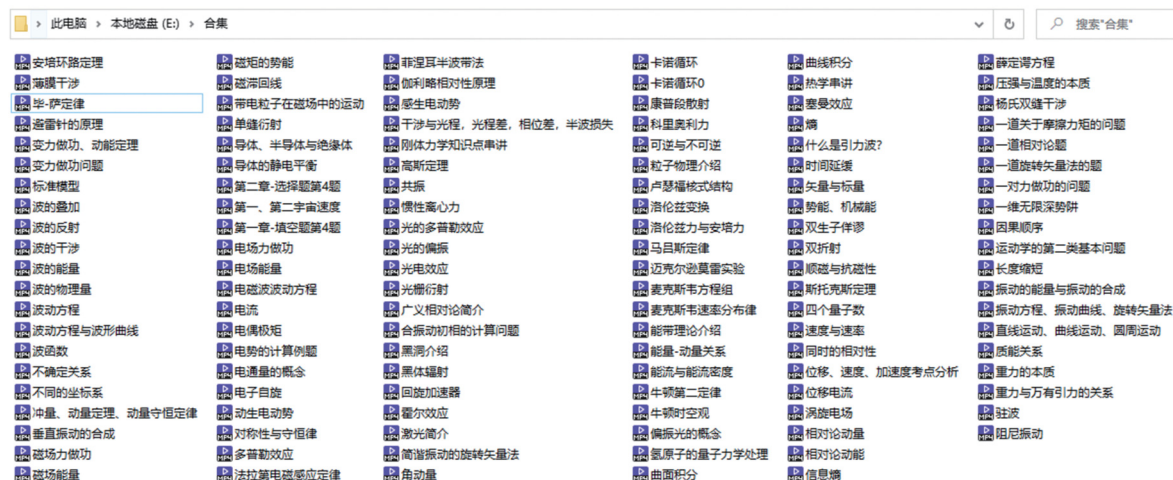


图2 所录制的通俗讲解视频文件列表

出现波长与入射光一样的散射光时,有同学说:“因为光刚好打到原子实上了,就像乒乓球碰铅球,前者能量太小,后者根本看不上,只好原速弹回了。”

学生上台讲解环节一般通过单独几次课来开展。我们一般在某些重要的内容讲完时安排一节,让事先有准备的学生上台讲。学期初,我们将班上的学生分组,每组一般五人左右,每次以组为单位上台讲,具体谁上台讲由组员自己确定。每个组要讲的主题会至少提前一周被告知,以便组员准备要讲的具体内容和方式。讲解完毕,教师会进行现场点评,并给予相应的小组评分,作为组员的得分计入平时成绩,其中上台主讲者得分上浮30%。为了体现公平,应保证所有学生在一个学期内都有一次上台的机会。

学生视频录制主要也是以小组为单位组织的,但也鼓励个人提交录制的视频。提交的视频都会被打分,作为平时成绩的一部分,积分规则与上台讲解类似。在过去的4个学期中,学生录制了250多个视频。视频中,同学们对物理问题的深刻的理解、表现出的创造力和认真态度令人惊叹,不少视频作品达到专业水准,并且极富个性化的特色。

激励学生主动输出的另一种方式是布置写作任务。一般要求是,学生自拟题目写一篇不少于2000字的文章。要求用最通俗的语言阐述所学的物理知识或其他通过学习理解的科学问题。可通过图片和动画来辅助讲解,文字应具有一定的趣味性,能吸引人读下去。所讲内容挑战度越高,

且越能被更低年级的人理解,则得分更高。教师通过邮箱接收文章,仔细评阅后给出评语和分数,得分计入学生的课程平时成绩。为了鼓励学生积极参与,我们还承诺对优秀的作品给予一定的稿费,经本人同意可发布于课程公众号上。在过去的四个学期中,学生提交的700多篇作品中,我们认为实属原创并且质量较高的文章超过150篇(部分情况见图3)。很多同学非常重视这种写作,甚至达到了精雕细琢的程度。

对于教师,录制视频和持续写作是除了讲课之外的两种主要的“主动输出”方式。由于教师所完成的输出是要面向全体学生甚至更大范围的读者,所以必须提高要求,避免错误。我们目前已完成视频120多个,撰写文章超过100篇,其中部分作品发布在我们自建的课程公众号上(微信公众号ID:wuliboke),作为课程内容的有益补充。

4 实践效果

2019年,我们在校2018级土木与交通、材料和电子信息的几个教学班中,初步进行了一些改革的尝试。到2020年,我们继续在2019级电气工程两个班教学中正式开展了这项课程教学改革。到2021年,在2020级材料专业的两个班中,各项改革举措得到进一步落实。总体来讲,课程教学效果的提升是非常明显的。

4.1 激发学生的学习兴趣,提升课程的教学效果

转变了对课程的认知,提升了学习兴趣。针对学生大学物理课程的认知,我们在每个年级的

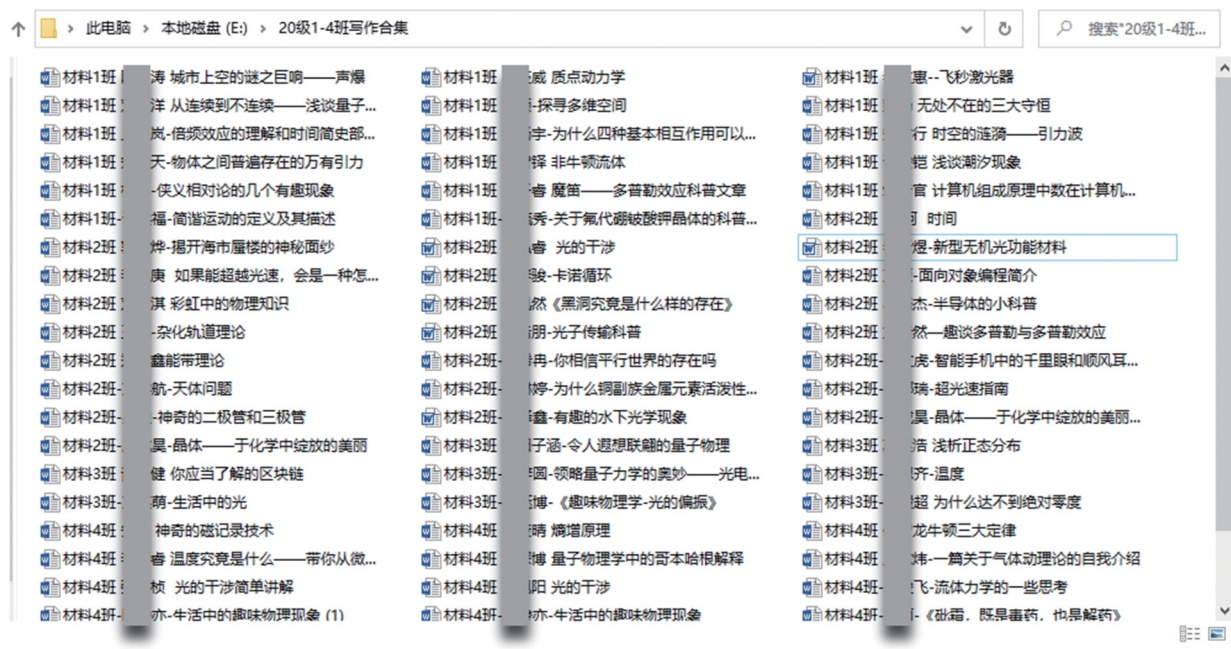


图3 学生提交的科普作品文件列表

第二学期的物理课即将结束时开展了问卷调查,三个年级分别收回问卷 131 份,143 份和 109 份,部分数据如图 4 所示。在回答“学习大学物理课的必要性”的问题上,20 级同学选择“非常重要”的比例最高;在选择“什么是大学物理课的学习目的”的问题上,18 级的同学选择“物理学能为专业课程学习服务”的比例最高。而 20 级同学则明显的倾向于费曼对于物理的观点,即认为“物理能让自己了解和欣赏大自然,并提供一种科学思维与方法的训练”。从统计结果来看,随着教改措施的深入开展,学生开始关心那些对他们考试“无用的”问题了,对物理科普书更有兴趣了。同时,创新意识得到提升,参与各类物理竞赛的人数明显增多。

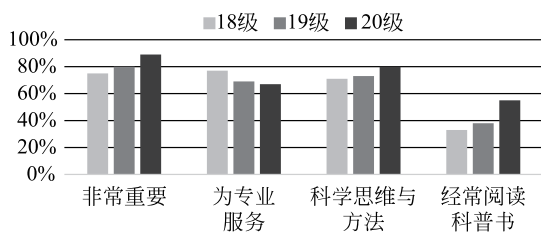


图4 对大学物理课认知的情况

课堂互动加强,学习积极性提升。通过激励学生“主动输出”,例如同桌讲解和上台讲解等措施,课堂互动性明显加强。这些“以学生为中心”

的措施拉近了师生距离,提升了学生的参与度,活跃了课堂气氛。更重要的是,这种方式能有效地驱动学生专心听讲,加深对课程内容的理解,提升自主学习能力。我们统计了 19 年和 21 年的教学班下课后向老师问问题的平均频次,前者只有不到 0.5,而后者超过 1.7。这说明改革实践有利于提升同学们课程学习的积极性。

课程评价机制更合理。相比 18 级,19 级和 20 级的平时成绩体现了学生主动输出环节的贡献,改变了以往只靠作业作为平时分的局面,建立了更合理的课程评价体系。同学们更愿意投入时间到更具有挑战性的问题中去。例如 20 级两个班的同学普遍重视按“费曼风格”写作的环节,提交的作品中不乏非常优秀的文章。如果没有评价机制的激励作用,这是很难实现的。

与之前的被动式接受为主的教学模式相比,采用激励学生主动输出的策略,学生输出不再只是做作业,还包括能讲清楚、会教别人,从而实现学生从被动的“会做”到主动的“会说”和“会教”的转变,真正理解和学会运用知识,课程学习效果的提升不言而喻。我们比较了材料专业 2018 与 2020 级大学物理(I)总评不及格(分值低于 60 分)和优秀(分值 ≥ 90 分)的比例,20 级相对 18 级分别降低了 17.5% 和提高了 56.0%(见图 5),课程教学效果提升是比较明显的。

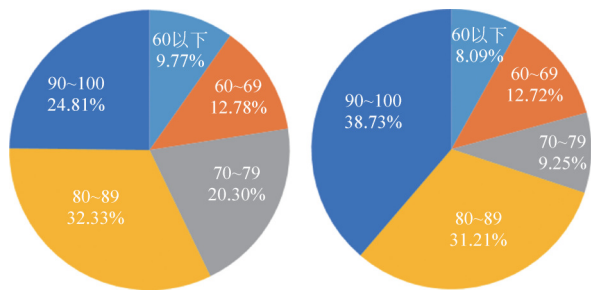


图 5 2018 级(左)与 2020 级(右)大学物理(I)总评情况

4.2 积累丰富的教学资源,提升师生的综合能力

随着改革措施的持续推进,我们按照“费曼风格”改造了教学课件,录制了 120 多个教学视频,撰写了超过 100 篇的物理方面的科普文章,使课程的教学资源更加丰富。另一方面,教师通过践行“费曼学习法”,对课程的知识理解更加透彻,尤其是弄清了很多一些以往没有真正搞清楚的疑难问题,讲课语言组织更加简练,教学水平明显提高。

通过这些措施的实行,很多同学表示,在学习方法、思维方法等方面有明显的提升。体现在具体技能方面,学生和教师在语言表达、视频录制、文章写作等方面有了明显的进步。很多同学更善于用文献搜索了解前沿情况,并提升了沟通和合作能力。

4.3 发挥自媒体作用,全面辐射社会大众

通过践行“主动输出”的理念,将撰写的物理科普文章发布在公众号上,受到广大读者的关注和转发,多篇文章被“中科院物理所”“中科院高能所”和“中国物理学会期刊网”等具有较大影响力的公众号转载。这些通俗易懂的文字将物理课堂延伸到社会,让更多人有机会学习更多的物理知识,思考和探究更多物理问题,从而提升科学素养,产生了良好的社会服务作用。

5 结语

为了解决大学物理课程吸引力不足的问题,我们基于“费曼理念”进行了教改尝试。实践表明,一旦领略到费曼眼中那种物理的魅力,学生们就能放下包袱,树立积极主动的学习态度。而践

行费曼“主动输出”理念的各种具体措施,更让学生们体验到高效率学习的快乐,课堂互动更多,课程教学效果提升明显。同时,课程评价更加合理,教师的教学能力明显提升。教改实践结果表明,基于“费曼理念”的课程改革是实现从“以教师为中心”向“以学生为中心”转变的有效途径,有助于提升大学物理课程的吸引力和教学效果,具有一定的推广价值。

参 考 文 献

- [1] 教育部高等学校物理基础课教学指导委员会,理工科类大学物理课程教学基本要求(2010 年版)[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
- [2] 赵凯华. 为纪念物理大师费恩曼百年诞辰而作[J]. 大学物理,2018,37(1):1-3+10.
ZHAO K H. On the centenary of birth of R. Feynman, a great master of physics[J]. College Physics, 2018, 37(1): 1-3+10. (in Chinese)
- [3] 潘小青. 从文化视角探析大学物理教学的问题与对策[J]. 物理与工程,2019,29(5):96-99,104.
PAN X Q. Discussion on the problems and countermeasures of college physics teaching from culture perspective[J]. Physics and Engineering, 2019, 29(5): 96-99,104. (in Chinese)
- [4] 关洪. 观光,还是探险? ——从《费曼物理学讲义》的诞生谈起[J]. 大学物理,1998,17(6):44-46.
GUAN H. Sightseeing or adventure? Comment on the birth of Feynman's lecture on physics[J]. College Physics, 1998,17(6): 44-46. (in Chinese)
- [5] <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1647156129793877786>.
- [6] 杨振宇. 美与物理学[J]. 物理教学,2008,30(5):10-14.
YANG C N. Beauty and physics[J]. Physics Teaching, 2008, 30(5): 10-14. (in Chinese)
- [7] 包景东. 物含妙理:像费恩曼那样机智地教与学[M]. 北京:清华大学出版社,2018.
- [8] 阮东,王青,徐湛.“费曼物理学”10 年教学小结[J]. 物理与工程,2018,28(6):15-17.
RUAN D, WANG Q, XU Z. A brief summary of 10-year teaching of the course Feynman physics[J]. Physics and Engineering, 2018, 28(6): 15-17. (in Chinese)
- [9] 王青,郭应寿.《费曼物理学 II》和《电动力学》混合式线上教学实践[J]. 物理与工程,2020,30(3):3-10.
WANG Q, GUO Y S. The practice of blended teaching in Feynman physics II and electrodynamics courses[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(3): 3-10. (in Chinese)
- [10] 张三慧. 大学物理学[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社,2013.