



新科技时代工程卓越化与卓越工程人才培养关键理念演化与启示

陈向东^{1,2*}, 黄行蓉³, 洪冠新⁴

1. 北京航空航天大学 经济管理学院, 北京 1000191;
2. 清华大学 技术创新研究中心, 北京 100084;
3. 北京航空航天大学 中法工程师学院/国际通用工程学院, 北京 100191;
4. 北京航空航天大学 中法航空学院, 杭州 311115

摘要: 基于国内外文献的深入分析, 提出了工程卓越化的概念及其发展特征, 并着重强调了三个核心作用规律: 首先, 工程理念有效集成科学技术资源, 推动本土问题导向型解决方案的精细化与专业化; 其次, 基础科学与工程实践之间的双向知识流动, 是工程卓越化发展的关键路径, 这一点对于发展中国家和新兴经济体尤为重要; 第三, 这种双向的知识与信息流动, 同样是卓越工程师教育改革的核心要素, 有力支撑着工程卓越化的可持续发展。基于上述理念, 本文进一步提出了卓越工程人才培养的关键理念与实践要点: 扎实的科学知识基础、高效的产学研合作机制、团队协作学习模式, 以及立足本土产业发展的理论与实践训练。这些理念与要点, 为我国工程卓越化的推进和卓越工程师的培养提供了宝贵的参考。

关键词: 工程卓越化; 工程教育; 卓越工程师教育; 国家创新体系

中图分类号: G40-03; N01

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2025)06-0777-17

引言

我国经济建设已迈入质量型发展的新阶段, 卓越

工程和卓越工程师人才的培养成为我国经济和社会发展的迫切需求。2021年, 习近平总书记在中央人才工作会议上强调, 要培养大批卓越工程师, 以加快构

收稿日期: 2023-08-27; **修回日期:** 2024-07-03

基金项目: 国家社会科学基金重大项目: 打赢关键核心技术攻坚战的目标、主攻方向与对策研究(23ZDA062); 北京航空航天大学卓越工程师产教联合培养专项和研究生教育与发展专项基金项目

作者简介: *陈向东(1953—), 男, 博士, 教授, 研究方向为国际技术转移、技术创新管理、国家与区域创新体系、高等工程教育比较。E-mail: chenxdng@buaa.edu.cn (通讯作者)

黄行蓉(1989—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为高等工程教育研究、航空航天飞行器结构动力学与控制。

洪冠新(1967—), 女, 博士, 教授, 研究方向为飞机大气扰动动力学与飞行安全、舰载飞机起降动力学与控制。

引用格式: 陈向东, 黄行蓉, 洪冠新. 新科技时代工程卓越化与卓越工程人才培养关键理念演化与启示[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2025, 17(6): 777-793. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.23010827. CSTR: 32282.14.JES.23010827

CHEN X D, HUANG X R, HONG G X. Engineering Evolution toward Excellency and Education for Excellent Engineers: Key Concepts and Their Implications under New Science & Technology Era[J]. Journal of Engineering Studies, 2025, 17(6): 777-793. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.23010827. CSTR: 32282.14.JES.23010827

建国家战略人才梯队, 这是我国新时代人才队伍建设, 特别是科技人才队伍建设的重要举措。将卓越工程师教育与中国式现代化工业发展实践紧密结合, 是我国高等工程教育人才培养的期望方向。

随着第五次工业革命的到来, 尤其是互联网和人工智能在制造业和服务业的广泛应用, 未来工程科学学科体系的变革以及卓越工程师教育改革及其实践活动, 必然引发一系列重要问题的思考: 何为卓越工程? 卓越工程师教育的核心又在哪里? 从现有的关于工程卓越主题的文献和报道来看, 工程质量体征通常被视为工程卓越的标志^[1], 但关于工程为何卓越的原因探讨却相对不足; 同时, 大量的关于卓越工程师教育和高等工程教育改革的文献, 更多地关注了高校内部的教学因素^[2]或产业端的教育行为^[3], 而将工程活动与卓越工程师教育主题联系起来的研究和分析工作相对较少。因此, 本文将以“卓越”工程的含义作为首要研究内容, 通过对比国际和国内工程活动的发展历程, 分析工程卓越化发展的核心理念及其演变, 同时结合工程人才队伍的需求特征以及工程教育改革的要点, 探索卓越工程人才教育改革的方向。

1 工程卓越化发展的理念演化: “工程”“技术”“科学”及其联系

本节首先审视了工程卓越化发展的相关基础概念和理念演化, 从这一角度出发, 探讨了卓越工程教育的特征和时代需求。在探讨卓越工程的话题时, 不仅需要理解人类工业文明演化过程中工程卓越化发展的实际情况, 还需领悟其话语和理念基础。这些话语和理念基础不仅体现了重要的实践凝练, 也展现了生动的理性思维, 因此值得我们进行深入的分析 and 探讨。

1.1 工程卓越化发展过程中的“工程”概念和理念涵义比较

工程卓越化的起源可追溯至“工程”理念的内涵演变。实际上, 自人类诞生以来, 工程活动便一直支撑着人类文明的发展。特别是随着现代大工业的兴起, 以不同国家和地区的专业人员群体活动为载体, 工程活动成为了一个根据特定社会不同需求、针对其

当前和长远工业发展面临的问题, 提出并实施以及修正解决方案的本土化、群体合作的发展过程。在这一过程中, 重要的理念逐渐演变并持续革新, 最终形成了今天工程文明世界中的通用型关键概念和理念。因此, 从工程演化的视角审视和探讨工程发展变革及其理念进化, 具有深远的意义。我国工程学界的专家们多年来对工程演化规律及其工程哲学问题进行了开拓性研究^[4-5], 这些研究成果具有重要的启发和参考价值。

“工程”概念作为伴随工业发展的核心术语, 其理念内涵始终与其质量型工业生产活动紧密相连。这一概念涵盖了设计、创造、技能、制造、批量产出等规模性活动, 并集成了各类相关科学技术要素和社会资源要素。工程进展与演化中的这种集成现象, 正是工程哲学所特别关注的内容^[4], 旨在审视和提炼人类工业文明从无到有、不断富集科技和工业智慧的创造性活动的内在本质。尤为值得注意的是, 不同国家和民族在推进工程文明、创造工业文明的过程中, 既存在共性和类似特点的概念与理念, 也蕴含着更具个性和差异性的内涵, 这无疑值得我们深入关注。

我国文化乃至东方文化视角对“工程”理念的理解, 与西方工程文明的发展既有相似之处, 也存在显著差异。在中文语境中, “工程”一词的字面意义为: “工”代表“工艺”, “程”则指规则和程序, 蕴含着“匠人”之作且遵循常理的意涵。而从我国文化及现实政策的角度来看, “工程”的概念实则更为广泛, 涵盖了西方语境中的“技术”“应用科学”“工艺”等多个方面。现实中的“工程”更多是指与产业实践活动密切相关的部分, 是紧密联结生产和工作实践的典型领域。而“工程师”(以工程师职称涵义为代表)则更多地体现了与工业实践紧密相连的群体身份。

从我国历史发展的角度来看, 工程实践, 尤其是大型工程项目, 自古至今绵延不绝。所谓现代“工程”活动的实践及相关工程教育, 是在相对较晚的时期(约1861—1895年)引入国内的, 尽管其中某些实践活动实际上早已在我国古代社会出现, 典型的如建筑、冶炼、铸造, 以及历史悠久的农业工程(包括水利灌溉、农耕与节气等)。李约瑟(Joseph

Needham) 曾关注并阐释了“工程”的含义: “在中国古代, ‘工’意味着从事某种制作产业(工艺)活动, 而这种活动与农业劳动的技艺成分有所区别; 至于‘程’, 则源于测量、尺度、数量、审视等含义。”^[6]可以说, 中文的“工程”更强调“工艺”与工作体量大之下的“有序”和“总成”; 相较之下, 西方近代文化中的“engineering”似乎更侧重于人为的“设计”和“造”的含义。前者注重其承载的“工艺”品质、数量及运行过程的总成关系, 例如, 我国《新唐书·魏知古传》中有“虽盛夏, 工程严促”之句, 清刘大魁《芋园张君传》亦载“相国创建石桥, 以利民涉, 工程浩繁”, 现代如“三峡工程”“探月工程”等称谓, 更蕴含了工作体量巨大场景下的设计、工艺有序、总成之意, 且融入了更多科学、技术涵义; 而英文语境则更注重其“人为”的“设计”与“创造”, 例如国际外汇市场上曾作为创新工具之一的外汇掉期交易(swap, 即卖出A货币以买进B货币的行为必须与另一时间上卖出B货币买进A货币的约定捆绑完成, 此交易类型可为商业银行通过即期对远期掉期或远期对远期掉期等操作规避外汇头寸风险提供便利), 此工具的操作即被形容为“engineered”, 类似的金融工具创新也被归入所谓“金融工程(financial engineering)”领域, 其中的“设计”和“人造”涵义十分显著。这一区别在工程实践及工程教育上至今似乎仍存在, 也影响到今天中文语境下“工程”一词希望准确表达的活动类型, 尤其是与科学、技术这类词汇之间的使用差异, 可能会影响工程教育内涵的准确传达。

从现代工业和工程卓越发展的历程来看, “工程”与“技术”呈现出一种相辅相成的语义关系。正如殷瑞钰等^[5]工程大家及工程哲学专家所指出的, “技术是工程的基本要素”, “工程是相关技术模块群的优化集成”。“工程”强调知识的“集成”和“制造”目标, 涵盖原创性的“创造”, 突显出高效的人为制造方案及其相关技术的综合, 同时也强调掌握不同技术的劳动者群体间合作形成的集成型工程生产关系。其卓越内涵更包括对某种技术的掌握, 尤其是对未知技术的探索和认知提升的演化体系, 并可扩展至基础科学的认知活动。

可以说, 在工程、技术和科学概念及其理念的演化过程中, 工程活动集成了可操作的科学知识, 实现了具象的实体文明创造, 并由此凝练出相关术语与内涵, 彰显“工程是现实的、直接的生产力”^[4]。同时, 正是这种具象的创造过程, 必然通过本土和本地方案体现不同地区、民族、国家的实体文明创造过程与成果, 因此“工程”的理念更具具象的知识统帅意义。

1.2 工程卓越化发展体现科技资源集成活动为基础的质量提升, 体现有效集成科学与技术元素过程

根据1.1节的分析, 人类工业文明的卓越化发展离不开“工程”理念内涵的演变。本质上, 工程活动是一个不断更新和集成多种资源的过程, 尤其是科技资源, 从而持续创造和提升产出质量。这既涉及到横向集成不同技术门类的知识联系, 也涉及到纵向集成基础科学研究(如数学、物理学、化学等最新认识)的知识联系。最终, 这些集成聚焦于实现某种本地“制造”方案的实践性成果, 并可能不断迭代和革新。这种横向与纵向知识集成的质量, 构成了现代工程不断卓越化发展的核心内容, 并对工程人才群体及其能力提出了相应的要求。特别地, 工程活动在集成科技资源方面, 需要强调两种重要特征。

首先, 工程活动及其运作体系以形成“眼见为实”的解决方案(特别是被称为原创型“工程”的prototype)为目标, 这通常是以满足本地本土功能需求为导向, 围绕着本土解决方案的知识集成。从各地区和国家工业历史发展来看, 相应的工程人才资源集成和运用各类知识的应变能力也与当地特定社会所需要的既定工程目标和工程质量期望同步发展。因此, 工程实践(包含工程质量期望和工程活动组成, 以及相应的工程文化)的知识演化和能力衍生必然有其企业、产业、区域乃至国别差异。即便名称相同的工程活动和产业实践, 由于其不同的工程质量期望(实际上, 对质量的定义及其内涵也存在差异)、不同的经济和社会需求, 以及必然形成的基于本地资源的基础实现过程, 也必然造就不同特性(不可比)和不同水平(可比)的工程知识体系和工程教育品格。然而, 现代工程活动主要通过工程师这类群体发挥作用, 这

与前工业时代以工匠个体精湛工艺取胜的作坊型造物方式有着重要区别。工程人才的教育更多以现代科学为认识基础,以更为规范的教育体系促进成规模的人才培养,因此,卓越工程人才的培养应具有更多的共性。

第二,大工业时代对应着鲜活的工业实践——既包括当前的工程实践,也涵盖面向未来的探索性实践。这一时代的工程实践及其所依托的工程科学具有鲜明的时效性与知识动态演进特征,体现出工程专业知识体系在稳态积累与动态更新之间的辩证统一。这意味着,即便一项工程活动已经完成了初步的技术“集成”并构建了基础科学知识的支撑框架,仍可能需要不断引入新技术进行再集成,尤其需要基础科学研究提供新的理论解释,以持续推动工程向更高水平的卓越化发展。这种稳态与动态并存的工程体系演化特征,进一步体现在卓越工程人才的能力构成上,也深刻影响着工程教育在能力培养方面的目标与路径。正是基于这一认识,工程高质量创造——即工程卓越化的可持续发展——才得以持续推进。因此,卓越工程人才的能力内涵(作为支撑工程卓越化发展的关键群体资源),主要体现为:在面对不同复杂程度和不同技术集成难度的工程任务时,所具备的扎实知识储备与灵活应变能力。考虑到工程卓越化本身是一个持续演进的过程,其发展路径以及相应的人才培养模式,仍可能因产业特性、地域条件和国家背景的不同而呈现出鲜明的个性化特征。

此外,不同产业(如高附加值产业或高技术密集型产业等)因其发展特性各异——包括科学驱动程度、价值增值能力以及工程知识复合集成的广度与深度——在工程科学与工程文化的表现上也呈现出不同侧重。在某些产业或发展阶段,工程科学的共性特征尤为突出,而工程文化的个性则相对弱化;而在另一些情境下,工程文化的独特性反而可能成为推动产业发展的关键力量。因此,从客观现实出发,工程实践、工程教育及卓越工程人才的培养,往往需要结合具体国家、区域或产业背景加以区分。这种差异不仅反映了不同发展阶段、经济周期的特点,也可能在国际政治竞争和科技博弈中,成为各方角力的重要场域。

2 国内外工程卓越化发展理念比较

2.1 欧美工程卓越化发展理念分析

从国际工业工程发展史的视角审视,美国的工业化进程与工程教育的演进与其产业实践紧密相连,同时也与相关的科学研究活动保持着密切的互动。在政策和实践术语层面,“工程”与“科学”往往呈现出更为紧密的关联,因而具备更佳的参考价值。

在美国“工程”理念的演化过程中,“工程”相较于“技术”,更强调实践、政策与管理层面的整合能力。这种以“工程”为优先的演进逻辑,恰恰凸显了对所谓“核心技术”及其系统性集成在产业工程发展中的关键作用。与此同时,具有基础科学研究属性的科技活动,在吸纳源自欧洲等地的先进知识资源、推动本土原创型产业工程体系构建方面,也发挥了至关重要的作用。

伦斯勒理工学院(Rensselaer Polytechnic Institute)是美国最早(1824年)设立并开展工程教育的高等院校。其创立初衷是为了应对当时本地在农业、市政及运河工程等领域面临的实际问题,并据此开设了相应的科学与技术课程,设置了学位,并系统整合了相关知识体系。类似地,美国早期开展工程教育的其他典型高校,如密歇根大学、哈佛大学和耶鲁大学的工学院,也都紧密契合其所处时代和地域的工业工程发展需求。尤其自20世纪40年代起,美国的教育机构与政府部门在理念上开始强调“科学型工程”(science-based engineering),继而进一步推动“科学型产业”(science-based industries)的发展。这一转向为美国的产业工程实践注入了现代制造业的核心工程思想,包括精密制造、质量检测与控制方法、工程数据的归档存储与分析等。也正是在这一时期,工程管理(engineering management, EM)作为一门实践领域和学科,逐步成形^[7]。与此同时,在工程教育与公共教育的发展进程中,基础科学的地位也愈发凸显。以“STEM”这一术语为例,它是科学(science)、技术(technology)、工程(engineering)和数学(mathematics)的统称,如今已广为人知。然而,其作为政策话语的起源可以追溯至美国西点军

校(United States Military Academy at West Point)^[8]。自此,STEM逐渐成为美国高等工程教育乃至基础教育中的核心政策概念,体现了工业化早期对科技人才培养的广泛共识。与此同时,美国还注重构建支撑工程教育发展的制度性组织。例如,1946年成立的美国工程教育协会(American Society for Engineering Education, ASEE),便致力于协调产业工程发展与技术进步之间的关系,体现出“产业-工程-科学”之间清晰的知识溯源逻辑。从高等工程教育的历史演进来看,STEM教育(近年来进一步扩展为STEAM,即在原有基础上加入Art,以融入艺术与人文因素,增强工程活动的社会意识与伦理意识^[9])已被视为现代工程教育的核心组成部分,并被纳入国家竞争力的战略框架。1986年,美国国家科学委员会发布的《本科的科学、数学和工程教育》报告中,明确将优质STEM人才的培养与提升国家竞争力直接关联。2009年,奥巴马政府在《教育以创新》倡议中进一步提出,应通过政府、企业、科技组织及非营利机构的协同支持,大力加强科学、技术、工程和数学领域的人才培养,以确保美国在全球科技领域的领先地位^[10]。这些理念不仅深刻塑造了美国高等工程教育的形态,也逐步渗透至普通教育体系,影响到中小学阶段的课程文化与育人导向。在这一创新与教育政策的双重驱动下,体系化工程发展的理念始终发挥着统领作用,而在重点产业的发展进程中,也总能观察到与之相伴的、不断演化的工程理念。

再看欧洲主要工业国家的工程发展活动,法国的工程发展元素及其高等工程教育演化尤为值得关注。尤其是法国工程师教育,其发展历程悠久,特点鲜明,成就显著。自法国大革命之后,“工程师”便成为国家和地方公共工程(特别是大型工程)所需依赖的精英型人才资源。与此相关的现代法国工程教育,其历史可以追溯到法国大革命爆发时期的1794年。1794年10月,法国成立了公共工程协会,并由该协会设立了中央公共工程学校,即后来1795年成立的法国综合理工学校的前身。该校自创立之初就强调基础科学的重要性。进入20世纪后,1934年法国政府出于培养领军人才群体的愿望,成立了专门的工程师职衔委员会,以规范工程师这一等级人才认定的质

量。随着工程教育在两次世界大战期间的快速发展,工程师正式成为一种具有职衔身份的精英群体,这也对法国的工程教育体系产生了深远的影响。此职衔认证委员会(Comission des Titres d'Ingénieur, CTI)的认证规则经过多次更新,直到2005年在欧洲推出扩展版,始终坚持了工程卓越化发展的人才内涵需求^[11]。

法国工程师作为经过规范化培训的精英群体,在近现代三次工业革命中确实发挥了巨大的作用,他们完成了工程建国、工程强国和工程富国的使命。众多工程人才成为了行业、社会乃至时代的领军人物,如法国联军统帅福煦(Ferdinand Foch)、总统德斯坦(Valéry Giscard d'Estaing)、诺贝尔奖得主贝古勒耳(Irène Joliot-Curie)、热力学奠基人卡诺(Nicolas Léonard Sadi Carnot)和数学家柯西(Augustin-Louis Cauchy)等,都是法国工程师教育体系的学生。如今,法国工业界的空中客车公司(Airbus)、法国电力公司(EDF)、雪铁龙(Citroën)、阿尔斯通(Alstom)、路易威登(Louis Vuitton)、斯伦贝谢(Schlumberger)等世界知名企业的创始人,也均源自法国工程师培养体系。这些都使得法国在现代工业各个领域,包括航空航天、高铁、核能、信息、建筑、农业、医药和艺术等,走在世界前列^[12]。

整体来看,欧洲高等工程教育机构的探索与演化发展,始终伴随着工程实践与基础科学之间的深层联系。尤其在“工业科学”或工程科学领域,这一趋势尤为显著,彰显了工程卓越化的一种生态发展规律。与此同时,相关创新政策也在持续推动大学与工业界的紧密合作。德国政府的经济与教育部门于1993年联合推出了一项旨在推动基础科学解决工业工程实际问题的政策项目。该项目历经多次延展,跨越世纪,持续实施至2007年,最终汇聚了280个具有代表性的科研专项,并出版了相关专著,明确提出“数学是一种关键技术”^[13],其核心理念在于促进数学等基础学科的前沿研究成果与产业界面临的工程实际问题紧密结合。通过这些典型专项的实施,生动展现了数学领域的新思想与新方法在解决关键产业问题中的强大能力,成功应用于微电子工程、薄膜技术与集成电路工程、计算机辅助医疗、交通与能源控制系统,以及

金融和保险业的风险管理等多个重要领域。这些成果不仅体现了基础科学在应对本土工程挑战、推动高质量工业工程实践中的重要作用,也揭示了一条可能通向世界领先水平的工程科技储备的演化路径。从产业与工业政策的角度来看,这个政策项目显著强化了大学与工业界之间的协同合作,大幅提升了基础科学与工程科学之间的信息交流与知识融合,进一步巩固了科学与工程之间紧密而富有成效的联系。

2.2 我国工程理念及工程教育体系演化发展特点

如前文所述,在我国现代工业的发展历程中,工程理念更侧重于产业实践,特别是专业型产业实践。这种专注且精细的实践特性,推动了我国社会主义工业化的迅速发展,尤其在改革开放之后,短时间内实现了产业现代化升级,工程质量甚至能与传统工业发达国家相媲美。这一过程中,我国高等工程教育机制紧跟时代步伐,起到了至关重要的推动作用。

自我国建国之初,高等工程教育就紧跟国家工业发展的步伐,成为现代工业布局的重要基石。20世纪50年代,通过系统引入苏联的高等工程教育模式,促进了关键工业领域的快速发展,并随着全国高校院系专业的调整,使得开设工程专业的高等院校覆盖了全国3/4的区域^[14]。这一时期,工科学生在所有大学生中的比例从26%上升到了37%,成功实现了为国家工业快速扩张提供专业人才的目标。1952年,在抗美援朝战争胜利后,为了培养航空领域的专门人才,国家将8个高等教育机构中的航空院系合并,成立了北京航空学院,这标志着我国在高等工程教育改革方面迈出了重要一步^[15]。学校迎接新生时挂出的“欢迎我国新一代红色航空工程师”的横幅,生动反映了那个时代对工程技术人才的渴望和期望。当时的教育体系特点是单独设立工科学院,并采用从苏联引进的“大学-系-教研室”结构进行教学与科研活动,形成了基础科学、专业基础到专业技能纵向贯通的学习路径。这种模式强调知识逻辑的严密性、专业聚焦以及实践操作能力,但同时也存在知识相对固定、跨学科创新困难等问题。此外,高度细化的专业设置虽然能够迅速满足工业需求,但从长远来看可能会限制学科间的交流与融合。尽管如此,不可否认的是,当

时的高等工程教育非常重视实践环节,设有系统的企业实习安排,旨在强化理论与实践的结合。不过,这些实践活动更多关注于加深对专业知识的理解,而非探索理论背后的工程问题。因此,这种教育模式有效支持了国家工业化进程的速度和强度,对推动我国工业现代化做出了重大贡献。然而,随着科学技术的发展和知识的不断更新,这种精细划分的专业教育模式也在不断地面临挑战和变革,这一过程在我国改革开放后的工程领域发展中尤为明显。

2010年,我国启动“卓越工程师教育培养计划”,在工程教育理念与政策实践层面,明确提出将产业与企业深度融入人才培养全过程,以通用标准与行业标准相结合的方式培养工程人才,重点聚焦三大核心目标:强化学生的工程实践能力、创新能力以及综合素质。该计划实施以来取得了显著成效,但我国工程教育仍面临若干深层次挑战。例如,创新型工程人才依然匮乏,工科学生在国际竞争力、经营管理能力、跨学科知识融合以及实际动手能力等方面仍有明显短板^[16];同时,人才培养与产业实际需求之间存在脱节,部分工程类高校办学定位模糊、特色不鲜明、优势不突出等问题亟待破解^[17]。为应对上述挑战,2017年我国启动了“新工科”研究与实践,旨在打造“卓越工程师教育培养计划”的升级版。该举措明确对标“工业4.0”和“工业互联网”发展趋势,紧密服务“创新驱动发展”“中国制造2025”“一带一路”等国家重大战略,坚持以社会需求为导向,以“大科学观”和“大工程观”为引领,以“人本内涵”为核心主线,推动工程教育向“融合创新”范式转型。其根本目标在于培养大批层次多元、类型多样、创新能力强、适应经济社会发展需要的高素质工程人才,为我国实现从“制造大国”向“制造强国”转变提供坚实的人才支撑^[18]。

总体而言,尽管我国在科技与工业快速发展背景下,高等工程教育取得了长足进步,但与国际先进水平相比,仍存在若干亟需关注的典型问题^[19]:一是战略型、领军型工程人才供给不足;二是产学研协同育人机制尚不深入,制约了工程人才培养质量的实质性提升;三是对工程本质及其能力体系的理解仍显薄弱;四是工程教育整体亟需系统性、结构性的改革与提质升级。

这些问题本质上反映出当前我国高等工程教育理念更新与政策设计层面的深层需求, 尤其涉及对“工程”本质属性、工程卓越发展的内在规律, 以及“工程-技术-科学”三者关系的再认识。因此, 深入探讨工程的内涵、工程与技术及科学的互动逻辑, 及其对工程教育卓越化路径的影响, 已成为推动我国工程教育高质量发展的关键议题。

2.3 工程卓越化发展理念演化趋势综合分析

工程卓越化是工业文明演进的必然趋势, 亦与卓越工程人才教育理念的持续演化紧密相连。在当前以工业4.0为代表的发展格局认知框架下, 相关研究日益聚焦于互联网、人工智能、智能制造以及各类新兴技术的深度融合, 推动新工业体系与新工程平台的不断演进^[20-22]。这一进程正逐步从第四次工业革命的技术驱动逻辑, 转向强调可持续发展、人与自然和谐共生的理念框架, 并催生出以“以人中心”、注重柔性化与人性化的工业5.0模式, 该理念已在多个国家和地区进入实践探索阶段^[23]。

在此背景下, 工程卓越化的发展路径日益呈现出纵向贯通基础科学与工程实践、横向融合多产业与多学科的立体化特征。这一趋势不仅重塑了现代工程的内涵与边界, 也深刻体现在全球范围内卓越工程师教育改革的浪潮之中, 成为推动工程教育范式转型的重要驱动力。

综合国际国内文献研究成果^{[4]177-178,224-225,[24-27]}, 并结合2.1和2.2节中的研究分析, 本文梳理并构建了工业发展、工程变革形态与相应工程教育内涵及理念的演化关系(见表1), 特别突出了工程教育改革理念与工业实践理念之间互动演进的整体格局。

如表1所示, 事实上, 自工业1.0阶段起, 基础科学便已发挥一定的支撑作用, 只是彼时其支持关系相对独立, 且机制更具个性化特征。表1所汇总的信息反映出以下三个重要特征: (1) 工程与基础科学的联系日益紧密, 推动了工程的卓越化发展; (2) 工程与产学研合作的质量不断提升, 进一步促进工程卓越化; (3) 工程领域的跨学科融合与协同合作持续深化, 成为推动工程卓越化的重要动力。

3 面向工程卓越化发展的卓越工程人才培养

3.1 强化基础科学与工程实践活动双向融合机制

从科技发达国家的工程实践历史以及我国工程质量不断提升的发展历程可以看出, 基础科学研究与工程实践的支撑联系越来越紧密、越来越关键, 主要表现在以下两个方面:

3.1.1 基础科学研究成果支持技术创新和工程路径开拓 在产业技术创新方面, 国际上长期重视基础科学研究对工程技术发展的支持作用。早期的研究强调了基础科学与工业技术发展之间的紧密联系, 例如弗里曼·戴森(Freeman Dyson)提出的“基于科学的技术”(science-based technology)概念。随后, Meyer-Krahmer和Schmoch^[28]通过分析专利文献引用科学文章的情况, 提出了衡量产业技术中“科学含量”的方法, 并指出化学、生物技术和信息技术等产业是典型的基于科学的产业。这些研究揭示了基础科学研究对于推动产业核心技术进步的重要性, 同时也促进了工程发展体系的进步。可以说, 基于科学的产业(science-based industries)主要关注的是将基础科学研究(以发现新知识为导向的研究)转化为生产力的过程, 这反映了所谓技术创新的线性模型。在这个模型中, 基础科学与工程技术活动被视为从新思想到生产力转化过程中的连续环节。传统的工程教育模式也遵循这一线性序列, 这种模式至今仍然是技术创新不可或缺的一部分^[29]。值得注意的是, 无论是国际上还是我国的科技政策, 都高度重视基础科学成果向产业应用的转移, 这是在新时代背景下对这一发展方向的延续和拓展。例如, 美国麻省理工学院(MIT)于2017年启动的新工程教育转型(NEET)计划, 便是一个旨在鼓励跨学科工程学生合作创新的教育模式, 从人才培养的角度出发, 促进新的工程产出的发展。这样的举措不仅推动了科学技术的前沿进展, 也为未来的工程教育改革提供了宝贵的经验。

3.1.2 基础科学研究解决工程卓越化发展中的瓶颈, 推动工程科学升级 值得注意的是, 上述将基础科学视为支撑工程技术发展的模式, 本质上建立在一种线性发展观之上。这一视角的优势在于清晰地呈现了

表1 典型工业发展格局与工程教育理念内涵演化模式对比

Table 1 Evolution pattern comparison: Typical industrial development vs. engineering education ideas & operations

工业发展格局、典型产业背景及其发展理念	工业工程意义上的社会背景与典型发展理念	工程师地位演化及工程教育X.X	典型工程教育内涵
前产业革命期 工艺体系、工具初创、公共工程需要； 建筑、市政、铁路、运河工程； 工业0.X	地方/民族/市政公共产业发展背景； “工艺”与科学理念	行业型工程师出现； 工程教育0.X	基于经验的作坊式、个性化工匠培养与应用科学型工程教育并行； 行业型工程教育
大工业革命时代 机械工业独占鳌头、电气化时代初期； 纺织、机械、钢铁、动力母机； 工业1.0	地方/民族/国家产业发展背景； 结合科学原理、专业技术、专业技能的“工程”理念	精英型工程师； 典型专业工程科学体系； 工程教育1.0	基于工程科学原理的工程教育机械、电气工程为基础； 精英型工程师教育
产业创新体系时代；过程系统工程 电气化、重化工、化学、冶炼精炼等； 工业2.0	地方/民族/国家/跨国企业发展背景； 研究与开发机构； 与科学、技术紧密联系的质量型“工程”理念	专业型工程师； 独立门类专业工程科学体系； 扩展型专业工程门类； 工程教育2.0	产业工程技术体系发展智慧，控制工程及系统工程为代表； 平台型专业工程科学； 专业型职业工程师培养体系
产业自动化、信息化时代 电子工业、可编程控制、半导体、计算机、信息工业革命； 工业3.0	民族/国家/跨国企业发展背景； 研究与开发国际化； 产-学-政联盟/创业企业； 与基础科学紧密联系的智慧型工程理念	信息技术等平台型技术基础； 通用型工程师； 科学型产业工程科学体系； 基础科学动态支持； 专业型与通用型工程教育并行； 工程教育3.0	平台型技术及产业工程发展智慧，科学+工程+管理； 通用工程师培养体系
产业信息化、工业智能化时代 网络信息技术、生物技术等； 新兴产业，产业融合/动态产业边界； 制造业服务化、工业智能化时代； 工业4.0	民族/国家/跨国企业/国际化发展背景； 政-产-学联盟/创新创业、新兴技术产业； 信息化与智能化框架下智能型工程理念	柔性能力、应对未知世界； 数字技术等平台技术基础； 通用型与专精型工程师群体； 科学与工程双向融合的跨学科知识创造； 工程教育4.0	服务型工业、后工业发展智慧，科学+工程+人文 卓越工程师教育体系； 产教联盟工程师团队型培养
智能产业化时代 人工智能、物联网、数字经济； 气候、环境、生物危机、后工业社会； 国际政治背景、国家工程教育； 工业5.0	全球与本土、民族、国家发展背景； 国家和社会负责任创新政-产-学联盟； 可持续发展框架下的卓越工程理念	社会、人文和人类命运共同体发展意识； 合作型通用、专精工程师群体； 工程教育5.0 ^[28]	可持续发展智慧； 交叉学科、应急工程、人文+工程+科学； 卓越工程师教育体系； 产教联盟工程师团队培养机制； 跨学科、产业合作型培养机制

“基础科学指导工程实践”的知识衍生逻辑，为现代工程的发展提供了理论根基；但其局限性也显而易见：它倾向于将知识转移视为单向过程，把工程所依赖的科学理论视为相对稳定甚至不变的“公理”，从而在实践中导致工程教育中基础科学研究与工程应用环节的割裂。

这种割裂具体表现为一种固化的课程结构——即“基础课→专业基础课→专业课”的线性金字塔模型，其中专业课被赋予更高的知识容量、内涵深度和

重要性，而前两个层级则被视为辅助或准备阶段。在此框架下，工程与生产实践中出现的问题，尤其是涉及质量提升等深层次挑战，往往被限定在“专业工程”范畴内，由“专业”工程师单独应对。这种做法有意或无意地切断了工程实践中产生的科学问题向基础研究反馈的通道，削弱了产业工程问题反哺基础科学发展的双向互动机制。

然而，恰恰是通过从复杂工程难题中提炼出关键科学问题，并将其反馈至基础科学研究，再借助科学

突破反过来解决工程瓶颈,才是实现工程卓越化的核心路径。这种自下而上的知识流动与信息反馈,尤其对发展中国家和新兴经济体而言,是推动工程能力跃升的关键环节。因此,亟需确立基础科学研究与工程实践之间双向演化、深度融合的新理念。近年来,随着信息技术与人工智能等领域的迅猛发展,基础科学与工业技术正加速融合,催生出新技术、新工程形态和新产业模式。这一趋势突出体现在产学研协同机制中所展现的“基础科学-工程技术”双向互促、共同演进的特征,而这正是工程卓越化的重要标志。

事实上,我国科学家和工程专家对此早有深刻体悟:工程活动要走向精专与卓越,离不开基础科学研究的持续支撑,二者之间存在内在的、必然的发展联系。例如,我国著名化学工程专家、教育家、中国科学院院士余国琮曾以化学工程为例指出^[30],现代工程实践应更加倚重科学方法,“少用点经验”。他本人正是运用流体力学原理,成功解决了精馏过程中的关键工程难题。余国琮特别强调,尽管人类在长期工程实践中积累的经验无疑是宝贵财富,但随着社会需求和技术复杂度的不断提升,仅靠经验已远远不能满足现代工程发展的要求。正是在这种背景下,工程师们逐步引入科学方法,催生了“工程科学”这一融合性学科。过去那种依赖试错型实践(无论成败)积累经验的做法,往往导致技术开发周期长、成本高、不确定性大,甚至一些重大缺陷只有在大规模工程实施后才暴露出来,严重制约了工业过程乃至整个工业文明的进步。即便是针对特定场景优化的经验模型,本质上仍属“经验”范畴,依然受限于科学认知的不足。

因此,真正的工程卓越化,需要的是以“工程科学”为核心,构建一个紧密连接基础理论与工程实践的协同平台,而非沿袭那种单向、固化、简化的线性知识链条——即“基础科学→应用科学(常表现为对基础科学的简化与固化)→专业工程”(在教育体系中体现为“基础课-专业基础课-专业课”的序贯结构)。

综上所述,高质量工程的发展规律,本质上是一个工程实践与基础科学研究相互激发、动态演化的知识共生过程。相应地,卓越工程师的培养也必须顺应这一规律,着力提升学生在双向知识流动中发现问

题、提炼问题、协同解决问题的能力,从而真正支撑国家工程科技的自主创新与高水平发展。

3.2 整合产-学-研结构资源

综合来看,基础科学与工程实践之间的双向知识流动是推进工程卓越化发展的关键路径。在高等工程教育机构参与的产学研机制中,这种互动体现为高校-产业-政府三螺旋结构的技术创新过程。通过高等工程教育体系持续提供新的科技思想和解决方案,围绕工程创新问题聚集的知识发现和再造形成了新的工程方案,从而为开辟新技术路径提供了必要的支撑。在这一过程中,高等工程教育机构凭借其新思想和新方案成为该结构的核心或起点,并在众多新兴经济体国家中不断展现出多样化的演进模式,有力推动了我国高科技经济的发展。

然而,从不断提升质量的工程卓越化进程来看,当前我国新科技工业发展中更应重视的是:从前沿工程瓶颈问题中提炼出新的科学课题,以引领产学研合作,打通实现工程卓越化发展的关键路径。尽管逆向知识和信息流动(即形成双向知识通道)的重要性日益凸显,但在新兴经济体国家和地区,这仍然是一个薄弱环节。值得注意的是,高等工程教育机构介入此类“反哺”基础科学研究的运行机制,已成为多个国家“国家创新体系”的重要组成部分。其战略核心在于通过“政-产-学”结构引导产学研实践活动,尤其是当政府政策占据这类结构的主导地位时(如设定大方向、促进相关机制),更能有效推动发展。例如,美国的相关工业科技政策聚焦于具有战略科技意义的项目,旨在通过这些“竞赛规则转换器”类型的工程能力产出增强国家和地区高科技型工程的竞争优势和发展前景^[31]。

因此,无论是从以工程高校为主导的产-学-研结构,还是转向以政府政策为主导的政-产-学结构,建立工程实践与基础研究之间的双向互动机制都是至关重要的。这是构建以工程卓越化能力为核心的国家创新体系的重要组成部分,也是培养卓越工程师不可或缺的一环。如此,才能确保工程领域的持续创新和高质量发展,满足现代社会对工程技术不断增长的需求。

4 新科技时代工程卓越化发展理念下卓越工程师教育的团队能力

基于上述分析, 还需进一步强调: 工程卓越化的发展不仅依赖于个体能力的提升, 更需要一支具备协同创新能力的群体型卓越人才队伍。因此, 卓越工程师教育已成为新科技时代具有标志性的教育理念。其核心在于构建以“卓越工程实现能力”为导向的教育机制——既需深刻把握工程卓越化发展的内在规律, 也需推动教育方式与方法的系统性革新。在一些国家和地区, 这一理念甚至已融入工程师职业资格认证体系之中。

卓越工程师教育尤其应注重以下四类团队型能力的培养:

(1) 促进跨学科工程领域的团队协作能力。积极借鉴国际国内先进的教育理念、实践案例与成功经验, 推动不同工程学科之间的深度交叉融合, 探索并创新实现工程卓越化的路径与方法。

(2) 提升工程团队的学习与协同进化能力。例如, 通过构建学习型组织, 强化学生之间、师生之间以及高校与企业之间的互动合作, 实现知识共享、智慧汇聚与共同使命的达成, 使团队成为持续学习与成长的有机体。

(3) 培育面向新工程活动的创造性团队文化。这不仅包括理论联系实际的团队文化建设, 更强调打造富有创造力的社区生态, 如“创客”型团队(强调动手与动脑结合)、产学研协同团队、创新创业团队以及校企联合实践团队等。我国政府倡导的“科技下乡”“科技扶贫”等行动, 同样体现了这种以团队协作为基础、服务社会需求的运行模式与价值导向。经过创造性使命驱动和创新乐趣滋养的团队合作, 本质上是在塑造一种融合科学与工程、科学与社会、科学与人文的积极文化生态。领先型高等工程教育机构尤应主动搭建此类文化平台, 发挥引领作用。

(4) 加强面向国际合作的工程开发与建设团队协作能力。这类合作具有更深远的意义: 不仅承载着国家或民族的工程使命, 更体现人类命运共同体理念下的可持续发展责任与工程伦理担当, 彰显全球视野与

责任意识。

结合国内外相关研究成果, 下文将对上述卓越工程师团队能力导向下的工程教育诉求进行深入分析与阐释。

4.1 卓越工程师教育的团队能力认识: 团队型科技集成和原创能力

现代工程人才的基本能力^[32]首先强调其通用性要素。其中, 数据素养(data fluency)——即理解和运用数据进行分析、决策与沟通的能力——已被广泛视为继学习、阅读、写作、表达沟通和计算之后的第6项核心素养, 也成为卓越工程师关键技能培养的重要内容。这类通用能力本身具有鲜明的跨学科特征。然而, 当代工程教育改革的关注点并不仅限于个体认知能力的提升, 更强调工程师在团队协作和社会语境中的综合表现。因此, 即使在关注工程师个人专业知识与竞争力的同时, 卓越工程师教育也必须将其置于团队合作与社会责任框架中加以审视。目前学界普遍认为, 这一综合能力体系主要由以下5个核心要素构成^[33-34], 它们共同构成了卓越工程师竞争力培养的基础:

(1) 技术竞争力: 具备扎实的专业知识, 能够有效规划、组织并实施工程过程, 以最优方式达成既定目标; (2) 管理竞争力: 拥有较宽泛的商业与组织管理知识, 能够在既定规则、流程和标准框架内高效推进工程项目; (3) 伦理竞争力: 具备强烈的工程伦理意识, 能在复杂工程情境中做出符合职业道德与社会责任的判断与决策; (4) 效率竞争力: 不仅追求工程活动的高效率与成果导向, 还特别强调持续学习与专业能力的动态提升; (5) 人格竞争力: 体现在工程实践中良好的时间管理、人际沟通、团队协作及冲突处理等软技能, 是支撑工程团队高效运作的关键。这五大要素相互支撑、有机融合, 共同构筑了面向未来复杂工程挑战的卓越工程师能力模型, 也为工程教育的系统性改革提供了明确方向。

4.2 卓越工程师教育的团队能力认识: 硬实力与软实力相结合能力

国际相关研究^[35]基于工程师基础科学与工

程实践相结合的特点,提出了一个关于工程师教育与培养中“硬产出能力”与“软技能”关系的分析框架。其中,“软技能”主要体现为团队协作导向的能力产出,如表2所示。该框架进一步表明,在工程活动的各个环节中,唯有工程设计这一硬产出环节较多依赖工程师的个体专业能力;而其余大多数环节——从需求分析、方案实施到系统集成与项目管理——均高度依赖与他人协作的能力,凸显了团队合作在现代工程实践中的核心地位。

4.3 卓越工程师教育的团队能力认识：注重工程贡献社会的综合能力

卓越工程师教育立足于科技发展的共性特征与“21世纪工程人才”的时代背景,其对人才素质与能力的要求具有鲜明的前瞻性。这不仅体现了卓越工程师所承载的多重身份与复合能力,也彰显了工程教育必须履行的社会责任与核心职能。具体可归纳为以下五个维度：

- (1) 工程师-方法大师,不仅精通工程理论与规范,更能辩证、灵活地运用并创新工程方法;
- (2) 工程师-科学家,不仅是工程科学的研究者与技术创新者,更能洞察生产实际,推动技术迭代与应用转化;
- (3) 工程师-企业家,不仅具备组织技术产品开发与提供专业服务的能力,还能在跨领域工程实践中发挥资源整合与战略引领作用;
- (4) 工程师-政治家,不仅熟悉新技术治理中的

政策与法规,还能有效沟通工程师群体与政府机构,推动有利于技术发展的制度环境建设;

(5) 工程师-设计师,在工程艺术与产品设计方面具有影响力,其成果不仅关乎商业化成功,更深刻塑造社会体验与价值导向。

由此可见,卓越工程师教育必须高度重视社会责任意识的培养,并着力强化跨学科融合、团队协作以及面向复杂现实问题的综合解决能力。

5 我国高质量工程人才培养和新工科教育改革启示

工程卓越化发展所亟需的工程人才与工程教育,应建立在三大核心理念之上:一是基础科学与工业工程实践之间的双向互动;二是跨学科知识的深度融合;三是工程师团队协作精神的培育。这些理念不能停留在理论层面,而应切实落脚于以本土工程问题为导向的实践探索,并在此过程中深化对工程活动内在规律的认识。

近年来,随着“卓越工程师教育培养计划”升级版的深入推进,我国积极推动新工科专业和学科点建设,通过产学合作、协同育人的机制,有针对性地设立“新工科建设专题”,系统整合工业企业中的工程实践资源。具体举措包括:鼓励部属高校与地方高校积极参与“双一流”建设和新工科教育实践项目,推动新工科建设有机融入国家及区域产业发展规划等。这些改革路径多维度嵌入高等工程教育体系及多层次

表2 工程软技能和硬产出能力比较
Table 2 Comparison of engineering capability: Soft vs. hard strength

软技能构成要素	工程硬产出能力				
	工程理解能力	工程设计能力	工程决策能力	工程原型制造能力	工程测试能力
交流	●	○	●	●	●
关键思维与解决方案	●	●	●	●	●
全过程学习与信息管理	●	●	●	●	●
团队合作	●	○	●	●	●
创业实现	●	○	●	○	○
职业道德与伦理	●	●	●	●	●
领导力	●	○	●	●	●

注：●代表横向因素和纵向因素密切相关；○代表无密切相关性。

工程人才培养体系,旨在为国家持续输送高质量工程人才,显著提升我国工程人才资源的全球竞争力和国家综合国力。

与此同时,从工程卓越化发展的现实需求出发,中国科协于2022年6月发布了“十大问题”系列报告^[36],涵盖10大前沿科学问题(本文记为Ⅰ类)、10大工程技术问题(Ⅱ类)和10大产业技术问题(Ⅲ类)。其中多项典型议题——如“自动、智能、精准的化学合成”(Ⅰ类)、“全固态锂金属电池的工程化应用”(Ⅱ类)、“高精密复杂硬曲面随形电路”(Ⅱ类)、“存算一体芯片的工程化与产业化”(Ⅲ类)、“自主可控的工业设计软件”(Ⅲ类)等——鲜明体现出卓越工程在连接基础科学研究与产业实践过程中的典型解题特征。这些问题的突破,高度依赖基础科学、工程技术方案与产业应用场景之间的深度融通与协同创新。由此可见,推动基础研究-工程实现-产业落地三者之间的有效衔接,不仅是我国工程卓越化发展的关键路径,更是新时代中国工程教育肩负的重要使命。

综上所述,我国卓越工程人才教育的理念革新应重点关注三个方面:一是强调“工程”在整合科技元素中的主导地位,注重问题导向、设计优先、技术集成及创造性的解决方案;二是强化卓越工程师教育与基础科学和工业实践之间的双向联系,确保两者间的动态互补;三是推崇以团队模式为核心的卓越工程人才培养方式,体现对社会和经济发展的责任感和代际担当。具体而言:

(1) 科技要素的集成与本土原创性解决方案。工程理念相较于单纯的技术发展更具系统性和综合性,在工程及其教育实践中特别重视项目型或解决方案导向的方法,以此来集成适当的技术门类。认识到技术作为工具可分为现有技术和未知技术两大类至关重要:现有的成熟技术如同现成的工具箱,而针对特定工程问题的未知技术则需要广泛的工程视野进行选择 and 攻克。无论是有形技术(如设备、原型设计图纸)还是无形技术(如专利、专有技术),都是工程活动的关键组成部分,需要多种技术类型的协同与集成。开拓型工程活动不仅可能催生新技术,还需与现有技术结合,产生具有广泛应用价值的通用技术或适合本

国需求的适用技术,从而高效实现本地工程解决方案。

(2) 工程与基础科学的双向联系。卓越工程师教育要求产学研结构的有效介入,并建立有效的互动机制,使基础科学研究能够支撑当前及未来的工程科学,同时将实际工程问题提炼为基础科学问题,促进新的科学探索和成果产出,进而支持工程科学的发展和工程卓越化的推进。这种发展模式应当成为卓越工程教育的基本规律。

(3) 卓越工程人才教育的团队模式与责任创新。卓越工程师的成长离不开“集思广益”的团队合作,尤其是在处理跨专业、跨学科的复杂工程问题时。工程团队的质量和数量对于一个项目的成功、企业的成长乃至国家工业的发展都至关重要。现代卓越工程师的培养应遵循这一特点和规律,通过团队合作促进知识积累、能力互补和创新文化的形成。此外,随着人工智能等领域的进步,科学-工程的社会文化变革带来了新的挑战和机遇,卓越工程师的角色已扩展到社会责任层面,工程能力的内涵也变得更加广泛和社会化。面对全球范围内科学、工程和产业发展所带来的社会联系问题及其运行规律,作为新兴发展中大国,中国应在工程卓越教育中未雨绸缪,致力于通过工程创造更加美好的社会环境。

6 结论与展望

本研究聚焦“新科技时代工程卓越化”的内涵演进及其对卓越工程人才培养的深层启示,旨在回应当前我国从“制造大国”向“制造强国”转型过程中对高质量工程人才的迫切需求。通过系统梳理“工程”“技术”“科学”三者的历史关联与理念变迁,结合国际比较与中国实践,本文深入剖析了工程卓越化发展的内在规律,并据此提炼出支撑新时代卓越工程师教育改革的关键理念框架。主要发现可归纳为以下三点:

(1) 工程卓越化本质上是一种以问题导向和质量提升为核心的系统性集成过程。它不仅体现为工程技术的先进性或产品质量的可靠性,更深层次地表现为对本土社会经济发展需求的精准响应能力。无论是欧

美国国家强调“科学型工程”(science-based engineering)的知识根基,还是我国历史上大型国家工程(如三峡工程、探月工程)所彰显的统筹协调与总成能力,均体现出工程作为“现实直接生产力”的集成统帅作用。这一过程要求工程活动能够有效整合横向的多技术门类与纵向的基础科学成果,形成具有原创性、适用性和可持续性的解决方案。

(2) 基础科学与工程实践之间存在动态互促的双向知识流动机制,这是实现工程卓越化的关键路径。传统线性模型将基础科学视为工程的“源头”,忽视了工程实践中复杂问题对基础研究的反向驱动作用。本文强调,真正的工程卓越不仅依赖于科学成果的“输入”,更在于能否从工程瓶颈中识别并凝练出新的科学问题,进而推动基础理论的突破。例如,余国琮院士运用流体力学原理解决精馏工程难题,正是“工程反哺科学—科学再赋能工程”闭环的典型范例。对于正处于追赶与赶超并存阶段的中国而言,打通这一双向通道,是突破“卡脖子”技术、构建自主可控产业体系的根本保障。

(3) 卓越工程师的培养必须从个体能力导向转向团队协作与社会责任导向。在工业4.0迈向工业5.0的背景下,现代工程日益呈现出高度交叉、快速迭代、人机协同与价值多元的特征。单一学科背景或孤立技术能力已难以应对复杂系统工程挑战。因此,卓越工程师教育应着力培育四大团队型能力:跨学科协作能力、持续学习与协同进化能力、面向真实场景的创造性解决问题能力,以及具备全球视野与人类命运共同体意识的国际合作能力。这要求教育模式从传统的

“课程递进式”转向“项目驱动、产教融合、团队共学”的新范式。

本研究尚存在一定局限。首先,对不同产业类型(如高技术密集型 vs. 劳动密集型)中工程卓越化路径的差异化机制分析尚显宏观,若能结合具体行业案例开展微观层面的研究,或将提供更具针对性和实践意义的参考;其次,国际上关于基础科学研究与工业科学、工业工程实践之间相互促进的政策实践已有一定积累,值得进一步开展系统的比较研究;再次,人工智能、数字孪生、绿色低碳等新兴技术正在深刻重塑工程范式与人才能力结构,这些因素对工程卓越化发展及卓越工程人才培养将具有重要影响,但本文尚未就此展开讨论。

基于上述发现与局限,未来研究可在以下方向进一步拓展:(1)开展分行业、分区域的工程卓越化案例库建设,系统总结“基础研究—工程实现—产业应用”一体化的成功模式,提炼可复制、可推广的协同创新机制;(2)深化政产学研协同治理研究,重点探索政府如何通过重大科技专项、创新联合体、工程师职衔认证等制度工具,有效引导双向知识流动与资源整合;(3)构建面向工业5.0的卓越工程师能力指标体系,将可持续发展、伦理责任、人机协作、韧性设计等新维度纳入评价标准,并开发相应的教学与评估工具;(4)加强国际比较与本土转化研究,在借鉴欧美工程教育先进经验的同时,立足中国制度优势与文化语境,探索具有中国特色的卓越工程师自主培养之路。

参考文献

- [1] 昌道励,周美. 三部门联合印发《制造业卓越质量工程实施意见》推动中国制造 迈向卓越质量[N]. 南方日报, 2023-12-29(A03).
Chang D L, Zhou M. The three departments jointly issued the "Implementation Opinions on Manufacturing Excellent Quality Engineering", Promote Made in China, Towards Superior Quality[N]. Nanfang Daily, 2023-12-29(A03).
- [2] 刘怡,张炜. 一流大学卓越工程师核心素养构成及发展状况调查: 基于学生视角的探索性研究[J]. 高等工程教育研究, 2023(6): 59-65.
Liu Y, Zhang W. Investigation on the development status of key competencies of excellent engineers in a first class universities: Exploratory research based on students' perspective[J]. Research in Higher Education of Engineering, 2023(6): 59-65.
- [3] 胡德鑫,逢丹丹,顾佩华. 面向卓越工程师培养的现代产业学院高质量发展: 目标、策略与路径[J]. 中国高教研究, 2023(12): 16-23+78.
Hu D X, Peng D D, Gu P H. High-quality development of modern industrial colleges for cultivating excellent engineers: Objectives, strategies, and paths[J]. China Higher Education Research, 2023(12): 16-23+78.

- [4] 殷瑞钰, 李伯聪, 汪应洛, 等. 工程哲学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2022.
Yin R Y, Li B C, Wang Y L, et al. Philosophy of Engineering[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2022.
- [5] 殷瑞钰, 李伯聪, 汪应洛, 等. 工程演化论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
Yin R Y, Li B C, Wang Y L. Theory of Engineering Evolution[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [6] Needham J, Wang L. Science and Civilization in China, Vol.4[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1963.
- [7] Kopacek P. Higher Education in Engineering Management with impacts of TECIS[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(25): 164-167.
- [8] Reynolds T S. The Engineers in America: A Historical Anthology from Technology and Culture[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1991.
- [9] Arce E, Suárez-García A, López-Vázquez 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.
- [10] Obama B. Educate to innovate: Third Annual White House Science Fair[EB/OL]. [2023-07-27]. <https://obamawhitehouse.archives.gov/issues/education/k-12/educate-innovate>.
- [11] 张多雷, 刘敏. 法国高等工程师教育解析, 中法工程师教育改革发展纪实——北航印记[M]. 北京: 光明日报出版社, 2022.
Jean D L, Liu M. Analysis on Higher Engineering Education in France, China-French Cooperative Education for Engineers: Development Records at Beihang University[M]. Beijing: Guangming Daily Press, 2022.
- [12] 张巍, 洪冠新. 法国工程师职衔委员会(CTI)认证体系变革之路, 中法工程师教育改革发展纪实——北航印记[M]. 北京: 光明日报出版, 2022.
Zhang W, Hong G X. The French Reformation Way of Engineering Qualification Commission, China-French Cooperative Education for Engineers: Development Records at Beihang University[M]. Beijing: Guangming Daily Press, 2022.
- [13] Krebs H J, Jäger W. Mathematics: Key Technology for the Future: Joint Projects between Universities and Industry[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [14] 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.
Wang S Y, Liu J Q. From history to future: Reflections on the sixty-year development of engineering education in New China[J]. Research in Higher Education of Engineering, 2010(4): 30-42.
- [15] 张柏春. 苏联技术向中国的转移: 1949—1966[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004.
Zhang B C. Technology Transfer from the Soviet Union to the P. R. China[M]. Jinan: Shandong Education Press, 2004.
- [16] 中华人民共和国教育部. 教育部关于批准第二批卓越工程师教育培养计划高校的通知[EB/OL]. [2023-07-27]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/moe_742/s3860/201109/t20110929_125721.html.
Ministry of Education of the People's Republic of China. The Ministry of Education approved the second batch notice of outstanding engineer education and training program colleges and universities[EB/OL]. [2023-07-27]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/moe_742/s3860/201109/t20110929_125721.html.
- [17] 陈厚丰, 张凡稷. 近十年我国高等工程教育的发展轨迹、困境与路径抉择[J]. 大学教育科学, 2021, 12(5): 60-68.
Chen H F, Zhang F J. The development track, dilemma and path of higher engineering education in China in past ten years[J]. University Education Science, 2021, 12(5): 60-68.
- [18] 朱正伟, 李茂国. 实施卓越工程师教育培养计划2.0的思考[J]. 高等工程教育研究, 2018(1): 46-53.
Zhu Z W, Li M G. Thinking on implementing the education and training plan of outstanding engineers 2.0[J]. Research in Higher Education of Engineering, 2018(1): 46-53.
- [19] 林成华, 赵文鹏. 工程教育面临哪些结构性矛盾[N]. 光明日报, 2022-8-16(15).
Lin C H, Zhao W P. What kinds of structural dilemma are facing in front of engineering education[N]. Guangming Daily, 2022-8-16(15).
- [20] Xu L D, Xu E L, Li L. Industry 4.0: State of the art and future trends[J]. International Journal of Production Research, 2018, 56(8): 2941-2962.
- [21] Chen H. Theoretical foundations for cyber-physical systems: A literature review[J]. Journal of Industrial Integration and Management, 2017, 2(3): 1750013.
- [22] Lu Y. Cyber Physical System (CPS)-based industry 4.0: A survey[J]. Journal of Industrial Integration and Management, 2017, 2(3): 1750014.
- [23] European Commission. Industry 5.0: Industrial research and innovation[EB/OL]. [2023-07-27]. <https://ec.europa.eu/info/research-and>

innovation/research-area/industrial-research-and-innovation/industry-50_en.

- [24] 潘云鹤. 新时代高等工程教育的范式变革与未来展望[J]. 科教发展研究, 2021, 1(1): 11-23.
Pan Y H. Engineering's paradigm shift and future prospects of higher education in the new era[J]. Journal of Science, Technology and Education Studies, 2021, 1(1): 11-23.
- [25] Froyd J E, Wankat P C, Smith K A. Five major shifts in 100 years of engineering education[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(Special Centennial Issue): 1344-1360.
- [26] Gürdür Broo D, Kaynak O, Sait S M. Rethinking engineering education at the age of industry 5.0[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 25: 100311.
- [27] Sunthonkanokpong W. Future global visions of engineering education, 2nd international science, social-science, engineering and energy conference 2010: Engineering science and management[J]. Procedia Engineering, 2011(8): 160-164.
- [28] Meyer-Krahmer F, Schmoch U. Science-based technologies: university: Industry interactions in four fields[J]. Research policy, 1998, 27(8): 835-851.
- [29] Pavitt K. Sectoral patterns of technical change: Towards a taxonomy and a theory[J]. Research Policy, 1984, 13(6): 343-373.
- [30] 袁希钢. 多用点科学, 少用点经验——余国琮院士与工程科学[N]. 光明日报, 2022-6-27(11).
Yuan X G. More science, less experience: Academician Yu Guocong and engineering science[N]. Guangming Daily, 2022-6-27(11).
- [31] Shultz G P, Armstrong R C. Game Changers: Energy on the Move: Five R & D Efforts from American Universities that are Offering a Cheaper, Cleaner, and More Secure National Energy System[M]. Stanford, Calif.: Hoover Institution Press, Stanford University, 2014.
- [32] 薛新龙, 岳云嵩. 世界各国如何构建数字人才体系[N]. 光明日报, 2022-10-13(14).
Xue X L, Yue Y S. How to restruct talent system for digital economies: Views from global countries[N]. Guangming Daily, 2022-10-13(14).
- [33] Fischer G. Industry and participant requirements for engineering management[D]. Vienna: Vienna University of Technology, 2004.
- [34] Kopacek P, Hajrizi E, Stapleton L. From engineering to mechatronics management[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(8): 1-4.
- [35] Arce E, Suárez-García A, López-Vázquez 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.
- [36] 陈海波, 赵佳伟. 这些问题, 关乎我们的未来[N]. 光明日报, 2022-6-28(11).
Chen H B, Zhao J W. These problems matter about our future[N]. Guangming Daily, 2022-6-28(11).

Engineering Evolution toward Excellency and Education for Excellent Engineers: Key Concepts and Their Implications under New Science & Technology Era

CHEN Xiangdong^{1,2*}, HUANG Xingrong³, HONG Guanxin⁴

1. The School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Center for Technology Innovation, Tsinghua University, Beijing 100084;

3. Centrale Peking & International General Engineering School, Beihang University, Beijing 100191, China;

4. Zhongfa Aviation Institute of Beihang University, Hangzhou 311115, China

Highlights

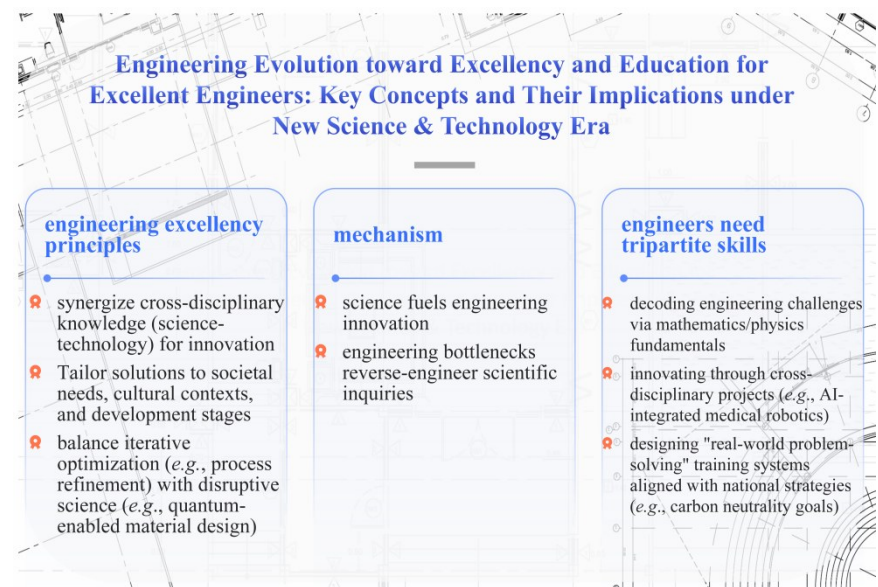
Pioneer the “integration-directionality-adaptability” triad, revealing the ternary-driven knowledge leapfrogging law of science-technology-local resource synergy.

Establish a cyclical innovation loop between “science—engineering” (e.g., fluid dynamics optimizing distillation) and “engineering—science” (e.g., semiconductors driving material R&D).

Construct a “scientific-decoding-interdisciplinary-collaboration-local-rooting” triadic competency model, advancing AI+medical robotics cross-disciplinary projects.

Realize the leap from “technological followership” to “innovation leadership” via “strengthening scientific foundations + deepening industry-academia synergy + fostering interdisciplinary teams”.

Graphical Abstract



Abstract: This paper, by reviewing various literature resources from different but relevant studies and also analyzing conceptual differences on typical terms in usage between Chinese and Western culture, focuses on key ideas and characters of engineering and engineering education, and proposes a specific term to indicate the fact: engineering evolution toward excellency (EEE), reflecting quality based evolution of the industrial civilization, driven by current and future needs from local region and national capacity, with specific social and economic expectations; in this way, available resources from sciences, technologies, and others are selected, optimized, and integrated through the engineering process, with differentiated efficiencies, depending heavily on capabilities and commitments of excellent engineers in the local and national capacity, and significantly, on the efficiency of local engineering education. The paper therefore emphasizes on fundamental mindsets and understanding over "engineering" with three important rules: (1) It is the engineering process, especially the EEE process, that integrates basic science knowledge, key technologies, and other relevant resources, enabling a quality local-need-based solution to be produced, therefore, concept of engineering and EEE should be the core part to actively understanding the link for continual development between the two fields, one in an active engineering practice and the other a relevant basic science research, to reach an up-to-date solution; (2) It

is such two-way knowledge and information transfer between basic scientific research and engineering practices that make EEE occur in a larger scale, especially in ways through which key basic scientific questions on practical bottle-neck could be found, defined, and decoded for higher quality scientific solution; (3) It is such two-way knowledge and information transfer mechanism that is the core part of engineering educational reform for excellent engineers to support EEE in a long run. Hence, this paper provides following important findings and policy suggestions for excellent engineer oriented education: (1) Solid foundation for basic scientific learning should be effectively implemented in order for students either to explore new engineering path, or to find and to create dynamic practical engineering solutions, and the latter part should be even more important in developing and emerging economies as often such function based university-industry consortium is less effective and much more demanding; (2) Effective university-Industrial collaboration, either in terms of UIG (university-industry-government) consortium or in shape of GIU (government-industry-university) structure, is necessary mechanism in engineering and in education for EEE upgrading, in which crucial step is on conceptual level reforming; (3) Group learning, especially cross-field group learning system should be well established throughout the course of the engineering educational reform, in order for both students and teachers to accept active co-operations and to jointly produce creative innovations and engineering solutions, when facing challenging dilemma and bottlenecks; (4) In both conceptual and practices, strong commitment for local engineering evolution and fit-in solution should be necessary, starting from regional and national industrial development case, theoretically and practically keeping EEE for local excellent output. The EEE concept and the rules discussed in this paper on education for excellent engineer could be served as reference for readers on relevant topics in engineering and education.

Keywords: engineering evolution toward excellency (EEE); engineering education; education for excellent engineers; national innovation system