

面向未来学习空间的元认知驱动教育模型研究

付瑞, 蔡迪*, 范长英, 张玉涛, 孙昊
潍坊科技学院计算机学院, 山东潍坊

摘要: 在数据信息时代, 为解决传统学习空间认知深度培养不足、元认知能力发展滞后等问题, 研究提出元认知驱动的三维教育模型。该模型打破了传统认知培养的时空界限, 通过智能化与具身化的学习空间重构, 强化学生的自我认知与调控能力。依托元宇宙与XAI-GenAI技术融合, 构建“虚拟化-沉浸化-泛在化”技术赋能框架, 结合元认知策略训练体系、实时动态反馈机制等核心组件, 实现了学习过程的可视化与动态适配。特别地, XAI与GenAI的应用使得学习路径更加透明, 知识生成更为动态, 从而推动教育模式向个性化与自主化方向转变。研究不仅为教育4.0时代提供了理论支撑, 还为高校教学范式的开放、动态与自适应演进指明了实践路径。

关键词: 元认知; 教育元宇宙; XAI-GenAI融合; 具身认知环境; 自适应学习

Research on Metacognition - Driven Educational Model for Future Learning Spaces

Rui Fu, Di Cai*, Changying Fan, Yutao Zhang, Hao Sun

School of Computer Science, Weifang University of Science and Technology, Weifang, Shandong

Abstract: In the era of data and information, this research proposes a metacognition-driven 3D educational model to address the insufficient cultivation of cognitive depth and the lag in metacognitive development in traditional learning spaces. This model eliminates the spatial and temporal restrictions of traditional cognition cultivation. Through the intelligent and embodied reconstruction of learning spaces, it enhances students' self-awareness and regulation abilities. Based on the integration of metaverse and XAI-GenAI technologies, the research constructs a “virtualization - immersion - ubiquity” technology-enabled framework. It also combines metacognitive strategy training systems and real-time dynamic feedback mechanisms to make the learning process visual and dynamically adaptive. The application of XAI and GenAI makes learning paths more transparent and knowledge generation more dynamic. This promotes a shift in educational models towards personalization and autonomy. The research not only provides theoretical support for Education 4.0 but also offers a practical path for the open, dynamic, and self-adaptive evolution of teaching paradigms in higher education.

Keywords: Metacognition; Educational Metaverse; XAI-GenAI Integration; Embodied Cognition Environment; Adaptive Learning

1 背景与问题

随着教育数字化转型的深入推进，传统学习空间在认知深度培养上的局限性日益凸显。OECD《教育2030学习指南》指出，当前全球多数课堂仍存在知识传递主导、学习碎片化等问题[1]。与此同时，元宇宙与生成式人工智能（GenAI）的融合为教育创新提供了新机遇：元宇宙通过3D沉浸空间与多智能体交互重构具身认知环境；而GenAI与可解释人工智能（XAI）的结合则实现了教学内容的动态生成与认知路径的可视化。

在此背景下，元认知能力作为联合国教科文组织界定的数字公民素养的关键组成部分[2]，其培养范式亟待革新。本研究聚焦“如何构建智能驱动的元认知发展新范式”这一核心问题，提出融合元宇宙、XAI与GenAI的三维教育模型。该模型旨在突破传统认知培养的时空限制，为教育4.0时代的教学生态重构提供理论支撑与实践路径。

2 核心论点

本研究提出以元认知理论为核心驱动力，通过融合元宇宙技术、XAI与GenAI，构建三维教育模型，以解决传统学习空间认知培养的时空局限性与认知断层问题。研究核心论点包括：

（1）元宇宙与XAI-GenAI融合可突破传统教育物理空间与认知培养模式的局限，显著提升学习者的认知监控与自主调控能力。

（2）以元认知能力为目标导向，重构学习空间的智能化与具身化，增强学生自我认知与调控策略，实现学习过程的可视化和动态适配。

（3）元认知驱动教育模型能够实现认知路径的透明化、知识生成的动态化以及学习过程的可追溯性，推动教育模式向个性化与自主化深度转型。

3 元宇宙与XAI-GenAI融合的技术赋能模型概要

元宇宙与XAI-GenAI融合的技术赋能模型以先进的数字技术为基础，整合虚拟现实技术、增强现实技术、数字孪生、人工智能等多种前沿技术，形成涵盖“虚拟化-沉浸化-泛在化”的渐进式技术支

撑体系。模型的构建旨在通过技术的深度融合与创新应用，推动教育模式的全面革新，促进学习过程的透明化、个性化和智能化。

在虚拟化阶段，模型通过数字孪生、3D建模和云计算技术实现教育场景的数字化映射，将真实教育资源与教学环境转化为数字形式，从而为教学活动提供基础支撑。沉浸化阶段利用VR/AR/MR技术、全息投影以及体感交互等感知技术，创造高度沉浸的具身认知体验[3]。学生可以在虚拟环境中通过具身交互深入学习、主动探索，从而有效提升学习的自主性与深度参与[4]。在泛化阶段依托5G、物联网及边缘计算技术，实现教育服务的全时全域覆盖[3]。学习者能够随时随地接入学习系统，获得实时反馈与支持，从而激发主体的主动学习行为，促进持续的学习动力与效能提升。

在技术赋能过程中，模型强调XAI技术的应用，实现教学决策的透明化，使学习路径与教学策略清晰可见，有助于学习者理解并积极参与认知决策过程。同时，GenAI技术根据学生实时学情与个性化需求动态生成教学内容与情境仿真，为学习者提供精准适配的学习资源，显著提升学习效果。

4 元认知驱动教育模型解构

4.1 认知强化环境建设

认知强化环境建设是元认知驱动教育模型的基础构件，更是一个多维度、沉浸式、具身交互的学习空间。该环境以元宇宙技术为支撑框架，融合虚拟现实（VR）、增强现实（AR）、混合现实（MR）与数字孪生等前沿技术，并通过数字建模与实时感知技术，将现实教学场景数字化映射至虚拟世界，形成可探索、可互动的学习情境。通过多种技术赋能实现学习者从被动接收知识向主动建构知识的根本转变，促使学生在“人一机一场”一体化环境中实现深度认知加工。

此外，具身认知理论还为该环境提供认知基础支持，强调学习者在沉浸体验中的身体参与和动作反馈有助于概念建构和记忆迁移。系统内置的虚拟导师、多智能体协同系统与情境任务模块，不仅模拟真实教学互动，还能根据学习者行为路径调整

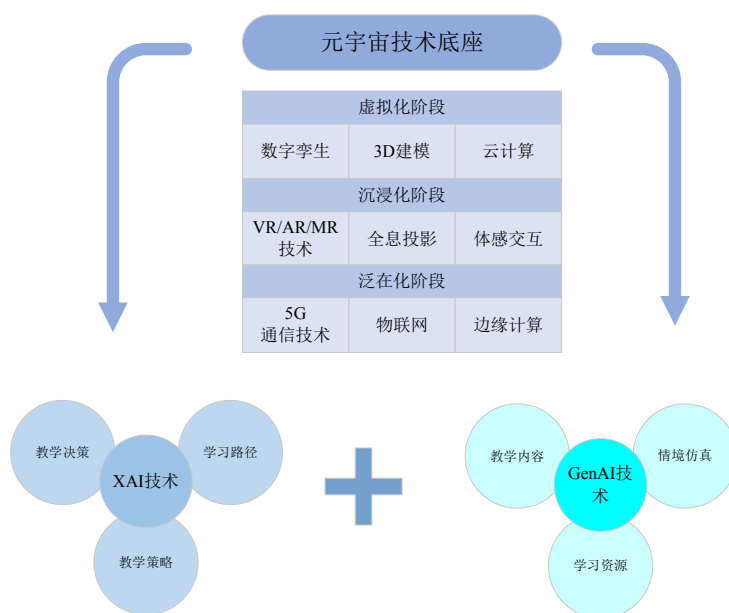


图1. 元宇宙与XAI-GenAI融合的技术赋能模型图

反馈策略，使学习过程更加个性化和智能化。通过构建如虚拟实验室、探究型任务情境、游戏化教学模块等多元空间，学生可在虚拟世界中实现实验操作、问题解决、合作探究等高阶学习活动。

认知强化环境不仅为学习者提供技术支持平台，更成为其认知能力、元认知能力与情感动机协同发展的关键场域，推动其从“知其然”走向“知其所以然”。

4.2 元认知策略训练体系

为帮助学习者形成系统化、自主化的学习调控机制，元认知策略训练体系以“计划—监控—评估”三阶段的元认知循环为基本框架，通过技术手段和教学工具将抽象的元认知过程具象化、操作化，引导学习者主动掌控自身的学习路径与认知过程[5]。

系统集成任务拆解模板、思维导图工具、反思日志机制等模块，帮助学习者梳理知识结构，构建认知框架。在学习过程中，通过集成XAI技术，对学习者的任务完成路径、行为决策和时间分布进行可视化建模，帮助其反思策略使用效果与认知偏差，可动态调整学习路径。同时结合GenAI，动态生成个性化的策略建议、情境任务与典型案例，实

现学习者在真实任务情境中的策略迁移与优化，推动其元认知能力从感知层向执行层跃迁。

4.3 实时动态反馈机制

以数据驱动为核心，融合多模态感知技术与人工智能诊断引擎，构建实时动态反馈机制，承担着持续监测、即时干预和智能优化学习过程的关键任务，确保学习路径与认知策略的持续适配与优化。

系统通过多模态数据采集（眼动轨迹、语音情绪、心率等），实时捕捉学习者的专注度、情绪状态、认知负荷与身体反应，从而全面还原其学习状态，再经过AI诊断引擎进行聚合分析，出具即时诊断报告，再依据诊断结果动态生成个性化反馈方案[6]。能够反馈出学习者当前认知负荷、专注度、情绪状态等指标，并由智能系统触发干预策略，如调整任务难度、推送情绪激励、推荐反思路径等，将学习反馈从“静态评估”转化为“动态干预”，使反馈不仅可见、更可操作。实现将学习过程转化为一个自适应、自更新的系统，持续激发学习动能，有效提升学习成效与体验质量。

4.4 学科知识图谱嵌入路径

作为连接课程内容与元认知策略的桥梁，

学科知识图谱嵌入路径借助自然语言处理技术（NLP），将教学大纲中的核心知识点、能力要求、学习任务等内容与认知策略映射至图谱结构并动态更新。

系统通过知识图谱与学习者行为数据的融合，对学习者在特定任务中的知识调用情况、知识盲点与策略偏差进行精准分析。同时，通过XAI可视化工具，将知识点之间的逻辑关系与学习者的知识掌握轨迹进行图形化呈现，支持学习者根据当前任务快速定位所需知识节点，提升其对认知过程的感知与控制能力。与GenAI联动，系统还可根据学习者当前任务需求，从知识图谱中抽取适配内容并生成多维教学资源，真正实现“任务驱动—图谱调用—资源匹配”的智能闭环。

4.5 自适应学习路径生成引擎

引擎整合学习者画像、实时学习数据与任务目标，借助图神经网络与因果图分析技术，为每位学习者生成符合其认知发展水平与策略偏好的多维学习路径，构建动态演进的个性化学习框架。根据当前学习任务的属性，引擎自动划分路径层级，涵

盖基础巩固、能力提升与迁移拓展三大阶段，并为每一阶段匹配最优的资源节点和策略组件，动态适应学习者的认知发展水平。引擎还融合教学任务类型、策略偏好与元认知行为数据，生成多方案备选路径，供学习者自主选择、系统辅助决策，从而提升其路径规划能力与自主学习成效。

4.6 多模态智能感知与调控体系

作为保障元认知驱动教育模型高效运行的智能底层系统，本体系融合人工智能、情感计算与神经信息科学等多领域技术，通过对学习过程中的非认知变量的深度感知与实时调控，实现对学习者状态的精准识别与动态支持[7]。

利用摄像头与麦克风采集表情、语音语调 and 肢体动作，并通过情绪识别算法分析其情感状态与心理动因，结合生理传感器捕捉心率与皮肤电信号，构建学习者的即时多模态画像。系统实时判断学习状态并与任务完成情况联动，提供教学提示、策略推荐与节奏调整建议，引导学习者回归正向认知状态。同时，支持教师实施“察—导—评”一体化智慧教学，全面提升元认知

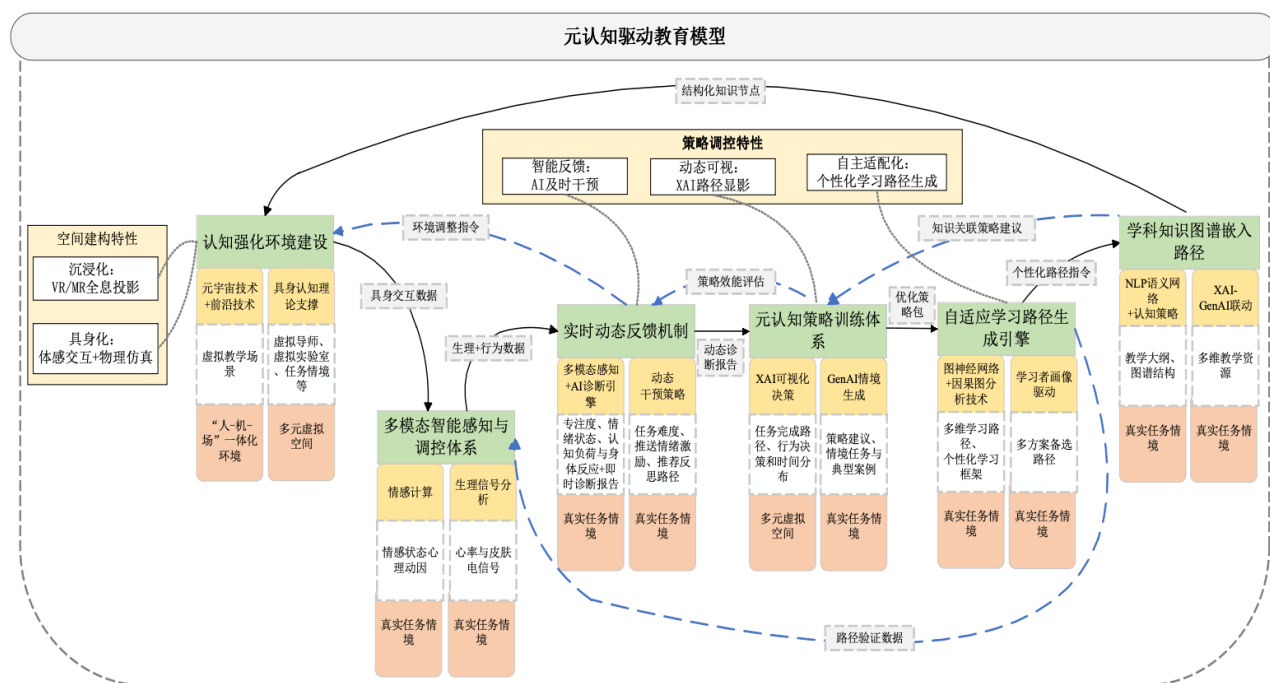


图2. 元认知驱动教育模型

驱动机制的运行效能。

5 结语

在教育智能化快速演进的背景下，传统教学模式正面临深刻变革，“以学习者为中心”的理念亟待从理念走向实践落地。研究聚焦未来学习空间的重构需求，以元认知能力发展为核心目标，融合元宇宙、XAI与GenAI等前沿技术，构建了具有系统性、融合性与适应性的元认知驱动教育模型，为教育4.0时代提供了理论支撑与技术方案。

研究从认知本质与技术演化双重维度出发，系统提出了“认知强化环境建设—元认知策略训练体系—实时动态反馈机制”三位一体的教育模型框架。模型不仅在空间建构上实现了沉浸化与具身化的高度统一，也在策略支持与过程调控上构建了动态可视、智能反馈、自主适配的教学生态。通过XAI赋能学习路径可解释性，GenAI支撑内容与情境个性化生成，系统实现了对学习者认知—策略—情绪的全流程精准支持。

同时，基于动态知识图谱的路径生成引擎、因果推理机制与多模态智能感知技术的深度嵌入，使个性化学习路径的生成、调整与优化具备更强的柔性、与适配性，有效打破了路径构成模糊与反馈滞后的瓶颈。研究还强调模型与实际教学场景的融合机制，通过平台—教师—学习者的三方协同，推进教学过程从标准化向智能化、自主化转型。

未来研究将进一步强化对跨学科课程、情绪感知与长期实证机制的支持，持续完善模型的广泛适

应性与实践可迁移性。有望引领高校教学范式向更加开放、动态、自适应的方向演进。

致谢

本文由以下基金项目资助：中国博士后科学基金（2024M752301）；山东省自然科学基金（ZR2023MF048）；山东省社会科学规划（2023JCXK017）；潍坊科技学院A类博士科研基金（KJRC2024006）。

参考文献

- [1] OECD. The future of education and skills education 2030: The future we want [EB/OL]. (2018-04-05) [2022-05-15].
- [2] 张恩铭, 盛群力. 培育学习者的数字素养——联合国教科文组织《全球数字素养框架》及其评估建议报告的解读与启示[J]. 开放教育研究, 2019, 25(6): 58-65.
- [3] 朱静. 元宇宙视域思想政治教育的境遇与趋向研究[D]. 西南大学, 2024.
- [4] 王昭. 元宇宙赋能下α世代沉浸式虚拟课堂设计研究[D]. 北方工业大学, 2024.
- [5] 汪子怡. 增强现实环境中促进协作问题解决能力的元认知支架设计研究[D]. 浙江师范大学, 2024.
- [6] Brown A L. Metacognition, executive control, self-regulation, and other more mysterious mechanisms[J]. Metacognition, motivation, and understanding, 1987: 65-116.
- [7] 徐晓飞, 张策. 生成式人工智能赋能工程教育和学生能力培养、测评与认证体系[J/OL]. 高等工程教育研究, 1-13[2025-06-02].

