Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

Research
Intelligent Manufacturing—Perspective

制造业的未来——一个新视角

Ben Wang [a,b,c]

[a] Georgia Tech Manufacturing Institute, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA
[b] School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA
[c] School of Materials Science and Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA

ARTICLE INFO

Article history:
Received 29 January 2018
Revised 2 July 2018
Accepted 23 July 2018
Available online 29 July 2018

关键词
先进制造伙伴计划
制造业生态系统
工业 4.0
智能制造
物联网
制造业创新研究院
美国国家制造创新网络

摘要

关于智能制造，前人已发表了很多文章。其大多数内容都集中在硬件、软件、增材制造、机器人、物联网（Internet of Thing，IoT）以及工业 4.0 等话题，而对另一些极重要的领域却少有讨论，如混合系统、先进制造业重定义、新制造的基本构成元素、制造业生态系统准备水平及技术可扩展性等。本文将通过实例，从全新的视角，为读者剖析这些领域中目前的四个挑战。挑战一：当我们希望提高公众对新制造业经济及其社会影响的认识水平，并获得政策制定者的明确支持时，应如何重新定义未来制造业。挑战二：如何正确认识到未来制造业的关键词是“混合”。它具有人类与机器人协作、增材制造与减材制造结合、金属材料与复合材料并用以及网络系统与物理系统融合等特点。因此，划定界限与制定标准变得尤其重要。挑战三：如何开发一个同时对技术、制造商业化和新制造生态系统做出评估的通用框架，以缩短生产到交付之间的时间；以及在该框架下，如何进一步制定一套可被广泛采用的、针对非信息技术的可扩增性测量的标准。最后，也是同样重要的是挑战四：如何通过公司多方合作，来验证“产 - 学 - 政”三位一体的模型是否成功。本文将详细讨论上述四大挑战。

© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

1. 引言

关于智能制造、工业4.0、网络-物理系统以及与未来制造相关的不少主题，前人的研究已经取得了大量的成果[1–9]。本文旨在为读者提供一个新的视角，去讨论其他较少被人所关注的，却对未来制造业至关重要的话题。它们分别是：混合制造系统，先进制造基本构成元素，技术、制造、商业化方案和生态系统的同时成熟[10]，技术可扩增性，以及“产-学-政”的全方位合作模型。

2. 重新定义制造业

制造业对国民经济的贡献深远而广泛。它的贡献包括国内生产总值（gross domestic product，GDP）、出口、高薪工作、有意义的投资回报以及制造业创新与STEM（科学、技术、工程、数学）教育及国家安全等领域之间的共生关系。因此，我们急迫地需要让政策制定者和公众了解先进制造业对于经济、社会和国家经济结构等的影响。但是，提高公众意识并获得政策制定者的支持并不是一件易事。我们面临的主要挑战是制造业留给大

E-mail address: ben.wang@gatech.edu

2095-8099/© 2018 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
英文原文: Engineering 2018, 4(5): 722–728
引用本文: Ben Wang. The Future of Manufacturing: A New Perspective. *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.020

多数人以“完全过时”的印象。在公众眼中，今天的制造业仍与过去低科技含量的工厂和车间别无二致。

所以我们的第一项重大任务是（重新）定义未来制造业。我们的目标是：① 让公众了解制造业如何影响我们的经济和社会；② 获得决策者的明确支持。这项任务的主要障碍是新颖的制造工艺、创新的材料和颠覆性的商业模式对现有的基础认知带来的冲击。

在创新材料方面，一个极佳的例子是细胞制造。10年前，除了专业人士外很少有人知道细胞治疗方法。但如今由于其临床效果及其对社会、经济的影响，它正迅速成长为被广泛应用的医疗模式。就在最近，由佐治亚理工学院（Georgia Institute of Technology，Georgia Tech）所领衔的全国细胞制造联盟（National Cell Manufacturing Consortium）绘制了一张关于细胞制造的行业发展蓝图[11]。随着细胞治疗被用于心血管疾病、癌症、神经疾病和炎症，细胞开发和培养将无处不在。细胞制造也将从一个目前少有人知的产业变成未来制造业的重要组成部分。然而在这么一个新兴的制造领域里，我们遇到了很多用传统定义无法清楚界定的概念。例如，在用细胞制造单克隆抗体的过程中，既包括了提取具指定抗原免疫力的小鼠脾细胞的步骤，又包括了将这些细胞与骨髓瘤细胞融合，生产新细胞的步骤[12,13]。如果我们仍然遵循传统制造业的定义，那么应当把处在生产过程中的细胞材料看作制造的原料还是产品本身呢？

在加工工艺方面，随着材料选择的拓广、材料性能的优化、材料效率和质量的提高，增材制造作为一种“直接生产”工艺正在获得广泛认可。然而，增材制造不应仅仅被视为一种制造过程。除了改变产品的制造方式外，增材制造还会改变产品的运输方式（即其对于供应链和物流的影响[14]）和产品的设计方式（如拓扑优化或部件合并[15,16]等）。GE90喷气发动机燃油喷嘴即是增材制造应用于零件加固领域的一个众所周知的成功案例。通过增材制造工艺，燃料喷嘴不仅将旧有设计的所有20个部件合并为一个单元，而且重量减轻了25%，强度增加了5倍[17]。该喷嘴的最终性能远远超出了团队一开始的预期。增材制造使单位成本对生产批量的敏感性大大降低。人们得以将单位成本与生产规模两个因素分离考量，解决了这一自制造业行业诞生以来持续困扰制造商的难题。因此，在未来的某一天，零件将能以几个甚至一个为一批地进行生产，也能随时随地以合理的成本进行生产。这种不受时间空间局限，单个产品为生产单位再集成的概念将改变许多现有的商业模式，刺激更新、更先进商业模式的诞生。

就商业模式而言，制造业服务正成为定义产品价值的核心驱动力。在下述案例中，制造引领了价值的创造，而技术使其成为可能。许多制造公司已经意识到，制造和服务正在融合，因为我们的经济已经从最初单纯的一次性交易转向了公司与客户的持续互动。那些通过智能传感器和通信技术实现的服务非常先进而且高利润。它们正逐渐成为许多制造商商业模式中不可获取的重要环节[18,19]。制造-服务混合型的商业模式正在取得喷薄式的成功。例如，劳斯莱斯公司（Rolls-Royce）在其喷气发动机中安装了传感器，对发动机运行进行性能监控和问题检测。所以，该公司并没有传统地让客户直接购买发动机，而是收取发动机维护费盈利。这就是产品至服务的转变。又例如，百保力公司（Babolat）在其生产的网球拍中加入传感器。伴随着用户的击球，传感器收集各种数据。因为这些数据，百保力公司可以准确分析球员的相关情况，随后便顺利成章地开始提供教练服务获得盈利。再如，约翰迪尔公司（John Deere）的某些设备可以收发天气及土壤条件的相关数据，以便向客户提供关于播种时间和地点的建议。这些都是制造-服务混合型商业模式很好的案例。

3. 混合制造

大约30年前，创新带来的机器人热潮迅速席卷各大工厂。当时许多人预测，10年内，所有工厂都将充满机器人，不会有人工操作员了。但几十年过去，工厂仍需要人工操作员，并且这种情况在可预见的未来不会发生变化。几年前，人们又预测增材制造将取代所有加工工艺。但如今我们有充足的理由相信这种情况也不会发生。未来的工厂将是机器人和人类的混合体、增材与减材制造的混合体、复合材料与金属的混合体、数字过程和模拟过程的混合体、网络系统和物理系统的混合体、在纳米和宏观的多尺度上由诸多元素构成的综合体。机器人不会完全取代人类，就像增材制造也不会完全取代减材制造一样。然而，他们将协同工作以实现责任的合理分配。所以，研究某单一系统固然重要，但同等甚至更为重要的是对于不同系统之间交互方法的研究；以及对于系统之间技术平衡和财务平衡的研究，即人机之间的交互、增材制造与减材制造之间的交互、复合材料及金属使用的交互等。为保障高效运行，执行标准对于由多个子系统混合组成的综合系统至关重要。

成型制造、加工（减材）制造和增材制造是制造领域的三大类型。图1是相关概念图，它显示了单位成本和制造数量（或规模）之间的关系。其中，成型制造最适于大批量生产，通过生产的数量来分摊购买工具和机器的高额初始投资，从而降低单位成本。与成型制造相比，加工制造的批量可以小一些，但比增材制造批量大。

值得关注的是，作为一种直接生产技术，增材制造工艺越成熟，图1中减材制造与增材制造间的单位造价平衡点就将越往右移。我们可以且应当采用类似的技术分析和经济效益分析来处理人机集成、复材-金属集成以及未来制造业的诸多使用场景。

4. 未来制造业企业的基本构成元素

历次工业革命都至少历时了80年的时间才最终完成。所以如今，准确地对工业4.0做出定义还为时尚早。然而，根据我们目前之所见，我们有理由推测，未来的成功制造业企业将包括以下七大重要基本构成元素。

（1）数字孪生体（digital twins）与数字线程（digital threads）。数字孪生体与数字线程的概念最早由美国国防部提出。现如今，其应用范围已远远不限于最初的开发部门[20]。数字孪生是指物理实体或物理流程的数字化镜像。它提供有关物理实体或流程的独特信息，如设计规范、工程模型、成品数据、运营数据。而数字线程则是一个能够提供全方位物理实物联网和信息交互的数据基础框架。它能够提供整个制造生命周期内所有数据的组合视图。准时制生产方式是指制造过程通过“在正确的时间将正确的组件送到正确的地方”得以实现。与之类似，数字线程的概念是指在正确的时间将正确的信息传递到正确的地方。

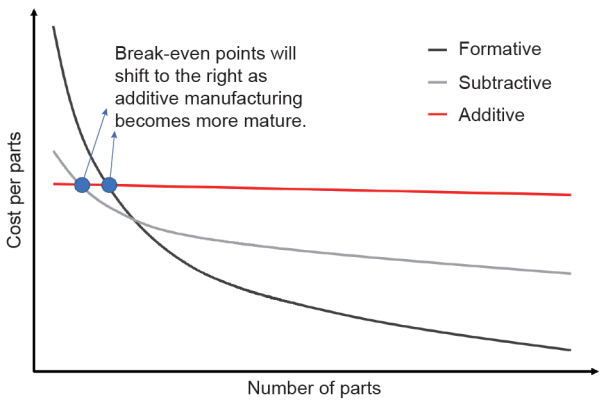

图1. 单位成本与生产批量大小关系图。

（2）全供应链的透明度与可视性。系统工程的概念已被我们所广泛接受。它超越了对生产中心或配送中心进行独立优化的概念，倡导优化整个供应链或整个供应基础网络。通过物联网（Internet of Thing，IoT）和数字线程技术，我们向整个供应链的透明和可视迈进了一大步。

（3）混合制造。此节前文已做详细论述，制造业的未来将基于混合系统的嵌入式体系而构建。

（4）创新材料。我们可以在很大程度上由制造必要工具的新材料之名，来定义人类文明的主要时期，如石器时代、青铜时代、铁器时代等。材料的创新仍将是科学、技术和经济政策领域的重要议题。制造业与材料是不可分割的。材料为制造提供了原材料，而制造则为原材增加了价值。据报道[21]，从实验室阶段到成熟的商业化应用阶段，一个新材料平均需要经历20~25年。为了加速这个研究/开发/应用过程，我们必须从多角度尽快谨慎地完成基础设施的建构，包括先进制造以及综合计算材料工程等。

（5）高级计量学。作为一般的经验法则，计量的准确度往往比人们的估计值高一个数量级。随着纳米加工成为某些领域的常规技术，行业对于更先进的计量的需求将相应增加。

（6）适应智能制造的熟练劳动力。熟练制造业劳动力的匮乏可能是全球范围新一代智能制造业所面临的最大威胁。这种短缺至少来自于两个方面。首先，能够上岗的具有智能制造必需技术的人才缺失。也就是说，能胜任未来制造业的劳动力数量和质量均远远不足。仅在美国，到2030年为止，将会有350万的制造业人才缺口[22]。其次，尽管我们认为学徒制是培养熟练劳动力的好方法，但大多数学徒项目几乎无法实现规模化。

（7）新商业模式的出现，譬如对于制造业及高端服务的融合。正如前文所述，我们观察到制造与服务相融合这一趋势于许多行业之中方兴未艾。

5. 从工业 2.0/3.0 至工业 4.0 的转型

纵览工业革命的历史，每个发展阶段均持续了80~100年。换句话说，革命不会在一夜之间发生，革命是不断发展和改进的结果。我们正处于第四次工业革命的开端，这一历史进程可能会持续至少50年。

我们对每段工业革命的主要特点描述如下。

工业2.0的特点是标准化与简单的硬连线自动化，

包括了批量生产与自动化的标准化。标准化体现在不同的方面：零部件的标准化、制造工序的标准化、检查和质量控制的标准化等。简单硬连线的自动化装置，如简单的取放设备；基于振动的部件馈送器等。其目的则是基于过程可重复性的考量，提高其自动化速度。而在工艺设计过程中，工艺灵活性并非主导因素。

工业3.0的特点是深度自动化、数字化与网络化。此阶段诞生了更为复杂的自动化，提供更快的速度、更好的质量和更为丰富的过程灵活性。先进的机器人技术和编程技术是灵活自动化的典型体现。通过更有弹性的自动化，制造商能够以合理的响应性和精度来适应产品种类和批量的变化。工业3.0的另一个特点是机床仪表的应用[计算机数控机床、三维（3D）打印机和机器人]。上述机床及仪表均带有传感器，用于数据收集以及过程监视、控制和管理。将工业3.0与工业2.0划分的最后一个特征是工业3.0得到了不同技术网络的支持。通过子网络联网，机器之间、工厂之间、企业之间实现了信息的实时传输。当传感器、数据共享、网络化为工业和制造企业带来前所未有的动力的同时，它们也使很多公司面临网络安全问题。关于网络安全这个重要的话题，另有文章进行详细讨论，本文不再赘述。

那么，工业4.0与工业3.0的区别在哪里？基于工业3.0，我们对于工业4.0的突破可以有哪些期望？以下是一些想法：

（1）超越优化。最佳的资源分配将使得输出/输入比率最大化，这对于工业和制造企业来说至关重要。在工业4.0中，优化必不可少但还远远不足。换句话说，仅凭优化还不足以体现业务差异化的优势。

（2）场景化意识。所有的生产单元，如机床、机器人以及3D打印机等都必须能够“扫描”环境并基于此做出决策。现阶段，许多决策均是基于已有的知识以及历史数据所制定的，同工业3.0一样。然而，工业4.0时代的企业应当具备以下能力：① 识别未知情景；② 将问题碎片化分解；③ 运用知识解决可以解决的问题；④ 在数据库之外寻找数据或知识来解决新的或未知的问题，或者发出人工求助的信号。一旦“新的”或“未知的”问题得以解决，该制造公司就会变得比以前更“智能”，因为系统已经完成了一次学习。这些场景化感知能力和学习能力可能是工业4.0最具特色的特征。

（3）结构化和非结构化数据。工业4.0的另一显著标准是结构化和非结构化数据的同时广泛使用。解决方案不再局限于结构化数据领域。非结构化数据集（如图像、自然语言甚至社交媒体中的消息及全球的市场更新情况）都会成为智能解决方案不可或缺的一部分。

（4）绩效指标。工业4.0的绩效指标涵盖了工业3.0的性能指标，如生产率、质量、可重复性、成本和风险等，并引入了更重要的新指标，如灵活性、适应性以及从失败或人为干预中学习的能力。

6. 衡量综合成熟度的基础框架——技术、制造、商业化方案以及相关生态系统的同时成熟

政策制定者和政治家越来越意识到，强大的制造业必将成为可持续的、有弹性的国家经济政策的重要组成部分。通过新颖的流程来加快引入新技术或新材料的商业化速度，可以大幅提升制造竞争力。为了更好地描述这一过程，佐治亚理工学院制造研究院（Georgia Tech Manufacturing Institute，GTMI）提出了一个创新框架，即“综合准备水平”（integrated readiness level，xRL），以对这一过程进行分析。xRL框架引入了衡量技术、制造和商业化方案成熟度的标准，来分析这些因素同时成熟需要的发展水平，并支持生态系统的发展。本节将描述一种新兴的xRL模型，并解释为何它对于政策制定很重要。

GTMI的研究人员开发这一框架是为了加速大学层面学术研究的商业化。其中，技术和制造维度的量度有：技术准备水平（technology readiness level，TRL）和制造准备水平（manufacturing readiness level，MRL）。TRL和MRL分别由美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）[23]以及美国国防部[24]开发，并在工业生产中已广泛使用。商业化方案准备水平（business case readiness level，BcRL）和生态系统准备水平（ecosystem readiness level，EcRL）是由GTMI开发的全新参数，仍处于初步开发阶段[10]。表1至表4和随后的讨论简要描述了TRL和MRL系统的基本特征以及在现实世界中对它们进行规模化和产业化的挑战。

6.1. 商业化方案准备水平

无论产品或流程如何革新，如果公司无法看到经济利益，那么新技术很可能最终也无法在实践中落地。就像工程师与研究人员为技术准备水平和制造准备水平工作，即TRL和MRL，企业决策者的工作范围则是企业的利润及盈利状况。将BcRL纳入模型可向企业决策者提

表1 技术准备水平（TRL）

TRL	Brief description
TRL 9	Actual application of the technology in its final form and under mission conditions
TRL 8	Technology has been proven to work in its final form and under expected conditions
TRL 7	Prototype exists having all key functionality available for demonstration and testing
TRL 6	Representative model or prototype system is tested
TRL 5	Fidelity of breadboard technology increases significantly
TRL 4	Basic technological components are integrated to establish that they will work together
TRL 3	Analytical and laboratory studies to physically validate analytical predictions of separate elements of the technology
TRL 2	Practical applications are identified but are speculative; no experimental proof or detailed analysis is available
TRL 1	Scientific research begins to be translated into applied research and development

表2 制造准备水平（MRL）

MRL	Brief description
MRL 10	Full rate production demonstrated and lean production practices in place
MRL 9	Low rate production demonstrated; capability in place to begin full rate production
MRL 8	Pilot line capability demonstrated; ready to begin low rate production
MRL 7	Capability to produce systems, subsystems, or components in a production-representative environment
MRL 6	Capability to produce a prototype system or subsystem in a production-relevant environment
MRL 5	Capability to produce prototype components in a production-relevant environment
MRL 4	Capability to produce the technology in a laboratory environment
MRL 3	Manufacturing concepts identified

表3 商业化方案准备水平(BcRL)

BcRL	Brief description
BcRL 9	Full rate production into national markets; future product improvements planned
BcRL 8	Full rate production into local market; confirmation of financial metrics estimate
BcRL 7	Product insertion into one target market; positive market focus group response
BcRL 6	Market-ready research prototype vetted to outside entity and key customers
BcRL 5	Financial issues defined; return on investment required; margin, funding source (internal, external, or both)
BcRL 4	Research concept/target markets presented to industrial partners; fit to strategic plan goals
BcRL 3	Research concept vetted to outside entity (incubator management, venture capital investors, etc.) for review
BcRL 2	University team review and validation of potential research concept market insertion
BcRL 1	Research concept proven in laboratory; principle investigator defines usage of potential market value

供所需的财务数据，以抉择新技术的推进与发展。

这就是BcRL的用武之地。协同TRL和MRL的数据，BcRL可以关联更多商业因素，从而更全面地对技术或制造流程定位。在技术成熟的同时，BcRL通过有条不紊的商业化方案的构建以及“市场拉动”，有效缩短了技术产业化所需的时间。

BcRL分析将提供技术的市场引入计划，与技术相关的市场数据，引入的时间表或规划蓝图，获取更大市场份额的有效战略，以及公司可能享受的经济利益等信息的完整描述。

BcRL的构建与TRL、MRL准备水平相同，如表3所示[10]。技术开发在BcRL 3~7的关键阶段达到了临界点，在此处，分析将指出新技术的潜在商业价值以及推动其发展的理由。我们可以认为，临界点是在测试市场评估期间产品满足足够大量的需求以达到商业成功的点。

6.2. 生态系统准备水平

EcRL是一种工具，可以检验某一特定区域对新产品或其类似系列产品的兼容性。一旦新产品成熟并进入市场，它便需要一个生产环境或一个“制造生态系统”[25]为其提供支持。该生态系统的一个重要组成部

表4 生态系统准备水平(EcRL)

EcRL	Brief description
Macroeconomic environment	Aggregated indicators: GDP, unemployment rate, and price indexes
	Major factors: national income, output, consumption, unemployment, inflation, savings, investment, trade, and finance
	Government policies: monetary policy and fiscal policy
Local market attractiveness and efficiency	Market size and purchasing power
Talent-driven innovation	Applied research and product development
Business sophistication	Pool of entrepreneurs; pool of advisors and experts; champions and community support; tacit knowledge availability
Financial market efficiency	Access to capital, cost of capital, and robustness of capital market
Climate and natural disasters	–
Cost and availability of workforce	Cost of workforce, availability of workforce, and efficiency of labor market
Quality of life	Cost of living, healthcare system, public school system, and choice of activities
Legal, regulatory, and admin systems	Legal systems, regulatory systems, and administrative systems
Economic, trade, financial, and tax systems	Economics, trade, financial aspects, and taxes
Government investment in manufacturing and innovation	–
Energy cost and policies	Energy cost; energy availability and robustness; energy policies
Physical and cyber infrastructure	Electricity, water, transportation, communications, and cyber infrastructure

分是那些可以通过设计服务、生产能力分配、配送中心以及投资渠道等来支持新产品制造的本地企业。

然而，需着重注意的是，维护现有生态系统至关重要，因为与其他准备级别工具不同，EcRL可能会在某些级别上发生变化。如果任何可持续性支持发生恶化，那么EcRL也将相应地产生变化。表4展示了EcRL的前三层。

上述框架被用于特定领域的问题评估（如技术或制造），xRL则通过提供产品准备状态的综合性视图来描述产品准备水平总状态。它利用了现阶段已发展完备的子框架，如TRL和MRL，并通过解决BcRL和EcRL扩展完善了综合准备水平分析。

7. 技术可扩增性

技术可扩增性（scalability）在信息技术（information technology，IT）领域被人们充分讨论，尤其是软件和计算的可扩增性。在计算性或软件领域，对可扩增性的定义是，基于越来越多的工作，网络或流程的增长和发展的能力[26]。

相对而言，关于非IT技术领域可扩增性的讨论要少得多，但这仍需我们全面关注。更重要的是，如果没有研究探索出为人们所接受的方法来衡量非IT技术的可扩增性，从实验室到市场的流程中，相关单位将很难进行协调和同步。

我们从以下角度来看技术的可扩增性。

（1）数量：系统（生产过程、机器等）处理工作量的能力。例如，化学气相沉积工艺可在实验室中生成2 g碳纳米管。该工艺是否可以按比例以相同质量生产数千克或数吨的碳纳米管？

（2）尺寸：系统（工艺、机器等）制造尺寸更大的类似产品的能力。

（3）复杂性，尤其是几何复杂性：系统（工艺、机器等）生产比现有产品更复杂的几何特征的产品的能力。

（4）功能：系统（过程、机器等）所具有的使产品具有比当前产品更多功能的能力。

（5）灵活性：系统（工艺、机器等）处理产品种类多样性的能力。

（6）成本：在系统（过程、机器等）具有数量、大小、复杂性、功能性、灵活性和可扩展性等能力的基础之上，以合理相似的成本生产类似的对象。

我们需要去研究关于非IT技术领域可扩展性的方方面面，并将其与加速技术开发和商业化的成功联系起来。

8. 产-学-政三方合作模型

产-学-政的合作对于产品从实验室到市场的过程来说越来越重要。该模型将每个利益相关者的最佳优势带入合作关系，并避免了创新价值链的崩溃。任何这个

模型的裂缝都意味着更多的成本、更久的拖延和更多的挫败。

根据我们的经验，公司会出于以下主要原因来开拓与科研机构的合作（未按任何特定顺序列出）：

- 获得下一代技术人才，招聘员工；
- 获取突破/转型技术，以便在不断增长的市场中实现战略定位；
- 接触到可持续发展/有竞争力的技术；
- 获得内部核心研究的补充技术；
- 使用下一代技术重新定位当前产品/流程；
- 利用合作伙伴资源开发虚拟研发中心；
- 通过合作加速商业化，以获得生产技术或市场准入；
- 实现关键技术问题的解决。

据我们的经验，在选择学术合作伙伴时，并非所有公司都根据上述全部8项原则做出选择，但大多数公司都使用上述8项原则的一部分作为其选择依据。

让我们继续上一节所讨论的xRL技术价值创造频谱的思路，为全面覆盖整个价值创造链，以下核心领导能力是至关重要的：知识领导力、转化领导力（图2）和发展领导力。学术界负责知识领导，而工业界则是发展领导力的主要掌握者。我们可以发现，xRL频谱的中间部分被忽略了，这部分频谱缺乏明确负责的利益相关者。换句话说，转化领导没有明确的“承担者”。

正如先进制造伙伴计划（Advanced Manufacturing Partnership，AMP）所指出的[21]，为加速技术开发及其投入市场的过程，有效的公私伙伴关系（public–private partnership，PPP）必不可少。其中，在美国国家制造创新网络（National Network for Manufacturing Innovation，NNMI）中建立15个制造业创新研究所（Manufacturing Innovation Institutes，MII）就是为了实现这个目标。建立这15个制造业创新研究所的主要目的体现在三个方面：①所有参与者设施共享；②新技术转化发展；③培养熟练劳动力。在撰写本文时，14个MII已经建成（表5）。

在技术集群方面，有三个MII聚焦电子工业，三个在生物制造领域，三个在能源应用/环境影响方面，还有三个关注数字自动化。这种技术覆盖极为全面且极富战略性。

由于多种原因，xRL频谱的中间部分一直被人们所忽略。明确承担者的缺失导致了许多挑战。我们认为xRL框架是MII或PPP的良好模式，其重点是弥合中间部分的“死亡之谷”或所谓的“失踪的中间部分”。

变革的领导权应当被来自学界、工业界或来自政府的关键利益相关者所分担和拥有，有时还为非营利性的非政府组织所共享。具体的责任分配因项目而异，因此需要彼此之间相互信任以及保证真正的互相参与所需的足够的时间。AMP和NNMI使用的主要模型是为

现有或目的导向的非营利组织——501(c)(3)[†]组织——提供管理实体，该管理实体为所有利益相关者充

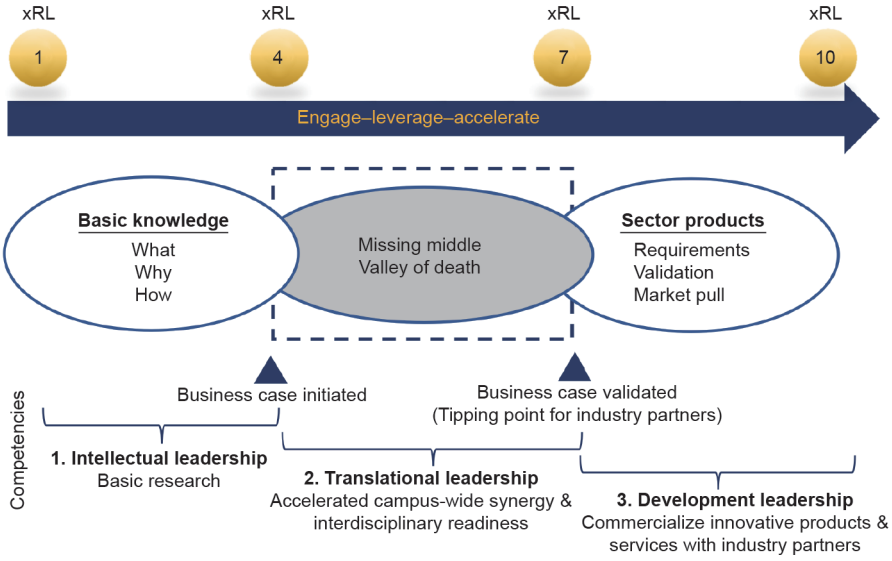

图2. 三项核心竞争力。

[†] 根据税法第 501(c)(3) 条免除美国联邦所得税的组织。

表5 已建成的MII

MIIs	Research field
America Makes	Additive manufacturing and 3D printing
The Digital Manufacturing and Design Innovation Institute	Digital manufacturing and design technologies
Lightweight Innovations for Tomorrow	Lightweight materials manufacturing
NextFlex	Flexible hybrid electronics
American Institute for Manufacturing Integrated Photonics	Integrated photonics
The Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation	Cutting-edge manufacturing technologies
PowerAmerica	Wide bandgap semiconductors
BioFabUSA	Regenerative manufacturing
The National Institute for Innovation in Manufacturing Biopharmaceuticals	Biopharmaceutical manufacturing
Clean Energy Smart Manufacturing Innovation Institute	Smart sensors and digital process control
Advanced Functional Fabrics of America	Advanced fibers and textiles
Rapid Advancement in Process Intensification Deployment Institute	Modular chemical process intensification
Reducing EMbodied-Energy and Decreasing Emissions	Sustainable manufacturing
Advanced Robotics Manufacturing	Advanced robotics

当“无偏见经纪人”。显然，这只是一种模式，关于它是否是一种可持续模式的问题还有待后续观察。

9. 结论

本文讨论了在智能制造或先进制造论文中经常被忽略的几个重要主题。这些主题包括：拥有混合系统的未来制造业，未来制造企业的构成元素，技术准备水平、制造准备水平、商业化方案准备水平及生态系统准备水平的同步发展，以及技术可扩增性等。当我们迎来新的制造业复兴时，这些话题对于学者、商业人士和政策制定者来说都是至关重要的。

References

[1] Jardim-Goncalves R, Sarraipa J, Agostinho C, Panetto H. Knowledge framework for intelligent manufacturing systems. J Intell Manuf 2011;22(5):725–35.
[2] Lee J, Bagheri B, Kao HA. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. Manuf Lett 2015;3:18–23.
[3] Li B, Zhang L, Ren L, Chai X, Tao F, Luo Y, et al. Further discussion on cloud manufacturing. Comput Integr Manuf Syst 2011;17(3):449–57. Chinese.
[4] Peschl M, Link N, Hoffmeister M, Gonçalves G, Almeida FLF. Designing and implementation of an intelligent manufacturing system. JIEM 2011;4 (4):718–45.
[5] Radziwon A, Bilberg A, Bogers M, Madsen ES. The smart factory: exploring adaptive and flexible manufacturing solutions. Proc Eng 2014;69:1184–90.
[6] Tao F, Zhang L, Venkatesh VC, Luo Y, Cheng Y. Cloud manufacturing: a computing and service-oriented manufacturing model. Proc Inst Mech Eng B J Eng Manuf 2011;225(10):1969–76.
[7] Tao F, Cheng Y, Zhang L, Nee AYC. Advanced manufacturing systems: socialization characteristics and trends. J Intell Manuf 2017;28(5):1079–94.
[8] Zhang L, Luo Y, Fan W, Tao F, Ren L. Analyses of cloud manufacturing and related advanced manufacturing models. Comput Integr Manuf Syst 2011;17 (3):458–68. Chinese.
[9] Xu X. From cloud computing to cloud manufacturing. Robot Comput-Integr Manuf 2012;28(1):75–86.
[10] Wang B, Kessler WC, Dugenske A. Engineering and manufacturing: concurrent maturation of xRL. In: Bryson JR, Clark J, Vanchan V, editors. Handbook of manufacturing industries in the world economy. Cheltenham Glos: Edward Elgar; 2015. p. 109–20.
[11] Nelson AL, Dhimolea E, Reichert JM. Development trends for human monoclonal antibody therapeutics. Nat Rev Drug Discov 2010;9(10):767–74.
[12] National Cell Manufacturing Consortium. Achieving large-scale, cost-effective, reproducible manufacturing of high-quality cells: a technology roadmap to 2025. Report. Gaithersburg: National Cell Manufacturing Consortium; 2016.
[13] National Cell Manufacturing Consortium. Roadmap update to achieving largescale, cost-effective, reproducible manufacturing of high-quality cells. Report. Gaithersburg: National Cell Manufacturing Consortium; 2017.
[14] Marchese K, Crane J, Haley C. 3D opportunity for the supply chain: additive manufacturing delivers. Report. New York: Deloitte University Press; 2015.
[15] Cotteleer M, Holdowsky J, Mahto M. The 3D opportunity primer: the basics of additive manufacturing. Report. New York: Deloitte University Press; 2013.
[16] Michalik J, Joyce J, Barney R, McCune G. 3D opportunity for product design: additive manufacturing and the early stage. Report. New York: Deloitte University Press; 2015.
[17] Kellner T. An epiphany of disruption: GE Additive Chief explains how 3D printing will upend manufacturing. Reports. Boston: General Electric Company; 2017 Nov 13.
[18] Giret A, Garcia E, Botti V. An engineering framework for service-oriented intelligent manufacturing systems. Comput Ind 2016;81:116–27.
[19] Esmaeilian B, Behdad S, Wang B. The evolution and future of manufacturing: a review. J Manuf Syst 2016;39:79–100.
[20] Leiva C. Demystifying the digital thread and digital twin concepts [Internet]. Cleveland: Informa USA, Inc; c2018 [updated 2016 Aug 1; cited 2018 Jan 29]. Available from: http://www.industryweek.com/systems-integration/ demystifying-digital-thread-and-digital-twin-concepts.
[21] Holdren JP, Lander E, Press W, Savitz M, Bierbaum R, Gates SJ Jr, et al. Report to the president on capturing domestic competitive advantage in advanced manufacturing. Report. Washington, DC: US President's Council of Advisors on Science and Technology; 2012.
[22] Kim A. A shortage of skilled workers threatens manufacturing's rebound [Internet]. Washington, DC: Center for Strategic and International Studies; c2016 [updated 2017 Aug 10; cited 2018 Jan 29]. Available from: https://tradevistas.csis.org/shortage-skilled-workers-threatens-rebound/.
[23] Sadin SR, Povinelli FP, Rosen R. The NASA technology push towards future space mission systems, in space and humanity. Acta Astronaut 1989;20: 73–7.
[24] OSD Manufacturing Technology Program. Manufacturing readiness level (MRL) deskbook. Report. Washington, DC: US Department of Defense; 2015.
[25] Pisano GP, Shih WC. Producing prosperity: why America needs a manufacturing renaissance. Boston: Harvard Business Press; 2012.
[26] Bondi AB. Characteristics of scalability and their impact on performance. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Software and Performance; 2000 Sep 17–20; Ottawa, ON, Canada. New York: ACM; 2000. p. 195–203.