

MT 机械工程导报

Mechanical Engineering Trends

<http://www.cmes.org>

2020 年第 2 期 总第 207 期

新工科教育的背景和使命 p1

数字孪生、赛博物理系统、智能制造、工业互联网四个术语之辨析 p23

中国制造业 500 强企业受疫情影响分析报告 p31

维修用机器人：从设施巡检到维修的演变 p40

目 录

CONTENTS

机械工程导报

MECHANICAL ENGINEERING TRENDS

1998 年创刊
2020 年第 2 期 (总第 207 期)
2020 年 4 月 28 日出版

主办: 中国机械工程学会工作总部
地址: 北京市海淀区首体南路9号
主语国际4号楼11层
邮编: 100048
电话: 010-68799036 (编辑部)
传真: 010-68799050
E-mail: zhongyg@cmes.org
网址: www.cmes.org
主编: 陈超志
责任编辑: 钟永刚
出版: 《机械工程导报》编辑部
发行: 中国机械工程学会工作总部



专家视点 EXPERT OPINION

- | | |
|-------------------------------|----|
| 新工科教育的背景和使命 | 1 |
| 数字孪生、赛博物理系统、智能制造、工业互联网四个术语之辨析 | 23 |



热点关注 CURRENT POINT

- | | |
|------------------------|----|
| 中国制造业 500 强企业受疫情影响分析报告 | 31 |
| 维修用机器人: 从设施巡检到维修的演变 | 40 |

新工科教育的背景和使命*



松山湖机器人基地 香港科技大学 南方科技大学 李泽湘

摘要

教育，无论是新工科还是传统工科，都是极其复杂和大滞后的系统。它对个人、企业、社会、国家的发展和未来走向都影响巨大。要把新工科教育做好和做到位极不容易，不是几句口号、几次动员会、几个工程甚至也不是短时间内就能搞好的。我们需要把新工科教育的来龙去脉、与传统工科教育的关系，以及世界上都有哪些好的探索和实践理清楚。发展新工科教育的天时、地利、人和都有哪些？在此基础上，如何进行顶层设计和配置合理的资源，使得新工科教育探索不至于半途而废。新工科教育是一个全新的概念，需要设立一些教育实验平台，小范围试错和迭代，总结经验，再逐步推广。就像当年小岗村农村经济改革和深圳市场经济改革一样。本文将论述新工科教育的使命和定位，阐述新工科教育与传统教育的共同点与不同点，同时总结回顾传统工科在国内外演变的过程。然后是新工科教育在国外、港科大、松山湖基地等采取的探索。最后，从发展新工科教育的初心提出新工科教育迭代的依据和标准，给出新工科教育发展的方向。

一、新工科教育的使命：科创

1. 美国是如何从农业国走到今天的

首先，我们调查了世界最大经济体——美国的经济发展和GDP增长的情况，得出了一些数据。美国2018年的GDP超过21万亿美元，人均达到6.3万美元。

其中，经济和科创发展最强劲的硅谷（也是众多科技巨头公司诞生地，占地1.8万平方千米，拥有700多万人口（与长沙市情况相近）），人均GDP达到11万美元。反观我们中国，作为世界第二大经济体，2019年GDP大约14万亿美元，人均约1万美元。

然后来看看美国是如何走到今天这一步的（见图1）。

1765年是人类历史一个重要的转折点，瓦特对蒸汽机的研究取得了突破性进展，他将冷凝器与气缸分离，使得气缸温度可以持续维持在注入蒸汽的温度，并在此基础上很快建造了一台实用样机。第一批新型蒸汽机于1776年制造成功并开始批量投入应用。同年（1776年），美国独立，并经历八年独立战争至1783

* 本文来源于《知识分子》公众号，本刊获得授权转载。

年结束。追溯历史，美国从独立开始，逐步发展经济，经历了几个重大的阶段：首先是1765年到1850年的第一次工业革命，之后进入以电和内燃机为代表的第二次工业革命（1850-1914）。1914年爆发了第一次世界大战，直到第二次世界大战1945年结束。战后，进入了以三极管、个人计算机为代表的信息时代，直到如今的智能时代。

独立初期的美国以农业为主，人均GDP约2000美元。随着第一次工业革命，美国的经济也开始了工业化发展。但是当时英国对技术保护很严格，不仅外界买不到机器，就连技术图纸也很难从海关带出，不比今天美国对我们的技术封锁等级低。

美国著名工程师富尔顿（Fulton, 1765-1815）在拿破仑的支持下，研制蒸汽船，初试非常成功，不料1803年在塞纳河试航时失败了。1804年，富尔顿转为效忠英国，发明了世界上第一个现代海军“鱼雷”（现代“水雷”）。1806年，他回到了美国纽约，带着自己的设计图纸，招募了一些工人，在哈德逊河附近开始了自己的事业。并且于1807年在纽约使用英国的机器制成以蒸汽机作为动力，可以在河流上使用的船“克莱蒙特号”，该船上安装了一台当时最好的瓦特蒸汽机。

罗威尔（Francis Cabot



图1 美国创新与经济增长进程

Lowell, 1775-1817，马萨诸塞州的罗威尔市以他名字命名），将工业革命引入美国发挥了重要作用。他18岁从哈佛大学毕业之后，开始从事贸易行业。美国在政治独立之后，手工业还是大量依靠进口，所以罗威尔意识到贸易救不了美国，美国需要本土的手工业产业。所以他自己去英国做工人，秘密学习，熟记纺织设备的建造及工作原理，在1812年战争（拿破仑战争）开始时回到美国研发纺织设备。所有的设备都是在他没有任何笔记，全凭记忆和理解的情况下生产出来的。

接着诸如1832年鲍德温的火车，1872年卡耐基从英国引进高炉炼钢的技术等等。但是这些都属于引进、消化、吸收、再创新的例子。光靠这些，不足以支撑美国的经济发展到今天。更

重要的是需要原创的技术。

图1中红框是整理出来的美国代表性的原创技术和产业，诸如1845年摩尔斯的电报，1848年弗朗西斯的汽轮机，1867年恩兹用钢铁造大桥，之后贝尔的电话，爱迪生的照明，特斯拉的交流电，怀特兄弟的动力飞行，福雷斯特开创的收音机产业，福特的汽车，伯顿的炼油技术。再后来1945年的计算机、三极管等，最后到硅谷时代兴起。美国也依靠经济和工业的发展，逐步提升，从人均GDP2000美元一直到现在的6万多美元。所以说，美国的经济能达到今天的水平，是通过创新实干得来的。

对于产品创新的方法和流程我们也都知道：首先产生创意，然后做出样机，进入市场，根据市场数据反馈进行学习，再对整个流程不断进行迭代（如图2）。



图2 产品创新迭代

2. 培养人才有哪三个问题

从美国和其他发达经济体的经验，我们问这么一个问题（科创之问）：能不能利用大湾区或者中国制造业强大的供应链体系，打造一批世界品牌？大湾区的首要定位是成为国际重要的科创中心。要实现这一目标，我们必须回答前面的科创之问。学院派创业者应该成为回答科创之问的主力军，而且也有优势成为主力军。

科创之问之外，还有两个非常著名的问题。一个是英国剑桥的生物学家李约瑟，在研究了中国发展史之后，提出了著名的李约翰之问：“尽管中国古代对人类科技发展做出了很多重要贡献，但为什么科学和工业革命没有在近代的中國发生”？

同样，在2005年，时任国务院总理温家宝在看望钱学森的时候，钱学森提出了对教育最大

的一个问题，也就是著名的钱学森之问：“为什么我们的学校总是培养不出杰出人才？”

钱学森可能知道教育问题产生的源头以及解决方法，但之前我们也提到，教育是一个复杂庞大的系统，不是简单一个人能解决的。它需要整个国家一起来思考，共同努力回答。

钱学森之问与李约瑟之问一脉相承，这两个问题也和我们的科创之问相辅相成，都是对中国科技创新的挑战。

在简述了三个问题之后，我们再来看看中国的GDP（图3），用2011年美元价格来衡量，我们目前离人均1万美元还差一些。不过这也是我们现在的一个基础。那么之后的40年，需要做什么来带动经济，怎样打造出一批批新的品牌？

3. 我们应该把握怎样的机会

综合之前的经验，有几个很重要的因素。首先要抓住需求，尤其是新兴市场的需求。从欧洲工业革命开始，到美国的中产阶级兴起，再到之后日本的中产阶级爆发，如今中国也有3亿到4亿中产阶级崛起（图4），所以我们有足够大的市场需求，就看怎么样去把握了。第二是把握好大方向，必须要把市场的需求与科技尤其是硬科技深度的融合起来。除此之外，我们还应该清楚今天要做的事情与美国之前经历的有什么同和不同。换句话说，我们已经经历了互联网时代，也经历了移动互联网时代，经过过去40年的发展，有了大湾区这样的得天独厚的制造生态链，有能力和速度去迭代产品，这就为后面的

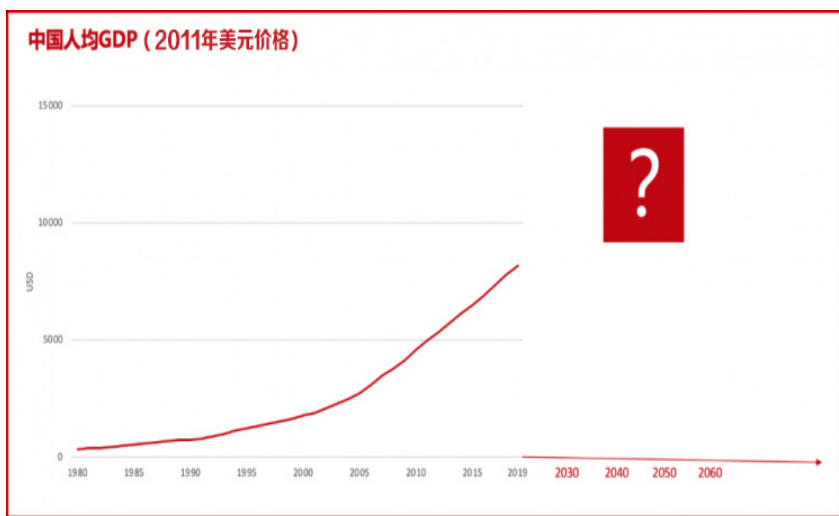


图3 中国人均GDP

物联网时代、智能时代、机器人时代打下了良好的基础。

二、新工科教育定位

1. 科创人才需要具备哪些素质

新工科教育的定位，要致力于培养和提供大量的科创人才，为回答前面的三个问题提供最重要和最宝贵的人力资源支撑。这涉及四个基本的环节：一要培养创新者基本素质；二要学会产品迭代的方法；三要掌握一套做硬科技创业不可回避的流程包括从概念到设计、到验证、小批量到最后量产（图5）；四要学会系统思维，应用系统思维去理清和解决创业过程中的关键子问题，建立自己的竞争优势。其中最重要的就是如何寻找和定义问题。

先来探讨下什么叫创新者素质。硅谷著名的风险投资公司红杉资本在过去40多年的投资经验和百亿美金学费的基础上，总结起来优秀创业者的20条特征（图6）。

华为经过这些年的摸索，也做出了一套自己的标准（图7）：可以看出，每一类都分了四个级别。一级是执行性人才，二级以上才达到开创性人才的标准。

哈佛大学的托尼·瓦格纳（Tony Wagner）教授在调研了大量的创新者、企业高管和教育家之后，对怎么培养创新者有独



图4 中国品牌消费市场崛起

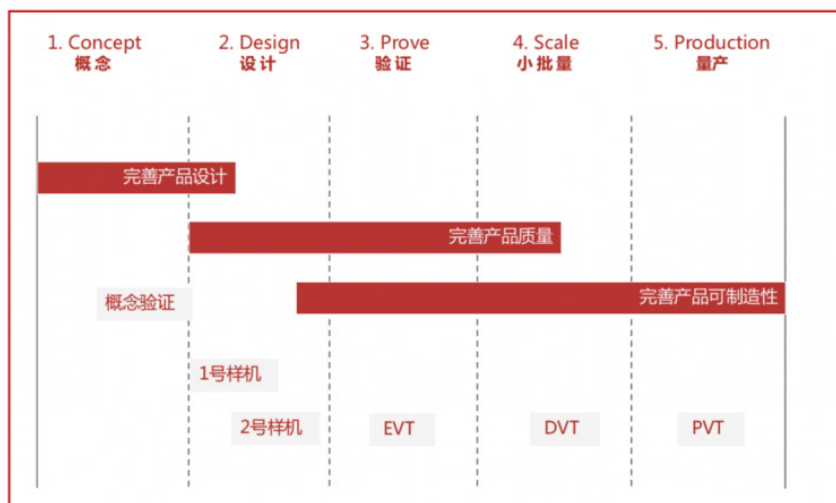


图5 创业流程



图6 红杉资本总结出的20条创业者素质

特和深刻的了解。他认为，从教育的角度看，创新者需要具备以下四条素质：

（1）必须要有好奇心，养成问问题的习惯，并且渴望通过问问题把它弄懂弄透。

(2) 必须要有团队合作能力。无论做产品还是做研究，都要和不同专业、背景、观念、价值观的人一起合作共事，每个人都可以从不同角度对一个问题提供不同的看法。通过团队合作融合大家的观点才能把一个复杂问题弄清楚。

(3) 跨界能力。就像乔布斯在斯坦福大学毕业典礼时所说，苹果打造创新的产品靠的是把之前看似毫不相关的点连接起来 (Connecting the dots)。

(4) 快速行动和动手能力。一个好的创业者，想到了就应该马上去做。有人问我怎么样选学生？我的回答是：给学生一件事情去做，看他能不能快速的反馈，能不能举一反三。如果能做到这一步，说明这个学生具备创业者最基本的素质。

2. 人才评估标准有哪些

可以看出，托尼·瓦格纳教授从教育的角度论述创新者的素质，和红杉以及华为开创者人才的标准是非常相似的。哈佛大学研究创新四十多年的教授特蕾莎·阿玛比尔 (Teresa Amabile) 还说到：创新者的素质并不是先天就有的，而是可以引导和培育的。同样，欧林工学院 (Olin College) 创校校长理查德·米勒 (Richard Miller) 强调人才培养的五个思维：跨学科思维、动手思维、企业家思维、

	0级	1级	2级	3级
1.主动性	不会自觉完成工作，需督促	主动行动，完成非配的任务	主动思考、快速行动，预判问题，采取对策	未雨绸缪，创造机会
2.概念思维	想不清楚、弄不明白	简单类比（局限与已有经验）	融类旁通，以点带面	深入浅出，把复杂事物总结成简单易懂的道理
3.影响力	不能清楚表达，不能服人，且蛮从	用简单道理说服别人	能换位思考	会用综合策略、有智慧
4.成就导向	安于现状	追求更好	自设富有挑战性的目标	敢于冒险做决策、企业家精神
5.坚韧性	受不了批评、挫折和压力	压不垮，任劳任怨	顶住压力，把事干成	变压力为动力，危中找机

图7 华为人才标准（二级或二级以上才能称为开创新人才）

伦理道德思维和全球思维。除了这五个思维之外，他们也有自己培养人才的九条标准：

① Develop and apply knowledge, skills and approaches and methods 培养和应用知识；

② Think critically 批判性思维；

③ Develop and apply creativity 创造力；

④ Develop and apply self-directed learning abilities 自我引导；

⑤ Prioritize doing good in the world 优先做好；

⑥ Design and implement processes to achieve desired outcomes 设计思维；

⑦ Communicate effectively 高效交流；

⑧ Collaborate successfully 成功合作；

⑨ Develop personal and

professional identity 自我专业素质。

美国权威的工程教育认证委员会 (Accreditation Board for Engineering and Technology, ABET) 在 2000 年终于跟进和修改了工科人才标准，简称 ABET11 条：

- a) 认识、提出和解决问题能力；
- b) 灵活运用数学、科学及工程知识的能力；
- c) 能有效的使用现代工程技术、工具与方法；
- d) 设计、操作实验以及分析和解释数据的能力；
- e) 实用系统设计能力；
- f) 交叉团队合作能力；
- g) 终身学习能力；
- h) 有效的沟通和表达能力；
- i) 明白职业规范、具有良好职业道德；
- j) 具备全面现代社会知识；
- k) 能理解工程社会影响的渊

博知识。

也可以把这 11 条归为四个类别，分别是：提出和定义问题能力；分析和解决问题能力；生活技能；职业操守。

欧林 9 条和 ABET11 条的最大区别在于对发现和定义问题（设计思维能力）的侧重度。爱因斯坦曾经说过，“如果我有一个小时去拯救世界，我会花 55 分钟去定义问题，5 分钟去找解决方案”。源于传统工程教育标准的 ABET 11 条看来更适合华为的 1 级人才标准，而欧林 9 条瞄准的是华为 2 级甚至更高。孔子言，“取乎其上，得乎其中；取乎其中，得乎其下；取乎其下，则无所得矣”。新工科教育的标准如何制定是不言而喻的。

3. 创业人才培养是怎么样的生态

明确了人才培养的目标和标准，下面的关键是如何去制定以课程体系为核心的培养方案、以及如何去评估和迭代（就像我们创新产品似的）。

我们知道欧林有套完整的课程体系来支撑他们人才培养的标准，并且达成目标的方法不局限于单模式。在学习方法方面，有项目制学习、设计思维训练、引导式学习、合作学习、动手实践学习、场景式学习、集成学习等。教学的方法更多的采用跨学科的教师团队来指导和引导学生，以

学生为中心，让企业积极参与进来。

哈佛大学商学院的特雷莎·阿马比尔教授花了四十多年，研究创新是怎么样发生的。开始，她总觉得创新就是少数的几个天才的事情，但是后面经过大量的研究，她发现只要掌握好的方法，有好的环境，普通人也可以具备创新能力，或者大幅度提升创新能力。当然这需要三个方面的因素：首先要具备一定的专业知识，尤其是在知识经济的今天，关键是怎么去学习知识，怎么去应用知识；第二要具备创新思维，也就是托尼·瓦格纳提到的创新者四条素质；第三，还需要内在和外在的驱动力，外在驱动力固然重要，但关键还是内在的驱动力。创新创业之路漫长而曲折，只有对此充满了激情与热爱的人才能不畏艰难、抵达胜利的彼岸。除此之外，好的环境犹如创新的催化剂，鼓励团队合作、学科交叉、包容和理解失败。在不断的迭代和试错过程中，给创新者赋能。

托尼·瓦格纳教授还提出了创新者培养生态三部曲（图 8）：首先要多玩，在玩的时候找到喜爱的东西。在发现爱好的过程中，去学习掌握知识。当然在这个阶段避免不了今天喜欢这个，明天喜欢那个。这也不是坏事，我们可以从一个兴趣，到另外一个兴趣，学习和拓展知识面，直到最

终找到真正的爱好和激情。这种激情，可以促使我们产生使命感，觉得能够改变自己、改变社会、给人类带来益处。而有了这种使命感，就会不遗余力去做好了。所以说创新不是一个人的事情，需要父母、导师、企业等来构成整个生态。

如今我们的幼儿园、小学、中学提供大量的补习班，却是和这个创新生态三部曲的原则相违背。蒙台梭利（Montessori）学校也提出，要大家尽情的玩，通过玩，去探索、实验、试错从而找到自己的兴趣，再从兴趣里找到自己的定位与使命。正如乔布斯所说，如果要取得伟大的成就，必须要找到自己喜爱的事情。

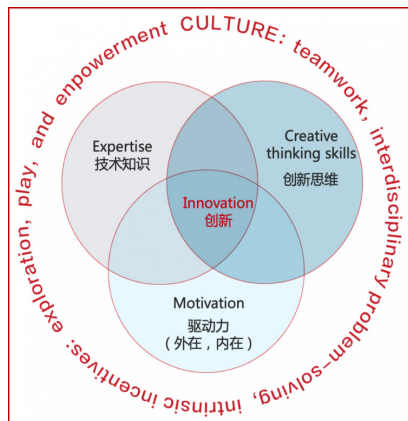


图 8 创新者培养生态和环境

三、传统工科教育的发展和新兴工科教育的兴起

先来了解一下传统工科教育的发展历程（图 9），这也能让我们更深刻的理解新兴工科教育的背景、使命和未来走向。前面提

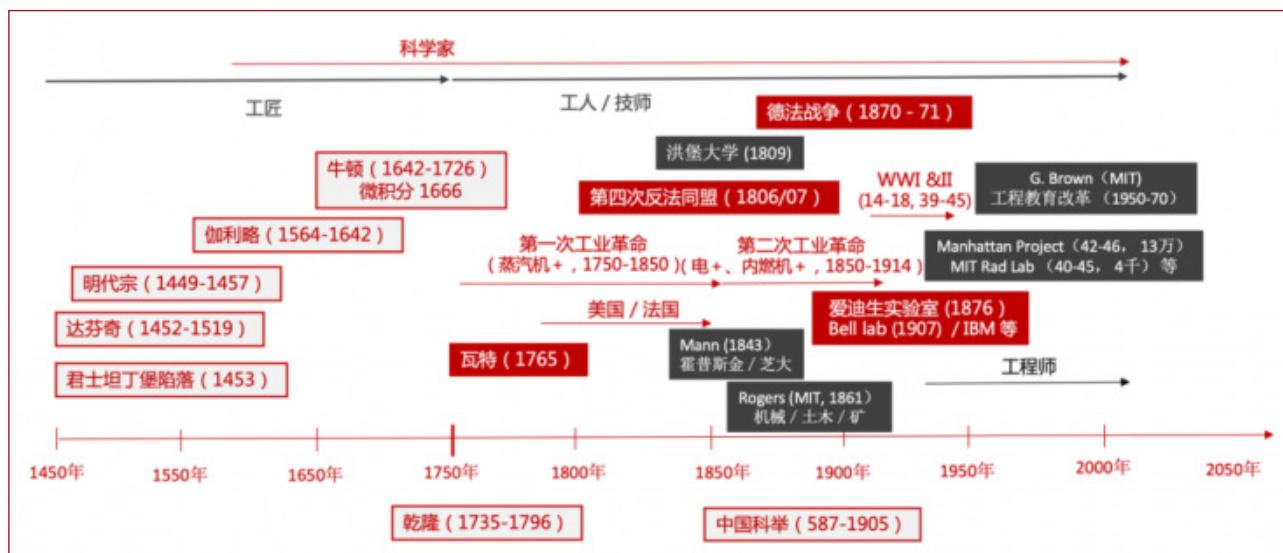


图9 工程教育的发展和演变过程

到过，1765年瓦特发明蒸汽机是人类从农业社会进入到工业社会的转折点。我们不仅要弄清楚转折点之后的故事，更要从转折点开始，理清之前发生了什么、为什么会产生这个转折（回顾下李约翰之问）。

1. 欧美教育改革经历了怎样的进程

我们从1450年谈起。1453年，东罗马帝国首都君士坦丁堡（现在的土耳其首都）被奥斯曼帝国攻陷，奥斯曼成功统治地中海东部及巴尔干半岛，丝绸之路被隔断。为了继续引进东方的丝绸、茶叶等产品，欧洲开始航海探索，寻求重新建立一条贸易的路径，这也是航海时代的开始。同时一大批学者离开这里，到了意大利（也带去了穆斯林从亚历

山大图书馆留存的古希腊文明），拉开了文艺复兴的序章。达芬奇就是文艺复兴时期艺术、建筑、军事、机械和科学发展的重要标志。那个时候的中国，还处在明朝时期，先后经历了明代宗土木堡事件和明英宗夺门之变，整个社会依然处于内忧外患，动荡不安。大约100年之后，伽利略起，标志着现代科学的诞生和科学方法的开始。同时开普勒也是科学革命的关键人物。他的著作《新天文学》、《世界的和谐》、《哥白尼天文学概要》成就了最为人们知的开普勒定律。牛顿也受开普勒的启发，发现了后来的牛顿万有引力定律。还有著名的微积分，也是牛顿因为英国的大瘟疫事件宅在家里，得出的结论。

经过科学革命以及科学方法的运用，造就了前文提到过的瓦

特发明蒸汽机。当时的中国，处于乾隆时代，也算是中国较为鼎盛的时期。可是同美国的华盛顿总统相比，他们做着截然不同的事情，对后续的影响也是各不相同。

2. 两次工业革命，两次战争对教育有怎么样的影响

第一次工业革命主要是蒸汽机的研制和应用。1765年，瓦特把当时格拉斯哥大学的纽科门蒸汽机（Newcomen steam engine）的效率提升了5倍，标志着第一次工业革命的开始。这些技术被应用在矿山、工厂、纺织、轮船、火车等各个行业，所以这是一个蒸汽机+的时代。

这次工业革命，从英国向周边国家辐射。法国属于近水楼台先得月，系统地“获取”了英

国的各项技术，派出大量人员去英国考察学习，还开办了军事和工艺类学校来传播技术。受益于工业革命，法国变得强大起来。1806年秋天，第四次反法同盟爆发，法军同时在耶拿和奥尔斯塔特大败普军，取得了德国大部分地区的控制权。受到战争的打击，普鲁士人痛定思痛，把这种危机转化成机遇，开始推广工业革命，并且组织建立了新型的大学，洪堡大学也因此诞生。普鲁士王国通过建立洪堡大学，来培养技术工人。工业革命和教育的成果，体现在1870年的普法战争，普鲁士大获全胜并统一德国。工业

革命之前，人口组成以农民为主，有少量的工匠。后来随着科学方法的诞生，有了科学家。工业革命开始之后，社会需要大批工人以及技师来应对工业的发展。大西洋彼岸的美国，一方面受到英国工业革命的影响；另一方面，也吸收欧洲尤其德国洪堡模式的优点（图10）。洪堡模式的主要特点：一是通过分科培养来大批量培育产业人才，二是开展科学研究和学术自由（主要在理学院和医学院），通过考试来检验效果，再通过控制老师来控制学生的质量。根据当时工业革命的要求，学生只需要按照要求把事情

做好即可。

美国麻州众议员贺拉斯·曼（Horace Mann）非常欣赏洪堡大学的体系，于1843年将其引进到了美国，以此模式建立了霍普金斯大学（1876年）和芝加哥大学（1890年）。当时对于如何分科教育有过激烈的争论，最后，美国成立了一个由哈佛大学和芝加哥大学校长参与的十人委员会（Committee of Ten, 1893年），决定分五科（数学、科学、英语、历史、外语）来学习。

洪堡教育模式被蔡元培1907年引进到中国并在北京大学推广开来。清华大学在1931年经过

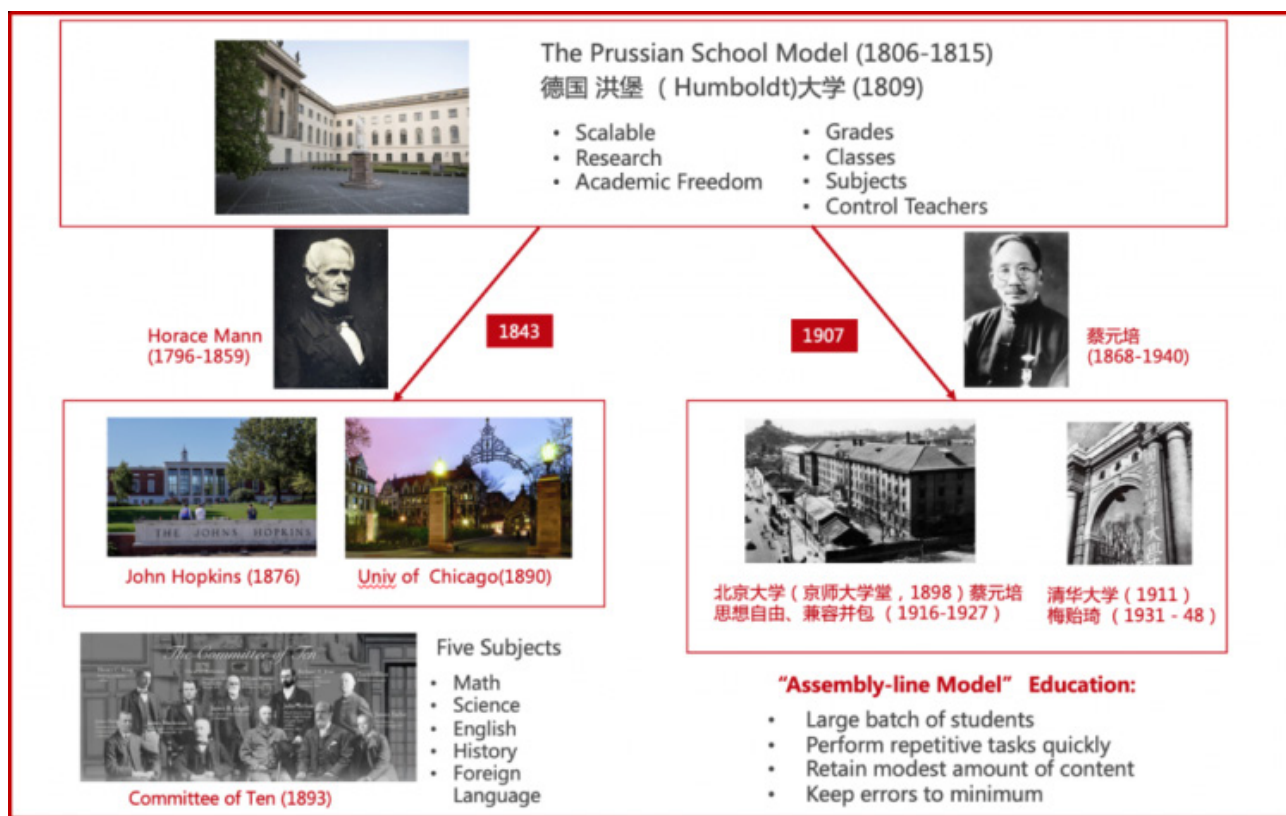


图10 洪堡教育理念从德国到美国（1843）和到中国（1907）的演变。

梅贻琦的改革，也采用了这种模式。有人把洪堡教育模式比喻成装配线形式的教育。

可以大批量培养产业工人（也叫技工），每个学生要重复学好一些知识点，尽可能不要出错，当然也不需要创新。而美国地理学家威廉·巴顿·罗杰斯（William Barton Rogers）觉得工业革命虽然产生了工人和科学家。但是工人和科学家脱节。他希望能创造一个新的工种：工程师，衔接科学家与技工（Technician）。所以，1861年他给麻州政府写了一个建立培养工程师的学校的报告，也就是麻省理工学院（MIT）的雏形。报告中提到培养的工程师第一要认识到知识的价值，二是通过动手去学习，三要有专业技能。从MIT的logo可以看出，手脑并用，理论实际相结合。但是由于美国发生内战（1861-1865），学校并没有立即运营。时隔四年之后，也就是1865年，第一批学生才入学。当时还处于第一次工业革命和第二次工业革命的过渡时期，学校只开设了三个专业：机械、土木和矿业。机械专业负责蒸汽机的修理和研制，土木专业负责铺路修桥，而矿业专业则为了挖矿。

第二次工业革命从1850年开始至1914年第一次世界大战爆发。第二次工业革命紧跟着第一次工业革命，并且从英国向西

欧和北美蔓延。第二次工业革命以电力和内燃机的应用为代表，包括电灯、电报、电话、无线电、飞机、汽车等，是一个“电+”和“内燃机+”的时代。1876年，爱迪生建立了一种新型研发机构，即著名的爱迪生实验室，发明了包括其名下的1093项专利和这些专利的商业应用。爱迪生不止是个发明家，且善于学习。他的实验室汇集了一批物理学家、数学家、冶金学家、化学家、技工和熟练工人，有机地融合了科学家、技工和资本，建立了实验平台和产业化体系，改变了以前小作坊式的技术创新，成为了现代工业技术研究的一个转折点。爱迪生实验室的创新模式影响了一大批类似的实验机构，包括1907年成立的贝尔实验室（Bell Lab），以及二战期间的麻省理工学院放射实验室（MIT Radiation Lab）和原子弹研究工程曼哈顿计划（Manhattan Project）。第二次工业革命使得电力技术应用越来越广，包括1882年爱迪生的第一家商业发电厂和1875年贝尔在电报的基础上发明的电话（Acoustic Telegraph）等。贝尔还去MIT介绍过电话技术，促使MIT在1882年9月成立了电机系，并且由查尔斯·クロス（Charles Cross）开设了美国第一个电机工程课程。第二次工业革命时期，中国还在延续一千多年的科举体

系，教学依然采用古老的方式（推荐观看央视纪录片《科举》）。这种文化根深蒂固也着实影响了我们后续的发展。经历了第二次鸦片战争的惨痛失利和太平天国运动，曾国藩等人开启了洋务运动（1861-1895），师夷长技以制夷，并派出首批幼童留学美国。虽然洋务运动没能救得了大清王朝，但是对于之前清政府抵制夷人、闭门造车来说，已经是进步了一大截。

3. 美国的经验给中国带来什么样的帮助

按罗杰斯当时的设想，技工可以用已有的科技做一些创新，科学家推进科学进步，而工程师则应该是二者的桥梁，不仅使用已有技术，而且可以应用科学去开发新技术。换句话说，工程师不会等待有了科学之后才去使用，而是可以自己走在科学的前端。很可惜，MIT从1865年招收第一批学生直到1930年代初，罗杰斯的这个梦想始终没有实现。学校还是以培养技工为己任，只要懂得修理和维护机器设备就好了。有个很有趣的例子，1936年钱学森去MIT拿到硕士学位后就离开去了加州理工，师从德国来的冯卡门教授。他自己回忆道，当时在MIT的一年时间，并没有学到太多。罗杰斯真正梦想的实现，则归功于范内瓦·布什



图 11 范内瓦·布什

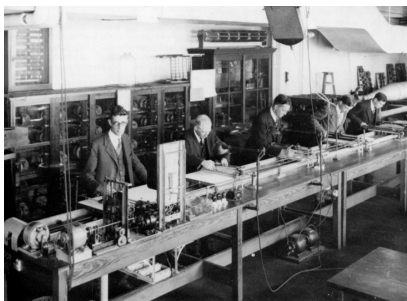


图 12 布什与几位弟子一起做实验

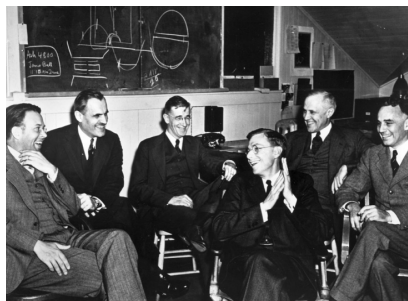


图 13 布什在伯克利劳伦斯实验室商讨放射实验室筹建事宜

(Vannevar Bush, 1890-1974) 教授对 MIT 的改变。

范内瓦·布什（图 11、图 12、图 13）博士毕业于 MIT（1916 年）。博士之后的头几年，他先后为塔夫斯大学 (Tufts University)、美国国家学院和 MIT 等工作，折腾了一段时间（明显的创业者素质），期间他还联合创办了雷神 (Raytheon) 公司，如今美国最著名的导弹公司。他在 MIT 任教时（1919-1938），首倡工程教育的研究文化。他最为著名的科研成果就是与著名数学家诺伯特·维纳 (Nobert Wiener) 研制了首台机械式模拟计算机（英国的计算机鼻祖查尔斯·巴贝奇 (Charles Babbage) 虽然提出了计算机构想，但并没能做出来）。同时他还担任二元代数课的教学，为信息论工作奠定了基础。之后他担任电机系主任，MIT 工学院首任院长（1932-1938）、教务长。可以说，MIT 正是在布什的领导 下建立了跨学科的研究文化。1938 年，他到卡耐基科学研究所

担任主任，这是美国资助科研经费最多的机构。此时他对美国科学研究的影响，可以说是最高级别的。同年八月份他又被任命为美国国家航空咨询委员会 (NACA, NASA 的前身) 的主任。在一战期间，布什发现科学家和军事之间的阻隔。他也意识到二战不可避免，而这次战争也是科技的战争。所以他给时任总统罗斯福写信，并用 15 分钟说服罗斯福批准成立美国 NDRC（相当于我国国防科工委这样的机构），把高校、企业、政府、军方等机构组织在一起，针对二战需要的技术进行研究。对二战影响最大的研究项目包括曼哈顿计划、MIT 放射实验室等。曼哈顿计划汇集了各类各样的科学家和技工，人数达 13 万之多。战争结束后，布什发表文章 “Science: The Endless Frontier”，建议政府不应该停止对科学的资助，并推动成立美国科学基金会。这篇文章也被李政道引用，用于推动中国成立自然科学基金委员会。布什同时还训练出来一批知名学生：

弗里德里克·特曼 (Frederick Terman)（1924 年毕业）后担任斯坦福大学工学院院长和教务长，被称为硅谷之父。哈仁 (H. Hazen, 1931 年毕业) 是伺服机构 (Servomechanism) 的创始人。戈登·布朗 (Gordon Brown, 1907-1996, 1938 年毕业) 是第一台数控机床的研制者，也是现代工程教育的奠基者。布什在 1927 年开始构建微分分析器时，意识到工程的进步离不开数学，这也为后来 布朗的教育理念埋下了种子。同样还有被誉为信息论之父的香农 (C. Shannon)，哈佛大学的哈沃德·加德纳称香农的硕士论文“可能是本世纪最重要、最著名的硕士学位论文”。布什还有两名中国学生，顾毓琇和李郁荣，也同样非常有名，他的这两位学生也为中国的现代教育建设做出了杰出的贡献。

介绍一下 MIT 放射实验室以及它对现代工程教育的影响。在二战时期，德军潜艇以“海狼”而闻名于世，一度给英国的海上运输造成了极大破坏，从英国到

美国的运输船只都被德国潜艇拦截,相当于将英美两国隔离起来。所以丘吉尔找到罗斯福寻求帮助,希望美国可以把英国最早研究出来的雷达进行进一步改进并且批量生产。于是罗斯福把任务交给了布什。布什到伯克利劳伦斯实验室(Berkeley Lawrence Lab,拥有大批诺奖得主,第一台回旋加速器诞生地)找了诸如康普吞(A. Campton,芝大物理学诺奖)、科南特(J. Conant,哈佛校长)、K. Campton (MIT 校长, A. Campton 的哥哥),还有罗兰远距离导航系统的发明者鲁米斯(Alfred Loomis),一起构思组织了跨学科的团队,由李·阿尔文·杜布里奇(Lee Alvin DuBridge)担任主任(1946年任加州理工校长),以物理学家、数学家为主导,技工、工程师为配角,来研究微波与雷达的实验室。高峰时期实验室有4000多研究人员,有9位先后获得诺贝尔奖。从事地面、机载、船载、预警、火炮联网等方向的研究。MIT放射实验室生产了美国一半以上的雷达,为赢得二战胜利做出了重要贡献,所

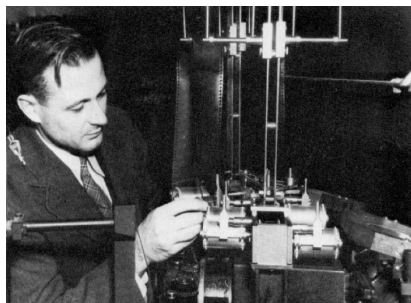


图14 戈登·布朗

以有句话说,原子弹结束了二战,雷达赢得了二战。

在放射实验室基础上,布什的弟子布朗教授(图14),同时也是首台数控机床研制者、MIT电机系主任(1952-1959)和工学院院长(1959-1968),意识到之前技工式的工程教育让工程师在二战的工程研究中处于配角地位。物理学家、数学家反而成为了无线电、雷达等重要工程项目的主要推动者。回看当年MIT创始人罗杰斯在创校方案《罗杰斯报告》(The Brown Report 1950)的设想和布什的教育理念,MIT成立了一个由布朗教授牵头的委员会,检讨工程教育,并于1950年提出了教育改革方案两个基本原则:科学主导工程,工程师首先要被培养成科学家,强调教学中数学和科学的地位;实验与课堂教学紧密结合。

在布朗的主持下,MIT电机系对课程进行了改革、并形成了今天我们所熟悉的课程方案(图15)。

从第一年级起,学生有两到三年的数学课,一到一年半的物理课。二年级起,开始专业基础课,三、四年级专业和选修课。同时有大约八门人文课程(每学期一门)。最后一年毕业设计。每个学期5门课,四年总共40门课,120学分。这个方案在MIT工学院推广后也几乎被全球所有的工学院采纳。这个课程体系的另一特点是先学理论,再动手做。专业基础课和专业课一般都会配有相应的实验(见布朗报告的第二原则)。最后毕业设计的宗旨是通过一个项目把之前所学的内容融合起来(项目题目通常由老师定)。在推动工程教育改革的同时,MIT把办学的重点

	秋季	春季
一年级	Math I	Math II
	Physics I	Physics II
	Chemistry I	Science
	其它课程(HSS)	其它课程(HSS)
二年级	Math	Math
	Elec 专业基础	Elec 专业基础
	Programming	Computer基础
	其它课程(HSS)	其它课程(HSS)
三年级	Elec 专业课程	Elec 专业课程
	选修课程	选修课程
	其它课程(HSS)	其它课程(HSS)
	Capstone (毕业设计)	Capstone (毕业设计)
四年级	其它课程	其它课程

图15 布朗教改后的工程教育课程体系

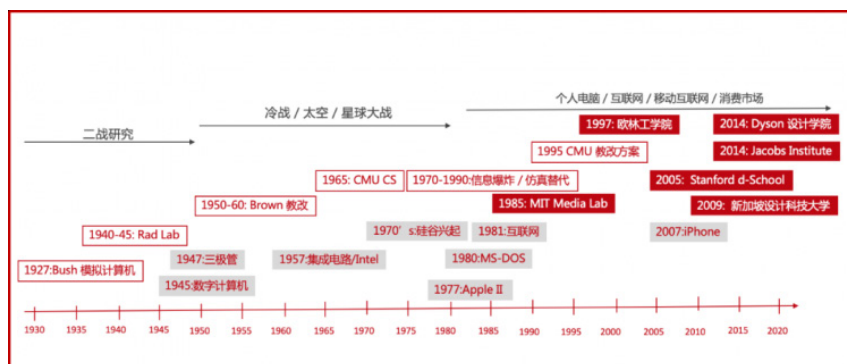


图 16 现代工程教育发展

放到了研究生教育。本科生的职业技能或者通过研究生阶段学习后得到加强，或者去企业通过企业内部培训获得（美国大企业有很好的培训机制）。

起源于MIT的现代工程教育，尤其是研究生工程教育适应了战后经济和产业的发展，对于推动美国经济和科技发展起到了举足轻重的作用（图16）。MIT、斯坦福和伯克利的创业者主要以教授、博士生和研究生为主体，技术主导型企业为多。

我们来系统梳理一下从1930年开始到今天的工程教育演变过程。1927年布什开始研究模拟计算机，1940年成立MIT放射实验室，再到50年代布朗的工程教育改革。在布朗教育模式往其他大学推广的同时，工业界也发生了一系列变化。1946年第一台数字电子计算机ENIAC在宾夕法尼亚大学亮相。1947年半导体三极管在贝尔实验室出现。三极管之父威廉·肖克利（W. Shockley）将晶体管技术带到硅谷，成立

了肖克利实验室（Shockley Semiconductor Laboratory）。以罗伯特·诺依斯（Robert Noyce）和戈登·摩尔（Gordon Moore）为首的“八个叛徒”

（“Traitorous Eight”）从肖克利实验室辞职后成立了仙童（Fairchild）半导体公司，后面又创办了英特尔公司。集成电路被应用到各种各样的仪器，包括大型计算机、收音机和电视等。1977年，乔布斯与沃兹尼克创办苹果公司并推出了Apple II，开创了个人电脑的时代，微软的软件产业也油然而生。之后硅谷兴起，进入了互联网时代。随着电子计算机的发展，卡内基梅隆大学（CMU）在1965年成立了计算机系，工科学生也开始需要学习编程等基础课。同样，各种各样的仿真工具诞生，这些工具可以在某种程度或者某些方面来帮助实验。随着越来越多的课程加入，仿真也就逐步替代了实际的动手操作，课程里的动手环节被逐步削减。因为在当时，大家都会觉

得上的课程越多，学到的知识也就越多，越有用，所以难免学生会超负荷工作。

卡内基梅隆大学在1995年又做了个系统的调研，通过了解追踪毕业的学生，发现课学的越多，学生取得的成就越差。所以又进行第二次改革，从每个学期5门课变成4门，减少了毕业要求的课程数量。这个教改得出一个很重要的经验，就是学的多不见得好。在实际应用中，如果学习的内容没法消化，就相当于浪费。

4. 新工科教育怎样开始

新工科教育的一个重要节点是2007年苹果推出智能手机，对整个产业界和教育界产生巨大影响，同时也开启了对传统教育模式的反思。从索尼的Walkman被苹果的iPod击垮，到后来诺基亚、摩托罗拉等手机巨头也同样被苹果打败，高通的前主席保罗·雅各布斯（Paul Jacobs）博士说到，他和很多行业高管长时间夜不能寐。以前高通通过诺基亚和摩托罗拉等客户支付的专利费躺在床上就可以数钱，但是后面这些客户都被与手机不沾边的苹果公司打败。他开始思考这种现象，分析乔布斯的特点和苹果公司的不同。从中他意识到传统的工程教育必须改革（他自己在加州大学伯克利分校获得本科、研究生和博士学位）。“未

来的产业领袖如果只是会专业技术已经不足以应对创新经济时代的挑战。他们必须学会如何在跨学科团队工作，如何快速迭代产品，从设计到制造。如何把技术与艺术融合起来，如何理解国际市场不同的需求”。2014年，他给伯克利捐了一笔钱成立了一个新的本科学院雅各布斯设计创新研究所（Jacobs Institute of Design Innovation），开启了伯克利的新工科教育探索。同一年，戴森也在帝国理工建立了与传统设计学院完全不一样的新型工程设计学院——戴森设计工程学院（Dyson School of Design Engineering）。反观MIT，早在1985年，建筑学院利用其在设计领域的优势建立了一个跨学科的研究生培养平台，MIT媒体实验室（MIT Media Lab）。该实验室招收来自设计、工程、科学、艺术等领域的学生。学生根据自己爱好，组成跨学科项目组，探索产品定义、迭代和制作。其口号是 Design and Demo。MIT当时的工学院院长很想在本科推行媒体实验室的改革，但遇到极大阻力。最后说服新加坡政府于2009年成立新加坡设计科技大学（SUTD）。

离苹果最近的斯坦福大学，于2005年成立了哈索·普拉特纳设计学院（Hasso Plattner Institute of Design，简称d.school），也在推动类似的

教育改革。

当然，最有代表性，也最为系统全面的改革还是1997年成立的欧林工学院。以上是一些新工科教育改革的实例。

为什么说这些改革就像当年的布朗的改革一样，对整个工程界和社会都会带来很大的改变？在二战及二战后直到1980年代，大学的科研经费主要来源于政府和军方。问题主要是针对战争、军事、冷战或太空竞争的各类需求。但是随着个人计算机、互联网以及消费市场的兴起，科研经费和研究问题的来源已经从政府和军方转移到企业、民用和消费市场。比如苹果一年的科研经费已经超过美国的国防先进研究计划署（DARPA）的预算。同样现在的企业对传统模式培养出来的毕业生也有新的衡量和评判，像谷歌已经从之前招名校研究生和博士生到现在15%的新员工不再有大学学历。同时，也不再需要提供成绩单。企业更在乎员工的创新能力，而不是学位或者学校的排名。

美国科技企业和主要高校在新工科教育领域的改革对中国工程教育和产业的发展有什么影响？中国的高等教育，尤其是工程教育应该如何改才能适应中国经济、产业和未来的需求？

我们先来看看中国工程教育的发展历程。

1872年到1875年，清政府先后派出四批共120名幼童赴美国留

学，1881年由于项目中断有94名回到中国。而这些留学生在中国的工程教育中也扮演了重要的角色。梁诚，第四期学生，17岁回国，1903年至1908年间担任晚清驻美国公使。他曾为清廷争回部分庚子赔款，这笔款项支持了逾千名学生赴美留学。他当年所设的游美肄业馆，后改称清华学堂（清华大学前身），也被称为清华之父。唐国安，第二期学生，1910年任外务部考工司主事，主要负责选派留学生，1912年5月清华学堂改办清华学校，担任了清华第一任校长，在任期间选派大批学生赴美留学，包括胡适、赵元任、竺可桢、梅贻琦（图17）等。



图17 梅贻琦

梅贻琦（1889-1962），作为第一批庚子赔款留学生，1911年入美国伍斯特理工学院研究电机工程，1916年回到清华担任物理系教授，1931年起担任清华大学校长。西南联合大学成立后，他以校务委员会常委身份主

持校务。梅贻琦先生是清华大学（含北京、新竹）历史上任期最长的校长（1931-1948、1955-1962），被清华人尊称为“永远的校长”。在他担任校长期间，清华大学也突飞猛进，他也留下了至今在教育界仍然振聋发聩的名言“大学者，非谓有大楼之谓也，有大师之谓也”。

我们熟知清华在人文方面，有国学四大导师梁启超、陈寅恪、王国维、赵元任。理学方面也有一批很有名的数学和物理学家。那么工程方面，就要说到前面提到的布什的两位学生：顾毓琇（图18）、李郁荣（图19）。

顾毓琇（1902-2002），无锡人，1915年，13岁的他考入清华学校中等科，1923年毕业，此后留学美国麻省理工学院，获电机工程学士、硕士、博士学位（1923-1929，三麻，类似清华三清），也是第一个拿到MIT博士学位的中国人。1929年归国后，他历任浙江大学电机工程系教授兼主任，国立中央大学工学院院长，国立清华大学电机工程系教授兼主任（1932-1933）、工学院创院院长（1933-1937），创办清华大学无线电研究所和航空研究所并任所长。他历任国民政府教育部次长、国立中央大学校长、上海市教育局局长、国立政治大学校长。其间，他还曾兼任国立音乐学院院长、中大教授，国立交通大学教授。他也培养出



图18 顾毓琇

一大批对中国科学发展起到关键作用的学生，包括钱学森，钱伟长，吴健雄等。江泽民也算是他运算微积分课程的学生。

李郁荣（1904-1989），顾毓琇在MIT的师弟，也是庚子赔款留学生之一，同样在MIT获得了学士、硕士、博士学位（1924-1930）。他读完硕士后，MIT数学系教授诺伯特·维纳（Wiener）找到布什，希望能推荐一个学生帮他实现他的想法。经布什推荐，李郁荣开始了与维纳教授长期的合作研究，他们共同研制的李-维纳网络，获得美国专利。在此过程中，李郁荣和维纳配合默契，把维纳的思想理论发扬光大，在工程界推广，立下汗马功劳。毕业之后，1934年受顾毓琇邀请，到清华电机系担任教授。所以清华电机系早期的课程体系、实验设备都和李郁荣密切相关。



图19 李郁荣

李郁荣促成了维纳1935年访问清华大学并继续与之进行合作研究（图20，图21）。以下是他给维纳教授的书信内容节选：“清华工学院以拥有的设备和装置而自豪。数学系的图书馆与MIT的一样完善。任之恭博士认为物理系的图书馆要比哈佛大学的更加完善一些。我相信，您会发现这些图书馆为研究工作准备了充分的资料”

同样顾毓琇也写信邀请维纳：“维纳教授，请允许我代表清华大学数学系、物理系和电机工程系的教职员，欢迎您和夫人即将来我校工作，我们对您的到来都十分高兴，希望您能早一天来到清华。我和李博士为您的住宿等事宜已经做出了初步的安排。我们保证未来一年您会在清华住得很好。您一到上海或天津，请打电报告知您乘火车来北平的



清华大学校史馆陈列了一张1936年电机系教师与维纳的合影照片，前排有赵友民、李郁荣、顾毓琇、维纳、任之恭、倪俊、章名涛；后排是张思侯、范崇武、沈尚贤、徐范、娄尔康、朱曾赏、严陵（左起）。

图 20 1936 年清华电机系成员与维纳合影

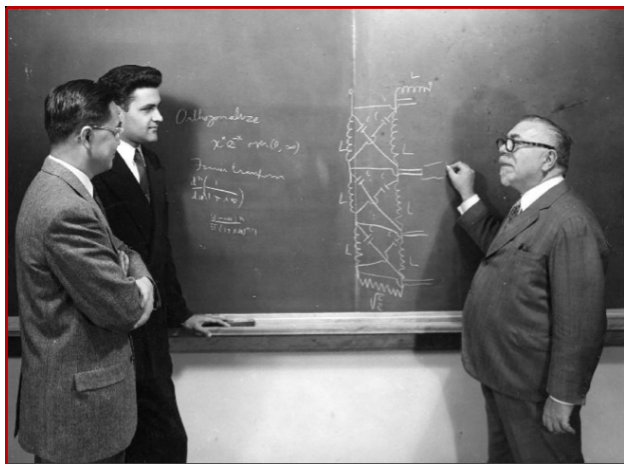


图 21 李郁荣，A. Bose 和维纳讨论李—维纳网络场景

具体时间，我们会到车站迎接您。我校电机工程系正在考虑购买一台小型积分仪或微分分析仪。请您与布什教授联系一下，让贵方的电机工程研究小组的专家为我们制作一台仪器，并请告诉我们所需费用情况，我们希望您在清华大学期间能帮助我们在此设备建立起来。梅校长刚刚已经打电报给您，谈到有关您和夫人旅行费用的事宜，此费用六月份由我校负责为您报销，单程旅费总计 1040 美元。随信寄上给杰克逊教授和布什教授的两封信，请代我转交一下为盼。

致以最美好的祝愿。Y. H. Ku”

信中内容可以看出，学科交叉在当时清华是很普遍的一件事情。而且从给维纳教授的路费 1040 美元来看，这在当时是天文数字。毛主席在北大做图书馆员的基本工资只有 8 美元，梁思成

在清华教授 300 美元已经是天价，MIT 的教授也只有 125 美元，所以我们可以说，清华在当时既有钱，又有人（有大楼也有大师）。

维纳回国后，还鼓动著名数学家、普林斯顿高等研究院终身教授约翰·冯·诺伊曼到清华访问，诺伊曼夫妇对此很感兴趣。1937 年 5 月 4 日，诺伯特·维纳专门就此事同时致函李郁荣、梅贻琦和熊庆来，郑重推荐约翰·冯·诺伊曼作为清华大学的访问教授。然而，由于七七事变，日本全面侵华，遂成为泡影。

同样很遗憾，1937 年李郁荣在去杭州参加亲戚婚礼时卢沟桥事变发生，只好躲在上海避难。八年期间通过开古董店维持生计，他的科研工作被迫中断。后来致信维纳并且于 1941 年拿到了 MIT 任教的聘书，无奈珍珠港事件突发，到 1946 年初才得以重返 MIT，开始致力于探讨通

讯中的统计理论，成为了统计通信方面的开山鼻祖（图 22）。他也和维纳、香农一起奠定了 MIT 二战后电机系的基础。在 MIT 李郁荣也培养出了一批高水平的学生，阿玛尔·博斯（Amar Bose，1956 年毕业）音响设备巨头公司 Bose 创始人，艾文·雅各布斯（Irwin Jacobs，1959 年毕业）高通创始人，G. Zames（1960）鲁棒控制的创始人。

我们能看出，当时清华电机系的起步水平还是挺高的。很可惜因为战争原因大部分设备和人才都流失了，一部分人带着一部分设备去了西南联大。虽然说西南联大在人文、理科等领域取得了非常了不起的成就（如陈省身的 Gauss-Bonnet 定理），但是西南联大在硬科技领域和当时 30 年代的清华是无法相比的。

图 23 上部分总结了美国工程教育的发展。再来梳理中国工

程教育的发展(图23下半部分)。

中国现代工程教育的发展从1932年顾毓琇回到清华开始,李郁荣(1934年)和维纳(1935年)来到清华建立电机系为起点。1937年至1945年整合到西南联大。1950年院系调整,工科与文理分家,失去了重要人文和科学支撑以及学科交叉的机遇。1966起年十年文革,1978年改革开放,迎来了科学春天,科技复兴。1990年开始高校合并,1999年大学扩招。虽然办学经费和规模得到了大幅提升,但也带来很多问题。一是管理体系臃肿,行政化和唯论文文化现象严重。二是面合心不合,阻碍学科交叉的障碍并没有实质性减少。1990年吴家玮教授创办香港科技大学,把梅贻琦、顾毓琇、李郁荣在1930年代开启但没完成的事业、借助香港回归、小平南巡、留学生归国和香港资金及政策支持,把起源于德国、发展于美国的研究型大学尤其是现代工程教育模式在香港落地结果,同时也推动了香港高等教育过去二十年的长足发展。2004年港科大开始探索新工科教育。2012年以港科大为模板深圳成立南方科技大学。这就是中国工程教育发展的大体脉络。

我们进一步分析下中国传统(或现代)工程教育的一些问题,这能帮助我们进一步理解钱学森之问的本质。从钱学森的求学(MIT和加州理工)、研究(工



图22 李郁荣回到MIT与维纳、香农组织通信研究讨论会

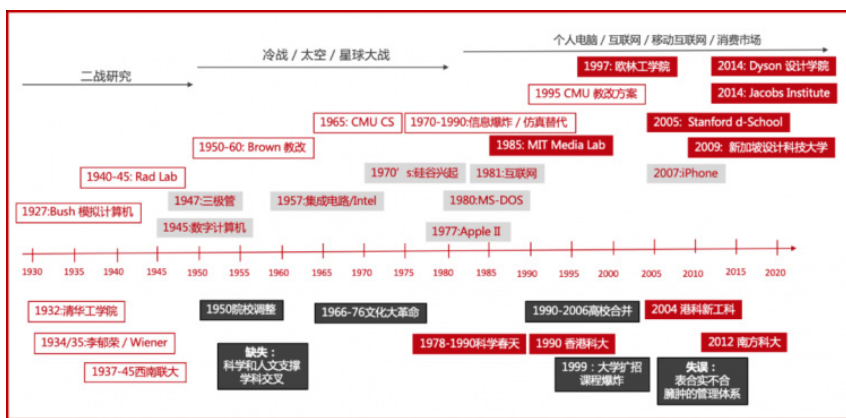


图23 中国现代工程教育发展

程科学、系统科学、工程控制论等)和工作(两弹一星等)背景,可以看出他说的创新人才应该是现代工程背景下的创新人才。当然这类人才在新工科背景下也可能非常出色(好比香农与乔布斯)。

创新首先要有非常好的学科交叉平台和环境支撑(见Amabile的创新图,图8)。但我们现在的大学,尤其是理工科大学,结构又是如何呢?学校首先被分割成理学部、工学部和商学部(叫部或群的都有,本质相

同)等。

工学部下面又细分成自动化学院、通信学院、光电学院、计算机学院、软件学院等(这些都隶属于之前或国外的电机系)。学院下面进一步细分成多个系或二级学科。每个系或二级学科就是一个小山头。隶属于这个山头的老师和同学跟其他山头老死不相往来(学生虽然几年后就毕业了,但接触的全是家山头的东西)。

我们再看看每家山头给学生提供的课程内容。按布朗现代工

程教育理念，先理论，再动手，40 门左右课程（CMU 教改后变成了 32 门课，甚至 30 门课也可毕业）。前面一部分还行，后面一部分就难说了。一个根本原因就是随着知识的爆炸，越来越多的课程被挤进来。每个老牌教授（或者教学指导委员会）都觉得自己的课程重要，一门课都不能少。

知识经济嘛，肯定是课程越多越好。图 24 列出了几所重点大学信息专业学生所修课程数目。相信李郁荣或者布朗看了这个课程表一定会晕过去（即使是香农这种超级学霸也不一定承受得了）。每个学期要上七、八门或更多的课程，最后的结果肯定是囫圇吞枣。实验和动手部分要么被仿真替代或者走个形式了（canned-type of experiments）。

毕业设计只有一学期，也是形式化。老师把之前做过的题目让学生重复一遍，也就你好我好大家好了。

再者就是教与学的单一模式。这一方面局限于千年科举的影响，更主要的还是大规模流水线生产的最好方法就是老师写版书（时髦的放 ppt），学生死记硬背，只要考试时能把老师教的复述出来就好。对此现象，斯坦福教授艾德·卡里尔（Ed Carryer）曾说到，“在传统教育模式中，我能够应对考试，也能回答老师的问题，但是实际生活中我无法设计任何新的东西”。

学校/指标	课程数	实践课程数	总学分
清华	78	11	170
上海交大	61+x	15	223
浙大	61	21	169
华科	46+x	6	160
哈工大	78	10	166
西南交大	71	14	184

图 24 我国大学电子信息专业课程学分数量

美国一所中学，针对灌输式学习方式做了一个有趣的实验。在暑假开始之前，对一门科学科目进行考试，全班取得 B+ 成绩。三个月后，对同样考题做一个简化版，全班的成绩竟然是 F。灌输式教学模式世界各地都有，也不是完全不能用，但不能走极端。

哈佛大学教授保罗·波蒂诺（Paul Bottino）也说：“传统的通过灌输式的教与机械记忆式的学所掌握的知识已经没有太多的价值了。真正有价值的是你如何利用你所掌握的知识去做有价值的事情。”灌输式的教学模式让学生保留的知识很有限，只有真正通过动手，通过实践，才能学会并掌握这些知识。正如那句话所说：告诉我，我会忘记；教导我，我可能记得；让我深入其中，我才能真正的学到并且运用。

总结起来，传统工程教育面临普遍性的挑战有四点：专业分化；知识碎片化；实验形式化；方法单一化。这是我们在传统工程教育所处的现状。这也是为什么，钱学森通过给总理提出钱学

森之问，让我们认识到问题的存在和严重性，并且去探索问题的解决方法。

四、新工科教育探索

1. 目前新工科教育有哪些案例

苹果、谷歌、高通、华为、大疆、戴森和腾讯等科技公司的经历，创新教育研究者 T. Wagner, R. Miller、艾德·卡里尔和 T. Amabile 等人的经验，以及创新人才培养机构 MIT 媒体实验室、斯坦福的 d.school、伯克利雅各布斯研究所（Berkeley Jacobs Institute）和欧林工学院的实践清楚的告诉我们，基于布朗报告的传统工程教育模式，哪怕登峰造极者如 MIT、斯坦福和伯克利，也已经不能满足创新发展对高端人才的需求了。新近出来的 MIT 新工科教育改革报告（见 [14]，与 1950 年布朗报告一脉相承）也清晰指出这一点。图 15 结构的课程体系很难培养出红杉 20 条、Wagner4 条或

者欧林 9 条标准的创新人才。

2. 给我们提供了什么方向

MIT 媒体实验室前任主任伊藤穰一 (Joi Ito) 教授 (他自己先后从塔夫茨大学和芝加哥大学休学, 博士没毕业) 在他的 Tedtalk 里说到: “今天硬件的价钱很便宜, 3D 打印以及制造技术也很方便, 知识获得都在手机和互联网上, 只要你想学, 知道目标在哪里, 你就可以学会。”在他担任媒体实验室主任时, 他把原来的口号由 Demo or Die 改成 Deploy or Die。他认为, 光是把原型机做出来还不够, 还应该通过创办公司, 把自己设计的东西推向市场。这样学生才能真正掌握 P. Jacobs 博士所提出的创新本领 (创业是检验新工科教育的最高标准!)

要在现有的课程体系去做根本性改革是非常困难的, 甚至是不可能的。每个老师都不希望自己的课程被改掉 (写了几十年自认为很得意的板书改没了, 这咋行?)。

MIT 机械系的经验可以借鉴。但前提是他们的本科生一直有动手的传统 (该校女生还可以打铁, 这在其他地方绝无仅有)。MIT 机械系戴维·华莱士 (David Wallace) 和 Maria Yang 教授为本科生开设了两门很有特色的产品设计课程, 极受学生欢迎。一门是一年级学生的玩具设计课程,



图 25 斯坦福机电一体化设计课程学生和老师

另外一门是四年级学生的毕业设计课程。毕业设计课程的答辩已成为 MIT 的狂欢节, 学生会有强烈的参与感和成就感, 据说每年都会有两个团队去创办公司。

另一个模式就是斯坦福的 d.school 模式。D. Kelley 教授曾帮助苹果设计第一代鼠标产品, 与乔布斯保持过长期合作, 同时创办了著名的设计咨询公司 IDEO。2005 年, 他在斯坦

福大学创办了 d.school。这个新学院的使命在于挖掘人的创造能力, 更强调这里是一个环境、一个社区、一个改变人思维的地方。学院的宗旨在于给年轻人赋能, 包括以下核心能力: Navigate ambiguity (排除歧义); Learn from others (People & context) (向他人学习 (人和环境)); Synthesize information (综合

信息)；Experiment rapidly (快速实验)；Move between concrete and abstract (在具体和抽象之间转换)；Build and craft intentionally (有意识地构建和制作)；Communicate deliberately (有意地交流)；Design your Design Work (设计您的设计作品)。

尽管录取标准也不低，斯坦福学生动手能力仍普遍不足(K12教育的缺失)。我专门采访过上Ed Carryer教授机电一体化产品设计课程的本科生。他们觉得这门课让他们掌握了如何去寻找和定义问题，如何异想天开，通过动手把想法变成现实。怎么应用知识，怎么团队合作。这门课让他们对自己变得更自信，给他们赋能了。

我本人于1992年加入香港科技大学。以前上课也采用传统模式，板书(+ppt)、作业加考试三板斧。后来发现学生对这种模式越来越不感兴趣。第一星期如果有100名学生来上课的话，到期中就变成了50，而到期末最多也就剩四分之一的学生。很困惑、很不理解(后面才听说有放水一招来吸引学生，但即使知道，也不会用，误人误己)。2004年，为参加亚太机器人比赛Robocon，我开设了一门项目课程。这门课学生要学会定义问题(搞清楚比赛规则)，然后以团队形式利用各种工具，把系统进

行分解(机械、电子、软件等)，设计和制造每个子系统，集成、测试和不断迭代。学生还去深圳买零部件，做PCB和机械加工(熟悉深圳的供应链)。这种新颖的学习模式把学生的积极性充分激发出来。学生没日没夜的泡在实验室，赶都赶不走。不少学生后来跟我讲，这门课让他们学到了比科大四年还多的东西。这门课也走出了汪滔、王铭钰、陶师正、潘宗良等一批创业者。这门课严格意义上来讲还只是一门工程设计课程(主题由大赛组委会给，而非学生自己定义)，不能给学生提供系统的训练。后来，我也见到许多有Robocon背景的创业者，在创业这条路上磕磕碰碰，犯了很多没必要的错误。后来，在这门课的基础上，我们为科大工学院一年级学生开设了一门机器人项目课程。局部改变了之前先学(很多)理论再(少少)动手的情况。这门课同时也被广东工业大学、湖南大学、宁波工程大学和常州大学的机器人学院采用。港科大后来在大疆的支持下，设立了一个新的学科部，综合系统与计学科部(ISD)，每年30个学生。期望能更全面的探索新工科教育。

无论是伯克利的雅各布斯研究所，斯坦福的d.school，港科大的ISD，还是MIT的媒体实验室，其工科教育改革还是多方面受到母体的约束，这好比在国企

推行承包责任制一样，有效果但很难彻底。

唯一系统、全面地把新工科教育做到位的是美国波士顿附近的欧林工学院。我花了很长的时间去了解欧林，也把其改革方案称之为“The Olin Way”(该校前面一条马路的名字)。

欧林的发展背景我就不多做介绍了(见[1]、[13]等文)。

首先，欧林很清楚培养什么样的人，欧林的人才标准前面已经详细介绍过。

我通过采访学生，走访课堂，看老师如何授课，与毕业生和企业界的人士交谈，同校长和行政人员交谈，也邀请欧林校长来大湾区传授经验，并且派我们的人员去参与欧林学习班，深度了解欧林的创新。欧林校园虽然不大，但是留给人的印象很深刻。这里有一个完全不同的创新环境与氛围。实验室与教室整合在一起，教室里到处贴着学生的想法和成果。

欧林于1997年注册成立，两年后校长到位，2000年启动校园建设，教师团队在准备课程体系前，先花两年时间走访五十多家学校，详细了解别人工科教育改革的经验和碰到的问题。2001年招聘第一批学生，欧林称之为合伙人，共同参与课程设计实验(这叫与用户共同设计UOCD)。2002年正式开学(2016年录取率为1/12)。第一批学生2006

年毕业，至今有一千多名校友，每年招收学生 80 名。教师共有 37 名，配备行政人员 75 名。欧林的毕业生极受企业欢迎，平均起薪高于 MIT。其中 20% 毕业生创业，50% 进入著名大学读研深造。即使不创业从事其他事业的学生，有了这段经历也表现得很好。欧林的学生男女比例 1:1，颠覆了我们对于偏工科学学校女生不多的印象。他们的经验也告诉我们，女生在团队合作中有优势。欧林的学生在申请学校之前很多都有参加过中小学机器人比赛的经历，清楚自己要学什么。学校也并不依赖 SAT 成绩来录取学生，而是通过推荐等渠道，使得学生有机会参加面试。面试的内容是用两天的时间来参与一组项目，与学校的老师和高年级同学互动，观察学生的表现，最后才决定录取。入学后四年的课程大概有 25-35 个项目课程，最后的毕业设计由企业提供，外加 5 万多加美元的经费赞助，设计结束后还要在重要场合展示项目。

学校没有院系之分，大部分课程都是团队教学模式，老师只是作为一个引导者，并不像传统的讲课模式。同时，老师的评估也有一套与传统不一样的标准，新的评估体系没有终身制，需要综合考察老师对社会的影响，对学生的成就，以及如何扩大学校的影响等方面，并不局限于传统的研究、教学、服务。

实现欧林的培养目标，最重要的就是有一套专门的课程体系（图 26），没有课程体系作为框架载体，再好的目标也不可能实现。欧林的课程设计围绕数学、科学、工程、设计、场景和课外六个方向。

欧林的课程结构与传统工科课程结构完全不同。每个学期四门课（图 27），每门课都是通过项目把多方面内容融合，其中红色的都是产品设计课程。可以看出产品设计课程在整个教学体系里占有非常重要的位置和比重。比如大学一年级的 Design

Nature，由两个模块构成，第一个模块是为了训练观察力，让学生去自然界寻找喜欢的动物，观察其特点并且解释功能，最后做一款实体去验证构思。第二个模块是做一个产品，比如小学生互动的玩具，学生们需要分组去调研，采访小孩、老师以及小孩的家长，通过观察小孩怎么玩来定义问题，设计产品，最后由小孩体验并评分。每一门课程的目标和目标跟整个课程体系的目标相适应。

第二类课程就是数学、科学和工程基础课程。通过项目载体

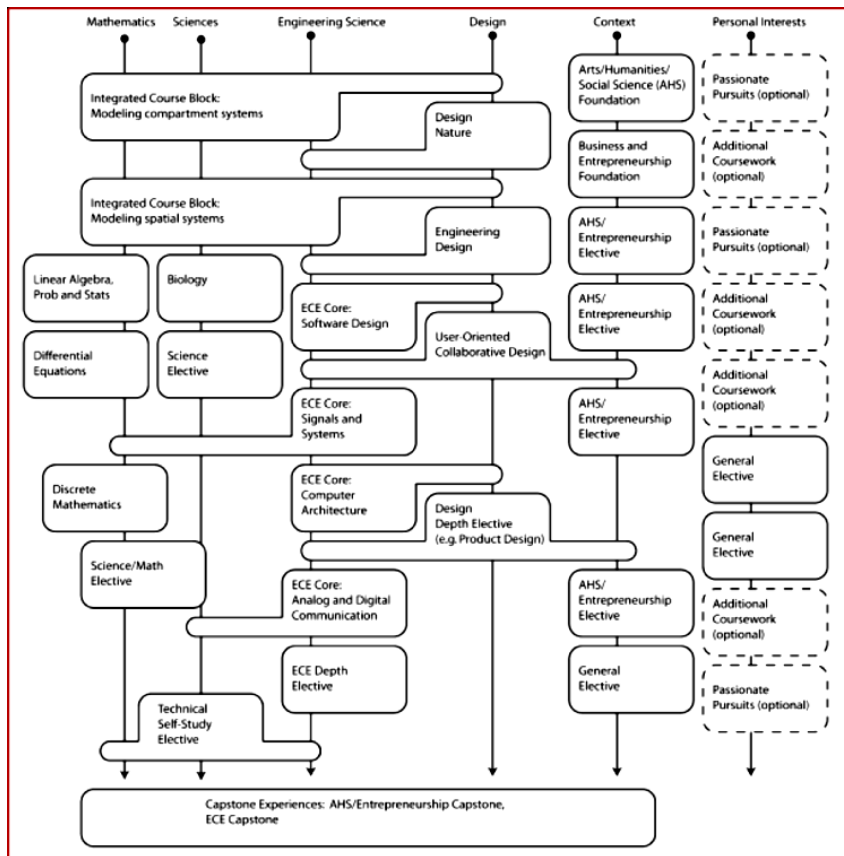


图 26 欧林的课程设计

融合起来，不只是简单学会课程内容，更重要通过课程培养思维方法并学会怎么应用、怎么学习。

有一门课程叫 QEA，工程量化分析，通过这门课程掌握多元微积分和基础物理等基础科学知识，通过使用正确的工具培养动手能力、团队合作等。课程有四个模块，第一个模块的内容是做

一艘满足要求的船。如果学生凭经验立马动手就做，就像山寨创业者一样，大部分都会失败。这时候老师就会强调科学方法的重要性，并且开始把相关的基本知识、为什么需要数学物理来设计等等告知学生，引导学生用这种方法分析设计，再去做，大部分都能成功。通过这种模式的课程，

学生掌握了科学方法，学会了使用工具，提升了职业技能，也知道怎么去学习，如何去应用。课程并不强调要做产品出来，而是要把科学方法、数理基础和工程融合起来。

第三类课程是人文、社会、管理、艺术等相关课程，也是同样通过项目载体融合。

我们可以用图 28 的模型来概括传统工科与新工科教育对学生创新能力的提升帮助。欧林利用崭新的机制、创始人和创始团队的视野、产业对创新人才的渴望、波士顿的地利、美国对教育创新的政策支持，还有欧林基金会的强大财源，经过近二十年不断迭代和试错，在新工科教育领域树立了一个闪亮的标杆。

希望我们一些有条件的大学也能做一些大胆的探索实验，哪怕规模小一点。尤其是一些经济条件好的地方政府，在创办新的理工科大学时，可以把欧林模式考虑进去。小而精，新模式，引领地方的科创经济上台阶。

五、新工科教育评估与迭代

参考文献 [15] 给出了一个设计项目课程的框架，它分四部分。第一，选定目标与标准 (Goals)；第二，制定系列活动 (Activities)；第三，梳理活动产生的结果 (Products)。第四，

	Fall Term 秋季	Spring Term 春季
第一年 (Freshman)	• Sci-Fic Films • ISIM (Sensor & Measurement) • Design Nature • Modeling & Simulation	• Products and markets • Introduction to mechanical prototyping • Software design • Linear algebra 1
第二年 (Sophomore)	• Principles of eng (Mechatronics) • Dynamics • Linear algebra 2 • Designing better drugs	• User oriented design • Thermodynamics • Independent study in advanced fabrication
第三年 (Junior)	• Iterate (Start-up development) • Transport phenomena • Mechanical design • Electricity and magnetism	• Affordable design and entrepreneurship • Anthropology of sciences • Quantitative engineering design • Nonlinear systems
第四年 (Senior)	• Affordable design and entrepreneurship • Negotiations • Small satellites • Bayesian inference and reasoning	• PCB Design • Iterate • Control • Sociology

图 27 欧林的课程表

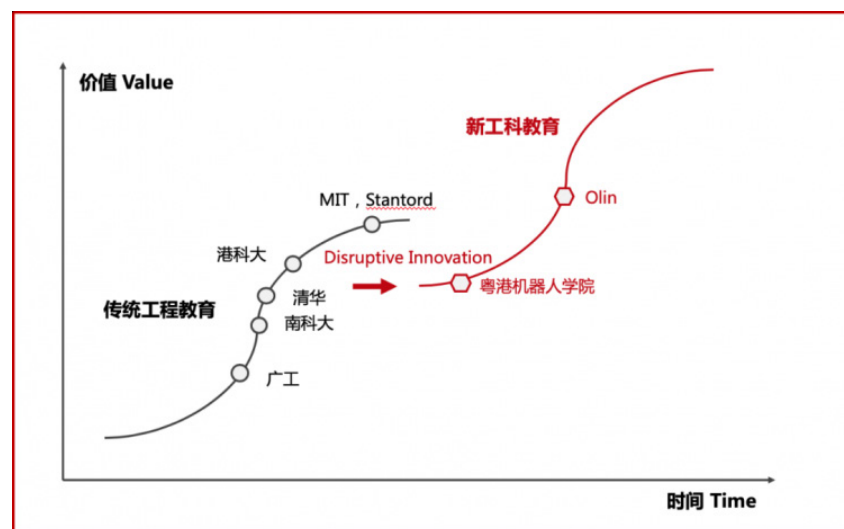


图 28 教育模式对学生赋能曲线

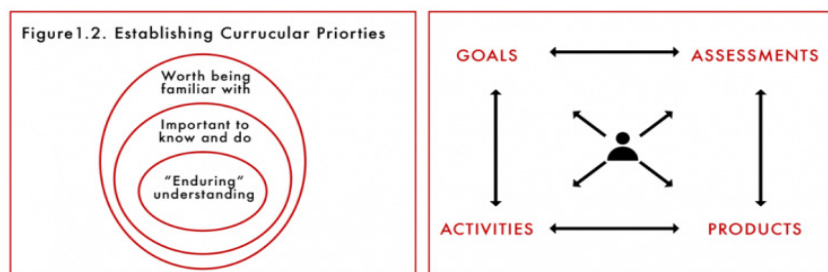


图 29 GAPA 框架

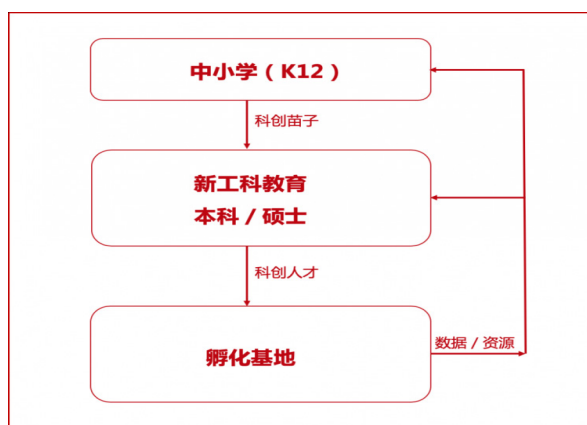


图 30 检验新工科教育的产业创新体系

评估结果 (Assessments)，迭代，直到达成目标（见图 29）。

GAPA 框架不只可以用来设计一门项目课程，也可以用来设计一个 program，比如一个新工科 Program。

欧林 9 条对于新工科教育的单个产品（毕业生）的标准已经很清楚了。但对于这个群体我们是否能用文章开头的科创之问来作为检验标准呢？（这肯定是个大滞后系统，需要十年、二十年，也就是我们常说的十年树木，百年树人）。回答科创之问不止是我们的初心，也是我们这一代人义不容辞的责任。为何不把民族的复兴，李约翰之问、钱学森之问与新工科教育的使命融合起来呢？**MT**

参考文献

- [1] A Whole New Engineer, D Goldberg and M. Somerville, ThreeJoy Associates, Inc. 2014
- [2] “The Olin curriculum, Thinking towards the future”, M. Somerville, et al, IEEE Trans on Education, pp. 198–205, 2005.
- [3] Creating Innovators, the Making of Young People Who Will Change the World, Tony Wagner, 2012, Harvard University.
- [4] Mindset, Changing the way you think to fulfil your potential, Dr Carol S. Dweck, Random House, 2006.
- [5] GRIT, The POWER of PASSION and PERSEVERANCE, Angela Duckworth, SCRIBNER, 2016
- [6] The Art of Innovation, Tom Kelley, Profile Books, 2016.
- [7] “Rethinking faculty development and assessment at Olin College”, R. Christensen, et al, 016.
- [8] “My education at Olin College”, R. Schutzengel, Physics Today, 2014.
- [9] “The current and future role of technology and innovation centres in the UK”, a report by Dr Hermann Hauser for Lord Mandelson, Secretary of State Department for Business Innovation & Skills, 2009.
- [10] The global state of the art in engineering education, New Engineering Education Transformation, Dr Ruth Graham, MIT 2018.
- [11] “Remaking Engineering Education for the Innovation Economy”, Dr Richard Miller, Presentation at HKUST IAS Distinguished Lecture Series, Dec. 12, 2018.
- [12] The integration of the humanities and arts with sciences, engineering and medicine in higher education. Consensus study report, the National Academies of Sciences, Engineering and Medicine.
- [13] 颠覆创新人才培养的欧林经验，李泽湘，知识分子，2019-05-06
- [14] The global state of the art in engineering education, March 2018. Dr. Ruth Graham[14]
- [15] Reimagining and empowering Design of Projects: A Project-Based Learning Goals Framework, J. D. Stolk and R. Martello, Olin College of Engineering, 2018

鸣谢：香港科技大学梁浩博博士根据网课撰写文字稿，松山湖机器人基地同事为本文改进提供参考建议。

数字孪生、赛博物理系统、智能制造、工业互联网 四个术语之辨析



英诺维盛公司 赵敏 北京兰光创新科技有限公司 朱铎先

摘要

数字孪生、赛博物理系统、智能制造、工业互联网这四个术语是新工业革命实践活动中频繁使用的重要概念。尽管这四个术语在各种场合被经常分别提及，但是鲜见同时讨论四个术语的分析文章。本文分析了四个术语的来源、组成、内涵、运行逻辑和相互关系。它们在发展上一脉相承，在内涵和实质上有不少共同点，但是也有明显区别。

清晰辨析异同，抓住内涵实质，有助于引导企业做好智能制造、工业互联网的顶层设计和实践落地。文中部分内容引自《铸魂》新书。

一、前言

数字孪生、赛博物理系统、智能制造、工业互联网这四大术语，是近几年业界当红热词。在国内业界，赛博物理系统兴于2014年，智能制造热于2015年，工业互联网火于2017年，数字孪生则红于2019年。

四大术语是各自独立，还是

彼此相关？可能绝大多数人认为彼此相关，但是四个术语之间的异同是什么？相关内涵有多少？运行逻辑之间到底是什么关系？可能确实不太好说清楚。笔者根据长期的业务实践和理论研究结果，结合《三体智能革命》一书中的“20字箴言”——“状态感知、实时分析、自主决策、精准执行、学习提升”^[1]，尝试分析、比较一下四个术语的内涵和实质。

在研究方法上，笔者采用了抽象的图示方式：用一条水平线将画面分为上下两个空间，上半部分是赛博空间（包含数字逻辑、电磁频谱和网络），下半部分是物理空间（包含机器/设备/业务活动/流程等物理系统）。用四个大圆圈来分别描述每个术语的基本内涵、组成要素和运行逻辑。

二、数字孪生的基本内涵

数字孪生是在软件定义作用下,长期的要素数字化所形成的结果。此处要素泛指物理世界的各种人、机、物、数据、图文、语言、物理信息等各种实体要素。因此数字孪生是一种经过长期发展形成的数字化通用技术。

笔者认为数字孪生有两层意思,一是指物理实体与其数字虚体之间的精确映射的孪生关系;二是将具有孪生关系的物理实体、数字虚体分别称作物理孪生体、数字孪生体。默认情况下,数字孪生亦指数字孪生体。

数字孪生一词据称是由迈克尔·格里夫(Michael Grieves)教授于2003年在密歇根大学执教时提出^[2]。目前尚无业界公认的数字孪生标准定义,概念在不断发展与演变中。数字孪生概念被提出后,很快被美国国防部应用于航空航天飞行器的健康维护与保障。德国西门子、法国达索、美国通用电气、美国参数技术等公司也积极跟进,特别是近些年,随着智能制造等概念的推进,数字孪生已成为智能制造的通用技术,在军工制造、高端装备等很多行业得到广泛应用。

国内一些学者对数字孪生也进行了深入研究。北京航空航天大学陶飞教授团队较早开展了数字孪生研究,在国际上首次提出

了“数字孪生车间”概念,并在《Nature》杂志在线发表了题为《Make More Digital Twins》的评述文章。笔者在《三体智能革命》、《机·智:从数字化车间走向智能制造》等著作中及多篇文章中对数字孪生进行了研究与解读。西门子公司出版了《数字孪生实战:基于模型的数字化企业》有关数字孪生的专著,高德纳、德勤等咨询公司也对数字孪生做了深入研究与技术发展评估。《德勤2020技术趋势》将数字孪生作为今后的五大趋势之一。这些研究成果对数字孪生的理论研究与工程实践起到了很大的推动作用。

笔者认为:数字孪生是在“数字化一切可以数字化的事物”大背景下,通过软件定义,在数字虚体空间中所创建的虚拟事物,与物理实体空间中的现实事物形成了在形、态、质地、行为和发展规律上都极为相似的虚实精确映射,让物理孪生体与数字孪生体具有了多元化映射关系,具备了不同的保真度(逼真、抽象等)。数字孪生不但持续发生在物理孪生体全生命周期中,而且数字孪生体会超越物理孪生体生命周期,在赛博空间持久存续。充分利用数字孪生可在智能制造中孕育出大量新技术和新模式,推动智能制造和工业互联网的应用与发展。数字孪生基本内涵和组成要素如图1所示。

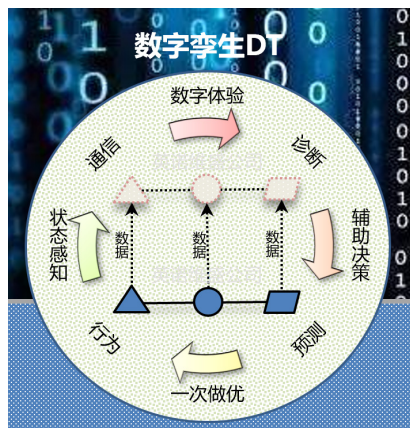


图1 数字孪生的基本要素和作用机制

图1大圆圈中表达的内容有三种:第一是数字孪生基本要素;第二是物理实体和数字虚体之间的映射关系;第三是数字孪生作用机制和运行逻辑。

笔者用“△○□”这三个彼此相邻的实线几何图形表示不同类型的物理实体要素,用其虚线几何图形表示这些物理实体要素在赛博空间的数字映射(数字虚体或数字孪生体)关系,用“数据”表示从物理实体感知/采集到的物理信息转化为比特数据,单向上行进入到数字虚体,虚线箭头表示虚实之间的数据流动方向,四个顺时针转的大箭头,既表示了“物理信息—比特数据—数字信息—数字知识—数字决策”的转换过程,也表示了“状态感知、数字体验、辅助决策、一次做优”的数字孪生作用机制。

模型和数据是评价数字孪生保真度的关键。

模型是构建数字孪生的核心,在机理模型上,可以由数/

理/化模型、因果模型、功能模型、系统模型、详细设计模型、仿真分析模型等组合构成,在数据分析模型上,也可以由机器学习模型、经验模型、降阶模型、故障模型等构成。机理模型与数据分析模型的综合应用,构成了数字孪生的模型来源。

数据是体验数字孪生的基础。数字虚体藉由传感器等获得的数据,能不能实时、准确地反映物理实体设备的工作状态,如果网络有一定的时延,时延到底是多少;如果现场有一定的干扰,干扰数据能不能排除等等,都是数字孪生技术需要研究和解决的问题。如果这些问题不能解决,体验就变成了表演,仿真也就成了“仿假”,数字孪生体也就变成可以人为设置的数字动画。

仅有模型和数据这两个关键要素,仍然不足以完整描述数字孪生。数字孪生所要达到的数字体验,必须要让人用五官感受到,其中最主要的感受是让人看到——即模型、数据的可视化,这个任务必须由而且只能由软件来实现。无疑,软件是数字孪生要素的载体。因此,在笔者参与赛迪研究院研究的数字孪生模型中,表达了如下观点:数据是基础,模型是核心,软件是载体^[10]。

从数字孪生发展历程来看,在模型上,先有机理模型,后有基于数据采集与大数据分析的数

据分析模型;在数据上,先有基于IT视角的模型数据化,后有基于CT视角的数据通信与传输。最终,模型+数据+软件,发展成为一种基于精准数据的数字体验技术。数字体验是数字孪生对工业技术的极其重要的贡献与补充,很多新技术、新产品、新业态就是在此基础上发展而成。

例如,在产品交付时,产品的物理实体和数字孪生体将被同时交付给客户,让客户清清楚楚、明明白白地知道该产品的来龙去脉,是以什么市场需求和功能条件为约束而设计和制造,所有零部件的设计、生产、测试、物流过程都有数字孪生体,都是可追溯的。在该产品的使用维护阶段,假如遇到了疑难复杂问题必须要做实验或验证的话,也可以不必在物理产品上做实验或验证,而是在其数字孪生体上以数字体验的方式来做实验或验证,可以设置任何极限条件做任何次数的虚拟研制,直到验证取得令人满意的成果并且有了百分之百的把握之后,再在物理产品上做验证,这样就会做到“验证即成功”^[3]。

数字孪生体既可以在物理实体之前(由人构建而)先行诞生,预先做待开发产品的数字体验,也可以在该产品的物理实体退出市场甚至在自然规律作用下实体灭失之后,仍然持久地在赛博空间永续存在。因此,笔者也把数字孪生体定义为当今数字社会/

智能社会的“遗传基因”^[3]。通常进入赛博空间的数字孪生体是无法彻底删除的。

内涵:用赛博世界连接物理世界,数字形态传承;

实质:数据+模型+软件,基于数字体验而优化物理产品。

三、赛博物理系统的基本内涵

CPS于2006年由美国国家自然科学基金会(NSF)的海伦·吉尔首次提出,并伴随着德国人在工业4.0中的推广应用而在全球业界兴起。美国国家标准与技术研究院(NIST)、国家自然科学基金会(NSF)、伯克利大学、德国国家工程院、弗劳恩霍夫协会等科研机构进行一系列研究,提出了一些理论框架。

近几年,一些有关CPS的书籍也陆续推出,如伦敦国王学院军事研究系教授托马斯·瑞德的《机器崛起:遗失的控制论历史》、美国辛辛那提大学李杰(Jay Lee)教授的《CPS:新一代工业智能》、中国信息物理系统发展论坛编写的《信息物理系统(CPS)白皮书2017》以及笔者合著的《三体智能革命》等,均对CPS进行了不同角度的研究与阐述。

在数字孪生体基础上,数据不断被感知和采集,从“△○□”物理实体设备上行到其数字孪生体。如果数字孪生体中的软件按

照预先设定的模型和规则，经过分析、推理之后，给出该场景下最适宜的控制指令，控制指令从数字孪生体下行到物理实体设备的控制器，驱动设备的执行器精准动作，以实现物理实体设备更好、更精确的控制，这是CPS的实质内容。在技术上，完成了四个大箭头所表示的“状态感知、实时分析、自主决策、精准执行”的智能闭环^[1]。如图2所示。

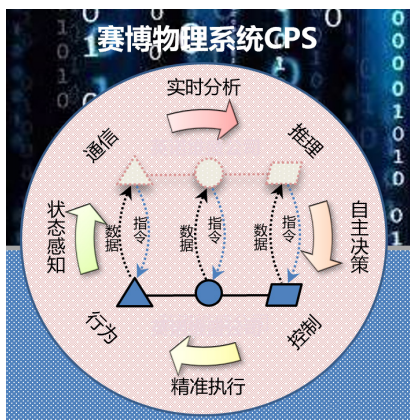


图2 CPS的基本要素和作用机制

CPS与数字孪生既有相似之处，也有明显不同。相似之处在于，CPS也会像数字孪生一样，建立颗粒度不同的虚实对应的映射关系；明显不同在于，在数字孪生中数据是单向从物理实体到数字孪生体的，没有以数据“控制物理设备”的行为发生，而在CPS中，控制指令从数字孪生体下行到物理实体设备，与上行数据形成闭环。另一个明显不同在于，在经过“感知、分析”之后，数字孪生体在软件定义下实现了自主决策，直接操控了物理设备

的运行结果。

状态感知、实时分析、自主决策、精准执行所形成的智能闭环，是智能系统的基本特征^[1]，是第四次工业革命重要标志，也是一个融合了赛博装置的物理设备的智能表现。作为使能技术，CPS在智能制造、工业互联网中都起着关键作用。

CPS是智能制造和工业互联网的基本运行机理的抽象与提炼。在智能制造和工业互联网中，一定会发现CPS的身影，它变化形式多样，尺度大小不一，可能以单元级、系统级、系统之系统（SoS）等不同的系统级别来出现^[4]。

内涵：实现数物融合控制；

实质：以“感知-分析-决策-执行”智能闭环，精准控制物理系统的形与态。

四、智能制造的基本内涵

智能制造术语源于日本在1990年所倡导的“智能制造系统（IMS）”国际合作研究计划。在国务院2015年发布的《中国制造2025》中，阐明了智能制造是主攻方向，让该术语再次在国内流行。今天的智能制造与30多年前的“智能制造系统”在内涵上是有区别的。

德国工业4.0小组在《德国工业4.0战略计划实施建议》

中推出通过“三项集成”实现智能化生产与服务模式。即以智能工厂为单元，“将各种不同层面的IT系统集成在一起（例如执行器与传感器、控制、生产管理、制造和执行及企业计划等不同层面）”，实现纵向集成和网络化制造系统（企内链）；“通过产品全生命周期和为客户需求而协作的不同公司，使现实物理世界与赛博世界完成整合”，实现产业链以及生产者与消费者的端端集成（价值链）；“将各种使用不同制造阶段和商业计划的IT系统集成在一起，这其中既包括一个公司内部的材料、能源和信息的配置，也包括不同公司间的配置”，实现企业生态圈的横向集成与社会化协作（价值网）^[6]。

2017年中国工程院提出了中国模式的智能制造“三范式”^[9]，认为数字化制造是智能制造第一种基本范式，也称作第一代智能制造，是智能制造的基础；数字化网络化制造是智能制造第二种基本范式，或称作“互联网+制造”或第二代智能制造；第三种基本范式是数字化网络化智能化制造，或叫新一代智能制造。智能制造“三范式”的英文是：Digital Manufacturing, Smart Manufacturing 和 Intelligent Manufacturing。“三范式”既具有很强的前瞻性、体系性，又具有很强的务实性，对学术界、企业界研究、推进智能制造具有

较好的实操性指导。

智能制造聚焦在制造领域，基本上与德国工业 4.0 实现对标，强调 CPS 是使能技术。德国工业 4.0 组件参考架构模型 (RAMI4.0)^[6]，对 CPS 进行了较为准确的定义和技术阐述。2013 年的 RAMI4.0 版本主要论述 CPS，而 2019 年的版本增加了对数字孪生的论述。可见工业 4.0 本身就包含了 CPS 和数字孪生。智能制造亦是如此。

笔者定义：“智能制造，基于 CPS 技术构建‘状态感知—实时分析—自主决策—精准执行—学习提升’的数据闭环，以软件形成的数据自动流动来消除复杂系统的不确定性，在给定的时间、目标场景下，优化配置资源的一种制造范式。”

该定义所涉及的各项基本要素是：

智能机理：状态感知—实时分析—自主决策—精准执行—学习提升，系统按照场景而不是按照固定程序来自主工作；

操作对象：数据（信息与知识的载体）；

使能：软件中的算法与规则（数字化知识）；

本质：数据自动流动，并因自动流动而形成信息 / 知识泛在；

目的：消除工业复杂系统的不确定性；

约束：给定时空场景；

价值：优化配置制造资源。

智能制造的基本要素和作用机制如图 3 所示。

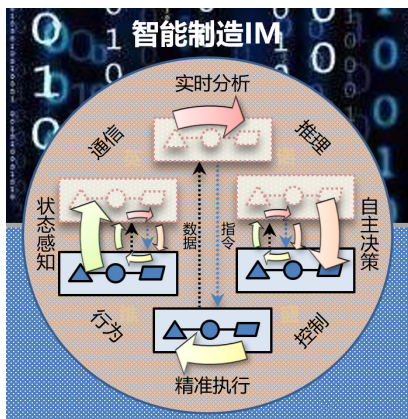


图 3 智能制造的基本要素和作用机制

在图 3 中，物理实体设备（“△○□”实线）及其数字孪生体（虚线）一直以虚实精确映射的方式存在，但是，物理实体设备（“△○□”）从企业资产的角度来说，可能分属于不同的企业 / 工厂 / 车间，具有不同的工作场景，组成上相对封闭与固化，因此用长方框来组合表达。从物理实体设备感知和采集的数据上行到数字孪生体，数字孪生体设备发出的控制指令下行到物理实体设备（其运行机理参见前文 CPS 内容，四个顺时针小箭头形成单元级智能闭环）。四个大箭头所表示的“状态感知、实时分析、自主决策、精准执行”的系统级智能闭环一直顺时针按序运转，反复迭代。经过长时间、大数据量的深度机器学习，智能设备实现了“学习提升”，动作过程执行得越来越好。

在笔者出版的《机·智：从

数字化车间走向智能制造》中，把智能制造简要表述为：智能制造是“人智”转“机智”的所有活动^{[3][5]}。因为从另一个角度来看，把人类的智能（人智），从隐性知识变为显性知识，再把知识写入软件，软件嵌入芯片，芯片嵌入盒子（PLC、DCS 等），盒子嵌入物理设备，就形成了 CPS，越来越多的“人智”进入物理设备，促进了“机智”的爆发，于是有了智能的机器和智能的制造过程。在软件定义与赋能下，形成了智能制造新范式。没有 CPS 使能，就没有智能制造落地。

内涵：优化配置制造资源；

实质：实现企内链、价值链和价值网，构建新制造生态。

五、工业互联网的基本内涵

工业互联网从技术上说起源于工业以太网和设备物联网，从术语上说由中国上海可鲁软件公司在 2007 年提出^[8]，从普及上说得力于美国 GE 公司的大力提倡与推动。

工业互联网的“第一性原理”，就是要广泛地连接各种机器设备和工业系统，由此而实现“连接—管控—优化—效益”的基本逻辑：由连接而实现数据采集，由数据采集而实现数据实时传输、设备实时监测和设备行为

的实时洞察，由此而有凭有据、精细化地进行制造资源的优化配置。

工业互联网因为大范围连接了更多的工业要素，情况会比智能制造稍微复杂一些。海量数据，泛在连接，优化配置工业资源，是工业互联网的基本内涵，全国大范围、社会大尺度、跨行业大协作（“三大”）是业界对它的基本期待。其组成要素和作用机制如图4所示。

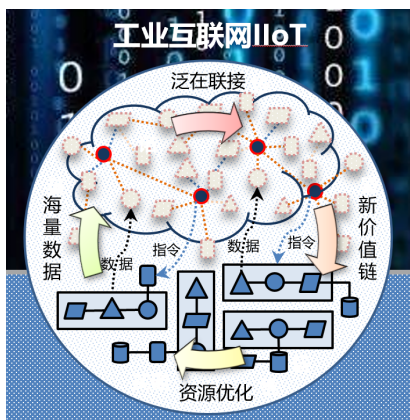


图4 工业互联网的基本要素和作用机制

在图4中，高度类似于智能制造，数字孪生、CPS都同时存在。但是不同之处在于，智能制造聚焦于制造领域，以智能工厂为单元，其所连接的终端以企业（不限于本地）边界内部的设备和在制品为主；而工业互联网的连接范围从一开始就不局限于企业边界，而是以价值链甚至是以价值网作为起点，直面“三大”需求，连接企业内外部要素，特别是在用工业品，向基于云的新价值链网发展：

1. 超越时空限制，打破原有相对封闭和固化的工业系统格局，以相对离散的形态更广泛、轻灵地连接机器、原材料、控制系统、信息系统、产品、数据以及人的业务活动等工业要素（图4中物理要素有些已经不在原有方框内），优化配置工业资源；

2. 打造支撑制造资源泛在连接、弹性供给、高效配置的工业互联网平台，构建基于海量工业大数据采集、汇聚、分析的服务体系^[7]，形成新工业生态；

3. 基于对工业大数据分析结果，洞察物理世界过去一直发生、但是无法观测到的物理活动细节，由此而更好地集成工业场景的实况信息，做好研发、生产、服务与管理决策；

4. 工业互联网不断促进硬件/软件捆绑功能解耦，促进传统工业软件解构，基于微服务和云架构而重构为工业APP，因此，在赛博空间就不再是与物理设备完全精确映射的数字孪生体，而是将原有数字孪生体打散后重组、重构，建立了新型连接关系的数字孪生体。

具有新型连接关系且离散度较高的数字孪生体在泛在连接、高效协同方面更为出色，在优化配置工业资源方面更加容易，让大范围管控和优化“系统之系统（SoS）”、实现超大型企业的精细化运营成为可能。

在对工业互联网的内涵理解

上，赛迪研究院和工业互联网研究院也提出了“三全”的思路：全要素、全产业链、全价值链。虽然术语和解读有所不同，但是都是在试图突出工业互联网基于云的新价值链网，各方对工业互联网基本内涵的理解上总体上是趋于一致的。

内涵：优化配置工业资源；

实质：基于云的新价值链网，构建新工业生态。

六、四个术语的相互比较

在分析了四个术语的内涵、实质和主要特征之后，不难看出，数字孪生、赛博物理系统、智能制造、工业互联网四个术语，在发展上一脉相承，在内涵和实质上有不少共同点，但是也有明显区别。

共同点：四个术语都是由物理空间的物理实体与其在赛博空间映射出来的数字孪生体两大部分基本要素组成，都属于新工业革命的活动内容，都可以给企业带来新技术、新模式和新业态。作为一种基础通用技术，这两年数字孪生的研究备受业界重视。

差异点：在内涵/实质上则是各不相同。数字孪生主要是在赛博空间对物理实体与业务流程等现实对象进行映射、仿真、优化和数据支持等数字形态传承类的活动，重在数字体验，以期

最大程度地通过优化数字孪生体而提升物理世界的材料、时间、能量、人力等作业效率与质量；数字孪生体与物理实体相融合，引入控制功能形成智能闭环后，形成了 CPS，强化了对物理实体的形和态的精准控制；多个多级别的 CPS 彼此互联而构建了智能工厂，基于企内链、价值链、价值网络完成特定领域的工业要素集成与制造管控，优化配置制造资源，形成新制造生态；工业互联网则是将智能制造系统进一步离散化、解构与重构，实现海量工业要素的泛在连接，超越企业边界管控物理设备（特别是在用品），在更大的范围内优化配置工业资源，形成新工业生态。这是一种由企业内到企业外，由在制品到在用品，由价值链网到新价值链网，由新制造生态到新工业生态的数字化转型过程。表 1 列出四个术语之异同以及从左到右的数字化转型升级过程。

由表 1 不难看出，数字孪生作为一种数字化通用技术，以“模型+数据+软件”贯穿于四个术语，成为数字社会/智能社会的“遗传基因”。图 5 是四个术语的内涵、构成及作用机制的几种展现与对比。

在赛博、物理两大空间占比上，四个术语有微妙差异，数字孪生体始于 IT 领域，赛博空间占比偏多；CPS 强调数字虚体与物理实体深度融合，赛博、物理

表 1 四个术语在内涵上的异同和递进关系

内涵 术语	数字形态传承	数物融合控制	优化配置制造资源	优化配置工业资源
工业互联网	模型+数据+软件	控制/智能闭环	企内链/价值链/价值网/新制造生态	基于云的新价值链网/新工业生态
智能制造	模型+数据+软件	控制/智能闭环	企内链/价值链/价值网/新制造生态	
CPS	模型+数据+软件	控制/智能闭环		
数字孪生	模型+数据+软件			

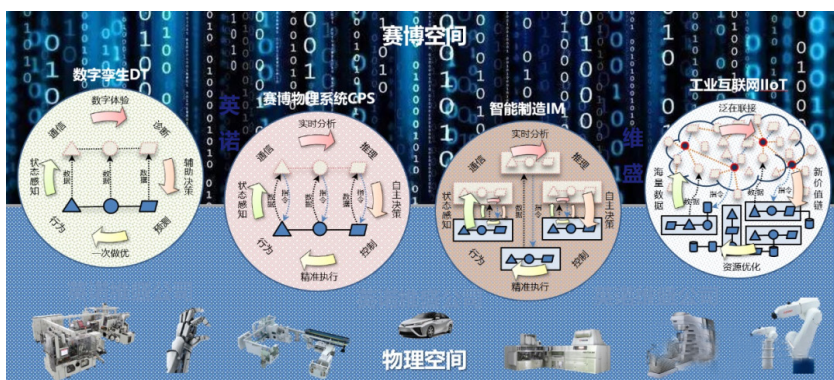


图 5 四个术语的内涵、要素及作用机制比较

相对平衡对等；智能制造基于智能工厂，以 CPS 实现对物理系统的精确控制，物理空间占比稍高；工业互联网以基于云的新价值链网来泛在连接工业要素和强化工业数据的采集与处理，赛博空间占比略多。这是一个虚实相互融合、占比交替占优的演变过程。图 5 中四个大圆圈位置高低不同，粗略地展示了这一演变趋势。

七、结论

数字孪生、赛博物理系统、智能制造、工业互联网这四个术语，在发展上一脉相承，在内涵、

实质和运行逻辑上有不少共同点，但是也有明显区别。四个术语在内涵和组成上呈现出赛博与物理相互虚实融合、占比交替占优的演变过程。

对于这四个术语，清晰理解异同，抓住内涵实质，有助于澄清概念，正本清源，可为这些概念的理论研究与工程实践提供较为明晰的指导，避免了对这四个术语人为的边界模糊、功能泛化，影响这些概念在科研与实践中的应用。也有有助于发挥四个术语的各自特长，引导企业将智能制造、工业互联网这些新工业革命的具体活动内容，在不同的行业

领域中做好实践与落地。

由于篇幅所限,本文仅对这四个术语的基本内涵与相互之间关系进行了初步阐述。作为新工业革命的重要组成部分,这个四个术语在智能制造研究与推进方

面具有很强的现实意义,建议相关研究人员做进一步研究,能更详实、更系统地厘清这四个术语产生的背景、内涵、关系、技术路径、应用场景、典型案例等内容。如果条件允许,建议政府组

织相关专家,在深入研究的基础上,编写四个术语的白皮书,为广大理论研究者与企业智能制造与工业互联网的实践者,提供有益的参考与指导资料。**MT**

参考文献

- [1] 胡虎,赵敏,宁振波,等.三体智能革命[M].北京:机械工业出版社,2016.
- [2] M Grieves. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper. Melbourne, FL: Florida Institute of Technology; 2014.
- [3] 赵敏,宁振波.铸魂:软件定义制造[M].北京:机械工业出版社,2020.
- [4] 中国信息物理系统发展论坛.信息物理系统白皮书(2017)[R].北京:中国信息物理系统发展论坛,2017.
- [5] 朱铎先,赵敏.机·智:从数字化车间走向智能制造[M].北京:机械工业出版社,2018.
- [6] ZVEI. The Reference architectural model RAMI 4.0 and the industrie 4.0 component [R]. Frankfurt: ZVEI, 2015.
- [7] 工业互联网产业联盟.工业互联网平台白皮书(2017)[R].北京:工业互联网产业联盟,2017.
- [8] 工控网/工业以太网.三大要素考验工业互联网[EB/OL],北京:工控网 <https://gongkong.ofweek.com/2013-08/ART-310008-8420-28716983.html>, 2013-08-30
- [9] 周济等,中国智能制造发展战略研究[J],北京:《中国工程科学》,2018年04期
- [10] 张洪国等,《数字孪生白皮书》(2019年)[R],北京:赛迪网,2019-12-19

中国制造业 500 强企业受疫情影响分析报告*



中国企业联合会

导语：中国制造业 500 强企业的调查结果反映，新冠肺炎疫情对企业 2020 年一季度的生产经营产生了显著不利影响，企业营业收入明显减少、运营成本增加、盈利全面下滑，但多数企业对二季度生产经营形势持相对乐观态度。企业迫切希望政府精准施策，出台加大减税降费力度、降低企业融资成本等方面的政策措施。

为充分了解新冠肺炎疫情（以下简称疫情）对制造业 500 强企业的影响，为政府决策提供参考依据，中国企业联合会专门成立课题组，通过网络对中国制造业 500 强企业进行定向问卷调查。

本次网上调查以中国制造业 500 强企业为调查对象，调查表共发放给 500 家企业，其中国有及国有控股企业（以下简称国有企业）160 家、民营及民营控股企业（以下简称民营企业）340 家，共回收 299 家企业的反馈，有效回收率达 59.8%。其中，国有企业 99 家、占 33.11%，民营企业 200 家、占 66.89%。调查样本主要分布在金属冶炼及制品、机械设备、化学原料及化学品、消费品生产、食品饮料生产、交通运输设备及零部件、制药和医疗

设备、综合制造业、计算机与通信设备及其他电子设备、建材生产、国防及军工等行业。上述行业企业所占比重分别为 26.76%、17.06%、15.38%、12.04%、6.35%、5.69%、4.35%、4.01%、3.68%、2.67%、2.01%。调查样本分布在 27 个省、自治区、直辖市，其中吉林、贵州企业没有参加，海南、西藏没有制造业 500 强企业。

调查结果显示，疫情对企业一季度的生产经营产生了显著不利影响，具体表现在：疫情给 50.73% 的企业带来很大损失，53.28% 的企业一季度营业收入明显减少，82.12% 的企业运营成本增加，97.08% 的企业盈利下滑，61.96% 的企业一季度用工不同程度减少，78.1% 的企业一季度固定资产投资不同程度减少，

70.44% 的企业出口不同程度减少，国际订单的不确定性增加。

调查结果显示，多数企业对二季度形势持相对乐观态度，约有 74.45% 的企业预计营业收入将好转，64.96% 的企业预计盈利将止跌回升，多数企业预测用工、固定资产投资、出口将好转。

调查结果显示，超过五成的企业认为当前企业面临的突出问题是：成本压力增大，原材料与上游零部件不能正常供应，产品（服务）销售渠道受阻、物流渠道不畅通。近四分之三的企业相信，能够顺利完成年度经营计划。

“调整生产计划，做好后续安排，疫情结束后全力追赶生产进度”、“创新服务方式、销售方式和管理方式”、“争取政策和资金支持”，是企业应对疫情所采取的

* 本文原载于《中国经济报告》2020 年第 2 期，本刊获得授权转载。

主要举措。企业对政府精准施策、帮扶企业寄予厚望，近九成企业希望加大减税降费力度，约七成企业希望降低企业融资成本。

一、疫情对2020年一季度企业生产经营产生显著不利影响

（一）疫情给多数企业带来很大损失

调查结果表明，有48.18%的企业反映，疫情的爆发给企业带来很大损失；有2.55%的被调查企业反映，遭受了无法承受的巨损失；二者之和，已经超过50%。只有25.91%的企业认为损失较小，企业可以承受。另有23.36%的企业反映尚未对损失进行评估。详见图1。

（二）近半数企业一季度营业收入明显减少

疫情对企业营业收入的不利影响较为明显。调查结果显示，有53.28%的企业反映，一季度营业收入明显减少，这意味着有超过一半的企业营业收入大幅下滑，疫情导致企业营业收入明显减少的比例明显高于对用工、投资、出口的影响。此外，有41.97%的企业反映营业收入有所减少。只有少数企业基本持平甚至不减反增，3.65%的企业与往

年基本持平，1.09%的企业有所增加。详见图2。

（三）八成以上企业运营成本增加

疫情的爆发，从多角度对企业生产运营产生了不利影响，包括复工复产延迟、原材料难以及时供应、工人不能按时返岗、产成品无法顺利出仓，这些最终都将在运营成本上有所反映，推动企业运营成本的增加。

调查结果显示，有八成以上企业运营成本出现不同程度的增

加，其中29.93%的企业明显增加，52.19%的企业有所增加。此外，有6.2%的企业与往年同期相比基本持平。还有超过一成企业不减反减，其中9.49%的企业有所减少。

（四）企业盈利全面下滑

调查结果显示，几乎所有被调查企业的盈利都出现了下滑，疫情对制造业企业盈利产生了普遍性、全局性的不利影响。具体看，有49.64%的企业一季度盈利明显减少，有47.44%的企业

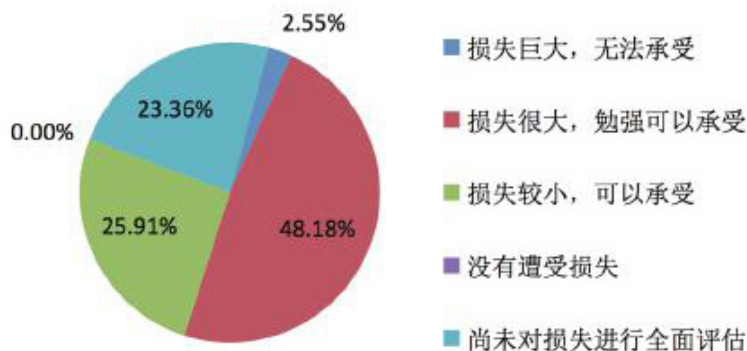


图1 疫情导致的企业受损程度

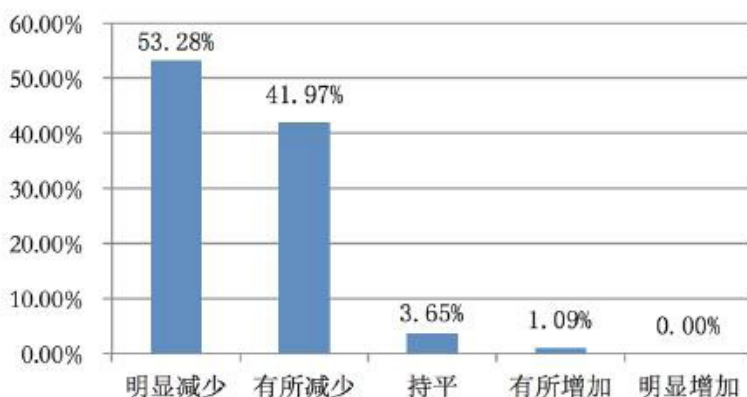


图2 疫情对企业一季度营业收入的影响

有所减少。二者相加，不同程度减少的企业达到了 97.08%。只有 2.92% 的企业一季度盈利有望实现与往年的基本持平。

（五）六成多企业一季度用工不同程度减少

调查结果显示，疫情对企业一季度用工的影响，明显小于对营业收入的影响，但总体上看，六成多的企业一季度用工量发生减少，约三分之一的企业一季度用工量持平或有所增加。具体看，19.34% 的企业在一季度的用工量明显减少，45.62% 的企业有所减少，用工量减少的企业占比合计为 61.96%，超过六成。33.58% 的企业基本持平，1.46% 的企业一季度用工量反而有所增加。详见图 3。用工量持平与增加的比例，高出营业收入持平或增加的比例 27.77 个百分点。

（六）近八成企业一季度固定资产投资不同程度减少

调查结果显示，疫情对企业固定资产投资的不利影响，明显小于对营业收入的影响，但却明显大于对用工量的影响。一季度的固定资产投资，27.74% 的企业明显减少，50.36% 的企业有所减少，合计达到了 78.1%。此外，有 20.08% 的企业基本持平，只有 1.09% 的企业有所增加。详见图 4。

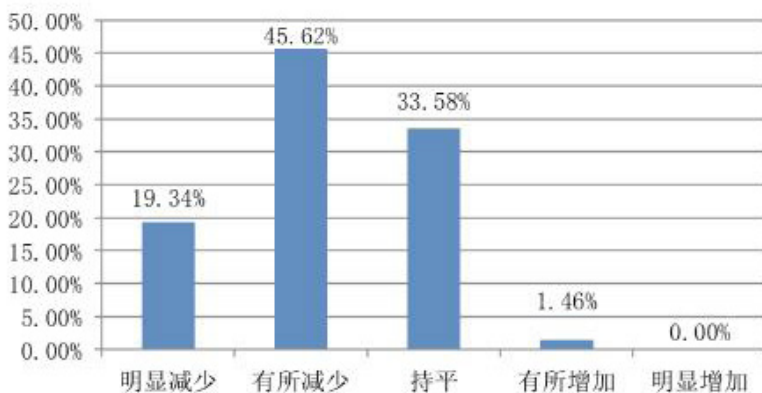


图 3 疫情对企业一季度用工的影响

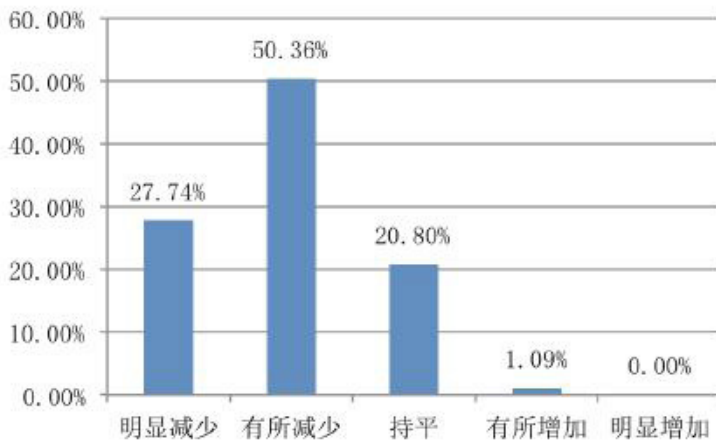


图 4 疫情对企业一季度固定资产投资的影响

（七）约三成企业出口明显减少

大型制造企业是中国出口的关键主力，其出口的变动，对全国出口贸易具有显著影响。调查结果显示，有 29.2% 的企业出口受疫情影响明显减少，有 41.24% 的企业有所下降，出口不同程度的企业占比合计为 70.44%。此外，有 8.76% 的企业与往年基本持平，1.46% 的企业有所增加，1.09% 的企业明显增加。具体见图 5。疫情对大型制造企业出口

的影响，虽然小于营业收入，但明显大于用工与固定资产投资。令人深感意外的是，在被调查企业中，尚有 18.25% 的企业反映没有出口业务，仅在国内市场发展。

（八）国际订单的不确定性增加

中国制造业已经深度嵌入全球制造业分工体系，是全球制造业产业链中的关键环节，但疫情的爆发在中断中国制造企业的稳定供给的同时，也在迫使全球产

业链上的其他国家企业不得不寻求将供应链向其他国家转移，这无疑增加了中国制造企业国际订单的不确定性，对中国制造企业竞争优势的持续发展构成挑战。调查结果显示，虽然只有 0.43% 的国际买家以中国疫情为由拒绝履行原有订单，但转移订单的比例却达到了 5.6%，还有 8.19% 的国际买家在寻求减少订货，这其中也许存在有订单转移的因素在内。同意中国企业推迟订单交货

的占 30.6%。具体见图 6。

调查结果显示，疫情对不同所有制、不同行业企业一季度生产经营的影响存在一定差异。民营企业因疫情受损的程度大于国有企业，民营企业营业收入、盈利、用工、出口的减少都比国有企业更明显，但国有企业的投资减少、成本增加更明显。疫情对消费品生产行业带来的损失最大，对交通运输设备及零部件制造行业营业收入的减少最多，对

计算机、通信设备及其他电子设备制造行业成本增加最大，对交通运输设备及零部件制造行业的盈利减少最多，对防务及军工行业的用工减少最多，对药品和医疗设备制造行业的投资减少最多，对防务及军工行业的出口减少最多。

二、企业生产经营将在二季度整体好转

（一）约有四分之三的企业营业收入将好转

尽管一季度受疫情影响，中国制造业 500 强企业的营业收入总体上都有不同程度下滑，但多数企业对二季度的营业收入作出了较为乐观的判断。调查结果显示，有 74.46% 的企业预计二季度的营业收入与一季度相比会发生好转，这一乐观态度的比例接近四分之三。另外有 22.99% 的企业预计营业收入大致与一季度相似，即预计会与往年同期相比有不同程度减少；只有 2.55% 的企业预计下滑程度将比一季度更为糟糕，企业营业收入的减少将进一步恶化。具体见图 7。

（二）运营成本能否回落存在分歧

通常来说，成本水平的变动，可能会慢于营业收入。调查

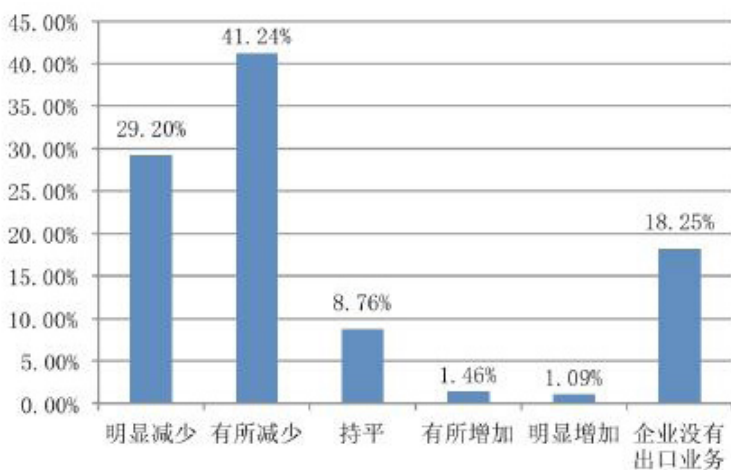


图5 疫情对企业一季度出口的影响

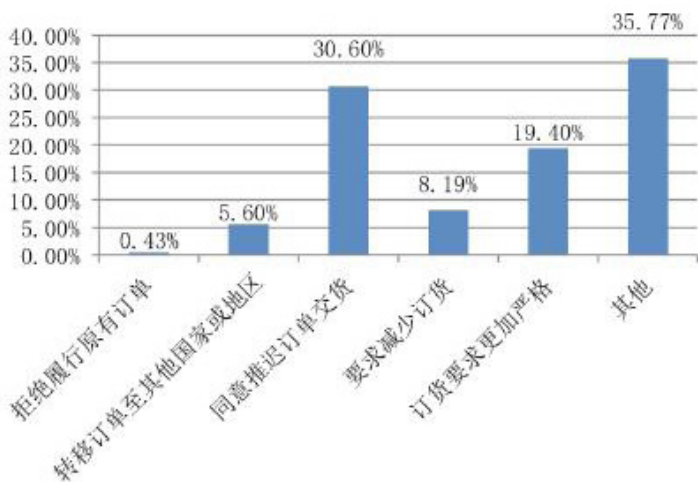


图6 疫情对企业国际订单的影响

结果显示,企业对二季度运营成本的预计,存在较大分歧,难以形成统一认知。有16.06%的企业预计将持续上涨;有39.05%的企业预计将维持在一季度的水平。二者合计为55.11%,稍多于50%。与此同时,另有44.89%的企业预计将逐步回落。显然,预计运营成本二季度将逐渐回落的比例,远低于预计营业收入将逐渐好转上升的比例。

(三) 多数企业预计盈利将止跌回升

调查结果显示,企业虽然

对二季度盈利的预期并不是很乐观,但显然好于对成本回落的预期,这一表现也与对营业收入的预期保持了一致。企业对营业收入在二季度的增长较为乐观,但对成本水平的下降存在担忧,从而对二季度的盈利做出了相对中性的预计。具体看,有19.34%的企业预计二季度企业的盈利将恢复到往年同期水平,有45.63%的企业预计将止跌回升。也就是说,对二季度盈利持相对较乐观态度的企业合计占64.97%,占明显多数。此外,有6.93%的企业预计盈利将进一步减少,有28.10%的企业预计盈利将与一季

度相似,与往年同期相比会有不同程度减少。详见图8。

(四) 多数企业用工将好转

疫情从两方面给企业用工带来不利影响:一是防疫管控阻碍了员工的正常返岗,二是受需求不足影响导致企业无法正常复产而不得不缩减用工。随着疫情防控积极向好,二季度生产生活将恢复至疫情前状态。一方面,需求将逐步修复;另一方面,员工将可以正常返岗。所以,如果疫情确实在二季度得到控制,企业用工将在二季度全面好转。调查结果显示,有62.41%的企业预计用工情况将在二季度发生好转,有35.77%的企业预计可能会继续保持一季度的状态,另有1.82%的企业预计甚至有可能进一步恶化。

(五) 多数企业固定资产投资将趋于好转

调查结果显示,企业总体上预计,固定资产投资在二季度将摆脱一季度的困境,逐渐趋向于好转。有63.87%的企业预计二季度企业固定资产投资将发生好转,有34.67%的企业预计将与一季度相似,只有1.46%的企业预计有可能进一步恶化。

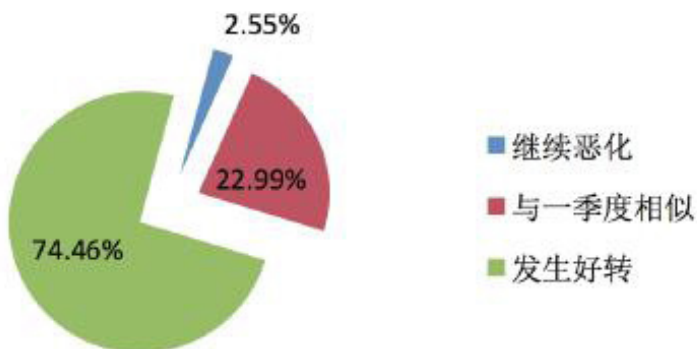


图7 二季度企业营业收入预计

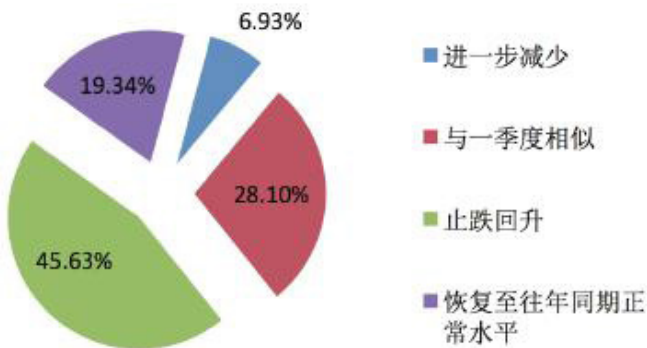


图8 二季度企业盈利预计

（六）多数企业出口将好转

调查结果显示，企业对二季度出口逐步修复预期的乐观程度，与对用工形势好转、固定资产投资恢复增长预期的乐观程度基本接近。具体来看，有 62.71% 的企业预计二季度的出口形势将发生好转，有 34.75% 的企业预计可能与一季度差不多，只有 2.54% 的企业预计有可能进一步恶化。

不同所有制企业对二季度走势的预计存在明显差异，国有企业对营业收入变化、盈利变化、用工变化、投资变化、出口变化的预计都好于民营企业，比民营企业对未来持有更为乐观的态度。

不同行业对二季度的走势预计存在明显差异，其中对盈利变化预计的差异最显著，建材生产，计算机、通信设备及其他电子设备制造，药品和医疗设备制造行业企业整体上认为二季度盈利会好转，但其他八个行业企业认为二季度盈利可能仍将面临略有减少的局面。

三、当前企业面临的突出矛盾和问题

疫情的大范围爆发，迫使有关政府部门采取了特殊管理措施，各地为加强对疫情扩散的防范，也相应采取了一系列具体举措。疫情防控措施的实施，对阻断疫情扩散、加强对患者的治疗

发挥了重要作用，但同时也对企业的正常生产经营产生了不可忽视的影响与挑战。据国家统计局服务业调查中心和中国物流与采购联合会发布的数字显示，2020 年 2 月份，受疫情影响，中国制造业 PMI 断崖式下跌至 35.7%。从企业规模看，大、中、小型企业 PMI 分别为 36.3%、35.5% 和 34.1%，分别比上月大幅下降 14.1、14.6 和 14.5 个百分点。面对严重的新冠肺炎疫情，中国制造业的持续发展显然在整体上遭遇了巨大困难，并且这一困难不是来自某一两个方面，而是几乎来自全方位的立体冲击。

课题组在此题目下为企业设置了 15 个选项，要求企业从中选择出自己认为对企业影响最突出的因素项。调查结果显示，疫情对企业的突出影响主要表现在如下三个方面。

（一）成本压力增大

调查结果显示，有 69.71% 的企业认为是成本压力增大。显然，如上文所述，疫情爆发从多个角度导致了企业运营成本的增加，并进而导致企业盈利下滑，给企业生存与发展带来巨大压力。

（二）原材料与上游零部件不能正常供应

调查结果显示，有 60.58%

的企业认为是原材料与上游零部件不能正常供应。巧妇难为无米之炊，交通运输的管制，以及上游企业不能正常复工复产，都限制了企业对原材料与上游零部件的及时、有效获取，从而导致企业无法正常运转。

（三）产品（服务）销售渠道受阻

调查结果显示，有 58.39% 的企业认为是产品（服务）销售渠道受阻。对企业来说，即使能够想方设法解决原材料、零部件供应，解决员工返岗复产困难，并顺利产出产品或服务，但也不得不面临疫情管控所导致的销售渠道受阻的严峻形势。

其他各选项的具体选择比例详见图 9。

不同所有制企业在所面临的问题上存在较大差异。国有企业认为“产品（服务）销售渠道受阻”是企业面临的最为突出的问题；对民营企业来说，最突出的问题是“成本支出压力增大”。

不同行业企业在所面临的问题上也存在较大差异。对交通运输设备及零部件制造行业来说，最突出的问题是原材料与上游零部件不能正常供应到位；对建材生产来说，最突出的问题是物流渠道不畅通；对药品和医疗设备制造行业来说，最突出的问题是产品（服务）销售渠道受阻；对防务及加工行业

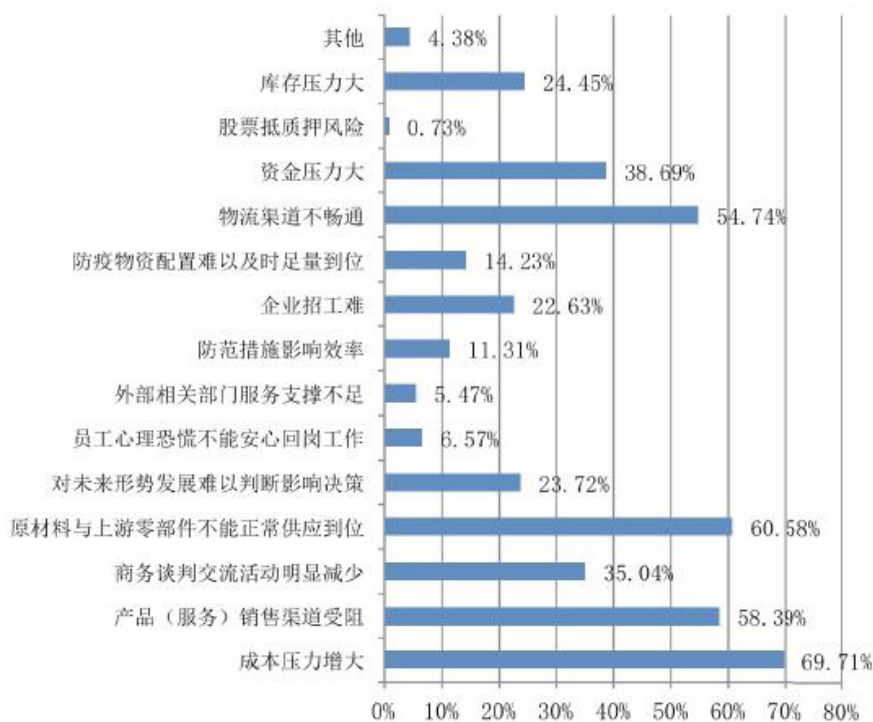


图9 当前企业持续发展所面临的主要问题

来说,最突出的问题是商务谈判交流活动明显减少。

四、坚定信心,积极主动应对疫情冲击

(一) 约有四分之三企业对实现年度经营目标总体抱有信心

面对疫情的严重冲击,只有信心坚定,企业才有可能通过主动采取科学应对措施,最终战胜当前所面对的各种困难与挑战,摆脱疫情的阴霾,确保年初所制定的年度生产经营目标得以充分实现,进而为国民经济稳增长做出突出贡献。

调查结果显示,企业对完成2020年的年度经营计划、实现年度目标,总体上依旧抱有信心。具体来看,有13.14%的企业对完成年度目标很有信心,有60.22%的企业较有信心。二者相加,合计约有四分之三的企业相信,可以顺利完成年度经营计划。不过也要注意,还有11.68%的企业信心不足,有1.82%的企业表示完全没有信心,另有13.14%的企业表示目前尚难以判断。上述结果表明,面临严峻的疫情,综合评估疫情对企业生产经营的影响,企业总体上对持续发展与完成年度经营计划抱有信心,但面临的困难也不容忽视。

(二) 积极采取措施应对疫情

推动企业发展,根本动力还是在于内因,也就是企业自身的变革和创新。面对困难与挑战,必须靠企业自身主动做出有针对性的调整与变革,从而最大限度地激发发展活力,战胜困难与挑战,获得发展。企业显然没有被疫情所击垮,反而展现了坚定的信心,并且积极主动地采取各种措施,努力缓解疫情带给企业的不利影响。

本次调查,课题组在问卷中设置了企业可以采取的10种措施,同时提供了“其他”选项。详见图10。

1. 调整生产计划,做好后续安排,疫情结束后全力追赶生产进度。调查结果显示,有83.58%的企业选择了根据疫情发生后的实际情况的变化,灵活调整企业生产计划,并且已经着手做好后续工作安排,等待疫情结束后全力以赴追赶生产进度,以最大程度消化疫情带来的不利影响。

2. 创新服务方式、销售方式和管理方式。调查结果显示,有76.28%的企业认为,疫情使得企业成本上升,化解成本压力,显然需要在管理上进行创新,需要更进一步加强成本管理,深挖成本节约潜力。疫情使得物流不畅、销售渠道受阻,这迫使企业不得不进行营销创新;实际上,疫情期间,居家防疫的方式,显著拉

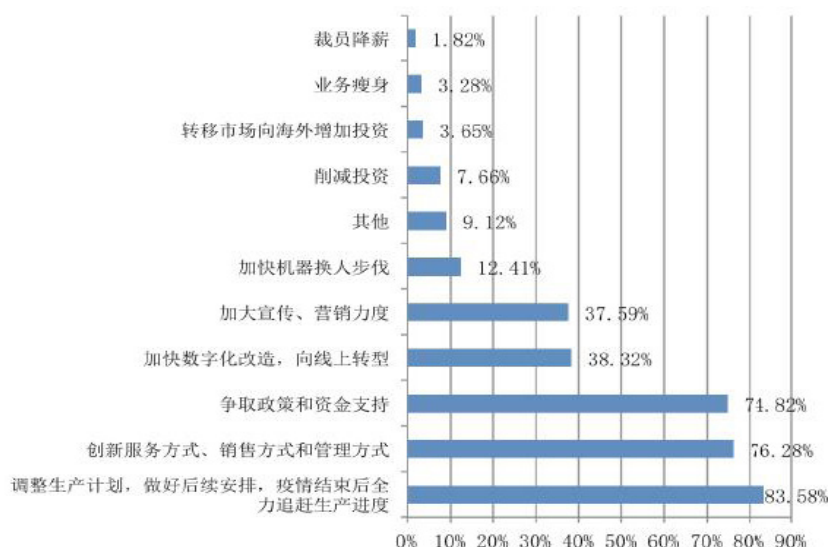


图 10 企业应对疫情的措施选择

动了线上销售的增长。基于疫情防控的需要,上门服务严重受阻,远程服务成为不二选择;对制造企业来说,必须在服务方式上积极创新,大力推广远程线上服务。事实上,对制造业企业来说,远程服务不仅可以克服因疫情封城等类似不利因素的干扰,而且可以增强企业服务的及时性和降低企业服务成本。

3. 争取政策和资金支持。调查结果显示,有 74.82% 的企业选择将向政府部门寻求政策与资金支持。疫情阻碍了企业生产活动的正常周转,企业资金周转必将面临更大压力,资金支持成为企业应对疫情的关键需求之一。与此同时,政策上的倾斜,无论是针对个案企业的,还是普惠性的,都将有助于降低企业运营成本,减少企业运营阻力,增强企业发展动力。

此外,企业选择应对疫情的措施还有:加快数字化改造、向线上转型,加大宣传、营销力度,加快机器换人步伐,等等。

不同所有制企业对实现 2020 年经营计划目标信心水平、在积极自救时的策略选择并不存在显著差异。不论是国有企业,还是民营企业,“调整生产计划,做好后续安排,疫情结束后全力追赶生产进度”,都是企业开展自救的最优先选择。

不同行业间对实现 2020 年经营计划目标信心、在积极自救时的策略选择存在显著差异。“创新服务方式、销售方式和管理方式”是交通运输设备及零部件制造行业最优先的自救措施;“加快机器换人步伐”是化学品制造、建材生产、机械设备、消费品生产、计算机、通信设备及其他电子设备制造这五个行业最优先的自救

措施;“争取政策和资金支持”是综合制造业、药品和医疗设备制造两个行业最优先的自救措施;“调整生产计划,做好后续安排,疫情结束后全力追赶生产进度”是金属产品、防务、食品饮料生产三个行业最优先的自救措施。

五、精准施策,大力帮扶受困企业

企业在疫情严重冲击下的发展,尽管是企业自身的任务,更多应该依靠内因来解决问题;但也需要政府从中积极作为,为受困企业发展提供应有的、力所能及的帮助与支持。事实上,推动、保障经济社会持续、平稳发展,既是政府的义务,更是政府的责任。尤其是在市场失灵的情境下,更需要政府积极作为,以修正市场非理性行为,为经济社会发展提供助力。当前疫情的大范围爆发,显然已经使得市场偏离了正常运行轨道,需要政府采取帮扶措施,以部分抵消市场失灵的不利影响。面对疫情导致的困局,企业在积极开展自救的同时,也对政府纾困寄予厚望。

调查结果显示,企业对政府帮助企业脱困发展展现出了多维度的诉求。课题组在问卷中设置了预计政府可以采取的 13 种帮扶措施,同时提供了“其他”选项。调查中,所有 13 种预设措施以及“其他”选项,都有企业选择,

这表明企业面对疫情困局，寄望于政府能够从多维度对企业提供帮助。详见图 11。

（一）加大减税降费力度

在全部 13 种可能的帮扶举措中，企业诉求最为迫切的是加大减税降费力度。多年来的减税降费，确实给企业带来了实实在在的好处，在一定程度上缓解了企业盈利持续下滑的态势。但疫情的大范围爆发与持续蔓延，严重阻碍了企业正常复工复产，导致了企业运营成本大幅攀升，挤压了企业原本狭窄的盈利空间。对企业来说，当前最紧迫的任务，就是拓展生存空间，充实生存基础。一方面需自身开源节流，增强盈利能力，提升盈利水平；另一方面，就是寄望于政府能够加大减税降费的力度，至少是能够出台更大规模的临时性减税降费举措。

（二）降低企业融资成本

位居帮扶举措需求强度第二位的是降低企业融资成本。在疫情带来的成本上升压力下，融资成本的高企，无疑更加成为了企业高度关注的痛点。也正是因为如此，企业迫切希望金融机构能够适当降低融资成本，以帮助企业渡过当前难关。

（三）强化公共卫生保障，健全国家应急管理体系

强化公共卫生保障，健全国家应急管理体系，位居帮扶举措需求强度第三位。这既是企业当前需求，更是企业长期期望。在 SARS 之后，又大范围爆发新冠肺炎疫情，充分暴露出了中国公共卫生保障、国家应急管理体系当中存在的问题。在企业复工复产过程中，企业一方面遭遇了复工复产管理不当，

人为导致复工复产延迟。另一方面，由于应急保障能力不足，防疫物资无法足量及时供应，迫使企业不得不延迟复工复产。所以，正是基于当前所遭遇的深刻教训，企业希望政府部门能够强化公共卫生保障，健全国家应急管理体系。

此外，企业还希望政府扩大国内有效需求，建立优质企业帮扶机制，重视企业家贡献、保护企业家积极性，加快构建良性的政企关系，等等。

不同所有制企业对政府帮扶措施的诉求差异不大，帮扶措施排前两位的都是加大减税降费力度、降低企业融资成本。国有企业排 3 至 5 位的帮扶诉求是：扩大国内有效需求；建立优质企业纾困机制；强化公共卫生保障，健全国家应急管理体系。民营企业排 3 至 5 位的帮扶诉求是：强化公共卫生保障，健全国家应急管理体系；重视企业家贡献，保护企业家积极性；扩大国内有效需求。

不同行业企业对政府帮扶措施的诉求差异比较大。交通运输设备及零部件制造、化学品制造、建材生产、机械设备、消费品生产、综合制造业、药品和医疗设备制造、计算机、通信设备及其他电子设备制造共八个行业，都将“加大减税降费力度”作为首位政策诉求；“重视企业家贡献，保护企业家积极性”则是金属产品、防务、食品饮料生产三个行业企业最优先的政策诉求。MT

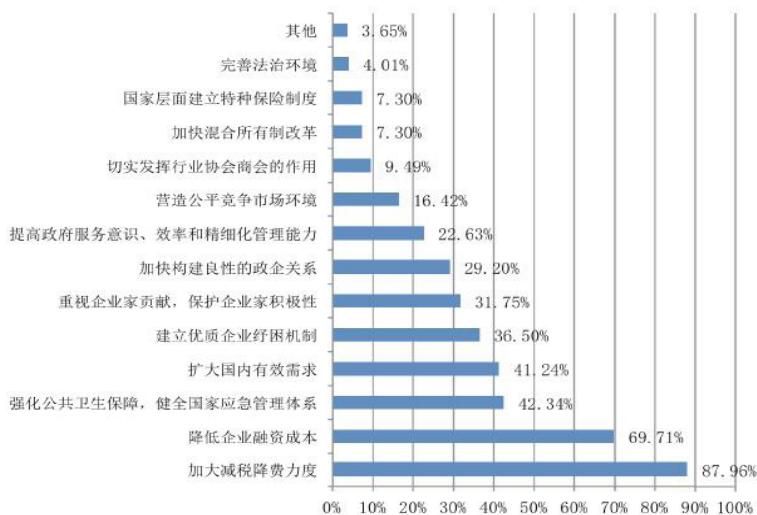


图 11 企业对政府帮扶举措的需求

维修用机器人：从设施巡检到维修的演变



美国机械工程师学会

编者按：本文为美国机械工程师学会（ASME）2019年8月发布的技术专题报告。

引言

遥控式移动机器人已经改变了许多行业资产巡检的过程。如今，它们可以攀岩墙壁、飞越高塔、穿行于管道、航行于深海。无论是风力机的叶片还是地下管道，或是大型工业容器的内部，人们都使用机器人来进行评查。

尽管巡检机器人已经很先进，但这只是一场更广泛的演变的开始。许多公司正在着力于将巡检机器人的能力提升至更高层面，并创建可用于工业资产维修的平台。

这场演变仍处于初期，我们离下一代机器人的广泛应用还很遥远，但是越来越多的公司和科研人员正在逐步克服困难，并提出创新性的解决方案来提升设备的效率、自动化以及实用性。他们的努力推动了机器人的演变发展，也为机器人在维修中的广泛应用铺平了道路。

1. 更安全，更快速，更廉价

人们对维修用机器人感兴趣的原因与巡检机器人相似——它能够帮助人类远离如高塔和工业储罐等高危环境。

移动式遥控机器人如今在很多领域中得到应用，或处于试用阶段：检查水下管道和缆线，蛇行穿梭细小管线和水沟，爬行巡

检吊桥索，沿着输电线路飞行，检查手机信号塔的天线角度，在高空寻找风力机叶片的缺陷等等。

成本也是一个重要因素。工人们在高空作业或者封闭环境下工作时，需要安装脚手架、索降绳，或者起重机和升降机，所有这些都会增加成本。

“在油气设施的火炬塔完成一次工作，仅脚手架的成本就



能达到 75 万到 125 万美元”，Apellix 公司（航空机器人系统制造商，位于佛罗里达州杰克逊维尔）CEO 鲍勃·达尔斯特伦（Bob Dahlstrom）说道：“按照以往的经验，高空作业时，这些设备的使用费用占据了 60% 的成本。”

机器人则不需要时间来安装设备，并且通常可以快速开始工作，缩短了设备停止运行的时间。一艘大型远洋船舶因涂漆或其他事务而停止工作，每一天可能会为公司带来持有成本和收入损失共计 100 万美元，达尔斯特伦如此说道：“所以缩短完成工作的时间是非常有价值的。”在一些情况下，机器人还可以在烟囱等危险环境下持续工作，无需关机，完全避免了电力中断带来的损失。

技术的进步使得机器人的广泛应用成为可能。Apellix 公司使用了多种传感器去操控航天机器人，很快这种技术就变得更好更廉价，因此，公司如今得以使用商业化的、现成的，或者说是商用现货（COTS）的传感器。此外，达尔斯特伦表示：“我们已经看到，杂乱的多种通信协议走向了统一的标准，很大程度上是因为人们在汽车产业无人驾驶车辆领域所取得的成果。”

但是维修用机器人的开发并不容易，其所面临的挑战也较巡检机器人更大。比起巡检用传感器，维修需要的有效载荷通常更重、更大。维修工具采用力矩和

其他力来工作，需要更强大的平台，并使用更多的动力。因此，很难使机器人的身形小巧到足以进入狭窄和难以到达的区域工作。

“开始看起来很简单，但是真正的问题在于细节”，通用电气巡检机器人公司（GE Inspection Robotics）【通用电气电力公司（GE Power Services）与瑞士苏黎世联邦理工学院（Swiss Federal Institute of Technology）的合资企业，总部位于苏黎世】CEO 埃克哈德·茨威克（Ekkehard Zwicker）如此说道。

随着各公司着手解决这些问题，维修用机器人的发展正逐步向前推进。例如，通用电气巡检机器人公司开发了一种磁性履带平台，可以携带多种巡检设备，目前公司正在努力扩大其机器人可以处理的工作种类。茨威克说：“我们正在逐步推进。现在我们的重点是清洁表面，为巡查做准备，在这之后就会着重于各种维修任务。”

该公司的一款机器人被设计用来清理燃煤锅炉中由并联焊接的水管构成的“水墙”。80 公斤重的机器人在可旋转的磁性滚轮上运行，它可以上升、下降，或横穿一排排水管。该滚轮已申请专利，它可以帮助机器人过渡地板与墙壁或墙壁与屋顶间的直角。除巡检设备外，机器人还可以携带清洗工具，如水射流、干冰和喷砂机，这些工具由锅炉外的泵提供动力，用于清除锅炉内

杂物并提升锅炉性能。公司还将使用清除油漆和涂料并重新喷涂受影响区域的工具。

茨威克说：“我们还在研究一种安装在平台上的机械臂，这种机械臂可以完成诸如手持钻机或其他工具之类的任务，让机器人能够执行各种维修任务。”

该清洁机器人由锅炉外的操作人员控制，不需要人员进入锅炉内。但它能自动检测出管道，识别并纠正行驶路线的偏差。此外，公司的系统通过机器人获得的信息建造容器的场外数字孪生，用以支持容器内，包括修理在内的后期工作。公司的北美销售经理吉姆·迪瑟尔（Jim Disser）说：“工程师可以在虚拟空间和虚拟情形中观察这些容器，在其中运行虚拟机器人，并了解它们的去向以及可能遇到的障碍。在现实中踏出第一步之前，他们可以在虚拟环境中完全规划好机器人的工作路线。”

2. 强化机器人平台

仅仅将维修用机器人送到工作地点也是一种挑战，但这也带来了一些创新性的解决方案。据悉，汽车制造商劳斯莱斯（Rolls Royce）正在开发一种蛇形机器人，这种机器人可以通过发动机进行维修。汉莎航空（Lufthansa）开发了一种自动铣削机器人，它利用吸盘附着在飞机机翼上以修

复缺陷。

为了到达高至 100 米的工作区域，Apellix 公司的无人机不仅仅只是在附近飞行，它还使用机械臂与高空中的建筑物接触，这对导航方面的准确性要求很高。达尔斯特伦说：“我们拥有非常精确的位置数据来确保无人机与建筑物接触。使用无人机进行可视化巡查时，偏离该位置一两英尺也无所谓，因为摄像机仍然可以瞄准正确位置。”

但是在与建筑物接触时，为了正确放置仪器或避免仪器坠毁，飞行必须更加精确。他说：“即使是 3 英寸的偏差都可能是灾难性的。”

Apellix 公司的无人机平台可以配置携带多种设备，目前主要用于大型地面油气储罐的金属及涂层厚度的接触式无损检测或传感器在建筑物上的安装。但是机器人的技能范围在快速扩大。例如，Apellix 公司现在正在开发一款用于室内和封闭工业空间的无人机。此外，公司很快将推出一种用于喷漆的技术，即通过一根绳索为无人机提供电力和油漆，使它能够长时间工作。专为工业用途设计的喷漆无人机将紧随其后到来。

达尔斯特伦说：“这将适用于类似环氧树脂的涂料的喷涂和其他应用，而不适用于传统的乳胶漆。这些涂料每分钟的使用量达到 1.6 加仑（1 加仑约为 3.8 升），而传统涂料每分钟的使用

量只有其三分之一。如果人工喷涂，则工作人员必须穿戴防护服。”

达尔斯特伦预测了无人机的一系列潜在用途，他说：“如今，我们用无人机来放置传感器和进行接触式测量。未来，我们将用它进行钻孔、打磨、焊接等更多类型的接触式任务。”

机器人平台中的一个关键创新是 Apellix 公司研发的航空机器人导引系统。在大部分操作

过程中，无人机是自主飞行的。当地面上的飞行员将飞机定位在巡检目标附近时，无人机就会接管，利用其机载电脑飞行到该建筑物，执行任务然后返回远离该建筑物的安全区域，等待操作人员的进一步指示。

为了实现这一目标，Apellix 公司不得不重新考虑传统的无人机导引方法。

当操作人员从地面进行无人



机可视化飞行或者通过机载摄像机飞行时，通常会发觉很难将无人机带到建筑物上的特定地点，而基于传统技术的导航设备经常在工业环境中是不可行的。比如，在大型船只附近盘旋的 GPS 系统可能无法与卫星连接以找到自己的位置。附近的金属结构可能使罗盘读数变得不可靠，无法确定无人机的方位。当无人机接近大面积坚固的墙壁时，用来读取海拔的气压读数可能发生偏差。

Apellix 公司通过组合多种传感器，利用机载电脑分析数据，从而在三维空间中精确定位无人机，解决了这些问题。达尔斯特伦举例说道：“如果你离目标 10 米远，并且卫星连接良好，机器人就可以知道它的 x-y-z 坐标并可以据此进行推断。如果机器人知道它从那个坐标以这个特定的速度向北移动，就能计算出它在什么位置和时间与目标接触。”

有时一些状况可能会使传感器失效，比如不锈钢水箱反射的阳光，他补充说明道：“这就是使用多种不同技术的原因，这样你才能持续获得数据的可信度评分，才能判断哪些数据是准确的，哪些不是。”

3. 应用更多任务工具

一些公司在研发向工作地点运送工具的平台，与此同时，一些公司正着力于研究装载在平台之上的设备。为此，RE2 机器人公

司研发出了接近人类手臂的机械臂，它可以安装在不同的平台上，为各种工具的使用打开了大门。

“一种新型‘仿人类’机械臂的出现使得机器人的维修能力呈指数级增长，只是因为这个世界是人类为了人类本身而设计的，”位于匹兹堡的 RE2 机器人公司（RE2 Robotics）的总裁兼 CEO，约尔根·佩德森（Jorgen Pedersen）说道，这将导致：“机器人很快就会对生产设备、车辆、桥梁和建筑物等基础设施，甚至机器人本身进行维修。”

该公司的机械臂“可以像人类一样，表现出近似于人类的性能，”佩德森接着说道：“这不代表机械臂外形一定要是拟人化的，但是它们展现出了人类与生俱来的那些独特属性。”

该公司的高灵活性操作系统中的一款模型有两只机械臂和一个躯干。

“每只手臂的机构自由度是 7，躯干是 2，总共有 16 个机构自由度，其中不包括如钳子等手臂末端的工具。”他提示道，每只机械臂的 7 个机构自由度与人类手臂的动作幅度相匹配。这款模型由一个 48V 的电池驱动，仅重 45 磅，却能举重 110 磅。“我们正在真正地向人类性能接近。”

研发机械臂的过程中，RE2 公司发现没有商用现货元件能满足它对于尺寸和重量的要求。

“我们不能采取传统的方

法，去直接购买商品化的电机、传动系统和电机控制器，然后组装到一起，因为这样只会制造出另一种在工业自动化市场上很常见的机械臂。所以我们需要自己定制零件或改装商品零件来满足需求。特别是，我们必须开发自己的专用电机控制器，以使我们的机械臂足够小、足够轻到可以被称作为‘仿人类’。”佩德森说。

公司的机械臂已经在特定领域展示了其多功能性。例如，军方用它们来处理爆炸品，如简易爆炸装置，而能源工业用它们来安全地修理和拆除设备和建筑。佩德森说，“这些机械臂以前就放在工程设备的驾驶室使用，将人工驾驶设备变成无人驾驶，这样操作人员就可以在飓风迈克尔（Hurricane Michael）清理行动中远程操作车辆执行危险的任务。”

另一方面，一些公司正在整合载荷、平台和先进的软件，以使机器人越来越多地进行自主化操作所需的“思考”。位于高登的科罗拉多矿业学院（Colorado School of Mines）的一个项目团队正以此为目标，研究可以处理整个端到端维修过程的机器人。

此学院团队正在研发一款磁性爬行机器人，它可以自主操作穿越燃煤锅炉的内壁，并在移动过程中使用各种无损检测传感器去巡检，找到需要维修的区域。一旦找到该区域，它会使用包括熔合和固态焊接工具在内的各种

维修设备来解决问题。接下来，重新检测这块区域来确保维修已正确完成。这很重要，“因为，人们最不想做的事就是设计了一个可以进入区域并完成所有工作的自动化系统，之后却需要人再回到该区域检查工作是否完成，”该学院的计算机科学助理教授、该项目的首席研究员张浩（音译）如此说道。

机器人将依靠人工智能来强化自主操作能力。例如，人工智能将处理机载数据的融合，允许机器人管理并“理解”来自传感器的丰富数据。人工智能还将自动收集数据，创建 3D 分层地图，机器人可以使用这些地图导航，并识别锅炉壁随时间的变化。人工智能还可用于“持续学习”，使得机器人随着时间推移将工作做得越来越好。

张浩表示：“这将让机器人学会识别壁上不同类型的损坏和风险——无论是裂缝、涂层问题

还是其他问题——我们不希望人类去执行危险任务。”

该款机器人仍处于设计阶段，学院团队预计在两年内将它完成。张浩说为此他们需要：“填补发电厂锅炉现场巡检与维修之间的技术空白。”这意味着他们需要自主设计无损检测传感器，找到并改装合适的现场维修工具，找到使电源和工业焊接装备等设备小型化的方法。

4. 人机合作

机器人的参与，使得维修技术越来越先进，所以控制和引导机器人的方式成为了关键。机器人的许多操作可通过日益提升的自主性进行控制，但是有些任务仍需要人为操控，一些公司正努力使人机交互界面更加友好。

例如，RE2 公司的机械臂可以自主操作的同时，也可以由人类远程操作来进行更为复杂的

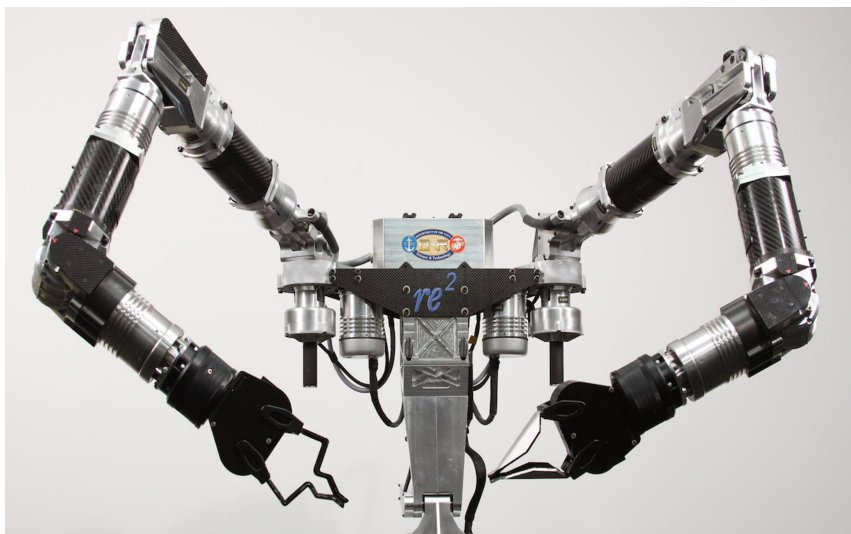
工作。公司已经研发了一种模仿控制器（IC），由真实手臂的比例模型和每个模型手臂末端的飞行摇杆式的输入装置组成，使人可以远程操控任何机器人平台上的机械臂以及它们末端的任何工具。

佩德森说：“这种模仿控制器为操作人员提供了高度直观化的交互界面，使其感到操纵器成为了自己身体的延伸。”他补充道，一位新员工几分钟内就可以完成培训，并在几小时内熟练控制机械臂。当在实际工作现场使用可视化传感器时，“操作人员具备了一种高效的遥现能力，可以用来远程——甚至在地球的另一端，执行复杂的维修任务。”

人类与机器人的协作方式对于位于田纳西州库克维尔的田纳西机器人公司（Robotic Technologies of Tennessee, RTT）尤为重要。该公司生产的机器人能将钢板焊接在一起，这些钢板目前应用于航空母舰、驱逐舰和其他美国海军舰艇。公司的目标是将现代制造业场所如车辆制造厂中先进的机器人焊接能力引入其他尚未投资自动化生产单元的领域。

公司的创始人兼总裁，杰米·彼尔德（Jamie Beard）说道：“我们并不是像流水线一样把工件送到焊接机器人那里，而是把焊接机器人带到工作中去。”

田纳西机器人公司的焊接平



台是装有磁轮的机器人，它可以爬上船舶和其他钢结构的侧面，利用多种传感器扫描表面，定位接缝，然后将钢板焊接在一起。基于这一能力，该公司最近对该平台进行了强化，使其能够执行更多任务。彼尔德说：“我们为移动式焊接机械臂配备了表面处理工具，用于磨削、等离子体爆破和冷喷涂作业，特别是针对维修工作。”

平台在不平坦、弯曲或倒置的表面上的移动能力也为其在这些非结构化环境中进行维修工作提供了支持。

该公司一直致力于使该平台成为一个高效的、可以与人类员工协同工作的“人机合作机器人（cobot）”。彼尔德指出，它可以由一个人携带，所以很容易被带到各种工作环境中使用。该公司还使该款机器人易于编程，即使是非机器人专家的终端用户，也能轻松为其编程，既简单又划算。

他说：“不需要程序员在场，焊接工人就可以为机器人编程，让机器人按他的意愿去做事。”

人可以在机器人旁边工作，共同完成任务，或者由一个人同时管理多个机器人。总之，平台的目的是帮助提高工人的生产力和安全性。

5. 未来发展之路

随着机器人能力的增强，不难想象未来将如何利用机器人改变维修方式。在此基础上，英国的一些大学启动了“自修复城市”方案，目标是到2050年实现街道维修的自动化。在计划中，无人机可以更换路灯，成群的飞行器负责公路的自动化巡检与维修，机器人可以在公共设施管道内长期滞留以对它们进行维修。

这个愿景虽然宏伟，但机器人公司以及其潜在终端用户都在认真地向推进。例如，科罗拉多矿业学院的项目正与电力公司

埃克西尔能源（Xcel Energy）合作，并得到了美国能源部的支持。而通用电气巡检机器人公司正与雪佛龙（Chevron）、陶氏化学（Dow）、以及挪威国家石油（Equinor）等公司进行合作。

通用电气（GE）的吉姆·迪瑟尔说道：“顾客正向我们咨询关于清洁和维护机器人的事宜。”他补充道，需要开发出能在曾经为人类打造的环境中工作的机器人是一个主要的挑战——设计工业空间时如果考虑到机器人的存在，就能够显著提高自动化维修的效率。这的确是个长期的解决方案，“但我们现在已经开始看到一些更先进的大型主体（能源公司）着眼于在未来设施的设计中考虑到机器人技术，这样对机器人更友好。”

除了成本与安全性，其他因素也将推动产业趋向维修用机器人。例如，机器人可以帮助解决工程师以及高技能劳动力的短缺问题。

同时，田纳西机器人公司的杰米·彼尔德说，进入劳动力市场的年轻工人“不会从事像过去那样劳动密集型的工作。年轻人将期望看到更高水平的自动化以及更多技术驱动型的互动。”

最后，彼尔德表示，机器人的广泛采用可能需要时间，“但只要 we 继续发展平台，与终端用户互动，就一定会成功。” MT



BEW2021

第25届北京·埃森焊接与切割展览会

THE 25th BEIJING ESSEN WELDING & CUTTING FAIR



2021年6月16-19日
上海新国际博览中心

Shanghai New International Expo Center

June 16-19, 2021

微信二维码



www.beijing-essen-welding.com

www.埃森焊接展.com