

# ACT-R 视域下促进元认知支持的教育智能体设计个案研究

## A Case Study on the Design of a Pedagogical Agents for Promoting Metacognitive Support

### from the Perspective of ACT-R

陈洁<sup>1</sup>, 贾冬雪<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 石河子大学师范学院

[chenjie@shzu.edu.cn](mailto:chenjie@shzu.edu.cn)

**【摘要】** 本研究基于 ACT-R 理论设计了深度嵌入对话流程的元认知支持智能体。采用准实验设计通过滞后序列分析法分析学习者在复杂任务中的提问行为序列，检验智能体对学生元认知行为的干预效果。结果显示，使用智能体的实验组形成了完整的“计划-监控-反思”行为闭环，呈现出动态迭代的元认知调节特征。而对照组行为序列则呈现出“计划内聚”与“监控-反思链断裂”行为模式，其元认知过程缺乏系统迭代。这表明基于 ACT-R 理论的智能体能够有效引导“人-机”协同解决问题的过程，帮助学习者建立更完整深入的元认知行为结构。

**【关键词】** 生成式人工智能；元认知；ACT-R 理论；滞后序列分析

**Abstract:** Based on the ACT-R theory and integrated with eight principles including explicit goal structure, this study designed a metacognitive support Pedagogical Agent deeply embedded in the dialogue process. A quasi-experimental design was adopted, and lag sequential analysis was used to examine the agent's intervention effect on students' metacognitive behaviors by analyzing learners' questioning behavior sequences in complex tasks. Results showed that the experimental group using the agent formed a complete “planning-monitoring-reflecting” behavioral loop with dynamically iterative metacognitive regulation, while the control group presented a “planning-cohesive” and “monitoring-reflecting chain broken” pattern lacking systematic iteration. This demonstrates that ACT-R-based Pedagogical Agents can effectively guide human-computer collaboration in problem-solving and help learners develop more comprehensive metacognitive behavioral structures.

Keywords: GenAI, metacognition, ACT-R theory, lag sequential analysis

## 1. 引言

自 2022 年 11 月 ChatGPT 发布以来，以大型语言模型（LLMs）为核心的生成式人工智能（Generative Artificial Intelligence, GenAI）凭借其强大的自然语言处理与生成能力，正在深刻地重塑着教学范式，可以为学习者提供覆盖教育全过程的个性化与即时性的信息支持。GenAI 还承担虚拟专家与智能学伴的双重角色，通过理解学生的学习情况并生成实时反馈、解释及建议，支持学生进行元认知调节（Ng et al., 2024），逐渐推动认知发展从“工具辅助”迈向“认知重塑”（韩悦，2024）。然而 GenAI 的应用也存在一定的风险，在 GenAI 赋能的学习场景中，学习者面临着信息过载、思维发散等多重挑战，学生极易产生认知惰性和浅层依赖（Rezaeian et al., 2025），从而跳过学习过程中至关重要的规划、监控、评估等元认知环节（Tankelevitch et al., 2024）。由此可见，学生如何在与 GenAI 的交互过程中有效

开展元认知调节活动，已成为影响人机协同知识建构质量的关键问题。基于此，为将元认知支持系统化地嵌入学生与智能体的对话过程，本研究采用模块化架构设计，在复杂问题解决任务中持续培养学习者的计划、监控与反思能力。思维导图模块用于外显学习者的认知结构并推动学习进程，该模块结合目标结构外显化与逐步逼近目标技能原则，在任务初始阶段生成《小船设计与制作》项目的可视化目标层级图，将总体目标分解为若干知识子目标。知识库文件模块提供情境化学习资源与知识抽象化支持，系统根据学习者当前任务节点推送匹配的多模态资源，并通过结构化提示引导学习者从具体案例中提炼一般性原理，促进陈述性知识向程序性规则转化。用户问题建议模块用于提升学习者的提问质量。模块结合产生式规则引导、降低工作记忆负荷与即时反馈等原则，对学习者的提问进行语义识别与纠偏，并提供结构化提问模板与分步提示，以促进有效提问并外显思维过程。对话流程引擎作为系统调控核心，通过分析学习者对话历史构建动态认知状态模型。通过四个模块的协同运作，系统将 ACT-R 理论原则与元认知理论相结合，使智能体能够根据学习者认知状态动态提供策略性元认知支持，从而实现从信息工具向元认知协同引导系统的转变。

2. 一项个案研究

3.1. 研究对象

本研究采用准实验研究设计，选取在西部地区某中学高一年级两个班级的 94 名学生，男生 57 人，女生 37 人。所有学生均参与《小船的设计与制作》STEM 跨学科项目学习。研究将两个班级学生分为实验组（49 人）与对照组（45 人）：实验组使用嵌入元认知支架的智能体开展学习，对照组则使用不加以设计的通用 GenAI 平台（DeepSeek）辅助任务完成。学习者此前都没有在课堂任务中使用过 GenAI 工具。

3.2. 研究过程

本研究设计并实施了为期 2 周、共 4 课时的 STEM 项目式学习课程，每课时 45 分钟，总时长为 180 分钟。课程围绕《小船的设计与制作》项目展开，重点培养学生跨学科知识整合与复杂工程问题解决能力。研究分为三个阶段展开（如图 1）：在学习进行过程中，收集学生与智能体或 GenAI 工具的完整对话日志，确保行为数据的真实性。

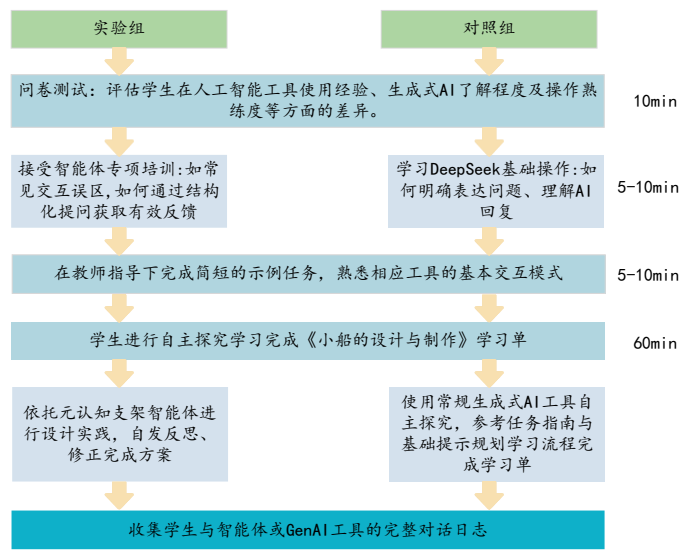


图 1 研究阶段过程

研究将收集到的对话文本数据转录整理，收集 94 名学生的完整对话文本数据，经清洗与筛选后，最终保留 72 组符合分析标准的有效对话数据。依据元认知理论框架，遵循已有

研究的成熟框架并进行改编，将学生在对话中表现出的提问与操作行为编码为计划、监控、反思三大维度，九项具体子行为（见表1），两位助教协同背对背完成数据编码工作。之后进行一致性检验。若 Kappa 系数不达标，则重新协商确定编码标准。使用 GSEQ 5.1 软件对编码后的行为序列进行滞后序列分析，通过计算调整后的残差（Z-score）来识别具有统计显著性的行为（ $Z>1.96$ ）即  $p<0.05$ ，从而揭示学生元认知行为的内在模式与结构。

表 1 行为编码框架

| 维度 | 编码 | 行为        | 行为描述                                |
|----|----|-----------|-------------------------------------|
| 计划 | A1 | 组织信息      | 提取、解释、梳理项目相关信息 我要制作一个具有特定功能小船的设计方案； |
|    | A2 | 分解任务      | 添加或更新子任务的信息、结构关系等如何保证小船的稳定性和操控性？    |
|    | A3 | 规划日程      | 添加问题解决日程，规划问题解决相关的任务进程              |
| 监控 | B1 | 自我监测      | 了解学习进度、问题分解、知识可视化等情况                |
|    | B2 | 子问题的知识选择  | 明确子问题解决所需的知识内容                      |
|    | B3 | 问题解决思路可视化 | 可视化表征问题的解决思路能否再详细一些                 |
| 反思 | C1 | 浏览课程资源学习  | 查看教学视频、课件等课程资源                      |
|    | C2 | 问题的解决方案生成 | “根据这个文件评价小船的设计方案”                   |
|    | C3 | 自我总结与反思   | 总结、反思修改的内容与问题解决思路                   |

### 3.3. 研究结果

#### 3.3.1. 实验组元认知行为模式特征

实验组学生的行为模式展现较为完整且活跃的计划-监控-反思自我调节循环过程（见表2）。学生能够有效从计划阶段过渡到监控与反思阶段。学生在“分解任务”或“规划日程”后，会显著地转向监控行为，“自我监测”（ $A2 \rightarrow B1$ ,  $z=2.40$ ； $A3 \rightarrow B1$ ,  $z=2.49$ ）和“子问题的知识选择”（ $A2 \rightarrow B2$ ,  $z=2.43$ ）。监控行为能够有效地触发深度的反思与生成性活动。最显著的序列体现在从“问题解决思路可视化”到“编写修改解决方案”的行为转换（ $B3 \rightarrow C2$ ,  $z=3.80$ ）。表明监控到进度或知识缺口后，学生会主动进行方案建构或回溯学习。实验组出现了从反思阶段回至计划或更高级反思阶段的序列，形成了迭代回路。“问题解决方案生成”后引发新一轮的“组织信息”和“分解任务”（ $C2 \rightarrow A1$ ,  $z=2.26$ ； $C2 \rightarrow A2$ ,  $z=3.90$ ），体现了基于方案生成的重新规划。

表 2 实验组调整后的残差值

| Given | A1    | A2    | A3    | B1     | B2     | B3     | C1    | C2     | C3    |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|
| A1    | -0.75 | -0.31 | 0.64  | 1.66   | 0.74   | 2.64** | -1.27 | -2.25  | -1.29 |
| A2    | 0.47  | -1.47 | 0.17  | 2.4**  | 2.43** | -0.64  | 1.01  | -2.68  | -0.55 |
| A3    | -0.62 | -0.6  | -1.05 | 2.49** | 1.56   | 0.68   | -1.05 | -1.12  | -0.82 |
| B1    | -0.66 | -0.76 | -0.07 | -1.38  | -0.24  | -0.31  | 0.98  | 1.43   | 0.5   |
| B2    | -0.75 | -1.04 | -0.32 | -1.56  | -0.62  | 1.31   | 1.59  | -0.39  | 1.41  |
| B3    | -0.84 | -1.29 | -0.53 | -1.74  | -2.19  | -1.62  | 1.24  | 3.8**  | 2.2** |
| C1    | -0.46 | -1.08 | 0.68  | -0.95  | -1.2   | -0.21  | -0.77 | 3.33** | -0.17 |

|    |        |        |        |       |       |       |       |      |       |
|----|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| C2 | 2.26** | 3.9**  | -1.31  | -0.82 | -0.04 | -0.12 | -1.31 | -1.1 | -0.7  |
| C3 | 1.12   | 2.64** | 2.17** | -0.42 | -0.91 | -1.72 | -1.09 | 0.19 | -0.91 |

注:\*\* $Z > 1.96$ , 下同。

3.3.2. 对照组元认知行为模式特征

对照组的行为模式呈现出显著的“计划内聚”和“监控-反思链断裂”特征，元认知调节的完整回路不完整（见表 3）。最突出的行为序列高度集中在“计划”阶段内部，形成了一个高强度的内循环。“组织信息”到“分解任务”的转换极为突出（ $A1 \rightarrow A2$ ,  $z = 4.54$ ）。“规划日程”也强烈地指向“分解任务”（ $A3 \rightarrow A2$ ,  $z = 3.17$ ），这表明行为呈现出一定的“执行导向”且认知闭环困难。“自我监测”自身有显著反复性（ $B1 \rightarrow B1$ ,  $z = 3.04$ ），“子问题的知识选择”之后引发了“问题解决思路可视化”（ $B2 \rightarrow B3$ ,  $z = 3.33$ ），这表明对照组学生也能进行一定程度的思维外显化监控。但是，关键的断裂点在于“监控”到“反思”，以及“反思”到“新计划”的链接薄弱。从监控行为到核心的反思行为均未达到显著水平。对照组完全缺乏从“反思”阶段显著地回指“计划”或“监控”的序列，未能形成驱动迭代的闭环。

表 3 对照组调整后的残差值

| Given | A1     | A2     | A3    | B1     | B2    | B3     | C1    | C2     | C3     |
|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|
| A1    | -0.71  | 4.54** | -0.63 | -0.06  | -1.41 | -1.46  | -0.87 | -1.14  | -0.5   |
| A2    | -0.03  | -0.51  | 1.13  | -0.49  | 1.37  | -0.78  | 0.44  | -1.17  | -0.84  |
| A3    | 2.01** | 3.17** | -1    | -1.92  | -0.77 | -1.37  | -1.04 | 1.4    | -0.59  |
| B1    | -0.6   | -1.64  | -0.3  | 3.04** | 1.04  | -0.33  | -0.74 | -0.97  | -0.42  |
| B2    | -1.04  | -3.47  | 0.44  | 1.23   | -0.73 | 3.33** | 0.77  | -0.06  | 1.02   |
| B3    | 0.76   | -0.8   | 0.78  | -0.28  | 0.23  | 0.14   | 0.31  | -0.25  | -0.54  |
| C1    | -0.34  | -1.28  | -0.7  | -0.77  | 0.58  | 1.45   | -0.42 | 1.45   | -0.24  |
| C2    | -0.4   | -0.62  | -0.84 | -0.92  | 0.01  | -1.19  | 1.67  | 2.74** | 3.42** |
| C3    | -0.15  | 1.78   | -0.31 | -0.34  | -0.63 | -0.44  | -0.18 | -0.24  | -0.11  |

3. 结论与展望

本研究通过准实验设计与滞后序列分析，揭示了实验组（智能体支持）与对照组在元认知行为模式上的差异，主要体现在行为链路的完整性与迭代性方面。实验组形成了多个完整的“计划—监控—反思—新计划”的跨阶段转换链路，构成了动态迭代的元认知调节回路。对照组的行为链路则多中断于阶段内部或阶段之间，强序列集中在计划和监控，缺乏监控到反思和反思优化这类推动进程迭代的关键链接。研究结果从行为序列的层面证实，基于 ACT-R 理论的元认知支架智能体，能够有效促进学生在与 GenAI 协同解决复杂任务过程中，形成更完整、深入且能自我迭代的元认知行为模式。

基金项目

本文为 2025 年新疆生产建设兵团研究生教育创新项目“AI 智能体赋能算法教学：自我调节学习能力培养的模式创新与效果验证”（项目编号：BTYJSXM-2025-SC01）的阶段性研究成果。

参考文献

杨宁,李晓璠,马子璘 & 林岚.(2025).GenAI 介入的同伴对话反馈对小学生批判性思维的影响.  
现代教育技术,35(08),46-56.

Flavell J H. Metacognition and cognitive monitoring: A new area of cognitive-developmental  
inquiry[J]. American Psychologist,1979, (10):906.