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

集智白皮书 No.202321

脑机接口技术发展与应用研究报告

(2023 年)

中国信息通信研究院

脑机接口产业联盟

2023年12月

前 言

当前，脑机接口概念越来越多地进入公众视野，人们也更加深入地接触到各种新产品和新应用。脑机接口技术创新活跃，有望成为促进经济社会发展、改善民生健康的重要力量。我国政府积极推动脑机接口产业发展，相关政策和行动方案陆续发布。随着神经科学、计算机、电子、医学等技术的发展，脑机接口技术的工程化进度加快，产业发展提速，正在形成政策积极引导和社会广泛参与的良好氛围。

当前脑机接口技术主要应用方向在医疗领域，该技术能为癫痫、帕金森、抑郁、多动症、自闭症、截瘫、卒中、阿尔兹海默症、意识障碍、疼痛、耳鸣、听力受损、视力受损和睡眠障碍等神经相关疾病诊治带来新的解决方案，相关患者如果能受益脑机接口的创新成果、享受技术发展红利，是践行“以人民为中心”发展思想的集中且生动的体现。

脑机接口技术的潜力巨大，绝不仅限于用在医疗领域，脑机接口与多种外部设备的结合能带来多种应用方案，具有更为广阔的发展空间。在教育领域能提升认知能力和协助职业规划；在工业生产领域能协助安全监测保障作业人员安全；在体育领域能辅助运动员和教练提高训练效果；在消费领域能客观评估用户体验和优化产品设计；在航天航空领域能辅助训练和客观反馈训练者感受。脑机接口技术在不断造福于民的过程中彰显科技创新的意义和价值。

脑机接口的创新生态不断完善，技术持续深入迭代，产品服务供给日益丰富，融资活水持续注入，由此推动脑机接口的应用加速向规模化发展过渡。本白皮书紧密跟踪国内外脑机接口发展动态，从技术和应用维度总结全球最新进展，重点展现应用成效，研判未来发展前景，提出举措建议。希望为关注脑机接口的相关单位以及社会人士提供参考和帮助。

脑机接口已经历经五十年发展历程，多国为期十年的前期投入已助力脑机接口技术和产业从应用萌芽期迈入普及期，有望在十年内实现“应用解决方案效果良好，多类解决方案走向成熟”的目标。脑机接口是事关经济社会发展的战略性领域，其深化发展有利于我国在未来产业科技竞争中抢占制高点。本白皮书希望引发各界对脑机接口技术的广泛关注，深入了解该技术并充分重视其基础性作用和战略性作用，遵循其综合性特点推动大科学计划、大科学工程、基地平台等一体化建设运行，从而在更大范围、更宽领域、更深层次应用，推动未来产业向高端化和智能化发展。

图目录

图 1 国外政府资助的脑机接口立项金额（2013-2022 期间）..... 2
图 2 历年各技术路线新增脑机接口企业数量..... 4
图 3 历年重点国家新增脑机接口企业数量..... 5
图 4 脑机接口企业获得投资金额趋势..... 6
图 5 植入式技术路线企业获投情况..... 7
图 6 非植入式技术路线企业获投情况..... 8
图 7 常规 ECoG 和μECoG 阵列比较.....10
图 8 HI LLC 的光采集专利各受理局申请趋势.....19
图 9 脑机接口下游应用解决方案企业研发方向.....21
图 10 热点应用方向的脑机接口企业国家分布.....21
图 11 Orion 的电极放置和植入部位..... 24

表目录

表 1 脑机接口发展规律..... 38

一、脑机接口产业全球发展欣欣向荣

（一）“脑机+”特点突出，加快融入诸多领域

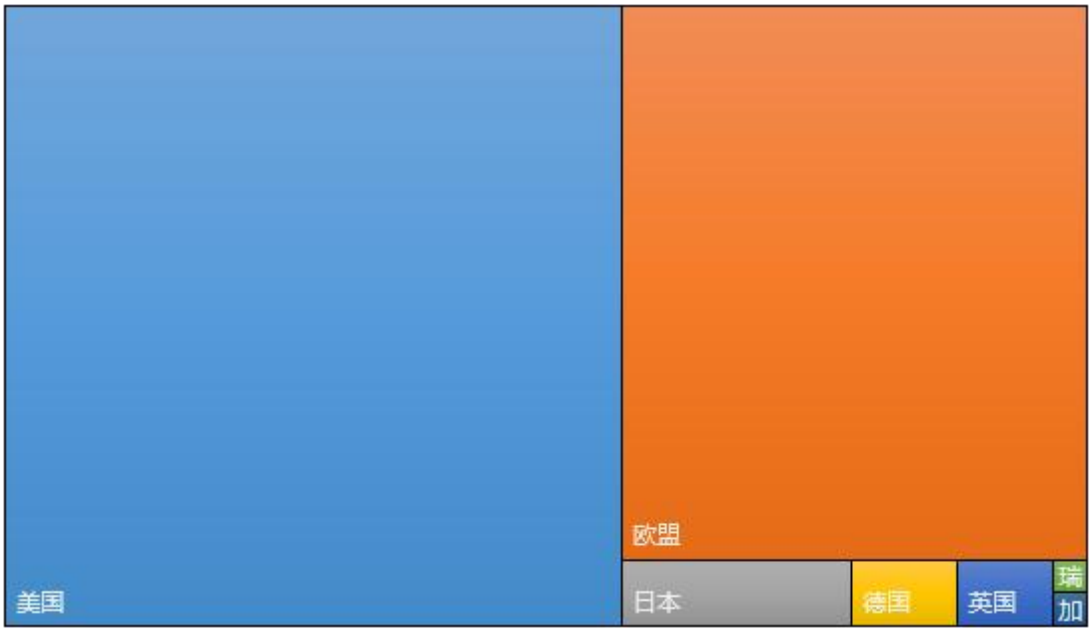
脑机接口技术能广泛适用于多种场景，并与多种外设结合。业界已广泛存在将脑机接口技术与安全帽、轮椅、外骨骼、无人机、汽车、虚拟现实头显等设备进行结合的案例。脑机接口技术与外部设备结合，**一方面促成新产品诞生**，比如脑控助眠仪、脑控鼠标、冥想脑状态监测等产品已经问世；**另一方面为传统解决方案提供新思路，**例如以神经反馈方式或神经刺激方式治疗疼痛、抑郁症、认知障碍等疾病。从全球实际应用情况看，脑机接口技术在医疗领域可辅助疾病诊断、预警发病和疾病治疗，在教育领域能提升认知能力和协助职业规划；在工业生产领域能协助监测保障作业人员安全；在体育领域能辅助运动员和教练提高训练效果；在消费领域能客观评估用户体验和优化产品设计；在航天航空领域能辅助训练和客观反馈训练者感受。

（二）发达国家高度重视，创新政策陆续出台

全球科技发达国家高度重视发展脑机接口，长期给与立项和资金支持。2013 年，**美国**启动“推进创新神经技术脑研究计划”（简称“脑计划”），2021 年该项目公布了在分子水平上绘制的哺乳动物初级运动皮层细胞类型特征图，是迄今为止绘制哺乳动物大脑最全面细致的图谱。美国在 2013 年脑计划之后持续进行脑机接口的科研投入，国立卫生研究院（NIH）、国家科学基金会（NSF）、国防高级研究计划局（DARPA）等政府部门资助了多家高校和公司开启脑机

接口相关研究，科研项目数量和资助资金总额全球领先。

欧盟 2013 年发起为期十年的“人脑计划（Human Brain Project，HBP）”，投入近 6.07 亿欧元，截止 2023 年 19 个国家的 155 个研究机构参与该计划，在人脑图谱绘制、癫痫和帕金森治疗方面有所突破。**日本**在 2014 年启动为期十年的“综合神经技术用于疾病研究的脑图谱”计划，2018 年绘制出狨猴大脑的 3D 图谱。韩国、加拿大、澳大利亚也陆续开展类似资助计划。



来源：NIH、NSF、European Comission、kaken 等，中国信息通信研究院

图 1 国外政府资助的脑机接口立项金额（2013-2022 期间）

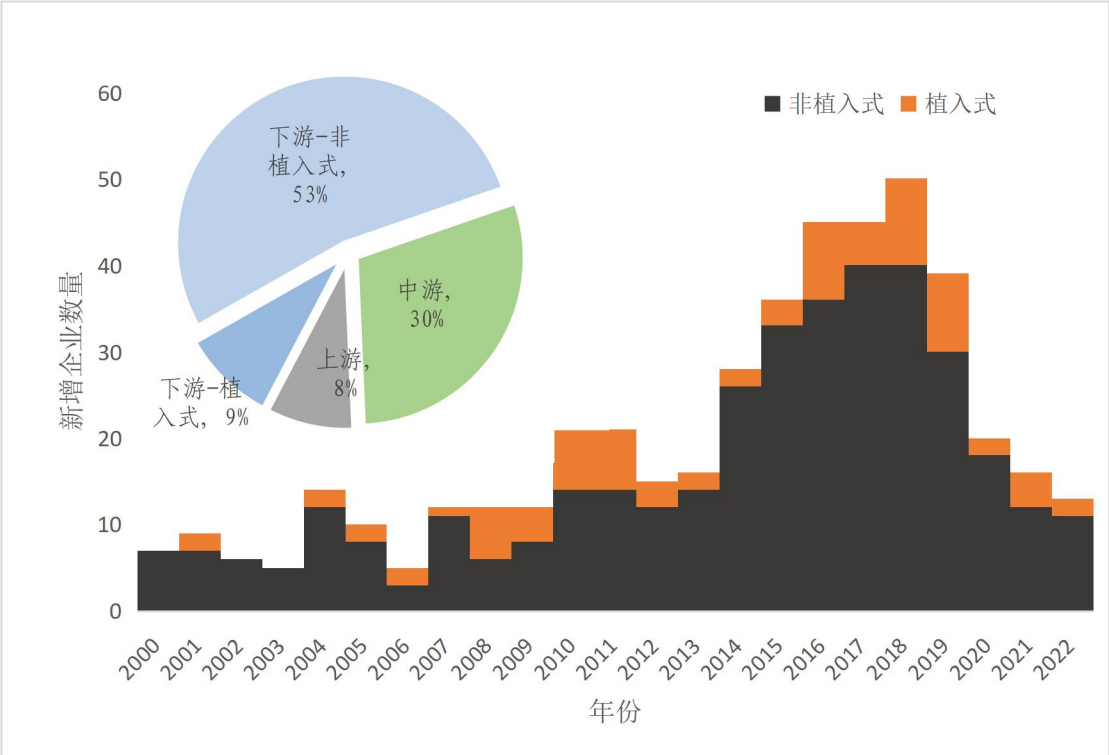
我国政府陆续发文为脑机接口指引发展方向和重点。2016 年我国《“十三五”规划纲要》将“脑科学与类脑研究”列为“国家重大科技创新和工程项目”，标志“中国脑计划”全面展开。近年来从中央到地方就发展脑机接口密集释放重要信号，指明发展重点和发展方向，并将脑机接口纳入未来产业。**在发展方向方面：**工业和信息

化部在 2023 年 8 月 22 日发布了《新产业标准化领航工程实施方案（2023—2035 年）》，脑机接口作为未来产业代表之一，是标准化工作的重点方向。工业和信息化部在 9 月 13 日发布《工业和信息化部办公厅关于组织开展 2023 年未来产业创新任务揭榜挂帅工作的通知》，脑机接口芯片、系统和多方向应用被纳入揭榜挂帅的任务清单。**在发展重点方面：**多省市将脑机接口纳入本省十四五规划，提出开展脑机接口基础研究，推动成果转化和广泛应用。个别省市还发布了区县级的脑机接口相关行动方案。上海浦东区科技和经济委员会在《浦东新区培育发展未来产业行动方案》中提出到 2030 年形成若干具有国际竞争力的未来产业集群，未来产业产值达 3000 亿元左右，脑机接口赫然在列。北京市经济和信息化局在 2023 年 9 月印发《北京市促进未来产业创新发展实施方案》，脑机接口是重点发展的 20 个方向之一，将进行技术攻关、创新平台搭建，以及加快脑机接口创新成果在临床医学、航空航天、智慧生活领域的成果转化和产业应用。

（三）新生企业增速下降，中美集聚创新力量

截至 2023 年第一季度，全球脑机接口代表性企业超 500 家。其中，**上游占** 8%，包括生产制造和销售电极、芯片、外设、相关核心器件的企业；**中游占** 30%，包括生产制造和销售医用及科研用工具、分析软件和采集设备的企业；**下游占** 62%，其中提供应用解决方案的植入式技术路线企业占比 9%，非植入式技术路线企业占比 53%。**从增长趋势看，企业新增速度下降。**美国“脑计划”的启动时间以

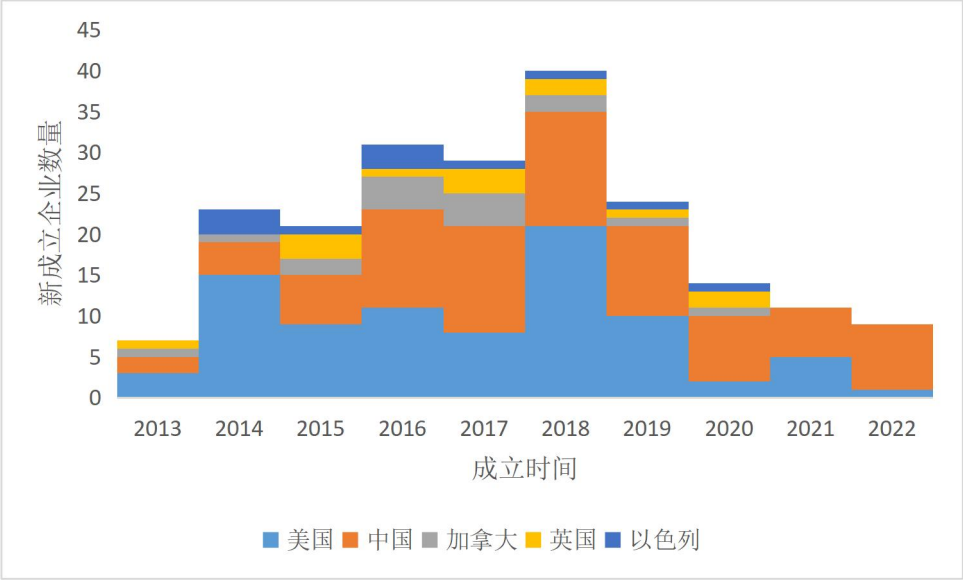
2013 年为分水岭，此时间节点之后脑机接口技术被业界看好，全球新增企业数量快速增长并持续到 2018 年。2019 年以后受疫情波及，供应链和合作交流一度受限，脑机接口技术应用前景尚不明朗，经济衰退导致投资人投资态度更加谨慎，轻资产特点的脑机接口企业获得资金渠道受限，部分企业倒闭以及新增企业数量放缓。**从技术路线看，非植入式技术路线企业居多。**全球 500 余家脑机接口相关企业中，20%从事植入式技术研发，80%从事非植入式技术研发。



来源：Crunchbase，CB，中国信息通信研究院

图 2 历年各技术路线新增脑机接口企业数量

从地域看，美国和中国是脑机接口企业重要来源国。全球脑机接口相关企业活跃在 40 余个国家，美国和中国企业数量破百，处于全球第一梯队，加拿大、英国和以色列的企业数量处于第二梯队，均超过 20 家。



来源：Crunchbase，CB，中国信息通信研究院

图 3 历年重点国家新增脑机接口企业数量

（四）金融投资更加谨慎，系统方案商倍受关注

脑机接口领域投资行为更加谨慎。2013 年至 2023 年第三季度，全球脑机接口领域风险投资累计近 800 笔，总金额超过 100 亿美元规模，获投企业近 300 余家，投资阶段包括天使轮、种子轮和 A 轮等，形式上还有债权和众筹等方式。2019 年至 2021 年期间脑机接口吸引大笔投资，投资额增速加快，2022 年以后年投资总金额有所回落，部分原因在于受疫情和经济衰退影响，脑机接口领域受全行业市场投资悲观预期拖累。此外也有部分原因在于个别投资交易信息不公开，无法纳入数据统计。不过脑机接口是未来最有可能取得突破的前沿科技，也是提升人类福祉的刚需，投资方对脑机接口技术落地前景总体而言持乐观态度，盈利期望寄托在具有较成熟系统解决方案的下游企业身上，因此虽然整体投资额度回落，但此类企业中研发进展较快的企业被资本竞相热投，单笔金额动辄破亿，估值

飙升。

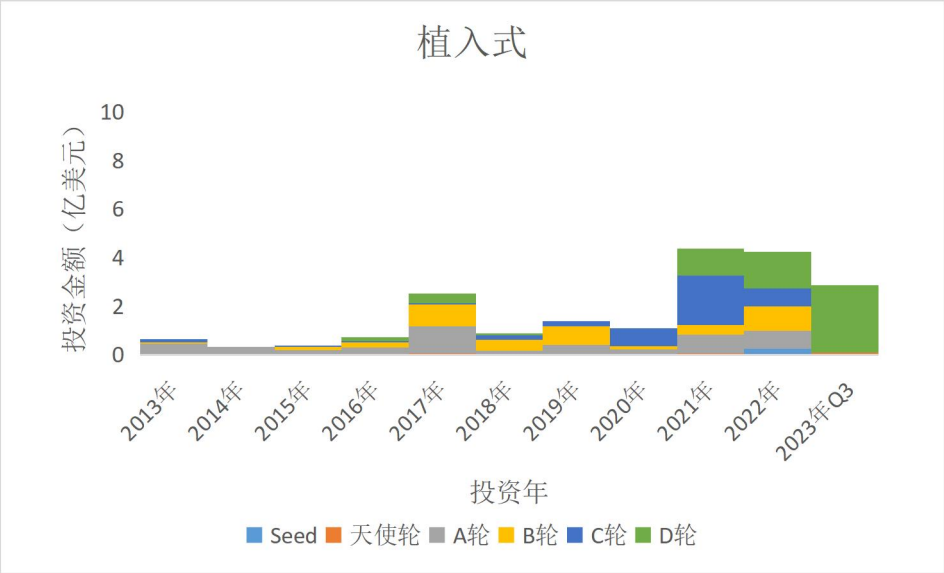


来源：Crunchbase，CB，中国信息通信研究院

图 4 脑机接口企业获得投资金额趋势

植入式技术个别企业融资轮次和规模不断升级。2013 年至 2023 年第三季度，植入式领域风险投资超过 40 亿美元，全球获投企业超过 50 家。**2021 年之后创新进展较快的植入式脑机接口公司备受资本关注，获得多轮融资且单笔金额过亿。**2023 年 8 月马斯克旗下的脑机接口公司 Neuralink 获得 2.8 亿美元的 D 轮融资，11 月再次获投 4300 万美元。美国脑机接口公司 Saluda Medical 从 2015 年至 2023 年融资 6 轮，2023 年筹得两笔资金均过亿。我国深圳市应和脑科学有限公司、上海脑虎科技有限公司（以下简称脑虎科技）、北京优脑银河科技有限公司融资金额也破亿。丰厚的资金持续注入推动公司创新加速；Neuralink 已经启动人体临床试验；Saluda Medical 的脊髓刺激系统获 CE 认证（欧盟监管批准）且已商用，脑虎科技在颞叶难治性癫痫患者上开展柔性神经电极人体临床试验，实现单神经元

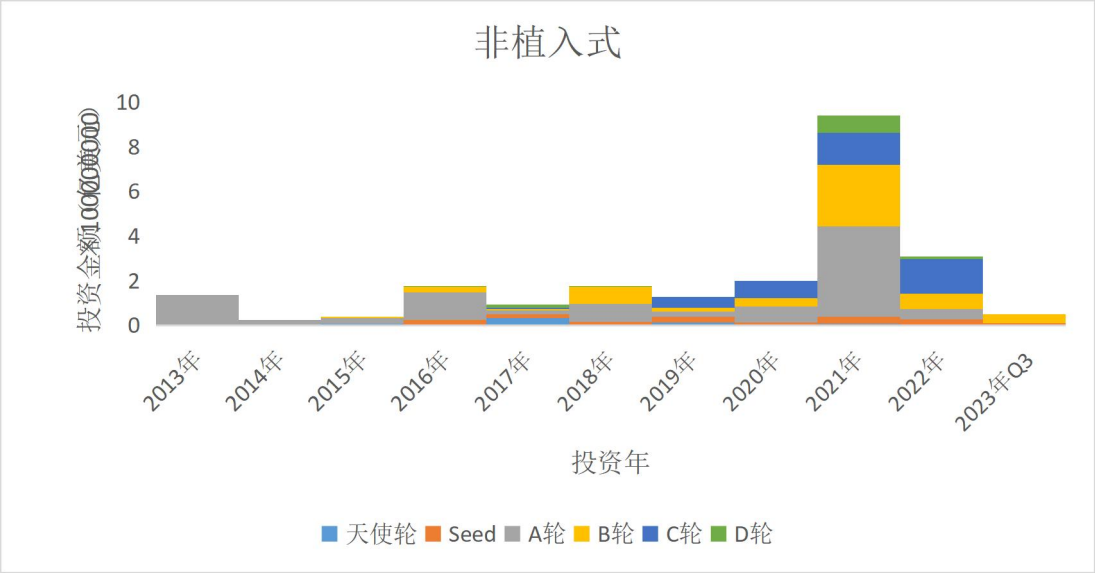
放电信号记录。



来源：Crunchbase，CB，中国信息通信研究院

图 5 植入式技术路线企业获投情况

大量非植入式技术企业吸引到投资。2021 年后投资方对非植入式技术信心加强，2013 年至 2023 年第三季度，非植入式技术风险投资超过 60 亿美元，全球超过 200 家企业获得投资。**2021 年非植入式技术融资向好，为企业发展注入“源头活水”。**非植入式领域 2021 年投资额超过 23 亿美元，相对上一年翻四倍以上，进入 A 轮、B 轮和 C 轮的资金明显增多，部分企业甚至进入 D 轮融资。



来源：Crunchbase，CB，中国信息通信研究院

图 6 非植入式技术路线企业获投情况

二、脑机接口标志性技术和产品创新涌现

（一）电极

1.非植入式电极

非植入式脑电采集设备的采集信号质量受核心器件电极影响显著。就非植入式电极最新研发进展看，包括：**一是改进材料以提升导电率，**浙江大学在电极的导电层中加入纳米粘土，改变了水凝胶与皮肤的接触特性，实现电极与皮肤紧密耦合。日本电子元器件制造商 MURATA MANUFACTURING（株式会社村田制作所）利用具有层状结构的二维过渡金属碳或/和氮化物（MXenes）给电极镀薄膜，薄膜中的金属阳离子使得电荷转移现象易于发生，从而使电极具有较低表面阻抗和良好导电率[1]。**二是改进结构以促进电极与皮肤充分接触，**美国初创公司 NIURA CORP 将传统的脑电采集耳塞主体

[1] 株式会社村田制作所申请的专利，公开号为 WO2023233783A1.

材料由硅胶替换为导电丝等导电材料，增加了电极接触耳内的表面积。谷歌子公司 X DEVELOPMENT LLC 设计的入耳式电极放置在具有弓形曲率的 C 形弹性支架上，从而保障电极与皮肤充分接触，并且不影响佩戴者聆听外部声音[2]。苏州意忆计科技有限公司将材料创新与结构创新结合，用多聚糖制成高弹性水凝胶电极，电极的“子弹头”结构适于有发区使用，用后无需清洗头发和脑电帽，使脑电采集设备广泛应用成为可能。

2.颅内皮层电极

颅内皮层电极（ECoG）成为脑机接口临床试验常用对象。当前很多研究团队利用 ECoG 电极开展脑机接口植入式技术研究。北京华科恒生医疗科技有限公司和德国植入电极供应商 CorTec 等多家厂商销售 ECoG 电极。**当前研发所聚焦方向一是改进植入方式以减小植入损伤。**美国脑机接口初创公司 Precision Neuroscience 提出狭缝插入法，用振荡刀片在头骨上做出 400 微米宽切口（大约四根人类头发的宽度）以插入电极。此电极获得 FDA 的“突破性设备”认定，已在手术中临时植入人体，未来朝可长期植入目标发展。我国博睿康科技（常州）股份有限公司（以下简称博睿康）联合清华大学也开展了相关探索和科研，已实现自主研发的低损伤植入 ECoG 脑机接口系统的产品化，目前正在开展人体试验。**二是积极研发微型颅内皮层电极 μ ECoG 电极以提高空间分辨率。**相对 ECoG，微型颅内皮层电极 μ ECoG 能在亚毫米尺度上记录颅内脑电活动。威斯康星

[2] X DEVELOPMENT LLC 申请的专利，公开号为 WO2021101588A1.

大学联合多家单位利用生物微机电系统（bio-MEMS）制造的μECoG 能在癫痫发作时监测到不同空间位置的病变神经活动[3]。μECoG **电极的研发热点在于提升采集质量和丰富功能。**例如，西北工业大学用具有超柔软性和高保湿性的细菌纤维素制作蛇形μECoG，从而确保电极准确定位[4]。加州大学 DAYEH, SHADI A 团队研发了带有圆形瓣的μECoG，借助可开合的瓣片实现在神经外科手术期间连续记录和实施反馈神经活动。深圳微灵医疗科技有限公司研发的柔性高密度μECoG 已处于工程样机阶段。



来源：National Library of Medicine

图 7 常规 ECoG 和μECoG 阵列比较

3.刚性植入式电极

植入式电极的优势在于采集到高分辨率神经信号的概率更高，目前在脑科学研究领域有较大需求，是产业下游攻关的重点方向之

[3] https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3653975/

[4] https://www.nature.com/articles/s41378-023-00597-x

一，**但植入式电极的长期可植入性是最大的技术挑战之一。**

刚性植入式电极已在科研领域使用多年。犹他电极是植入式电极的典型代表，自 2004 年起被美国 FDA 批准科研目的的临床使用。此外还有多家厂商面向科研领域供货刚性植入式电极，大多适用于科研用途的短期使用。例如美国植入式电极供应商 Blackrock Neurotech、科斗（苏州）脑机科技有限公司等。除脑起搏器外，尚未有用于人体的刚性植入式脑机接口电极获批上市，因此临床试验多采用 ECoG 电极或体积相对较大的脑起搏器。

从技术发展趋势看，**先进制造工艺有助于刚性植入式电极创新。**美国植入式电极供应商 NeuroNexus 利用微纳加工和封装技术保障了电极的机械性能和几何特性可靠。比利时微电子研究中心（IMEC）用 CMOS（互补式金属氧化物半导体）技术将电子元件集成在探针上，使电极能够多路复用。我国植入式电极在高密度方面有所突破，武汉衷华脑机融合科技发展有限公司利用硅通孔高密度封装技术和倒焊工艺等技术制造出 6 万通道的阵列电极。

确保刚性条件下低损伤植入电极成研发热点方向。除了常规的刚性电极植入方法，业界还采用较新颖手段尝试植入刚性电极，例如**超声降阻法植入电极。**上海交通大学的刘景全团队利用超声振动提高微针电极的刚度和抑制震颤，从而降低植入过程阻力，同时提高植入成功率。在长期慢性植入后通过轻微超声振动去除探针前端包裹的星型细胞胶质，缓解因血脑屏障引发的神经信号无法记录问题。杭州电子科技大学王明浩团队将刚性骨架与柔性衬底结合，以

向脑脊液施加超声激励的方式使刚性骨架在脑内部分断裂，探针在脑内部分变为柔性结构，从而减小脑部损伤。**还有血管介入式植入电极。**澳大利亚脑机接口初创公司 Synchron 通过传统的血管介入手术，将电极从患者颈静脉植入至大脑运动皮质附近的血管。我国南开大学段峰团队联合上海心玮医疗科技股份有限公司等多家单位，以羊和猴为对象，也完成了介入式脑机接口试验。

4.柔性植入式电极

植入式电极有可能在未来趋于柔性化以更适应脑组织，学界和产业界正在开展相关研究。当前加州大学、上海交通大学等科研力量，以及脑机接口初创公司 Neuralink、上海阶梯医疗科技有限公司等企业力量都在研发柔性植入式电极，Neuralink 正在启动人体试验对象招募，阶梯医疗已经完成非人灵长类动物验证，正在开展多例科研临床试验。

凝胶成柔性电极材料的热门选择。2021 年哈佛大学和麻省理工学院联合提出以碳纳米管作为导电材料的水凝胶粘弹性电极，用冷冻干燥工艺使水凝胶形成多微孔结构，此电极实现体外星形胶质细胞激活数量减少，局部场电位信噪比高。电极设计和阵列制造方便快捷，从设计到组装只需三天，不需高温、刺激性化学蚀刻或薄膜光刻技术。2023 年中国科学院长春应用化学研究所研发的植入式水凝胶电极实现大鼠脑信号长期实时跟踪监测。2023 年瑞典林雪平大学研发出无毒可注射的植入材料，将以酶作为“组装分子”的凝胶注入活体组织后，与体内常见代谢物葡萄糖和乳酸发生反应，聚合

成坚固但柔软的电极，无需进行基因改造。**虽然凝胶在解决生物相容性方面具有独特优势，但长期稳定性仍有待观察，还需要持以时日才有可能用于临床。**

柔性植入式电极的植入方法尚在多方探索中，实现手段不一。柔性植入式电极的植入方法全球未形成共识，当前方法包括：**临时硬化法，**例如将高密度柔性流苏结构电极浸没在熔融的聚乙二醇液体中形成复合细丝，聚乙二醇在脑内降解代谢后将电极释放；或者利用蚕丝蛋白暂时硬化电极，在体内展开后，封装层掺杂的特异性敏感酶在外界温度、酸碱度、浓度等触发下降解。**外部辅助法，**Neuralink 和阶梯医疗使用自研的手术机器人植入柔性电极。

5.多通道离体微电极阵列

微电极阵列（MEA）功能丰富助力体外神经细胞群研究。MEA 是将多个电极以阵列形式集成于一个芯片上，可同时记录细胞群放电，利于研究细胞电生理特性和离子通道生物学特性。美国厂商 BMSEED、瑞士厂商 3brain，德国厂商 Multi Channel Systems 等都有相关产品。MEA 除常规配有活细胞分析系统、实验数据可视化和分析软件外，厂商还增加特色功能以形成差异化竞争优势。BMSEED 的产品可将细胞进行病理拉伸以模拟脑损伤或脊髓损伤，活细胞成像系统将拉伸过程可视化，并使用电生理学数据采集系统测评细胞健康程度和功能。从而可再现体内细胞的电气环境和机械环境，更精准模拟复杂的人体，实现体外预测体内行为。3brain 的 MEA 阵列集成有温度控制功能和刺激功能，并具有防溢屏障、隔电

磁和防噪外壳功能。

（二）芯片

高通量与实时性需求将催生专用非植入式脑机接口芯片。脑电信号由于在极端条件下进行信号处理，对信号链路设计和芯片性能要求较高，将朝向专用芯片发展。**随高通量采集与实时计算的高需求，未来或诞生将数据处理与计算集成于一体的专用 DSP 芯片。**目前美国芯片供应商德州仪器的脑电采集芯片在非植入式脑机接口方面应用较为普及，我国中科院自动化研究所等团队均进行相关研究并取得阶段性成果。

植入式芯片朝向一体化发展并伴随产生新的数据和传输协议。当前片上系统(SoC)集成方案的全植入脑机接口方案取得重大进展，实现小型化、高通道、全植入与多模态。例如 IMEC 公司将硅基植入式探针和 IC 信号处理电路集成在一根硅针上，完成了一体化流片过程。而且高通量采集和处理导致数据庞大，颅内无法存储，未来将会产生新的数据压缩协议和数据高速传输协议。美国植入式芯片供应商 Intan 的植入式芯片已经产业化落地，给全球多个研究团队供货，我国海南大学、复旦大学等单位也均开展相关研究。

（三）神经外科手术机器人

神经外科手术机器人为植入式脑机接口发展提供重要支撑。植入式脑机接口手术在定位病灶、活检、植入电极时存在难度大和精准度要求高等问题，神经外科手术机器人将是不可缺少的辅助手段，此类机器人可将立体定向技术与多种影像资料融合，实现术中多类

数据实时反馈。法国手术机器人公司 Medtech 的无框架立体定向手术机器人（Robot of Stereotactic Assistant，ROSA）诞生早且影响力大，近年华科精准（北京）医疗科技有限公司（以下简称华科精准）等国内创新力量崛起，产品性能不断接近国外，且具有可操作性好，反应速度快、售后及时等优点。

前沿技术不断被用在机器人中以提供更丰富功能。当前已有虚拟现实三维场景下的定位导航系统机器人相关产品，医生通过头显不仅能看到患者外貌，还能透视看到患者大脑组织结构，也可以在面部投射标识，将病人进行数字重建，此类产品对教学和临床具有重要意义。以色列神经外科手术机器人公司 Augmedics 的增强现实手术设备帮助医生通过近眼显示头戴设备看到皮肤和组织下手术工具的实时位置及轨迹数据，这些数据投影到外科医生的视网膜上，医生在注视患者的同时可查看导航数据，无需在患者和屏幕之间来回切换视线。设备操作精度约 1.4 毫米，将外科医生的操作准确性提高到 98.9％。华科精准将增强现实用于神经外科手术机器人中，软件根据患者影像数据 3D 还原病灶和血管病投影到患者头部，辅助医生术中明确手术入路和病灶切除范围。**未来，神经外科手术机器人或将面向特定病种进行功能细分和功能拆分，由此可降低成本，也利于向更广范围拓展。**

（四）脑电采集设备

脑电采集设备市场规模持续增长且设备功能不断优化和细分。咨询机构 DelveInsight 的数据显示，全球脑电采集设备市场在 2022

年达到 10.5 亿美元，在 2023 年至 2028 年期间以 9.96% 的复合年增长率增长，预计到 2028 年将达到 18.5 亿美元[5]。当前癫痫、中风、昏迷、睡眠障碍等神经系统疾病高发，且老龄人口日益增多也扩大患病人群数量，脑电采集设备在此类神经疾病的监测和诊断方面发挥重要作用，未来几年内，对脑电采集设备的轻量便携和多模态同步采集需求更加旺盛，便捷诊断也有利于促进居家疾病预警和远程诊疗推广，从而带动市场整体增长[6]。日本光电和美国尼高力在脑电采集设备全球市场份额占比显著，博睿康的品牌影响力日益提升。厂商们对脑电采集设备功能不断优化和细分以谋取差异化竞争优势。2023 年，澳大利亚脑电采集设备商 Compumedics 的便携式脑电图放大器 OKTI 系统获 FDA 批准上市，具有 4K 采样率和 128 通道。博睿康的可穿戴式多模态研究平台可实现脑电、高密度肌电、心电、皮肤电等多源信号同步。苏州念及智能科技有限公司的脑电采集设备支持凝胶、海绵盐水两种电极，即戴即用，提升了设备佩戴便捷性和友好性。

高端电生理监测设备对医疗和科研意义显著。脑机接口术中需要高端电生理采集监测设备对单细胞瞬间放电进行监测。高端电生理采集监测设备集成多种技术，具有极高科研价值，但产品研发难度大且投入成本高。我国天坛医院联合斯坦福大学和天津大学研发出紧密贴合在脑干等不规则区域的柔性可拉伸高密度微电极阵列，

[5] https://www.medgadget.com/2023/06/global-electroencephalography-devices-market-to-grow-at-a-substantial-cagr-of-9-96-by-2028-estimates-delveinsight-key-companies-allengers-magstim-egi-masimo-natus-medical-neurowave-system-se.html

[6] https://www.openpr.com/news/2903303/global-electroencephalography-eeg-devices-market-2023

可实时高精度可视化脑内术腔神经传导束或重要部位的神经核团，能有效提高手术精准度，更好的保护患者神经功能。

（五）超高场磁采集设备

超高场磁共振成像（MRI）在脑机接口基础科研中发挥重要作用，能获取活体大脑组织介电特性的高分辨三维图像，以揭示大脑组织在认知活动与疾病发展过程中的介电特性变化；尤其是在小血管成像、波谱学、功能成像、脑代谢物等方面，超高场 MRI 比普遍应用的 3T MRI 更清晰，能在细胞和分子水平上活体成像，从协助脑机理的突破性研究。**在科研方面，**中科院电工研究所王秋良院士团队研制出人用 9.4T MRI 超导磁体，法国 CEA（原子能和替代能源委员会）与德国 Siemens Healthineers（西门子医疗）共同研发的人用 11.7T MRI 已进入交付和测试阶段。**在产业化方面，**上海辰光医疗科技股份有限公司的 7.0T MRI 可用于小动物；西门子医疗和德国 Bruker 的 7.0T MRI 可人用，在软件、磁体、梯度、波谱仪、射频线圈等核心关键技术方面具有一定优势。

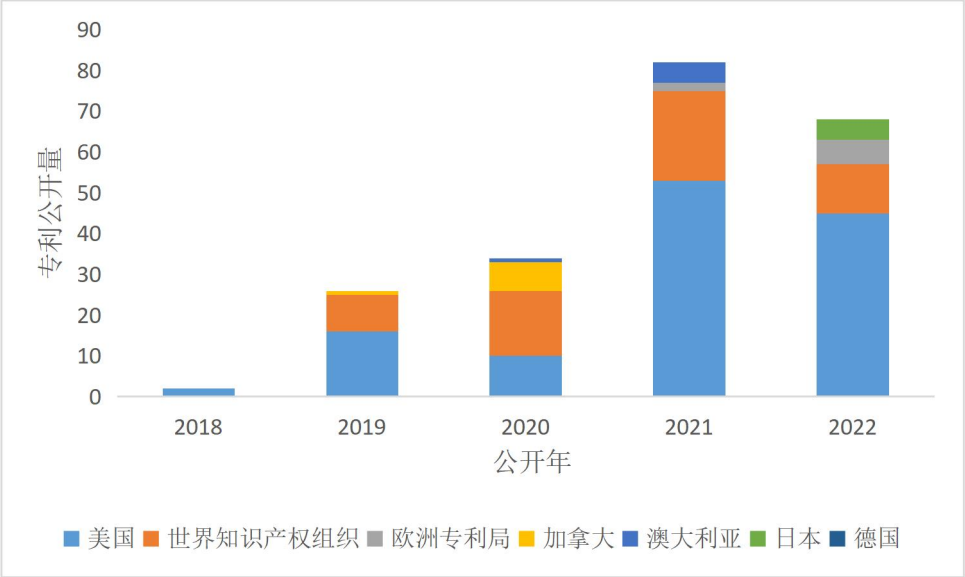
（六）无创光采集设备

大脑的神经活动会导致神经递质发生构象变化，神经递质分布发生变化，神经元体积发生变化。测量由上述变化引发的大脑皮层光谱变化即是以光方式无创采集脑信号的技术，**即在光穿过头皮和颅骨并与大脑皮层相互作用之后，测量从头皮和颅骨发射出的光子强度。**业界所用方法包括：功能近红外光谱成像法（fNIRS）、单光子计数法、拉曼散射法、双折射或光学活性测量法。其中 fNIRS 设

备可穿戴且便携，不易出现运动伪影，研究大脑活动不需静坐，是光采集手段中最为普及使用的方法。

国内外研发和生产制造 fNIRS 的厂商众多，如美国 Kernel、日本 Hitachi、我国丹阳慧创医疗设备有限公司等。荷兰科研设备供应商 Artinis Medical Systems 的 fNIRS 产品遍及 40 个国家的 350 所大学、诊所和公司，其产品通过 112 个 fNIRS 通道和 128 个脑电图通道可同时测量脑组织中的电位、脑组织氧合和血容量变化，实现高时空分辨率下的大脑监测。

除了 fNIRS 之外，其他以光方式采集脑信号的技术手段鲜有产品诞生，值得注意的是此类技术的专利已经超前布局。美国 HI LLC 公司从 2017 年开始，持续对利用光子光学相干断层扫描、近红外脑电采集、单光子计数方法、拉曼散射方法、双折射和光学活性测量方法采集脑信号的技术申请大量专利，总量接近 500 件。保护的技术包括光子集成电路、光调制和解码方法、光电探测器、信号处理方法、数据压缩方法、降噪屏蔽方法、工艺制造方法、测量方法等，对算法和硬件及系统全面进行知识产权保护。



来源：中国信息通信研究院

图 8 HI LLC 的光采集专利各受理局申请趋势

（七）分析设备

脑电分析云端智能化平台成为诸多厂商共识。在脑数据价值日益凸显的当下，多家脑电分析设备商立足软硬件传统业务的同时，深入挖掘数据价值，开发出了数据分析、数据打标等服务，并将这些服务集中在“云端智能化平台”上提供。即在云端部署数据分析平台，同时结合大数据和人工智能等技术，以 PaaS（平台即服务）或者 SaaS（软件即服务）服务形式为用户提供数据分析的工具和解决方案。

对用户来说，“云端智能化平台”一是能降低使用者操作难度，用户可在云上对数据进行实时提取、标记和分析。美国公司 Brain Electrophysiology Laboratory 利用机器学习、云计算和开源手段建立了模块化云平台，提供高精度大规模脑电图记录、分析和解码服务，降低用户脑电数据采集工作量。**二是辅助用户快速开展研究。**美国

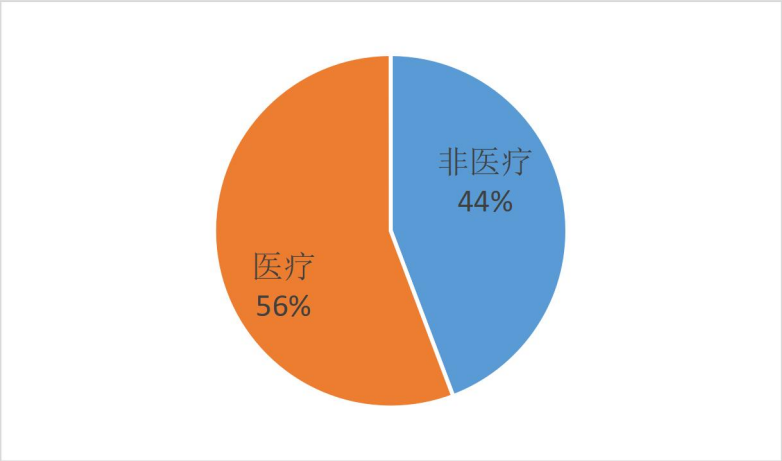
公司 Brain Space 提供时频分析、连通性分析、地形图分析等在线实时分析工具和标引工具，将设备调试时间由 70 分钟缩至 5 分钟。丹麦公司 BrainCapture 的云上诊断算法将神经科医生的诊断时间从 45 分钟缩至 10 分钟。**三是促进远程诊断等应用推广。**患者可以向云平台远程上传神经疾病发作数据，云平台的人工智能技术可诊断脑状态，从而降低诊断成本和专业人才培训需求，利于在中低收入国家推广。韩国公司 iSyncBrain 提供远程神经重症监护和远程脑电图服务，与住院监测费用比便宜三倍，99.1%的成年患者在 72 小时内的发病可被检测到。

对厂商来说，云化平台，一是扩充厂商数据资源。共享数据的云平台在方便用户便捷使用的同时，壮大了厂商的数据资源，形成厂商的无形资产。**二是夯实厂商行业地位。**云平台与硬件捆绑模式以及开源加深了用户相关品的依赖，厂商制定和主导数据标准形成，从而构筑利于自身发展的生态平台。

三、应用解决案例日渐丰富多元

（一）医疗应用仍为主流，非医疗应用多点开花

医疗仍是脑机接口当前主要产业化方向，下游应用解决方案企业中医疗方向占比过半。脑机接口产业下游相关企业近 350 家，较明晰的应用方向不少于 30 种，主要分为医疗和非医疗两类，其中医疗企业占比 56%，消费、工业、教育等非医疗企业占比 44%。当前脑机接口领域的植入式技术均面向医疗，此外也有部分非植入式技术用在医疗中。



来源：中国信息通信研究院

图 9 脑机接口下游应用解决方案企业研发方向

医疗领域应用主要包括疾病预警、诊断、治疗和功能增强。主要面向的疾病包括癫痫、帕金森、抑郁、疼痛、多动症、自闭症、截瘫、卒中、阿尔兹海默症、意识障碍、耳鸣和听力受损、视力受损和睡眠障碍等，以及利用脑状态辅助药物研发和麻醉监测给药。**非医疗领域应用方向包括：**工业安全监测、车内交互控制和疲劳检测、对外交互、外设控制、睡眠检测和助眠、情绪舒压、认知训练、脑健康体检、游戏控制、体育训练和人才选拔、模拟训练和体验、产品优化、安全识别认证。

热点应用方向企业分布
企业数量
少————————————————多

应用	热点方向	细分方向	美国	中国	澳大利亚	英国	加拿大
严肃医疗	神经病变和损伤	癫痫、帕金森、脑损伤诊治和预警					
严肃医疗和消费医疗	情绪	抑郁症、舒压					
严肃医疗和消费医疗	睡眠	睡眠检测、诊断、干预					
严肃医疗	运动功能恢复和增强	卒中和截瘫预警、诊断和康复					
严肃医疗	认知衰退和障碍	阿尔兹海默症和意识障碍					
严肃医疗	止痛	诊断和治疗					
严肃医疗	自闭症和多动症	诊治					
严肃医疗	感官增强	视听功能增强					
消费	营销	产品优化、广告					
消费	教育	认知训练					
消费	智能生活控制	外设控制、对外交互					

来源：中国信息通信研究院

图 10 热点应用方向的脑机接口企业国家分布

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：https://d.book118.com/236031140134010102