

数字教师与平行教育：关于ChatGPT之后教学变革的探讨

王飞跃

(中国科学院自动化研究所, 北京 100190)

摘要：从历史到现在，教育在本质上都属人工智能的范畴。而且，教育必须是人工智能排位第一且最重要的应用领域。否则，日益复杂的智能科技将不但不可解释，还会变得无法治理，很容易被少数人利用并伤害大多数人的利益。针对ChatGPT引发的全球性各个社会层面的人工智能冲击，讨论如何有效地利用智能科技，特别是基于大模型和生成式智能技术的数字教师和平行学校，促进智能科技在教育教学中的深度应用，加速教育科技和教学模式的智能变革，从而更加有效地造福人类，确保人类命运共同体的安全、健康与可持续发展。

关键词：分布式自主教育；ChatGPT；人工智能生成内容；新文科；数字人；数字教师；人工智能；平行智能；平行师生；平行学校；平行教育；智能教育

中图分类号：TP399

文献标志码：A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202348

Digital teachers and parallel education: A paradigm shift in teaching and learning after ChatGPT

WANG Fei-Yue

Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: From its historical origin to present function, education is an inspiration and integral part of our quest for artificial intelligence(AI). We must ensure that teaching and education should be positioned as the first and most important field for research and development of intelligent science and technology. Otherwise increasingly complicated AI technology would not only remain unexplainable but also become ungovernable, and be manipulated easily by some minority of our human beings to harm the majority of us. Considering the current impact to all aspects of our society at the global level by ChatGPT and likewise artificial intelligence-generated content(AIGC)/artificial general intelligence(AGI) technologies, hereby we investigate a new approach to effectively deploy intelligent technology, especially digital teachers and parallel schools, for intelligent teaching and smart education. We hope this would lead to a paradigm shift in teaching and education for the benefits of humanity, and safe, healthy, sustainable development of our shared human community.

Key words: DeEdu, ChatGPT, AIGC, new social sciences, digital human, digital teachers, artificial intelligence, parallel intelligence, parallel teachers and students, parallel schools, parallel education, smart education

收稿日期：2023-11-24；修回日期：2023-12-01

基金项目：国家自然科学基金项目 (No.61533019)；国家社会科学基金项目 (No.19ZDA364)；松鼠AI项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61533019), The National Social Science Foundation of China (No.19ZDA364), Songshu AI Projects

0 引言

目前，各个国家对ChatGPT之类的智能科技在教育活动中的应用态度不一，有支持鼓励的，有观望探索的，也有立法打击的，这充分反映了不同地区对其效果与意义的不同理解。对此，我们应该如何去理解？更为重要的是，我们必须认真思考，一旦ChatGPT之类的智能技术成熟并普及之后，学校该教什么？又该如何教？

数学家、科学家、哲学家、教育家怀德海（Alfred North Whitehead, 1861—1947）认为教育教学就是让学生在校园里“所学到的东西，能够帮助其理解在其生命中所发生的一系列事情”^[1]，而且，这个理解“不仅仅是一种逻辑上的认识”，还是法语格言所说的：“理解一切，即宽恕一切（to understand all, is to pardon all）”之中所含一切的意义。

因此，我们不妨借此认识来“理解”ChatGPT在教育方面的效果与意义，即“宽恕”其带来的变化，坦然地投入其中，积极主动地推动智能科技在教育教学中的应用。

此外，怀德海还认为：“我们想要的‘理解’，是坚定不移地对现在的理解。知识的唯一用途，就是武装我们的现在，没有比轻视现在对年轻人的危害更大的了。”他特别强调，这个“现在”就是“现在包含了一切，现在是一个神圣的所在，因为它既联系着过去，又包含着未来。”对于我们而言，现在的重要问题是教育在ChatGPT之下的“现在”又是什么？

我们认为，随着以AlphaGo和ChatGPT为代表的新AI技术不断发展成熟，人类社会的知识基础设施将发生根本性变革，甚至“知识”和“才能”的定义也将发生改变。简言之，今天学校教的“科学知识”和“专业知识”可能很快就会变为不学而知的“科学素质”和“科技常识”。现在实施的许多教育理念和要求，对于即将或已经到来的智业社会，几乎等同于用农业社会的意识与手段培养工业社会所需的人才，只能是缘木求鱼，无法完成其目标，不但是浪费时间和资源，而且是对学生身心和心智的摧残^[2]。

由此，人类必须加快教育的变革，使之适应历史性的社会大变革。本文将就此进行初步探索，推动建设“联系着过去，又包含着未来”的智业社会

之教育的“现在”，服务于人类命运共同体的安全、健康、可持续发展。

1 从工业到智业的变革：现状与问题

人工智能的发展趋势、形形色色的智能科技的不断涌现，充分表明从工业社会向智业社会的历史性大变革已经开始。从农业到工业，社会的基础知识结构和教育基础设施都发生了巨大的变化，农业时代原本专属于士大夫等社会精英“人之为人”的许多重要且专业的知识，成了工业时代普通人的普通“人文素质”，无需特别学习也会知道一些，多了反而成了不合时代的“之乎者也”。我们不得不问，从工业到智业，变化又将如何？

毫无疑问，随着大模型生成式和智能技术的加速迭代和不断涌现，社会的基础知识和教育设施必定再次发生根本性的变化。如同农业到工业变革时的教育大变革转折，除了少数领域，数理化及计算机等大部分专业知识将不再是必须专门学习的东西，将不可避免地成为普通人的普通“科学素质”和“科技常识”，无需专门学习就会了解许多，并足以应对其生活和工作中遇到的绝大多数问题。

尽管“教什么”“学什么”是一个极其复杂的问题，而且难以在短期内形成广泛的社会共识，但其中的两点已经成为世界范围许多有识之士甚至多数人士的共同认识，即：精简内容，让师生有更多的自由时间进行学习；变革课程，让师生都有更大的自主空间进行探索。更为重要的是，比变革教学内容更为艰巨、更具影响与意义的工作，就是如何变革学校中知识和学科的结构与布局，如何重新设计、设置、实施面向已经来临的智业社会之新的课程以及相应的新考核方式与方法。

由于目前许多课程的科学知识在新的智业社会基础设施中将大概率成为不需专门学习的“科学素质”与“科技常识”，如同今日之“人文素质与常识”一样，今后不应再有我们熟知的数理化生等分科课程。今天，机器学习算法可以轻易地解答数学奥林匹克竞赛问题^[3]，可以想象，在智能科技更加成熟普及之后，未来最主要的学科和课程可能就是复杂性科学（complexity of science）和相关课程，核心目的是培育学生应对不定的未知世界之创新能力。而且，复杂性科学知识或许只有一种可行的学习和研究途径，就是交叉学科或融学科

方法 (interdisciplinary approach); 只有一种有效的掌握和应用手段, 就是虚实结合、知行合一、人机一体的平行方式。由此, 从元学科到超学科 (如图1所示), 从自然哲学到智能科学 (如图2所示), 最终实现学科交叉和科技一体的新文科、新理科、新工科知识体系 (如图3所示)。在此学科结构下, 大模型和元宇宙技术, 还有区块链智能 (blockchain intelligence)、智能合约 (smart contracts)、分布式组织与行动 (decentralized autonomous organizations and operations, DAOs) 将变得极为重要, 学校会借助“新文科、新理科、新工科”的形态自然回归到以培养人性和想象力为主的社会教育基地, 确保人类命运共同体安全、健康、可持续发展。

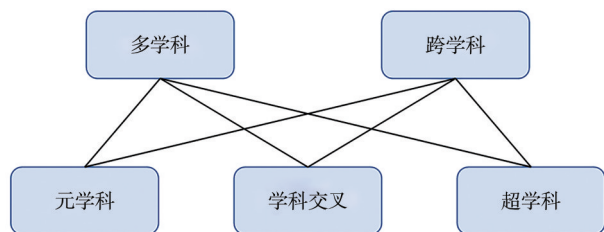


图1 融学科：从元学科到超学科

然而, 复杂性科学意味着什么? 内涵是什么? 课程如何设计? 除了少数专家的“复杂性科学是21世纪的科学”之口号外, 目前学界并无共识。就连当今几乎人人都认为非常重要的交叉学科, 尽管许多地方已设立相应的研究和教育机构, 但目前连相应的多学科 (multidisciplinary)、融学科 (interdisciplinary)、跨学科 (transdisciplinary) 之间的关系和交往机制仍无共识。这种情况下, 我们如何设计、设置新的学科课程?

一条可行的途径就是将人工智能用于教育的早期开拓者派珀特 (Seymour Papert, 1928—2016) 等提倡的“干中学、学中干 (doing by learning, learning by doing)”方法。此外, 20多年前麻省理工学院 (MIT) 等高校提出的“设想、设计、实施、运维” (conceive, design, implement, operate, CDIO) 课程教学理念与技术在此可发挥重要的推动作用。过去10多年, 中国科学院团队与青岛智能产业技术研究院 (QAI) 已将CDIO扩展到iCDIOS, 还将STEM扩展至iSTREAMS, 加入机器人 (R)、研究 (R)、艺术 (A)、人工智能 (A)、制造 (M)、管理 (M) 等内涵。首先强调培养学生的5个i意识, 即: 激励 (inspiration)、创新 (innovation)、智能 (intelligence, 包含情报意识)、交叉 (interdisciplinary, 包含自主)、国际化 (international, 包含人类命运共同体), 最终要确保教育的结果能够促进人类命运共同体的6个“S”发展, 即: 物理世界中安全 (safety)、网络空间安全 (security)、生态世界中可持续 (sustainability)、个性化权益 (sensitivity, 包括隐私权等和择优发展)、全面服务 (service)、全面智育 (smartness)。

令人高兴的是, 目前世界各地中学和高等院校兴起的各种知识技能型学生比赛的风潮, 为考核未来新课程提供了一种可能的解决方案: 以比赛代替传统考试, 化传统考试为参加和进级比赛的资格赛。例如, QAI智航学校组织的无人机、机器人、人工智能比赛, 要求学生的课程成绩达到一定水平才可以参赛, 结果不但促进一些平时对课程学习无兴趣的学生主动自己补习, 提高成绩参加比赛, 而且减少了考试作弊的现象, 使整个学校的考试成

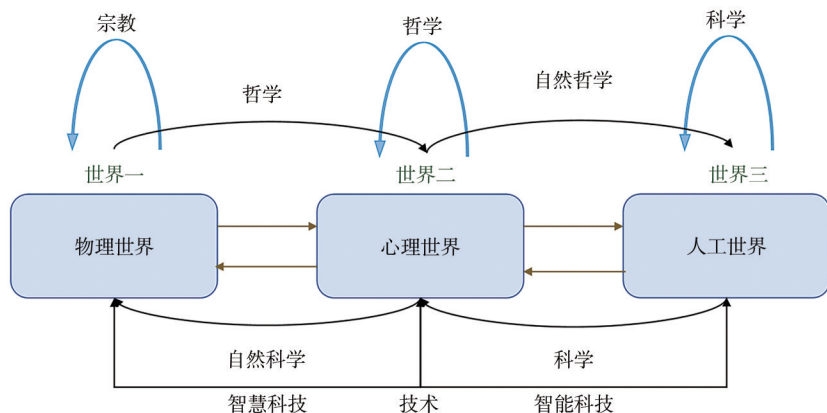


图2 基于波普尔3个世界的智能科学：自然哲学与自然科学的再认识

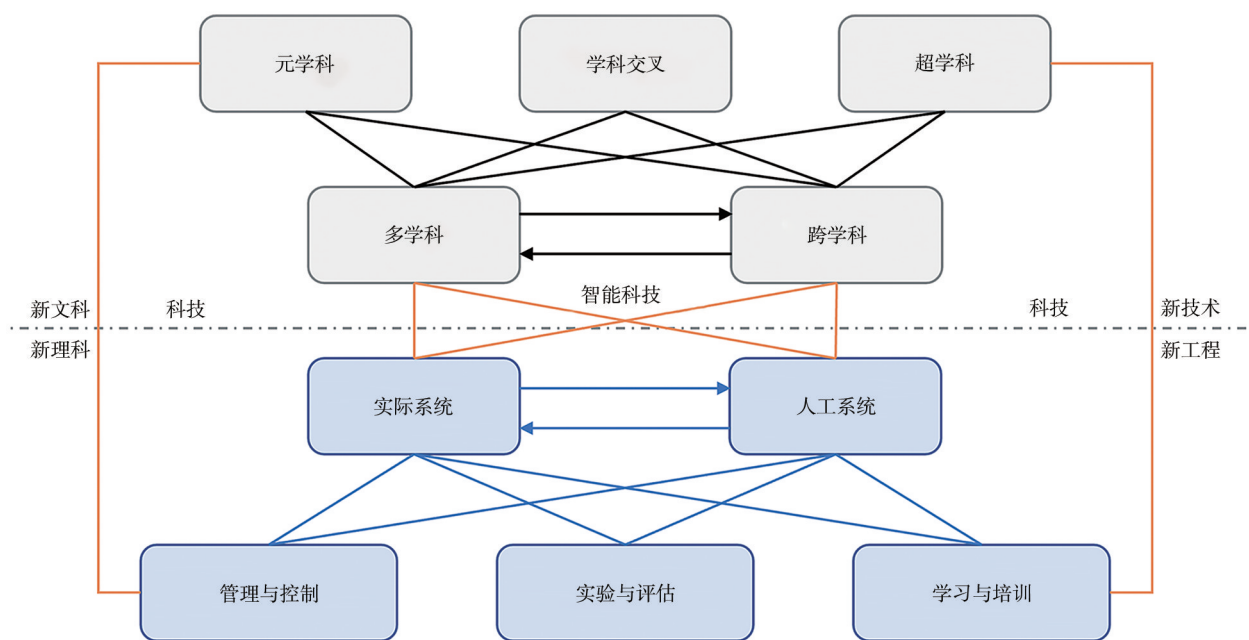


图3 平行科学：新文科、新理科、新工科

绩都得到了提高。更为主要的是，比赛培养了学生在动手、交流、组团、规划、调试、控制、管理、指挥、应急等方面的能力，这些正是传统教育相对薄弱的环节，更是这个时代所迫切需要培养的能力。

有趣的是，人工智能时代的兴起就是从“打榜”比赛开始的，而开源资源和技术的发展壮大，特别是大模型和场景工程的出现，在本质上既复杂又交叉，不但为智能技术的进一步发展提供了坚实的基石，更为教育教学的进一步变革提供了有力的基础和保障。

2 面向3个世界的教育大模型：从数字人教师开始

如何进行面向智业社会的变革？首先，我们需要根本性地改变现有的专业文化和知识基础，重新思考AlphaGo和ChatGPT之类的智能技术成熟和普及之后，相对于新的知识基础设施，届时何谓知识？如何树人？

其次，我们必须认识到教育才是人工智能和基础科技最重要的应用领域，必须排位第一，否则普及、提高并长期可持续发展将是一句空话。为此，研究并推动教育产业及其形态的创新，迫在眉睫。

基于平行智能和平行教育的研发成果^[4-17]，我

们的基本理念就是：我们已进入了一个“老IT（industrial technology，工业技术）”“旧IT（information technology，信息技术）”“新IT（intelligent technology，智能技术）”3种IT技术联合开发波普尔（Karl Popper，1902—1994）世界大模型的新时代，即“物理”“心理”“人工（虚拟）”3个世界的“第三轴心时代”，其特征就是包容、共赢，是第三波智慧型全球化的开始。这次全球化不同于“第一轴心时代”的“负和（negative sum）”全球化、“第二轴心时代”的“零和（zero sum）”全球化，这次是“正和（positive sum）”的全球化，其经济特征就是知识特有的边际效应递增，而非传统的递减，确保“你有、我有、他有”的物质基础。新的教育形态必须考量这一时代特性。

这是远比语言大模型和视觉大模型更加广阔的世界模型视角。而现有这些大模型智能技术已足以表明，变革教育产业和形态最直接、最自然的方式，就是将自然与人工相平行，从自然知识到人工知识，引入“数字人师生”和“机器人师生”与生物人师生相平行。而且，让这些师生平行相交，从欧式空间到非欧空间，在其中构建平行学校，培育平行师生，形成教育新生态和新范式。简言之，就是“3个世界，3类师生”：按照Pareto的“80/20”管理法则，数字人师生占80%以上、机器人师生

应占15%以下,生物人师生应占5%以下,共同构成平行师生(如图4所示)。

大模型技术所衍生出的“对齐”和“提示”工作以及相应工程师工种的出现,预示今后相当体量的教育教学工作将归为“对齐”和“提示”,相应的教育工作者不但不会失业,数量极可能还将大幅度增加,但将被“快递小哥化”。人类教师不可替代的核心作用是传承传授生理和心理方面的人性知识与行为,但这可能很大程度上将以“对齐”和“提示”的“智能”新方式贯彻执行。

当前人工智能的大模型和生成式技术的发展是对这一新的教育形态设想的最有力支持,智能技术发展的趋势表明,“大问题、大模型”正在迅速地转向“小问题、大模型”的垂直细分化。这一趋势,加上围绕大模型生成式的进一步开发^[18-20]和智能代理技术的成熟^[21-23],针对教育问题的每一种“小问题、大模型”就自然地定义并引入了一类“数字人教师”。

我们还必须引入“机器人师生”,用于数字形态之外的许多教育功能和教学活动,特别是高危、高强的教学实践工作。不久的将来,人机交互虚实互动的教学实验工场、教育实践基场、自主智育剧场,将成为智业社会教育的重要基础设施。教育教

学工场化、公平化是智能社会发展的必经趋势,“数字人师生”和“机器人师生”将是其关键的支持,并成为社会的新产业与经济发展的新动力。

大模型技术只提供了培育数字教师的初级手段,我们需要更强的推理与智能,正如文献[24]所设想的,数字教师将成为培育各种各样数字人的核心技术,成为未来人机交互,特别是元宇宙人类化的基础,实现知识的实时可视化和即时“可用化”,从基础模型(foundation model)走向基础智能(foundation intelligence),从基础设施模型(infrastructure model)走向基础设施智能(infrastructure intelligence)。为此,必须加快相应的 Nuwa-verse、Kidsverse、Youthverse、Adultsverse、Eldersverse 等研发工作,加速开发数字学校技术(digital school technology, DST)和可信真自主自动化智能系统(verified, calibrated, certificated, and validated intelligent systems for TAO-based automation, VC2VISTA)^[24-26]。

3 教育形态的变革：从平行师生到平行教育

最初,人类在大自然中观察学习。到了农业社会,人们在学堂私塾通过书籍进行学习。在工业



图4 3个世界,3类师生:数字教师与平行师生(这里3类科学家按帕累托80/20法则划分, $\varepsilon \in (0,1)$ 表示“数字人科学家”在科研团队中的占比)

时代，在校学生从在实验室实操学习到今天利用数学推理和计算机仿真进行抽象学习。大模型等智能技术的成熟，使利用更大规模、更加复杂的人工系统进行虚实互动的平行学习成为现实^[27-28]，其作用将远大于采用任何传统的教学手段和技术，也使社会科学中许多“反事实实验（counterfactual experiments）”有了新的替代和教学方式^[29]，这将大大地促进新文科、新理科、新工科的发展与融合。

除此之外，人工智能的交互对抗生成式技术最终将走向更一般的计算实验方法，这对于教育教学的进一步变革具有重大的作用和意义。在教育变革中，我们往往需要做许多相应的教育教学实验，以确保变革的有效和成功。但这些实验往往费时久、成本高，而且在法律和道德上都会遇到许多难以解决的问题。特别是许多设想的教育实验，目前还不知道用什么样的科学手段或方法来完成。然而，对任何科学的事与物之基本要求，一是可实验，二是能验证，这对如何科学地开展教育变革提出了重大的挑战：如何完成相应的教育教学试验？由此，计算教育实验应运而生，为解决这一重大挑战提供了一种可行的方案。而且，大模型、AI Agent、数字人师生、机器人师生的引入，更是极大地拓展了实施计算教育实验的技术途径，为科学的教育变革提供了强有力的保障。

教育的变革还必须考虑智业社会基础设施的特色，即算力基础设施和服务世界。在工业时代，基础设施设备在不使用时可以“断开”，但在智业时代，算力与服务器在不使用时往往也不能“断开”，必须持续提供能源以维持其状态。为了有效利用能源并可持续发展，我们必须将智能技术，特别是人机交互的智能技术“拟人化”，形成数字人社会：让AI Agent成为数字人，让数字人分布“生活”于算力与服务器的数字世界，时时刻刻自主地服务于人类之福祉。为此，我们还必须像管理生物人一样管理数字人，并引入区块链、智能合约、DAO等新型的组织、协调和执行技术。这一过程，不但使得人工智能可以被治理，还使得文科知识理科化、工程化，推动新文科、新理科、新工科的发展。同时，我们还必须像教育、培育生物人一样，教育、培育数字人和机器人，使其价值观与人类价值观“对齐”，自然地走向数字人、机器人、生物人的平行教育过程。显然，平行教育是一个持续的

社会过程，而非一项可以一劳永逸解决问题的技术。

由此，平行教育的进一步发展，将开启新教育形态的“3个世界，3种模式”之新的“一天”，即AM、PM、EM，如图5所示。“上午”自主模式（autonomous mode，AM），占时80%以上，主要教学工作将由数字人师生和机器人师生自主完成；“下午”平行模式（parallel mode，PM），占比15%以下，此时生物人师生必须通过云端或以离线的方式介入或指导，才能完成教学任务；“晚间”专家模式（expert mode，EM），占比5%以下，此时，必须以生物人师生为主体，以数字人师生和机器人师生为辅，在现场具身地完成相应的教育工作。我们相信，这一平行教育的模式，将极大地释放师生自由活动的时间，创新师生自主探索的空间，让师生更多地从事“人之为人”的活动，使教育教学更加人性化。

目前，支撑平行教育设想的主要基础智能技术已经呈现在我们面前，这就是教育大模型、教学场景工程和面向3类师生的一体化智育操作系统。初步研究表明，这有可能极大地提高教育教学的效率^[30-32]。

4 智慧教育与智能产业：从工业5.0到教育5.0

10年前，平行智能催生了工业5.0运动^[33-34]，已经获得世界范围的重视和认可，特别是欧盟发布了相应的工业5.0文件^[35]之后，学术界与工业界竞相展开了各种工业5.0的研究与应用^[34,36]。我们相信平行教育的发展也将引发教育5.0（education 5.0）^[37]的教育科技变革，让教育形态从传统教育（教育1.0）、工业化教育（教育2.0）、信息化教育（教育3.0）、网络化教育（教育4.0）迈向智能化教育，即教育5.0。

教育5.0将以促进人类与智能教育机器之间的互动与合作为主要目的，其特点是智能、互联、网络物理社会系统（CPSS）和教育教学知识自动化。依赖数字人和机器人师生，教育5.0将生物人师生置于学习的中心，强调个性化教育、跨学科学习、实践性教育和科技创新，旨在培养学生的创造力、批判性思维和解决问题的能力，以应对未来社会和职业的需求。教育5.0将推动教育产业的大发展，类似于电子商务和外卖服务对物流配送行业

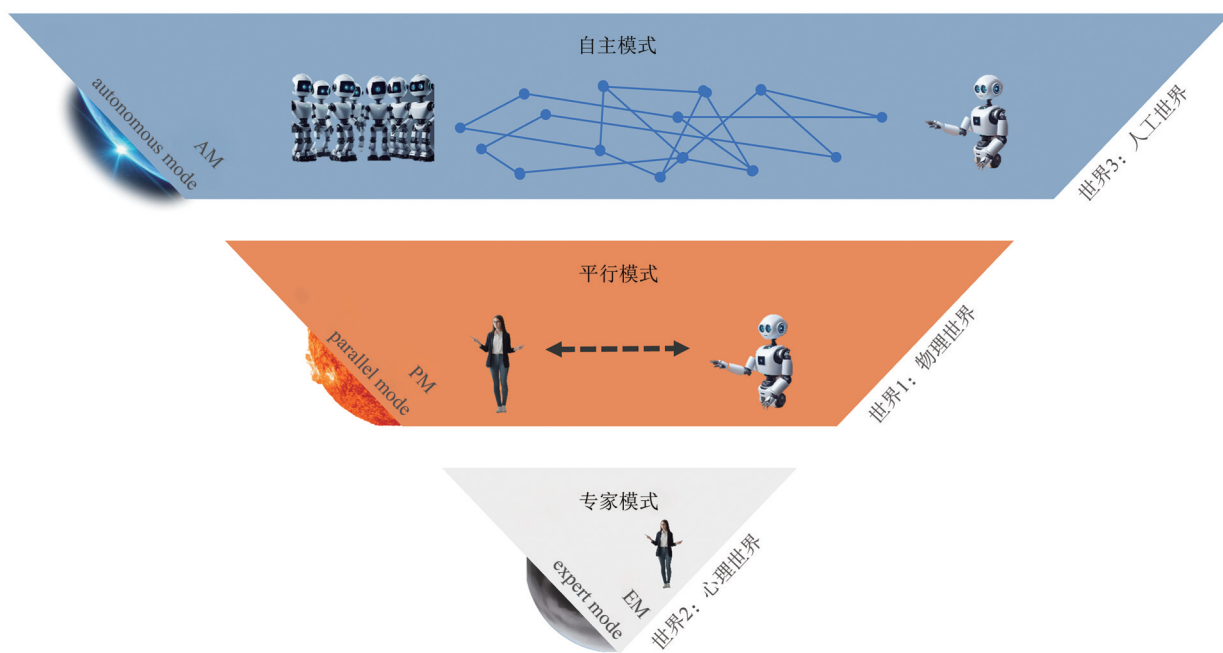


图5 3个世界，3种模式：AM、PM、EM，平行教育的一天

所带来的改变和颠覆，不但不会让教育工作者失业，而且会产生更多的人性化的教育工作，并使从事这种新型的教育工作者得到社会的充分认可与尊敬。

同时，在教育5.0的背景下，我们可以利用“3个世界，3类理念”分布式地落实“环境，社会，治理”（environmental, social, governance, ESG）、“人类伦理，社会责任，生态可持续”（human ethics, social responsibility, ecological sustainability, ERS）、“多元化，公平，包容”（diversity, equity, inclusion, DEI）等先进社会理念和生态措施（如图6所示）。与传统的方式不同，这种方式可以在不增加人类当前负担的情况下，利用平行智能和区块链技术，使ESG、ERS和DEI成为智业社会中各种DAO的治理规则。由此，学生将接受更加全面、多维度的教育，培养他们的环境意识、伦理道德和社会责任感，鼓励他们参与社会变革和多元化的社会，培养有能力面对当今全球性挑战的公民，从而塑造一个更加可持续、公开、公平、公正和包容的未来社会。

5 展望

唐代诗人杜甫在其杰作《春夜喜雨》中，描述了教育工作的最高境界：“好雨知时节，当春乃发生。随风潜入夜，润物细无声。”这首诗优雅地

回答了师生“何时教，如何教”与“何时学、如何学”的问题。希望iSTREAMS和iCDIOS等智慧教育理念和智能教育技术，能够促使各种功能的教育教学像一条条青绿“智慧”的清澈溪流，培育一代代的新时代师生，进入“平行世界，鸡犬相闻，老死不相往来，永生于元宇宙”的学习灵境。

在AlphaGo和ChatGPT之后，人工智能驱动的科学（AI for science, AI4S）、面向人工智能的科学（science for AI, S4AI）、分布式自主科学（decentralized autonomous science, DeSci）等新领域与技术加速涌现，相应的人工智能驱动的教育（AI4E）、面向人工智能的教育（E4AI）、分布式自主教育（DeEdu）也如雨后春笋般出现，为变革教育奠定了基础，提供了技术体系。更为重要的是：区块链智能、智能合约和DAO等技术已使教育科学从以文科领域为主走向硬科技的“理工”的范畴。新的加密技术和联邦智能方法，从非同质化通证（non-fungible token, NFT）、闪电网络、联邦学习、联邦治理发展到联邦生态，更使教育教学的智能变革现实可行。但是，为了确保变革的成功，仅凭这些智能技术在教育教学的应用还远远不够。为此，我们需要引入数字教师和平行教育等理念与技术。

平行师生和平行学校的引入，为教育变革的展

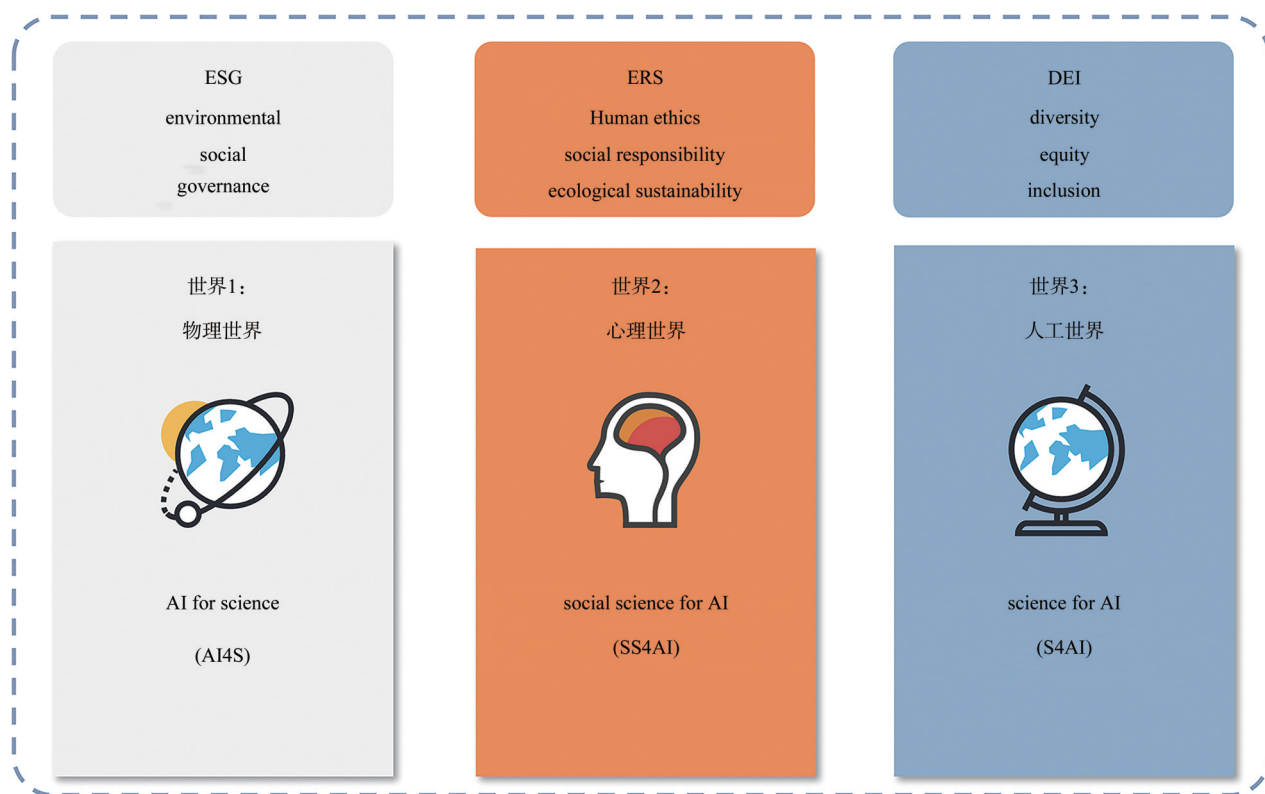


图6 3个世界，3类理念：ESG、ERS、DEI

开提供了新的角度，就是数字人/机器人/生物人和相应的平行师生之互动互融的人性化培育与教育，即通过数字学校及其衍生平行学校，使生物人/机器人/数字人以实时交互的各种方式在各种各样的教育大模型中进行学习培育，并相互促进，使“对齐”和“学习”变成一项长期持续的教育工程，如同人类本身所接受的传统教育过程一样，使“终身学习”技术化、个性化、幸福化，让孔子的“学而时习之，不亦说乎”成为普遍现实。最终目标就是让智慧教育、智能教学“对齐”人类的价值，实现教育变革的目标，服务人类命运共同体，并推动整个社会与自然生态的安全、健康、可持续发展。

致谢：感谢王雨桐、韩金朋等博士和李艳芬、宋平、胡小蕾、刘墨琳等老师在论文写作过程中提供的帮助。

参考文献：

- [1] WHITEHEAD A N. The aims of education[M]. New York: Free Press, 1929.
- [2] LOYALKA P, LIU O L, LI G R, et al. Skill levels and gains in university STEM education in China, India, Russia and the United States[J]. Nature Human Behaviour, 2021, 5(7): 892-904.
- [3] TRINH T H, WU Y, LE Q V, et al. Solving olympiad geometry without human demonstrations[J]. Nature, 2024, 625(7995): 476-482.
- [4] FU M, YEO C, LIN Y, et al. WAVES: Web-based audio/video educational systems for real-time laboratory experiments[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2000 (31): 205-212.
- [5] FU M, YEO C, LIN Y, et al. WAVES: towards real time laboratory experiments in cyberspace[C]// Proceedings of 2001 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Piscataway: IEEE Press, 2001: 3470-3474.
- [6] FU M. An analytic model for agent systems with Petri Nets[D]. Arizona: The University of Arizona, 2003.
- [7] 王飞跃. 我的教学梦[C]// 新观点新学说学术沙龙文集 7: 教育创新与创新人才培养. [出版者不详: 出版地不详], 2007.
- WANG F-Y. My teaching dream[C]// Proceedings of New Perspectives and New Doctrines Academic Salon 7: Educational Innovation and Cultivation of Innovative Talents. [S.l.:s.n.], 2007.
- [8] 王飞跃. 从计算思维到计算文化[J]. 中国计算机学会通讯, 2007(11): 78-82.
- WANG F-Y. From computational thinking to computational culture[J]. Communications of the CCF, 2007(11): 78-82.

- [9] 王飞跃, 邓勇. 教育创新与创新人才培养 • 序[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2008.
- WANG F-Y, DENG Y. Educational innovation and cultivation of innovative talents-preface [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2008.
- [10] 王飞跃. 将来如何教学生?[J]. 科技导报, 2010(15): 123.
- Wang F-Y. How to teach students in the future? [J]. Science & Technology Review, 2010(15): 123.
- [11] 王飞跃. 面向计算社会的计算素质培养: 计算思维与计算文化[J]. 工业和信息化教育, 2013(6): 4-8.
- WANG F-Y. Cultivation of computational quality for computational society: computational thinking and computational culture[J]. Industrial and Information Technology Education, 2013(6): 4-8.
- [12] 张杰, 王飞跃. 最优控制: 数学理论与智能方法(上册) • 序[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- ZHANG J, WANG F-Y. Optimal control: mathematical theory and intelligent methods (first book)-preface [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.
- [13] GAO Y Q, WANG F-Y, SUN W P, et al. A CDIO-based social manufacturing laboratory: prototype for CPSS-based production processes [C]// Proceedings of 2016 ASEE Annual Conference & Exposition Proceedings. [S.l.:s.n.], 2016.
- [14] LIU X W, GONG X Y, WANG F-Y, et al. A new framework of science and technology innovation education for K-12 in Qingdao, China[C]// Proceedings of 2017 ASEE International Forum. [S.l.:s.n.], 2017.
- [15] 秦蕊, 梁小龙, 李娟娟, 等. 平行科研院所: 从数字化转型到智能化变革[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(2): 212-221.
- QIN R, LIANG X L, LI J J, et al. Parallel scientific research institutes: from digital transformation to intelligent revolution[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2023, 5(2): 212-221.
- [16] LIANG J, TANG Y, HARE R, et al. A learning-embedded attributed petri net to optimize student learning in a serious game[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2023, 10(3): 869-877.
- [17] LIANG J, HARE R, CHANG T Y, et al. Student modeling and analysis in adaptive instructional systems[J]. IEEE Access, 2022, 10: 59359-59372.
- [18] WANG F-Y, MIAO Q, LI X, et al. What does ChatGPT say: the DAO from algorithmic intelligence to linguistic intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(3): 575-579.
- [19] 卢经纬, 郭超, 戴星原, 等. 问答 ChatGPT 之后: 超大预训练模型的机遇和挑战[J]. 自动化学报, 2023, 49(4): 705-717.
- LU J W, GUO C, DAI X Y, et al. The ChatGPT after: opportunities and challenges of very large scale pre-trained models[J]. Acta Automatica Sinica, 2023, 49(4): 705-717.
- [20] 王飞跃, 缪青海. 基础智能: 从联邦智能到基于 TAO 的智能系统联邦[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 103-112.
- WANG F-Y, MIAO Q H. Foundation intelligence: from federated intelligence to TAO-based intelligent systems federation[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(19): 103-112.
- [21] YE P J, WANG F-Y. Parallel population and parallel human--a cyber-physical social approach[J]. IEEE Intelligent Systems, 2022, 37(5): 19-27.
- [22] WANG F-Y. New control paradigm for industry 5.0: from big models to foundation control and management[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(8): 1643-1646.
- [23] 王飞跃, 王雨桐. 数字科学家与平行科学: AI4S 和 S4AI 的本源与目标[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(1): 27-33.
- WANG F-Y, WANG Y T. Digital scientists and parallel sciences: the origin and goal of AI for science and science for AI[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(1): 27-33.
- [24] WANG F-Y. Foundation worlds for parallel intelligence: from foundation/infrastructure models to foundation/infrastructure intelligence[R]. Beijing: Alfred North whitehead Laureate Lecture, The whitehead Academy of Intelligence, 2021.
- [25] WANG F-Y, LV C. Foundation vehicles: from foundation intelligence to foundation transportation for future mobility[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(10): 4287-4291.
- [26] WANG F-Y. Infrastructural vehicles: the TAO from infrastructural intelligence to foundational mobility and services[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(12): 4667-4670.
- [27] MIAO Q H, LY Y S, HUANG M, et al. Parallel learning: overview and perspective for computational learning across Syn2Real and Sim2Real [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(3), 603-631.
- [28] WANG F-Y. The DAO to MetaControl for MetaSystems in Meta-verses: the system of parallel control systems for knowledge automation and control intelligence in CPSS[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(11): 1899-1908.
- [29] LU M, CHEN S Z, XUE X, et al. Computational experiments for complex social system--part III: the docking of domain models[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2023, 10(1): 1-15.
- [30] LI X, YE P, LI J, et al. From features engineering to scenarios engineering for trustworthy AI: I&I, C&C, and V&V[J]. IEEE Intelligent Systems, 2022, 37(4): 18-26.
- [31] LI X, TIAN Y, YE P, et al. A novel scenarios engineering methodology for foundation models in metaverse[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 53(4): 2148-2159.
- [32] WANG F-Y. Parallel intelligence in metaverses: welcome to Hanoi![J]. IEEE Intelligent Systems, 2022, 37(1): 16-20.

- [33] WANG F-Y, LIN Y L, IOANNOU P A, et al. Transportation 5.0: the DAO to safe, secure, and sustainable intelligent transportation systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(10): 10262-10278.
- [34] WANG F-Y, YANG J, WANG X, et al. Chat with chatgpt on industry 5.0: learning and decision-making for intelligent industries[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2023, 10(4): 831-834.
- [35] BREQUE M J, NUL L D, PETRIDIS A. Industry 5.0: towards a sustainable, human-centric and resilient European industry[R]. [S.l.:s.n.], 2021.
- [36] WANG F-Y, TANG Y, WERBOS P J. Guest editorial: cyber-physical-social intelligence: toward metaverse-based smart societies of 6I and 6S[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(4): 2018-2024.
- [37] The Economist. Large, creative AI models will transform lives and labour markets [N]. The Economist, 2023-04-22.

[作者简介]



王飞跃（1961—），男，博士，中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任，澳门科技大学特聘教授。主要研究方向为平行系统的方法与应用、社会计算、平行智能、知识自动化。