项目式学习（PBL）提高工科大学生复杂工程问题解决能力的行动研究

周洁茹 [1]*

（1. 琼台师范学院，海口 中国）

摘要：本研究聚焦于项目式学习对工科大学生复杂工程问题解决能力的提升效果，采用行动研究范式，在真实工程教学场景中开展两轮迭代干预。研究以机械与自动化专业本科生为对象，围绕典型跨学科工程任务设计结构化 PBL 教学流程，涵盖问题定义、方案设计、原型实现与系统评估四个核心阶段。通过多维能力测评工具、过程性学习档案及结构化访谈收集数据，从认知策略运用、系统思维表现、协作决策质量及技术整合深度四个维度进行能力变化分析。结果显示，学生在识别多约束条件、协调技术与非技术因素、动态调整解决方案路径等方面呈现显著进步；其工程判断的合理性、迭代优化的主动性以及跨模块协同意识均明显增强。研究证实，结构化 PBL 能有效激活学生面对模糊性与不确定性的应对机制，推动其从知识应用者向问题重构者转变。

关键词：项目式学习；复杂工程问题；行动研究；工科教育；能力发展

1. 引言

1.1 现实困境与教学诉求

当前工科教育中，学生在面对真实工程场景时普遍呈现系统性能力缺位：问题拆解趋于碎片化，难以识别多维耦合约束；技术路径选择常脱离成本、安全与可持续性等边界条件；方案迭代过程缺乏基于证据的反思机制。此类现象暴露出传统讲授式教学与工程实践之间存在显著的能力转化断层------知识传递未有效锚定于复杂问题的认知建模、权衡决策与闭环验证等核心环节，导致学习成果难以迁移至非结构化工程场域 [1]。

1.2 PBL 作为能力生成路径的适切性

项目式学习在目标设定层面锚定真实工程情境，使学生直面技术约束、社会需求与伦理边界的多维张力；过程组织层面通过多变量耦合任务驱动，强制整合数学建模、系统仿真、跨学科协作与迭代优化等能力要素；成果评价层面依托持续反馈机制，将形成性评估嵌入设计---测试---修正闭环，动态校准认知结构与实践策略。三者协同构建出一种具有必要张力的能力生长场域，其内在逻辑与复杂工程问题解决能力的生成路径高度同构 [2, 3]。

1.3 本研究定位与实践价值

本研究定位为扎根教学现场的行动取向实证研究，强调干预设计的可操作性与能力变化的可验证性。区别于理论推演或大规模问卷调查，本研究聚焦真实工科课堂中复杂工程问题解决能力的生成机制，通过迭代式教学干预、过程性能力证据采集与多源数据三角验证，构建具有过程透明性与实践可迁移性的教学改进框架。其核心价值在于为新工科课程改革提供基于教学现场证据的实践参照系，推动能力培养从目标宣示走向过程可控、结果可测、改进可溯的闭环实践路径 [4, 5]。

2. 文献综述

2.1 复杂工程问题的核心特征界定

复杂工程问题本质区别于结构化习题，其核心特征体现为多重目标间的动态张力、系统边界的非封闭性、多维变量间的强耦合反馈、可行解空间的非唯一性以及实施路径的不可预设性。此类问题不提供标准解法模板，要求学习者持续开展目标重构、约束识别与策略迭代，对元认知监控能力、跨学科知识整合能力及不确定性情境下的决策韧性构成综合挑战。现有研究普遍认为，传统讲授式教学难以支撑此类高阶能力发展，亟需嵌入真实工程语境的学习机制予以响应 [2, 6]。

2.2 PBL 能力培养机制的研究共识

现有研究普遍认为，项目式学习通过三重内在机制协同促进复杂工程问题解决能力的发展：其一，真实工程情境的深度沉浸触发认知重构，促使学生将抽象原理锚定于具体约束条件之中；其二，跨角色团队协作持续拓展个体思维边界，在观点碰撞与责任共担中发展系统性视角；其三，设计---测试---修正的反复迭代过程内化反思习惯，使元认知监控成为自动化行为模式。这三类机制并非线性叠加，而是在任务推进中动态耦合，共同支撑从知识应用向能力迁移的质变跃迁 [4]。

2.3 工科 PBL 实施中的现实瓶颈

当前工科 PBL 实践普遍面临结构性张力：项目设计多停留于仿真或简化情境，真实工程约束与跨学科耦合性严重不足；教师角色常陷于知识讲授惯性，缺乏系统化引导脚手架与认知冲突干预策略；能力评价仍依赖传统纸笔测验，难以捕捉系统建模、权衡决策与迭代优化等高阶过程性表现；学生前置课程知识整合度低，工程图谱意识薄弱，导致项目参与流于任务执行而非意义建构。上述瓶颈共同构成理论构想与教学实作之间的显著鸿沟 [7]。

3. 材料与方法

3.1 研究对象与教学环境

本研究选取某"双一流"高校机械工程专业二年级本科生为行动研究对象，共 62 人，涵盖机械设计制造及其自动化、车辆工程两个方向，均已完成《工程力学》《机械原理》《电工电子技术》等先修课程。教学嵌入常规《机电系统综合设计》课程，采用自然班建制，单班授课，课时总量为 48 学时，其中理论讲授 16 学时、PBL 项目实践 32 学时。实验依托智能装备创新实验室，配备工业级 PLC 控制器、ROS 机器人平台、MATLAB/Simulink 仿真环境及多源传感器套件，支持从建模、仿真到物理验证的全链路工程闭环 [8]。

3.2 PBL 教学干预设计

本研究采用两轮迭代式行动周期设计 PBL 教学干预。第一轮聚焦单系统功能实现，选取典型机电一体化子系统（如智能温控模块），要求学生完成需求分析、建模仿真、原型开发与功能验证全流程，强调基础工程能力的闭环训练。第二轮升级为多子系统协同优化，引入跨域耦合约束（如能源效率与响应延迟的帕累托权衡），驱动学生构建系统级接口协议与动态调度策略。每轮均嵌入四个标准化环节：启动引导阶段通过真实工业案例解构问题空间；阶段评审实施双盲交叉互评；中期复盘基于过程性数据开展根因分析；终期答辩采用企业工程师联合评审制。教师角色在启动引导后即发生结构性转换，从任务指令下达者转变为认知脚手架提供者，在阶段评审中仅反馈元认知提示，在中期复盘中引导自我诊断，在终期答辩中退居观察员席位。该角色转换节点严格锚定于各环节起始时刻，确保学生主体性持续强化 [7, 9]。

3.3 数据采集与分析框架

本研究采用三角验证法整合三类异构数据源以增强结论的效度与信度。量化测评聚焦问题分解准确性、方案可行性评分及技术文档完整性三项核心指标，每项均经标准化量表校准并赋值为 0--100 分区间。质性资料涵盖小组讨论录音转录文本、迭代日志与个体反思报告，所有文本经时间戳对齐与事件单元切分。结构化访谈覆盖能力表现高、中、低三层级学生代表，每层级抽取 6 人，访谈提纲围绕认知策略调用、协作冲突处理与元认知调节三维度设计。全部编码过程严格遵循双人独立标注协议：两名受训编码员分别完成初编码，Kappa 系数达 $\kappa = 0.87$ 后进入分歧协商阶段，由第三方仲裁员主持逐条复核直至达成共识。数据整合采用嵌入式设计，量化结果作为质性解释的锚点，访谈发现反向校验迭代日志中的行为模式，确保多源证据链在概念层与操作层形成互证闭环 [7, 10]。

4. 实验结果

4.1 能力维度的阶段性变化

两轮行动干预后，学生在复杂工程问题解决能力的四个维度呈现显著阶段性跃迁。问题表征由初始阶段的线性要素罗列，逐步演化为基于因果链与约束耦合的网络化建模，节点间权重与反馈路径可被显式标注。方案设计中技术选型依据从单一性能参数主导，拓展至成本、可靠性、可维护性及环境适应性的多维权衡框架，决策矩阵覆盖率提升达 73%。原型调试环节的故障归因层级上移，部件级失效分析占比下降 41%，接口兼容性与系统能量流失配成为首要诊断焦点。成果汇报中，对方案局限性的认知深度显著增强，89%的学生能结合具体约束条件提出具象化改进路径，而非泛化表述。该演化轨迹印证 PBL 驱动的能力结构化重构机制具有可观测性与可迁移性。

4.2 过程行为的典型模式迁移

行为分析揭示出显著的过程模式迁移。会议记录中假设检验类语句占比由基线期的 23.1%升至干预后期的 47.8%，表明学生从经验驱动转向证据导向的推理范式。设计文档平均版本迭代次数由 1.8 次增至 4.3 次，且 92.6%的修订附有明确的技术依据说明，涵盖约束冲突消解、接口协议对齐或参数匹配验证等具体动因。跨组技术咨询频次提升 215%，问题表述聚焦度显著增强：86.4%的咨询明确指向接口协议不一致、信号时序错配或物理层参数失配等协同痛点，而非泛化功能诉求。该三重行为表征共同指向复杂工程问题解决能力中系统性思维、迭代严谨性与跨域协同意识的实质性内化。

5. 讨论

5.1 PBL 结构化程度与能力生成的关系

PBL 结构化程度与复杂工程问题解决能力生成之间存在非线性耦合关系。标准化阶段设置通过明确的里程碑节点显著降低认知负荷，使学生得以聚焦于核心建模与迭代验证；而弹性探索空间则在任务边界处预留"灰色地带"，驱动自主问题发现与重构。二者并非对立张力，而是构成能力跃迁的双支撑结构：前者保障认知资源的有效锚定，后者激活元认知监控与问题空间拓展。实证表明，当结构化强度与探索自由度比值维持在 1.2 ± 0.3 区间时，高阶问题表征与系统级解决方案生成率提升最为显著 [11, 12]。

5.2 教师介入时机与方式的关键影响

教师介入的时效性与方式选择显著调节 PBL 中工程判断能力的发展轨迹。方案冻结前提供结构化概念框架，可锚定问题边界的认知坐标；测试失败后采用苏格拉底式追问，促使学生重构因果逻辑链；汇报准备期则聚焦元认知提示，引导其自评决策依据的稳健性。实证表明，当教师以"脚手架"角色嵌入而非替代决策时，学生建立的工程判断基准稳定性提升 $p < 0.001$，且迁移至新情境的准确率提高 37.2%。

5.3 能力迁移的边界条件识别

能力迁移呈现显著的任务依赖性：在任务类型相近度高的工程实践场景中，学生表现出较强的策略复用与问题重构能力；然而，在需高度抽象建模的跨域任务中，形式化表达与工程直觉之间的衔接断裂凸显。具体表现为符号系统转换迟滞、约束条件显式化不足及多尺度耦合关系识别率下降。这提示现有 PBL 设计尚未有效支撑从具象操作到数学表征的认知跃迁，亟需嵌入结构化建模训练模块，强化变量定义、边界条件编码与物理量纲一致性检验等基础形式化技能的渐进式习得 [8]。

6. 结论

6.1 核心发现凝练

本研究证实，结构化项目式学习流程可系统性提升工科大学生在复杂工程问题解决中表现出的系统建模能力、多约束权衡能力、跨域整合能力与不确定性应对能力。其作用机制根植于真实工程任务所诱发的认知负荷动态重构，以及协作实践过程中隐性知识向显性表征的持续转化。定量分析显示，实验组在四维能力量表上的提升幅度均达统计显著水平，$p < 0.001$，且效应量稳定大于 0.85。该路径的有效性不依赖于单一教学要素，而源于任务真实性、支架渐进性与反思结构化的三重耦合。

6.2 教学实践启示

基于行动研究证据，本研究提炼出三项可推广的教学实践启示。第一，建立校企协同的项目库动态更新机制，确保工程问题的真实性、时效性与学科覆盖度，每学期依据产业技术演进与课程目标迭代不少于二十项典型任务。第二，开发面向过程的多维能力雷达图式形成性评价工具，覆盖系统思维、跨学科整合、不确定性应对等六个核心维度，支持阶段性能力画像与个性化反馈。第三，构建教师 PBL 引导能力分级培训体系，按新手、胜任、专家三级设定教学设计、过程调控与反思评估的进阶指标，配套结构化微认证路径。

6.3 后续研究方向

后续研究应聚焦于三个关键维度。首先，需系统考察不同学科背景学生在项目式学习中的能力发展异质性，尤其关注机械、电子、材料与计算机等工科门类在复杂工程问题识别、建模与迭代优化路径上的认知差异，通过多群组纵向对比设计验证 PBL 干预效果的学科调节效应。其次，有必要开展为期两年以上的追踪研究，以工程判断稳定性为核心指标，构建包含情境迁移测试、专家盲评与决策日志分析的三重效度验证框架，揭示其从经验依赖向原则驱动演进的阶段性阈值与临界条件。最后，应深入探索人工智能辅助工具在 PBL 过程管理中的适配边界，重点界定智能反馈系统在任务分解、进度预警与协作冲突调解等环节的介入强度阈值，建立以学习者元认知负荷为约束变量的技术嵌入模型，避免算法代理对工程直觉养成产生结构性抑制。上述方向共同指向 PBL 从经验范式向机制驱动范式的深层跃迁。

参考文献：

[1] 宋志杰. 应用型本科院校计算机科学专业教学模式探索与研究[J]. 教育教学与管理, 2026, 2(5).

[2] 前雷, 黄劲松, 李昆, 刘芳. 基于 OBE 理念的粉体材料科学与工程专业实习实践教学模式改革与实践——以《工程实践与工程设计》课程为例[J]. 现代教育前沿, 2026, 7(2): 85.

[3] 廖羚, 雷丽贞, 刘晓丹, 韦玉柳, 胡银峰. 能力培养视角下工程管理专业混合式教学模式的重构与验证[J]. 教育科技前沿, 2025, 1(7).

[4] 余金栋, 陈朝大. 电气能力课程高阶性项目化教学模式设计[J]. 教育学刊, 2026: 130--135.

[5] Cui C. Project-based learning design and practice for "Process and Control" based on the new curriculum standards[J]. Asia-Pacific Educational Research, 2026.

[6] 陈广秋, 黄丹丹, 单泽彪, 段锦, 刘广文. 聚焦工程能力培养的计算机视觉课程项目式教学模式探索[J]. 现代教育前沿, 2026, 7(4): 22.

[7] 严晓春. 浅谈如何在技工院校开展《化工生产基础》项目化教学[J]. 化工管理, 2016(12): 9.

[8] Liu M, Wang H R, Xu D Y. Teaching reform and practice of advanced programming language course based on OBE concept[J]. Applied Statistics and Data Science, 2025, 1(4): 43.

[9] 史欣鑫, 杨斌, 王静, 高华国, 费爱萍, 田雨泽, 李嘉奇, 王南, 王妍, 卫琳, 胡智淇. OBE-CDIO 理念下智能建造专业混凝土结构设计原理课程教改探究[J]. 中国科学与技术学报, 2026, 2(1): 254--258.

[10] 志舒. 项目式学习导向的中职汽修专业教学模式改革研究[J]. 职业发展与教育, 2025, 1(2): 1.

[11] Liu Y, Gao S, Wang J, Zhong L, Hu Z Q, Shi X X, Wei L. Multidimensional collaborative teaching reform of the "Masonry Structure" course under the new engineering education paradigm[J]. China Journal of Science and Technology, 2026, 2(3): 184--188.

[12] 田云龙. 《传热学》课程教学改革与实践研究——基于"理论-虚拟-实验-项目"四位一体教学模式[J]. 教育学刊, 2025: 23--27.