

DOI: 10.3901/JME.2023.19.187

# 美国先进制造国家战略回顾与未来技术\*

王国彪<sup>1</sup> 宋建丽<sup>2</sup>

(1. 天津大学机械工程学院 天津 300354;  
2. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院 北京 100192)

**摘要:** 一个国家经济的繁荣和发展在一定程度上取决于该国制造业的健康状况,美国也不例外。先进制造技术一直是美国乃至全球制造业关注的前沿热点。2012年、2018年和2022年,根据相关法案的规定和世界形势的变化,美国分别制定和更新了三份先进制造国家战略,始终围绕确保美国先进制造技术在全球的领先地位这一总目标,均将发展先进制造技术作为振兴美国制造业的重要举措。在回顾了美国近年来发布的先进制造国家战略背景及其内涵的基础上,对当前美国主要部门(如国家自然科学基金会、商务部、国防部、能源部)实施的先进制造领域资助计划/项目进行了概述,对未来先进制造技术的发展趋势进行了展望。数字化转型是振兴制造业的必由路径之一,基于增强现实、物联网和人工智能的制造将是未来先进制造技术的重要方向。面对人类的生命健康和粮食短缺,以及地球资源匮乏和环境恶化等挑战,应大力发展智能制造、生物制造、增材制造、太空制造、量子制造等前沿领域和方向。

**关键词:** 先进制造; 国家战略规划; 发展领域; 未来技术

**中图分类号:** TH16; TP249

## Review on the Advanced Manufacturing National Strategy of the United States and Prospect of the Future Technologies

WANG Guobiao<sup>1</sup> SONG Jianli<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354;  
2. School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering,  
Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192)

**Abstract:** The prosperity and development of a country's economy depends in part on the health of its manufacturing industry, and there is no exception of the United States. Advanced manufacturing technology has always been the focus of the United States and even the global manufacturing industry. In the years of 2012, 2018 and 2022, according to the provisions of relevant laws and changes in the world situation, three advanced manufacturing national strategies have been formulated and updated by the United States, which always focused on the overall goal of ensuring the leading position of American advanced manufacturing technology in the world. The development of advanced manufacturing technology has been regarded as an important measure to revitalize the U.S. manufacturing industry. On the basis of reviewing the background and connotation of the advanced manufacturing national strategy issued by the United States in recent years, the advanced manufacturing funding programs/projects implemented by the major departments of the United States at present, such as the National Science Foundation, the Department of Commerce, the Department of Defense and the Department of Energy are summarized. The development fields and trends of advanced manufacturing technology in the future are prospected. Digital transformation is one of the necessary paths to revitalize the manufacturing industry, and manufacturing based on augmented reality, the internet of things and artificial intelligence will become the important directions of advanced manufacturing technology in the future. Faced with the challenges of human life, health and food shortages, as well as the scarcity of earth resources and environmental deterioration, intelligent manufacturing, biological manufacturing, additive

\* 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4603005)。20230503 收到初稿,  
20230908 收到修改稿

manufacturing, in space manufacturing, quantum manufacturing and other frontier fields and directions should be vigorously developed.

**Key words:** advanced manufacturing; national strategic planning; development fields; future technologies

## 0 前言

制造业回归一直是美国政府和各界关注的焦点问题之一<sup>[1]</sup>。20 世纪 90 年代以来,美国经济呈现加速“去工业化”趋势,传统工业城市逐渐衰落,制造业逐步流失,突出表现为美国制造业增加值占世界比重与占国内生产总值比重逐步下降,制造业就业人数与相对比重也呈现加快下降的趋势<sup>[2-3]</sup>。《2010 年美国竞争再授权法案》第 102 条“协调先进制造业的研发”<sup>[4]</sup>,明确要求国家科学技术委员会制定战略规划,以指导联邦政府支持先进制造研发项目和活动。同时,要求每五年对战略报告进行更新。

2011 年 6 月,总统科技顾问委员会(The President's Council of Advisors on Science and Technology, PCAST)递交了《确保美国在先进制造业的领先地位》报告<sup>[5]</sup>,先进制造行动正式被确立为国家战略,并建议实施先进制造伙伴关系(Advanced manufacturing partnership, AMP)计划,标志着美国制造业进入一个新时代。2012 年 2 月,美国发布首份《先进制造业国家战略规划》以下简称《2012-战略》)报告<sup>[6]</sup>;2018 年 10 月,发布《先进制造美国领导力战略》(以下简称《2018-战略》)报告<sup>[7]</sup>;2022 年 10 月,美国科技政策办公室发布了第三份《先进制造国家战略规划》(以下简称《2022-战略》)报告<sup>[8]</sup>,对重振美国制造业进一步深度布局。

美国先进制造战略的核心目标是建立规模大、异质高、韧性强的产业联盟网络,促进制造业知识更新和传播,弱化甚至消除线性创新模式与金融资本带来的“死亡之谷”负面效应<sup>[9]</sup>,孕育颠覆性技术和战略性新兴产业,重获产业竞争优势。三份战略报告提出的诸多先进制造技术已成为推动制造业未来发展的新“引擎”。通过振兴制造业来推动美国经济发展和国家安全,建立强大的美国供应链、投资研发以及培训能够保障全球经济的劳动力,从而保持美国制造业的全球领先地位。

## 1 制定战略的背景

制造业是美国最大的经济部门之一。据美国国

家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)统计<sup>[10]</sup>,2021 年,制造业为美国国内生产总值(Gross domestic product, GDP)贡献了 2.3 万亿美元,占比 12%,拥有 1470 万名员工,占美国总就业人数的 9.6%,平均薪酬比整个私营行业高出 8.8%。美国的繁荣和发展在一定程度上取决于美国制造业的健康状况。20 世纪 90 年代以来,美国加速“去工业化”造成制造业衰退<sup>[11]</sup>,使得制造业增加值占 GDP 比重从 1970 年的 22.7%下跌至 2021 年的 11.1%,就业人数占总非农就业人数的比例从 1970 年的 25.89%下跌至 2022 年的 8.41%。2008 年金融危机以后,美国逐渐意识到了“去工业化”所带来的产业结构过分“空心化”问题,将重振制造业作为长远发展的重要战略,密集而持续地出台了一系列政策措施。一方面,十分重视创新引领,认为创新是美国一直以来取得世界领先经济成就的关键;另一方面,为应对金融危机引发的制造业急速下滑,全美各界掀起了克服危机的大讨论,最为典型的是时任麻省理工学院第十六任校长的苏珊·霍克菲尔德组织发起了多轮圆桌会议<sup>[12]</sup>,号召通过技术创新,尤其是发展先进制造技术,解决制造业危机。经过与学界、产业界多轮对话、讨论,逐步形成了一系列国家层面的政策建议和行动计划,以确保美国有能力领导下一代制造业。与此同时,提高供应链韧性、组建先进制造业产业联盟等政策措施需要不断更新先进制造国家战略。

在先进制造战略规划中,美国始终坚持战略引领、行动部署的方针,建立了法案——创新战略——产业(制造业)战略——先进制造战略的四层级纵向一体化战略格局<sup>[13]</sup>,实现了从国家宏观层面战略规划到先进制造业行动具体落地的系统设计,保证了国家对于解决产业“痛点”的意志。

经过 10 余年精心谋划和不懈努力,在一系列政策措施支持和推动下,美国基本遏止了制造业下滑的趋势<sup>[14]</sup>。综合分析美国先进制造业的政策特点,主要包括四个方面:一是增加制造业就业;二是刺激制造业投资;三是通过研发投入,提升强化美国先进制造业的领先地位;四是通过减少贸易逆差,提高制造业的全球竞争力。

## 2 战略报告主要技术内容

### 2.1 《2012-战略》报告

《2012-战略》报告从投资、劳动力和创新等方面提出了促进美国先进制造业发展的五大目标及相应的对策措施,主要包括:① 通过培育更加有效的联邦能力和设施的使用,加速对先进制造业技术的投资;② 增加正在发展的先进制造业部门所需的有技能的工人数量,使教育和培训系统对技能需求做出积极反应;③ 建立和支持全国和地区的公私、政府—企业—高校之间的合作,以促进对先进制造技术的投资和资源配置;④ 通过采取跨部门的投资组合优化联邦政府先进制造业投资并适时调整;⑤ 增加美国公共部门和私人部门对先进制造业研发的总投资。

从报告中不难看出,美国在联邦财政紧缩情况下,仍增加对先进制造业研发计划拨款,支持创新性制造流程,加强对纳米制造、生物制造、工业机器人、3D 打印、先进设计、新一代信息网络、物联网(Internet of things, IoT)、先进材料及国防科技工业等领域的投资。

### 2.2 《2018-战略》报告

《2018-战略》报告展示了美国引领全球先进制造的愿景,提出通过发展和推广先进制造技术、教育和培训制造业劳动力、提升国内制造业供应链能力三大目标任务,以确保美国国家安全和经济繁荣;分析了影响先进制造业创新和竞争力的八大因素,从“强技术、育人才、建网络”着手强化先进制造领导力基础,将“技术、劳动力、供应链”三方面作为保障先进制造业领导地位的核心要素。

在技术方面,报告明确了捕获智能制造系统的未来、开发世界领先的材料和加工技术、确保通过国内生产制造得到医疗产品、保持在电子设计和制造方面的领先地位、增加粮食和农业制造业机会等战略任务,以及智能和数字制造系统、先进工业机器人、人工智能(Artificial intelligence, AI)、工业网络安全、高性能材料、增材制造(Additive manufacturing, AM)、关键材料、低成本的分分布式制造、连续制造、组织和器官的生物制造、半导体设计工具和制造、新材料、器件和结构、食品安全加工、检测和可追溯性、食品安全生产和供应链、改善生物基产品的成本和功能技术等重点技术方向。报告提出了未来需要重点关注的 11 个技术领域,包

括:(1)先进传感、测量和过程控制(包括信息物理系统),或称智能制造、先进自动化;(2)先进材料设计与合成;(3)可视化、信息化和数字化制造技术;(4)可持续制造,包括高能效制造和再制造;(5)纳米制造(包括微尺度制造);(6)柔性电子制造;(7)生物制造;(8)增材制造;(9)先进制造和检测装备;(10)工业机器人;(11)先进成形(包括近净成形)与焊接技术。

报告还对《2012-战略》实施进展情况进行了评估,总结了 2012—2018 年期间在推进技术研发、完善教育与培训体系、建立多类型的公私合作机制、优化投资模式、提升公私投资强度和投资比例等方面取得的进展,肯定了“在美国制造”计划框架下,14 个制造创新研究所(Manufacturing innovation institute, MII)在促进技术发展、与中小企业合作、培训制造业劳动力等方面取得的成绩。

### 2.3 《2022-战略》报告

《2022-战略》报告勾勒了当时和未来一段时期内美国引领先进制造业的七大愿景,即发展经济、创造高质量的就业岗位、增强环境可持续性、应对气候变化、加强供应链、确保国家安全和改善医疗保健。为实现上述愿景,制定了开发和实施先进制造技术、壮大先进制造业劳动力队伍和提升制造业供应链韧性等三个相互关联的目标。确定了 11 项具体任务和 37 项技术和计划建议。11 项具体任务包括:(1)实现清洁和可持续制造,支持脱碳;(2)加快微电子学和半导体制造业创新速度;(3)实施先进制造技术,以支持生物经济,促进生物制造研究;(4)开发创新材料和加工技术;(5)引领智能制造未来;(6)扩大和丰富先进制造业人才库;(7)发展、扩大和促进先进制造业教育和培训;(8)强化雇主与教育机构之间的联系;(9)加强供应链互联互通;(10)努力减少制造业供应链的脆弱性,激发供应链的敏捷性;(11)加强和振兴先进制造业生态系统,协调和支持先进制造技术从实验室过渡到市场,建立和加强区域制造网络。

综上所述,通过 2012-2022 持续 10 年战略规划推进,从根本层面上,提升了美国制造业竞争力。因世界形势和内外部环境发生变化,三份战略报告尽管侧重点有所不同,但始终围绕确保美国先进制造技术在全球的领先地位这一总目标,并将开发和实施先进制造技术作为战略规划的优先任务,不断推进机器人、增材制造等技术的应用,从而实现美国制造业从传统制造向先进制造的转型。

### 3 先进制造的基本概念

#### 3.1 什么是先进制造

关于什么是先进制造,美国政府部门的报告先后给出了不同的诠释。2011 年的《美国的创新战略—确保我们的经济增长和繁荣》报告<sup>[15]</sup>将先进制造定义为:以新技术的形式把大量的智力资本投入制造过程,形成较低的成本、快速的定制、减少浪费和提高质量的结合。2012 年的《捕捉国内先进制造业竞争优势的总统报告》<sup>[16]</sup>提出,先进制造并不局限于新兴技术,还包括在一系列领域有全球竞争力的美国制造商和供应商的高效率、高集成、紧密控制的流程。在《2018-战略》报告中,先进制造是指一系列的活动。这些活动依赖于信息、自动化、计算、软件、传感和网络的使用和协调,以及/或利用由物理和生物科学,如纳米技术、化学和生物学,支持的前沿材料和新兴能力。既包括用新方法制造现有产品,也包括用新涌现的先进技术制造新产品。在《2022-战略》报告中,先进制造业被定义为“对现有产品制造方法的改进创新,以及利用先进技术生产新产品,包括依赖于信息、自动化、计算、软件、传感和网络的生产活动”。这些显然都是故意模糊的定义。因为一个领域的先进制造不同于另一个领域的先进制造,这意味着没有真正的方法来确定这个概念。例如,美国食品与药品管理局认为<sup>[17]</sup>,制药业的先进制造意味着使用创新技术来创造现有和新产品,是新的医疗产品制造技术的统称。

美国在 2020 年 10 月和 2022 年 2 月发布的《关键和新兴技术国家战略》<sup>[18]</sup>和更新后的《关键和新兴技术清单》<sup>[19]</sup>,均将先进制造列为“关键和新兴技术”之一。

#### 3.2 什么是先进制造技术

美国是首先提出“先进制造技术”(Advanced manufacturing technology, AMT)这一概念的国家。虽然先进制造技术迄今也没有一致公认的定义,但从广义上可以认为先进制造技术是在传统制造技术的基础上吸收了机械、电子、材料、能源、信息和现代管理等多学科、多专业的高新技术成果,将其综合应用于产品全生命周期中,实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产,是一项能够在动态、多变的市场中提高制造技术适应能力和竞争能力的总称。1993 年,美国政府批准了由联邦科学、工程与技术协调委员会(Federal Coordinating Council for Science, Engineering, and Technology, FCCSET)主持

实施的 AMT 计划<sup>[20]</sup>。1994 年, FCCSET 下属的工业和技术委员会先进制造技术工作组组织专家进行了有关先进制造技术分类目录的编制工作,这是对先进制造技术内涵的首次较系统的说明。根据这份目录,先进制造技术由主体技术群、支持技术群和制造基础设施三个部分组成。具体的技术又可分为两大类:一是数字化设计、制造、管理和系统集成技术;二是制造工艺技术,包括精密超精密加工技术、精密成形技术、先进焊接技术、表面工程技术、特种加工技术等。

#### 3.3 先进制造与传统制造的特征差异

传统制造被认为是获取原材料并创造出附加值的产品<sup>[21]</sup>。表 1<sup>[22]</sup>展示了传统制造与先进制造的特征差异。这仍然高度依赖于应用场景、行业类型和公司具体情况。然而,提高劳动技能、定制化、创新和高科技生产系统的共性表明,先进制造利用了最新的想法,根据客户需求量身定制,并随着新技术进步不断发展。

表 1 先进制造与传统制造的特征差异

传统制造业	特征	先进制造
大规模生产	生产策略	定制和以客户为中心
分层	组织结构	平坦、开放的信息流
充足的劳动力供给	劳动力供应标准	熟练/技术劳动力可用
非熟练和半熟练	技能要求	半熟练和技术技能
在职培训, 高中/职业学校	教育	大专或大学技术学位
每 1 个熟练工人对应 3 个半熟练工人	劳动力	每 4 个熟练工人对应一个半熟练工人
铸造、焊接、成形、钎焊、机加工等	生产技术	AM: 3D 打印、粉末床、材料沉积等
投资于生产	研发/创新	将收入再投资于研发
低成本	能源	低成本, 高可靠性
空间	基础设施需求	IT/数字基础设施
高速公路和/或铁路交通便利	物流	全球供应链管理
低犯罪率	生活质量标准	文化设施

总之,先进制造是将机械与 AI、IoT 和增强现实(Augmented reality, AR)等数字和“云计算技术”相结合,快速调整生产流程以适应不断变化的供应需求。先进制造技术不是一项技术,而是一项技术体系的创新和整合,需长时间、巨额、高风险的投入,既需要国家层面的战略规划,更需要政府主导的项目支持和相关机构的落地实施。

### 4 美国先进制造计划/项目概述

从早期的基础研究、技术研发到应用推广,美

国先进制造国家战略均是通过诸如国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)、商务部(Department of Commerce, DoC)、国防部(Department of Defense, DoD)、能源部(Department of Energy, DoE)等与先进制造相关的跨部门协作计划/项目进行具体实施<sup>[23]</sup>。这些计划/项目包括：NSF 先进制造和制造系统集成计划(Manufacturing systems integration, MSI)、未来制造计划(Future manufacturing, FM)、霍林斯制造扩展伙伴关系计划(The Hollings Manufacturing Extension Partnership, MEP)、制造创新国家网络计划(National network for manufacturing innovation, NNMI)、增材制造推进计划(Additive manufacturing forward, AM Forward)、DoD 制造技术计划(Manufacturing technology, ManTech)、先进制造技术联盟计划(Advanced Manufacturing Technology Consortia, AM Tech)、NIST 先进制造技术路线图计划(Advanced manufacturing technology roadmap program, MFG Tech), 等。

#### 4.1 NSF 先进制造和制造系统集成计划

从 2010 年开始, NSF 在其工程学部土木、机械和制造创新科学处(Civil, Mechanical and Manufacturing Innovation, CMMI)设立“先进制造计划”, 支持振兴美国制造业相关的基础研究。该计划加速了制造技术的进步, 重点是通过多学科研究, 从根本上改变制造能力、方法和实践。资助领域包括: 制造系统、材料加工、制造装备、方法论以及跨尺度制造等。鼓励在网络制造系统、制造机器和装备、材料工程及纳米制造等领域开展交叉研究。同时, 资助美国制造研究所开展创新性的基础研究<sup>[24-25]</sup>。

制造系统集成计划支持面向数字化转型带来的机遇和挑战的基础研究, 强调在全生命周期生态系统中设计和制造的数字集成。连接、自动化和安全协作是数字环境不可或缺的领域, 在价值创造过程中支持制造产品创新、系统实现和维护。重点资助方向包括: 用于制造系统(机器和/或人)集成和协作的数字表达、协议和/或过程; 智能自组织生产系统; 技术、机器和人的易用性、互操作性和无缝集成; 面向服务的体系结构和系统; 跨平台兼容和可用的数据集; 制造价值链内部和整个价值链的可靠和安全通信; 跨时间和空间的分布式制造系统集成, 包括整合传统和领先的设备和技术; 评估数字环境中整个生命周期外部性的影响和价值的方法。

#### 4.2 NSF 未来制造计划

NSF 从 2020 年开始实施 FM 计划。这是一个跨部门、跨领域的交叉计划, 其目标是支持未来从事基础研究和教育的科技人员, 研究面向未来几十年、处于技术成熟度最低端、能够消除限制当前制造业发展的科学、技术、教育、经济和社会障碍, 催生目前尚不存在的新的制造能力, 以及通过减少制造业对环境的影响, 增强美国在制造业中的领导地位。与此同时, FM 计划使新的制造业能够应对气候变化、全球流行病和健康差距、社会和经济鸿沟、边缘化人口和社区的基础设施不足以及环境可持续性等紧迫的社会挑战, 将需要在可持续合成和生产新材料、化学品、量子 and 半导体装置、综合系统以及质量有保证、产量高、成本合理的部件和系统的技术方面取得重大进展, 需要 AI 和机器学习、新的网络基础设施、数学和计算建模的新方法、新的动力学和控制方法、整合系统生物学、合成生物学和生物处理的新方法, 以及影响经济、劳动力、人类行为和社会的新方法。

在 2021 财年预算报告中<sup>[26]</sup>, NSF 将 FM 定义为基础研究, 以实现目前不存在或不可能实现的制造, 或以小的规模进行大规模生产。重点资助领域包括<sup>[27]</sup>: (1)未来网络制造, 即计算、网络、传感、AI 和制造的交叉研究, 探索利用新型传感器、执行器、设备和系统融合的数据基础设施的可用性, 低延迟和可靠的安全传感和通信, 云和边缘计算, 数据分析, 数学和计算建模, 不确定性量化与风险分析, 先进的控制, 以人为本的自动化、远程操作和人机交互, 数字孪生, AI 和机器学习提高了通用性和可靠性, 降低了制造过程和系统控制成本。机器学习和预测分析、自主性、无线通信、信息物理系统、IoT 以及先进的计算系统和服务的最新进展, 为重新思考、重新概念化、重塑和探索制造业的新可能性提供了强大的动力; (2)未来生态制造, 将使整体制造过程涵盖整个制造生命周期, 并考虑到能源消耗、健康和环境影响以及成本效益, 尽可能长时间地保持资源的使用, 在使用中提取其最大价值, 并在使用寿命结束时回收材料; (3)未来生物制造, 基于生物的生产和技术, 将使基于生物的治疗细胞和分子、化学品、药品、材料、聚合物和燃料的生产, 以及用于计算、信号处理和通信的基于生物的技术成为可能, 揭示和利用基本的生物学原理来解决生物制造中的规模挑战, 缩短从实验室到量产的研发周期; (4)以人为本的自动化, 即在自动化过程中优先考虑人的需求、能力和偏好, 以及人与机器

之间的优势和局限性, 创造一种和谐的人机协同关系, 一个安全、高效、愉快的工作环境。

### 4.3 霍林斯制造扩展伙伴关系计划

20 世纪 80 年代, 随着日本成为全球高科技产品制造中心, 美国意识到公共资源不仅应该关注基础科研活动, 也要关注任务导向的科研活动, 即联邦政府可以对产业推广项目进行直接投资。1988 年, 在南卡罗来纳州参议员弗里茨·霍林斯(Fritz Hollings)的提议和推动下, 美国出台了《综合贸易与竞争法案》, 正式提出联邦机构应肩负起技术的商业推广职责, 并于 1989 年率先在南加州、俄亥俄州、纽约建立了三个区域制造业技术中心<sup>[28]</sup>, 支持制造技术的转移, 以提高中小制造企业的生产力和技术能力。1998 年, 该计划被更名为霍林斯制造扩展伙伴关系(MEP)<sup>[29]</sup>。

目前, 该计划由 NIST 负责管理, 已在全美 50 个州及波多黎各建设了 51 个 MEP 中心。这些中心拥有约 450 个 MEP 服务站和 1400 多位值得信赖的顾问和专家, 致力于推动联邦技术成果在美国中小制造企业快速转化和应用, 提升中小制造企业竞争力, 提供全面的、经过验证的解决方案、促进增长。据统计<sup>[30]</sup>, 2021 年, MEP 计划帮助超过 3.4 万家美国制造企业实现了 144 亿美元的销售、节省成本 15

亿美元, 完成 52 亿美元的新投资, 并创造和保留了 125 746 个就业岗位。

### 4.4 制造创新国家网络计划

NNMI 是美国政府在 2012 年启动的一个制造业创新计划, 旨在加强美国制造业的竞争力和创新能力。其目标是建立一个全国性的制造业创新网络, 为美国制造业提供更多的资源和支持, 以应对全球竞争的挑战。该网络包括 DoC、DoD 和 DoE 以及其他六个联邦伙伴机构(即 NASA、NSF、卫生与公共服务部、农业部、教育部和劳工部)。NIST 专门设立先进制造业国家项目办公室(AMNPO), 负责协调 NNMI 计划。NNMI 由一系列的制造创新研究所(MII)组成, 致力于推动制造业的技术创新和人才培养, 促进企业之间的合作和信息共享, 加速新技术的商业化和推广。2019 年有 14 家研究所, 2020 年又新增了两所, 使 MII 的数量增加到 16 所, 如表 2 所示<sup>[31]</sup>。其中, 隶属于 DoC 1 个、DoD 9 个、DoE 6 个。2021 年, 16 家研究所与 2300 多个成员机构合作, 开展了 700 多个重大技术和劳动力应用研发项目, 培训了 9 万多名先进制造业培训人员, 州、工业界和联邦基金为这些活动捐助了 4.8 亿美元。NNMI 将美国工业界、学术界和政府聚集在一起,

表 2 16 家制造创新研究所(MII)基本情况一览表

MII 名称	网址	研究领域	成立日期	隶属部门
NIIMBL: 生物制药制 (Biopharmaceuticals)	<a href="https://niimbl.force.com/s/">https://niimbl.force.com/s/</a>	生物制药制造	2017 年 3 月	DoC
America Makes: 增材制造 (Additive Manufacturing)	<a href="https://www.americamakes.us/">https://www.americamakes.us/</a>	增材制造	2012 年 8 月	
MxD: 数字化制造与设计 (Manufacturing times Digital)	<a href="https://www.mxdusa.org/">https://www.mxdusa.org/</a>	数字化制造与设计	2014 年 2 月	
LIFT: 面向未来轻量化 (Lightweight Innovations for Tomorrow)	<a href="https://lift.technology/">https://lift.technology/</a>	轻量化金属材料制造	2014 年 2 月	
AIM Photonics: 集成光子 (Integrated Photonics)	<a href="https://www.aimphotonics.com/">https://www.aimphotonics.com/</a>	集成光子学制造	2015 年 7 月	
NextFlex: 柔性混合电子 (Flexible Hybrid Electronics)	<a href="https://www.nextflex.us/">https://www.nextflex.us/</a>	薄柔性电子器件及传感器 制造	2015 年 8 月	DoD
AFFOA: 高级功能织物 (Advanced Functional Fabrics)	<a href="https://affoa.org/">https://affoa.org/</a>	复杂的、集成的和网络化的 纤维、纱线和织物制造	2016 年 4 月	
BioFab USA: 先进再生制造 (Advanced Regenerative Manufacturing)	<a href="https://www.armiusa.org/">https://www.armiusa.org/</a>	人工组织及其相关的制造	2016 年 12 月	
ARM Institute: 先进机器人 (Advanced Robotics)	<a href="http://www.arminstitute.org/">http://www.arminstitute.org/</a>	面向制造的人工智能和机 器人技术	2017 年 1 月	
BioMADE: 生物工业制造 (Bioindustrial Manufacturing)	<a href="https://www.biomade.org/">https://www.biomade.org/</a>	可持续和可靠的生物工业 制造技术	2020 年 10 月	
Power America: 下一代电力电子 (Next Generation Power Electronics)	<a href="https://poweramericainstitute.org/">https://poweramericainstitute.org/</a>	宽带隙电力电子制造	2015 年 1 月	
IACMI: 先进复合材料 (Advanced Composites)	<a href="https://iacmi.org/">https://iacmi.org/</a>	纤维增强聚合物复合材料 制造	2015 年 6 月	
CESMII: 清洁能源智能制造 (Clean Energy Smart Manufacturing)	<a href="https://www.cesmii.org/">https://www.cesmii.org/</a>	智能制造、先进传感器、 过程控制	2016 年 12 月	
RAPID: 快速发展的过程强化部署 (Rapid Advancement in Process Intensification Deployment)	<a href="https://www.aiche.org/rapid">https://www.aiche.org/rapid</a>	面向制造的模块化化学过 程强化	2017 年 3 月	DoE
REMADE: 减少内涵能源和降低排放 (Reducing Embodied-energy And Decreasing)	<a href="https://remadeinstitute.org/">https://remadeinstitute.org/</a>	可持续制造	2017 年 5 月	
CyManII: 网络安全 (Cyber security)	<a href="https://cymanii.org/">https://cymanii.org/</a>	网络安全和节能制造	2020 年 9 月	

解决每个部门无法单独解决的跨部门制造业挑战，强调“创新技术的转变能力”（重点是商业转化，而不是技术创新）。正因如此，2016 年 9 月 NNMI 被重新命名为更加鲜明的 Manufacturing USA<sup>[32]</sup>，16 家研究所在 Manufacturing USA® 网络下联合起来形成了推动制造业创新的全国力量，完成共同的任务愿景，旨在通过技术、供应链、教育和劳动力发展方面的大规模公私合作，弥合技术研发的早期阶段和将技术推向市场的后期阶段之间的差距，提升中小企业的技术竞争力，确保美国在先进制造业的全球领导地位。每一个研究所都是独特技术的集中地，从整体上推动美国先进制造技术转化。

#### 4.5 增材制造推进计划

为提高供应链韧性，美国政府联合几家大型标志性美国公司于 2022 年 5 月推出了“增材制造推进”计划<sup>[33]</sup>，将通过提高美国中小型制造商的竞争力、创造和维持高薪制造业工作岗位，以及通过采用 AM 提高供应链弹性来帮助美国家庭降低成本。这是继 2013 年 2 月 12 日强调了 3D 打印技术的重要性之后<sup>[34]</sup>，时隔 9 年，美国政府再一次提出对 AM 技术应用的支持计划。该计划旨在从政策层面鼓励美国大型设备制造商 (Original equipment manufacturer, OEM) 支持中小型企业使用 3D 打印技术，帮助他们提升工业制造能力和解决供应链问题。OEM 明确承诺增加对 3D 打印零件的需求，同时为中小型企业提供人员培训、技术援助和参与标准制定的机会。

在 AM Forward 计划的支持下，美国正在汇聚优质的科研、企业、公共部门资源，建立起以数据为基石、算法为竞争力的 AM 发展战略。更重要的是，这种资源的汇聚是开放、跨国界的，美国在积极地发挥自身的影响力，从全球范围内吸引优质的创新力量，赋能其本国的制造业振兴计划。

随着 AM Forward 计划的发布，美国材料与试验协会 (American Society for Testing and Materials, ASTM) 国际 AM 卓越中心和创始行业成员宣布启动材料数据和标准化联盟 (Consortium for Materials Data and Standardization, CMDS) 计划。ASTM CMDS 的使命是将代表整个 AM 价值流的各行各业的关键组织聚集在一起，每年选择感兴趣的材料和特定应用属性 (例如静态、循环、热、腐蚀) 发布项目、执行各种项目，最终支持标准和数据集的开发。研究成果将支撑 ASTM 相关委员会制定的新 AM 标准和规范，以推动整个行业创建具有属性的和改进的材料规范和基于稳健数据集的结构要求。2022 年

8 月，ASTM 获得 NIST 资助的 30 万美元用于制定一个路线图<sup>[35]</sup>，包括 AM、机器人和自动化、大数据分析 and AI。此外，NIST 还开展金属基 AM 测量技术的研究<sup>[36]</sup>。通过资助项目的研究，NIST 正在促进行业解决采用 AM 的障碍，包括支持基于等效模型的测量科学、AM 材料的表征以及支持一致数据交换/表征新标准，发挥美国在 AM 测量和国际标准方面主导作用，解决重要的技术挑战，加速采用 AM 技术，赢得在本领域的全球竞争地位。

#### 4.6 DoD 制造技术计划

ManTech 是由美国陆军、海军、空军、国防后勤局以及国防部长办公室共同组织实施的一套组合项目，其目的是降低武器系统成本，缩短交付时间，增强系统性能，提高制造效率，降低金融和技术风险。该计划持续实施 50 多年来，为提升美军武器装备性能和质量以及经济可承受性、降低武器装备采办风险做出了巨大贡献，代表了美国国防制造技术的重点发展方向。早在 2003 年，ManTech 就开展了激光增材制造研究项目。近两年，又开展了如薄壁换热器验证、发动机叶片铸造型芯等应用研究项目，为推动美国 AM 产业发展奠定了基础。在最新战略规划中又新增“先进制造企业”重点领域，注重军工企业整体能力提升。目前，重点研究领域包括：(1) 金属成形与制造，重点关注材料加工、铸造、锻造、连接技术研发及应用，以及智能加工、轻质合金 (如钛合金粉末) 加工等；(2) 电子产品加工与制造，重点关注宽禁带和碳化硅装置、锂电池、红外传感器/激光器、微型/柔性显示器等的制造技术；(3) 复合材料加工与制造，重点关注高温构件、轻量化构件、舰船用复合材料构件以及其他特殊用途复合材料构件的制造技术；(4) 先进制造集成，重点关注能够在产品/系统的全生命周期内促进制造企业快速优质运作的技术、过程和实践，如三维技术数据包、智能制造、供应链网络建模与集成、产品/过程数据的互操作性等技术。

#### 4.7 先进制造技术联盟计划

产业技术联盟是提升一个国家全球竞争力的战略工具。为响应《美国创新战略 2011》，NIST 于 2013 年设立 AM Tech。这是一项由联邦政府财政支持的竞争性资助计划，旨在建立新的或加强现有的行业驱动的联盟，开发技术路线图，以解决高优先级的研究挑战，发展美国先进制造业，提高美国的创新能力和国际竞争力，解决美国所谓的创新生态系统对经济有害的弱点。该计划的目标是加速创新过程——从发现到发明再到开发新的制造工艺技术——从

而创造高技能、高工资的制造业就业岗位。

AM Tech 计划共资助了 35 个联盟<sup>[37-38]</sup>，如表 3 所示。其中，2013 年资助了 19 个联盟、2014

年资助了 16 个。联盟资助领域囊括了新一代信息技术、高端装备制造、生物、新能源、新材料等领域。

表 3 美国先进制造技术联盟一览表

资助年份	联盟名称	受资助机构
2013	可持续制造的电化学(EPSuM)	Ohio University
	先进复合材料创新(CAIIAC)	Georgia Tech Research Corporation
	金属铸造技术和工艺	American Foundry Society
	热力制造业先进技术	ASM International
	MTConnect 路线图战略	National Center for Defense Manufacturing and Machining
	钢铁优化高级仿真与可视化	Purdue University
	纸浆和纸制品可持续生产技术	Agenda 2020 Technology Alliance, Inc.
	智能风电(SMART Wind)	Distributed Wind Energy Association
	工程、测绘和科学发展(FIBERS)	University of Massachusetts Lowell
	光子学技术路线图	University of Rochester
	半导体供应链路线图	SEMATECH Inc.
	柔性电子制造研究所架构	AZ Board of Regents on behalf of Arizona State University
	先进连接和成形技术路线图	Edison Welding Institute
	电池(cell)制造	Georgia Research Alliance
	钣金成形创新路线图	Northwestern University
	电力电子生态系统	Power Electronics Industry Collaborative
	可持续制造创新	University of Kentucky Research Foundation
	增材制造材料	The Pennsylvania State University
	光子系统制造	International Electronics Manufacturing Initiative, Inc.
2014	流体动力先进制造	Regents of the University of Minnesota
	先进冻干技术	Purdue University
	功能玻璃制造创新	The American Ceramic Society
	雾化技术创新	ASM International
	大规模精密制造	University of North Carolina at Charlotte
	面向循环经济的再制造	Rochester Institute of Technology
	先进混合制造集成技术	Youngstown State University
	热塑性塑料结构制造	University of Maine System
	生物制药科技	University of Massachusetts Lowell
	燃气轮机先进生产和工程	Energy Florida, Inc.
	生物半导体发展	Semiconductor Research Corporation
	航空航天先进制造技术	Ohio Aerospace Institute
	加速推进大型结构	Louisiana Center for Manufacturing Sciences
	可持续分离过程	The American Chemical Society
	先进超导体制造	University of Houston
	生物医学装备(BIOCOR)	University of Southern California

4.8 NIST 先进制造技术路线图计划  
为推动 AM Tech 计划的具体实施，2021 年 6

月 17 日，NIST 宣布启动一项新的竞争性资助计划，即 MFG Tech，重点开展国家关键利益领域的技术路



线路图的制定，解决高优先级研究挑战，发展美国先进制造业。行业驱动的技术路线图是所有资助项目的关键组成部分。每个先进制造产业技术联盟将吸引各种规模的制造商、大学研究人员、行业协会和其他利益相关者，确定并优先考虑减少美国先进制造业增长共同障碍的研究项目<sup>[39]</sup>。

获资助的首批 4 个科研机构分别为<sup>[40]</sup>：(1)加州大学洛杉矶分校，将汇集微电子供应链的领导者制定一个路线图，以提高在集成单独制造的组件和先进封装技术方面的能力和竞争力；(2)北卡罗来纳州达勒姆半导体研究公司，制定先进封装技术和劳动力发展的整个价值链的路线图，支持新兴微电子应用，加速美国在半导体领域的领导地位；(3)弗吉尼亚州迪克坦塔联邦先进制造中心，通过识别整个扩展供应链中数字线程技术的关键弱点和差距，提高美国制造业供应链的韧性和能力；(4)普渡大学，扩大现有的先进冻干技术中心联盟技术路线图，包括新型冻干技术和新兴类别稳定药物(治疗)的应用，促进制药行业快速部署有效的药物和疫苗。2022 年 5 月 12 日，NIST 宣布向 6 个州的 7 个科研机构提供第二轮资金资助<sup>[41]</sup>，包括：(1)爱迪生焊接研究所有限公司(俄亥俄州)，通过部署先进材料、大规模 AM 和其他技术来提高灵活性和能源效率，降低成本，加速桥梁、风塔、管道和船舶等大型结构的制造；(2)休斯顿大学，确定与超导体和先进结构材料等各种平台技术相关的制造挑战和技术障碍，加速未来碳中性机器和系统的商业化；(3)ASTM 国际总部(宾夕法尼亚州)，指导建筑制造业采用先进技术，如 AM、机器人、自动化和 AI，以提高生产力、效率、灵活性和安全性；(4)凯斯西储大学，在整个产品生命周期内将 AI 和机器学习工具与传统材料科学和制造工艺知识相结合，为先进材料的未来制造提供全面的方法。(5)SRI International(加利福尼亚州)，支持量子技术制造路线图(Quantum Technology Manufacturing Roadmap, QTMR)，确定竞争前的开发和供应链差距，保持美国在量子相关领域的主导地位；(6)新罕布什尔大学，探索一种新的制造范式，以实现太空制造业的公平商业化、工业化和大众化；(7)国际电子制造倡议公司(北卡罗来纳州)，制定推进前沿 5G 和 6G 产品制造的路线图，加速美国下一代无线网络的发展。

## 5 先进制造技术展望

随着 AI、IoT、5G/6G 和大数据的发展和应用，

制造业也将进入智能和万物互联时代，不同机构均对未来先进制造技术的发展趋势进行了展望。如美国波士顿咨询公司 BCG 指出<sup>[42]</sup>，以下五种技术在未来几年最有可能影响制造业格局并提高生产率。一是自主机器人；二是集成计算材料工程；三是数字制造；四是 IoT 和柔性自动化；五是制造业中的 AI，其最常用的技术和产品包括工业机器人、机器视觉、智能产品、机器学习和协作机器人等。德勤和竞争力委员会在其联合发布的报告中指出<sup>[43]</sup>，“预测分析”是推动其未来竞争力的最重要的先进制造技术，其他还包括数字设计、仿真和集成、高性能计算、开源设计/用户直接输入、高性能材料、先进机器人、增材制造、AR、智能互联产品和智能工厂等其他改变全球制造业的突出技术。NSTC 先进制造小组委员会强调参与先进制造的联邦机构应广泛关注和大力支持的五大新兴技术领域<sup>[44]</sup>，他们是未来投资和扩大政府、行业和学术界合作的优先选项，包括：(1)先进材料制造，每隔 10 年启动与之相关的研究计划，如 2001 年启动的国家纳米技术计划，2011 年启动的材料基因组计划和 2021 年启动的纳米制造产业联名计划(Nanomanufacturing Signature Initiative, NSI)<sup>[45]</sup>；(2)工程生物学与生物制造；(3)面向再生医学的生物制造；(4)先进生物制品制造；(5)药品的连续生产。NSF 在其《2022-2026 财年战略规划》报告中指出<sup>[46]</sup>，随着材料、技术和系统的突破，未来五年，研究改变制造能力、方法和实践，重点资助先进制造与生物技术、合成生物学、可持续性、AI、机器人、传感技术、数据科学和计算建模等领域的交叉研究。以下六方面的技术更应引起关注，他们是未来制造的“硬核”技术。

### 5.1 智能制造与数字制造

人们普遍认为制造已是一个生态系统，其远远超越了工厂本身的概念。智能制造(Intelligent manufacturing, IM)源于 20 世纪 90 年代日本工业和国际贸易部发起组织的“智能制造系统(Intelligent manufacturing system, IMS)”国际合作研究计划<sup>[47]</sup>。“智能”则是描述企业在产品全生命周期中创建和使用数据/信息、实现柔性化的生产过程，以满足低成本和环境保护等相应要求。根据 2022 年 6 月 DoE 发布的《国家智能制造战略规划》<sup>[48]</sup>，智慧制造(Smart manufacturing, SM)是指先进传感、仪器、监测、控制和工艺/过程优化的技术和实践的組合，它们将信息和通信技术与制造环境融合在一起，实现工厂和企业中能量、生产率和成本的实时管理。智能制造不仅包括工厂本身，更关注环保和优化生产

率,降低能耗,是能应对动态全球化市场的柔性制造和生态系统。

《2022-战略》报告中明确表示“引领智能制造(SM)未来”,对发展 SM 提出了如下四点建议:一是数字制造,即使先进的传感、控制技术和机器学习应用于整个制造业,通过发展 DT 和制定数据兼容性标准推进智能制造,并实现无缝集成;二是制造业中的 AI,即优先考虑机器学习、数据访问、保密性、加密和风险评估方面的研发,开发最佳实践、标准和软件工具,以扩展新的商业模式,使生产数据货币化,同时维护数据安全并尊重知识产权;三是采用以人为本的技术,即促进新技术和标准的发展,通过实现安全高效的人机交互,扩大人与机器之间的协作,从而增强人的能力,增强生产工人的能力;四是制造业的网络安全,即制定标准、工具和试验台,发布、传播在智能制造系统中实施网络安全的指导方针,更换无法确保网络安全的生产设备。

从 2020 年起,美国制造工程师学会旗下的《Smart Manufacturing》杂志连续两年评选全球最有影响力的 20 位智能制造领域的专家,并由该杂志特约编辑伊岚·沃尔夫撰文逐一介绍其学术专长与成就<sup>[49-50]</sup>。当前,包括 AI/机器学习、AR/虚拟现实(VR)、自动化/机器人、AM/混合生产、大数据分析、云计算、数控加工、面向制造的设计、IoT/边缘计算、仿真/DT 已成为 SM 十个热门技术。马库·罗维奥在“智慧制造:制造的未来是数字化”一文中指出<sup>[51]</sup>,工业 4.0 技术连接机器人、3D 打印、云计算、AI 和 IoT,使 SM 成为可能,并以令人眼花缭乱的速度加速制造业创新。

数字制造(Digital manufacturing, DM)是与智能制造同时出现的另一个词汇,是指在 VR、计算机网络、快速成型和数据库等技术支持下,以客户需求为基础,对产品信息、工艺信息和资源信息进行分析、组织和重组,实现产品设计和功能仿真以及快速成型,进而满足客户需求和质量标准的快速制造过程<sup>[52]</sup>,是计算机系统在制造服务、供应链、产品和流程中的应用。DM 亦称之为数字化制造或制造业数字转型,强调应用数字化技术升级传统制造业,突出计算机技术应用的特征。DM 主要涉及三大领域,即产品生命周期、未来/智慧工厂和价值链管理。

数字制造技术将所有生产领域的系统和流程联系起来,创建了从设计到生产再到最终产品服务的集成制造方法<sup>[53]</sup>。

## 5.2 增材制造

AM 通常被称为 3D 打印,即通过连续沉积薄层材料,在数字模型的基础上创建三维物体。从美国在 2013 年国情咨文中提到 3D 打印、创建第一个 NNMI 创新机构——国家增材制造研究所,到 2018 年将 AM 技术列为关键出口管制清单,再到更新后的《2022-战略》对 AM 最详实的叙述,说明美国发展 AM 技术的决心和投资支持 AM 技术的意志,推动了 AM 技术走向更为广泛的应用领域,包括采用 AM 直接打印电子和独特的传感器结构、有望在未来直接培育出人体组织和器官的生物细胞 3D 打印、可以为航空航天领域带来可观的重量减轻和性能提升的单片高性能金属零件的 AM 等。

2021 年 1 月,DoD 发布了首份《国防部增材制造战略》报告<sup>[54]</sup>,明确了 AM 的内涵以及对国防战略改革的重要意义,为 AM 这一改变游戏规则的前沿技术在国防部范围内的发展与应用构建了共同的愿景。NIST 于 2022 年 9 月正式出版了《美国在高附加值增材制造领域的领导战略》报告<sup>[55]</sup>,对发展可能影响个人和公共安全,或导致深远的经济影响的零件级增材制造,从提高质量、降低成本和工艺在高附加值的应用角度,明确了未来研发的 6 大关键领域:(1)明确的要求;(2)经过验证的性能建模和分析能力;(3)特性良好的材料和为增材制造设计的材料;(4)已知测量不确定度的现场过程监测和控制;(5)量身定制的后处理和无损评估;(6)安全的、注册的、可互操作的数据。

《2022-战略》报告从以下六个方面提出了实施 AM 的具体路径:(1)纳米增材制造在电子产品领域的作用;(2)AM 在医疗药品领域的作用,集成 AI 系统等技术提高 AM 针对患者提供的解决方案;(3)AM 过程优化发展框架的重要性,包括开发用于提升过程监测能力的感应器和其他控制措施、开发用于提升质量控制水平的 AI 算法、开发用于 AM 的材料,以及将 AM 集成到智能制造平台;(4)AM 的柔性特征,可有效解决例如航空航天、国防等制造领域所遇到的供应链挑战;(5)公立与私营企业合作的重要性,以及中、高等教育对 AM 的推动作用;(6)AM 对人类可持续发展的重要性。

## 5.3 混合制造

混合制造是指同时利用 3D 打印操作(增材制造)和更常见的铣削/车削操作(减材制造)的加工工艺,在一个由多功能/多任务数控机床和增材制造模块组成的混合制造平台上进行,并具有自动 3D 扫描和尺寸控制能力<sup>[56]</sup>。它充分利用减材制造成形尺寸

精度高和表面质量好的优势，弥补 AM 工艺精度低的新复合加工方法，具备“打印”复杂形状的同时，还具有减材制造的精度和表面粗糙度，能快速制造出不同材料的高精度、高质量的复杂形状零件，特别有利于复杂形状、多品种、小批量零件的生产，以及通过激光修复技术提升零部件的再制造能力，因而具有广阔的应用前景，有望替代 CNC 机床。

#### 5.4 变形制造

变形制造又称机器人锻造，是利用传感器、热控制、制动成形、机器人操作系统和计算系统精确锻造金属物件，将金属铁匠的增量变形与智能机器人和机器人系统的精度和控制相结合，模拟了人类铁匠的技能和创造力，旨在将铁匠的古老技能与数字时代的机器人技术结合起来，使得金属件反复渐进地在压力机上准确定位并形成零件，如图 1 所示。这项技术的倡导者——俄亥俄州立大学材料科学与工程系教授格伦·达芙恩将其视作继计算机数控 (CNC) 及 3D 打印之后的“第三次数字制造浪潮”，将成为下一代数字制造技术<sup>[57]</sup>。机器人锻造打破了数控加工和 AM 的一些局限性，将铁匠的热机械变形与智能机器系统的高精度控制系统相结合。与数控加工相比，变形制造的成形技术可减少加工时的

材料损失；与 AM 相比，变形制造的锻造技术可以利用类型更广泛的金属材料并优化金属的性能；此外，由于采用了开式模锻，也可用机器锻造系统代替封闭式模锻和相应模具来生产较大的锻造部件(如飞机舱壁)。

#### 5.5 太空制造

太空制造(In Space Manufacturing, ISM)又称“微重力制造”，是一种在地球大气层外制造、组装和/或集成货物的过程，或是将原材料或可回收材料转化为太空中的组件、产品或基础设施<sup>[59]</sup>。它是 NASA “地外制造”计划的重要组成部分<sup>[60]</sup>，通常可分为 3 个高水平层次：一是面向空间管理系统，涉及与在轨建造有关的活动，这些活动将留在空间中使用；二是面向地球的 ISM，包括在微重力下制造性能更好的新材料和人体植入器官，并送回地球；三是月球、火星和小行星表面的 ISM(即原位资源利用)。ISM 的技术方法包括：增材制造、太空装配、无容器处理、凝固、回收和超薄涂层等；可生产的产品包括：氟化物光纤的玻璃材料、人体器官/植入物、碳纳米管、半导体、乳胶球、备件、建筑材料、太阳能电池/阵列、天基太阳能发电站、大型太空望远镜、粒子对撞机/加速器等。

随着太空 AM 能力的不断增强，通过在微重力环境中开发新的 AM 工艺，以建造替换零件和空间基础设施，实现机器人与太空 AM 工艺的集成，并进行深空探索。优先考虑微重力条件的太空生物制造，实现太空可持续的食品生产和回收。进一步提高太空任务能力举措还包括用于打印电子设备和传感器的微重力 AM 技术、用于更换和维修的金属部件，以及用于基础设施的月球风化层 3D 打印技术。

#### 5.6 量子制造

基于量子计算、传感和通信的强大潜力已经在初始功能的量子系统中得到了证明，这些系统可以达到传统技术无法实现的应用和解决方案。然而，量子系统尤其是量子计算机非常复杂，通常需要极端的操作条件，这会影响产品的设计、稳定性和成本。需要创新的方法来制造包含量子系统的量子器件，以满足在低于 1 K 温度下潜在操作的苛刻要求，以及器件制造和异构集成的极端精度。

量子制造作为 NSF 探索性研究早期概念资助项目，在其 2022 年申请指南中鼓励开展如下研究<sup>[61]</sup>：(1)在金刚石和其他材料的所有三个维度中控制引入特定缺陷，与它们的目标功能性能保持一致；(2)低温下无缺陷介质和低损耗超导薄膜的沉积；(3)源自过程相关源的自旋量子位的退相干源；(4)大面

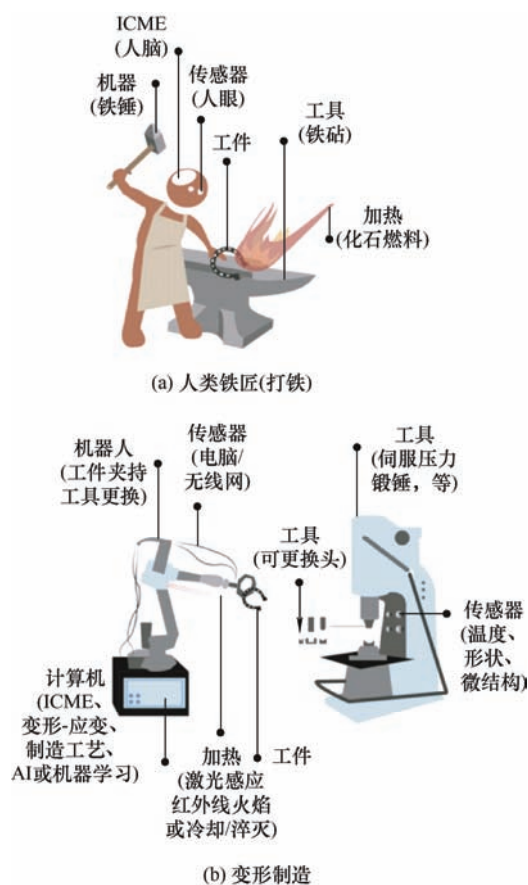


图 1 变形制造与人类铁匠(打铁)的比较<sup>[58]</sup>

积、高通量表征量子材料和器件的新方法；(5)通过技术探索新材料平台及其制造，如外延生长使保护和利用固体环境中的量子相干性途径成为可能；(6)实现量子与传统电子的 3D 集成的关键工艺，如高纵横比通孔和倒装凸块芯片键合工艺；(7)量子器件与光子学的混合集成用于量子信息的分布；(8)在真空中集成量子、光子和电子功能的新包装方法；(9)适用于量子计算机、传感器和系统的自动可扩展制造设备的方法。

## 6 结 论

(1) 为振兴制造业，美国从 2012 年-2022 年持续从国会立法、行政指令、政策规划、资金支持等方面制定了较为切实可行的行动方案，出台了一系列的政策措施，形成了“一揽子”解决方案，鼓励创新成果在美国中小企业落地转化。

(2) 先进制造技术是推动制造业可持续发展的根本保证。面对人类的生命健康和粮食短缺，以及地球资源匮乏和环境恶化等挑战，大力发展智能制造、生物制造、增材制造、太空制造、量子制造等前沿领域和方向，并开发复合制造新模式。

(3) 数字化转型是振兴制造业的必由路径之一。基于 AR、IoT、AI 的制造将是未来先进制造技术的重要方向。同时，应重点关注面向多材料的增材制造、机器人和自动化技术。

## 参 考 文 献

- [1] 阮晓东. 美国启动“制造业回归”的思考[J]. 新经济导刊, 2017(6): 56-60.  
RUAN Xiaodong. Consideration on the Launch of the “Return of Manufacturing Industry” in the United States[J]. New Economy Weekly, 2017(6): 56-60.
- [2] 胡鞍钢, 任皓, 高宇宁. 国际金融危机以来美国制造业回流政策评述[J]. 国际经济评论, 2018(2): 112-130.  
HU Angang, REN Hao, GAO Yuning. Review of the US’ manufacturing reshoring policy in post-crisis era[J]. International Economic Review, 2018(2): 112-130.
- [3] 王睦欣. 美国制造业发展及回流战略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.  
WANG Kuixin. A study on the development and reflow strategy of american manufacturing[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [4] The America COMPETES Act, passed by Congress in December 2010 and signed into law by President Obama in January 2011, contains provisions that support advanced manufacturing [EB/OL]. [2023-08-08]. [https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc491076/m1/1/high\\_res\\_d/R41231\\_2010Dec21.pdf](https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc491076/m1/1/high_res_d/R41231_2010Dec21.pdf).
- [5] Report to the President on Ensuring American Leadership In Advanced Manufacturing (2011) [EB/OL]. [2023-06-22]. <https://www.manufacturing.gov/sites/default/files/2018-01/pcast-advanced-manufacturing-june-2011.pdf>.
- [6] A National Strategic Plan for Advanced Manufacturing [EB/OL]. [2023-06-22]. [http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/iam\\_advancedmanufacturing\\_strategicplan\\_2012.pdf](http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/iam_advancedmanufacturing_strategicplan_2012.pdf).
- [7] Subcommittee on Advanced Manufacturing Committee on Technology of the NSTC. Strategy for American Leadership in Advanced Manufacturing [EB/OL]. [2023-05-23]. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2018/10/Advanced-Manufacturing-Strategic-Plan-2018.pdf>.
- [8] National Strategy for Advanced Manufacturing [EB/OL]. [2023-05-27] <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/10/National-Strategy-for-Advanced-Manufacturing-1007202.2.pdf>.
- [9] 李瑞, 梁正. 发展型网络国家何以跨越科技成果转化的“死亡之谷”—美国先进制造产业联盟解读[J]. 科技进步与对策, 2021, 38(23): 1-9.  
LI Rui, LIANG Zheng. How can developmental network countries cross the “Valley of Death” in science and technology transformation: an interpretation of the u.s.a advanced manufacturing industry alliance[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2021, 38(23): 1-9.
- [10] NIST. Manufacturing Industry Statistics : Applied Economics in US Manufacturing [EB/OL]. [2023-07-26]. <https://www.nist.gov/el/applied-economics-office/manufacturing/total-us-manufacturing/manufacturing-economy/total-us>.
- [11] 韩文艳, 熊永兰, 张志强. 21 世纪以来美国制造业演变特点及其启示[J]. 世界科技研究与发展, 2022, 44(1): 108-127.  
HAN Wenyan, XIONG Yonglan, ZHANG Zhiqiang. Evolution characteristics and enlightenment of American manufacturing industry since the 21st century[J]. World Sci-Tech R&D, 2022, 44(1): 108-127.
- [12] MIT News. Hockfield to co-chair U.S. manufacturing partnership [EB/OL]. [2023-05-28]. <https://news.mit.edu/2011/hockfield-obama-manufacturing-0624>.

- [13] 焦国伟. 全球金融危机后美国制造业发展战略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- JIAO Guowei. Research on the strategy of revitalizing u.s. manufacturing after the global financial crisis[D]. Changchun: Jinlin University, 2019.
- [14] NIST. Manufacturing Industry Statistics [EB/OL]. [2023-07-26]. <https://www.nist.gov/el/applied-economics-office/manufacturing/total-us-manufacturing/manufacturing-economy/total-us#> : ~ : text=In%202021%2C%20Manufac-turing%20contributed%20%242.3,an%20estimat-ed%2024%20%25%20of%20GDP.
- [15] National Economic Council, Council of Economic Advisers, and Office of Science and Technology Policy. A Strategy for American Innovation: Securing Our Economic Growth and Prosperity. February, 2011 [EB/OL]. [2023-05-28]. <https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/uploads/InnovationStrategy.pdf>.
- [16] Executive Office of the President, President's Council of Advisors on Science and Technology. Report to the President on Capturing Domestic Competitive Advantage in Advanced Manufacturing [EB/OL]. [2023-05-28]. [https://www.manufacturing.gov/sites/default/files/2018-01/pcast\\_amp\\_steering\\_committee\\_report\\_final\\_july\\_27\\_2012.pdf](https://www.manufacturing.gov/sites/default/files/2018-01/pcast_amp_steering_committee_report_final_july_27_2012.pdf).
- [17] Advanced Manufacturing: FDA news, events, and funding opportunities related to advanced manufacturing [EB/OL]. [2023-05-28]. <https://www.fda.gov/emergency-preparedness-and-response/mcm-issues/advanced-manufacturing>.
- [18] The National Strategy for The Critical and Emerging Technologies list. October 2020 [EB/OL]. [2023-05-28]. <https://nps.edu/documents/115559645/121916825/2020+Dist+A+EOPOTUS+National+Strategy+for+Critical+%26+Emerging+Tech+Oct+2020.pdf/1543be15-a2ae-3629-7a45-aabdecaedb84?t=1602805142602>.
- [19] Critical and emerging technologies List Update. February 2022 [EB/OL]. [2023-05-28]. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/02/02-2022-Critical-and-Emerging-Technologies-List-Update.pdf>.
- [20] SUN Yanling, and CHEN Ning. Computer Graphic Study of Advanced Manufacturing Technology with Chaos Characteristic Analysis. Journal of Physics: Conference Series 2023 (2021) 012024. doi: 10.1088/1742-6596/2023/1/012024 [EB/OL]. [2023-07-23]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2023/1/012024/pdf>.
- [21] KOENEKE B. What Is Advanced Manufacturing? A Quick Guide [EB/OL]. [2023-07-24]. <https://www.projectmanager.com/blog/what-is-advanced-manufacturing>.
- [22] CHRISTIAN C. What is Advanced Manufacturing? [EB/OL]. [2023-07-24]. <https://www.thomasnet.com/articles/services/what-is-advanced-manufacturing/>.
- [23] Explore Manufacturing Programs [EB/OL]. [2023-07-26]. <https://www.manufacturing.gov/>
- [24] National Science Foundation. FY 2021 Budget Request to Congress, May 7, 2009 [EB/OL]. [2023-05-21]. [https://www.nsf.gov/about/budget/fy2010/pdf/entire\\_fy2010.pdf](https://www.nsf.gov/about/budget/fy2010/pdf/entire_fy2010.pdf).
- [25] National Science Foundation. Dear colleague letter: supporting fundamental research to enable innovation in advanced manufacturing at manufacturing USA institutes [EB/OL]. [2023-05-21]. <https://www.nsf.gov/pubs/2017/nsf17088/nsf17088.jsp>.
- [26] National Science Foundation. FY 2021 budget request to congress, February 10, 2020 [EB/OL]. [2023-05-28]. <https://www.nsf.gov/about/budget/fy2021/pdf/fy2021budget.pdf>.
- [27] National Science Foundation. Future manufacturing (FM): Program Solicitation, NSF 23-550 [EB/OL]. [2023-05-21]. <https://www.nsf.gov/pubs/2023/nsf23550/nsf23550.pdf>.
- [28] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2013, strengthening american manufacturing: The role of the manufacturing extension partnership: Summary of a symposium. Washington, DC: The National Academies Press [EB/OL]. [2023-05-28]. <https://doi.org/10.17226/18329>.
- [29] 王海燕, 梁洪力, 张寒. 美国制造拓展伙伴计划的新动向及其对我国创新方法工作的启示[J]. 中国软科学, 2015(1): 59-66.
- WANG Haiyan, LIANG Hongli, ZHANG Han. The new trend in MEP of U. S. and its policy, implications to the work of disseminating innovation method in China [J]. China Soft Science, 2015(1): 59-66.
- [30] The MEP Advisory Board. Annual report 2021 [EB/OL]. [2023-07-26]. [https://www.nist.gov/system/files/documents/2022/05/12/MEP%20Advisory%20Report\\_2021\\_WEB.pdf](https://www.nist.gov/system/files/documents/2022/05/12/MEP%20Advisory%20Report_2021_WEB.pdf).
- [31] NIST. Manufacturing USA. 2019/2020 highlights report [EB/OL]. [2023-07-24]. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ams/NIST.AMS.600-6.pdf>.
- [32] 朱焕焕, 陈志. 从“国家制造业创新网络”到“美国制造”——美国制造业战略的延续与变化[J]. 全球科技经

- 济瞭望, 2019, 34(2): 1-6.
- ZHU Huanhuan, CHEN Zhi. From "National network for manufacturing innovation" to "Manufacturing USA": the continuations and changes of American manufacturing strategy[J]. Global Science, Technology and Economy Outlook, 2019, 34(2): 1-6.
- [33] FACT SHEET. Biden administration celebrates launch of AM forward and calls on congress to pass bipartisan innovation act [EB/OL]. [2023-05-28]. [https :  
//www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/  
2022/05/06/fact-sheet-biden-administration-celebrates-lau  
nch-of-am-forward-and-calls-on-congress-to-pass-bipartis  
an-innovation-act/# : ~ : text=AM%20 Forward %  
20will%20help%20lower%20costs%20for%20American,s  
upply%20chain%20resilience%20through%20adoption%  
20of%20additive%20manufacturing.](https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/05/06/fact-sheet-biden-administration-celebrates-launch-of-am-forward-and-calls-on-congress-to-pass-bipartisan-innovation-act/#:~:text=AM%20Forward%20will%20help%20lower%20costs%20for%20American,supply%20chain%20resilience%20through%20adoption%20of%20additive%20manufacturing.)
- [34] Remarks by the President in the State of the Union Address [EB/OL]. [2023-05-28]. [https :  
//obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2013/02/  
12/remarks-president-state-union-address#annotations :  
8492936.](https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2013/02/12/remarks-president-state-union-address#annotations : 8492936)
- [35] ASTM. International receives award to develop construction sector technology roadmap [EB/OL]. [2023-05-28]. [https :  
//newsroom.astm.org/newsroom-  
articles/astm-international-receives-award-develop-constr  
uction-sector-technology-roadmap.](https://newsroom.astm.org/newsroom-articles/astm-international-receives-award-develop-construction-sector-technology-roadmap)
- [36] NIST. Awards nearly \$4 million to support metals-based additive manufacturing [EB/OL]. [2023-05-28]. [https :  
//www.nist.gov/news-events/news/2022/07/nist-awards-ne  
arly-4-million-support-metals-based-additive-manufacturi  
ng.](https://www.nist.gov/news-events/news/2022/07/nist-awards-nearly-4-million-support-metals-based-additive-manufacturing)
- [37] Advanced manufacturing technology consortia (AMTech) program [EB/OL]. [2023-05-28]. [https :  
//www.nist.gov/  
oam/programs/advanced-manufacturing-technology-conso  
rtia-amtech-program.](https://www.nist.gov/oam/programs/advanced-manufacturing-technology-consortia-amtech-program)
- [38] 赵作权, 郝赞聪. 基于网络组织机制的美国先进制造技术联盟计划与案例研究[J]. 科技导报, 2021, 39(7): 20-27.
- ZHAO Zuoquan, HAO Yuncong. American advanced manufacturing technology consortia program and examples : A perspective of network form of organizations[J]. Technology Review, 2021, 39(7): 20-27.
- [39] Advanced manufacturing technology roadmap(MFGTech) program. 2022-09-08 [EB/OL]. [2023-05-28]. [https :  
//www.nist.gov/oam/programs/advanced-manufacturing-te  
chnology-roadmap-mfgtech-program.](https://www.nist.gov/oam/programs/advanced-manufacturing-technology-roadmap-mfgtech-program)
- [40] NIST. Awards funding to strengthen advanced manufacturing for microelectronics , digital and biomanufacturing. [EB/OL]. [2022-04-01]. [https :  
//www.nist.gov/news-events/news/2022/04/nist-awards-fu  
nding-strengthen-advanced-manufacturing-microelectroni  
cs.](https://www.nist.gov/news-events/news/2022/04/nist-awards-funding-strengthen-advanced-manufacturing-microelectronics)
- [41] NIST. Awards funding to strengthen advanced manufacturing for critical and emerging technologies [EB/OL]. [2022-05-12]. [https :  
//www.nist.gov/news-  
events/news/2022/05/nist-awards-funding-strengthen-adva  
nced-manufacturing-critical-and-emerging.](https://www.nist.gov/news-events/news/2022/05/nist-awards-funding-strengthen-advanced-manufacturing-critical-and-emerging)
- [42] HAROLD L , MICHAEL Z, JUSTIN R. Why advanced manufacturing will boost productivity [EB/OL]. [2023-05-28]. [https :  
//www.bcg.com/publications/ 2015/  
lean-and-manufacturing-production-why-advanced-manuf  
acturing-boost-productivity.](https://www.bcg.com/publications/2015/lean-and-manufacturing-production-why-advanced-manufacturing-boost-productivity)
- [43] Deloitte and Council on Competitiveness. advanced technologies initiative manufacturing & innovation. 2015 [EB/OL]. [2023-05-28]. [https :  
//manufacturing.report/  
Resources/Whitepapers/1145b484-eefa-4522-adc8-912f74  
a2393d\\_us-indprod-deloitte-and-council-on-competitvene  
ss-advanced-tech-report.pdf.](https://manufacturing.report/Resources/Whitepapers/1145b484-eefa-4522-adc8-912f74a2393d_us-indprod-deloitte-and-council-on-competitiveness-advanced-tech-report.pdf)
- [44] Subcommittee for Advanced Manufacturing of NSTC. Advanced manufacturing : A snapshot of priority technology areas across the federal government[EB/OL]. [2023-05-28]. [https :  
//www.mrs.org/docs/default-source/  
Advocacy-Policy/Resources/advanced-manufacturing---a-  
snapshot-of-priority-technology-areas.pdf?sfvrsn=0.](https://www.mrs.org/docs/default-source/Advocacy-Policy/Resources/advanced-manufacturing---a-snapshot-of-priority-technology-areas.pdf?sfvrsn=0)
- [45] National Nanotechnology Initiative Supplement to the President's 2021 Budget. A report by the nanoscale science, engineering, and technology subcommittee, committee on technology of the national science & technology council. [EB/OL]. [2023-05-28]. [https :  
//www.nano.gov/sites/default/files/NNI-FY21-Budget-  
Supplement.pdf.](https://www.nano.gov/sites/default/files/NNI-FY21-Budget-Supplement.pdf)
- [46] National Science Foundation. NSF strategic plan for fiscal years 2022-2026 [EB/OL]. [2023-05-28]. [https :  
//www.nsf.gov/pubs/2022/nsf22068/nsf22068.pdf.](https://www.nsf.gov/pubs/2022/nsf22068/nsf22068.pdf)
- [47] OKABE T, BUNCE P, LIMOGES R. Next generation manufacturing systems (NGMS) in the IMS program. In: OKINO N, TAMURA H, FUJII S, editors. Advances in Production management systems: Perspectives and future challenges [DB/CD]. Boston: Springer Nature, 2013.
- [48] United States Department of Energy. National smart manufacturing strategic plan: to facilitate more rapid development , deployment and adoption of smart

- manufacturing technologies[EB/OL]. [2023-06-22]. [https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-07/National%20Smart%20Manufacturing%20Strategic%20Plan%20-%202022\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-07/National%20Smart%20Manufacturing%20Strategic%20Plan%20-%202022_0.pdf).
- [49] ILENE W. The 20 most influential professors in smart manufacturing [EB/OL]. [2023-06-22]. <https://www.sme.org/technologies/articles/2020/june/the-20-most-influential-professors/>.
- [50] ILENE W. The 20 Most Influential Academics [EB/OL]. [2023-06-22]. <https://www.sme.org/technologies/articles/2021/may/the-20-most-influential-academics-2021/>.
- [51] MARKKUS R. Smart manufacturing: the future of making is digital [EB/OL]. [2023-05-28]. <https://redshift.autodesk.com/articles/smart-manufacturing>.
- [52] JERIPULUIA S, SAMATHAM M, et al. A critical review on digital manufacturing[J]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2016, 3(9): 54-60.
- [53] TWI. What is digital manufacturing? (A Definitive Guide) [EB/OL]. [2023-05-30]. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-digital-manufacturing>
- [54] Department of Defense Additive Manufacturing Strategy [EB/OL]. [2023-05-28]. <https://nps.edu/documents/115559645/121916825/2021+Dist+A+OSD+Additive+Manufacturing+Strategy+Jan+2021.pdf/814f5fe9-fe15-7b0e-17c8-53cc18e805f9?t=1611704140416>.
- [55] MARK B, SHAWN M. The strategy for american leadership in high-consequence additive manufacturing [EB/OL]. [2023-07-26]. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ams/NIST.AMS.600-10.pdf>.
- [56] GRZESIK W. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: A review[J]. Journal of Machine Engineering, 2018,18(4): 5-24.
- [57] Metamorphic Manufacturing, or Robotic Blacksmithing-A Vision for a New Technology [EB/OL]. [2023-05-28]. <https://lift.technology/wp-content/uploads/2016/06/Metamorphic-Manufacturing-short-FINAL.pdf>.
- [58] DAEHN G, TAUB A. Metamorphic manufacturing (a.k.a. robotic blacksmithing): The third wave of digital manufacturing. national network for manufacturing innovation[R]. New York: Lightweight Metals Institute, 2018.
- [59] ERIK K. In-space manufacturing - 2022 industry survey and commercial Landscape [EB/OL]. [2023-05-28]. [https://www.researchgate.net/publication/364107062\\_In-Space\\_Manufacturing\\_-\\_2022\\_Industry\\_Survey\\_and\\_Commercial\\_Landscape/link/6339e4839cb4fe44f3f5d5ea/download](https://www.researchgate.net/publication/364107062_In-Space_Manufacturing_-_2022_Industry_Survey_and_Commercial_Landscape/link/6339e4839cb4fe44f3f5d5ea/download).
- [60] NASA. In-space manufacturing [EB/OL]. [2023-05-28]. <https://www.nasa.gov/oem/inspacemanufacturing>.
- [61] NSF. Dear colleague letter, quantum manufacturing [EB/OL]. [2023-05-28]. <https://new.nsf.gov/funding/opportunities/quantum-manufacturing>.

作者简介：王国彪(通信作者)，男，1964 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为机械优化设计、智能制造、科技战略与政策规划。

E-mail: gbwang@tju.edu.cn

宋建丽，女，1969 年出生，博士，教授，博士研究生导师。主要研究方向为先进制造技术。

E-mail: songjianli@bistu.edu.cn