

编者按 2024 年 8 月,时任国际生产工程院(CIRP)主席的房丰洲教授在第 73 届 CIRP 大会上以《制造变革性发展的新时代》为题作开幕致辞,致辞以传承性的历史纵深感与前瞻性的技术洞察力引发制造领域研究人员的广泛共鸣。致辞不仅追溯了古代东西方文明对“物质本质”的哲学共通性,更以量子计算、原子及近原子尺度制造(亦即原子级制造)、人工智能等前沿技术为锚点,勾勒出一幅由“制造范式跃迁”驱动的未来图景。这篇演讲的独特价值在于,它既是对 CIRP 七十余年学术使命的传承,更是对全球制造业迈进“技术革命临界点”的宣言,其背后隐含的范式逻辑亟待去深入挖掘。本刊曾于 2020 年 5 月发表房丰洲教授的《原子及近原子尺度制造——制造技术发展趋势》一文,该文一经刊发即受到广泛关注,当年 11 月,“极紫外光原子尺度可控去除的物理机制”入选中国机械工程学会“机械工程重大科学问题”,2021 年底出版的《机械工程学科发展战略报告(2021—2035)》将原子级制造列为优先发展领域。房丰洲教授在 CIRP 大会的致辞是他对制造发展内在规律长期思考的凝炼,其内容兼具技术洞见与人文关怀,提示我们:当代制造技术的变革不仅是工具的革新,更是认知的革命。当人类首次在原子尺度实现物质的精确操控时,制造业的终极目标便已跨越“生产产品”层面,迈向追求重塑物质存在的本体论意义。这种转变要求研究者兼具科学家的严谨与哲学家的思辨,在量子世界的概率论与宏观世界的确定性之间构筑新的技术文明。致辞所展现的谦逊姿态恰是对这个探索时代的精准注解——在已知与未知的边界上,制造技术的每一次突破都是对人类认知疆域的进一步拓展。为飨读者,本刊特刊出该英文致辞的中文译稿,并特邀房丰洲老师撰写解读文章,既为阅读导引,亦是他制造理念的进一步阐释。

中图分类号:TH-3

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.04.026

制造发展的新趋势

——解读《制造变革性发展的新时代》

房丰洲

0 引言

成立于 1951 年的国际生产工程院(CIRP)是生产工程领域最权威的学术机构,总部设在法国巴黎,现有成员包括来自全球数十个国家的 600 余名领军科学家(leading professors)和工业领袖(industrial leaders)。2024 年 8 月 19 日,第 73 届国际生产工程院大会正式开幕,我在会上发表了题为《制造变革性发展的新时代》的开幕式致辞。致辞回顾了 CIRP 的发展历史与传承,汇报了过去一年 CIRP 的工作进展,并展望了未来制造科学与技术的发展方向。致辞一经发表,便获得热烈反响和持续的积极反馈,我想这对促进国际学术交流和构建跨文化共识是有益处的。这场盛会在地中海文明的发源地希腊塞萨洛尼基召开,本身就承载着跨越古今、文明互鉴的象征意义。我在撰写致辞时尝试用一条连接历史规律与技术前沿的线索,将古希腊原子哲学、中国道家宇宙观与当代制造技术并置,隐含了制造科学从经验技艺(制造范式 I,简称制造 I)到机器控制(制造范式 II,简称制造 II),再到原子操控(制造范式 III,简称制造 III)的演化脉络^[1-3]。致辞中明确了原子级

制造的量子效应是制造 III 的核心命题。我尝试用这种从哲学思辨到技术革命的叙事方式,开辟一个理解制造科学的新维度:制造变革不仅是技术迭代,更是人类认知边界与文明形态的突破。事实上,通过研究制造范式跃迁与文明转型升级的深层关联,可清晰追溯制造业重塑人类文明发展进程的底层逻辑。

应《中国机械工程》之邀,我从不同维度对致辞进行解读,并加入一些进一步思考。

1 历史哲学维度:东西方文明的制造思想共鸣与范式转型

公元前 5 世纪,古希腊的德谟克利特提出“原子是万物根基”,而中国的老子通过“道生一,一生二,二生三,三生万物”(《道德经》第四十二章)揭示宇宙生成逻辑。李约瑟在《中国科学技术史》第二卷中指出,道家思想的“道”作为未分化整体(undivided whole)的概念,本质上不同于西方原子论的机械分割观,但是其层级衍生规律(“三生万物”的递进结构)确实为技术演化提供了离散化认知框架(discretization epistemology)^[4]。葛荣

晋^[5]进一步论证,老子提出的“三生万物”中的“三”并非固定数值,而是象征“从简单到复杂的离散跃迁节点”。尽管古希腊原子论强调物质基元的不可分割性,道家思想侧重生成过程的阶段性,但二者共同构成了“物质控制由宏观连续向微观离散演进”的哲学基础。这种跨越文明的哲学共识,本质上指向人类对制造本质的终极追问:如何通过最小单元的控制实现物质形态的精确重构。当代原子级制造并非凭空出现,而是对古老哲学命题在技术维度的历史性回应。

这些哲学观点为制造技术铺就了演进之路:从依赖经验积累(制造Ⅰ)到如今精准操控原子(制造Ⅲ),本质上是千年智慧在当代的技术显现。古希腊的原子论与青铜时代的“百炼钢”技艺虽分属理论与实践,却共同揭示了“微观控制决定宏观性能”的底层逻辑。致辞中特别强调的苏格拉底“无知之知”,则是范式转型的认知前提——唯有承认对物质本质的认知局限时,方能突破经典力学的连续介质假设(制造Ⅱ的根基),直面原子尺度下离散化制造的技术革命。这种历史纵深与哲学思辨的双重审视,不仅揭示原子级制造在文明进程中的历史必然性,更将技术变革升华为对人类认知边界的突破。

2 技术变革维度:从“宏观机器运动控制”到“原子级物质操控”的范式革命

致辞中提到的数字制造、增材制造、生物制造等不同制造模式的发展趋势指向一个共同命题:制造业正从“机器可复现的精度极限”转向“原子尺度的精准操控”。这种技术跃迁的背后是制造范式从“连续介质假设”到“离散量子态”的认知重构。传统制造(制造Ⅱ)基于材料连续性,其工艺精度受限于机床误差与刀具磨损等宏观因素;而原子级制造(制造Ⅲ)的新兴技术群(如原子层沉积、单原子操纵等)则建立在量子隧穿效应、电子自旋调控等原子尺度机制上。致辞提出的“原子尺度物质操控”,实为对“德漠克利特之问”的技术回应——通过电场、磁场、化学势等量子层面的调控,人类首次具备“拨动单个原子”的能力。这种制造过程与设计目标之间的零偏差映射的制造模式,不仅将芯片制程推向埃米级($1\text{\AA}=0.1\text{ nm}$),更可能催生拓扑量子器件^[6]、DNA纳米机器人^[7]等颠覆性产物,重新定义“制造”的边界。

作为制造Ⅲ的核心驱动力,“人工智能”与“量子计算”共同支撑原子级制造的“认知—执行”闭环,将理论层面的量子级操控转化为工程实践。

人工智能具备“优化决策”的能力,为原子级制造提供了动态调控的“神经中枢”。例如,在原子层沉积工艺中,传统方法需依赖人工反复调整参数(如温度、气体流速)以控制沉积质量,而人工智能可通过监测处理原子级沉积过程的海量多维度微观数据(如表面吸附率、能量分布),预测工艺效果并修正工艺偏差,缩短原本耗时的试错过程,显著提升制造效率与精度。同时,生成式学习、强化学习等人工智能方法则有望提升原子级操控在复杂环境的适应性和鲁棒性。与此同时,量子计算在特定算法或场景下展现出的“无与伦比的算力”,则直接对应“量子理论替代经典力学”的制造Ⅲ核心特征:当加工尺度逼近原子直径(约 $1\sim 3\text{\AA}$,即 $0.1\sim 0.3\text{ nm}$)时,唯有量子模拟能精确预判原子键合/断裂能、晶格畸变量等参数,使制造从“宏观统计式控制”升级为“单原子确定性操作”。

3 产业伦理维度:原子级制造的技术红利与责任

原子级制造的技术突破正在重塑全球产业链的价值分配逻辑。致辞提到的“制造伦理”与“可持续制造”,实为对制造Ⅲ时代“技术双刃剑”的预警。以芯片产业为例,当制程进入埃米级($1\sim 3$ 个原子层)时,制造过程可能涉及稀土元素原子级提纯、量子点阵列合成等跨境协作^[8]。与此同时,原子级制造的“超低能耗”特性(如等离子体能量精准投放)与“零废料生产”潜力,为碳中和目标提供了新路径,但其大规模应用仍需解决量子计算的高能耗悖论:超导量子比特需接近绝对零度的巨量制冷能耗^[9]。

这一维度要求制造业从“效率优先”转向“伦理嵌入”。致辞提出 CIRP 的“桥梁角色”,并针对全球技术治理发出呼吁:需协同推进原子级制造的标准化、原子数据归属、量子安全协议等议题^[10],其扩散管控需依赖“原子技术伦理公约”。这种责任的本质,是将古希腊“知识即美德”的哲学传统注入技术开发——唯有结合苏格拉底式“自知无知”的谦卑,方能避免技术奇点引发的文明失控。

4 范式转换维度:制造Ⅲ的意义与全球发展新格局

“制造Ⅲ”的核心内涵是以原子及近原子尺度制造(ACSM)为标志的技术革命。致辞中对“量子计算赋能原子操控”、“最小功能结构探索”的强调,正是制造Ⅲ中“量子理论替代经典力学”

的实践映射。这种范式转换的意义在于:它打破了摩尔定律终结后半导体产业的困局,将制造创新的主战场从“工艺微缩”转向“原子重组”,使材料、信息、生物等领域的底层技术得以在原子尺度融合。这种变革印证了库恩(Thomas Kuhn)在《科学革命的结构》中提出的范式转换理论^[11]:当“反常现象”(如摩尔定律失效)在旧范式(制造Ⅱ)框架下无法解释时,必然催生新范式(制造Ⅲ)的建立。例如,使用原子级制造得到的新型三元逻辑系统运行人工智能任务^[12],能够超越当前二进制技术,在运行速度、功耗、可扩展性方面具有量级式提升。

当前,美欧正在通过“原子到产品(A2P)计划”、“原子精度制造(APM)计划”等开展布局。我国若能在原子级制造工艺、拓扑量子器件等方向实现自主突破,便可绕过传统技术,在6G通信等未来产业建立“原子级技术标准”。这种变革性的发展是制造内在规律使然,是产品性能与功能跃升的有效途径^[13]。

参考文献:

- [1] FANG F Z. On the Three Paradigms of Manufacturing Advancement [J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2023, 6(1):1-3. DOI: 10.1007/s41871-023-00217-2.
- [2] FANG F Z, LUO X C, DAI G L, et al. Atomic and Close-to-Atomic Scale Manufacturing: the Fundamental Technology of Manufacturing III [M]// TO-LIO T. *CIRP Novel Topics in Production Engineering: Volume 1*. Cham: Springer, 2024.
- [3] 房丰洲. 原子及近原子尺度制造——制造技术发展趋势[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(9):1009-1021.
- FANG F Z. On Atomic and Close-to-Atomic Scale Manufacturing—Development Trend of Manufacturing Technology [J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2020, 31(9):1009-1021.
- [4] NEEDHAM J. *Science and Civilisation in China, Vol. 2: History of Scientific Thought* [M]. New York: Cambridge University Press, 1956:696.
- [5] 葛荣晋. *中国哲学范畴通论* [M]. 北京:首都师范大学出版社, 2001.
- GE Rongjin. *Chinese Philosophical Categories: a Comprehensive Study* [M]. Beijing: Capital Normal University Press, 2001.
- [6] Microsoft Azure Quantum, AGHAEE M, AL-CARAZ RAMIREZ A, et al. Interferometric Single-

shot Parity Measurement in InAs-Al Hybrid Devices [J]. *Nature*, 2025, 638:651-655.

- [7] JIAO Y F, WANG H Y, WANG H, et al. A DNA Origami-based Enzymatic Cascade Nanoreactor for Chemodynamic Cancer Therapy and Activation of Antitumor Immunity [J]. *Science Advances*, 2025, 11(2): eadr9196.
- [8] 许子皓. 2nm 量产倒计时 [N]. *中国电子报*, 2025-03-18(8).
- XU Zihao. Countdown to 2nm Mass Production [N]. *China Electronics News*, 2025-03-18(8).
- [9] AAMIR M A, SURIA P J, GUZMÁN J A M, et al. Thermally Driven Quantum Refrigerator Autonomously Resets a Superconducting Qubit [J]. *Nature Physics*, 2025, 21(2):318-323.
- [10] CHEN B X, FANG H H, CHENG F C, et al. A Biomass Graphene Composite Fluorescent Coating for Encryption of Anti-counterfeit Information [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2025, 7(5): 3409-3419.
- [11] KUHN T. *The Structure of Scientific Revolutions* [M]. Chicago: University of Chicago Press, 1962.
- [12] ZHU X H, XI M Q, WANG J Y, et al. High-performance Ternary Logic Circuits and Neural Networks Based on Carbon Nanotube Source-gating Transistors [J]. *Science Advances*, 2025, 11(2): eadt1909.
- [13] 房丰洲, 赖敏, 王金石, 等. 制造发展的三个范式: 制造发展规律的研究 [J]. *中国科学基金*, 2024, 38(1):159-171.
- FANG F Z, LAI Min, WANG Jinshi, et al. The Three Paradigms of Manufacturing Advancement: Law of Manufacturing Development [J]. *Science Foundation of China*, 2024, 38(1):159-171.

(编辑 卢湘帆)

作者简介:房丰洲,男,1963年生,国际纳米制造学会首任主席、国际生产工程院主席(2023—2024)、*Nanomanufacturing and Metrology* 期刊主编。主要研究方向为超精密加工与测量、光学设计制造与检测、原子及近原子尺度制造。先后被选为国际纳米制造学会、国际工程与技术科学院、国际生产工程院、美国制造工程师学会、爱尔兰皇家科学院及欧洲科学院的会士或院士。2024年获希腊亚里士多德大学荣誉博士学位,同年获国际纳米制造学会终身成就奖。

本文引用格式:

房丰洲. 制造发展的新趋势——解读《制造变革性发展的新时代》[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(4):882-887.

FANG Fengzhou. New Era of Manufacturing Development [J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(4):636-654.