

# 工程科学是智能制造人才培养的必由之路

周 明, 张 军

北京建筑大学, 机电与车辆工程学院, 北京  
Email: zhouming@bucea.edu.cn, zhangjun@bucea.edu.cn

收稿日期: 2021年2月28日; 录用日期: 2021年3月23日; 发布日期: 2021年3月30日

---

## 摘 要

智能制造工程的实现是“中国制造2025”的关键途径。智能制造网络化随着网络科技的发展而发展, 而制造过程的智能化是智能制造工程的核心。制造过程的智能化主要是建造物理系统的数字化和支撑物理过程实现的环境系统的数字化, 明晰环境支撑系统如何影响物理过程, 以及它们之间的相互关系, 才能建立智能制造工程的理论和技术。智能制造工程对人才的要求与以往的工科培养有所不同, 需要有很强的数理基础。培养智能制造人才需经过工程科学的培养和相关专业设计、制造理论、技术、技能的培养, 其中, 工程科学的培养是必由之路。

## 关键词

智能制造, 智能制造工程, 工程科学, 制造过程智能化, 智能制造网络化

---

# Necessary Training of Engineering Science for the Cultivation of Intelligence Manufacturing Talents

Ming Zhou, Jun Zhang

School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing  
Email: zhouming@bucea.edu.cn, zhangjun@bucea.edu.cn

Received: Feb. 28<sup>th</sup>, 2021; accepted: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2021; published: Mar. 30<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

Intelligent Manufacturing Engineering is the key to “China Manufacturing 2025”. Intelligent Manufacturing Engineering is composed of Webified Intelligent Manufacturing and Manufacturing

**Process Intelligence. Webified Intelligent Manufacturing will benefit from the network scientific and technical advancements, but the Manufacturing Process Intelligence, which is the core of Intelligent Manufacturing Engineering, is defined to be the digitization of constructed physical system and its correspondingly supporting environmental system in which the physical system is able to operate. The mechanism of Manufacturing Process Intelligence concerns of how the supporting environmental system influences the physical system, and vice versa. The study of mechanisms and their relations will create influencing theories and realization techniques. Therefore, the cultivations of Intelligent Manufacturing Engineering talents will be distinct from the previous existed cultivations of engineering talents in that strong mathematical backgrounds configure the new talents. In this case, Intelligent Manufacturing Engineering talents must receive the training of engineering science courses, and, additionally, receive the corresponding professional scientific and technological skills. No matter what professions involved in the realization course of Intelligent Manufacturing Engineering, the engineering science courses necessitate the trainings.**

## Keywords

**Intelligent Manufacturing, Intelligent Manufacturing Engineering, Engineering Science, Manufacturing Process Intelligence, Webified Intelligent Manufacturing**

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在科技创新发展趋势下, 美国、德国、英国、日本等世界主要国家为抢占科技发展先机, 先后分别提出了“国家先进制造战略计划”、“工业 4.0”、“工业 2050”、“互联工业”等战略。在新一轮科技革命和产业变革中, 为把我国建设成为世界制造强国, 我国于 2015 年也提出“中国制造 2025”发展战略。“中国制造 2025”被称为中国版的“工业 4.0”, 同时也是中国建设世界制造强国的行动纲领, 智能制造工程是这个纲领的最核心部分[1]。

智能制造分为制造过程智能化和网络化智能制造。网络化智能制造随着网络科学技术的发展而发展。制造过程的智能化, 必须研究制造过程的智能制造系统, 其理论涉及到物理系统和支撑物理过程运行的环境系统的分析、计算、建模、控制等理论, 以及支撑环境与物理系统之间相互关系的一系列理论与技术实现问题。

工程科学是自然科学与工程技术的融合产物, 探索基础理论在应用中的理论和实现技术。以自然科学理论为基础和导向, 理论研究在实际应用中与应用研究相结合, 用自然规律科学研究的理论, 创造人工物的手段与方法[2], 使用数理分析、计算和建立理论模型等多种研究方法研究解决工程中的理论问题。因此, 工程科学为建造智能制造系统提供相关的理论和方法, 是实施智能制造提供的方法论。在实现智能制造工程中, 工程科学扮演着不可替代的作用。

## 2. 中国制造在国际上所处的位置与企业转型的必要

原工信部部长苗圩说: “中国制造不像我们想象那么强大, 西方工业也没有衰退到依赖中国。我们的制造业还没有升级, 但制造业者却已开始撤离。”他说, “全球制造业已基本形成四级梯队发展格局, 全球科技实力形成五个级别。

制造业的四级梯队:

第一梯队是以美国为主导的全球科技创新中心;

第二梯队是高端制造领域, 包括欧盟、日本;

第三梯队是中低端制造领域, 主要是一些新兴国家, 包括中国;

第四梯队主要是资源输出国, 包括 OPEC (石油输出国组织)、非洲、拉美等国。

科技实力领域五个级别:

第一级, 核心, 美国。

第二级, 发达, 英国, 德国, 法国, 日本。

第三级, 登堂入室, 芬兰、意大利, 以色列, 加拿大, 澳大利亚, 挪威, 韩国等中等发达国家。

第四级, 在大门口, 中国, 印度, 墨西哥, 南非等发展中国家。

第五级, 落后, 其余发展中贫穷国家都在此列。” [3]

苗圩在对《中国制造 2025》进行全面解读时指出, 在全球制造业的四级梯队中, 中国还处于第三梯队, 而且这种格局在短时间内难有根本性改变。要成为制造强国至少要再努力 30 年[3]。

我国的制造业自主创新能力不足, 自主创新落后, 导致我们制造业过分依赖于外部, 没有形成高端产业的主导权。创新能力不足和核心技术的缺失成为制约我国制造业发展的关键因素[4]。

我国的制造业需要转型也需要升级。主要发展方向是高端制造业和制造业的服务化, 逐步形成具有不同产业优势的产业集群[4]。创新是发展的根本途径, 通过创新驱动, 加快制造业转型、升级; 通过创新驱动, 提升产品的竞争力, 提高我国制造业在国际上的地位。

在通过创新驱动制造业转型、升级过程中, 应该重视的是创新能力的建设, 创新人才的培养至关是重中之重[5]。制造业的转型、升级依靠的是高端的科技人才, 国际间高端制造的竞争实际上是人才培养的竞争。为适应“中国制造 2025”策略, 人才培养是至关重要。培养各层次的人才, 帮助制造业成功转型、升级, 是实现“中国制造 2025”策略的关键。

### 3. 智能制造

西方德国、日本等发达国家已经走过工业化、城镇化、农业现代化、信息化的发展历程, 实现了工业 1.0、2.0、3.0, 正在向工业 4.0 迈进[1]。我国已经发展为世界装备制造大国, 但整体制造水平不高, 能耗过大、产能也过剩。目前, 我国的制造大多处于中、低端水平, 在高端制造和核心技术上缺乏竞争力[2]。

我国工业的发展必然是工业 2.0、3.0、4.0 同步发展过程, 即工业化、信息化、城镇化、农业现代化叠加发展[2]。“中国制造 2025”采取“总体规划、分步实施、重点突破、全面推进”的发展策略[2]。

“中国制造 2025”的目标是: 经过 10 年的奋斗, 到 2025 年, 中国制造业整体素质大幅提升, 创新能力显著增强, 全员劳动生产率明显提高, 智能化、服务化、绿色化达到国际先进水平, 中国进入世界制造强国的行列[1]。实现“中国制造 2025”要实施五大工程: 智能制造工程、制造业创新中心建设工程、工业强基工程、绿色制造工程、高端装备创新工程。其中, 最核心的是实施智能制造工程[1]。

人们通常都认为智能就是知识与智力相加, 但不是简单的相加。知识是智能的重要基础, 智力就是一种获得和利用有效知识进行问题解答的能力[6], 因此, 智力在智能制造的实现中, 显得尤为重要, 并起到关键的作用, 培养满足智能制造要求的“智力”也是当务之急。李拓宇等人认为“以人为本”是“中国制造 2025”的重要基础[7]。通过完善多层次人才的培养保障机制来实现“中国制造 2025”[8]。

智能制造主要由两部份构成, 一部分是智能制造技术, 另一部分是智能制造系统[6]。智能制造技术是实现智能制造理论在实践应用中的手段。智能制造系统担当着十分重要的角色, 由物理系统和支撑物理过程的环境系统(也称为环境支撑系统)组成。研究物理系统和环境支撑系统之间的关系和相互影响规律,

才能建造完善的智能制造系统理论。目前科技的发展还停留在建造物理系统数字化上,对环境支撑系统和与物理系统的关系研究甚少。

#### 4. 数字与物理世界的融合程度, 决定第四次工业革命的过程

“中国制造 2025”的核心是创新驱动发展。主线是工业化和信息化两化融合,主攻方向是智能制造,最终实现制造业数字化网络化智能化。周济提出主攻方向是实现制造业智能制造,并指出制造业数字化和网络化智能化是新一轮工业革命的核心技术,以下三点为智能制造的实现提供了技术保证[1]。

“一是信息技术指数级增长。不仅仅是芯片,还有计算机、网络、大数据、云计算等信息技术和产业都呈现出指数级增长的态势。这些信息技术及装备的指数级提升和增长是催生第三次工业革命的三大根本动力之一。”

“二是数字化网络化进步。数字化和网络化使得信息的获取、使用、控制以及共享变得极其快速和廉价,产生出了真正的大数据,创新的速度大大加快,应用的范围无所不及。”

“三是集成式智能化创新。数字化网络化智能化技术作为共性使能技术深刻地与制造技术融合,一种全新的创新方法——集成式智能化创新应运而生。是第三次工业革命的三大根本动力”[1]。

张曙认为,德国“工业 4.0”的核心理念是信息系统和物理系统的深度融合,并指出信息物理系统导致了智能制造的产生[8]。智能制造是第四次工业革命在制造领域的主要体现,第四次工业革命特别强调信息物理系统,即数字与物理世界的融合[9]。

然而,李培根认为,数字与物理世界的融合不再是简单地、表面地融合,通过第二和第三次工业革命,人们对工程中确定性问题的认识与控制已趋成熟。但制造中涉及效率、质量、成本、绿色、服务等,还存在大量的不确定性,以及有多少不确定性因素相互关联,又互相影响到何种程度[10]?不确定性分为客观不确定性和主观不确定性(或曰认识不确定性)[10]。客观不确定性包括加工过程中质量的不确定性、产品运行性能中表现出的不确定性等。主观不确定性,是未能数字化而导致人对其认识的不确定性[10]。

日本早期的智能制造计划之所以未取得明显效果,其主要原因是没有形成技术之上的解决客观不确定的理论和方法,是发展到第三次工业革命的前沿,也是技术发展的瓶颈。因此,要减少李培根所说的客观不确定性和主观不确定性,打破这种技术发展的瓶颈,一方面,提高数字与物理世界的融合程度,另一方面,在相关行业研究建立物理系统与环境支撑系统以及它们之间影响关系的理论和技术。有效的途径是用工程科学研究智能制造系统的规律。

要实现智能制造人才的培养,是有别于以往工科侧重于专业知识的培养。为实现“中国制造 2025”,科技人才应该侧重基础理论的培养,特别是数理基础的培养,再结合各学科的专业培养,同时了解学科的研究前沿,了解工程实际,才能为智能制造服务。

#### 5. 工程科学及其属性

工程科学是自然科学与工程技术的融合,钱学森先生首先给出的工程科学(也称技术科学)思想相对完善的论述[11]。工程科学萌生于第一次工业革命中后期的英国,相对成熟于第二次工业革命时期德国哥廷根大学。19世纪末德国哥廷根大学的克莱恩(F. Klein)的观点是数学要和实际工程结合起来,要运用数学去解决实际问题[11]。普朗特在哥廷根大学开创了应用力学学派,成为近代航空流体力学的奠基人。普朗特培养了如冯·卡门(Theodore von Karman)、铁·木辛柯(Stephen P. Timoshenko)、普拉格(Willia Prager)、邓哈托(J. Den Hartog)、纳戴(Arpád Nadai)等人才。冯·卡门和铁木辛柯等人把哥廷根大学的应用力学引入美国,是美国近代应用力学的奠基人。冯·卡门也是我国学者钱学森、钱伟长、郭永怀、林家翘的导师。



1957年, 钱学森再次对技术科学(也称为工程科学)的特点、性质和研究方法等进行全面、详细、深入的论述[11]。他认为工程技术不是自然科学理论的简单推演, 而是艰苦的创造, 需要创造出一门新的知识—技术科学(工程科学), 才能产生有科学依据的工程理论, 才能完成自然科学和工程技术的综合。他认为技术科学(工程科学)是从自然科学和工程技术的相互结合中产生的, 是以自然科学的规律为指导, 为工程技术服务的一门学问, 主要是研究和解决工程技术中的一般性问题, 其研究成果对工程技术具有普遍的应用性[12]。

基础科学以基础理论和纯理论研究为主, 主要是揭示自然界的客观规律。工程科学(技术科学)是理论研究和应用研究的结合, 探索基础理论的应用问题, 主要是揭示人工自然的一般规律。工程技术是改造自然、创造人工自然的手段与方法[12]。

钱学森工程科学思想的现实意义在于: 强化基础科学研究成果向工程技术领域应用的转化, 将工程技术中的一般问题反馈到自然科学促进了自然科学的发展, 形成完备的科学技术知识体系[12]。

从以上的论述可以看出, 工程科学处于自然科学和工程技术两个层次之间。钱学森指出: 工程科学的研究目标是“创造出工程技术的理论”, “要追到工程技术问题背后的理论”[13]。

工程科学的属性: 首先, 工程科学不是自然科学, 而是关于人工物的科学; 工程科学用对自然物的认识成果来制造人工物, 同时, 工程实践对科学认识提出更多更高的要求, 超出现有科学知识的范畴, 从而产生围绕实践展开的科学研究, 是对自然科学认识的延伸, 扩充了人类认识的边界; 其次, 工程科学也不是工程技术。工程科学同自然科学一样, 仍然属于科学, 属于人类认识人工自然的范畴[14]。工程科学属于应用基础研究。基于这样的定位, 要求研究人员要从工程实践中提炼出兼有学术和应用价值的科学问题, 其研究目标是要创造出工程技术的理论[15]。

## 6. 工程科学是实现智能制造的必要途径

智能制造分为制造过程智能化和网络化智能制造。网络化智能制造随着网络科学技术的发展而发展。制造过程的智能化, 则必须研究制造过程的智能制造系统。

智能制造系统由物理系统和环境支撑系统组成。针对李培根提出的认识的客观不确定性和主观不确定性问题[10], 对物理系统的认识, 即数字与物理世界的融合, 不能停留在对“表层”物理系统本身的认识。要减少客观不确定性, 需从代表“表层”物理系统的数字出发, 经过数理研究, 生成“深层次”的环境支撑系统的数字组合, 进而发掘出环境支撑系统。再经过数理分析, 研究“深层次”环境支撑系统是如何影响“表层”物理系统的, 建立“深层次”环境支撑系统与“表层”物理系统的关系。物理系统、环境支撑系统的数字化, 以及研究环境支撑系统与物理系统的相互影响关系是制造过程智能化的核心。其理论涉及到数理分析、计算、推理、不同尺度下的建模与控制等一系列理论与技术实现问题。这部分工作需要借助工程科学来完成。

工程科学在绝大多数情况下并不直接介入工程项目, 而是在工程实验室中独立发展。然而, 工程科学是现代技术的思想源泉和概念基础。现代工程实践中所谓核心技术, 大都源于工程科学中, 如芯片设计、半导体、材料和计算机等基础科学。正是这些以人工物为特征的工程科学发展滞后, 使得中国难以出现像英特尔、高通这样的由实验室成果直接驱动的高科技企业[14]。

工程科学的时代特征:

其一, 极端性环境下的研究。面对越来越多的极端环境, 深海、深空、高温、高压等, 研究在极端服役环境下, 极小尺度和极大尺度下的设计制造、灾害行为、破坏机制、安全控制原理和方法;

其二, 介尺度研究。研究包括物质与系统跨尺度行为、能流与物质流传递与交换、相互作用及其调控的理论和方法;

其三, 多过程研究。复杂系统往往涉及多个速率过程, 具有各自的时空尺度, 高度的非线性耦合规律及控制原理;

其四, 交叉性研究。工程科学涉及机械、力学、物化、材料、生命、信息、人文等, 多学科交叉已成为科学技术发展的必然[15]。

因此, 发展智能制造的工程科学是实现智能制造必走之路。

## 7. 智能制造人才的培养

德国的科技来源于德国的教育, 更来源于德国的制造业。工业 4.0, 是德国的现实, 中国的梦想。如果明晰智能制造的途径, 能够使梦想成为现实, 并实现弯道超车。人类正在走进一个人工自然时代, 从内外两方面向人本身逼近。这是现代科学发展趋势, 也只能在现代科学的进一步发展中获得圆满解决[14]。工程科学是关于人工物的科学, 无论科研、教学还是学科建设等, 本质上都是人的问题。一流的人才必然造就一流的学科。从这种意义上讲, 必须把培养工程科学家放在未来工程实践的首位[14]。

工程科学归根结底是基础研究, 智能制造需由实践来衡量。所以, 智能制造人才的培养理念和方法与以往的工科以专业技术培养为主的培养方式有所不同, 用工程科学人才培养的培养要求, 再加上相关专业理论知识、技术、技能的培养, 使培养出的智能制造人才, 能够解决制造工程实践中的工程科学问题, 并将研究结果再回到制造工程实践中去检验。做到研究问题要源于制造工程实践, 研究结果对制造工程实践具有指导意义。

因此, 智能制造人才首先掌握工程科学研究的方法论, 要有深厚的数理化知识储备, 掌握分析数学(包括数学分析、实变函数、泛函分析、小波、分形理论、混沌等), 善于使用数值计算、理论模型等多种研究方法去解决来源于工程中的理论问题; 还要掌握相关领域的设计与制造原理与技术; 同时, 还要培养国际视野, 视野宽广。

掌握这套方法论实际上是很高的要求。这就需要学生要有很好的数理基础, 有做理论研究的毅力和兴趣, 并且真正能够拿出具有创新性的研究成果[16]。

## 8. 结论

西方制造强国在进入第四次工业革命, 工业 4.0, 我国相应的也提出了“中国制造 2025”, 之后完成的程度取决于各国人才的培养和竞争。因此, 人才的培养是关乎到“中国制造 2025”能否实现的关键因素。文中论述了工程科学是智能制造人才培养必须具备的知识储存, 是“智能”实现的基础。

## 基金项目

中国建设教育协会教育教学科研课题(2019038)。

## 参考文献

- [1] 周济. 智能制造是“中国制造 2025”主攻方向[J]. 企业观察家, 2019(11): 54-55.
- [2] 刘则渊, 王续琨. 科学·技术·发展: 中国科学学与科学技术管理研究年鉴. 2006~2007 年卷[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2008.
- [3] “中国制造”并非想象中那么强大, 再继续下去会出大问题! 航空制造网[EB/OL]. [https://mp.weixin.qq.com/s/FW\\_-YR6dWYXqoX23BlzWeA](https://mp.weixin.qq.com/s/FW_-YR6dWYXqoX23BlzWeA), 2021-02-05.
- [4] 徐浩. 我国智能制造装备产业发展问题研究[J]. 计算机产品与流通, 2019(9): 89-90.
- [5] 龚其国, 杨丽萍. “中国制造 2025”背景下制造业的发展策略研究——基于社会网络分析和文本挖掘[J]. 科技促进发展, 2020, 16(8): 917-923.

- [6] 杜出云. 机电一体化技术在智能制造中的应用[J]. 装备维修技术, 2019(4): 72.
- [7] 何升龙. 机电一体化技术在智能制造中的应用[J]. 门窗, 2019(17): 239.
- [8] 张曙. 中国制造企业如何迈向工业 4.0 [J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(12): 1-5.
- [9] 曹进华. “智能制造”背景下应用型本科机自专业人才培养定位及对策思考[J]. 教育现代化, 2020, 7(46): 37-39, 61.
- [10] 李培根. 浅谈智能制造的本质和真谛[N]. 中国科学报, 2019-05-30(008).
- [11] 钱学森. 论技术科学[J]. 科学通报, 1957(3): 97-104.
- [12] 陈立新. 基础科学与工程技术之间的桥梁——钱学森的技术科学思想[J]. 科技管理研究, 2012, 32(22): 255-258.
- [13] 童秉纲, 李秀波, 赵硕. 工程科学研究人才培养之道——童秉纲院士访谈[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2016, 8(1): 5-11.
- [14] 贾玉树. 时代呼唤工程科学家[N]. 学习时报, 2020-05-27(006).
- [15] 戴兰宏. 新时代工程科学学科发展的思考[J]. 工程研究 - 跨学科视野中的工程, 2020, 12(5): 480-487.
- [16] 朱克勤. 传承工程科学思想, 办好钱学森力学班[C]//中国力学学会. 力学与工程应用(第十六卷). 中国力学学会: 河南省力学学会, 2016: 3.