

平行教学实验室：赋能K-12教育的新AI基础设施

高欣¹, 林飞², 傅君¹, 孙健君¹

(1. 天津市第二中学, 天津 300140;

2. 澳门科技大学创新工程学院工程科学系, 澳门 999078)

摘要: 为应对中小学(K-12)教学实验室在运行效率、安全保障与智能支持等方面的挑战, 引入平行智能, 提出了一种以人工系统-计算实验-平行执行(ACP)方法为核心、融合三类人系统的平行教学实验室框架。该框架通过构建人工系统、开展计算实验并实施平行执行, 将传统教学实验转化为可计算、可分析、可验证的虚实融合过程。通过系统集成大语言模型、视觉-语言-行动(VLA)等新一代人工智能(AI)技术, 支撑实验教学的自主运行与安全可控。围绕平行教学实验室的体系架构、关键技术与运行机制展开分析, 并结合天津市第二中学智慧出行AI实验室的建设实践, 验证框架在真实教学场景中的可落地性与应用价值。研究表明, 平行教学实验室为推动K-12实验教学由静态设施向智能化系统演进提供了一种可行路径。

关键词: K-12教育; 平行智能; ACP方法; 大语言模型; 三类人系统; 平行教学实验室

中图分类号: G482

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202610

Parallel teaching laboratories: a new AI infrastructure empowering K-12 education

Gao Xin¹, Lin Fei², Fu Jun¹, Sun Jianjun¹

1. Tianjin No. 2 High School, Tianjin 300140, China

2. Department of Engineering Science, Faculty of Innovation Engineering, Macau University of Science and Technology, Macao 999078, China

Abstract: To address the challenges faced by kindergarten through twelfth grade (K-12) teaching laboratories in operational efficiency, safety assurance, and intelligent support, parallel intelligence was introduced, and a parallel teaching laboratory framework centered on the artificial systems, computational experiments, and parallel execution (ACP) method, while integrating the three-class human system. Through the construction of artificial systems, the execution of computational experiments, and the implementation of parallel execution, traditional teaching experiments were transformed into virtual-real integrated processes that were computable, analyzable, and verifiable. By systematically integrating next-generation AI technologies, including large language models and vision-language-action (VLA) models, autonomous operation and safety-controllable experimental teaching were supported. The architecture, key technologies, and operational mechanisms of the parallel teaching laboratory were analyzed, and the feasibility and application value of the framework in real educational settings were validated through the construction practice of the Smart Transportation AI Laboratory at Tianjin No. 2 High School. The results show that the parallel teaching laboratory provides a feasible pathway for promoting the evolution of K-12 experimental teaching from static facilities to intelligent systems.

Key words: K-12 education, parallel intelligence, ACP method, large language models, three-class human system, parallel teaching laboratory

0 引言

著名物理学家费曼曾强调“实验是一切知识的试金石”，指出实验在知识验证与科学进步中的基础性地位^[1]。对于基础教育而言，实验同样是学生理解科学原理、形成实践能力与科学思维的重要途径。科学教育研究长期认为，实验教学在科学学习中具有不可替代的作用，学生对科学知识的认识往往不是单靠课堂讲授完成的，而是需要借助实验活动不断加深^[2]。此外，学校中的不少探究任务仍带有较强的程序化特征，学生往往只是在完成预设步骤，与真实科学探究之间仍有明显距离^[3]。因此，中小学（kindergarten through twelfth grade, K-12）实验教学的建设重点不能只停留在器材增加和场地扩展上，还应考虑实验任务本身是否贴近真实问题，是否能够真正服务学生的学习过程。基于这一点，教学实验室不应仅被看作放置仪器的场所，而应被视为支撑实验教学持续开展的重要环境。

近年来，K-12教学实验室在数字化设备、信息化管理、智能仪器等方面取得了显著进展^[4-5]。然而，在教学实验运行、实验安全保障和教育教学辅助等方面，现有教学实验室体系仍面临明显不足。已有研究尝试引入数字孪生（digital twin, DT）技术以增强实验运行管理与安全保障能力，但其实施成本高、系统灵活性受限^[6]。同时，融合人工智能（artificial intelligence, AI）的自主驱动实验室（self-driving laboratory, SDL）已在高校科研与教学实验室中得到较为系统的发展，但在K-12教学实验室中尚未得到应用^[7]。此外，基于大型语言模型（large language model, LLM）与多模态大型语言模型（multimodal large language model, MLLM）的教育教学辅助系统已逐步走向成熟，其在K-12教学实验室场景中的系统性集成亦成为重要发展趋势^[8]。

平行智能（parallel intelligence, PI）^[9-10]作为融合AI、代理智能与自主智能的系统性理论框架，为应对上述挑战提供了新的技术路径。其核心方法——人工系统（artificial systems, A）、计算实验（computational experiments, C）与平行执行（parallel execution, P），即ACP方法^[11]，是复杂系统研究中的重要理论工具。通过在人工系统中开展面向实际系统需求的计算实验，复杂教学实验过程可被转化为可计算、可分析和可验证的问题空间。该方法已

在教育教学^[12-13]、智能交通^[14]和药物研发^[15]等领域得到广泛验证，为重构传统教学实验流程、提升实验安全保障水平以及推动教学实验室由静态资源向动态智能系统演化奠定了理论基础。

基于此，本文提出了一种以ACP方法、三类人（生物人、机器人、数字人）以及3种运行模式（自主模式、平行模式和专家/紧急模式）为核心的平行教学实验室框架，并系统集成LLM/MLLM、视觉-语言-行动（vision-language-action, VLA）等AI技术，构建面向K-12教学实验场景的智能化实验基础设施体系。本文进一步结合天津市第二中学智慧出行AI实验室的建设与应用实践，对平行教学实验室的运行机制与实施流程进行了具体分析。

本文的创新点主要体现在以下3个方面：一是面向K-12教学实验场景，提出了融合平行智能、ACP方法与三类人系统的平行教学实验室总体框架；二是将大语言模型、MLLM与VLA等新一代AI技术纳入统一的教学实验室基础设施体系，构建了面向实验运行、安全保障与教学辅助的系统化技术路径；三是结合天津市第二中学智慧出行AI实验室的建设实践，对平行教学实验室在真实教学场景中的实施方式与应用价值进行了验证，为K-12实验教学的智能化升级提供了可参考的框架与实践范式。

1 教学实验室中的需求与挑战

本节从教学实验运行、实验安全保障和教育教学辅助3个方面出发，回顾相关技术与系统的发展脉络，系统分析传统教学实验室在效率、安全与智能支持方面的局限性。

1.1 教学实验运行

传统教学实验室的运行通常以课表与场地为核心，按班级和课时组织学生完成统一的实验任务。这一模式在保障教学秩序的同时，也暴露出明显的运行瓶颈^[16]。例如，在多班级、多课程、多设备的约束下，实验编排本质上属于复杂系统调度问题，固定化的编排方式容易导致教学灵活度不足与资源利用率偏低^[17-18]。同时，教师难以及时掌握学生的实验进程并实施针对性的指导。为提升实验运行效率，早期研究沿两条路径展开：其一是远程实验，通过远程实验室管理系统（remote laboratory management system, RLMS）实现对实验设备的在线访问与调度，但教学组织复杂度较高^[19]。其二

是仿真实验，以仿真平台替代部分实体操作以降低成本与操作门槛，但难以覆盖真实操作的复杂性，学生动手实践能力受限^[20]。

DT的发展为教学实验运行提供了一种新的技术路径。通过对实验设备、实验流程与运行状态进行建模，并借助传感与通信机制实现虚拟系统与真实实验之间的状态同步，DT使实验运行过程从一次性执行转变为可记录、可回放、可对照的虚实融合过程^[21]。学生能够在虚实之间迭代思考、分析和溯源，这是远程实验与仿真实验所不具备的。目前，DT已被广泛应用于高校、工程等教育培训领域^[22-23]。例如，英国伦敦大学学院药学院开发的化学教育与沉浸式培训数字孪生实验Lab427实验室^[24]，以及面向本科生高效液相色谱（high performance liquid chromatography, HPLC）教学实验室^[25]等典型实践。然而，在K-12教学实验室中，DT的应用仍处于起步阶段，现有研究多集中于探索性实践，例如Acker等^[26]基于DT构建了面向高中生的机器人教学平台。然而，这类高保真的建模方式会带来较高的实施成本，同时“孪生”关系并非所有教学实验运行的必要条件，过度强调实时同步可能限制实验运行的灵活性。

1.2 实验安全保障

在K-12实验教学中，安全是实验室运行的底线。教学实验场景中的安全保障通常可划分为事前防御与事后响应两个层面^[27]。传统的事前防御主要依赖操作规范，例如，教育部发布的《中小学实验室规程》^[28]、美国化学会（American Chemical Society, ACS）发布的《中学阶段化学实验室安全指南》^[29]和教师现场监督。然而，这类安全保障方式多以静态规则或离散监测为主，风险识别与处置往往具有滞后性。为弥补上述不足，早期的研究一方面通过1.1节所述的远程实验来规避高风险操作，另一方面借鉴工业领域的危险与可操作性分析（hazard and operability study, HAZOP）方法，在实验室建设初期进行风险识别与流程审查^[30]。随着AI技术的发展，机器学习方法开始被引入实验室安全领域。例如，利用长短期记忆网络（long short-term memory, LSTM）对实验环境参数与历史数据进行风险预测^[31]，或通过目标检测算法实时监测学生个人防护装备（personal protective equipment, PPE）的佩戴情况^[32]。然而，教学实验室属于典型的复杂系统，不可观测状态与不可预

测行为普遍存在，上述方法主要起到缓解作用，难以对实验风险进行持续、全面的覆盖。

事后响应方面，传统的做法主要是设置自动化的紧急切断装置，例如将燃气供应与泄漏检测、通风与排风状态进行联锁控制，在异常条件下实现自动切断^[33]。同时，一些研究构建了实验室安全监测与预警系统，并与紧急切断机制形成联动^[34]。在此基础上，引入DT可为实验室安全管理提供新的技术优势，使安全策略从静态规则驱动转向基于状态感知与过程建模的动态响应。相关研究已在高校实验室中得到系统性的探索，例如徐文等^[35]提出了基于DT的高校实验室安全管理平台框架；Lab427 DT实验室^[24]集成了面向健康与安全的对话式AI代理。然而，在K-12教学实验室中，此类方法尚未得到广泛应用，仍缺乏面向教学情境的统一框架与可复用的实施范式。

1.3 教育教学辅助

教学实验室服务对象主要包括教师与学生两个主体，前者负责实验设计、过程指导与学习评价，后者通过实验操作与探究活动完成学习任务。随着计算机与自动化技术的发展，辅助教学系统已在K-12教育体系中得到广泛应用，并逐步形成软件与硬件两个层面的技术形态^[36]。在软件层面，早期代表性系统是Bitzer等^[37]于20世纪60年代提出的PLATO系统，其已具备在线教学、测验与交互等基本形态。随着计算能力与AI技术的演进，辅助教学系统逐步向智能化方向发展，涌现出AutoTutor^[38]、Moodle^[39]、国家中小学智慧教育平台^[40]以及清华大学雨课堂^[41]等典型系统，覆盖教学支持、学习管理与教学组织等多个环节。近年来，LLM和MLLM的兴起为辅助教学系统带来了质变式提升。典型实例包括由GPT-4^[42]驱动的Khanmigo^[43]，其面向K-12场景同时承担虚拟家教与教师课堂助教的角色；相关实践还包括QuizletTM的Q-Chat^[44]与DuolingoTM的Explain My Answer^[45]等系统。与此同时，学术界已开展大量实证研究，验证了基于大模型进行教学辅导的潜在优势^[46-47]，这为K-12教学实验模式的进一步革新提供了重要启示。

在硬件层面，早期典型的教学辅助设施主要是传感器实验系统，通过探头对实验过程中的温度、压力、pH、电压、电流等数据进行实时采集与可视化，辅助学生对实验现象与过程机理形成直观理解^[48]。代表性厂商包括PASCO^[49]与Vernier^[50]。同

时，交互式电子白板也被广泛引入教学实验场景，例如 SMART Board^[51]和希沃^[52]等产品。近年来，教学实验室的硬件形态亦在持续演进，吊装实验室通过将实验室公用工程进行模块化封装，并借助摇臂或升降机构将实验物料与接口输送至实验台^[53]。此外，机器人系统开始逐步进入教学场景，在K-12教育中常见于机械臂作为课堂演示或辅助操作装置^[54]，以及用于远程实验的遥操作机器人平台^[55]。相比之下，在高校教学实验室中，SDL已得到较为系统的研究与应用^[7]，并有工作将SDL与大模型结合以提升实验操作的自主性与智能化水平^[56]，但在K-12教学实验室中仍缺乏相应探索。近期，VLA模型在通用具身任务中表现出良好的跨模态理解与执行能力^[57]，在实验室场景中亦已有探索性研究，如AutoBio^[58]与Shake-VLA^[59]等工作，为构建面向教学实验室的新型智能硬件体系提供了潜在技术基础。

2 平行教学实验室体系框架

本节从理论框架与技术框架两个层面系统阐述平行教学实验室的整体架构。在理论层面引入平行智能与ACP方法，说明其在K-12教学实验室这一复杂系统中的适用性与必要性；在技术层面进一步明确系统的运行逻辑、交互机制与关键模块，并通过示例性描述说明部分核心功能的实现路径。

2.1 平行教学实验室理论框架

平行教学实验室的理论框架如图1所示，其核心是将PI与ACP方法引入教学实验室场景。K-12实验教学系统如前文分析，具有运行组织复杂、安全约束严格与教学辅助需求多样等特征。现有方法在实施成本、灵活度等方面有所欠缺，同时，智能化技术缺乏统一的系统集成架构。PI提供了一种面向复杂系统的整体性解决思路，将大模型、VLA等技术纳入统一框架，并通过ACP方法应用到教学场景，为解决教学实验室面临的多重需求与挑战提供支持。

具体而言，ACP方法首先依据教学实验的需求，构建对应的人工系统，该阶段定义为描述智能。人工系统由开发人员与教师协同设计，其实现形式包括DT、软件定义和虚拟系统。需要指出的是，人工系统并不要求与实际实验室在结构与状态上完全一致，DT仅作为人工系统的一个特例或子集，从而避免传统DT方法在成本与灵活性方面的

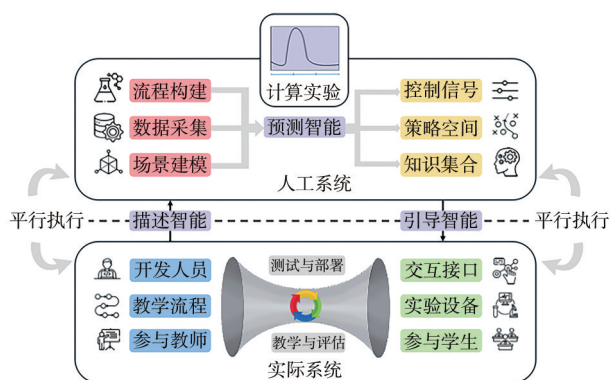


图1 平行教学实验室的理论框架

局限^[60-61]。人工系统主要承担实验装置的场景建模、实验流程构建与数据采集等功能。在此基础上，教师围绕教学目标设计并开展计算实验，以获得相应的知识集合、策略空间和虚拟设备控制信号，该阶段对应预测智能。随后，计算实验求取的解空间以平行执行的方式，在人工系统与实际系统之间借助交互接口不断迭代演化，引导学生在虚实之间反复验证实验过程，该阶段体现为引导智能^[62]。基于ACP架构，并进一步集成平行智能所承载的其他智能技术，可形成面向教学实验室的统一技术框架。

2.2 平行教学实验室技术架构

平行教学实验室的技术框架如图2所示。实际系统面向天津市第二中学部署的4类数字化教学实验室，包括理、化、生实验室以及智慧出行AI实验室。其主要设施涵盖吊装实验室系统、摇臂装置、智能传感器、地理沙盘与多模态交互屏等，承担实验操作、数据采集与人机交互等基础功能。实际系统的核心任务在于提供可触达的实验环境，并为后续虚实映射、行为采集和实验过程管理提供数据基础。

人工系统依据实际系统的教学需求，通过数字化建模方式构建而成。其不要求与实际实验室1:1映射，而是以数字化、可操作的交互界面为载体，重点处理现实实验环境中需要虚实交互、难以直观呈现、具有潜在危险或成本较高的实验过程。例如，在化学高风险实验教学中，人工系统首先对关键设备（如试剂柜、反应容器与加热装置）进行数字化建模，其次结合反应动力学模型与可视化技术构建反应过程仿真，最终将高风险操作步骤（如浓硫酸稀释、氢气生成等）转移为由机械臂在封闭箱体中执行的自动化流程，并与虚拟界面保持同步。通过上述方式，教师与学生可在人工系统中进行参

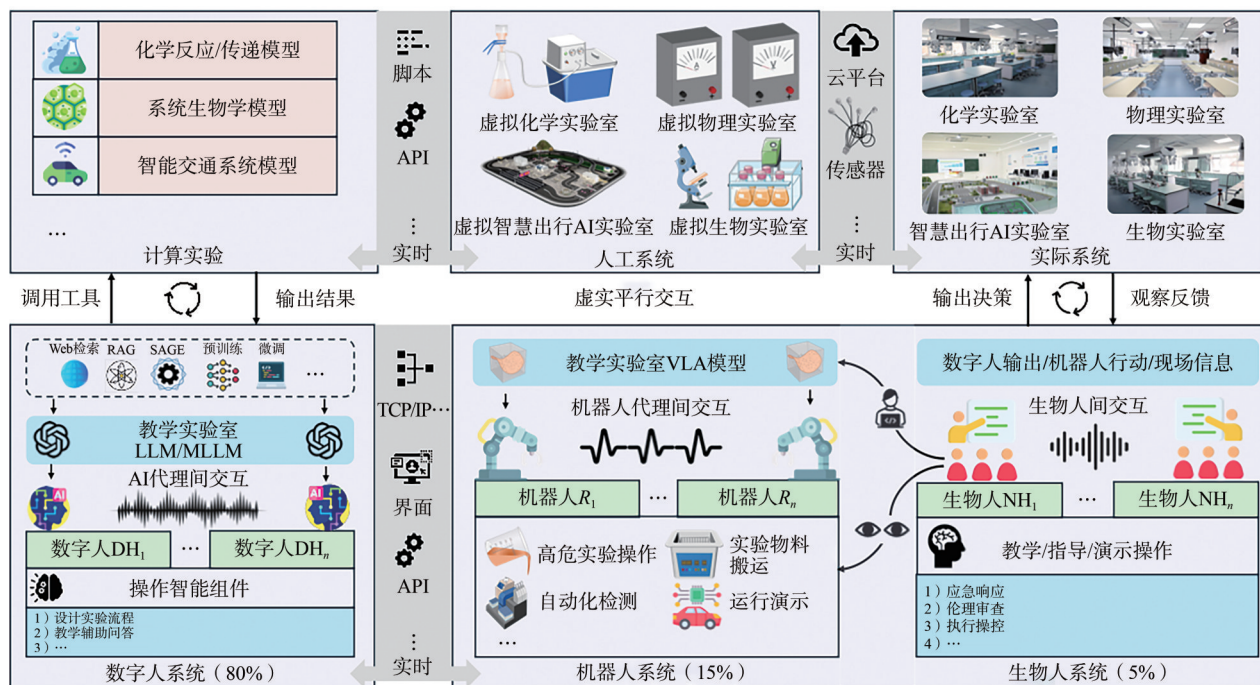


图2 平行教学实验室的技术框架

数调整、流程回放、变量控制与误操作模拟，使实验理解不再受限于物理条件，从而在安全环境中掌握高危实验的机理与规律。

计算实验是人工系统的核心组成，承担实验任务的建模、推演与评价功能。计算实验围绕明确的教学目标构建，例如，概念理解、操作技能掌握、长期记忆形成或跨学科能力培养，并由教师或数字人代理设计实验步骤、变量设置、任务逻辑与数据采集方式，形成可重复、可修改、可共享的实验任务模板。该过程需根据具体实验类型调用相应模型，如化学反应与传递模型、系统生物学模型或智能交通系统模型，并通过脚本或应用程序编程接口（application programming interface, API）的方式集成至人工系统中。计算实验不仅用于虚拟环境下的实验机理复现，还可支持实验方案验证、学生行为路径评估以及个性化教学策略的辅助制定。

平行执行机制实现人工系统与实际系统之间的双向映射与协同联动，可根据实验任务特性灵活选择虚实联调或虚实切换模式，便于教师与学生在不同教学场景下开展实验活动。当实验可在真实环境中安全执行时，人工系统中的推演结果可通过脚本执行、API调用或物联网（Internet of things, IoT）接口映射至实体系统；当实验存在安全风险、成本较高或难以实施时，则可选择完全在人工系统中运

行，从而在保障教学连续性的同时降低实验风险。

平行教学实验室的运行依托三类人系统协同，包括5%生物人（教师、开发人员和安全保障人员）、80%数字人（LLM/MLLM驱动的智能代理）与15%机器人（具身自动化设备）^[63]。三类人系统在虚实融合的教学环境中承担不同职责：约80%的时间处于自主模式（autonomous mode, AM），由数字人与机器人承担主要的实验运行与教学任务；约15%的时间处于平行模式（parallel mode, PM），教师通过云端或远程界面对系统进行引导、纠偏和分析；约5%的时间处于专家/紧急模式（expert/emergency mode, EM），由生物人全面接管系统以应对突发情况。该协同机制实现了实验教学在自主运行与人工干预之间的柔性切换。

数字人系统运行于线上或云端，由基于LLM/MLLM构建的多个智能代理组成，分别负责实验流程规划、教学知识解释、任务推演以及对机器人系统的自主控制。作为数字人核心的基础模型可采用通用大模型，并结合教学实验室场景进行指令微调或提示微调，也可通过专用预训练方式构建。相关模型同时集成Web检索与检索增强生成（retrieval-augmented generation, RAG）^[64]机制，可访问实验室配置数据库、知识库与历史实验记录，并结合用于精准检索的SAGE^[65]框架，支持学生在实验过

程中的实时提问与深度探究。当计算实验流程确定后，数字人代理可依据实验目标、可控变量与操作权限生成可执行代码或端到端控制策略，通过互联网协议套件（如TCP/IP）、API等接口引导机器人完成实验操作，或指导学生在虚拟环境中进行自主推演。

机器人系统泛指教学实验过程中的各类具身自动化设备，包括机械臂、自动化搬运车、多自由度操作平台、智能沙盘、微缩智能车等。机器人可通过预训练的教学实验室VLA模型，根据教师或学生的自然语言指令对实验场景进行感知与理解，并通过机器人操作系统（robot operating system, ROS）^[66]等底层控制系统执行相应动作，完成高风险操作、实验物料搬运、自动化检测与过程演示等任务。同时，机器人系统支持群体通信与协同机制，使多个机器人代理能够高效协作，并具备紧急切断与人工接管能力，以在自主性与安全性之间保持可控平衡。

生物人系统包括教师、学生、安全保障人员等具有最终决策权的真实参与者。其主要负责实验教学的监督、伦理与安全保障、远程指导以及紧急干预。在PM下，生物人通过云端界面对人工系统与机器人系统进行策略调整、参数修正和教学建议推送；在EM下，生物人可直接接管系统，对机器人实施强制停止或人工操作，对虚拟实验流程进行重置、修改或人工判定。

3 平行教学实验室的关键技术

本节将从人工系统构建、垂类大模型构建、数字人代理系统和实验室VLA 4个方面，系统阐述平行教学实验室的关键技术体系。

3.1 人工系统构建

平行教学实验室人工系统的核心目标是将真实实验环境以可计算、可交互的形式映射至虚拟空间。在ACP框架下，DT是人工系统的重要实现方式之一，前文讨论的DT技术均可作为人工系统构建的具体路径。进一步而言，场景工程（scene engineering, SE）是人工系统构建的另一关键基础。SE可通过Unity^[67]、SolidWorks^[68]等建模工具实现，也可借助同时定位与地图构建（simultaneous localization and mapping, SLAM）重建^[69]、神经辐射场（neural radiance field, NeRF）^[70]以及三维高斯泼溅（3D gaussian splatting, 3DGS）^[71]等方法，对实验空间与实验对象进行高精度三维重建。随着

生成式AI的发展，人工系统中的实验资产、场景结构与交互对象亦可由生成模型直接生成，实现从文本到场景、从图像到三维资产的快速构建，从而显著降低教学实验室虚拟化的成本^[72]。

3.2 垂类大模型构建

由于通用LLM/MLLM难以直接适配教学实验场景，对模型进行教育领域的定向改造是平行教学实验室的基础能力需求，其核心体现在指令微调与提示微调（提示工程）两个层面^[73]。指令微调用于使模型掌握教学任务、实验流程、安全规范以及心理与价值引导等领域的知识。目前已有面向教学场景的指令微调数据集，例如化学领域SMollInstruct^[74]、生物领域BioInstruct^[75]等；同时，教育垂类大模型如EduChat^[76]亦可作为基础模型加以应用。提示微调则通过系统提示模板、规范化任务格式与角色设定，增强模型输出的一致性与稳定性。此外，面向师生问答、实验解释与认知支持的模型，还需在隐私保护与教育伦理层面进行约束化设计，通过护栏机制确保模型输出符合学校教学场景对心理安全与价值引导的要求^[77]。

3.3 数字人代理系统

数字人代理系统是平行教学实验室的核心调度中枢，其运行依赖于明确的角色划分和预设的代理式工作流（agentic workflow, AW）。教育领域中已出现初步的AW相关研究，例如AWE^[78]、ChemVR-AI^[79]等教学代理系统。每个数字人代理承担特定职责，包括实验任务规划、知识解释、机器人协同等，并通过预设的链式思维（chain-of-thought, CoT）提示模板完成任务分解与任务分配^[80]。数字人代理系统需保留人工干预入口，使教师能够在必要时对任务流程进行校正、监督与覆盖，同时支持多代理协同机制，以适配跨学科、多步骤或复杂装置条件下的实验教学场景。

3.4 实验室VLA

实验室机器人的VLA通常以MLLM为语言与感知基础，并结合扩散模型（diffusion model, DM）^[81]或流匹配^[82]机制生成动作序列。针对MLLM，需要通过端到端策略微调或代码级执行策略微调，使模型能够理解实验室环境并生成可执行的行为指令。当前通用领域中已有多种VLA技术路线，例如扩散生成策略^[83]等，同时也出现了一些开源VLA模型，如OpenVLA^[84]、 π_0 ^[85]等。然而，即便经过针对性微调，VLA模型仍可能存在

不确定性与行为偏差，因此需在系统层面引入多重安全机制，包括可视化操作边界约束、动作空间限制、多级人工紧急切断以及安全代理复核等，以确保实验教学任务在自主执行与安全可靠性之间保持平衡^[86]。

4 案例研究

随着教育数字化对新课程改革与教学模式创新的持续赋能，相关国家政策也在不断推进。天津市第二中学已率先完成多类数字化智能实验室的配置与教学实践，相关智能基础设施已较为完备，如图3所示。整体而言，实验室体系正逐步向平行教学实验室方向演进，但仍处于初期阶段：实际系统的智能化建设已基本完成，而人工系统的构建尚不完善。因此，本文选取当前最接近平行教学实验室形态的案例，即智慧出行AI实验室，作为代表性示例进行分析。



图3 天津市第二中学平行教学实验室的初步实践

为落实《新一代人工智能发展规划》^[87]中关于“推进全民智能教育、在中小学阶段系统开展人工智能课程体系建设”的政策要求，天津市第二中学建设了智慧出行AI实验室，如图4所示。该实验室以智能交通为主题，通过“虚实结合、以行促学”的方式，探索面向中学阶段的新型AI教学基础设施。作为平行教学实验室的初步实现形态，该系统已具备ACP方法的基本功能，并配置了面向教学支持的数字人代理；机器人系统由智能交通沙盘中的自动化装置与缩微智能车构成，支持多传感器实验与自主决策相关教学；生物人主体则由教师与参与课程的学生构成。与此同时，实验室同步制定了相应的标准化规范，用于约束平行流程、设备

接口、安全策略与多代理协同机制，为后续平行教学实验室的扩展建设提供可复用的实现路径。



图4 天津市第二中学智慧出行AI实验室运行示例

具体而言，实验室的实际系统围绕交通场景进行构建。鉴于交通系统具有空间尺度大、场景复杂度高特点，实验室采用1:24高精度交通沙盘进行实体呈现。该沙盘可通过灯光、投影与动态控制模块模拟雨雾天气、夜间驾驶及低能见度等复杂环境，并可设置交通事故、道路施工等突发事件，以形成可控的实验情境。沙盘顶部布设4K高清摄像头阵列，用于构建全局视觉定位系统，实现车辆跟踪、交通流模拟与交通状态识别等功能。实验室同时配备具备真实车辆运动学特性的缩微智能车，搭载单双目摄像头、激光雷达与超声波雷达等多模态传感器，用于车辆控制、智能感知与车联网（vehicle-to-everything, V2X）协同等实验教学。在课程设计方面，高一年级侧重基础AI实验任务，如红绿灯识别停车、车道线跟随与自动避障等，涵盖机器视觉、代码逻辑与底盘控制等内容；高二年级则进一步引入传感器协同、车路协同与交通系统级智能等更高层级任务，引导学生在可控环境中理解复杂系统的协同运行机制。

人工智能系统与计算实验的构建依托实验室现有计算资源，包括i9 CPU、NVIDIA 24GB GPU以及由交换机与无线接入点（access point, AP）构建的实验室局域网。在人工系统层面，依据实际交通沙盘的结构与功能需求，利用CARLA^[88]仿真器构建与真实沙盘结构一致的数字场景工程，并配套构建视觉模型训练所需的数据集、LabelImg^[89]标注工具，以及道路拓扑、交通信号与车辆动力学等高精度模型，使学生能够在虚拟环境中开展模型训练、

算法验证与实验推演。系统中配置了经过提示微调的 DeepSeek Chat^[90] 和 Qwen3-235B-A22B^[91] API, 用于构建多数字人代理体系, 包括嵌入 PyCharm^[92] 环境的智能编程代理以及面向实验指导的教学问答代理。计算实验依据课程教学要求在人工系统中执行, 例如基于 YOLO^[93] 系列算法实现红绿灯识别、基于 TinyML^[94] 在边缘设备上部署轻量化模型, 以及基于 OpenCV^[95] 实现车道线检测等, 使学生能够在虚拟环境中完成从数据标注、模型训练到实验推演的完整流程。

人工系统与实际系统通过脚本引擎、ROS 接口、API 以及局域网通信协议实现虚实交互, 计算实验的推演结果可通过平行执行机制映射至真实沙盘中的缩微智能车执行, 形成虚实联动的闭环教学流程。当算法或控制策略在虚拟环境中表现稳定时, 可直接部署至实际智能车平台进行验证; 若出现策略偏差或潜在风险, 则可在人工系统中进行调整与重训, 从而保障实验教学过程的安全性、可控性与连续性。当前, 缩微智能车的 VLA 尚未完成部署, 相关研究与系统集成工作仍在持续推进中。

从教学应用情况看, 智慧出行 AI 实验室已在课程实施过程中表现出初步的教学增益。与传统实验课相比, 学生能够在虚拟环境中先完成方案推演, 再进入实体系统进行验证, 这一过程降低了直接上手的试错成本, 也使教师更容易识别学生在任务理解和操作思路上的具体问题。课堂实践表明, 学生对实验任务的参与度有所提升, 对交通感知与智能控制相关概念的理解更为深入, 实验过程中的重复调试也更具针对性。与此同时, 教师可借助人工系统中的过程记录对学生的实验表现进行回溯分析, 从而为后续教学调整提供依据。后续研究仍需结合学习成绩、任务完成质量和课堂观察等数据, 进一步开展更系统的教学效果评估。

5 结束语

平行教学实验室作为平行智能理念在教学实验场景中的具体实践形态, 通过构建基于 ACP 方法的虚实融合体系, 并引入三类人系统以及 LLM/MLLM、VLA 等关键技术, 为 K-12 实验教学提供了一种可重构、可扩展且具备自主性的智能化基础设施。本文以天津市第二中学智慧出行 AI 实验室为案例, 验证了平行教学实验室在真实教学场景中

的可落地性与实际应用价值。基于上述探索, 平行教学实验室不仅有助于提升实验教学的安全性、可控性与教学效率, 也为 K-12 教学实验室的智能化升级提供了具备可操作性的技术路径与实践范式。

6 致谢

本文系 2022 年度市教委社会科学重大项目《高质量实施品牌高中建设项目的实践研究》(No.2022JWZD88) 的成果。

参考文献:

- [1] Feynman R P, Leighton R B, Sands M, et al. The Feynman lectures on physics; vol. I[J]. American Journal of Physics, 1965, 33(9): 750-752.
- [2] Abrahams I, Millar R. Does practical work really work? a study of the effectiveness of practical work as a teaching and learning method in school science[J]. International Journal of Science Education, 2008, 30(14): 1945-1969.
- [3] Chinn C A, Malhotra B A. Epistemologically authentic inquiry in schools: a theoretical framework for evaluating inquiry tasks[J]. Science Education, 2002, 86(2): 175-218.
- [4] Banilower E R, Smith P S, Weiss I R, et al. The status of K-12 science teaching in the United States: results from a national observation survey[C]//The Impact of State and National Standards on K-12 Science Technology. Leeds: Emerald Publishing Limited, 2006: 83-122.
- [5] Knight D, Hannigan M, Cheadle L, et al. Introducing university laboratory tools into K-12 classrooms: Benefits and challenges[C]//Proceedings of the 2017 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [6] Lin Y Z, Alhamadah A H J, Redondo M W, et al. Transforming engineering education using generative ai and digital twin technologies[PP]. V1. (2024-11-01) [2026-01-10]. arXiv: arXiv.2411.14433.
- [7] Lo S, Baird S G, Schrier J, et al. Review of low-cost self-driving laboratories in chemistry and materials science: the “frugal twin” concept[J]. Digital Discovery, 2024, 3(5): 842-868.
- [8] Park S, Kim H. A comprehensive survey and taxonomy on large language model-based knowledge tracing[C]//International Conference on Generative Systems and Intelligent Tutoring Systems. Berlin: Springer, 2025: 246-258.
- [9] Wang F Y, Wang X, Li L X, et al. Steps toward parallel intelligence[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 3(4): 345-348.
- [10] 李柏, 郝金第, 孙跃硕, 等. 平行智能范式视角下的视觉-语言-动作模型发展现状与展望[J]. 智能科学与技术学报, 2025, 7(3): 290-303. Li B, Hao J D, Sun Y S, et al. Vision-language-action models under parallel intelligence paradigm: the state of the art and future perspectives[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2025, 7(3): 290-303.
- [11] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489, 514. Wang F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- [12] 王飞跃. 数字教师与平行教育: 关于 ChatGPT 之后教学变革的探讨[J]. 智能科学与技术学报, 2023, 5(4): 446-455. Wang F Y. Digital teachers and parallel education: a paradigm shift in

- teaching and learning after ChatGPT[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2023, 5(4): 446-455.
- [13] 王飞跃. 智能科技与K21教育: 未来社会的未来学校与未来师生[J]. *智能科学与技术学报*, 2024, 6(3): 281-283.
Wang F Y. K21 education and intelligent sciences: future schools and teachers/students in future society[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2024, 6(3): 281-283.
- [14] Zhu F H, Lv Y S, Chen Y Y, et al. Parallel transportation systems: toward IoT-enabled smart urban traffic control and management[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2020, 21(10): 4063-4071.
- [15] Lin F, Yang J, Sun D L, et al. Autonomous drug discovery with parallel intelligence[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2025, 12(8): 1742-1744.
- [16] Hofstein A, Lunetta V N. The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century[J]. *Science Education*, 2004, 88(1): 28-54.
- [17] Koopmans M. Education is a complex dynamical system: challenges for research[J]. *The Journal of Experimental Education*, 2020, 88(3): 358-374.
- [18] Mital P, Moore R, Llewellyn D. Analyzing K-12 education as a complex system[J]. *Procedia Computer Science*, 2014, 28: 370-379.
- [19] Schauer F, Krbecek M, Beno P, et al. REMLABNET - open remote laboratory management system for e-experiments[C]//*Proceedings of the 2014 11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)*. Piscataway: IEEE Press, 2014: 268-273.
- [20] Hu B K, Jia W Y, Mi S S, et al. The impact of computer simulation on students' conceptual understanding in K-12 science education: a meta-analysis[J]. *Journal of Science Education and Technology*, 2025. DOI: 10.1007/s10956-025-10264-7.
- [21] Lei Z C, Zhou H, Hu W S, et al. Web-based digital twin communication system of power systems for training and education[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(2): 3592-3602.
- [22] Zhao P, Zhu H Y. Design and implementation of a virtual experimental teaching system for deep energy exploitation based on digital twin technology[J]. *Systems*, 2024, 12(10): 386.
- [23] Zhou Z L, Oveissi F, Langrish T. Applications of augmented reality (AR) in chemical engineering education: Virtual laboratory work demonstration to digital twin development[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2024, 188: 108784.
- [24] Taylor M V, Muwaffak Z, Penny M R, et al. Optimising digital twin laboratories with conversational AIs: enhancing immersive training and simulation through virtual reality[J]. *Digital Discovery*, 2025, 4(5): 1134-1141.
- [25] Taylor M, Bin Abdullah N, Al-Dargazelli A, et al. Breaking the access to education barrier: enhancing HPLC learning with virtual reality[J]. *Journal of Chemical Education*, 2024, 101(10): 4093-4101.
- [26] Acker J, Rogers I, Guerra-Zubiaga D, et al. Low-cost digital twin approach and tools to support industry and academia: a case study connecting high-schools with high degree education[J]. *Machines*, 2023, 11(9): 860.
- [27] 张磊, 虎春艳, 张滩纤, 等. “实验室安全与规范”课程“四位一体”教学改革与实践[J]. *实验室研究与探索*, 2025, 44(2): 258-262.
Zhang L, Hu C Y, Zhang W Q, et al. Reform and practice of “four-in-one” teaching system for laboratory safety and specification course[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2025, 44(2): 258-262.
- [28] 教育部. 中小学实验室规程[S]. 北京: 中华人民共和国教育部, 2009.
Ministry of Education of the People's Republic of China. Regulations on primary and secondary school laboratories[S]. Beijing: Ministry of Education, 2009.
- [29] American Chemical Society. Committee on chemical safety. guidelines for chemical laboratory safety in secondary Schools[M]. Washington: American Chemical Society, 2016.
- [30] American Chemical Society Committee on Chemical Safety. Identifying and evaluating hazards in research laboratories[R]. 2015.
- [31] Harada T, Hayashi R, Tomita K. Prediction of hazards in laboratory work using deep learning models learnt from past laboratory accidents [J]. *Journal of Environment and Safety*, 2024, 15(2): 17-24.
- [32] Ali L, Alnajjar F, Parambil M M A, et al. Development of YOLOv5-based real-time smart monitoring system for increasing lab safety awareness in educational institutions[J]. *Sensors*, 2022, 22(22): 8820.
- [33] Gupta K, Brundage P, Palassis J. School chemistry laboratory safety guide[R]. 2006.
- [34] Qin H T, Jin C S, Zhou T, et al. A LoRa-based multi-node system for laboratory safety monitoring and intelligent early-warning: towards multi-source sensing and heterogeneous networks[J]. *Sensors*, 2025, 25(21): 6516.
- [35] 徐文, 杜坤, 李江, 等. 数字孪生技术在高校实验室安全管理中的实践[J]. *实验技术与管理*, 2024, 41(4): 222-227.
Xu W, Du K, Li J, et al. Research on the application of digital twin technology in university laboratory safety management[J]. *Experimental Technology and Management*, 2024, 41(4): 222-227.
- [36] Rickel J W. Intelligent computer-aided instruction: a survey organized around system components[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1989, 19(1): 40-57.
- [37] Bitzer D, Braunfeld P, Lichtenberger W. PLATO: an automatic teaching device[J]. *IRE Transactions on Education*, 1961, 4(4): 157-161.
- [38] Graesser A C. Conversations with AutoTutor help students learn[J]. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 2016, 26(1): 124-132.
- [39] Dougiamas M, Taylor P. Moodle: using learning communities to create an open source course management system[C]//*ED-MEDIA 2003-World Conference on Educational Multimedia, Hypermedia & Telecommunications*. Chesapeake: Association for the Advancement of Computing in Education, 2003: 171-178.
- [40] 教育部. 国家中小学智慧教育平台上线试运行[EB]. (2022-03-28)[2026-01-10].
Ministry of Education of the People's Republic of China. National Smart Education Platform for Primary and Secondary Schools Launched for Trial Operation[EB]. (2022-03-28)[2026-01-10].
- [41] 清华大学. 学堂在线推出智慧教学工具——雨课堂[EB]. (2016-06-17)[2026-01-10].
Tsinghua University. XuetangX launches intelligent teaching tool “Yuketang (Rain Classroom)”[EB]. (2016-06-17)[2026-01-10].
- [42] Hurst A, Lerer A, Goucher A P, et al. GPT-4o system card[PP]. V1. (2024-10-25) [2026-01-10]. arXiv: arXiv.2410.21276.
- [43] Khan Academy. Meet Khanmigo: Khan Academy's AI-powered teaching assistant and tutor[EB]. [2026-01-10].
- [44] Quizlet. Introducing Q-chat, the world's first AI tutor built with OpenAI's ChatGPT API[EB]. (2023-02-28)[2026-01-10].
- [45] Duolingo. Explain my answer is now available to learners[EB]. (2023-10-11)[2026-01-10].
- [46] Vanzo A, Pal C S, Sachan M. GPT-4 as a homework tutor can improve student engagement and learning outcomes[C]//*Proceedings of the*

- 63rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 1: Long Papers). Stroudsburg: ACL, 2025: 31119-31136.
- [47] Kestin G, Miller K, Klales A, et al. AI tutoring outperforms in-class active learning: an RCT introducing a novel research-based design in an authentic educational setting[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 17458.
- [48] Tinker R. A history of probeware[R]. Concord: The Concord Consortium, 2000.
- [49] PASCO Scientific. PASCO wireless sensors & SPARKvue for science education[EB]. [2026-01-10].
- [50] Vernier Science Education. Science probeware & experiment software for teachers[EB]. [2026-01-10].
- [51] SMART Technologies. SMART Technologies launches new SMART Board RX series[EB]. (2023-11-16)[2026-01-10].
- [52] 希沃. 第六代交互智能平板[EB]. (2023-04-22)[2026-01-10].
Seewo. 6th-generation interactive flat panel[EB]. (2023-04-22)[2026-01-10].
- [53] 孙元成, 赵敏. 一种集成式的实验室顶部吊装系统: CN201921204274.7[P].(2020-06-05)[2026-01-10].
Sun Y C, Zhao M. Integrated laboratory ceiling-mounted system: CN210685124U[P]. (2020-06-05)[2026-01-10].
- [54] Karalekas G, Vologianidis S, Kalomiros J. Teaching machine learning in K-12 using robotics[J]. *Education Sciences*, 2023, 13(1): 67.
- [55] Jara C A, Candelas F A, Torres F. Virtual and remote laboratory for robotics e-learning[C]//18th European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Amsterdam: Elsevier, 2008: 1193-1198.
- [56] Song T, Luo M, Zhang X L, et al. A multiagent-driven robotic AI chemist enabling autonomous chemical research on demand[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2025, 147(15): 12534-12545.
- [57] Zhang J Y, Huang J X, Jin S, et al. Vision-language models for vision tasks: a survey[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2024, 46(8): 5625-5644.
- [58] Lan Z Q, Jiang Y X, Wang R Q, et al. AutoBio: a simulation and benchmark for robotic automation in digital biology laboratory[PP]. V3. (2025-05-29)[2026-01-10]. arXiv: arXiv.2505.14030.
- [59] Khan M H, Asfaw S, Iarchuk D, et al. Shake-VLA: vision-language-action model-based system for bimanual robotic manipulations and liquid mixing[C]//Proceedings of the 2025 20th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). Piscataway: IEEE Press, 2025: 1393-1397.
- [60] 张俊, 许沛东, 王飞跃. 平行系统和数字孪生的一种数据驱动形式表示及计算框架[J]. *自动化学报*, 2020, 46(7): 1346-1356.
Zhang J, Xu P D, Wang F Y. Parallel systems and digital twins: a data-driven mathematical representation and computational framework[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(7): 1346-1356.
- [61] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. *自动化学报*, 2019, 45(11): 2001-2031.
Yang L Y, Chen S Y, Wang X, et al. Digital twins and parallel systems: state of the art, comparisons and prospect[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [62] 薛霄, 于湘凝, 周德雨, 等. 计算实验方法的溯源、现状与展望[J]. *自动化学报*, 2023, 49(2): 246-271.
Xue X, Yu X N, Zhou D Y, et al. Computational experiments: past, present and perspective[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(2): 246-271.
- [63] Yang J, Wang X, Tian Y L, et al. Parallel intelligence in CPSSs: being, becoming, and believing[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2023, 38(6): 75-80.
- [64] Lewis P, Perez E, Piktus A, et al. Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks[C]//Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems. New York: ACM Press, 2020: 9459-9474.
- [65] Zhang J T, Li G L, Su J Y. SAGE: a framework of precise retrieval for RAG[PP]. V3. (2025-06-06)[2026-01-10]. arXiv: arXiv.2503.01713.
- [66] Quigley M, Conley K, Gerkey B, et al. ROS: an open-source robot operating system[C]//ICRA Workshop on Open Source Software. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [67] Unity Technologies. Unity user manual 2022.1[EB]. (2022-11-18) [2026-01-10].
- [68] Dassault Systèmes. SOLIDWORKS 2024 Web Help[EB]. (2024-01-10) [2026-01-10].
- [69] Dissanayake M W M G, Newman P, Clark S, et al. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(3): 229-241.
- [70] Mildenhall B, Srinivasan P P, Tancik M, et al. NeRF: representing scenes as neural radiance fields for view synthesis[J]. *Communications of the ACM*, 2021, 65(1): 99-106.
- [71] Kerbl B, Kopanas G, Leimkuehler T, et al. 3D Gaussian splatting for real-time radiance field rendering[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2023, 42(4): 1-14.
- [72] Lin C H, Gao J, Tang L M, et al. Magic3D: high-resolution text-to-3D content creation[C]//Proceedings of the 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2023: 300-309.
- [73] Jia M L, Tang L M, Chen B C, et al. Visual prompt tuning[C]//European Conference On Computer Vision. Berlin: Springer, 2022: 709-727.
- [74] Yu B T, Baker F N, Chen Z Q, et al. LLaSMol: advancing large language models for chemistry with a large-scale, comprehensive, high-quality instruction tuning dataset[PP]. V4. (2024-08-10) [2026-01-10]. arXiv: arXiv.2402.09391.
- [75] Tran H, Yang Z C, Yao Z H, et al. BioInstruct: instruction tuning of large language models for biomedical natural language processing[J]. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 2024, 31(9): 1821-1832..
- [76] Dan Y H, Lei Z K, Gu Y Y, et al. EduChat: a large-scale language model-based chatbot system for intelligent education[PP]. V1. (2023-08-05) [2026-01-10]. arXiv: arXiv.2308.02773.
- [77] Holmes W, Miao F. Guidance for generative AI in education and research[R]. 2023.
- [78] Jiang Y H, Lu Y J, Dai L, et al. Agentic workflow for education: concepts and applications[PP]. V1. (2025-09-01)[2026-01-10]. arXiv: arXiv.2509.01517.
- [79] Jain R, Rout S, Srivastava G. ChemVR-AI: an immersive virtual reality laboratory with pedagogical agents[C]//Proceedings of the 27th International Conference on Mobile Human-Computer Interaction. New York: ACM Press, 2025: 1-5.
- [80] Bosma M, Chi E, Ichter B, et al. Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models[C]//Proceedings of the Advances in Neural Information Processing Systems. Massachusetts: MIT Press, 2022: 24824-24837.
- [81] Ho J, Jain A, Abbeel P. Denoising diffusion probabilistic models[J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2020, 33: 6840-6851.
- [82] Lipman Y, Chen R T Q, Ben-Hamu H, et al. Flow Matching for Generative Modeling[PP]. V3. (2024-02-08) [2026-01-10]. arXiv: arXiv.2210.02747.
- [83] Chi C, Xu Z J, Feng S Y, et al. Diffusion policy: Visuomotor policy learning via action diffusion[J]. *The International Journal of Robotics*

Research, 2025, 44(10/11): 1684-1704.

- [84] Kim M J, Pertsch K, Karamcheti S, et al. OpenVLA: an open-source vision-language-action model[PP]. V3. (2024-09-05)[2026-01-10]. arXiv: arXiv.2406.09246.
- [85] Black K, Brown N, Driess D, et al. π_0 : a vision-language-action flow model for general robot control[PP]. V4. (2026-01-08)[2026-01-10]. arXiv: arXiv. 2410.24164.
- [86] Liang J, Huang W L, Xia F, et al. Code as policies: language model programs for embodied control[C]//Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Press, 2023: 9493-9500.
- [87] 国务院. 国务院关于印发新一代人工智能发展规划的通知[EB]. (2017-07-20)[2026-01-11].
State Council of the People's Republic of China. Notice of the state council on issuing the new generation artificial intelligence development plan[EB]. (2017-07-20)[2026-01-11].
- [88] Dosovitskiy A, Ros G, Codevilla F, et al. CARLA: an open urban driving simulator[C]//Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning. [S.l.]: PMLR, 2017: 1-16.
- [89] Tzatalin. LabelImg: graphical image annotation tool[EB]. [2026-01-10].
- [90] Liu A X, Mei A X, Lin B C, et al. DeepSeek-V3.2: pushing the frontier of open large language models[PP]. V1. (2025-12-02)[2026-01-10]. arXiv: arXiv. 2512.02556.
- [91] Yang A, Li A F, Yang B S, et al. Qwen3 technical report[PP]. V1. (2025-05-14)[2026-01-10]. arXiv: arXiv. 2505.09388.
- [92] JetBrains. PyCharm: the only Python IDE you need[EB]. [2026-01-10].
- [93] Redmon J, Divvala S, Girshick R, et al. You only look once: unified, real-time object detection[C]//Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2016: 779-788.
- [94] Warden P, Situnayake D. Tinymt: Machine learning with tensorflow lite on arduino and ultra-low-power microcontrollers[M]. Sebastopol: O'Reilly Media, 2019.
- [95] Bradski G. The OpenCV library[J]. Dr. Dobb's Journal: Software Tools for the Professional Programmer, 2000, 25(11): 120-123.

[作者简介]



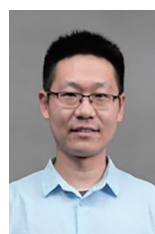
高欣 (1974-), 女, 天津市第二中学党委副书记、校长, 主要研究方向为智慧校园管理及建设。



林飞 (1994-), 男, 澳门科技大学博士生, 主要研究方向为平行智能、AI for Science、大语言模型、多模态感知和生成式AI。



傅君 (1982-), 女, 天津市第二中学纪委书记, 主要研究方向为现代教育技术、人工智能教育、中学科学教育和智慧校园建设。



孙健君 (1989-), 男, 天津市第二中学德育主任, 主要研究方向为高中语文教学、高中德育工作和团工作。