“科学—技术—产业”协同演进的实现机制

戚聿东　罗天舒　徐凯歌

摘　要：当前，新一轮科技革命和产业变革加速演进，世界主要国家纷纷推动科技创新和产业创新深度融合，积极抢占科技发展制高点和产业应用制高点。立足科学革命史、技术革命史、产业革命史的关键证据，剖析“科学—技术—产业”协同演进的六大核心机制，解构“科学—技术—产业”从单向传导向多维互构的演进逻辑，诠释科学技术的前导性及加速融合特征，揭示产业实践对技术创新和科学研究的反向塑造作用，为优化新兴领域创新生态、强化国家创新体系跨层级衔接提供机制设计层面的历史参照和理论依据。“十五五”时期，为加快健全完善“科学—技术—产业”协同演进机制，不断强化我国国际科技创新中心策源功能，政府需加强顶层设计，锚定超越式发展目标构建系统性支撑体系；相关部门需打破协同壁垒，构建跨域联动高效协作机制；企业需强化科技创新主体地位，抢占核心赛道，实现突破式创新和产业落地；社会需培育创新生态，强化消费引领和应用场景支撑。

关键词：“科学—技术—产业”协同；科学研究；技术创新；产业实践

中图分类号：F124.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1003-7543(2026)06-0016-18

习近平总书记指出，“世界已经进入大科学时代”[1]，“科学研究向极宏观拓展、向极微观深入、向极端条件迈进、向极综合交叉发力，不断突破人类认知边界”[2]。党的二十大报告提出，“坚持创新在我国现代化建设全局中的核心地位”，“推动创新链产业链资金链人才链深度融合”[3]。党的二十届三中全会审议通过的《中共中央关于进一步全面深化改革　推进中国式现代化的决定》提出“构建支持全面创新体制机制”，“推动科技创新和产业创新融合发展”[4]。这些论述的核心在于破解经济社会发展中长期存在的“科学—技术—产业”脱节问题，实现科学研究、技术创新、产业发展协同共进。在2025年世界知识产权组织发布的全球创新指数报告中，我国综合排名跻身全球前十，拥有的全球百强创新集群数量达24个，成为全球顶级创新高地最为密集的国家，但仍面临基础研究投入不足、关键核心技术受制于人、科技成果转化率偏低等问题。在此背景下，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要》(以下简称《纲要》)提出“抢占科技发展制高点”，“强化国际科技创新中心策源功能，布局建设区域科技创新中心和产业科技创新高地”，“建设具有全球影响力的教育中心、科学中心、人才中心”[5]。人工智能作为通用性最为广泛的关键共性技术，既是当今世界最前沿的引领性技术，又是替代性最强的颠覆性技术，在现代工程技术群中发挥着主导作用。《纲要》提出，通过全面实施“人工智能+”行动，

基金项目：国家社会科学基金重大项目“科技创新对产业结构和就业结构的影响与对策研究”(25&ZD274)。

作者简介：戚聿东，北京师范大学经济与工商管理学院院长，教授、博士生导师；罗天舒，北京师范大学经济与工商管理学院博士研究生；徐凯歌(通信作者)，北京师范大学经济与工商管理学院讲师。

“抢占人工智能产业应用制高点”[5]。在新一轮科技革命和产业变革加速演进背景下，全面把握“科学—技术—产业”协同演进机制，推动科技创新和产业创新深度融合、高效协同，持续提升国家创新体系整体效能，对于我国抢抓时代机遇、深入实施创新驱动发展战略，具有重大而深远的理论和现实意义。

一、“科学—技术—产业”协同演进的理论框架和底层逻辑

在科技创新驱动经济高质量发展的背景下，科学、技术和产业三者并非孤立存在，而是相互关联、动态耦合的有机整体。厘清三者间的交互逻辑和演化规律，是破解科技和经济“两张皮”问题、构建创新生态体系的关键。

布莱恩·阿瑟在《技术的本质：技术是什么，它是如何进化的》一书中系统阐释了技术进化机制及其与经济的关系，其揭示的技术组合、现象捕获、自创生、经济表达等原理，为理解“技术—经济”演化规律提供了可参照的逻辑框架[6]。本文在布莱恩·阿瑟的技术经济理论的基础上，将技术进化和技术扩散视角引入经济系统，构建“科学—技术—产业”协同演进的机制框架，旨在打开“科学—技术—产业”协同交互规律的“黑箱”。这里从技术进化、技术扩散及其动态交互三个维度，系统阐释“科学—技术—产业”协同的内在机理（见图1）。

（一）技术进化视角下的技术缘起逻辑

布莱恩·阿瑟通过介绍技术进化的两大来源——对自然现象和效应的捕获、开发、利用以及对已有技术的重新组合，阐明了技术的构建过程。

一方面，新技术的形成来源于对自然现象和效应的捕获、开发、利用。然而，先进技术所依托的现象无法仅凭随机观察或诉诸常识而被发现和理解，必须依托详细、系统、可编码的理论知识，而对现象的捕获有赖于科学认知的发展。马克思在《资本论》中指出：“机器生产的原则是把生产过程分解为各个组成阶段，并且应用力学、化学等等，总之应用自然科学来解决由此产生的问题。”[7]这揭示了技术的关键进化与科学息息相关，即“科学—技术”的现象驱动机制（机制①）。

另一方面，技术在某种程度上来源于已有技术的新组合。布莱恩·阿瑟将技术的结构特征归纳为层级性和递归性。层级性体现为从整体技术到构成技术的最基本零部件的逐层分解；递归性则指技术内部嵌套技术，由不同层级的技术建构而成。技术依靠自身结构的层级性和递归

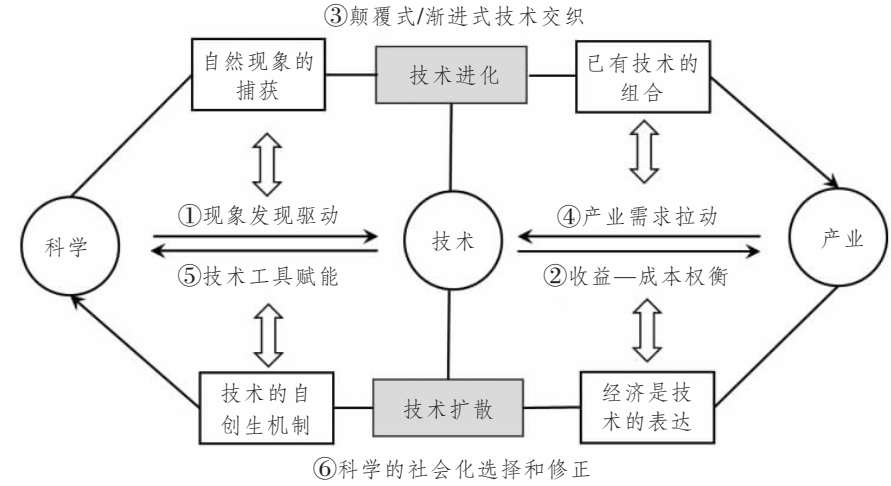


图1 “科学—技术—产业”协同演进的理论框架

性形成的“组合进化机制”,揭示了新技术可以通过将现有技术组合起来而产生。正如熊彼特把创新视作已有生产要素的重新组合,技术创新同样也会从其他技术中借用完整的产品部件,而不是从零开始全新设计。历史上每次技术长波的出现,并非摒弃以往的技术成果,而是在旧技术路线所达高度之上实现的新技术跃升。进一步而言,布莱恩·阿瑟强调技术组合进化的方向由“实现人的目的”所决定,“技术组件的集成或组合是为了满足它们的目的”[6]。这一观点在技术向产业渗透的过程中得到具体体现:迂回式生产会衍生新的应用场景需求,不同的产业需求能够为技术发展创造“机会利基”,从而在现有技术单元的基础上,依据生产部门的实际需求激发互补式创新,按最优“成本—效率”逻辑对多个技术单元或独立产品进行重新排列组合,最终形成功能更完备、适配场景更丰富、更契合特定需求的新技术,即“产业—技术”需求拉动的倒逼作用机制(机制④)。

(二)技术扩散视角下的技术应用转化

布莱恩·阿瑟除了提出技术进化的两大来源之外,还强调了技术扩散过程的两大特性,即技术在扩散过程中具有自创生机制,且经济是技术的表达。

一方面,技术具有不断完善内部结构的自创生机制。技术结构的层级性决定了技术在很大程度上来源于既有技术的新组合,而层级结构的递归性又赋予技术体自行建立、持续深化的能力。在技术自我迭代的过程中,技术能够提供近距离观测现象的方法,当科研辅助技术扩散至科学领域,“被捕获的现象”通过技术的反哺机制实现对新现象的再捕获,技术体也由此完成自我建立、持续深化,并逐步走向专业化、复杂化。具体而言,科学研究领域使用专用的技术工具可提升科研效率和精度,从而对力、能、声、光、电、热等自然现象进行分解和还原,极大增强了人类认识和驾驭自然力的能力,即技术工具赋能现象发现的“技术—科学”反哺机制(机制⑤)。

另一方面,技术与经济之间存在着深刻的内在关联,经济是技术的表达,技术价值最终要在产业的实际应用中体现。在技术产业化进程中,受技术自身特性和各部门资源禀赋异质性影响,产业在技术选择过程中存在“收益—成本”权衡,进而导致技术扩散的速度呈现差异化特征。从技术自身维度来看,通用目的技术具有广泛适用性和强大渗透力,能够在多个产业部门中发挥基础性作用,并通过持续的改进和创新推动整个经济系统的技术升级,但通用目的技术的前期投入巨大,需要与各部门的技术体系和生产模式进行深度融合,“收益—成本”的平衡周期较长。专用技术则针对特定产业或生产环节设计,具有较强的应用性和专业性,在目标部门内的“收益—成本”核算相对清晰,但其扩散范围相对有限,扩散速度往往取决于目标部门的需求迫切性和技术适配性。从技术的应用部门维度看,卡萝塔·佩蕾丝把产业部门划分为三类:一是生产关键生产要素或投入品的“动力部门”;二是大量使用关键生产要素的“支柱部门”;三是围绕前述部门展开的“引致部门”[8]。这三类部门在技术选择和技术扩散的过程中呈现不同节奏特征。技术产业化呈现逐级演进的后显性特征,许多技术在投入产业应用初期,实际效果和潜在价值可能并不明显,需经过一段时间的实践检验、迭代改进和优化完善,才能逐渐显现出对生产效率、产品质量、产业结构等方面的显著赋能作用,即“收益—成本”权衡下的“技术—产业”的扩散机制(机制②)。

(三)技术进化和技术扩散的交互关系

技术进化和技术扩散并非孤立存在的过程,二者之间存在动态交互关系。从技术进化对技术扩散的驱动效应来看,技术的组合迭代强化了该技术簇进化的路径依赖,进而加速其扩散进程;从技术扩散对技术进化的反作用来看,不同部门在技术扩散过程中产生的需求和反馈,构

成技术进化的关键驱动力。这种技术进化和技术扩散的交互关系，在“科学—技术—产业”的协同演进和逆向创新方面均有体现。

一方面，“科学—技术—产业”的协同演进机制（机制③）有赖于颠覆式和渐进式技术的协同交织。技术进化的核心源头在于对自然现象和效应的捕获，这一过程深刻揭示了技术的关键性进化与科学范式密切相关。科学范式是在某一特定时期公认的实际科学实践范例[9]，它为人类探索自然设定了认知框架和方法论基础。随着科学的不断进步，人类对自然现象的认知边界持续拓展，而这种拓展恰恰为技术提供了“捕获新现象”的可能性。当科学范式发生转换时，原本未被认知的自然规律得以显现，技术便能够借此突破既有路径依赖，基于新的自然机理构建出全新的技术原理和功能体系。这类技术往往是颠覆式技术，标志着整个技术体系实现革命性跃迁。而当颠覆式技术进入产业领域后，其完全渗透扩散则依赖于产业需求拉动的“组合式创新”。不同产业部门基于“成本—效率”的现实考量，会将核心技术和既有技术元素进行新的排列组合，形成适配特定场景的应用方案。这类组合创新以既有技术体系为基础，通过优化适配性、降低成本、拓展功能生成一系列渐进式技术，最终推动技术向全产业各部门深度扩散。此外，技术组合阶段可引发广泛的资源集聚和重组，构建涵盖商品生产、服务供给和消费者网络的完整生态体系，推动新产品、中间产品和工业制造特殊产品进一步交叉生成新产品技术，从而形成技术加速回报式的正反馈循环。因此，技术产业化普遍具有后显性和加速性特征。

另一方面，“产业—技术—科学”的逆向创新机制（机制⑥），本质上是技术扩散过程对科学现象的验证和选择。从科学发现驱动技术进化层面来看，技术是对现象的捕获，而技术产业化则是经济系统对科学现象的社会化验证和选择，技术产业化过程中的场景需求会反向修正并重塑科学认知。当技术在产业各部门扩散时，技术应用场景的复杂性往往超出实验室的预设范畴。例如，“动力部门”的规模化应用可能暴露技术对极端环境的适配缺陷；“支柱部门”的批量生产可能反映其成本管控瓶颈；“引致部门”的多样化需求可能倒逼技术突破原有功能边界。技术向产业部门扩散中面临的实际问题，加速了对科学现象认知偏差的反馈，进而推动科学认知的修正和重塑。具体而言，产业场景中技术失效的案例为科学研究提供新的问题导向，促使研究者重新审视既有科学范式的适用边界；而技术在特定场景的意外突破，则可能揭示未被发现的现象关联，为科学理论拓展提供实证依据。因此，技术扩散并非单向应用过程，而是通过技术应用的产业实践反向塑造技术进化的科学基础，为下一轮技术进化提供更精准的现象捕获方向。

二、“科学—技术—产业”协同演进的六大核心机制

上述理论框架揭示了“科学—技术—产业”交互的底层逻辑，而六大核心机制则是这一逻辑在历史和现实中的具体展开。这里结合六次技术革命的历史证据，系统解析每一项机制的运行规律、表现特征和实证依据，为理解“科学—技术—产业”协同演进的内在机理提供历史依据。

（一）“科学—技术”：后显性和加速性机制

在“科学—技术”的互动关系中，存在后显性和加速性两大核心逻辑，二者共同支撑“科学—技术—产业”的正向传导，是科技和产业演进的关键动力。后显性体现为技术对科学突破的滞后性依赖，技术创新需以科学对自然规律的系统性揭示为前提；加速性则表现为科学和技术的互促节奏持续加快，不断缩短“科学突破—技术转化—产业落地”的周期。后显性和加速性两大核心逻辑，可通过科学革命和产业实践得到印证。

科学革命是“科学—技术”互动的逻辑起点。康德最早把科学革命概念引入科学研究领域。他指出,数学从经验技术转向逻辑体系、伽利略开创实验方法这两大转折,为近代科学奠定方法论基础。在17世纪科学革命中培根、伽利略、牛顿构建的近代科学框架,直接支撑第一次产业革命的蒸汽机技术;19世纪的“第二次科学革命”催生第二次产业革命的电力和内燃机技术[9];后续量子革命则为第三次产业革命的原子能、计算机技术提供原理支撑。波普尔、库恩、伽里森等学者的研究,进一步揭示了科学研究的迭代性和交叉性,为“科学—技术”互促的加速性提供底层逻辑,并明确科学发展是范式转换而非简单累积,这一发展过程受哲学分析、科学共同体态度等因素制约。

也有学者认为,科学发现与技术进步之间的关联并不紧密[10-12]。例如,道格拉斯·诺斯认为,第一次工业革命时期的技术事件大体上与基础科学的发展无关[13]。莫基尔也持类似观点,他认为科学并非新技术产生的必然动因,无论是蒸汽机的发明及其引发的18世纪末技术革命,还是19世纪钢铁工业兴起及由此催生的铁路运输等领域的工业变革,基础科学均未发挥关键作用。尽管莫基尔承认系统科学研究在生物技术发展中占据核心地位,但他同时指出,该领域的诸多新技术和新成果(如药物、化学试剂、半导体等)实则是额外研究的副产品,并非源自核心基础研究①。本文认为,任何关键技术发明的关键突破,总会找到其科学原理的源头。正如约翰·希克斯指出,若不掌握热与压力关系的相关知识,蒸汽机的发明便无从谈起[14]。这类知识在18世纪已普及,而这正得益于物理学家在17世纪60年代前后开展的大量研究。因此,那些仅通过个别案例而非整体观察得出“技术发明与科学研究无关”的观点,大多缺乏充分的史实支撑。以霍尔的研究为例,他将研究时段锁定在1760—1830年,从而得出“科学发现与新技术问世之间不存在太多关联”的结论。但实际上,推动工业革命取得巨大成就的那些科学发现大多出现在1700年之前,而非1760年之后。例如,牛顿在17世纪建立的经典力学体系,为后来瓦特改良蒸汽机提供了理论基础。如果从更长的时间维度来看,科学发现与技术进步之间是存在紧密联系的,技术创新确实是以科学对自然规律的系统性揭示为前提的,这充分体现了“科学—技术”的后显性。部分学者因研究时段的局限性而得出了片面的结论。事实上,若通过扩大时间维度,结合科学革命和产业革命的历史进程进行分析,可以有力地反驳这些反例[15]。

18世纪中叶至今,人类社会经历了六次技术革命浪潮,相关技术浪潮及其核心技术突破如表1(下页)所示。第一次技术浪潮始于1771年,以阿克莱特机器纺纱工厂在曼彻斯特开业为标志,英国工业革命由此开启,社会生产从家庭手工业时代正式进入工厂时代[16]。第二次技术浪潮以1829年英国蒸汽和铁路时代开启为标志,规模经济、标准化生产组织形式日益成为主流。第三次技术浪潮从1875年钢铁、电力和重型工程时代开始,以巨型钢铁企业为代表的垂直一体化企业组织应运而生。第四次技术浪潮从1908年开始,以飞机、汽车企业为代表的大规模生产模式和金字塔形组织在美国兴起。第五次技术浪潮从1971年美国的信息化时代开始,一批信息技术(IT)企业开始出现[17-18]。当下,以人工智能技术为主导的第六次技术浪潮席卷而来,2015年OpenAI等人工智能公司相继成立,技术应用从最初的人脸识别到生成式人工智能的普及,人类正

①莫基尔观点出自其论文《历史上的创新:技术变迁与经济发展》,载本·斯泰尔、戴维·维克托、理查德·内尔森:《技术创新与经济绩效》,上海人民出版社2006年版,第28~49页。该书第一章“引言及回顾”也概述了莫基尔这一观点。书中作者译为乔·莫克亚,按照最新译法,本文将莫克亚更新为莫基尔。

表 1 六次技术浪潮及相关技术突破

	技术革命开始时间①	相关技术革命产物	技术革命持续时间	相关科学突破时间	相关科学突破	“科学—技术”潜伏期
第一次	1771 年②	纺织机	58 年	1687 年	牛顿经典力学理论	84 年
第二次	1829 年③	蒸汽机	46 年	1755 年	欧拉运动微分方程	74 年
第三次	1875 年④	钢铁	33 年	1824 年	卡诺定理	51 年
第四次	1908 年⑤	内燃机	63 年	1865 年	熵增定律	43 年
第五次	1971 年⑥	计算机	44 年	1936 年	图灵机理论	35 年
第六次	2015 年	人工智能	——	1986 年	BP 神经网络	29 年

经历新一轮技术革命,而这也仅仅只是开始。

1.“科学—技术”演化的后显性

从历史发展进程来看,人类早期的技术创造,如钻木取火、陶器制作,大多依靠经验积累形成,这些技术的出现时间早于相关科学解释,科学对它们的指导作用没有得到体现。以汉代中国领先世界的织布机械为例,由于缺乏系统科学理论支撑,这类技术始终被困在经验技术范畴里难以突破。但近代之后,科学完全重塑技术发展逻辑,第一次产业革命中阿克莱特水力纺织机的出现并非偶然,这款机器以 1687 年提出的牛顿经典力学为理论基础。同时,力学传播形成的机械制造理论还推动飞梭等精密零件加工落地,突破传统手工业局限。麦克斯韦和特斯拉构建的电力科学直接促成第二次产业革命的电气化变革,充分证明了科学的后发支撑价值。

1771 年第一次技术革命(以阿克莱特纺织机为代表)依托 84 年前提出的牛顿经典力学;1829 年第二次技术革命(以蒸汽机为代表)植根 74 年前的欧拉运动微分方程;1875 年第三次技术革命(以钢铁技术为代表)得益于 51 年前的卡诺定理;1908 年第四次技术革命(以内燃机为代表)依赖于 43 年前的熵增定律;1971 年第五次技术革命(以计算机为代表)植根 35 年前的图灵机理论;2015 年第六次技术革命(以人工智能为代表)依托 29 年前的 BP 神经网络。历次技术革命均滞后于科学突破,且“科学—技术”的潜伏期呈现 84 年→74 年→51 年→43 年→35 年→29 年逐次递减趋势,清晰表明二者的关联随着时代发展愈发紧密。同时,科学对技术的后显性支持还决定着技术发展的可持续性,基础研发探索的新知识和新原理是技术创新的根本来源。反之,若忽视基础研发,即便短期实现技术领先,也易陷入长期发展瓶颈。

2.“科学—技术”演化的加速性

根据表 1 数据,绘制六次技术革命“科学—技术”潜伏期统计图(见图 2,下页)。在六次技术革命的发展进程中,“科学—技术”的潜伏期呈现逐渐缩短的态势。第一次技术革命期间,“科学—技术”的潜伏期为 84 年;此后潜伏期逐步递减,到第六次技术革命时,潜伏期已缩短至 29 年。随着技术革命不断推进,科学突破到技术革命之间的滞后时长持续缩减,科学向技术转化应用的速度愈发加快。

技术创新组织模式的变革,是“科学—技术”加速性的核心驱动力量。早期的重大科技成果,如伦琴发现 X 射线、贝尔发明电话,大多源于个体研究,个体能力和资源会对其形成限制,使得技术转化周期较长;当代技术创新已形成“科研机构+企业+政府”的协同联动模式,具体表现为科研机构负责基础理论突破,企业主导技术研发

①以下年份均为相关技术已趋于成熟投入市场年份,并非发明年份。

②③④⑤⑥分别参见克里斯·弗里曼、弗朗西斯科·卢桑:《光阴似箭:从工业革命到信息革命》,中国人民大学出版社 2007 年版,第 158、209、146、284、320 页。

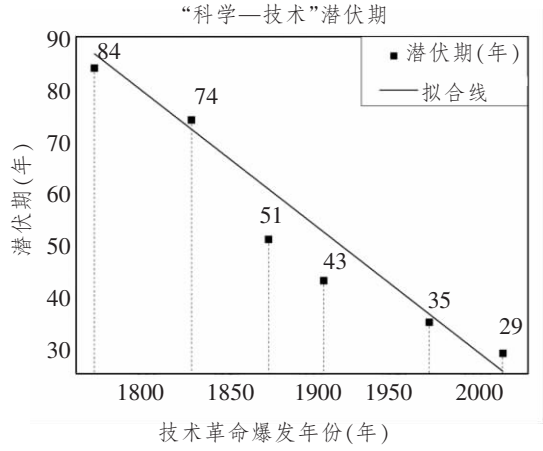


图 2 六次技术革命中的“科学—技术”潜伏期

和市场化进程,政府提供政策支持和资本引导,这种三方协作模式能快速整合跨学科知识、集中资本投入并精准匹配市场需求。例如,量子力学为半导体理论奠定基础后,依托多方协作优势,芯片技术从实验室研究到大规模生产的周期已缩短至数十年,远快于传统技术的发展节奏。

“科学—技术”潜伏期的持续压缩,更直观地展现出加速走势,从第一次技术革命的 84 年逐步下降至第六次技术革命时的 29 年,延迟时长不断缩短,依照这一演进趋势,未来第七次科技革命中,该潜伏期可能会进一步压缩至 20 年甚至10 年以内。时间维度的压缩还外化为互动方式的升级,科学突破得以迅速转向技术成果,同时,技术应用中的问题能即时回流科研端,使得“科学突破→技术转化→科学再突破”的循环持续加速。后摩尔时代的数字经济创新依托跨学科协作迅速锁定方向[19],智能革命中技术迭代和理论完善的同步性也显著提升,这些都是“科学—技术”加速性的具体佐证。

(二)“技术—产业”:集群性和迟滞性机制

技术与产业的互动并非孤立瞬时的线性事件,而是在通用目的技术与专用技术的差异化扩散中,依托“动力部门—支柱部门—引致部门”的层级传导形成集群效应,同时,因技术特性与部门适配差异呈现显著迟滞,最终共同塑造技术创新和产业变革的动态轨迹。

技术与产业的互动关系历来是学术界争论的焦点,部分学者对其互动的显著性提出质疑,其中最具代表性的是“技术的社会形成”(SST)理论[20]和 David Hess 的替代路径理论[21]。SST 理论强调技术扩散是社会需求、制度环境、文化规范共同作用的结果,甚至认为技术特性的主导作用被高估。David Hess 则进一步提出,社会力量可通过“替代路径”直接推动技术创新,比如有机食品运动绕过传统产业相关模式催生了替代农业技术,这似乎说明技术与产业的互动能被外部社会力量弱化。不过这些观点并没有真正否定技术与产业的内在关联,反而揭示出互动形式的复杂性。

从理论逻辑层面分析,技术作为“经济的表达”,本身就带有不可分割的产业属性。SST 理论虽然指出了制度因素带来的影响,但忽视了技术核心特性所具有的决定性作用。区块链技术的分布式特性虽然打破了传统“动力部门”的集中模式,但其在金融跨境支付领域的快速扩散,本质上仍是通过降低交易成本实现价值传递,这与层级传导模型的核心逻辑是一致的。卡萝塔·佩蕾丝的技术革命理论说明,人工智能等技术会通过层级渗透的方式重塑经济格局。对于 David Hess 的替代路径理论,中国光伏产业的发展提供了有力回应:政策扶持虽不可或缺,但单晶硅组件成本大幅降低和度电成本的关键突破,本质上是技术迭代和规模效应的结果,社会运动只是加速这一进程,并没有替代产业互动。

在实证层面,“索洛悖论”常被视作互动不明显的论据,不过后续研究已经揭示出它在时间维度上的误导性[22],数字经济的实践亦反映了“索洛悖论”的过时性,并且索洛本人也认可这一看法[23-24]。数字技术短期内虽未显著提升劳动生产率,但企业经持续适配后,全要素生产率的收敛效应会显著显现,这一情况证明所谓的“悖论”

其实是技术扩散的迟滞阶段，并非互动缺失[25]。生成式预训练语言模型（简称大模型）技术的应用更直观地展现出这种动态性：虽然部署大模型技术需要承担模型训练、云服务年费等高额成本，但它能显著提升内容生成效率，使得用户数量呈现爆发式增长，这一现象印证了“收益—成本”权衡对扩散速度的调控作用，即高适配性部门会快速采纳，低适配性部门则滞后跟进，这种差异正是技术与产业互动过程的表现，并非互动缺失。

在方法论层面，持反对意见的学者常常混淆“互动迟滞”和“互动不存在”这两个概念。David Hess观察到的社会运动推动技术发展的现象，本质上属于技术扩散的特殊路径，并非普遍规律。他研究中涉及的有机农业技术商业化，依然依赖产业链整合和成本优化，这与通用目的技术的扩散逻辑没有本质区别。历史比较的结果显示，电力技术从发明问世至重塑工业体系耗时半个世纪，硅谷技术向全美扩散的平均周期达50年，这种技术扩散的长周期特性使得“技术—产业”互动必然呈现后显性特征。当前，人工智能在医疗领域降低误诊率、在物流领域提升效率的实证效果，以及光伏在我国西北地区实现度电成本经济性突破的情况，都验证了卡萝塔·佩蕾丝的技术革命生命周期理论，即技术与产业的互动始终存在，只是在不同阶段会以不同强度呈现，这一过程的本质是“收益—成本”权衡下的动态适配过程。

1.“技术—产业”的集群性

“技术—产业”的集群性源于不同技术类型在三类部门中的跨领域渗透和协同联动。通用目的技术凭借广泛适用性和强大渗透力，成为集群创新的核心引擎，其先作用于提供关键生产要素的“动力部门”，再通过需求牵引扩散至大量使用关键要素的“支柱部门”，最终带动围绕前两类部门展开的“引致部门”，形成全链条集群；专用技术虽聚焦特定领域，却能在目标部门体系内推动局部集群，与通用目的技术的宏观集群形成互补。

以第一次工业革命中的蒸汽机为例，蒸汽机是典型的通用目的技术。首先，蒸汽机在“动力部门”（如煤炭开采、钢铁冶炼）落地。煤炭部门为满足蒸汽机燃料需求研发新开采技术以扩大产能，钢铁部门则为适配蒸汽机制造需求改良冶炼工艺以提升材料强度，二者共同为蒸汽机提供关键要素支撑。紧接着，蒸汽机快速扩散至纺织业、铁路运输等“支柱部门”。蒸汽机为纺织业提供动力支撑使其突破动力瓶颈，水力纺纱机随之升级为蒸汽驱动设备，铁路运输领域则围绕蒸汽机完成轨道设计和机车制造的技术整合。随后，纺织机械维修、铁路货运服务等“引致部门”随之兴起。这一过程既推动了纺织、铁路等产业从手工生产转向机械制造，又带动了煤炭、钢铁产业同步升级，进而构建起跨行业的工业集群。

在当代技术革命中，这种集群逻辑更为凸显。信息技术先在“动力部门”（如芯片制造、数据中心）实现突破，为全产业提供算力和数据要素；继而渗透至“支柱部门”（如制造业、电子商务），制造业通过工业互联网完成智能化改造，电子商务依托大数据技术优化供应链，同时催生专用技术在“支柱部门”内的局部集群；最终，“引致部门”（如云计算服务、物流配送）快速发展，形成“数字动力—实体应用—配套服务”的集群格局。在生物医学工程领域，交叉技术先在“动力部门”（如生物试剂研发、成像设备制造）奠定基础，再扩散至“支柱部门”（如精准医疗、生物制药），基因编辑等专用技术在支柱部门内推动个体化诊疗落地，进而带动“引致部门”（如基因检测服务、医疗数据管理）扩张，形成“技术融合—部门联动—产业集群”的闭环，同时推动传统医疗产业改造和新兴业态培育，重塑医疗健康产业生态。

2.“技术—产业”的迟滞性

“技术—产业”迟滞性的本质，是不同技术类

型与三类部门在适配过程中“收益—成本”权衡存在的周期差异。通用目的技术的前期投入规模大,且需与多部门技术系统深度融合,因而其“收益—成本”平衡周期更长,迟滞性也更为显著;专用技术的“收益—成本”核算虽然清晰,但其扩散依赖目标部门的需求迫切性和适配能力,同样存在迟滞。同时,三类部门的层级传导会进一步放大这一特性,具体表现为“动力部门”作为关键要素供给方,技术扩散速度稍快,“支柱部门”因需大规模适配技术系统而迟滞更明显,“引致部门”则因依赖前两类部门的发展节奏呈现被动迟滞状态。

从通用目的技术的迟滞来看,1712 年纽卡门蒸汽机虽依托大气压力理论问世,但受限于技术工艺粗糙,仅能在“动力部门”(如英国煤矿区)凭借廉价煤炭资源勉强实现抽水作业,无法快速适配“支柱部门”(如纺织业)的规模化生产需求,其既需突破效率低、能耗高的技术瓶颈,又需与纺织业的生产流程深度融合,致使其“收益—成本”平衡周期漫长。直至瓦特受潜热理论启发发明改良蒸汽机,才逐步完成与“动力部门”(如煤炭、钢铁)的要素匹配,进而被“支柱部门”(如纺织、冶金)采纳,这一过程耗时数十年。当代互联网技术同样如此。其从实验室发明到在“支柱部门”(如传统制造业)完成智能化改造,需“动力部门”(如电网升级、芯片国产化)提供稳定支撑,同时制造业需调整生产线布局、培训技术工人、重构管理模式,这些适配动作难以瞬时完成,导致技术落地与产业升级之间出现数年甚至十余年的迟滞;即使在“动力部门”内部,互联网与数据中心、芯片制造的融合,也因前期投入巨大、技术迭代快,“收益—成本”平衡周期长,同样存在迟滞。

专用技术的迟滞则与目标部门的适配能力直接相关。以人工智能领域的专用技术为例,1996 年国际象棋计算机“深蓝”虽实现技术突破,但“支柱部门”(产业应用)对该技术的需求不迫切,且其无法与“动力部门”(算力支撑)、“引致部门”(人工智能运维服务)形成联动,导致技术长期局限于实验室。直至 2016 年围棋机器人“阿尔法围棋”推动人工智能技术迭代,且“动力部门”(GPU 算力提升)、“支柱部门”(如智能客服、内容创作需求爆发)逐步完成适配,专用人工智能技术才开始规模化落地。2023 年以来,生成式人工智能如 ChatGPT4 等“爆品”的商业化落地,更是依赖“动力部门”(大模型训练数据供给)、“支柱部门”(多行业应用场景成熟)与“引致部门”(人工智能内容审核服务)的协同适配,从技术突破到产业规模应用历经数十年,凸显专用技术因部门适配不足产生的迟滞。

此外,三类部门的层级差异和地域资源禀赋进一步加剧迟滞。在 19 世纪英国标准化零件生产这一专用技术向美国扩散的过程中,美国“动力部门”(如钢铁产能)、“支柱部门”(如制造业)需结合自身高工资经济特征调整生产流程,方能将技术转化为节省劳动力的产业优势,这一适配过程从 19 世纪初延续至 19 世纪中后期,因部门适配节奏差异导致迟滞。在当代可再生能源技术的全球扩散中,光照充足且“动力部门”(电网设施)完善的区域,技术能快速与“支柱部门”(电力产业)融合,迟滞较短;而光照条件有限、“动力部门”(电网基建)薄弱的区域,技术与“支柱部门”的适配需要长期投入,迟滞显著。这种迟滞并非技术本身的缺陷,而是技术类型特性、部门适配周期与地域产业生态共同作用的结果,是“技术—产业”扩散过程中的必然阶段。

(三)“科学—技术—产业”:正向协同演进机制

“科学—技术—产业”的协同演进呈螺旋上升之势,而非简单线性因果,其核心路径可概括为“理论突破—技术转化—产业升级”,且这一过程深度依赖颠覆式技术和渐进式技术的协同交织。技术进化的核心源头在于对自然现象和效应的捕获,而科学范式作为特定时期指导技术开

发的公认范例，为这一捕获过程设定认知框架和方法论基础。科学革命对认知边界的扩展，本质是科学范式的演进，它为技术“捕获新现象”创造可能，当科学范式转换时，未被认知的自然规律显现，技术便能突破路径依赖，创造全新技术原理和功能体系，这类技术多为颠覆式技术，标志技术体系发生革命性跃迁。例如，伽利略和托里拆利对大气压力的研究，正是通过科学范式拓展为蒸汽机发明奠定理论根基，若无此项科学突破，蒸汽机便缺乏原理支撑；而产业需求则是颠覆式技术落地并催生渐进式技术的关键推手，若无煤矿抽水的现实需求，纽卡门蒸汽机可能不会出现，更遑论经后续微观改良成为第一次产业革命的核心动力技术。工业启蒙阶段，这种协同效应通过“科学家—工程师—企业家”的互动进一步显现：科学家布莱克提出潜热理论为技术突破提供指引，工程师瓦特据此完成蒸汽机改良，实现颠覆式技术向实用化转化，企业家阿克莱特则借工厂化生产将技术放大为规模产业，不仅引爆了技术革命，还重塑了社会生产体系，使科学指导技术、技术驱动产业的生态雏形得以确立，印证三者协同是产业革命超越单纯技术范畴实现系统性变革的关键。

学术界对“科学—技术—产业”协同关系的质疑由来已久，这种质疑的核心理论支撑主要源于技术决定论和部分技术史研究的论断。凡勃伦的技术决定论提出技术以效率逻辑自主演化[26]；法国年鉴学派史学家布罗代尔曾提出，工业革命的兴起并非由技术进步所推动[27]；匈牙利历史学家拉兹洛·马凯则进一步指出，工业革命的发生不依赖科学的发展，它的根源实则是中世纪技术革命带来的影响，是在此基础上自然涌现的结果。雷切尔·劳丹提出，在18世纪蒸汽机的关键改良时期，蒸汽机的突破主要依靠工匠经验而非系统性科学理论，科学的完善是在蒸汽机广泛应用之后[28]。莫基尔也提出，科学和技术的角色有时甚至会出现颠倒，如蒸汽机的发明促进了现代热力学的形成。这些观点可导出如下结论：技术拥有独立的进化路径，科学发现和产业应用不过是偶然并行的现象，并非有机协同的整体。

上述反例的根本局限体现在将协同关系窄化为即时性、单向性的因果链，忽略了技术进化中科学范式的隐性积累和滞后性影响。1864年麦克斯韦提出电磁场方程组，从理论上预言电磁波存在却未涉及实用化；1887年，赫兹通过实验证实电磁波存在，但装置仅用于科学验证，传输距离极短；1895年，马可尼依托麦克斯韦理论框架和赫兹实验方法，通过改良接地天线、加入高灵敏度相干器等设计，实现2公里以上的实用化无线电通信，1897年更将传输距离延长至19公里。从理论奠基到技术落地间隔31年，从实验验证到实用突破也历经8年，清晰地体现了科学范式的隐性积累对技术进化的滞后性支撑，而非即时性因果关联。这个过程清楚地呈现了“科学滞后补位→技术原理升级→产业场景扩散”的协同链条，并非技术的孤立进化。与此同时，半导体产业的发展完全颠覆了技术自主论。基于20世纪量子力学对微观粒子运动规律的科学性捕获，贝尔实验室1947年发明晶体管这一颠覆式技术，后续产业则通过“晶体管—集成电路—超大规模集成电路”的组合创新达成全领域扩散，进一步印证了科学范式为技术提供认知框架、产业需求拉动技术优化的协同逻辑。就算是生物科学领域的规律成簇间隔短回文重复序列（CRISPR）基因编辑技术，也需要依靠对“细菌免疫系统”的科学发现，这说明即便协同顺序偶尔出现调整，“科学—技术—产业”的互动闭环也从未中断。“19世纪最伟大的发明是发明了发明的方法。”①托马斯·库恩指出，科学范式不仅提供理论工具，还通过“技术—仪器”系统塑造观测方式，这种影响虽非立竿见影，却会通过技术原理

①此句话出自阿尔弗雷德·诺斯·怀特黑德，转引自乔尔·莫克尔：《启蒙经济：英国经济史新论》，中信出版集团2020年版，第93页。

的突破逐步显现[9]。当量子力学范式确立时，没人能预见其会催生半导体产业；但当晶体管技术与产业的“成本—效率”需求结合时，科学的潜在价值便通过技术组合创新转化为现实生产力。这种“科学铺垫—技术破局—产业扩散”的协同机制，在摩尔定律主导的芯片产业中表现为加速回报的正反馈，在生物医药领域体现为基础研究与临床应用的迭代互动，这恰恰证明所谓“无协同”的学术论断，不过是对协同过程的隐性化、滞后性特征的误读，而协同演进才是技术产业化的本质规律。

一些企业通过产品迭代和跨领域布局，成为“科学—技术—产业”协同演进的具象化载体，让抽象协同机制落地为可感知的创新成果，同时彰显技术产业化的后显性和加速性特征。苹果公司的产品迭代是典型案例，从触控屏技术的科学原理出发，其产业化应用催生出 iPhone 系列产品；而用户对更轻薄机身的需求，又推动航空级铝合金材料研发，每一代 iPhone 都串联起材料科学、通信技术和工业设计的协同突破，实现“科学原理→产业应用→需求反哺技术”的完整路径。在跨领域融合催生的新兴产业中，企业引领作用更为突出。谷歌母公司 Alphabet 旗下的 DeepMind 公司，把深度学习理论与蛋白质结构预测相结合，开发出 AlphaFold 算法这一颠覆式技术，该算法颠覆结构生物学研究范式，赛诺菲、葛兰素史克等药企将其应用于新药研发，大幅缩短了研发周期。在量子信息领域，IBM 投入数十亿美元建设量子计算实验室，其 127 量子比特处理器的研发，既依赖超导量子比特物理原理，又推动量子纠错算法的数学理论突破。同时，IBM 通过量子云平台推进商用化，为金融、物流等行业开发专用量子算法，这种渐进式的行业技术适配，正在为未来产业构建技术壁垒。

展望未来，“科学—技术—产业”协同联动的作用愈发突出，已成为影响全球产业变革方向的核心动力。谷歌、亚马逊、Meta、苹果等全球前十强企业 2024 年的平均研发强度已升至 13.2%①，基础科学领域也因此持续吸纳研发资金，为“科学—技术—产业”协同发展夯实资源底座。产业场景的规模化应用成为科学突破的加速器，Meta 元宇宙计划推动的脑机接口技术迅速落地、英伟达 GPU 算力需求触发的芯片设计颠覆式变革，均是产业驱动技术跃迁的典型例证。科学、技术和产业的深度融合既重塑企业和国家的产业竞争力，又驱动人类社会迈入以协同创新为主要动能的新阶段，一旦科学发现、技术创新和产业实践在全球创新生态中形成广泛联动，“科学—技术—产业”的螺旋上升态势便会释放更强劲的能量，进而持续牵引经济高质量发展并触发社会系统性变革。

（四）“产业—技术”：需求倒逼创新机制

“产业—技术”的倒逼作用本质上体现了技术组合进化与产业需求之间的动态耦合关系。技术通过层级性和递归性形成“组合进化机制”，而产业需求为这种组合指明了方向，即按照最优“成本—效率”逻辑对已有技术单元进行新的排列组合。这一由需求牵引技术组合创新的核心逻辑，得到了相关经济理论研究的印证。有研究基于制造业行业数据的实证检验，证明产业需求结构的变化会显著引导技术创新的方向和路径选择[29]。这种作用模式彻底超越技术供给单向牵引产业需求的线性逻辑，转而从产业真实痛点出发，反向锁定技术攻关的核心目标和实施路径，从而推动创新方向从实验室导向切换为产业需求导向，并在区块链、光伏、汽车、金融等多元应用场景中展现出强劲的实践价值。

产业运行中的核心痛点和产业链短板，往往在竞争压力下成为技术组合创新的直接触发点和精准坐标。光伏产业早期面临成本掣肘的瓶颈，倒逼技术组合向硅片切割效率提升和电池转换率优化聚焦，实现能耗降低、投资回报周期缩短的成本效率突破，且晶硅电池和钙钛矿技术

①参见《2024 年欧盟工业研发投资记分牌》。

的组合研发更预示下一代光伏技术的进化路径。电动汽车行业的“续航焦虑”倒逼宁德时代构建起骁遥双核电池架构,该架构借助双核架构与自生成负极技术的深度融合,保障动力输出的连续性、稳定性和安全性;同时可在同样电池包空间内配置更多电量以支撑更长续航,这种跨化学体系的技术组合,不仅解决了极端温域适应性问题,还带动了锂矿提纯、隔膜材料等上游技术的连锁突破。政府政策和全球竞争形成的外部压力进一步放大技术组合的倒逼效应。中国“新基建”战略加速 5G 网络部署和应用落地,推动华为、中兴等企业在 Massive MIMO 天线技术领域实现规模化商用,并依托 5G 网络切片、边缘计算等技术持续扩大工业互联网平台设备连接规模。这些实践共同印证“产业—技术”倒逼作用模式的核心要义,即把市场竞争压力、成本约束、用户需求、政策目标等抽象变量转译为可落地的技术组合命题。从电动汽车的电池安全突破到智能工厂的系统集成,技术创新不再是从零开始的发明,而是基于既有技术单元的创造性重组。随着精准医疗、氢能等领域新需求的涌现,这种由需求定义技术组合、技术重塑产业形态的动态范式,正成为全球产业竞争和技术革新的底层逻辑。

(五)“技术—科学”:工具赋能反哺机制

传统观念中科学进步和技术发展遵循的理论先行、实践跟进线性路径,在布莱恩·阿瑟提出的技术层级性和递归性理论视角下被彻底重塑。所有技术均是已有技术组件的创造性组合,这种层级结构的递归性赋予技术体自我建立、深化的自创生机制,使其能够持续迭代进化,“技术和经济进化的过程永远不可能停止”[30]。当下“技术—科学”的逆向推动正是这一机制的集中体现:技术实践不再只是理论的简单应用,而是暴露盲区、倒逼基础理论创新、催生新认知的核心引擎[31]。这种逆向互动借助工程突破、工具革新、跨域融合、资本耦合等多重路径,正在重塑人类探索自然规律的方式,进而形成被捕获的现象借助技术反哺作用再去捕获新现象的螺旋式上升过程。

人工智能驱动的科学研究(AI for Science)作为这一机制在数字时代的极致体现,正在引发自实验科学以来最为深刻的科研范式革命。广义上的“人工智能驱动的科学研究”已从最初的辅助计算工具,进化为能够独立发现科学规律、设计实验方案、验证理论假设的“硅基科学家”,其本质是技术递归进化到一定阶段后,对科学研究全链条的系统性赋能。2024 年,诺贝尔物理学奖和化学奖均授予与人工智能深度相关的研究成果,标志着国际科学界对“技术定义科学边界”这一趋势的正式认可。《纲要》明确提出,“加快突破人工智能基础理论和核心技术,推进人工智能模型架构改进、算法优化”,“探索通用人工智能发展路径”,这是国家层面主动顺应“技术—科学”逆向互动规律的战略抉择。这一战略布局不仅将加速中国在基础研究领域科学发现的不断突破,还将推动人文社科领域研究范式和方法的重大创新,形成“技术突破—科学发现—技术再升级”的良性循环。

在工程一线,技术对既有科学边界的主动突破往往直接孕育新理论。量子计算工程为解决“退相干”难题,在传统量子力学基本框架内,通过构建基于表面码和测度守恒的量子纠错理论,实现对理想化量子系统的实用化修正。其中,稳定子模型是量子纠错理论的核心数学工具,也是量子信息处理新数学基础的关键组成部分,而表面码的递归维度扩展则为纠错能力的规模化提升提供了技术路径。ITER 托卡马克装置因磁约束湍流受阻,推动等离子体物理研究从宏观建模转向微观输运机制,这一过程既催生出先进磁构型设计理论,又使人类对高温等离子体行为的认知从经验迈向精确预测;半导体行业面临 10 纳米以下制程的技术瓶颈,促使材料学家跳出硅基框架探索石墨烯等二维材料,该技术组合

过程暴露了传统理论的局限性，进而推动低维材料电子输运理论的建立，为后摩尔时代芯片技术提供关键支撑。

跨技术领域的融合实践和工程意外发现，以超出预期的方式挑战既有理论并开辟双重创新路径。1986年，IBM苏黎世实验室在镧钡铜氧材料中发现35K超导现象，这一发现突破传统巴库斯理论的麦克米兰极限，促使物理学家转向铜氧化物体系探索非常规超导机制，后续研究提出的共振价键理论、层间耦合模型等，成为理解高温超导的重要理论框架[32]。2024年，Google DeepMind和Isomorphic Labs联合开发的生物分子结构预测大模型AlphaFold3，将人工智能算法引入蛋白质结构预测，该预测精度超越传统实验极限，同时暴露了传统折叠动力学理论的局限性，进而促使科学家结合机器学习和统计力学构建多尺度模型，最终推动计算结构生物学从辅助工具向核心研究范式演进。产业资本与工程实践的深度融合放大逆向推动效能，进而形成“应用需求—技术研发—理论反哺”的闭合回路。

“技术—科学”逆向推动的核心在于技术实践以问题为导向的探索特质，这恰是技术递归性进化的必然结果。量子计算、可控核聚变等前沿技术在突破现有理论边界时，必然遭遇科学体系的解释盲区，而实践和理论的张力正是新理论诞生的动力。从石墨烯制备技术推动二维材料理论建立，到AlphaFold革新蛋白质结构预测理论，人类认知正从理论预设实践转向实践定义理论。可以预期，合成生物学、量子信息等领域的技术实践将继续向极限推进，通过组件的创造性组合持续拓展“相邻可能”空间，在暗物质探测、意识本质研究等前沿地带催生更多革命性理论，而技术与科学的这种相互强化，终将不断拓展人类认知宇宙的新边界。

（六）“产业—技术—科学”：逆向创新机制

“产业—技术—科学”的逆向创新，打破了“科学→技术→产业”的传统线性模式，构建起以产业需求为起点、技术转化为纽带、科学突破为支撑、反哺产业为闭环的全链条协同路径，其本质是技术扩散过程对科学现象的验证和选择。从科学发现驱动技术进化的层面看，技术是对现象的捕获，技术产业化是经济系统对科学现象的社会化验证和选择，且产业场景中的需求会反向修正、重塑科学认知。这种创新逻辑紧扣真实产业问题，产业实践界定技术方向，技术突破牵引科学探索，最终孕育“产业—技术—科学”持续互促的共生格局。金玉萍等指出，技术转移和要素流动的协同作用，能够有效衔接创新链条各环节，为产业需求驱动的科学突破提供支撑[33]。产业发展的现实瓶颈往往触发逆向创新，当产业目标撞上技术天花板，问题求解驱动技术突破并暴露基础科学盲区，最终由工程目标直接驱动的实践不受既有理论束缚，将产业难题转化为科学前沿课题，为逆向创新奠定基础。

技术转化作为把产业需求转译为可行方案的核心环节，在解决具体问题的过程中常暴露理论盲区并催生科学突破，这一过程本身契合技术扩散中场景复杂性超出实验室预设、推动科学认知修正的规律。例如，中国科学技术大学研发的“小来”机器人（机器化学家），通过数据驱动的智能实验范式，推动化学理论革新。上海交通大学研发的柔性手术机器人系统，通过仿生结构设计、生物组织交互数据建模、跨尺度感知技术创新，促进了生物学和新兴学科的融合。孟山都智能种植系统通过实时数据优化种植管理，修正传统农业中“统一生长周期”的单一假设，同时为农业生态学模型提供动态变量整合的新范式，这一系统的实践体现出技术实践对理论研究的反哺作用。当技术转化的成果进一步沉淀，产业实践经验会升华为普适性科学理论，最终反哺更广阔的产业创新，完成“产业—技术—科学—再产业”的逆向闭环。

逆向创新实质上是问题导向型科学范式的

集中呈现,产业需求则重构“产业—技术—科学”的互动关系,让这一互动关系在多元场景中同时展现破解复杂难题的现实价值和长远意义。例如,光伏产业为突破传统硅基电池高能耗、刚性局限,并契合低成本、高效率的发展诉求,推动钙钛矿太阳能电池技术攻关,如双自由基自组装分子材料开发、气体淬火辅助原位涂层技术应用,进而促进材料科学在载流子传输速率精准评价、钙钛矿结晶动力学等领域的基础研究。在航天产业,为降低发射成本、实现火箭可回收,我国推动可回收火箭高温材料技术创新,进而推动高温材料科学在聚酰亚胺树脂热稳定机制、极端条件下材料损伤演化理论等方面取得突破。这些案例验证了逆向协同在制造、能源等领域的有效性,形成技术实践推动科学发现、科学发现反哺产业升级的螺旋式上升路径。逆向创新面临短期投入与长期回报的张力以及跨领域知识整合壁垒,产业需求的精准性对冲了基础研究的不确定性,技术迭代的工程性则弥合了科学发现的应用鸿沟,最终该创新模式在全球创新版图中重塑“产业—技术—科学”互动逻辑,让创新链各节点因逆向协同释放更强共生动力。这一切的核心始终是技术扩散过程中产业场景对科学现象的持续验证、选择和重塑,为下一轮技术进化提供了更精准的现象捕获方向。

三、推动“科学—技术—产业”协同演进的政策建议

当前,新一轮科技革命和产业变革正以前所未有的广度和深度演进,人工智能、量子信息、生物技术、新能源等前沿领域的突破不断重塑全球创新格局和产业竞争版图。中国和美国作为全球创新领域的核心参与主体,在“科学—技术—产业”协同演进的赛道上形成差异化竞争态势:美国凭借长期积累的基础研究优势、完善的产学研协同生态,在高端芯片、核心软件、前沿生物科技等领域占据先发优势,其企业主导的创新模式、市场化的成果转化机制推动了技术与产业的快速耦合;而中国在新能源、高铁、5G 通信、人工智能、生物医药等领域实现从跟跑到并跑乃至领跑的跨越,但在基础研究原创性、高端技术自主可控性、“科学—技术—产业”全链条协同效率等方面仍存在短板,面临核心技术“卡脖子”的外部压力。“十五五”时期,我国发展处于战略机遇和风险挑战并存、不确定难预料因素增多的关键时期。抢抓新一轮科技革命和产业变革机遇,以“科学—技术—产业”协同演进机制推进新兴产业和未来产业加速成长,加快传统产业数智化转型升级,是我国实现高质量发展的迫切需要。

(一)政府层面:强化顶层设计,锚定超越式发展目标构建系统性支撑体系

作为创新生态的构建者和引导者,政府的核心使命是立足全球视野进行顶层设计,保障宏观政策取向的一致性和连续性,为“科学—技术—产业”协同超越式发展提供制度保障和战略指引。建设具有全球影响力的科学中心,正是这一使命的核心载体和关键抓手。科学中心作为原始创新的策源地,是支撑基础研究突破、引领核心技术攻坚的战略枢纽,其建设需贯穿“顶层设计—资源投入—制度保障”全链条,形成与超越式发展目标相适配的系统性支撑体系。一是确立“基础突破—技术攻坚—产业引领”的超越式发展战略定位,锚定科学中心建设核心目标,围绕人工智能、量子信息、脑科学、合成生物学等中美竞争核心赛道,编制跨周期的“科学—技术—产业”协同发展规划,明确科学中心建设的阶段目标、重点领域布局和实施路径,将基础研究能力提升、前沿技术创新突破、创新要素集聚配置等科学中心建设的关键任务纳入规划体系,避免短期政策波动对长期创新布局及科学中心建设进程的干扰。二是加大基础研究长期稳定投入,夯实科学中心原始创新根基。建立中央财政基础研究投入逐年递增机制,将基础研究经费占

研发总经费比重提升至更高水平，重点支持数学、物理等基础学科以及与核心技术突破密切相关的应用导向型基础研究，对服务于科学中心建设的科研团队给予5~10年长期资助，破除短期考核对原创探索的束缚。进一步完善激励政策，鼓励企业通过设立基础研究基金、向科研机构捐赠等方式参与科学中心相关基础研究项目，对企业投入基础研究的资金给予更大力度的税收抵扣优惠，构建政府主导、企业参与、多元协同的基础研究投入格局，为科学中心建设汇聚持续创新动能。三是强化制度保障和环境优化，为科学中心建设营造良好生态。完善知识产权保护法律法规，加大对侵权行为的惩处力度，保障科学中心内科研机构、企业等创新主体的合法权益，激发原始创新积极性；建立关键技术领域的容错纠错机制，针对科学中心内面向重大战略需求的基础研究和前沿技术攻关项目，允许科研探索中的合理失败，为科研人员松绑减负；优化营商环境，降低市场准入门槛，为中小企业参与科学中心相关创新链条竞争创造公平条件，促进创新要素在科学中心内自由流动、高效配置，助力科学中心充分发挥原始创新策源功能，为“科学—技术—产业”协同超越式发展提供核心支撑。

（二）部门层面：打破协同壁垒，构建跨域联动的高效协作机制

部门间的协同效能直接决定“科学—技术—产业”全链条运转效率，需打破传统条块分割格局，形成跨领域、跨层级的联动合力，破解各自为政的协同堵点。一是建立国家级“科学—技术—产业”协同发展统筹协调机制，由科技、工信、教育、财政、人社等部门组成专项工作组，统筹配置科技资源、教育资源、人才资源，协调解决基础研究布局、技术攻关分工、产业落地衔接等跨部门问题。例如，针对芯片领域“设计—制造—封装测试”全链条协同不足的问题，推动科技部门负责技术攻关统筹、工信部门负责产业需求对接、财政部门负责资金保障的协同联动。二是搭建跨部门信息共享和资源整合平台，整合高校和科研院所的基础研究成果、企业的产业需求、科研设施的开放信息，构建“科学成果库—技术需求库—设施共享库”三库联动机制，实现资源精准对接。借鉴美国国家科学基金会（NSF）跨学科项目资助模式，推动跨部门联合设立协同创新专项基金，重点支持跨领域、跨主体的关键技术攻关和成果转化项目。三是强化跨区域协同联动，聚焦长三角、珠三角、京津冀等创新资源密集区域，推动建立区域间“科学—技术—产业”协同机制，打破地域壁垒，促进创新要素自由流动。要以布局建设区域科技创新中心和产业科技创新高地为重要抓手，依托各区域创新资源禀赋差异，推动形成差异化、特色化的创新发展格局。例如，在长三角打造综合性区域科技创新中心，聚焦集成电路、生物医药等高端产业构建产业科技创新高地；在珠三角强化产业和科技的深度融合，打造制造业创新驱动的产业科技创新高地；在京津冀突出北京国际科技创新中心的策源功能，辐射带动周边区域形成创新协同圈。区域科技创新中心和产业科技创新高地的建设，离不开多部门协同发力：科技部门负责牵头规划布局创新平台，工信部门聚焦产业痛点推动技术适配，财政部门保障重点项目资金投入，从而实现创新资源的集聚和优化配置，强化国际科技创新中心的策源功能。同时，要将建设具有全球影响力的教育中心、科学中心、人才中心作为跨部门协同的核心目标之一，教育部门要牵头推进高水平研究型大学和学科建设，培育兼具科学素养、技术能力和产业视野的复合型人才，夯实教育中心根基；科技部门统筹推进国家实验室、大科学装置等科研平台建设，聚焦基础研究和前沿技术突破，强化科学中心的原始创新能力；人社部门牵头完善人才培养、引进、激励机制，推动人才跨区域、跨部门自由流动，为人才中心建设提供制度保障。通过三大中心建设与区域科

技创新中心、产业科技创新高地建设的深度衔接，形成“教育育人才、科学出成果、人才促创新、产业见实效”的跨域协同闭环，进一步提升“科学—技术—产业”全链条协同效能。推动东部沿海产业密集区与中西部科研资源富集区建立协同关系，依托中西部的教育中心和科学中心优势开展基础研究，借助东部产业科技创新高地实现技术转化，最终形成基础研究在中西部、技术转化在东部、产业应用全辐射的协同格局。

（三）企业层面：强化主体地位，抢占核心赛道实现突破式创新和产业落地

企业是“科学—技术—产业”协同演进的核心载体，也是技术落地、产业升级的关键力量，需立足全球竞争视野，主动抢占核心赛道，在承接科学成果、突破关键技术、引领产业升级中实现超越式发展。一是强化企业创新主体地位。科技型骨干企业需主动牵头整合创新资源，联合高校、科研院所组建创新联合体，聚焦中美竞争的核心技术领域，如光刻机、高端芯片、核心软件、生物制剂、高端装备等，开展“清单式”攻关，形成企业提需求、高校出理论、科研院所定方案、企业做验证的协同攻关模式。对比美国特斯拉、谷歌等企业的前沿布局模式，加大对未来技术的研发投入，布局颠覆性技术，力争在新兴领域实现“变道超车”。二是提升成果转化和产业落地能力。企业需主动对接高校、科研院所的基础研究成果，建设中试基地、工程研究中心等成果转化平台，加快实验室技术向规模化生产过渡[34]；针对新能源、人工智能等优势领域，积极参与国际技术标准制定，抢占产业竞争话语权。同时，发挥科技型中小微企业的“补位”作用，通过参与大企业主导的配套项目，承接细分领域的技术验证和零部件生产任务，形成大企业抓核心突破、中小企业抓配套支撑的协同格局。三是加强国际合作和自主可控平衡。在全球创新网络中精准定位，积极参与国际技术合作和交流，引进先进技术和人才；同时，聚焦核心环节加大自主研发投入，建立关键技术备份体系，提升产业链供应链韧性和安全水平，避免在核心技术领域过度依赖外部供给。

（四）社会层面：培育创新生态，强化消费引领和应用场景支撑

社会层面的创新意识、消费需求和应用场景，是“科学—技术—产业”协同演进的重要土壤，需通过培育创新文化、引导消费升级、开放应用场景，为超越式发展提供广泛支撑。一是培育全社会创新文化。加强科学普及和创新宣传，提升公众的科学素养和创新意识；鼓励高校、科研院所向公众开放科研设施和科普资源，营造“崇尚创新、宽容失败”的社会氛围，激发全民创新活力。二是引导消费升级和应用需求。通过政策引导、舆论宣传等方式，鼓励社会公众和企业优先选择自主创新产品，为本土技术和产业提供市场验证场景。例如，在智能家电、新能源汽车、医疗设备等领域，通过消费补贴、示范推广等方式，扩大自主创新产品的市场需求，以消费牵引技术迭代和产业升级。三是推动应用场景开放共享。鼓励政府部门、事业单位率先开放公共领域的应用场景（如智慧城市建设、政务服务智能化、公共医疗升级等），为新技术、新产品提供测试验证平台；支持行业协会、产业联盟搭建场景对接平台，促进企业与需求方的精准对接，加速技术落地和产业赋能。同时，引导社会资本关注前沿创新领域，通过天使投资、风险投资等方式，为初创型科技企业提供资金支持。Reform

参考文献

[1]习近平.加强基础研究 实现高水平科技自立自强[J].求是，2023(15)：4–9.
[2]习近平.在全国科技大会、国家科学技术奖励大会、两院院士大会上的讲话[N].人民日报，2024–06–25(2).
[3]习近平.高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋

斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[N].人民日报,2022-10-26(1).
[4]中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定[N].人民日报,2024-07-22(1).
[5]中华人民共和国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要[M].北京:人民出版社,2026.
[6]布莱恩·阿瑟.技术的本质:技术是什么,它是如何进化的[M].曹东溟,王健,译.杭州:浙江人民出版社,2018:14.
[7]马克思恩格斯全集:第23卷[M].北京:人民出版社,1972:505.
[8]卡萝塔·佩蕾丝.技术革命与金融资本:泡沫与黄金时代的动力学[M].田方萌,等,译.北京:中国人民大学出版社,2007.
[9]托马斯·库恩.科学革命的结构[M].张卜天,译.北京:北京大学出版社,2022.
[10]Musson A E, Robinson E. Science and technology in the industrial revolution[M]. Manchester: Manchester University Press, 1969.
[11]Landes D S. The unbound prometheus: technological change and industrial development in western Europe from 1750 to the present [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1969: 113-114.
[12]Mathias P. Who unbound prometheus? Science and technical change, 1600-1800[M]// Musson A E. Science, technology and economic growth in the eighteenth century. London: Methuen, 1972: 69-96.
[13]道格拉斯·诺斯.经济史上的结构和变革[M].厉以平,译.北京:商务印书馆,1992:159.
[14]约翰·希克斯.经济史理论[M].厉以平,译.北京:商务印书馆,1987:132.
[15]罗伯特·艾伦.近代英国工业革命揭秘[M].杭州:浙江大学出版社,2012:9-10.
[16]保尔·芒图.十八世纪产业革命[M].杨人楩,陈希秦,吴绪,译.北京:商务印书馆,2021:207.
[17]贾根良.第三次工业革命与工业智能化[J].中国社会科学,2016(6):87-106.
[18]克里斯·弗里曼,弗朗西斯科·卢桑.光阴似箭:从工业革命到信息革命[M].沈宏亮,译.北京:中国人民大学出版社,2007.
[19]戚聿东,徐凯歌.后摩尔时代数字经济的创新方向[J].北京大学学报(哲学社会科学版),2021(6):138-146.
[20]肖峰.论技术发展的社会形成[D].北京:中国人民大学,2001.
[21]Hess D J. Alternative pathways in science and industry: activism, innovation, and the environment in an era of globalization [M]. Cambridge: MIT Press, 2007.
[22]Oliner S D, Sichel D E. Information technology and productivity: where are we now and where are we going? [J]. Journal of Policy Modeling, 2003, 25(5): 477-503.
[23]本·斯泰尔,戴维·维克托,理查德·内尔森.技术创新与经济绩效[M].浦东新区科学技术局,浦东产业经济研究院,译.上海:上海人民出版社,2006:60.
[24]Uchitelle L. Economic view: productivity finally shows the impact of computers[N]. New York Times, 2000-03-12(3-4).
[25]赵宸宇,王文春,李雪松.数字化转型如何影响企业全要素生产率[J].财贸经济,2021(7):114-129.
[26]Veblen T. The engineers and the price system[M]. London: Routledge, 2017.
[27]布罗代尔.资本主义论丛[M].北京:中央编译出版社,1997:31-32.
[28]Laudan L. The nature of technological knowledge: are models of scientific change rele-

vant?[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 1984.
[29]孙巍,夏海利.居民收入分布与产品技术创新——需求引致创新理论与实证检验[J].经济科学,2022(3):50–64.
[30]布莱恩·阿瑟.复杂经济学:经济思想的新框架[M].贾拥民,译.杭州:浙江科学技术出版社,2023:238.
[31]布朗温·H.霍尔,内森·罗森伯格.创新经济学手册:第一卷[M].上海市科学学研究所,译.上海:上海交通大学出版社,2017:80.
[32]林良真.我国超导技术研究进展及展望[J].电工技术学报,2005(1):1–7.
[33]金玉萍,刘恒源,李光勤.技术转移与资本跨地区流动[J].经济科学,2025(5):50–72.
[34]盛朝迅.以科技创新为引领促进新质生产力发展[J].改革,2025(8):77–86.

Operational Mechanisms for the Coordinated Evolution of "Science, Technology and Industry"

Qi Yudong　Luo Tianshu　Xu Kaige

Abstract: Currently, a new round of technological revolution and industrial transformation is accelerating, and major countries around the world are promoting the deep integration of technological innovation and industrial innovation, actively seizing the high ground of technological development and industrial application. This article is based on key evidence from the history of scientific revolution, technological revolution, and industrial revolution, and analyzes the six core mechanisms for the coordinated evolution of "science, technology and industry". It deconstructs the evolution logic of "science, technology and industry" from one–way transmission to multi–dimensional mutual construction, interprets the leading and accelerating integration characteristics of science and technology, reveals the reverse shaping effect of industrial practice on technological innovation and scientific research, and provides historical references and theoretical basis for mechanism design to optimize the innovation ecology of emerging fields and strengthen the cross level connection of the national innovation system. During the 15th Five–Year Plan period, in order to accelerate the improvement of the operational mechanisms for the coordinated evolution of "science, technology, and industry" and continuously strengthen the source planning function of China´s international science and technology innovation center, the government needs to strengthen top–level design, aim for leapfrog development goals, and build a systematic support system; relevant departments need to break down collaboration barriers and establish cross domain linkage and efficient collaboration mechanisms; enterprises need to strengthen their position as the main body of technological innovation, seize the core track, achieve breakthrough innovation and industrial landing; society needs to cultivate an innovative ecosystem, strengthen consumer leadership, and provide support for application scenarios.

Key words: the coordinated evolution of "science, technology and industry"; scientific research; technological innovation; industrial practice

(责任编辑:杨果)