CAICT 中国信通院　BCIA 脑机接口产业联盟 Brain Computer Interface Industrial Alliance

集智 蓝皮书 No.202502

脑机接口技术与应用研究报告

（2025 年）

中国信息通信研究院

脑机接口产业联盟

2025年8月

版权声明

本报告版权属于中国信息通信研究院和脑机接口产业联盟，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院、脑机接口产业联盟”。违反上述声明者，编者将追究其相关法律责任。

前　言

当前，**脑机接口技术正以其创新性、交叉性与前沿性，成为未来产业发展的关键力量。**当前，美国和欧洲等科技强国与地区均将脑科学研究列为重点项目，投入巨额资金大力扶持并积极推进相关研究。这一举措有力地推动了脑科学领域多学科交叉融合的进程，构建起广泛而深入的协同创新网络。**我国在脑机接口领域的顶层规划布局正不断强化**，多部委主动作为，积极为脑机接口产业的发展谋篇布局、指引方向，全力营造有利的政策环境与发展条件。与此同时，北京、上海等多地率先在脑机接口领域展开布局与探索，展现出强劲的发展动能与蓬勃的发展活力。

从技术发展态势审视，脑机接口技术向实际应用领域迈进的进程显著提速，与之相关的热点事件、突破性重磅成果等不断涌现，出现频次明显加大。在技术演进进程中，人机交互的友好性得以提升，与此同时，在医疗健康领域，针对癫痫、抑郁症、脊髓损伤等疾病的精准治疗案例持续涌现。这一系列现象表明，脑机接口已步入技术爆发式发展阶段，正沿着脑感知与脑调控这两大核心方向稳步演进，**且展现出融合化与智能化的发展趋势，**具体表现为技术手段深度融合、功能模块有机整合以及多学科交叉渗透融合，进而使得脑机接口系统在解码、控制与校准等关键环节的智能化水平显著提升。

从产业发展格局审视，全球脑机接口企业数量已突破 800 家，这些企业主要集中分布在美国和中国。**在业务布局方面，**近八成的企业聚焦于无创脑机接口的研发工作，有创占比约为两成且多集中

在美国。就当前产业生态而言，龙头企业相对匮乏，上市企业占比较低，中小微企业构成了产业生态的主体部分。**从产业链各环节的发展来看，在上游，**多种电极技术路线并存，且在未来一段时期内，多条技术路线并行发展的局面仍将持续。**在中游，**产品种类丰富多样，能够满足不同应用场景和用户需求，为脑机接口技术的广泛应用提供了坚实的硬件和软件支撑。**在下游，**技术正逐步走向成熟，且获得了较多的融资支持，反映出投资者对脑机接口产业落地应用的信心不断增强。**从产业地域分布格局来看，**我国相关企业呈现出集聚态势，近七成企业集中分布在北京、广东、浙江、江苏和上海这五个地区。**从市场规模发展趋势研判，**脑机接口技术受到技术创新突破、政策支持引导、资本投入增加等多重利好因素的驱动，展现出广阔的应用前景。一旦在医疗健康、生活消费等众多领域的市场需求得到释放，市场规模有望实现更大突破。

从趋势与展望看，技术创新方面，脑机接口将深化人机融合探索，通过算法优化、精准调控、深度协同等实现智能交互升级。**产业格局方面，**优势企业或转型为开放生态平台型企业，上下游协同更加密切，逐渐出现的收并购活动将加速资源整合，跨行业入局者增多。**投资方面，**投资规模扩大且阶段前移，融资领域和渠道更加多元，医疗健康领域投资持续升温，消费电子、智能交通等领域成为新方向，政府引导基金与社会资本将为企业发展提供更充裕资金保障。

目 录

一、 脑机接口分类与国内外布局.....1
(一) 脑机接口分为脑感知与脑调控技术.....1
(二) 脑机接口技术具有创新、交叉、前沿三个特性.....4
(三) 美欧脑计划研究布局与投入.....6
(四) 中国脑机接口政策与区域发展布局.....13
二、 脑机接口技术发展现状.....16
(一) 脑机接口技术按双路线发展并分三阶段演进.....16
(二) 技术效能、安全性与应用进展.....32
(三) 技术发展的协同创新模式.....35
三、 脑机接口产业发展情况.....37
(一) 产业链全景概况.....37
(二) 全球生态发展趋势.....42
(三) 投融资聚焦下游.....47
四、 脑机接口发展展望.....51
(一) 脑机接口技术创新不断进阶.....51
(二) 脑机接口产业生态格局加速构建.....52
(三) 投融资体系发展更加多元包容共享.....53

图 目 录

图 1 脑机接口技术实现方法.....1
图 2 美国脑计划的基础经费和补充经费.....8
图 3 脑机接口技术发展阶段.....17
图 4 脑机接口产业链.....37
图 5 脑机接口产业链分布的国家.....42
图 6 全球不同技术路线的脑机接口企业增长趋势.....43
图 7 重点国家脑机接口企业的技术路线分布.....44
图 8 全球脑机接口投资趋势.....48
图 9 全球脑机接口按不同技术路线的投资趋势.....49
图 10 脑机接口产业链各环节的全球融资趋势.....49

表 目 录

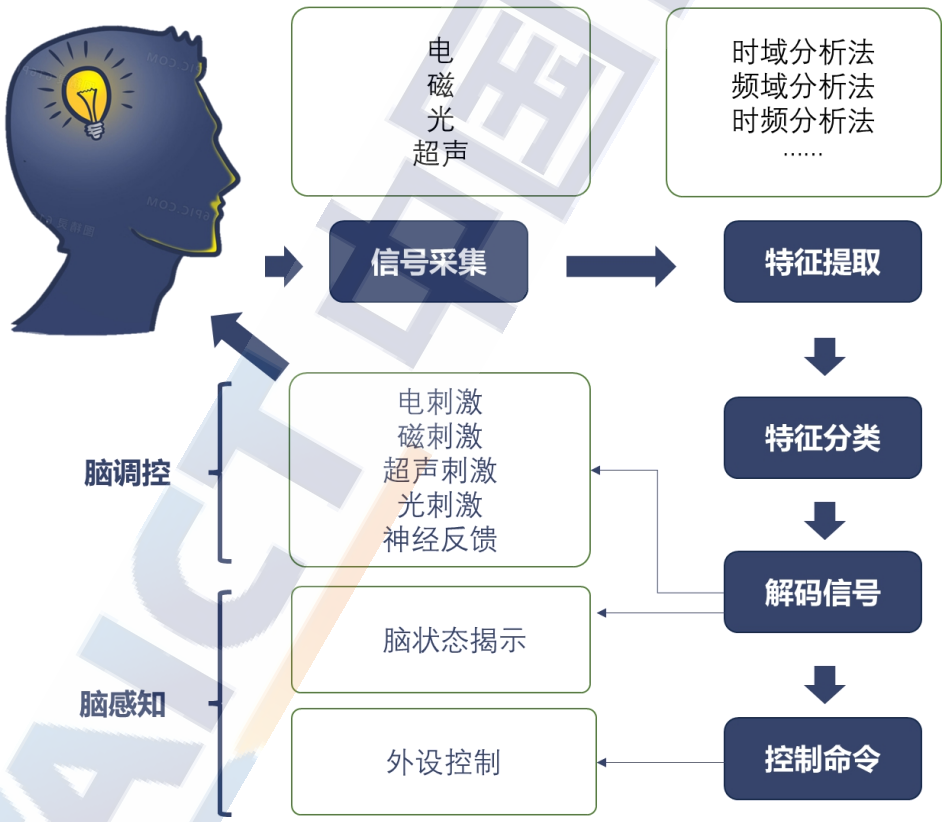
表 1 美国脑计划重点方向.....6
表 2 EBRAINS 中具有战略地位的工具.....12

CAICT 中国信通院

一、脑机接口技术分类与国内外布局

(一) 脑机接口分为脑感知与脑调控技术

脑机接口（Brain Computer Interface, BCI） 是一种建立大脑与外部设备之间直接通信通路的技术，其核心目标是解读大脑活动产生的意图或状态信息，并将其转化为控制外部设备的指令；或者将外部信息编码为特定的神经刺激信号输入大脑，从而对神经功能进行调控，以进行神经功能修复或增强。**脑机接口技术根据最终实现目的不同，可分为两类，分别是脑感知技术和脑调控技术。**



来源：中国信息通信研究院

图 1 脑机接口技术实现方法

脑感知技术是通过电、磁、光、超声等手段采集和分析大脑信号，

从而解码出大脑意图。解码结果可用于揭示脑状态和输出意图，如揭示疲劳、情绪、认知等状态；还可被转化为控制命令，实现对无人机、轮椅等外部设备的控制。对大脑意图的解码结果还可以用于优化对大脑进行刺激的参数，使对大脑的神经调控更加精准，以实现神经功能的恢复、替代和增强，此类技术可视为**脑调控技术**。

1. 脑感知技术原理与应用

脑感知技术以“解译脑机制”为前提，通过“利用脑信息”实现脑状态监测，涵盖电、磁、光、超声等多模态信号采集与成像技术。其核心目标包括脑功能状态评估、神经疾病预警诊断及人机交互控制，技术路径按侵入程度可分为有创与无创两大类。

电信号感知技术包含有创与无创两类。创新方向聚焦于电极材料、信号处理芯片及解码算法的协同优化，以提升信噪比与时空分辨率。

磁信号感知技术包括超导量子干涉仪（SQUID）和新型原子磁力计这两类脑磁图仪（MEG）无创技术，创新方向聚焦于高通道密度、便携化及成本优化演进，同时探索量子传感等新型磁探测技术。

光信号感知技术包括功能近红外光谱（fNIRS）无创技术，通过检测血红蛋白浓度变化间接反映神经活动，已广泛应用于认知科学研究。创新方向聚焦于 fNIRS 与脑电图（EEG）、MEG 的多模态脑成像系统融合，以提升时空动态解析能力。

超声信号感知技术通过超声多普勒效应检测血流动力学变化，

如检测脑血流量、血氧水平，间接反映神经元代谢活动。需植入微型超声探头，多用于啮齿类动物神经活动监测，临床应用尚处探索阶段。

2. 脑调控技术原理与应用

脑调控技术以“解析脑机制”为基础，通过“干预脑活动”实现神经功能调控。涵盖电、磁、光、超声、神经反馈等多模态刺激与信号调制技术。其核心目标包括神经与精神疾病治疗和认知功能增强，技术路径按侵入性可分为有创调控与无创调控两大类。

神经调控技术在早些年皆为开环调控，严格意义上，并不属于脑机接口技术，但随技术发展，脑起搏器、人工耳蜗等代表性技术正朝向感知闭环调控方向发展，**因此将已出现明确闭环发展趋势的脑调控技术也纳入脑机接口范围，将其开环阶段视为脑机接口的早期形态。**当前，基于电、磁、光、超声的神经调控技术和神经反馈技术，正在面向成瘾戒除、抑郁症治疗及阿尔茨海默病等疾病展开攻关，以解决传统治疗效果有限的问题。但多数技术方案仍处于硬件优化、算法验证及临床前测试阶段，距离规模化产品落地仍面临多重挑战。

电调控技术分为有创和无创两类。典型的有创技术包括深部脑刺激（DBS）、脊髓电刺激（SCS）等。通过颅内电极直接施加电脉冲实现高时空分辨率干预。创新朝向微型化、无线化、生物相容性发展。无创电调控技术包括经颅直流电刺激（tDCS）、经颅交流电刺激（tACS）等技术。通过头皮电极施加微弱电流实现脑功能调

控，正在朝向高精度定位、便携化发展。

磁调控技术包括重复经颅磁刺激（rTMS）、θ爆发刺激（TBS）、模式化磁刺激（pTMS）等。通过时变磁场穿透颅骨，在皮层神经元中诱导感应电流，调节突触可塑性或神经振荡。创新朝向精准调控、实时闭环调控、脑深部调控发展。

神经反馈技术通过实时监测脑活动信号将神经状态转化为视觉、听觉、触觉等反馈信息，引导受试者自主调节脑功能。创新朝向多模态融合、与虚拟现实集成发展。

超声调控技术是通过机械振动或空化效应调节神经元膜通透性、血流或血脑屏障功能，实现无创深部脑区调控。创新朝向多参数优化、实时影像引导、药物递送协同发展，目前处于前沿研发探索阶段。

光调控技术包括经颅光生物调节（tPBM）、光遗传学无创调控等技术。通过近红外光穿透颅骨，调节线粒体功能、氧化应激或神经元代谢，实现无创脑调控。创新朝向多波长联合刺激、实施反馈调控发展，目前处于前沿探索阶段。

(二)脑机接口技术具有创新、交叉、前沿三个特性

脑机接口作为一项变革性技术，具备创新性、交叉性及前沿性三个特征。其创新性体现在为人机交互领域带来突破性变革，是未来产业布局中具有战略意义的重要发展方向。脑机接口技术可突破传统人机交互范式，在生物神经系统与外部的智能设备之间建立沟通

桥梁，实现智能设备与神经系统的直接通信，精准获取大脑意图，并凭借颠覆性技术手段达成人体功能的辅助、增强与修复。**脑机接口的交叉性特征显著，作为多学科深度融合的创新驱动引擎，有助于推动多学科间的紧密耦合与协同发展。**在信号采集环节，需融合神经科学知识，以精准捕捉大脑产生的生物电信号；硬件设计方面，工程学原理为系统构建提供物理基础；信号解码过程，则依赖计算机科学与神经编码理论的协同优化，实现从神经信号到可理解信息的有效转换；电极设计与制作环节，材料学发挥关键作用，确保电极具备良好的生物相容性和信号传导性能；信号传输过程，信息通信技术和云计算技术为其提供高效、稳定的数据传输与处理支持。此外，脑机接口技术的重大突破还引发了广泛的伦理争议，也将会带动伦理学与社会科学领域的协同探索与深入研究，共同应对技术发展带来的社会影响。**脑机接口的前沿性体现为在未来科技革命中发挥引领作用，推动颠覆性技术突破。**目前，双向脑机接口技术已取得重要进展，不仅实现了大脑向外部设备输出信号，还能让设备向大脑反馈模拟触觉等人工感觉信息，构建起更为复杂、高效的人机交互通道。不仅如此，脑机接口技术展现出在认知增强领域的巨大潜力。通过直接刺激大脑特定区域有效提升个体的记忆力和注意力水平，为改善人类认知能力提供新途径。此外，脑机接口有助于深入探索研究脑网络，未来有望在特定场景下探索群体意识与群体协作机制，为人类社会的组织与协作模式带来变革。

（三）美欧脑计划研究布局与投入

全球多国均认识到脑科学研究在科技发展与社会进步中的战略性，纷纷将其列为重点对象加以推进。例如，美国推出“推进创新神经技术脑研究计划”（简称“脑计划”），欧盟实施“人脑计划（HBP）”，日本开展“Brain Minds”脑计划。各国均试图借助大规模的资金投入以及持续的技术研发驱动，深化对大脑工作机制的研究，并着力推进相关研究工具的开发与创新。

1. 美国脑计划进展与挑战

美国依托“脑计划”大力推进脑科学研究及相关工具的研发工作。2013 年，美国正式颁布“脑计划”，在神经科学领域明确七个优先研发方向，以推动阿尔茨海默病、精神分裂症、孤独症、癫痫以及创伤性脑损伤等脑疾病治疗技术的进步。

表 1 美国脑计划重点方向

优先发展方向	内容
1	研究不同类型脑细胞的实验研究方法，以确定其在健康和疾病中发挥的作用。
2	生成从神经突触到整个大脑的脑图谱。
3	改进神经活动的监测方法。
4	通过改变神经回路的神经调控手段在大脑活动与行为之间建立联系。
5	通过新理论和数据分析工具研究心理活动的生物学基础。
6	开发新技术来研究人脑并治疗疾病。
7	整合上述六个目标产生的新技术和概念方法，以理解认知、情感和行为。

来源：美国脑计划

美国“脑计划”在实施进程中有明确的阶段性目标。在前五年，该计划着重于工具的开发，以为后续研究奠定基础；在五年之后，其目标转向更为深入层次，即利用前期所开发的工具，深入探究大脑的工作原理以及各类脑疾病的致病机理。

2018 年 4 月，美国“脑计划”正式开启第二阶段战略规划。为助力该计划加速达到预期目标，美国国立卫生研究院（National Institutes of Health，NIH）专门组建了名为 ACD 的咨询委员会（Advisory Committee to the National Institutes of Health Director），为“脑计划”的实施推进提供专业指导与支持。

美国持续拨付的科研经费，体现了政府对脑科学研究及其医学临床转化应用的高度重视。在 2014 - 2023 年期间，美国政府对“脑计划”的投入累计超过 40 亿美元。这些投入经费明确划分为基础经费和补充经费两部分。**基础经费**在 2023 年之前呈现持续增长的态势，自 2023 年起投入额度开始减少。与之形成对比的是，**补充经费**自 2017 年开始拨付，此后逐年增加，2023 年开始大幅增长，使得“脑计划”的 2023 年经费额度达到历史新高。补充经费来源于 2016 年 12 月美国议会通过的《21st Century Cures Act》（21 世纪治愈法案）。该法案旨在为再生医学、“脑计划”、抗癌登月计划等四项科学研究提供 2017 至 2026 财年的长期资金支持。在这四项计划中，“脑计划”所获得的支持力度仅次于抗癌登月计划，累计获得 15.11 亿美元的拨款。这一数据凸显美国政府对“脑计划”的重视程度。

截至 2024 年底，美国“脑计划”已资助超过 1300 个研究项目，涵盖 168 所院校，**在大脑相关研究工具、技术以及疗法领域不断取得突破性进展。**在研究工具与技术方面，**2020 年，**科研人员借助高通量投射电子显微镜，绘制出神经元回路图谱，为深入理解大脑神经连接机制提供基础。**2021 年，**研究人员绘制出小鼠神经回路的结构与功能图谱，堪称全球规模最大、最为详细的连接组学数据集，推动了神经科学领域对大脑复杂网络结构的认知。此外，还研发出大视场双光子成像显微镜，可在活体大脑中实现神经元亚细胞分辨率的钙成像，为实时观测大脑神经活动提供了工具。**自 2022 年起，美国“脑计划”的研究方向逐渐转向应用验证。**深部脑刺激、脊髓电刺激等先进技术被应用于难治性抑郁症、卒中等疾病，取得了良好成效。科学家甚至还利用脑电信号重建出受试者所聆听的歌曲，这些成果展示了脑机接口技术的价值潜力。

来源：美国脑计划

图 2 美国脑计划的基础经费和补充经费

在推动以脑机接口为典型代表的脑科学发展进程中，美国多部门展现出协同合作态势。美国国立卫生研究院（NIH）率领下属 10 家研究所和中心在“脑计划”中发挥核心作用。同时，“脑计划”专门设立了多理事会工作组（Multi - Council Working Group，MCWG），以统筹协调各方资源与力量。此外，**美国国防高级研究计划局（DARPA）、食品药品监督管理局（FDA）以及美国国家科学基金会（NSF）等部门也从不同维度为“脑计划”提供支持。**以美国 FDA 为例，2023 年，其启动了产品全生命周期咨询计划（Total Product Lifecycle Advisory Program，TAP）试点项目，以为医疗器械开发提供涵盖整个生命周期的专业指导，其指导范围广泛，涉及研发、营销、运营、质量管控、业务拓展、保险规划、临床研究设计以及审批等多个关键环节。**参与 TAP 计划的指导单位除 FDA 外，还包括美国神经外科医师协会等在内的其他 61 家专业机构。**在该试点项目中，超过九成的参与者能够在提出咨询请求后的 14 天内获得专业回复，提高了医疗器械开发效率。2024 年 3 月，美国 FDA 正式加入“脑机接口协作社区”。该社区的参与方涵盖脑机接口领域的头部企业、医疗机构、患者团体以及投资方等多方主体，构建形成“技术验证–审批–商业化”的闭环体系，**有助于加速脑机接口技术从实验室研发到实际应用的转化进程**，临床转化的关键环节得以打通，有效解决监管指导流程缓慢、融资渠道不畅等难题。

自 2025 年起，美国的“脑计划”或将受到经费削减、人才外流

等影响。以美国国立卫生研究院（NIH）为例，2025 年第一季度，其科研经费同期减少 18 亿美元，很多在研项目暂停，高校科研间接费用拨款被砍削，差旅费与设备采购费受到严格限制。以往订购实验小鼠或显微镜零件仅需 2 周，如今需 6 个月，部分实验室甚至因资金链断裂而面临关闭危机。从白宫 2026 财年预算提案来看，科研经费呈现缩减趋势，或将影响到“脑计划”等科研项目。国际顶级学术期刊《自然》的调查结果显示，1608 名科研人员中，75.3%的人表示正在考虑离开美国，另寻科研发展之地。在受访的 690 名研究生中，548 人表达了离开美国的意向；在 340 名博士生中，255 人明确表示选择离开。

2. 欧盟脑计划协作机制与成果

2013 年，欧盟发起了一项为期十年的“人脑计划”（Human Brain Project，HBP），该计划作为欧盟“地平线 2020”框架计划下的旗舰项目之一，总投资额达 11.4 亿欧元。截至 2023 年项目结束，共有来自 19 个国家的 155 个研究机构、500 余位研究人员参与其中。**这一计划推动了脑科学领域多学科的交叉融合，构建起高效的协同创新网络。**

在成果产出领域，不同国家的科研团队在多个关键方向取得进展。在意识评估方面，意大利与比利时的科研人员构建了一套高灵敏度的意识评估方法，借助磁刺激技术与脑电图（EEG）技术，对

复杂的大脑反应进行精准测评，为深入理解意识状态提供技术手段。**在脑机理论研究层面，**德国科学家绘制了人类三维大脑图谱，全面呈现了人类大脑的微观结构、复杂的连通性以及各脑区的功能特性，有助于研究人员与临床医生之间建立沟通的桥梁。法国科学家基于患者的解剖结构、结构连接以及大脑动力学数据，为药物难治性癫痫患者定制出个性化大脑计算模型，模型能够精准模拟患者在癫痫发作期间大脑的异常活动模式，从而为外科手术提供精确的定位依据，提高手术的成功率与安全性。**在人机协同研究方面，**“人脑计划”聚焦于机器人行为控制、认知学习以及人机协同等前沿领域。西班牙、荷兰、英国和意大利的科研人员将脑科学与机器人技术融合，机器人具备记住地点的能力，显著提升其自主导航性能，为未来智能机器人的发展开辟新路径。**在疾病治疗领域，**瑞士联邦理工学院洛桑分校（EPFL）开发出个性化的脊髓刺激模型，使截瘫患者重新获得站立和行走的能力，为脊髓损伤患者带来希望，也为神经康复医学的发展做出贡献。

在科研产出方面，欧盟的“人脑计划”成果丰硕，共促成 3137 项出版物问世。其中，发表于《Nature Neuroscience》《Neuron》等国际顶级学术期刊的论文超过 400 篇。**在 15 个国家催生了 92 项专利，**这些专利覆盖多个前沿领域，包括但不限于脑机接口技术、多模式神经调节技术、神经形态计算、癫痫发作预测技术、医学图像分析技术、肢体康复技术、睡眠优化策略、辅助外骨骼装置以及神经成

像技术等。这些成果不仅推动了脑科学研究的发展，也为相关技术的临床应用与产业化奠定基础。**搭建了具有重大战略意义的 EBRAINS 神经信息学平台。**该平台在多个欧盟国家部署节点，构建起覆盖广泛、高效协同的网络体系。平台汇聚了数百种工具，为科研人员开展前沿研究、解决复杂科学问题提供便捷的数据共享渠道与研究支持服务。部分工具在脑科学研究领域占据关键地位，值得科研界予以高度关注。

表 2 EBRAINS 中具有战略地位的工具

重点工具	工具介绍	特点
知识图谱	一个元数据管理系统，用于查找和共享软件、模型和数据。包括搜索、编辑、查询构建、统计和 API 功能	2195 个贡献者，1064 个数据集，4 个元数据模型
OpenMINDS 神经科学图形数据库元数据框架	元数据模型被 EBRAINS Knowledge Graph、EBRAINS Atlas Service 和 The Virtual Brain（TVB）采用	正被 Japan Brain/MINDS 项目采用
EBRAINS Curation Workflow	管理工作流，确保元数据根据 OpenMINDS 框架准确地输入到知识图谱中	通过数据描述符以标准化和可互操作的格式访问数据
Siibra 工具套件	用于探索人类、大小鼠和猴的大脑微观区域细节，研究多模态数据的特征，包括 siibra-explorer、交互式 3D 图谱查看器和编程 Python 客户端	与知识图紧密集成，允许无缝查询语义和空间锚定数据集
虚拟大脑（TVB）	将经验数据整合到个性化大脑网络模型中，提供全面的方法来理解大脑功能。用于构建、运行和整合神经质量模型，使研究人员能够研究大型神经元群体的动力学	是 EBRAINS 平台的重要组成部分，是全脑模拟的强大工具
NEST	用于研究大脑连接，学习过程和神经模式，促进大规模神经元网络的模拟和了解大脑动态，可在高性能	模拟能力被公认很强大

	计算环境中实现，是大型复杂模拟的理想工具	
Neuron	用于帮助建模神经元，模拟神经元和脑网络。是最常用的细胞级模拟工具之一	也可用于网络级模拟，无缝集成了各种硬件平台，允许从单细胞到大型网络的模拟
Arbor	集成大型数据集，高分辨率模型，可高性能模拟尖峰神经网络，在细胞水平层面实现神经元计算	性能和可扩展性出色，适用于需要密集计算资源的通用模型。对研究复杂大脑功能的研究人员很有价值

来源：欧盟脑计划

(四) 中国脑机接口政策与区域发展布局

1. 国家政策体系构建

党中央和国务院重视以脑机接口为代表的未来产业发展，多次就其发展做出重要指引。脑机接口是当前科技领域的前沿热点，其研究和发展需要攻克一系列基础理论和关键技术难题,具有前沿性、创新性、高成长性、战略性和不确定性等特点，是未来产业发展的典型代表，是推动我国科技水平迈向世界前沿的重要力量。习近平总书记在中共中央政治局第十一次集体学习中明确指出，要着力培育壮大新兴产业，积极布局建设未来产业，以此不断完善我国的现代化产业体系。这一战略部署不仅体现了国家对科技创新和产业发展的高度重视，也为我国未来产业的发展指明了方向。

多部委协同发力，为脑机接口技术指引方向，并着力营造有利发展环境。2016 年，我国《“十三五”规划纲要》明确将“脑科学

与类脑研究”纳入“国家重大科技创新和工程项目”范畴，标志“中国脑计划”全面启动实施。2021 年，国家“十四五”规划《纲要》将脑科学确立为重要战略方向，凸显其在国家科技战略布局中的关键地位。**工业和信息化部**从任务实施、标准推动和政策指引多方面推动脑机接口技术与产业发展。自 2023 年以来开展“未来产业创新任务揭榜挂帅”和“人工智能医疗器械创新任务揭榜挂帅”工作，将脑机接口技术作为重点方向。成立工业和信息化部脑机接口标准化委员会，加强脑机接口标准化建设，发挥标准对产业技术的支撑引领作用。2025 年 7 月，工业和信息化部联合国家发展改革委、教育部、国家卫生健康委、国务院国资委、中国科学院、国家药监局发布《关于推动脑机接口产业创新发展的实施意见》，提出五大重点任务和三个重点工程，有力推动技术创新与产业发展。2024 年，**科技部**发布《脑机接口研究伦理指引》，从伦理层面为脑机接口领域的研究活动提供了规范框架，确保相关研究在遵循科学伦理原则的前提下有序开展。2025 年促进脑机接口产业发展的利好政策密集出台。**国务院办公厅**在《提振消费专项行动方案》中明确提及脑机接口，旨在加速推动该领域技术与产品的开发、应用及推广。此外，还印发《关于全面深化药品医疗器械监管改革促进医药产业高质量发展的意见》，针对脑机接口设备提出予以优先审评审批，提升了产业创新效率。**国家医保局**印发《神经系统类医疗服务价格项目立项指南（试行）》，为脑机接口技术单独立项，为该技术在临床领

域的广泛应用提供支持。**国家药监局**公开征求《关于优化全生命周期监管 支持高端医疗器械创新发展的举措（征求意见稿）》的反馈意见，并批准《采用脑机接口技术的医疗器械 用于人工智能算法的脑电数据集质量要求与评价方法》医疗器械行业标准修订项目立项，规范了脑机接口医疗器械的研发、生产与监管流程。

2. 区域产业布局与试点探索

多地发布政策，指引脑机接口发展方向。2025 年 1 月，**北京市**颁布全国首个专门聚焦脑机接口技术的政策文件——《加快北京市脑机接口创新发展行动方案（2025 - 2030 年）》。方案明确将脑机接口作为发展重点，提出要加速研发进程，推动多领域应用。仅隔两日，**上海市**发布《上海市脑机接口未来产业培育行动方案(2025 - 2030 年)》，聚焦未来产业培育，旨在通过政策引导和资源整合打造具有国际影响力的产业集群。2025 年 5 月，**四川省和山东省**相继印发《四川省脑机接口及人机交互产业攻坚突破行动计划（2025—2030 年》《山东省脑机接口产业科技创新行动计划（2025—2027 年）》，为脑机接口产业的快速发展提供政策保障。

此外，国内多地也积极推动脑机接口产业发展。南通市政府牵头组建了生物医药未来产业（长三角）创新联合体，专门设立脑机接口工作方向，有利于整合长三角地区优势资源，促进产学研深度融合和协同发展。**湖北省、浙江省**在 2025 年上半年相继给出脑机接

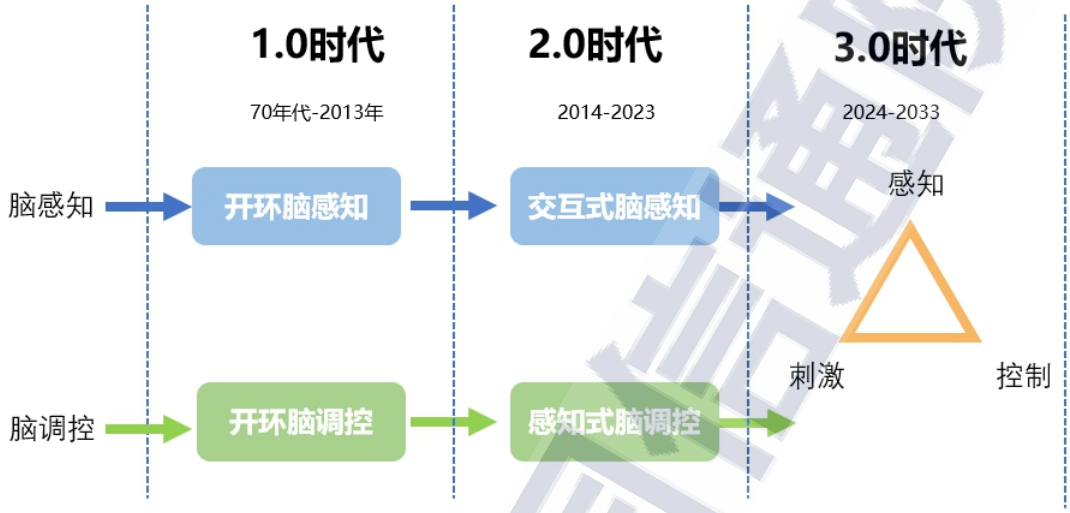
口的医保定价，填补了脑机接口医疗服务价格空白，解决了因收费标准模糊而导致的产品落地难问题。明确的医保定价为医院采购脑机接口设备以及开展技术应用提供了清晰的成本参考，有助于增强医院采购信心，推动脑机接口技术在医疗领域的进一步应用。

二、脑机接口技术发展现状

（一）脑机接口技术按双路线发展并分三阶段演进

自 2013 年起，全球多国相继启动为期十年左右的脑科学研究，显著加速了脑机接口的技术革新与产业化进程。**基于脑计划实施的时间节点与技术演进特征，可将脑机接口技术在横向上分为脑感知技术和脑调控技术两条演进路线，在纵向上分为三个时间阶段。**1.0 **时代（2013 年前）脑感知与脑调控技术各自独立发展，**该阶段脑感知与脑调控技术以单向采集或刺激为主，缺乏双向交互能力与闭环能力。2.0 **时代（2014-2023 年）脑感知交互性提升，脑调控走向闭环，**在脑计划资源投入下，脑机接口技术呈现两大突破，一是脑感知技术交互化，多种开源工具、智能算法使复杂抽象的脑感知结果可理解性加强，输出更为实时准确，实现流畅的交互体验。二是脑调控技术感知化，即从开环刺激转向闭环调控，如脑起搏器可基于感知结果动态调整刺激参数。3.0 **时代（2024 年起）感知、刺激、控制技术融合发展，**随着多国的脑计划进入后半程，脑机接口技术向深度融合演进，不仅能精准感知大脑活动信号，还能依据这些信

号对大脑状态进行调控，同时实现对外围设备的有效控制，为用户提供更自然、智能的交互体验。



来源：中国信息通信研究院

图 3 脑机接口技术发展阶段

1.1.0 时代：脑感知与脑调控独立发展

（1）开环脑感知

在 1.0 时代，EEG、MEG、fNIRS 等无创脑感知技术主导发展，但空间分辨率与侵入性矛盾突出。有创技术如 ECoG、fUS 等使用范围受限，仅用于科研，临床转化存在困难。

脑电感知技术在 1.0 时代，以无创的 EEG、有创的 ECoG 和阵列电极为主。无创 EEG 技术的时间分辨率为毫秒级，空间分辨率为毫米级，易受肌电、眼电伪迹干扰。设备形态为头盔式或网状电极帽，需导电膏降低接触阻抗，使用不便。典型应用为癫痫监测、睡眠分期分析。有创的 ECoG 和阵列电极能直接记录皮层神经元电活

动，信噪比高于无创技术，但需开颅手术植入。设备形态多为软质宏电极和硬质电极阵列，主要用于癫痫病灶定位研究。

脑磁图技术在 1.0 阶段的时间分辨率为毫秒级，空间分辨率优于 EEG，但对环境磁场敏感。设备以全头盔式超导量子干涉仪（SQUID）阵列为主，需液氦冷却维持超导态。典型应用为进行功能区定位，如语言区术前规划、癫痫灶定位等。面临动辄千万的高成本，需定期补充液氦的维护复杂问题，而且受限于 SQUID 传感器技术，无法做到设备小型化。

功能近红外脑成像技术在 1.0 时代的时间分辨率 1-10Hz，空间分辨率约 1cm。设备形态为多通道光纤探头阵列。典型应用为认知神经科学研究、婴幼儿脑功能评估。但该时期的设备穿透深度有限，无法探测深部脑区，易受头皮血流干扰，需复杂算法校正。

（2）开环脑调控

在 1.0 时代，脑调控技术经历了从基础研究到临床转化的转变。人工耳蜗、DBS 等有创电调控技术与无创磁调控技术率先实现商业化，神经反馈等调控技术仍处科研验证阶段。

电调控技术在 1.0 时代并存有创与无创两大方向。有创电调控技术的临床导向开始明确，技术路径清晰且走向商业化。人工耳蜗在 1977 年商业化，技术走向微型化与智能化，在 2000 年后从单通道向多通道演进，且支持算法升级，但言语识别仍受噪声干扰。脑

起搏器在 1987 年被批准用于帕金森病治疗，技术演进中开始支持动态调整刺激参数，但存在手术风险、电极移位等问题。无创电调控技术被用于治疗抑郁症、慢性疼痛等，安全性高但空间分辨率低，且存在个体差异大，缺乏统一刺激参数标准，临床效果可重复性低等问题。

磁调控技术在 1.0 时代空间分辨率优于经颅电刺激，1985-2000 年的早期阶段主要用于神经科学基础研究，2008 年后获批可用于治疗抑郁症，标志着技术取得临床转化突破。该阶段磁调控技术结合导航技术可实现个体化靶点定位，精准度得到提升。但穿透深度有限且个体差异大，导致需反复校准，且疗效持久性差。

神经反馈技术在 1.0 时代实现了实时算法升级，从简单阈值比较发展为机器学习驱动的动态反馈，设备形态更加便携化，被用于自闭症治疗、癫痫控制等。但该阶段存在质疑有效性的声音，且长周期训练才能见效，患者依从性差，缺乏统一训练协议，不同实验结果可比性低。

超声调控技术于 2008 年被首次在小鼠模型中证明可调控运动皮层活动，验证无创神经调控可行性。2012 年开启人体研究先河，对初级体感皮层的超声调控可记录到体感诱发电位变化。技术创新趋势朝向无创、深部脑区调控发展。但调控精度受到颅骨的密度、厚度及非均匀性影响，长期安全性未知。

光调控技术于 1973 年首次被用于观察神经元活动，开启光学方

法在神经科学中的应用。2000 年左右，光遗传学与近红外光调控兴起，实现毫秒级神经元激活或抑制，2007 年光遗传学在活体动物中的可行性得到验证。2010 年以后，光遗传学从基础研究向临床前应用拓展，探索其在帕金森病、癫痫等神经疾病中的治疗潜力，近红外光调控技术逐步应用于神经退行性疾病。但存在光穿透深度与散射限制，长期安全性未知，光热效应或光机械效应对神经元的调控机制尚不明确，可能引发非特异性效应。

2.2.0 时代：脑感知交互性提升，脑调控走向闭环

（1）交互式脑感知

多国政府从 2.0 时代开始重视和支持脑机接口技术发展，使得技术突飞猛进，**呈现技术路线多条，产品形态多样，功能多元的特点。**由 BrainGate 主导的**阵列式犹他电极系统**，在全球范围内已成功植入数十名患者体内。该系统凭借其精准的信号采集与分析能力，助力患者实现脑控打字等人机交互功能，为肢体运动障碍患者开辟了新的沟通途径。Neuralink 推出的**柔性微丝电极系统**能帮患者流畅地操控高难度游戏，展现信号传输与解码方面的高效性和稳定性，为人机交互提供了新途径。Synchron 研发的**血管内电极系统**与前沿科技紧密融合，其系统搭载 OpenAI 公司的大模型、英伟达公司的芯片以及苹果公司的智能头显，患者仅需通过思维活动，就能控制家居设备的开关、调节温度等，为患者的日常生活带来便利。

在国内，上海阶梯医疗自主研发的脑机接口系统完成前瞻性临床试验，标志着国产**柔性微丝电极系统**取得重大突破，为神经康复、人机融合等应用场景提供了技术支撑。北京脑科学与类脑研究所主导的**皮层表面微电极阵列**（ECoG）系统帮助失语患者重建交流能力，提升了患者的生活质量和社会融入感。博睿康的 ECoG 系统帮助患者实现自主喝水等脑控功能，患者脊髓损伤的临床评分有显著改善。

在脑机接口技术的发展进程中，2.0 **时代的脑感知技术解码与分析能力获得提升，展现出更为友好的交互性能。**脑感知技术不再仅仅满足于获取脑信息，得益于算法的优化、计算能力的增强以及多学科交叉融合，2.0 **时代的交互式脑感知技术能够精准捕捉和清晰揭示大脑的实时状态，**如大脑在正常生理活动下的神经活动模式，以及在病理状态下出现的异常信号。基于强大的解码分析能力，**脑感知技术与各类外接设备建立起高效的连接并交互，应用场景得以拓展**。例如，在医疗健康领域，通过精准分析脑电信号的异常变化，提前预警癫痫、卒中等疾病的发作先兆。该技术还能检测佩戴者的脑疲劳状态并及时发出提醒，避免事故发生。2.0 时代的交互式脑感知技术能将渐冻症患者脑意图转化为语音和文字显示在屏幕上，实现患者与外界的有效交互，提升其生活质量和尊严。

——有创的脑电感知技术

2.0 时代，有创的脑电感知技术创新聚焦电极和算法，电极的工艺设计、植入损伤、分辨率等方面不断突破传统局限，算法软件在

脑电信号可解释性、解码还原度和解码速度等方面不断进步，为脑科学研究与临床应用带来了新的机遇。

从电极体积来看，呈现不断减小的趋势。中国科学院上海微系统与信息技术研究所运用垂直堆叠方法，将柔性探头与 Intan 放大器芯片直接集成到印刷电路板上，这一微型化设计使探头面积减少 50%以上，重量降低 75%以上，降低了植入难度，还减少了对脑组织的占用空间。

从电极植入损伤来看，也呈现不断减小趋势。韩国首尔国立大学研发出可通过注射器进行微创植入的帐篷类电极，在植入后能扩大 200 倍，从而更好地适应脑组织的形态。这种电极还具备生物降解性，避免了二次手术取出的风险，减轻了患者的痛苦和负担。佐治亚理工学院研发的微创脑机接口系统尺寸不到一平方毫米，微小的尺寸进一步降低了植入过程对大脑造成的损伤。

从电极性能来看，呈现采集更加精准的趋势。为了实现更精准的脑电信号采集，电极与大脑的贴合度至关重要。中国西北工业大学设计的电极基底采用了细菌纤维素这一特殊材料，并且采用了蛇形布局。细菌纤维素具有良好的生物相容性和柔韧性，能够更好地适应大脑表面形态，蛇形布局增强了电极与大脑的贴合度，确保了电极准确定位在目标脑区，精准采集脑电信号。北京大学采用超薄的柔韧塑料薄膜，制备出具有 1024 通道的高密度神经探针，分辨率达到微米级，可捕捉到更为细微的神经活动信号，为探究大脑的神经机制提供了工具。

从算法软件来看，解码能力显著提升。美国布鲁克林纽约大学提出基于深度学习的新型神经语音解码框架，将复杂的 ECoG 信号转换为具有明确可解释性的语音参数。使研究人员和临床医生更直观地理解语音产生过程中的大脑活动模式。美国约翰霍普金斯大学利用循环神经网络对 ECoG 信号进行精准识别与解码，捕捉到语音节奏等细节特征，使解码还原度大幅提升。日本大阪大学提出基于 Grassmann 核的映射函数，在保证解码精度的前提下，大幅提高信号解码的效率，有助于脑机接口技术在实时交互场景中应用。

——无创的脑电感知技术

2.0 时代，无创的脑电感知技术创新聚焦核心器件和算法软件方面，使得信号采集质量、佩戴舒适性等方面都取得了进步。解码能力提升也使得大脑功能定位、意图识别、运动控制更精准，这些成果为临床诊断和治疗提供了有效工具。

从电极性能看，采集能力、舒适性和实用性显著提升。无创电极作为无创脑电感知技术的关键部件，**信号采集质量更高，**中山大学研发的微针干电极贴片相较于传统的扁平结构，在信号质量上实现了大幅提升，信号精度达到了单个微针水平，为后续的数据分析和处理提供了基础。**佩戴更加舒适。**德国伊尔梅瑙技术大学开发的新型干电极由多个呈花状排列的倾斜针脚组成，此种设计改善了佩戴者在坐姿和仰卧姿势下的舒适度。利于长期卧床人群的长时程舒适佩戴，可连续监测脑电信号，为临床诊断和治疗提供数据支持。

长续航使得产品更具有实用性。加州大学伯克利分校用干式镀金电极研制出一款入耳式脑电耳机，其螺旋形的设计与头部较为贴合，信号干扰明显减少。耳机由甲基丙烯酸酯聚合物制作，可连续 40 小时不间断采集脑电信号，并能自动检测佩戴者的嗜睡情况，准确率高达 93.3%，可长期监测脑疲劳，在驾驶安全监测、工作疲劳预警等领域具有应用前景。

从算法软件看，无创信号的解码能力得到提升。德国柏林自由大学使用新型超高密度脑电系统和体感诱发电位绘制大脑中央沟图，单个通道分类出大脑中央沟前部或后部的准确率达到 95.2%，解析到的大脑功能电生理特征表征与植入电极达到的水平相当，有助于在定位大脑功能区域时，降低侵入性操作带来的风险。**意图识别和运动控制更精准。**印度贝内特大学提出基于深度时间网络的模型，能准确识别运动想象脑电信号，在二分类和多分类数据集上的分类准确率达到 99.7%和 84%，可精准捕捉用户的运动意图，实现更自然、高效的人机交互和运动控制。**算法模型更加具可解释性。**美国休斯顿大学使用模拟方法生成混合不同比例噪声的脑电信号，以此验证不同模型解释方法在时间精度、频率干扰和空间定位等方面的稳健性。这种方法有助于研究人员深入理解算法模型的工作原理，评估其在复杂环境下的性能表现，为算法的优化和改进提供依据。**用户控制更加便捷。**德国人工智能研究中心利用迁移学习方法训练解码分类器预测运动意图，无需进行繁琐的校准过程，降低脑电通

道数量，简化使用流程，提高了系统的实用性和普适性。

——脑磁图技术

2.0 时代，传统脑磁图的超导材料革新、集成与小型化、算法软件优化方面取得了显著突破和进展，同时无液氦技术兴起，设备趋于小型化和可穿戴化，这些进步推动了脑磁图在神经科学基础研究、临床疾病诊断、康复医学以及人机交互等多个领域的应用。随着技术的不断发展和完善，脑磁图有望在未来发挥更大的作用。

传统超导量子干涉器件（SQUID）脑磁图仪的超导材料特性不断优化。在超导材料革新方面，研究人员不断探索和改进低温超导材料的纯度、晶体结构和制备工艺，以提高 SQUID 的灵敏度、稳定性和工作温度范围，使得 SQUID 能够在更接近绝对零度的条件下稳定工作，同时提高了对微弱脑磁信号的探测能力。**在设备小型化方面，**微纳加工技术和先进封装工艺在 2.0 时代大幅进步，从而使单个传感器的尺寸缩小到了毫米级别，数百甚至上千个通道的 SQUID 传感器可集成在一个芯片上，以精确地捕捉大脑不同区域的磁场变化，为研究大脑功能提供了更详细的信息。**在算法软件优化方面，**SQUID 脑磁图仪的实时信号处理能力得到提升，能在毫秒级别内完成对脑磁信号的处理和分析，实现对大脑活动的实时成像和反馈。基于贝叶斯理论、独立成分分析和深度学习等方法，脑磁图与脑电图、功能磁共振成像信号有效融合，这些融合分析方法利于癫痫病灶定位、认知功能研究和神经精神疾病诊断。

原子磁强计技术为脑磁图带来技术路线变革，在降低成本与提升效率方面展现优势。传统脑磁图装机量全球仅数百台，主要原因在于传统脑磁图设备要求低温运行，对运行环境要求苛刻，运维成本高，导致广泛应用受限。2024 年，我国脑磁图技术取得突破。北京昆迈医疗、未磁科技自主研发的无液氦的原子磁强脑磁图相继上市，这些新型设备能在室温环境下实时、无创探测大脑神经活动产生的磁场信息，信号强度优于传统技术，具备一致性高、鲁棒性强以及多通道无串扰等优势。**在设备形态方面，整机朝向可穿戴发展。**以 275 通道的 SQUID 脑磁图设备为例，重约 450kg，并且要求被测试者的头部相对于传感器必须保持静止，使用存在诸多不便。基于原子磁强计技术的探测器可缩小至硬币大小，同时成本大幅降低。英国公司 Cerca Magnetics 的此类设备仅重 905g，还可根据需求量身定制，确保传感器与测试者不同类型的头皮直接接触，从而保证信号采集的准确性。该设备已被加拿大多伦多 SickKids 等医院投入使用。

——功能近红外脑成像技术

2.0 时代，功能性近红外光谱技术（fNIRS）持续进步，**分辨率与实时成像等硬件能力提升，多模态融合等算法优化了成像质量，整机出现便携化与可穿戴化趋势，实用性更高。**

在硬件设计方面，该技术实现了分辨率的提升、实时成像能力的增强，以及与脑电图（EEG）等多模态技术的深度融合。英国伦敦大学借助漫射光层析成像技术，采用重叠空间采样策略开展 3D

脑功能成像研究，提高了空间分辨率与成像精确度，在优化成像质量的同时降低了成本。Kernal 公司将 fNIRS 与 EEG 等多模态技术融合，从多个维度获取大脑活动信息，提升了对大脑功能研究的全面性和准确性。

在整机设计方面，fNIRS 设备正朝着便携化与可穿戴化方向演进。其轻量化的设计能更好地适应各类移动场景，例如用于儿童注意力监测以及评估运动员脑功能。范德堡大学与斯坦福大学医学院研发出一款可穿戴 fNIRS 头环，重量仅 142 克，数据传输频率达 10 Hz，电池续航时间可达 5 小时，实际应用较为便利。

在应用领域拓展方面，fNIRS 技术的应用场景日益广泛。在医疗领域，该技术被应用于重症病房患者的意识检测。英国劳森健康研究所与加拿大西部大学的研究人员在重症监护病房中，运用 fNIRS 技术对严重脑损伤后处于昏迷状态的患者进行残留意识检测。这种检测方式操作简便，易于床边部署，为临床诊断提供了新手段。此外，**fNIRS 技术在早期诊断认知功能衰退方面也展现出巨大潜力。**希腊塞萨利大学利用该技术探寻阿尔茨海默病、轻度认知障碍等疾病患者大脑功能衰退的生物标志物，相关研究表明，fNIRS 可用于神经功能衰退的诊断评估。除了在医疗领域的广泛应用，**fNIRS 技术还逐渐渗透到社会生活的多个层面。在评估人际关系方面，**澳门大学提出了“人际神经同步现象”的概念。研究表明，情侣、亲子等具有特定亲密关系的人群，其额叶、颞叶和顶叶脑区的

活动模式呈现出较高的一致性，这一发现为深入理解人际关系提供了神经科学层面的视角。**在评估人与环境关系方面，**伊朗塔比阿特莫达勒斯大学的研究人员通过测量被试处于不同温度环境下前额叶皮层的 fNIRS 信号变化，确定了环境温度对体感舒适度的影响，为环境与人体交互研究提供新的技术手段。

（2）感知式脑调控

脑调控技术在 2.0 时代，核心突破在于新增了感知功能，并由此进化为感知式闭环调控模式，为个性化精准治疗提供支撑。目前，无创 EEG 电极与有创电极成为主流感知手段。基于精准的感知结果，脑调控技术综合运用电刺激、磁刺激、光刺激、超声刺激以及神经反馈等多种神经调控方式，根据实际需求进行单一刺激或组合刺激。

脑调控技术在与脑感知技术融合的演进路径中，主要呈现出三条主线：其一，传统脑调控技术功能优化，以提升性能与稳定性；**其二，**催生出具备全新形态与功能的产品，拓展脑调控技术的应用边界；**其三，**将多种现有技术手段组合，创造出更具优势的调控解决方案。

第一条演进路径是在传统脑调控产品基础上进行功能拓展，新增关键的脑感知功能。在这一进程中，国际与国内企业均取得成果。例如，美国美敦力公司与意大利 Newronika 公司先后研发出具备闭环功能的自适应脑深部电刺激系统。美敦力的脑起搏器能够精准捕捉患者大脑内与疾病症状紧密相关的特定脑电信号，为精准治疗提

供了基础。中国企业诺尔康研制出基于神经反馈的闭环人工耳蜗，能够精确提取和分析因外部异响反馈所引发的大脑神经反馈信号，精准定位大脑意图抑制的噪声频段并加以抑制，有效减少使用者遭受的噪声伤害。

第二条路线衍生出全新技术形态，兼具感知与调控双重功能。与在传统脑调控产品基础上进行优化改进不同，此路线采用全新的设计方案，产品具备小型化与微创化特征。例如，美国公司 Nia Therapeutics 研发出一款微型植入物，能实时感知患者记忆力衰退信息，并基于人工智能与云分析技术，对患者大脑实施精准的电刺激干预。美国公司 Inner Cosmos 研制出治疗抑郁症的脑机接口植入物，体积为 Neuralink 植入物的五分之一，仅需刮除毫米级厚度的头骨，无需深入大脑内部。近两年的临床研究结果显示，首批受试者的抑郁症状得到了明显缓解。

第三条路线是对传统脑感知与传统脑调控技术进行组合创新，旨在提升整体调控效果。例如，复旦大学将成熟的 TMS 技术结合到可穿戴脑磁帽上，通过实时采集运动区 8 通道脑电信号分析受试者脑功能状态，即时匹配多种 TMS 磁疗方案，并根据实时数据反馈更新磁疗方案，取得了满意的康复效果。德国公司 Neuro11 利用脑电检测运动员的压力状态，并基于神经反馈技术训练运动员的专注力，使其赛场表现更稳定。

在脑调控技术的 2.0 时代，调控方式呈现出愈发多元化的态势。

电刺激、磁刺激、神经反馈等调控手段得到普遍应用，光刺激、超声刺激、热刺激等新兴调控技术也逐步开启应用探索之旅。**在脑电感知与光调控结合方面，**美国公司 JelikaLite 与美国罗格斯大学罗伯特伍德约翰逊医学院的联合研究结果显示，EEG 脑电感知结果可用作自闭症患儿大脑活动变化的生物标志物，对患儿大脑特定区域进行经颅光调控。经过 8 周的治疗，患儿症状减轻，沟通能力和社交互动能力均得到提升。**在脑电感知与超声调控结合方面，**韩国成均馆大学研制了闭环经颅超声神经刺激系统，可在癫痫发作前，通过检测高频振荡信号及时启动经颅超声，并根据神经活动的调整刺激强度，从而抑制癫痫发作。

3.3.0 时代：“感调控”走向一体化

在脑机接口技术的 3.0 时代，感调控一体化技术出现智能化与融合化趋势。

智能化特征主要体现在四个方面。**其一，信号采集与解码智能化。**传统脑机接口技术主要依赖人工标注特征完成信号解码，此种方式效率低且泛化能力较差。智能化技术借助卷积神经网络、循环神经网络等深度学习算法自动提取信号特征，从而提高解码精度。以 Neuralink 的芯片为例，已达到每分钟解码 12 个单词的水平，且错误率低于 5%，性能超过传统算法。**其二，多模态融合与闭环控制迈向智能化。**单一脑电信号容易受到噪声的干扰，影响系统的稳定

性和准确性。鉴于此，当前的脑机接口系统开始整合脑电、功能近红外、眼动追踪等多模态数据，并运用多传感器融合算法，有效提升系统的稳定性。例如，清华大学开发的动态脑机接口系统，能够实时调整解码策略，以适应不同个体的差异以及任务的变化。**其三，自适应学习与个性化校准成为可能。**智能化的脑机接口系统具备持续优化模型参数的能力，能很好地适应用户状态的变化。加州大学的脑机接口系统帮助瘫痪患者通过想象动作操控机械臂，相对传统只能工作 1-2 天的设备，通过人工智能自学习破解神经信号漂移难题，实现连续 7 个月无校正的新突破。**其四，应用需求推动产品智能化升级。**渐冻症、脊髓损伤等患者对脑机接口的高精度、低延迟控制需求迫切，这要求系统必须具备实时响应能力。加州大学伯克利分校将瘫痪患者的意念解码为自然、流利和清晰的语言，解码速度达到新高，相对之前的每分钟 28 词，90 词速度解决了神经语音解码的实时流畅问题。

融合化特征主要体现在以下三个关键方面。**其一，融合多技术手段。**例如，多种脑感知技术相互融合，或是多种脑调控技术协同应用。以丹麦企业 Insai 为例，其开发出一款用于增强认知的可穿戴产品。将脑电感知技术与功能近红外脑成像技术深度融合，实现了多模态的脑感知功能。同时还结合了磁刺激调控技术，这种多技术融合的方式有效提升了人类的认知功能。**其二，融合多种功能。**脑机接口系统不再局限于单一功能，而是同时具备感知大脑功能、调

控大脑功能以及对外交互控制功能。以智能座舱设计为例，在智能座舱环境中，系统利用多模态信息融合技术，综合分析驾驶员的脑电波、情绪状态以及注意力水平。在此基础上，结合触控、手势等多种交互方式，智能调整座舱的氛围、音乐播放以及座椅状态等，从而全方位提升用户的驾乘体验。**其三，学科之间交叉融合。**随着脑机接口技术的不断发展，其对神经科学、计算机科学、工程学等多个领域的跨学科合作需求日益迫切,跨界合作的案例也愈发常见。德国 Marburg 大学在《ACS Nano》期刊发表了一项研究成果，联合了 97 位不同领域的作者，共同探讨纳米材料在脑机接口中的应用。作者涉及纳米科学、制药学、细胞生物学等多学科领域。此外，清华大学集成电路学院与天津大学脑机海河实验室开展合作，将忆阻器芯片作为自适应脑电解码器，在硬件效率和解码准确率方面取得突破性进展，这也是学科交叉融合推动脑机接口技术发展的例证。

(二)技术效能、安全性与应用进展

脑机接口由 Jacques Vidal 于 1973 年正式提出，发展至今已历经五十余载，完成了从理论构想到工程实现的关键跨越，**目前正处于从实验室走向应用的关键窗口期。**

脑机接口技术的安全性不断验证。其一，技术创新保障植入过程安全。美国公司 Synchron 采用血管内植入方式，无需进行开颅手术，降低了传统脑机接口植入手术带来的风险。美国公司 Precision

提出新型颅骨微缝技术，在颅骨上做 400 微米宽的切口，将薄薄的电极如同投递信件一般，通过切口狭缝植入颅内，不需要钻孔或开颅手术。2025 年 4 月，中国科学院自动化研究所公布其缝纫机式机器人，精度超越人手肉眼极限，具有自动化程度高、可植入数量多、空间定位准、时间效率高、灵活避让血管等优势，有效提高电极成功率和植入效果。**其二，植入体对人体造成的安全风险可控。**BrainGate 的安全中期报告指出，从 2004 年到 2021 年，14 名成年人植入犹他电极平均 872 天，未发生取出类安全事件和设备不良意外事件，未发生颅内感染、死亡或永久性致残。Synchron 在《JAMA Neurology》杂志公开其技术在植入 4 名重症患者后的长期安全性结果，其系统植入 12 个月后没有出现血管阻塞事件，也没有出现与装置相关的不良事件。Neuralink 最新公开数据显示，其植入电极附近的神经元 98%保持活性。**其三，新型材料降低植入损伤。**2025 年 5 月，美国公司 Axoft 的超软植入电极被批准用于研发目的的销售。其材料柔软、透明不膨胀，柔软度是现有聚酰亚胺材料的 1 万倍，比硅材料柔软 100 万倍，适于规模化制造，其商业化标志着这一材料从实验室走向实际应用。

可应用技术不断涌现，相继获得官方认可。2025 年 2 月，美敦力自适应脑起搏器获得美国 FDA 批准，可为帕金森患者提供更为个性化的治疗，显著改善患者的运动功能和改善生活质量。2025 年 5 月，Neuralink 的大脑植入设备“Link”获得美国 FDA 的突破性设备

认定，可协助渐冻症患者用人工智能合成声音，以及控制光标。2025 年 4 月，美国公司 Precision Neuroscience 的脑机接口系统被 FDA 批准用于临床，从短期变为可植入 30 天，**显著提高公司收集高质量神经数据的能力，有助于系统优化性能。**

脑机接口技术虽已展现出一定的安全性，正处于蓬勃发展的关键窗口期，仍面临诸多问题有待解决。**技术层面，**电极与芯片等核心元器件缺乏统一标准，不同技术路线并行发展，可能导致资源分散与兼容性难题；信号采集与处理的精度、稳定性尚待提升，难以实现精准的人机交互。**应用层面，**当前报道的应用案例仍为小样本，大多技术新近研发和应用，长期效果有待观察，个体应用效果差距仍然较大，距离实际应用仍需时日。此外，较长的审批注册周期、高昂的研发成本和应用成本，限制技术大规模普及。**市场层面，**大量资本涌入，部分企业估值虚高，技术落地速度远不及预期。过度宣传让公众产生不切实际的过高期待，这种误导可能引发后续的信任危机。**法律层面，**隐私保护、脑数据安全以及责任界定等复杂议题短期内难以快速解决，可能引发公众对技术的担忧与抵触。且快速发展的技术难以及时制定出适配的监管办法，对技术的快速落地和应用造成一定困扰。这些问题若不能妥善处理，将阻碍脑机接口产业的快速发展，错失当前窗口期。

（三）技术发展的协同创新模式

脑机接口技术演进是通过多学科边界拓展与深度融合实现的，这种协同创新模式已成为未来产业典型特征。在基础研究到工程化应用的全链条创新过程中，脑机接口技术发展既需要神经科学领域对脑功能机制的突破性认知，也离不开电子工程与信息技术在信号处理、算法优化方面的技术支撑，同时依赖先进制造与材料科学在器件开发、系统集成等环节的关键突破。这种创新范式是通过跨学科资源整合与协同攻关实现的，涉及科研机构、产业界、资本市场的多维度资源投入与系统化支持，当前全球范围内具有里程碑意义的脑机接口技术成果，普遍建立在多主体协同创新的基础之上。例如，洛桑联邦理工学院、洛桑大学医院与瑞士医疗器械企业 Onward 联合开发的脑-脊髓接口技术，标志着神经工程领域重大突破。相关研究团队由来自美国、法国等 9 个国家的 69 名跨学科专家组成，专业领域覆盖神经外科、转化神经工程、神经修复学、诊断与介入放射学等 12 个学科方向。研究团队还包含基金会的科研管理人员，以及医疗科技巨头美敦力的临床转化专家，充分体现基础研究、临床应用与产业转化的深度融合。

另一典型案例来自美国脑机接口企业 Synchron，**在技术研发层面，**其微创血管内神经接口技术已获得多国科研资助体系支持，包括美国国防高级研究计划局的国防科技创新基金、海军研究办公室

生物医学技术计划、澳大利亚国家健康与医学研究委员会旗舰项目资助，并得到澳大利亚联邦政府医疗创新基金及运动神经元疾病研究所的支持。**在技术应用层面，**Synchron 与 NVIDIA 合作，以增强终端侧的实时信号处理能力，建立人工智能模型和多模态数据的统一框架，提供响应更快、更直观的用户体验，同时与苹果公司在系统底层打通协议标准，使 iOS、iPadOS 等操作系统支持脑控方式的用户操作。**这种跨国别、跨部门、跨行业的资金配置模式和合作模式，凸显了脑机接口技术在研发中和应用中对多层次资源整合的需求。**

脑机接口的国内外合作呈现出深化、拓展和多元化的趋势。当前，多国政府、企业、高校、研究机构等在推动脑机接口技术和产业发展时，更重视跨部门和跨领域的合作，更强调资源整合、知识共享和生态共建，从而加速了脑机接口从实验室走向产业化的步伐。以北京市为例，北京脑科学与类脑研究所在市级资金支持下成立“北脑-天坛临床医学转化实验室暨赵继宗院士工作站”，参与北京天坛医院的脑机接口临床与转化病房工作，构建了基础研究到临床转化的协作网络；与清华大学电子工程系共建“神经信息与认知计算联合实验室”，突破脑电信号解码与神经接口硬件设计的学科壁垒。这种协作架构通过专家交叉任职、数据资源开放共享及设备平台共建，实现神经科学、临床医学与电子信息工程领域的深度耦合。

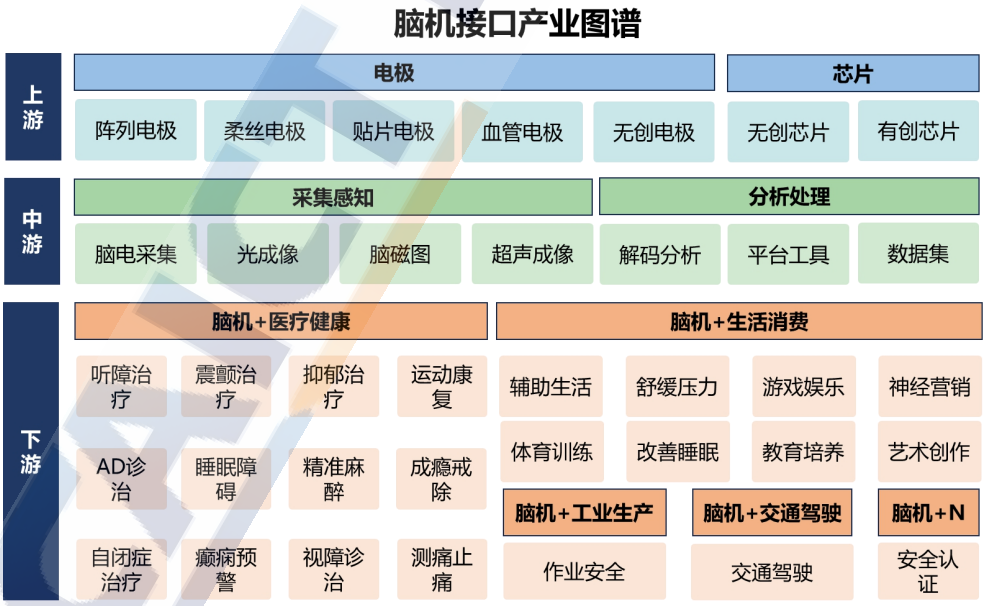
国际层面，美国国立卫生研究院通过申报机制强化跨学科合作。其发布的“脑科学前沿探索性项目”明确要求申请团队整合神经活

动机理研究与大规模记录神经信号经验，推动神经生物学、生物医学工程及临床医学领域的交叉融合。**欧盟通过组织架构设计实现跨国协同，依托人脑计划构建起大规模神经科学协同网络。**项目实施期间汇聚 19 国 155 家核心机构，并通过 76 个伙伴关系项目吸纳 15 国 33 个组织参与。项目结题后形成覆盖欧洲 22 国 112 个研究机构的持续性协作体系，为大规模开展神经信息学、神经形态计算等交叉研究提供平台支撑。以上这些模式为全球技术发展提供了可借鉴的协同创新路径。

三、脑机接口产业发展情况

（一）产业链全景概况

脑机接口产业链按上游（电极和芯片）、中游（采集感知和分析处理）和下游（医疗健康、生活消费、工业生产等）进行划分。



来源：中国信息通信研究院

图 4 脑机接口产业链

1.上游

脑机接口产业链的上游企业数量占比为 8%，上游技术和产品主要涵盖核心元器件，其中电极与芯片是关键组成部分，当前该技术领域尚未形成统一标准，**有创电极**技术各有优劣，呈现出多家企业主导不同类型电极并行发展的态势。**第一种为阵列式犹他电极，**美国公司 Blackrock 研制，起步早且应用范围广，人体临床案例多，电极植入时间长，积累了深厚的技术储备和相关经验。**第二种为柔性微丝电极，**美国公司 Neuralink 和中国公司阶梯医疗是典型代表，此技术难度大，采集到的信号质量好。**第三种为血管内电极，**美国公司 Synchron 是典型代表，此类电极通过类似于心脏支架手术的成熟介入方法递送到大脑血管内，降低了植入风险。**第四种为皮层表面微电极阵列（ECoG），**美国公司 Precision、北脑、微灵医疗等在积极研发，此类电极通常植入在大脑硬脑膜附近，未触及皮质层，植入风险相对小。**无创电极**主流技术为干电极和凝胶电极，此类供应商数量多，全球均有分布。脑机接口**芯片**也分为有创和无创两类，目前正朝向计算存储传输一体化、小型化和高通量化方向发展，美国公司 Neuralink 已研制出集成度非常高的此类芯片。

2.中游

脑机接口产业链的中游环节，主要涉及感知和分析脑神经活动的系统、软件以及平台，全球企业数量占比 37%。在感知脑神经活

动的技术手段上，主要包括电、磁、光、超声这四种方式。

基于电方式感知和分析脑信号的技术发展最为成熟，脑电图机、事件相关电位仪、脑电分析仪等产品种类丰富，大多已经取得二类或三类医疗器械注册证。众多国家都有从事该领域的企业，如美国公司 COMPUMEDICS、中国公司博睿康等都是行业内典型代表，其产品为脑神经活动的监测和研究提供技术支持。**基于磁方式感知脑信号的技术主要为磁共振设备和脑磁图仪。**此类设备体型庞大，运维成本高昂，导致使用范围和频次相对较低，主要应用于科研和医疗等特定场景。美国企业 Ricoh 等在该领域具有代表性，中国企业北京昆迈也正逐渐崭露头角。**基于光方式感知脑信号的产品以功能近红外设备（fNIRS）为主。**这类产品技术相对成熟，日本企业 Shimadzu 的产品功能丰富，在市场上占据着较高份额。丹阳慧创等中国企业也在不断进行产品创新。**基于超声方式的脑信号感知技术属于**前沿研究领域，但具有巨大的发展潜力，值得行业高度关注。其中，超快功能超声成像（fUSI）技术能够通过检测血流动力学的微小变化来反映神经元活动，具备高时空分辨率的显著优势。法国国立卫生与医学研究所的 Mickael Tanter 教授团队在该领域长期深入研究，取得诸多成果。美国公司 Butterfly 正在研制一款微型超声芯片，兼具采集和调控功能，还将集成音频生成、控制和记录等多种功能，有望为脑机接口技术带来新突破。

3.下游

脑机接口产业链的下游企业全球占比 55%，技术和产品主要聚焦于特定应用场景，**可划分为医疗健康、生活消费、工业生产、交通驾驶应用等若干类别。**

在医疗健康领域，众多脑机接口企业致力于研发面向神经、精神和感官三大方向疾病的诊治方案，如诊治听力障碍、认知障碍、睡眠障碍、抑郁症、卒中、成瘾、自闭症以及疼痛等。例如，美国企业 SPARK Neuro 研制认知障碍早筛技术，通过精准的脑电信号分析，实现对认知障碍的早期发现与诊断；中国景昱医疗研发了双靶点脑深部电刺激技术，用于成瘾防复吸，为成瘾患者提供了新的治疗途径，可将复吸率从常规手段的 90%降至 20%。从成熟度看，听力障碍、震颤治疗、抑郁症治疗、运动康复等个别应用领域，已有人工耳蜗、脑起搏器、基于脑电的运动康复训练设备等产品取得三类或二类医疗器械注册证。视障治疗、成瘾戒除等相关技术大多处于临床试验阶段。**在医疗健康领域，以收并购模式整合产业链资源的趋势显现。**2023 年 10 月，Precision Neuroscience 并购微电子机械系统（MEMS）代工厂，以实现核心技术内部化生产，从而实现快速迭代。2024 年 2 月，Synchron 购买德国制造商 Acquandas 的部分股权，从而获得该制造商的分层技术独家使用权。2025 年 5 月，上市公司 Firefly Neuroscience 收购 Evoke Neurosicence，Evoke Neurosicence

擅长基于脑电图实现个性化神经调控，此次收购将助力 Firefly Neuroscience 补齐技术短板，为未来市场竞争赢得优势。

在生活消费领域，相关企业推出的脑机接口产品可面向多类群体。一方面，这些产品助力渐冻症、运动功能障碍等残障人士实现脑控打字以及操控各类设备，极大提升他们的生活自理能力和生活质量。另一方面，这些产品可用于监测健康人群的大脑健康状况，帮助舒缓压力，实现沉浸式游戏操控，甚至辅助艺术创作，优化消费体验，提高认知能力并改善睡眠质量。例如，中国企业念及科技、华南脑控研制的人机交互头环，在助残领域发挥重要作用；美国企业 Emotiv 的便携式脑电头环被广泛应用于艺术创造、无障碍设计、市场研究以及心理学等多个领域。

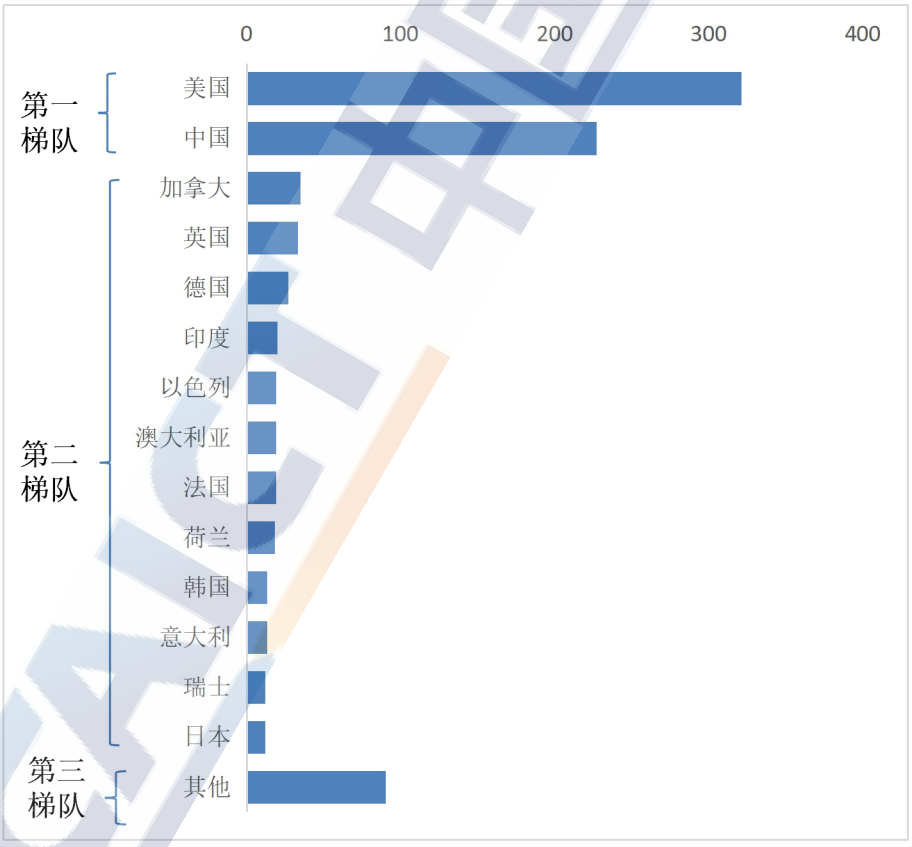
在工业生产领域和交通驾驶领域中，脑机接口技术展现出应用潜力，能够实时监测矿下、井下、道路、太空等不同作业场合中人员的疲劳状态，一旦发现异常情况，及时发出预警，从而避免事故发生。例如，山西帝仪、北京华脑等企业在该领域开展探索尝试。

在其他应用领域中，脑机接口技术还可以应用都更多元的场景中，例如，基于脑纹这一独特的生物识别特征，用于实现身份认证和安全验证，为安全保障提供新技术手段。例如，美国企业 Neuroreplicas 等在该领域进行探索与实践。

(二) 全球生态发展趋势

1. 全球企业梯队分布，中小企业占据主流

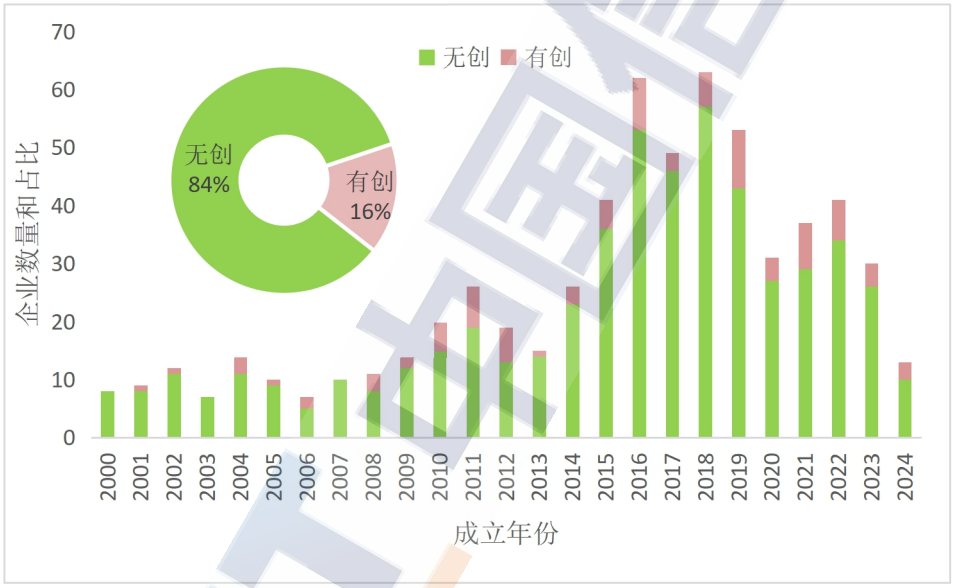
从全球脑机接口企业的类型分布来看，当前产业生态呈现出鲜明的特点，**即龙头企业稀少，上市企业占比不高，中小企业构成主力军。**据中国信息通信研究院的统计数据显示，脑机接口产业链的核心企业数量已突破 800 家，广泛分布于全球 50 余个国家。大多企业总部设在美国和中国。加拿大、德国、英国、印度等 12 个国家处于第二梯队，这些国家的企业在全球市场中的占比均不足 5%，虽有一定发展但尚未形成规模优势。第三梯队的国家企业数量均为个位数。



来源：中国信息通信研究院

图 5 脑机接口产业链分布的国家

自 2000 年以来，全球脑机接口新增企业虽存在一定数量波动，但整体呈现增长态势。2013 年起，随着多国相继启动脑计划，为脑机接口产业的发展提供了政策支持与资源保障，在此激励下，2014 年至 2019 年期间，全球企业增长速度加快。2020 年之后，受全球疫情蔓延以及经济不景气等多重因素的综合影响，每年企业增速放缓。在 2020 年至 2022 年期间，再掀发展高峰，每年新成立企业的数量正增长，展现出该产业具有一定的韧性与发展潜力。

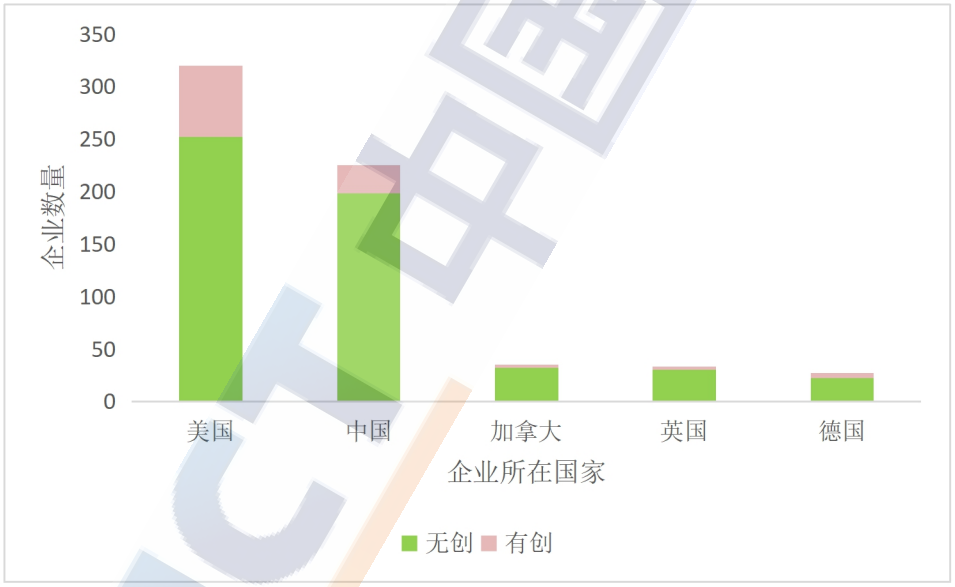


来源：中国信息通信研究院

图 6 全球不同技术路线的脑机接口企业增长趋势

按照有创和无创两条技术路线看，目前全球八成以上企业从事无创研发，近两成企业从事有创研发路线。美国、中国、澳大利亚等国，无创企业的数量均显著多于有创企业。这一现象背后的主要原因在于，无创技术路线更具安全性优势，市场接受度更高。在全球老龄化进程加速以及慢性病高发的背景下，可穿戴无创脑机接口

设备能针对老年人群和慢性病患者实现连续数据采集，高度契合慢性病管理对于长期、稳定监测的需求。此外，无创技术的低成本特性降低了研发门槛，使更多中小型公司得以参与其中，同时其商业化周期相对较短，能更快实现市场回报。基于这些因素，预计未来无创脑机接口企业的数量仍将持续增长，且在市场中的占比将更为显著。当前，市面上已有多种无创脑健康产品商业落地。例如，消费级睡眠监测设备帮助用户实时了解自身睡眠状况；正念冥想和认知训练提升设备辅助用户进行心理调节和认知能力训练，这些产品正逐渐走进日常生活。



来源：中国信息通信研究院

图 7 重点国家脑机接口企业的技术路线分布

在全球范围内，**聚焦有创技术路线的企业数量美国位居首位，中国紧随其后**。有创技术涉及手术植入等高风险操作环节，相关产品必须经过严格的伦理审查、多阶段临床试验以及长期的安全性验

证流程。复杂的流程不仅导致资金成本增加，还使市场回报周期漫长，诸多因素限制了企业参与研发的积极性与投入度。然而，就当前技术发展阶段而言，在应对某些特定疾病和满足特定需求方面，无创技术在可靠性和有效性上仍难以与有创技术匹敌，**在今后一段时期内，有创技术仍将保持着较高的技术壁垒，并在特定应用场景中具有不可替代性。**

2.我国企业呈集聚态势，民企成为主力军

据中国信息通信研究院统计数据显示，**我国脑机接口企业总量已突破 200 家**，这些企业广泛分布于 25 个省份。从地域分布集中度来看，约七成的企业集中在北京、广东、浙江、上海和江苏这五个地区，凸显了这些地区在脑机接口产业发展中的领先地位。

我国脑机接口企业对无创技术路线的倾向性高于全球平均水平，凸显国内行业在技术路径选择上更关注安全性与应用普适性。在全球脑机接口企业领域，84%的企业聚焦于无创技术路线的研发与应用，16%的企业投身于有创技术路线。相比之下，我国脑机接口企业中，采用无创技术路线的企业占比达 88%，有创技术路线的企业占比为 12%。这一比例差异表明，我国脑机接口企业在技术选择上，正呈现出更倾向于无创技术路线的趋势。

从产业链结构来看，我国脑机接口产业在中下游环节具有较强的产业集聚效应和市场活力。上游企业数量相对较少，近 30 家；中游

和下游企业数量较为接近，均达到 100 余家。

从企业规模构成来看，我国脑机接口产业仍以中小民营企业为主体。脑机接口产业联盟的统计结果显示，其会员构成中，中小民营企业的占比超过 50%，显示出中小民营企业为代表的创新力量正在崛起，在未来产业中发挥重要作用。例如，强脑科技被誉为“杭州六小龙”之一，多次进入《财富》杂志评选的“中国最具社会影响力创业公司”榜单，还入选《时代》周刊的百大发明。诺尔康在人工耳蜗领域实现了国产化突破，打破进口垄断局面，将产品价格降至 7 万元/台，使进口产品均价从 25 万元降至 15 万元，减轻了广大患者的经济负担，让更多患者能够受益于先进的医疗技术。

3. 政策技术资本协同发展，产业前景可期

脑机接口市场规模正因多种相关因素的协同作用而持续扩张。首先，**政策层面的有力支持为产业发展营造了良好的环境。**2025 年以来，中国多主管部委和地方政府出台支持脑机接口发展的政策或举措，有力推动临床试验的开展以及促进产业链各环节协同合作，加速产业链的布局进程。其次，**技术领域取得的成效增强了业界的信心。**例如，复旦大学加福民研发出脑脊接口微创技术使曾被判定“永远站不起来”的患者，在术后 24 小时恢复腿部运动，展示了脑机接口技术的潜力。再者，**应用场景的不断拓展为脑机接口市场开辟了更为广阔的空间。**脑机接口正逐步迈入多元应用探索的新阶段。

在医疗健康领域，除广泛应用于治疗帕金森、震颤、癫痫等疾病外，还在毒瘾戒除、强迫症治疗、自闭症干预、脑瘫康复以及阿尔兹海默症治疗等方面展现出价值。在非医疗健康领域，该技术同样发挥着重要作用，例如可增强运动员等群体的专注力，在高危作业场景中精准识别作业人员的疲劳程度，有效提升作业安全性。

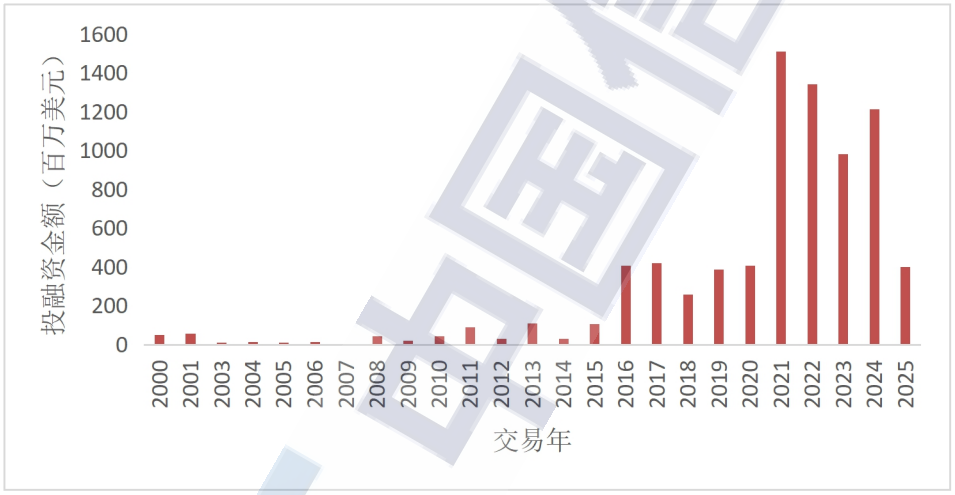
当前，脑机接口市场已达到数十亿美元规模，预计到 2030 年将突破百亿美元大关。全球脑机接口市场正处于“技术突破、临床验证、商业落地”的关键转折期。从产业链发展现状来看，上游和下游环节的集成发展程度相对较低，而中游环节则较为成熟。在此背景下，多家咨询机构预测，脑机接口的全球市场规模在数十亿美元范围。随着下游环节的逐步成熟，市场有望实现从百亿级向千亿级发展。据麦肯锡测算，全球脑机接口在医疗应用领域的 2030 年市场规模有望达到 400 亿美元，到 2040 年突破 1450 亿美元。美国摩根士丹利在 2024 年发布的研究报告《脑机接口：下一个重大的医疗技术机遇？》中预测美国医疗市场规模，认为商业化需 5 年时间，市场规模有望达到 4000 亿美元。

（三）投融资聚焦下游

全球范围内，脑机接口领域的投融资活跃程度呈现出显著攀升态势。据中国信息通信研究院统计数据显示，截至 2025 年 4 月底，在脑机接口领域，已公开披露的全球投融资交易笔数累计超过 1000 笔，

近 400 家脑机接口企业成功获得投资，投资总额接近 100 亿美元。

全球对脑机接口领域的投融资热情，自美国 2013 年发布脑计划后便开始持续升温，2021 年开始加速活跃，年交易事件数量屡次突破百笔大关。鉴于脑机接口领域具有技术门槛高、研发周期长的特点，目前该领域的投融资活动仍主要由具备专业背景的医疗基金或科技基金主导。这些专业基金为脑机接口企业的技术研发和市场拓展提供了创新支持。

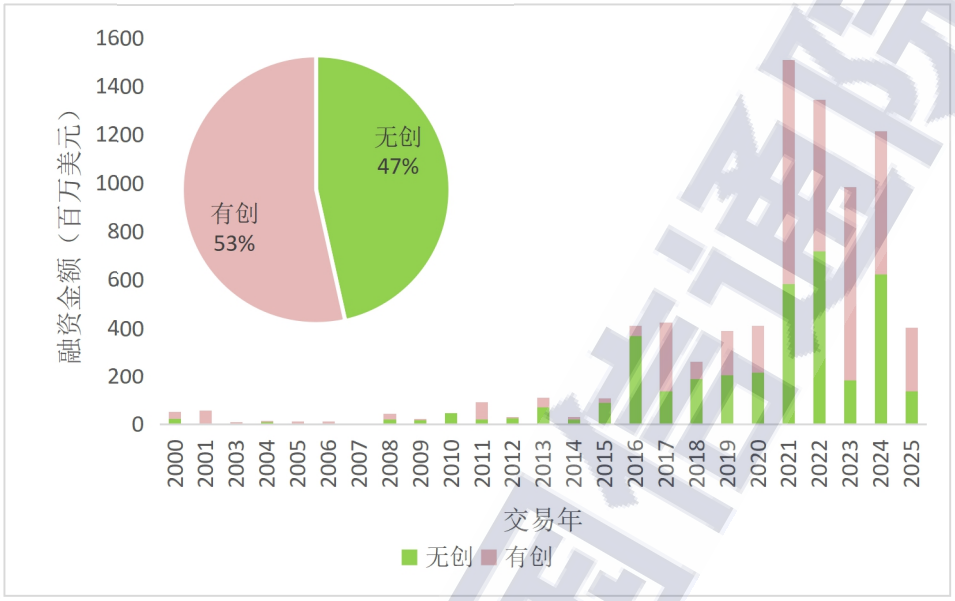


来源：中国信息通信研究院

图 8 全球脑机接口投资趋势

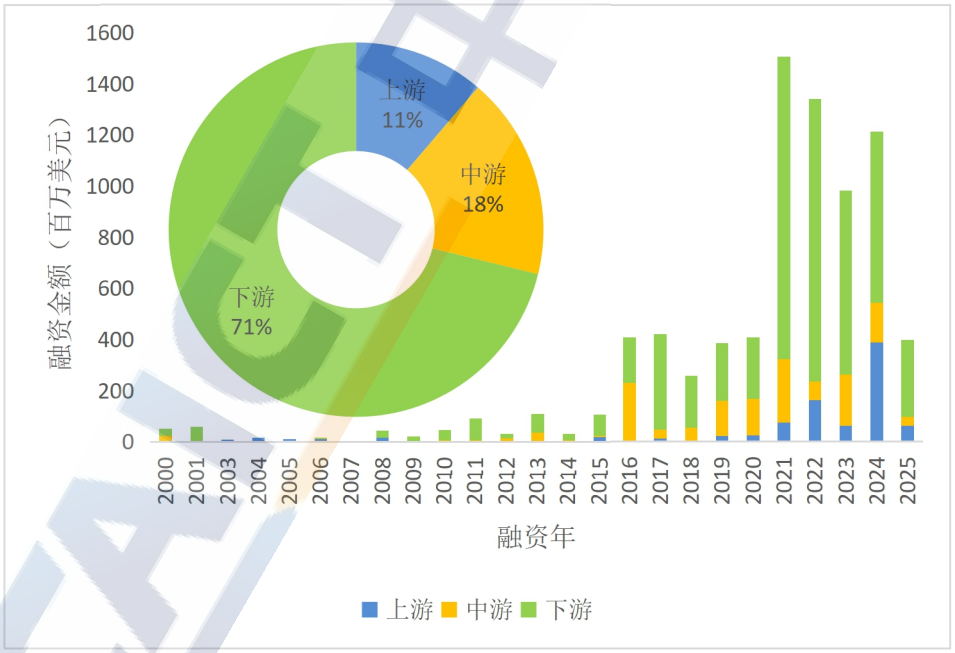
从脑机接口领域投融资的技术方向分布情况来看，全球范围内，聚焦有创技术路线的企业吸引了 53%的资金投入，无创技术路线的企业获得了 47%的资金份额。**自 2021 年起，有创技术路线企业的融资金额呈现出增长态势，**体现出资本方对有创技术更为重视。这一现象的产生，一方面是由于有创技术实现难度较高，其研发过程涉及复杂的手术植入、高精度的信号处理以及长期的安全性验证等多个环节，这些都需要大量的资金作为支撑；另一方面，有创技术在

满足特定医疗需求和实现更高性能方面具有独特优势，市场潜力巨大，因此对资本的需求更为迫切。



来源：中国信息通信研究院

图 9 全球脑机接口按不同技术路线的投资趋势



来源：中国信息通信研究院

图 10 脑机接口产业链各环节的全球融资趋势

从脑机接口产业链的投资分布情况来看，资金流向呈现出明显的差异化特征。具体而言，约一成的投资金额注入产业链上游环节，近两成资金流入中游，七成的资金则集中投向下游。从投资趋势的演变分析，**自 2021 年起，脑机接口下游领域获投资金额激增，**一定程度上反映出投资者对下游市场的信心显著增强，同时也表明产业落地方向正逐步趋于明确，相关技术在逐步走向成熟。

当前，**投资方在脑机接口领域的兴趣明显向医疗健康方向聚焦，且“投早投小”的投资态度成为趋势。**在脑机接口医疗健康领域，融资规模快速增长。2023 年该领域融资 3 亿美元，2024 年攀升至 6.13 亿美元。从投资阶段来看，**2024 年全球脑机接口行业在天使轮、种子轮和 A 轮等早期阶段的投资吸引力显著提升，**相比 2023 年增长 16%。在 2024 年的全球脑机接口行业融资事件中，超过 43%的投资事件发生在这些早期阶段。例如，Prime Movers Lab 领投脑机接口公司 Cognixion 的种子轮，投资金额达 1200 万美元；Arboretum Ventures 领投脑机接口公司 Motif Neurotech 的 A 轮，投资金额为 1875 万美元。

聚焦中国脑机接口领域的投融资趋势，总体呈现出积极向好的发展态势。在政策相继密集出台的激励下，以及国家积极倡导对前沿科技“投早、投小”的引导下，投资热度升温。据统计，中国投融资事件近 200 起，有 70 余家企业获得投资，其中近 50 家企业多次融资，多家产业化进展较快的企业的融资金额破亿元。

四、脑机接口发展展望

脑机接口是多学科技术的集中应用，体现出碳基和硅基技术的深度融合，以及数字化技术与智能化技术的融合。脑机接口的技术和产业不断迈向新的征程，其在多方面带来强劲的社会效益，在多领域应用带来可观的经济效益，将有望成为未来产业增长的引擎。

(一) 脑机接口技术创新不断进阶

脑机接口有助于进一步深化人机融合，实现智能交互。借助对神经信号的采集与解析、反馈与调控等手段，未来人机智能交互可能不再依赖预设程序，而是在真实场景中由人直接下达给设备，动态生成指令。被控设备也不再局限于单一设备，而是分布于大脑神经网络与外部智能终端的协同体系之中。技术发展趋势可能出现:**一是算法更加优化。**一方面脑机接口技术与深度学习、强化学习、生成对抗网络等算法的结合更加紧密，信号处理与交互策略得到优化，意图识别准确率和设备控制精准度提升。另一方面，脑机接口技术将以更高效、更节能的仿生模式带动智能计算技术、神经形态计算技术发展，未来将与人工智能技术、大模型技术等智能化技术产生更加深入的融合。**二是调控更加精准。**未来在深入理解各脑区之间的作用机制基础上，有望研制出能预测潜在风险并自适应调整调控策略的智能模型,在复杂多变的实际环境中动态生成调控策略，优化大脑整体功能。**三是深度协同。**脑机接口借助先进的传感器技术、

信号处理算法以及接口协议，实现与多种类型外设的高度兼容与协同工作，同时与云计算、算力形成深度耦合，将处理结果实时反馈至外设，使人机交互更加高效，协同完成复杂任务。

（二）脑机接口产业生态格局加速构建

一是具有早期发展优势的企业或将转型为开放生态平台型企业。在产品层面，硬件制造与软件开发走向融合。一些具有市场优势的企业不仅研发硬件设备，还将同步开发配套的数据处理和分析软件，以优化软硬件协同性能，提高系统的整体效率和稳定性。甚至还搭建开放式的脑机接口生态平台，提供标准化的接口和开发工具，降低开发门槛，吸引开发者、科研机构、医疗机构等各方参与，促进创新应用涌现，形成良性的产业生态循环。**二是上下游协同更加密切，收并购浪潮加速行业资源整合。**上游将与中游设备制造商、系统集成商，以及下游应用开发商的配合更加紧密。例如，定制开发高性能、低功耗的专用芯片，为设备的性能提升提供支持。一些创新步伐领先的领军企业和传统巨头接连入场，以收并购模式整合供应链，快速补齐产品短板和抢占市场。**三是跨行业入局者不断增多，竞争格局持续演变。**脑机接口应用领域广泛，未来将吸引科技巨头、医疗企业、汽车制造商等跨行业企业纷纷涉足，也将带来资金、技术和市场资源的整合。未来头部企业将凭借其强大的研发实力和资金投入，在高精度脑电信号采集、高效解码算法等核心技术领域占据

技术制高点。这些企业将主导行业标准和技术发展方向，引领产业进步。众多中小企业将凭借灵活的创新机制和对细分市场的深入了解，在细分领域形成差异化竞争优势。

（三）投融资体系发展更加多元包容共享

一是投资规模持续扩大。当前投资趋势已经清晰显现出，资本青睐技术突破型的系统集成整合类型企业，尤其是有创技术领域的企业。随着有创脑机接口技术的临床试验成功案例不断涌现，资本将加大对该领域的投资力度。特别是能将采集、解码、调控等关键技术进行有效集成和整合，取得重大突破的企业将成为投资热点。**二是投资阶段前移。**除了对成熟企业的投资，投资者将更加关注早期创业企业。在研发初期阶段的企业获得资金支持的机会将更多，从而更快完成技术验证和产品原型开发，加速产业的发展。**三是投资方向日益丰富。**医疗健康领域是脑机接口当前最核心的应用方向，存在刚性需求，且企业数量在下游占比显著，因此医疗健康领域的投资仍将持续升温，从神经系统疾病的治疗到精神疾病的干预，再到康复医疗和健康监测，都有望获得大量的资金投入。随着脑机接口技术在消费电子、智能交通等领域的潜在应用逐渐显现，这些领域也将成为投资的新方向。**四是融资渠道将更加多元化。**政府将通过设立引导基金，引导社会资本投向脑机接口产业。这些基金不仅可以提供资金支持，还能在政策扶持、产业对接等方面发挥积极作用，

促进产业的健康发展。此外，社会资本的活跃性也将更高，联合投资、风险共担等灵活多样的资金支持模式，将为企业发展提供更为充裕的资金保障，同时也将极大地调动社会资本参与脑机接口产业投资的积极性。多元化的融资渠道不仅缓解了企业的资金压力，还将加速脑机接口技术的创新与产品迭代,从而迎来脑机接口发展的春天。

中国信息通信研究院

地址：北京市海淀区花园北路 52 号

邮编：100191

电话：010-62304812

传真：010-62304980

网址：www.caict.ac.cn