

光学中的对立与统一：粒子说中的波动影子

高原 李路曦

(山东大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266237)

摘要 “粒子说”是经典光学理论的一种早期观点,认为光由微小、不可分割的粒子组成,并以直线传播。牛顿是该理论的主要倡导者之一,他提出用光粒子的运动和相互作用解释诸如反射、折射等基本光学现象。本文探讨了粒子说对干涉、衍射、偏振等波动光学现象的解释,并揭示其中蕴含的波动思想。牛顿通过“适合”概念,从粒子运动的角度尝试解释干涉现象,而马吕斯和毕奥则进一步提出光粒子在力作用下的运动规律,从理论上统一了反射、干涉及偏振等光学现象,推动粒子说达到了新的高度。尽管粒子理论将光视为由微小粒子组成,但其在解释偏振和干涉现象时,已不自觉地融入了波动的周期性特征。这些早期研究不仅为波动理论的崛起奠定了坚实的实验和理论基础,还生动展现了科学理论发展的内在逻辑,即矛盾中的对立与统一。将这一科学史视角融入教学,不仅能够帮助学生深入理解科学发展的复杂性,还能有效培养批判性思维与创新能力,并激发对科学探索的浓厚兴趣。

关键词 波动光学;粒子说;干涉;衍射;偏振

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.08.09.01

OPPOSITION AND UNITY IN OPTICS: TRACES OF WAVE THEORY WITHIN THE CORPUSCULAR VIEW

GAO Yuan LI Luxi

(School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237)

Abstract The “corpuscular theory” is an early viewpoint in classical optics, proposing that light consists of tiny, indivisible particles propagating in straight lines. Newton, as one of its principal advocate, suggested that the motion and interactions of light particles could explain fundamental optical phenomena such as reflection and refraction. This paper examines how the “corpuscular theory” accounts for interference, diffraction, and polarization—phenomena typically associated with wave optics—and reveals the wave-like ideas it implicitly contains. Newton introduced the concept of “fits” to explain interference from the perspective of particle motion, while Malus and Biot further proposed laws governing the motion of light particles under forces, theoretically unifying phenomena such as total reflection, interference, and polarization, thereby elevating the corpuscular theory to new heights. Although the theory regarded light as composed of particles, its explanations of polarization and interference already incorporated periodic features characteristic of waves, albeit unconsciously. These early studies not only laid a solid experimental and theoretical foundation for the rise of the wave theory, but also vividly demonstrate the internal logic of scientific development—the opposition and unity of contradictions. Incorporating this historical perspective into teaching can help

收稿日期: 2025-08-09

基金项目: 国家自然科学基金(62205180); 山东大学本科教育教学研究项目一般项目。

通信作者: 高原, yuan.gao@sdu.edu.cn; 李路曦, liluxi@sdu.edu.cn。

引文格式: 高原, 李路曦. 光学中的对立与统一: 粒子说中的波动影子[J]. 物理与工程, 2026, 36(1): 102-106, 114.

Cite this article: GAO Y, LI L X. Opposition and unity in optics: Traces of wave theory within the corpuscular view[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(1): 102-106, 114. (in Chinese)

students better appreciate the complexity of scientific progress, cultivate critical thinking and creativity, and inspire a strong interest in scientific inquiry.

Key words wave optics; corpuscular theory; interference; diffraction; polarization

光的“粒子说”是牛顿在《光学》中系统化和推广的经典光学理论,主张光由高速微粒组成,通过直线运动和相互作用来解释反射、折射等光学现象。作为光学史上的重要学说,粒子说在传统大学物理和光学教学中往往被作为反例来介绍。然而,人类对光本性的认识经历了复杂而曲折的过程,在光学发展的早期阶段,粒子说曾发挥过重要作用。以牛顿为代表的科学家们,试图用粒子说解释包括干涉、衍射、偏振等在内的多种光学现象——其中不少现象后来被证明源于光的波动性。这些研究虽未指向最终正确的理论,却凝聚了当时顶尖科学家的智慧与理性光辉,并推动了实验与理论方法的发展。许多如今在波动光学课程中作为经典案例讲授的现象^[1, 2],早在波动说确立之前便已被粒子说支持者深入研究。例如,典型的等厚干涉现象“牛顿环”在17世纪已由牛顿详细观察和解释^[3];在偏振光学中,我们现今通过电磁波的横波性导出光的偏振性和马吕斯定律,而历史上的马吕斯本人则是粒子说的倡导者^[4]。这些事实表明,尽管粒子说在解释波动现象方面存在不足,它在光学发展史上仍具有不可忽视的科学价值。然而,现有教学体系中关于粒子说如何尝试解释这些波动现象的内容往往被忽略。

在光学与大学物理教学实践中,笔者逐渐认识到,将粒子说对波动现象的解释纳入教学具有重要意义。这不仅是对光学理论历史演进的深入剖析,更是一次关于科学方法与科学精神的生动展示。通过这种教学方式,学生可以全面理解科学理论的动态发展,认识到即便粒子说最终未能完全解释波动现象,它的提出及其对波动现象的探索依然是科学探索的重要组成部分。以牛顿为代表的科学家曾在其理论框架下提出创新性观点,例如“适合”理论(fits of easy reflection and easy transmission),试图用光粒子规律性的运动解释干涉条纹的间隔规律^[5, 6];尽管其精确性难与波动说相比,却彰显了在实验事实基础上进行理论建构的创造性思维。此外,牛顿还是最早提出颜色感知可能与光的振动频率相关的学者之一^[7],并敏锐地将色彩与音乐的和声建立类比,洞察到二者均源于对刺激频率的感应^[7]。这些解释

在现代物理学的视角下虽有局限,却为理解理论与实验的互动提供了典型案例;还原这一过程,不仅有助于学生掌握科学推理的方法,更能培养其批判性思维与科学素养。

此外,将粒子说与波动说的历史争论引入课堂,还能激发学生的学习兴趣。历史上,以惠更斯为代表的波动说支持者与以牛顿为代表的粒子说拥护者之间的激烈辩论,推动了光学理论不断发展。通过学习这一科学史案例,学生能够直观感受科学理论的竞争与融合,理解失败的尝试如何为后续突破奠定基础。这种基于案例的教学方法,不仅使课堂更具趣味性和启发性,还帮助学生认识到科学发展的本质是不断修正与迭代的动态过程。因此,在光学教学中系统讨论粒子说对波动现象的解释,不仅能深化学生对光学核心概念的理解,还能引导他们从历史视角认识科学理论的演变逻辑。遗憾的是,目前国内外教科书和论文对此介绍仍较为缺乏。基于此,本文将结合历史背景,重点探讨粒子说在干涉、衍射和偏振三类波动现象中的解释,并尝试为教学提供更全面、多元的视角。

1 粒子说对干涉现象的解释

牛顿继承了古希腊哲学家的原子理论,在其名著《光学》中,牛顿主张光是由微小的粒子组成的^[5]。这些粒子以直线传播,并与物质相互作用导致反射、折射等现象^[5]。牛顿认为,光的多种性质,如强度、颜色和传播速度等,均可以通过这些粒子的运动来解释。17世纪,胡克观察到薄膜会产生不同颜色,虽然胡克发现薄膜的颜色与其厚度相关,但他未能建立两者之间的定量关系^[8, 9]。这一难题由牛顿通过实验解决。实验中他发现,在出现连续颜色环的区域,薄膜的厚度呈算术级数变化。为解释这一经验规律,牛顿提出,光线进入折射介质时会经历周期性的状态变化,这些变化决定了光线在第二表面被反射还是透射。他将这些变化称为“易透射和易反射的适合”(fits of easy transmission and easy reflection)。基于薄膜中的测量结果,牛顿提出光具有一个特定的空间

周期性常数,即“适合的间隔”(intervals of fits)^[5]。他发现,这一间隔与光的颜色、光在介质中的折射率以及入射角度有关。利用这一概念,牛顿建立了数学理论,并将其应用于厚膜的颜色现象,结果与实验观察高度一致。

然而,仅凭周期性概念不足以精确计算彩色条纹的位置。因此,牛顿提出了一项补充假设:无论入射光的方向如何,光在两个平行表面之间经历的“适合”数量是相同的^[8]。如图 1(a)所示^[8],有

$$\frac{e_r}{I_r} = \frac{e}{I} = m$$

其中, e_r 和 e 分别是斜射光线和垂直光线的路径长度, I_r 和 I 是对应方向的“适合间隔”, m 是“适合”的数量。当光线通过薄膜时,薄膜的厚度不同,所经历的“适合”的个数也不同。如图 1(b)所示,如果经历偶数个“适合”,它将透过薄膜;如果经历奇数个“适合”,它将被反射。因此,要预测光在特定厚度和入射角下的行为,需要同时知道光线的路径长度 e 和“适合间隔” I ,从而解释了“牛顿环”现象。

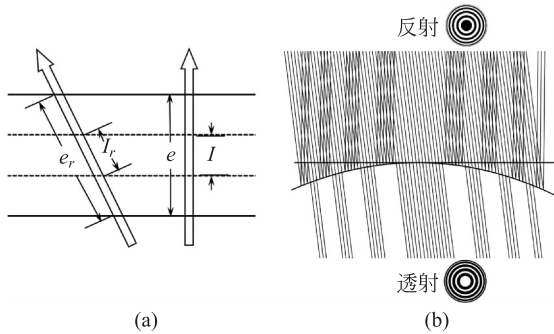


图 1 粒子说对于干涉现象的解释

(a) “适合”的数量与入射角度无关^[8]; (b) 单色光线表现出周期性。当空气层的厚度达到特定值时,光粒子能够穿透下方凸透镜的玻璃表面,而在中间厚度时,它们失去了这种能力并被反射^[5]

牛顿声称,“适合”理论完全基于实验,无须力学解释。然而,为迎合偏好力学模型的科学家,他提出假设认为,当光线撞击物体表面时,会在物体中的以太中激发波动。这些波动传播速度比光快,以太在不同距离处压缩或膨胀,当粒子位于波动有助于其运动的区域时,它处于“易于透射”的“适合”;而在波动阻碍其运动的区域时,则处于“易于反射”的“适合”。尽管牛顿的“适合理论”在很多方面不够明确,但其核心的粒子与波动协作思想极为独特,在物理学史上,首次将周期性特征赋予光的粒子说,且首次提出粒子和波共存的必要性。

2 粒子说对衍射现象的解释

格里马尔迪(Francesco Maria Grimaldi)在 17 世纪上半叶首次对光的衍射现象进行了精确观察,并提出了“衍射”一词^[10,11]。他通过实验证明,光线穿过小孔后并非沿直线传播,而是以锥形散射开来。牛顿在描述格里马尔迪的实验时写道(见图 2(a))：“假设阳光通过小孔 HK 照射到一个暗室内的纸张上,用刀刃 MNO 截断光束的一部分,你将在纸张上看到六排彩色条纹,在它们之外还有一片微弱的光线(Z)向两侧扩散。”^[10]

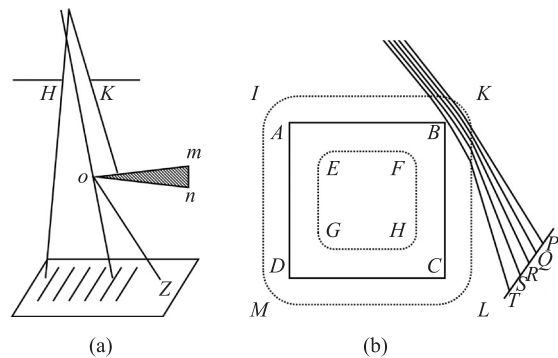


图 2 粒子说对衍射现象的解释

(a) 牛顿绘制的格里马尔迪实验的示意图^[10]; (b) 牛顿绘制的用于解释光在方形障碍物阴影中弯曲的示意图^[10]

牛顿基于他的粒子理论和以太假说对衍射现象进行了解释。他认为光粒子在接近不透明物体边缘时,会因以太密度梯度的作用而发生偏折,这种偏折被他称为“新型折射”。他假设物体外的以太较稠密,内部以太较稀薄,二者之间逐渐过渡。光粒子在穿过这些区域时,受到非均匀以太的作用而改变路径,从而在阴影区域形成彩色条纹。他将这些色彩现象归因于光线的不同折射性或反射性的分离,并试图将衍射现象纳入他的粒子理论框架。

在他写给波义耳(Robert Boyle)的信中,牛顿绘制了一幅方形物体 $ABCD$ 的图(见图 2(b)),假设该物体被两条虚拟的以太边界框定,并在这两条边界之间存在以太梯度^[10]。外边界 $IKLM$ 外部的以太均匀且稠密,而内部边界 $EFGH$ 内部的以太均匀且稀薄,二者之间逐渐过渡。牛顿指出,经过物体边角的光线“会受到来自靠近 K 一侧较稠密以太的作用,并且距离物体越近,这种作用越明显,从而使光线在 $PQRST$ 区域内散射开”。他

进一步推测,“这可能是导致在格里马尔迪实验中,光通过刀刃或其他不透明物体边缘时偏转,并通过这种偏折产生多种颜色的原因。”

尽管牛顿的解释巧妙地将衍射现象纳入粒子理论,但这一假说存在局限性。它未能定量和准确解释实验中的许多观察结果,例如衍射条纹的具体分布及其强度规律。最终,这些不足之处促使后来菲涅耳(Augustin-Jean Fresnel)通过引入波动理论成功解释了衍射现象,标志着波动理论在光学领域的崛起与主导地位的确立。

3 粒子说对偏振现象的解释

虽然如今光的偏振性是其横波性的直接的结果,但是历史上偏振现象的发现极大地拓展了粒子理论的应用范围,同时显著增强了其说服力。在偏振现象出现之初,由于光的波动说把光看作在介质中传播的纵波,所以光的波动理论无法与光的偏振性兼容,而光粒子理论则能通过假设光粒子具有各种不对称的形状,来合理解释偏振现象的实验结果。牛顿最早从粒子的角度讨论了偏振现象^[12]。他提出,光线中每个光粒子都具有两个对立的面,这些面被赋予了一种特殊的属性,这种属性正是非寻常折射的关键^[5]。牛顿认为,光粒子这些面的取向与晶体对称轴之间的关系决定了光线的折射行为:是寻常折射、非寻常折射,还是会沿晶体主切面产生偏振。

马吕斯(Étienne Louis Malus)在牛顿理论的基础上,更深入地探讨了光粒子的不对称性。他将这种不对称性直接归因于光粒子本身的结构,假设每个光粒子都有三个主轴,即 a 、 b 和 c 轴,其中 a 轴始终与光线传播方向一致,而 b 轴和 c 轴在介质的排斥力或吸引力的作用下会绕 a 轴旋转^[12]。马吕斯进一步提出,这些轴不仅是数学上的表示,而且是实际存在的物理实体,它们与物质的相互作用会产生反射和双折射中的偏振效应。马吕斯还发现了“正弦平方”法则,这不仅统一了解释全反射、部分反射和双折射中的偏振现象,还成为马吕斯最重要的理论成果之一^[13]。

毕奥(Jean-Baptiste Biot)在马吕斯研究的基础上进一步拓展了对偏振光的研究。他通过精密的实验,发现某些物质能够改变偏振光的偏振面,这种现象被称为旋光性^[14,15]。进而毕奥对牛顿的“适合”模型从物理本质上进行了进一步的解释:

“所有依赖于易反射和易透射适合的现象,只需假设光分子具有两个极点,一个是吸引极,一个是排斥极,并且它们以匀速绕其重心旋转,交替地将这两个极点呈现给物体表面。这样,光分子与物体表面的关系就如同两块磁铁以同极或异极相互靠近。当光分子在接近表面时呈现其吸引极,所产生的吸引力会加快其速度,从而增强其透射的趋势……相反,当光分子呈现其排斥极时,所导致的排斥作用会极大地削弱其因运动方向而产生的透射倾向,使得光微粒更易被反射。在这一模型中,适合的间隔仅仅是光分子在其旋转中两次回到相同相位所经历的时间,而适合的长度则是分子在一个间隔中所运动的距离。^[16]”

通过上述基于粒子说对波动光学现象的解释,我们可以看出,尽管粒子说将光视为分立的粒子,但其中已经透露出了波动的思想。例如,上文提到的牛顿认为以太的波动引起了易于透射或反射的“适合”;毕奥在解释偏振光的干涉和旋光现象时也指出:“光分子在两个极化方位角之间周期性地振荡,不同颜色的分子振荡速度各异,其中紫色分子最快,蓝色次之,黄色更慢,依次类推,红色分子最慢。^[12]”这种周期性正是波动的一个基本特征。可见,“粒子说”的理论中已蕴含了波动说的理念。

另外,马吕斯虽然是粒子说的倡导者,但他的实验却证明了惠更斯关于双折射的理论正确性,而惠更斯的理论正是基于波动说。阿拉果(Dominique François Jean Arago)早期也是粒子说的支持者,但后来他认识到“粒子说”的局限性,转而成为菲涅耳波动理论的坚定拥护者,并通过其大力支持和推广,使菲涅耳理论迅速得到了广泛接受(当然,这与阿拉果和毕奥之间的个人矛盾也有一定关系)^[12]。可见,粒子说和波动说作为一对矛盾的理论体系,既相互对立,又彼此联系,在科学发展中相辅相成。这一对矛盾关系体现了马克思主义哲学的核心观点之一——矛盾论,即事物内部存在既对立又统一的双方,它们在发展中不断深化,既推动事物前进,又孕育出否定自身的因素,最终促成变化与转化^[17]。粒子说对波动光学现象的解释及“波粒”之争,生动体现了这一观点,同时是“对立与统一”“否定之否定”等哲学思想在光学研究及科学发展中的深刻体现。

在课堂教学中,这一部分内容可以以专题讲座的形式呈现,借鉴北京大学陈秉乾先生在电磁学授课中的模式——以故事化、逻辑性强的讲述

为主线,将科学史与物理原理自然交织^[18]。课堂伊始,教师可用“波动光学革命前夜”的历史背景引入,通过生动的叙述带领学生走进牛顿、马吕斯、毕奥等科学家的研究现场,重现他们的实验过程与思想争论。在讲解“粒子说中的波动影子”这一主题时,教师可以边推导边讲故事,例如在黑板上画出牛顿环示意图的同时,引入牛顿如何用粒子说解释干涉现象的思路,并与波动理论的观点进行实时对比。课堂中可以设置“思辨暂停”,鼓励学生站在历史人物的立场上思考:如果自己身处那个时代,面对相同的实验现象会作何解释?最后,联系马克思主义哲学的矛盾论,引导学生理解科学理论发展中的对立统一规律。通过这种讲座式的沉浸体验,学生不仅掌握了光学的核心知识,还能深刻体会科学思想的演变与哲学内涵。通过调查问卷等方式评估学生对这种教学方式的接受和反馈情况。

4 结论

通过对粒子说解释波动光学现象的分析,我们可以看到,科学理论的发展并非简单的线性演进,而是一个充满矛盾、交融与转化的过程。粒子说虽然未能最终全面揭示光的本性,但其中所蕴含的波动思想,为波动说的发展提供了重要的启示与铺垫。而“波粒”之争不仅推动了光学理论的不完善,也生动展现了科学研究中对立统一的规律。历史证明,科学理论之间的对立并非绝对排斥,而是相互激发、彼此促进的动力源泉。从粒子说到波动说,再到现代的波粒二象性与量子场论,人类对光本质的理解不断深化,每一步既建立在前人理论的基础之上,又通过扬弃其局限性实现突破。这种不断辩证发展的过程,不仅是科学进步的重要体现,也是科学精神的核心内涵之一。

在教学中,粒子说与波动说的历史演变具有重要的教育价值。引导学生了解这一科学史案例,有助于他们认识科学发展的非线性特征,理解科学知识是在不断的质疑、验证与扬弃中向前推进的。学生可以由此体悟到科学研究所需要的辩证思维,认识到对立中的统一与创新的价值。同时,这一过程能够培养学生的批判性思维和历史视野,激发其对科学探索的兴趣,使其更全面地把握光学理论发展的脉络及其背后的哲学思想。这样的教学设计,不仅有助于知识的传授,更能提升学

生的科学素养与创新能力,为其未来的学术研究与实践应用奠定坚实基础。

参 考 文 献

- [1] 钟锡华. 现代光学基础[M]. 2版. 北京:北京大学出版社, 2012.
ZHONG X H. Fundamentals of modern optics[M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2012. (in Chinese)
- [2] 蔡履中. 光学[M]. 3版. 北京:科学出版社, 2007.
CAI L Z. Optics[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [3] DARRIGOL O. A history of optics from Greek antiquity to the nineteenth century [M]. Oxford: Oxford University Press, 2012.
- [4] PELOSI G. Etienne-Louis Malus: The polarization of light by refraction and reflection is discovered [Historical Corner] [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2009, 51(4): 226-8.
- [5] NEWTON I. Opticks, Or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections & Colours of Light [M]. New York: Dover Publications, 1952.
- [6] HANSON N R. Waves, particles, and Newton's Fits[J]. Journal of the History of Ideas, 1960, 21(3): 370-91.
- [7] WHITTAKER E. A history of the theories of aether and electricity: vol. I: the classical theories; vol. II: the modern theories, 1900—1926[M]. New York: Courier Dover Publications, 1989.
- [8] KIPNIS N. History of the principle of interference of light [M]. Basel: Birkhäuser, 1991.
- [9] WESTFALL R S. Newton's reply to Hooke and the theory of colors[J]. Isis, 1963, 54(1): 82-96.
- [10] STUEWER R H. A critical analysis of Newton's work on diffraction[J]. Isis, 1970, 61(2): 188-205.
- [11] KOMECH A, MERZON A. The early theory of diffraction[M]. Gewerbestrasse: Stationary Diffraction by Wedges; Method of Automorphic Functions on Complex Characteristics. Cham; Springer International Publishing, 2019: 15-7.
- [12] FRANKEL E. Corpuscular optics and the wave theory of light: the science and politics of a revolution in physics[J]. Social Studies of Science, 1976, 6(2): 141-84.
- [13] PELOSI G. Etienne-louis malus: the polarization of light by refraction and reflection is discovered[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2009, 51: 226-8.
- [14] GARBACZ P, BARRON L D, FISCHER P. Fundamentals of chiral spectroscopy[J]. 2024.
- [15] CLARK E. Pioneers in optics; Jean-Baptiste Biot[J]. Microscopy Today, 2019, 27(2): 40-1.
- [16] BIOT J B. Traité de physique expérimentale et mathématique [M]. Paris: Deterville, 1816.

(下转第 114 页)

知识、提升学生提问能力和批判性思维能力上。在当前时代, AI 给出各种信息充斥着人们日常生活。学生应该抱着批判思维的角度来看待 AI 给出的结果, 必要的时候找权威资料进行进一步核实, 从而更好地驾驭 AI 工具, 让 AI 服务于教与学。

5 结语

基于 DeepSeek 大模型的 AI 智能体, 我们开发了大学物理 AI 教学助手。加入知识库后, AI 智能体求解大学物理习题的能力和知识点总结能力得到巨大提升, 其优异性能体现在以下几个方面: (1) 在处理知识库中的习题时, 模型能严格按照物理规律推导, 避免数值计算错误, 精准完成解答。对马文蔚版和王少杰版大学物理教材所有课本的例题和课后习题, AI 智能体解答准确率接近 100%, 能够完全保障习题解答的准确率。(2) 模型能够将复杂问题拆解为多个子步骤, 并对每一步的物理意义进行解释。(3) 若学生对某一步骤存在疑问, AI 助手可定位具体知识点, 进行深入讲解。(4) 模型可基于相关知识点生成习题, 帮助学生巩固知识点。(5) AI 智能体可以对教材中知识点进行总结和提炼。(6) AI 智能体可以根据复杂的物理公式生成 Python 代码, 运行 Python 代码就可以将公式可视化, 更加形象化地帮助学生理解物理概念。综上所述, 我们成功开发了具有实用价值的大学物理 AI 助教。模型不仅能够准确解答课后习题, 还通过生成个性化练习和互动辅导, 实现教与练一体化互动式教学支持。本研究为 AI 技术深度融合基础学科教学提供了可复制的范式, 其技术路径对新工科背景下的教学改革具有参考价值。

致谢: 资助本项目的基金: 2025 年度广东省本科高校教学质量与教学改革工程项目(高等教

育教学改革项目, 序号: 1268), 2025 年度广东省教育科学规划课题(高等教育专项, 编号: 2025GXJK0606), 2023 年教育部大学物理教指委教改项目(项目编号: DJZW202330zn)。本项目开发的大学物理 AI 助教智能体完全免费使用, 不用于任何商业用途。本课题在训练智能体的过程中, 采用了马文蔚等编著的《物理学》(第六版 高等教育出版社) 和王少杰等编著的《大学物理学》(第五版 高等教育出版社), 并参考了清华大学《大学物理》习题库中的相关内容, 在此表示衷心感谢! 如果读者对搭建智能体感兴趣, 可以与通讯作者联系获取技术上的支持。

参 考 文 献

- [1] 王琛琛, 张睿, 吴天刚. 大学物理知识图谱的构建及其在个性化教学中的应用[J]. 物理与工程, 2020, 30(5): 76-81.
WANG C C, ZHANG R, WU T G. The construction of college physics knowledge map and its application in individualized teaching[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(5): 76-81. (in Chinese)
- [2] 何钰, 孙燕云, 谢东, 等. 基于知识图谱的大学物理课程建设与实践[J]. 物理与工程, 2024, 34(6): 149-157.
HE Y, SUN Y Y, XIE D, et al. Construction and practice of college physics curriculum based on knowledge graph[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(6): 149-157. (in Chinese)
- [3] 周可雅, 孟庆鑫, 曹永印, 等. 问题牵引式大学物理课程知识图谱探索与实践[J]. 大学物理, 2025, 35(1): 66-69.
ZHOU K Y, MENG Q X, CAO Y Y, et al. Exploration and practice based on a problem driven knowledge graph of college physics[J]. College Physics, 2025, 35(1): 66-69. (in Chinese)
- [4] 范春蕾, 武荷岚, 解希顺. 试论 ChatGPT 对大学基础课教学的影响[J]. 物理与工程, 2023, 33(4): 7-11, 17.
FAN C L, WU H L, XIE X S. The influence of ChatGPT on the teaching of basic courses in universities[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 7-11, 17. (in Chinese)
- [18] 陈秉乾, 舒幼生, 胡望雨. 电磁学专题研究[M]. 北京: 北京大学出版社, 2021.
CHEN B Q, SHU Y S, HU W Y. Special topics in electromagnetism [M]. Beijing: Peking University Press, 2021. (in Chinese)
- (上接第 106 页)
- [17] 阮青. 学习运用否定之否定规律[Z]. 中共中央党史和文献研究院; 纪检监察报, 2024.
RUAN Q. Learning to Apply the Law of the Negation of the Negation[Z]. Institute of Party History and Literature of the CPC Central Committee; Journal of Discipline Inspection and Supervision, 2024. (in Chinese)