

《华盛顿协议》毕业要求框架变化及其启示

李志义

【摘要】《华盛顿协议》毕业要求框架是实现成员间教育资格实质等效的基本参照点。IEA 联合 WFEO 对 2013 版《毕业要求和职业能力》进行修订后颁布了 2021 版《华盛顿协议》毕业要求框架。本文对新版毕业要求框架及其支撑知识与态度框架、复杂工程问题定义、复杂工程活动定义的变化进行了系统分析,在此基础上,从联合国可持续发展目标、工程领域多样性和包容性、本科阶段 STEM+C 教育、KSA“三位一体”内在逻辑、第一性原理思维等五方面,探讨了此次修订对我国工程教育与工程教育认证的启示。

【关键词】华盛顿协议 工程教育认证 毕业要求

一、引言

工程师培养需要经历两个重要阶段:一是通过学校工程教育获得教育资格,二是经过专业实践的养成性发展获得执业资格。每个工程教育本科专业都制定了毕业要求,学生达到要求就意味着取得教育资格。《华盛顿协议》(简称《华协》)基于成果导向教育(OBE)理念制定了毕业要求框架,作为其成员制定实质等效毕业要求标准的参照点。换言之,《华协》成员应参照《华协》毕业要求框架制定工程教育认证毕业要求标准,参与认证专业的毕业要求应覆盖标准毕业要求。这样,就能保障通过工程认证专业的毕业生具有实质等效的毕业资格。国际工程联盟(International Engineering Alliance, IEA)2005 年颁布第一版《华协》毕业要求框架^①以来,已修订 3 次,于 2021 年 6 月 21 日颁布第 4 版。^[1]

2019 年 11 月世界工程组织联合会(World Federation of Engineering Organizations, WFEO)与 IEA 签署了谅解备忘录,成立专门工作组对《毕业要求和职业能力》(2013 年第 3 版)进行审查与修订。这次审查与修订背景是:联合国可持续发展目标,社会需求变化和新思路,以及当代价值观和雇主需求变化。修订工作主要着眼于:联合国可持续发展目标(需考虑技术、环境、社会、文化、经济、金融和全球责任),适应工程专业人士和专业未来发展需求(需加强团队合作、沟通、伦理和可持续性方面必备素质),工程领域新兴技术和学科(需在保留学科独立方法同时,增强数据科学、其他学科和终身学习能力),解决工程

决策所需的智力敏捷性、创造力和创新能力(需在解决方案设计和开发中强调批判性思维和创新过程),多样性和包容性(需将这些因素纳入团队合作、沟通、合规、环境、法律等系统工作方式)。修订工作历经一年多,草案分别提交 2021 年 IEA 年度大会和 2021 年 WFEO 大会讨论后,由 IEA 正式发布。毕业要求框架变化的分析比较,对修订我国现行基于 2013 版《华协》毕业要求框架制订的《工程教育认证标准(2018 版)》具有现实意义。《华协》毕业要求框架代表毕业生毕业应具备的技术和非技术能力,这些能力由表 2 所列知识和态度框架支撑,表 1 复杂工程问题和复杂工程活动分别由表 3 和表 4 定义。因此,表 1 至表 4 是一个整体,形成知识、能力和态度“三位一体”毕业要求框架结构。分析比较包括两个框架(毕业要求和知识与态度)和两个定义(复杂工程问题和复杂工程活动)。

二、毕业要求框架变化

从结构看,2013 版毕业要求框架由 12 条特征组成,2021 版将 2013 版中“工程师与社会”与“环境和可持续发展”合并为“工程师与世界”,成为 11 条特征。除此之外,2021 版毕业要求框架与 2013 版相比,结构与特征没有变化。然而,几乎每条特征内容的表述都有变化(见表 1)。

WA1 工程知识。2021 版增加了计算基础知识,与工程基础知识并列,是未来适应新兴学科及数据科学的需要(见第六部分启示之三)。2013 版英文句式结构为“Apply knowledges of...to the solution of...”,2021 版改为“Apply knowledge of

收稿日期:2022-02-20

作者简介:李志义,大连理工大学教授、博士生导师。

表 1 《华协》毕业要求框架

| 2013 版 | 2021 版 |
|---|---|
| WA1(工程知识) ^② :将数学、自然科学、工程基础和专业知识(如 WK1 至 WK4 分别指定的知识)用于解决复杂工程问题。 | WA1(工程知识):应用数学、自然科学、 计算 与工程基础、以及专业知识(如 WK1 至 WK4 分别指定的知识)开发复杂工程问题的解决方案。 |
| WA2(问题分析):利用数学、自然科学和工程科学的第一性原理,识别、表达并通过文献研究分析复杂工程问题,以获得有效结论。(WK1 至 WK4) | WA2(问题分析):利用数学、自然科学和工程科学的第一原理, 结合可持续发展的整体考虑 ,识别、表达、研究文献和分析复杂工程问题,以获得有效结论。(WK1 至 WK4) |
| WA3(设计/开发解决方案):设计针对复杂工程问题的解决方案,设计满足特定需求的系统、部件或工艺,并恰当考虑公共健康和 安全、文化、社会及环境因素 。(WK5) | WA3(设计/开发解决方案):设计针对复杂工程问题的解决方案,设计满足特定需求的系统、部件或工艺,并恰当考虑公共健康和 安全、全寿命成本、零净碳 ,以及资源、文化、社会和环境要求。(WK5) |
| WA4(研究):利用基于研究的知识(WK8)与研究方法对复杂工程问题进行研究,包括设计实验、分析与解释数据,并通过信息综合得到合理有效的结论。 | WA4(研究):利用研究方法对复杂的问题进行研究,包括基于研究的知识、设计实验、分析和解释数据,并通过信息综合得到合理有效的结论。(WK8) |
| WA5(使用现代工具):针对复杂工程问题,开发、选择与使用恰当的技术、资源、现代工程工具和信息技术工具,包括预测与模拟,并能够理解其局限性。(WK6) | WA5(使用工具):针对复杂工程问题,开发、选择与使用恰当的技术、资源、现代工程工具和信息技术工具,包括预测与模拟,并能够理解其局限性。(WK2、WK6) |
| WA6(工程师与社会):基于工程相关背景知识进行合理分析,评价专业工程实践和复杂工程问题解决方案对社会、健康、安全、法律及文化的影响,理解应承担的责任。(WK7) | WA6(工程师与世界):解决复杂工程问题时,分析和评估可 持续发展 对社会、经济、可持续性、健康和 安全、法律框架和环境的影响 。(WK1、WK5 和 WK7) |
| WA7(环境和可持续发展):理解和评价针对复杂工程问题的工程实践对环境、社会可持续发展的影响。(WK7) | |
| WA8(伦理):运用道德原则,遵守职业道德与职责以及工程实践规范。(WK7) | WA7(伦理):运用道德原则,遵守职业道德和工程实践规范及 相关国际法和国际法,理解多样性和包容性的必要性 。(WK9) |
| WA9(个人与团队):在多样化团队及多学科环境中,作为个人、成员或领导者有效发挥作用。 | WA8(个人与团队):在多样化和 包容性 团队及多学科、 面对面、远程和分布式 环境中,作为个人、成员或领导者有效地发挥作用。(WK9) |
| WA10(沟通):能就复杂工程活动与业界及社会公众进行有效沟通和交流,如能够理解、撰写有效报告和 设计文档 、进行有效的介绍,给予和接受明确的指令。 | WA9(沟通):就复杂工程活动与工程界及社会公众进行有效的和 包容性 的沟通和交流,如能够理解、撰写有效报告和 设计文档 、进行有效的介绍,在此过程中 考虑到文化、语言和知识的差异 。 |
| WA11(项目管理与财务):理解并掌握工程管理原理与经济决策方法并将其应用于自己的工作,作为团队成员和领导者应用于管理项目和多学科环境。 | WA10(项目管理与财务):理解和掌握工程管理原理和经济决策方法,将其应用于自己的工作,作为团队成员和领导者应用于管理项目和多学科环境。 |
| WA12(终身学习):认识到在最广泛的技术变革背景下自主学习和终身学习的必要性,准备好并具有从事终身学习的能力。 | WA11(终身学习):认识到在最广泛的技术变革背景下有必要并准备好和有能力的:① 自主学习和终身学习;② 适应新技术和未来技术 ;③ 在最广泛的技术变革背景下进行批判性思维 。(WK8) |

注:体现于联合国可持续发展的 17 个目标 (UN-SDG)。

…to develop the solutions of …”。前者用介词短语作状语,后者用动词不定式作状语(也可理解成谓语句补语),就将原来应用层面的低阶认知能力(apply)提高为创造层面的最高阶(develop)能力。^[2]

WA2 问题分析。2021 版增加了问题分析时“结合可持续发展的整体考虑”。2013 版和 2021 版都强调应用第一性原理,《工程教育认证标准(2018 版)》用“基本原理”代替“第一性原理”。事实上,二者存在显著差异,后者主要指分析问题的方法论(见第六部分启示之五)。毕业要求框架的《华协》《悉尼协议》和《都柏林协议》的区别特征可以看出^[1]:《华协》是“利用第一性原理”、《悉尼协议》是“利用分析方法”、《都柏林协议》是“利用规范方法”。利用第一性原理分析问题,恰恰是我国工程教育的短板。

WA3 设计/开发解决方案。2021 版增加了设计对全寿命成本和零净碳(碳中和)的考虑。全寿命成本包括设计、制造、采购、运行、维护、报废、回收、再利用等成本。以往设计往往对项目的设置费(设计、制造、采购、运行)考虑较多,对维持费(维护、报废、回收、再利用)考虑较少,因为设置费在现有技术条件下基本可预见且有经验可依,而维持费需考虑较多因素,使用寿命往往有较大不确定性且没有现成经验可依。设计阶段权衡设置费与维持费,特别是充分考虑回收与再利用费用,做到全寿命效益最大化,不仅是提高设计全寿命经济性的要求,也是可持续发展的需要。零净碳是响应 2015 年巴黎气候大会通过《巴黎协定》确立的 2020 年后全球气候治理新机制,即全面实施《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)。我国 1992 年经全国人大批准《联合国气候变化框架公约》,1994 年起该公约生效。2020 年 9 月 22 日,中国政府在第七十五届联合国大会上提出:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。”

WA4 研究。除个别词序调整外,基本内容没有变化。

WA5 使用现代工具/ WA5 使用工具。2021 版除个别词序调整外,基本内容没有变化。不过,特征词 2013 版是“使用现代工具”,2021 版是“使用工具”。此外,相应知识增加了 WK6,强调使用数据、建模和计算技术模拟可能的解决方案,同时理解所做假设的影响和所使用数据的局限性。

(WA6 工程师与社会+ WA7 环境和可持续发展)/ WA6 工程师与世界。2021 版 WA6(工程

师与世界)将2013版WA6(工程师与社会)与WA7(环境和可持续发展)合二为一。2013版WA6强调“人文”,WA7强调“自然”,2021版将二者统一为“世界”,表明工程师解决复杂工程问题时须处理好与客观世界的关系并承担相应责任。特别强调可持续发展及联合国可持续发展17个目标(见第六部分启示之一)。同时,相应知识增加了WK1和WK5,强调相关社会科学知识及资源有效利用、最小浪费和环境影响、全寿命成本、资源再利用、零净碳等方面知识。《工程教育认证标准(2018版)》将“工程师与社会”用“工程与社会”来替代,似乎对工程师责任主体强调不够。

WA8 伦理/WA7 伦理。2021版增加了遵守国家与国际法律的伦理责任,以及理解多样性和包容性的伦理责任。《工程教育认证标准(2018版)》将“伦理”用“职业规范”来替代,似乎难以覆盖其内涵,尤其是2021版增加的内容远超出职业规范范畴。《华协》WA8(2013版)或WA7(2021版)中ethics常译为“道德”。从词源考察,“道德”(morality)源于风俗(mores)而“伦理”源于古希腊伊索斯。“伦理”是外在社会对人的行为的规范和要求,通常指社会秩序、制度、法制等;“道德”指内在规范,是个体的行为、态度和心理状态。^[3]20世纪70年代起,工程伦理学在美国等发达国家兴起。《工程伦理学》作者马丁(M. W. Martin)和欣津格(R. Schinzinger)认为:“伦理是理解道德价值,解决道德问题,为道德判断作辩护的活动”。“工程伦理是对在工程实践中涉及的道德价值、问题和决策的研究。”《华协》WA8(2013版)或WA7(2021版)中ethics指“伦理”而非“道德”。

WA9 个人与团队/WA8 个人与团队。2021版强调团队的多样化和包容性,更关注不同种族、性别、年龄的平等。工作环境的多学科主要包括社会、管理、人道主义科学、法律方面,增加了面对面、远程和分布式环境,充分考虑了人们工作方式的新变化(见第六部分启示之二)。《工程教育认证标准(2018版)》将“多样化团队”描述为“多学科背景下的团队”似乎不太妥当,毕竟团队构成与工作环境(背景)不能同语而语,且二者指向截然不同。

WA10 沟通/WA9 沟通。2021版考虑到文化、语言和其他方面差异,强调书面和口头的包容性沟通的重要性。2013版和2021版都将沟通内容指定为“复杂工程活动”,而《工程教育认证标准(2018版)》将其指定为“复杂工程问题”,二者在《华协》中给出了明确不同的定义(见表3和表

4)。“复杂工程问题”是工程师自身应面对和解决的,“复杂工程活动”则涉及自然界和人类社会(见表4),应与工程界及社会公众进行沟通。

WA11 项目管理与财务/WA10 项目管理与财务。除个别英文表达调整外,基本内容没有变化。《工程教育认证标准(2018版)》相应于该条毕业要求的特征词为“项目管理”。工程教育实践中,存在专业忽视“财务”方面知识和应用能力的现象。

WA12 终身学习/WA11 终身学习。增加了适应新技术和未来技术及技术变革背景下进行批判性思维,强调了适应能力和批判性思维的重要性。

三、知识和态度框架变化

如果说毕业要求框架给出了学生毕业应具备的能力结构,知识和态度框架则给出了形成该能力结构必备的知识和态度结构。前者是能力产出,后者是产出能力。就是说,根据知识和态度结构设置课程体系,通过课程体系形成能力结构(见第六部分启示之四)。从结构看,2013版知识框架共8条,2021版在此基础上增加了一条态度方面内容,共9条,因此2021版称为知识和态度框架。2021版变化见表2。

WK1:增加了社会科学知识,课程体系应包括:①基础自然科学课程(如物理、力学、化学、地球科学和生物科学);②与本学科相关的社会科学课程或者学生体验(如毕业设计)对相应社会科学的投入来代替社会科学课程。

WK2:增加了数据分析知识,课程体系应包括与专业相适应的数学、数据分析、数值分析和统计/概率课程,以及使用现代工具的计算和信息理论经验。“计算机与信息科学的形式方面”:有学者将“计算机和信息科学”统称为“信息学(Informatics)”,认为信息学有三个方面:形式方面和非形式的经验和实验方面。形式方面指接近逻辑学和数学的理论方面。

WK3:没有变化。课程体系应包括本学科的工程基础课程,如材料学、流体力学、传热学、动力学、电路学等。

WK4:没有变化。课程体系应包括适当的学科前沿课程。

WK5:增加了支持运行的知识,强调资源有效利用、环境影响、全寿命成本、资源再利用、零净碳等方面的知识。学生每次设计体验都要考虑与其他领域(科学、法律、艺术、人文)的相关因素,以及包括联合国可持续发展的17个目标在内的可持续性概念。

表 2 《华协》知识和态度框架

| 2013 版 | 2021 版 |
|---|--|
| WK1: 对与本学科相关的自然科学有系统的、以理论为基础的理解。 | WK1: 对与本学科相关的自然科学有系统的、以理论为基础的理解, 并对相应的社会科学有认识。 |
| WK2: 基于概念的数学、数值分析、统计学和计算机和信息科学的形式方面, 以支持适用于本学科的分析 and 建模。 | WK2: 基于概念的数学、 数值分析、数据分析 、统计学以及计算机与信息科学的形式方面, 以支持适用于该学科的分析 and 建模。 |
| WK3: 工程学科所需的系统的、理论的基础知识。 | WK3: 工程学科所需的系统的、理论的基础知识。 |
| WK4: 工程专业知识, 为工程学科公认的实践领域提供理论框架和知识体系; 许多是学科前沿的知识。 | WK4: 工程专业知识, 为工程学科公认的实践领域提供理论框架和知识体系; 许多是学科前沿的知识。 |
| WK5: 实践领域支持工程设计的知识。 | WK5: 实践领域支持工程设计和运行的知识, 包括 资源有效利用、环境影响、全寿命成本、资源再利用、零净碳等方面的知识。 |
| WK6: 工程学科实践领域的工程实践(技术)知识。 | WK6: 工程学科实践领域的工程实践(技术)知识。 |
| WK7: 理解工程的社会角色并确定本学科工程实践存在的问题; 伦理和工程师对公共安全的职责; 工程活动的影响; 经济、社会、文化、环境和可持续性。 | WK7: 理解工程的社会角色并确定本学科工程实践存在的问题, 如工程师对公共安全和可持续发展的职责? |
| WK8: 掌握学科研究文献筛选的知识。 | WK8: 掌握学科研究文献筛选的知识, 意识到批判性思维和创造性方法对评价新兴问题的重要性。 |
| | WK9: 伦理、包容性的行为举止, 职业道德、职业责任和工程实践规范知识; 意识到由于种族、性别、年龄、体能等因素需要多样性, 需要互相理解和尊重, 需要包容性态度。 |

注: 体现于联合国可持续发展的 17 个目标 (UN-SDG)。

WK6: 没有变化。课程设置应超越理论教学, 应包括对当前技术及当代实践与思维的教学。

WK7: 增加了体现联合国可持续发展目标的内容。学生课程的所有实际体验应恰当考虑工程与社会关系并为其承担责任。课程中的设计活动应考虑对人的影响, 以及对环境、经济、社会、文化、资源和联合国可持续发展目标中阐述的影响。

WK8: 增加了对批判性思维和创造性方法“意识”(awareness)。课程设置应与时俱进, 反映学科前沿的新知识和新方法, 具有批判性、创新性和挑战性。《华协》2021 版毕业要求框架将“意识”专门定义为: 使用或应用所学的东西时, 认识到背景和含义。意识的展示可以比知识的展示更多样化。提出正确的问题, 包括所做假设中面对一种情况时遵守或尊重可能是可接受的展示。

WK9: 新增特征与内容。课程设置应让学生学习如何在不同专业背景下, 以不同的团队合作方式, 将包容和伦理的方法融入工作实践(见第六部分启示之二)。

四、复杂工程问题定义变化

IEA《毕业要求和职业能力》包括《华协》《悉

尼协议》和《都柏林协议》三个协议的毕业要求框架, 三个协议解决工程问题的范围分别是复杂工程问题(Complex Engineering Problems)、普通工程问题(Broadly-defined Engineering Problems)和确定工程问题(Well-defined Engineering Problems)。没有一个真正的工程项目或任务与任何其他项目或任务完全相同(否则解决方案可简单购买或复制), 故工程师职业特征是能处理复杂和不确定工程问题。《华协》毕业要求框架将复杂工程问题和解决复杂问题作为中心概念。^[4]从结构上讲, 2021 版复杂工程问题定义与 2013 版没有变化, 包含 WP1(知识深度)、WP2(冲突范围)、WP3(分析深度)、WP4(熟悉程度)、WP5(适用规则的范围)、WP6(利益相关方参与度及冲突程度)和 WP7(相互依赖性)7 个特征(见表 3)。其中, WP1 是构成复杂工程问题的必要条件, WP2 至 WP7 是构成复杂工程问题的充分条件。因此, 复杂工程问题定义为: 具备特征 WP1 且同时具备特征 WP2 到 WP7 的一个或全部。

WP1: 没有变化。

WP2: 增加了非技术问题及对未来需求的考虑。强调以全面的方式解决问题, 并考虑系列限制因素, 包括资源和非技术问题, 包括今天和未来的影响。

WP3: 增加了分析问题的创造性。强调应给学生提供鼓励系统思维和方法分析问题的机会。

WP4: 增加了新兴问题, 以应对新兴技术挑战。

WP5: 没有变化。

WP6: 增加了跨工程学科和其他领域。强调应鼓励解决需要跨工程学科和其他领域合作的问题, 以了解不同观点和处理多种需求。

WP7: 增加了系统方法。强调采用系统方法解决多层次、多因素问题的重要性。

五、复杂工程活动定义变化

IEA《毕业要求和职业能力》将工程活动范围按《华协》《悉尼协议》和《都柏林协议》三个协议依次区分为复杂工程活动(Complex Engineering Activities)、普通工程活动(Broadly-defined Engineering Activities)和确定工程活动(Well-defined Engineering Activities)。无论是 2021 版还是 2013 版, 复杂工程活动均依据 EA1(资源范围)、EA2(交互层次)、EA3(创新)、EA4(对社会和环境的影响)、EA5(熟悉性)等 5 个特征定义(见表 4); 具有其中一个或多个特征的工程活动(项目)即复杂工程活动。

EA1: 增加了计算、分析和设计软件, 因为它

们在表达工程问题及寻找最优解过程中,不再是辅助性工具而是主要工具。

表3 《华协》复杂工程问题定义

| 2013版 | 2021版 |
|---|---|
| WP1:如果没有一个或多个WK3、WK4、WK5、WK6或WK8的深入工程知识(允许采用基于基本原理的、第一性原理的分析方法)则无法解决。 | WP1:如果没有一个或多个WK3、WK4、WK5、WK6或WK8的深入工程知识(允许采用基于基本原理的、第一性原理的分析方法)则无法解决。 |
| WP2:涉及广泛的或相互冲突的技术、工程和其他问题。 | WP2:涉及广泛的和/或相互冲突的技术、 非技术问题(如伦理、可持续性、法律、政治、经济、社会),以及对未来需求的考虑。 |
| WP3:没有明显的解决方案,需要抽象思维、原创性分析才能建立合适的模型。 | WP3:没有明显的解决方案,需要抽象思维、 创造性 和原创性分析才能建立合适的模型。 |
| WP4:很少遇到的问题。 | WP4:很少遇到的问题或 新兴问题 。 |
| WP5:解决的问题是专业工程标准和实践规范未包含的。 | WP5:解决的问题是专业工程标准和实践规范未包含的。 |
| WP6:涉及具有广泛不同需求的不同利益相关者群体。 | WP6:涉及 跨工程学科、其他领域和/或具有广泛不同需求的不同利益相关者群体的协作。 |
| WP7:是高级问题,包括许多组成部分或子问题。 | WP7:具有许多组成部分或子问题的高级问题, 可能需要采用系统方法才能解决。 |

EA2:增加了非技术问题,强调了更广泛的非技术性问题的影响。

EA3:增加了有意识的创新解决方案,强调了创新是自觉的行动。

EA4:没有变化。这种情况下鼓励采用基于概率风险的方法来评估所提出的解决方案。

EA5:没有变化。

表4 《华协》复杂工程活动定义

| 2013版 | 2021版 |
|--|--|
| EA1:涉及使用各种资源(包括人员、金钱、设备、材料、信息和技术)。 | EA1:涉及使用各种资源,包括人员、 数据和信息、自然、金融和物理资源,以及适当的技术(包括分析和/或设计软件)。 |
| EA2:需要寻求重要问题解决方案,这些问题源于广泛或冲突的技术、工程及其他问题间的交互影响。 | EA2:需要在广泛和/或冲突的技术、 非技术 及工程问题的交互中寻求最佳解决方案。 |
| EA3:以新颖方式创造性运用工程原理和基于研究的知识。 | EA3:以新颖方式创造性运用工程原理、 有意识的创新解决方案 和研究性知识。 |
| EA4:在系列难以预测和缓解为特点的情况下产生重大后果。 | EA4:在系列难以预测和缓解为特点的情况下产生重大后果。 |
| EA5:可通过应用基于原理的方法超越以往的经验 | EA5:可通过采用基于原理的方法超越以往的经验。 |

六、几点启示

(一) 工程教育要面向联合国可持续发展目标

2015年9月25日联合国大会193个成员国正式通过17个可持续发展目标^[5],旨在2000-2015年千年发展目标到期后继续指导2015-2030年全球发展工作,以综合方式彻底解决社会、经济和环境三个维度的发展问题转向可持续发展道

路。可持续发展目标与工程和工程师关系分析可见,工程和工程师对2030年实现每项可持续发展目标发挥着不可或缺的作用(见表5),需要新型工程师将可持续发展价值观和目标融入工作中。为此,工程教育需要从关注学科知识和技能转向关注更广泛的跨学科复杂工程问题,分析社会和可持续发展问题,并运用学科知识和技术手段解决这些问题;要关注新工程能力需求以及应对可持续发展挑战的新趋势,注重培养学生创造性学习和思考能力、解决复杂问题的能力、跨学科和国际合作能力及合乎道德规范的态度;要推进工程教育方式方法改革,由以学科知识为重点的方法转变为更加广泛的跨学科学习方法,由以教师为中心的方法转变为以学生为中心和基于问题的学习方法。这些不仅是工程教育重点关注和改

表5 可持续发展目标、工程及工程师

| 序号 | 目标 | 工程与工程师的作用(举例) |
|----|-------------|--|
| 1 | 消除贫困 | 工程可推动经济增长,助力缓解和消除贫困。 |
| 2 | 消除饥饿 | 工程促成农业和粮食生产的机械化,化肥和杀虫剂使用提高了生产效率。 |
| 3 | 良好健康与福祉 | 工程根除了伤寒、霍乱等疾病,改善了水和卫生设施,从而改善全球健康状况。 |
| 4 | 优质教育 | 工程师通过创造在线学习工具等新技术以及依赖快速通信技术,推动教育实施。 |
| 5 | 性别平等 | 确保女性获得技术和工程有助于缩小性别差距,确保女性能受益并且参与技术革命,以及担任领导职位。 |
| 6 | 清洁饮水与卫生设施 | 土木工程师和环境工程师通过提供清洁饮水和污水处理技术,挽救数十亿人的生命。 |
| 7 | 廉价和清洁能源 | 电气工程师、机械工程师和环境工程师一直是开发低成本可再生能源的核心力量。 |
| 8 | 体面工作和经济增长 | 工业革命的工程创新带来经济繁荣并创造更好就业机会,工程被公认为经济增长的重要推动器。 |
| 9 | 工业、创新和基础设施 | 现代经济离不开工程,工程师负责基础设施的设计、建设和维护。 |
| 10 | 减少不平等 | 工程师的工作对于通过基础设施建设及新技术和创新,为人人提供机会、减少不平等至关重要。 |
| 11 | 可持续城市和社区 | 设计和开发适于居住、可持续和有韧性的城市,土木工程师、结构工程师、电气工程师、机械工程师、环境工程师、软件工程师和电信工程师发挥关键作用。 |
| 12 | 负责任的消费和生产 | 工程师通过循环经济概念制定资源管理和负责任消费的解决方案。循环经济中,产出和产品可投入其他流程和产品中,从而保护地球资源。 |
| 13 | 气候行动 | 工程师应对气候变化方面走在最前沿,通过开发广泛的技术减少温室气体排放,并通过发展韧性基础设施来缓解气候变化的影响。 |
| 14 | 水下生物 | 海洋工程师与科学家和其他工程学科携手合作,共同解决海洋污染和资源利用等问题,包括海浪能和油气勘探问题。 |
| 15 | 陆地生物 | 工程师通过负责任地利用森林资源和保护栖息地,在缓解产业的影响、保护生物多样性方面发挥重要作用。 |
| 16 | 和平、正义与强大机构 | 工程实践包括多样性和包容性,可持续实践和工程伦理等价值观,对安全、可持续的工程解决方案至关重要。工程师也助力发展强大的工程教育、认证和监管机构,从而确保各领域工程师的能力发挥。 |
| 17 | 促进目标实现的伙伴关系 | 工程领域的伙伴关系对推进可持续发展目标至关重要,无论是工程机构内部的工程学科领域,还是涉及政府、产业和大学的国家和国际机构之间。 |

革的问题,也是工程教育认证应关注的问题。

(二) 充分理解工程领域的多样性和包容性

美国 ABET 工程认证委员会对多样性和包容性的定义是^[6]:多样性包括但不限于种族、民族、文化、性别认同和表达、年龄、国籍、宗教信仰、工作部门、身体能力、性取向、社会经济地位、教育、婚姻状况、语言、外貌和认知差异等特征。包容性指所有成员都尊重、支持和重视他人的有意、主动和持续的努力和实践。包容的环境提供公平的机会和资源,使每个人能够平等地参与,并在言语和行为上受到尊重。多样性是人类差异的范围,包括个体或群体不同的特征。

目前,工程领域的多样性和包容性已成为世界许多工程组织的主流话题^[7],人们越来越认识到,更为多样的跨学科方法和更加包容的思维方式有助于解决全球面临的挑战;多样性和包容性团队对于成功设计和实施解决方案、实现多元化目标至关重要。因此,需要确保未来工程解决方案不存在偏见和歧视。随着大数据、机器学习、自主系统和人工智能向更加数字化世界转变,新的体系更可能带入偏见和歧视,从而导致歧视泛滥和偏见加剧。确保工程参与者多样性,偏见才更有可能发现和避免。因此,工程教育应创造多样化的教育环境,注重包容性教学,形成让所有人感到舒适和包容的工程文化,培养未来工程师的包容性思维。

(三) 充分重视本科阶段 STEM+C 教育

STEM 和 C (Computing 或 Computational thinking) 教育是工程教育两大热门概念。^[8]

科学致力于发现,是以探索发现为核心的人类实践活动;技术致力于发明,是以发明革新为核心的人类实践活动;工程致力于建造,是以集成建构为核心的人类实践活动。科学、技术、工程之间有着明显区别,各自相对独立、并行发展;它们之间又有着密切联系,越来越呈现相互渗透、相互融合发展态势。科学是技术的基础,技术是工程的基础。没有不依托于工程的科学和技术,也没有不运用科学和技术的工程。现代科学研究越来越需要以技术、工程为手段和载体,以各种各样的仪器、装备为工具,以工程实践提出的许多新问题特别是工程科学问题为研究对象。

美国数学协会主席 Lynn A. Steen 认为:数学是科学和工程学术生涯的激活力量,同时也是过滤器。数学是科学、技术和工程的基础。图 1 给出了科学、技术、工程和数学四者之间的关系。上述科学指自然科学。《华协》(2021 版)对自然科学的定义是:在每个工程学科或实践领域适用

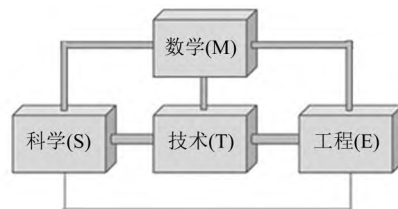


图 1 STEM 之间关系

情况下,提供对物理世界的理解,包括物理、力学、化学、地球科学和生物科学。数学不属于自然科学而属于形式科学(formal science)。形式科学是与形式系统如逻辑学、数学、理论计算机科学、信息理论、系统理论、判定理论、统计学和语文学等有关知识的分支。与经验科学(自然、社会、人文等)不同,形式科学不常涉及经验过程,不是和基于真实世界观察理论有效性联系的,而与定义和规律为基础的形式系统性质相联系。“数学为何得到比所有其他科学的尊重,就是它的定律是绝对肯定和无可置疑的,而其他科学却有一定程度的争论和存在由于新事实的发现而被抛弃的危险。”爱因斯坦的这句话精辟阐明了数学与自然科学的本质区别,道出了数学独特的研究手段和永真性,以及它的地位与作用。我国工程教育实践中,有些专业对数学和自然科学对于工程教育的重要性认识不足,甚至将数学归于自然科学,会直接影响工程专业人才培养质量。

计算思维是计算学科不断发展过程中逐渐形成的普适思维,是运用计算机科学的基础概念进行问题求解、系统设计以及人类行为理解等涵盖计算机科学广度的系列思维活动。^[9]数学完成了物理世界系统到现实世界的符号化问题,进一步形成问题的数学模型;计算思维则建立了系统的可计算模型,使数学模型转化为信息系统模型,可由通用计算装置自动解算。^[10]因此,计算思维是通过借鉴计算或计算学科的智慧、思想和方法,能普遍应用于科学、技术和工程等众多学科领域问题求解的一种方法论。

荷兰四大顶尖理工大学联盟(代尔夫特理工大学、埃因霍芬大学、特温特大学和瓦赫宁根大学)“4TU 工程教育中心”的研究报告指出^[11]:我们正处于第四次工业革命的边缘,这场革命建立在全球化、数字化和超连接性革命的基础上。互联网、大数据、云计算、物联网和人工智能与数字工程的深度集成,推动了工程和工程领域的范式转变。借助数据科学的兴起与发展,工程设计的模式从传统“设计—构建—测试”向“模型—分析—构建”转变,在基于大量数据的虚拟环境中使用原型和实验。知识和其他价值越来越多由集成

网络和物理的智能机器的算法创造。算法使这些系统能自己做出决策,并尽可能自主执行任务。工科专业的学生必须培养数学、计算思维、编程、预测分析等方面能力。这是2021版《华协》毕业要求框架增加计算基础知识并将其与工程基础知识并列的原因。

(四) 充分理解 KSA“三位一体”的内在逻辑

知识、能力和态度(素质)(Knowledge, Skill and Attitude, KSA)被誉为教育“铁三角”。欧洲工程教育认证网络(ENAE)和 IEA 共同研制的“工程专业认证最佳实践案例”对《华协》毕业要求的定义为^[12]:是可评估的学习成果,描述或例证毕业生期望从通过认证的专业教育中获得的知识、能力和态度,该专业为特定目的(包括特定工程职业实践)提供教育基础。该定义参考了 A Rugarcia 等工程教育目标描述^[13]:工程教育目标可方便地从三个部分勾勒:① 知识——知道的事实和概念;② 能力——在管理和应用知识时使用的能力,如计算、实验、分析、综合/设计、评估、沟通、领导和团队合作;③ 态度——决定能力和知识所针对的目标的态度:个人价值观、关注点、偏好和偏见。知识是专业工程师的数据库,能力是用于操纵知识的工具,以实现由态度决定或强烈影响的目标。说明《华协》毕业要求框架是按 KSA“三位一体”内在逻辑构建的。其中,知识是期望学生毕业时应知道什么(事实性知识)和理解什么(原理性知识);能力是期望学生毕业时应能应用这些知识做什么;态度是期望学生毕业时应能按正确方向应用这些知识做什么。

知识是基础。《华协》将知识定义为^[1]:认识和理解术语、事实、方法、趋势、分类、结构或理论。包括学习,以及展示已学到的东西。对特定知识的展示总是通过基于该知识所做的工作。知识结构框架由表 2 定义,是构建课程体系的基础。如马来西亚《工程专业认证标准(2020)》明确规定^[14]:课程体系应该覆盖知识框架(与表 2《华协》2013 版基本相同)的所有内容。

A Rugarcia 等从 21 世纪未来工程师挑战出发,提出工程教育要注重培养七类能力^[13]:① 独立学习、相互依存学习和终身学习能力;② 解决问题的能力、批判性思维和创造性思维能力;③ 人际关系/小组/团队能力;④ 沟通能力;⑤ 评估和自我评价能力;⑥ 知识整合与应用能力,⑦ 适应不断变化的市场和新技术的能力。这些能力与 2021 版《华协》毕业要求框架 WA1-WA5 和 WA8-WA11 密切相关,而 WA6 和 WA8 与态度密切相关(见表 1)。

表面看,表 1 所示 2021 版《华协》毕业要求 11 条框架是由能力和态度构成的,似乎与知识无关。实际上,表 1 毕业要求框架是由表 2 知识框架支撑的,表 1 与表 2 是一个整体,不可分割,一起组成《华协》毕业要求框架的知识、能力和态度结构。《工程教育认证标准(2018 版)》忽略了表 2 所示的知识框架,似乎不太完整。

诚然,表 1 是学生毕业时的能力产出,但产出这些产出的是课程体系,而构建课程体系的依据是表 2 所示的知识和态度框架。过去我国工程教育专业存在重知识轻能力现象,而今能力培养重要性已被普遍认同。然而,目前又出现另一种极端——忽视知识传授。课程体系构建不是依据表 2 知识框架,而是表 1 毕业要求的能力指标,而每门课程教学目标被认为必须与这些能力指标(一个或多个)对应的“能力型”目标。如某高校机械设计制造及其自动化专业《高等数学》课程教学目标之一为:“能够对机械工程领域的复杂工程问题建立数学模型,并基于模型进行推理与求解。”显然,“能力型”课程目标对于修读该门课程的大学一年级学生是难以实现的。事实上,一些课程(特别是公共基础课)传授知识的重要作用不容忽视。如已通过 ABET 认证的美国爱荷华州立大学计算机科学专业的普通化学课程目标为:① 理解化学动力学、热力学和电化学概念并能解决相关问题;② 理解平衡态概念及其如何应用于化学反应、酸和碱、缓冲液和溶解度;③ 了解放射性原理和核化学的用途;④ 了解有机分子的结构和官能团在有机化学中的作用;⑤ 描述分子间的力及其对物理性质的影响;⑥ 使用命名法和结构图描述无机和有机化合物;⑦ 理解化学与我们所生活世界之间的关系,理解和应用热力学第一定律和第二定律;⑧ 理解决定物质的每种物理状态的特征及物理和化学变化动力学的原理和理论。这些课程设置的初衷与本真或者说课程目标大都不是“能力型”。

能力是知识(包括显性和隐性)的外显,态度是知识的内化。知识本身就表现为行动力,是把事情做成的能力倾向。没有知识,能力和态度就成为无源之水、无本之木。要充分理解《华协》毕业要求的 KSA“三位一体”内在逻辑,在专业与课程教学设计、实施与评价中,就要遵从认知规律、重视知识在能力和态度形成中的基础性作用,切忌只吃“第八个馒头”。

(五) 充分认识第一性原理思维的重要性

第一性原理可简单理解为:追根溯源,任何事物的背后都有一个终极的真相。两千年前哲学家

亚里士多德首次提出第一性原理,指出每个系统都存在第一性原理,是最基本的命题和假设,不能被省略和删除,也不能违反。第一性原理是大道至简的。就是说,任何复杂的事情都可通过洞察和分析得到最简单的道理,此过程即抽象,这些最简单的道理是真正最有价值、不言而喻、普适的。第一性原理是任何特定系统存在的最底层本质,任何系统第一性原理的改变都会实质性改变该系统,反过来,任何未触及第一性原理的努力都是做无用功(或影响微弱)。

第一性原理思维在问题分析中非常重要,因为它让我们不受限于纷繁复杂的表象,直接找到本质最核心的东西(即系统中不可删除、不可违反的原理),然后从该原理出发,从零到一,层层向上,产生颠覆性突破。第一性原理思维与比较思维有很大区别,生活中总倾向于比较,这样思维方式导致的行为结果是只能产生细小的迭代发展。第一性原理思维被誉为 21 世纪科技界与工程界最厉害的思维模式,埃隆·马斯克(Elon Musk)在 PayPal、特斯拉、SpaceX 和太阳城等不同领域的颠覆性创新,都源于第一性原理思维,是其最推崇的思维模式。可见,利用数学、自然科学和工程科学的第一性原理分析复杂工程问题,与利用基本原理进行分析存在本质区别。

七、结语

《华协》毕业要求框架是实现其成员教育资格实质等效的基本参照点。为适应工程学科与工程实践新发展对工程教育提出的新需求,反映当代价值观和雇主需求新变化,IEA 联合 WFEO 对 2013 版《毕业要求和职业能力》进行了修订。2021 版《华协》毕业要求框架强调了联合国可持续发展目标、多样性和包容性、工程学的新兴技术和学科、技术环境和学习系统的快速变化、创造力和创新能力等。系统分析和深入思考该修订的变化与启示,对我国工程教育改革及工程教育认证标准的修订,具有现实意义。

注 释

- ① 《毕业要求和职业能力》(Graduate Attributes and Professional Competences)由 IEA 制定和发布,包括《华盛顿协议》(本科教育)、《悉尼协议》(高等职业教育)和《都柏林协议》(中等职业教育)三个协议的毕业要求框架。本文提及的某版本毕业要求框架指该版本《毕业要求和职业能力》中规定的相应于《华协》的毕业要求框架。
- ② WA1(工程知识)中 WA 是《华盛顿协议》(Washington Accord)的缩写,WA1 是《华盛顿协议》毕业要求框架第 1 条,括号内为该条毕业要求的特征(关键词)。

参 考 文 献

- [1] International Engineering Alliance. Graduate Attributes and Professional Competences[EB/OL]. (2021-06-21)[2022-02-10]. <https://www.ieagrements.org/assets/Uploads/IEA-Graduate-Attributes-and-Professional-Competencies-2021>. 1-Sept-2021. pdf.
- [2] 李志义. 对毕业要求及其制定的再认识——工程教育专业认证视角[J]. 高等工程教育研究, 2020(5):1-10.
- [3] 尧新瑜. “伦理”与“道德”概念的三重比较义[J]. 伦理学研究, 2006(4):21-25.
- [4] International Engineering Alliance Secretariat. 25 Years of the Washington Accord; celebrating international engineering education standards and recognition 1989-2014 [EB/OL]. (2014-06-21)[2022-02-10]. https://www.ieagrements.org/assets/Uploads/Documents/History/25Years_Washington_Accord-A5booklet-FINAL. pdf.
- [5] UN. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development[EB/OL]. (2015-09-25)[2022-02-10]. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>.
- [6] ABET Engineering Accreditation Commission. 2022-2023 criteria for accrediting engineering programs[S/OL]. (2021-10-31)[2022-02-10]. <https://www.abet.org/accreditation/accreditation-criteria/criteria-for-accrediting-engineering-programs-2022-2023/>.
- [7] 鲍菲尔德·D. 工程领域的多样性和包容性[R]. 联合国教科文组织国际工程教育中心,译. 北京:中央编译出版社, 2021.
- [8] 钱逸舟. STEM+C: 破圈而出[J]. 上海教育, 2020(35):39-41.
- [9] JEANNETTE M WING. Computational thinking[J]. Communications of ACM, 2006(3):33-35.
- [10] 邓磊,战德臣,姜学锋. 新工科教育中计算思维能力培养的价值探索与实践[J]. 高等工程教育研究, 2020(2):49-53.
- [11] ALDERT KAMP. Navigating the landscape of higher engineering education—coping with decades of accelerating change ahead[R/OL]. (2020-04-21)[2022-02-10]. <https://www.4tu.nl/cee/publications/navigating-the-landscape-of-higher-engineering-education-4tu.cee-web-def>. pdf.
- [12] ENAEE IEA. Best practice in accreditation of engineering programmes: an exemplar[EB/OL]. (2015-04-13)[2022-02-10]. <https://www.ieagrements.org/assets/Uploads/Documents/Policy/Best-Prct-Full-Doc>. pdf.
- [13] RUGARCIA A, FELDER R M, DONALD R, et al. The future of engineering education(part 1): a vision for a new century[J]. Chemical Engineer Education, 2000, 34(1):16-25.
- [14] Engineering Accreditation Council, Board of Engineers Malaysia. Engineering programme accreditation standard 2020 [S/OL]. (2020-05-01)[2022-02-10]. <http://www.bem>.

On Changes in Washington Accord Graduate Attribute Profiles and Its Enlightenment

Li Zhiyi

Abstract: The Graduate Attribute Profiles of the Washington Accord is the basic reference point for realizing the substantive equivalence of the education qualification among its signatories and provisional members. Recently, IEA together with WFEO has revised the Graduate Attributes and Professional Competences (2013) and issued the Graduate Attribute Profiles of the Washington Accord(2021). In this paper, the Graduate Attribute Profiles, the Knowledge and Attitude Profile, the Definition of Complex Engineering Problems and the Definition of Complex Engineering Activities are systematically analyzed. Based on these analyses, the enlightenment of this revision to the Chinese engineering education and engineering education accreditation are discussed from five aspects: the United Nations sustainable development goals, diversity and inclusiveness in engineering fields, the STEM+C education at undergraduate level, the internal logic of the KSA “trinity”, and first-principles thinking.

Key words: Washington Accord; engineering education accreditation; graduate attributes

(责任编辑 骆四铭)

《高等工程教育研究》编辑部严正声明

近期,不断有作者和单位反映,某些非法网站和不法人员假冒《高等工程教育研究》编辑部的名义进行所谓约稿、组稿和编辑出版活动,不仅给相关作者带来损失,也对本刊的社会声誉造成恶劣影响。对此,本刊声明如下:

一、本刊从未委托任何单位或个人编辑出版《高等工程教育研究》。

二、gaogong@hust.edu.cn 为本刊接收投稿的唯一电子邮箱,也是本刊唯一投稿途径。

三、本刊编辑部从未对外设立任何个人银行账号(卡号),一切财务事宜均经由华中科技大学财务处统一管理。

四、敬请广大作者提高自我保护意识,谨防上当受骗,我刊将保留依法追究不法分子盗名行骗的法律责任的权利。赐稿及问询,请联系编辑部电话 027-87542950;或关注《高等工程教育研究》微信公众号(微信号:gh_e4f3f0fc3637)相关信息的发布。

《高等工程教育研究》编辑部

2022 年 5 月