

面向工业 4.0 的 CPS 多学科交叉融合课程 教学改革与探索^{*}

张广泉

苏州大学计算机科学与技术学院, 苏州, 215006

摘要 本文针对工业 4.0 背景下 CPS 课程建设与人才培养的现状, 依据新工科建设要求与 OBE 教育理念, 通过分析 CPS 多学科交叉融合人才所必需的知识体系和能力要求, 采用敏捷教学与项目式学习相结合的模式, 探索 CPS 课程教学改革与创新人才培养新途径。

关键词 工业 4.0, 信息物理系统(CPS), 交叉融合学科, 敏捷教学, 项目式学习

Teaching Reform and Exploration of CPS Multidisciplinary Interdisciplinary Course for Industry 4.0

ZHANG Guangquan

School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215000, China
gqzhang@suda.edu.cn

Abstract—Aiming at the current situation of CPS curriculum construction and talent training under the background of industry 4.0, according to the requirements of new engineering construction and OBE education concept, this paper explores a new way of CPS curriculum teaching reform and innovative talent training by analyzing the knowledge system and ability requirements necessary for CPS interdisciplinary integration of talents, and adopting the model of combining agile teaching and project-based learning.

Key words—industry 4.0, Cyber-Physical Systems, Interdisciplinary disciplines, agile teaching, project-based learning

1 引言

当今世界处于百年未有之大变局的时期, 全球科技创新进入空前密集活跃的时期。新一轮科技革命和产业变革正在重构全球创新版图, 重塑全球经济结构。以人工智能、量子信息、移动通信、物联网、区块链为代表的新一代信息技术的加速突破应用, 融合机器人、数字化、网络化、新材料的先进制造技术正在加速推进制造业向智能化、服务化、绿色化转型。新一代的颠覆性产业革命已初现端倪, 世界各主要工业强国皆高度重视, 并出台一系列战略规划, 其中以德国的“工业 4.0”和美国的“工业互联网”战略最具代表性。正如习近平总书记的两院院士大会讲话中所指出的那样: “科学技术从来没有像今天这样深刻影响着国家前途命运, 从来没有像今天这样深刻影响着人民生活福祉。”

为适应新一轮科技革命和产业变革的新趋势, 紧紧围绕“中国制造 2025”等一系列国家战略和区域发展需要, 2017 年 2 月以来, 教育部积极推进新工科建设, 先后形成了“复旦共识(2017.2)”、“天大行动(2017.4)”和“北京指南(2017.6)”, 全力探索形成中国特色、世界水平的工程教育体系, 促进我国从工程教育大国走向工程教育强国。根据教育部“新时代高教 40 条”提出的“推进校企深度融合, 加快发展新工科, 探索以推动创新与产业发展为导向的工程教育新模式”的意见, 2018 年 10 月, 教育部、工业和信息化部、中国工程院联合推出《关于加快建设发展新工科、实施卓越工程师教育培养计划 2.0 的意见》, 其总体思路为面向工业界、面向世界、面向未来, 服务制造强国等国家战略, 紧密对接经济带、城市群、产业链布局, 以加入国际工程教育《华盛顿协议》组织为契机, 以新工科建设为重要抓手, 培养适应和引领新一轮科技革命和产业变革的卓越工程科技人才, 服务竞争力中国建设。

^{*}基金资助: 江苏省高等教育教学改革研究课题(编号: 2021JSJG254)。

2 信息物理系统(CPS)与工业 4.0

信息物理系统 (Cyber-Physical Systems, 简称 CPS) 这一术语, 最早由美国国家航空航天局 (NASA) 于 1992 年提出, 2006 年美国科学家 Helen Gill 在国际上第一个关于信息物理系统的研讨会上对这一概念进行详细描述。“Cyber”指的是系统内支持决策的计算机、网络、软件、算法、数据等, “Physical”不仅仅表示物理系统部分, 例如汽车的机械和电气部分, 还包括与系统交互的实体世界, 例如道路和行人。CPS 通过集成先进的感知、计算、通信、控制等信息技术和自动控制技术, 构建了物理空间与信息空间中人、机、物、环境、信息等要素相互映射、适时交互、高效协同的复杂工程系统, 实现系统内资源配置和运行的按需响应、快速迭代、动态优化。

CPS 的概念一经提出, 就受到了全世界的广泛关注, 成为工业发达国家产业界、学术界、工程界共同关注的研究和投资热点。“工业 4.0”是德国于 2013 年提出的国家级战略计划, 旨在提升制造业的智能化水平, 提升德国的工业竞争力, 在全球范围内引发了新一轮的工业转型竞赛。德国在工业 4.0 实施建议中将 CPS 作为工业 4.0 的核心技术, 在标准制定、技术研发、验证测试平台建设等方面做出了一系列战略部署。

我国于 2015 年发布了“中国制造 2025”行动纲领, 提出“基于信息物理系统的智能装备、智能工厂等智能制造正在引领制造方式变革”, 要围绕控制系统、工业软件、工业网络、工业云服务和工业大数据平台等, 加强信息物理系统的研发与应用。《国务院关于深化制造业与互联网融合发展的指导意见》明确提出, “构建信息物理系统参考模型和综合技术标准体系, 建设测试验证平台和综合验证试验床, 支持开展兼容适配、互联互通和互操作测试验证。为全面部署推进制造强国战略实施, 加快推进我国从制造大国向制造强国转变, 《指导意见》把发展 CPS 作为强化融合发展基础支撑的重要组成部分, 明确了现阶段 CPS 发展的主要任务和方向, 对推动我国 CPS 发展具有重要意义。此外, 美国的“工业互联网”、欧盟的“CyphERS CPS 欧洲路线图和战略”等都将 CPS 列为重要研究领域, 通过 CPS 使得数字技术与软件、传感器与纳米技术深度融合并广泛应用于制造领域, 引发生产制造方式新的变革。

目前, 各国政府及组织纷纷开展 CPS 相关领域探索, 尤其在制造业领域, 基于 CPS 的解决方案已广泛应用于设计、生产、服务的关键环节, 已成为智能工厂、智能电网、智能医疗、智能家居、智慧交通、智慧农业、智慧城市与智慧地球等得以实现的基础。

3 CPS 工程教育现状

以 CPS 为基础的第四次工业革命不但引发了新一轮科技革命和产业革命, 也带来了第三次教育革命。当前高校的学科专业设置都是前三次工业革命的产物, 难以适应新时期对创新型人才的需求, 传统教育理念亟待改革创新。为适应第四次工业革命发展需要, 国际工程教育专业认证标准——华盛顿协议 2013 版和 2021 版先后强调了培养学生解决复杂工程问题能力及非技术能力的要求。美国国家科学院、工程院、医学院于 2016 年联合发布“21 世纪 CPS 教育报告”。该报告研究了 CPS 这一新兴领域的知识内容及其对工程和计算机科学教育的影响, 按照工程教育专业认证体系, 认为 CPS 是包含嵌入式系统、软件工程、控制系统、网络通信和系统工程等学科组成的一个新兴交叉融合学科, 强调了开展 CPS 工程教育的重要性和紧迫性。

CPS 将工程和物理世界的应用、计算机工程中的硬件、计算机科学中的信息世界三者联结在一起。物理世界的基本原理包括物理学、数学建模、分析、算法和系统设计。计算机工程与计算机科学世界的原理涉及嵌入式计算和通信硬件系统、软件编程及网络。传感器是物理和信息世界之间关键的硬件桥梁。控制理论是 CPS 的重要基本原理, 相关要素包括稳定性、优化以及如何控制分布式数字系统。根据以上基本原理, CPS 知识体系可包括以下 7 个模块:

- ① 基本计算概念。
- ② 面向实体世界的计算。
- ③ 离散和连续数学。
- ④ 传感、驱动、控制、通信及计算的交叉应用。
- ⑤ 控制、计算和通信融合的异构动态系统建模。
- ⑥ CPS 系统开发。
- ⑦ CPS 系统特性。

CPS 也称为信息物理融合系统, 所谓“融合”, 是将原本被认为是分离和割裂的方法、技术、流程和设备整合成统一整体, 以此推动新的科学和技术进步。2014 年美国国家研究理事会进一步指出“融合”是一种跨越学科边界以解决问题的研究路径, 该路径整合了生命与健康科学、物理学、数学、计算机科学、工程学及更多种类的不同学科, 形成一个全面、综合的研究框架, 来解决那些存在于多个领域交界面上的科学和社会挑战。学科交叉融合有利于回归自然规律和科学技术的本质, CPS 具有多学科交叉融合特征, 其课程内容的广度、深度及创新性都非常强, 这些因素都是过于强调专业化的传统教育理念难以适应的。

本文针对我国传统工程教育在培养交叉融合创新人才方面存在的问题和不足, 依据新工科建设要求与

OBE 教育理念,采用敏捷教学与项目式学习相结合的模式,探索 CPS 课程教学改革与创新人才培养新途径。

4 基于敏捷教学的CPS课程教学模式改革与实践

长期以来,我国高等工程教育始终存在着如教学内容单一、教材滞后、教学理念不够科学、教学评价机制不够完善等问题,严重影响了工程教育改革的可持续发展。新工科建设的目的和要求必须培养一大批具有可持续竞争力的创新人才,传统的教学与人才培养模式已经无法满足社会对人才的需求,如何科学培养高素质的有可持续竞争力的人才是如今亟需解决的重大问题。近年来,我国高等工程教育改革逐渐吸收国际主流工程教育发展的经验,提出了敏捷教学的新概念、新模式。

4.1 敏捷教学

敏捷教学(Agile Education)这一概念的灵感来自20世纪90年代的工业概念、敏捷制造和敏捷软件开发。新产品开发和制造模式必须适应新技术、新产品和新需求的快速变化。例如,敏捷制造出现在20世纪90年代末,形成了一种先进的制造技术。该生产方式集合了敏捷虚拟企业联盟、先进的柔性生产技术和高素质的人才,以提高行业竞争力。此外,在这一时期,软件工程领域兴起了一种全新的敏捷软件开发方法,以用户的需求进化为核心,采用迭代、循序渐进的方法进行软件开发,大大提高了软件开发效率。

展望未来教育的发展趋势,面向可持续竞争力的大规模个性化创新人才培养将是高校教育的基本形态。这种形态将以大学培养目标与学生个人志趣相结合为特征,针对每个学生形成定制化培养方案,不断加强教学过程中教师学生之间的互动研讨,通过教学资源快速和灵活的组织,促进教学内容与环节的快速交替迭代和精准协同优化,实现个性化创新人才培养的目标。我们把这种全新的、主动响应社会需求变化、以学生发展为中心、实行目标不断进化的教学形态称为敏捷教学。

敏捷教学是一种将理论、知识、能力和素养结合在一起的综合教学体系,它是通过提高学生潜在的创新能力和适应变化的能力来激发学生兴趣的一种方法。敏捷教学通过理论、技术、实践交叉并行与快速重构以及跨校跨界教育资源的高效协同,实现知识学习和能力提升的多轮迭代。

4.2 敏捷教学实践探索

敏捷教学强调对培养目标与要求的精准教学,详细分解能力培养目标,对教学内容进行并行重组和迭

代编排。敏捷教学旨在为教与学制定精准的协调程序,通过探索性、主动性和渐进式的学习过程来增强学生的能力。以CPS课程为例:

CPS课程知识点的组织,从课程内容构成大框架角度来看相对固定,虽然在一个学期的授课过程中,一般不会有太大变化。但对于课程建设来说,则需要“不断变化”的。因为CPS学科领域中不断涌现新的技术、方法,新的问题不断被发现。在课程讲授内容中必须结合前沿技术,反映国内外CPS领域中的研究动态。因此每一学期的课程内容和知识点的组织结构,都需要根据前沿技术的发展、研究动态的变化而“变化”。“变化”还体现在动态的教学内容分解、课程环节编排和教学内容迭代。

CPS课程教学内容涵盖跨学科跨领域的基本知识、关键技术和最新发展动态,通过深入浅出的方法提高学生对内容的理解;教师按照课程知识点脉络进行教学内容、教学环节编排时,一方面要和前沿技术相结合,另一方面要和相关的科研方法相结合,使学生在掌握基础概念、前沿技术的同时,还学习科研方法,提升学生的创新思维能力和意识。同时以案例和问题的形式引出新知识点,将学生在教学环节中的问题进行整理、总结和反馈。这种动态反馈使学生更容易掌握课程学习脉络,教师能够及时了解学生对知识点的掌握情况和学习需求,可以提前对教学内容进行针对性的更新迭代。

在课程教学过程中引入敏捷教学模式,关键在于对教学内容、教学单元和知识点按不同粒度进行有效“分割”设计。粒度过大会导致教学知识点内容庞大,不利于在教学过程中采用微课等形式进行教学,粒度过细则导致教师工作量过大。有效“分割”设计教学内容、教学单元和知识点“因材施教”,成为在课程教学中引入敏捷教学模式成功与否的关键。

敏捷教学注重理论与实践的结合。强调将课程式教学和项目式学习相结合,通过更广泛、更深入的实践活动,提升学生的动手能力。

5 基于项目式学习的CPS人才培养模式改革与实践

目前,我国高等工程教育普遍存在着理论课程与工程情境相脱节、教学内容与智能化生产和信息技术相脱节的现象,这些弊端已经成为掣肘中国制造业持续转型升级的重要因素。传统的工程教育模式变革迫在眉睫。近年来,项目式学习(Project-Based Learning, PBL)成为全球教育创新的一个热点话题,正从理论到实践全面开花,给传统教育带来了强烈的冲击。项目式学习遵循OBE理念,以能力培养为导向,从“以教师为中心”转为“以学生为中心”,从“基于知识传

授为中心”转为“基于能力培养为中心”；从学习者的“学”出发，充分实现“以教为主”向“以学为主”转变，加强师生互动；是一种以培养学生解决复杂工程问题的系统综合能力和工程创新能力为核心的新兴学习模式。

5.1 项目式学习

“项目”这个词本身来自于工程界。它为学生提供了一个真实的场景，在探究现实问题的过程中，学生的批判性思维能力、问题解决能力、语言表达能力都能得到较好的发展。项目式学习思想最早源自杜威的实用主义哲学教育，他反对传统的以课堂、教师、教材为中心的教育，主张以学生、活动和经验为中心，让学生参与到真实情境中来思考问题和处理问题，从做中学（Learning by Doing），这为PBL奠定了理论基础。

20世纪初杜威的学生克伯屈（W. H. Kilpatrick）提出了设计教学法，主张学生参与有目的的活动获得知识，最早在美国主要是针对中小學生广泛开展的一些创新学习模式。20世纪70年代，问题式学习（Problem-Based Learning, PBL）被引入到医学、法学、语言学、哲学、逻辑学、数学等领域的学习，这被称为PBL的1.0时代。20世纪90年代，PBL进入2.0时代——项目式学习，这才真正引起教育界的广泛重视。

项目式学习，保留了1.0时代的“从真实问题到真实答案”的最小路径，却强化了问题的结构化和层次感。问题式学习强调知识的获取，而项目式学习更强调知识的应用。项目式学习属于归纳教学法，重视从经验中总结、归纳，它的起点是经验，形成思维的过程是归纳。它与一些同属归纳教学法的探究性学习（Inquiry Learning）、案例式学习（Case-Based Learning）和及时教学法（Just in Time）等学习模式相似，这些教学方法均以学习者为中心，赋予学生更多的责任，学生从现实中构建自己的知识，而不是简单地从教师那里获取知识。PBL既是一种面向学生的创新学习模式，同时也是一种面向教师的教学新理念、新模式。

如今，随着PBL的推广和发展，构成了新的挑战式学习（Challenge-Based Learning, CBL）模式，也称为是PBL3.0时代的到来。

5.2 项目式学习实践探索

项目式学习是一种通过对真实的、复杂的问题进行探究，以小组合作的方式进行项目实施，项目要具有一定挑战度、通过挑战又能完成，项目应体现问题驱动、批判性思维和研究、分工合作、沟通交流、分享和技术手段采用等关键要素，学生在参与过程中逐

渐建构知识网、掌握必备技能、实现综合发展的教学模式。

CPS是一门交叉学科，涉及问题的复杂性强、范围广，因此特别适合跨学科项目式学习。在课程开始学习时，将学生分为若干设计小组，精选CPS典型应用案例，布置若干真实场景中的实际问题（如无人车系统的建模、设计、分析、测试与验证）作为设计项目供学生选择，要求在课程结束后提交项目成果（提交项目设计报告、小组PPT演示），师生共同评价。学生在学习CPS课程内容同时，通过融合课中引入的多个概念和知识来解决具体的现实问题，加深对CPS方法的理解和认识，从做中学、学中做，在团队合作中为这些问题建立完整的典型的CPS解决方案。项目在启动、计划，执行，结题及评价等各个环节，均需要教师的干预、指导和监督。学生完成项目设计，持续地针对实际问题进行系统的学习是教学的关键。项目式学习的实施过程中，教师往往在关键时刻作为引导者出现，其项目目标的实现很大程度上取决于指导教师的引导。由于项目式学习的项目要求具有真实性，它要求指导教师拥有丰富的专业经验和灵活性，并愿意投入较大的精力，以保障能够应对学生在实施项目过程中遇到的未预期到或不熟悉的问题。

经过几轮教学改革和探索，基于项目式学习取得了初步的成效。其中指导本科生参加2018年首届全国高校通识课程论文大赛进入决赛并获奖，多人参加“互联网+”大赛和大学生创新创业训练计划项目；相关教改论文获2020年中国高校计算机教育大会优秀论文奖。

采用项目式学习可以有效地培养学生解决复杂工程问题的系统综合能力和工程创新思维能力，这种创新学习模式对于推进工程教育改革、培养具有创新创业能力的复合型人才具有重要的意义。近年来，教育部大力推进信息技术与教育教学深度融合，构建线上线下混合式教学模式。在智慧环境下探索项目式学习的设计与实施已成为项目式学习发展的趋势。

6 结束语

作为“工业4.0”、“工业互联网”、“中国制造2025”等一系列国家级战略规划的关键技术，CPS因控制技术而起、信息技术而兴，是信息化和工业化深度融合的结果。随着制造业与互联网融合迅速发展壮大，CPS不但成为支撑和引领全球新一轮产业变革的核心技术体系，也给传统工程教育带来了颠覆性创新。本文依据新工科建设要求与OBE教育理念，初步探讨了面向工业4.0的CPS人才培养与课程建设问题。通过分析CPS跨学科复合型人才所必需的知识体系和能力要

求,采用敏捷教学与项目式学习相结合的模式,探索CPS课程教学改革与创新人才培养新途径。

需要指出的是,CPS概念自提出以来,随着物联网、云计算、大数据、人工智能等高新技术不断发展与涌现,已从信息、物理二元空间自然延伸和发展为人、信息、物理三元空间。人机物三元融合强调的是人类社会、信息空间和物理世界的有机融合,物理世界分别与信息空间、人类社会源源不断地进行信息交互,而信息空间与人类社会则进行着计算属性和认知属性的智能融合。2021年5月28日,习近平总书记在两院院士大会、中国科协第十次全国代表大会上指出,以信息技术、人工智能为代表的新兴科技快速发展,大大拓展了时间、空间和人们认知范围,人类正在进入一个人机物三元融合的万物智能互联时代。目前,人机物三元空间的深度融合已引起世界各国的高度关注,也给高等工程教育带来了新一轮的挑战。

参考文献

- [1] 张炜,吕正则.面向工业4.0的高等工程教育变革趋势与应对策略[M].浙江:浙江大学出版社,2020
- [2] 计算机教育20人论坛报告编写组.计算机教育与可持续竞争力[M].北京:高等教育出版社,2019
- [3] 工业和信息化部信息化和软件服务业司,中国电子技术标准化研究院.信息物理系统白皮书[M].2017
- [4] 中国电子技术标准化研究院.信息物理系统(CPS)典型应用案例集[M].北京:电子工业出版社,2019
- [5] 言十.美国21世纪CPS教育报告简介[J].计算机教育,2018.1:2-9
- [6] 朱凌,许星,张炜.CPS与工程教育改革[J].高等工程教育研究,2017.6:24-31
- [7] 张广泉.《形式化方法》课程建设探索与实践[J].计算机技术与教育学报,2021.9(2):59-64
- [8] 宋相君,张广泉.基于扩展混成Petri网的CPS无人车系统建模与分析[J].计算机科学,2017.44(7):21-24