专 论

物理实验面临的机遇与挑战

蔡铁权 （浙江师范大学教育学院 浙江 321004）
谢佳莹 （江西省南昌中学 江西 330000）
薛 真 （浙江师范大学教育学院 浙江 321004）

摘 要 物理学是以实验为基础的实证学科，实验也是物理教学的内容、方法和手段。物理学的急剧发展，尤其是粒子物理、宇宙学、量子理论的突破性进展，人工智能的崛起，对物理实验的思想、理念、方法、器件以及功能形成根本性的冲击。文章从物理实验面对的发展机遇和面临的挑战局面去思考，并从语境实在论、科学实验哲学、科学仪器哲学、体知合一认识论、具身认知理论、科学本质观等理论视域，观照物理实验的本质，谋求物理实验化挑战为机遇，变困厄为动力的途径，达致物理实验的澄明之愿景。

关键词 物理教学 物理实验 机遇 挑战 愿景
文章编号 1002-0748(2026)11-0002 **中图分类号** G633·7 **文献标识码** A

物理学发展至今，由于科学技术的发展，实验中接触到的材料、器件、仪器、设施以及实验的方法都有了极大的改变，尤其当数字信息技术、网络、人工智能融入实验，使物理实验研究和物理教学面临着一种全新的机遇和挑战，这就需要我们做出认真的思考、研究和严峻的抉择。

1 物理实验当前的景观和面对的机遇

翻开近几十年，尤其是21世纪以来的国内外物理教育杂志，如《Physical Review Physics Education Research》《The Physics Teacher》《American Journal of Physics》和《Physics Education》或《物理教学》《实验室研究与探索》《实验室科学》等，实验研究和实验教学研究已成为热点，各种类型的研究纷至沓来，琳琅满目，信息技术辅助、AI赋能，生成式人工智能等更显得醒目显彩。这样的局面着实令人兴奋，这一方面大大拓展了实验研究与实验教学的领域空间，另一方面，也极大地激活了人们的思维和丰富了研究的方法，对传统实验的方式从根本上做出了更新，这的确是令人欣喜的景象，即给实验研究和实验教学带来了极其难逢的机遇。只要简单地择要列举一下，即可见这种场景之一斑。

（1）数字实验系统(DISLab)。数字化实验的设想源起于20世纪60年代初的美国，在80年代，由于数字化实验的应用、研究、生产推广，已经改变了全球基础教育理科实验的样貌。20世纪90年代，数字化实验进入中国，使用传感器和计算机演示的中学物理实验引起了广泛的关注。21世纪初，我国基础教育课程改革推进了数字化实验进入校园，而在物理实验教学中的应用与研究最具代表性。目前的数字化实验系统，已成为拥有上百种传感器、数百种创新成套器材，与计算机及信息技术深度融合的新型物理实验工具体系。

数字化实验系统有效地弥补了传统实验上的不足，为学生的科学探究提供了广阔的空间和多样的手段，为物理学科核心素养的全面发展创造了有利的条件。其独有的数据采集、计算与分析功能、数形转换及数理融通的属性，已成为学生建构物理模型、实验论证、培养高阶思维、养成科学态度与责任、达成物理观念等方面的有力工具。数字实验系统正在各大、中学校物理实验研究与教学中得到广泛应用。

（2）虚拟仿真实验。虚拟仿真软件基于Flash平台完成，并生成“单机版”和“移动版”。虚拟仿真在极端条件、微观运动、宇观现象及实验室、教室无法实现的实验具备特别的优势。如物体在不受外力作用条件下的运动、月相变化、开普勒运动定律、分子运动、卢瑟福散射实验、核的裂变和聚变等。随着三维仿真实验的发展，大大增加了实验的可观察性和真实性，提高了实验的效果。

虚拟仿真实验可以丰富教学内容，提高教学功

能、拓展实践领域的教学效果。将理论知识、仪器结构、实验内容和具体操作有机结合，有利学生随时随地进行实验，摆脱了时间、空间和实验设备的限制；并将课前预习、课中操作、课后复习有效贯通。对于一些实验中需要用到的有毒害、有腐蚀性的化学试剂、不可及不可逆或高危操作、高成本耗材与价格昂贵的设备等，虚拟仿真实验可以弥补其中缺失的环节。同时可以在线学习，即在计算机或手机上练习与操作，提高了学习的效率和便捷性。

（3）AI赋能的大、中学校物理实验。自2022年以来，生成式人工智能（Generative Artificial Intelligence）工具大量涌现。2024年，我国教育部启动了推动人工智能在教育领域深度应用的总体战略部署，AI赋能的大、中学校物理实验教学成为推动基础教育课程改革、提高物理教育质量中一道靓丽的风景线，引人注目。

AI技术凭借强大的数据处理、智能分析和个性化推荐能力，能有效解决以往实验教学中反馈滞后、教师指导缺乏针对性等问题，并可实现教学资源的高效配置，达到教学过程智能化，学生得到个性化学习的指导与支持、评价与反馈。为物理实验教学以至物理教育改革与发展提供新颖的模式、方法与途径，为基础教育智能化发展提供借鉴。

（4）教学微视频。教学微视频涵盖DV短片、小电影、视频剪辑、纪录短片等，内容丰富多彩。通过DV、PC、MP4、摄像头、手机、DC等多种视频终端实现播放接收。时间短则几十秒，长则几分钟，形式灵活多样，可视化效果良好。

教学微视频在创设情境、提出问题、经历探究过程、构建物理模型和课前预习、课后复习、答题解惑等方面都有不可替代的功能，是一种重要的物理实验辅助形态与手段。

2　物理实验现实的困境和面临的挑战

“实验室”一词来自于17世纪初中世纪拉丁语Laboratorium，是指用于科学实验、研究或教学，用于制造药物、化学品的房间或建筑物。而对于实验的发展来看，从化学之父波义耳（Robert Boyle）进行私人领域意义上的实验，到德国的世界著名化学家李比希（Justus von Liebig）开创的大学实验室教学与研究模式，再到美国因战争推行的由费米（Enrico Fermi）担任负责人之一的“曼哈顿计划”，这一历史过程充分揭示出科学知识生产规模扩大与原始创新能力的提升都离不开实验方法的确立与实验室的升级。在当代，顶尖科学技术成果的诞生也往往与大型实验室的建设与新型实验仪器的创制密不可分，希格斯玻色子的发现、引力波的被探测、黑洞照片的拍摄、量子纠缠态的确证、阿秒技术的成功，等等，无不如此。

当前引起热议的信息技术融入物理实验的各种方式和方法，对真实实验所起的主要是辅助、强化、扩大、补充、优化和赋能的作用，真实实验是无可替代的，而且是不可弱化的。

（1）物理实验的物理教学功能对认知的挑战。根据斯坦福大学的维曼（Carl Wieman）等的教育实证研究[1]，康奈尔大学的史密斯（Emily M. Smith）等的课程对照研究[2]，他们的研究结果表明，物理实验对学生的考试成绩没有可观测到的直接影响，即使改变实验课强化物理知识或者强化物理实验技能，也不会影响物理考试的成绩。因此，不能仅通过考试成绩的高低去衡量物理实验的有效性以及给学生物理学习带来的效果，实验课开设与否或实验课开设的水平与质量不能仅以考试成绩是否提高为依据。也就是说，无论物理实验的开设以及方式及质量，并不以提高学生的笔试成绩为目的。这就使物理实验，对教学评价及评价的方式提出了严峻的挑战与质疑。尤其在一些仅以考试成绩为唯一判据导向下的学校，导致了一种极端的功利趋向来影响学生的发展，即认为物理实验费时费力又费钱却不提分，不如做实验题对提高解题能力，应付考试得分更见效，殊不知，这种做法违背了物理学的本质，悖反了物理教学的初衷，异化了物理实验教学的目标。

操作性的真实实验，其重要的教育教学功能和价值体现在哪些方面？今天，对学生学科核心素养发展的作用是什么？物理实验承载的教育与文化的使命何在？这既是我们摆脱现实困境、直面挑战的需要，也是物理教学发展的必然抉择。

康奈尔大学的史密斯等开发了E-CLASS和LES工具衡量学生关于物理实验的态度和信念。科罗拉多大学的维尔科克斯（Bethany R. Wilcox）等也利用了这一评价工具实施研究[3]。结果表明，在开放式和设计型的实验中，学生对物理实验的态度、信念及对实验认知的作用显著，学生能更深入全面地认识到物理学理论和物理实验的深刻的内在联系。而且，学生都愿意花费更多的时间做实验，同时，参与实验显著地改变了学生对物理实验本质的个人观点。

罗格斯大学的卡兰丽娜（A. Kalanlina）等研究者利用科学能力量表进行研究，结果表明：学生在实

验中充当设计者时，他们会把实验看成是专业的实验研究，更加注重逻辑思考和科学推理[4]。

上述研究的结论启示我们，如何充分开发学生实验的潜在功能，正确认识实验的地位和作用，揭示物理实验的本质，这正是实验教学上所面临的挑战之一。

(2) 量子力学理论对物理实验在观念、思想、理论和技术上的挑战。科学实验的功能是发现与论证，教学实验的作用是探究与验证。牛顿力学体系是一个由公理化方法构建起来的演绎体系；严格的因果决定论，纯客观性。牛顿力学建立的方法论共三步：①实验，通过实验把相关现象分离出来，并对其进行测量；②归纳，从现象中归纳出一般的规律；③整合与预言，通过一般规律对观察现象进行演绎证明，并预言有可能出现的新的实验现象。实验、测量、观察、语言表达、符号赋义都是无歧义的，观察陈述与实验事实是中性的，是对自然界内在本质的揭示，是形成理论的基础或是证实理论的判别标准。牛顿力学的显著特征表现在：超时空性表明的无条件性；严格的因果决定性表明的无歧义性；这两者又共同决定了纯客观性。牛顿经典力学对宇宙的深刻洞见，漂亮的数学表达，难以置信的精确预言，对人类文明的深刻影响，成为了此后三百多年来指导物理学研究的无可撼动的科学范式。也是经典物理实验所遵从的无尚规则。量子力学假定，微观粒子是作为希尔伯特空间中的算符存在的。只有当我们观察它时，它才在那里，当不观察它时，它是四维时空中的一种“抽象”实在，所以，我们不能根据观察到的状态来推断粒子在观察之前的状态，当然，这里并不是否定了微观粒子的本体性，表明的是微观粒子的真实存在是有限的人类永远无法直接观察到的。那么，物理实验中的测量是什么？测量离不开测量仪器，而仪器是已有理论和经验的物化形式。正如瓦托夫斯基(Marx W. Wartofsky)说的：“测量的物理工具和仪器是一个测量系统的具体化，是以硬件和技术体现着一种观念结构，在这种结构中，各种量值在理论上得到整理，各种具体的数被安置在一种演绎的理论网络中。”“仪器给测量带来某些属性，它们扩展了观察的范围、精确度和稳定性。”[5]但是，当测量仪器参与了研究对象的“制备”，并影响了科学家的整个认知过程时，科学哲学是不是要转向仪器实在论的研究？对无法直接观测的微观粒子，不可能像经典实体那样，能获得任何直接的感知。通用经典的概念、语言和图像，如何赋予这些微观粒子以本体论的地位？远离经验而抽象地构建起来的理论，还能被认为是对实在的描述吗？量子物理学家用“投影假设”或“塌缩假设”等一些思想实验解释量子测量问题，在这种解释中，物理学、哲学与心理信仰问题已经密切地联系在一起了。在亚原子世界中，“基本粒子”“有形的物质”“孤立的物质”已完全失去了原有的意义。在高能物理中，分割亚原子的唯一方法是让它们猛烈地相撞，但是，相撞后的碎片仍然是同类粒子，而且是从碰撞过程中所包含的能量中创生出来的。尽管目前物理学家还不能对上述机制提供令人满意的理论，但已经是在根本意义上颠覆了通常的物质观念、粒子观念和能量观念[6]。

(3) 未来智能化社会可能带来的新的哲学观念[7]对物理实验将会引发的挑战。人工智能的快速发展，世界也处于快速变化之中，如何重构概念框架或丰富现有的概念工具箱，是我们面临的概念挑战。这使物理实验所蕴含的各方面的概念都面临变化、重构、删减、丰富等。人工智能是由大数据驱动的，如何理解数据之间的相关性所体现出的测量或决策作用，是我们所面临的思维方式的挑战。物理实验与测量和思维方式是密切相关的。在一个全景式的智能化社会里，将面临新的伦理、法律和社会的挑战。物理实验不可避免伦理、法律、STSE 和 SSI 等方面的问题。当人类社会由传统上求力的技术所驱动的工业社会，转向由求智能的技术所驱动的智能化社会时，人类必然面临技术的挑战。这种挑战对物理实验是更为直接的。在知识生产领域，软件机器人的普遍使用，将为科学家提供科学认知的新视域，如何对待有软件机器人参与的分布式认知，是人们面临的对传统认识论的挑战。物理实验无可置疑地是位于知识生产领域的核心，必然要面对认识论的问题。当整个人类成为彼此相连的信息有机体并且与信息人造物共享一个数字化的信息空间时，如何理解分布式的认知责任，是人们面临的对传统责任观的挑战。物理实验同样要承担这种认识的责任，等等。机遇与挑战同在，困厄与发展共存，我们应寻求新的视角，获取新的途径，到达发展的愿景。

3　物理实验理论的观照和发展的愿景

现代物理学的急剧发展，特别是量子力学理论、粒子物理学、宇宙学和人工智能的发展成果，引起科学哲学论域空间的不断扩展，科学研究方法的不断丰富，思维方式的不断更新，新理论、新技术和新材料的不断出现，对物理实验的理解和诠释的视角和视域也得到了不断扩张，这为我们思考物理实验面

临的机遇与挑战带来了契机。

(1)语境实在论。语境实在论(Contextual Realism)是1966年由美国乔治·华盛顿大学的斯查哥尔(Richard H. Schagel)提出,20世纪的科学发展所蕴含的实在观越来越明显地确证了“语境实在论”的意义所在。这种实在论认为,“实在”是由无数呈现构成、特性、结构和过程的语境层次组成的。既包括所有现实存在的物质,也包括所有可能存在。语境实在论认为,科学研究是一项探索性的事业,科学认知结果中既有自在实在的信息,也有主体建构的信息,是主客观统一的结果,认知程度的提高构成了科学发展的未来。在一定的意义上讲,理论实体的概念通常是在根据一系列的实验操作和能够对这些操作结果做出解释的成熟的理论框架内发明的。它的指称既依赖于理论语境,也依赖于实验语境。理论实体并不是对实在的镜像反映。语境实在论具备六个基本原则:本体论原则,方法论原则,认识论原则,语义学原则,价值论原则,道德原则。语境实在论是一种开放的、动态的、兼收并蓄的、更有生命力和辩护力、更与当代大科学时代的认识相符合的实在论[8]。物理实验的研究与理解及理论框架,是离不开与语境实在论这种最新的科学哲学理论的指导的。

(2)科学实验哲学。科学实验哲学在20世纪80年代有一个快速的起步,之后10年间有一个缓冲过程,21世纪初关于科学实验的历史和社会科学的研究常常与哲学问题相关联。如稳定性(stability)概念,在科学研究进程内部,实验实践的一个主要特征就是,某种相互作用的稳定性是涌现在实验实践的不同种类元素的多样性中的。这些要素包括,在研究中的物质材料加工程序,仪器的各种模式以及处于研究状态下的各种现象模式,“稳定”显示了确定的常态特征。如果“稳定”意味着能够有效抵抗现实的或可能的干扰,那么进一步的哲学问题来了:有什么样的干扰?稳定过程的什么特征能说明这种鲁棒性?这些特征是事实的还是规范性的?处理这些问题要理论性的探索,即典型的哲学。关于实验科学中使用仪器的本性和角色的论述,关于仪器的理论和物质程序与实验结果的理论解释之间关系的论证。科学实验哲学的中心论题包括:①实验的物质实现;②实验和因果关系;③科学—技术关系;④实验中理论的角色;⑤建模和(计算机)实验;⑥使用仪器的科学和哲学意义。此外,在成熟的科学实验哲学中应该进一步深入讨论的议题:科学观察与实验的关系,观察是理论负载的,观察到的应是经验事实而非客观事实,则观察与实验如何处置相互地位;社会和人文科学中的实验,即实验在社会科学和人文学科中的作用;科学实验的各种规范和社会问题,包括严肃的伦理问题,自然和人工的对照等。

(3)科学仪器哲学。普赖斯(Derek de Solla Price)在20世纪80年代提出了“科学仪器哲学”(The Philosophy of Scientific Instruments)这一术语,并指出,众多科学史学家以及几乎所有的科学哲学家都是“复归”(born-again)的理论家而非实验科学家。同样令人遗憾的是,在我们学科的早期维多利亚时代形成期,出现了如此多的神话故事。我们深受关于伽利略(Galileo Galilei)在比萨斜塔、牛顿与苹果的那些鼓舞人心的故事之害——这是对炼丹术的一种浪漫化。普赖斯提出,依据有关仪器起源的历史证据,首次尝试撰写一部仪器史,探讨其在科学中不断变化的地位的哲学,这样一部简史,是科学发展的结构中重要的一部分。它既与这些科学仪器和设备的制造者所处的外部社会历史相关,也与科学内容的内在逻辑紧密相连[9,10]。从科学仪器哲学的视角看,不理解科学仪器,就不能完整地理解科学思想,也不能全面地把握科学史。仪器与科学理论、科学实验是科学进展的三个基本判据,理论—实验—仪器三位一体的关系是理论实体的充分体现。科学仪器不是外在的工具,而是科学思想的器物形态,可以将科学思想的本质及其发展过程理解为科学仪器的制作、改进和现代化的过程。科学实验可以理解为科学家运用技能与技巧这些“默会知识”去使用仪器的过程。

(4)体知合一认识论。体知合一认识论(Epistemology of Embodiment)认为,科学家的认知是通过身体的亲历而获得的,是身心融合的产物。“以强调身心融合为基点,内在地摆脱了传统认识论面临的各种困境,把对人与世界的关系问题的抽象讨论,转化为对人与世界的嵌入关系或语境关系的具体讨论,从而使科学家对科学问题的直觉解答具有了客观的意义。体知合一认识论以阐述技能性知识(skillful knowledge)的获得为目标,把对认识论问题的讨论从关注知识的来源与真理的问题,转化为通过规则的内化与超越而获得的认知能力的问题,从而使得规范性概念由原来哲学家追求的一个无限目标,转化为与科学家的创造性活动伴随的不断建立新规范的一个动态过程[11]。体知合一认识论为物理实验的教学功能提供了适切的理论。

(5)具身认知理论。具身认知(embodied

cognition)的探讨最初是从心智具身性或具身心智(embodied mind)的思考开始的。具身认知的研究始于21世纪初,现已引起广泛的关注,并逐渐为人们所接受。具身认知可以从三个视角加以理解:①身体的状态直接影响着认知过程的进行,我们的知觉和运动系统在概念形成和理性推理中扮演了一种基础性的角色。②大脑与身体的特殊感觉—运动通道在认知的形成中扮演着至关重要的角色,在身体与外部环境互动的过程中,大脑通过特殊的感觉和运动通道形成具体的心理状态,从而构成了概念加工的基础。③具身认知不仅把身体,而且把环境的方方面面包含在认知加工中。因此有:作为身体学习的"具身",作为身体经验的"具身",作为认识方式的"具身",作为环境融为一体的"具身"的说法。具身的性质与特征可以从几个方面得到论证:①身体参与认知,身体本质性介入了认知过程,影响了我们的思维判断、记忆、分类和概念的形成。②知觉是为了行动,思维和判断等认知过程本身与身体的感觉—运动系统构成了耦合关系,认知的作用并非中枢的符号加工,而是为了使有机体更好地适应环境。③意义源于身体,意义建筑在身体经验的基础上,人类的概念形成、语言表达、认知判断都基于身体的运动图示,意义的产生离不开身体的感觉运动系统,身体的活动造就了事物对我们的意义。不同身体造就不同思维方式,不同的身体导致不同的身体体验,不同的身体体验又造就了认知上的差异,形成不同的思维方式[12]。具身认知理论为实验提供了心智发展和思维提升的别样途径。

(6)科学本质观。科学实验是科学活动的主要方式之一,这就决定了物理实验必须遵从科学活动的原则和符合科学原理,受科学本质观的制约和引导,基础教育课程改革将科学本质观纳入科学学科的核心素养内容之中,这是对科学本质的深刻理解的体现。科学本质观对物理实验具有多方面的规约和启示。实验、观察、理论是密不可分的,对理论的建立与实验事实、现象相互间的复杂相依存相制约的关系有十分深刻的阐述,所以,从科学本质观的视角审思大、中学校中的物理实验,可以获得对实验的深刻洞见与共识。

此外,实验与物理学科核心素养有紧密的内在关联,对教师的专业发展具有有力的推动作用,同时,对科学、技术、工程的相互关系,对科学、技术、社会、环境的互动等方面的理解,科学伦理学、科学史、科学哲学、科学心理学等对实验的影响都是不可忽视的。

4　结　语

由于近代科学兴起以来,科学实验伴随着量子力学理论上的突破和发展,各种新技术和新型材料被发现,加上现今信息技术的广泛应用,AI技术的崛起,都对科学实验,尤其是对物理实验形成了在观念、理论、思想、机制等方面的有力冲击,物理实验既面临机遇也面对挑战,如何化挑战为机遇,变困厄为动力,我们提出从语境实在论、科学实验哲学、科学仪器哲学、体知合一认识论、具身认知理论和科学本质观等理论视域去观照物理实验,深刻认识物理实验的本质、特征与功能,寻求新的突破口和创新发展的策略,谋求物理实验和教学达到全新的澄明之境和相应的高度。

参考文献

[1] Carl Wieman, N. G. Holmes. Measuring the impact of an instructional laboratory on the learning of introductory physics [J]. Am. J. Phys.,2015(11):972—978.

[2] Emily M. Smith, Martin M. Stein, Cole Walsh, N. G. Holmes. Direct Measurement of the Impact of Teaching Experimentation in Physics Labs [J]. Phys. Rev. X, 2020(1):11—29.

[3] Bethany R. Wilcox, H. J. Lewandowski. Open-ended versus guided laboratory activities: Impact on students' beliefs about experimental physics [J]. Phys. Rev. Phys. Educ. Res., 2016(2):020132.

[4] A. Karelina, Eugenia Etkina, Maria Ruibal-Villasenory, David Rosengrant, Alan Van Heuvelen, Cindy Hmelo-Silver. Design and Non-design Labs: Does Transfer Occur? [J]. AIP Conference Proceedings, 2007(1):92—95.

[5] M·W·瓦托夫斯基.科学思想的概念基础——科学哲学导论(新校译本)[M].范岱年,等译.北京:求实出版社,1989:259—260.

[6] 成素梅.量子论与科学哲学的发展[M].北京:科学出版社,2012:29—44.

[7] 成素梅,张帆.人工智能的哲学问题[M].上海:上海人民出版社,2020:1—15.

[8] 成素梅.理论与实在[M].北京:科学出版社,2008:193—205.

[9] 汉斯·拉德.科学实验哲学[M].吴彤,何华青,崔波,译.北京:科学出版社,2022:1—15.

[10] Derek de Solla Price. Philosophical Mechanism and Mechanical Philosophy: Some Notes Toward a Philosophy of Scientific Instruments [J]. Annalidell' Istitutoe Museo di Storiadella Scienza di Firenze, 1980(5):75—85.

[11] 成素梅.技能性知识与体知合一的认识论[J].哲学研究,2011(6):108—114.

[12] 叶浩生.具身认知——原理与应用[M].北京:商务印书馆,2022:26—57.