

从项目式学习到人机协同：生成式人工智能赋能高职工科竞赛育人的演进机制与可迁移路径

陈 强¹, 陈弘正^{2*}

¹山东职业学院乌拉尔国际轨道交通学院, 山东 济南

²黄冈师范学院机电与智能制造学院, 湖北 黄冈

收稿日期: 2026年8月13日; 录用日期: 2026年9月11日; 发布日期: 2026年9月20日

摘 要

文章以研究团队2021~2025年围绕全国大学生智能汽车竞赛与全国大学生电子设计竞赛开展的四项连续研究为对象, 借用行动者网络理论并将其转译为“竞赛网络-多方协作权责-必经审核关口”的职教话语, 回顾并剖析竞赛育人模式从“跨学科项目式学习”经“AI增强型探究式学习”到“三元人机协同育人”的演进机制。研究发现: 三个阶段的实质差异不在于是否使用了AI工具, 而在于竞赛网络的参与方构成变化与必经审核关口的位移——教师由“知识与方案的核心供给者”转型为“工程可行性的最终审定者”; 大语言模型承接基础知识供给与方案生成职能后, 其“建议失效”事件反而成为学生建立批判性工程素养的关键契机。本文把该素养操作化为三个维度、六项子维度与十六条可观测行为指标并配套观测量规, 并以一个关键技术决策点为例完整追溯各参与方之间的协商链条; 据此提炼“三元权责分工-四阶递进流程”的实施框架, 并给出四条实训迁移路径。上述结论的成立依赖“实物可证伪”的强反馈环境与高职竞赛情境, 向其他学科、教育层次与常规课堂的迁移尚待验证。

关键词

生成式人工智能, 竞赛网络, 批判性工程素养, 教师角色转型, 实训迁移, 职业教育

From Project-Based Learning to Human-AI Collaboration: Evolutionary Mechanisms and Transferable Pathways of Generative AI-Empowered Engineering Competition Education in Vocational Colleges

Qiang Chen¹, Hungcheng Chen^{2*}

*通讯作者。

文章引用: 陈强, 陈弘正. 从项目式学习到人机协同: 生成式人工智能赋能高职工科竞赛育人的演进机制与可迁移路径[J]. 职业教育发展, 2026, 15(9): 373-388. DOI: 10.12677/ve.2026.159402

¹Shandong Polytechnic-Ural International Institute of Rail Transit, Shandong Polytechnic, Jinan Shandong

²School of Mechatronics and Intelligent Manufacturing, Huanggang Normal University, Huanggang Hubei

Received: August 13, 2026; accepted: September 11, 2026; published: September 20, 2026

Abstract

Taking as its object four consecutive studies conducted by the authors' team between 2021 and 2025 on the National University Students' Intelligent Car Racing Competition and the National Undergraduate Electronics Design Contest, this paper borrows Actor-Network Theory and translates it into a vocational-education vocabulary of competition network, multi-party rights and responsibilities, and obligatory review gate. Three findings are reported. First, what distinguishes the three stages is not whether AI tools are used, but how the participants in the competition network are recomposed and where the obligatory review gate is relocated: the instructor shifts from the central supplier of knowledge and solutions to the final arbiter of engineering feasibility. Second, once large language models absorb the supply of foundational knowledge and the generation of candidate solutions, the episodes in which their advice fails in practice become the decisive moments for building students' critical engineering literacy; the paper operationalises this literacy into three dimensions, six sub-dimensions and sixteen observable behavioural indicators with an accompanying observation rubric, and traces in full the chain of negotiation among students, instructors, the model, components, costs and contest rules at one key technical decision point. Third, an implementation framework comprising a triadic division of rights and responsibilities and a four-phase procedure is distilled, together with four pathways for migrating competition outcomes into routine practical training. These claims rest on a strong-feedback setting in which physical artifacts can falsify AI advice and on a vocational-college competition context, so transfer to other disciplines, educational levels and routine classroom teaching remains to be verified.

Keywords

Generative Artificial Intelligence, Competition Network, Critical Engineering Literacy, Transformation of the Teacher's Role, Migration to Practical Training, Vocational Education

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1.1. 政策语境：“十五五”规划下工科竞赛育人的新坐标

2025年1月，中共中央、国务院印发《教育强国建设规划纲要（2024—2035年）》，把“加快建设现代职业教育体系，培养大国工匠、能工巧匠、高技能人才”列为九项重点任务之一[1]；2026年6月的《教育发展“十五五”规划》提出推进中职、高职、职业本科衔接培养，并布局建设产教融合实训基地与未来实训中心[2]；同年，教育部等五部门印发《“人工智能+教育”行动计划》，提出“十五五”期间的四项重点任务，要求推动人工智能与教育深度广泛融合、全面提升师生的人工智能素养[3]。

在这一坐标系中，工科竞赛的定位正发生三重变化：从“课外活动”转变为制度化的育人接口——“岗课赛证”要求把技能大赛项目与职业技能等级证书标准融入课程体系[4]，赛项的技术指标与评分规

则因此成为可被课程直接调用的教学资源;从“少数尖子的舞台”转变为高技能人才批量培养的试验场[2];以及要求把生成式人工智能的使用规范纳入教学设计[5][6]。

1.2. 问题的提出: 竞赛育人的三重张力

把一场竞赛真正转化为可持续、可复制的育人机制,长期面临三重张力。其一是知识的跨学科张力:智能车、储能小车一类赛题横跨电子、机械、控制、数学与程序设计,任何单一专业的知识储备都不足以支撑完整方案,而高职学生普遍具象思维较强、理论基础相对薄弱,“做中学”比“学而后做”更易达成[7][8]。其二是约束的刚性张力:竞赛不仅规定功能指标,更以时间、成本与器件可得性构成硬约束——三人一队须在四天三夜内完成从设计、制作到报告撰写的全部工作[9],技术上最先进的方案往往不是最适配的方案。其三是教师精力的张力:教师既是知识与方案的主要供给者,又是答疑者与裁决者。

生成式人工智能为第三重张力提供了新解法,却同时抛出新问题。当大语言模型(Large Language Model, LLM)能在数分钟内生成系统框架、器件清单乃至可运行代码时,“做中学”的教育价值是否会被架空?已有研究既指出 LLM 可显著提升学习效率[10],也提示其可能生成错误内容并诱发“去技能化”风险[11][12];高教领域关于人工智能的话语则常在“不可抗拒的变革”与“权威的再分配”之间摇摆,缺乏对权责如何重排的刻画[13]。本文正是要回答:在高强度、强约束的工科竞赛场景中,生成式 AI 究竟改变了什么,又有什么没有被改变。

1.3. 研究团队的四年轨迹与本文定位

自 2021 年起,本研究团队以山东职业学院与黄冈师范学院的联合训练为基地开展了四项连续研究:文献[7](2021)首次引入行动者网络视角解释跨专业团队的知识创新;文献[8](2022)以“具有发电功能的储能小车”赛题实践模块化项目式教学;文献[14](2024)在智能车电磁组训练中引入 ChatGPT,构建 AI 增强型探究式学习模型;文献[9](2025)把大模型嵌入真实竞赛 workflow,提出“学生-大模型-教师”的三元协作模型。

本文并非上述成果的技术复述,而是以研究回顾为主轴的综述性论文,其核心关切是把四年间分散的经验抽象为可被其他院校复用的框架与路径。贡献有三:提供统一的分析框架,使三个阶段的差异能被还原为竞赛网络参与方构成的重组与必经审核关口的位移;揭示“AI 建议失效”对批判性工程素养的塑造作用,并把该素养操作化为可观测的行为指标;提炼可迁移的实施框架与四条走向常规实训的路径[2]。本文结论生成于“实物可证伪”的强反馈情境与高职竞赛场景,其迁移条件将在第 7.2 节讨论。

2. 分析框架: 竞赛网络与必经审核关口

2.1. 从行动者网络到职教话语的转译

本文借用行动者网络理论(Actor-Network Theory, ANT)的分析工具,出于两点考虑:其一,工科竞赛的育人过程从来不只是人与人之间的事——电感、超级电容、单片机、控制算法、竞赛规程乃至器件的采购周期,都实实在在地改变着学习的走向,而 ANT 要求以同等力度对待人与物两类参与方[15][16];其二,ANT 关于“参与方如何被组织到共同目标之下”的过程刻画,恰好对应竞赛训练中反复出现的协商与取舍。本文对该理论持工具性借用的立场[17]。

然而,ANT 的原生术语对职业教育读者门槛偏高。为此本文作了系统的话语转译(表 1):以“竞赛网络”指称由师生与器材、算法、规程、成本共同构成的参与方集合;以“多方协作权责”指称把各方目

标对齐到共同目标的协商过程；以“必经审核关口”指称网络的收敛节点——所有方案若要落地都必须通过这一关口；以“方案定型”指称争议消退、方案被固化为成熟做法。obligatory passage point 在国内多译作“强制通行点”[18]，本文改用“必经审核关口”，以凸显它由教师把守、以专业审定为内容的具体形态。

为使这一工具真正可用而不停留于框架性介绍，本文把协商过程操作化为三类可在训练记录中直接辨认的事件：抵抗，指器件、成本、赛制等物性参与方使既有方案无法推进的时刻，如电容在过压下烧毁、专用芯片因采购周期而不可得；转译，指某一参与方用自身语汇重述他者诉求、从而使方案得以改写的话语；入网与定型，指新的参与方被纳入方案、并经实测检验后争议消退的时刻。第 5.3 节将以一个关键决策点为例，追溯这三类事件如何串成一条协商链。

Table 1. Translation of actor-network theory terms into vocational-education discourse

表 1. 行动者网络理论术语的职教话语转译

原始术语	本文使用的职教话语	在竞赛育人场景中的所指
异质网络 heterogeneous network	竞赛网络	由师生与器材、算法、竞赛规程、成本周期共同构成的参与方集合
行动者 actor (人类/非人类)	参与方/物性参与方	教师、学生；以及车模、传感器、超级电容、控制算法、评分规则等
转译 translation	多方协作权责协商	把各参与方的目标对齐到共同目标，并据此分配任务与责任的过程
必经通行点 obligatory passage point (OPP)	必经审核关口	所有方案若要落地必须通过的收敛节点；把守者拥有结构性影响力
黑箱化/稳定化 stabilization	方案定型	争议消退后，方案被固化为可直接调用的成熟做法与教学资源

注：本表由作者依据文献[15] [16]整理并结合职业教育语境转译。

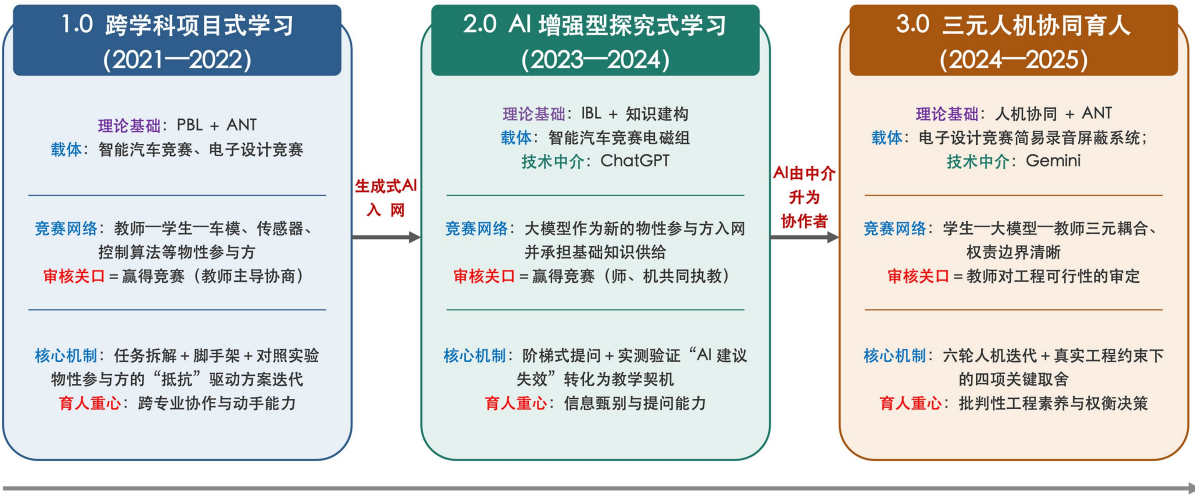
2.2. 与国内相关研究的对话

在国内，该理论主要被应用于科学技术学的理论反思[17]与公共治理的机制分析[18]，工程教育界亦有以其分析课程中社会技术议题的尝试[19]；用于职业教育的训练与实训情境仍相当少见。这一空白值得注意：职业教育恰恰是人与物、学校与企业、课程与岗位高度交织的领域，“产教融合”“岗课赛证”等命题本质上都是多方参与、反复协商的网络问题[4]。既有研究还提示，多方协作常遭遇“转译桎梏”——各方诉求难以对齐[18]；当生成式 AI 带着海量未经筛选的方案入网时，如何避免协商被信息淹没，正是本文关注的核心问题。

把上述概念落到竞赛育人场景，可形成三个分析问题：哪些人与物被组织进了竞赛网络？必经审核关口位于何处、由谁把守？协商由谁主导、学生处于什么位置？下文即以这三问贯穿三个阶段的比较(图 1)。

2.3. 三阶段的整体图景

表 2 从九个维度比较了三个阶段的网络构型。三者共享同一表层目标——赢得竞赛，但网络内部结构发生两次重组：生成式 AI 作为新的物性参与方入网，随后由“查询工具”升格为“协作伙伴”，并迫使必经审核关口由“赢得竞赛”收敛为“通过教师对工程可行性的审定”。



注：作者自绘，内容依据文献[7]-[9] [14]。

Figure 1. Three-stage evolution of the engineering competition education model and the reconfiguration of its competition network

图 1. 工科竞赛育人模式的三阶演进与竞赛网络重构

Table 2. Comparison of network configurations across the three stages of competition-based education

表 2. 三阶段竞赛育人模式的网络构型比较

比较维度	1.0 跨学科项目式学习	2.0 AI 增强型探究式学习	3.0 三元人机协同育人
时间与载体	2021~2022; 智能汽车竞赛电磁组、电子设计竞赛储能小车	2023~2024; 智能汽车竞赛电磁组	2024~2025; 电子设计竞赛简易录音屏蔽系统
理论基础	项目式学习	探究式学习	人机协同
网络参与方	教师、跨专业学生小组; 车模、电感、超级电容、控制算法、竞赛规程	在上述基础上新增 ChatGPT	在上述基础上新增大模型与器件成本、采购周期等现实约束
技术中介	无	ChatGPT (局部、点状介入)	大模型(全流程嵌入)
必经审核关口	赢得竞赛	赢得竞赛	通过教师对专业正确性与工程可行性的审定
协商主导者	教师	教师与模型共同承担	学生主导、教师终审
教师角色	知识与方案的核心供给者	方向引导者与质量把关者	必经审核关口的把守者与价值守门人
学生角色	任务执行者与主动试错者	自主探究者与提问者	方案筛选者与最终决策者
育人重心	跨专业协作与动手能力	信息甄别与提问能力	批判性工程素养与权衡决策

注：本表由作者依据文献[7]-[9] [14]归纳整理。

2.4. 经验材料的来源与处理

本文的经验材料来自研究团队 2021~2025 年在四届竞赛训练中留存的四类语料：训练过程记录、人机对话日志、教师对 AI 生成方案的逐页可行性批注，以及赛后复盘材料。使用时作了三项处理：匿名化，凡涉及学生个人信息之处一律以“某学生”“A 组”指代；保真优先，缩排引文均直接取自原始记录；

来源标注, 每处引文均注明语料类型与年份。需坦承的是, 这些材料是教学过程的自然产物而非预设采集的数据, 只能支持机制层面的“如何发生”。

3.1.0 阶段: 跨学科项目式学习与教师主导的协商(2021~2022)

3.1. 网络构型与协商过程

1.0 阶段以项目式学习(Project-based learning, PBL)为理论基础, 以 2021 年智能汽车竞赛电磁组与电子设计竞赛“具有发电功能的储能小车”赛题为载体[7][8]。团队由 3~4 名跨专业学生组成, 教师依据专长分派任务, 把复杂赛题拆解为若干子项目并提供技术要素作为脚手架[7][8]。

从协商的角度看, 这一阶段的议题设定由教师完成: 教师把“赢得竞赛”确立为共同的必经审核关口, 并据此重新表述各专业的学习任务; 随后学生按专业入队, 车模、电感、控制算法、竞赛规程等物性参与方亦被逐一纳入[7]。

这种由教师主导的协商在训练记录中留下了清晰的痕迹。以电机调速方案的对照实验为例, 教师先把技术选择转化为可分组验证的任务, 再在学生质疑任务本身时, 用竞赛情境重述它的意义:

学生: 那如何使电机两端的电压发生变化, 进而控制电机的转速呢?

教师: 把电机供电电路简化为电源与电枢电阻的串联; 改变电压可串入电阻, 或用 PWM 调制方式调压。

(分组挑战数轮之后)A 组学生: 比赛过程中以恒定速度行驶即可, 为什么要改变这么多次转速?

教师: 赛道不是直的, 过弯要减速、直线要加速。

——团队训练记录, 2021 年智能汽车竞赛

A 组学生的异议并非对技术细节的追问, 而是对任务正当性的质疑; 教师的回应也不是给出答案, 而是把“赛道的几何形状”这一物性参与方引入讨论, 使串电阻方案的局限由“老师说它不好”转变为“赛道不允许它”。同一次实验还留下另一细节: 当学生需要串接与电枢电阻相等的电阻时, “有的同学说查手册, 有的说先串个试试, 有的使用万用表测量。争论之后发现, 没有手册内容可查”——知识的权威由此从“手册”转移到“测量”。

3.2. 两项关键实证及其育人机理

第一项实证是储能小车的对照实验。在超级电容模块中, 学生依次经历三重失败: 单体电容直接供电时电压过低致电机无法运转; 经升压变换器供电时, 电容输出电压跌至阈值以下后变换器失效; 而以电机反转发电直接充电时, 输出电压超过电容耐压导致电容烧毁[8]:

有学生转动直流无刷电机处于发电状态对超级电容器充电, 由于电机发电时的输出电压超过了超级电容的耐受电压, 所以测试过程中出现了电容被烧毁的情况。

——团队训练记录, 2022 年电子设计竞赛

随后两组学生分别验证串联与并联方案, 确认“并联增容不改压、串联提压不增容”, 最终导向串并混联[8]。同期的电感排布方案亦经历了从单电感、双水平电感、八字形到双 T 形的四阶迭代, 最终实现直道与弯道的全场景稳定检测[7][14]。

第二项实证发生在循迹方案的选型上, 它在生成式 AI 尚未入网的年代已呈现出与“约束敏感度”一致的判断过程:

有同学想要使用摄像头配合树莓派来实现道路识别。但是这位同学发现, 树莓派和摄像头的功耗实在太, 让

整个系统运行起来需要数量足够多的超级电容, 但又受限于小车的尺寸和重量, 并不是一个很好的选择。

——团队训练记录, 2022 年电子设计竞赛

否决这一方案的既不是教师, 也不是技术优劣, 而是“功耗 - 储能容量 - 车身尺寸与重量”构成的约束链。学生是在自己推演这条链条之后放弃了技术上更强的方案——这与 2025 年团队否决专用驱动芯片的推理结构完全同型。

两项实证的育人机理是共通的: 推动方案迭代的并非教师的讲授, 而是物性参与方的“抵抗”——是电容在过压下的烧毁、是功耗与车身重量的冲突, 否定了原有方案。知识正是在“方案被现实驳回 - 重新协商 - 再验证”的循环中生成的; 学生开始学习在真实约束下做权衡, 而不是寻找唯一正确答案[8]。1.0 阶段的机制因而可概括为“任务拆解 + 脚手架 + 对照实验”: 教师是协商的唯一主导者, 学生的探究仍在教师预设的资源边界内展开, 学习效率受制于教师的知识储备与精力——这正是 2.0 阶段变革的出发点。

4.2.0 阶段: 大模型入网与批判性工程素养的生成(2023~2024)

4.1. 新参与方的入网方式

2.0 阶段以探究式学习(Inquiry-based learning, IBL)为理论基础。文献[14]沿用 Pedaste 等的五阶段探究循环[20], 并在每一阶段嵌入 ChatGPT: 教师提供使用规范与信息甄别原则作为脚手架, 学生质疑并分析 AI 的回答、识别潜在错误, 再经协作讨论收敛与反思[14]。

大模型入网带来的第一个变化, 是知识供给权的部分让渡: 此前只有教师与教材能回答“控制算法的数学形式是什么”这类问题, 如今学生可直接向模型提问, 文献[14]因此把教师角色描述为与 ChatGPT 并肩的“共同教练”(co-coach)[14]。第二个变化是提问本身成为可训练的能力。近年一项针对大学课堂人机对话的编码研究显示: 学生提问的认知水平普遍偏低、策略较单一, 而随着任务推进与经验积累, 提问水平随之提升[21]。这与本团队的观察一致——提问能力不是先决条件, 而是在真实任务的反复摩擦中被养成的。

4.2. 关键实证: “AI 建议失效”作为教学契机

对话日志显示, 学生最初的提问几乎都指向“替我完成”, 而模型的第一次回应本身就构成一次边界宣告:

学生: 你能帮助我完成智能车代码的编写吗?

ChatGPT: 作为一个 AI 语言模型, 我可以为您提供关于编写智能汽车代码的一些建议和指导, 但我不能直接为您编写代码。

——人机对话日志, 2023 年

随着任务推进, 同一批学生的提问迅速转向“这是什么”与“出现某现象怎么办”:

学生: (粘贴一段单片机系统初始化程序)你能帮我解释一下代码的作用吗?

学生: PID 参数调试时, 震荡过大怎么调节? 增量式 PID 响应慢怎么调节?

——人机对话日志, 2023 年

从“你能帮我写吗”到“这段代码在做什么”, 再到“出现震荡该怎么调”, 提问的认知层级由知识、理解升至应用与问题解决, 其驱动力并非教师的讲授, 而是实车调试中不断出现的具体故障[21]。

在智能车电磁组训练中, ChatGPT 生成了用于舵机转角与电机转速的两套控制代码框架[14]。然而当

学生将代码与初始参数移植到实车后, 普遍遭遇“理论合理但实践失效”的落差: 模型给出的通用参数完全无法循迹[14]。在教师指导下, 学生通过大量实车测试自行总结出各项控制参数的影响规律[14]。本文关注的是这些结论如何被获得:

有学生认为不需要 Kd, 只使用 Kp 参数即可。小车在直线行驶时系统稳定, 但在较快速度通过弯道时出现问题: 为提高响应速度他增加 Kp, 角度调节加快了却出现左右震荡。加入较小的 Kd 后事情发生转机……他不断加大 Kd, 结果反倒引起了严重的震荡。

——团队训练记录, 2024 年智能汽车竞赛

本文认为, 2.0 阶段最具教育学意义的发现恰恰是 AI 的失效。当模型给出的参数在实车上完全无法工作时, 学生迅速从“AI 万能”的迷思中清醒, 转而把 AI 定位为“思路提供者”, 并自发形成“AI 生成 → 实测验证 → 问题反馈 → 迭代优化”的工作流。用竞赛网络的语言说, 这是一次反向协商: 物性参与方驳回了另一个参与方的提案。批判性素养不是被讲授的, 而是在网络的摩擦中被生成的。

4.3. 批判性工程素养：操作化定义与观测框架

上述过程指向一种可辨识、可培养的能力。本文将其界定为批判性工程素养: 在生成式人工智能参与的工程任务中, 学习者对模型输出与自身方案进行来源审辨、约束权衡并承担决策责任的综合能力。这一界定以真实工程任务为发生场域, 且是行为层面的、可被第三方观察的。

据此, 本文把该素养分解为三个维度、六项子维度与十六条可观测行为指标(表 3)。来源审辨力指对 AI 输出的可信度作出分层判断的能力, 含“可信度分层”与“交叉验证”: 学生逐步区分出原理性陈述(仍需与教材互证)、参数建议(必须实测)与器件选型(须叠加成本、周期与可得性判断)三类内容, 这与既有研究关于“模型在高度专业化领域仍需人类专家监督”的结论一致[22] [23]。约束敏感度指在给定资源条件下识别方案可行边界的能力, 含“显性约束辨识”与“隐性约束推演”——时间与器件约束是显性的, 而调试工时、团队技能储备等隐性约束往往要在试错中才被感知。责任自持力指拒绝把判断责任外包给模型的自觉, 含“验证承诺”与“归因自持”: 职业教育以技能本身为培养目标[6], 对“去技能化”风险尤为敏感[12], 工科竞赛因而提供了天然的对冲: 实物必须由学生亲手制作与调试。

Table 3. Dimensions, sub-dimensions and observable behavioural indicators of critical engineering literacy
表 3. 批判性工程素养的维度、子维度与可观测行为指标

维度	子维度	可观测行为指标	证据来源
来源审辨力	可信度分层	① 能区分原理性陈述、参数建议与器件选型三类输出的可信度差异; ② 对参数类建议主动标注“须实测”; ③ 能指出 AI 排障建议中与本系统不符之处	对话日志; 调试记录
	交叉验证	④ 主动向模型追问依据或来源; ⑤ 将模型答案与教材、器件手册或实测数据比对后再采用	对话日志; 设计报告
约束敏感度	显性约束辨识	⑥ 能复述任务书的时间、成本、功耗与器件约束; ⑦ 方案比较时主动列出成本与采购周期	方案评审; 器件清单
	隐性约束推演	⑧ 以备货情况、调试工时或团队基础否决技术更优的方案; ⑨ 能推演约束间的连锁效应(如阵列规模放大单件成本); ⑩ 能说明“最优 ≠ 最适配”的理由; ⑪ 主动为演示或测试场景增加约束	方案评审; 复盘陈述

续表

责任自持力	验证承诺	⑫ 在分工中写入“一切结论须经实践验证”并据以执行；⑬ 拒绝直接移植未经验证的生成代码；⑭ 保留失败测试的原始记录	调试记录；测试报告
	归因自持	⑮ 失败后追溯自身决策链而非归因于模型；⑯ 在报告中标注 AI 贡献与自身判断的分界	复盘陈述；设计报告

注：作者依据 2021~2025 年训练记录归纳。水平判定：未显现 = 训练全程未观察到；初步显现 = 经教师提示后出现；稳定表现 = 无需提示且在两个以上子任务中重复出现。

表 3 的三级水平判定以行为证据为准，不采信仅有自陈而无对应记录的情形。需说明的是，表 3 是面向教学过程的观测工具，而非经信效度检验的量表：其条目与水平划分未经项目分析与效标关联验证，把它发展为可用于跨校比较的正式量表是后续研究的任务。

4.4. 机制提炼

2.0 阶段的核心机制是“阶梯式提问 + 实践验证”：教师从答疑者转向方向引导者；但 AI 的参与仍是局部的、点状的，学生仍主要是 AI 服务的使用者，必经审核关口依然是“赢得竞赛”。

5. 3.0 阶段：三元人机协同与审核关口的再锚定(2024~2025)

5.1. 六轮人机迭代的设计流程

3.0 阶段以 2024 年电子设计竞赛“简易录音屏蔽系统”赛题为载体[9]。该题要求设计由录音屏蔽信号发生器与音频监测识别模块构成的系统，须实现屏蔽距离不小于 1 m、屏蔽角度不小于 60°，输出功率在 1~4 W 间以 1 W 步进可调[9]。团队引入具备深度思考能力的 Gemini 模型作为全流程协作伙伴[9]。

文献[9]完整记录了由六轮提问、模型深度思考与响应构成的迭代过程：从需求拆解与初始方案生成，到逐项校验方案覆盖度，再到各模块的深化与软件总体架构[9]。关键在于，每一轮提问都嵌入了教师反馈：教师提示学生对 AI 回答的实现难度、真实应用条件与时间约束进行批判性审视，再由学生把质疑写入下一轮提示词[9]。教师并未直接与模型对话，却通过学生这一中介把工程经验注入生成过程——这是一种以学生为枢纽的间接协商结构，与既往“学生 - AI”二元对话研究形成对照[22] [24]。

5.2. 四项关键取舍：技术先进性与现实约束的权衡

三元协同最能体现育人价值的环节，是对 AI 方案的可行性筛选。表 4 据文献[9]重制，归纳四项关键决策：AI 推荐的某专用驱动芯片配合数模转换器方案在技术上成立，却因采购周期长、成本高而被否决，团队最终选用直接数字频率合成方案；在音频检测环节，AI 建议以硬件电路做信号调理，团队则改为在软件中完成频谱分析与类型识别[9]。

Table 4. Four human-AI trade-off decisions in the design of the simple recording shielding system

表 4. 简易录音屏蔽系统设计中的四项人机取舍决策

设计环节	AI 建议方案	师生最终决策	取舍依据	训练的判断维度
信号发生模块	专用驱动芯片 + 数模转换器控制功率	直接数字频率合成芯片 + 功率放大器	采购周期长、单价高，四天三夜赛制下不可得	成本与周期意识
功率调节方式	数模转换器 + 运算放大器实现精密电压控制	数字电位器调节功放增益	与最终选定的信号发生方案匹配，电路更简单、成本更低	方案间的耦合意识

续表

音频监测与识别	以硬件电路完成信号 调理	滤波后经模数转换, 在微控制器内以频域 分析完成识别	硬件复杂度与调试难度过 高; 软件方案识别精度更 优	软硬件分工的经 济性意识
电源管理	外部接口供电 + 线 性稳压	电池供电 + 开关变 换与线性稳压组合	现场演示的便利性与供电 稳定性优先	使用场景意识

注: 依据文献[9]表 2 重制, 并补充“取舍依据”与“训练的判断维度”两列。

支撑这些取舍的, 是指导教师对 AI 生成方案逐页留下的可行性批注:

AI 回答专业性没问题, 核心模块划分清晰、结构合理。但是需要考虑多种因素, 如比赛的时间紧迫、参赛选手是高职大二的学生的专业水平有限、参赛的硬件条件受限很难实现复杂的系统等等情况下, 可实施性上需要考虑。

AI 可能不了解需要现场测试。需要带设备去测试现场, 使用电池方案更易携带和移动。

机器学习不现实, 没有大量的数据支持, 学生不具备这方面的基础。

——教师对 AI 生成方案的逐页批注, 2025 年

这些批注指向 AI 难以自动考量的隐性约束: 赛制时长、学习者的既有基础、实验室的硬件条件、演示的现场性与训练数据的可获得性。它们没有一条在质疑 AI 的专业正确性——教师首先确认“专业性没问题”, 随后才追问“在我们这里能不能做出来”。这正是“必经审核关口”的实质: 它审的不是对错, 而是可行。

同一份记录还显示, 学生已能独立完成一次完整的否决:

有学生测试了使用播放器播放白噪声来掩盖正常语音的方式, 近距离上确实能干扰到一些录音设备, 但是也影响了正常的说话声音, 并且手机等录音设备由于降噪功能, 播放时屏蔽掉了噪声。

——团队训练记录, 2025 年电子设计竞赛

这一否决的证据来自学生自己的实测, 被否决的对象是学生自己的构想, 而判断依据是“手机的降噪功能”这一未被预料到的物性参与方。四项取舍的共同逻辑是: 最优的技术方案未必是最适配当前场景的方案[22] [23]。

5.3. 一个决策点的完整协商链: 功率调节方案的形成

表 4 以结果的形式呈现四项取舍, 却隐去了取舍如何发生。本节选取耦合最紧的一条线索——从信号发生器选型到功率调节方式确定——追溯其协商过程。协商的起点是赛题设定的共同关口: 输出功率须在 1~4 W 间以 1 W 步进可调、评分导向鼓励程控, 加之四天三夜的赛制与“器件须为实验室现有”的条件[9]。

第一轮是 AI 提案: Gemini 推荐使用专用压电驱动芯片配合数模转换器实现功率程控, 理由是内置升压电路、可编程波形、集成度高[9]; 就技术合理性而言无可指摘, 教师的批注也首先确认它“专业性没问题”。

第二轮是抵抗, 且抵抗来自非人参与方。团队记录写道: 这类芯片“成本较高, 且采购周期长, 此外由于该项目中需要多个换能器组成阵列, 所以需要多个驱动芯片, 成本太高”。为满足屏蔽角度而必须采用的换能器阵列, 把单片器件的成本与周期成倍放大, 越过赛制所能容忍的阈值——“采购周期”与“阵列规模”这两个从不出席讨论的参与方, 实际否决了一个由 AI 提出、教师认可其专业性的方案。

第三轮是学生的再提案: 改用直接数字频率合成芯片生成正弦波、后接线性功率放大器[9]。

第四轮是第二次抵抗,来自器件的物理属性:教师指出,这类合成芯片“输出电压幅度是固定的(通常几百毫伏),直接调节它的输出幅度比较困难,而且可能会影响信号质量”。新方案在成本上通过了检验,却在功率可调这一硬指标上遇到阻力。学生随即提出最关键的一问:

学生:如果用 AD9833 这类 DDS 芯片生成纯净正弦波,再通过线性功放驱动换能器,功率调节时,应该调 AD9833 还是调后面的线性功放的放大倍数?

——团队训练记录,2025 年电子设计竞赛

第五轮是教师的转译。教师并未直接给出电路,而是把问题从“调哪一级”重述为“功率由谁决定”：“当然是调线性功放的增益而不是直接调节 AD9833 的输出”。教师用自身语汇重述了学生“怎么调”的诉求,把讨论从操作层面提升到系统层面。

然而转译并未立即成功,学生随即提出第三次抵抗,指向的是转译方案自身的可实施性:

学生:运放的放大倍数不是调电阻吗?远程怎么调电阻,用个机械装置调电位器吗?

——团队训练记录,2025 年电子设计竞赛

这一问题的分量不在于技术难度,而在于它替赛场提出了要求:赛题鼓励程控,而机械调阻显然不是程控——学生实际上是用评分规则的语汇检验了教师方案的可行性。第六轮,教师完成最后一次转译,引入一个新的参与方:“现在有数字电位器,也就是程控的电位器,发指令就可以改变它的电阻值”,做法是在功放的反馈回路中加入数字电位器,经数字接口控制其阻值以调节增益。数字电位器由此入网:它既满足功率连续可调的技术指标,又以“可由指令控制”回应了评分规则对程控的偏好;方案在实测中达成 1~4 W 步进可调而定型[9]。

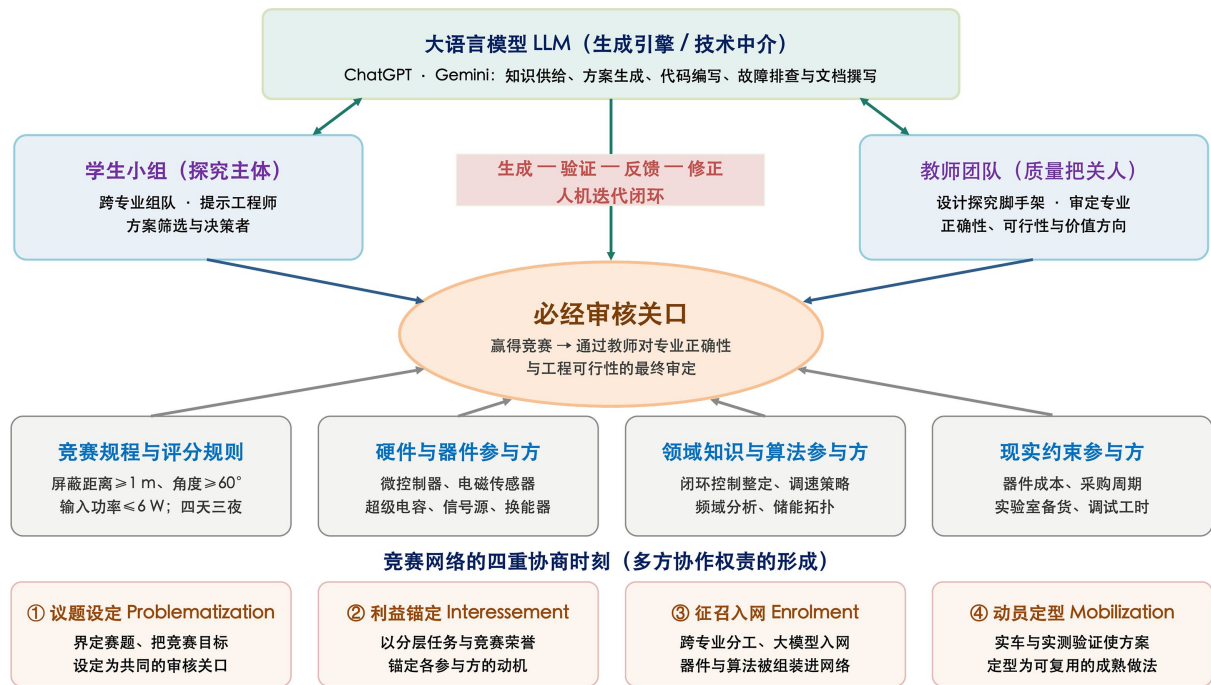
回看这条链条,可得三点超出个案的观察。其一,被否决的从来不是“错误的方案”,而是“在本网络中无法被所有参与方接受的方案”——所谓“最优解”始终相对于一组参与方而言。其二,推动方案演化的关键动作,是学生把物性参与方的抵抗转述为一个可回答的问题(“该调哪一级”“远程怎么调电阻”),正是这两次转述把沉默的器件属性与赛场条件带进了讨论;提问因此不只是学习行为,更是协商中的结构性动作。其三,教师的两次转译都不是提供答案,而是提供语汇,语汇的更换使原本对立的诉求得以兼容——这或许正是 AI 时代教师不可替代性的具体所在。

5.4. 教师角色的三次转型

贯穿三个阶段,教师角色经历了三次实质性转型。1.0 阶段,教师是知识与方案的核心供给者,效率上限由其个人的知识储备与精力决定;2.0 阶段,教师转为方向引导者与质量把关者,得以集中于引导学生辨别 AI 输出的正确性[5][25]。

3.0 阶段,教师成为必经审核关口的把守者与价值守门人。其深层动因是稀缺性的迁移:当 AI 能以极低成本生成看似合理的方案时,真正稀缺的不再是方案,而是对方案的判断力[9]。第 5.3 节的协商链提供了具体证据:教师的两次介入都发生在方案因物性抵抗而卡住的节点上,且都以更换语汇而非给出答案的方式完成。

这一变化并非“重要性下降后的补偿性说法”,而是重要性的重新定位:当知识供给被大规模自动化之后,教育中不可自动化的部分——判断、取舍与价值把关——反而被凸显[5][6]。与之相伴的是新要求:教师还须了解模型的能力边界与失效模式,并据此设计“可控失败”的教学情境。图 2 刻画了这一阶段的网络结构:学生、大模型与教师构成三元耦合,竞赛规程、硬件器件与现实约束作为物性参与方共同指向必经审核关口。



注：作者自绘，内容依据文献[9]与 Callon 的转译理论[15]。

Figure 2. Competition network of the triadic human-AI collaborative model and the four moments of negotiation
图 2. 三元人机协同育人的竞赛网络与四重协商时刻

6. 从竞赛实践到教学策略：可迁移的实施框架

本节将四年经验抽象为可迁移的框架，包含三元权责分工、四阶递进流程与迁移路径三个组件。

6.1. 三元权责分工与边界

学生是探究主体与最终决策者，负责定义问题、设计交互指令、验证输出结果并沉淀实践知识，其要害在于“决策权”。大模型是生成式协作伙伴，承担知识讲解、方案与代码生成、故障排查等重复性工作，其边界在于不承担正确性责任。教师是必经审核关口的把守者，负责把控专业正确性与工程可行性、校准学术诚信。三者基于比较优势形成权责分工[5] [25]。

6.2. 四阶递进实施流程

结合探究式学习的阶段模型[20]与竞赛项目的开发规律，可将实施流程划分为定向与认知、模块化探究、系统集成与联调、迭代优化与反思四个阶段，每一阶段明确三元主体的任务与阶段产出(图 3)；四阶并非单向推进，而是螺旋上升的循环。该设计还回应了人机对话研究提出的三条建议——提供提问训练、丰富提问场景、加强对模型回答的反思[21]。

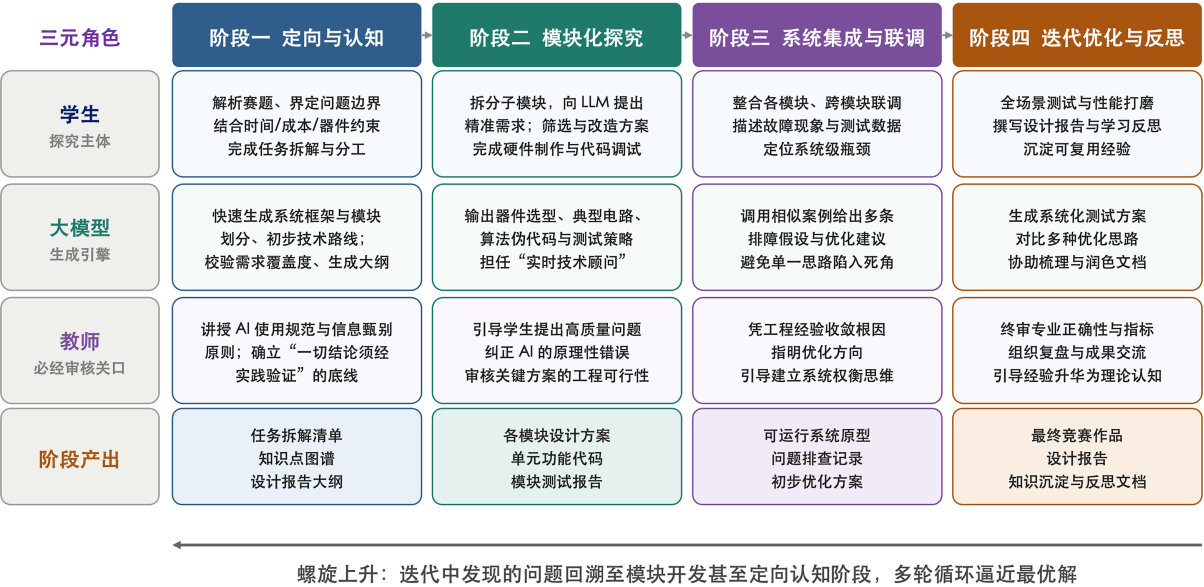
6.3. 从竞赛训练走向常规实训：四条迁移路径

竞赛的受益面终究有限，其育人价值只有迁移到常规实训才能规模化释放。《教育发展“十五五”规划》提出布局建设产教融合实训基地与未来实训中心[2]，为此提供了条件基础。本文提出四条迁移路径(表 5)。

路径一是赛题降维为实训项目：可采取“保结构、降指标、拆课时”的处理——保留系统结构与关键取舍点，按学时把指标分级，使同一赛题在不同课程中反复使用[21]。路径二是把“可控失败”设计进

实训任务：电容烧毁、参数失效、专用芯片不可得都是高价值的学习契机，但在竞赛中属偶发事件；在实训中，教师可主动预置一个 AI 会给出但在本实验室条件下无法实现的方案，由学生自行发现并论证其不可行，其观测点即表 3 中“以采购周期、备货情况否决技术更优的方案”等指标。

路径三是把“必经审核关口”制度化为评审节点：迁移到实训应固化为方案评审、器件清单审核与测试报告评审三个节点，并配套评审要点清单——第 5.2 节所引批注的隐性约束可直接改写为清单条目；这既保证质量底线，又使教师的指导时间从分散答疑转向集中评审[4]。路径四是把提示词与错误案例沉淀为共享教学资源：每一届学生与模型交互形成的提示词模板、AI 失效案例与修正记录均可结构化入库，其边际成本很低，却回应了职业院校教师数字素养的短板[6] [12]。



注：作者自绘，内容依据文献[9] [14]。

Figure 3. Four-phase implementation pathway of human-AI collaborative competition-based education
图 3. 人机协同竞赛育人的四阶段递进实施路径

Table 5. Four pathways for migrating competition training outcomes into routine practical training
表 5. 竞赛训练成果向常规实训迁移的四条路径

迁移路径	操作要点	教师工作重心	政策与制度接口
路径一：赛题降维为实训项目	保结构、降指标、拆课时；把关键取舍点保留为必答环节	任务改造与难度分级	项目化课程改造；“岗课赛证”中“课”与“赛”的对接
路径二：把“可控失败”设计进任务	预置在本实验室条件下不可实现的 AI 方案，由学生自行发现并论证	情境设计与失败复盘引导	过程性考核；实训基地典型案例库建设
路径三：审核关口制度化为评审节点	设置方案评审、器件清单审核、测试报告评审三节点及评审要点清单	由分散答疑转向集中评审	岗课赛证过程性评价；实训质量标准
路径四：提示词与错误案例入库共享	结构化沉淀高质量提示词模板、AI 失效案例与修正记录	资源建设与新教师培训	教师数字素养提升；未来实训中心资源体系

注：本表由作者提炼，政策接口依据《教育发展“十五五”规划》[2]。

6.4. 迁移条件与边界

该框架的迁移不是无条件的：其一，它高度依赖强反馈环境，在缺乏即时反馈的纯理论课程中，以实测证伪 AI 建议的机制将会失效；其二，它依赖教师的双重胜任力——既懂专业，又了解模型的能力边界[12]；其三，它需要与之匹配的评价体系[21] [26]，表 3 的观测量规是朝这一方向的初步尝试。

7. 讨论

7.1. 与既有研究的对话

既有关于 LLM 应用于工程教育的研究，多集中于课程情境中的技术接受度与学习效果[22]，或以系统综述归纳应用领域与工具类型[23]。本系列研究的差异在于把模型嵌入了一个具有真实时间压力、成本约束与评分规则的竞赛工作流，并以三元交互取代此前常见的“学生 - AI”二元对话[9]。这带来两项发现：约束而非能力，往往是决定 AI 建议能否落地的关键变量；教师的价值在 AI 介入后不是被稀释，而是被重新定位到判断与把关环节。学界已对“去技能化”风险表达关切[6] [12]；本文的经验表明，这一风险的强弱高度依赖任务的物质性。

在理论层面，本文把行动者网络的分析工具转译为职教可用的话语。国内相关研究多集中于科学技术的理论反思[17]与治理领域的机制分析[18]；本文表明，当新的物性参与方具备生成能力时，必经审核关口会主动向仍具不可替代性的人类节点迁移，其微观机制是语汇的更换而非答案的提供。

7.2. 研究边界与局限

明确界定结论的成立条件，与提出结论同样重要。本文的适用边界有三：其一是学科边界，核心机制——AI 建议在实物上被即时证伪，从而触发学生的重新判断——依赖任务的强物质性，该条件在电子、控制、机械等工科专业成立，在软件工程中部分成立，而在管理、财经、人文等以文本与方案为产出的专业中基本不成立，后者需以结构化同行评议、真实客户反馈等替代性证伪装置方能复现类似效应；其二是教育层次边界，本文样本全部为高职二年级学生，在本科尤其研究生阶段，审核关口很可能部分下沉至学习者自身与同伴评议；其三是教学类型边界，第 6.3 节的四条迁移路径尚未在班额较大、课时分散的常规实训中验证。

在适用边界之外，本文还有三项方法局限：其一，四项研究均以本团队指导的少量参赛队伍为对象，样本小、缺少对照组与前后测；其二，经验材料是教学过程的自然产物而非预设采样(见第 2.4 节)，只能刻画机制而不能估计效应量，所引引文经作者选取，难以完全排除选择性呈现的可能，表 3 的观测量规亦未经信效度检验；其三，技术中介四年间快速更替，本文关于“AI 建议失效”具有教学价值的判断，也可能随模型可靠性提升而需重新评估。明确这些边界并不削弱本文的价值：教学权责的重排取决于网络中各参与方的构成，这一主张本身就要求研究者交代所观察的是哪一张网络。

8. 结论

本文以竞赛网络分析为主轴，回顾了研究团队 2021~2025 年间的四项连续研究，刻画了工科竞赛育人模式从跨学科项目式学习、经 AI 增强型探究式学习到三元人机协同育人的演进历程。

主要结论有四。第一，三个阶段的实质差异在于竞赛网络的参与方构成与必经审核关口的位移，而非是否使用 AI 工具：教师由知识与方案的核心供给者，先转型为方向引导者与质量把关者，最终成为工程可行性的最终审定者，其重要性被重新定位而非削弱。第二，生成式 AI 的赋能机制具有两面性——它既释放了师生的时间与精力，也通过在真实工程约束下的“失效”，为学生提供了建立批判性工程素养的教学契机。第三，该素养可被操作化为三个维度、六项子维度与十六条可观测行为指标，并可借助观

测量规在四阶实施流程中顺带完成记录。第四, 四年经验可被抽象为“三元权责分工 - 四阶递进流程”的实施框架, 并可经由四条路径迁移至常规实训[2]; 其成立依赖任务的强物质性、学习者尚不成熟的自我校验能力与小规模高强度的组织形式。

未来研究可在四个方向推进: 以多模态模型与智能体为技术中介, 考察竞赛网络的进一步重组[27]; 对表 3 的观测量规开展信效度检验[26]; 以更大样本、跨院校的准实验设计检验本文框架的育人成效; 在文本类专业与更高教育层次中开展对照研究, 检验本文界定的适用边界。

基金项目

本文接受黄冈师范学院教学研究项目“教育大语言模型于现代教育技术的应用研究”(项目编号: 2024CE35)及博士基金项目“似台风涡流通过地形模拟与大语言模型融合应用”(项目编号: 204202535904)的资助, 并感谢历届参赛学生在训练与竞赛过程的投入, 特此致谢。

参考文献

- [1] 中共中央 国务院印发《教育强国建设规划纲要(2024—2035 年)》[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/202501/content_6999913.htm, 2025-01-19.
- [2] 国务院关于印发《教育发展“十五五”规划》的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202606/content_7073640.htm, 2026-06-29.
- [3] 教育部等五部门关于印发《“人工智能 + 教育”行动计划》的通知 教科信(2026) 1 号[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202604/content_7065138.htm, 2026-04-02.
- [4] 曾天山. “岗课赛证融通”培养高技能人才的实践探索[J]. 中国职业技术教育, 2021(8): 5-10.
- [5] 朱永新, 杨帆. ChatGPT/生成式人工智能与教育创新: 机遇、挑战以及未来[J]. 华东师范大学学报(教育科学版), 2023, 41(7): 1-14.
- [6] 徐国庆, 蔡金芳, 姜蓓佳, 李政, 杨惠, 郑杰. ChatGPT/生成式人工智能与未来职业教育[J]. 华东师范大学学报(教育科学版), 2023, 41(7): 64-77.
- [7] Li, Y., Chen, Q., Chen, H.C. and Lin, Y.L. (2021) Project-Based Learning in a Competition of Intelligent Transport System: Knowledge Innovation Viewpoint by Actor-Network Theory. 2021 *IEEE 4th International Conference on Knowledge Innovation and Invention (ICKII)*, Taichung, 23-25 July 2021, 34-37. <https://doi.org/10.1109/ickii51822.2021.9574726>
- [8] Chen, Q. and Chen, H.C. (2022) Project-Based Learning in Competition of Energy-Harvesting Electric Vehicles: Optimal Design. 2022 *IEEE 5th Eurasian Conference on Educational Innovation (ECEI)*, Taipei, 10-12 February 2022, 62-64. <https://doi.org/10.1109/ecei53102.2022.9829471>
- [9] Chen, H.C. and Chen, Q. (2025) Large Language Model-Driven Human-AI Collaboration: An Innovative Approach for Training and Knowledge Construction in Undergraduate Electronics Design Competitions. *Sensors and Materials*, **37**, 3539-3555. <https://doi.org/10.18494/sam5660>
- [10] Kasneci, E., Sessler, K., Küchemann, S., Bannert, M., Dementieva, D., Fischer, F., *et al.* (2023) ChatGPT for Good? On Opportunities and Challenges of Large Language Models for Education. *Learning and Individual Differences*, **103**, Article ID: 102274. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274>
- [11] UNESCO (2023) Guidance for Generative AI in Education and Research. UNESCO.
- [12] 王佑镁, 王旦, 王海洁, 郭府宁, 毛聪聪, 柳晨晨. 生成式人工智能教育应用的“去技能化”危机与应对——基于反转型逆向思维分析框架[J]. 开放教育研究, 2025, 31(4): 97-108.
- [13] Bearman, M., Ryan, J. and Ajajawi, R. (2023) Discourses of Artificial Intelligence in Higher Education: A Critical Literature Review. *Higher Education*, **86**, 369-385. <https://doi.org/10.1007/s10734-022-00937-2>
- [14] Chen, Q., Chen, H.C. and Lin, Y.L. (2024) ChatGPT-Powered Inquiry-Based Learning Model of Training for Intelligent Car Racing Competition. *Sensors and Materials*, **36**, 1147-1161. <https://doi.org/10.18494/sam4726>
- [15] Callon, M. (1984) Some Elements of a Sociology of Translation: Domestication of the Scallops and the Fishermen of St Brieuc Bay. *The Sociological Review*, **32**, 196-233. <https://doi.org/10.1111/j.1467-954x.1984.tb00113.x>
- [16] Fenwick, T. and Edwards, R. (2010) Actor-Network Theory in Education. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203849088>

- [17] 肖雷波, 王秀. 行动者网络理论的马克思主义批判与超越[J]. 山东科技大学学报(社会科学版), 2023, 25(4): 20-28.
- [18] 杨峰, 程越欣. 行动者网络视域下城市智慧治理的主体驱动、转译桎梏及现实路径[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2024, 26(5): 52-63.
- [19] Irish, R. and Romkey, L. (2021) Using Actor Network Theory to Explore Sustainability Issues in an Engineering & Society Course. *Proceedings of the Canadian Engineering Education Association (CEEAA)*, Charlottetown, 20-23 June 2021, 183-189. <https://doi.org/10.24908/pceea.vi0.14960>
- [20] Pedaste, M., Mäeots, M., Siiman, L.A., de Jong, T., van Riesen, S.A.N., Kamp, E.T., *et al.* (2015) Phases of Inquiry-Based Learning: Definitions and the Inquiry Cycle. *Educational Research Review*, **14**, 47-61. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2015.02.003>
- [21] 何珊云, 沈演. 学会提问: 大学生与生成式人工智能协同学习模式的研究[J]. 华东师范大学学报(教育科学版), 2025, 43(2): 34-48.
- [22] Bernabei, M., Colabianchi, S., Falegnami, A. and Costantino, F. (2023) Students' Use of Large Language Models in Engineering Education: A Case Study on Technology Acceptance, Perceptions, Efficacy, and Detection Chances. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, **5**, Article ID: 100172. <https://doi.org/10.1016/j.cacai.2023.100172>
- [23] Filippi, S. and Motyl, B. (2024) Large Language Models (LLMs) in Engineering Education: A Systematic Review and Suggestions for Practical Adoption. *Information*, **15**, Article 345. <https://doi.org/10.3390/info15060345>
- [24] 赵丽, 刘寅生. 教育对话的技术转向: 嬗递路径、应用困顿与范式重构——兼论对 ChatGPT 的逻辑审视及展望[J]. 华东师范大学学报(教育科学版), 2024, 42(8): 76-84.
- [25] 王一岩, 刘淇, 郑永和. 人机协同学习: 实践逻辑与典型模式[J]. 开放教育研究, 2024, 30(1): 65-72.
- [26] Chiu, T.K.F. (2024) Future Research Recommendations for Transforming Higher Education with Generative AI. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, **6**, Article ID: 100197. <https://doi.org/10.1016/j.cacai.2023.100197>
- [27] 顾小清, 郝祥军. 悟空的毫毛: 正在重塑学习技术系统的多智能体[J]. 华东师范大学学报(教育科学版), 2025, 43(5): 16-29.