

研究报告

(2023 年第 8 期 总第 129 期)

2023 年 06 月 14 日

脑机接口行业图谱¹

资本市场与公司金融研究团队

朱雅姝 胡杏

【摘要】 行业图谱研究是本团队科技成果转化研究的一项子课题，目标定位于清晰理解前沿科技成果的技术核心、科创企业的技术竞争力及科研工作者的研究进度，从而助力科技成果转化效率的提升。行业图谱研究将以系列形式展开，选取国家战略重点科技领域的商业应用场景逐一进行，时效性较强。

本报告为行业图谱的计算机科学系列之脑机接口领域。美国、欧盟、日、韩、澳大利亚等多国已加速布局脑机接口，抢占全球脑科学竞争战略高地。中国对该技术的重视程度不亚于发达国家，近两年已经将其上升为国家战略。脑机接口是指在人或动物大脑与外部设备之

¹ 感谢资本市场与公司金融研究中心的实习生许喜远、张与豪同学对本报告的助研工作。许喜远同学是清华大学医学院 2022 级博士。张与豪同学是清华大学医学院 2023 级博士。

间创建的直接连接实现脑与设备的信息交换，其工作流程包括脑电信号的采集、处理、输出和执行，最终再将信号反馈给大脑。其中，脑电信号的采集和处理是核心。脑电信号采集技术包括脑电信号的放大和模拟信号到数字信号的转换，软件主要由嵌入式程序、USB 程序和 PC 端程序构成，使用到的硬件设施有脑机接口电极、脑机接口芯片等。脑电信号处理技术，包括脑电的预处理，神经元信号提取算法，深度学习，数据管理，机器学习算法，软件工程等各环节，都依赖于 GPU、CPU 等高性能硬件设备提供的算力作为基础，并被集成于脑机接口芯片中。

脑机接口的电极、芯片是核心技术竞争的硬件设备。目前国内缺乏商业化的侵入式阵列电极，而最先进的电极都是在国外生产或与外国有关。国内的技术和产品无法与美国的重量级成果如 Neuropixel 等相媲美。芯片的生产上，高质量的原材料和制造设备均依赖于国外供应商，例如硅晶圆主要由美国的 Global Foundries 和台湾的台积电等公司生产，金属线材主要由美国的 TE Connectivity 和日本的 Furukawa Electric 等公司生产。目前国际芯片企业 Neuralink 独占领先地位，我国聚德科技正在此领域紧追。

脑机接口的数据处理技术也是关键的核心竞争力。具体指将采集到的脑信号进行分析和解码的过程。国际上，美国 Google 的 DeepMind 实验室在机器学习算法和人工智能方面有着突出的研究成果，能够对脑信号进行高效的分类和识别，实现对脑机接口的精准控制。美国 BrainGate 团队也在脑机接口数据处理方面取得了重要突破，他们利用机器学习算法实现了运动意图的准确识别和肢体运动控制。国

内已经有部分企业可以实现非侵入式脑机接口的脑电信号分类和识别。在侵入式脑机接口的数据处理技术方面，美国的霍华德·休斯医学研究所开发的尖峰排序 Kilosort 算法可以从侵入式脑机接口的脑电信号中提取单个神经元的信号，然而国内没有研究机构或企业开发出可以与之匹敌的算法。

综合来看，脑机接口是一项跨学科的合作项目，任何一个子领域的差距都使得项目整体无法前行。相比国外，国内的基础科学较薄弱，例如芯片技术研发、电极材料学、传感器的研究、脑神经科学基础研究、光遗传学、心理学、临床外科学的探索等等都无法达到国外先进水平。所涉及到的硬件设施的底层技术和原材料几乎来自于欧美。

通常从脑电信号采集的角度将脑机接口技术分为侵入式和非侵入式两类。侵入式脑机接口目前适用于医疗、患者治疗、神经科学研究等场景，未来有望适用于消费级场景，其技术壁垒较高，需要进行开颅手术，将电极植入到大脑皮层及其内部采集脑电信号，因此可获得质量较高的神经信号；其缺点是容易引发人体的排异反应，产生神经瘢痕包裹电极，进而导致神经信号质量降低。非侵入式脑机接口目前适用于消费娱乐、残疾人士交互等场景，脑机接口不进入大脑，只需要用电极连接头皮来获取信号，对人体伤害较小，技术难度较低，如使用脑电帽采集脑电信号；但由于颅骨对神经信号的衰减作用和对神经元发出的电场活动的分散和模糊效应，使得信号分辨率不高。侵入式和非侵入式技术在场景应用和技术实现上各有优劣势，因此脑机接口企业基于企业自身的技术储备和战略定位，选择不同类别的技术解决方案。

近年来新成立的脑机接口公司创始人基本都是由各自领域的专家和资深的从业者组成，国内产业界与学术研究机构以密切合作模式促进脑机接口技术发展。由于脑机接口技术壁垒相对较高，预计未来脑机接口产业的发展仍由学术研究机构主导，产业资本与学术研究机构合作将更加紧密，促进技术的产业孵化。

目 录

一、全球技术发展政策对比分析.....	1
(一) 美国脑计划中的脑机接口研究规划.....	2
(二) 欧盟脑计划中的脑机接口研究规划.....	4
(三) 日本脑计划中的脑机接口研究规划.....	4
(四) 韩国脑计划中的脑机接口研究规划.....	5
(五) 澳大利亚脑计划中的脑机接口研究规划.....	6
(六) 中国脑计划中的脑机接口研究规划.....	6
二、脑机接口技术概述.....	8
(一) 技术背景.....	8
(二) 发展历史简述.....	10
(三) 脑机接口技术的应用方向.....	14
三、脑机接口技术流程与关键核心技术.....	17
(一) 脑科学研究现状.....	19
(二) 脑机接口的分类.....	23
(三) 脑机接口电极的制备.....	28
(四) 脑机接口信号处理芯片.....	32
(五) 产业链现状.....	34
(六) 脑机接口关键核心竞争点.....	36
(七) 脑机接口面临的挑战.....	39
四、基于人工智能的脑机接口技术在医疗领域的应用场景分析.....	42
(一) 肢体运动障碍诊疗中的应用.....	42
(二) 意识与认知障碍诊疗中的应用.....	44
(三) 精神疾病诊疗中的应用.....	44
(四) 感觉缺陷诊疗中的应用.....	45
(五) 癫痫和神经发育障碍诊疗中的应用.....	47
五、脑机接口技术的产业现状.....	48
(一) 科研院所为主， 侧重非侵入式脑机接口研究.....	53
(二) 市场潜力大， 已成为新投资热点， 未来发展可期.....	53
(三) 产品认证和监管尚处于初级阶段， 临床应用有限.....	61

六、专业术语解析.....	62
参考文献.....	66

图表目录

图 1-1	脑机接口技术布局国家	2
图 1-2	中国脑计划框架图	7
图 2-1	传统或狭义的 BCI 系统示意图	9
图 3-1	脑机接口技术体系	17
图 3-2	脑机接口技术流程及产业链图	18
图 3-3	神经元示意图 ^[17]	19
图 3-4	脑功能分区图 ^[18]	20
图 3-5	不同深度的脑机接口 ^[10]	22
图 3-6	不同脑机接口的分辨率 ^[11]	23
图 3-7	脑机接口分类示意图	24
图 3-8	侵入式微纳电极 Neuropixel 记录神经元信号 ^[12]	25
图 3-9	侵入式脑机接口 Neuropixel 微纳电极 ^[13]	29
图 3-10	脑机接口技术研究与应用中存在的问题	41
图 4-1	基于人工智能的脑机接口技术在医疗领域的应用场景分析	42
表 3-1	生产脑机接口植入设备的公司及产品简介	27
表 3-2	欧美生产脑机接口电极的公司及产品简介	31
表 3-3	生产脑电信号处理芯片的公司及产品简介	32
表 3-4	脑机接口产业链	34
表 5-1	脑机接口技术国内外主要研究机构及代表性成果	49
表 5-2	脑机接口主要芯片厂商	55
表 5-3	脑机接口技术在医疗健康领域的主要应用产品	55
表 5-4	国内外重点 AI 脑机接口企业的概况以及相应的融资信息	59

脑机接口技术是将人脑与计算机、外部设备等智能系统相连的一种技术，它可以将人脑中的信息转化为计算机可以理解的信号，实现对机器的控制和交互。BCI 技术的出现，可以帮助那些因为身体残疾无法使用手脚来控制机器的人们，实现用大脑思维来操作计算机等外部设备。此外，BCI 技术还可以被应用于认知神经科学、运动控制、智能增强等多个领域，具有广泛的应用前景。

本报告基于最新的科学文献及行业报道进行资料梳理和汇总。对比各国脑机接口发展政策，从技术背景、发展历史和应用方向三个方面展开宏观视角分析；提炼当前脑机接口关键核心技术、产业链结构、全球领先企业的研发现状及融资情况，形成行业画像。

一、全球技术发展政策对比分析

历经 50 多年的研究，当前脑机接口正处于第三个发展阶段-技术爆发期，美国、欧盟、日、韩、澳大利亚等多国政府、科研机构和企业都已加速布局脑机接口，抢占全球脑科学竞争战略高地（图 1-1）。美国是最早提出脑科学计划及其行业发展规划的国家，也是政府资金投入最多，技术发展水平最高的国家。中国相对于美国等西方国家对脑机接口技术（Brain-Computer Interface, BCI）的研究起步较晚，但重视程度不亚于发达国家，近两年已经将此技术上升为国家战略。

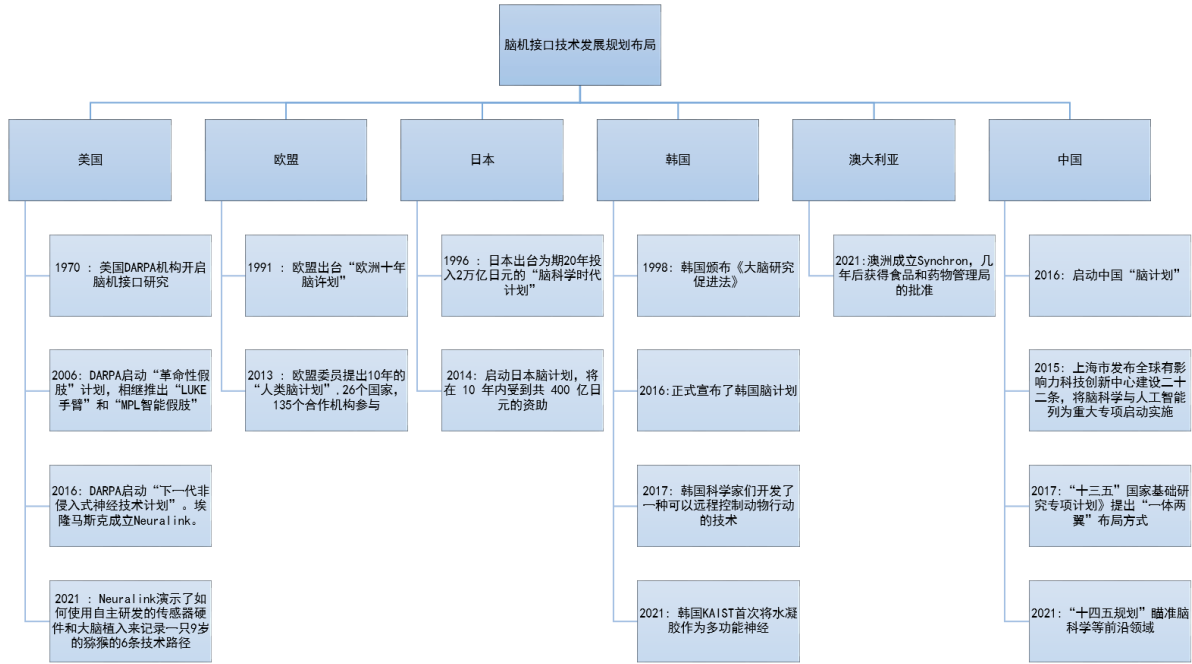


图 1-1 脑机接口技术布局国家

（一）美国脑计划中的脑机接口研究规划

美国政府自 1989 年起开始推进脑科学计划，并将 20 世纪最后 10 年定名为“脑的 10 年”。2013 年 4 月 2 日，奥巴马政府宣布了“脑计划”（BRAIN Initiative），该计划旨在通过推进神经技术创新，探索人类大脑工作机制、描绘脑活动全图、促进神经科学研究，并开发针对目前无法治愈的大脑疾病的新疗法。美国政府最初拨出逾 1 亿美元启动资金，并规划未来 12 年总共投入 45 亿美元。随后，美国国立卫生研究院（National Institutes of Health, NIH）、美国国防高级研究计划局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）和美国国家科学基金会（National Science Foundation, NSF）三大联邦机构相继提出各自的研究重点。2014 年 2 月，美国政府进

一步推进 **BRAIN** 计划，并将该计划 2015 财年预算提高至 2 亿美元。同年 6 月 5 日，NIH 的 **BRAIN** 小组发布了《**BRAIN** 计划 2025：科学愿景》报告，详细规划了 NIH 脑科学计划的研究内容和阶段性目标。

在 2014 年 6 月 20 日，加利福尼亚州提出了一项名为 **Cal-BRAIN** 计划的脑科学计划，旨在促进产业参与。此后，其他州也开始探讨类似的计划。2018 年 11 月 2 日，美国国立卫生研究院（NIH）宣布加大对“脑计划”研究项目的投资，投入 2.2 亿美元用于 200 个新项目，其中包括各种脑部疾病的检测和治疗、无创脑机接口和无创脑刺激装置等。2019 年 10 月 21 日，美国 **BRAIN 2.0** 工作组发布了《大脑计划与神经伦理学：促进和增强社会中神经科学的进步》报告，对其五年前提出的《**BRAIN** 计划 2025：科学愿景》实施情况和未来发展进行了梳理和展望。

美国脑计划重点研究包括建立大脑结构图谱、研发大规模神经网络电活动记录和调控工具、理解神经元活动与个体行为的关联、解析人脑成像基本机制、发明人脑数据采集的新方法以及与脑机接口技术紧密相关的研究内容。2016 年，NIH 宣布第三轮支持“通过推进创新神经元技术开展大脑研究”计划的研究资助项目，其中涉及基于微小电传感器的神经末梢系统，该系统无线记录大脑活动以改善中风患者的康复，也涉及脑机接口技术。

美国军方尤为重视脑机接口的创新研究及其在军事和医疗方面的应用。DARPA 启动了几十个神经相关项目，如“可靠神经接口技

术（RE-NET）”、“革命性假肢”、“基于系统的神经技术新兴疗法（SUBNETS）”、“手部本体感受和触感界面（HAPTIX）”、“下一代非手术神经技术（N3）”和“智能神经接口（INI）”，探索神经控制和恢复、脑机接口与外骨骼机器人、无人机和无人车等设备的联用等，以研发治疗和康复新途径、增强和开拓脑功能和人体效能、拓展训练方式和作战环境。

（二）欧盟脑计划中的脑机接口研究规划

人类脑计划（Human Brain Project, HBP）于2013年10月1日启动，是欧盟委员会未来和新兴技术的旗舰项目，有26个国家的135个合作机构参与[1]。这是一个为期10年的基于超级计算机的大型科研项目，主要研究领域大致划分为三大类：未来神经科学、未来医学、未来计算。涵盖13个子项目，其中包括老鼠大脑战略性数据、人脑战略性数据、认知行为架构、理论型神经科学、神经信息学、大脑模拟仿真、高性能计算平台、医学信息学、神经形态计算平台、神经机器人平台、模拟应用、社会伦理研究和人脑计划项目管理。欧盟脑计划中未明确提及脑机接口，但脑计划项目离不开脑机接口技术和设备的支持，同时社会伦理研究也对脑机接口的未来应用提供伦理依据。欧盟中奥地利和德国等国家科研人员在脑机接口方面做了许多工作。可惜的是，由于受到学术界的广泛质疑，以及HBP后来的发展方向偏离了最初设定的目标，该项目目前已宣告失败，欧盟决定停止对人类脑计划的下一个十年的资助。

（三）日本脑计划中的脑机接口研究规划

日本脑/思维计划（Brain/MINDS）是一个于 2014 年启动的项目，旨在通过集成神经技术，绘制用于疾病研究的脑图。该项目的研究集中在三个领域：普通猕猴大脑的研究、脑图绘制技术的开发以及人类脑图谱的制定。相关研究涉及脑机接口技术，该领域已经有不少日本脑机接口研究的新闻和文献报道。该项目计划在未来 10 年内获得来自日本教育部、文化部以及日本医学研究与发展委员会的共计 400 亿日元资助，用于推进其研究计划。该项目的核心目标是将神经科学、医学和工程技术相结合，创造出更加精确和详尽的脑图，为研究神经系统疾病的发病机理和治疗提供新的视角和思路。

（四）韩国脑计划中的脑机接口研究规划

韩国脑计划（Korean Brain Initiative, KBI）旨在促进脑科学和产业的互动。该计划由韩国脑科学研究所、韩国科学技术研究院脑科学研究所和神经工具开发小组三个研究机构牵头^[2]。该计划致力于基础研究，旨在开发适用于基础和临床研究的新型神经技术，并对神经退行性疾病进行临床研究，如阿尔兹海默症（Alzheimer's disease, AD）和帕金森病（PD）。该计划的研发项目包括建立多尺度的脑图谱、开发绘制脑图谱的创新型神经技术、加强与人工智能相关的研发和开发针对神经系统疾病的个性化药物。韩国脑计划在构建大脑地图的基础上，进一步对老年痴呆、帕金森病、忧郁症、成瘾症、孤独症、大脑发育障碍等疾病加大研究投入。此外，已有文献报道韩国科研人员在基于脑电图/功能近红外光谱等的脑机接口方面取得的成果。

（五）澳大利亚脑计划中的脑机接口研究规划

澳大利亚脑联盟（Australian Brain Alliance, ABA）提出澳大利亚脑计划（Australian Brain Initiative, ABI）^[3]。澳大利亚脑计划的总体目标是破解大脑的密码，即深入理解神经回路的发展、信息编码与检索、复杂行为的基础，以及适应内外部变化的机制。为了实现这一目标，澳大利亚脑计划将重点研究优化和恢复大脑功能、开发神经接口记录和控制大脑活动以恢复功能（即脑机接口）、探究整个生命周期学习的神经基础，并提供有关脑启发式计算的新见解。澳大利亚脑计划的潜在影响包括创造先进的神经技术产业、研发治疗脑部疾病的疗法以及推动跨学科合作，促进对大脑的深入了解。

（六）中国脑计划中的脑机接口研究规划

1. 国家宏观政策引导科技战略研究规划

我国的脑科学和类脑研究已经被提升为国家战略（如图 1-2 所示），中国脑计划自 2016 年启动，包括探索大脑秘密和攻克大脑疾病的脑科学研究以及建立并发展人工智能技术的类脑研究两个方向。在 2017 年《“十三五”国家基础研究专项规划》中，脑与认知、脑机智能和脑的健康被明确提出作为核心问题。目前的布局可用“一体两翼”来概括，其中以研究脑认知的神经原理为“主体”，其中以绘制脑功能联结图谱为重点，而研发脑重大疾病诊治新手段和脑机智能新技术为“两翼”^[4]。

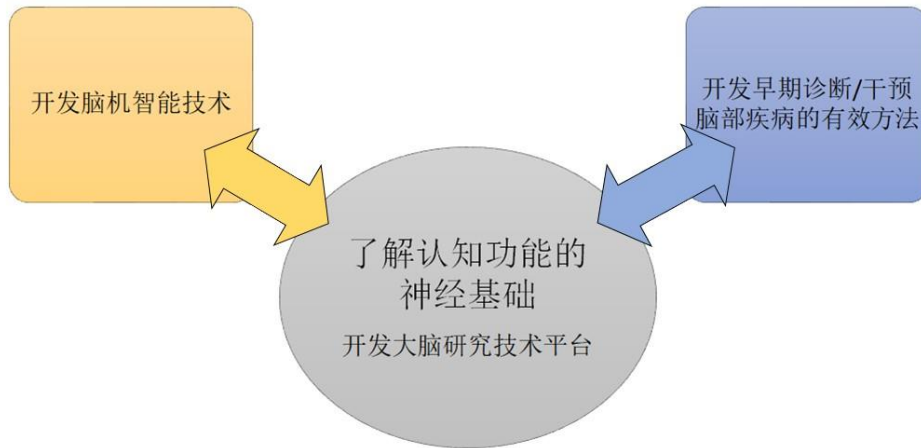


图 1-2 中国脑计划框架图

作为“一体两翼”布局的“一翼”，脑机智能的关键技术研发和产业发展备受重视。脑机接口技术是脑与机智能的桥梁和融合的核心技术，也可能是脑重大疾病诊治的新手段，例如深部脑刺激，同时也是研究大脑的一种工具。在十四五规划和 2035 年远景目标纲要中，人工智能和脑科学为国家战略科技力量，其中类脑计算和脑机融合技术研发是重要领域之一，而脑机接口技术是脑机智能融合技术的关键之一。

2. 地方规划出台推动产业落地发展

近年来，各地方政府出台相关政策大力支持脑科学与类脑研究的发展，对脑科学和类脑科学的发展给予了高度关注。上海市在此方面领先全国，提出了以计算神经科学为桥梁开展脑与类脑交叉研

究的地方脑计划，并在 2015 年开始实施。北京市也加大了政策支持，2018 年发布了通知，其中第一大领域是认知与类脑技术。

政策出台后，各地迅速落实落地，成立实体机构开启科研工作。北京和上海带头成立了北京脑科学与类脑研究中心、上海脑科学与类脑研究中心。2018 年 12 月，上海市启动了“脑与类脑智能基础转化应用研究”市级重大专项，其中还包括“全脑神经联结图谱与克隆猴模型计划”等相关专项。此外，2015 年 5 月上海市发布的全球有影响力科技创新中心建设二十二条将脑科学与人工智能列为重大基础工程之首。在 2019 年，北京市经济和信息化局发布了《北京市机器人产业创新发展行动方案(2019—2022 年)》，其中提到了面向养老、健康服务领域的关键技术，如机器学习、触觉反馈、增强现实和脑机接口等。这些政策和专项的出台都推动了我国脑科学和类脑科学的研究和发展。2021 年，杭州西湖区率先布局脑机智能产业，全力打造脑机智能产业链。该项目旨在探索以国有企业为主体、产学研深度融合的新路径，助力西湖区打造全国性的校地合作示范区，真正实现产学研深度融合，帮助优秀企业和科研团队在区内落地发展。这表明我国各地方政府在推动脑机智能产业的发展方面，已经迈出了实质性的步伐。

二、脑机接口技术概述

(一) 技术背景

脑机接口技术的流程主要包括脑电信号采集、信号预处理、特征提取、分类识别等步骤（如图 2-1 所示）。脑电信号采集需要通过电极将信号从脑部采集出来，因此脑机接口电极的制备是关键前提。信号预处理使用脑电信号预处理芯片，可以对采集到的信号进行滤波、降噪等处理，提高信号的质量。特征提取需要从复杂的脑电信号中提取出与特定任务相关的特征，进而用于分类识别。分类识别则是将特征与已知任务的模型进行比较，最终实现对任务的识别和控制。

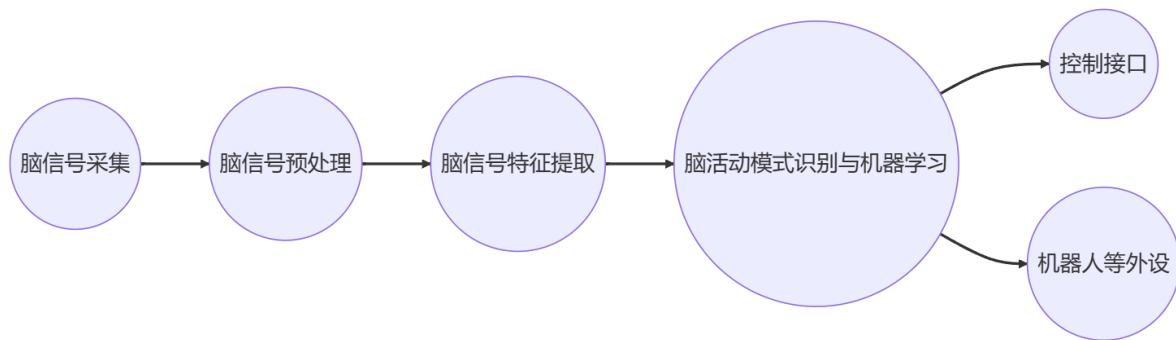


图 2-1 传统或狭义的 BCI 系统示意图

根据不同的信号来源和应用场景，脑机接口技术可以分为多种不同类型，例如基于脑电信号、脑磁信号、脑血流动力学信号等不同的类型。此外，脑机接口技术还可以根据控制目标的不同，分为控制外骨骼、控制移动设备、辅助交流等不同类型的。

尽管脑机接口技术具有广泛的应用前景，但其面临着很多挑战和难点。其中包括信号质量不稳定、信号处理和分类算法的精度和效率不高、可穿戴设备的舒适性不佳等问题。另外，由于涉及到脑

科学和生物医学工程等多个领域的专业知识，技术的交叉和融合也是需要解决的难题之一。

（二）发展历史简述

1. 脑机接口技术发展史

脑机接口技术是将人脑与计算机、外部设备等智能系统相连的一种技术，它可以将人脑中的信息转化为计算机可以理解的信号，实现对机器的控制和交互。BCI 技术的出现，可以帮助那些因为身体残疾无法使用手脚来控制机器的人们^[5]，实现用大脑思维来操作计算机等外部设备。此外，BCI 技术还可以被应用于认知神经科学、运动控制、智能增强等多个领域，具有广泛的应用前景^[5]。

脑机接口技术是一项充满挑战和机遇的前沿技术，其研究和发 展将需要多个学科和行业之间的合作和协同。脑机接口技术的研究需要多个学科的融合，包括脑科学、计算机科学、生物医学工程等领域的专业知识。在产业链的各个环节中，涉及到电极制备、信号处理、模型训练、应用开发等多个领域的专业技术^[6]。因此，需要各个学科之间的密切合作，才能推动脑机接口技术的不断发展。

脑机接口技术的研究可以追溯到二十世纪七十年代，近五十年的发展经历了三个阶段，分别是科学幻想阶段、科学论证阶段和技术爆发阶段。目前，脑机接口技术正在第三个阶段中蓬勃发展。

在第一个阶段中，即科学幻想阶段，1977 年，Jacques J. Vidal 开发了基于视觉事件相关电位的脑机接口系统，通过注视同一视觉刺激的不同位置实现了对 4 种控制指令的选择；1980 年，德国学者提

出了基于皮层慢电位的脑机接口系统。然而，由于技术限制，第一阶段的研究并没有取得明显的进展^[6]。

第二阶段，即科学论证阶段，从 1980 年代末至 1990 年代末。美国和欧洲的少数先驱们研发了首个实时且可行的脑机接口系统，并开拓了脑机接口领域。1988 年，L.A. Farwell 和 E. Donchin 提出了著名的脑机接口范式，即“P300 拼写器”，该系统有望帮助严重瘫痪患者与环境进行通信和交互。脑机接口研究的主要驱动力是期望将其用作运动障碍患者的新型辅助技术，特别是对于那些可能无法使用其他替代方案的患者。同年，Stevo Bozinovski 等人报道了利用脑电 alpha 波控制移动机器人，这是首个利用脑电进行机器人控制的研究^[6]。

在这个时期，研究者们还开发了基于感觉运动节律的脑机接口系统，其中根据操作性条件作用开发了用于控制一维光标的脑机接口，利用该方法训练用户自我调节其感觉运动节律的幅度，以实现向上或向下移动小球。同时，Gert Pfurtscheller 等人开发了另一种基于感觉运动节律的脑机接口^[6]，用户必须明确地想象左手或右手运动，并可以通过机器学习将其转换为计算机命令，这定义了基于运动想象的脑机接口。

1992 年，Erich E. Sutter 提出了一种高效的基于视觉诱发电位的脑机接口系统，利用从视觉皮层采集的视觉诱发电位识别用户眼睛的注视方向来确定选择拼写器中哪个符号。这项研究是基于视觉诱

发电位脑机接口的首次临床应用，肌萎缩侧索硬化症患者可以利用该系统实现高于 10 个单词/分钟的通信速度^[6]。

在脑机接口领域，除了一些著名的研究外，还有一些其他的研究也受到了关注。比如，基于事件相关电位和稳态视觉诱发电位的脑机接口系统，可以让用户通过选择意图指令或控制物理设备。此外，1999 年的国际脑机接口会议促进了欧美学者对非侵入式脑机接口研究的深入探索^[6]，为后续的脑机接口研究打下了坚实的基础。

自 21 世纪以来，脑机接口技术进入了一个快速发展阶段，被称为技术爆发阶段。在这一阶段，脑机接口研究的规模和范围急剧扩大，吸引了越来越多的研究人员参与。新型的脑机接口实验范式相继涌现，如听觉脑机接口、言语脑机接口、情感脑机接口以及混合脑机接口。先进的脑电信号处理和机器学习算法也被广泛应用于脑机接口研究，如共空间模式算法和 xDAWN 算法等^[7]。此外，新型的脑信号获取技术也得到了广泛应用，如功能磁共振成像测量的血氧水平依赖信号和功能近红外光谱测量的皮层组织血红蛋白浓度。

脑机接口应用最初主要集中在医学领域，但如今在非医学领域的应用也取得了迅速发展，例如增强正常个体感知觉和认知、娱乐游戏、汽车和机器人行业等。随着脑机接口人因工程的提出，从用户体验、心理状态和用户训练等层面提高了脑机接口的满意度和实用性，这将进一步推动其在各个领域的应用。

在全球范围内，美国在脑机接口的理论、方法和实践方面具有明显的领先优势。侵入式脑机接口研究主要集中于美国，已成功开

发出多种外周神经电极、三维电极、柔性电极、环形电极以及光遗传技术并将其应用于脑机接口。相比之下，欧盟和欧洲国家更注重神经疾病研究，主要关注非侵入式脑机接口。日本也主要关注非侵入式脑机接口，并倡导脑机接口和机器人系统的集成。

2. 我国脑机接口技术发展状况

我国脑机接口技术的研究起始于上世纪 90 年代末，清华大学创建了基于稳态视觉诱发电位的脑机接口新范式。现在，这一范式已成为无创脑机接口的三种主要范式之一。近年来，国内的脑机接口研究取得了显著的进展，如清华大学在高速无创脑机接口字符输入方面，华南理工大学在多模态无创脑机接口方面，天津大学在神经康复和航天应用方面，上海交通大学在情感识别方面等。此外，还有国防科技大学、中国科学院半导体研究所、电子科技大学、北京师范大学、兰州大学、中国科学院深圳先进技术研究院、中国医学科学院生物医学工程研究所、华中科技大学、昆明理工大学等单位在脑机接口及脑机协作智能方面也做了重要工作^[4]。

尽管国内研究团队主要集中在非侵入式脑机接口的研究并取得了较多进展，但在侵入式脑机接口方面也进行了研究。浙江大学研发了复杂环境下的大鼠导航系统，以及猴子用皮层脑电控制机械手完成不同手势的抓握动作。清华大学实现了首个基于无创医学影像技术导引的微创脑机接口系统。目前，我国在侵入式神经接口设备领域处于发展初期，仅在教育层面上有部分产品与欧美医疗公司临

床产品相似，但在核心范式、核心芯片、核心通信协议、核心算法、核心材料器件等方面存在较严重的短板。

我国的脑机接口技术产业化发展目前还处于起步阶段，整体发展水平与欧美发达国家仍存在一定的差距。

(三) 脑机接口技术的应用方向

医疗健康领域是脑机接口技术最初且最主要的应用领域，也是目前离商业化最近的应用领域。随着技术的发展，应用领域不断拓宽，未来将逐步应用于医疗健康、娱乐、智能家居、军事和其他领域。

1. 医疗健康

脑机接口技术在医疗健康领域中具有广泛的应用前景。一方面，脑机接口技术可以帮助临床医生了解患者的大脑活动和行为认知，为诊断和治疗提供重要的辅助信息。例如，在神经科学、神经心理学和神经疾病诊断中，脑机接口技术可以用于研究和评估受试者的大脑活动和行为认知，以及提供一种非侵入性的脑信号监测方法。另一方面，脑机接口技术还可以作为一种康复手段，帮助康复患者恢复肢体运动和感知功能。例如，在中风康复和肌无力康复中，脑机接口技术可以通过将大脑信号转换为机械指令，帮助患者进行肢体运动训练和康复训练，从而提高康复效果和患者的生活质量。

除此之外，脑机接口技术还可以在神经康复、疼痛管理、情绪调节等方面发挥作用。例如，在神经康复中，脑机接口技术可以通过对患者的大脑信号进行监测和控制，帮助患者改善运动障碍和感

知障碍等神经功能障碍。在疼痛管理中，脑机接口技术可以通过控制大脑信号的输出，帮助患者减轻疼痛感觉和提高疼痛阈值。在情绪调节中，脑机接口技术可以通过监测患者的大脑信号，及时发现并调节患者的情绪状态，从而帮助患者缓解情绪问题^[8]。

2. 娱乐

脑机接口技术在娱乐领域中有着广泛的应用前景。通过采集大脑信号并进行分析，可以实现一系列的人机交互应用，例如电影、游戏和音乐等方面。其中，脑机接口技术在游戏领域的应用较为突出。通过采集玩家的大脑信号，游戏开发者可以设计出更具有沉浸感和互动性的游戏。比如，脑机接口技术可以通过玩家的大脑信号来识别他们的注意力水平，然后根据这一信号来调整游戏的难度和挑战性，从而实现更好的游戏体验。

除了游戏领域，脑机接口技术在音乐和电影方面的应用也很有前途。通过采集听众或观众的大脑信号，可以了解他们对音乐或电影的反应和情感状态，从而设计更加个性化和优质的音乐和电影作品。例如，在音乐演唱会上，通过采集听众的大脑信号，可以实时了解他们对音乐的反应和情感状态，然后根据这些反馈来调整音乐的演唱和演出方式，从而实现更加动态和个性化的演出^[9]。

3. 智能家居

随着人工智能和物联网技术的发展，智能家居正逐渐成为人们生活中不可或缺的一部分。而脑机接口技术也可以为智能家居的控制和操作提供更加便捷、自然和个性化的方式。例如，在智能家居

的控制方面，脑机接口技术可以实现“以意念控制”的方式，通过识别人脑中特定的想象图案来控制家电的开关、调节家居环境温度、改变灯光颜色等等。这种方式可以让人们通过简单的思考，就能实现对智能家居的控制，提高生活的便捷性和舒适度。

此外，脑机接口技术还可以实现智能家居的自适应调节。通过对大脑信号的监测和分析，脑机接口技术可以了解用户的心情和偏好，自动调节智能家居的温度、音乐播放、灯光等等，以达到最佳的舒适度和使用体验。此外，脑机接口技术还可以实现智能家居的个性化定制，根据用户的喜好和习惯，定制出适合他们的智能家居使用方案。

4. 军事

脑机接口在军事领域主要应用于“替代”和“增强”两个方向。脑机接口系统能够辅助操纵各类无人设备，代替士兵深入危险或高风险场合执行任务。脑控武器是军事武器自动化和智能化的一个重要发展方向。结合脑控和手控可以发挥士兵个体控制的巨大潜能，这是武器研制和使用的智能化目标。脑控外骨骼是提升单兵作战能力的最有效手段之一，将机械外骨骼附着在人体外部，利用想象思维控制外骨骼的运动和动作，增加单兵作战的力量、速度和准确度，是脑控外骨骼的最终目标。此外，动物侦察兵利用动物的侦察能力，将脑控芯片植入动物体内，由人类远程控制动物的行动和侦察路线，延伸人类侦察范围和时间。还可以借助脑机接口进行更高效和更保密的军事通信，提高作战人员的认知能力。

5. 其他

脑机接口在其他方向主要应用于“增强”和“补充”健康人群的机能。例如，澳大利亚的 SmartCap 公司通过在帽子内植入电极，实时监测用户的疲劳状态。同时，部分公司将脑机接口应用于驾驶状态监测，随时关注驾驶员的疲劳状态，以降低疲劳驾驶所带来的风险。在教育领域，脑机接口技术可以实时探测学生的注意力表现，帮助教师及时了解课堂情况以改变教学方法。在市场营销领域，脑机接口技术可用于评价观看广告、电影和电视等媒体内容的观众情绪体验，以及评估更广义的人机交互情景下的用户体验^[9]。

三、脑机接口技术流程与关键核心技术

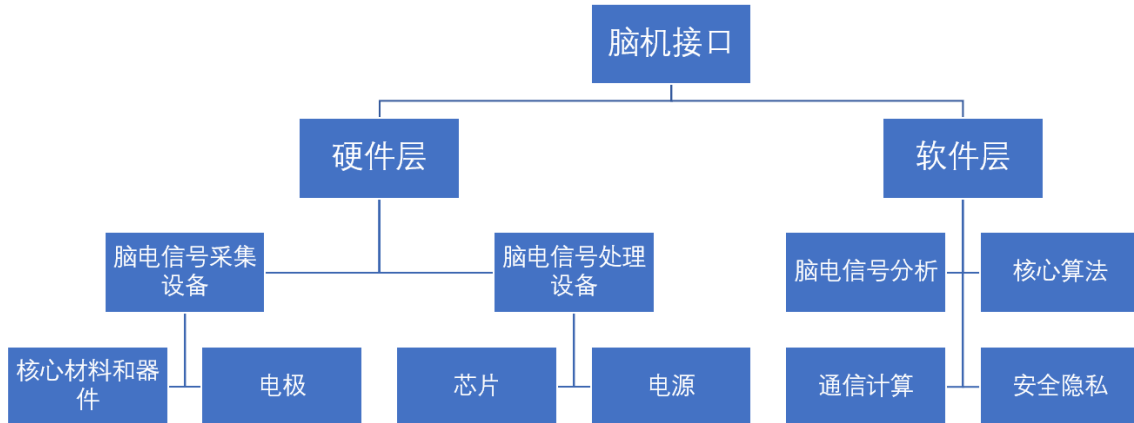


图 3-1 脑机接口技术体系

脑机接口的技术体系主要分为硬件层和软件层，如图 3-1 所示。硬件层包括脑电采集设备和脑电信号处理设备。脑电采集设备包括核心材料和器件、电极，脑电信号处理设备包括芯片、电源等。软

件层包括脑电信号分析、核心算法、通信计算和安全隐私。随着材料科学、信号处理、医疗设备的不断进步，可以采集到的脑电信号的数据量越来越庞大，如何从海量的数据中提取出所需粒度的信息，其中的算法是仍需突破的。而面对海量的数据，硬件层面将面临存储技术的问题，存算一体架构如忆阻器等离线计算是可能的解决方案，软件层则面临数据压缩算法，以及高通量高速数据无线传输等方面的挑战。此外，基于脑电的信息认证及信息安全、隐私保护也将是软件层重点研究和解决的问题。

脑机接口的技术流程和产业链如图 3-2 所示，上游包括脑机接口电极、脑机接口芯片、脑机接口手术，中游包括脑电信号采集、脑电信号处理、脑电信号分析，下游包括应用端外设和应用端软件，本章将分别介绍这些部分。

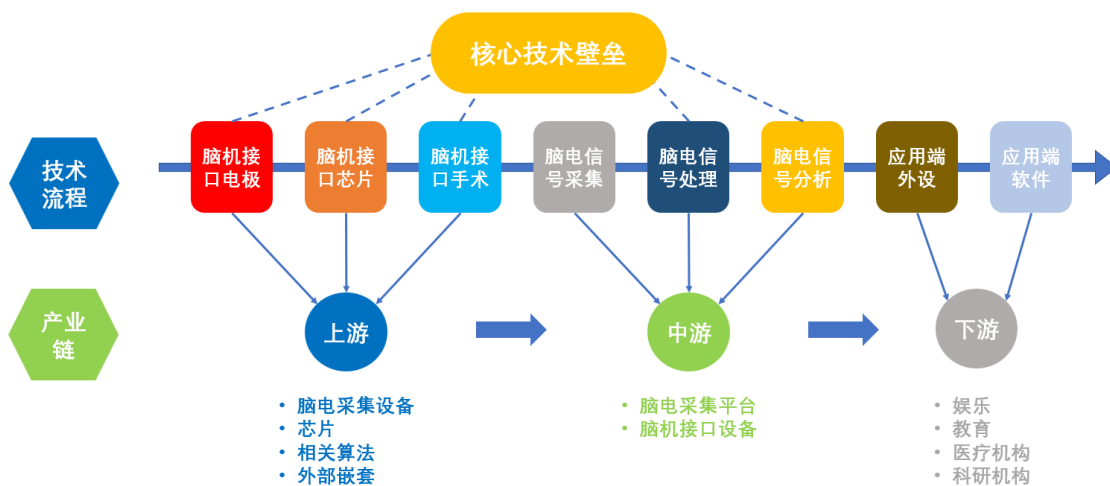


图 3-2 脑机接口技术流程及产业链图

（一）脑科学研究现状

脑科学研究是脑机接口行业出现和发展的基础。脑科学是对神经系统（大脑、脊髓和周围神经系统）及其功能和障碍的科学研究。它是一门交叉学科，结合了生理学、解剖学、分子生物学、发育生物学、细胞学、心理学、物理学、计算机科学、化学、医学、统计学和数学建模，以了解神经元、胶质细胞、神经环路、神经系统的特性。随着技术的进步，神经科学的研究尺度已得到极大扩展，从对单个神经元的分子和细胞研究，到对感觉、运动和认知任务的研究，如学习、记忆、行为、感知和意识。

神经元是构成神经系统结构和功能的基本单位，分为细胞体和突起两部分。细胞体由细胞核、细胞膜、细胞质组成，具有联络和整合输入信息并传出信息的作用。突起可分为轴突和树突，轴突负责传递兴奋冲动，树突负责接收冲动。神经元膜内含有 K^+ ，膜外含有 Na^+ 离子，它们通过离子通道的跨膜转运形成静息电位和动作电位。动作电位是指神经细胞受到刺激时在静息电位的基础上产生的可扩布的电位变化过程。如图 3-3 所示为神经元的示意图。

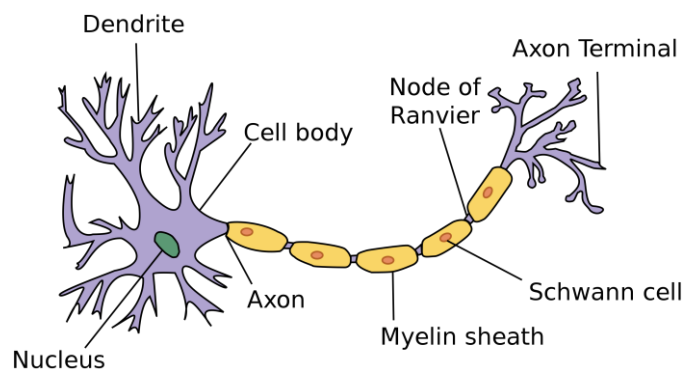


图 3-3 神经元示意图^[17]

神经元构成了神经系统的结构，而突触使得这些结构相互连接构成真正的系统。突触又分为电突触和化学性突触，电突触不需要神经递质来介导，而是电信号的双向直接传递。化学突触是以神经递质为媒介，将电信号转为化学信号再转为电信号的单向传递，根据神经递质的不同可分为兴奋性突触后电位（EPSP）和抑制性突触后电位（IPSP）。

大脑的不同区域负责着不同的功能，如图 3-4 所示，额叶负责解决问题、判断和运动功能，顶叶管理感觉、书写和身体姿势，颞叶与记忆和听力有关，枕叶包含大脑的视觉处理系统。

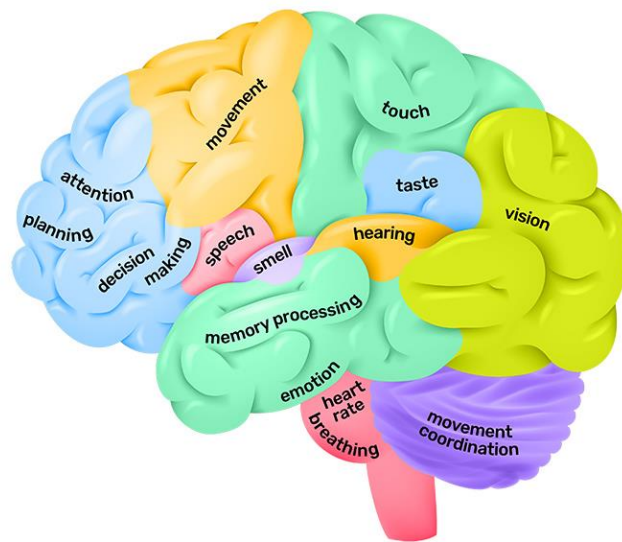


图 3-4 脑功能分区图^[18]

现代神经科学的研究主要可以分为：分子和细胞神经科学、神经环路和系统、认知和行为神经科学、计算神经科学、转化和临床神经科学。分子和细胞神经科学寻求理解神经元和神经胶质内部和之间的基本过程，这些过程和成分通常与神经系统疾病直接相关，

并可能被证明是新药治疗的临床相关靶点。神经环路和系统的研究包括神经回路是如何形成的，并在解剖学和生理学上用于产生反射、多感官整合、运动协调、昼夜节律、情绪反应、学习和记忆等功能。换句话说，他们解决了这些神经回路在大规模脑网络中的功能，以及产生行为的机制。认知和行为神经科学研究神经环路如何产生心理功能的问题。新测量技术的出现，如神经成像、脑电图、脑磁图、电生理学、光遗传学和人类基因分析，结合认知心理学的复杂实验技术，使神经科学家和心理学家能够解决抽象问题，如认知和情绪的神经机制。计算神经科学的研究利用数学模型、理论分析和计算机模拟来描述和验证生物学上合理的神经元和神经系统。例如，生物神经元模型是对尖峰神经元的数学描述，可用于描述单个神经元的行为以及神经网络的动力学，计算神经科学最新研究包括神经编码、神经解码、神经网络动力学、脑机接口。转化和临床神经科学，致力于将基础研究发现转化为临床应用，如特发性震颤、神经退行性疾病等的研究，神经退行性的疾病主要有脑萎缩、老年痴呆症、帕金森综合征以及肌肉萎缩侧索硬化。

脑机接口在脑科学的研究中起到了关键作用，脑科学的进步反过来促进脑机接口的发展。在脑科学研究中，脑机接口主要用于电生理信号的采集，采集的信号可用于脑科学研究分析。同时，脑科学的研究成果可以通过脑机接口得到成果转化与应用。如神经环路、脑功能分区的研究结果，可以为脑机接口的应用提供科学的指导。

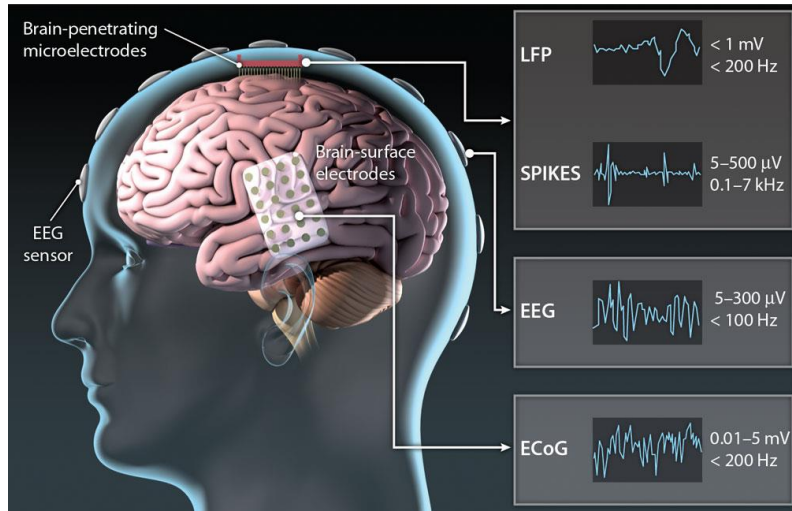


图 3-5 不同深度的脑机接口^[10]

不同的深度脑机接口检测到的信号的精细度和特征不同，如图 3-5 所示。非侵入式脑机接口如头戴式脑电帽，检测到的信号被称为 EEG，是距离皮层较近的按特定几何形态排布并被同步激活的大量神经元突触活动。侵入式脑机接口可以分为皮层脑电（ECoG）和深部脑电信号，皮层脑电是指直接从皮层获得的电信号记录。深部脑电信号可分为单个神经元信号（Spike）和局部场电位（LFP）。深部脑电信号源于插入大脑的小型电极的记录。单个神经元信号记录是用通带大约为 100-2000 Hz 的带通滤波器进行的，而 LFP 记录是用 <math>< 200 \text{ Hz}</math> 的低通滤波器或具有非常低的截止频率（0.1Hz）和 <math>< 100 \text{ Hz}</math> 上限的带通进行的。电极采集到的信号是电极周围不同距离的神经元电信号的叠加，类似于鸡尾酒会效应，需要通过算法提取出单个神经元的信号，如 Neuropixel 电极使用的是尖峰排序和模板匹配等算法。此外，不同深度的脑机接口的时间和空间分辨率不同，如图 3-6 所示，EEG 的时间分辨率最高，但空间分辨率较低。

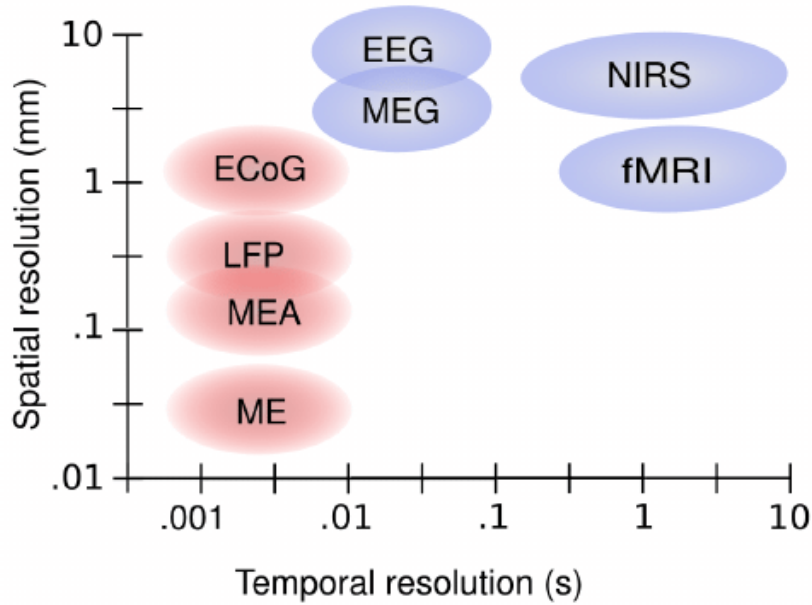


图 3-6 不同脑机接口的分辨率^[11]

新一代脑科学研究已经形成以神经性疾病与治疗、脑科学技术与方法、脑科学信息与服务为中间层，以大脑控制、脑机接口、大脑模拟、人工智能、新药研发、脑控仿生科技、新型教育教学等为应用层的脑科学发展图谱。神经性疾病与治疗是通过对脑损伤和疾病的研究，发展治疗方法；脑科学技术与方法是通过发展神经科学研究的技术和方法，如脑成像、脑电图、单细胞测量等，推动脑科学的发展；脑科学信息与服务是将脑科学的成果应用于人们的生活和健康，如通过脑机接口帮助残障人士。

综上，高科技行业的竞争基础来源于所属领域基础科学的竞争，脑科学的基础研究进展决定着相关行业的发展高度。

（二）脑机接口的分类

随着脑机接口技术的发展，不同的研究组或不同的研究人员使用不同的分类方法来区分脑机接口，目前还没有一个完全统一的分

类标准和结果^[8]。一种常见的分类方法是根据脑信号采集的方式，可以分为**侵入式**和**非侵入式**脑机接口；另一种分类方法是根据脑机接口的范式、感觉刺激和采用的信号类型进行分类，可以分为单一范式/单一感觉刺激/单一脑信号的脑机接口和混合脑机接口。详见图 3-1。以下将进行简要介绍。

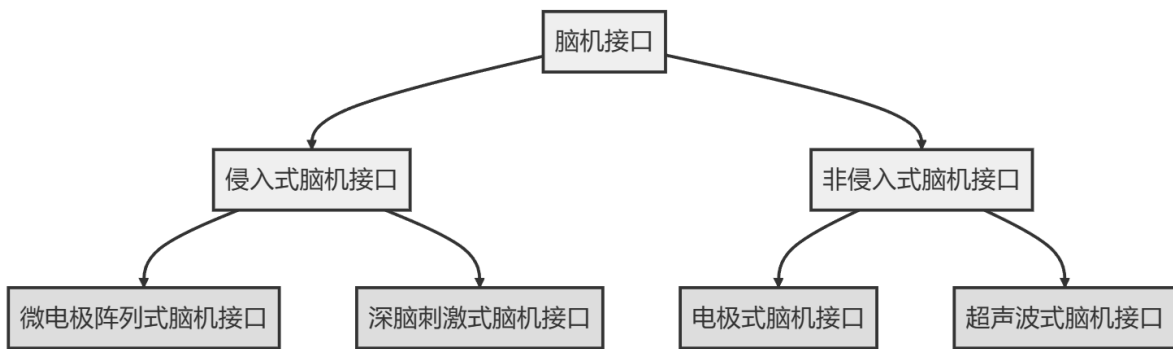


图 3-7 脑机接口分类示意图

1. 侵入式脑机接口

侵入式脑机接口是一种将电极或探针插入大脑皮层以获取神经信号的脑机接口技术。相较于非侵入式脑机接口技术，侵入式脑机接口具有更高的信号精度和稳定性，能够提供更好的控制精度和响应速度，可以实现更复杂的运动和交互任务。同时，侵入式脑机接口技术还可以提供更多的神经信息，帮助科学家研究人类大脑的神经机制。不过，侵入式脑机接口技术也存在一些缺点。首先，该技术需要进行外科手术，对患者具有一定的风险和副作用；其次，电极或探针长期插在大脑中可能会引起感染、出血等并发症；此外，侵入式脑机接口技术的实现成本较高，难以普及和推广。因此，侵

侵入式脑机接口技术适用于一些特定场景，例如临床应用和科学研究等领域，但在普通用户和大众市场中的推广应用受到较大的限制^[8]。

侵入式脑机接口包括侵入式微纳电极和深部脑刺激器（Deep Brain Stimulator, DBS），如图 3-8 为使用侵入式微纳电极 Neuropixel 记录神经元信号。由于这些设备需要在人脑内进行植入和操作，因此具有高度的技术要求和安全风险，并通过伦理检验。

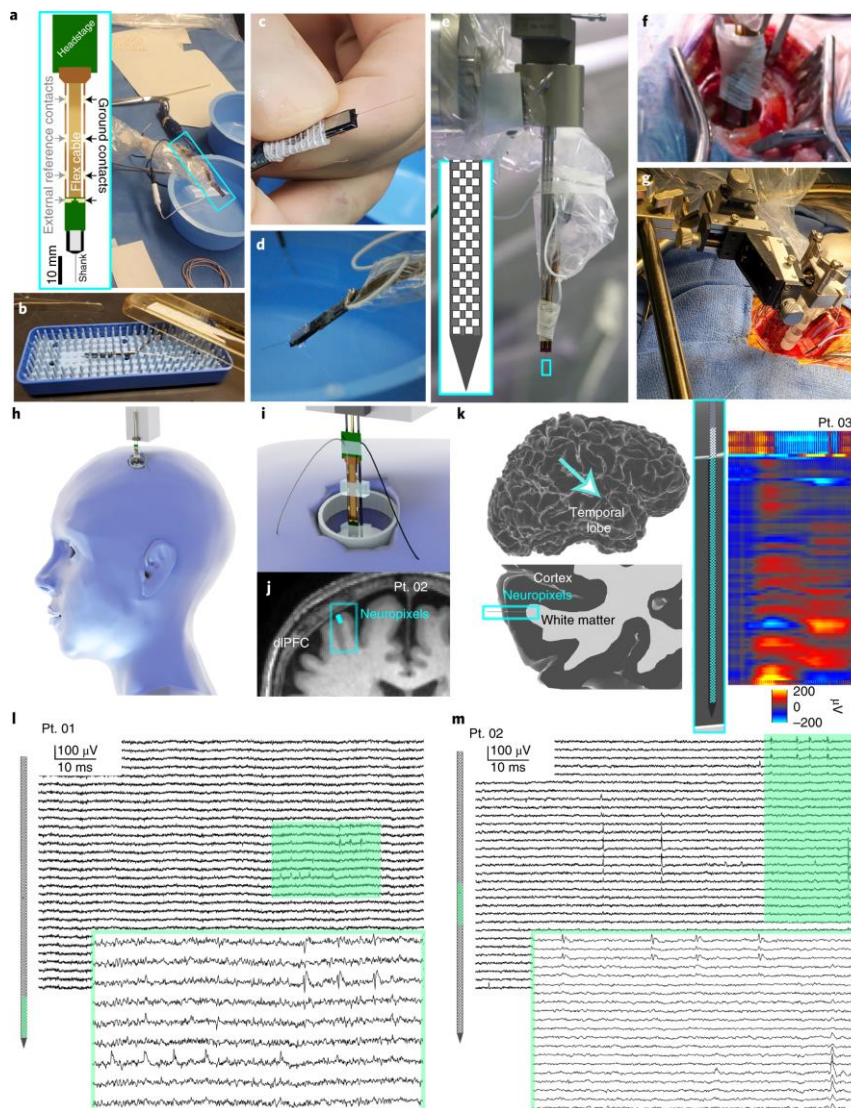


图 3-8 侵入式微纳电极 Neuropixel 记录神经元信号^[12]

核心研发平台是脑机接口植入设备研发的重要部分，主要包括电极的设计和制造、手术操作系统、数据分析软件等。这些平台需要高精度、高质量的设备和原材料，如微纳加工技术、生物材料、显微镜等。此外，匹配硬件设备也是关键，如放大器、多通道数据采集器等。

将侵入式脑机接口植入大脑的过程中所需的设备也是侵入式脑机接口的关键一环。设备需要确保高精度的植入目标位置，涉及到高精度机械自动化控制。得益于植入设备的研发，医生通过开颅手术植入脑机接口的风险和难度有所降低。

供应商来源包括原材料供应商和设备制造商，这些公司通常具有专业的技术和经验，如美国的 **St. Jude Medical** 等公司（如表 3-1 所示）。这些公司提供高质量的电极材料和设备，为脑机接口植入设备的研发和生产提供了重要的支持。

中国在植入式脑机接口的生产能力相对较弱，这主要是由于技术和经验的长期缺乏。长期以来，脑起搏器受到国外垄断。清华大学李路明团队通过二十年的潜心攻坚，孵化出脑起搏器公司——品驰医疗，一举打破国外垄断，在临床中开展大规模的植入。脑机接口植入设备需要高水平的制造和工程技术，需要高精度、高质量的设备和原材料，这些都是需要长期积累和发展的。同时，由于这些设备需要进行严格的安全检测和临床试验，因此对于技术和管理要求更高。虽然中国在生产相关设备和原材料方面取得了一些进展，

但在脑机接口植入设备领域的生产能力相对较弱，需要更多的研究和投资来提升其制造和研发能力。

表 3-1 生产脑机接口植入设备的公司及产品简介

公司名称	简介	研究方向	产品
品驰医疗	总部位于北京市中关村科技园区昌平园，是专业从事脑起搏器、迷走神经刺激器、脊髓刺激器、骶神经刺激器等系列化神经调控产品研发、生产和销售的高新技术企业	深部脑刺激器	G106R
Medtronic	总部位于爱尔兰的医疗器械公司，是全球领先的脑起搏器制造商之一，生产多种类型的脑起搏器电极和相关的手术系统。	深部脑刺激器	Activa、Solectra
St. Jude Medical	总部位于美国的医疗器械公司，专注于生产高品质的脑机接口植入设备，包括深部脑刺激器和植入式脑电图电极等。	深部脑刺激器、植入式脑电图电极	Infinity DBS System、ILUMIEN OPTIS
Boston Scientific	总部位于美国的医疗器械公司，生产多种类型的脑机接口植入设备，包括深部脑刺激器和植入式脑电图电极等。	深部脑刺激器、植入式脑电图电极	Vercise DBS System、Precision Montage MRI Spinal Cord Stimulator
Neuralink	总部位于美国加利福尼亚州的神经科学技术公司，由埃隆·马斯克（Elon Musk）创立，旨在研发高密度、高带宽的脑机接口技术。	深部脑刺激器、植入式脑电图电极	N1 Implant
NeuroPace	总部位于美国加利福尼亚州的医疗器械公司，专注于研发和生产治疗癫痫的植入式设备。	植入式脑电图电极	RNS System
Ad-Tech Medical	总部位于美国的医疗器械公司，生产多种类型的脑机接口植入设备，包括深部脑刺激器和植入式脑电图电极等。	深部脑刺激器、植入式脑电图电极	Custom Stereotaxic Systems、CT/MRI

2. 非侵入式脑机接口

非侵入式脑机接口是指在不需要切开头骨或在大脑内植入电极的情况下，通过放置在头皮表面的电极阵列来获取大脑的电信号，以实现人机交互的技术。相较于侵入式脑机接口，非侵入式脑机接口具有更安全、更简单、更易操作的优点。

非侵入式脑机接口的优点在于其操作相对侵入式脑机接口来说更为简单，不需要进行手术或切开头骨，安全性更高，而且不会给患者带来疼痛或不适。同时，这种技术还可以用于实时监测大脑信号的变化，帮助研究人员更好地了解大脑的工作机制。

然而，非侵入式脑机接口技术也存在一些缺点。首先，由于头皮和头发的存在，信号采集时的信噪比较低，信号的分辨率和准确性受到一定限制。此外，由于大脑信号会受到许多因素的影响，例如肌肉运动、情绪、呼吸等，因此需要采用复杂的算法来处理这些干扰信号，从而获得准确的大脑信号^[8]。

非侵入式脑机接口目前是主流的研究方向，已有较为成熟的试用或应用案例。而侵入式脑机接口的研究组或人员相对较少，但是该类脑机接口研究具有探索价值和潜在的应用，关键在于相关技术的突破，正受到国内外的关注。

（三）脑机接口电极的制备

脑机接口（Brain-Computer Interface, BCI）电极是采集神经电生理的装置通常由微纳电极、头戴式脑电帽电极和脑起搏器电极组成。以下是各种脑机接口电极的制备方法和相关要求：

微纳电极的制备通常需要使用纳米加工技术，如图 3-9 所示为侵入式脑机接口 Neuropixel 的微纳电极示意图和电镜图。制备过程包括使用光刻、电子束曝光和化学蚀刻等步骤，以在硅基底上形成微米级别的电极。在此过程中，需要高精度的加工设备和耐高温、化学蚀刻的化学材料。一些关键的研发平台要求包括电子束曝光机、等离子刻蚀机等。微纳电极的生产主要依赖于一些专业硅片加工公司，如美国的 MEMSCAP 公司和德国的 SCHOTT 公司等。

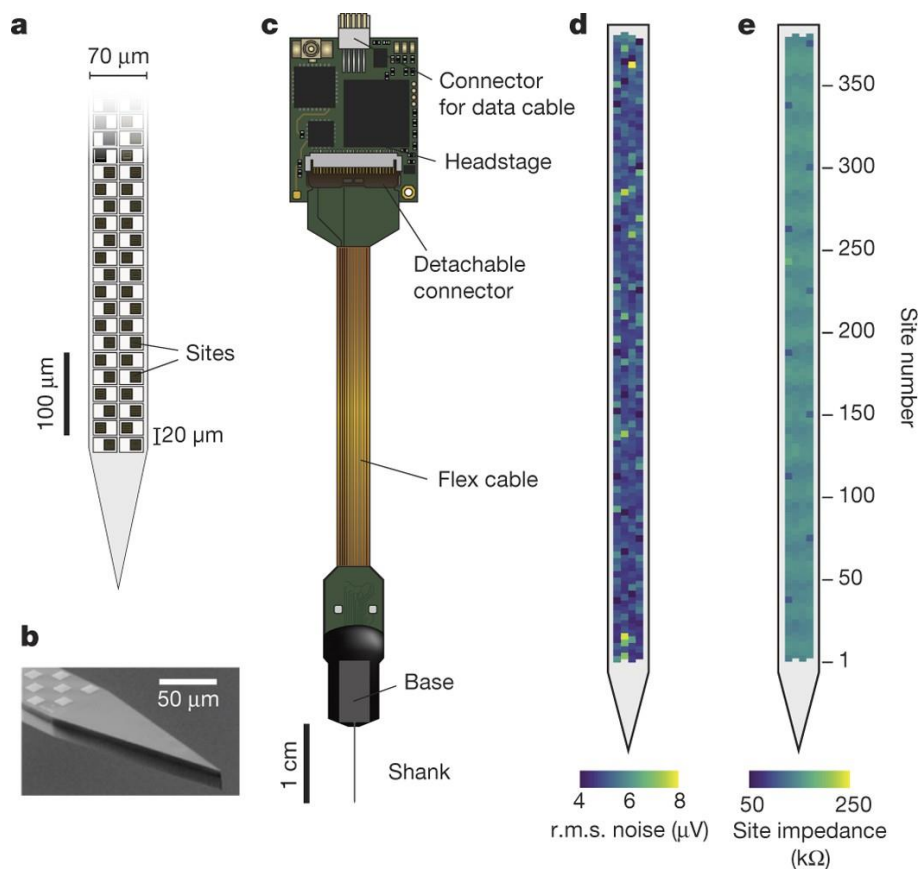


图 3-9 侵入式脑机接口 Neuropixel 微纳电极^[13]

头戴式脑电帽电极的制备较为简单，通常是将金属电极嵌入到头戴式帽子中，并与放大器相连。这些电极通常由银/银氯化物和碳纳米管等材料制成，其制备过程涉及金属电极的制备和头戴式电极

的集成。头戴式脑电帽电极需要与脑机接口放大器相匹配，以确保信号的质量和可靠性。一些脑机接口设备制造商，如美国的 NeuroSky 和 Emotiv 公司等，提供完整的头戴式脑电帽电极和相应的放大器设备。

脑起搏器电极制备需要精确的电极设计和制造，以确保准确的定位和有效的刺激。脑起搏器电极通常由铂/铱等高导电性材料制成，并使用微纳加工技术制造。脑起搏器电极需要与脑机接口放大器相匹配，以确保信号的质量和可靠性。一些脑机接口设备制造商，如美国的 Medtronic 公司和德国的 Sapiens 公司等，提供完整的脑起搏器电极和相应的放大器设备。

总的来说，脑机接口电极的制备需要高精度的加工设备、耐高温、化学蚀刻的化学材料、精确的电极设计和制造等。这些设备均为半导体产业所需，而中国半导体产业从设备到材料都处于被卡脖子的状态，目前正处于攻坚阶段。脑机接口从源头上受到半导体产业制造水平的制约，进而限制了中国脑机接口的产业发展。此外，脑机接口电极还需要与相应的硬件和软件设备相匹配，例如放大器和数据处理软件等。这些设备通常是由脑机接口设备制造商提供（如表 3-1 所示），并需要与电极一起购买。电极制造过程中所使用的原材料也需要高精度和高质量，这些原材料通常需要进口，而中国可能缺乏相关技术和原材料的供应。因此，中国目前还不能完全独立生产高质量的脑机接口电极和相应的设备，但随着技术的不断发展和进步，未来可能会有更多的制造和研发能力。

表 3-2 欧美生产脑机接口电极的公司及产品简介

公司名称	简介	研究方向	产品
Imec	总部位于比利时鲁汶的技术公司，专注于纳米电子和数字技术领域。	微纳电极阵列	Neuropixel
NeuroNexus	总部位于美国密歇根州的神经科学技术公司，专注于开发和生产微纳电极阵列和相关的电子学设备。	微纳电极阵列、电子学设备	NeuroNexus Probes
Blackrock Microsystems	总部位于美国犹他州的医疗器械公司，专注于生产高品质的神经科学研究工具和脑机接口设备。	微纳电极阵列、头戴式脑电帽、脑起搏器电极	Utah Array、Cerebus System、Wireless Neural Matrix
Neuralink	总部位于美国加利福尼亚州的神经科学技术公司，由埃隆·马斯克（Elon Musk）创立，旨在研发高密度、高带宽的脑机接口技术。	微纳电极阵列	N1 Link
g.tec	总部位于奥地利的医疗器械公司，专注于脑机接口和脑-机器界面的研究和开发。	头戴式脑电帽、脑起搏器电极	g.HIamp、g.BSImed、g.GAMMAbox
Medtronic	总部位于爱尔兰的医疗器械公司，是全球领先的脑起搏器制造商之一，生产多种类型的脑起搏器电极。	脑起搏器电极	Activa、Solectra
Sapiens Neuro	总部位于德国的医疗器械公司，专注于脑起搏器电极和相关的脑机接口设备的研发和生产。	脑起搏器电极	Cereneo
Emotiv	总部位于美国的神经科学技术公司，生产高品质的头戴式脑电帽和相关的脑机接口设备。	头戴式脑电帽	Emotiv EPOC X
NeuroSky	总部位于美国的神经科学技术公司，生产基于干式脑电技术的头戴式脑电帽和相关的脑机接口设备。	头戴式脑电帽	MindWave Mobile 2

(四) 脑机接口信号处理芯片

脑电信号处理芯片是将脑电信号转化为数字信号的芯片，通常由模数转换器、滤波器、放大器和数字信号处理器等组成。这些芯片需要高精度的设计和制造，以确保信号的准确性和可靠性。脑电信号处理芯片通常需要与相应的硬件和软件设备相匹配，例如放大器、采集器和数据处理软件等。这些设备通常是由脑电信号处理芯片制造商提供，并需要与芯片一起购买。

脑电信号处理芯片的研发需要高水平的集成电路设计和制造技术，其中包括模拟电路设计、数字电路设计、射频设计、低功耗设计等多个领域的专业知识。一些关键的研发平台要求包括高精度的芯片设计软件、电路仿真软件、射频测试设备和集成电路制造设备等。这些要求限制了中国生产高品质脑电信号处理芯片的能力。

脑电信号处理芯片所使用的原材料包括硅晶圆、金属线材、芯片封装材料等，这些原材料需要高精度和高质量。目前，这些原材料主要依赖于国外供应商，例如硅晶圆主要由美国的 GlobalFoundries 和台湾的台积电等公司生产，金属线材主要由美国的 TE Connectivity 和日本的 Furukawa Electric 等公司生产。此外，芯片制造所需的一些设备和材料也需要进口（如表 3-2 所示），这限制了中国生产高品质脑电信号处理芯片的能力。

表 3-3 生产脑电信号处理芯片的公司及产品简介

公司名称	简介	研究方向	产品
Intan Technologies	总部位于美国加州洛杉矶的集成电路公司，通过将微弱的生物电信号	模拟和数字信号处理器	RHD2216

	直接转换为数字信号，Intan 微芯片取代了电生理监测和数据采集系统中的所有仪器电路。		RHD2164 RHA2116 RHA2132
ADI	总部位于美国马萨诸塞州的集成电路公司，是脑电信号处理芯片领域的领先厂商之一，提供多种高品质的模拟和数字信号处理器。	模拟和数字信号处理器	ADAS1000 、 ADSP-21489
TI	总部位于美国德克萨斯州的半导体公司，也是脑电信号处理芯片领域的领先厂商之一，提供多种高品质的模拟和数字信号处理器。	模拟和数字信号处理器	ADS1299 、 TMS320F28379D
NXP	总部位于荷兰的集成电路公司，专注于设计和生产高品质的模拟和数字信号处理器，包括脑电信号处理芯片。	模拟和数字信号处理器	Kinetis K24 、 LPC54114
Mindray	总部位于中国深圳的医疗器械公司，生产多种类型的医疗设备，包括脑电信号处理芯片和相应的数据采集设备。	模拟和数字信号处理器、数据采集设备	BeneVision N-Series、M-series
NeuroSky	总部位于美国的神经科学技术公司，生产基于干式脑电技术的脑机接口设备和相应的脑电信号处理芯片。	模拟和数字信号处理器	ThinkGear ASIC
聚德科技	总部位于中国北京的半导体公司，是中国领先的脑电信号处理芯片厂商之一，生产多种类型的模拟和数字信号处理器。	模拟和数字信号处理器	JDC1000 、 JDC1101
同方威视	总部位于中国北京的科技公司，生产多种类型的医疗设备，包括脑电信号处理芯片和相应的数据采集设备。	模拟和数字信号处理器、数据采集设备	S10、NT-3

(五) 产业链现状

在脑机接口产业方面，为了实现脑电信号的预处理、信号通信以及部分信号处理环节，整个产业链可以分为上游、中游和下游三个环节。上游包括脑电采集设备（如非侵入式电极和侵入式微电极）、BCI 芯片、处理计算机/数据集和处理算法、操作系统级分析软件和外部嵌套等。中游主要包括脑机接口产品提供商。下游则包括医疗保健、教育培训、游戏娱乐、智能家居、军事国防等各种应用领域。从产业链各环节来看（详见表 3-4），脑机接口产业上游参与者包括芯片和脑电采集设备商、操作系统和软件商、数据分析商等，中游主要是脑机接口产品提供商，下游则包括各种应用领域。

表 3-4 脑机接口产业链

产业链环节		供应商
上游	脑电采集设备	Brain Products, NeuroScan, BrainCo 等
	BCI 主芯片	TI, ST 等
	BLE 芯片及 IP 供应商	泰凌微、锐成芯微、博通集成等
	外部嵌套	Rex Bionics, Oculus, Ekso 等
中游	脑电采集平台	Neuracle(博睿康), Neuralink, BrainGate, NeuroSky(神念科技), Synchron, g.tec, NeuraMatrix, NeuroXess(脑虎科技)等
	脑机接口设备	柔灵科技, MindMaze, BrainCo, NeuroPace, CTRL-Labs 等
下游	应用领域	创新医疗、世纪华通、浙大网新、汤姆猫、科大讯飞(医疗, 科研, 教育, 娱乐, 军事国防等领域)

全球脑机接口产业链发展还处于初期阶段，其上游设备尚未实现标准化量产，自研 BCI 芯片和算法是核心技术壁垒。在国内市场上，脑机接口产业链发展还不够完善，芯片等环节发展也较为薄弱，

当前主要以德州电气（Texas Instruments，TI）、意法半导体（STMicroelectronics）等国际大厂为主。

BCI 芯片的设计涵盖了模拟、数字、通信等多种功能，其技术门槛在于模拟电路设计挑战大、低功耗要求高，且具备无线能量传输能力。如今，BCI 芯片主要有两种方案——通用方案和专用 ASIC（Application-Specific Integrated Circuit）方案。通用方案适用于多种应用场景，而专用 ASIC 方案则针对特定的应用场景进行设计，因此具有更高的性能和功耗优化。一些企业和高校已开始自主设计脑机接口专用 ASIC 芯片，例如，Neuralink、布朗大学和复旦大学等，这些芯片设计和制造都比较复杂。

脑机接口技术是一种交叉学科，需要涵盖多个学科领域的人才，包括神经学、人工智能、材料学、生物学等。然而，在国内外高校中，并没有开设与脑机接口相关的专业课程，这导致脑机接口领域人才的匮乏。除此之外，脑机接口的信号采集需要各种材料和零部件，以及芯片算法等软硬件相结合的技术，技术要求非常高。因此，技术壁垒主要可分为人才壁垒和核心零部件壁垒。

以美国为代表的西方国家在早期对脑机接口技术的研究中，投入了大量的人力、财力和物力，也涌现出了许多行业独角兽，如 Neuralink、Synchron、BrainGate 等。与之伴随的也是不断增高的技术壁垒。目前，脑机接口平台的核心零部件仍然依靠进口，国产化水平有待提高。为了在脑机接口领域赶上并超越西方国家，中国需要加强核心零部件的国产化率。

2021年10月26日，美国商务部工业和安全局(BIS)出合新规，拟向出口管理条例中进一步明确新的管制项目，其中就包括脑机接口技术。此次美国进一步加强脑机接口技术的出口管制，将对中国的脑机接口产业发展造成影响。因此，中国提升核心零部件的国产化率是势在必行的。只有在核心零部件国产化率提高之后，中国的脑机接口产业才能更好地发展。

(六) 脑机接口关键核心竞争点

在脑机接口的工作过程中，脑机接口材料和芯片、脑机接口数据处理相关技术、脑机接口医学相关技术成为核心环节，需要计算机、自动化、材料学、微电子、基础医学、临床医学、神经科学、神经工程、运动康复、心理学等多个学科的人员通力合作，并借助数据管理、机器学习、软件工程等数据处理相关的技术。

1. 脑机接口材料和芯片

脑机接口材料和芯片是脑机接口的关键核心竞争点之一，其主要任务是从大脑获取神经信号，获取信号的质量好坏从源头上影响脑机接口的整体质量及应用。更优质的材料具有更好的生物兼容性并且制备出的电极可以为脑机接口技术提供更高的分辨率和更长时间的记录能力，同时还可以为神经科学研究提供更多的数据支持。脑机接口电极采集信号后一般输入到脑机接口的芯片中进行模数转换，因此脑机接口的芯片技术也是脑机接口的关键核心竞争点，发展方向包括提高信号采集的时间和空间分辨率、减少干扰和噪声等。

2. 脑机接口数据处理相关技术

脑机接口数据处理技术可以把采集到的脑电信号解码为指令。脑机接口系统包括脑电信号的产生、处理、转换和输出等单元，其中脑电信号的转换为核心环节。当前脑机接口的研究重点在于寻找合适的信号处理和转换算法，涉及多种技术，包括数据预处理、数据管理、机器学习算法、软件工程等，并依赖高性能的计算能力^[7]。

①**数据预处理**：神经信号处理技术是脑机接口技术中至关重要的一部分，它可以从神经信号中提取有用信息，并将大脑信号解释为指令以驱动外部设备。神经信号处理技术涉及到多个领域，包括信号去噪、信号特征提取、信号编码和解码等。对于非侵入式的脑机接口，需要对数据进行预处理，如滤波、去除伪迹等，进一步可以将时域信号变换到频域上进行分析；对于侵入式脑机接口，涉及到如何从采集到的信号提取出真实的神经元信号，一般认为这是一个鸡尾酒会问题，不同企业不同产品用的算法不同。近年来，深度学习技术在神经信号处理方面得到了广泛应用，可以帮助脑机接口技术提高指令的准确率和响应速度。

②**数据管理**：数据进行处理后的数据管理在脑机接口研究中扮演着至关重要的角色，它为收集和存储来自不同试验和研究的脑电信号提供了标准化和有效的方式。通过数据管理技术，研究人员可以共享和比较不同实验之间的数据，以便更好地理解脑机接口系统的性能和限制。此外，数据管理技术也可以支持在线实时数据管理和决策制定，进一步提高脑机接口的应用效率和效果。

③**高性能计算**：高性能计算技术是实现脑机接口系统大规模数据分析和实时信号处理的关键。通过利用高性能计算机集群，可以实现对多个脑电信号源的并行计算，提高数据处理效率和速度。此外，高性能计算技术还可以支持复杂的计算机视觉算法，从而实现更高的精度和准确性。

④**机器学习算法**：机器学习算法是脑机接口研究中不可或缺的一部分。这些算法可以自动地学习和优化大量脑电信号数据的特征，从而发现更为复杂和微妙的关系，进一步提高脑机接口系统的准确性和稳定性。近年来，基于深度学习的算法已经成为脑机接口研究中的热点领域，具有非常广阔的应用前景。

⑤**软件工程**：软件工程技术可以支持脑机接口研究的集成化和系统化，加速研究成果的应用和转化。例如，软件工程技术可以帮助研究人员构建脑机接口系统的软件平台，提高其效率和稳定性；同时，也可以提供丰富的软件开发工具包，支持不同领域的开发人员快速开发和部署自己的脑机接口应用程序。此外，软件工程技术还可以支持脑机接口系统的实时监控和控制，进一步提高其性能和应用效果。

3. 脑机接口医学相关技术

医学在脑机接口中扮演着脑机接口应用端之前的最后一个环节，因此也是决定脑机接口能否发挥作用，应用效果的一环。对于非侵入式的脑机接口，医学在其中起指导作用，对侵入式脑机接口，需要临床医生的专业技术将脑机接口植入人脑，运动康复和神经学。

其中，神经学关乎脑机接口对神经信号的识别与处理，认知神经学可为脑机接口提供理论基础和规范设计^[14]。

①**基础医学**：基础医学中神经科学方向的研究人员主要研究人类的思维、感知和行为等认知过程并探究其神经机制。脑机接口技术的研究和应用离不开基础医学的支持，基础医学对于神经科学的研究可以提供脑机接口技术的理论基础，帮助研究人员设计脑机接口实验的范式，并为脑机接口技术的主体评价提供指导。

②**临床医学**：脑机接口技术在临床医学中有广泛应用，可用于评估和治疗一些神经系统相关的疾病，如癫痫、帕金森病、中风等。除了传统的治疗方法，脑机接口技术可以提供一种创新的治疗方法，例如使用脑机接口辅助恢复肢体活动功能。此外，脑机接口技术还可以用于疾病的早期诊断和预测。

综上所述，脑机接口技术是一种涉及多个科学领域的交叉技术，其关键技术包括数据管理和医学相关技术。脑电信号的处理和转换成脑机接口工作的核心环节，需要数据管理、机器学习、软件工程等技术的支持。此外，临床医学、认知神经科学、神经记录和神经信号处理等医学技术在脑机接口的发展中具有重要作用。

（七）脑机接口面临的挑战

脑机接口在发展过程中面临诸多挑战，主要包括技术成熟度极低、跨多学科导致的技术复杂性、难以商业化和规模化，以及安全和伦理问题，如图 3-2 展示了脑机接口面临的挑战之间的关联。

①**技术成熟度极低**：从脑机接口技术的角度来看，该技术的成熟度非常低。目前，对大脑反馈刺激和大脑工作机制的研究十分有限。同时，脑机接口技术的研究尚处在解决“从脑到机”方向的输出和控制问题，但控制的效率和准确率很低。研究“从机到脑”的问题难度更大，原因是目前神经科学相对于神经编码的具体方式还处于未知状态。此外，在信号采集的过程中，非侵入式接口存在采集信号差的问题，而侵入式接口需面临对脑部损伤的问题，随着接口植入时间延长，穿刺电极被炎症细胞覆盖会导致信号丢失。

②**跨学科的复杂性**：脑机接口技术是一个跨学科的研究领域，需要多个学科的支持和协同合作。为此，需要加强不同领域之间的交流和合作，建立起一个开放的平台，促进各方面的资源整合和知识共享。同时，还需要提高不同学科专家的综合素质，加强对多学科知识的了解和掌握，从而实现跨学科合作的无缝对接。

③**难以商业化和规模化**：目前，脑机接口的发展阶段还处在实验室展示的水平，离真正的商业化还有很长的距离。走在脑机接口行业前沿的 Neuralink 公司在 2020 年 8 月末展示了用三只小猪实现可实际运作的脑接口芯片自动植入手术设备，但目前尚未有商业化和规模化生产的消息。此外，脑机接口技术还需要面临诸多商业化和规模化方面的挑战，例如，如何降低成本、如何扩大生产规模、如何实现市场营销和如何维护市场竞争力等等。尽管脑机接口技术在未来可能会成为一个巨大的市场，但目前要实现商业化和规模化仍然面临着重重的挑战。另外，当前尚无统一的脑机接口基础理论框

架，缺乏能对脑机接口系统的性能进行科学评价的评价标准。商业化、监管无先例可循。由于脑机接口技术和市场目前都还处在早期的阶段，产业规模并不清晰，产品合规性有待商榷，没有相关法律可以遵循，难以实现完整的脑机接口商业化发展。

④**安全伦理问题**：脑机接口技术的应用可能会涉及到一系列的安全和伦理问题，需要引起足够的重视。例如，黑客攻击、意念控制、数据窃取等安全问题，以及人性问题、伦理问题、审查问题等等。为了解决这些问题，需要加强相关法律法规的制定和落实，同时还需要加强对安全和伦理问题的研究和预测，以提前预防和化解可能出现的问题。此外，还需要加强公众宣传和教育，让人们了解脑机接口技术的原理、应用和风险，从而做出明智的决策。

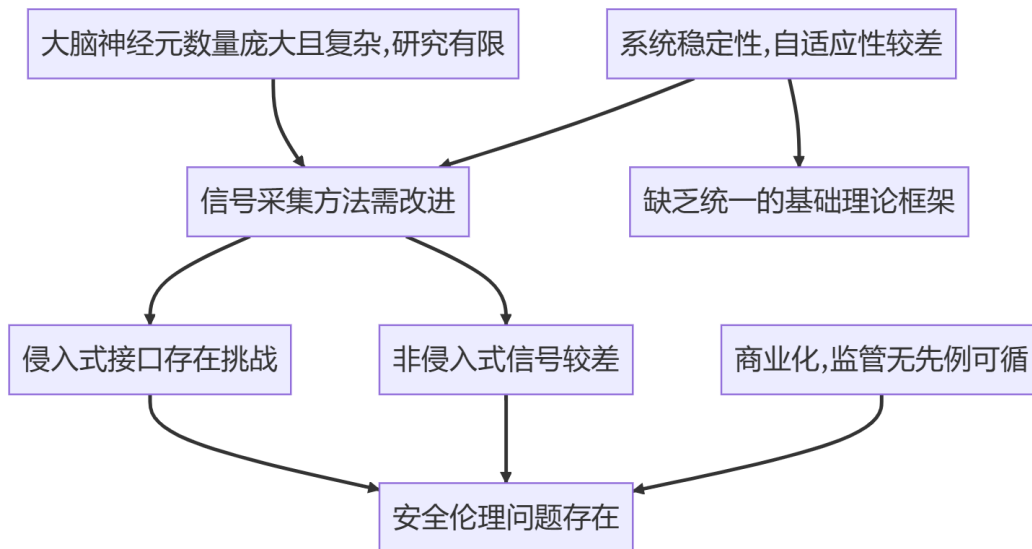


图 3-10 脑机接口技术研究与应用中存在的问题

四、基于人工智能的脑机接口技术在医疗领域的应用场景分析

随着人类寿命的延长和老龄化人口的增加，医疗服务需求越来越高，同时医疗成本也在不断增加。基于人工智能的脑机接口技术的应用（如图 4-1 所示），有望为医疗行业带来革命性变革，减轻医疗人员压力，提高医疗效率，降低医疗成本。

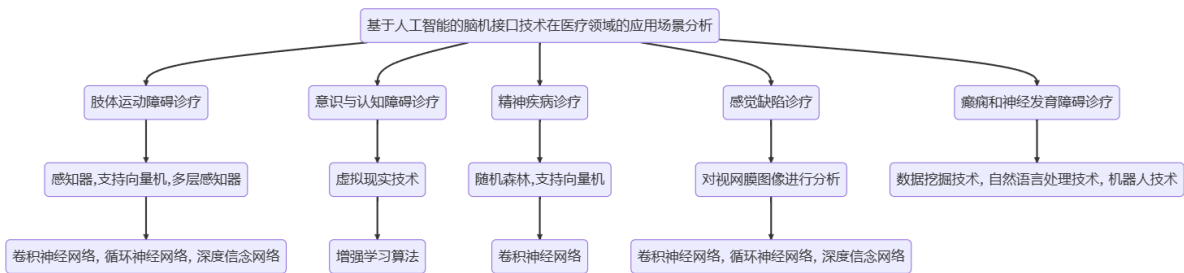


图 4-1 基于人工智能的脑机接口技术在医疗领域的应用场景分析

（一）肢体运动障碍诊疗中的应用

肢体运动障碍是一种神经系统疾病，其主要症状是肌肉僵硬、肢体无力和协调障碍等。这种疾病对患者的生活和工作产生了极大的影响，也给医生的诊疗带来了巨大的挑战。近年来，人工智能技术的快速发展为肢体运动障碍的诊疗带来了新的机遇，特别是在脑机接口技术方面。本报告将介绍脑机接口技术的原理以及人工智能在脑机接口技术中的应用，旨在为肢体运动障碍的诊疗提供参考^[15]。

人工智能在脑机接口技术中的应用主要体现在两个方面：信号处理和分类。信号处理是指将采集到的脑电信号进行预处理，包括滤波、降噪、放大等操作，以提高信号的质量和可靠性。分类是指根据信号特征对脑电信号进行分类，以实现对外部设备的控制。

运动意图识别和分类是脑机接口技术中最核心的问题之一，它直接影响到外部设备的控制效果。目前，基于深度学习算法的运动意图识别和分类方法在脑机接口技术中得到了广泛应用。其中，最新的算法主要包括基于神经网络的方法和基于深度学习的方法。

基于神经网络的方法主要包括感知器、支持向量机（Support Vector Machine, SVM）和多层感知器（Multi-Layer Perceptron, MLP）等。这些方法主要基于传统的机器学习算法，需要手动选择特征并进行分类器的训练。虽然这些方法在一定程度上可以实现运动意图的识别和分类，但是它们的效果受到特征选择和分类器的影响，且无法充分利用深度学习算法的优势^[15]。

基于深度学习的方法主要包括卷积神经网络（Convolutional Neural Network, CNN）、循环神经网络（Recurrent Neural Network, RNN）和深度信念网络（Deep Belief Network, DBN）等。这些方法可以自动学习和提取脑电信号的特征，从而实现对运动意图的识别和分类。研究表明，基于深度学习的运动意图识别和分类方法在肢体运动障碍的诊疗中表现出了良好的效果^[15]。最新的算法主要是基于深度学习和卷积神经网络的方法。研究人员通过将脑电信号转化为二维图像，利用卷积神经网络自动学习和提取信号的空间特征，进而实现对运动意图的识别和分类。例如，研究人员利用卷积神经网络对手臂运动意图进行分类，实现了对外部机器手臂的控制。这种方法具有实时性和准确性高的优点，可以为肢体运动障碍患者提供更加自主和便利的生活方式。

（二）意识与认知障碍诊疗中的应用

在意识与认知障碍的诊疗中，一种常用的方法是利用脑机接口技术来监测脑电信号，并通过分析这些信号来确定患者的疾病类型。现在，基于深度学习的方法已经被广泛应用于脑电信号的分类和诊断。这些方法主要包括卷积神经网络、循环神经网络和自编码器等。通过这些方法，可以更加准确地确定患者的病情，并为医生提供更加有效的治疗方案。

此外，在脑机接口技术的应用中，一些研究人员还利用了增强学习算法来优化脑机接口的控制策略。这些算法可以通过学习与环境交互的方式来改进控制策略，使得脑机接口可以更加准确地识别和响应患者的意图。这种方法已经在某些意识障碍患者的康复治疗中得到了应用，取得了良好的效果。

另外，一些研究人员还尝试将脑机接口技术和虚拟现实技术相结合，来帮助患者进行认知训练和康复治疗。通过虚拟现实技术，患者可以更加直观地体验治疗过程，并且可以根据自己的需要自主调整治疗内容和难度^[15]。

（三）精神疾病诊疗中的应用

精神疾病是一种病理状态，包括各种心理和行为障碍，通常需要长期治疗和护理。而传统的精神疾病治疗方法如药物治疗、心理治疗等，存在着各种限制和不足。因此，发展新的治疗方法是必要的^[16]。在精神疾病诊疗中，脑机接口技术可以通过监测患者大脑活动的方式，为医生提供更加精准的信息。这一技术可以帮助医生了

解患者的思维和情感状态，从而更好地诊断疾病并制定个性化的治疗方案。

近年来，一些新的方法和算法已经被应用于脑机接口技术中，以提高其在精神疾病诊疗中的应用价值。其中，深度学习算法是一个非常具有前途的方法，可以用于对大脑活动信号的分析 and 识别。这种算法可以通过对大量数据的学习和训练，自动识别患者的思维和情感状态，从而提高诊断的准确性。

此外，基于深度学习算法，还有一些其他的方法和算法也被应用于脑机接口技术中。例如，**CNN** 可以用于对脑电图数据的分类和识别，从而实现对患者大脑活动的监测和分析。同时，**SVM** 和随机森林（**Random Forest, RF**）等机器学习算法也可以用于精神疾病的诊断和治疗中。

目前，一些应用案例已经证明了人工智能在脑机接口技术中的潜在价值。例如，在抑郁症的诊疗中，研究人员可以通过监测患者的大脑活动，使用深度学习算法自动识别抑郁症患者的思维和情感状态。基于这些信息，医生可以制定个性化的治疗方案，以帮助患者更好地应对抑郁症。

（四）感觉缺陷诊疗中的应用

在感觉缺陷的诊疗方面，脑机接口技术可以通过实现人脑与外部设备的无缝连接，来恢复失去的感觉功能。例如，一些研究人员正在开发一种可穿戴设备，它可以通过与人脑进行直接交互，来帮助那些失去听力或视力的人们重建他们的感知能力。另外，该技术

还可以帮助那些失去运动能力的人们，通过控制外部设备的功能来恢复他们的自主行动能力。

具体来说，人工智能可以通过脑机接口技术实现对脑电信号的解析和识别，从而实现对患者感觉缺陷的精确定位和诊断。同时，人工智能还可以对脑机接口技术的信号处理和信息提取进行优化，从而实现更高效的诊断和治疗。例如，可以通过人工智能算法对脑电波的频谱进行分析和处理，帮助医生更好地了解患者的症状和疾病进展情况，并为后续治疗提供更准确的依据。

深度学习算法可以对视网膜图像进行分析，识别和测量眼底的各种特征，如视神经盘、黄斑和视网膜动脉等。这些特征与眼睛的健康状态密切相关。通过比较受影响的眼睛与正常眼睛的数据，深度学习算法可以确定视力问题的类型和程度^[16]。

卷积神经网络和循环神经网络可以识别和分析声音信号中的频率、振幅和时序等特征。这些特征与不同类型的听力问题相关。通过训练这些神经网络模型，可以从声音信号中提取有效的特征，以区分正常听力和不同类型的听力障碍^[16]。

此外，机器学习算法可以对皮肤传感器信号进行分析，提取和比较受影响的皮肤区域与正常皮肤的差异。这些差异可能涉及皮肤电位、皮肤温度和皮肤压力等特征。通过训练机器学习算法，可以将这些特征与不同类型的触觉障碍相关联，以提高感觉缺陷的诊断准确性^[16]。

通过使用深度学习、卷积神经网络和循环神经网络等人工智能模型，可以分析和识别感觉缺陷相关信号中的特征，从而提高感觉缺陷的诊断准确性和效率。这些算法的运作原理与传统的模式识别技术不同，其更具有自适应性和泛化性，可以应用于不同类型和不同程度的感觉缺陷诊疗中。

（五）癫痫和神经发育障碍诊疗中的应用

癫痫和神经发育障碍是一类神经系统疾病，影响着全球数百万人的生活质量。尽管传统的治疗方法（如药物治疗和手术）已经取得了一定的成功，但这些方法并不是完全有效的，有时会产生副作用和风险。随着人工智能技术的发展，越来越多的研究者开始将其应用于癫痫和神经发育障碍的诊疗中，希望能够改善这些疾病的治疗效果^[16]。

图像识别技术被广泛应用于癫痫和神经发育障碍的诊疗中。这些技术可以帮助医生更准确地分析病人的病情，从而制定更好的治疗方案。最新的算法采用了深度学习的方法，可以在准确性和效率方面取得更好的表现^[16]。例如，使用深度学习算法进行脑电图分析可以更快速、准确地检测到异常电信号，提高了癫痫的诊断准确性。

数据挖掘技术也被广泛应用于癫痫和神经发育障碍的诊疗中。通过对大量病例数据的分析，可以发现潜在的规律和趋势，帮助医生更好地了解病情和治疗方案。最新的算法采用了机器学习的方法，可以更好地挖掘数据中的信息，并进行预测和决策。例如，使用机

机器学习算法可以预测癫痫的发作时间和类型，帮助医生制定更精准的治疗计划^[16]。

自然语言处理技术可以帮助医生更好地理解和分析病人的病历和医疗文献。最新的算法采用了深度学习和语义分析的方法，可以更准确地识别和提取关键信息，并对文本进行分类和摘要。例如，使用深度学习算法可以自动识别脑电图记录中的不同事件类型，并对其进行标记和分类，帮助医生更好地理解病人的脑电图数据^[16]。

机器人技术在癫痫和神经发育障碍的治疗中也发挥着越来越重要的作用。机器人可以帮助医生在手术中更精确地定位和操作，从而减少手术风险和副作用。最新的算法采用了深度学习和视觉识别的方法^[16]，可以实现更准确和安全的手术。例如，使用深度学习算法可以自动识别脑部结构，并指导机器人进行手术操作，提高手术的精度和安全性。

五、脑机接口技术的产业现状

脑机接口产业现状国内外情况差异较大，表 5-1 列出了脑机接口技术的国内外主要研究机构及其代表性成果。以美国为例，对比中美脑机接口技术现状。在侵入式脑机接口方面中国没有比肩美国的成果。虽然中国在脑起搏器和皮层脑电方面并非空白，但与美国仍有一定差距。在微创脑机接口方面，国内在微创电极方面有部分机构在进行，但缺乏 Neuropixel 等重量级成果，美国研究机构的一些成果是国际合作的产物，目前来看难以超越甚至难以复制。在非侵入

式脑机接口方面，国内外差距相对于侵入式较小，国内已经有成熟的研究成果和产品落地。

表 5-1 脑机接口技术国内外主要研究机构及代表性成果

国内/ 国外	单位	类别	研究方向和成果
国外	美国明尼苏达大学 贺斌研究团队	非侵入式	在 2019 年，生物电系统（包括脑电和心电）的研究成功地开发出了第一款由大脑控制的机器人手臂，这个机器人手臂具有连续跟踪计算机光标的能力。
	加州大学	侵入式	利用 ECoG 电极矩阵采集颅内脑电信号，并结合深度学习和最新语音合成技术，将这些神经信号转换成自然流畅的合成语音。
	美国加州大学圣地亚哥分校 Swartz 计算神经科学中心	非侵入式	开发了 EEGLB、FMRLAB 和 BCILAB 平台，这些平台可以使用 EEG、MEG、fMRI 等方法来观察和模拟多个大脑区域的功能活动之间的动态相互作用。
	美国 Wadsworth 中心 Wolpaw 教授团队	非侵入式	该研究首次证明了 EEG 感觉运动节律在基于 BCI 的通信和控制方面的有用性，并将其扩展到多维运动控制。同时，研究团队还开发了通用的 BCI 软件平台 BCI2000，为未来的研究提供了一个基础平台。
	杜克大学 Nicoletis Lab	非侵入式	进行了具有开创性的研究，涉及人类患者和非人类灵长类动物的神经元群体编码、脑机接口和神经假体研究。支持使用覆盖广泛皮层区域的电极来提取神经信号并驱动脑机接口。
	哈佛大学 Lab of Dr.Sydney Cash	非侵入式	利用非侵入性设备测量大脑的活动和结构，可以获得大脑的整体视图。
	奥地利格拉茨技术 大学	非侵入式	使用事件相关同步/去同步电位作为脑机接口输入，研究人员成功地完成了通过运动想象控制外围设备的实验。此外，2015 年还发布了一份脑机接口研究路线图。
	柏林工业大学	非侵入式	一项新的无线模块化硬件架构已经发布，可以同时采集脑电、功能近红外脑功能



国外			像，以及其他常规生理参数，如心电、肌电和加速度等。同时，还推出了混合脑机接口数据集，其中包含了同时采集的脑电和近红外脑功能影像信息。
	德国图宾根大学	非侵入式	利用功能近红外脑功能成像技术，研发了一款脑机接口系统，可以应用于患有意识障碍状态的患者。这是首次实现了这一目标。
	斯坦福大学神经义肢移动实验室	侵入式	提供脑机接口临床治疗方案，旨在帮助瘫痪患者。该方案旨在提取植入患者大脑电极的记录信号，从而提供准确、高效、可靠的辅助技术控制。
国内	清华大学医学院洪波教授团队	非侵入式	洪波课题组和解放军总医院功能神经外科合作，通过手术前的功能磁共振影像精准定位目标脑区，使用了 3 个颅内电极，实现了微创植入脑机接口打字，每分钟速度达到 12 个字符，每个电极的等效信息传输率达到 20 比特/分钟。相比之下，2021 年美国斯坦福大学脑机接口团队基于运动脑区的神经信号实现了手写字符高速识别，使用了 192 个微针硅电极，每个电极的等效信息传输率约为 2 比特/分钟。
	清华大学电子工程系张洵淋教授团队	侵入式	长期致力于面向生物医学的低噪声低功耗电路设计与系统集成方法学研究。针对脑科学前沿研究对无线小型化神经接口的强烈需求，提出了适用于神经信号频段的高精准、低功耗神经接口专用电路设计方法、可植入闭环神经接口系统设计方法等神经接口系统设计关键问题解决方法。
	清华大学航天航空学院李路明教授团队	侵入式	研制成功了国内第一个治疗帕金森病的植入式脑深部刺激器--脑起搏器，使我国成为继美国之后，全球第二个能够设计生产制造脑起搏器并将其应用于临床的国家。发明碳纳米植入电极、脑起搏器软件重植等技术，建立了与脑起搏器相关的神经调控技术自主知识产权体系。



国内	清华大学医学院 BCI 实验室高小榕 教授团队	非侵入式	提出并实现了一种基于 SSVEP 的非侵入式 BCI 技术。该技术通过解码大脑初级视觉皮层的振荡频率来确定用户正在注视的刺激物，并将其转换为相应的指令输出。
	华南理工大学自动化科学与工程学院 李远清教授团队	非侵入式	取得了在基于脑机接口的植物人意识检测方面的显著科研成果。已经成功建立了脑机接口研发平台，并开发了多个脑机接口系统，如脑控轮椅、脑控护理床、脑控电视和脑控电灯等。
	上海交通大学计算机科学与工程系吕 宝粮教授团队	非侵入式	成果在脑电与情感识别，以及疲劳驾驶方面表现突出。
	天津大学医学工程 与转化医学研究院 明东教授团队	非侵入式	开展了以神经系统认知与调控为研究主线的工作，重点聚焦于脑-机交互在特种医学、人机工程、物理医学和康复工程等领域的应用。在这些领域，研究涉及神经工效感知交互、人工神经康复机器人、新型脑-机接口和定量脑电信息标定等领域，探索了神经系统认知与调控的新方法和新技术。
	华东理工大学信息 科学与工程学院金 晶教授团队	非侵入式	研究基于脑机接口技术的脑卒中病人的新型康复技术、肌萎缩侧索硬化病人的辅助技术设计、模式识别与机器学习在生物信号识别中的应用。
国内	北京理工大学机械 与车辆学院毕路拯 教授团队	非侵入式	利用运动想象的脑机接口控制车辆。
	上海大学机电工程 与自动化学院杨帮 华教授团队	非侵入式	主要的研究方向是在医疗康复领域中，应用运动想象脑机接口解码技术、虚拟现实技术以及将 BCI 和 VR 技术相结合的方法。研究涉及多个方面，其中包括脑卒中患者的康复训练系统等。

	华中科技大学自动化学院脑机接口与机器学习实验室伍冬睿教授团队	非侵入式	智能医疗与情感计算的脑机接口
	西安交通大学徐光华教授团队	非侵入式	重点研究是中风患者的康复，着重探究脑机主被动协同康复机理以及脑控中风康复机器人。
	昆明理工大学伏云发教授团队	非侵入式	研究重点在于探究脑信息处理、脑-机交互控制和通信方面的理论、方法、模型及其创新应用。致力于发展脑功能神经成像技术、计算脑网络连通性、设计脑-计算机接口并推动其创新应用。
	中国科学院自动化研究所余山研究员团队	侵入式	高生物兼容性电极材料、高性能脑机接口芯片、微创植入技术、高鲁棒性编解码算法等方面的研究。
	浙江大学脑机接口研究所郑筱祥教授团队	侵入式	国内首例侵入式脑机接口（BCI）临床转化研究已于2020年完成。
	中国科学院神经科学研究所崔嵩研究员团队	侵入式	研究主要关注于以下方面：神经科学基础的运动控制、脑机接口技术和解码方法。目标是为设计类脑智能机器人和为运动障碍患者提供假肢和康复方案提供支持。

当前脑机接口产业中美之间的差距主要体现在多个单一学科力量无法与美国竞争。每一项神经工程技术都是多学科合作的结果，如果任何一部分薄弱，技术就无法完成。对比中美在脑机接口产业现状上的差距后，我们可以总结目前国内的脑机接口产业现状有如下特点：

（一）科研院所为主，侧重非侵入式脑机接口研究

脑机接口技术是一项跨学科交叉融合的前沿领域，目前的研究主要由科研院所和高校为主导。表 5-1 列出了国内外主要的脑机接口技术研究机构和研究组。国内外许多知名大学已经开始开展脑机接口的前瞻性研究，并取得了丰硕的研究成果。

然而，由于技术、伦理等多重限制，侵入式脑机接口的研究投入相对较小，研究机构和企业数量也远少于非侵入式脑机接口。例如，侵入式脑机接口的关键器件的研究和开发是与半导体材料和加工技术同步发展的。由于大脑组织的特殊性，其采集设备对安全性的要求极高。目前除了传统的刚性电极，柔性电极方面的研究也在逐渐发展，如 Neuralink 开发的“神经蕾丝”技术，在人脑中植入细小的电极，微米级的螺纹插入大脑控制运动的区域。每根线都包含许多电极，并将其连接到植入物。在中国，成立于 2016 年的科斗脑机也开发出多种侵入式脑微电极。

然而，目前侵入式电极的使用时间最长不超过两年，技术仍存在瓶颈。此外，由于涉及到伦理等多重问题，侵入式脑机接口的研究和应用受到了很大的限制。相比之下，非侵入式脑机接口由于技术难度相对较低，研究投入和研究机构和企业数量都较多，其发展速度更快。

（二）市场潜力大，已成为新投资热点，未来发展可期

从公司的角度来看，由于脑机接口研发成本高、专业人才缺乏、盈利模式不明等诸多原因，相对于其他人工智能产品，涉足这一领

域的公司较少。但随着近两年脑科学、类脑科学和人工智能技术的不断进步，脑机接口受到了更多的关注，其中包括 2019 年 Facebook 计划以约 10 亿美元收购脑机接口创企 CTRL-Labs，以及 2020 年 8 月份 Elon Musk 旗下的脑机接口初创企业 Neuralink 公开最新研究成果，都使得脑机接口从实验室被推向了公众视野，并成为当下投资热点。在国内，脑机接口领域的企业博睿康科技也完成了过亿元 B 轮融资。阿里达摩院发布的《2022 十大科技趋势》预测指出，脑机接口将迎来重大进展，帮助人类超越生物学极限。据 QYResearch 的数据显示，2019 年全球脑机接口市场规模已经达到了 12 亿元，预计到 2026 年将达到 27 亿元，年复合增长率为 12.4%，其中北美地区是全球最大市场，占总市场份额超过 6 成。联合市场研究公司的数据同样显示，2020 年脑机接口的市场规模达到了 14.6 亿美元。而从脑机接口可影响到的应用领域来看，不论是医疗、教育还是消费，都将带来远超过于十几亿美金的巨额市场空间。

然而，国内对于脑机接口的研发处于初期阶段，无论是技术还是市场起步都比国外要晚。目前国内的脑机接口企业主要集中在医疗领域，非医疗领域的应用场景主要包括教育和智能家居。表 5-2 列出了国内外主要脑机接口芯片厂商，表 5-3 列出了脑机接口技术在医疗健康领域的主要应用产品（因研究有限，可能存在疏漏）。企业融资信息看表 5-4。虽然国内的脑机接口市场相对较小，但是随着技术和市场的不断成熟，其发展潜力和市场前景都将会越来越大。

表 5-2 脑机接口主要芯片厂商

公司名称	简介	研究方向	产品
Neuralink	2015 年创立，2016 年马斯克将其收购。	专注于研究侵入式脑机接口，旨在开发能够将人工智能植入人类大脑皮层的脑机接口技术。	Neuralink 在 2019 年推出了自主研发的 N1 脑部传感器芯片，该芯片可以将细胞膜表面电位记录下来，并通过滤波等处理将其转化为数字信号。
NeuroSky	2004 年成立于美国圣何塞，拥有国际领先的生物信号传感技术	主要研究和开发生物信号采集处理、脑机接口等领域的技术。	NeuroSky 的 ThinkGear 技术将采集、滤波、放大、A/D 转换、数据处理和分析等脑电波信号的功能完全集成到一个 ASIC 芯片中。
中电云脑（天津）科技有限公司	2018 年成立于天津	中国电子信息产业集团与天津大学合作，共同打造国家健康医疗大数据云脑中心。	在 2019 年，开发了一款名为“脑语者”的高度集成的脑机交互芯片。
NeuraMatrix	成立于 2019 年，清华大学孵化企业	开发新一代脑机接口平台，包括以下方面：设计脑机接口芯片、开发系统化设备以及打造软硬一体化平台。	NeuraMatrix 已经完成了几轮迭代，自主研发的脑机接口芯片已经流片完成，即将发布。

表 5-3 脑机接口技术在医疗健康领域的主要应用产品

国内/国外	公司名称	简介	研究方向	产品
	Neuralink	2015 年创立，2016 年马斯克	专注于侵入式脑机接口研究，主要研发将人工智能植入人类大	在 2020 年，科学家将直径为 23mm 的 Link V0.9 芯片植入了猪脑，并成功地读取和写入了神经信

		将其收购。	脑皮层的脑机接口技术。	号。在 2021 年，他们发布了最新的研究成果，让植入大脑芯片的猴子通过意念来玩游戏。
国外	BrainGate	著名的侵入式 BCI 系统公司	产品专注于医疗健康，主要用于帮助失去四肢或其他身体功能失控的患者。	该产品在 2017 年实现了 BCI 字符输入和控制自身躯干和手部吃饭的功能。
	Kernel	Bryan Johnson 创立的美国脑机接口公司	该产品在 2017 年实现了 BCI 字符输入和控制自身躯干和手部吃饭的功能。	用于治疗抑郁症或老年痴呆症等疾病的临床应用。
	Paradromics	成立于 2015 年，位于美国加利福尼亚	专注于侵入式脑机接口研究，帮助失明、耳聋和瘫痪患者重新获得与外界沟通和联系的能力。	专注于侵入式脑机接口研究，帮助失明、耳聋和瘫痪患者重新获得与外界沟通和联系的能力。
	Dreem	前身为 Rythm，成立在法国，总部位于美国旧金山	研究重点解决失眠障碍等睡眠问题的非侵入式脑机接口。	该团队开发了一种头戴式睡眠监控可穿戴设备，可以提高深度睡眠质量。
	MindMaze	总部位于瑞士洛桑，成立于 2012 年	该非侵入式脑机接口团队利用游戏化技术来帮助神经康复	开发了集成了可穿戴头显和 3D 动捕相机的用户界面，用于为神经系统疾病患者创造 VR 和 AR 环境。
国外				

	NeuroPace	<p>成立于1997年，总部位于美国加州山景城</p>	<p>通过响应性脑刺激来治疗神经系统疾病</p>	<p>用于癫痫治疗的脑部植入装置 RNS Stimulator，该装置于 2013 年 11 月被 FDA 批准上市。</p>
国内	品驰医疗	<p>成立于2008年，由清华大学航空学院李路明教授团队创立</p>	<p>研发深部脑刺激——脑起搏器，侵入式脑机接口</p>	<p>研制成功了国内第一个治疗帕金森病的植入式脑深部刺激器--脑起搏器，使我国成为继美国之后，全球第二个能够设计生产制造脑起搏器并将其应用于临床的国家。发明碳纳米植入电极、脑起搏器软件重植等技术，建立了与脑起搏器相关的神经调控技术自主知识产权体系。</p>
	博睿康	<p>成立于2011年，由清华大学神经工程实验室专家创立</p>	<p>研发非侵入式、微创的脑机接口</p>	<p>搭建以神经信号采集、解析、反馈为核心的脑机接口技术平台，形成无创、微创系列产品与解决方案。该研究的重点是脑科学、精神与心理疾病筛查，以及各类神经系统疾病的监护、诊疗与康复等领域。</p>
	BrainCo (浙江强脑科技有限公司)	<p>2015年创立，哈佛创新实验室孵化的第一支华人团队</p>	<p>非侵入式脑机接口</p>	<p>采用无创的非侵入式混合脑机接口技术，可以用于认知和情绪训练以及半瘫患者功能恢复。该设备通过收集和处埋人体的脑电信号 (EEG) 和肌电信 (EMG)，实现对大脑信</p>

				息的读取和外部设备的控制。
国内	念通智能	成立于2016年，孵化于上海交通大学机电实验室	专注于肢体康复设备的研发生产	主要产品包括一款名为eCon的无线脑电采集设备，可从大脑表皮采集和保存用户的脑电波信号，以及eConHand手功能康复设备，用于辅助中风患者进行手功能康复训练。
	脑陆科技	成立于2018年，总部位于北京	专注于脑科学前沿科技应用，包括脑科学、脑健康筛查、脑电算法、脑电数据开放平台等领域。	家用助眠智能脑机交互头环BrainUp可以进行全方位的脑电信号监测。
	臻泰智能	成立于2018年，依托西安交通大学技术优势	研发脑控主被动协同康复机器人及各类脑机接口相关系统应用	无线便携式医疗级脑电头带可应用于睡眠监测、情绪识别以及认知康复。
国内	江苏集萃脑机融合研究所	2019年成立于苏州，依托中科院半导体研究团队	专注于开发脑状态检测和脑-机接口的核心器件和解决方案	采用脑电信号监测和识别疲劳状态，并采用高效比边缘计算处理器实现复杂脑机接口算法的本地执行。
	妞诺科技	2014年12月成	提供脑科学医疗整体解决方案、	其自主研发的配套硬件包括脑科学病例数据库及算

		立于杭州	AI 算法技术研究以及软硬件产品研发	法、脑科学大数据云平台和脑电图仪等。
--	--	------	--------------------	--------------------

表 5-4 国内外重点 AI 脑机接口企业的概况以及相应的融资信息

公司	企业成立时间	融资信息
Neuralink	2016 年	Neuralink 已经在 4 轮融资中筹集了总计 3.63 亿美元。Neuralink 共有 14 家投资者，Raison 和 Valor Equity Partners 是最新的投资者。据 PrivCo 于 2021 年 6 月 30 日发布的消息，Neuralink 的后期估值范围为 5 亿美元至 10 亿美元。
BrainGate	2002 年	暂且未查到
Paradromics	2015 年	Paradromics 已经在 8 轮融资中筹集了总计 5830 万美元。他们最新的融资来自于 2022 年 9 月 21 日的 Venture - Series Unknown 轮融资，融资金额未知。据 PrivCo 于 2021 年 7 月 23 日发布的消息，Paradromics 的后期估值范围为 5000 万美元至 1 亿美元。
Dreem	2014 年	Dreem 已经在 3 轮融资中筹集了总计 5700 万美元。他们最新的融资来自于 2018 年 6 月 26 日的 Venture - Series Unknown 轮融资，融资金额未知。
MindMaze	2012 年	MindMaze 已经在 10 轮融资中筹集了总计 3.407 亿美元。他们最新的融资来自于 2022 年 2 月 17 日的 Venture - Series Unknown 轮融资，融资金额未知。MindMaze 已经收购了 4 家组织，最近的一笔收购是于 2018 年 11 月 13 日收购的 Neuro Motor Innovations。
NeuroPace	1997 年	NeuroPace 已在 8 轮融资中筹集了总计 2.473 亿美元。他们最新的融资来自于 2021 年 6 月 30 日的 Grant 轮融资，融资金额未知。根据 PrivCo 的数据，截至 2020 年 8 月 31 日，NeuroPace 的后市估值在 5 亿美元至 10 亿美元之间。
品驰医疗	2008 年	暂且未查到

博睿康	2011 年	博睿康科技成立于 2011 年，是一家专注于基于人工智能和脑科学的创新医疗技术的企业。在 2015 年 12 月，博睿康完成了天使轮融资，投资方为熔拓资本。在 2018 年 4 月，博睿康完成了 Pre-A 轮融资。随后在 2019 年 8 月，博睿康完成了 A 轮融资，融资金额为 6000 万人民币。在 2021 年 3 月，博睿康完成了 B 轮融资，融资金额超过亿元人民币。最近的一次融资是在 2022 年 12 月，博睿康完成了 C 轮融资，融资金额数亿元人民币。
BrainCo (浙江强脑科技有限公司)	2015 年	BrainCo 是一家总部位于美国麻省的脑机接口企业，成立于 2015 年。截至 2021 年 9 月，BrainCo 已获得超过 2000 万美元的融资。在 2016 年，该公司完成了 1000 万美元的 A 轮融资。在 2018 年，BrainCo 完成了超过 1000 万美元的 B 轮融资。
念通智能	2016 年	念通智能成立于 2016 年 12 月，截至 2021 年 9 月 29 日，念通智能完成了 Pre-A 轮融资，融资金额超过 1000 万元人民币。此前，念通智能曾在 2021 年 1 月 18 日进行了一轮战略融资，融资金额为 1000 万元人民币，投资方为长盈精密。而在其成立之初，念通智能曾于 2017 年 5 月 17 日进行了一轮天使轮融资，投资方为长盈精密。
脑陆科技	2018 年	暂且未查到
臻泰智能	2018 年	臻泰智能是一家脑机接口企业，其于 2019 年 9 月 24 日完成了天使轮融资，投资方为联想创投。最近一次融资是 2022 年 5 月 17 日进行的战略融资，投资方为苏州胡杨林资本，具体融资金额未公开。
江苏集萃 脑机融合 研究所	2019 年	暂且未查到
妞诺科技	2014 年	妞诺科技成立于 2014 年 12 月，并于 2016 年 6 月 29 日完成了 Pre-A 轮融资，融资金额为 1000 万元人民币，投资方为丰豪创业投资。此后，在 2018 年 12 月 24 日，妞诺科技进行了一轮战略融资。而在其成立之初，妞诺科技曾于 2016 年 1 月 30 日进行了一轮天使轮融资，融资金额为 100 万元人民币，投资方为贝壳社基金。

（三）产品认证和监管尚处于初级阶段， 临床应用有限

脑机接口技术在医疗应用中已经获得了一系列优秀的科研成果，但是这些成果要真正应用于临床，需要通过产品化来实现。作为一种新型人工智能医疗器械，其必须通过国家相关机构的审评认证，以确保其安全性和功能性。在保障医疗器械安全性和功能性的同时，各国也在不断完善相关政策，以推动人工智能在医疗行业的快速落地与应用。美国食品药品监督管理局（FDA）在 2017 年发布了数字健康创新行动计划，对医疗器械软件提出了新的审批标准，以避免传统的繁琐审核流程。该机构还于 2018 年发布了突破性器械项目指南，鼓励治疗或诊断危害生命或不可逆衰老疾病的医疗器械快速上市。中国国家药监局也开辟了“创新医疗器械绿色通道”，并颁布多项措施以加强监管和加速审批流程，以此加速人工智能医疗产品的上市进度。尽管与人工智能辅助诊断、智能医疗机器人等领域相比，脑机接口产品通过相关机构认证的数量还不多，但这一技术有着广阔的应用前景，相信未来会有更多的产品通过认证并为临床医疗带来更多的价值。

美国的 BrainGate 专注于侵入式脑机接口技术研究，目前已经开发出市面上首个被 FDA 批准用于人体实验的大脑皮层植入电极设备，旨在针对中风、渐冻症等疾病的治疗。Ceribell 的快速反应脑电图（EEG）系统也获得了 FDA 许可，能够快速诊断癫痫发作，它是一种无创 EEG 系统，包括 10 个电极头带和“脑部听诊器功能”，能够将 EEG 实时转换为声音。2021 年，IpsiHand 成为第一个真正意义上获得 FDA 市场批准的脑机接口设备，可帮助中风患者恢复手腕和

手部功能。此外，Neuralink 已获得 FDA 的“Breakthrough Devices Program（突破性设备计划）”认证，其未来产品可治疗重度抑郁、阿尔茨海默病等疾病。在我国，天津大学神经工程团队设计的新型卒中人工神经康复机器人系统“神工一号”、“神工二号”已通过国家食品药品监督管理局检测，其中的脑电图仪获得了医疗器械注册证，多家三甲医院临床测试成功，受益患者达到三千余例，有力推动了脑—机交互技术在临床康复工程领域的发展与应用。博睿康科技也取得了脑机接口相关产品的医疗器械注册证。但是，目前脑机接口技术处于初级阶段，未来需要更加完善的制度和标准来规范产品上市进程，并对产品的安全性和有效性进行全面认证。

六、专业术语解析

脑机接口（Brain-Computer Interface, BCI）

是一种技术，它建立在神经科学、计算机科学、机器学习和工程学等领域的交叉点上，旨在建立一种直接连接人类大脑和计算机的通信途径，允许人类直接控制计算机或机器，或通过计算机接收来自人类大脑的信号。

深部脑刺激（Deep Brain Stimulation, DBS）

是一种治疗方法，它通过在人类大脑的深层区域植入电极并施加电刺激来调节大脑功能，用于治疗帕金森病、抑郁症和其他神经精神疾病。

经颅磁刺激（Transcranial Magnetic Stimulation, TMS）

是一种非侵入性的大脑刺激技术，通过在头皮上放置电磁线圈并施加磁场来诱发大脑区域的神经元兴奋或抑制，被用于研究和治疗神经精神疾病。

经颅直流 / 交流电刺激 (Transcranial Direct/Alternating Current Stimulation, tDCS/tACS)

是一种非侵入性的大脑刺激技术，通过在头皮上放置电极并施加直流或交流电刺激来调节大脑功能，被用于研究和治疗神经精神疾病。

经颅超声刺激 (Transcranial Ultrasound Stimulation, TUS)

是一种非侵入性的大脑刺激技术，通过在头皮上放置超声发射器并施加超声波来调节大脑功能，被用于研究和治疗神经精神疾病。

脑磁 (Magnetoencephalogram, MEG)

是一种记录人类大脑活动的技术，通过检测头皮外部的磁场变化来测量大脑神经元活动。

正电子发射计算机断层扫描 (Positron Emission Tomography, PET)

是一种检测大脑代谢和血流情况的技术，通过注射放射性示踪剂并测量放射性衰变来确定大脑区域的代谢和血流情况。

功能性磁共振成像 (Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)

是一种无创性神经成像技术，通过测量血液中氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的浓度变化来反映脑部不同区域的代谢活动，从而探测大脑活动的区域、强度和时间特征。

功能性近红外光谱成像（Functional Near Infrared Spectroscopy, fNIRS）

是一种无创性神经成像技术，通过测量头皮下脑部组织中的血红蛋白和氧合血红蛋白的浓度变化来反映脑部不同区域的代谢活动，从而探测大脑活动的区域、强度和时间特征。

人类脑计划（Human Brain Project, HBP）

是欧洲联盟倡导的一个大型科研计划，旨在通过跨学科的方法，建立一个多级别、综合性的人类脑模型，以期深入理解脑的基本功能、疾病机制和治疗方法。计划由数百名欧洲及国际的科学家、工程师和医学专家共同参与，涵盖神经科学、计算机科学、物理学、数学、医学等多个领域。

哥白尼革命

哥白尼革命是指在 16 世纪时，波兰天文学家尼古劳斯·哥白尼提出的一个理论，即地球并不是宇宙的中心，而是围绕太阳旋转。这个理论挑战了当时普遍接受的地心说模型，也就是认为地球是宇宙的中心，其他天体则绕地球旋转。哥白尼的理论通过他在天文观测和数学上的研究支持，成为了现代天文学的基础之一，也极大地影响了人类对宇宙的认知和理解。哥白尼的理论虽然遭到当时教会的反

对，但最终为后来的科学家们所接受和证实，也被视为科学革命的一部分。

参考文献

- [1] K. Amunts, C. Ebell, J. Muller, M. Telefont, A. Knoll, and T. Lippert, “The human brain project: creating a European research infrastructure to decode the human brain,” *Neuron*, vol. 92, no. 3, pp. 574–581, 2016.
- [2] S.-J. Jeong, H. Lee, E.-M. Hur, Y. Choe, J. W. Koo, J.-C. Rah, K. J. Lee, H.-H. Lim, W. Sun, and C. Moon, “Korea brain initiative: integration and control of brain functions,” *Neuron*, vol. 92, no. 3, pp. 607–611, 2016.
- [3] L. R. Richards, P. T. Michie, D. R. Badcock, P. F. Bartlett, J. M. Bekkers, J. A. Bourne, A. Castles, G. F. Egan, A. Fornito, and A. J. Hannan, “Australian brain alliance,” *Neuron*, vol. 92, no. 3, pp. 597–600, 2016.
- [4] M. Poo, J. Du, N. Y. Ip, Z.-Q. Xiong, B. Xu, and T. Tan, “China brain project: basic neuroscience, brain diseases, and brain-inspired computing,” *Neuron*, vol. 92, no. 3, pp. 591–596, 2016.
- [5] M. Barinaga, “Turning thoughts into actions.” American Association for the Advancement of Science, 1999.
- [6] S. H. Scott, “Converting thoughts into action,” *Nature*, vol. 442, no. 7099, pp. 141–142, 2006.
- [7] J. R. Wolpaw, N. Birbaumer, W. J. Heetderks, D. J. McFarland, P. H. Peckham, G. Schalk, E. Donchin, L. A. Quatrano, C. J. Robinson, and T. M. Vaughan, “Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting,” *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, vol. 8, no. 2, pp. 164–173, 2000.
- [8] M. Izzetoglu, S. C. Bunce, K. Izzetoglu, B. Onaral, and K. Pourrezaei, “Functional brain imaging using near-infrared technology,” *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol. 26, no. 4, pp. 38–46, 2007.
- [9] D. Lul e Q. Noirhomme, S. C. Kleih, C. Chatelle, S. Halder, A. Demertzi, M.-A. Bruno, O. Gosseries, A. Vanhaudenhuyse, and C. Schnakers, “Probing

command following in patients with disorders of consciousness using a brain–computer interface,” *Clin. Neurophysiol.*, vol. 124, no. 1, pp. 101–106, 2013.

[10] Nitish V. Thakor ,Translating the Brain-Machine Interface.*Sci. Transl. Med.*5,210ps17-210ps17(2013).

[11] van Gerven M, Farquhar J, Schaefer R, Vlek R, Geuze J, Nijholt A, Ramsey N, Haselager P, Vuurpijl L, Gielen S, Desain P. The brain-computer interface cycle. *J Neural Eng.* 2009 Aug;6(4):041001.

[12] Paulk, A.C., Kfir, Y., Khanna, A.R. et al. Large-scale neural recordings with single neuron resolution using Neuropixels probes in human cortex. *Nat Neurosci* 25, 252–263 (2022).

[13] Jun, J., Steinmetz, N., Siegle, J. et al. Fully integrated silicon probes for high-density recording of neural activity. *Nature* 551, 232–236 (2017).

[14] S. G. Mason and G. E. Birch, “A general framework for brain-computer interface design,” *IEEE Trans. neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 70–85, 2003.

[15] R. Coben and T. E. Myers, “Connectivity theory of autism: Use of connectivity measures in assessing and treating autistic disorders,” *J. Neurother.*, vol. 12, no. 2–3, pp. 161–179, 2008.

[16] Z. J. Geng, Y. T. Zhang, Q. Zhang, J. L. Sun, and S. M. Li, “Predominant hemisphere at pure tone stimulus: a study of fMRI combined with magnetoencephalography,” *J. Clin. Radiol.*, vol. 25, no. 4, pp. 305–309, 2006.

[17]File:Neuron.svg - Wikimedia Commons. (2019, March 17).
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Neuron.svg>

[18] Lobes of the brain. (2018, July 17). Queensland Brain Institute - University of Queensland. <https://qbi.uq.edu.au/brain/brain-anatomy/lobes-brain>

行业图谱研究项目

一、项目目标和定位

行业图谱是清华大学五道口金融学院资本市场与公司金融研究中心基于科技成果转化研究的一项子课题，聚焦于科技成果这一核心要素，从技术链视角切入展开的研究项目。科技成果的转化需要对科技成果有清晰、准确、深刻的认识和理解，能够解析科技成果所包含的学术价值、社会价值、经济价值和人文价值等，从而探索科技成果的未来应用场景，以跨越从 0 到 1 的商业性转化，通过不断理解优化实现社会产业化，并最终成为科技推动社会发展的历史进程。

然而，由于科技天然具有强大的认知壁垒，其先进性、创新性的特点，使得科技成果面临非专业人士看不懂、不敢判断的知识窘境。在成果转化的操作路径中，执行者可分类为三方：成果供给方、成果接收方及连接双方的中介服务机构。除了成果供给方之外，成果接收方和中介服务机构都面临着知识窘境。成果供给方是科技成果的发明人、创造者，对科技成果的学术价值拥有深度认知，但缺乏商业经验和分析社会需求的能力，很难独立实现成果的成功转化；成果接收方是进行成果商业化、产业化的企业，对社会需求敏感，善于进行商业价值的探索，但由于不具备深厚的科研基础，不能对科技成果进行技术层面的准确分析和判断，影响执行效率；中介服务机构虽然具备政策分析、法律服务等领域的专业能力，但同样面临看不懂技术的知识窘境，导致出现无效推介、不合理的专利布局、未来的专利纠纷等潜在危机。这一需求的断层也间接性地影响经济学称之为成果转化“死亡之谷”时期的存在。因此，如何准确认识科技成果，正确判断科技成果的技术领先度，理解科技成果所处的行业地位和产业链发展格局，对于提高科技成果转化具有极其重要的价值。

本研究以国家十四五规划为导向，重点关注与国家战略需求发展相关的重大创新领域。集中在人工智能、量子信息、集成电路、生命科学、生物育种、空天科技、深地深海、现代能源等前沿领域。对基础科研方向进行应用场景的细分，将相关可转化/转化中的科技成果进行技术链条的梳理，通过专业性的技术解构和解析，形成高逻

辑性、易理解性的技术图谱；并在此基础上，对科技成果产业化应用现状进行行业研究和分析，以全球视野定位领先梯队中的科创企业和学术团队的技术实力。通过行业图谱的研究，不仅可以清晰定位高新技术企业的技术竞争力，而且能够对我国相关行业现状和未来方向有更准确的认识。既为科技成果转化提供了专业性知识体系支撑，也有助于指导城镇产业化发展布局、推动产业链融通创新、引导创业投资基金对“硬科技”的积极性及鼓励金融支持创新体系的建设。

二、研究方法

方法学上，行业图谱研究将进行学科领域分级细化，再对技术在应用场景方向上进行详细分级和解构：

（一）一级分类：从应用产业所属学科的角度，以国家十四五规划为导向，重点关注影响国家安全和全局的基础核心领域，包括人工智能、量子信息、集成电路、生命科学、生物育种、空天科技、深地深海、现代能源等。

（二）二级分类：对技术对象进行分类。比如生命科学中包括疫苗、新生物材料、细胞治疗、人工智能、基因技术等技术对象，择一进行技术应用方向分析和流程解析。

1、应用方向的技术流程全景

即对某一技术对象在一个应用方向上的技术流程全景图，从研发到生产、上市的全流程。如新药的研发生产及上市的整体概况图。

2、应用方向的技术产品细分类

对技术对象在此应用方向上所形成的产品种类进行细分，并提炼属性/功能的特点。比如机器学习和深度学习脑机接口技术在肢体运动障碍诊疗，意识与认知障碍诊疗，精神疾病诊疗，感觉缺陷诊疗以及癫痫和神经发育障碍诊疗中的应用。

3、应用方向上某一细分产品的技术开发流程

从上一级分类产品中选定一个细分产品，一般是现阶段技术发展最先进的产品，针对其所应用的场景相关技术开发/生产全流程进行解析和描述。比如：信号采集、信号处理、特征提取、分类识别和应用实现等多个阶段，其生产流程及其中核心竞争技术环节。

4、领先级国际科创企业及学者团队定位

将国际国内最领先的科创企业进行技术平台和产品性能的比较分析，并将其所具备的技术优势定位于上述图谱中。将国内外学者团队的领先性研究成果/转化状态进行分析，并定位于上述图谱中。比如：国际先进的脑机接口企业如 Neuralink、BrainGate、Kernel、Paradromics 的优势技术平台。

三、研究报告形式

行业图谱以结构化脑图为基础形式，辅以文字报告进行解释说明。文字报告的内容框架包括：

概览：概述图谱传递的信息内容、解答的技术问题和目的。

科学背景简述：描述图谱行业背景、技术流程、关键技术平台和竞争点的细节、技术应用的例证及国内外行业发展现状，对图谱做详细内容的补充说明。

专业术语解析：针对重点专业术语进行概念解释。

参考文献。

免责声明

本报告由清华大学五道口金融学院资本市场与公司金融研究中心（以下统称“研究中心”）编写。本报告仅供研究使用，并非为提供咨询意见而编写。本报告中的信息均来源于本研究中心认为可靠的已公开资料，但研究中心及其关联机构对信息的准确性及完整性不做任何保证。本报告的版权仅为研究中心所有，如需转载，请注明本文为本研究中心的著作。

（作者：朱雅姝为清华大学五道口金融学院资本市场与公司金融研究中心高级研究专员。胡杏为清华大学五道口金融学院副教授、清华大学五道口金融学院资本市场与公司金融研究中心副主任。）

联系人：朱雅姝

邮箱：zhuysh@pbcfsf.tsinghua.edu.cn
