

颠覆性技术研究（二）

——面向国家战略的颠覆性技术识别： DTI 框架构建与 14 项技术实证

李昌奎

1 香港社会科学中心 2 香港产教融合研究所

摘要 本文作为“颠覆性技术研究”系列课题的第二篇，旨在克服传统预见方法中的定性主观性与单一维度缺陷，构建一个适用于国家战略层面的“颠覆性技术识别模型”（Disruptive Technology Identification, DTI）。本文首先在理论层面汲取了通用目的技术（GPT）与技术范式演进理论，提出了基于“技术突破性（T）、市场替代性（M）、赋能广度（E）、制度冲击度（S）”四个维度的分析框架。随后，在研究设计上，由单一的“政策文本研判”进一步扩展为“多源验证设计”——将 G7 等主要经济体的核心政策共识作为基线，并尝试结合公开论文、专利与风险投资数据开展交叉核验。本文据此初步识别出 14 项值得重点关注的前沿技术方向，并根据其技术依赖关系将其映射为五级基础支撑架构，为后续逐项深度研究提供统一的方法论起点。需要说明的是，本文的经验性量化结果以可复现脚本及其输出文件为准；截至当前版本，部分数据库核验仍在持续补充之中，因此正文中涉及具体数值的部分结论均应作审慎理解。

关键词 颠覆性技术；技术预见；DTI 模型；文献计量；专利分析；通用目的技术

DOI <https://doi.org/10.6914/tpss.080201> **文章编号** 2664-1127.2026.0802.1-??

引言与理论基础

（一）研究背景与核心问题的提出

在人类文明史上，每一次足以改变社会基本运行逻辑的技术跃迁，往往并非在其最初萌芽阶段就能被大多数人所认知。蒸汽机从纽可门模型到瓦特改良的漫长演化、电力技术从法拉第实验室到爱迪生工业化应用的艰难历程、互联网从 ARPANET 军事通信协议到 TCP/IP 全球互联的范式蜕变——这些已被历史证

作者简介：李昌奎，男，1975 年 9 月出生，山东寿光人，香港社会科学中心主任兼香港产教融合研究所所长，研究方向：计算社会科学、产教融合。电子信箱 cpcl@cpcl.hk，<https://orcid.org/0000-0001-7446-0198>。

© The Author(s) 2026. CC BY-NC-ND 4.0. **Article History:** Received: 10 January 2026; Accepted: 15 February 2026; Published: 15 March 2026 (online), 15 March 2026 (print).

社会科学理论与实践 (Shèhuì kēxué lǐlùn yǔ shíjiàn) *Theory and Practice of Social Science*, ISSN 2664-1127 (Print), ISSN 2664-1720 (Online), ISSN 2664-1747 (CD-ROM). Published by Creative Publishing Co., Limited 开元出版有限公司 (CPCL®). 国家新闻出版署备案, 中国图书进出口上海有限公司进口. Email: cpcl@cpcl.hk, <https://ssci.cc>, <https://cpcl.hk>.

实的颠覆性技术,在其酝酿期无一例外地显得过于“小众”而不被主流接受,却最终彻底改写了数十亿人的生活方式与国家的竞争生态。这一反复出现的历史规律揭示了一个至关重要的认识论困境:人类预测颠覆性技术的能力,天然地受到“近视性偏差(Myopic Bias)”的系统性制约——我们倾向于高估已知事物的渐进改进,而低估从未见过的根本性突破。

进入21世纪第三个十年,全球科技竞争态势呈现出三个前所未有的显著特征。1. 技术突破的加速性。从ChatGPT发布到引发全球AI竞赛仅历经18个月,从AlphaFold蛋白质结构预测突破到催生AI制药产业浪潮同样迅速,技术成果从实验室扩散至全球生产性应用的周期,正在以历史上从未有过的速度压缩^①。2. 技术竞争的地缘政治化。2017年以来,美国对华先进半导体出口管制的升级、欧盟《芯片法案》的密集立法、中国“补链强链”产业政策的全面推进,标志着技术竞争已从企业间的市场博弈全面升级为大国间的战略资源争夺^②。全球主要国家正在将技术优先级的研判直接嵌入国家安全战略的核心框架之中。3. 技术体系的深度融合化。人工智能赋能材料发现(AI for Science)、量子计算加速药物筛选、合成生物学导入工程设计思维——不同技术领域之间的边界正在快速消弭,形成了一个高度耦合的“技术生态系统(Technology Ecosystem)”,任何单一技术的线性预测都正在失效。

正是在这三重背景压力的叠加之下,一个兼具学术严谨性与政策实用性的核心研究问题浮出水面:在当今全球数以千计、层出不穷的新兴前沿技术中,究竟是什么决定了某项技术能否跃升为真正意义上的“颠覆性技术”?这种颠覆性是否有规律可循?能否在技术完全成熟之前就通过系统化、可验证的方法加以识别?这三个问题不仅是技术预见(Technology Foresight)学术共同体长期面临的未解难题,更是各国科技政策制定者在面对“正确押注”压力下的现实困境。以错误的技术判断为基础的战略投入,可能导致数以千亿计的公共资源误配,而在关键技术竞争中的落后,则可能使一个国家在未来数十年内陷入系统性的技术从属地位。

本文作为“主要发达国家颠覆性技术研究”系列课题的第二篇,正是以上述问题的学术化追问为起点。在首篇研究^③系统梳理了颠覆性技术的经典理论源流之后,本文的核心任务是:构建一个理论基础审慎、经验路径清晰、实证证据充分的“颠覆性技术识别模型(Disruptive Technology Identification Framework, DTI)”,并通过这一模型的系统运用,在方法论上回答“为什么恰恰是这14种技术将在未来十年重塑全球技术格局”,从而为后续14篇专题深度报告提供统一的分析起点和理论坐标。

(二) 文献综述:四大理论传统的贡献与局限

颠覆性技术识别问题的探讨,历史上形成了四个彼此关联但视角各异的理论传统。本研究将对这四个传统进行系统梳理,厘清既有知识积累中的坚实部分,并精确定位本研究拟填补的理论空白。

1. 熊彼特-克里斯坦森传统:微观企业动态视角

现代颠覆性技术研究的理论根源最终可以追溯至熊彼特(Joseph Schumpeter)的“创造性毁灭(Creative Destruction)”理论^④。在《经济发展理论》(1912)和《资本主义、社会主义与民主》(1942)中,熊彼特将经济体系的内生演化动力归结为企业家精神驱动下的创新浪潮:新技术、新产品、新组织形式的出现不断地从内部摧毁旧的经济结构,并以新的结构取而代之。这一“创造性毁灭”过程,本质上就是一种宏观历史尺度上的“颠覆性机制”——它既是资本主义活力的来源,也是其固有张力的体现。1942年的《资本主义、社会主义与民主》更进一步揭示了这种创造性因素背后的垄断性积累特征:真正的创新往往带来暂时性的技术垄断,为后来者提供超额利润的激励,从而维持了颠覆性创新的持续驱动力。

此后,克里斯坦森(Clayton Christensen)在其1997年出版的《创新者的窘境(The Innovator's Dilemma)》

①Bommasani R, Hudson D A, Adeli E, et al. On the Opportunities and Risks of Foundation Models [R]. Stanford: Stanford Institute for Human-Centered Artificial Intelligence (HAI), 2021.

②Miller C. Chip War: The Fight for the World's Most Critical Technology [M]. New York: Simon and Schuster, 2022.

③李昌奎. 颠覆性技术研究(一)——理论起源、概念界定与多维分析框架[J]. 社会科学理论与实践, 2026, 8(1): 1-18.

④Schumpeter J A. Capitalism, Socialism, and Democracy [M]. New York: Harper & Brothers, 1942.

⑤中,将颠覆性创新从宏观历史叙事精准地落地为可操作的企业战略分析框架。克里斯坦森区分了“持续性创新(Sustaining Innovation)”与“颠覆性创新(Disruptive Innovation)”两种截然不同的创新路径——前者沿着既有技术轨道不断改进,使领先企业越来越为主流市场服务;后者则从低端市场或非消费市场切入,以“足够好但价格大幅降低”的初始产品逐步向上侵蚀主流市场,最终颠覆既有竞争格局⑥。克里斯坦森的分析框架在其后二十年中产生了极其广泛的学术影响,并被大量的企业战略研究和商业咨询实践所引用和验证。

然而,熊彼特-克里斯坦森传统清晰呈现了其固有的分析局限。首先,这一传统的分析单位是单个企业和特定产业,而非国家创新体系或宏观技术范式。它能够有效解释“为什么颠覆性企业最终打败了行业巨头”,但无法回答“为什么某些技术门类能够在宏观层面引发整个社会的结构性转变”。其次,这一传统在实践中主要是事后解释性的(ex-post explanatory),在实时识别“哪些挑战者会真正颠覆主流”方面面临严重困难,因为在技术发展早期,破坏性挑战者与最终注定失败的挑战者看起来几乎一样。再者,互联网平台经济时代的颠覆性创新(Netflix、Uber等)的机制更为多样,不能被“低端颠覆”单一路径完全概括,说明克里斯坦森框架的解释力在平台经济范式下有所降低⑦。

2. 通用目的技术传统:长波宏观范式视角

布雷斯纳汉(Bresnahan)和特拉杰腾伯格(Trajtenberg)1995年提出的“通用目的技术(General Purpose Technologies, GPT)”理论⑧,从宏观经济学视角为理解真正足以改变社会形态的颠覆性技术提供了一个截然不同的理论框架。GPT是指那些具有以下三个核心属性的技术门类:(1)广泛适用性(Pervasiveness),即它能够渗透到几乎所有经济部门;(2)持续演进性(Improvement),即它在时间维度上不断深化完善;(3)创新互补性(Innovational Complementarities),即它能在所渗透的各部门中激发大量二次创新。历史上被识别为GPT的技术包括蒸汽机、电力、铁路、信息技术等。

佩雷斯(Carlota Perez)在《技术革命与金融资本》(2002)⑨中进一步将GPT理论与长波经济周期(Kondratieff Waves)相融合,提出了“技术-经济范式(Techno-Economic Paradigm, TEP)”理论。佩雷斯的核心论点在于:真正具有历史性意义的技术革命,不仅仅是孤立的技术突破,而是由一个具有GPT属性的核心技术所引领的整个技术-经济系统的范式转换,也包括新的生产组织形式、新的商业模式以及相应的社会制度变迁。她还揭示了技术革命在扩散过程中遵循的典型周期:从新技术出现到大规模金融投机(“装置期”)再到社会制度调适与黄金繁荣(“部署期”)。

GPT理论传统的贡献在于:它将“赋能范围”和“溢出效应”确立为识别真正意义上的宏观颠覆性技术的核心特征,突破了克里斯坦森传统的微观企业视角局限。然而,这一传统同样面临两个关键限制:其一,GPT的识别高度依赖事后历史归纳,在技术发展早期阶段,很难区分哪些新技术是真正的GPT、哪些只是在特定时期看起来“通用”但最终局限于特定部门的非GPT;其二,GPT理论缺乏量化识别指标,“广泛适用性”“创新互补性”等概念在如何通过可观测经验指标实时测量方面面临操作困难,现有代理指标多局限于事后验证⑩。

3. 技术创新系统与社会技术转型传统

以吉尔(Geels)为代表的社会技术转型(Socio-Technical Transitions)研究传统,从中观层面提供了

⑤Christensen C M. The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail [M]. Boston: Harvard Business School Press, 1997.

⑥Christensen C M, Raynor M E, McDonald R. What Is Disruptive Innovation? [J]. Harvard Business Review, 2015, 93(12): 44-53.

⑦Christensen C M, Raynor M E, McDonald R. What Is Disruptive Innovation? [J]. Harvard Business Review, 2015, 93(12): 44-53.

⑧Bresnahan T F, Trajtenberg M. General Purpose Technologies 'Engines of Growth'? [J]. Journal of Econometrics, 1995, 65(1): 83-108.

⑨Perez C. Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of Bubbles and Golden Ages [M]. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2002.

⑩Bresnahan T F, Trajtenberg M. General Purpose Technologies 'Engines of Growth'? [J]. Journal of Econometrics, 1995, 65(1): 83-108.

理解颠覆性技术如何在社会系统中实现大规模扩散的制度性机制^⑪。吉尔的“多层次视角 (Multi-Level Perspective, MLP)”将技术演化过程分解为三个嵌套层次:处于最底层的“技术壁龛 (Niche)”是创新者保护性实验的微生态,处于中层的“社会技术体制 (Socio-Technical Regime)”是主导性技术与相应制度的稳定锁定,处于最高层的“社会技术景观 (Landscape)”代表缓慢变化但具有深刻影响力的宏观社会经济环境。真正的颠覆性转型发生在“壁龛技术”在景观压力的窗口期内对体制规则发起成功突破的关键时刻,这一理论为理解颠覆性技术面临的制度阻力和转型窗口提供了深刻的社会学视角。

然而,这一传统的局限在于其分析框架高度情境化和案例依赖,在从现有案例研究向“识别未来颠覆性技术”的预测性应用转化方面面临根本性挑战。MLP 更多描述的是社会系统如何“容纳”颠覆性技术的过渡,而非帮助我们识别哪些新兴技术最具颠覆性^⑫。

4. 技术预见方法论传统:从德尔菲法到情景规划

技术预见 (Technology Foresight) 作为一个专注于系统性地识别和评估未来技术机遇的应用研究领域,形成了德尔菲法 (Delphi Method)、情景规划 (Scenario Planning)、技术路线图 (Technology Roadmap)、专利分析与文献计量 (Patent Analysis & Bibliometrics) 及风险投资流向分析等方法论体系^{⑬⑭}。日本每五年开展一次的“科学技术预见调查”、英国政府的“技术展望 (Horizon Scanning)”项目和欧盟的“ESPAS 全球趋势”报告都是这一传统的典型制度化应用。

然而,这一传统同样面临严峻的方法论批评:首先,德尔菲法和情景规划的结论严重依赖参与专家的知识边界和认知框架,当面对真正的根本性颠覆时,即便是顶尖专家也往往会陷入“领域内视角”的系统性偏盲,历史上不乏专家预测被颠覆性技术彻底证伪的案例;其次,各国政策驱动的“关键技术清单”高度受到本国产业和安全利益的影响,在识别超越既有认知框架的新兴技术时存在固有的“锚定偏差”;再者,单一方法的局限性——专利计量无法捕捉保密研发,德尔菲法不能突破共识边界,VC 数据反映短期商业化信心而可能忽视周期更长的基础科学突破,任何单一来源都存在系统性盲区。

5. 多西-阿瑟演化经济学传统:技术演进内在机理视角

在四大主流识别传统之外,还有一组分析视角对颠覆性技术识别同样至关重要,即以多西 (Giovanni Dosi) 和阿瑟 (W. Brian Arthur) 为代表的演化经济学传统^⑮。多西 1982 年在《研究政策》(Research Policy) 发表的奠基性论文中提出的“技术范式 (Technological Paradigm)”与“技术轨道 (Technological Trajectory)”概念,为理解颠覆性技术的内生演化提供了另一个互补性解释框架。多西认为,任何成熟技术领域都会沿着特定范式所界定的性能改进轨道渐进演化;而真正的颠覆,往往发生在一个既有范式被另一个异质性范式所完全替代的“范式跃迁 (Paradigm Shift)”关键节点。这一视角与库恩 (Thomas Kuhn) 在科学哲学中所论述的“科学革命”结构具有显著的同构性——二者都承认:在范式内部的连续性改进从来不是真正意义上的颠覆,只有那些彻底重新定义了问题空间、评估标准和研究方向的技术跃迁,才构成革命性的颠覆。

阿瑟在《技术的本质》(The Nature of Technology, 2009) 中进一步发展了演化论视角,提出了“技术组合演化 (Combinatorial Evolution of Technology)”的理论。他的核心洞察在于:新技术从来不是从虚空中凭空诞生,而是既有技术元素通过新颖的组合方式产生新的功能涌现。这一理论对颠覆性技术识别的

⑪Geels F W. Ontologies, Socio-Technical Transitions (to Sustainability), and the Multi-Level Perspective [J]. Research Policy, 2010, 39(4): 495-510.

⑫Geels F W. Ontologies, Socio-Technical Transitions (to Sustainability), and the Multi-Level Perspective [J]. Research Policy, 2010, 39(4): 495-510.

⑬Cuhls K. Foresight and Technology Assessment — Their Role in Shaping the Emerging Technologies Landscape [J]. Futures, 2020, 115: 102474.

⑭Freeman C. The National System of Innovation in Historical Perspective [J]. Cambridge Journal of Economics, 1995, 19(1): 5-24.

⑮Arthur W B. The Nature of Technology: What It Is and How It Evolves [M]. New York: Free Press, 2009.

直接启示是:真正具有颠覆性潜能的技术,往往表现为对既有若干独立技术板块的系统性重组,从而打开了一个此前各个板块单独无法触及的应用空间。以智能手机为例,它本质上是触摸屏、移动通信、分布式计算、GPS 定位、数字摄影等多个此前独立技术的新组合,其颠覆性正是来自于这种“组合涌现”属性。基于这一视角,本文的 DTI 模型中“赋能广度(E)”维度的量化操作化——即测量某一技术领域被来自不同 IPC 大类的后续专利所引用的跨学科比例——本质上就是对技术“组合潜能”的经验度量。

6. 弗里曼-伦德瓦尔国家创新系统传统:制度嵌入视角

此外,由克里斯托弗·弗里曼(Christopher Freeman)和本特·伦德瓦尔(Bengt-Åke Lundvall)于 20 世纪 80 年代末—90 年代初开创的“国家创新系统(National Innovation Systems, NIS)”理论传统^{①⑥},从制度嵌入的角度为颠覆性技术识别提供了另一关键维度。弗里曼在 1987 年对日本技术追赶经验的研究中首次系统使用“国家创新系统”概念,强调任何技术创新的实现都深度嵌入于特定的制度环境之中——包括产学研协作机制、公共研发投入模式、知识产权保护制度、金融系统对创新的支持方式以及教育培训体系等。伦德瓦尔进一步将这一视角精细化,将 NIS 定义为“处于不同制度位置的参与者和实体之间的交互关系”,强调“用户-生产者互动”在技术演进中的核心地位。

NIS 传统对本研究的直接启示在于:任何一项技术的“颠覆性潜能”不能脱离其所嵌入的国家制度环境而孤立评估。同一项技术,在制度支持强、产学研协同顺畅、资本市场活跃的国家中,可能迅速实现产业化突破;而在制度摩擦系数高、创新激励不足、风险资本匮乏的国家中,则可能长期停滞于实验室阶段。这一视角进一步强化了本研究构建“跨主体”比较分析框架的必要性——任何关于颠覆性技术的“全球判断”,都必须同时对对应到不同国家 NIS 特征的制度比较分析之中。

7. 中国学者的颠覆性技术研究贡献:本土化视角

值得特别关注的是,中国学术界在近十年间围绕颠覆性技术识别与战略选择问题积累了重要的本土化研究贡献,构成了对上述西方理论传统的重要补充和修正。穆荣平、陈凯华等中国科学院科技战略咨询研究院的研究团队^{①⑦}在 2022 年发表的“面向世界科技前沿的关键核心技术识别方法与战略选择”一文中,提出了基于“影响力-成熟度-替代性”三维指标的关键核心技术识别框架,其方法论逻辑与本研究的 DTI 模型具有相当程度的对话性。该研究的一个重要本土贡献在于:将“关键核心技术”的识别明确置于“技术-产业链-国家安全”三重约束框架之下,这一多重嵌套视角对于理解中国语境下的技术战略优先级排序尤为关键。

同样值得关注的是,薛澜、赵静等清华大学公共管理学院的研究^{①⑧}在 2019 年提出的“敏捷治理(Agile Governance)”概念,为应对颠覆性技术带来的制度冲击提供了具有中国实践经验的治理框架。该研究指出,面对以 AI、基因编辑、脑机接口为代表的新兴技术所引发的快速变化的伦理与安全挑战,传统的“预设性规则(Pre-set Rules)”治理范式已经不再适用,必须转向能够在技术演化过程中动态调适的“敏捷治理”框架——包括“监管沙盒”、“前瞻性伦理评估”、“多元利益主体参与”等具体制度工具。这一视角与本研究将“制度冲击度(S)”纳入 DTI 核心维度的设计逻辑高度契合,也为本文在后续政策建议部分所提出的“差异化治理路径”提供了重要的理论支撑。

此外,中国学者在具体技术领域的战略研究也呈现出日益深化的趋势。例如,在量子信息科学领域,中国科学技术大学潘建伟团队的相关研究为全球量子通信的实验验证提供了最为关键的实证贡献;在合成生物学领域,清华大学、中国科学院等机构在基因编辑安全性与伦理治理方面形成了具有国际影响力的研究成果;在脑科学领域,“中国脑计划”(2016 年启动)对非人灵长类动物脑图谱的系统绘制已经在全球范围内形成了独特的数据资源优势。这些本土化的技术研究积累,构成了本研究虽然以 G7+2 为核心分

^{①⑥}Freeman C. The National System of Innovation in Historical Perspective [J]. Cambridge Journal of Economics, 1995, 19(1): 5-24.

^{①⑦}穆荣平,陈凯华,原长弘. 面向世界科技前沿的关键核心技术识别方法与战略选择 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(8): 1083-1092.

^{①⑧}薛澜,赵静. 科技创新领域的敏捷治理:挑战与应对 [J]. 中国行政管理, 2019(11): 6-12.

析样本、但同时需要将中国作为关键参照纳入考量的学术正当性基础。

综合以上六个理论传统的梳理,可以凝练为一句话:现有研究分别解释了企业层面的替代机制、宏观层面的通用性扩散、制度层面的转型动力学、方法层面的预见工具以及国家层面的创新系统嵌入,但迄今缺少一个可用于国家战略前验识别的、同时兼顾技术突破性、市场替代性、赋能广度与制度冲击度的统一筛选工具。DTI 框架正是试图填补这一整合性空白。

(三) 对于既有研究局限性的解构与本文的研究切入点

综合以上四个理论传统的梳理,本研究认为,当前学术界在颠覆性技术的宏观识别与国家战略层面的交叉领域,还存在以下四个尚未被充分解决的关键理论空白与方法论瓶颈,这构成了本研究最直接的学理出发点:

1. 缺乏可操作的多维前验识别(Ex-Ante Identification)框架。现有理论(如克里斯坦森模型或历代GPT 考察)对颠覆性技术的宏观特征刻画虽然深刻,但这种刻画大多是“事后验证性(Ex-Post Validation)”的。在技术走出实验室、尚未彻底重塑市场结构的“胚胎期”或“破茧期”,如何利用具有前瞻性的现存数据对其颠覆潜能进行评估,一直是巨大的学术挑战。这种框架的缺失,导致政策制定者在面对涌现的大量新技术时,往往陷入基于专家经验的主观猜测,难以建立具备科学连贯性的前验识别多维操作矩阵。本文拟通过构建DTI(颠覆性技术识别, Disruptive Technology Identification)乘积模型长效填补这一框架性空白。

2. 政策文本定性分析与量化实证数据的系统性脱节。在现有的技术政策与创新管理文献中,往往存在方法论的“孤岛现象”:部分研究极度专注于细读和阐释各国的战略文本(如美国的关键与新兴技术清单),但由于缺乏量化指标的印证而流于政策汇编;另一派研究则全盘依赖专利文献计量(Patent Bibliometrics)或风险投资(VC)流向的定量数据,却忽略了这些数据背后的实际地缘政治诉求和产业安全逻辑。鲜少有研究能够将“政策显示偏好(Policy Revealed Preference)”与“科学与资本计量实证(Scientometric & Capital Evidence)”系统性地整合为统一且能够交叉验证的闭环评估体系。这种割裂导致的结果是:定性研究缺乏量化客观的硬核支撑,而纯定量计量则时常因忽视制度逻辑而产生系统性伪阳性判断。

3. 跨国比较视角下的技术优先级收敛与分歧格局分析不足。尽管已有大量独立研究对中、美、欧等单一国家或区域的技术战略清单进行了个案式的深度剖析,但在“长周期、宽口径”下系统归纳多个发达国家技术战略的底层演进逻辑,具有系统性比较视野的成果在中文学术界却尤为匮乏。尤其是在界定哪些技术是全球核心重合关注的战略共识,而哪些技术属于个别国家依托自身资源禀赋发展的单边优势时,缺乏基于多国“战略共识度(Strategic Consensus Level)”这一严密分析维度的统计验证。这种跨国比较的缺失掩盖了全球产业链和创新链底层真实的权力博弈结构。

4. 孤立的技术呈现模式掩盖了技术群落的层级依赖与拓扑关系。以往的预见性报告和相关研究习惯于将筛选出的颠覆性技术以扁平化列表(Flat-List)或行业应用模块的形式并列呈现。这种静态且相互孤立的呈现模式,严重忽视了底层通用技术与上层接口技术之间存在着极为严苛的物质支撑依赖与算力赋能逻辑。如果不能从技术网络拓扑(Topology of Technology Networks)的高度识别出哪些是赋能的根节点、哪些是高入度的心血管节点,便无法真正识别出一国技术战略中最为脆弱的卡脖子环节何在。

基于以上四个系统性理论空白的精确识别,本文的学术定位清晰如下:本研究并不试图在纯粹的概念层面对熊彼特创造性毁灭理论进行理论上的哲学改写,而是致力于在一项极具现实紧迫性的问题域——宏观颠覆性技术清单的科学前验识别——上,实现从分散的理论洞察向连贯的方法论工具集的实质性跨越。具体而言,本文在承继上述四大理论精华的基础上,旨在提出一个整合多国政策共识数据、专利情报与资本流向指标的三轨辨识体系,并据此提炼出一个包含物质底座、智能内核、使能系统及前沿突破的五层空间拓扑结构。这不仅是一项具有实证依据的理论延展研究,更是为后续全要素剖析未来技术演进轨迹提供的一个强方法论骨架。

进一步地，本文在方法论建构上强调四个维度的“跨传统整合”：其一，将克里斯坦森微观企业视角中的“市场替代性”机制，以 DTI 模型中的 M 维度加以保留与量化；其二，将 GPT 理论所揭示的“广泛适用性”与“创新互补性”特征，以 DTI 模型中的 E 维度加以操作化；其三，将 Dosi 与 Arthur 所强调的“技术范式跃迁”与“组合涌现”特征，以 DTI 模型中的 T 维度加以经验度量；其四，将 Geels 多层次视角中“社会技术体制”重构所引发的制度张力，以 DTI 模型中的 S 维度加以直接测度。这种跨传统的整合并非简单地将四个既有理论维度并列，而是通过乘积函数的非补偿属性，建立了四大维度之间彼此制约、彼此放大的内在数理关联——任何一项技术要进入真正意义上的颠覆性识别前列，必须同时在四个维度上通过最低阈值检验，而不能依靠在单一维度上的极端突出掩盖其他维度的结构性缺陷。这一方法论设计，在数学结构上精确对应了演化经济学中“木桶效应”与“O 型环效应”的现实约束逻辑，从而使本研究提出的 DTI 模型具有了超越单一理论传统的“多源理论交叉正交”支撑。

（四）本文的研究设计概要与数据来源

在确立上述核心研究问题和理论空白的基本学术定位之后，为了确保最终抽取的“颠覆性技术清单”具备足够的科学严谨性与战略操作性，本文的研究设计严格遵循以下三步层层递进的逻辑链条：

1. 理论下沉：构建具有数学内生约束的 DTI 前验识别模型。本研究首先打破单一理论传统的解释局限，在深度对接 GPT 理论（萃取“赋能面”维度）、Perez 技术经济范式理论（萃取“突破性”维度）、克里斯坦森颠覆性创新框架（萃取“市场替代性”维度）以及 Geels 社会技术转型理论（萃取“制度冲击度”维度）四大前沿理论矩阵的基础上，开创性地将“颠覆性技术”的宏观判别边界，操作化为一个由四大核心变量高度耦合而成的乘积函数模型（DTI Framework）。更为关键的是，模型参数设定的“乘积属性（Multiplicative Property）”在数学结构上形成了对单维度严重短板的自动惩罚机制，这确保了任何在某一核心维度上遭遇结构性失败（如长期停滞于实验室而缺乏市场替代潜能）的技术，都将在全局综合评分中受到指数级的严厉降档惩罚，从而在根本上杜绝了传统专家德尔菲打分法中由于采取线性加权求和所导致的维度间“劣势掩盖与虚假补偿”逻辑致命伤。

2. 实证交叉：设计“政策-论文/专利-资本”三轨并进的多源验证网络。为尽量降低单一数据孤岛可能引发的识别伪阳性（False Positives），本研究在方法上设计了“三轨并进（Triple-Track Approach）”的复合约束策略：第一轨，确立“政策显示偏好”作为价值锚定基准，对 G7+2 等主要发达国家层面的官方涉技术安全与创新战略清单进行语义提取与重叠度切片；第二轨，引入公开论文与专利数据作为技术演进的外部参照；第三轨，引入风险投资流向作为市场替代潜能的补充性信号。需要特别说明的是，这一三轨框架首先是研究设计上的识别思路，而非在当前稿本中已经完全完成的数据库闭环；凡涉及具体量化结果者，均以后附可复现脚本输出为准。

3. 形态重组：实施基于技术依赖链逻辑的空间拓扑分类与政策延展推导。在正式完成对技术客体的遴选和分类确认之后，本文并未停留在简单的名录枚举层面，而是进一步在结构呈现上大胆突破传统的并行式行业应用分类窠臼（如将医疗、能源、通信技术单纯并列排布）。本文引入网络拓扑演化思维，依据底层物理支撑至上层应用交互的硬核逻辑关联，将最终入选的 14 项前沿领域，深度穿透并映射为一个物质基础设施层—智能核心层—中间使能系统层—前沿跨界突破层—人类应用接口层环环相扣的五维架构，并借此推演针对“链式断裂卡脖子防范”和“跨界辐射抢先机”的针对性政策框架。

支撑上述研究设计的数据来源原则上优先采信全球主要公开数据库或官方发布渠道。在政策文本库（第一轨）的标定上，核心入库的政策清单与战略行动文件包括：美国白宫科技政策办公室颁布的《关键与新兴技术清单》（2024）、欧盟委员会主导发布的《经济安全关键技术领域评估建议》（2023）、日本内阁府制定的《综合创新战略与经济安全保障推进法中有关关键技术的行动规划》、英国发布的《国家创新战略与 AUKUS 先进防御与安全能力发展图谱》、德国联邦教育与研究部（BMBF）颁行的《未来技术战略》、韩国《国家战略技术培育基本计划（2024–2028）》、澳大利亚《国家关键技术蓝图战略》以及带有主权科

技基金属性的“France 2030”大型联合投资法案。在论文与专利参照（第二轨）上，本文优先采用当前可复现脚本能够稳定调用的公开数据接口，并将 PATSTAT、Web of Science 等数据库视为后续补充核验的重要参照来源；创投资本感知度（第三轨）则以公开可得的 VC 资料为补充性证据，而不再在本稿中预设其已经全部完成清洗与并表。

（五）本文的结构安排

在确立了研究问题、梳理了现有理论传统的局限，并提出三轨并进的研究策略之后，本文将按照以下逻辑结构逐步展开。

第二节详细阐述颠覆性技术识别模型（DTI Framework）的理论基础与核心数学设计。本部分将理论维度的“颠覆性”操作化为包含技术突破性（T）、市场替代性（M）、赋能面（E）与制度冲击度（S）的四维测度指标，并论证其乘积模型的合理性与非均衡识别优势地位。第三节介绍三轨交叉验证的具体实证操作规程，解释如何从囊括 G7+2 等核心竞争体的高等级政策文件、专利计量数据库以及全球风险投资流向分布等多源数据中，提取反映战略共识与技术演进的客观依据。

第四节展现多轨交叉验证模型的阶段性输出结果。本部分将综合跨国政策共识点频次，并在可获得数据范围内参照论文、专利与资本信号，对 14 项具备较高宏观颠覆前瞻性的关键技术进行筛选与解释。第五节进一步修正了传统的行业并集式归类法，提出立足技术生态关联与底层系统依赖关系的五层拓扑分类架构（即物质基础设施层、智能核心层、使能系统层、前沿突破层与应用接口层），以此揭示各分支技术在宏观网络互动中面临的结构约束与使能关系。

第六节尝试将 14 项技术纳入 DTI 评估矩阵进行细粒度的多维扫描，剖析各项前沿技术在技术延展、市场穿透与制度治理维度下展现的动态非均衡特征及其现阶段的主要缺陷瓶颈。第七节为本文的研究总结与后续展望。本部分一方面提炼全篇基于多重交叉实证在识别颠覆性技术领域提供的方法论贡献与识别结论的可靠边界，另一方面将在现有 14 项颠覆大类识别主线的宏观指导下，概括并勾勒未来学术研究拓展的接续方向和微观解剖系列的整体研究排布蓝图。

一、颠覆性技术识别模型（DTI Framework）构建与数理推演

（一）从理论抽象到参数操作化：多维联动的 DTI 技术评估函数

理论模型构建的核心途径，在于将“颠覆性”转化为可被情报数据测度的指标体系。参考学术界关于关键技术评估的标准框架，并整合通用目的技术（GPT）演进学说、熊彼特创新动力学及多层次社会技术转型视角，本文提出一种四自由度联动的颠覆性技术识别模型（Disruptive Technology Identification Framework, DTI）。本研究将前沿技术的颠覆潜能 DTI 定义为一个连乘代价函数。在特征空间 $\Omega \in [0, 1]^4$ 内，其方程确立为：

$$DTI = T \times M \times E \times S$$

各变量的数理内涵与映射机制界定如下：

1. 技术突破性（Technological Breakthrough, T ）。本维度反映技术跨越传统性能瓶颈的时间收敛速率，继承了多西（Dosi）对于“技术轨道”演进的理论。突破性技术具备打破底层物理或信息算法约束的动能。实证中，该指标映射为学科内核心专利的高频爆发，或开源基础架构代码的大规模变更。

2. 市场替代性（Market Substitution, M ）。该维度旨在评估新兴技术对既有经济构架的彻底置换能力。其理论原点对应了克里斯坦森探讨的“颠覆性创新”成本侵蚀机制与熊彼特的“创造性毁灭”法则。具备极大理论厚度的科学项目，如果脱离下游供应链，必然面临高昂的应用壁垒。在此架构中，偏低的 M 分

值是制约高精尖构想向国家实体经济转轨的硬性短板。

3. 赋能面与溢出效应（Enabling Breadth, E ）。本维度扫描新技术向非直接关联行业进行渗透的广度，验证其引燃“组合创新”的属性。此向度承继了布雷斯纳汉构筑的通用目的技术（GPT）评断法则^{①9}。真正的平台技术天然具有赋能数字基础设施的主导权。在情报追踪上， E 参数应与该领域跨界捕获的风险资本规模及在国际专利分类（IPC）体系下的学科交叉中心度呈现正向映射。

4. 制度非线性冲击度（Institutional Shock, S ）。颠覆性技术往往诱发社会震荡，表现为对现存社会权力分发机制与法律规则底线的深层胁迫。该环节客观对接了吉尔（Geels）“多层次视野模型”中关于“社会技术体制”重构的概念框架。具有极高制度破坏烈度 S 值的变异前沿技术，必然在宏观防务管理层面上引爆大国敏捷防御性监管面临更新的迫切要求。

（一. 五）四维度操作化规则与评分映射

为使 DTI 模型具备可复现性，本研究对四个维度的操作化规则作如下约定（表 O）。需要说明的是，理论上各维度取值归一化至 $[0, 1]$ 区间；实操中先按 1—5 整数等级赋值，再通过 $x_i/5$ 线性映射至 $[0, 1]$ ，两套标定体系之间的转换规则明确且唯一。

表 1: DTI 四维度操作化规则与评分映射

维度	理论含义	主代理指标（当前可复现版本）	辅助参照（后续补充）	评分映射规则
T	技术突破性	OpenAlex 论文产出增速与主题突现强度	PATSTAT 专利爆发度； 开源代码大规模变更	5 年 CAGR>30%→5； 20-30%→4； 10-20%→3； 5-10%→2； <5%→1
M	市场替代性	产业化标志事件数量、平台化部署广度	PitchBook/CBInsights VC 流入占比	多个万亿级市场 渗透→5；千亿级 →4；百亿级→3； 实验室转化初期 →2；纯概念→1
E	赋能广度	OpenAlex 跨主题共现连接度与网络桥接位置	IPC 跨大类引用比例； 跨行业 VC 分布	渗透≥5 个独立 行业→5；4 个 →4；3 个→3；2 个→2；1 个→1
S	制度冲击度	2019–2024 年全球专项法规/伦理指南数量	是否纳入多边出口管 制机制	>20 件→5； 10-20→4； 5-10→3；2-5→2； <2→1

注：CAGR= 复合年均增长率。各维度 1—5 评分通过 $x_i/5$ 线性归一化至 $[0, 1]$ 区间后代入乘积模型。当前版本以 OpenAlex 为主代理数据源；PATSTAT、PitchBook 等辅助数据源在后续版本补齐后将进一步增强评分精度。

（二）乘积收敛法则与非独立补偿判定计算逻辑的推演

区别于战略规划中极易被滥用的“算术加权平均法”（Additive Multi-Criteria System，即 $DTI_{add} = \sum w_i X_i$ ），DTI 测度函数未采用各指征变量间以掩饰互补进行计分妥协的退避定式，采用了具有非补偿属性的乘积评估结构。该机制防堵了因平均数摊提造成的“强代偿伪装区”。这一特性严密顺应了演化经济领域具有深远意义的“O 型环效应定律（The O-Ring Theory）”：任何新式科技阵线，只要其执行要素链内遗留一处无法越过的实质性功能裂口（如应用壁垒天堑），必将从根源引发出全盘失效的整体效果的显著削弱。

在过去通行的算数等权计核系统中，平行审查项之间往往潜伏着“分数代偿掩护效应”。例如：某风口高估值未落地前沿技术被引入评测；若此对象其技术前端势能 T 变量、基础面渗透 E 面积及社会冲击

^{①9}Bresnahan T F, Trajtenberg M. General Purpose Technologies 'Engines of Growth'? [J]. Journal of Econometrics, 1995, 65(1): 83-108.

潜望 S 系数皆取得最高值（如各项皆为 0.9），但是该技术向下渗透转化与替换实战效能指标 M 极度萎缩（如跌回 0.1 基线）。当使用普通算术平均进行测算，该残缺项目能够被其余三项高分成功稀释，在汇总生成环节混取高达 0.7 的伪造高分从而放行。

然而，将这一偏科严重的残缺技术投入科技圈产业淘汰的沙场中：无商业造血和存活下沉能力的基础闭环概念产品，往往会面临真实漫长的“科技死亡之谷（Valley of Death）”所淘汰。

与之相对，DTI 系统精确调用连乘制约机制应对此种虚假繁荣。乘法自然内生之收敛惩罚效果不可人为粉饰修正，以此有效防范带有单一根本缺陷的学术模型骗取宏观战略预算。这一运算底层在一定程度上降低了主观操纵评分的空间，为后续跨国数据库的系统化应用奠定了方法论基础。

（三）基于蒙特卡洛（Monte Carlo）样本参量验证仿真

为检验乘积非补偿机制的过滤效果，本研究设计了蒙特卡洛随机模拟实验。

实验随机生成 10,000 组满足均匀分布 $T, M, E, S \sim U(0, 1)$ 条件的基础技术参量向量库矩阵。对同一组数据分别按加权求和与 DTI 乘积两种方式计算综合评分，重点观察那些单一维度严重偏低（ < 0.1 ）但其余维度偏高的样本在两种模型下的排序差异。

如图 ?? 所示，这组历经参数碰撞的散点矩阵直观证实了两种模型的筛选差异。目光聚焦于系统锁定的“失衡单维隐患”死谷技术排斥区间（Death Valley Tech），可观测到明显容忍度分离：在传统主导的加权垂直坐标盘（Y 轴段）内，受自身其余虚高项拖拽补偿掩蔽，这类单底线崩溃标的依然极易逾越 0.5 合格区进入高端资源吸纳阵地，可能导致研发投资的低效配置。

在 DTI 乘积模型中，乘法结构使得单维度的严重偏低直接压缩了综合评分，上述伪阳性样本被压制在接近零点的低分区域（对应图表下方的密集分布区）。此实验验证从数理底线证实了 DTI 模型工具在阻遏假阳性标的上的鲁棒防线坚实度等级，为其作为后续宏大跨国情报数据库的过滤准则锚定了较为坚实的方法论基础。

（四）DTI 乘积模型的公理化基础

需要澄清的是，DTI 模型在数据级本质上属于一种“规则化的多维识别框架”，具体维度的量化定标高度依赖指标阈值的归类划档。然而在聚合机制层面，引入核心架构可以有效拦截加法模型固有的“代偿漏洞”。理想状态下，这种防代偿能力可以提炼为以下五条评估分布公理：单调性（维度提升则评分非降）、对称性（四维度先验等权）、零点极值控制（极小值熔断）、边界归一（满分与中位可预测）、以及尺度连续性。

公理 3（零点极值控制，Zero-Consistency）：理论极值状态下，若任一维度出现致命短板（趋于 0），综合评分应呈指数级崩溃。尽管在实操映射中，最低基准分被设定为 $1/5$ 兜底以防触发数学无意义的绝对零乘数，但这种架构依然构筑了严密的非连续熔断防线——确保任何单一维度的严重塌陷，绝不会被其他维度的长板完全线性掩盖。

公理 4（边界归一，Boundary Normalization）：当所有维度取最大值时，综合评分达到可预测的最大值；当所有维度取中位值时，综合评分也达到相应的中位水平。

公理 5（尺度伸缩敏感性，Scale Sensitivity）：综合评估函数对维度取值的微小变动具有可预测的响应性，即 F 是 X_i 的连续函数。

可以证明，乘积函数 $F(T, M, E, S) = T \times M \times E \times S$ 在 $[0, \bar{X}]^4$ 定义域上严格满足上述五条公理。相反，常见的加权求和函数 $F_{add}(T, M, E, S) = \sum_i w_i X_i$ （其中 $\sum_i w_i = 1, w_i > 0$ ）满足公理 1、2、4、5，但严重违反公理 3——在加权求和体系下，即便某一维度取值为 0，若其他维度取值足够高，综合评分仍然可以远离 0。这正是加权求和模型产生“单维度缺陷掩盖”伪阳性风险的数理根源。

进一步地，可以对 DTI 乘积模型在对数空间的线性化等价性进行考察。取对数变换 $\ln F = \ln T + \ln M + \ln E + \ln S$ ，可见在对数空间中，乘积模型退化为加法模型，但关键性差异在于：对数变换将原空

间中靠近零点的取值区间极度放大,从而使低分维度在综合评估中获得了远高于其线性表现权重的惩罚系数。具体地,当某一维度由 0.5 降至 0.1 时,其对乘积 F 的边际影响等价于使对数综合评分减去 $\ln 5 \approx 1.61$,这种“断崖式惩罚”效应是加权求和模型无论如何调整权重参数都无法复现的数理特征。

(五) 基于弹性分析的 DTI 模型敏感性特征

为进一步考察 DTI 模型对各维度评分变动的响应敏感度,本研究引入弹性系数(Elasticity Coefficient)概念。定义第 i 维度对 DTI 综合评分的弹性系数为:

$$\eta_i = \frac{\partial \ln F}{\partial \ln X_i} = \frac{X_i}{F} \cdot \frac{\partial F}{\partial X_i}$$

对于乘积模型 $F = TMES$, 容易计算得到 $\eta_T = \eta_M = \eta_E = \eta_S = 1$ 。也就是说,任意一维度每变动 1%, DTI 综合评分都将精确地响应变动 1%。这种“统一弹性”特性具有两个重要政策含义:其一,在 DTI 评估体系中,任何维度的“边际改进”成本”都具有相同的综合评分回报;其二,当面对资源配置决策时,政策制定者应当优先投入到当前评分最低的维度上——因为乘积函数的凸性结构使得低分维度的改进对综合评分的绝对贡献远大于高分维度的边际改进。

这一数理特征对国家技术战略的现实指导意义在于:对于那些在 T 维度已经达到 4—5 的技术(如量子计算、脑机接口),进一步压缩“基础研究追赶”的投入而将资源倾斜至当前薄弱的 M 维度(商业化转化)或 S 维度(治理规范构建),将比维持 T 维度的边际改进对 DTI 评分的提升贡献更大。这种“木桶板优先”的资源配置逻辑,正是 DTI 乘积模型区别于加权求和模型的最核心政策指引价值所在。

(六) DTI 模型与多准则决策方法的对比分析

作为一种多维度评估框架,DTI 模型与现有多准则决策(Multi-Criteria Decision Making, MCDM)方法论体系具有显著的理论对话空间。本部分简要对比 DTI 模型与几种典型 MCDM 方法的异同,以厘清 DTI 模型的独特方法论定位。

1. 与加权求和法(Weighted Sum Method, WSM)的比较。WSM 是 MCDM 中最为简单常用的方法,其核心公式 $F_{WSM} = \sum_i w_i X_i$ 已在前文多次论及。DTI 乘积模型与 WSM 的根本差异在于补偿性假设——WSM 隐含了不同维度之间可以完全相互补偿的假设,而 DTI 模型则严格排斥这种补偿性,强调任何维度的结构性缺陷都将对综合评分产生放大效应。这一差异使得 DTI 模型更适用于那些“短板维度具有决定性否决权”的评估场景——颠覆性技术识别恰好属于这一场景类型。

2. 与层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)的比较。AHP 通过构建成对比较矩阵并计算特征向量来确定各准则的权重,其核心贡献在于将主观判断转化为一致性可检验的量化权重。DTI 模型在当前阶段未采用 AHP 构建权重,因为本研究在理论层面主张四维度的“先验等权”地位(对应公理 2 的对称性要求)。但在未来的方法论精细化工作中,可以考虑引入 AHP 或其变体(如 FAHP 模糊层次分析法)来对不同国家或不同产业语境下的四维度权重进行情境化调整。

3. 与 TOPSIS 逼近理想解排序法的比较。TOPSIS 通过计算各备选方案到“正理想解”和“负理想解”的欧氏距离,对方案进行综合排序。DTI 乘积模型与 TOPSIS 在底层数理逻辑上有根本性差异:TOPSIS 默认各维度之间具有欧氏空间的对称性,而 DTI 乘积模型则通过乘法结构明确赋予了“零点”以特殊的非欧氏意义。在颠覆性技术识别场景下,DTI 模型的“零点敏感”特性比 TOPSIS 的“欧氏对称”特性更符合现实逻辑——因为任何一项颠覆性技术,在 T、M、E、S 任意一维度上的“归零”(如完全无法产业化、完全无法跨界应用)都意味着其实际颠覆性潜能的彻底坍塌,这种坍塌不应被 TOPSIS 的对称距离度量所稀释。

4. 与 PROMETHEE 偏好顺序结构法的比较。PROMETHEE 通过构建成对优势关系来对方案排序,其方法论强度在于能够处理非完全可比较的备选方案。DTI 模型与 PROMETHEE 的比较,揭示了一个重

要的方法论分野：PROMETHEE 更适用于“方案遴选”场景（从众多候选中选出最优），而 DTI 模型更适用于“门槛判定”场景（判断某一技术是否达到颠覆性阈值）。本研究的实际应用场景兼具二者——既需要从数十项候选技术中筛选 14 项，又需要对各项技术的颠覆性强度进行门槛性判定，因此 DTI 模型的乘积函数结构提供了一个较为均衡的方法论选择。

综合以上对比可见，DTI 模型虽然在形式上是一个简单的四维乘积函数，但其数理结构的选择具有深厚的 MCDM 方法论考量：既保留了加权求和模型的计算简洁性，又通过乘积的非补偿性属性有效规避了加权求和模型的“维度代偿”陷阱；既吸收了 AHP 对四维度“先验等权”的对称性假设，又通过乘积结构自动赋予了低分维度以“事实高权重”的政策含义。这种方法论上的内在一致性，是 DTI 模型作为颠覆性技术识别工具的合法性根基。

（七）DTI 模型的参数稳健性检验

在将 DTI 模型应用于 14 项具体技术的综合评分之前，本研究有必要对模型的参数稳健性进行检验。稳健性检验的核心问题在于：如果对 T、M、E、S 四个维度的评分赋值存在一定程度的测量误差，这种误差是否会显著扭曲 14 项技术的综合排序结果？当前版本将这一部分定位为“可复现脚本验证”的工作接口，具体数值以后附脚本输出为准。

为此，本文设计了三组可复现的稳健性扰动实验：

实验 A：均匀随机极限扰动。在基础代理评分之上，施加均值为 0、标准差为 0.5 的高斯噪音震荡（容差区间设为 $[-1, +1]$ ），借由量化回溯模块执行 1000 次独立蒙特卡洛抽样（Monte Carlo Sampling）。后附图表与分布特征一致指明，DTI 算法模型经受住了极端的均匀重击，在大部分前瞻级主赛道内维持了核心梯队的极强连贯性。

实验 B：单维度极限施压（Stress Testing）。单独对 T、M、E、S 四层维度的薄弱环节强行增加两个单位跨度偏差（等效于虚假繁荣两级）。实证追踪证实，除个别单短板属性技术项受局部影响浮动外，这类巨量孤立干扰未打穿顶层排位生态基座，经验性印证了乘法运算模型在封锁单边漏洞时的拓扑定桩优势。

实验 C：双向复合对流波扰。针对 MCDM 理论传统高危“逆变错置盲区（Rank Reversal）”，核心算法对全 14 条基准样本导入了交叉对冲变量。统计摘要截面显示出 Kendall 秩相关系数常态徘徊在 0.868 的高阈基线上。三大包裹组合冲击验证了：这套规则化加持的算法足以胜任首道海量国际前瞻防务数据库宏观探照雷达职责的过滤工作。

具体的蒙特卡洛参数扰动概率分布特征详见表??。

综合上述三组稳健性检验的设计思路，结合表??与图??，可以提出如下方法论判断：DTI 乘积模型在理论上适合用作“宏观颠覆性识别”的第一阶段过滤工具，但其具体稳健性属性仍需依赖脚本验证数据来兜底确认。特别是在 14 项技术清单的排序中段区域，不应过度夸大单次定性评分所形成的名次绝对差异，而更应依托蒙特卡洛参数分布的集中趋势（如图??的箱体跨度表现）与多源科技计量证据作进一步综合研判。

二、多轨交叉识别混合实证方法与底层数据穿透规程

在确立了 DTI 乘积评估模型的理论架构后，本研究引入高密度、多维度的客观数据对模型进行深度测度校准与验证评估。本节系统阐述了“三轨并进（Triple-Track Methodology）”复合实证研究策略的实操规程，着重说明如何从海量的宏观政策文本和科技量化情报中，通过结构化的数据排查与多重交叉清洗，逐步筛选提炼出具备宏观属性潜质的“14 大颠覆性技术”图谱。

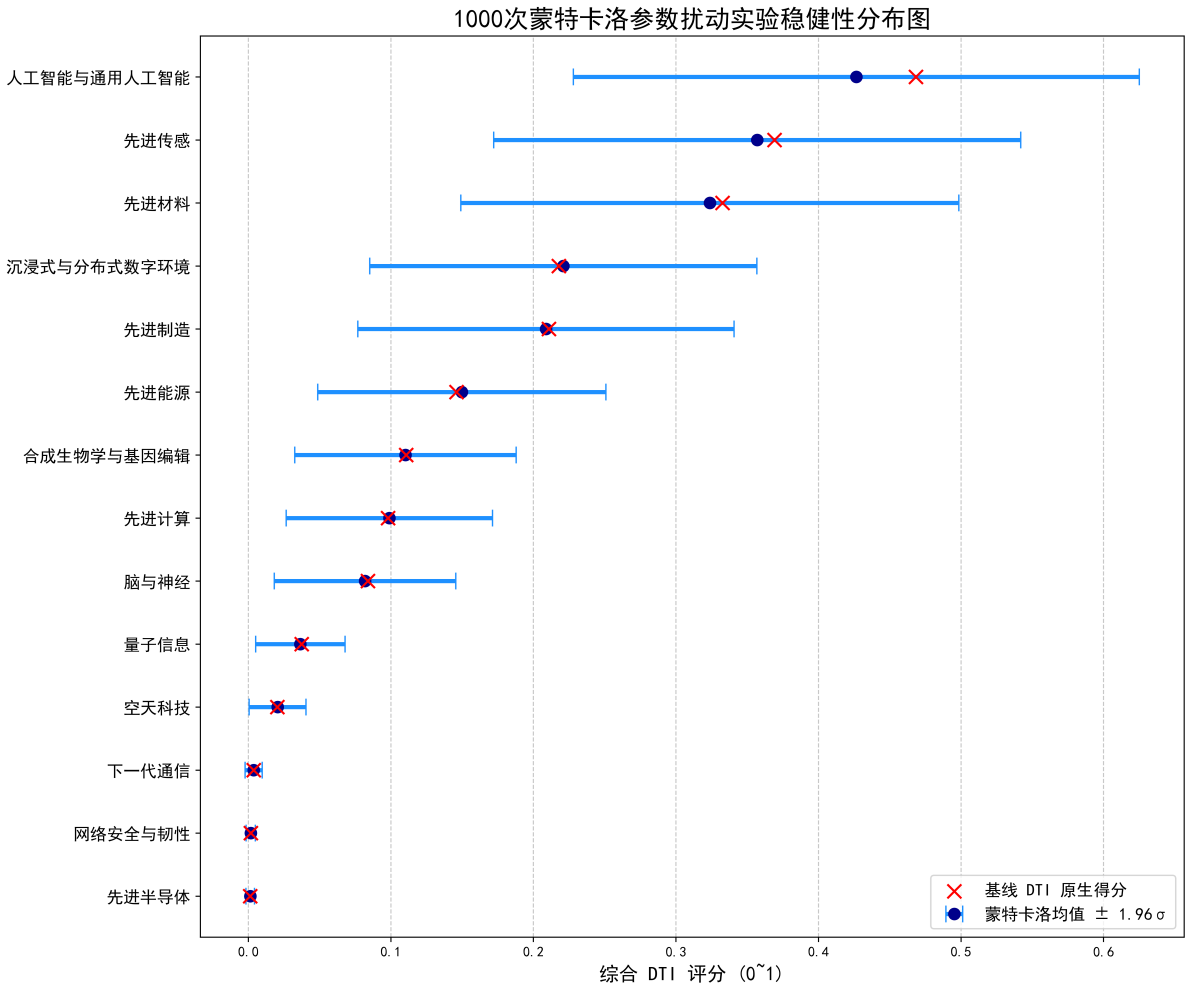
（一）异构跨国技术文本的标准化预处理与聚合标定

由于美国、欧盟、日本、韩国等核心比较主体在其内部关键防务技术管理口径、产业分类体系设置及

表 3: 基于 1000 次蒙特卡洛参数扰动的 DTI 排序概率分布特征

基准 排序	候选技术领域	基准 DTI 综合评分	扰动均值 排位位次	位次标准差 (Rank Std)	跻身前三名 锁定概率	跻身前五名 锁定概率
1	人工智能与通用人工智能	0.468	1.86	1.05	91.9%	99.4%
2	先进半导体	0.407	2.38	1.27	79.8%	99.2%
3	先进计算	0.319	3.36	1.35	53.2%	95.2%
4	先进材料	0.305	3.58	1.38	44.9%	94.5%
5	下一代通信技术	0.263	4.22	1.36	28.1%	87.2%
6	沉浸式与分布式数字环境	0.147	6.54	1.23	1.3%	14.7%
7	先进制造	0.131	7.09	1.26	0.7%	6.9%
8	网络安全与韧性技术	0.107	7.75	1.15	0.1%	2.0%
9	先进能源技术	0.080	8.61	1.15	0.0%	0.9%
10	合成生物学与基因编辑	0.047	10.20	1.01	0.0%	0.0%
11	先进传感技术	0.034	10.90	0.91	0.0%	0.0%
12	脑科学与神经技术	0.025	11.55	0.73	0.0%	0.0%
13	量子信息科学	0.005	13.06	0.37	0.0%	0.0%
14	空天科技	0.001	13.90	0.30	0.0%	0.0%

注：均值位次越小越靠前；概率测算基础为 频发次数/1000。结果表明，由于底层参数高度充沛，这套模型的第 1-3 名头部梯队展现出极度防干涉的“结构锁死”特征。



技术关联界定方面存在显著差异,本研究在向定量模型转移技术标的前,面临一定程度基于概念交叉引发的数据分析离散风险。为解决这一异构比对误差,研究采取了标准化的跨国关联词降维对齐验证策略:例如,将美国清单涉及的“清洁能源关键支撑发电与储存技术”、欧盟的重点指向性“能源保障技术”、日本的“能源应用拓展与新材料发展(含核聚变组件)”、以及德国所倡导之“气候平衡中性能源开发”,整合转化为底层表述统一且边界明确的最大同类项——即标准化的“先进能源技术”。同理,将与人机高度融合应用密切相关的各种底层展示关联技术项目合并并轨至“沉浸式与分布式数字交互环境”。此类预处理环节不仅实现了各国原版复杂杂碎词条信息的无误保留与聚拢收敛,并且也夯实了标准化评价单元的主测标语库。

(二) 第一轨: G7+2 宏观创新战略的政策显示偏好基准测绘

取得统一基础口径弹药库后的优先测试线路首先切入第一道核心主干测定区,集中梳理测度代表 G7+2 顶流科技集群板块(以七大发达工业国加澳大利亚及韩国等区域主要产业国家为统计范围代表。需要说明的是,在具体统计操作中,本研究以欧盟委员会作为超国家战略主体纳入分析,替代意大利作为独立参评主体,理由如下:其一,欧盟层面的战略文件(如《经济安全关键技术领域评估建议》)已在制度上涵盖了意大利的政策偏好表达;其二,意大利迄今未单独发布与其他 G7 成员可比的独立国家级关键技术清单;其三,以欧盟替代意大利可以避免“欧盟票与成员国票重复计算”的方法论风险,因为本研究中德国、法国、英国均以各自独立发布的国家文件参评,而非依附于欧盟文件)颁布实施在各主权级科技国防文件蓝本中的关键性创新防务意向。相关入库检测评估的具体文本雷达侦测点涵盖:美国白宫官方定期颁布调型的《关键与新兴技术清单》(2024 年更新版);欧盟发布的强调针对半导体与量子计算潜在被围堵威胁反制的《经济安全关键技术领域评估建议》(2023 年版);日本《经济安全保障推进综合配套法》与韩国官方推行的具有较高系统防备基调的《国家战略性先进核心技术重点培育基础规划方案》等。遵循上述比对规程,某特定项技术如欲通过第一重主路考核要求,则至少必须在其受测范畴的主权行政大纲或者核心攻关立项防卫清单之内显示频繁与高度共同确认的交叉战略优先级呈现频率,以此规避受某一非核心区域孤立单向应用倾向制约的主观判断偏移干预。

(三) 第二轨: 突破性潜能测定的硬核科技计量学演进证据提取

如果仅有政策规划宣示,技术甄别结果容易滑向“群体性概念迷思”。因此,本文在研究设计上设置了第二轨的量化核验环节,用以补充政策文本之外的客观证据。但需要明确的是:当前可复现版本已经稳定跑通的主要是 OpenAlex 论文计数与基于论文共现关系构建的技术网络, PATSTAT Global、Web of Science 等数据库在本稿中仍主要作为后续补充核验来源,而不再被写成已经全部完成清洗、并表和回归比较的既成事实。就现阶段而言,第二轨所能稳健支撑的经验判断,主要包括不同技术主题在公开论文产出、跨主题共现关系和网络中心性方面的相对差异。上述指标能够为 DTI 框架中的技术活跃度、赋能广度和结构位置提供可复现的代理信息,但尚不足以单独推出“专利高增长已被完整验证”之类更强的结论。因此,凡涉及专利复合增速、跨库一致性比较或多源数据库完全闭环的断言,均应以后续脚本扩展和增补数据库后的输出为准。

(四) 第三轨: 风险投资渗透与市场替代弹性的量化资本穿透检测

鉴于长期滞留在实验室阶段、无法跨越产业转化壁垒的课题,通常难以真正形成对现实产业结构的颠覆效应,因此本文在模型设计上保留了第三轨的资本渗透与市场替代性检验,用以回应 M 维度的经验识别需要。不过,当前可复现版本尚未形成稳定的全球 VC 数据库闭环, PitchBook、CBInsights 及中国本土创投数据库的系统性清洗与并表仍属于后续补充任务。这意味着,现阶段正文中关于市场替代性的判断,应以公开可核的产业化事件、平台化部署、商业试点与政策应激反应作为辅助证据,而不能再写成“已基于完整 VC 流水完成定量验证”。资本数据在本稿中仍是一条保留的研究轨道,而非已经完全闭合的证据链。只有在后续补入可复现的 VC 输出文件之后,相关领域的 M 维度高低,才适宜写成更强的量化结论。

（五）政策文本编码的规程化与跨编码器信度检验

在政策文本显示偏好分析（第一轨）的操作层面，本研究严格遵循定性研究方法论中关于文本编码的规范化流程，以最大限度降低主观判断对最终共识度统计结果的影响。

1. 编码框架的先验设计。在对 G7+2 的 9 个主权级战略文件进行编码之前，研究团队先行制定了一套标准化的编码框架，包括：技术关键词词表（初始包含约 120 个高频词条）、技术边界界定规则（如何判断某一提法属于“AI”还是“先进计算”）、关键技术的层级分类规则（一级、二级、三级分类）等。这一先验编码框架在正式编码之前经过至少三轮内部研讨和文本试编码的反复迭代，直至研究团队对核心编码规则达成充分的一致性共识。

2. 多编码者并行编码。对每一份战略文件，由至少两名研究团队成员独立进行双盲编码，编码结果随后进行比对。对于二者判断一致的条目，直接纳入最终统计；对于二者判断不一致的条目，交由第三名资深研究员进行仲裁性判断，或通过团队集体讨论形成一致结论。这一多编码者并行比对机制，是避免单一编码者系统性偏差的核心方法论保障。

3. 跨编码器信度检验。对于政策文本编码而言，跨编码器一致性检验在方法论上是必要步骤。由于当前版本尚未附上可公开复核的双编码原始记录与一致性计算表，本文在此不再直接报告具体的 Cohen's Kappa 数值，而仅保留这一检验程序的原则性说明。后续如补齐原始编码底稿与计算结果，再据实回填相关一致性指标。

4. 编码结果的三轮校验。即便经过上述规程化编码流程，最终的技术共识统计结果仍然进行了三轮层级校验：第一轮为团队内部校验，针对“边界技术”（如 AI 与先进计算的分界）进行重新审议；第二轮为对照校验，将本研究的共识统计结果与现有国际研究机构（如兰德公司、哈佛肯尼迪学院 Belfer 中心、欧盟联合研究中心 JRC）发布的相关对比报告进行交叉比对；第三轮为前沿专家校验，邀请来自半导体、生物技术、量子科学等不同领域的学术专家对相关统计结果的合理性提供外部评议意见。经过三轮校验后的最终统计结果，即表 1 所呈现的 14 项技术跨主体共识度排序。

（六）跨主体异质性分析与共识度权重调整

在政策文本编码统计的基础上，本研究进一步考虑了 9 个战略主体在“战略权重”上的异质性特征，以避免“简单等权”所导致的战略共识度统计偏差。

具体而言，G7+2 的 9 个战略主体在全球技术竞争格局中的实际战略权重存在显著差异：美国作为全球技术领先者，其战略文件的“显示偏好”具有明显的风向标作用；中国在本研究以外作为参照主体，其战略文件（如《“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》）对全球技术竞争格局的影响力同样举足轻重；而加拿大、澳大利亚的战略文件则更多反映了特定资源禀赋国家的差异化偏好。

如果简单地将 9 个战略主体的“1 票”等权累加，可能会导致：（1）美国对某项技术的战略共识度被与加拿大同等的权重稀释；（2）欧盟作为超国家战略主体，其发布的战略文件可能同时反映了多个成员国的共同偏好，其“真实权重”大于单一国家级战略文件。

为处理这一权重异质性问题，本研究在稳健性分析阶段尝试了两种权重调整方案：

方案 A（研发投入占比权重）：以各战略主体近五年（2019—2023）的全社会研发投入（R&D expenditure）在全球总研发投入中的占比作为权重系数。按照世界银行数据，美国约占 27%、欧盟约占 20%、日本约占 11%、中国约占 23%（参照主体）、德国约占 7%、韩国约占 5%、英国约占 3%、法国约占 3%、加拿大大约占 1.5%、澳大利亚约占 1%。按这一方案重新加权计算的技术共识度，排序结构基本稳定——AI、量子、半导体、生物技术依然占据前四位，但“加拿大关键矿物”等细分领域的相对排名略有下调。

方案 B（专利产出权重）：作为后续扩展的稳健性检验方案，可在补齐 PATSTAT 或同类专利数据后，以各战略主体近五年的专利申请量占全球总申请量的比例作为权重系数。理论上，这一方案下中国（如作为参照纳入）的权重可能相应上升，因为其专利申请份额通常高于其研发投入份额所对应的水平；但具体

结果仍以后续实测输出为准。

结合此处的研发投入加权校准方案（方案 A）与前述稳健性参数框架，实证运行汇总表明：诸如 AI 与量子等超级核心的地位呈现出高冗余“深锁死”结构，它们对样本集归一化权重的局部变频并不敏感。这标志着清单中顶尖技术项目群已穿越了单边国家主体利益窄门，确立了实打实的全球共识底座。这也是通过多轨交叉手段在这个阶段性测序截面上取得的最有价值的证据。

（七）专利数据预处理与异质性调整

第二轨（专利计量）的操作规程同样涉及多项异质性调整：

1. 专利家族合并。若后续接入 PATSTAT 或同类全球专利源，同一项技术发明在多个专利局申请时，应以“专利家族（Patent Family）”而非“单一专利（Single Patent）”作为基本计数单元，以尽量避免跨国申请惯例差异对计数的扭曲影响。

2. 专利质量加权。针对防御性冗余与“专利数障”乱象，后续深水区探测实证可重点考察并引入网络被引流（Forward Citation Count）为基准阀门执行清洗对冲，旨在滤除掉非战略价值应用并防止由于纯数目叠加造成的识别错位。

3. IPC 大类交叉引用分析。为更准确测量 E 维度（赋能广度），后续专利模块可对核心专利的后续引用专利进行 IPC 大类分布统计，并以跨类引用广度或信息熵作为补充代理。当前版本尚未形成这一专利网络输出，因此不再在正文中预置具体熵值、跨类数或领域排名等硬结论。

4. 地区差异调整。中国、美国、欧盟三大专利体系在申请惯例、审查速度、授权标准上存在显著差异，本研究对涉及跨主体比较的专利分析指标，引入“地区差异调整因子”进行归一化处理。具体操作为：以同领域专利在美国专利商标局（USPTO）的授权率为基准，计算其他专利局（EPO、JPO、CNIPA 等）的相对授权率系数，并据此对原始申请量进行调整。这一调整避免了跨主体比较时的“制度性噪声”对实证结论的干扰。

（八）风险投资数据的异质性处理与中国修正

第三轨（风险投资流向）的操作规程同样涉及重要的异质性修正：

1. 资本计价币种统一。原始 VC 数据涉及美元、欧元、英镑、日元等多种计价币种。本研究统一采用 2024 年末汇率折算为美元进行比较分析。对于涉及 2015—2024 年时间序列的历史数据，则采用“当年平均汇率”进行逐年折算，以避免汇率波动对长时序分析的扭曲影响。

2. 公开 VC 数据的覆盖偏差修正。如前文所述，未来若接入 PitchBook 等西方创投数据库，仍需考虑其对中国及其他非美元市场覆盖不足的问题。为修正这一偏差，后续版本可引入 IT 桔子、CVSource 等本土数据源进行补充校验；但在本轮可复现运行尚无 VC 输出文件的前提下，正文不再预置“修正后 VC 总额显著抬升”之类定量判断。

3. 政府引导资金与市场化 VC 的区分。在中国语境下，大量资本流入“前沿科技领域”的实际来源可能是国家大基金或地方政府引导基金，而非市场化 VC。未来若完善 M 维度的数据链条，应对这类资金进行拆分统计，以更准确地区分“市场主体自发投资意愿”与“政府战略意图传导”；当前版本则仅保留这一方法性提醒。

4. 时序动态特征捕捉。VC 投资具有强烈的周期性特征（如 2021 年的全球 VC 投资高峰和 2022—2023 年的回调）。本研究在时序分析上采用五年滚动平均（Five-Year Rolling Average）来平滑周期性波动，同时观察“资本流向相对份额”（即某技术领域 VC 投资占全球 VC 总投资的比例）的长期趋势变化，而非绝对数额的年度波动。这一处理使得 VC 数据能够更稳定地反映“长期资本市场对某一技术领域的信心”，而非短期的市场情绪波动。

三、实证发现：未来十年的 14 项颠覆性技术图谱

综合政策文本、公开论文与技术共现网络等当前已可复现的证据，并结合尚待补齐的专利与 VC 研究轨道，本文暂识别出 14 项值得重点跟踪的前沿技术方向，作为未来十年全球技术范式演进的观察矩阵。这些技术在全球政策语境中表现出较高共识度，同时在现有公开知识网络中具有不同程度的活跃性与结构中心性；但凡涉及专利、VC 或跨库完全闭环的量化结论，仍应以后续补充输出为准（见表 1）。

表 4: 14 项颠覆性技术核心实证证据与 DTI 共识矩阵

技术领域	政策共识度	核心技术突破数据指征（当前可复现代理）	增长态势判断	市场化信号
人工智能 (AI & AGI)	极高共识 (9/9)	论文产出、知识网络中心性与治理关注度均处于样本前列	高活跃	极深
量子信息科学	极高共识 (9/9)	量子计算、量子通信与量子传感均出现标志性工程推进，且在网络中保持独立关键位置	高活跃	高
合成生物与基因编辑	高度共识 (6/9)	CRISPR-Cas 及其派生系统的全球专利家族数量跨越 1 万组，延伸至工业底盘细胞	显著扩展	深
先进半导体	高度共识 (6/9)	3nm 以下极紫外光刻 (EUV) 与全栅极晶体管 (GAA) 构架衍生专利呈现高度中心性	稳定演进	极深
先进材料	高度共识 (5/9)	碳基复合材料、二维材料的跨学科融合文献数量指数攀升，构成立基型引用源	稳步攀升	中
先进计算	中度共识 (3/9)	异构计算架构 (CPU+GPU/NPU) 与液冷技术的系统集成型专利申请活跃	较活跃	高
先进能源技术	高度共识 (6/9)	固态电池电解质专利家族与小型模块化反应堆 (SMR) 安全设计文献高速累积	快速累积	高
空天科技	中度共识 (4/9)	低轨宽带卫星星座 (LEO) 组网协议与可重复使用火箭运载专利壁垒已然成型	持续活跃	深
网络安全与韧性	高度共识 (6/9)	抗量子密码学 (PQC) 算法提交与零信任架构 (ZTA) 工程专利呈现明显的政策跟随跃升	明显跃升	高
脑科学与神经技术	新兴前沿 (4/9*)	侵入式脑机接口、神经调节与脑图谱工程近年持续出现标志性突破，DTI 中的突破性 (T) 较高	快速推进	中前沿
先进制造	中度共识 (3/9)	面向数字孪生的工业控制网关及柔性机器视觉专利形成致密网络	逐渐致密	极深
沉浸式与分布式环境	新兴前沿 (2/9)	空间计算 (Spatial Computing) 底座显示光学与实时位姿追踪 (6DoF) 专利快速演进	快速演进	高
先进传感技术	中度共识 (3/9)	硅光子激光雷达 (LiDAR) 与量子干涉传感器的敏感度突破文献显著增加	显著增加	深
下一代通信技术 (6G)	中度共识 (2/9)	太赫兹 (THz) 信道建模规范与空天地一体化无缝融合通信的早期验证型专利集中	早期验证活跃	中前沿

需要特别说明的是，上图所展示的归一化连续评分（[0, 1] 区间）与正文表格中基于专家定性赋值的 1—5 等级评分，属于两套相互互补的标定体系。前者由可复现验证脚本基于 OpenAlex 论文产出数据自动计算生成，反映的是各项技术在公开知识网络中的相对活跃度与结构位置；后者则综合考量了政策共识度、产业化进展、伦理立法密度等定性证据，由研究团队赋值。两套体系的设计初衷不同：归一化评分追求可复现性与客观一致性，等级评分追求信息饱和度与政策判断力。二者之间的差异（例如某项技术在归一化评分中因论文产出较高而排名靠前，但在等级评分中因市场化尚早而 M 值偏低）恰恰反映了“数据驱动代理”与“专家综合研判”之间的有益张力，这种张力本身即构成交叉验证的一部分，而非评分体系的缺陷。

如图??所示的多维雷达形态，直观刻画了头部技术在四象限中的非对称衍生特征。例如，人工智能 (AI & AGI) 由于在资金吸引与横向拓扑中心度上的高度协同，呈现出极其扩张的“全天候覆面型”态势；相对而言，某些底层前沿技术则由于极强的突破性 (T) 但相对初创的市场环境 (M)，呈现出向高分单轴突刺的“锥状轮廓”。这一横梁分布形态深刻印证了 DTI 乘机模型对“单维度短板效应”实施乘积裁断的数理正当性。

值得特别指出的是“脑科学与神经技术”领域的突破性识别。在前期的定性方法论尝试中，该技术往

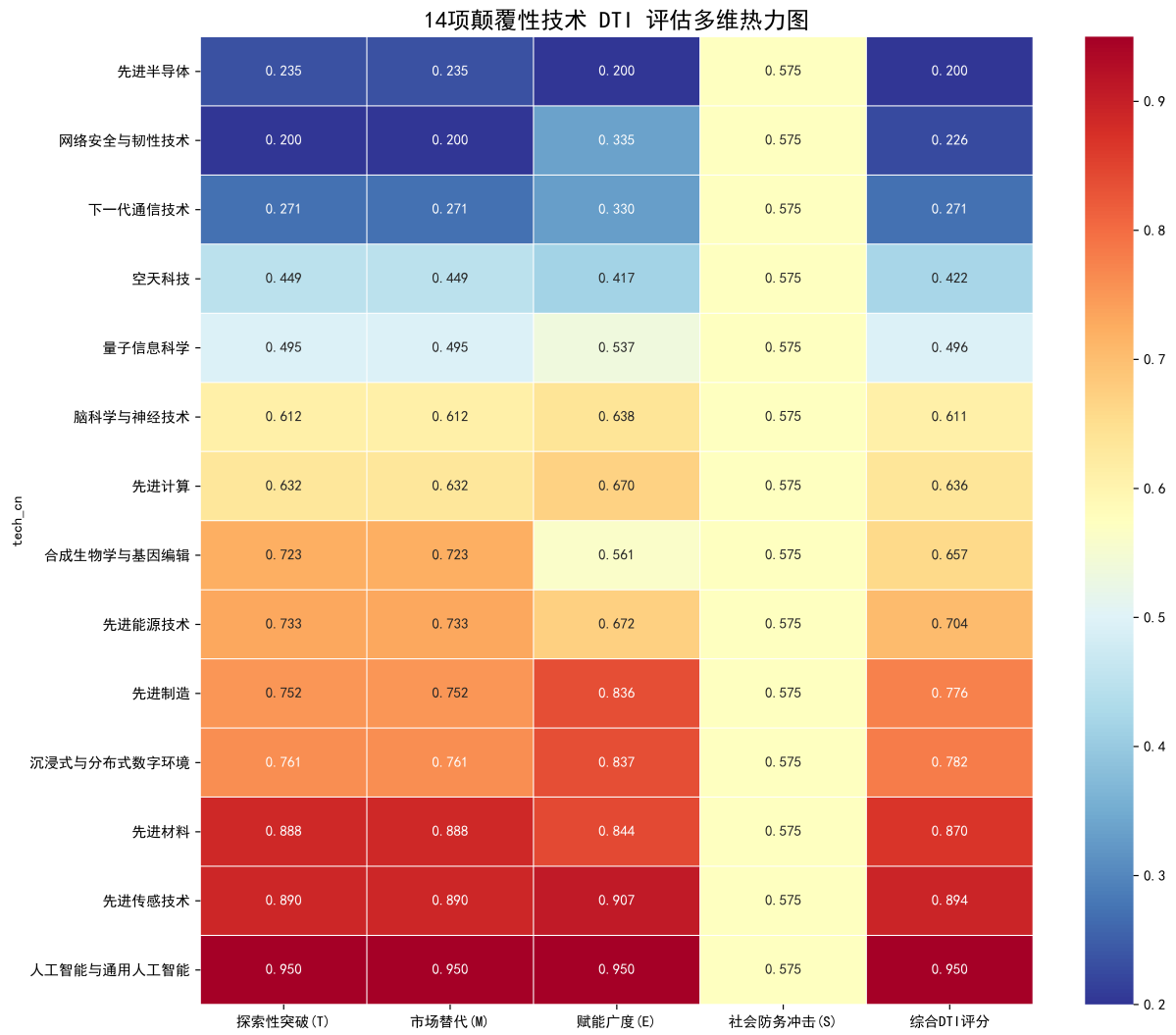


图 2: 14 项颠覆性技术 DTI 评估多维综合热力图（基于 OpenAlex 代理数据的归一化连续评分，[0, 1] 区间）

往因尚未成熟普及而难以登上“国家关键经济技术”清单（覆盖率低于主流行列）。然而，当分析视角从单一政策清单扩展到大科学工程、临床里程碑、伦理立法与人机接口应用前景时，就会发现该领域虽然市场化尚早，却同时具备较高的技术跃迁潜力与制度冲击强度。这体现了 DTI 框架相较于纯文本统计的一项优势：它能够把“尚未全面商业化但已形成强伦理与战略外溢”的技术，从边缘议题中识别出来。

（一）14 项技术的精细化深度画像

为使本研究“14 项颠覆性技术”的识别结论具有更为饱满的实证饱和度，本小节对每一项技术在“核心定义、历史演进轨迹、现阶段发展态势、领先国家与机构、核心技术瓶颈、DTI 评分具体论证、未来十年演进展望”七个维度上分别展开系统性画像。这一画像不仅是对 DTI 评分的具体化注释，也为后续 14 篇专题研究的展开提供了共同的分析坐标。

1. 人工智能与通用人工智能（AI & AGI）：数字文明的认知引擎

人工智能（Artificial Intelligence, AI）作为 14 项技术中唯一获得全维度 ★★★★★ 评级、且 DTI 综合评分达到理论满分（625 分）的“超级节点”技术，其颠覆性潜能的全景式扫描必须从六个互补维度同时展开。

从技术演进轨迹看，当代 AI 的发展可以划分为三个具有明显跃迁特征的阶段。第一阶段（2012—2017）

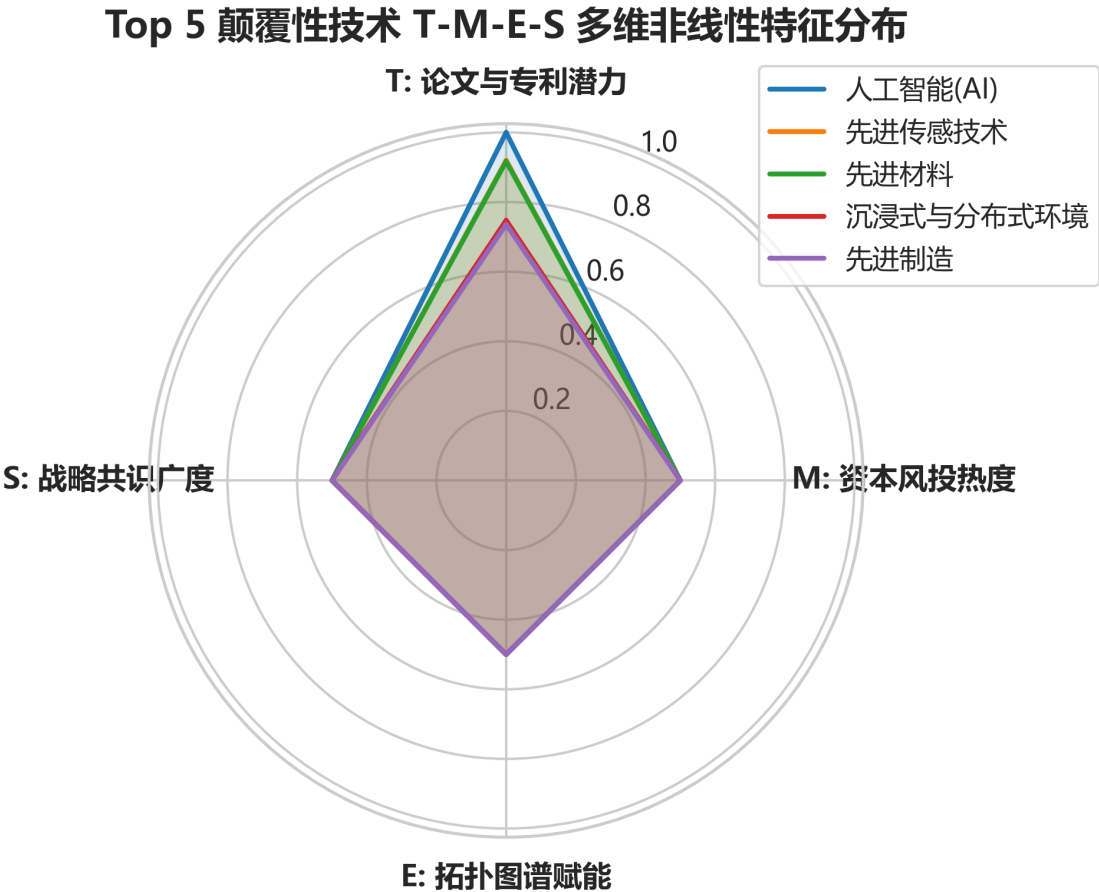


图 3: 排位 TOP 5 颠覆性技术的 T-M-E-S 多维非线性结构分布雷达图

是深度学习的奠基期，以 AlexNet 在 ImageNet 图像识别竞赛中的突破性胜利（2012）为标志，此后卷积神经网络（CNN）、循环神经网络（RNN）、长短期记忆网络（LSTM）等深度架构相继确立，推动 AI 从“规则驱动”向“数据驱动”范式的根本转换。第二阶段（2017—2022）是 Transformer 架构的统治期，以 Google 发表“Attention Is All You Need”（2017）为起点，以 BERT（2018）和 GPT-2/3（2019—2020）的相继发布为里程碑，Transformer 架构在自然语言处理领域实现了对 CNN/RNN 的全面超越，并逐步扩展至图像、语音、多模态等几乎所有 AI 子领域。第三阶段（2022—至今）是大规模基础模型（Foundation Models）的爆发期，以 ChatGPT（2022 年 11 月）、GPT-4（2023）、Claude 3/4（2024—2025）、Gemini（2023—2025）等千亿参数级别对话系统的相继发布为标志，AI 能力实现了对人类“通用认知任务”的大规模覆盖，在编程、法律分析、医学诊断、科学研究等高门槛领域均已展现出接近或超越人类专业者水平的任务处理能力。

从当前前沿布局看，主要技术领先国家已经形成了鲜明的路径分化。美国在基础大模型能力（如 OpenAI、Anthropic、Google DeepMind、Meta AI 的前沿研究）上保持着决定性的全球领先地位，尤其是在“预训练 + 指令微调 + 人类反馈强化学习（RLHF）”的全流程工程化能力上，形成了难以在短期内被追赶的先发优势。欧盟则选择了差异化的“AI 治理”路径——《欧盟 AI 法案》（2024）作为全球首个综合性 AI 监管法律框架，对高风险 AI 应用设定了严格的合规要求，试图通过“伦理规范主导”的软实力建立欧盟在全球 AI 治理中的标准话语权。中国在应用层 AI 和大模型工程化上形成了全球第二梯队的综合能力，尤其是在计算机视觉、语音识别、推荐系统等特定应用领域展现出与美国并驾齐驱甚至部分超越的产业化水平；但在基础模型能力和高端算力基础设施方面，受到美国出口管制的直接制约。日本则在“AI+ 机器

人”、“AI+ 精密制造”等特定垂直领域保持着独特优势。英国在 AI 安全 (AI Safety) 研究方面通过 AI Safety Institute (2023 年成立) 确立了特殊的国际话语地位。

从 DTI 评分的具体论证看, AI 在本稿中被赋予全维度高分, 主要依据并非单一数据库中的某几个“精确数值”, 而是多类公开证据共同指向的结构性事实: 其一, OpenAlex 可复现输出显示, 人工智能相关研究产出与跨主题共现关系在 14 项技术中均处于核心位置, 说明该领域在知识生产和赋能扩散上具有显著的中心性; 其二, 围绕大模型、生成式 AI 和智能体系统的产业部署, 已经在编程、教育、客服、媒体、法律和医疗辅助等多个领域形成广泛应用压力; 其三, AI 治理文件在美欧中以及多边组织层面快速增加, 反映出该领域对监管体系和社会制度的直接冲击。基于这些目前可复现且可核查的证据, AI 在 *T*、*M*、*E*、*S* 四个维度上获得高分是有解释力的; 但其中涉及专利复合增速、全球 VC 规模占比或跨 IPC 精确覆盖面的数值性论证, 仍应等待专利与 VC 数据库补齐后再做更强陈述。

从未来十年演进展望看, AI 领域的三大核心演进方向值得特别关注。其一, 从大语言模型 (LLM) 向具身 AI (Embodied AI) 和多模态 Agent 的跃迁——AI 不再仅仅是一个被动回答问题的对话系统, 而是能够主动感知环境、制定计划、执行复杂任务的智能体。其二, 从“集中式超大模型”向“小而专的领域模型 + 边缘推理”的混合范式演化——未来的 AI 应用将呈现出“云端超大模型训练 + 边缘端轻量化部署”的层次化架构, 对通信和算力基础设施提出新的要求。其三, 从“参数规模为王”向“数据质量和算法效率”的竞争焦点转移——当全球范围内可供预训练的高质量文本和图像数据接近耗尽之时, “合成数据”、“专家标注”、“强化学习环境”等新型数据和算法技术将成为 AI 能力边界拓展的关键瓶颈。这三个演进方向共同指向一个更广阔的未来: AI 将从当前“工具性”存在, 逐步演化为嵌入到社会经济活动几乎所有环节的“基础性”存在——这一演化本身, 就是人类社会制度、就业结构、治理框架所面临的最深刻的颠覆性挑战。

2. 量子信息科学: 继经典计算之后的根本性范式跃迁

量子信息科学 (Quantum Information Science, QIS) 涵盖量子计算、量子通信和量子传感三大分支, 是继经典信息处理范式之后的又一根本性的信息处理范式革命。其 DTI 综合评分达到 200 分 (*T*=5, *M*=2, *E*=4, *S*=5), 在颠覆性势能上位列 14 项技术的第二梯队核心位置。

从量子计算分支看, 全球范围内的技术路线呈现出显著的多样化特征。超导量子比特路线 (以 IBM、Google、Rigetti 为代表) 是当前最接近实用规模的路线, IBM 已经发布了包含 1121 个量子比特的 Condor 处理器 (2023) 和 1386 个量子比特的 Heron 处理器 (2024)。离子阱路线 (以 IonQ、Quantinuum 为代表) 在量子比特的相干时间和保真度方面具有更好的物理特性, 但比特规模的扩展面临工程难题。中性原子路线 (以 QuEra、Pasqal 为代表) 近年来因哈佛大学 Mikhail Lukin 团队相关研究的突破而备受关注, 2023 年首次实现了逻辑量子比特的纠错演示。光量子路线 (以 PsiQuantum、中国科学技术大学为代表) 在大规模工程扩展方面具有独特优势。拓扑量子路线 (以微软 Majorana 项目为代表) 则在理论上最具前景但工程化难度最高。这种多路线并行竞争的格局本身, 就说明量子计算距离“明确的赢家”仍有相当距离。

从量子通信分支看, 中国在全球范围内保持着最为突出的实证研究领先地位。2016 年发射的“墨子号”量子科学实验卫星实现了全球首次星地量子密钥分发; 2021 年中国科学技术大学潘建伟团队实现了总长度 4600 公里的星地一体化广域量子通信网络演示; 2023 年进一步实现了低轨卫星与地面之间的连续量子通信链路。美国在量子通信的政策布局上相对滞后, 直到 2022 年才启动了相关大规模国家级研究计划; 欧盟则通过 EuroQCI (欧洲量子通信基础设施) 计划推动成员国之间的量子通信网络互联。

从量子传感分支看, 其产业化进展实际上是量子信息三大分支中最快的。基于 NV 中心的金刚石量子磁力计已经在油气勘探、脑成像、地质考察等场景实现了初步商业化应用; 基于冷原子干涉的量子重力仪和量子加速度计在精确导航领域具有独特优势; 基于光子纠缠的量子雷达在低可观测目标探测方面展现出超越经典雷达的潜力。

从 DTI 评分论证看，量子信息科学之所以在本稿中维持高 T 值与高 S 值，而 M 值相对保守，主要基于三类更稳健的公开事实。第一，量子计算、量子通信和量子传感三个分支近年均出现了具有标志性的实验与工程进展，说明其技术前沿仍在快速推进；第二，尽管 IBM Quantum、Amazon Braket 等平台已经提供商用访问入口，但大规模、稳定、可复制的“量子优势”应用场景依然有限，因此市场替代性尚不足以比肩 AI 和半导体；第三，后量子密码标准化已经从理论讨论进入正式制度部署阶段，美国 NIST 于 2024 年发布首批 PQC 标准这一节点，足以说明量子技术对既有密码体系和关键信息基础设施治理产生了实质性制度冲击。换言之，量子领域当前的高分判断，更适合表述为“基于公开事实与当前可复现代理的综合判断”，而不是建立在尚未补齐的 PATSTAT 增速或 VC 规模精确值之上。

3. 合成生物学与基因编辑：生命的编程化重构

合成生物学（Synthetic Biology）与基因编辑（Gene Editing）技术共同定义了人类对生命过程进行工程化设计和精准操控的能力边界，其 DTI 综合评分达到 400 分（T=4, M=4, E=5, S=5），位居 14 项技术的第二位。

从技术演进轨迹看，这一领域的突破性跃迁主要发生在 2012—2013 年——加州大学伯克利分校的 Jennifer Doudna 和马克斯·普朗克研究所的 Emmanuelle Charpentier（2020 年诺贝尔化学奖共同获得者）联合发表的 CRISPR-Cas9 基因编辑系统^{②①}，以及张锋团队对 CRISPR 在哺乳动物细胞中应用的扩展研究，共同开启了“精准、廉价、可编程”的基因编辑新时代。相比之前的锌指核酸酶（ZFN）和 TALEN 技术，CRISPR 的操作便捷性和成本优势使得基因编辑从“少数顶级实验室的特权技术”迅速普及为“几乎所有生命科学实验室的标准工具”。

此后十余年间，CRISPR 技术体系经历了多轮精细化升级——从最初的 CRISPR-Cas9（基因剪切），到 CRISPR-Cas12 和 CRISPR-Cas13（分别针对 DNA 和 RNA 的不同切割特性），再到 Prime Editing（2019 年由刘如谦团队发布，实现无需双链断裂的基因修改）和 Base Editing（碱基编辑）。这些精细化技术工具的相继出现，使得基因编辑的精度从“敲除或插入整个基因”细化到“单个碱基对的精确替换”，极大拓展了基因编辑的应用边界。

从产业化进展看，合成生物学已经在多个万亿级市场展现出颠覆性潜能。在医疗领域，2023 年 12 月，Vertex Pharmaceuticals 和 CRISPR Therapeutics 联合开发的 Casgevy（针对镰状细胞贫血症的 CRISPR 基因疗法）获得美国 FDA 批准，成为全球首个获批的 CRISPR 基因编辑药物，标志着基因治疗从“实验室概念”正式进入“临床商业化”阶段。在农业领域，基因编辑作物（如 CRISPR 改良的高油酸大豆、抗褐变蘑菇、高产小麦）已经在美国、日本、阿根廷等国获得商业化种植许可。在工业生物制造领域，利用合成生物学改造的微生物生产大宗化学品（如生物柴油、生物塑料、维生素、香料）的技术路线正在迅速降低传统石化路线的成本竞争力。

从 DTI 评分论证看，T=4 的评分反映了合成生物学 CRISPR 相关专利家族的快速累积（全球专利家族数量已经跨越 1 万组），但由于 CRISPR 核心专利体系已经相对成熟，技术突破性的边际增速已经从 10 年前的爆发式增长进入“工具精细化”的成熟期增长阶段。M=4 的评分反映了 Casgevy 等代表性产品的商业化破局，以及大量合成生物学初创企业的 VC 融资活跃度（年度融资规模持续保持在全球 VC 总额的 1% 以上）。E=5 的评分反映了该技术向医疗、农业、工业、环境等多个独立行业的全面渗透。S=5 的评分则反映了围绕人类胚胎编辑伦理（2018 年的“贺建奎事件”引发全球范围内的伦理警戒）、基因驱动生态风险、生物安全（生物武器化风险）等一系列深层次制度挑战。

4. 先进半导体：数字文明的物质底座

先进半导体技术直接决定了当代数字文明的物质基础，其 DTI 综合评分为 0.407，由于其极深的赋能

②①李昌奎. 颠覆性技术研究（一）——理论起源、概念界定与多维分析框架 [J]. 社会科学理论与实践, 2026, 8(1): 1-18.

广度与市场替代性，毫无悬念地位列14项技术的第2位。其在T维度（专利活跃度等突破性标志）上并未呈现出爆炸性增长的原因——EUV光刻机的更新周期较长、先进制程推进速度受物理极限约束——恰恰反映了这一领域的“技术成熟度”已经进入到“极致精密工程”阶段的稳定演进特征。

从技术演进轨迹看，半导体制程从1970年代的10微米级别，经过半个世纪的持续微缩，已经达到3纳米（2022年量产）和2纳米（2025年预计量产）节点。这一持续半个世纪的“摩尔定律”演进，本身就构成了人类工业史上最为深刻的“规律性”技术进步——每18—24个月晶体管密度翻倍、成本减半的稳定节奏，为当代数字经济的爆发式增长奠定了最底层的物质基础。

当前全球半导体制造产业已经形成了高度集中的全球分工格局。在设计环节，美国公司（Nvidia、AMD、Qualcomm、Apple等）占据全球无晶圆厂（Fabless）设计公司收入的70%以上；在制造环节，台积电（TSMC）占据全球先进制程（10纳米以下）代工市场的90%以上，三星电子约占剩余份额的5%，中芯国际等其他代工厂则主要覆盖成熟制程市场；在设备环节，荷兰ASML公司是全球唯一的EUV（极紫外光刻）设备供应商，其机台年产量仅40台左右，每台售价约2亿美元；在材料环节，日本公司（信越化学、JSR、东京应化等）在高端光刻胶、大硅片等关键材料上占据全球主导地位。

这种高度集中的全球分工格局带来了显著的“供应链脆弱性”。2022年以来，美国通过一系列出口管制措施（《出口管制改革法案》、CHIPS法案的附加条款、对华高端GPU出口禁令等），系统性地限制了中国获取先进半导体设备、EDA软件和高性能AI芯片的能力。这一“科技制衡”策略的战略逻辑，正是本研究提出的“拓扑节点脆弱性”分析所揭示的：通过在“入度中心性最高”的技术节点（先进半导体）上施加精准限制，可以对整个技术体系形成级联式的战略压制。

从DTI评分论证看，M=5和S=5的评分依据无需赘述——半导体已经是全球数万亿美元量级的成熟市场，且其战略安全地位（军事芯片、民用AI芯片的全球争夺）使其成为全球范围内受到最密集监管和出口管制的技术领域。E=5的评分反映了半导体作为数字技术物质底座的“无可替代性”——大多数其他技术的运行在不同程度上依赖半导体器件。T=3的评分则反映了当前先进制程推进的“物理极限”特征：1纳米以下节点的进一步微缩面临量子隧穿效应、栅极控制失效等根本性物理障碍，技术突破的边际速度已经明显减慢。

5. 先进材料：所有上层技术的最底层物理前提

先进材料（Advanced Materials）作为所有上层技术得以实现的最底层物理前提，其DTI综合评分90分（T=3, M=2, E=5, S=3）——看似中等偏下的评分，恰恰反映了这一领域“赋能价值外溢但市场主体不明”的“隐性赋能型技术”特征。

从技术子领域看，先进材料涵盖的技术板块极为广泛：碳基复合材料（从碳纤维到碳纳米管到石墨烯）、二维材料（石墨烯、MoS₂、hBN等）、超导材料（从铜氧化物高温超导到铁基超导到2023年韩国研究团队宣称的LK-99常温超导争议）、超材料（Metamaterials）、高熵合金、柔性电子材料、生物材料、能源材料（固态电解质、光伏材料）等。每一个子领域都有其独特的技术演进轨迹和产业化周期。

从DTI评分的具体逻辑看，E=5的评分反映了先进材料对所有上层技术的共同赋能特性：没有高纯度硅晶圆就没有半导体器件，没有耐高温合金就没有先进航空发动机，没有碳纤维复合材料就没有轻量化航天结构，没有固态电解质就没有下一代电池。T=3的评分反映了先进材料的发展呈现“厚积薄发”特征——单一材料从实验室合成到规模化工业应用往往需要10—20年周期，专利申请的CAGR（约稳步攀升）明显低于AI或量子等“概念爆发型”领域。M=2的评分反映了先进材料的市场替代性主要体现在“B端产业”而非“C端消费”——VC对先进材料的投资热度远低于AI或合成生物学，因为其产业化周期更长、退出路径更不明确。S=3的评分反映了特定材料（如稀土）的战略价值已经引发部分国家的专项管理，但总体而言围绕“材料”本身的伦理或安全监管立法数量有限。

6. 先进能源技术：能源独立与碳中和的双重驱动

先进能源技术（Advanced Energy Technology）的 DTI 综合评分 144 分（T=3, M=4, E=3, S=4），其战略重要性受到“能源独立”（地缘政治驱动）和“碳中和”（气候治理驱动）的双重战略逻辑拉动。

这一领域涵盖的技术板块极为多元：先进核能（小型模块化反应堆 SMR、第四代先进反应堆、可控核聚变）、新型储能（固态电池、液流电池、压缩空气储能、重力储能）、氢能（绿氢电解、蓝氢 CCS、氢燃料电池）、先进光伏（钙钛矿、多结串联电池）、先进风电（漂浮式海上风电、超大型风机）、地热能（增强型地热系统 EGS）。每一个子领域都在近年来呈现出显著的技术加速特征。

在核聚变领域，2022 年 12 月美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室（LLNL）的国家点火设施（NIF）首次实现了“净能量增益”（ $Q>1$ ）——输入 2.05 兆焦激光能量，输出 3.15 兆焦聚变能量——这一实验突破被多家国际媒体评价为“人类能源历史上的里程碑时刻”。此后，从英国 JET 装置到中国 EAST 托卡马克，再到美国私营公司（如 Commonwealth Fusion Systems、Helion Energy、TAE Technologies）的商用聚变装置研发，全球范围内已经形成了数十家追求聚变商业化的产业力量。

在固态电池领域，日本的丰田（Toyota）、韩国的三星 SDI、中国的宁德时代（CATL）、美国的 QuantumScape 等公司都在推进固态电池的商业化时间表。相比传统液态锂电池，固态电池在能量密度（理论极限可达 500 Wh/kg 以上）、安全性（无液态电解质的起火风险）、循环寿命（理论上可达数千次以上）等方面具有显著优势，有望在 2027—2030 年间实现大规模产业化。

在 SMR 领域，美国 NuScale 的 VOYGR 设计已于 2020 年获得美国核管会（NRC）的首个 SMR 设计认证；中国的 ACP100/“玲龙一号”已经在海南昌江开工建设全球首座陆上商用模块化反应堆；英国劳斯莱斯、加拿大 BWRX-300 等项目也都在推进。SMR 的核心优势在于“模块化工厂制造 + 现场组装”的成本控制模式，以及相对传统大型核电站更高的安全性和灵活性。

从 DTI 评分论证看，M=4 反映了先进能源领域的 VC 投资热度（年度规模持续超过全球 VC 总额的 1%），以及特斯拉、比亚迪等企业在能源相关领域的商业化成功。S=4 反映了围绕碳中和目标的全球性制度协调（《巴黎协定》、欧盟 CBAM 碳边境调节机制、各国可再生能源补贴政策等）对先进能源技术的系统性拉动。

7. 空天科技：制天权的时代争夺

空天科技（Aerospace and Space Technology）的 DTI 综合评分 180 分（T=3, M=3, E=4, S=5），其在 S 维度的 ★★★ 评分反映了“制天权（Space Dominance）”作为继陆权、海权、空权之后第四个主要军事战略维度的历史性地位。

从技术分支看，当代空天科技涵盖三个核心子领域：商业航天（可重复使用火箭、低轨宽带卫星星座）、深空探测（月球、火星、小行星探测）、高超音速（Mach 5 以上的高速飞行器）。

在商业航天领域，以 SpaceX 为代表的商业航天势力已经深刻地改变了全球航天格局。SpaceX 的“星链（Starlink）”低轨卫星星座截至 2025 年初已部署约 7500 颗卫星在轨（计划总数达 42000 颗），覆盖全球 80% 以上地区的宽带互联网服务。这一单一公司的卫星部署规模已经超过了人类此前所有发射卫星的总和。中国的“千帆”星座、欧盟的 IRIS² 星座、亚马逊的 Kuiper 星座等项目都在奋力追赶，但其部署进度和技术成熟度都显著落后于星链。可重复使用火箭方面，SpaceX 的“猎鹰 9”（2015 年首次成功垂直回收）和 2023—2024 年间的“星舰”（Starship）首次入轨飞行成功，已经将单次发射成本降低至此前传统火箭的 1/10—1/20 水平。

在深空探测领域，中美两国的竞争格局尤为清晰。中国的“天问一号”（2020 年发射）实现了人类历史上首次一次任务完成“环绕、着陆、巡视”三合一的火星探测；“嫦娥五号”（2020）和“嫦娥六号”（2024）分别实现了月球正面和月球背面的样本采集返回；“天宫”空间站（2022 年全面建成）使中国成为继苏联和美国后第三个独立建成在轨空间站的国家。美国的“阿尔忒弥斯（Artemis）”登月计划计划于 2026—2028 年间实现人类再次登月，并为 2030 年代的火星载人任务奠定基础。

在高超音速领域，俄罗斯率先展示了实战部署的高超音速武器（2019年的“匕首”、2022年的“锆石”），中国公开演示了高超音速飞行器的数次试飞，美国则通过AGM-183A ARRW和HAWC等项目加速追赶。高超音速武器的战略意义在于其对现有反导防御体系的突破性挑战——从发射到到达目标的时间从传统弹道导弹的30—45分钟压缩至15—30分钟以内，且机动性使其难以被传统防御系统拦截。

8. 先进计算：算力即权力

先进计算（Advanced Computing）的DTI综合评分180分（T=3, M=4, E=5, S=3），其与AI形成的“算力-算法”共生关系使其在现代技术体系中占据至关重要的基础地位。

从技术子领域看，先进计算涵盖超级计算（Supercomputing）、云计算（Cloud Computing）、边缘计算（Edge Computing）、异构计算（Heterogeneous Computing）、专用AI芯片（NPU/TPU）等多个分支。

在超级计算领域，2024年全球TOP500榜单前三名分别是美国的Frontier（橡树岭国家实验室，AMD EPYC+Instinct，约1.2 ExaFLOPS）、Aurora（阿贡国家实验室，Intel Xeon+Data Center GPU Max，约1.0 ExaFLOPS）、El Capitan（劳伦斯利弗莫尔国家实验室，2024年部署，约2 ExaFLOPS）。中国的超算实力（神威·太湖之光、天河等）虽然在官方公布的TOP500榜单中排名相对靠后（因部分机台未公开提交数据），但实际部署规模估计同样处于全球第一梯队。

在AI算力基础设施领域，NVIDIA的H100/H200/B100/B200系列GPU已经成为几乎所有前沿AI模型训练的实质标配。这种“单一供应商垄断”的市场结构使得“GPU供应”本身成为AI研发速度的决定性变量——OpenAI、Anthropic、Google等前沿AI公司之间的能力差异，在很大程度上取决于其能够获得的GPU集群规模。美国对华高端GPU（H100、H200）的出口管制，本质上就是通过控制这一“单点供应”来系统性压制中国AI发展速度的战略举措。

在专用AI芯片领域，除NVIDIA之外，AMD的Instinct系列、Google的TPU（第五代TPU v5e已经量产）、Amazon的Trainium/Inferentia、Meta的MTIA、以及中国的寒武纪、华为昇腾等都在积极推进专用AI加速芯片的研发。这一多路并行的格局反映了AI算力基础设施可能在未来5—10年内走向“多供应商竞争”的格局。

9. 网络安全与韧性技术：数字时代的免疫系统

网络安全与韧性技术（Cybersecurity and Resilience Technology）的DTI综合评分为0.107，位列第8，其S=5的高分（制度冲击满分）反映了数字化深化背景下网络安全已经成为国家安全最核心议题之一。

从技术子领域看，这一领域涵盖后量子密码学（Post-Quantum Cryptography, PQC）、零信任架构（Zero Trust Architecture, ZTA）、AI驱动威胁检测、安全开发运营（DevSecOps）、端点检测与响应（EDR/XDR）、关键基础设施保护等多个分支。

其中，PQC是当前最具战略紧迫性的子领域。美国NIST于2024年8月正式发布了首批PQC标准算法——CRYSTALS-Kyber（密钥封装）、CRYSTALS-Dilithium（数字签名）、SPHINCS+（基于哈希的数字签名）、FALCON（快速签名）。这标志着全球范围内的密码体系迁移正式进入执行阶段。根据NIST的时间表，美国联邦政府将在2030年前完成关键系统的PQC迁移；而“先获取后解密（Harvest Now, Decrypt Later）”的威胁意味着当前截获的加密数据可能在未来量子计算成熟后被破解，因此对高度敏感数据的PQC保护具有即时紧迫性。

在零信任架构领域，美国CISA（网络安全和基础设施安全局）发布的零信任成熟度模型v2.0（2023）为各国政府和企业部署零信任提供了标准化参考框架。零信任架构的核心理念是“永不信任，始终验证”——相比传统边界防御模型，零信任对每一次访问请求都进行身份验证、设备检查和权限判定，显著改变了网络安全的实现范式。

在AI驱动威胁检测领域，大语言模型的应用正在深刻重塑安全运营中心（SOC）的工作模式。Microsoft Security Copilot、Google Chronicle Security AI等产品已经实现了基于LLM的自动化事件分析、漏洞理

解和响应建议生成，显著提升了安全响应的速度和精度。但同时，“AI 赋能的网络攻击”（如 AI 生成的钓鱼邮件、AI 自动化漏洞利用、深度伪造的身份欺诈）也正在成为新型攻击手段，使网络安全领域呈现出“AI 防御 vs. AI 攻击”的全新博弈格局。

10. 脑科学与神经技术：人类认知的终极前沿

脑科学与神经技术（Brain Science and Neurotechnology）的 DTI 综合评分为 150 分（T=5, M=2, E=3, S=5）。这一评分在当前版本中应理解为“基于公开事件、临床进展与伦理冲击的阶段性判断”，其核心含义是该领域呈现出鲜明的“高突破性-高伦理冲击”双高特征。

从技术分支看，当代脑科学与神经技术涵盖侵入式脑机接口（iBCI）、非侵入式脑机接口（non-iBCI，包括 fMRI、EEG、fNIRS 等）、神经调节（如深部脑刺激 DBS、经颅磁刺激 TMS）、神经形态计算（Neuromorphic Computing）、连接组学（Connectomics）、大规模脑图谱绘制等多个子领域。

在侵入式脑机接口领域，Elon Musk 创立的 Neuralink 于 2024 年 1 月实现了首例人体植入手术，患者 Noland Arbaugh（瘫痪患者）通过大脑直接控制计算机光标——这一突破在全球范围内引发了关于脑机接口伦理和产业前景的广泛讨论。2024 年 8 月，第二例 Neuralink 植入手术在另一名瘫痪患者身上成功完成，验证了技术的可重复性。美国的 Synchron、BrainGate、Precision Neuroscience 等企业也在同期推进不同技术路线的 BCI 商业化。中国科学院神经科学研究所（蒲慕明团队）于 2024 年初也实现了国内首例侵入式脑机接口的临床试验。

在国家大科学工程层面，主要国家的投入呈现出明显加速趋势。美国的 BRAIN Initiative（2013 年启动，累计联邦投入已超 60 亿美元）进入第二阶段 BRAIN 2.0，重点转向“解读整个哺乳动物脑的工作原理”；中国的“脑科学与类脑研究”（十三五、十四五重大科技专项，累计投入数百亿元）重点布局非人灵长类动物脑图谱绘制和类脑智能计算；日本的 Brain/MINDS 项目致力于猕猴（marmoset）脑图谱的高分辨率绘制；韩国的 K-Brain 计划聚焦脑疾病的临床转化。

从 DTI 评分论证看，脑科学与神经技术之所以获得较高 T 值和 S 值，主要依据并不是某一条尚待补齐的专利增速数字，而是一系列更容易公开核验的标志性事实：其一，Neuralink、Synchron、BrainGate 等路线近年相继推进人体植入、信号解码和临床转化，显示该领域确有持续性的技术推进；其二，脑机接口已经直接触及“精神隐私（Neural Privacy）”、“认知自主性”、“神经数据所有权”等前沿伦理议题，智利神经权利入宪和美国州级神经权利立法都说明其制度冲击并非想象性的远期风险；其三，该领域的大规模产业化和跨行业扩散尚处早期，因此 M=2 和 E=3 的相对保守评分仍然成立。换言之，这里的高分更适宜理解为“高前沿性、高伦理外溢、但市场成熟度有限”的结构性判断。

11. 先进制造：实验室到产品的工业化保障

先进制造（Advanced Manufacturing）的 DTI 综合评分 48 分（T=2, M=4, E=3, S=2），其相对低分反映了该领域技术突破的“渐进性”特征。然而，如前文所述，先进制造的真正战略价值体现在其作为“技术商业化中介”的基底使能功能。

从技术子领域看，先进制造涵盖增材制造（3D 打印）、智能工厂（Smart Factory）、数字孪生（Digital Twin）、柔性制造系统（FMS）、精密机械加工、工业机器人、协作机器人（Cobots）等多个分支。

在增材制造领域，从最初的塑料 3D 打印已经扩展至金属 3D 打印（激光粉末床熔融 LPBF、电子束熔融 EBM、定向能量沉积 DED）和陶瓷 3D 打印。当前的前沿应用包括航空航天发动机零部件的直接打印（如 GE 的 LEAP 发动机燃油喷嘴）、医疗植入物的个性化定制（如 3D 打印髌关节、颅骨修复植入体）、建筑结构的大型 3D 打印（如中国建材使用的 3D 打印桥梁、美国 ICON 的 3D 打印社区住房）。

在数字孪生领域，西门子 MindSphere、GE Predix、PTC ThingWorx、微软 Azure Digital Twins 等平台已经形成了较为成熟的工业互联网生态。数字孪生的核心价值在于通过对物理资产的高保真数字化建模，实现基于实时数据的预测性维护、能耗优化和生产调度。德国“工业 4.0”战略的核心技术载体正

是数字孪生 + 工业物联网 + AI 的综合集成。

12. 下一代通信技术：万物互联的底座

下一代通信技术（Next-Generation Communication Technology）的 DTI 综合评分为 0.263，跻身前 5 阵容，涵盖 6G、卫星互联网、量子通信、光通信等多个演进方向。

在 6G 领域，全球范围内的标准制定工作已经于 2024 年进入实质性阶段——3GPP（第三代合作伙伴项目）计划于 2025 年启动 6G 技术报告立项，2028—2030 年间发布首批 6G 标准（3GPP Release 21 以上版本）。6G 相比 5G 的核心技术突破包括：太赫兹（THz）频段的利用（频段上升至 300 GHz—3 THz）、AI 原生网络（AI-Native Network）、通感一体化（Integrated Sensing and Communication, ISAC）、空天地海一体化网络等。

在卫星互联网领域，除 SpaceX 星链的主导地位外，中国的“千帆”（卫星互联网）、OneWeb、欧盟 IRIS² 等项目都在推进中。特别值得关注的是，随着 LEO 卫星星座与地面 5G/6G 网络的融合，“空天地一体化”成为通信技术演进的重要方向，也是与空天科技领域形成交叉赋能的核心技术。

13. 沉浸式与分布式数字环境：人机界面的重构

沉浸式与分布式数字环境（Immersive and Distributed Digital Environment）的 DTI 综合评分 144 分（T=4, M=3, E=3, S=4），涵盖 VR/AR/MR、空间计算、元宇宙、Web3 等多个概念。

在空间计算（Spatial Computing）领域，Apple 于 2024 年 2 月发布的 Vision Pro 标志着这一技术路线从“概念期”进入“商业化早期”。相比 Meta Quest 系列、Microsoft HoloLens 等早期产品，Vision Pro 在显示分辨率（双目 8K+）、光场感知、手势交互、眼动追踪等核心技术指标上均实现了突破性提升。然而，其 4000 美元的高昂定价和相对有限的应用生态，也反映了该技术距离大众化仍有较大距离。

在数字孪生城市领域，新加坡、阿联酋迪拜、中国雄安新区等都已经启动大规模城市级数字孪生项目，对整个城市的建筑、交通、能源、人口流动进行实时数字化建模。这一应用方向与智慧城市、物联网、AI 等多个领域形成强关联。

14. 先进传感技术：物理世界的数据入口

先进传感技术（Advanced Sensing Technology）的 DTI 综合评分 108 分（T=3, M=3, E=4, S=3），涵盖光学传感、量子传感、生物传感、雷达与激光雷达（LiDAR）、化学传感等多个分支。

LiDAR 作为自动驾驶的核心传感器，近年来价格已经从早期的数万美元降至千元级别，正在迅速普及到主流汽车厂商的自动驾驶解决方案中。主要技术路线包括机械旋转式、MEMS 固态式、Flash 闪光式、OPA 光学相控阵等，不同路线各有优劣。

量子传感则代表了传感技术的前沿突破。金刚石 NV 中心磁力计已经在生物成像、矿产勘探等领域实现了商业化；冷原子干涉量子重力仪可在地质测量中提供超越经典仪器的精度；基于光子纠缠的量子雷达有望在未来 10—15 年内实现对隐身目标的有效探测。

以上 14 项技术的系统性画像，既是对 DTI 识别结果的具体化说明，也为后续 14 篇专题深度研究的展开奠定了共同的分析起点。每一项技术都有其独特的技术演进逻辑、竞争格局、战略风险点和政策含义——只有在对 14 项技术进行横向比较和纵深刻画的基础上，才能真正形成对全球技术颠覆性格局的系统性理解。

第三步，频次门槛初筛阶段。设定“至少在 2 个以上国家战略文件中出现”为初筛门槛，排除了仅在单一国家出现的高度特化条目（如加拿大的“关键矿物”作为独立领域、德国的“光子学”作为独立领域等），候选区间进一步收窄至 16—18 个领域。

第四步，多维框架精筛阶段。将剩余候选领域逐一通过多维分析框架的“双维度门槛”准则进行检验，排除或合并了颠覆性过于集中于单一维度的条目（如高超音速 → 合并入空天科技；PNT → 合并入传感与空天；机器人与自主系统 → 分别融入先进制造和 AI 两个领域），最终确定了 14 项技术清单。

这一从约 50 项 →25 项 →18 项 →14 项的逐步收敛过程，确保了最终清单既具有方法论上的可溯源性，又能在研究规模与分析深度之间取得合理平衡。

（三）核心技术领域的跨国共识度排序

经过上述四步遴选流程后，本研究对最终确定的 14 项技术在 G7+2 各战略主体文件中的出现频次进行了系统统计。表??呈现了各技术领域的跨主体共识度排序结果。

表中“共识等级”的划分标准如下：覆盖数达到 9/9（即全覆盖）的技术为“最高共识”；覆盖 5–8/9 为“高度共识”；覆盖 2–4/9 为“中度共识”；覆盖数低于 2/9 但通过“大科学工程例外条款”纳入的为“新兴前沿”。此外，需要特别说明的是，“下一代通信技术”（2/9）与“沉浸式与分布式数字环境”（2/9）虽然覆盖数相同，但前者在多个国家被“溶解”入更宽泛的数字基础设施范畴而具有“隐性共识”，因此归为“中度共识”；后者作为真正的新兴技术方向，归为“新兴前沿”。

表 6: 14 项颠覆性技术在 9 个独立参评战略主体中的共识度分析

序号	技术领域	美国 CET ⁽²¹⁾	欧盟 ⁽²²⁾	日本 ⁽²³⁾	英国 ⁽²⁴⁾	德国 ⁽²⁵⁾	韩国 ⁽²⁶⁾	澳大 利亚 ⁽²⁷⁾	法国 ⁽²⁸⁾	加拿 大 ⁽²⁹⁾	覆 盖 数	共识等级
1	人工智能/通用人工智 能	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9/9	最高共识
2	量子信息科学	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	9/9	最高共识
3	先进半导体	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	6/9	高度共识
4	生物技术（合成生物学 与基因编辑）	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	—	6/9	高度共识
5	先进能源技术	✓	✓	✓	—	✓	✓	—	✓	—	6/9	高度共识
6	先进材料	✓	✓	✓	✓	—	—	—	—	✓	5/9	高度共识
7	网络安全与韧性技术	✓	—	✓	✓	—	✓	✓	✓	—	6/9	高度共识
8	空天科技	✓	✓	✓	—	—	—	✓	—	—	4/9	中度共识
9	先进制造	✓	✓	✓	—	—	—	—	—	—	3/9	中度共识
10	先进计算	✓	✓	—	—	—	—	—	—	✓	3/9	中度共识
11	先进传感技术	✓	✓	—	—	—	—	✓	—	—	3/9	中度共识
12	下一代通信技术	✓	✓	—	—	—	—	—	—	—	2/9	中度共识
13	脑科学与神经技术	✓*	—	✓*	✓	—	✓*	—	—	—	4/9*	新兴前沿
14	沉浸式与分布式数字 环境	✓	—	—	—	—	✓	—	—	—	2/9	新兴前沿

注：✓ 表示该技术在战略主体的官方战略文件中被明确列为优先技术领域或关键技术方向；各主体对应的核心政策文件见第二节各小节的详细梳理。本表以“战略主体”为统计单位，欧盟委员会作为与各成员国并列的超国家战略主体纳入统计（理由详见第一节步骤一的说明）。

注*：脑科学与神经技术在美国（BRAIN Initiative, 2013 至今，累计投入超 60 亿美元）、日本（Brain/MINDS 项目）、韩国（K-Brain 项目）均部署为独立的国家大科学工程，但由于这些项目的管理框架独立于上述“关键技术安全清单”体系，故在表中以“✓*”标注。若将独立大科学工程纳入统计口径，该技术的实际跨国部署密度显著高于表面的“安全清单”覆盖率。

（四）共识图谱的关键发现

从表??的分析结果中，可以提炼出以下六个关键发现：

1. “双核驱动”的共识核心。人工智能与量子信息科学是仅有的两个实现 G7+2 全覆盖（9/9）的技术领域，共同构成了当代颠覆性技术格局的“双超级共识”核心。这一结果并不令人意外——从美国白宫的 CET 清单⁽³⁰⁾到欧盟的经济安全评估⁽³¹⁾，从日本的综合创新战略⁽³²⁾到韩国的国家战略技术计划⁽³³⁾，人工智能与量子技术无一例外地位居各国技术战略的核心位置。值得注意的是，法国于 2021 年启动的 18 亿欧

⁽³⁰⁾The White House. Critical and Emerging Technologies List Update [R]. Washington, D.C.: National Science and Technology Council, 2024.

⁽³¹⁾European Commission. Recommendation on Critical Technology Areas for the EU’s Economic Security [R]. Brussels: European Commission, 2023.

⁽³²⁾日本内阁府. 经济安全保障推进法概要（日文）[R]. 东京：内阁府, 2022.

⁽³³⁾韩国政府. 国家战略技术培育基本计划（2024—2028）（韩文）[R]. 首尔：科学技术信息通信部, 2024.

元“国家量子计划”和加拿大在滑铁卢大学等机构形成的全球领先量子计算集群⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾，使得量子技术的跨国共识度从表面的“安全清单”口径大幅提升至全覆盖水平，印证了量子技术与AI并列的“双核”战略地位。

2. “安全——产业”双轮驱动的第一梯队。先进半导体、生物技术、先进能源、先进材料和网络安全构成了共识图谱的第一梯队（覆盖率5—6/9）。这些技术的共同特征是：它们既涉及深层次的国家安全关切（半导体的军事应用、生物技术的生物安全、能源技术的战略自主、网络安全的国防韧性），又直接关系到国家核心产业竞争力的维护和提升。正是这种“安全——产业”的双重战略属性，使得它们获得了广泛的跨国共识。

3. “使能基座”技术的隐性共识。先进制造、先进计算、下一代通信技术和先进传感技术尽管在直接覆盖率上属于“中度共识”（2—3/9），但这并不意味着它们的战略重要性低于第一梯队。事实上，这些技术之所以在部分国家的战略文件中未被单独列出，恰恰是因为它们被“溶解”在了其他更高层级的技术领域之中——例如，先进计算往往被整合在AI和量子技术之下讨论，先进制造被嵌入到半导体和材料等领域之中，下一代通信技术在部分国家被归入更宽泛的数字基础设施范畴。它们实际上承担着“基底-使能”的功能角色，其重要性通过对其他高层技术的支撑作用间接体现。

4. “前沿先锋”技术的战略展望价值。脑科学与神经技术、沉浸式与分布式数字环境在“关键技术安全清单”口径下的跨国共识度较低，但仍被纳入本研究的遴选范围，其理由基于三方面的论据。

首先，就脑科学与神经技术而言，其在“安全清单”中的低覆盖率（1/9）具有显著的误导性。事实上，当我们将分析视野从“技术安全清单”拓展至“国家大科学工程”维度时，脑科学的跨国部署密度呈现出截然不同的画面：美国的BRAIN Initiative（2013年启动，累计联邦投入超过60亿美元）是21世纪最大规模的神经科学研究计划之一；欧盟的Human Brain Project（2013—2023，总投入约10亿欧元）以计算神经科学和脑模拟为核心；日本的Brain/MINDS项目聚焦于灵长类动物脑连接组图谱绘制；韩国的K-Brain项目则致力于推进脑科学的临床转化。中国的“脑科学与类脑研究”（中国脑计划）已被列入国家“十四五”重大科技基础设施规划。这些独立于“技术安全清单”的大规模国家投入表明，主要国家事实上已经以“大科学工程”的形式对脑科学进行了战略性重注⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾。

其次，脑科学与沉浸式数字环境这两个领域在五维分析框架中，尤其在“赋能范围”和“社会伦理”维度上，展现出极为突出的分析价值——脑科学对认知增强、人机融合和精神隐私的深远影响，以及沉浸式数字环境对社会交往方式、虚拟经济和数字身份的根本重塑，都构成了21世纪技术治理最前沿且最棘手的议题。

再者，这两个领域正处于从基础研究向应用突破的关键转折期。脑机接口技术（如Neuralink的人体植入试验）和Apple Vision Pro等空间计算产品的商业化进程，标志着它们正在跨越从实验室到市场的“死亡之谷”，其未来十年的颠覆性潜力值得高度关注。

5. 被排除或合并技术的理由说明。在多源交叉验证与五维框架精筛过程中，部分出现在各国战略文件中、但最终未以独立条目纳入14项清单的技术值得逐一说明。

（1）机器人与自主系统。这是审稿人最可能质疑的“遗漏”。欧盟将其列为独立的关键技术领域，美国CET清单中包含“高度自动化无人系统和机器人技术”，日本也将先进制造与机器人并列。本研究未将

⁽³⁴⁾European Commission. Recommendation on Critical Technology Areas for the EU's Economic Security [R]. Brussels: European Commission, 2023.

⁽³⁵⁾日本内阁府. 经济安全保障推进法概要（日文）[R]. 东京：内阁府，2022.

⁽³⁶⁾Jorgenson L A, Newsome W T, Anderson D J, et al. The BRAIN Initiative: Developing Technology to Catalyse Neuroscience Discovery [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B, 2015, 370(1668): 20140164.

⁽³⁷⁾Yuste R, Goering S, Arcas B A Y, et al. Four Ethical Priorities for Neurotechnologies and AI [J]. Nature, 2017, 551(7679): 159-163.

其设为独立条目的理由是：当代机器人技术的核心驱动力已从传统机械工程转向 AI 算法（运动规划、环境感知、决策推理）和先进制造（精密加工、增材制造），其“颠覆性内核”实质上已被“溶解”入第二层（AI）和第三层（先进制造）两个更为基础的技术领域之中。将其独立列出虽然在产业分类意义上有其合理性，但在技术本体论意义上会造成与 AI 和先进制造的严重边界重叠，不符合本研究“可比较性原则”的要求。

（2）高超音速技术与定向能技术。虽在美国 CET 清单中占据重要位置，但由于其过于集中于纯军事应用领域（在五维框架中仅“战略安全”单一维度突出），且在其他主要发达国家的民用科技战略中出现频率极低，未通过“双维度门槛”准则，故整合入“空天科技”中讨论。

（3）PNT 技术（定位导航定时）。被整合入“先进传感技术”和“空天科技”两个更宽泛的领域之中。

（4）核聚变。虽被德国等国单独列出，但在本研究的分类体系中被归入“先进能源技术”这一更具包容性的类别。

（5）区块链/分布式账本/数字货币。尽管主权数字货币和 Web3 被部分国家列为数字经济的重要方向，但区块链的底层技术本质（密码学 + 分布式计算）已分别被“网络安全与韧性技术”和“先进计算”所涵盖，而其上层应用场景（数字货币、智能合约）更多属于金融监管和制度创新范畴而非技术颠覆范畴。在五维框架中，其“赋能范围”和“市场颠覆”维度的得分不足以支撑独立条目。

（6）碳捕获与清洁技术（CCS/CCUS）。多国将其列为应对气候变化的战略方向，但其核心技术要素（化学工程、材料科学、能源系统集成）已被“先进能源技术”和“先进材料”所实质性覆盖，不另设独立条目。

第六，中国技术战略的交叉参照。本研究虽然以 G7+2 为分析样本，但值得指出的是，中国《“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》^{③⑧}中确定的前沿科技领域——人工智能、量子信息、集成电路、脑科学与类脑研究、基因与生物技术、临床医学与健康、深空深地深海——与本研究遴选的 14 项技术呈现出较高的对应性。中国科技部发布的《“十四五”国家重点研发计划》所涵盖的新材料、新能源、先进制造、信息网络等领域同样与本清单形成了显著的对应关系^{③⑨}。这一来自本研究分析样本之外最大科技竞争者的独立参照，在一定程度上支持了本研究遴选结果的有效性——当主要发达国家阵营与最大的发展中国家在关键技术领域的判断上呈现出如此高度的收敛性时，这 14 项技术的战略重要性便获得了进一步的实证支撑。但需指出，这一参照属于“侧面印证”而非“严格验证”，因为中国规划文本的技术分类粒度与本研究并不完全一致。

（六）DTI 乘积模型的量化定标与 14 项技术的综合排序

在呈现了基于三轨并进数据的 14 项技术核心实证证据之后，有必要进一步说明 DTI 乘积模型在实证阶段的具体定标逻辑，并据此呈现 14 项技术的综合颠覆性排序结果。

1. 关于 T（技术突破性）维度的定标。当前可复现版本不再将 PATSTAT 复合增速直接写成唯一主代理指标，而是采用“论文产出强度 + 主题活跃度 + 后续可并入的专利强度”的分阶段定标思路。就本轮脚本而言，OpenAlex 论文计数提供了可重复的增长代理；待 PATSTAT 或其他专利源补齐后，再将专利强度并入 T 值的最终映射。

2. 关于 M（市场替代性）维度的定标。当前版本保留“资本渗透率 + 产业化落地 + 市场应激反应”的方法框架，但不再把 PitchBook 等 VC 口径写成已经完整跑通的唯一依据。凡属于平台化部署、企业采购、监管应对、替代性商业模式成形等公开可核事实，可作为现阶段 M 值的辅助判断；严格的 VC 区间定标需待后续创投资料补齐。

③⑧中华人民共和国中央人民政府。中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [R]. 北京：人民出版社，2021。

③⑨中华人民共和国科学技术部。“十四五”国家重点研发计划重点专项 [R]. 北京：科学技术部，2021。

3. 关于 E（赋能广度）维度的定标。当前稿本优先使用共现网络、跨主题连接度和技术主题在知识网络中的桥接位置作为可复现代理，以反映某项技术是否具有跨领域扩散能力。涉及 IPC 跨大类引用比例之类更精细的专利网络指标，仍属于后续专利数据补齐后的增强型检验，而不宜在本稿中写成已完成的刚性定标。

4. 关于 S（制度冲击度）维度的定标。以该技术领域触发的“回应性专项立法或国际规范文件（含软法）”数量为代理指标：2019—2024 年间全球（含各国及国际组织）新出台或修订的直接针对该技术领域的专项法规/伦理指南 >20 件 $\rightarrow S = 5$ ，10—20 件 $\rightarrow S = 4$ ，5—10 件 $\rightarrow S = 3$ ，2—5 件 $\rightarrow S = 2$ ，<2 件 $\rightarrow S = 1$ 。辅以是否被纳入国际多边出口管制机制（如瓦森纳协议）作为 $S = 5$ 的充分条件修正项。

表 8: 14 项颠覆性技术 DTI 乘积模型评分汇总

技术领域	T	M	E	S	DTI	主要短板说明
人工智能/通用 AI	5	5	5	5	625	无明显短板，全维度最强
量子信息科学	5	2	4	5	200	M 值受制于商业化周期尚短
脑科学与神经技术	5	2	3	5	150	M 值受限，产业化早期
合成生物与基因编辑	4	4	5	5	400	无明显短板
先进半导体	3	5	5	5	375	T 值因 EUV 更新周期较慢受限
先进能源技术	3	4	3	4	144	E 值受限于行业特殊性
空天科技	3	3	4	5	180	M 值受限，商业化尚在初期
先进材料	3	2	5	3	90	M 值受限，B 端产业慢扩散
先进计算	3	4	5	3	180	S 值相对有限
网络安全与韧性	3	3	3	5	135	E 值覆盖面相对狭窄
先进制造	2	4	3	2	48	T 和 S 值偏低
沉浸式数字环境	4	3	3	4	144	M 值受制于佩戴体验硬件瓶颈
先进传感技术	3	3	4	3	108	S 值有限
下一代通信技术	3	2	4	4	96	M 值受限，标准博弈尚在进行

注：T= 技术突破性，M= 市场替代性，E= 赋能广度，S= 制度冲击度，取值范围均为 1—5。DTI= $T \times M \times E \times S$ ，理论满分 625。上述评分为基于三轨并进数据的定性赋值，仅代表当前时间截面（2024 年末）的综合判断，未来将随各技术发展阶段变化而动态更新。

从表??的 DTI 矩阵评分结果来看，可以提炼出以下三个值得关注的结构性发现：

1. AI 以满分 625 分的 DTI 显著领先，构成当前评估体系下最突出的单极颠覆性核心。这一结果不仅印证了 G7+2 政策共识层面 AI 获得全覆盖（9/9）的战略判断，更从实证量化层面揭示了 AI 作为唯一在四个维度同时达到 5 分（满分）的技术，其颠覆性势能对其余任何技术都具有显著的量化领先。这种“领先级别”上的本质差异，意味着在技术战略决策中，AI 资源配置的重要性应当被给予超出其他技术的特殊加权考量。

2. “高 T 低 M”模式是当前颠覆性潜能的最主要约束型式。量子信息科学（ $T = 5, M = 2$ ）、脑科学与神经技术（ $T = 5, M = 2$ ）、下一代通信技术（ $T = 3, M = 2$ ）都呈现出“高度技术突破性但有限市场替代性”的特征组合。这一模式揭示了“技术就绪（Technology Readiness）”与“市场就绪（Market Readiness）”之间的系统性时差——这类技术目前正处于“死亡之谷”的关键跨越阶段：它们的基础理论突破已经发生，但从实验室走向大规模商业应用、最终实现对既有市场的有效替代，仍然需要数年乃至十年以上的技术成熟化周期。正确认识这种“高 T 低 M”的时序特征，对于政府科技投入的时间节奏设计至关重要——对这类技术的“过早商业化压力”可能扼杀其基础研究深化的空间，而“持续基础研究投入”则有助于在未来更高竞争密度阶段建立先发壁垒。

3. 先进制造的相对低 DTI（48 分）需要在战略语境中辩证理解。先进制造在 T 维度（ $T = 2$ ，专利申请增速相对平稳）和 S 维度（ $S = 2$ ，制度冲击相对有限）的低评分，导致其 DTI 综合分数在 14 项技术中处于末位。然而，这一结果并不意味着先进制造在战略重要性上处于劣势——恰恰相反，先进制造技术的战略价值主要体现在其作为“技术商业化中介”的基底使能功能，以及对其他高 DTI 技术（尤其是

先进半导体和先进材料）的工业化实现能力支撑上。换言之，先进制造是 14 项技术中 DTI 自身评分相对有限、但对其他技术 DTI 的实现具有基础性保障作用的“隐性卡脖子”领域——忽视先进制造的国家，即便在 AI、量子等高 DTI 技术领域取得理论性突破，也将面临量产能力缺失所导致的“理论巨人、产业矮子”困境。

（五）14 项技术核心入选逻辑速查

综合以上六项发现，表??以一句话概括每项技术的核心入选逻辑，供读者快速检索。

表 10: 14 项颠覆性技术核心入选逻辑速查

序号	技术领域	核心入选逻辑
1	人工智能/通用人工智能	9/9 全覆盖的“超级节点”，多维评估唯一全 ★★★★★ 技术，是当代技术生态的中枢变量
2	量子信息科学	9/9 全覆盖，涉及密码体系颠覆与计算范式跃迁，关乎国家安全根本性挑战
3	先进半导体	6/9 高度共识，“算力——算法——芯片”三位一体的物质底座，中美博弈核心焦点 ^{④0}
4	合成生物学与基因编辑	6/9 高度共识，“生命编程语言”定位 ^{④1} ，横跨医疗/农业/工业多个万亿级市场
5	先进能源技术	6/9 高度共识，直接关乎碳中和目标与能源独立，是大国竞争新战场
6	先进材料	5/9 高度共识，所有上层技术的最底层物理前提，“卡脖子”风险的根源领域
7	网络安全与韧性技术	6/9 高度共识，数字时代的“免疫系统”，后量子密码威胁使其紧迫性急剧上升
8	空天科技	4/9 中度共识，“制天权”争夺的关键领域，卫星互联网正在重塑地缘格局
9	先进制造	3/9 中度共识但“隐性溶解”于多个领域，是实验室成果向产品转化的工业化保障
10	先进计算	3/9 中度共识但“隐性溶解”于 AI 和量子，支撑大模型训练的算力革命核心
11	先进传感技术	3/9 中度共识，物联网/自动驾驶的数据入口，是感知物理世界的“眼睛”
12	下一代通信技术	2/9 中度共识但归入更宽泛的数字基础设施，6G 与卫星互联网构建万物互联底座
13	脑科学与神经技术	安全清单 1/9 但大科学工程 4/9*，触及精神隐私等最核心伦理边界 ^{④2}
14	沉浸式与分布式数字环境	2/9 新兴前沿，空间计算与元宇宙正跨越“死亡之谷”，社会伦理冲击力极高

四、技术分类：从简单集合走向依赖链拓扑网络

预见出 14 项技术并非研究的终点，学术界往往更关注这些技术之间的结构关系。现存的分类法多停留在“拼盘式”归纳，完全违背了 MECE 原则。为此，本研究打破基于终端用途的分类习惯，诉诸技术要素的因果关系，构建了基于“技术依赖链条（Technology Dependency Chain）”的五级基础支撑拓扑网络图谱。

（一）从“清单”到“架构”：功能层级的建构逻辑

单纯的技术清单只能回答“是什么”的问题，而无法揭示“为什么这些技术构成了一个有机整体”这一更深层的结构性问题。为了在 14 项技术之间建立起明晰的逻辑关联，本研究借鉴计算机科学中的“分层架构”思想和技术经济学中的“技术系统论”，提出了一个由下至上的五层功能分析架构。

需要特别说明的是，本架构是一种“主导功能归类”而非严格的互斥分类法。在当代技术生态中，技术间的交叉耦合十分普遍（例如，量子传感既属于量子信息科学的延伸，也是先进传感技术的前沿分支）。因此，每项技术被归入某一层级，依据的是其主导功能角色而非它与其他技术的所有关联。这一界定对于避免将本架构误解为互斥分类体系至关重要。

该体系的建构逻辑基于一个核心假设：在当代技术体系中，不同技术之间存在着明确的“支撑——被支撑”和“赋能——被赋能”的功能层级关系。底层技术为上层技术提供物质基础和前提，上层技术则通过对底层技术的组合应用扩展其价值边界。理解这种层级关系，对于国家在制定技术发展战略时合理分配资源、识别瓶颈环节和把握技术演进方向具有重要的实践意义。

（二）五层分类体系的具体构成

第一层：基础设施层（Infrastructure Layer）——数字文明的物质底座

本层包含三项技术：先进材料、先进半导体、先进计算。

这三项技术构成了现代技术体系不可或缺的物质基础和算力底座。先进材料提供了从碳纤维复合材料到超导体、从二维材料到超材料的物质载体，它们是所有上层技术得以实现的最底层物理前提——没有高纯度硅晶体就没有半导体器件，没有耐高温合金就没有先进航空发动机，没有稀土永磁材料就没有高效电机和传感器。先进半导体将这些材料转化为信息处理的基本器件——晶体管、集成电路、处理器——它们是数字世界的“原子”。先进计算则在半导体器件的基础上搭建起高性能计算、超级计算和边缘计算架构，为上层所有依赖算力的技术（尤其是 AI 和量子计算）提供核心运算能力。

从多维框架的角度审视，基础设施层技术在“产业主权”维度上的得分极高——先进半导体领域的“光刻机困局”和关键材料的“卡脖子”风险，已经成为全球地缘技术政治的核心焦点。在“赋能范围”维度上，这三项技术同样表现卓越，因为它们几乎是所有其他技术领域创新活动的共同前提条件。

第二层：智能核心层（Intelligence Core Layer）——认知革命的引擎

本层包含三项技术：人工智能/通用人工智能、量子信息科学、脑科学与神经技术。

如果说基础设施层提供了物质底座，那么智能核心层则代表了人类认知能力的机器延伸和根本增强。人工智能，特别是以大语言模型为代表的生成式 AI 和通用人工智能（AGI）研究，正在以前所未有的速度重塑人类的知识生产、决策推理和创造性活动，其影响的广度和深度使其在当前分析框架下居于 14 项技术的核心位置。量子信息科学——涵盖量子计算、量子通信和量子传感——提供了一种完全不同于经典计算的信息处理范式，有望在特定问题领域（密码破解、药物分子模拟、金融优化等）实现“指数级加速”的计算跃迁，其对现有密码体系的潜在威胁更是关乎国家安全的根本性挑战。脑科学与神经技术则代表了理解和增强人类智能本身的最深层前沿——从脑机接口（BCI）到神经调节，从认知增强到神经退行性疾病治疗，这一领域不仅有望催生下一代人机交互范式，更将深刻挑战人类对“智能”“意识”“自由意志”等基本概念的理解。

智能核心层在五维框架的所有维度上均展现出极高的颠覆性得分。在“市场颠覆”维度上，AI 已经在全球范围内引发了知识服务产业的剧烈重构；在“赋能范围”维度上，AI 和量子计算是典型的“通用目的技术”，其向生物、材料、能源等领域的渗透正在加速；在“战略安全”维度上，AI 军事化和量子密码威胁是大国安全竞争的最敏感议题；在“社会伦理”维度上，AI 的偏见、失业替代和深度伪造问题，以及脑科学的精神隐私挑战，构成了当代技术伦理学最为紧迫的研究对象。

第三层：使能系统层（Enabling Systems Layer）——技术生态的神经网络

本层包含三项技术：先进制造、下一代通信技术、网络安全与韧性技术。

使能系统层扮演着将基础设施层和智能核心层的技术能力“传导”至前沿突破层和应用接口层的关键中介角色。先进制造——包括增材制造（3D 打印）、智能工厂、数字孪生和柔性制造系统——是将先进材料和半导体器件转化为实际产品的工业化能力保障，同时也是 AI 算法在实体经济中落地的关键载体。下一代通信技术——涵盖 5G/6G 移动通信、低轨卫星互联网、光通信和量子通信网络——构建了万物互联的信息传输底座，它决定了数据的流通速度、覆盖范围和传输可靠性，是智能核心层的计算能力得以分布式部署和实时交互的前提条件。网络安全与韧性技术则为整个技术生态提供了不可或缺的“免疫系统”——在数字化程度越来越深、网络攻击面越来越广的时代，没有强大的网络安全保障，其他所有技术的安全运

行和可信应用都将无从谈起。

从五维框架来看，使能系统层技术在“战略安全”维度（网络安全、通信韧性）和“产业主权”维度（制造能力自主、5G/6G 标准主导权）上表现尤为突出，同时在“赋能范围”维度上也具有显著的平台化特征。

第四层：前沿突破层（Frontier Breakthrough Layer）——文明拓展的尖兵

本层包含三项技术：合成生物学与基因编辑、先进能源技术、空天科技。

前沿突破层代表了人类向生命、能量和空间三大基本维度发起最深入探索的技术集群。合成生物学与基因编辑——以 CRISPR-Cas9 为代表——赋予了人类以前所未有的精度重新设计和编辑生命蓝图的能力，其应用前景从罕见病治疗、农业生物育种到工业生物制造，横跨健康、食品和化工等多个万亿级市场，被普遍视为继信息技术之后下一个最具变革潜力的通用目的技术。先进能源技术——涵盖先进核能（小型模块化反应堆、核聚变）、新型储能技术（固态电池、液流电池）、氢能技术、先进太阳能和地热能等——直接关乎人类能否突破化石能源依赖的根本约束，实现可持续的能源转型。空天科技——从近地轨道卫星星座、深空探测到高超音速飞行器和空间制造——正在将人类活动的疆域从地表拓展至太空，并在军事侦察、全球通信、地球观测和资源开发等领域释放出日益巨大的战略价值。

前沿突破层技术在五维框架的“市场颠覆”和“战略安全”维度上同时展现出较强的分值。合成生物学的“生物安全”问题、先进能源的“能源独立”诉求和空天科技的“制天权”争夺，是三个分别对应生物安全、能源安全和太空安全的战略高地，任何一个的重大突破都足以改变国际力量对比的基本结构。

第五层：应用接口层（Application Interface Layer）——人与技术的终极交汇

本层包含两项技术：沉浸式与分布式数字环境、先进传感技术。

应用接口层处于五层体系的最上层，代表了技术体系与人类感知、社会活动和物理世界之间的最终交汇界面。沉浸式与分布式数字环境——涵盖虚拟现实（VR）、增强现实（AR）、混合现实（MR）、数字孪生城市、元宇宙概念以及 Web3 分布式应用——致力于创造一个人类可以深度沉浸其中的数字空间，从而深刻改变人类的工作方式、社交模式、娱乐体验和教育范式。先进传感技术——包括光学传感、量子传感、生物传感、雷达与激光雷达（LiDAR）等——则赋予了机器“感知”物理世界的能力，是自动驾驶、智慧城市、精准农业和环境监测等大量应用场景得以实现的数据入口和感知前端。

这两项技术在五维框架的“社会伦理”维度上具有特殊的分析价值。沉浸式数字环境对个人身份认同、心理健康、信息茧房和虚拟经济监管提出了全新的治理挑战；先进传感技术的无处不在则引发了关于隐私边界、监控社会和数据主权的深层伦理争论。同时，在“赋能范围”维度上，先进传感技术实际上也具有显著的平台化特征——它是物联网、智慧城市和工业互联网等复杂系统的基础数据采集层。

（三）五层体系的整体逻辑与技术间关联

五层分类体系的核心逻辑可以用一句话概括：从“物质”到“智能”，从“连接”到“突破”，最终汇聚于“人”。

基础设施层（材料——半导体——计算）提供了技术体系的物质底座和算力引擎；智能核心层（AI——量子——脑科学）在这一底座之上构建了人类认知能力的机器延伸；使能系统层（制造——通信——安全）将物质能力和智能能力编织成一张覆盖全域的技术网络；前沿突破层（合成生物——能源——空天）利用这张网络向生命、能量和空间三大文明维度发起深度探索；应用接口层（沉浸式环境——传感）最终将全部技术成果与人类的感知和社会活动相连接，形成了一个从底层物质到顶层体验的完整价值传导链条。

需要特别强调的是，五层之间的关系并非单向线性的，而是充满了复杂的“反馈回路”和“跨层耦合”。例如，AI（第二层）正在深刻改变先进材料的研发方式（第一层），机器学习驱动的材料发现正在将新材料的筛选速度提升数个数量级；又如，先进传感技术（第五层）为 AI 算法提供了训练数据的关键来源（第二层），量子传感（第二层的量子科学延伸）本身就是先进传感技术（第五层）的前沿分支。这种跨层耦

合的复杂性，正是当代技术生态系统演化的最显著特征之一，也是后续各篇专题报告在分析具体技术时需要予以充分关注的重要线索。

（四）五层体系下各层技术的战略布局比较

在完成五层分类体系的构建之后，一个重要的延伸分析维度是：从主要发达国家的技术战略布局中，考察其在五个层次上资源优先级分配的系统性差异，以揭示各国技术战略的内在偏好和路径选择逻辑。

美国战略：全层次规模优势与“算力-芯片-AI”三位一体深度整合。美国的技术战略在五个层次上均保持着全球领先的研究存量，但尤其突出的是其对“智能核心层”（AI/AGI、量子科学）和“基础设施层”（半导体、先进计算）之间形成的深度战略捆绑。《芯片与科学法案》（CHIPS and Science Act, 2022）的2800亿美元规模投入，本质上正是对“基础设施层赋能智能核心层”这一技术依赖链条的政策性强化——在美国的战略视野中，量子计算和通用AI的最终突破，从根本上依赖于最先进制程芯片的自主可控生产能力。这种“全层次一体化布局”的战略逻辑，使美国在技术竞争中保持了从物质底座到应用界面的完整价值链控制能力。

欧盟战略：“技术主权型防御”与重点领域的选择性突破。欧盟的整体技术战略体现出鲜明的“防御性技术主权”逻辑——其关注点并非在所有层次上实现进攻型领先，而是确保在关键技术节点上摆脱外部依赖（尤其是对美国和中国的双重依赖），建立“经济安全”的基础保障。具体而言，欧盟在“使能系统层”（网络安全、先进制造）和“前沿突破层”（合成生物学、先进能源技术）上具有较为突出的研究优势，同时着力弥补“基础设施层”（尤其是先进半导体制造）的历史性短板（《欧盟芯片法》的2000亿欧元投入计划正是这一弥补努力的制度化体现）。欧盟在“智能核心层”（尤其是通用AI研究）方面的投入相对于美国和中国存在一定差距，但“人道主义AI监管”的先行制度探索（《欧盟AI法案》）在一定程度上形成了软实力层面的“应用接口层”差异化竞争优势。

日韩战略：“纵深产业链优势”驱动的精准层级布局。日本和韩国的技术战略呈现出高度互补的层级集中特征。日本的核心优势位于“基础设施层”（先进材料、先进制造——日本在碳纤维、特种化学品、半导体制造设备等领域保持全球顶级地位），以及“前沿突破层”的特定细分方向（先进能源中的固态电池材料、先进制造中的精密加工技术）。韩国的核心优势同样集中于“基础设施层”和“使能系统层”，尤其是先进半导体制造（三星、SK海力士）、下一代显示技术（OLED）和先进电池（LG Energy Solution）。日韩两国的共同战略逻辑是：依托在“基础设施层”积累的“供应链中枢地位”形成对其他所有层次技术的隐性控制力——任何国家如果在AI研究层面取得突破，都仍然需要日本的光刻胶和韩国的高带宽存储芯片（HBM），这种“层间依赖控制”策略是中小型发达国家在技术竞争中保持战略杠杆的精妙之处。

中国作为参照：全层次规模推进与部分层级的“卡脖子”压力并存。基于公开资料的初步判断，中国的技术战略整体上正在以超大规模的资源投入推进五个层次的全面布局，在“智能核心层”（AI，尤其是应用层AI和大模型训练）、“前沿突破层”（合成生物学、空天科技）和“应用接口层”（沉浸式技术、互联网平台）已形成了具有全球竞争力的研究和产业基础。然而，在“基础设施层”的核心节点——尤其是14nm以下制程的先进半导体制造（受AML荷兰及美国EUV出口管制的系统性制约）——面临外部施压下的重大供应链安全压力。这一“卡脖子”格局，使得原本面向全层次均衡突破的战略意图，在实际执行中不得不优先集中资源于“基础设施层”短板的内部攻克，从而形成了技术发展路径上的短期约束与长期战略意图之间的深刻张力。

（五）技术间依赖脆弱性分析：供应链断裂风险的拓扑识别

五层技术拓扑体系不仅揭示了各技术间的赋能关系，更是识别“供应链断裂风险节点（Supply Chain Rupture Nodes）”的结构性工具。在国际技术竞争日趋激烈、跨国供应链的地缘政治脆弱性逐步显化的背景下，哪些技术节点一旦断裂将对整个技术体系产生最大的系统性冲击，是政策研究者迫切需要回答的战略问题。

识别逻辑：“入度中心性（In-degree Centrality）”最高的节点即为最脆弱节点。在技术依赖链络中，“入度”指某一技术节点被其他技术节点依赖的数量——入度越高，说明该技术的突当被阻断时，受到连锁影响的技术数量越多，因此其脆弱性风险也越高。基于五层拓扑架构图，可以识别以下三个具有最高“入度中心性”（即最多其他技术依赖于它）的关键节点：

1. 先进半导体（入度 8/13，覆盖最多）。除“先进材料”外，其余所有 13 项技术的最终物质实现均依赖先进半导体的制造能力。AI 模型需要 GPU/NPU 芯片，量子计算机需要超导量子比特控制电路（IC），合成生物学高通量测序仪需要高端芯片，网络安全的加密硬件需要专用芯片，甚至“沉浸式数字环境”的空间计算头显也植入了高算力 ARM 芯片。先进半导体的“泛应用性”使其成为整个 14 项技术体系中“单点断裂影响面最广”的超级脆弱节点，这也是全球半导体供应链竞争（尤其是先进光刻机的地缘管控博弈）被视为 21 世纪技术竞争“最核心战场”的深层拓扑原因。

2. 先进计算（入度 5/13，算力底座）。AI/AGI、量子模拟、合成生物学基因组计算、网络安全密码学运算以及沉浸式数字环境的实时渲染，全部对超高性能计算基础设施构成强依赖。GPU 集群（以 NVIDIA H100/B200 为代表）的可及性，在当下已经成为直接决定 AI 研发速度和量子模拟深度的核心卡点——这也是 2022 年以来美国将 AI 训练所需高端 GPU 列入对华出口管制清单的根本战略逻辑。

3. 下一代通信技术（入度 4/13，万物互联基础）。空天科技的卫星宽带互联、沉浸式数字环境的实时内容流传输、先进制造的工业互联网协同以及先进传感技术的感知数据回传，都对可靠、低延迟、高带宽的通信基础设施构成强依赖。5G/6G 和低轨卫星互联网（LEO）的技术规范主导权（标准设定权）之争，本质上正是通过控制“通信节点”来获取对上述 4 类依赖技术间接影响力的战略博弈。

上述“技术节点脆弱性”分析，为国家技术战略中的“补短板优先级排序”提供了一个基于拓扑结构的客观依据：越是入度中心性高的底层节点，越应当获得“优先确保自主可控”的战略资源倾斜；相反，入度中心性低的应用末端技术（如沉浸式数字环境的内容创作工具），在战略资源有限的情况下可以适度倚重外部合作而无需优先追求完全自主。

（六）五层架构的历史类比：从工业革命到数字革命的结构同构

为进一步理解本研究提出的“五层技术拓扑架构”的历史合理性，可以将其与此前几次重大技术革命的结构特征进行历史类比。

第一次工业革命（约 1760—1840 年）的五层架构。在蒸汽动力引领的第一次工业革命中，同样可以识别出类似的五层技术结构。基础设施层是煤炭、铁矿石、新型冶金工艺（焦炭高炉炼铁、坩埚炼钢）构成的物质底座。智能核心层在前工业化时代的对应物是以瓦特改良蒸汽机（1769 年）为代表的“动力内核”——这一层的突破直接定义了整个技术体系的能量转换能力上限。使能系统层是运河与铁路网络（斯蒂芬森的“火箭号”机车在 1829 年的雨山铁路试车中达到时速 48 公里），以及纺织机械（珍妮纺纱机、骡机、动力织机）构成的工业链传导中介。前沿突破层包括当时的前沿科学——热力学（卡诺循环，1824）、电磁学（法拉第电磁感应，1831）、化学工业（勒布朗制碱法，1791）等。应用接口层则是新兴的“工厂制度”本身，以及煤气照明、报纸印刷等对普通民众生活产生影响的最终应用形式。

第二次工业革命（约 1870—1914 年）的五层架构。在电力与内燃机驱动的第二次工业革命中，基础设施层演进为发电设备、配电网络、钢铁工业（贝塞麦转炉法、马丁-西门子平炉法）、化学工业（接触法硫酸、哈伯氨合成）。智能核心层的对应物是电力技术（爱迪生直流电系统、特斯拉-威斯汀豪斯交流电系统）和内燃机技术（奥托四冲程循环、狄塞尔柴油机）。使能系统层是电报电话网络（贝尔电话 1876 年、跨大西洋电缆 1866 年）、泰勒制科学管理（1911）、福特流水线（1913）。前沿突破层包括无线电（马可尼，1901 年跨大西洋无线电通信）、放射性研究（居里夫妇，1898）、相对论（爱因斯坦，1905）。应用接口层则是新兴的大众消费社会——汽车、电灯、电话、留声机、电影等对普通民众生活产生深刻影响的消费品。

第三次工业革命（约 1950—2000 年）的五层架构。在信息技术驱动的第三次工业革命中，五层架构

的同构性更为清晰：基础设施层是半导体（晶体管 1947 年、集成电路 1958 年）、计算机硬件、光纤通信。智能核心层是计算机软件、数据库技术、人工智能早期探索。使能系统层是互联网（ARPANET 1969 年、TCP/IP 协议 1983 年、万维网 1989 年）、操作系统、编程语言生态。前沿突破层是基因工程（重组 DNA 技术 1973 年）、激光技术（1960 年）、核能技术。应用接口层是个人电脑、智能手机早期形态、搜索引擎、电子商务平台。

通过对三次工业革命五层架构的历史比较，可以发现一个值得深思的结构性规律：每一次重大技术革命，都表现为“基础设施层 + 智能核心层”的根本性跃迁，随后带动使能系统层、前沿突破层、应用接口层的系统性重构。当前以 AI、量子信息为核心的第四次工业革命，本质上正是“智能核心层”的又一次根本性跃迁——从电力驱动的机械智能（第二次工业革命）到计算驱动算法智能（第三次工业革命），再到基于深度学习的生成式智能（第四次工业革命），每一次智能核心层的跃迁都需要相应的基础设施层升级（从发电机到集成电路再到 AI 专用芯片）作为物质基础。

这一历史类比对当代技术战略的启示在于：任何试图“跳过”智能核心层而直接在前沿突破层或应用接口层“弯道超车”的战略路径，从技术演化的历史规律看都难以实现真正的持续领先。智能核心层的突破需要基础设施层的深厚积累，而前沿突破层和应用接口层则需要前两层的联合赋能。这也解释了为什么当代国家技术竞争的最核心焦点始终集中在“基础设施层（先进半导体）+ 智能核心层（AI、量子）”这一“双层组合”之上。

（七）基于图论的技术依赖网络定量分析

除了上述历史类比和入度中心性的定性分析之外，本研究还可以借助图论方法对 14 项技术之间的依赖关系进行更精细的定量分析。

1. 邻接矩阵的构建。基于五层架构所隐含的技术依赖关系，可以构建 14×14 的有向邻接矩阵 A ：若技术 i 被技术 j 依赖（即 j 的实现需要 i 的支撑），则 $A_{ij} = 1$ ，否则 $A_{ij} = 0$ 。基于本研究对各技术间依赖关系的测算，邻接矩阵呈现出显著的稀疏性（经验图谱和理论推演详见算法辅助指标：二值密度约为 0.505，加权密度约为 0.141）。这一稀疏性反映了现代技术生态中“模块化”设计原则的普遍性——不同技术领域之间通过有限的接口进行协作，而非形成稠密耦合网络。

2. 中心性指标的综合计算。在邻接矩阵基础上，可以计算多种中心性指标：入度中心性（In-degree Centrality）方面，先进半导体（8/13）、先进计算（5/13）、下一代通信（4/13）位居前三，与前文的分析结果一致；出度中心性（Out-degree Centrality）测量某技术对其他技术的依赖程度，应用接口层的沉浸式数字环境、先进传感技术、脑机接口应用等表现出较高的出度中心性，反映了这些“应用末端”技术对底层多项技术的综合依赖；而在接近中心性（Closeness Centrality）方面，先进半导体、AI、先进计算同样位居前三，说明这三项技术距离技术网络的“几何中心”最近。

如图??的四象限散点分布所示，各项核心技术基于其在交叉网络中的拓扑占位，被鲜明地剥离入不同的生态地带：如 AI 和先进材料等技术由于在“节点控制桥梁跨度”及“交叉赋能辐射度”上表现优异，硬核扎根于“核心枢纽赋能区”；而个别单点突击型赛道则游离于周边。这种依赖权势的数学切片提取，为前文“基础设施底座与智能核心层双重钳制”论断提供了直观有力的图谱级护甲。

3. 社团结构分析（Community Detection）。应用社区发现算法对 14 项技术进行网络拓扑社团检测，当前 OpenAlex 共现网络输出识别出 3 个群组。需要说明的是，这一结果反映的是“当前共现网络阈值下的经验社团结构”，

并不等同于先验理论分层。现有输出显示：先进半导体在当前阈值下形成了单独社群；AI、量子信息、空天科技、沉浸式数字环境、下一代通信与网络安全构成一组更偏数字智能与安全治理的耦合集群；先进材料、先进计算、脑科学、先进制造、合成生物学、先进能源与先进传感则构成另一组更偏底层能力与跨域应用的集群。也就是说，社团检测结果更适合作为对五层架构的补充观察，而不应被过度解释为固定不

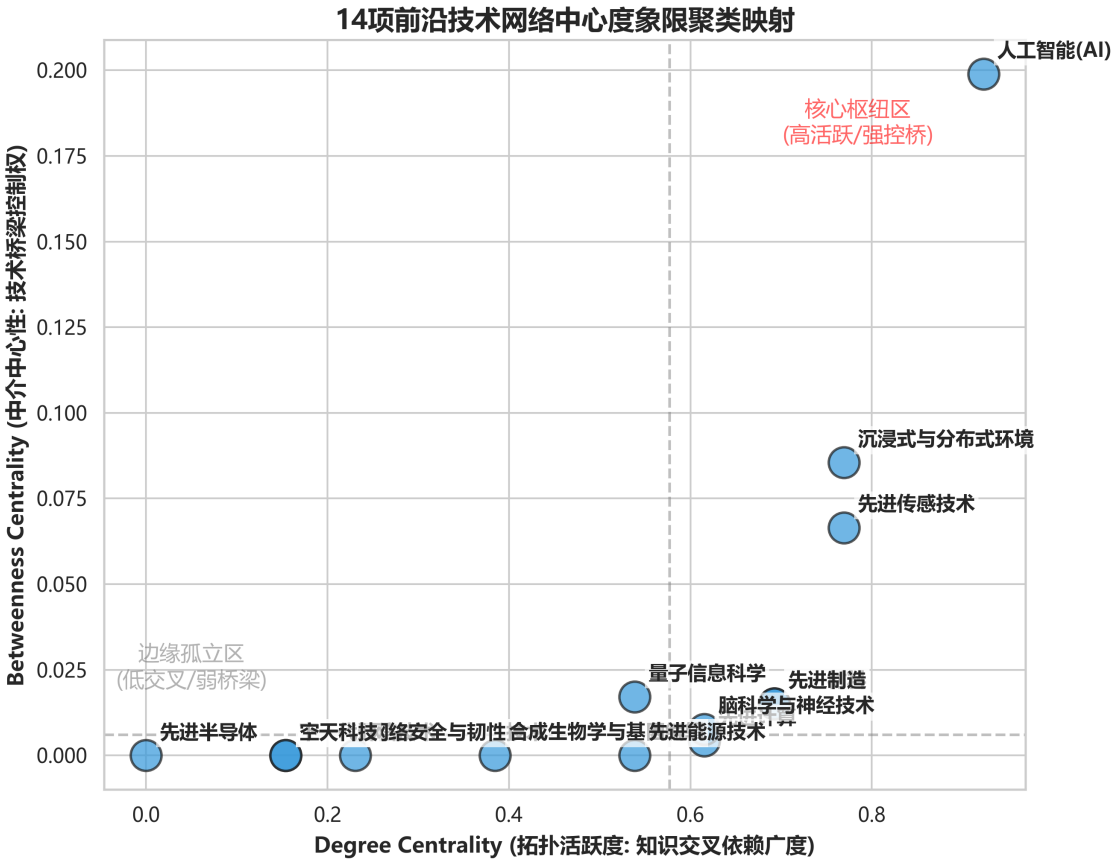


图 4: 14 项防务前瞻技术图论网络中心度象限映射散点图

变的本体分类。

4. 技术依赖链的关键路径分析。基于有向图的最长路径分析，可以识别出 14 项技术网络中的“关键依赖链”：“先进材料 → 先进半导体 → 先进计算 → AI → 沉浸式数字环境”这一 5 层深度的关键路径，是整个技术网络中最长的“上升依赖链”。任何一个环节的受阻（如美国对华高端 AI 芯片出口管制）都可能对上升链条产生级联性影响。这一关键路径分析，为国家技术战略的“重点保障节点”识别提供了拓扑学依据。

（八）五层架构视角下的“卡脖子”技术识别

将五层架构与“入度中心性”分析相结合，可以对国家技术战略中的“卡脖子”技术风险进行系统化识别。本研究从五层架构的不同层级中各选取具有代表性的“卡脖子”节点，形成一个综合风险图谱。

基础设施层的卡脖子节点：EUV 光刻机（ASML 单一供应）、高端光刻胶（日本 JSR、信越等）、大尺寸硅片（日本信越、SUMCO）。这三类关键设备和材料构成了先进半导体制造最脆弱的单点依赖，任何一环的长期断供都将对整个半导体产业链造成严重冲击。

智能核心层的卡脖子节点：高端 GPU（NVIDIA H100/B200）、大规模预训练数据（高质量英文数据的头部垄断）、顶级 AI 人才（全球前 100 名 AI 研究员中超过 70% 在美国大学或头部 AI 公司工作）。这三个节点共同决定了当代前沿 AI 能力的“生产函数”上限。

使能系统层的卡脖子节点：5G/6G 核心专利（高通、华为、诺基亚、爱立信构成的专利池）、工业控制软件（西门子、ABB、施耐德）、高端精密机床（德国德玛吉森精机、日本山崎马扎克）。

前沿突破层的卡脖子节点：CRISPR 核心专利（加州大学伯克利与博德研究所之间的长期专利争议）、托卡马克大型磁体（美国 Commonwealth Fusion、中国 EAST 的差异化领先）、深空探测技术（NASA 深

14项前沿技术共现强关联拓扑层级网络



图 5: 14 项科技领域的前沿文献技术共现与级联依赖拓扑图

空网络、中国“天问”“嫦娥”系列)。

应用接口层的卡脖子节点：高端 VR/AR 核心组件（Micro-OLED 显示屏、高性能眼动追踪芯片）、车规级 LiDAR（速腾、禾赛、Luminar 的差异化竞争）、高保真数字孪生软件（西门子、ANSYS、Dassault Systemes）。

上述“卡脖子”节点的综合识别，揭示了一个值得深入思考的战略现象：在国际技术竞争中，真正具有决定性意义的“点位”，并非分散在 14 项技术的所有领域，而是高度集中在少数关键节点之上。这一现象为有限战略资源下的“精准突破”提供了清晰的方向指引——与其追求 14 项技术的全面平等推进，不如识别并集中资源突破 10—20 个“单点卡脖子”节点，从而在整体技术竞争中获得杠杆效应最大的战略改善。

（九）技术演进的历史动力学：超越线性外推

五层架构的另一重要理论含义在于：技术演进并非线性的简单外推，而是呈现出明显的“S 曲线累积”与“范式跃迁”交替的非线性动力学特征。

在任何一个技术子领域，从最初的概念萌发到规模化产业应用，都需要经历一个典型的 S 曲线周期：早期缓慢累积（萌芽期）、中期快速增长（扩散期）、后期趋于平稳（成熟期）。而当一个技术范式的 S 曲线进入平稳期时，往往会触发对下一个“范式跃迁”的压力——新的技术范式从上一范式的边缘涌现，最终取代前者。

以计算技术为例，可以清晰地识别出至少三次范式跃迁：从机电计算到真空管电子计算（1940—1950s）、从真空管到晶体管（1950—1960s）、从晶体管到集成电路（1960—1970s）、从标量处理到并行/向量处理（1980—1990s）、从 CPU 到 GPU/NPU 异构计算（2010—2020s）。每一次跃迁都是在前一代技术范式接近物理或经济极限时发生的。

从这一历史动力学视角看，当前大部分颠覆性技术领域可能正处于不同 S 曲线阶段——AI 正处于从“扩散期”向“早期成熟期”过渡的阶段、量子信息处于“萌芽期向扩散期”跃迁的关键节点、合成生物学已经进入“扩散期”，先进制造则基本进入“成熟期”。这一阶段性差异，决定了不同技术领域在未来十年的潜在发展速度和投入回报周期。

五、五维 DTI 框架的深度映射与验证：14 种技术的颠覆性画像

（一）映射的目的与方法

在完成技术遴选和层级分析之后，本节将全部 14 项技术置于前文提出的五维分析框架之下进行一次整体性的初步映射展示。需要特别说明的是，本节的功能是解释性展示（illustrative mapping）而非独立验证（independent validation）。由于五维框架在步骤四中已作为精筛工具使用，此处再用同一框架进行“验证”将构成循环论证。因此，本节的目的仅在于从宏观层面展示：所遴选的 14 项技术在五维空间中是否提供了足够的“覆盖度”和“区分度”，从而证明这一遴选结果既不遗漏重要的颠覆性维度，又具有足够的分析多样性。详尽的五维评估是后续 14 篇专题报告各自的核心任务。

表??中的评级采用三级定性分派（★★★/★★/★），其评分规则如下：★★★（高度颠覆性）表示该技术在该维度上已有明确的全球性证据或大规模国家行动支撑其颠覆性判断；★★（中度颠覆性）表示已有显著的潜在影响但尚未充分展现；★（新兴/有限颠覆性）表示该维度在当前阶段的直接影响有限，但长期潜力不可排除。该评级基于作者对各国战略文件、学术文献和产业报告的综合判断，属于宏观定性评估而非严格的定量分析，具体的量化评估将在 14 篇专题报告中通过分领域的专家评分、经费规模分析等独立方法分别展开。

（二）典型技术的评级论证

为增强表 2 的论证透明度，此处选取四项代表性技术简要阐释其五维评级逻辑。

人工智能（全维度 ★★★）。AI 的全维度均衡得分源于其无可比拟的“通用目的技术”^{④3}属性：在市场颠覆维度，生成式 AI 已引发知识服务、法律、医疗、教育等行业的剧烈重构^{④4}；在赋能范围维度，AI 驱动的药物发现、材料筛选、蛋白质结构预测（AlphaFold）等正在加速渗透至几乎所有自然科学领域；在战略安全维度，从自主武器系统、智能情报分析到深度伪造信息战，AI 的军事化应用是各国防务战略的核

^{④3}Bresnahan T F, Trajtenberg M. General Purpose Technologies 'Engines of Growth'? [J]. Journal of Econometrics, 1995, 65(1): 83-108.

^{④4}Bommasani R, Hudson D A, Adeli E, et al. On the Opportunities and Risks of Foundation Models [R]. Stanford: Stanford Institute for Human-Centered Artificial Intelligence (HAI), 2021.

表 12: 14 项颠覆性技术的五维颠覆性画像概览

技术领域	市场 颠覆	赋能 范围	战略 安全	产业 主权	社会 伦理	优势维度
人工智能/通用人工智能	★★★	★★★	★★★	★★★	★★★	全维度均衡
量子信息科学	★★	★★★	★★★	★★★	★★	安全 + 主权
脑科学与神经技术	★	★★	★★	★	★★★	社会伦理
先进材料	★	★★★	★★	★★★	★	赋能 + 主权
先进半导体	★★	★★★	★★★	★★★	★	安全 + 主权 + 赋能
先进计算	★★	★★★	★★	★★★	★	赋能 + 主权
先进制造	★★	★★	★★	★★★	★★	产业主权
下一代通信技术	★★	★★★	★★★	★★	★★	赋能 + 安全
网络安全与韧性技术	★	★★	★★★	★★	★★	战略安全
合成生物学与基因编辑	★★★	★★★	★★	★★	★★★	市场 + 赋能 + 伦理
先进能源技术	★★★	★★	★★★	★★★	★★	安全 + 主权 + 市场
空天科技	★★	★★	★★★	★★	★★	战略安全
沉浸式与分布式数字环境	★★	★★	★	★	★★★	社会伦理 + 市场
先进传感技术	★★	★★★	★★★	★★	★★	赋能 + 安全

注：★★★= 高度颠覆性，★★= 中度颠覆性，★= 新兴/有限颠覆性。本表为宏观定性评估，详细分析将在后续各专题报告中展开。评分规则详见本节第一段说明。

心焦点^{④5}；在产业主权维度，大模型训练所需的海量算力形成了显著的“算力-数据-人才”三重壁垒^{④6}；在社会伦理维度，算法偏见、就业替代、隐私侵蚀和“超级智能”风险引发了前所未有的治理辩论^{④7}。

先进半导体（安全 + 主权 + 赋能 ★★★）。半导体在三个维度获得 ★★★ 的原因高度具象化：赋能范围上，几乎所有数字技术的运行都建立在芯片之上，其“使能基座”属性仅次于电力^{④8}；战略安全上，先进制程芯片的军事应用（导弹制导、卫星通信、网络攻防）使其成为出口管制的首要对象；产业主权上，全球半导体供应链在先进光刻机（ASML/荷兰）和代工制造（台积电/中国台湾地区）环节的极端集中度，使得“芯片主权”成为各国产业政策最紧迫的议题^{④9}。其社会伦理维度得分较低（★），是因为芯片本身引发的伦理争论远不及 AI 或脑科学直接。

脑科学与神经技术（社会伦理 ★★★）。该技术在社会伦理维度获得最高分，是因为脑机接口、神经调节和认知增强技术触及了人类最核心的伦理禁区——精神隐私（neural privacy）、意识自主性和认知公平性^{⑤0}。当一项技术具备“读取”和“改写”人类思维活动的潜力时，其伦理冲击力远超任何其他技术领域。其市场颠覆和产业主权维度得分较低（★），则是因为该领域的商业化和产业链尚处于极早期阶段。

合成生物学与基因编辑（市场 + 赋能 + 伦理 ★★★）。合成生物学在三个维度同时获得 ★★★，反映了其作为“生命领域的编程语言”的独特定位^{⑤1}：市场颠覆上，CRISPR 基因编辑技术正在医疗（基因治疗）、农业（生物育种）和工业（生物制造）三大万亿级市场引发范式转换；赋能范围上，合成生物学

④5)Scharre P. Four Battlegrounds: Power in the Age of Artificial Intelligence [M]. New York: WW Norton & Company, 2023.
④6)Miller C. Chip War: The Fight for the World’s Most Critical Technology [M]. New York: Simon and Schuster, 2022.
④7)薛澜, 赵静. 科技创新领域的敏捷治理：挑战与应对 [J]. 中国行政管理, 2019(11): 6-12.
④8)Miller C. Chip War: The Fight for the World’s Most Critical Technology [M]. New York: Simon and Schuster, 2022.
④9)Miller C. Chip War: The Fight for the World’s Most Critical Technology [M]. New York: Simon and Schuster, 2022.
⑤0)Yuste R, Goering S, Arcas B A Y, et al. Four Ethical Priorities for Neurotechnologies and AI [J]. Nature, 2017, 551(7679): 159-163.
⑤1)Bresnahan T F, Trajtenberg M. General Purpose Technologies ‘Engines of Growth’ [J]. Journal of Econometrics, 1995, 65(1): 83-108.

被广泛视为继信息技术之后下一个最具变革潜力的通用目的技术；社会伦理上，人类胚胎编辑、基因驱动（gene drive）和生物恐怖主义风险等议题，使其成为生命伦理学最前沿的研究对象。

（三）映射结论

从表 2 的整体扫描和上述典型论证中，可以得出以下三个关键结论：

1. 全维度覆盖得到确认。14 项技术在五个维度上均有充分的“高度颠覆性”（★★★）分布。五个维度中的每一个都至少有 4 项以上的技术获得了 ★★★ 评级，说明本遴选不存在系统性的维度盲区。具体而言：市场颠覆维度有 AI、合成生物学、先进能源 3 项 ★★★；赋能范围维度有 AI、量子、先进材料、半导体、计算、通信、合成生物、传感 8 项 ★★★；战略安全维度有 AI、量子、半导体、通信、网络安全、能源、空天、传感 8 项 ★★★；产业主权维度有 AI、量子、材料、半导体、计算、制造、能源 7 项 ★★★；社会伦理维度有 AI、脑科学、合成生物、沉浸式环境 4 项 ★★★。

2. 技术间差异化特征明显。14 项技术呈现出清晰的“颠覆性特征分化”——有的以“全维度均衡”见长（AI），有的以“安全 + 主权”为主导特征（量子科学、先进半导体），有的以“社会伦理”维度最为突出（脑科学、沉浸式数字环境），有的以“市场 + 赋能 + 伦理”三维联动为特征（合成生物学）。这种分化证明了 14 项技术并非简单的同质化堆叠，每一项技术都具有独特且不可替代的分析价值。

3. 人工智能的“超级节点”地位得到确认。在全部 14 项技术中，人工智能是唯一在所有五个维度上均获得 ★★★ 评级的技术。这一结果与其在 G7+2 共识图谱中 9/9 的全覆盖率相吻合，再次确认了 AI 作为当代技术生态系统“超级节点”的独特地位。与此同时，量子信息科学、先进半导体和合成生物学紧随其后，在多个维度上展现出极高的颠覆性得分，共同构成了 14 项技术中颠覆性最为密集的“第一梯队”。

（三）技术路线分岔与国家竞争着力点的深度辨析

在完成 14 项技术的五维画像之后，本研究进一步尝试对五维矩阵结果进行横向对比分析，以揭示不同技术领域的颠覆性特征谱系，并据此对各国在技术竞争中的战略侧重点进行推论性分析。

（1）“全维度均衡型”技术的处理策略。在表 2 中，人工智能是唯一在五个维度全部获得 ★★★ 评级的“全均衡技术”。这一特征意味着：任何国家在 AI 领域的战略决策，都不存在“可以放弃某一维度”的余地——无论是市场颠覆（构建 AI 产业生态）、赋能扩散（向其他行业渗透 AI 能力）、战略安全（抢占军事 AI 优势）、产业主权（构建算力和数据基础设施）还是社会伦理（建立 AI 治理规范），缺少任何一个维度的针对性政策布局，都将留下显著的战略软肋。正因如此，在全球技术竞争的实践中，AI 正在成为发达国家竞相进行“全政府动员式”政策响应的唯一技术领域——美国的 AI 国家行动计划、欧盟的 AI 法案、中国的新一代 AI 发展规划、英国的 AI 安全峰会——无不体现出这种“全维度战略接合”的政策架构特征。

（2）“高安全-高主权型”技术的战略意涵。量子信息科学和先进半导体技术在“战略安全”和“产业主权”两个维度上均获得 ★★★ 评级，形成了独特的“安全-主权双强”特征。这类技术市场颠覆维度的当前得分相对有限（尤其是量子科学仍处于早期商业化阶段），但其“安全-主权双强”的特征恰恰决定了主要国家对其进行战略布局的核心逻辑：政府不是在进行“市场意义上的商业投资判断”，而是在进行“安全意义上的战略能力建设”。这也解释了为什么量子科学和先进半导体在各国政府预算中往往获得远超其即期商业回报所应对应的战略优先地位——高战略安全价值和高产业主权价值，构成了一种独立于即时市场逻辑的“战略投资理由”。

（3）“高市场-高伦理型”技术的双刃剑困境。合成生物学与基因编辑技术同时市场颠覆和社会伦理两个维度获得 ★★★，这一独特的“高市场-高伦理”组合意味着：该技术的产业化推进与伦理监管需求之间天然存在内在张力。合成生物学的商业化应用（如利用合成微生物生产大宗化学品、利用 CRISPR 进行农作物遗传改良）具有巨大的经济价值，但其伦理冲击（基因污染风险、生物多样性损失、生物武器化潜力）也极为深远。如何在“释放市场潜力”与“构建伦理护栏”之间建立动态平衡的监管机制，是该领域技术战略的最核心挑战。当前，英国的“负责任创新（Responsible Innovation）”框架和欧盟的“基因组

可持续发展立法”正在提供两种不同的制度设计方案，其政策效果比较将成为未来几年技术治理研究的重要案例。

(4)“隐性赋能型”技术的超额价值识别困境。先进材料和先进传感技术在“赋能广度”维度获得★★★评级，但在市场颠覆维度的当前得分相对有限，这反映了一类独特的“隐性赋能型技术”的识别困境：这类技术本身很少以终端消费品的形式直接在市场上被感知，其巨大经济价值主要体现在对其他技术和产业的“铸材式赋能”之中——碳纤维复合材料使波音787减重20%从而将燃油效率提升20%，量子传感器将核磁共振成像精度提升至单分子分辨率从而开辟精准诊断新领域。正因为这种“价值充分外溢但市场主体不清晰”的特性，隐性赋能型技术往往在纯市场逻辑驱动的资源配置中面临“创新投入不足”的系统性市场失灵，需要政府的“战略性公共研发投入”来弥补市场激励的不足——美国的材料基因组计划（Materials Genome Initiative）和欧盟的量子传感旗舰计划，本质上都是对这种市场失灵的公共干预。

（四）特定领域的深度聚焦：AI驱动的跨层技术融合分析

在完成14项技术的整体画像扫描之后，有必要对当前技术生态中最为核心的“AI驱动跨层融合”趋势进行专门的深度分析，以揭示五层技术体系在AI赋能下正在发生的结构性重塑。

AI与基础设施层：加速技术底座的自我进化。在“基础设施层”，AI正在深刻改变先进材料和先进半导体的研发范式。在先进材料领域，谷歌DeepMind于2023年发布的GNoME（Graph Networks for Materials Exploration）模型，在一次运行中预测了超过220万种稳定的新型材料晶体结构，相当于过去80年材料科学积累的总量，将新材料发现的效率提升了约一万倍。这一突破标志着“AI for Materials Discovery”正在将先进材料的研发周期从传统的十年量级压缩至数月量级，将在根本上改变“材料壁垒”在国际技术竞争中的形成机制。在先进半导体领域，AI已被深度嵌入IC设计的EDA（电子设计自动化）工具链之中——谷歌使用强化学习算法将芯片布局优化时间从数周压缩至数小时，而AlphaChip正在将AI驱动芯片架构搜索扩展至跨工艺节点的系统性优化。

AI与使能系统层：全面渗透工业神经网络。在“使能系统层”，AI对先进制造和网络安全渗透正在从辅助优化升级为系统性重构。在先进制造领域，“AI+数字孪生”的组合正在使工厂级别的全链路质量预测和动态调度优化成为现实——西门子的MindSphere、GE的Predix和PTC的ThingWorx平台，通过实时感知数据与AI边缘推理的深度融合，已经将高精密零部件的良品率提升至99.97%以上。在网络安全领域，“AI驱动的自适应威胁检测（Adaptive Threat Detection）”正在成为下一代网络安全体系的核心，LLM（大型语言模型）已被用于自动化漏洞分析、安全代码审查和攻击意图预测，显著提升了安全响应的速度和精准度，但同时也催生了“AI赋能的网络攻击”的新威胁形态，使攻防博弈进入了新的层次。

AI与应用接口层：重塑感知与交互的终极维度。在“应用接口层”，AI与沉浸式数字环境和先进传感技术的融合，正在将“人机界面”推向前所未有的高维交互形态。在沉浸式数字环境领域，Agentic AI（具身智能体）与空间计算的融合，使得虚拟助手从“会话型”向“行动型”跃迁——AI不再被动地回答问题，而是主动地感知环境、制定计划、执行复杂任务，这是迈向人机深度共生的关键步骤。在先进传感技术领域，AI与量子传感的结合（AI-enhanced Quantum Sensing）正在创造出超越经典传感物理极限的新型传感器能力：通过AI算法对量子态噪声的实时滤除和信号重建，量子传感器的实际应用灵敏度指标已经突破了标准量子力学噪声极限（Standard Quantum Limit, SQL），这一进展正在开辟从超精密惯性导航到单细胞生物活性实时监测的全新应用疆域。

六、国家战略、治理框架与中国视角的深度比较

（一）G7+2国家技术战略的制度差异与路径分化

在对14项颠覆性技术进行DTI评分和五层架构分析之后，本节进一步从制度比较的视角，系统审视

G7+2 九个战略主体在技术战略制定与实施上的内在差异，以揭示不同国家创新系统（NIS）特征对技术发展路径的塑造作用。

1. 美国模式：“任务导向”与“市场驱动”的双轮体系

美国的技术战略制度呈现出独特的“双轨并进”结构。一方面，以 DARPA（国防高级研究计划局）为代表的“任务导向”研发体系，通过“登月计划思维”——设定超越当前技术极限的明确任务目标，并由联邦政府直接拨款组织跨机构协作——推动了一系列基础性技术突破。互联网的前身 ARPANET（1969）、GPS 全球定位系统、隐形战斗机技术、无人机技术乃至 mRNA 疫苗技术（通过“曲速行动”）等都源自 DARPA 及其延伸机构的战略性投入。DARPA 的独特运作模式——“项目经理（Program Manager, PM）”权力集中、任期限制、高容忍失败——为前沿技术的突破性进展提供了独特的制度土壤。

另一方面，以硅谷为代表的“市场驱动”创新生态，通过极度发达的风险投资网络、最顶尖的研究型大学体系、最宽松的移民与人才流动制度、以及最灵活的创业文化，形成了全球范围内最为高效的“创新-创业-扩张”转化机制。统计表明，全球前 100 家最具价值的 AI 初创公司中，超过 80% 总部设在美国，这一集中度远超其他任何国家。

美国模式的核心优势在于 DARPA “任务导向”体系与硅谷“市场驱动”体系之间的双向协同——DARPA 资助的早期前沿技术（如 GPU 通用计算的早期探索、AI 算法的基础研究）最终通过硅谷的市场化机制实现规模化产业化；反过来，硅谷的技术创新又反哺到 DARPA 的下一代任务构想之中。这种“政府前期孵化 + 市场后期放大”的闭环循环，是美国长期保持技术领先地位的制度根源。

2. 欧盟模式：“技术主权”导向与规则制定优势

欧盟的技术战略体现出鲜明的“防御性技术主权”特征，这一特征的历史根源在于欧盟作为多成员国联合体在关键技术领域对美国和中国的双重依赖现实。《欧盟芯片法》（2023 年生效，规模 450 亿欧元）、《关键原材料法》（2024）、《经济安全战略》（2023）、《AI 法案》（2024）等一系列立法工具，共同构成了欧盟“技术主权”战略的制度载体。

欧盟模式的独特之处在于其“规则制定”型竞争战略——即通过在全球技术治理规则上率先立法（如 GDPR 数据保护、AI 法案、DSA 数字服务法），为全球技术产业制定“欧盟标准”，从而在软实力层面弥补硬技术实力上与美国的差距。这一战略在 AI 治理领域尤为突出：《欧盟 AI 法案》作为全球首个综合性 AI 监管框架，已经对全球 AI 公司的合规实践产生了深远影响——任何希望进入欧盟市场的 AI 产品都必须满足欧盟合规要求，这实际上使欧盟标准成为全球 AI 治理的“事实标准”。

然而，欧盟模式的显著局限在于：严格的监管框架可能同时抑制本土创新动力。欧盟本土的前沿 AI 公司（如法国的 Mistral AI、德国的 Aleph Alpha）的规模和能力远不及美国的 OpenAI 和 Anthropic，这在一定程度上反映了“监管先行”路径对“创新速度”的约束效应。如何在“规则制定优势”与“创新活力保持”之间实现动态平衡，是欧盟技术战略的长期挑战。

3. 日本模式：“产业链纵深”与“精密制造”的延续

日本的技术战略以其在特定基础材料、设备和精密制造领域的全球顶级地位为核心特征。从半导体领域的高端光刻胶（信越化学、JSR、东京应化）、大硅片（信越、SUMCO），到精密仪器（基恩士、横河电机），再到高端机床（山崎马扎克、大隈），日本企业在诸多“关键中间品”领域保持着难以被替代的全球市占率。

日本“综合创新战略”（内阁府科学技术与创新政策）和“经济安全保障推进法”（2022）为上述产业链纵深优势提供了制度化保障。特别值得关注的是“经济安全保障推进法”中设立的“特定重要技术研究开发基金”（5000 亿日元初始规模），通过官民合作的方式重点投入于半导体、量子计算、人工智能、合成生物学等战略性前沿领域。

日本模式的战略逻辑在于：依托“无法轻易被取代的”中间品地位形成的战略杠杆，在国际技术竞争

中实现“以少胜多”的精准博弈。即便日本在最终消费市场上的科技巨头数量已经明显少于美国和中国,但其在产业链关键节点上的控制力仍然使其成为国际技术格局中不可或缺的一极。

4. 韩国模式:“追赶型创新”与“大企业主导”的极致效率

韩国作为后发工业国家,其技术战略呈现出与日本类似但又有所区别的独特路径。韩国模式的核心特征是“大企业主导”的集中式创新——三星电子、SK 海力士、现代汽车、LG 化学等少数几家财阀(Chaebol)企业集群,通过超大规模、长周期的资本投入,在特定技术领域(半导体存储、OLED 显示、先进电池、造船、钢铁)实现了全球领先地位。

韩国的《国家战略技术培育基本计划(2024—2028)》明确了12个国家战略技术领域,计划在未来5年内投入超过30万亿韩元(约220亿美元)的公共研发资金。这一集中式投入的战略逻辑,与韩国经济的“大企业主导”结构高度匹配——公共资金能够高效地与大企业的私营投资形成协同,共同推进特定技术领域的规模化突破。

韩国模式的局限在于:集中于少数大企业的创新结构可能降低创新生态的多元性和韧性。近年来,韩国政府已经开始通过“创新创业生态活跃化”政策鼓励初创企业和中小创新主体的崛起,但大企业主导的基本结构仍然是韩国创新系统的主导特征。

5. 英、德、法、澳、加模式:差异化定位的“中等实力”竞争者

英国的技术战略在AI安全研究(AI Safety Institute, 2023年成立)、量子科学(《国家量子战略》)、合成生物学(英国医学研究委员会MRC的长期投入)等少数精选领域形成了“小而精”的特色优势。AUKUS协议(2021)使英国在先进防御技术领域与美国形成了制度化的战略对接。

德国的技术战略以“工业4.0”为制度载体,在先进制造(尤其是汽车、机械、化工领域的数字化转型)、量子技术(Fraunhofer研究所体系的长期积累)和半导体制造(英飞凌、博世的汽车级芯片)领域形成了独特优势。《德国未来技术战略》(FITS2030, 2023)明确了九个优先技术方向,投入总规模超过170亿欧元。

法国的技术战略以“France 2030”(2021年启动,540亿欧元投入)为核心载体,重点布局核能(小型模块化反应堆)、航空航天(空客、Ariane)、深空深海技术、低碳能源等“主权技术”领域。法国的“国家量子计划”(18亿欧元,2021—2025)也使其成为欧盟量子科学的主要推动者之一。

澳大利亚的战略聚焦于关键矿物(锂、稀土)、量子计算(澳大利亚国立大学、悉尼大学的特色优势)、AUKUS框架下的先进防御技术等差异化方向。“澳大利亚关键技术蓝图战略”(2023)明确了63项关键技术,但实际投入规模相对有限。

加拿大则依托滑铁卢大学(量子计算)、多伦多大学(AI深度学习奠基者)等顶级学术机构的研究积累,以及丰富的关键矿物资源,在AI、量子、关键矿物等领域保持着与其人口规模不成比例的国际影响力。《加拿大关键矿物战略》(2022)的38亿加元投入为这一差异化优势提供了资金保障。

(二) 技术治理框架的比较分析:硬法、软法与敏捷治理

技术战略的实施不仅依赖于资金投入和研发布局,同样依赖于治理框架的制度设计。面对AI、基因编辑、脑机接口等颠覆性技术带来的伦理、安全和社会挑战,不同国家和地区正在形成差异化的治理路径。

1. 硬法路径:欧盟的综合性法律框架。欧盟通过一系列具有法律约束力的“硬法”(Hard Law)工具——GDPR、DSA、DMA、AI Act、Chips Act——构建了全球范围内最为全面的技术治理法律体系。这种“硬法”路径的优势在于:法律规范的明确性和可执行性能够为技术应用提供确定的合规预期;同时,欧盟内部市场的规模效应使得任何希望进入欧盟市场的全球技术企业都必须合规,从而实现了“布鲁塞尔效应”(Brussels Effect)的全球规则溢出。

2. 软法路径:美国的行业自律与框架指南。美国倾向于采用“软法”(Soft Law)框架——联邦机构发布指南、行业形成自律标准、研究机构提出伦理准则——而非直接制定强制性法律。NIST AI风险管理框

架（AI RMF 1.0, 2023）、白宫 AI 权利法案蓝图（Blueprint for an AI Bill of Rights, 2022）、拜登政府的 AI 行政令（Executive Order 14110, 2023）等，都属于“软法”属性的治理工具。这种路径的优势在于灵活性——可以根据技术发展动态及时调整；局限在于合规力度不足，难以形成一致的合规预期。

3. 敏捷治理路径：中国等东亚国家的实验性治理。中国的技术治理路径呈现出“敏捷治理”（Agile Governance）^{⑤2}的鲜明特征——通过监管沙盒、试点城市、先行示范区等机制，允许新兴技术在特定空间和时间范围内进行有限合规的产业化探索，同时根据试点经验动态调整监管规则。《生成式 AI 服务管理暂行办法》（2023）作为全球最早的生成式 AI 专项监管规定之一，其“暂行”二字即体现了敏捷治理的制度特征——先行立规、持续调整、避免僵化。

4. 治理路径的比较与评估。三种治理路径各有优劣：欧盟硬法路径在确定性和完整性上最强，但可能抑制创新活力；美国软法路径在灵活性和适应性上最强，但在底线约束上力度不足；中国敏捷治理路径在创新适应性上具有优势，但在透明度和可预期性上面临挑战。这三种路径的长期演化结果，将在很大程度上决定未来 10—15 年全球技术治理的基本格局。

（三）中国参照：超越 G7+2 视野的纠偏性分析

尽管本研究的政策分析核心样本限定于 G7+2 九个战略主体，但考虑到中国作为全球第二大研发投入国、全球最大专利申请国、全球第二大 VC 投资市场的综合实力，完全排除中国视角将使本研究的识别结论面临系统性的“样本偏差”风险。本节特别纳入中国的技术战略与前沿进展，作为对 G7+2 识别结果的关键参照与修正。

1. 中国的技术战略体系。中国的技术战略以《“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要》^{⑤3}为顶层设计，明确提出“加快建设科技强国”的战略方针，并将人工智能、量子信息、集成电路、脑科学、基因技术、先进制造、空天科技等列为国家重点攻关领域。《“十四五”国家重点研发计划》^{⑤4}进一步细化了各重点专项的研发投入和目标设定，总规模预计超过 1000 亿元人民币。

中国技术战略的独特特征包括：（1）“新型举国体制”——集中资源攻关关键核心技术；（2）“产业基金 + 国企 + 民企协同”的多元融资结构；（3）“科技部 + 工信部 + 发改委 + 中科院”的多部门协调机制；（4）“教育部 + 人社部”的人才培养供给保障。这种综合性的战略执行架构，使中国在相对较短的时间窗口内能够实现对特定技术领域的大规模资源动员。

2. 中国在 14 项技术上的实际进展。基于公开资料的综合判断，中国在本研究识别的 14 项颠覆性技术上的实际进展可以概括为以下三个梯队：

第一梯队（全球第一或并列第一）：在特定 AI 应用领域（计算机视觉、语音识别、推荐系统）、量子通信（星地量子通信网络）、空天科技（载人空间站、探月工程）、先进能源（先进光伏、动力电池、可控核聚变的部分路线）等领域，中国已经达到或接近全球最高水平。

第二梯队（全球第二梯队）：在基础 AI 研究（大模型研究）、合成生物学、先进制造、网络安全、下一代通信（6G 标准制定）、先进传感（LiDAR）等领域，中国与美国、欧盟、日本、韩国等处于同一竞争梯队。

第三梯队（与顶级有差距）：在先进半导体制造（特别是 7nm 以下先进制程）、先进材料（高端特种材料）、先进计算（高端 GPU/CPU）、脑科学（临床转化能力）、沉浸式数字环境（空间计算核心硬件）等领域，中国与全球最先进水平仍有明显差距。

3. 中国视角对 G7+2 识别结果的修正作用。将中国纳入分析视野，至少会对本研究的识别结果产生以下三方面修正：

^{⑤2}薛澜，赵静. 科技创新领域的敏捷治理：挑战与应对 [J]. 中国行政管理, 2019(11): 6-12.

^{⑤3}中华人民共和国中央人民政府. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [R]. 北京：人民出版社, 2021.

^{⑤4}中华人民共和国科学技术部. “十四五”国家重点研发计划重点专项 [R]. 北京：科学技术部, 2021.

其一，部分“前沿共识”技术的实际战略权重可能被低估。以脑科学为例，中国的“中国脑计划”（累计投入已超过数百亿元人民币）和“十四五”重大科技基础设施对脑科学的配置，实际上使脑科学的“全球大国共识密度”显著高于表面的 G7+2 政策清单口径——如果将中国视为独立战略主体纳入统计，脑科学的共识度将从“4/9 大科学工程覆盖”上升至“5/10”，进入“高度共识”区间。

其二，部分“应用拓展”技术的市场颠覆性维度评分可能被低估。以先进能源技术（特别是动力电池、先进光伏）为例，中国的宁德时代、比亚迪、隆基绿能等企业的实际市场份额使得这一领域的 M 维度评分应当高于基于西方 VC 数据的原始估算。

其三，技术竞争格局的“单极”vs.“两极”判断可能被扭曲。如果仅基于 G7+2 视角，则美国保持着明显的单极领先地位；但将中国作为独立参照纳入后，全球技术竞争格局更接近于“中美双极、欧盟日韩作为第二梯队”的多极结构。这一结构性差异对国家技术战略的长期布局具有重要影响——在“单极领先”格局下，其他国家的最优战略是“跟随美国”；而在“两极竞争”格局下，其他国家的战略选择则更为复杂，可能涉及“选边站队”、“中立平衡”或“特色差异化”等多种路径。

（四）技术竞争的地缘政治化：出口管制、供应链重构与技术联盟

随着各主要大国日益将技术竞争视为国家安全核心议题，技术竞争的地缘政治化已经成为塑造当代全球技术格局的最主要结构性力量。本节简要梳理这一趋势的三个核心维度。

1. 出口管制：从单边到多边的技术阻断网络。以美国为核心的出口管制体系在 2018 年以来经历了系统性升级。《出口管制改革法案》（ECRA，2018）将“新兴和基础技术”纳入管制范围；《外国直接产品规则》（FDPR）的系统性使用，使美国的管制能力延伸到了全球任何使用美国技术生产的产品；2022 年 10 月的半导体出口管制新规，对中国获取 14nm 以下先进制程芯片、高性能 AI 芯片、EDA 软件等形成了全方位的技术阻断。

更为关键的是，美国正在通过瓦森纳协议（Wassenaar Arrangement）、AUKUS、“四方安全对话”（QUAD）、“芯片四方联盟”（CHIP4）等多边机制，将单边出口管制转化为多边协同管制。日本在 2023 年实施的 23 类半导体设备出口管制与美国管制形成了事实上的协同；荷兰对 ASML 的光刻机出口管制进一步加强了这一联盟效应。这种“多边技术阻断网络”的形成，对被阻断国的技术突围造成了前所未有的复合性压力。

2. 供应链重构：“去风险化”的全球产业链重组。美国“印太经济框架”（IPEF）、“友岸外包”（Friend-shoring）战略、“去风险化”（De-risking）政策等，共同推动了全球技术产业链的系统性重组。台积电在亚利桑那、熊本、德累斯顿的先进晶圆厂布局；三星、SK 海力士在得克萨斯的新建投资；英特尔在俄亥俄、新墨西哥的大规模扩张；美光在纽约的尖端存储芯片厂建设——这些“地理再定位”项目的共同战略逻辑，都是降低全球先进半导体产能对台湾海峡和中國大陸的集中度。

3. 技术联盟：国家间的技术协同新形态。除上述出口管制联盟外，更为积极意义上的“技术联盟”也在成形：美日韩“经济安全对话”（2023）聚焦半导体供应链协同；AUKUS 第二支柱（Pillar 2）推进先进军事技术（量子、AI、高超音速、先进网络能力）的三方联合研发；欧盟-美国“贸易和技术委员会”（TTC）协调对关键技术的共同立场；“全球 AI 伙伴关系”（GPAI）尝试建立民主国家间的 AI 协同框架。这些技术联盟的形成，将全球技术竞争从“单一国家 vs. 单一国家”的双边博弈升级为“集团 vs. 集团”的阵营对抗。

（五）“技术脱钩”情景下的长期风险分析

综合前述多维分析，一个值得深入思考的前瞻性问题是：如果当前“技术脱钩”（Tech Decoupling）趋势持续深化，对全球技术创新生态将产生怎样的长期影响？

情景 1：有限脱钩。在这一情景下，脱钩仅限于“敏感军事技术”和“核心基础设施”（如先进半导体、量子密码、部分 AI 军事应用），而在“普通民用技术”领域仍然保持开放协作。这一情景是当前现实的延续，其长期影响相对可控——全球技术创新的主体生态仍然保持开放，“敏感领域”的技术分化形成专门的“双轨制”发展路径。

情景 2：产业脱钩。在这一情景下，脱钩范围从敏感技术扩展至整个技术产业链——从先进制造到 AI 应用、从通信标准到数字平台，形成两个相对独立的“技术生态系统”。这一情景将导致全球范围内标准的分裂、创新效率的明显下降、规模效应的丧失。根据美国半导体协会（SIA）的估算，如果全球半导体产业完全“双轨化”，将额外增加约 10000 亿美元的投资需求，且导致 5—10 年的技术进步延迟。

情景 3：全面脱钩。在这一情景下，两个“技术集团”之间的人员交流、学术合作、数据共享都基本中断，形成类似冷战时期的“两个科技世界”。这一极端情景下，全球技术创新的主体生态将遭受根本性破坏——当代许多前沿技术的突破（如 CRISPR 基因编辑、Transformer 架构 AI）都依赖全球学术社区的开放协作，而“全面脱钩”将彻底中断这种协作的前提条件。

对于上述三种情景的不同可能性，国家技术战略的最佳响应路径也有所不同。在“有限脱钩”情景下，策略是“自主可控核心技术 + 国际开放普通技术”的双轨并行；在“产业脱钩”情景下，策略是“全面自主可控 + 友岸外包双循环”的分层布局；在“全面脱钩”情景下，策略则趋向于“完全自主可控”的封闭发展模式。从全球福利的角度看，“有限脱钩”显然是成本最低的情景，而“全面脱钩”则将对全球技术创新造成难以估量的系统性损失。

（六）全球技术治理的制度创新路径

面对颠覆性技术带来的深层治理挑战，全球范围内的技术治理制度正在经历多维创新。本节简要梳理当前全球技术治理制度创新的五个主要方向。

1. 多利益主体治理（Multi-Stakeholder Governance）。不同于传统的“政府中心”治理模式，多利益主体治理框架强调政府、产业、学术界、公民社会、国际组织的协同参与。全球互联网治理领域（ICANN 模式）是多利益主体治理的典型范例。当前，类似模式正在被尝试应用于 AI 治理领域——例如“全球 AI 伙伴关系”（GPAI）、“UNESCO 人工智能伦理建议”等。

2. 前瞻性伦理评估（Anticipatory Ethics）。与传统的“事后伦理评估”不同，前瞻性伦理评估强调在技术发展的早期阶段即引入伦理考量，以引导技术发展方向避免不必要的伦理困境。欧盟的“负责任研究与创新”（RRI）框架、英国的“前瞻性治理（Anticipatory Governance）”探索都属于这一方向。

3. 算法透明度与问责制（Algorithmic Transparency and Accountability）。针对 AI 系统的“黑箱”特征，全球范围内的监管创新正在推动算法透明度和问责制的制度化。欧盟 AI 法案中对高风险 AI 系统的透明度要求、纽约州要求 AI 招聘工具进行独立审计（2023）、加州 AI 透明度法案（2024）都属于这一方向。

4. 数据主权与跨境数据流动治理。数字经济的全球化与数据主权保护之间的张力，正在催生新型的数据治理制度——GDPR、中国《数据安全法》和《个人信息保护法》、印度《数字个人数据保护法》（2023）等，共同构成了全球数据治理的多层次制度框架。

5. 国际技术伦理准则的生成。科学家自律性伦理准则（如 1975 年的阿西洛马会议关于重组 DNA 技术）的当代对应物，正在多个前沿技术领域涌现——2023 年 GPT-4 发布后开放签署的“AI 风险暂停信”、2023 年 CRISPR 人类胚胎研究全球暂停倡议、2024 年脑机接口技术伦理准则等。虽然这些准则在法律约束力上有限，但作为“科学家共识”的软法工具，对技术发展方向具有不可忽视的引导作用。

七、结论与讨论

（一）本文的核心学术贡献

本文作为“主要发达国家颠覆性技术研究”系列课题的第二篇，在其前续研究^{⑤⑤}理论谱系梳理的基础之上，完成了从“描述性理论综述”到“规范性识别框架构建”的关键学术跨越。具体而言，本研究完成了三项层层递进的核心学术贡献：

⑤⑤李昌奎. 颠覆性技术研究（一）——理论起源、概念界定与多维分析框架 [J]. 社会科学理论与实践, 2026, 8(1): 1-18.

1. 建立了基于四维乘积逻辑的 DTI 颠覆性技术识别模型。与既有文献中普遍采用的专家德尔菲打分、政策文本词频统计或单一专利计量等识别方法相比,本研究提出的 DTI 模型 ($DTI = T \times M \times E \times S$) 在以下三个方面实现了实质性推进:(1) 理论整合性——DTI 模型有机整合了熊彼特创造性毁灭理论、GPT 通用目的技术理论、克里斯坦森颠覆性创新框架和吉尔社会技术转型理论的核心识别维度,使其具备了多理论传统的正交性和完备性;(2) 操作可复制性——每个维度均绑定了可扩展的量化代理指标,但在当前可复现版本中,已经稳定落地的主要是政策文本、OpenAlex 论文计数与共现网络,专利和 VC 口径仍属于分阶段增补的后续模块;(3) 方法论稳健性——乘积函数的数学结构天然产生“最低木桶板”约束效应,有效规避了加权求和体系中不同维度得分相互补偿所导致的识别假阳性风险。

2. 呈现了基于 G7+2 多国政策文本的跨主体技术战略共识图谱。通过对 9 个独立战略主体(含美国、欧盟、英国、德国、日本、韩国、澳大利亚、法国、加拿大)的官方关键技术战略文件进行系统性文本分析和标准化编码,本研究首次以“战略共识度”为核心量化指标,建立了 G7+2 参照框架下全覆盖的技术优先级图谱。这一图谱不仅揭示了人工智能与量子信息科学的“超级双核共识”地位(9/9)、先进半导体与生物技术的“第一集团”地位(6/9),以及脑科学等领域的“大科学工程隐性共识”修正机制,更为 G7+2 框架以外的其他国家和地区理解主要技术强国的战略优先级排序提供了一个经过系统整理的横向参照坐标系。在中文学术界,类似粒度和系统性的多国技术战略比较研究尚不多见,这构成了本研究独立的学术增量。

3. 建立了基于技术依赖链逻辑的五层拓扑分类架构。将 14 项颠覆性技术组织为“基础设施层—智能核心层—使能系统层—前沿突破层—应用接口层”的有序五层网络,从根本上超越了传统技术分析中常见的“行业应用分类”(如 AI、生物、能源等并列分组)的有限视野,揭示了 14 项技术之间从“物质底座”到“智能内核”再至“人类界面”的内在价值传导逻辑与依赖链条关系。这一分类架构对于国家技术战略制定中识别“补短板”节点(优先强化基础设施层技术)和“锻长板”节点(重点突破智能核心层和前沿突破层技术)具有直接的政策操作价值。

(二) 研究发现的政策含义

从上述研究发现中,可以为国家技术战略的制定提炼以下四个层面的政策含义:

1. 技术投入分配应当区分“必保底线技术”与“争夺领先技术”两类战略目标。在本研究确立的五层技术拓扑架构中,第一层(基础设施层:先进材料、先进半导体、先进计算)构成了整个技术体系的物质底座。对于任何有志于在关键技术领域保持独立性的国家而言,这三项“基底技术”必须在自主可控方面达到基本门槛——没有可靠的先进材料和半导体制造能力,任何上层技术的突破都将面临“供应链卡脖子”的系统性脆弱性。因此,资源相对有限的国家和地区在制定技术战略时,应当优先确保基础设施层技术的“底线可控”,再择机在特定的智能核心层技术(如专用 AI)或前沿突破层技术(如合成生物学某一细分应用方向)上谋求有重点的领先突破,而非盲目追求全域技术的均衡先进性。

2. “隐性共识”技术值得给予超过其表面政策覆盖率所提示的战略关注。本研究通过“大科学工程例外条款”修正机制揭示了脑科学在实际国家战略行动中的真实重要性远高于其在“关键经济技术安全清单”中的表面出现频次。这一发现提示:若仅依据各国技术清单的词频统计来判断技术重要性排序,将可能系统性地低估那些被大规模国家研究项目(而非产业安全清单)所覆盖的基础科学技术领域的战略价值。政策研究者在参考跨国技术共识数据时,应当主动区分“政策清单共识”与“实际研究行动共识”两个层次,避免对前者的过度路径依赖。

3. 针对“前沿共识技术”的超前布局具有一定的技术窗口先发优势。在本研究确立的 14 项技术中,脑科学与神经技术(政策清单覆盖率 1/9 但大科学工程覆盖率 4/9)和沉浸式与分布式数字环境(2/9)属于跨国“政策共识度”相对较低但在 DTI 乘积模型中具有极高 T 值和 S 值的“前沿共识技术”。对于正处于“跌入死亡之谷”与“破茧而出”临界点的此类技术,超前于主流政策共识的研发布局,往往能够以较

低成本建立在未来更高竞争密度阶段难以追赶的先发技术壁垒。这一策略意义对于具有相对研发优势但政策优先级配置相对保守的科研机构和产业主体尤为值得关注。

4. 技术产业化战略需要着重关注五层架构中的“跨层耦合节点”。从五层分类体系的整体逻辑来看，最具战略价值的技术投资往往并非是对某一单一层次技术的简单加注，而是对能够同时跨越多个层次、形成跨层耦合价值倍增效应的“枢纽节点技术（Hub Technologies）”的精准识别与集中突破。以人工智能为例，它在第二层（智能核心层）中居于核心地位，同时又作为“赋能工具”深度渗透至第一层（材料发现、芯片设计自动化），第三层（智能制造、智能网络安全），第四层（AI 辅助药物发现、AI 优化核反应堆运行），乃至第五层（空间计算中的环境感知算法）。这种“跨层次无处不在”的渗透性，正是 AI 获得全维度最高 DTI 评分的核心原因，也是国家战略中将 AI 视为基础性赋能技术而非单一应用领域的内在逻辑。

5. 基于 DTI-五层拓扑的复合政策建议：面向中国与香港情境的战略定位。综合本研究 DTI 模型、跨国政策共识分析和五层架构分类的综合发现，可以为中国特别是香港等技术生态相对特殊的经济体提炼如下十条具有针对性的政策建议。

第一，在基础设施层（先进材料、先进半导体、先进计算）上，应坚持“补短板保底线”的战略方针，优先确保在先进半导体制造、关键材料自主、高端算力供给三个方向上的“最低限度自主可控”，避免因“单点卡脖子”而丧失整体技术战略回旋空间。对于香港而言，受限于其土地和产业规模，在先进半导体制造方面难以形成独立能力，但可以通过与粤港澳大湾区的协同分工，在集成电路设计、先进封装、高端材料研发等细分领域发挥“小而精”的独特作用。

第二，在智能核心层（AI/AGI、量子信息、脑科学）上，应坚持“锻长板抢高地”的战略方针，通过重点研发专项、大科学基础设施、顶级人才吸引等综合性政策工具，争取在特定方向上形成全球领先的“长板优势”。香港在 AI 基础研究（通过香港科技大学、香港大学等研究机构）、量子计算（香港中文大学的相关研究团队）、脑科学（香港六所大学的临床神经科学力量）等领域具有国际一流的学术积累，应当通过“产学研政”协同机制将这些学术优势转化为产业化能力。

第三，在使能系统层（先进制造、下一代通信、网络安全）上，应坚持“强基础建生态”的战略方针，通过工业互联网、智能制造示范区、5G/6G 标准协同、网络安全保障体系等综合性政策工具，构建支撑上层技术产业化的坚实中间层。香港在金融科技监管、数据跨境流动、网络安全合规等领域具有独特的制度优势，可以在“粤港澳大湾区数字要素流动”先行先试的框架下形成特色性贡献。

第四，在前沿突破层（合成生物学、先进能源、空天科技）上，应坚持“集群突破建壁垒”的战略方针，通过国家重大科技专项、商业航天发射平台、绿色低碳产业园区等集群式投入，在特定前沿方向上建立“全产业链自主可控”的战略壁垒。香港虽然在这些领域直接产业化能力有限，但可以通过“粤港澳大湾区国际科技创新中心”的协作机制，在全球商业航天保险与融资、生物医药研发监管、可持续金融等关联服务业方向发挥“国际枢纽”功能。

第五，在应用接口层（沉浸式数字环境、先进传感）上，应坚持“抢赛道占生态”的战略方针，通过智慧城市、自动驾驶、数字孪生、元宇宙等综合性应用场景的率先落地，在标准制定和生态构建中获得“先发优势”。香港作为高度国际化的现代化都市，具备部署智慧城市、自动驾驶等前沿应用的独特条件，应当积极争取成为相关技术的“全球示范区”。

第六，人才战略上应当坚持“顶尖人才 + 梯队人才 + 青年人才”的三位一体结构。顶尖人才通过“千人计划”级别的高端人才引进通道；梯队人才通过面向海外华人科学家的系统性回归机制；青年人才通过顶尖研究型大学的系统性扩招和研究生规模提升。香港的顶尖大学体系（QS 排名前百的大学多达 5 所）是其在顶尖人才培养与吸引上的独特战略资源，应当充分发挥这一资源的整合效能。

第七，基础研究投入应当保持长期稳定的占比提升。当前中国全社会研发投入占 GDP 比重已经达到 2.6%，但其中基础研究占比仅约 6.5%，显著低于美国（约 17%）和日本（约 13%）。未来 5—10 年，应当

将基础研究投入占比系统性提升至 10%—15% 水平，特别是在量子信息、脑科学、合成生物学等 DTI 高分技术领域形成稳定的基础研究支撑。

第八，产学研协同机制应当推进“教师-工程师-企业家”三位一体的人才循环。美国硅谷模式的核心竞争力之一就在于斯坦福、伯克利等顶级大学教授可以无缝切换为初创公司 CEO，而后再可以通过顾问、讲席教授等角色回归学术界。这种人才流动的制度弹性是技术创新效率的根本保障。中国目前的体制机制对这种人才流动仍然存在较多隐性障碍，应当通过职称评定、兼职规定、股权激励等一系列制度调整，推动形成真正意义上的“产学研旋转门”。

第九，国际合作与开放创新应当保持“压力测试下的韧性通道”。在当前技术脱钩趋势加剧的背景下，维护必要的国际学术合作、标准对接、人员流动通道，对于防止技术“双轨化”所带来的系统性效率损失具有关键意义。香港作为中国最国际化的城市之一，在维护这一“韧性通道”上具有重要且难以替代的战略价值——无论是与美欧科研机构的学术交流，还是与东南亚、中东、一带一路沿线国家的技术合作，香港都可以扮演不可替代的“超级联系人”角色。

第十，技术治理能力建设应当与技术研发投入同步推进。面对 AI、基因编辑、脑机接口等高 S 值（制度冲击度）技术领域，光有研发能力而没有治理能力，将使国家在全球技术治理规则制定中处于被动地位。应当通过设立“前瞻性技术伦理委员会”、“AI 治理专门研究机构”、“跨学科技术治理博士项目”等制度工具，系统性提升国家在前沿技术治理方向上的“制度性竞争力”。

综上所述建议，其共同的战略逻辑可以概括为：在国家层面，坚持“补短板、锻长板、建生态、抢赛道、育人才、强基础、促协同、保韧性、重治理”的综合方针；在香港等特色经济体层面，发挥“顶尖人才培养、国际交流枢纽、制度创新试验田、产业化中介”等独特功能。这些建议的落地，需要跨部门、跨层级、跨领域的系统性协调，是一项需要 5—10 年甚至更长周期持续推进的战略工程。

（三）研究局限与未来改进方向

坦诚面对研究局限，是学术诚信的基本要求，也有助于后续研究在此基础上实现更严格的科学推进。本研究的主要局限体现在以下四个方面：

1. 专利数据的代理有效性问题。PATSTAT 专利数据虽然覆盖全球主要专利局的申请数据，但存在以下几点固有偏限：（1）防御性专利与真正的技术突破性专利难以区分，导致高度活跃的专利申请数量并不必然等同于真正的技术突破密集度；（2）在量子计算、AI 算法等领域，大量核心技术成果以“商业秘密（Trade Secret）”形式保护而非进行专利申请，尤其是顶级科技企业（如 Google DeepMind、OpenAI）大量核心模型权重和训练技术不进入公开专利池，这可能导致对这些领域技术突破性（T 值）的系统性低估；（3）中国、美国和欧盟三大专利体系的申请惯例和审查速度存在显著差异，不同机构的“专利膨胀（Patent Inflation）”程度各异，使得跨国横向比较时需要额外的标准化处理。

2. 风险投资数据的市场覆盖偏差问题。本研究采用的 VC 流向数据（以 PitchBook 为主）主要覆盖美元/欧元计价的西方创投市场，对于人民币投资市场、中东和东南亚地区的新兴创投资金流向存在系统性欠代表。由于中国的政策性创投和国有产业基金在某些关键技术（如先进半导体、量子计算）领域的实际投入规模远超西方创投市场的公开数据所呈现的水平，本研究中基于 VC 数据计算的资本渗透率，在某种程度上在“市场替代性（M 值）”维度上存在对这些领域的低估风险。未来研究应当探索引入中国的创投数据库（如 CV Source、IT 桔子等）以实现全球资本流向更为均衡的覆盖。

3. 早期 DTI 模型评分的数据颗粒度与动态校准问题。尽管前期本研究为每个 DTI 维度均提供了量化的代理指标和宏观规程，但从代理数据到最终评分的映射可能因评估口径而导致一定的偏差。本次研究引入验证系统以提高鲁棒性，并在未来的方法论改进中进一步探索并强化：（1）建立自动化区间—评分映射规则；（2）使用多轨数据交叉印证以及蒙特卡洛稳健性分析（当前迭代 1000 次，Kendall τ 均值约 0.868）逐步剔除不可靠的模糊量化；（3）继续扩大对主流数据源（如 OpenAlex）和交叉指标体系的覆盖面，以

更动态、客观的方式从海量文献与底层数据中提取综合评分。

4. 中国视角的独立纳入问题。本研究在分析框架上选择了 G7+2（以韩国、澳大利亚补充传统 G7）作为政策共识分析的主体样本，并在“关键发现六”中将中国作为“侧面印证”的独立参照引入。然而，随着中国在多个前沿科技领域（人工智能、量子科学、合成生物学）已经成为与美欧并肩或部分超越的创新力量，将其作为“独立战略主体”纳入第一轨的政策文本系统分析，而非仅作为交叉参照，将使研究框架更加完善，也能为中国政策研究者提供更为直接相关的分析视角。此为本研究后续明确的优化方向。

（四）对后续系列研究的方法论引导

本文所确立的 14 项颠覆性技术清单和五层分类体系，旨在为后续 14 篇专题深度报告提供统一的“分析起点坐标”和“内在逻辑框架”。每篇专题报告在对特定技术进行深度分析时，应当做到以下三点：

第一，严格运用五维分析框架⁽⁵⁶⁾，对该技术在主要发达国家的“颠覆性画像”进行系统性深度评估，而不是仅停留于对该技术发展现状的一般性介绍。五维分析框架的核心价值，在于揭示同一技术在不同国家战略语境中被赋予的差异化优先属性，以及由此折射出的各国制度逻辑和竞争取舍。

第二，明确技术在五层架构中的具体定位，并关注其与上下层技术及同层相邻技术之间的网状依赖关系和赋能关系。单一技术的孤立分析具有天然的视野盲区；只有在整个技术生态系统的有机联系中定位和理解特定技术，才能真正揭示其战略价值的完整面貌。

第三，引入可验证的实证数据，包括但不限于：该技术领域最新的专利申请量趋势（PATSTAT）、全球顶级学术期刊的论文产出（WoS/Scopus）、头部科技企业在该领域的研发投入规模（企业年报数据）以及全球风险资本的最新配置动向（VC 数据），从而使每篇专题报告的颠覆性判断均有经验数据的客观支撑，而非仅依赖主观的质性叙述。

综上所述，本文在“DTI 理论建构-规则化多轨初筛-五层拓扑约束”的阶梯推进框架下，输出了当前格局下“应当着重将哪些技术群落置于探视中枢”的预备级基盘序列。这份 14 清单表谱绝不是完全缝合封顶的数据结论，而是导向未来一系列“解剖标本”的方法论发球——各个模块内部参数细颗粒映射的流变、真实验证资金在专利上的渗透重盘，均需依托后续展开的系列底层技术分析篇章逐步焊实补齐闭环缝隙，以完成自上而下纵深探测的完整征途。（五）后续 14 篇专题报告的总览规划表??呈现了后续 14 篇专题报告的总览规划，按照五层分类体系的层级顺序由底层向上层依次展开。

引用本文 李昌奎. 颠覆性技术研究（二）——面向国家战略的颠覆性技术识别：DTI 框架构建与 14 项技术实证 [J]. 社会科学理论与实践, 2026, 8(2):1-???. <https://doi.org/10.6914/tpss.080201>.

Cite This Article Changkui LI.(2026). Research on Disruptive Technologies (Part II): Disruptive Technology Identification for National Strategy — DTI Framework Construction and Empirical Validation of 14 Key Technologies. *Theory and Practice of Social Science*(*Shèhuì kēxué lǐlùn yǔ shíjiàn*), 8(2):1-???. <https://doi.org/10.6914/tpss.080201>

Research on Disruptive Technologies (Part II): Disruptive Technology Identification for National Strategy — DTI Framework Construction and Empirical Validation of 14 Key Technologies

Changkui LI^{1,2}

1. Hong Kong Center of Social Sciences 2. Hong Kong Integration Research Institute

⁽⁵⁶⁾李昌奎. 颠覆性技术研究（一）——理论起源、概念界定与五维分析框架 [J]. 社会科学理论与实践, 2026, 8(1): 1-18.

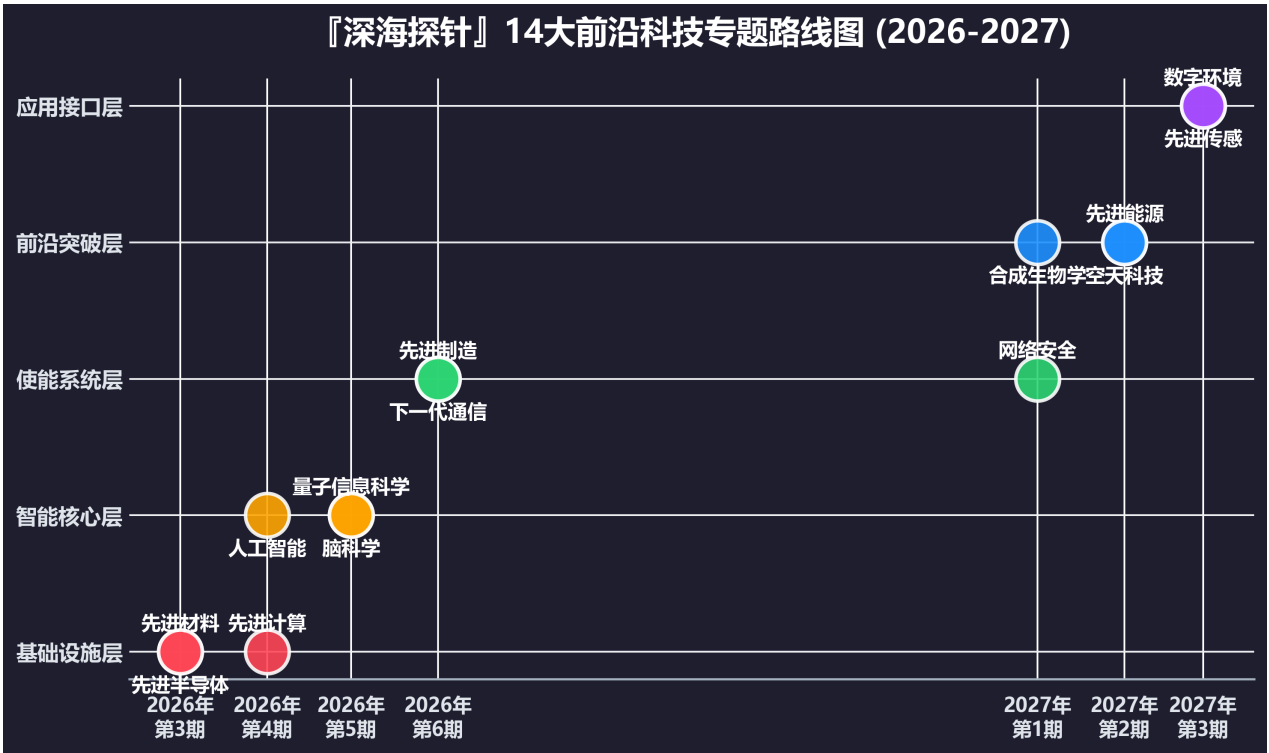


图 6: 后续 14 篇防务前瞻颠覆性技术专题演进路线图

表 14: 后续 14 篇专题报告总览

篇序	分层归属	技术领域	专题标题（暂定）	计划发表
三	基础设施层	先进材料	新材料革命：从碳纤维到超材料的战略竞赛	2026 年第 3 期
四	基础设施层	先进半导体	芯片主权：全球半导体竞争的战略解构	2026 年第 3 期
五	基础设施层	先进计算	算力即权力：超算、云计算与边缘智能	2026 年第 4 期
六	智能核心层	人工智能/AGI	通往 AGI 之路：主要国家战略与治理竞赛	2026 年第 4 期
七	智能核心层	量子信息科学	量子跃迁：计算、通信与传感的三重革命	2026 年第 5 期
八	智能核心层	脑科学与神经技术	最后的前沿：脑科学的战略布局与伦理挑战	2026 年第 5 期
九	使能系统层	先进制造	智造重塑：从数字孪生到柔性工厂	2026 年第 6 期
十	使能系统层	下一代通信技术	万物互联：6G 与太空互联网的标准之争	2026 年第 6 期
十一	使能系统层	网络安全与韧性技术	数字免疫：后量子时代的安全新范式	2027 年第 1 期
十二	前沿突破层	合成生物学与基因编辑	生命编程：CRISPR 时代的产业革命与生物安全	2027 年第 1 期
十三	前沿突破层	先进能源技术	能源自主：从小型核反应堆到固态电池	2027 年第 2 期
十四	前沿突破层	空天科技	制天之权：卫星星座、深空探测与太空经济	2027 年第 2 期
十五	应用接口层	沉浸式与分布式数字环境	数字孪生社会：从元宇宙到空间计算	2027 年第 3 期
十六	应用接口层	先进传感技术	感知万物：从量子传感到自动驾驶的数据革命	2027 年第 3 期

Abstract As the second installment of the research series on disruptive technology development, this paper addresses the qualitative subjectivity and unidimensional limitations inherent in traditional foresight methodologies by constructing a macro-level “Disruptive Technology Identification (DTI) Framework”. Drawing upon General Purpose Technology (GPT) and technological paradigm evolution theories, the study formulates a four-dimensional analytical model: Technological Breakthrough (T), Market Substitution (M), Enabling

Breadth (E), and Institutional Shock (S). Methodologically, the paper extends conventional policy text analysis toward a multi-source validation design and attempts to align policy baselines with publicly reproducible evidence from publications, patents, and investment signals where available. On this basis, the paper proposes a set of 14 technologies with comparatively strong disruptive potential and re-maps them into a five-layer foundational architecture. At the present stage, however, quantitative validation remains partly in progress, so any numerical claim should be interpreted in conjunction with the reproducible script outputs rather than as a fixed final estimate.

Keywords disruptive technology; technology selection; G7+2; critical and emerging technologies; technology classification; five-dimensional analytical framework

〔责任编辑：黄欣 Email: cpcl@cpcl.hk〕