

工程教育创新论丛（第一辑）

# 面向工业4.0的 高等工程教育变革趋势 与应对策略

THE REFORM TREND AND COUNTERMEASURES  
OF HIGHER ENGINEERING EDUCATION FACING THE NEW  
INDUSTRIAL REVOLUTION

张 炜 吕正则◎著

INDUSTRY 4.0



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

面向工业 4.0 的高等工程教育变革趋势与应对策略 /  
张炜, 吕正则著. —杭州: 浙江大学出版社, 2020.10  
ISBN 978-7-308-20469-9

I. ①面… II. ①张… ②吕… III. ①高等学校—制  
造工业—人才培养—研究—中国 IV. ①F426.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2020) 第 149012 号

## 面向工业 4.0 的高等工程教育变革趋势与应对策略

张 炜 吕正则 著

---

责任编辑 李海燕  
责任校对 虞雪芬  
封面设计 雷建军  
出版发行 浙江大学出版社  
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)  
(网址: <http://www.zjupress.com>)  
排 版 杭州好友排版工作室  
印 刷 浙江省邮电印刷股份有限公司  
开 本 710mm×1000mm 1/16  
印 张 11.25  
字 数 131 千  
版 印 次 2020 年 10 月第 1 版 2020 年 10 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-308-20469-9  
定 价 49.80 元

# 序

当前,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、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,并出台了一系列战略规划,其中以德国的“工业 4.0”、美国的“工业互联网”战略最具代表性。正如习近平总书记在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。”

工程科技是推动人类进步的发动机,是产业革命、经济发展、社会进步的有力杠杆。在我国高等工程教育快速发展过程中,必须尊重工程科技人才成长规律,培养造就一大批具有国际水平的战略性工程科技领军人才和青年工程科技人才。然而,在我国高等工程教育系统中,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。工程教育范式的创新变革依赖于准确预见基础科学重大发现,有效预测颠覆性

产业技术变迁,以及密切跟踪新兴商业模式和社会生产方式演进。因此,面向“中国制造 2025”计划的十大战略性新兴产业需求特征,深度追踪我国高等工程教育的最佳实践案例,探索“工程学习有效性”的内在机理,设计行之有效的“新工科”教育教学计划,对于提升我国工程科技人才培养质量具有重要意义。本研究的理论价值和实践意义主要体现在以下三个方面。

第一,有助于充分把握新一轮产业革命和复杂工程系统的变革趋势,探析未来工程科技人才的职业能力框架与培养方式。本研究以“中国制造 2025”计划为出发点,通过文献梳理、案例追踪和结构化问卷调研,以期分析和预测新一轮产业革命变化对未来工程师的知识能力素质要求,初步构建智能工业时代工程科技创新人才的能力框架及可持续培养模式。

第二,通过动态追踪美国、欧盟、德国、俄罗斯、日本等先进制造业强国和区域以及我国工程教育改革实践,主动构建面向未来的工程教育模式,为我国高等工程教育“十四五”规划提供重要参考依据。新工业革命背景下,国际工程教育面临着前所未有的机遇和挑战。本研究运用文本分析、关键事件技术和结构化组合案例方法,动态追踪世界范围内工程教育政策演变趋势,梳理归纳我国高校工程教育创新与人才培养模式。

第三,在充分借鉴国际国内先进经验的基础上,梳理我国工程教育创新与人才培养的最佳实践模板,提出面向先进制造业的工程教育战略行动方案。在现场调研和结构化案例分析的基础上,归纳我国工程教育发展变革趋势,并提炼总结新时期工程教育变革的实现路径,从多视角多维度出发提出面向“中国制造 2025”计划的工程教育改革

建议及其行动方案。

本书由浙江大学中国科教战略研究院副院长、科教发展战略研究中心副主任张炜教授负责整体构思、结构设计和全文校对。其中第一章至第四章,由浙江大学公共管理学院硕士研究生姜月鑫、谢彦洁参与撰写,第五章由公共管理学院博士研究生吕正则参与撰写,第六章由公共管理学院博士研究生吴蓝迪参与撰写,第七章由公共管理学院博士研究生吕正则和吴蓝迪参与撰写。对各位同学的辛勤努力和精心付出表示由衷感谢!

在我国高校加速推进“新工科”教育改革和建设工程教育强国的伟大征途中,衷心希望有更多工程教育理论研究者和管理实践者积极关注并努力推动我国高等工程教育教学改革实践,为建设创新型国家和实现“两个一百年”奋斗目标培养面向新时代的中国特色社会主义工程科技人才!

2020年2月于清雅苑

# 前 言

2013 年是第四次工业革命元年,“工业 4.0”开始进入人们视野。德国人工智能研究中心董事兼行政总裁沃尔夫冈·瓦尔斯特尔在德国汉诺威工业博览会上率先提出,将通过信息物理系统使得数字技术与软件、传感器和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,吹响了第四次工业革命的号角。同年 12 月,在欧洲最大的应用科学研究机构——弗劳恩霍夫应用研究促进协会、德意志国家工程院以及西门子等公司的推动下,德国“工业 4.0”计划正式发布。

为快速响应全球新工业革命浪潮,我国于 2015 年 5 月发布了《中国制造 2025》行动纲领。行动纲领指出,制造业是国民经济的主体,是立国之本、兴国之器、强国之基,要在 21 世纪中叶将我国建设成为引领世界制造业创新发展的制造强国,为实现中华民族伟大复兴打下坚实基础。本研究通过系统梳理“1+X”的“中国制造 2025”政策,以及全方位、体系化的与“中国制造 2025”配套的工程科技人才政策,探索了在“中国制造 2025”背景下我国工程教育政策的演变趋势,充分挖掘为应对第四次工业革命的未知考验和面向未来的中国创新型工程师需要具备的技能和素质。在系统总结世界范围内工程教育环境变化和政策演进趋势的基础上,分析现有工程教育培养模式的基本

特征和存在的问题,分析把握新一轮产业革命和“中国制造 2025”在实施过程中可能引发的变革趋势,以及其对工程教育所产生的影响。同时,关注新时期国内外工程教育的典型实践以及优秀工科院校的最新改革动向,提炼总结未来计算教育发展和工程教育变革的实现路径,进而构建面向“中国制造 2025”的工程教育模式、应对策略与行动实施方案。

具体而言,本书第一篇,基于第四次工业革命的产业特征,详细阐述了新工业革命下的全球工程教育政策演变。第二篇从我国高校学科专业布局应对“中国制造 2025”产业变化的整体数据出发,分析预测了中国制造业十大重点领域的未来人才需求,总结出高校工程学科专业相对应的变化特征。在此基础上,研究分别从智能化趋势和新工科范式两个视角,指出我国工程教育教学的变革趋势。第三篇基于已有的数据挖掘和案例分析,从加强顶层设计、面向产业需求和强调高校育人主体职能等三个方面提出优化我国工程科技人才培养的对策性建议。

# 目 录

## 第一篇 新工业革命驱动下的全球工程教育政策演变

### 01 第四次工业革命趋势下的产业特征

- 1.1 全球四次工业革命的核心特征比较 / 4
- 1.2 第四次工业革命的产业变革特征 / 8

### 02 国际工程教育政策演变趋势

- 2.1 美国:完善 STEM 教育链条,培养具备计算能力的新型工程师 / 15
- 2.2 欧盟:以创新创业为社会可持续发展注入动力 / 22
- 2.3 德国:以数字化与智能化引领工程教育变革 / 26
- 2.4 俄罗斯:以工程项目为导向、跨学科研究方法推动工程教育变革 / 30
- 2.5 日本:用开放式科技创新解决社会经济问题 / 32
- 2.6 本章小结 / 34

### 03 面向“中国制造 2025”的我国工程教育政策演变趋势

- 3.1 “1+X”的“中国制造 2025”产业政策:智能制造引领两化(工业化和信息化)深度融合 / 38
- 3.2 面向“中国制造 2025”的人才政策:培养多元化、创新创业型工程师 / 43
- 3.3 面向“中国制造 2025”新需求的新一代工程师能力框架体系 / 46
- 3.4 本章小结 / 51

## 第二篇 新兴产业人才需求与工程教育范式变革典型案例

### 04 我国高校学科专业应对“中国制造 2025”产业变化整体数据分析

- 4.1 中国制造十大重点领域及人才需求 / 56
- 4.2 高校学科专业变化特征 / 59
- 4.3 本章小结 / 70

### 05 智能化趋势:计算教育引领工程教育变革

- 5.1 计算教育核心模块发展 / 74
- 5.2 计算教育模式典型实践 / 78
- 5.3 计算教育实现路径提炼 / 93
- 5.4 本章小结 / 101

### 06 新工科范式:“中国制造 2025”的实现路径

- 6.1 面向“中国制造 2025”的新工科范式的提出 / 103
- 6.2 新工科范式下工程教育改革的典型实践 / 107
- 6.3 “新工科”建设的四种路径 / 144
- 6.4 本章小结 / 149

## 第三篇 支撑“中国制造 2025”的工程教育改革建议

### 07 工程教育改革政策建议

- 7.1 加强顶层设计,优化工程教育人才培养政策 / 154
- 7.2 面向产业需求,探索新工科人才培养模式 / 155
- 7.3 构建系统性跨学科知识桥梁,多层次加强计算教育 / 156
- 7.4 强调高校育人主体职能,分类构建创新型工程科技人才支持体系 / 158

结语 / 160

参考文献 / 162

索引 / 168

# 第一篇



## 新工业革命驱动下的全球工程教育政策演变

科学技术的发展,带动新工业体系与社会发展模式不断向智能、生态、和谐、合作、共享与可持续发展。对比前三次工业革命,第四次工业革命更加凸显了数字化、智能化、绿色化、协同化、网络化五大特征。本篇通过国际工程教育政策的搜集和分析,梳理了美国、欧盟、德国、俄罗斯、日本从 2006 至 2016 年出台的一系列工程教育相关政策,采用纵向追踪法来追踪世界发达国家在工程教育领域内取得的瞩目成就以及工程教育发展前沿动态,并与《中国制造 2025》分析对比,构建基于“中国制造 2025”人才新需求的新一代工程师能力框架。



## 01 第四次工业革命趋势下的产业特征

2011年是第四次工业革命元年，“工业4.0”开始进入人们视野。那一年，德国人工智能研究中心董事兼行政总裁沃尔夫冈·瓦尔斯特尔在汉诺威工业博览会上率先提出，要将物联网和服务网络等现代科技媒介广泛应用于制造领域，引发生产制造方式新的变革，吹响第四次工业革命的号角。两年后的2013年，在欧洲最大的应用科学研究机构——弗劳恩霍夫应用研究促进协会、德意志国家工程院以及西门子等多家公司的建议和推动下，“工业4.0”项目正式发布。世界科学技术和生产发展进入新的机遇期。

世界上每一次工业革命对生产力的巨大推动作用都是毋庸置疑的，新的生产方式和思维方式带来了一个时代的更替。18世纪60年代到19世纪50年代是第一次工业革命时期，瓦特蒸汽机的发明将人类历史带入“蒸汽时代”，用机械力量代替传统人力和畜力，实现了生产力的极大跨越。19世纪末到20世纪初期，以电力的广泛应用和内燃机的发明为主要标志的第二次工业革命翻开了“电气时代”的崭新篇章，人们的生活方式和生产方式发生了更

大的改变,生活品质有所提高。从 20 世纪 70 年代开始,第三次工业革命的大幕缓缓拉开,以原子能、空间技术、电子计算机和生物工程技术的发明和应用为标志,技术密集型和资本密集型产业迅速发展壮大,第一、二产业经济比重下降,第三产业比重上升,人类生产生活赋予人本身更大的价值和意义。

随着移动互联网的应用,第四次工业革命被提上日程。德国率先提出“工业 4.0”概念,试图巩固世界制造强国的先进地位。美国紧随其后,于 2012 年启动的“先进制造业国家战略计划”,随后组建的工业互联网联盟(IIC)正式启动了美国工业互联网计划。日本也不甘示弱,提出“日本工业 4.0”,开展对人工智能产业的探索。总之,世界各国都希望能够搭上世界科技进步的快车,为本国发展强基固本。

## 1.1 全球四次工业革命的核心特征比较

为清楚了解第四次工业革命将带来的巨大社会变革,让中国搭上这趟科技快车,现将四次工业革命从动力、领域、实质等方面列表对比(表 1-1),进而将德国工业 4.0 与“中国制造 2025”的不同维度进行对比,辨明科学技术发展趋势,在政策制定、科学研究、技术落地、人才培养等方面切中要害,赶上甚至领跑全球。

表 1-1 全球四次工业革命核心特征

	第一次工业革命	第二次工业革命	第三次工业革命	第四次工业革命
开始时间	18 世纪 70 年代	19 世纪 70 年代	20 世纪 40 ~ 50 年代	21 世纪
进入的时代	蒸汽时代(工业 1.0)	电气时代(工业 2.0)	信息时代(工业 3.0)	智能制造时代(工业 4.0)
能源动力	煤炭(改良的蒸汽机)	电力(发电机和电动机) 石油(内燃机)	太阳能、风力、核能等可再生能源	以风能、核能为代表的新能源
涉及领域	蒸汽机的发明、机器的发明和使用	内燃机的发明、电力广泛应用、电气化	原子能、计算机、微电子技术、航天技术、分子生物学、遗传工程	系统科学、计算机科学、纳米科学与生命科学
新兴部门	/	石油化工、汽车制造、电力工业	信息技术产业、核工业、航空航天工业、电子工业	大数据部门
实质	机器生产代替手工劳动	蒸汽时代进入电气时代	自动化、数字化、信息化	人工智能化、深度信息化
生产特征	机械化生产	流水线生产	数字化生产	智能化生产
生产规模	少量定制、少量标准化生产	大规模标准化生产	大规模定制	个性化定制
创新模式	实践创新	理论创新	信息技术创新	协同创新
经济模式	工厂	公司	平台式企业	智能工厂
对人的态度	不关注	无视人的生存权益	开展重视个体发展,以人为本	人本思想进一步凸显

与德国工业 4.0 相比较,我国“中国制造 2025”主要具有如下特点(表 1-2):

战略目标。德国工业 4.0 是瞄准新一轮科技革命制订的措施,主要聚焦制造业的高端产业和高端环节。“中国制造 2025”则是通过数字化、网络化、智能化制造,实现新一代智能制造技术的突破和广泛应用,重塑制造业的技术体系、生产模式、发展要素及价值链,实现我国

制造业的“换道超车”，为我国建成世界一流的制造强国打下坚实的基础。

表 1-2 德国工业 4.0 战略与“中国制造 2025”计划对比

	德国工业 4.0	中国制造 2025
战略目标	充分利用信息物理系统,将先进制造业向智能型转化	新一代智能制造范式与技术体系的构建,实现“换道超车”
关键要素	智能工厂、智能生产、智能产品	数字化、网络化、智能化制造
重点领域	标准化和开放标准的参考框架 建立管理复杂系统的工具 建设提供全面宽带的基础设施 设计、网络、系统等全面安全措施 数字化时代工作的组织和设计 持续的职业培训和发展 规章制度建设 提升原材料、人力、财务资源效率	新一代智能制造(融入新一代人工智能技术) 智能制造创新体系 智能制造领域基础能力 工业物联网与智能云平台 “中国制造 2025”示范区 智能升级技术改造与服务型制造 智能一代产品创新 智能制造装备、软件与集成产业
实现路径	建立全球性信息物理系统;通过价值网络实现横向集成;建设贯穿整个价值链的端到端工程数字化集成;建设纵向集成和网络化制造系统	采用“探索—试点—推广—普及”的有序推进模式;以信息物理系统为新一代智能制造的关键应用技术;营造“用产学研金政一体化”协同创新的生态系统

关键要素。德国工业 4.0 提倡生产全过程的数字化,强调智能工厂、智能生产、智能产品三大关键要素,即注重工业本身的智能化、生产过程与产品的智能化,进而为减少人工成本奠定基础。“中国制造 2025”以新一代智能制造为核心,强调数字化、网络化、智能化制造,融入了新一代人工智能技术,如大数据智能、人机混合智能、群体智能、跨媒体智能、自主智能等,是真正意义上的智能制造。

重点领域。德国工业 4.0 重点发展领域包括标准化和开放标准

的参考框架；建立管理复杂系统的工具；建设提供全面宽带的基础设施；设计、网络、系统等全面安全措施；数字化时代工作的组织和设计；持续的职业培训和发展；规章制度建设；提升原材料、人力、财务资源效率。“中国制造 2025”则是以产品智能化、制造过程智能化、服务智能化为主要方向，以“智能产品装备”“智能工厂”“智能制造新模式”“云制造”“工业物联网”等为重点突破方向，抓紧实施智能制造和机器人重大工程；推进智能制造创新体系的建设和智能制造领域基础能力的建设；推进工业物联网与智能云平台建设；推进“中国制造 2025”示范区建设；实施智能升级技术改造与服务型制造推进工程；实施智能一代产品创新工程；以及实施智能制造装备、软件与集成产业培育工程等。

实现路径。“工业 4.0”突出“智能”“网络”“系统”；要建设 CPS，将物联网和服务网广泛应用于制造领域，对制造产品的全生命周期、完整制造流程模块进行集成和数字化，构筑一种高度灵活、具备鲜明个性特征的产品与服务新生产模式；由于标准化、组织工作和产品的可获得性是实施“工业 4.0”的重大挑战，故而该项目鼓励德国企业参与实施“工业 4.0”，并将通过领先的供应商策略和领先的市场策略来实现战略目标。“中国制造 2025”则从“总体规划—重点突破—分步实施—全面推进”的战略层面出发，采用“探索—试点—推广—普及”的有序推进模式，以 CPS 为关键使能技术，依赖新一代智能制造技术体系和系统结构，构建新一代智能制造范式，营造“用产学研金政一体化”协同创新的生态系统，以企业为主题，汇集各方力量，实施有组织的创新，逐步形成有利于智能制造发展的生态环境。

## 1.2 第四次工业革命的产业变革特征

科学技术的发展,带动新工业体系与社会发展模式不断向着智能、生态、和谐、合作、共享与可持续方向发展(邱学青等,2014)。从表 1-3 来看,与前几次相比,第四次工业革命可以归纳出以下几个新的特征。

表 1-3 第四次工业革命的新特征

特征	具体内容
数字化	利用材料制备新技术和光点信息传感技术加强一手数据采集,以云计算、数据融合处理与分析、远程监控与诊断等技术为支撑,实现制造服务信息化
智能化	工业制造引入物联网和务联网,结合云计算、大数据技术将各类制造资源进行统一集中管理和经营,打通生产、服务、管理全流程,实现整条价值链的信息流通共享
绿色化	发展节能环保技术及设备,提高资源利用效率,发展绿色能源;推进传统制造业的绿色改造,强化产品全生命周期绿色管理,积极构建绿色制造体系
网络化	制造业网络中的研发设计环节的“众包”、制造环节使用数据流来驱动制造业实现更好的沟通与协调;建设分布式能源网络,实现能源网络的开放共享与协调互补;发展信息网络,为物与物之间的连接与网络的形成奠定基础
协同化	互联网与产业链各环节紧密协同,提升网络化协同制造水平;推进部门之间、跨领域跨行业的协同,打造政产学研用协同创新机制;全社会多元化制造资源的有效协同,提高产业链资源整合能力

### 1.2.1 数字化

数字化是指实际生产与虚拟控制系统汇聚程度越来越高。材料和信息采集手段的革新是产业数字化转型的前提和物质保障。材料和制备领域新技术的不断研发为网络信息技术的进步做出了重要贡