

国际科技竞争环境下高等工程教育改革大势： 新工程教育十大革新理念

陈向东¹, 洪冠新²

(1. 北京航空航天大学法国研究中心, 北京 100191; 2. 北航中法航空学院, 浙江 杭州 311115)

摘要: 分析、总结世界科技飞速发展、国际竞争日趋激烈大势之下的高等工程教育创新思想与实践, 以国际国内相关研究为基础, 综合十大类工程教育特别是卓越工程教育改革重要理念, 并以工程教育的机制创新、教育思想创新、教育方法创新 3 个部分分类归纳相应的工程人才培养理念, 突出本土工程—社会问题导向和面向未知工程世界发展格局, 强调多个具有时代特征的新理念, 如基础科学与解决工程“瓶颈”问题紧密结合、高效产学研构造、跨学科工程原型创造等重要机制和运行思想理念, 以及基于项目的学习、学生为中心的学习、工程教育平台设施开发等方法理念。这些创新理念对我国工程教育, 特别是高等工程教育机构推进卓越工程师教育改革提供政策和研究参考。

关键词: 工程教育; 工程教育理念; 卓越工程; 卓越工程师教育

中图分类号: TB114.2 文献标识码: A 文章编号: 1005-0566(2024)01-0001-11

Ten significant concepts during new engineering education reform under higher engineering transformation in the international S&T competition era

CHEN Xiangdong¹, HONG Guanxin²

(1. French Research Center, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beihang Zhong-Fa Aeronautic Institute, Hangzhou 311115, China)

Abstract: This paper highlights innovative ideas and concepts in higher engineering education reforms, based on urgent economic and social needs for leading engineers in the new science and engineering competition era. By analyzing various research in related topics, 10 kinds of significant concepts are extracted and summarized in three categories, namely, innovative institutions, engineering excellency oriented educational thoughts, and educational methods, actively reflecting urging intensions of local engineering focus and engineering uncertainty in the future world, emphasizing numbers of important characters of engineering education and learning procedures, typically, closer linkages between basic science and engineering bottlenecks, effective government-industry-university consortium, cross-field collaborative prototyping, as well as project-based learning, student-centered learning, and up-to-date engineering facilitating learning, etc.. These innovative concepts and summarized characters may provide useful reference for policy researchers and practitioners regarding engineering education reforms in China.

Key words: engineering education; concepts of engineering education; engineering excellency; education for excellent engineers

收稿日期: 2023-07-13 修回日期: 2023-09-06

作者简介: 陈向东(1953—), 男, 山东淄博人, 博士, 北京航空航天大学法国研究中心特聘教授, 研究方向为技术创新管理、国别与区域技术创新、国际技术转移、高等工程教育比较。

当今工业科技发展日新月异,工程发展的产业边界日趋融合,工业 4.0 及 5.0 等认知框架不断涌现,国际国内相关研究给出的多类现代工程发展时代特点已是目不暇接^[1-3],以互联网、物联网为核心的各类新兴技术集成不断促成新的进化平台,可持续发展、以人为中心的和有韧性有弹性发展诉求(对比相对脆弱的刚性发展)也越来越将工程与社会发展融于一体,今天的工业模式与传统模式关系既有渐进融合观点^[4],也有突变类观测和分析,而突变分析观点就十分注重企业 and 国家间竞争现象。以上这些背景,都赋予了全球科技竞争与合作环境下工程教育,尤其是所谓卓越工程教育改革的紧迫性和工程人才能力诉求的战略意义。

从工程教育前景本身分析,国际上工业和科技发达国家相关研究曾综合高等工程教育在不同工业时代格局变化主要特征,有专题研究报告^[5]站在 21 世纪角度提出以往 100 年间工程教育的 5 个主要变化方向,均以知识和能力的增长效率为聚焦点。本文提炼如下:①强调工程精准,从经验型教育转向强调工程科学和数据分析;②强调工程产出,从知识输入型转向产出(成果创造)型教育和学分制;③强调工程总体观,从工程环节知识过硬转向工程设计过硬型教育;即所谓“设计”为统帅;④强调工程人才多面成长,从相对聚焦的专业教学为核心的单维教育方式转向宽学科教学、交互型学习、社会行为结合的双向或多维教育方式;⑤强调工程能力对动态和未知状态的把握,从即成知识型教学转向某种未知工程背景下的信息、计算、沟通技术、跨学科集成型动态知识教育。

有关工业 5.0 时代的教育研究^[6]甚至强调工程技能(engineering skills)、数据熟练能力(data-fluency)和社会伦理(负责任创新等)应成为多种类学科学生必须具备的能力要求^[7]。

事实上,我国科学家和教育家早在 20 世纪 90 年代就曾十分注重工业新格局发展与工程教育变革问题。如中国工程院院士翁史烈^[8]曾就 21 世纪高等工程教育强调五大趋势,即工程教育与科

学研究,工业生产一体化趋势,科学技术综合化趋势,社会理性化发展趋势,国际化趋势,工程教育终身化发展趋势,并由此提出工程教育 5 个“加强”,即加强教师与学生沟通和言传身教、加强人文科学教育、加强工程教育的产学研结合和加强学校管理体制变革等,还特别建议强化国内国外企业、科研、高校之间的合作办学关系等,体现了我国工业实践为基点的工程教育改革要点。

而从我国工程教育实践现状看,仍存在很大改革和创新空间。根据沈锦璐等^[9]的研究,我国现有工程教育和人才培养体系、组织架构、学科分类等仍受到“路径依赖”和“学科壁垒”影响而升级缓慢的问题,表现为学科与产业适配性不足,急需在新工程变革和产业转型中适应“新工科”人才培养需求;从工程人才现状看,目前我国工科毕业生供给的结构性过剩与短缺并存,专科层次和研究生层次工科学生供给不能完全满足企业和行业需求,人才培养链与国家创新链、产业链对接还有待增强。特别当“中美贸易战”、疫情冲击全球经济时,我国企业加快自主创新研发,高等工程教育机构发展和工程知识与能力培养建设尤其需要适应并领先企业的发展需求,需要更多考虑我国企业和产业长远和潜在的质量型发展需要。

我国经济建设已经进入质量型发展新时代,卓越工程和卓越工程师人才的培养迫在眉睫。习近平总书记号召“培养大批卓越工程师”,以加快建设国家战略人才力量,是我国建设开发新时代人才队伍特别是科技人才队伍的重要部署。尽快推进工程卓越的人才队伍培养和教育,时代责任均感十分紧迫。

从上述分析也可看出,对于我国工程教育的改革创新、推进卓越工程师教育发展,教育创新理念极其重要,工程教育理念必须先行,其意义在于:①领先的工程教育理念和智慧将提高新时代工程人才队伍需求的响应速度;②理念和智慧领先的工程教育模式转换将引起工程教育结构变革,并可能引领下一代(可持续发展)工程教育走向;③理念和智慧领先的工程人才队伍将主导本

土工业和产业发展未来,在未来世界典型产业发展中赢得战略主动。

本着上述思考,综合比较国际国内相关研究,本文提炼新工程教育发展十大创新理念,并将其归纳为3个教育理念类型:①使命驱动型工程教育机制创新理念;②反映工程卓越化的工程教育思想创新理念;③旨在提高知行效率的工程教育方法创新理念,供我国工程教育界的学者和学生参考。

一、使命驱动型工程教育结构创新理念

使命驱动型工程教育结构创新的类型,强调从国家和区域发展历史和发展战略角度总结分析、理解工程教育创新的结构和体制创新特点。

(一)融入中国特色使命内涵的我国新时代工程教育机制理念

卓越工程师应当是一种肩负国家和产业使命的产业工程人才队伍,这样的概念本身就具有国际市场竞争背景和国际政治发展视野,特别值得站在新兴经济体国家和地区的立场,适应赶超经济和自主创新发展的需要,进行恰当总结。

事实上,有关我国高等工程教育发展与改革的以往研究工作也主要突出了体制和结构建设的发展和变革^[10-11]。我国高等工程教育体系建设经历了工业化道路选择与教育改造和调整阶段,特别是改革开放40余年工程教育跨越式发展,取得突出的学科建设和工程人才培养成果,举世瞩目。

综合来看,我国新时代工程教育的制度创新和历史发展,具有高等工程教育服务中国特色社会主义国家建设的时代使命。其包含的重要理念表现在以下几个方面。

(1)“领军型”工程师培养,突出胜任“中国创造”,以国家发展战略的“使命”型问题入手,以需求驱动新工科模式转型,以“使命驱动思维”“问题驱动思维”重构“领军型”工程师培养模式转变;基于我国工业特别是关键制造领域的使命、问题和需求导向运行机制,强化使命内涵的工程教育改革和探索重要方向。

(2)产教协同驱动教学、创新研究、社会发展

需求服务,三者合一,是落实我国工程教育革新的重要方面。

(3)构筑学生、学术、学科一体的综合发展体系,加快构建中国自主的知识体系,也为我国工程教育改革和发展提出了更为紧迫的要求,尤其需要结合我国工程发展特征。

主要表现在以下几个方面。

①卓越工程教育立足我国社会经济发展实际,从人口众多但自然资源有限的状况,我国卓越工程教育需要解决工程人才队伍培养与国家产业战略需要和人民生活水平持续提高、可持续发展的匹配等问题。

②卓越工程教育立足我国新时代中国特色社会主义建设特征和制度与文化自信内涵。

③卓越工程师教育立足全球经济协同发展理念,本着人类命运共同体理念,融入全球和区域经济的可持续发展。

我国自2010年启动“卓越工程师教育培养计划”以来,聚焦我国工程经济的创新能力、聚焦适应经济社会发展需求、高质量高标准的工程技术人才,促进我国从制造大国向制造强国转变的需求。习近平总书记在2021年9月27日举行的中央人才工作会议上曾特别指出“要探索形成中国特色、世界水平的工程师培养体系,努力建设一支爱党报国、敬业奉献、具有突出技术创新能力、善于解决复杂工程问题的工程师队伍”,强调有一种“突破常规、创新模式,重视科学精神、创新能力、批判性思维的培养教育”“要建立交叉学科发展引导机制,培养高水平复合型人才”。这些新时代中国特色社会主义的预期培养目标,也是未来工程教育改革方向,显示出中国式现代化国家的工程人才培养和工程教育发展重点。

(二)科学与工程紧密联系的工程教育机制理念

国家层面高等工程教育的发展事实上一直体现着科学与工程的某种联系,但这种联系在教育体制、构造、政策上仍然存在较大国别演化差异,如Focacci等^[12]对英国、美国、德国和瑞典4个国家在1830—1970年间教育与人才培养的比较研

究,突出了教育政策对其技术革命与工程发展的作用差异。强调科学与工程의 紧密联系,并将其发展与国家科技竞争力,乃至科技霸权政策相联系,美国是其政策发展的重要发源地,有其鲜明的国家功利目的,但需要看到的是,由于“工程”的概念比较“技术”而言更为体系化、实践性强,因而科学与工程联系的工程教育规律有其合理性。

美国很早就在高等教育上重视的是工程教育(Engineering Education),并建立相应的工程教育组织(如美国工程教育协会, American Society for Engineering Education, 1946 年成立)。从美国工业及其工程教育发展历史特征看,工业工程实践提出的重大“瓶颈”问题往往是高等工程教育机构基础科学领域纵深和延伸发展的契机,是一种产业—大学—产业的知识发展脉络,基础科学具有服务于工程发展需要的流动品质,如兰赛勒理工学院(Rensselaer Polytechnic Institute, 1824 年)是美国最早建立的提供工程教育的高等学校,当时主要为解决本地农业和市政与运河工程问题开设相应的学位和课程体系;早期密歇根大学、哈佛大学、耶鲁大学等包含的工学院形式虽有不同,也都是与当时当地工业发展需要密切结合。从现代工业和工程教育发展的历史看,北美国家相对欧洲国家教育机构的知识发展起步根基相对不足,因其经济发展急需,现实需要紧迫,遂成为其高等工程教育与工业界较为融洽关系的一种传统,科学与(工业)工程的术语传统一直持续至今,美国的工业和科技政策术语中,科学总是和工程并列,并非和技术并列,也是一种典型表现。

还需要特别指出的是,随着美国国际政治霸权需要的变化,美国高等工程教育发展越来越成为其科技工业霸权的重要支撑力量之一,特别表现在常规型产学研联盟运行机制产生所谓“竞赛规则转换器”类型的新科技,以及政策急要时(所谓“国家安全挑战”时)快速反应的政府—产业—高校合作机制,这种合作机制及其产出已经成为美国科技霸权运行的一种结构性制度资源。因而高等工程教育机构与产业界的积极联系及其工程

人力资源育成体系也成为国家科技发展体系化关键一环,甚至成为其工程科技安全预警和控制线的参考。其体系和运行方式既有值得警惕的一面,也有值得参考借鉴的一面。

(三)嵌入产学研联盟、紧密型校企合作的工程教育机制理念

高等工程教育为工业特别是多种多样的创新创业型工业提供新思想,促成产学研(即高校—产业—政府三螺旋)知识创造过程,这一“三螺旋”现象在科技和工业发达国家首先总结和提出。美国在 20 世纪 60 至 90 年代发展的新工业类型,特别是伴随着硅谷这样的高技术工业诞生和发展,孕育出高等工程教育机构产生新科技思想、新工程方案创造新工业的强大力量。所谓产学研(即 UI 以及后来的 UIG,高校—工业,或者高校—工业—政府)三螺旋结构即成为工程和产业知识创造、再造的关键运行结构;其中高等工程教育机构往往占据三螺旋结构的制高点,“硅谷”为符号的产学研结盟创造经济奇迹的例子不胜枚举,并经过北美、欧洲不断活跃并扩展到东南亚。我国自 20 世纪 80 年代改革开放迎接了这一轮科技大潮,政府适时推出和实行的科技第一生产力各类政策,促进产学研联盟和科技园区不断发展,使得我国各地高科技经济大踏步前进,成果斐然。

值得注意的是,自美国政府 20 世纪 50 年代发表《科学——永无止境的前沿》,以曼哈顿计划为蓝本,将其国家工程科技政策作用推向前台,形成了典型的“政—产—学”结构,2020 年再通过所谓“科学前沿”法案,更聚焦科技工程资源的“政—产—学—研”联盟,尤其聚焦那些以信息和网络技术为重要领域的颠覆型产业工程,推进具有战略意义的路径开拓型的技术单元创新,其政府政策参与的技术和工程主题选择与企业级别的市场研发热点相辅相成,共同形成重要的产业工程技术发展源泉。在这一轮政府政策积极参与的高校联盟中,高等工程教育机构不但是重要的知识创新和人才产地,同时经由政策和市场作用,其科技和工程外延机制也决定了国家、地区意义上未来

工业工程前景和卓越工程发展方向。值得重视的是,政府政策地位占据了这一轮“三螺旋”机制的制高点,以“政—产—学”形式推进关键领域和主题科技工业发展。由此看出,在国际市场乃至国际政治竞争的大背景下,伴随着知识工业和智能经济发展时代,政产学研联盟力量及其运行机制成为重要的工程科技组织资源,确保新工程技术的原生机制,同时也成为多样化产业关键技术储备平台。一方面,高等工程教育机构的作用越来越大;另一方面,“政产学”运行机制也赋予高等教育机制内涵中更多的国家战略意义。这一发展也值得关注和借鉴。

我国政府科技政策积极支持新技术、新工程创造,特别是具有产业和工程技术教育的方向性政策促进了政府—高等工程教育—工业工程三者之间的知识再造,反映了具有“政—产—学”联盟意义的紧密型校企合作和知识再造过程,并取得突出的科技成果,积累了多方面经验,包括工业价值链意义上的知识再造。如朱正伟等^[13]曾就此提出,中国特色工程教育应注重按照工业价值链重构人才培养模式,同时应十分强调与中国工业界融合过程中的人本主义教育观和实践主义教育思想,突出产学研结合体,按照中国国情和实践相结合的原理,以国际工业价值链发展规律重构人才培养模式。

二、工程卓越和科技进步引致的工程教育思想理念

工程教育思想创新的类型,强调其中适应工程卓越的最新发展和变革,反映其中工程的社会、经济影响和产业科技提升规律对工程人才能力的需求特征,其工程教育思想创新十分重要。

(一) 数学支撑工程攻坚的工程教育思想理念

所谓科学、技术、工程和数学(STEM)知识构成作为学习科学和工程领域的教育发展由来已久。在其内涵元素中,数学和物理学原理及其基础科学研究越来越被认为是当代工程科学和产业关键技术发展的极其重要的思想和方法支撑资源,贯彻了一种基础科学研究服务于产业工程技术发展的运行逻辑,尤其体现在那些可能影响关

键产业发展的关键器件制造过程上。

美国最早提出 STEM 4 位一体的知识和教育内涵,其发源地是在西点军校的美国军事科学院,与当时的沃彻斯特技术学院(Worcester Institute of Technology)所实行的学徒式经验型工程教育内涵体系并行发展,代表了一种基础科学与现代工程技术发展的原型知识体系。进入 21 世纪后,以 STEAM(加进了艺术科类以扩大人文领域)为核心的本科工程教育甚至成为其国家安全体系关键组成部分,一方面反映美国国内社会总体工程人才短缺和相应大众工程教育迟滞^[14],另一方面也反映其科技霸权政治政策急需。

此外,数学的发展在西方国家科学文明中还有一种宗教信仰背景,数学思想与元素发展往往扮演自然世界最终解释力的某种功能寄托,无形中也促进了认识自然世界和创造工程世界、发展工业科学的一种思维惯性。

进入 21 世纪,欧洲国家高等工程科学发展所表现出的数学与工程方案密切结合的趋势更为显著。如德国曾在 21 世纪初的 10 年中,明确提出“数学是一种关键技术”的口号,并由政府职能部门专门推出以此口号命名的系列支持项目,事后出版相关成果专著^[15],通过 280 个典型项目中的出类拔萃者,显示了数学可以作为解决产业界关键工程问题的“关键技术”,由此促进了基础科学尤其是数学对于工程科学的推进作用,同时也促进大学、研究院与工业界的联系。该系列著作选取获资助的 280 项典型专题中的 40 多项数学作为关键技术的例子,突出了前沿数学学科在微电子工程、薄膜技术和集成电路工程、计算机辅助医疗、交通和能源控制、金融和保险业风险管理等重要产业领域中的有效应用。这些例子说明,工程与数学的联系可以解决产业和工程专业的深层次问题,促进工程科学的前瞻性和本国、本地实践需要,打造高质量工业资源及其可能领先世界的工程科技资源储备。

我国著名数学家华罗庚有句名言,“科学是踏实的学问,连贯性和系统性都很强,前面的东西没有学好,后面的东西就上不去;基础没有打好,搞

尖端就比较困难。我们在工作中经常遇到一些问题解决不了,其中不少是由于基础未打好所致”。这些话对我国科研和制造部门突破“卡脖子”技术仍然有其重要启示意义。数学作为典型基础学科,其本身也在发展,掌握最新的数学思想和方法的阶段性成果,对从根基上解决重大工程问题有重要意义。时至今日,人工智能学科及相关工程领域的进展过程中,数学正在成为一种关键技术发挥着重要作用;与此相关,数学这种关键“技术”也在成为工程教育中的重要基础。国际上高等工程教育机构都在加大数学学科的教育。北京航空航天大学中法工程师学院引入法国中央理工教学方法和理念,其重要组成之一就是强化数学的学习,学生可由演化式教学强化基础理论和思维方法,比较顺利进入算法、智能、信息,乃至金融工程领域开展后续研究和实践工作。

(二) 创造为先的工程教育思想理念

传统工程教育发展往往遵循专业专精型工程知识和能力培养体制,对应的是工程专业知识和经验的渐进和累积方式,以此不断打造特定工程和技术路径上的知识世界。毋庸置疑,此类工程教育理念仍然有其重要地位,尤其在复杂技术和体系型工程领域,如航空航天、核发电设施、化工过程设施等等。与此相向,以创造为先、在未知领域上拓宽视野开展知识创造(或称路径开拓)的类型,也在成为工程教育的新兴理念和实践范式。这类工程技术路径开拓型的创造为先型教育,也被描述为注重“从 0 到 1”的颠覆型新技术和工程创新型教育。虽然上述两者(路径专精型和路径开拓型)都需要基础科学知识和研究的训练,但知识密度和能力分布方式有很大区别。

国际上创造为先的工程教育理念发展主要聚焦的是跨学科合作,追求工程新创意和新设计。如美国麻省理工学院(MIT)于 2017 年推出“新工程教育转型(NEET)”项目,并自喻为世界上培训工程师模板,其运行要点主要突出的就是创造为先:①跨专业合作,互动式学习和项目为中心的学习;②实践口号是创客、发现者、交叉学科、创意社区(合作);③鼓励积极分析思考、动手解决问题、

全新点子、社团形式的合作等运行要点,目的是激发、支持有“趣味”的新项目。

此类追求颠覆型工程科技主题的创新活动及其能力培养,其发生发展反映科技发达国家高等工程教育改革重点,注重“路径创新”类型的工程“卓越”,注重领先型技术路径,注重通过团队合作实现工程原型(prototype)创造;随着国际科技竞争与合作的发展大势,创造为先的工程教育思想及其改革也应当作为我国高等工程教育发展的一种重要参考。

同时,本文也希望强调,从工程知识能力集成的复杂性角度看,专业专精作为一种传统上的卓越型工程实现,对发展中国家、特别是像我国这样在现代制造业中快速发展并正在迈入工程前沿的新兴经济体国家而言,其地位更为重要。这类工程“卓越”更多体现在对高质量工程实现的把握上,相对于“从 0 到 1”,这类本文描述为工程世界中“从 8 到 10”的类型更具有工程卓越的强基作用,但还需要特别关注这种类型的卓越内涵中基础科学的动态支撑特征,即在新工程时代,专业专精类型更应紧密联系基础科学研究能力,通过工程教育的创新实践、通过产学研联盟加以推进。对我国工程经济发展而言,将解决现行关键工程重要问题作为首要,特别是我国被“卡脖子”的高精尖产品及其工程难关,其中大多与相关基础科学问题辨识和提取不足、基础科学研究聚焦不够、工程—科学反馈信息通道不畅等有关,综合反映为基础科学研究支撑能力不足,而这正是高等工程教育机构应当负起责任的领域。

如果从今天科技进步面临前所未有的工程未知和不确定局面来看,“从 0 到 1”和“从 8 到 10”的工程创意和实现都是需要的。一方面,需要通过多学科、跨学科组合和集成,形成新兴技术路径开拓;另一方面,结合我国工程实践需求和知识、能力通路,创造出独特的、高质量的工程技术路径,这样两类工程教育模式和内涵应当并行不悖,协调发展。同时,从联系基础科学研究的支撑作用而言,专业专精进取意义上的工程进步也需要一种创造为先的理念。

(三) 融入风险意识的“挑战型”工程教育思想理念

随着现代工业工程发展的日趋复杂,特别是路径开拓性工程技术的发展需要,工程失败比率日渐升高,需要现代卓越工程师及工程技术人员有必要的能力和方法应对。融入风险意识的“挑战型”工程教育理念应当是一种必须的教育思想和方法探索需要。

工程教育注重面临未知世界的应对能力,本质上就是一种风险型教育的工程人才培养方式,其最典型的对应场景是航空航天,因其面对的往往是人类未知的世界,需要提出并实现没有或很少人类工业文明经验的工程解决方案,相应的工程人才教育的理念核心是“挑战”。事实上,国际和国内相关工程教育也有这样的教育理念革新,即所谓“基于挑战的学习方式”^[16],对应的工程领域就是航空航天领域。其中主要的工程教育理念及其内涵元素包括:①并行工程(concurrent engineering)与并行设计(concurrent design);②开放型并行设计工具(open concurrent design tool);③行为动机诊断(motivational diagnosis)及其装置;④基于问题导向的学习(problem based learning, PBL);⑤研究问题定义(research questions, RQ);等等。

在面对未知世界的“基于挑战”类型的工程教育方面,问题的发现和定义、工程师个体和群体的行为动机本身、确定问题之后的学习机制、兼顾多种可能危机和风险应对状况的更为灵活的“并行”理念,都是重要的工程能力素质内涵。其中,能够容纳多种未知风险处置可能性的“挑战”理念具有最为关键的意义。

(四) 设计统帅工程体系的工程教育思想理念

设计统帅工程体系的理念,典型概念叫作“面向制造的设计”,即DFM(design for manufacturing),是一种强调制造和产出体系化运行的工程理念,其理念本身并非完全针对工程教育,但其工程知识和能力需求的侧重意义,自然对相应的工程教育内涵和能力培养提出了要求,也应看作是对工程教育改革的要求^[17]、有关融入数字技术突出设计理念的教育方法的国别研究^[18]以及引入社会机器人设计

理念的研究^[19]等。

作为工程教育理念,设计统帅工程体系的运作思想主要突出了3个要素。①实物产出。面向制造的设计强调工程活动的系统性产出,而非纸上谈兵的原则性蓝图,也不是组成工程体系的某些重要环节的设计和原理,而是需要一个系统性的整体产出。②可工程化。面向制造的设计强调的是从总体到部件的可工程化,而非仅仅是一种原理图或系统仿真,必须解决可能的工程化问题。③全寿命。面向工程的设计也是一种着眼于全寿命工程系统的全局性观念,即将工程运行的近期和直接目标与远期辐射效应,包括社会效应结合起来,避免工程结束之后由于后续出现的工程效应新问题(包括工程的社会效应问题)而必须对原有工程补充、修正乃至推翻再造。

这一理念在工程教育发展实践中会反映为两个关键环节。一是理念引导。实现工程教育变革,即从传统上工程系统典型环节入手的知识和经验教育,转化为集成各个环节、注重工程总体效应的全局型工程教育。二是注重实践。强调面向加工制造(Design for Manufacturing, DFM)、“产出为王”,将系统设计直接与实物制造产出联系起来,而非仅仅纸上谈兵的“原理”设计。其实践要点为:①全局观点,考察产品运行效果而不是以后发现问题再进行修改设计的方式,此种教育和运行理念不容事后补救,而是必须事前考虑所有可能因素和效应;②整体观点,并非仅在零部件层次,而是更注重整体构架及其关系的教育理念;③合作观点,不仅仅靠DFM工程师完成,也靠外部关联者与企业制造者,同样,DFM不能仅靠工作室内的工程师们来完成;④实践检验观点,不靠某种“工具”来完成,必须有相应的实践(测试)检验。

如果从卓越工程层面考虑,下列“设计”更能覆盖“工程卓越”的知识和能力:①引入可靠性工程设计团队(即DfR, design for reliability team),典型成员角色应包括专攻零部件工程师、专攻工程失败的物理学专家(机械或材料等)、专攻加工制造的工程师;②优质工程(或称卓越工程)的工程

制造设计,即所谓 DFE(design for excellency),除工程专业之外,还必须融入人文、社会科学知识和意识元素。

可以说,上述“设计统帅工程体系”的理念,既是工程教育思想的创新理念,也是一种工程教育运作方法的先进理念。

三、工程教育方法创新理念

工程教育方法创新的类型,希望强调其中教育方式革新过程中的新着眼点以便适应工程人才能力培养需求,以此分析、实践相关工程教育创新活动。

(一)基于项目的学习方式(project based learning, PBL)

基于项目的学习方式是配合重视工程产出及其能力培养的一种典型学习方式,也代表了新型的工程教育教学法的理念革新,并与以往教师为中心、以知识学习为中心的学习方式形成对照。

实践上其运行要点关系 3 个关键环节,即跨学科、团队合作、真实世界的工程问题,突出了解决现实工程问题的核心目标。该教学法认为,这 3 个关键环节会使工程教育瞄准和应对真实工程世界,特别有助于卓越型工程师解决工程难题的实际能力培养,因而这三要素也是保证项目产出的积极结果的有效教育理念。

实践证明,这类基于项目的学习方式,项目本身的设计相当关键,有关教育机构还给出了 PBL 教学模式的 5 个基本运行原则:①项目选择必须反映真实世界中存在的两难问题;②项目运行必须具备学生之间多样化学科知识背景下的合作;③学生必须提供包含观测环节的多种解决方案;④项目方案中应含有最新的技术元素;⑤项目完成必须提供一个制成品。

值得强调的是,PBL 教学方式实际上包含了面对未知工程世界的 3 个环节,即项目本身的设计和定义、项目运行过程(如上述运行原则的要求)、项目成功或合格的检验方式。起始阶段的项目主题设计十分关键,它决定了工程预期质量水平和工程教育的水平。可以看出,这类教学方法的理念变革本身就是一种创新型的工程教育改革,其

整体运行可以说是一种面向未知工程世界的“求生”或“求成”型团队合作,寓教于“成”赋予了以学生团队为中心的学习、创造、挫折、再造直至成功的探索型工程能力,大大提升工程教育过程的学习氛围和学习质量。

(二)以学生为中心的教育方法理念(student centered learning, SCL)

以学生为中心的工程教育理念,是与传统上以教师为中心的教学方法相对的学习模式,既是学习方式的变革,也反映对工程教育内涵的一种新理解。

以教师为中心的工程教育,针对的工程学科知识类型,应当是相对成熟,较少甚至没有变化,技能上的训练较为程式化,是经验积累型的技能和知识学习类型。而与此相对,以学生为中心(SCL)的学习方式,站在学习者的角度,反映的是一种面对未知知识世界的学习场景。

同时,本文也倾向于说明,以学生为中心和以教师为中心的学习方式各有其适应的学习场景。本文设计了合并两种学习方式并与工程知识已知和未知场景相结合的图解形式(见图 1),演示出多种可能的工程教育格局和方法定位,从中可以体会以学生为中心的教育理念的必要和先进之处。

其中,以教师为中心的一对多授课的传统方式过渡到以学生为中心的学习模式存在两种通路,通常的过渡场景应是图中所示经由左上角的教师引导方式(路径 I),是本着教师对相关工程主题更为全面和深入理解的基础上的教学情形。但如果更为强调学生面对未知工程场景的学习情形(例如某种在研工程项目),则更有效率的学习方式应是由右下角过渡模式(路径 II),即有教师参与的、主要靠学生(包括多学科交叉背景的学生)合作学习的形式,而这正是现代工程教育可能采用的创新型学习模式。

如果再考察此类 SCL 教学方式的缘起和发展背景,则其中更有工程教育战略性转换的意味。以学生为中心的学习方式是一种更能适应工程对象多变、工程未知状况频繁出现场景下的教育。

换句话说,这种学习方式更适应于针对未知工程世界的研究型教学,学生针对某种未知工程背景,以所学所知为基础,经过个体特别是群体团队合作探索和研究,最终产出一种或多种解决方案。在此种认知和学习过程中,由此途径培养出的学生应有更高工程应变能力,应付知识工业时代的复杂工程问题应更为自如、自信。

从图1还可以看出,以学生为中心的学习方式

(特别是圆形虚线框内的部分)具有创造性以及对于未知工程世界的柔韧性。同时,还应意识到,SCL学习方式作为一种新的工程教育理念,其发生发展还应当与以教师为中心的学习方式保持适度平衡和协调,而并非在任何情景下都能完全取代的关系。显然,以教师为中心的学习方式在理解基本的工程理论分析框架、理解典型意义工程问题类型的学习活动中还是必要的。

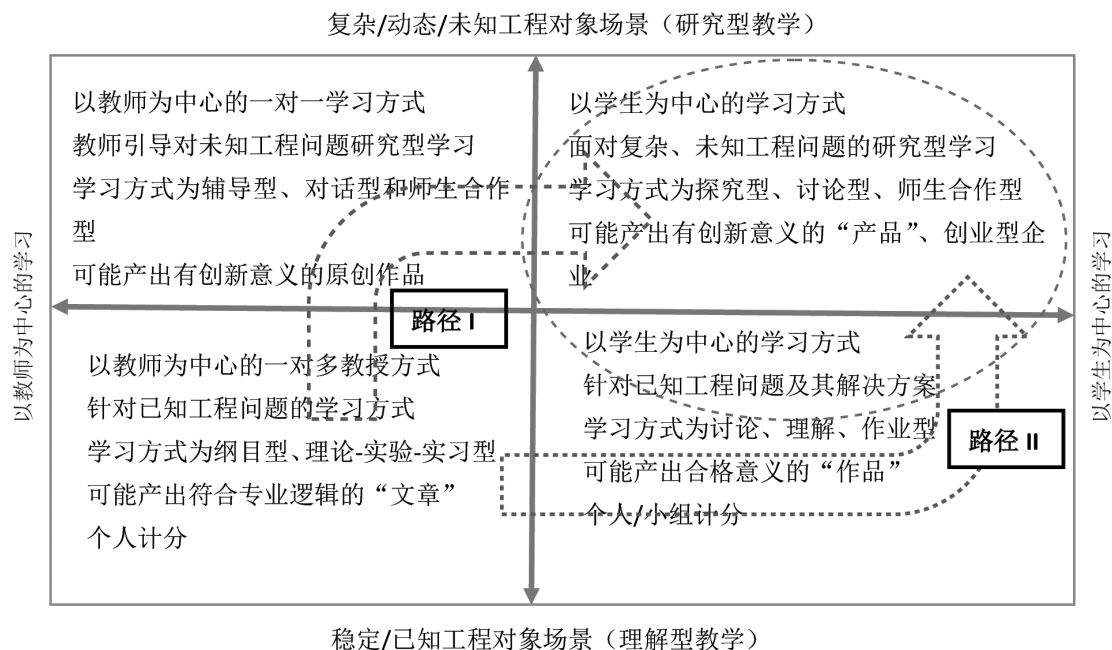


图1 以教师为中心与以学生为中心的学习方式——教育理念对比

（三）卓越工程师教育的“学习设施”平台开发理念

现代工程教育,特别是面向所谓卓越工程师的培养和教育体系,必须建设和升级相关的教育和运行设施。这些设施更多表现为一种软硬件结合的设施,而非仅仅是昂贵的实验设施和工业设备、装备。这种所谓“设施”更多反映的是一种工程专家、科学家、工程师类型的教师和工程学生的合作机制,是一种与各类专业设备(包括自制的设备)融合为一体的平台型工程智慧设施,甚至具有相应学习机构的本地智慧特征。

德国柏林工业大学学者 McFarland 等^[20]曾以德国工业工程发展经验,提出了一个有关工程教育综合“设施”及“环境”体系组成。①学习设施(learnstrument),强调其功能为面向学生(包括在

职学生)的实践性学习活动,可扩展学习概念与学习内容的设施;学习设施应具有明确的学习目的及其贯彻路径。②学习工厂(learning factories),强调其功能为通过学习过程、学习规则、实践产品以及某种教育概念来定义的学习环境,借以建造一个基于经验学习的模拟真实工厂的实践模型。③项目导向的教学和学习设施,强调教师和学生之间的互动平台,强调反映学生个体需要的情境,特别是能充分体现现实情境下完成一个完整项目的平台。④跨国情境渗入,在跨国情境下实施项目导向的学习和工程教育平台,表现为更为现实的可持续型工程教育模式。

其中,前两个方面是所谓工程教育体系的基础部分,而后两者则是针对不同知识难度和学生情境而融入个体(也包括了作为学习机构群体意

义上的机制个体)认识和社会文化的动态部分。因此,工程实验室建设本身也是工程教育的重要平台,因而融入其相关教育理念的教学设施建设应是其重要的教学方法创新理念的表现。

根据 Chen 等^[21]的研究,英国帝国理工学院曾将其工程实验室分为 3 个类型,分别服务于本科工程学生 3 个学习目的(持续 3 年),即基础理论、专业知识、专业发现,十分强调其中的团队“动手”型学习,并分别有相应的工程教育方法理论支持,如 Kolb 的经验学习理论、Vygotsky 的近端域开发(Proximal Zone)理论等。这些实验室平台的学习方法设计都注重跨学科、不同类型的能力和知识领域交叉特点,而其最终学习目标不在于个体学习成绩排序,在于工程学生群体的优秀与满意水平比率(以评分和实际调研方式,该论文得出 2014—2016 年学习的工程学生优秀与满意比率大于 96%)。

北京航空航天大学中法工程师学院引入了法

国高等理工的工程教育方式,包含了工业科学和相应的教学和学习设施。其中,工业科学实验室成为工业科学相关课程的重要学习场所和平台,学生以团队形式、中外交流方式从中体会和学习各类基础学科知识与工程实践相联系过程中的“原型工程”规律。

四、总结

本文总结国内、国际相关主题研究,归纳出 3 大类现代工程教育新理念并加以分析,从中可以看出,这些教育理念有一定的内在关联,也有不同类型的主题聚焦,但都对卓越工程教育改革有直接的关切。其间相互支撑和发展关系如图 2 所示。其中,工程教育体制创新理念反映其使命驱动和教育改革战略性;而工程变革引致的教育思想创新理念则突出工程卓越的能力需求,工程教育的方法创新理念更提供相应的教育方式上的创新实践。综合起来,这些工程教育的理念创新意义可以总结为以下几点。

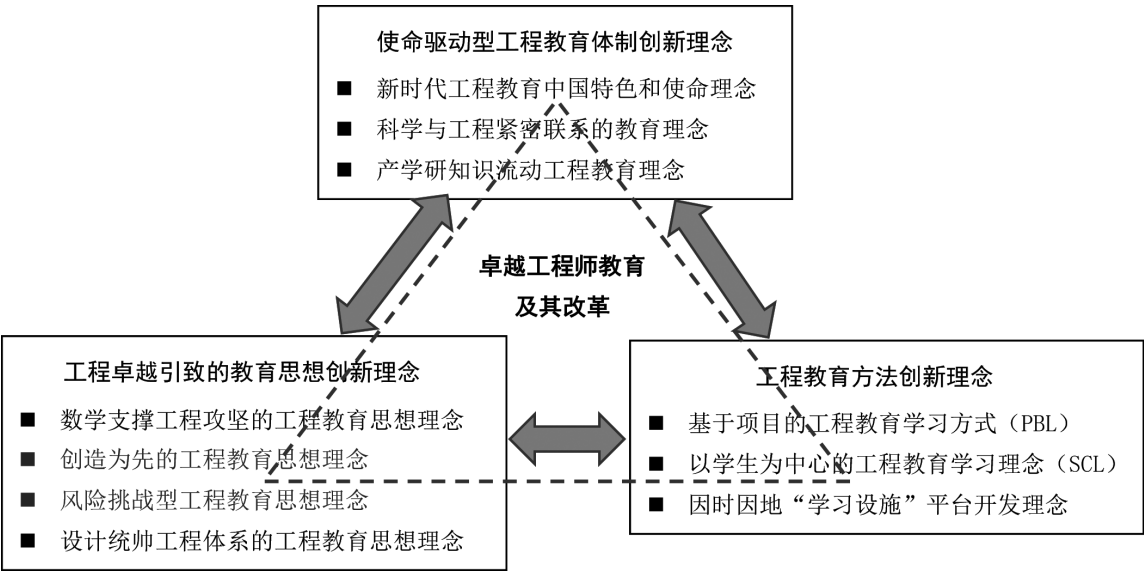


图 2 新工程教育的 3 类、10 大创新理念关系结构

(1)工程教育体制创新理念和智慧具有重要引领作用,应十分重视其国家和区域意义上的新时代工程人才队伍培养的战略含义。

(2)工程教育体制、教育思想、教育方法三者发展有其内涵统一性和彼此适配性。实践上,工程教育体制创新理念融合国家政策、本土社会、产业进步发展使命要素,工程教育思想创新理念重

在工程卓越实践的能力特征诉求,而工程教育方法创新理念则重在知识、能力的效率型教、学方式。

(3)工程教育体制、教育思想、教育方法三者的发展既有其内在的自洽性,又有其特殊性,对应不同工程主题领域、不同工程教育机构、不同工程教育资源场景,差别化实践是必然的。而工程教

育人才队伍质量整体提升,产业的高质量创造和社会、经济的高质量发展进步,才是最终工程教育改革成功的表现。

总之,本文研究认为,在国际国内科技革命和国际上科技竞争与合作大势之下,我国高等工程教育改革亟待深入,而这种发展应当首先结合我国新时代社会主义建设的国情和产业实践,积极汲取国际国内新的工程教育理念创新,作出适应我国国情特点的高等工程教育的创新和发展。

参考文献:

- [1] XU L, XU E, LI L. Industry 4.0: state of the art and future trends[J]. International journal of production research, 2018(8):2941-2962.
- [2] CHEN H. Theoretical foundations for cyber-physical systems: a literature review[J]. Journal of industrial integration and management, 2017, 2 (3):1750013.
- [3] LU Y. Cyber Physical System (CPS)-based industry 4.0: a survey[J]. Journal of industrial integration and management, 2017, 2 (3):1750014.
- [4] European Commission. Industry 5.0, industrial research and innovation, 2020 [EB/OL]. (2021-03-19)[2023-06-30]. https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en.
- [5] FROYD J E, WANKAT P C, SMITH K A. Five major shifts in 100 years of engineering education[R]. Proceedings of the IEEE 100, 2012:1344-1360.
- [6] GÜRDÜR B D, KAYNAK O, SALT S M. Rethinking engineering education at the age of industry 5.0[J]. Journal of industrial information integration, 2022(25):100311.
- [7] RIPOLL V, GODINO-OJER M, CALZADA J. Development of engineering skills in students of biotechnology: innovation project “from laboratory to industry”[J]. Education for chemical engineers, 2023(43):37-49.
- [8] 翁史烈. 21 世纪高等工程教育展望[J]. 世界科技研究与发展, 1997, 9(1):9-13.
- [9] 沈锦璐, 李飞. 产业结构变迁视角下我国高等工程教育体系的建构与实践研究[J]. 清华大学教育研究, 2022, 43(3):134-143.
- [10] 王孙禺, 刘继青. 从历史走向未来: 新中国工程教育 60 年[J]. 高等工程教育研究, 2010(4):30-42.
- [11] 夏普惠. 工业革命与中国工程教育发展[J]. 中国发展观察, 2022(1/2):61-67.
- [12] FOCACCI C N, PEREZ C. The importance of education and training policies in supporting technological revolutions: a comparative and historical analysis of UK, US, Germany, and Sweden (1830 – 1970) [J]. Technology in society, 2022, 70:102000.
- [13] 朱正伟, 李茂国. 面向新工业革命的中国工程教育发展战略研究[J]. 中国高教研究, 2018(3):44-50.
- [14] BORMAN K M, HALPERIN R H, TYSON W. Introduction: the scarcity of sciences and engineers, a hidden crisis in the United States[M]// Becoming an Engineer in Public Universities, Pathways for Women and Minorities, Palgrave Studies in Urban Education. New York: Palgrave Macmillan, 2010:1-2.
- [15] WILLI J, HANS-JOADRIM K. Mathematics: key technology for the future-joint projects between universities and industry 2004 – 2007[M]. Berlin: Springer, 2008: I-XVIII.
- [16] LÓPEZ-FERNÁNDEZ D, SALGADO S P, FERNÁNDEZ B J, et al. Challenge-based learning in aerospace engineering education: the ESA concurrent engineering challenge at the technical University of Madrid[J]. Acta astronautica, 2020 (171):369-377.
- [17] ARCE E, SUAREZ-GARCÍA A, LOPEZ-VAZQUEZ J A, et al. Design sprint: enhancing STEAM and engineering education through agile prototyping and testing ideas [J]. Thinking skills and creativity, 2022(44):101039.
- [18] TAIMUR S, ONUKI M. Design thinking as digital transformative pedagogy in higher sustainability education: Cases from Japan and Germany[J]. International journal of educational research, 2022(114):101994.
- [19] MAHDI H, AKGUN S A, SALEH S, et al. A survey on the design and evolution of social robots: past, present and future [J]. Robotics and autonomous systems, 2022(156):104193.
- [20] MCFARLAND R, REISE C, POSTAWA A, et al. Learnstruments in value creation and learning centered work place design[M]// Proceedings of the 11th Global Conference on Sustainable Manufacturing. Berlin: Universitätsverlag der TU, 2013: 624-629.
- [21] CHEN W Q, SHAH U V, BRECHTELSBAUER C. A framework for hands-on learning in chemical engineering education: training students with the end goal in mind [J]. Education for chemical engineers, 2019(28):25-29.

(本文责编: 辛 城)