

根技术及其全生命周期解构

房汉廷^{1,2}

(1. 浙江大学区域协调发展研究中心, 浙江 杭州 310058;
2. 浙江大学杭州国际科创中心新质生产力与创新战略研究院, 浙江 杭州 311200)

摘要:根技术创新是一个尚未纳入技术经济学和创新经济学深入研究的重要问题。基于创新元动力原理和生物学隐喻,发展并再定义了根技术概念,即根技术(root technology)是从一个技术种子引发,经过向下筑根,实现向上涌现,继而在某个临界点产生爆发,最终成为泛在的元技术。研究表明:根技术本质上是其所在领域技术体系的“基因源代码”,是创造技术体系的技术,具有独特的生命周期——分期与变态同步发生,具有弱根技术、中根技术和强根技术3种分型,尤其是强根技术创新对创新链、产业链和价值链具有重要的不可替代的价值。这项研究成果是一项开拓性工作,为构建根技术创新范式、掌控创新链、把控产业链、操控价值链给出了理论指引和实践指导。

关键词:根技术;根技术分期;根技术分型;根技术创新

中图分类号:F062.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-0566(2025)03-0001-19

Unveiling root technology and its full life cycle: Principles, stages, and innovations

FANG Hanting^{1,2}

(1. Center for Regional Coordinated Development, Zhejiang University (ZJU), Hangzhou 310058, China;
2. Institute of New Quality Productivity and Innovation Strategy,
ZJU-Hangzhou Global Science and Technology Innovation Center, Hangzhou 311200, China)

Abstract: Root technology innovation is an important yet under-explored topic within the fields of techno-economics and innovation economics. This paper advances and redefines the concept of root technology based on the principles of innovation fundamental dynamics and biological metaphors. Root technology refers to a technological seed that establishes deep roots, grows upwards, and eventually bursts at a critical point, becoming a widely adopted meta-technology. Research shows that root technology essentially provides the “genetic source code” for its field’s technological ecosystem and it is foundational in creating these systems. Its unique life cycle is characterized by concurrent phases and metamorphoses, and can be classified into three types: weak, moderate, and strong root technologies. Notably, strong root technology innovations hold irreplaceable value in the innovation chain, industry chain, and value chain. This study offers theoretical guidance and practical recommendations for establishing paradigms

收稿日期:2025-02-20 修回日期:2025-03-10

基金项目:浙江省新型智库重点课题项目“关于发现和培育根技术、根产业的建议”(24ZK008Z);北京大成企业研究院重点课题项目“我国根技术与根产业创新战略研究”(2025DC003A)。

作者简介:房汉廷(1962—),男,内蒙古赤峰人,经济学博士,博士生导师,浙江大学区域协调发展研究中心智库领军人才、研究员,浙江大学杭州国际科创中心新质生产力与创新战略研究院研究员,研究方向为创新经济学、科技金融。

in root technology innovation, mastering the innovation chain, controlling the industry chain, and manipulating the value chain.

Key words: root technology; stages of root technology; types of root technology; innovation of root technology

进入 20 世纪 80 年代以来,世界技术创新范式出现了一个极为引人关注的现象——一些国家或地区相继涌现出依靠底层核心技术驱动的科技企业。如英特尔公司依靠计算架构技术成为计算产业的“巨无霸”,微软公司依靠 Windows 操作系统和 Office 套件成为软件行业的“常青树”,华为公司依靠 5G 网络技术成为全球 5G 标准制定的主要贡献者并成为全球通信领域的最大企业。仔细观察和分析这些企业背后的逻辑,普遍有一个共同点——它们都是从一项或几项元型技术发起,然后向下扎根,向上生长,继而迎来企业的高成长,引爆产业的大爆发,最终深深地影响和改变社会样态。其实,这些企业乃至相关产业发展的根型模式,最基础的根本动力是根技术。

根技术一词源于计算机 Linux 系统中的一个概念即 Root,它代表着系统的最高权限。第一个将根技术作为一个技术创新范畴使用的是房汉廷。在 2017 年第二届 5G 和未来网络战略研讨会上,房汉廷^[1]将根技术定义为能够衍生出并支撑着一个或多个技术簇的技术,可为整个技术树成长的各个环节及末端持续赋能(简称根技术 1.0)。

根技术概念提出之后,迅速引起了社会的广泛关注。2020 年,鲁不逊^[2]针对中美贸易战提出了“美国打的是一场‘根’的战争”;2024 年,华为公司提出“建根技术新生态,给全球开发者更优选择”^[3];国家有关部门(国资委、科技部)也相继开展了关于“发现和培育根技术”的调研。特别是 2024 年年底中国深度求索公司推出 DeepSeek-R1 之后^[4],引发了世界多国对中国根技术的恐慌,宣告了美国在人工智能领域对中国 AI 芯片制造根技术(数据技术、算法技术和算力技术)封锁战略的初步破产,也证明了中国“以根制根”“筑根自强”策略的成效初彰。

根技术虽然引起了一定程度的社会、企业关注和政府关注,但理论界并没有及时跟进研究,至今能够看到的公开文献还局限于极少数研究者的

作品^[5]。为此,本文拟从根技术概念、特征与全生命周期 3 个方面,对根技术进行一个相对全面的科学解构。

一、根技术:定义与特征

1. 概念溯源

从溯源上看,早期的根技术概念仅限于生物学领域,主要指的是与植物根系相关的技术或方法,这些技术旨在优化植物的生长和发育。如通过特定的方法和技术手段,优化植物根系的生长和功能,从而提高植物的养分吸收、水分利用、抗逆性等方面的能力等。工程技术领域借用根技术一词则源于计算机 Linux 系统中的根(root),即系统的最高权限。作为一个技术经济学的新范畴,源自房汉廷^[1,5-6]的一系列研究。他第一个界定了根技术 1.0 和根技术属性,指出根技术具有以下 3 大属性。一是技术全新性。主要来自颠覆性技术、突破性技术和新技术,是典型的“0-1”科研成果。这种全新属性,使其实现了对旧根技术的全面颠覆或跨越,再造或重构了其所波及领域的底层技术逻辑,或者产生了新的技术范式,创立了新的底层技术逻辑。二是技术高分蘖性。一个根技术可以同时蘖生出一个乃至多个枝干技术,进而形成“独根成林”之生态,快速形成从技术创新到颠覆多个产业应用模式的爆发效果。三是技术多维应用性。一项根技术通常都具有相当程度的泛在性,不仅对其自身领域具有颠覆性、突破性和创新性,且对相关产业领域技术产生重大影响,重塑相关领域技术格局,具有典型的指数效应^[6]。

2. 再定义

由于理论界对根技术的研究还处在半蛮荒阶段,如何准确定义根技术的内涵和外延还具有很大的不确定性。在分析近 50 年的技术史和 90 多项具体案例的基础上,我们认为,根技术(root technology)是从一个技术种子引发,经过向下筑根,实现向上涌现,继而在某个临界点产生爆发,最终成为泛在的元技术。根技术本质上是其所在领域技

术体系的“基因源代码”,是具有基础支撑作用、技术扩散效应和生态构建能力的底层核心技术。由其主导的技术体系呈树状分布,底层是技术之根,核心是技术之干,然后是持续向上生发出的技术枝、叶、花和果(其可简称根技术 2.0,是本文的逻辑起点)。

3. 特征提炼

从研究样本看,根技术具有显著的原创性、基础性、不可替代性、扩散性和多向赋能性 5 个主要特性(见表 1)。

表 1 根技术的显著特征

特性	具体表征
原创性	原理创新、方法创新、架构创新、应用创新
基础性	稳定基石性、广泛关联性、应用普适性、系统引领性、创新驱动性
不可替代性	底层逻辑、知识壁垒、融合能力
扩散性	显著的通用性、显著的带动性、显著的融合性
多向赋能性	前沿研究支撑、技术融合创新

(1)原创性。从原创性看,根技术源头是技术种子,是一个技术领域的新物种,具有显著的“0-1”属性。

这种特征具有以下显著标识:一是根技术多源于原理创新。根技术基本是基于对自然规律的新认识、新发现,突破传统理论和方法的局限,提出全新的技术原理而被发明的。以半导体技术为例,从最初对电子在半导体材料中导电特性的发现,到基于这一原理发展出晶体管、集成电路等一系列核心技术,都是建立在对物理原理的深入探索和创新之上。这种基于原理层面的创新是根技术原创性的核心,它为后续一系列技术创新和应用拓展提供了根本动力。二是根技术多基于方法创新。在发现、发明根技术的过程中,经常需要发明新的研究方法、实验手段或制造工艺。比如在基因编辑技术领域,CRISPR-Cas9 系统的出现,开创了一种高效、精准的基因编辑方法,与传统的基因编辑方法相比,具有操作简单、效率高、特异性强等诸多优势。这种方法上的创新不仅推动了基因编辑技术本身的快速发展,还为生命科学研究和医学治疗带来了革命性的变化,使得科学家能够更加深入地研究基因功能,为治疗各种遗传疾病提供了新的可能。三是根技术多体现为架构创

新。根技术能够构建全新的技术架构或系统框架,为相关技术的集成和应用提供新的平台和模式。以 5G 网络通信技术为例,其采用了全新的网络架构,如引入了大规模天线、超密集组网、网络切片等关键技术,从根本上改变了传统通信网络的架构和性能,实现了更高的数据传输速率、更低的时间延迟和更大的设备连接数,为智能交通、工业互联网、智能家居等众多领域的发展提供了有力支撑,引领了通信技术的新变革。四是根技术多表现为应用创新。原创的根技术往往能够开辟全新的应用领域和市场空间,激发人们对未来生活和社会发展的新想象。互联网技术就是一个典型的例子,它最初作为一种信息传输和共享的技术,经过不断地发展和创新,已经广泛应用于社交、电商、金融、教育、医疗等各个领域,深刻改变了人们的生活方式和运行模式,创造了巨大的经济价值和社会价值。

(2)基础性。从基础性看,根技术是其技术体系的总引擎,具备持续向上赋能动能,可以同时衍生出一个乃至多个枝干技术,形成“独根成林”之生态,快速产生从技术创新到颠覆多个产业应用模式的爆发效果。

基础性特征有以下显著标识。一是根技术的稳定基石性。根技术是整个技术体系构建的基础,如同大厦的基石。如上面提到的 CRISPR-Cas9 技术,已经成为众多生物技术之根。二是根技术的广泛关联性。根技术与众多技术存在着广泛的联系和相互作用。以人工智能领域的深度学习算法为例,它与数据挖掘、计算机视觉、自然语言处理、语音识别等多个技术领域紧密相关。深度学习算法为这些领域提供了核心的计算模型和分析方法,推动了它们的快速发展。同时,这些相关领域的数据和应用需求又反过来促进了深度学习算法的不断优化和创新。三是根技术的应用普适性。根技术具有很强的普适性,能够在多个行业和领域得到广泛应用。3D 打印技术作为一种根技术,具有广泛的应用前景。在制造业中,它可以用于快速原型制造、零部件定制生产;在医疗领域,能够打印人体器官模型用于手术规划,甚至尝试

打印人体组织和器官;在建筑领域,可以打印建筑构件、进行建筑模型制作等。3D 打印技术的普适性使其能够为多个行业带来创新和变革。四是根技术的系统引领性。根技术的发展往往能够引领整个技术领域的发展方向。在生物合成领域,基因编辑技术、DNA 合成与组装技术是其两大根技术,它们是生物部件标准化、基因转录与翻译调控、生物体代谢途径等衍生技术的支撑,对新药物的开发、生物制药、定制化疗法、个性化医疗、基因和细胞治疗、生物传感器等都具有系统引领性。五是根技术的创新驱动性。根技术是激发创新的重要源泉。如在航天领域,火箭发动机技术是根技术之一。为了提高火箭的运载能力和发射效率,科学家们不断研发新型火箭发动机,可重复使用火箭发动机技术。这种技术的创新不仅降低了航天发射的成本,还为太空探索、卫星发射等带来了更多的可能性,激发了航天领域在商业航天、深空探测等方面的创新发展。

(3)不可替代性。从不可替代性看,次生技术对根技术具有显著的技术路径依赖和生态锁定能力。不可替代性有以下显著标识。一是底层逻辑不可替代。根技术为其他技术的发展提供了底层架构和基础原理。仍以半导体技术为例,它无疑是所有现代电子信息产业的根技术,从模拟通信时代、数字通信时代到智能通信时代的技术创新,几乎都源自这一根技术体系。二是知识壁垒不可替代。根技术通常经过了长期的研发和积累,形成了独特的技术体系和知识壁垒。如统治 PC 世界 30 多年的 Windows 操作系统,在用户体验、安全性和管理能力以及在不同设备上的广泛应用和兼容性技术,共同构成了难以替代的技术壁垒,以至于作为开源操作系统的 Linux 至今都没有真正做到超越 Windows。三是融合能力不可替代。根技术是推动技术融合和创新的核心要素。量子计算技术与传统计算技术、通信技术等的融合,有望为密码学、金融、材料科学等领域带来革命性的突破。量子计算作为根技术,其独特的量子比特运算原理和超强的计算能力,是实现这些跨领域创新的关键,无法被其他技术所替代。

(4)扩散性。从扩散性看,根技术一旦育成,它就会从其初始领域向其他领域快速扩散,形成广覆盖、多应用的技术生态体系。其原因主要有以下几点。一是根技术具有显著的通用性。根技术的底层架构与平台的高度通用性,可以直接或间接地作为其他技术开发的高能级平台。如被科技界和产业界普遍寄予厚望的室温超导技术,一旦获得重大突破,就可能对多领域带来极大变化。室温超导材料不仅引发了材料领域的革命性变革,还直接加快了磁悬浮交通、量子计算机、高精度医疗器械、超导电缆等的研发和商用。二是根技术具有显著的带动性。根技术的进步会带动一系列相关技术的协同发展和扩散。仍以人工智能技术为例,深度学习算法作为人工智能的核心根技术之一,它的发展推动了计算机视觉、自然语言处理、语音识别等多个相关技术领域的突破。三是根技术具有显著的融合性。根技术具有很强的融合性,能够与其他不同领域的技术相互渗透和融合,产生新的技术和应用。如生物技术与信息技术的融合,形成了生物信息学这一新兴领域。基因编辑技术作为生物技术领域的根技术之一,与信息技术中的大数据分析、计算机模拟等技术相结合,不仅推动了基因治疗、个性化医疗等领域的发展,还为农业育种、生物制药等行业带来了新的技术手段和创新思路,加速了技术在不同领域的扩散和应用。

(5)多向赋能性。从多向赋能性看,根技术具备多维应用性,可以对多领域产生支撑甚至颠覆效应,特别是其泛在的终极演化模式,将对自身领域及相关产业领域技术产生重大影响,重塑相关领域技术格局,具有典型的指数效应。其原因主要有以下几点。一是根技术可以为前沿研究提供支撑。根技术往往是前沿科学研究的重要工具。比如量子计算这一根技术,其超强的计算能力为物理学、化学等领域的复杂模拟和计算提供了可能,有助于科学家更深入地理解微观世界的物理规律,推动基础科学的发展。二是根技术可以加快技术融合创新。根技术之间以及根技术与其他技术的融合能够产生新的创新成果。物联网与大

数据、云计算的融合,使得智慧城市建设成为可能,实现了城市交通、能源、环境等多方面的智能化管理,提高了城市运行效率和居民生活质量。三是根技术可以形成独立的技术生态体系。以智能手机产业为例,ARM 架构(芯片设计)、Android/iOS(操作系统)、5G 通信协议(标准规范)共同构成移动互联网时代的根技术体系,上层数以百万计的 APP 应用均建立在此基础之上。这种技术层级关系决定了根技术的掌控者天然具有生态主导权。

二、根技术与相关概念辨析

根技术虽然在网络自媒体和一些企业规划中多次被使用,但因为缺乏严格的学术规范界定,经常会与一些已有技术概念相混淆。为此,本文认为有必要对与其相近或相似的共性技术、底座技术、颠覆性技术和突破性技术概念进行一定程度的辨析。

1. 共性技术或通用技术

共性技术或通用技术是指在多个行业或领域广泛应用的技术。共性技术概念最早由美国经济学家 Tassey^[7]正式提出,他构建了一个“以技术为基础的经济增长模型”,并围绕这个模型提出了共性技术的概念,认为共性技术研究是技术研究的第一个阶段。其后,共性技术成为一个专业热词,很多学者分别就其识别、评价、开发应用等展开深入研究。Keenan^[8]从国家层面探索新兴共性技术的识别问题,并分析了英国在共性技术识别中的实践经验及不足。Mowatt 等^[9]探讨了共性技术的评价方法,并对 4 种共性技术进行了比较。Maine 等^[10]研究了共性技术的商业化开发和应用问题,并以先进材料制造业为例,分析了共性技术开发和应用的市場价值。国内学者对共性技术的跟进性研究多为应用性研究,重点探索共性技术研发组织、研发投入、成果分享以及可持续等问题。

综合来看,目前形成共识的共性技术,其鲜明特征是“通用性”(generic)和“竞争前”(pre-competition)。通用性强调的是其影响范围,包括同一产业细分领域和不同产业的技术应用,更多体现为标准化技术和测量技术。如日本产业技术研究所(AIST)将其限定为“标准化技术和测量技术”,

美国标准技术研究院(NIST)将其定义为“对不同应用领域的新产品竞争前则更强调共性技术所处的发展阶段,如企业或机构在创意期、初创期使用共性技术一般被视为“竞争前”,而在成长期、成熟期继续使用共性技术则具有了一定的竞争中特点。

可见,共性技术是指在多个行业或领域广泛应用、具有通用性的技术,而根技术则是指那些在技术体系中处于基础地位、具有广泛渗透性和带动性的核心技术。共性技术与根技术都具有基础性、通用性和带动性等特征,共性技术可为多个行业提供通用的技术解决方案,根技术则为整个技术体系提供基础支撑。

2. 底座技术

底座技术是一种在多个领域中用于支撑、连接或调节设备的关键技术,是推动技术进步和应用创新的关键驱动力。底座技术概念的源头来自存储程序原理^[11]。以信息技术为例,经过近 80 年的发展演化,信息技术已经发展成一个包含芯片技术、操作系统、开发环境、输入输出设备、信息网络、导航定位、安全保密、应用信息系统等覆盖广泛的庞大产业链,并且在向人类社会各个领域进行全方位信息赋能。不过,在信息技术复杂构成体系中并非是发散的,而是遵从严格层级递进关系,即下一层技术为上一层提供服务,其中处在最基础层次的一些技术、标准、产品构成了信息技术底座。如 CPU 的算法、芯片,操作系统、开发环境,信息传输(远距离、近距离)标准、基础芯片,以及导航定位等,当下 AGI 模型、算力开始成为信息技术底座的内容。与信息技术领域明显的底座技术相比,能源领域、材料领域、制造领域、健康领域的底座技术相对较为简单。如核裂变、核聚变的控制技术是核能源的底座技术,高温超导和石墨烯魔角技术是新材料的底座技术,纳米技术、飞秒技术是微纳制造的底座技术,基因编辑技术是合成生物的底座技术。

由上可见,底座技术具有技术之根或技术之本的基本特征——不仅具有根驱动属性,而且具有高爆发特点以及总控能力。如美国微软公司的 DOS、Windows 操作系统,苹果的 IOS 系统,谷歌的安卓系

统, Open AI 的 ChatGPT 系统, 中国的 DeepSeek 系统等, 都具备底座技术“王者”实力。不过, 用底座技术定义分层清晰的信息技术领域是没有问题的, 但用到其他技术领域就没有“根技术”更为直观和通用。从差异视角看, 根技术往往是突破性的创新成果, 能够开拓新的技术领域, 而底座技术更多地是对现有技术的整合和优化, 为上层应用提供支撑平台; 在创新程度上, 根技术往往需要更多的原始创新和基础研究投入, 其突破可能带来技术范式的转变, 而底座技术的发展更多依赖于技术集成和应用创新, 其进步通常是渐进式的。

3. 颠覆性技术

1995 年, 颠覆性技术的概念被提出。研究者认为, 能够破坏已有的性能改善轨迹或者重新定义性能含义的技术被称为颠覆性技术^[12]。这种技术虽然最终表现为彻底改变现有市场格局的技术, 但其颠覆能力并不是因为比主流技术更为出色, 而是因为其性价比更具竞争力, 一旦在某个时间节点或场景应用中性价比超过主流技术, “技术颠覆”就会发生且很难逆转。

世界很多学者都对颠覆性技术进行了跟进性研究, 形成比较一致的共识是颠覆性技术创新是一个动态的过程, 可以从技术来源、技术属性、技术轨道、市场侵入路径、技术的影响(效果)等多个视角或视角组合来进行判断。从技术来源上看, 颠覆性技术多为新技术与现有技术融合创新的结果, 具有很强的前沿引领性和交叉融合性; 从技术属性上看, 颠覆性技术在初始阶段胜在性价比或边缘性补充, 而其最终结果也因其快速迭代使其技术性能超越主流技术。从技术发展上看, 颠覆性技术发展轨道具有异轨性, 为其最终形成对主流技术换轨埋下了基因。从市场路径上看, 颠覆性技术往往最初寻求利基或新市场, 然后再向主流市场渗透。从技术影响上看, 颠覆性技术最终将取代主流技术, 淘汰在位领先企业, 改变竞争规则, 具有变革性。

由于颠覆性技术容易造成技术突袭、改变游戏规则, 可以为实现换道超车带来机遇, 因此受到世界主要国家和创新型企业的关注。美国国

防高级研究计划局(DARPA)作为引领颠覆性技术创新的典范, 吸引了众多国家、政府部门和大型企业模仿与追随, 试图复制 DARPA 的成功模式, 纷纷创立类似机构推动颠覆性技术创新。在众多模仿 DARPA 的机构中, 较为知名的是英国高级研究与发明局(ARIA)、俄罗斯前瞻研究基金会(FPI)、日本的登月计划(Moonshot R&D)和德国的联邦颠覆性创新局(SPRIN-D)。中国对颠覆性技术也给予了非常高的重视。2024 年 7 月, 党的二十届三中全会审议通过《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》, 指出要“加强关键共性技术、前沿引领技术、现代工程技术、颠覆性技术创新, 加强新领域新赛道制度供给”^[13]。

由上可见, 颠覆性技术既可以是基于技术种子且筑根成功形成的根技术, 也可能是主流技术之外的边缘技术经过不断迭代和完善, 最终依靠性价比而颠覆现有的主流技术。

4. 突破性技术

突破性技术的提出者是 Abernathy 等^[14]。他们认为突破性技术是突破性创新的核心, 是对现有技术路线的升级甚至升维的新技术。关于突破性技术, 目前还没有形成一个完全共识性定义。许佳琪等^[15]综合多种文献后提出了一个描述性的突破性技术定义: 在技术新鲜性上, 突破性技术是对现有技术“天花板”的突破, 呈现出一种全新功能, 具有破壁效应; 在技术轨道稳定性上, 突破性技术具有升高原有技术轨道, 向上高度跃迁出一个具有代差量级的水平; 在技术应用的效果上, 突破性技术是对旧技术的扬弃, 更是建立在他人过去的技术发展或全新的技术上的新突破。

为更具象地理解什么是突破性技术, 笔者以《麻省理工科技评论》2025 年 1 月新发布的“十大突破性技术”为案例进行具体分析(自 2001 年起, 《麻省理工科技评论》推出“十大突破性技术”)^[16]。

2025 年的“十大突破性技术”榜单, 涵盖了人工智能、天文观测、医学、环保、制造业等多个领域, 每一项技术都蕴含着巨大的突破力量。从十大榜单看, 排名第一位的是“小语言模型: 语言处

理的新维度”，它是对传统大型语言模型的技术突破，将使 AGI 更快地到来，也使人工智能跃升到一个新的水准。排名第二的是“Vera C. Rubin 天文台：探索宇宙的新窗口”，它是对宇宙探索技术的新突破，将开启探索宇宙的全新篇章。排名第三位的是“长效 HIV 预防药物：抗击艾滋病的新希望”，它为抗击艾滋病带来了新的希望曙光。排名第四位的是“生成式 AI 搜索：信息获取的新变革”，是对传统搜索引擎的直接扬弃。排名第五位的是“牛打嗝抑制剂：环保与畜牧业的新平衡”，它是抑制畜牧业甲烷气体排放的新技术，对温室气体控制和气候稳定提供了新的解决手段。排在第

六位的是“清洁航空燃料：航空业的绿色转型”，将使航空业绿色转型成为可能。排在第七位的是“快速学习的机器人：制造业的智能升级”，将进一步推动制造业的智能升级。排在第八位的是“有效干细胞疗法：医学领域的新突破”，是健康领域的突破性新成果。排在第九位的是“无人驾驶出租车：出行方式的新变革”，有人驾驶将成为历史。排在第十位的是“绿色钢铁：传统产业的绿色革命”。

由上可见，突破性技术是挑战现有技术“天花板”的新技术，是技术轨道升级或升维的跃迁技术，多数将成为二代元根技术、三代元根技术（见表 2）。

表 2 根技术与相近概念比较

技术类别	概 念	特 征	区 别	联 系
根技术	根技术是从一个高密度、高能级技术奇点(种子)引发,经过向下筑根,实现向上涌现,继而在某个临界点产生爆发,最终成为泛在的元技术。根技术本质上是其所在领域技术体系的“基因源代码”	原创性,基础性,不可替代性,扩散性,多向赋能性	强调种子与根的原动力	与共性技术具有一定的交叉,开源之根技术同时也是共性技术。与底座技术也有一定的交叉性,很多底层架构技术往往是根技术。颠覆性技术和突破性技术的部分会发展为根技术
共性技术	共性技术或通用技术是指在多个行业或领域广泛应用的技术	通用性和竞争前	强调技术的通用性和泛在性,外部性比较强	共性技术的主要来源是根技术中的一代元技术。共性技术和底座技术也有某些重叠、交叉
底座技术	底座技术(base technology)。底座技术是一种在多个领域中用于支撑、连接或调节设备的关键技术,是推动技术进步和应用创新的关键驱动力	基础性,支撑性	强调对相关领域的基础架构作用 and 支撑作用	底座技术与根技术、共性技术都有一定的交叉,在一些领域可能是同一个事项的不同表达
颠覆性技术	颠覆性技术是能够破坏已有的性能改善轨迹或者重新定义性能含义的技术	边缘性,换轨性,颠覆性	强调技术的性价比,强调市场介入的低调性	颠覆性技术是根技术的重要来源之一,但颠覆性技术更强调“性价比”和竞争性,而根技术更强调掌控性和驱动性
突破性技术	创新强度高且在技术层面产生重大突破,能够在一段时间内使产业结构发生重大变化,带来重大经济效益	持续性或非持续性,突破现有技术瓶颈	强调现有技术的突破式创新,以及技术发展障碍的克服	突破性技术是根技术的重要来源之一,它更强调在既有技术领域的升级或升维式突破

三、根技术全生命周期解构

(一)根技术的分期与分型

1. 根技术分期

在研读了《世界科学技术史》^[17]、《中国科学技术史》^[18]和《自然科学大事年表》^[19]等历史案例基础上,结合对工业革命以来 90 项历史根技术^[20]案例的具体解析结果,笔者发现:一项根技术的全生命周期至少包含着 5 个阶段或呈现 5 种形态,后一种形态都是前一种形态的变态。5 个阶段或 5 种形态分别为种子期(混元态)、筑根期(萌发态)、涌现期(具形态)、爆发期(繁荣态)和泛在期(开放态)(见图 1、图 2)。

其中:种子期是根技术的混元态,是“化无有为”的鸿蒙期,按照种子个体密度大小、能量高低,分为低能级根技术种子、中能级根技术种子和高能级根技术种子;筑根期是根技术的萌发态,是“蓄力蓄能”的盘古期,按照筑根能力和筑根程度强弱可以分为弱筑根模式、中筑根模式和强筑根模式;涌现期是根技术的具形态,是“破土而出”的破局期,按照涌现强弱程度可分为弱涌现、中涌现和强涌现;爆发期是根技术的繁荣态,是“根力全彰”的主导期,按照根技术的爆发程度可以分为低烈度爆发、中烈度爆发和高烈度爆发;泛在期是根技术的开放态,是“根赋社会”的平台期。

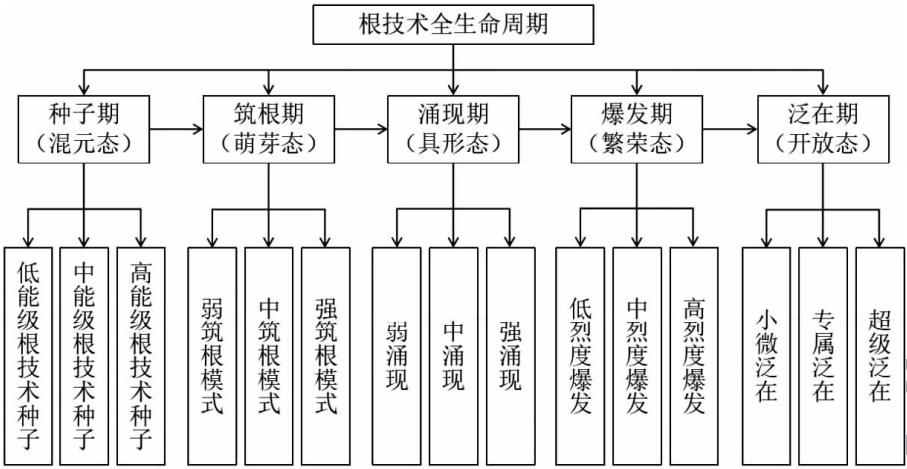


图 1 一项根技术不同阶段的形态特征

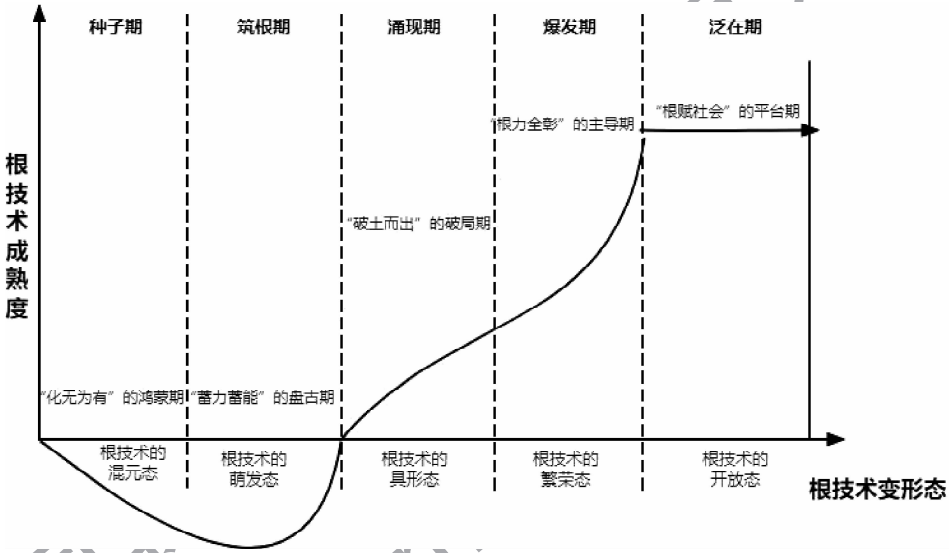


图 2 一项根技术的全生命周期

2. 根技术分型

从根技术的禀赋能量和输出能量水平维度看，根技术可以分为弱根技术、中根技术和强根技术三种类型（见图 3）。弱根技术的生命周期，通常表现为“低能级种子→弱筑根模式→弱涌现形态→低烈度爆发→小微泛在”的链式关系；中根技术的生命周期，通常表现为“中能级种子→中筑根模式→中涌现形态→中烈度爆发→专属泛在”的链式关系；强根技术的生命周期，通常表现为“高能级种子→强筑根模式→强涌现形态→高烈度爆发→超级泛在”的链式关系。

具体来说，弱根技术是微小系统的根技术，其全生命周期曲线比较低平，原创性、基础性、不可

替代性显著，但扩散性和多向赋能性明显比较弱。这类根技术往往都是“藏在细节中的关键”——有之丝滑，缺乏塞滞。中根技术是专属领域的技术之根，其全生命周期曲线比较高扬，原创性、基础性、不可替代性比较显著，扩散性和多向赋能性也比较明显。这类根技术通常决定着局域技术体系的实力、能力和效力，很多“卡脖子”技术多为中根技术。强根技术是大技术系统之根，其全生命周期曲线非常陡峭，一旦进入涌现期随时可能迎来高烈度爆发，即通常所说的“风口效应”，原创性、基础性、不可替代性、扩散性和多向赋能性都非常显著。这类根技术是具有颠覆性力量技术，是能够引发巨大技术变革甚至技术革命的大技术，也

是人类文明巨大推动力的源泉。

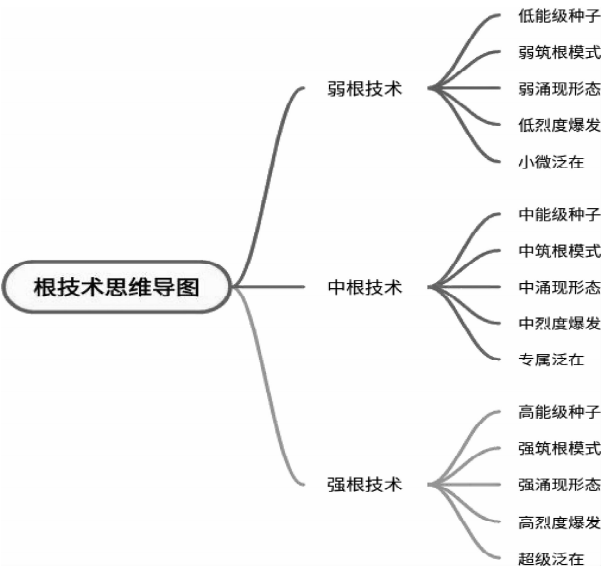


图3 根技术思维导

(二)根技术全生命周期具象化展开

1. 种子期:混元态—鸿蒙期

(1)混元态。根技术由何而来,初始状态是什么?根技术为何会产生向下筑根且向上涌现、爆发以及泛在的能力?这些疑问至今还没有一个合理的解释。不过,按照逻辑外推以及生物学隐喻,任何根技术的元点都应该是一粒技术种子,这个种子并不像现实世界的植物种子,而是更像创世纪中的神力之作——人们根据第一性原理,并通过自己的智慧和超越现实世界的想象力,发现或发明某种解决某种需要的原理、方法,形成最初的智慧种子。这个基于人类或类人类(如强人工智能)智慧的最初种子,就成为一项根技术的本初点。本初点的根技术种子,可能是一个创意、一段编码化的文字、一个数学公式、一个化学方程式或是一段计算机代码等。其状态也是混元的,是典型的一元初始或0-1的无中生有的产物,它既有天才的灵光闪现,也有各种偶然的实践触发。如中国古代炼丹家偶然发现的火药,蔡伦发明的造纸法,法拉第发现的电磁感应,特斯拉发现的无线电,图灵提出的图灵测试,昂内斯发现的超导现象,爱因斯坦一波多尔斯基—罗森发现的量子纠缠等。这些本初点状态的根技术,在其后的实践中都引发了相关领域的技术大爆发和产业高成

长,并最终成为人类文明创新之根。

(2)鸿蒙期。种子期是根技术“化无为有”的鸿蒙期,是一切“有”的开端。此时,根技术尚处在似有未有的“无”状态,需要天才之眼去发现,需要制度、环境以及物质条件去孕育,否则本初点是极易被忽略的。因此,确定种子期的第一步是发现原理,即依据第一性原理逐步确定技术本初点的范围,第二步是在确定的范围内展开精细化的筛选,第三步是开启“生命”检测。这个过程和人类文明的进程突然加快是类似的。人类在发现和确定技术种子本初点的历史长河中,既有缓慢的超长待机状态,也有智慧大爆炸时代。历史地看,技术种子大爆炸主要有3个阶段,即轴心时代、文艺复兴时代、信息技术时代。

在轴心时代,东西方几乎同时出现了一批寻找到本初点种子的科学家、哲学家等。如中国的老子、孔子、庄子、墨子、韩非子,古希腊的苏格拉底、柏拉图、亚里士多德,古印度的释迦牟尼、阿南等,他们几乎都在公元前800年至公元前200年之间,特别是公元前600年至公元前400年这段时间,为人类定位了各种关键“奇点”。这个时期发明的可转动的轮子,可观测天空的小孔成像设备,可以冶炼铁矿石的炉子等,都成为推动人类文明升级的重要根技术。同样,发生在公元1300—1600年之间欧洲文艺复兴时期,是另一场“本初点种子”发现盛宴,在这个时期艺术、物理学、天文学、经济学等领域都发生了突破性发明。这个时期的五大发明都是来自“本初点”的天才设计。如抽水马桶的发明使人类卫生与健康跃上了一个新的文明高度,降落伞的发明使飞行安全成为现实,复合显微镜的发明使微观世界暴露出了本来面目,望远镜的发明使宇宙尺度下时空变得可观测,印刷机的发明使得大量信息能够以更容易、更快速、更易于访问的方式传播。发生在我们当下的信息技术时代,本初点种子技术更是呈现出量大、能高、速快的特点。如物联网技术、互联网技术、计算机与人工智能、基因编辑技术、生物合成技术、核聚变技术、超导技术等。

在梳理和分析古今中外的根技术本初点种子

技术问题,发现根技术种子是一个总和概念,根据其个体密度大小、能量高低,还可以进一步分为低能级根技术种子、中能级根技术种子和高能级根技术种子。关于技术种子能级问题,赵红州等^[21]曾经有过开创性研究,他们发现“科学发现的过程,类似于采掘过程。它总是沿着不同物质层次(或能量级别)不断推进的,不同时代总有不同的科学成为‘当采学科’”。

第一,低能级种子。低能级是天文学中的一个专有名词,指的是能量较低的状态或水平,在量子物理学中,能级又是指粒子或系统在不同能量状态下的分布。笔者借用低能级这个概念形容根技术种子,是特指那些单位质量密度低、能量含量小、生命周期短、影响范围窄的根技术元型。如众所知,生命科学领域,每粒种子都是全息的,都包含了其未来的所有性征及成长的时间极限和空间极限。假如一粒技术种子是一个生命体,那么其所具有的天然基因以及外部适应性条件则决定了其未来能级的高低。如麻雀卵成长的终极成就是一只飞翔在屋檐、田野的小鸟,能够继续衍生的后代也不过是下一代麻雀,而大天鹅卵成长的终极则是一只翼展超过 2 m、体重可达 10 kg 以上,且可以飞跃珠穆朗玛峰的大鸟。以植物类比,草本型植物大多低矮、短寿,即使草本之王的竹子、香蕉等也不过 5 m 左右且根干支密度低下,而灌木型植物则在生命周期、致密度上均有大幅度提升,至于乔木型植物,则可以长成如北美红杉那样高达 110 m、胸径可达 8 m 的巨无霸。因此,低能级根技术种子由于其天然的局限,往往难以独立发展成为具有高能量的技术体系,多为简单型“根—干—枝”技术结构,多可以在微小领域创造出新的技术范式。

第二,中能级种子。顾名思义,中能级是能量介于低能级和高能级之间的状态。笔者所说的中能级根技术种子,特指那些单位质量密度较高、能量含量较高、生命周期较长、影响范围较宽的根技术元型。这类根技术种子由于具备了相当的质量和能量潜能,在适宜条件下通常能够生发出比较强劲的主根及辅根,并能够向上支撑一个或多个主干的生长,并最终在其专属领域形成小生态系

统,是比较复杂的“根—干—枝”技术结构。中能级根技术种子是非常重要的根技术源泉,多可以在中型领域开拓出新的技术赛道。比如集成电路中的封装技术,它同样是根技术,是决定芯片最终性能的关键,但它与芯片制造技术相比却又是一个中能级的根技术,只在其专属领域才具有核心价值。中能级根技术种子分布比较广泛,每一个细分领域都存在一个或多个这样的元型种子,一旦孕育成功就可以改变其领域的技术面貌,进而对相关产业形成一定的能级跃迁效应。

第三,高能级种子。高能级根技术种子,特指那些单位质量密度极大、能量含量极高、生命周期很长、影响范围非常宽泛的根技术元型。这类根技术种子由于具备了大密度质量和高能量潜能,一旦发现并获得生发条件,则会发育出强劲而复杂的根体系,并以此为其后的干技术、枝技术发展、成长等提供持续的高强度能量供给。因此,由高能级根技术种子发育成的基本是非常复杂的“根—干—枝”技术结构。高能级根技术种子是开天辟地式技术革命的重要引发者,整个人类技术史的每一次大的跃迁现象,都可以看到高能级根技术种子所给予的第一驱动力。它不仅对某一领域的底层技术产生颠覆,而且对全技术系统都会产生极大的影响,最终改变社会发展面貌及进程。如以开辟人类新纪元的互联网为例,其根技术元型就是根服务器和域名系统(DNS)。根服务器主要负责管理全球互联网域名系统,域名系统(DNS)负责解析网址,将域名和 IP 地址相互映射。由于互联网两大高能级根技术种子在 20 世纪 80 年代的“野蛮生长”,不仅快速颠覆了信息领域的技术范式,而且很快引发了一系列应用领域的技术创造,成就了全世界从工业革命到信息革命的大跃迁。

2. 筑根期:萌发态—盘古期

(1)萌发态。经过或长或短的种子期,在适宜的条件下种子被激活、萌发,开始向下筑根。最初的筑根往往是一项相对“简单且粗鄙的技术”,它深埋在沃土之下,充分利用种子自身携带的能量向下扎根,使根技术逐步具备向上释放能量的条件。

从当今耳熟能详的世界科技巨头发展历程看,它们无一例外地都是发现了相关领域的技术种子密度和能量,并遵从第一性原理筑根成功的。如瓦特改良蒸汽机,英特尔发明 x86 架构,微软公司发明 Windows 操作系统,苹果手机发明 A 系列处理器、iOS 系统、生态系统集成和创新设计,阿斯麦 (ASML) 光刻机发明光源系统,Open AI 发明 GPT 系列模型,华为公司发明 5G 网络技术,DeepSeek 发明新的模型蒸馏 (model distillation) 技术,Sangamo 生物公司控制的 ZFNs (锌指核酸酶)、TALENs (转录激活因子样效应物核酸酶)、CRISPR/Cas9 和单碱基编辑技术等。

(2) 盘古期。筑根期是根技术发育的关键时期,具有盘古开天辟地的特点。首先,筑根期是验证种子真伪的试金石。一项技术所依托的种子是否具备足够的密度和能量成长空间,只要给予其适宜的环境和条件就可以得到验证。这些环境和条件包括必要的物质条件和制度条件,前者解决的是技术筑根的硬件,后者解决的是技术筑根的软件,如果两者都得到了充分满足,筑根依然不能实现则要考虑种子本身的真伪。反之,如果筑根实现,则说明种子真实存在且可以孕育出真正的技术之根。其次,筑根期是验证筑根模式是否可行。从一项技术想法到一项技术开始生根,需要一系列约束或保障条件,这些边界约束条件综合起来优化之后形成的标准就构成了筑根规范或模式。只有规范或模式得到验证之后,真正的规模化筑根才会进入快车道。最后,筑根期是测试筑根动能的关键节点。一项技术可以筑根并不能证明其就具备了成为根技术的标准,只有其能够形成足以高密高能且持久向上赋能力量的根,才能够证明其具备了成为根技术的条件。

筑根期是根技术“地下活动”时期,按照筑根能力和筑根程度可以划分为弱筑根模式、中筑根模式和强筑根模式 3 种细分类型。

第一,弱筑根模式。由于种子能级的差异,所筑根的壮弱是有很大差异的。对于低能级种子来说,限于其基因及能量密度,通常只能形成弱筑根

模式。这种技术之根通常只会局限在一个有限的范围,根茎很难发育成粗壮形态,依托其形成的技术体系,通常也是比较简单、低矮、功能较弱的。因此,弱筑根模式通常是指小型技术系统底层技术初期的状态,它向深、向广的扎根能力都非常有限,所发育成也更多是小微细分领域的根技术,甚至多以技术诀窍等专有技术形态呈现。

第二,中筑根模式。中筑根模式对应的是中能级种子的筑根形态。由于中能级种子的基因密码和能量密度远超过低能级种子,其筑根能力会有大幅度提高,可以形成比较粗壮且体系化的技术根系,为涌现、爆发赋予较大的能量。通常中筑根发育成的根技术,多为专属领域的底层技术,所赋能的技术体系范围也多为单一产业领域,很少出现“破圈”现象。

第三,加强筑根模式。强筑根模式对应的是高能级根技术种子的筑根形态。由于高能级种子所具有的高成长基因以及自身所携带能量密度,所以这类种子一旦获得筑根条件,往往会发育出极为强劲的根系统,并由此积累出巨大的现实能量和潜在能力,为涌现、爆发储备巨大能量。这种根技术一旦筑根成功,就会展现出强大的创造力、领导力,为整个创新链提供绵绵不绝的高强度赋能。强筑根所形成的根技术乃至根技术体系,不仅是专属领域的根技术,而且形成多领域的“破圈效应”,颠覆相关领域的底层技术体系,进而达成技术革命性大变革。如随着人工智能的快速迭代,加强人工智能的主体根技术基本完成,AGI 的根技术将打破所有学科、产业、资本、市场边界,形成巨大的“破圈效应”。强筑根之后的根技术,是典型的大技术,对相关领域的技术创新、产业变迁、资本流向和市场升级,往往具有梅特卡夫^[22]所说的“创造性毁灭”力量。

3. 涌现期

(1) 具形态。霍兰^[23]首先提出了著名的涌现理论。他认为,在复杂的自适应系统中,“涌现”现象俯拾皆是:蚂蚁社群、神经网络、免疫系统、互联网乃至世界经济等。但凡一个过程的整体行为

远比构成它的部分复杂,皆可称为“涌现”。笔者在此借用“涌现”一词,是表达根技术在筑根期之后突破“地平线”向上生长的时期的初始具形样态。此时,根技术筑根成功,向上生长开始发力,在“地平线”上已经形成初始主干及枝杈,甚至部分分蘖也已经在进行之中。换言之,此时的根技术正在演化成一个初始的“根—干—枝”技术复合体。其中,干—枝技术部分就是根技术的“涌现”初始形态。

根技术的具形态概念可以从其技术形态、应用形态和生态形态 3 个方面来理解。技术形态是指其作为根技术所表现出的具体形式和技术特征已经基本呈现。如基础性的确立——某一领域的技术底座。以电子产业为例,半导体技术是其基础,几乎所有电子设备都离不开芯片;核心的树立——决定整个技术体系的发展方向。以 5G 网络通信技术为例,未来物联网、智慧城市等应用的核心支撑。引领性的展现——能够引领行业变革。以人工智能技术为例,它可以引领各行各业的智能化转型。

应用形态是指根技术在具体应用场景中的表现形式和作用方式。如广泛性的呈现——具有广泛的适用性。以云计算技术为例,它不仅用于企业 IT 基础设施,还广泛应用于教育、医疗、金融等领域。渗透性的显露——能够深度渗透到各个行业,改变传统的运作模式。以大数据技术为例,它正在改变金融、零售、制造等行业的决策方式。协同性的显现——能够与其他技术协同工作,形成完整的解决方案。以物联网技术与人工智能技术结合为例,它们推动了智能家居、智能工厂等应用的发展。

生态形态是指根技术在技术生态系统中的地位和作用。如主导性的占位——在技术生态系统中占据主导地位,其他技术往往围绕它展开。以操作系统(如 Windows、Android)为例,它是软件生态系统的主导技术。衍生性的展露——能够衍生出大量的应用技术和产品。以互联网技术为例,它衍生出了电子商务、社交媒体、在线教育等众多应用。开放性的表达——根技术通常具有开放

性,能够吸引大量的开发者和企业参与生态建设。以开源技术(如 Linux、TensorFlow)为例,通过开放源代码,吸引了全球开发者的参与。

(2)破局期。涌现期是根技术的破局期,是指某一根技术在发展过程中,通过突破关键瓶颈或实现重大创新,从技术积累期进入全面验证期的阶段。这一阶段通常伴随着技术的成熟、应用的初步普及以及生态的初步建立,是根技术从实验室走向局部应用的关键转折点。这个时期是根技术发展的重要里程碑,标志着技术从理论探索和小规模试验阶段,进入标准化、规范化的初商用阶段。在这个阶段,根技术的性能、成本、可靠性等关键指标基本达到商业化要求,市场需求与技术供给形成良性互动,推动技术快速普及。以人工智能技术为例,其破局期出现在 2010 年代,得益于深度学习法的突破、计算能力的提升(如 GPU 的广泛应用)以及大数据的积累,AI 技术从实验室走向各行各业,催生了智能语音助手、自动驾驶、AI 医疗等广泛应用。

破局期主要包括以下特征。一是技术瓶颈的突破。如半导体技术在破局期实现了制程工艺的突破(如从 28 nm 到 7 nm),使得芯片性能大幅提升,成本显著下降。5G 技术的破局期得益于毫米波通信和大规模天线阵列技术的突破,实现了高速率、低延迟的通信能力。二是商业化条件初步成熟,包括下降、性能稳定、供应链形成等。如太阳能技术的破局期出现在 2010 年代,光伏发电成本从每瓦时 0.30 美元降至 0.05 美元以下,推动了全球可再生能源的快速发展。三是市场需求爆发,推动技术快速普及。如移动互联网技术的破局期得益于智能手机的普及和用户移动应用的需求爆发。四是生态系统的快速扩展,吸引大量企业和开发者参与生态建设,形成繁荣的技术生态。如区块链技术的破局期吸引了金融、供应链、物联网等领域的广泛参与,形成了多样化的应用生态。五是政策与资本的支持,加速技术的商业化进程。如新能源汽车技术的破局期得益于各国政府的补贴政策和资本的涌入,推动了电动汽车的快速普及。

涌现期的破局意义重大,它意味着根技术进入了从技术驱动向市场驱动转变的关键阶段,不仅推动行业变革,还可以创造新经济形态,提升社会效率等。

按照涌现理论的类型划分,根技术筑根完成之后的涌现也可以根据程度强弱分为弱涌现、中涌现和强涌现3种形态。

第一,弱涌现形态。从人类技术史看,绝大多数根技术都属于弱涌现类型,即一项根技术只发育出一个主干,进而只在某一个特定领域或细分领域产生创造作用,“一根一干少枝”是常态。这种类型的根技术,微观上看往往只具有“微小创新”价值,它形成的技术体系、产业宽度及市场利基非常有限;宏观上看,这类根技术通常不会引发技术革命和产业革命,对社会经济范式也多以补充完善为主体形态,而不会或很少颠覆现有技术体系、产业体系和经济范式。

第二,中涌现形态。从工业革命以来的根技术特点看,其中涌现在技术革新和产业升级上发挥着重要作用,大量的“一域性根技术”多属于此种涌现成果。所谓中涌现类型,是指一项根技术可以发育出“一根一干多枝”形态,即在干层面并不产生指数效应,但在枝的环节却可以展现出比较强大的爆发性。从微观效果看,中涌现类型的根技术通常可以由技术掌控者创造出一个新产业或开辟出一个新赛道,技术形态表达为“专精特新”;从宏观效果看,中涌现类型的根技术具备颠覆单个行业或领域底层技术的能力,可以引发某个特定行业的技术革命,但由于其动能的有限性,通常难以引发社会性的技术革命和产业革命,更不会创造出新的技术—经济范式。

第三,强涌现形态。从200多年工业的时间尺度看,一共发生了6次技术革命^[24]。这6次技术革命分别是始于1771年英国的产业革命,始于1829年英国并扩散到美国及欧洲大陆的蒸汽和铁路革命,始于1875年美国和德国的钢铁、电力、重工业革命,始于1908年美国的石油、汽车和大规模生产革命,始于1971年美国的信息和远程通信革命,以及始于2022—2024年美国和中国的人工智

能大模型革命。从根技术涌现视角看,这五次技术革命无一例外都是根技术强涌现的结果。如1765年珍妮纺织机的诞生,极大地提高了生产效率,标志着人类从手工业生产进入了机械化,这种以机械化为核心的技术革命,不仅筑牢了纺织业的高速成长之根,而且对机器制造、棉花新品种选育、社会新基础设施都引发了全面革命。珍妮纺织机的发明不仅是一个技术创新,更是工业革命第一个根技术的强涌现。从结果看,这次强涌现根技术直接创造了有别于农业革命的新经济范式,开创了世界工业革命的新纪元。第二次、第三次、第四次技术革命,同样展现了强涌现根技术的伟大力量。

第五次(1971年)和正在发生的第六次(2022年)技术革命,是以信息采集、信息传输和信息处理为AGI时代为标志的。其中,第五次技术革命的根技术是物联网技术、互联网技术、计算机与人工智能技术,它们相互之间的迭代推进,极大地提高了信息采集、传输和处理的效率,致使美国等技术革命先发国家诞生了大量信息和远程通信领域的类国家公司。第六次技术革命尚没有社会共识,是笔者综合2022—2025年1月通用语言大模型演进及迭代特征确定的,特别是2022年11月30日美国OpenAI的ChatGPT上线,和2024年11月20日中国深度求索的DeepSeek-R1上线,直接展现出了与第五次技术革命截然不同的“升维式”特征。如果说第五次技术革命是智能化根技术的强涌现,那么第六次技术革命则是智慧智能技术的强涌现。以笔者观察到的情况看,通用语言大模型的核心技术Transformer、预训练技术、RLHF、模型压缩、多模态融合等分别可以表达为根技术—干技术—枝技术等。假以时日,第六次技术革命将彻底颠覆已有的技术—经济—社会范式,特别是AGI真正普及之时可能就是工业革命退出历史舞台之日,信息革命范式将成为主导未来技术、产业、经济、社会的根力量,届时“现实世界”与“虚拟世界”将融为一个不可分割的统一世界(见表3)。

表 3 6 次相继出现的强根技术革命 (1771—2024)

技术革命	名 称	核心国家	诱发技术革命大爆炸的标志事件	起始年份
第一次	产业革命	英国	珍妮纺织机,阿克莱特在克隆福德设厂	1765 - 1771
第二次	蒸汽与铁路时代	英国 (扩散到欧洲大陆和美国)	蒸汽动力机车“火箭”在利物浦到曼彻斯特的铁路上试验成功	1829
第三次	钢铁、电力、重工业时代	美国和德国追赶并超越英国	卡内基酸性转炉钢厂在宾夕法尼亚的匹兹堡开工	1875
第四次	石油、汽车和大规模生产的时代	美国及德国并扩散至欧洲	第一辆 T 型车从密歇根底特律的福特工厂出产	1908
第五次	信息和远程通信时代	美国 (扩散到欧洲和亚洲)	在加利福尼亚的圣克拉拉英特尔微处理器宣告问世	1971
第六次	AGI 时代	美国发动,中国紧追	美国 OpenAI 宣布 ChatGPT (2022—11—30) 上线,中国深度求索宣布 Deep seek - R1 (2024—11—20) 正式上线	2022

注:本表是在卡萝塔·佩雷斯整理的“五次相继出现的技术革命”基础上,结合第六次技术革命的基本情况补充完善形成的^[24]。

4. 爆发期

(1)繁荣态。一项根技术经过种子期的成功蓄势,筑根期的成功蓄力,涌现期的成功破局,就会迎来爆发期的繁荣时态。如果说种子期、筑根期和涌现期是一项根技术的量变时态,那么爆发期则是其质变后的时态。爆发期的根技术,将依托根技术的力量以及涌现之后的性状,引发根技术支撑的干技术、枝技术等爆发性增加,使根技术在向上赋能上实现全技术链条的繁荣景象。以人工智能技术为例,2012 年深度学习在图像识别领域取得突破性进展后,全球 AI 相关论文发表数量从每年不足 1 万篇快速增长至 10 万篇以上,风险投资金额从 2012 年的 5.9 亿美元飙升至 2021 年的 935 亿美元。这种爆发式增长不仅体现在技术研发投入上,更反映在应用场景的快速扩展和产业生态的急剧膨胀上。

根技术的繁荣态是指某一根技术在经过破局期后,进入全面普及、广泛应用并深度融入社会经济生活的阶段。在这一阶段,根技术不仅实现了大规模商业化,还催生了丰富的应用场景和生态系统,成为推动经济增长和社会进步的核心动力。繁荣态是根技术发展的成熟阶段,标志着技术从局部突破走向全面繁荣。

繁荣态是根技术发展的最高阶段,表现为技术的广泛应用、生态的成熟以及对社会经济的深远影响。在这一阶段,技术的性能、成本和可靠性达到最优状态,市场需求与技术供给形成高度协同,技术生态呈现出多元化、开放性和可持续性。以互联网根技术为例,在其达到繁荣态时,互联网技术开始在全球范围内普及,并催生了电子商务、社交媒体、在线教育等众多应用,深刻改变了人们

的生活方式和经济模式。

繁荣态的主要特征表现在以下方面。一是技术成熟与标准化。在繁荣态,根技术的性能、成本和可靠性达到最优状态,技术标准趋于统一,行业规范逐步完善。以移动通信技术(如 4G、5G)为例,其在繁荣态实现了全球标准化,推动了智能手机和移动互联网的普及。二是广泛应用与场景多元化。根技术在繁荣态被广泛应用于多个领域,催生了丰富的应用场景和商业模式。以人工智能技术为例,其在繁荣态时,恰是其开始应用于医疗、金融、制造、交通等多个领域之时,进而催生了智能诊断、智能投顾、智能制造、自动驾驶等应用。三是生态系统繁荣。在繁荣态,根技术的生态系统高度成熟,吸引了大量企业、开发者和用户参与,形成了开放、协同、可持续的生态。如以云计算技术为例,在繁荣态时形成了以 AWS、阿里云、微软 Azure 为核心的全球云生态,支持了数百万企业的数字化转型。四是经济与社会价值显著。根技术在繁荣态创造了巨大的经济和社会价值,成为推动经济增长和社会进步的核心动力。如以电子商务技术为例,在繁荣态时极大地推动了全球零售业的数字化转型,2023 年全球电子商务市场规模超过 6 万亿美元。五是政策与资本的高度支持。在繁荣态,根技术通常得到政策和资本的高度支持,进一步加速技术的普及和生态的扩展。如以新能源汽车技术为例,在繁荣态得到了各国政府的补贴政策和资本的持续投入,2023 年全球电动汽车销量超过 1 000 万辆。

(2)主导期。爆发期是根技术全面展现其元动力的时期,不仅创造出自身独有的创新链,且带来相关产业链的重构。以智能手机为例,触控技

术、移动处理器、高分辨率显示屏等关键技术的突破,不仅创造了全新的智能手机产业,还带动了移动应用开发、移动支付、共享经济等衍生业态的发展。爆发期也是根技术应用场景快速形成,甚至不断颠覆相关应用场景的时期。如移动支付在中国的普及率从2013年的25%跃升至2020年的86%,创造了全球最大的移动支付市场。再如DeepSeek从名不见经传到疯狂成长,仅仅两个月时间就创造了4 000万下载量,日活用户超过2 000万人的成绩,充分演绎了爆发期根技术的超强动能。

当然,同样是根技术,由于种子、筑根、涌现等原始禀赋以及外部成长条件的差异,它们在爆发期所表现出来的爆发力度、宽度和高度也是存在着比较大的差异的。受制于根技术种子、筑根和涌现等基础因素,根技术的爆发程度表现通常表现为低烈度爆发、中烈度爆发和高烈度爆发三种形态。

第一,低烈度爆发。低烈度爆发形态是基于低能级种子、弱筑根模式和弱涌现条件形成的根技术爆发形态。具体特点如下:一是爆发能量低,技术向上成长空间比较小,支撑后续的技术创造力量较低;二是指数增长层级少,经过3—5次的分型就会快速衰减,创造的创新链比较短;三是引发波及面窄,爆发的波及面通常局限在相对小的邻域范围,对产业创造、市场创造价值比较低。低烈度爆发是众多根技术爆发的常态,有些会成为人类技术进步史上的重要生态缔造者,但更多地成为“一过性”技术。

第二,中烈度爆发。中烈度爆发形态是基于中能级种子、中筑根模式和中涌现条件形成的根技术爆发形态。具体特点如下:一是爆发能量比较高,具备凿穿某一域的能力,技术向上具备了比较强大的支撑能力;二是指数增长层级比较多,可以经过5—10级以上的技术分型,在某些领域创造的创新链比较长;三是引发波及面比较宽,爆发的波及面通常会对局部形成压倒性影响,深刻地改变该领域的技术格局。中烈度爆发是众多根技术爆发的非常态,这些爆发成果对相关产业、市场以

及社会局部都会产生重要影响,甚至会成为未来强根技术发展的重要基础。观察人类社会中度烈度根技术爆发的历史,很容易看到它们的历史镜像和现实迭代。如轮子被称为人类进入文明之后最重要的根技术,但其最初只是一种替代“滑橇”技术的创造,其后经过漫长的历史才不断再开发,继而成为今天无处不在的人类根技术^[25]。

第三,高烈度爆发。高烈度爆发形态是基于高能级种子、强筑根模式和强涌现条件形成的根技术爆发形态。具体特点如下:一是爆发能量巨大,具备颠覆多领域底层技术的能力,技术向上具备了强大的支撑能力;二是指数增长层级非常多,可以经过N级以上的超长次技术分型,在初始领域及衍生领域都可能创造出非常长的创新链、产业链和价值链;三是爆发可以是连续性的或间歇式的多次爆发,对社会经济、文化、政治等都可能产生巨大而深刻的变化。高烈度爆发是众多根技术爆发的偶然态,这些爆发成果是人类社会发生巨大的变迁的根本力量。150万年前人类发明了火的制作方法,使人类开启了能量革命;4 500年前,人类发明了冶铁技术,开启了人类农业革命;250年前人类发明了蒸汽机,开启了人类工业革命的序幕;70年前人类发明了互联网、芯片等技术,开启了人类信息革命的新时代。当前,人工智能的飞速迭代,ChatGPT、DeepSeek等的相继出现,可以视为近期最具“高烈度”特征的根技术爆发现象。

5. 泛在期

经过种子期、筑根期、涌现期、爆发期之后,根技术的底层技术以及衍生技术完全定型,大的技术突破或创新基本停止,其应用场景也从某一局部泛化到社会、经济的多个方面,实现了技术与人类生活的深度融合。出现上述现象则意味着根技术已经进入了泛在期。

(1)开放态。技术泛在(technological ubiquity)指的是技术在现代社会中无处不在、广泛渗透的现象。根技术进入泛在期,意味着不再是一项神秘技术和持续爆发技术,它的基本规范、标准都已经成为全社会的共有知识,可以是公共适用技术,

也可以是基础技术,还可以是共性技术或底座技术。以信息根技术的泛在化衡量,它是物联网技术、5G 技术、人工智能技术、芯片制造技术等在社会各领域的广泛应用和深度融合。

(2)平台期。泛在期根技术的主要特征为:一是根技术爆发结束,技术创新速度变得缓慢,一个完整的创新链创建完毕,技术体系趋于成熟和稳定;二是根技术开始广泛普及和深度融入社会方方面面,成为全社会的技术基础;三是根技术应用达到其渗透的极限,不再驱动新的应用场景出现。

大尺度且宏观地看,泛在期根技术是全人类共有财富,它们已经由商品状态回归到完全的知识状态。泛在期根技术也可视为后发者福利——可以免费获取,可以采取拿来主义,可以极大地缩小与根技术主导者之间的鸿沟。泛在期根技术的这种超级外部性是人类文明扩散、传播、继承、再创造的超级红利,也是不同经济体交流互鉴效能倍增的捷径。

当然,对于不同类型的根技术,其泛在期表现也有着比较大的区别。通常可以分为小微泛在、专属泛在和超级泛在。

第一,小微泛在。小微泛在的根技术是指那些在小微企业、个人用户以及日常生活场景中广泛渗透并发挥作用的根技术。这类技术通常具有低成本、易用性、高普及度和强适应性等特征,能够满足小微主体和普通用户的需求。小微泛在的根技术,通常是由低能级种子—弱筑根—弱涌现—低烈度爆发形成的根技术,其泛在程度通常会局限在其细分领域,构成其底层技术的新公共产品。由于这类根技术门槛相对较低,包括发明者对其实施的技术壁垒也相对有限,所以在经历短暂的爆发期之后,迅速进入泛在通道。这种根技术通常是某一细分领域的元技术,对于其所属领域具有“不二”的影响力,以致很多方式、方法泛在上千年。如传承上千年的古法造纸、冶铁、制陶等。在现实中观察到的中国浙江、广东的产业集群,就是典型的小微根技术泛在化的典型。这些集群初始阶段往往只有一家掌握某一项或一组该细分领域的根技术,其后这些根技术被员工掌

握并经过再创业迅速扩散为泛在状态,进而支撑了同类企业的指数级增长,最终演化为产业集群。

具体来说,小微泛在的根技术特征:一是低成本与易获取性,如云计算服务(如 AWS、阿里云)提供按需付费的模式,小微企业无需投入大量资金即可使用高性能计算资源;二是高普及性与易用性,如移动支付技术(如支付宝、微信支付)几乎覆盖了所有消费场景,用户只需扫码即可完成支付;三是增强适应性与场景化,如 SaaS(软件即服务)工具(如钉钉、企业微信)可以根据小微企业的需求提供定制化的办公解决方案;四是轻量化与模块化,如开源技术(如 TensorFlow、Kubernetes)允许开发者根据需求选择特定功能,降低了开发门槛;五是生态化与协同性,如智能家居设备(如小米生态链)通过物联网技术实现设备间的互联互通,为用户提供一体化的智能生活体验;六是普惠性与社会价值,如移动支付技术在发展中国家和地区的普及,极大地促进了金融包容性和经济增长。

第二,专属泛在。根技术的专属泛在是指某些根技术在特定领域或行业中深度渗透,成为这个领域不可或缺的核心支撑,甚至定义了行业的标准和生态。

具体来说,专属泛在的根技术主要有以下特征。一是专属泛在的根技术促进了根技术的高度专业化和对特定领域的深刻影响。专属泛在的典型特征是根技术在特定行业中的深度渗透。如在半导体行业中,光刻技术是制造芯片的核心根技术,ASML 的极紫外光刻机(EUV)几乎垄断了高端芯片制造市场。根据 ICInsights 的数据,2023 年全球光刻机市场规模超过 200 亿美元,其中 ASML 的市场份额超过 80%。二是专属泛在的根技术定义了行业的标准和生态。例如,在通信领域,5G 网络技术作为根技术,不仅提升了通信速度,还定义了物联网、智能城市等新兴应用的标准。根据 GSMA 的数据,2023 年全球 5G 连接数已超过 10 亿个,预计到 2025 年将达到 20 亿个。三是专属泛在的根技术加快了这个行业的持续创新。如在生物医药领域,基因编辑技术(如 CRISPR)作为根技术,正在革命性地改变药物研发和疾病治疗的方式。根

据麦肯锡的报告,2023 年全球基因编辑市场规模达到 100 亿美元,年均增长率超过 30%。四是专属泛在的根技术推进了专业生态体系的形成。如 DeepSeek 实施开源之后,全球迅速形成语言类大模型的泛在创新高潮,极大地加快了强大的生态系统的发展。

第三,超级泛在。根技术的超级泛在是指根技术在社会、经济、生活等各个层面无处不在,并且深度融合,成为推动社会进步和变革的核心力量。这种现象不仅体现在技术的广泛普及,还体现在其对人类社会运行方式的根本性改变。

具体来说,超级泛在的根技术主要有以下特征。一是超级泛在是根技术与社会各个领域的深度融合。如人工智能、大数据、物联网等根技术已经渗透到医疗、教育、交通、金融等各个行业,改变了传统的运作模式。在医疗领域,AI 辅助诊断系统能够快速分析医学影像,提高诊断准确率;在教育领域,个性化学习平台通过大数据分析学生的学习行为,提供定制化的学习方案。根据麦肯锡的报告,2023 年全球 AI 技术在各行业的应用市场规模已超过 1 万亿美元。超级泛在还体现在基础设施的智能化。二是根技术正在将传统基础设施升级为智能基础设施。如智能电网通过物联网和大数据技术实现电力的高效分配和管理;智能交通系统通过实时数据分析和 AI 算法优化交通流量,减少拥堵。根据国际能源署(IEA)的数据,2023 年全球智能电网投资超过 500 亿美元,预计到 2030 年将翻倍。三是根技术的超级泛在深刻改变了人们的日常生活。智能家居、可穿戴设备、自动驾驶等技术正在将日常生活全面智能化。如智能家居系统通过物联网技术实现家电的远程控制和自动化管理,自动驾驶技术通过 AI 和传感器技术实现车辆的自主导航。根据 Statista 的数据,2023 年全球智能家居设备市场规模达到 1 500 亿美元,自动驾驶市场规模超过 500 亿美元。四是根技术的超级泛在推动了经济模式的变革。根技术正在催生新的经济形态如共享经济、平台经济、数字经济等。如共享经济平台(如 Uber、Airbnb)通过物联网和大数据技术实现资源的高效配置,平台经济通过

云计算和 AI 技术提供高效的服务和交易平台。根据 PwC 的报告,2023 年全球共享经济市场规模超过 2 000 亿美元,数字经济占全球 GDP 的比重超过 50%。

四、结论、建议与展望

(一)主要结论

结论一:根技术是创造技术体系的技术。将根技术概念纳入技术经济学和创新经济研究,是一项具有开创性的探索,为技术经济学和创新经济学提供了新的观察视角和研究对象。提出的根技术定义为:从一个技术种子引发,经过向下筑根,实现向上涌现,继而在某个临界点产生爆发,最终成为泛在的元技术。其本质上是其所在领域技术体系的“基因源代码”,是创造技术的技术。并在此定义的基础上,将根技术的显著特征概括为“原创性、基础性、不可替代性、扩散性和多向赋能性”,从多个侧面确认了根技术在创新链条上的“基因源代码”地位及本质属性。

结论二:根技术具有独特的生命周期,分期与变态同步发生。从一项根技术的全生命周期轨迹看,它是由 5 个分期和 5 种形态构成的,即种子期对应于混元态,筑根期对应于萌发态,涌现期对应于具形态,爆发期对应于繁荣态,泛在期对应于开放态。对根技术生命周期分期、变态规律的发现,为发现、培育根技术提供了关键标识。

结论三:根技术体系具有弱根技术、中根技术和强根技术 3 种分型。从根技术的天然禀赋能量、后天资源获取和输出能量水平 3 个维度看,弱根技术价值比较低,通常决定比较微小领域技术体系的底层架构;中根技术价值适中,通常决定某一专属领域技术的底层架构;强根技术价值巨大,通常能够决定某个大领域乃至多个领域技术的底层架构。对根技术体系这一分型的发现,为识别、筛选以及评价根技术价值提供了重要依据。

结论四:强根技术创新是对创新链、产业链和价值链具有重要的不可替代的价值。在全球化竞争与技术迭代加速的背景下,根技术因其原创性、基础性、不可替代性、扩散性和多向赋能性,已经成为决定创新链、产业链和价值链的核心枢纽。

当下各个国家在国际技术、产业竞争中,表面上是创新链、产业链和价值链竞争,深层次则是根技术创新范式的竞争,特别是强根技术范式的竞争。因为,哪个国家或经济体掌控的根技术数量越多,质量越高,就会在相关领域的竞争中占据绝对优势,甚至会形成“根霸权”,尤其是对强根技术的掌控,甚至决定着一个国家或经济体的国运或命运。

(二) 主要建议

建议一:高度重视根技术创新范式的价值。在创新成为推动社会进步和经济发展的关键动力时期,如何探索更为有效的技术创新范式,是决定我们能否实现真正突破性发展的大问题。根技术创新范式作为一种新的创新思维方式,强调从基础科学原理出发,探索全新的技术路径,为解决复杂问题和实现跨越式发展提供了新的可能性。

建议二:高度重视根技术对创新链的掌控之力。创新链本质是“知识流动—技术转化—价值创造”的动态过程,而根技术正是这一链条的“基因源代码”。弱根技术可以掌控小微创新链,中根技术可以掌控专精特新领域创新链,而强根技术则可以掌控关键领域及相邻领域的创新链。因此,国家要在创新链的根部发力,发现和培育更多的根技术,创造“弱根技术→中根技术→强根技术”热带雨林模式的形成条件,跳出“跟随→模仿→落后→被卡脖子”的低端锁定藩篱。

建议三:高度重视根技术对产业链中的根产业创造之力。根技术商业化的首要成果就是根产业,它是指依据根技术建立的产业链“根部”部分,具有以下 3 个显著特征。一是共性架构性。根产业一般不生产面向市场终端的产品或服务,而是以根技术为核心搭建起一个新的产业基础或共性体系,包括技术实现、工艺流程、统一标准、商业模式等。根产业的这种属性,使其对整个产业链具有完全的掌控力,可以精准地“断枝”“去冗”。二是超强稳定性。根产业一旦形成,通常在其全生命周期都会保持相对稳定,由其衍生出的干产业、枝产业可能会不断更新,甚至淘汰,但根产业部分则持续生机勃勃,这就使根产业表现出“根部长

青”的活力。三是多向赋能性。根产业是多个相关产业之根,同一根产业之上可以演化出多姿多彩的干、枝、杈、叶、花、果等,具有多向赋能性。由于根技术与根产业的特殊属性,决定了基于根技术形成的根产业,不仅具有产业主导效应,还具有显著的产业回顾效应、产业旁侧效应和前向效应,在创造新产业的同时,对传统产业、相关产业、未来产业进行颠覆式创新^[5]。

建议四:高度重视根技术对价值链的支配作用。根技术既是创新链之根、产业链之根,也是价值链之根,谁掌控了根技术谁就可能获得价值链的分配权,尤其是强根技术掌控者,更是价值链的终极话事者。这是因为,根技术决定了价值链的形成和结构,价值链条上的财富自然服从于根技术的支配权。如果说弱根技术、中根技术还有一定的“放弃”可能,那么处在强根技术支配下的价值链中后端者,只能被动接受掌控者的安排。同时,强根技术决定了价值链的竞争力和发展潜力。拥有核心强根技术的价值链往往具有更强的市场竞争力和更大的发展空间,可以推动价值链的升级和变革。因此,高度重视发现、培育根技术,掌控根技术特别是强根技术,对一个经济体在国际价值链上获得主导或较有利的地位是至关重要的。

(三) 展望:中国有机会成为根技术国度

根技术的发生、发展是有规律可循的,种子期的重点是创造适宜的环境,筑根期、涌现期的重点是识别根技术,爆发期的重点是集中资源创造“风口”,泛在期的重点是根技术社会化赋能。换言之,当人们掌握了根技术从种子期、筑根期、涌现期、爆发期和泛在期的形变特点之后,就可以创造条件,模拟根技术产生的环境,识别、培育根技术,加快根技术的成长速度。如在种子期,鼓励铺天盖地式的创新活动,通过大众“试错”筛选出各种根技术。弱根技术可以筑牢微小系统技术之根,中根技术可以掌控专属领域技术之根,强根技术可以创造新的产业、改造传统产业。在筑根期、涌现期可以鼓励耐心资本、开展企业家识别和筛选中根技术、强根技术,集中资源进行重点培育。在

爆发期可以引导政府、企业、个人广泛开展应用场景研发,加快完善创新链,打造产业链。在泛在期,可以充分发挥政府作用,让根技术转变为全社会共享的公共适用技术、基础技术和共性技术。因此,政府、企业、公共研发机构、投资者和大众,未来只要是遵循根技术的发生、发展规律,按照各自角色行动,中国是非常有机会成为一个非常重要的根技术大国的。这方面的成功案例很多。如以色列通过有组织的科研发明的智能温室大棚技术,成为现代农业的重要根技术,不仅把沙漠、荒漠的迦南地真正变成了“流着奶和蜜的地方”,而且技术扩散到世界各地后,极大地提高了农业的生产效率。又如杭州成功育出具有根技术能级的DeepSeek,其背后的逻辑就是遵循了根技术的发生、发展规律。

参考文献:

[1]房汉廷. 5G 未来 蓝海已掀波:5G 是一项影响全球经济的根技术[N]. 人民邮电报,2017-05-10(3).

[2]鲁不逊. 美国打的是一场“根”的战争[Z]. 微信公众号:量子学派,2020-08-14.

[3]华为公司. 构建根技术新生态,给全球开发者更优选择[EB/OL]. (2024-09-21)[2025-02-18]. https://www.sohu.com/a/123456789_123456.

[4]DeepSeek 崛起冲击美股 英伟达股价大跌 17%[N]. 环球时报,2025-01-28(5).

[5]房汉廷. 发现根技术与培育根产业[N]. 安徽日报,2019-06-01(2).

[6]房汉廷. 着力发现和培育根技术、根产业[J]. 科技中国,2024(3):14-16.

[7] TASSEY G. The economics of R&D policy [M]. Californian:Quorum Books,1997:25-30.

[8] KEENAN M. Identifying emerging generic technologies at the national level: the UK experience [J]. Journal of forecasting,2003,22(2/3):129-160.

[9] MOWATT G, BOWER D J, BREBNER J A, et al. When and how to assess fast-changing technologies: a comparative study of medical applications of four generic technologies [J].

Health technology assessment 1997,1(14):1-149.

[10] MAINE E, GARNSEY E. Commercializing generic technology: the case of advanced materials ventures [J]. Research policy,2006,35(3):375-393.

[11] GOLDSTINE H H. The computer from pascal to von neumann[M]. Princeton: Princeton University Press,1980.

[12]克里斯坦森. 颠覆性创新[M]. 崔传刚,译. 北京:中国出版集团,2019:10-25.

[13]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[EB/OL]. (2024-07-21)[2024-11-12]. https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6963770.htm.

[14] ABERNATHY W J, UTTERBACK J M. Patterns of industrial innovation[J]. Technology review,1978,80(7):40-47.

[15]许佳琪,汪雪峰,雷鸣,等. 从突破性创新到颠覆性创新:内涵、特征与演化[J]. 科研管理,2023(2):1-3.

[16]麻省理工科技评论. 2025 年“十大突破性技术”正式发布,DeepTech 深科技[EB/OL]. (2025-01-07)[2025-02-18]. <https://m.sohu.com/media/354973>.

[17]王鸿生. 世界科学技术史[M]. 北京:中国人民大学出版社,2008:5-30.

[18]李约瑟. 中国科学技术史第六卷第五分册:发酵与食品科学(中文版)[M]. 北京:科学出版社,2018:20-100.

[19]《自然科学大事年表》编写组. 自然科学大事年表[M]. 上海:上海人民出版社,1975:1-300.

[20]杨文志. 影响人类的 90 项“根技术”清单,中国贡献有多少?[Z]. 微信公众号:士心察观,2024-07-15.

[21]赵红州,蒋国华. 再论科学发现的采掘模型[J]. 科学学研究,1985(1):38-43.

[22]梅特卡夫. 演化经济学与创造性毁灭[M]. 北京:中国人民大学出版社,2007:11-45.

[23]霍兰. 涌现:从混沌到秩序[M]. 上海:上海科学技术出版公司,2006:10-15.

[24]佩雷斯. 技术革命与金融债资本:泡沫与黄金时代的动力学[M]. 北京:中国人民大学出版社,2007:13-20.

[25]巴萨拉. 技术发展简史[M]. 上海:复旦大学出版社,2000:8-12.

(本文责编:默 黎)