

基于 GenAI 辅助的 STEM 设计式学习对学生学习成绩和元认知的影响研究

Effects of GenAI-Assisted STEM Design-Based Learning on Students' Academic Performance and Metacognition

张翼菲^{1*}, 杨轶杰¹, 热依汉古丽·买买提艾则孜¹, 赵嘉华¹

¹福建师范大学 教育学院, 福建福州 350000

*yifeizhang25@163.com

【摘要】 STEM 教育是培养创新人才的重要路径, 设计式学习 (DBL) 为工程导向的 STEM 教学提供了实践方式。然而, DBL 学习过程中对“反思”等关键认知机制的支持仍显不足。为此, 研究构建 GenAI 辅助的 STEM 设计式学习模式, 以 40 名高一学生为对象开展单组准实验研究。结果显示, 学生后测成绩与元认知分数均显著高于前测 ($p < 0.01$); 访谈发现学生在人机协同中保持理性判断, 小组合作强化了表达意愿与学习自信。研究表明, GenAI 辅助的 DBL 模式有效弥补了传统教学中反思指导不足的问题, 实现了学习成绩与元认知的双重提升。未来可增设对照组、拓展任务类型以深化验证。

【关键词】 STEM; 生成式人工智能; 设计式学习

Abstract: STEM education serves as a critical pathway for cultivating innovative talents, with Design-Based Learning (DBL) offering a practical approach to engineering-oriented STEM instruction. However, the support for key cognitive mechanisms such as "reflection" within the DBL process remains insufficient. To address this gap, this study developed a GenAI-assisted STEM design-based learning model and conducted a one-group quasi-experiment involving 40 tenth-grade students. The results showed that students' post-test scores and metacognitive levels were significantly higher than their pre-test scores ($p < 0.01$). Interview data revealed that students maintained rational judgment during human-AI collaboration, while group work enhanced their willingness to express ideas and boosted learning confidence. These findings indicate that the GenAI-assisted DBL model effectively compensates for the lack of reflective guidance in traditional instruction, achieving simultaneous improvements in both academic performance and metacognition. Future research should include control groups and diversify task types to further validate the model.

Keywords: STEM, Generative Artificial Intelligence, Design-Based Learning

1. 前言

在科技快速发展与全球性挑战日益复杂的背景下, 培养学生的 STEM 素养已成为国际教育改革的重要议题 (Bybee, 2010)。STEM 教育强调在真实情境中整合科学、技术、工程与数学知识, 以提升学生解决复杂问题的能力 (Fang et al., 2025)。在此背景下, K-12 阶段推进 STEM 教育被认为是培养未来创新型人才与提升社会应对能力的重要路径 (Falloon et al., 2020; Jackson et al., 2021)。在 STEM 跨学科整合过程中, 工程被视为关键枢纽, 其不仅能够真实问题情境中整合科学与数学知识 (Hanson et al., 2022), 还通过实践活动将抽象知识转化为具体应用, 从而显著提升学生的学习参与度与情境理解 (Kelley & Knowles, 2016)。基于此, K-12 STEM 教育普遍以工程设计作为实现学科整合的重要载体 (English, 2020)。

设计式学习 (Design-Based Learning, DBL) 为工程导向的 STEM 教学提供了重要实现路径。DBL 通过开放性设计任务, 引导学生在设计、建构与测试的迭代过程中理解学科核心概念并发展工程实践能力 (Guzey et al., 2016)。研究表明, DBL 能够促进问题解决与设计能力, 还能增强学生对 STEM 学习的兴趣及工程素养 (Vongkulluksn et al., 2018)。然而, 在真实课堂情境中, DBL 的实施效果仍受到限制。工程设计任务的复杂性与跨学科特征使学生易产生认知负荷与理解困难, 因而需要持续的过程性支持, 尤其是在元认知调控与决策反思方面 (刘增泽, 2025)。但受课堂时间与情境限制, 教师难以提供全过程、个性化的指导, 从而制约学生的深度参与与高阶思维发展 (杜文彬, 2025)。同时, 部分教师在工程整合教学中的专业支持能力有限, 在引导学生进行设计决策与反思迭代方面存在困难 (Guzey et al., 2014)。

需要注意的是, 大量研究关注工程设计流程与技能训练, 但对“感知学习”“反思”及“反思性决策”等关键认知机制的探讨明显不足 (Paredes-Aguirre et al., 2026; Kidd et al., 2025)。感知学习是指学生结合自身经历与认知, 对自身的发展和理解程度进行评估的过程 (Paredes-Aguirre et al., 2026)。在工程设计情境中, 反思不仅是优化设计方案的必要环节, 更是促进知识整合与学习深化的核心路径。缺乏有效反思支持, 将直接影响学生对设计过程的理解与调控能力 (Wendell et al., 2017)。因此, 开发支持反思与反思性决策的工具与策略, 已成为提升工程设计学习质量的重要方向 (Kidd et al., 2025)。

在此背景下, 生成式人工智能 (Generative Artificial Intelligence, GenAI) 为弥补上述不足提供了新的可能。GenAI 具备内容生成、语义理解与实时交互反馈等能力, 能够在学习过程中提供持续性与个性化支持 (Vasconcelos et al., 2023)。研究表明, GenAI 在帮助学生理解复杂问题、拓展设计思路以及支持方案论证方面具有显著潜力, 尤其适用于跨学科与开放性任务情境 (Rana et al., 2025)。因此, 将 GenAI 引入 DBL, 从而在学习过程中提供认知与元认知支架, 促进学生在设计中的反思与决策优化。

在工程导向的 STEM 教育中, 现有研究多聚焦于设计流程与任务实施, 以 DBL 作为教学方法的实践相对较少。此外, 在工程设计学习过程中, 对感知学习、反思与反思性决策等关键认知过程的支持仍显不足 (Paredes-Aguirre et al., 2026; Kidd et al., 2025)。基于此, 本研究在工程导向的 STEM 情境中引入 DBL, 并借助 GenAI 提供认知与元认知层面的过程性支持, 旨在促进学生的反思与元认知发展, 进而提升其学习成效。为验证该方法的有效性, 本研究以高中生为对象开展准实验研究, 拟回答以下问题:

- (1) 基于 GenAI 辅助的 STEM 设计式学习对学生学习成绩有何影响?
- (2) 基于 GenAI 辅助的 STEM 设计式学习对学生元认知水平有何影响?
- (3) 基于 GenAI 辅助的 STEM 设计式学习对学生的感知有何影响?

2. 文献综述

2.1. STEM 教育

STEM 教育以真实复杂问题为导向, 整合科学、技术、工程与数学的知识技能开展跨学科教学, 是培养学生问题解决、创新思维等核心素养的关键路径 (Halawa, 2024; Hacıoğlu et al., 2021)。正因如此, K-12 阶段的 STEM 素养培育已成为国际教育改革共识, 多国均将其作为培养 21 世纪创新型人才的重要举措 (Bybee, 2010; Falloon et al., 2020), 在我国也被纳入提升科技竞争力的人才培养战略 (赵章靖, 2025)。STEM 教育通过创设真实问题情境, 不仅能推动学生多学科知识的综合应用、提升实践与创新能力, 还能激发学习主动性, 同时培养团队协作等未来发展所需的关键能力 (易志刚, 2020)。

在 STEM 跨学科整合体系中，工程是连接各学科的核心纽带，其能在真实问题解决中融合科学与数学知识，将抽象理论转化为实践应用，有效提升学生的学习参与度与知识理解度（Kelley & Knowles, 2016; Hanson et al., 2022），因此工程设计也成为 K-12 STEM 教育实现学科深度整合的重要载体（English, 2020）。

尽管 STEM 教育的重要性已获广泛认可，其实施仍面临诸多挑战。国际研究表明，课堂实践中存在学生学习动力不足、教学内容缺乏整合、评估机制缺失、教师专业支持能力有限等问题（Hsu & Fang, 2019; Margot & Kettler, 2019）。就我国而言，STEM 教育尚处起步阶段，相关研究多聚焦于案例分析与教学模式设计（李小红 & 李玉娇, 2019; 易志刚, 2020），课程开发虽呈现多元化趋势，但仍以科技创新类为主，较为单一（方浩颖等, 2019）。因此，如何通过适切的教学模式将工程导向的 STEM 教育有效落地，成为当前研究亟需关注的问题。

2.2. 设计式学习

设计式学习（Design-Based Learning, DBL）是一种以开放性设计任务为核心的教学方法，引导学习者在问题分析、方案构思、原型制作与反思改进的迭代过程中，综合运用多学科知识并发展问题解决能力（Guzey et al., 2016）。其核心特征在于“做中学”与“迭代反思”，强调学生在真实设计情境中通过持续试错与调整，深化对学科概念的理解（Thibaut et al., 2018）。DBL 与工程导向的 STEM 教育具有高度契合性，为工程实践在课堂中的落地提供了重要教学路径（English, 2020）。研究表明，DBL 能够有效促进学生工程设计实践能力的发展（Fan et al., 2021），提升其问题解决、沟通协作与创新思维等 21 世纪技能（Johnson et al., 2015），同时增强学生对 STEM 学习的兴趣与态度（Vongkulluksn et al., 2018）。

然而，在聚焦工程的 STEM 教育研究中，工程设计流程（Engineering Design Process, EDP）仍是最常被采用的教学范式，而专门以 DBL 作为教学方法开展的实证研究相对较少（Kidd et al., 2025）。多数研究关注设计流程与任务实施本身，对 DBL 教学模式系统化应用的探索仍显不足。

更值得关注的是，即使是在采用 DBL 的研究中，对学习过程中“反思”及“反思性决策”等关键认知机制的支持也明显不足（Kidd et al., 2025）。反思不仅是设计迭代的核心环节，更是促进知识整合与学习深化的重要路径，缺乏有效反思支持将直接影响学生对设计过程的理解与调控能力（Wendell et al., 2017）。然而，当前 DBL 实践多聚焦于设计任务的完成度，对学生如何在设计过程中进行元认知调控、如何优化决策过程缺乏深入探讨与有效支持。

综上所述，DBL 作为工程导向 STEM 教育的重要教学路径，其教育价值已获广泛认可，但在实际应用中仍面临被 EDP 主导、系统化研究不足的困境，尤其是对反思与元认知等关键认知机制的支持缺失，成为制约 DBL 教学效果的核心问题。这也为本研究借助 GenAI 构建反思支持体系提供了切入点。

3. 基于 GenAI 的 DBL 学习模式构建

3.1. 教学设计

本研究以 DBL 作为教学实施的基本框架。DBL 强调以真实问题为驱动，引导学习者在问题分析、方案构思、原型制作与反思改进的迭代过程中综合运用多学科知识并发展问题解决能力，通常包括“确定问题”、“方案构思”、“方案确定”、“制作测试”及“交流反思”五个基本步骤。在此基础上，结合 STEM 教育目标与本研究情境，将 DBL 五步骤转化为围绕“自动浇花装置”设计任务的可操作教学流程，明确各阶段学生活动与学习资源，并在全过程中引入 GenAI 作为学习支架，为学生提供过程性支持（见图 1）。



图 1 教学流程

3.2. 学习设计

本研究采用 HTML5 开发基于网页的 GenAI 辅助学习系统, 为学生提供与 GenAI 交互的学习支持环境。系统选用字节跳动推出的生成式人工智能模型豆包作为对话引擎, 在连续交互过程中围绕学习任务持续提供反馈, 支持学生逐步完成问题分析、方案论证与反思改进等活动。图 2 展示了系统架构, 包括三个数据库模块: 学习材料数据库 (用于存储与“自动浇花装置”设计任务相关的情境故事、学习资源、任务要求与评价标准等教学内容)、GenAI 交互数据库 (学生与 GenAI 互动的主要载体, 用于记录对话内容)、学习行为数据库 (记录学生在系统中的学习行为数据, 包括对话记录、关键操作、方案提交与修改过程等, 为后续学习过程分析与教学效果评估提供数据支持)。

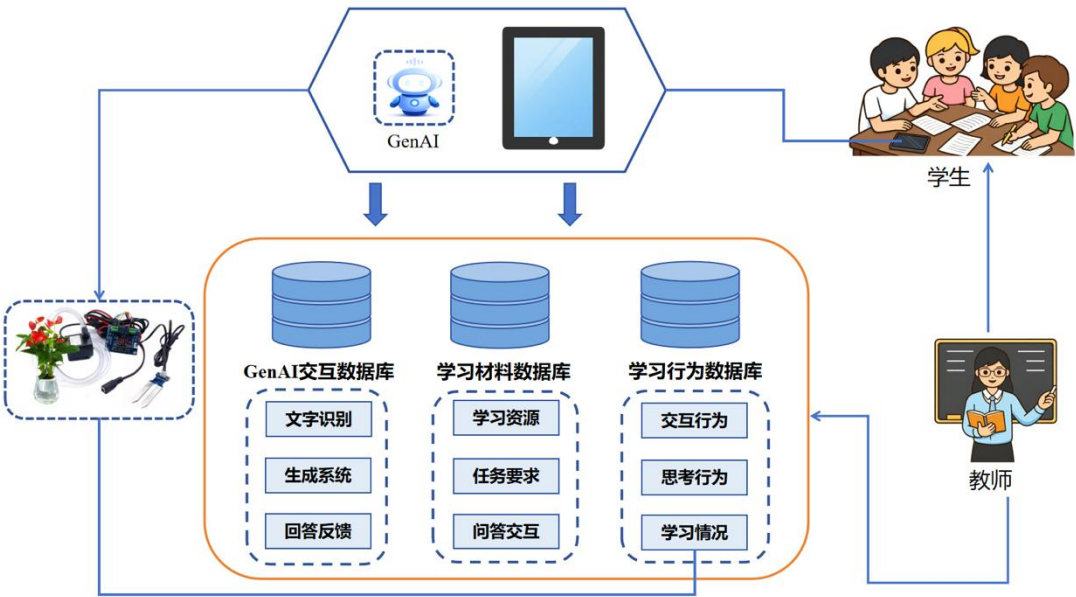


图 2 系统架构

4.实验设计

4.1. 实验对象

本研究选取福州市某高中高一年级的一个班级作为实验对象, 开展一项单组准实验研究, 以检验基于 GenAI 辅助的 STEM 设计式学习的教学效果。该班学生共 40 人, 均参与本次教学实验。本研究主要从学生的学习成绩、元认知能力以及学习感知等方面对教学效果进

行评估，通过前后测对比分析教学干预的效果。此外，在实验结束后，选取部分学生开展半结构化访谈，作为定量研究结果的补充。

4.2. 测量工具

学习成绩前测与后测：由两名具有 10 年以上教学经验的高中教师依据《普通高中通用技术课程标准（2017 年版 2020 年修订）》，并参考普通高中相关课程标准中与工程设计相关的内容，结合 STEM 教育设计式学习目标共同编制，以确保测试内容的科学性与评价结果的可靠性。

元认知问卷：采用 Lai 与 Hwang（2014）的“后设认知察觉倾向”量表，共 5 个题项，问卷均采用李克特五点量表形式，所有题项均为正向计分，用于测量学生在学习过程中的元认知水平变化。

访谈提纲：根据 Hwang、Yang、Tsai 与 Yang（2009）的相关研究进行改编，结合本研究的教学情境形成半结构化访谈问题，共有 6 个开放性访谈问题。访谈主要围绕学生在学习中的学习体验、思考过程与使用感受展开。在面对面访谈中，研究人员向学生告知了具体的指导方针，包括整个访谈将被记录下来，但他们的陈述内容将对父母和老师保密；访谈内容将仅用于数据收集目的。

5.实验结果

5.1. 学习成绩

配对样本 t 检验是对同一组受试者实验前和实验后的结果比较。为考察教学干预对学生学业成绩的影响，对 40 名学生在实验前后进行测试，获得有效配对数据 36 份。配对样本 t 检验结果（见表 1）显示，学生后测成绩（ $M=57.58$, $SD=11.390$ ）显著高于前测（ $M=50.08$, $SD=17.716$ ）， $t(35)=-2.861$, $p<0.01$ 。结果表明，经过教学干预后，学生的学业成绩较干预前有显著提升，说明该教学方法对提高学生成绩具有积极作用。

表 1 前测与后测配对样本 t 检验

配对样本检验									
		配对差值					显著性		
		标准误差	差值95%置信区间			（双			
		平均值	标准差	平均值	下限	上限	t	自由度	尾）
配对1									
前测-后测		-7.500	15.727	2.621	-12.821	-2.179	-2.861	35	.007

5.2. 元认知水平

在元认知水平方面，配对样本 t 检验结果（见表 2）显示，学生后测分数（ $M=3.793$, $SD=.4531$ ）显著高于前测（ $M=3.989$, $SD=.4194$ ）， $t(35)=-3.663$, $p<0.01$ 。结果表明，经过教学干预后，学生的元认知水平较干预前有显著提升，说明该教学方法对提高学生元认知水平具有积极作用。

表 2 前测与后测配对样本 t 检验

配对样本检验									
		配对差值					显著性		
		标准误差	差值95%置信区间			（双			
		平均值	标准差	平均值	下限	上限	t	自由度	尾）
配对1									
前测-后测		-.2500	.4095	.0683	-3.886	-.1114	-3.663	35	.001

5.3. 访谈分析

教学实验结束后,本研究共选取5名学生开展半结构化访谈,进一步挖掘学生对GenAI辅助STEM设计式学习活动的真实感知与体验,所得定性结果作为定量实验数据的补充支撑。通过对访谈文本的反复梳理、编码与归纳,核心发现如下:其一,多数学生认可GenAI对问题解决与思维发展的推动作用,有学生明确提到“当小组讨论思路集中在同一个点子上,没有更多新点子时,小智能提供其他创意,开拓我们的思维”(S01),且学生并非盲目采纳GenAI建议,而是会对GenAI给出的方案进行批判性评估,再与人机协同思路整合优化自身设计;其二,小组合作作为核心实施形式,显著提升了学生的表达意愿与学习自信,同伴的鼓励与榜样作用被认为是信心提升的重要因素(S03),合理的小组分工也助力了设计任务的高效推进;其三,本次学习活动带来的积极体验,显著强化了学生的STEM教育学习动机,不少学生表示“愿意继续参与STEM学习,对该领域充满兴趣”(S01),更有学生坦言“未来会对工科专业有一定的选择意愿”(S05),整体呈现出正向的学习感知与发展倾向。

6. 研究结论

本研究构建了GenAI辅助的STEM设计式学习模式,通过单组准实验研究验证了其在高中生STEM教育中的应用效果。研究发现,该模式显著提升了学生的学习成绩与元认知水平。实验数据显示,学生后测成绩与元认知分数均显著高于前测($p<0.01$),表明GenAI作为认知支架嵌入DBL全流程,能够有效降低跨学科工程设计任务的认知难度,同时通过实时交互反馈弥补传统教学中反思指导不足的问题,帮助学生在设计迭代中逐步发展反思意识与自我调控能力。

值得关注的是,学生对学习活动的积极感知揭示了该模式更深层的教育价值。访谈发现,学生并非被动接受GenAI的建议,而是在人机协同中保持理性判断,对AI生成内容进行筛选、评估与整合,这一过程本身就是元认知能力的实践演练。同时,小组合作并未因技术介入而被削弱,反而在同伴互动中强化了表达意愿与学习自信。这暗示着技术支架与人文协作并非此消彼长,而是可以形成良性互补——GenAI承担了部分认知支持功能,反而释放了教师与同伴更多精力投入深度的情感互动与价值引领。由此催生的积极学习体验,不仅增强了学生对STEM领域的即时兴趣,更引发了部分学生对未来专业选择的深层思考,体现出该模式在知识传授之外的情感与价值层面的育人潜力。

整体而言,本研究将GenAI的技术优势与DBL的教学特征相结合,有效弥补了工程导向STEM教育中反思支持不足、个性化指导有限等实践困境,实现了学生成绩与元认知的双重提升,并在认知、社会与情感层面产生了积极的协同效应。本研究仍存在样本规模较小、缺乏对照组、教学任务单一等局限,未来可扩大样本规模、设置对照组并设计多样化任务,进一步检验该模式的适用性。

参考文献:

- 方浩颖,梁海坤,谢永燊,周少娜 & 周新兰.(2019).基于“中国STEM教育2029行动计划”首批领航学校实施案例的研究.基础教育参考,(13),31-34.
- 刘增泽.(2025).指向复杂问题解决能力培养的跨学科实践设计.中小学教材教学,(02),8-13.<https://doi.org/10.19878/j.cnki.zxxjcjx.2025.02.001>.

- 杜文彬.(2025).STEM教育的发展路径、本质内涵与价值追求.全球教育展望,54(11),12-24.
- 李小红 & 李玉娇.(2019).美国推进 STEM 教育的策略.比较教育研究,41(12),87-93.<https://doi.org/10.20013/j.cnki.ice.2019.12.012>.
- 易志刚.(2020).我国 STEM 教育现状及本土化发展对策.科教文汇(中旬刊),(23),5-6.<https://doi.org/10.16871/j.cnki.kjwhb.2020.08.003>.
- 赵章靖.(2025).为未来而探索: STEM 教育的发展现状与策略建议.中国基础教育,(12),10-13.
- Bybee, R. W. (2010). Advancing STEM education: A 2020 vision. *Technology and engineering teacher*, 70(1), 30.
- English, L. D. (2020). Facilitating STEM integration through design. In *Integrated approaches to STEM education: An international perspective* (pp. 45-66). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52229-2_4
- Falloon, G., Hatzigianni, M., Bower, M., Forbes, A., & Stevenson, M. (2020). Understanding K-12 STEM education: A framework for developing STEM literacy. *Journal of Science Education and Technology*, 29(3), 369-385. <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09823-x>
- Fan, S. C., Yu, K. C., & Lin, K. Y. (2021). A framework for implementing an engineering-focused STEM curriculum. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 19(8), 1523-1541. <https://doi.org/10.1007/s10763-020-10129-y>
- Fang, S. C., Yang, K. L., & Fan, S. C. (2025). A conceptual framework for assessing transdisciplinary STEM practices. *Research in Science & Technological Education*, 43(1), 272-293. <https://doi.org/10.1080/02635143.2023.2264781>
- Guzey, S. S., Moore, T. J., Harwell, M., & Moreno, M. (2016). STEM integration in middle school life science: Student learning and attitudes. *Journal of Science Education and Technology*, 25(4), 550-560. <https://doi.org/10.1007/s10956-016-9612-x>
- Guzey, S. S., Tank, K., Wang, H. H., Roehrig, G., & Moore, T. (2014). A high-quality professional development for teachers of grades 3–6 for implementing engineering into classrooms. *School science and mathematics*, 114(3), 139-149. <https://doi.org/10.1111/ssm.12061>
- Hacıoğlu, Y., & Gülhan, F. (2021). The effects of STEM education on the students' critical thinking skills and STEM perceptions. *Journal of Education in Science Environment and health*, 7(2), 139-155. <https://doi.org/10.21891/jeseh.771331>
- Halawa, S., Lin, T. C., & Hsu, Y. S. (2024). Exploring instructional design in K-12 STEM education: a systematic literature review. *International Journal of STEM Education*, 11(1), 43. <https://doi.org/10.1186/s40594-024-00503-5>
- Hanson, J. R., Hardman, S., Luke, S., & Lucas, B. (2022). Developing pre-service primary teachers' understanding of engineering through engineering habits of mind and engagement with engineers. *International Journal of Technology and Design Education*, 32(3), 1469-1494. <https://doi.org/10.1007/s10798-021-09662-w>
- Hsu, Y. S., & Fang, S. C. (2019). Opportunities and challenges of STEM education. *Asia-Pacific STEM teaching practices: From theoretical frameworks to practices*, 1-16. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0768-7_1
- Hwang, G. J., Yang, T. C., Tsai, C. C., & Yang, S. J. (2009). A context-aware ubiquitous learning environment for conducting complex science experiments. *Computers & Education*

- on, 53(2), 402-413. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2009.02.016>
- Jackson, C., Mohr-Schroeder, M. J., Bush, S. B., Maiorca, C., Roberts, T., Yost, C., & Fowler, A. (2021). Equity-oriented conceptual framework for K-12 STEM literacy. *International Journal of STEM Education*, 8(1), 38. <https://doi.org/10.1186/s40594-021-00294-z>
- Johnson, C. C., Peters-Burton, E. E., & Moore, T. J. (Eds.). (2015). *STEM road map: A framework for integrated STEM education*. Routledge.
- Kelley, T. R., & Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM education*, 3(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z>
- Kidd, N., Tang, K. S., & Lin, K. Y. (2025). A systematic review of engineering practice in K-12 STEM studies. *Research in Science & Technological Education*, 1-25. <https://doi.org/10.1080/02635143.2025.2561994>
- Lai, C. L., & Hwang, G. J. (2014). Effects of mobile learning time on students' conception of collaboration, communication, complex problem-solving, meta-cognitive awareness and creativity. *International Journal of Mobile Learning and Organisation*, 8(3-4), 276-291. <https://doi.org/10.1504/ijmlo.2014.067029>
- Margot, K. C., & Kettler, T. (2019). Teachers' perception of STEM integration and education: A systematic literature review. *International Journal of STEM education*, 6(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s40594-018-0151-2>
- Paredes-Aguirre, M., Bolanos-Mendoza, C., Ortiz-Rojas, M., Martinez-Tovar, J., Sanchez-Mendoza, M., & Moreno-Abramowicz, M. (2026). Understanding perceived learning and the role of digital self-efficacy in generative AI adoption among STEM and non-STEM students. *Cogent Education*, 13(1), 2614093.
- Rana, V., Verhoeven, B., & Sharma, M. (2025). Generative AI in design thinking pedagogy : Enhancing creativity, critical thinking, and ethical reasoning in higher education. *Journal of University Teaching and Learning Practice*, 22(4), 1-22. <https://doi.org/10.53761/tjs.e2f36>
- Thibaut, L., Ceuppens, S., De Loof, H., De Meester, J., Goovaerts, L., Struyf, A., ... & Depaepe, F. (2018). Integrated STEM education: A systematic review of instructional practices in secondary education. *European Journal of STEM Education*, 3(1), 2. <https://doi.org/10.20897/ejsteme/85525>
- Vasconcelos, M. A. R., & Santos, R. P. D. (2023). Enhancing STEM learning with ChatGPT and Bing Chat as objects to think with: A case study. *arXiv preprint arXiv:2305.02202*. <https://doi.org/10.29333/ejmste/13313>
- Vongkulluksn, V. W., Matewos, A. M., Sinatra, G. M., & Marsh, J. A. (2018). Motivational factors in makerspaces: a mixed methods study of elementary school students' situational interest, self-efficacy, and achievement emotions. *International journal of STEM education*, 5(1), 43. <https://doi.org/10.1186/s40594-018-0129-0>
- Wendell, K. B., Wright, C. G., & Paugh, P. (2017). Reflective decision-making in elementary students' engineering design. *Journal of Engineering Education*, 106(3), 356-397. <https://doi.org/10.1002/jee.20173>