

脑机接口总体愿景与关键技术研究报告

(2022 年)

中国信息通信研究院

2022年11月

版权声明

本报告版权属于中国信息通信研究院，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”。违反上述声明者，本院将追究其相关法律责任。



前 言

脑科学问题是人类社会面临的基础科学问题之一，是人类理解自然和理解人类本身的待深入探索领域，而脑机接口是有效探索手段之一。我们站在通往未知世界的伟大旅程起点上，探索大脑之途势必艰辛而具有挑战。在国家战略和顶层设计的引领下，在科技创新不断更迭促进下，在人民大众的期待关注下，脑机接口技术将在面向世界科技前沿、面向国家重大需求、面向人民生命健康的科技创新主战场上发挥重要作用。为此提出“**脑智芯连，思行无碍**”这一行业发展**总体愿景**，并针对此愿景目标的实现，尝试勾画出在不远的未来，脑机接口产业发展的蓝图和愿景期望。希望产业各方能够在此愿景描绘的不同场景下开展更多研究、开发、交流与合作，共同绘制脑机接口产业美好的未来。

研究过程中，我们开展了大量走访调研，就脑机接口系统的总体愿景目标、系统应满足的需求及关键指标、关键技术发展现状和趋势、脑机接口系统的应用场景和业界诉求等问题广泛征询专家学者意见，得到了行业多方的大力支持，并获得了大量有价值的第一手信息和观点。调研工作覆盖国内十多个省份的主要高校、科研机构和企业事业单位，主要包括清华大学、天津大学、北京理工大学、昆明理工大学、杭州电子科技大学、电子科技大学、西安交通大学、上海大学、国防科技大学、中科院深圳先进院、中科院半导体所、之江实验室、博睿康科技（常州）股份有限公司、浙江强脑科技有限公司、山东海天智

能工程有限公司、浙江柔灵科技有限公司、西安臻泰智能科技有限公司、北京华脑技术发展有限公司、上海韶脑传感技术有限公司、中电云脑（天津）科技有限公司、无锡傲意科技有限公司、蓝色传感（北京）科技有限公司、上海念通智能科技有限公司、北京品驰医疗设备有限公司等，在此向所有专家提供的专业支持和宝贵建议致以衷心的感谢。

目 录

一、脑机接口系统的总体愿景.....	1
（一）脑机接口发展概述.....	1
（二）总体愿景.....	3
二、脑机接口系统应满足的需求及关键指标.....	5
（一）需求.....	5
（二）关键指标.....	8
三、脑机接口关键技术.....	15
（一）采集技术.....	16
（二）刺激技术.....	22
（三）范式编码技术.....	24
（四）解码算法技术.....	28
四、典型应用场景案例和需求.....	33
（一）脑状态检测.....	33
（二）神经调控.....	37
（三）对外交互.....	40
五、展望与建议.....	45
（一）未来展望.....	45
（二）发展建议.....	47

图 目 录

图 1 脑机接口系统的五大需求支撑愿景实现	4
图 2 脑机接口系统的关键指标	5
图 3 脑机接口关键技术	16

表 目 录

表 1 脑机接口系统的关键指标	8
-----------------------	---

一、脑机接口系统的总体愿景

（一）脑机接口发展概述

大脑是我们思想、情感、感知、行动和记忆的源泉，大脑的复杂性赋予我们人类智慧，同时使我们每个人都独一无二。近年来，研究大脑认知的神经科学已经在分子细胞、关键元器件、软硬件开发、应用系统、仪器仪表等多方面取得进展和突破，使得脑机接口产业的商业应用逐渐成为可能。

脑机接口是指在有机生命形式的脑与具有处理或计算能力的设备之间，创建用于信息交换的连接通路，实现信息交换及控制。脑机接口按照信号采集方式不同**主要分为植入和非植入两种技术路线**。

植入式脑机接口是有创方式，是指对深入到颅骨以下的组织进行信号采集和记录。常见技术手段包括皮层脑电图（Electrocorticogram, ECoG）、单个神经元的动作电位（Spike）和局部场电位（local field potential, LFP）。也有技术以介入为手段，以创伤性较小的方式将电极送入颅内血管来采集脑电信号。植入式脑机接口记录的信号时空分辨率高、信息量大，能够对复杂任务进行实时、精确控制。

植入式脑机接口技术主要应用在医疗领域，最有可能率先落地并带来市场收益的是神经替代、神经调控相关技术和产品。神经替代脑机接口技术是为了弥补特殊人群因器官损伤导致的信息收发能力缺损，采用脑机接口技术把感觉信息直接写入脑，或是将脑意图信息从脑内读出，解码后实现对外交互，完成意愿动作。神经替代脑机接口

技术国内外都已经进入科研临床阶段，主要针对感觉和/或运动神经损伤人员（如瘫痪、失语和失明患者）做基本功能替代或功能重建。神经调控脑机接口技术是进行精神状态实时解析并精准刺激调控脑内神经活动的异常状态。对记忆丧失、中重度抑郁、精神分裂、毒瘾戒断等病症来说，神经调控脑机接口技术比药物治疗更为精确高效。由于当前精神类疾病发作的理论模型尚未建立，且治疗靶点不明，因此神经调控脑机接口技术主要进行神经机理探索和治疗尝试，辅助提升此类病症的诊疗水平，还无法进行广泛临床治疗。

非植入式脑机接口采用无创采集技术在头皮表面或附近采集大脑响应信号。常用技术手段包括脑电图（electroencephalography, EEG）、功能近红外光谱（Functional near-infrared spectroscopy, fNIRS）、脑磁图（magnetoencephalography, MEG）、功能核磁共振成像（Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI）。非植入式脑机接口由于安全无创，因此得到了广泛的研究与产业应用，但受限于在脑外采集信号的强度与噪声干扰，目前可实现的脑机交互性能有限。

非植入式脑机接口技术可应用在更广泛的生活生产领域，正逐步在康复训练、教育娱乐、智能生活、生产制造等众多方面为人类带来福祉。产业界在非植入脑机接口领域普遍重视面向产业和消费领域的研究，配合虚拟现实、增强现实、眼动仪、外骨骼等外设，利用非植入式脑机接口系统开展多场景应用探索，如：运动康复训练；利用用户脑波创造音乐和控制电器；利用用户情绪识别数据个性化推荐用户

潜在喜好产品；对用户情绪进行识别感知以提示预警，从而实现疲劳驾驶提醒和安全生产等等。

脑机接口已成全球科技前沿热点，在面向未来的科技创新发展中占有重要地位。世界主要国家和地区都在加快脑机接口产业布局，积极开展相关技术研发。脑机接口技术也将带动和引发其他技术的未来发展。脑机接口技术是人与机器、人与人工智能交互的终极手段，也是连接数字虚拟世界和现实物理世界的核心基础支撑技术之一，同时其与量子计算、云计算、大数据等信息通信（ICT）技术的结合将成为各领域新的重要研究方向。可以确定地说，受益于技术的不断革新与突破，脑机接口将会显著提升人类生活质量。

（二）总体愿景

脑科学问题是人类社会面临的基础科学问题之一，是人类理解自然和人类本身的“终极疆域”，而脑机接口是破解该“终极疆域”的有效手段之一。在国家战略的积极推动下，在科技创新不断更迭促进下，在人民大众期待关注下，脑机接口技术将发挥重要作用。脑机接口技术涉及脑科学、人工智能技术、信息通信技术、电子信息技术和材料学。未来的脑机接口技术，应实现“**脑智芯连，思行无碍**”这一行业发展总体愿景。其中，“脑”寓意为大脑和思维意图，“智”寓意为人工智能和类脑智能，“芯”寓意为以芯片为代表的外部设备，“连”有通讯、接口、协同三重含义。通过“脑智芯连”的科学融合，实现“思行无碍”的目标，即期待大脑及人类智能和外部设备相互连接后，人

类的思想和行为控制之间，不再有疾病和空间的障碍；人类的能力得到显著增强，不再承受神经疾病带来的痛苦。

为促进“脑智芯连，思行无碍”这一愿景目标的实现，报告提出脑机接口系统应满足“准确、高效、稳定、易用和安全”五大需求。脑机接口系统应具有准确的大脑意图解码算法；高效的信息解码效率，快速地反馈响应和执行任务；稳定的设备性能与抗干扰能力；易用、轻便、舒适的使用体验；安全的植入、采集和信息传送保障。

脑智芯连 思行无碍

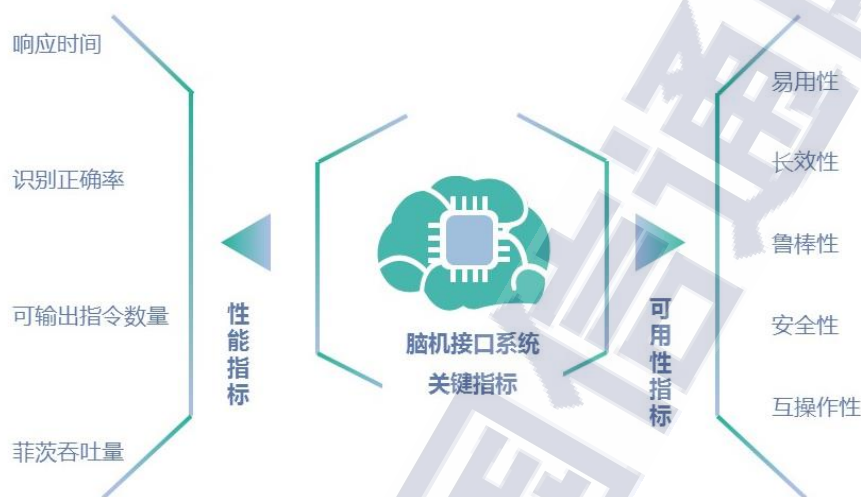


来源：中国信息通信研究院

图 1 脑机接口系统的五大需求支撑愿景实现

脑机接口应从性能指标与可用性指标两个方面有效衡量脑机接口系统是否满足五大需求。性能指标主要体现在响应时间、识别正确率、可输出指令数量和菲茨吞吐量四个易量化指标；可用性指标主要体现在易用性、长效性、鲁棒性、安全性和互操作性五个指标。这些指标在不同技术路线下、不同应用场景下的需求各有差异，但基本涵

盖了脑机接口技术和系统各方面要求。经过分析和产业调研，报告也给出了为促进愿景目标实现的各指标的建议值，从而为业界的技术创新和系统开发提供一定的参考。



来源：中国信息通信研究院

图 2 脑机接口系统的关键指标

脑机接口总体愿景的实现也离不开核心关键技术的支撑。关键技术包括采集技术、刺激技术、范式编码技术和解码算法技术。关键技术面向不同场景衍生出不同应用。本报告就当前主流应用场景进行归纳并分为三类，分别是脑状态检测、神经调控和对外交互技术等。

二、脑机接口系统应满足的需求及关键指标

（一）脑机接口系统应满足的需求

1. 准确

在脑疾病诊断、行为辅助决策、外设交互控制等应用场景下，共性需求是系统能稳定做出识别正确率较高的判断，即系统虚警概率低，

识别精确，这样外部计算设备才能对大脑的需求正确反馈。识别正确率是系统核心需求之一。

2. 高效

脑机接口技术产业发展和应用一个重要前提就是高效，最好能够达到和肢体响应一样甚至更快的效率，实现人机快速响应。指令交互、打字、控制机械外骨骼等应用场景下如出现秒级延误则给用户体验带来较为负面的影响。这要求系统快速解码识别大脑意图并做出反馈，响应时间是衡量快速响应的核心关键指标。系统快速响应性能，需要范式编码、算法解码和系统通信技术相互配合。在实际应用落地过程中，也应兼顾“快”、“准”、“稳”等方面协同发展。

3. 稳定

脑机接口本质上是一套通信系统，在不同的应用场景下，都需要考虑系统各项指标的稳定和抗干扰能力，即系统的长效性和鲁棒性。长效性是指系统需要保持长期性能稳定。系统能在较长时间内各项性能指标不出现较大波动。鲁棒性是指系统在一定的外部干扰情况下，依然能够保持稳定的工作性能指标。在植入式脑机接口应用场景中，由于电极易于失效，系统更侧重长效性指标；而在非植入式场景，由于信号易受干扰，更加侧重系统鲁棒性。

4. 易用

易用包含“轻便”与“便捷”两个含义。“轻便”在非植入情形下

指脑机接口系统轻巧便于携带，在植入情形下指植入物尺寸小、重量轻。沉重的脑机接口系统一方面可能导致用户接触时造成身体压迫，产生不适感，不利于长期使用。另一方面不利于外出携带，难以采集大范围的脑信号，从而难以实现更广泛的场景应用。

“便捷”是指脑机接口系统具有操作便捷性。一方面需要降低使用者的操作复杂性，避免复杂的调试和维护等工作。尤其是在消费场景下，有必要尽量缩短设备部署时间、人机适应时间，实现快速交互。这就需要尽量减少和压缩模型训练时长，调试时长，从而提升用户对产品的接受度。另一方面普及无线信号传输，摆脱有线束缚，使用起来更加方便。此外，可考虑与智能外设，如智能耳机等终端设备进行系统化设计，提升使用的**舒适性、便携性**。

5.安全

脑机接口系统作为一种人机交互系统，在安全方面要考虑的因素包括：系统需要在软件和硬件方面，能有效防御外部恶意攻击，避免数据被窃或恶意篡改，系统需要内置一定的安全自检机制；在机制和制度保障方面，需要有合法合规的信息与科技伦理制度、法规、倡议、指南和标准，确保神经隐私与神经权利不受侵犯，保障系统用户的人身健康安全。对植入式脑机接口系统来说，在电极材料选择上要考虑散热性能、要确保植入后人体安全，需要对植入物的质量、形状、功耗和应用场合进行限定，以避免损害生物组织。对于非植入式脑机接口技术来说，不当的使用方法可能存在潜在的人身安全隐患，需要对

脑机接口系统的使用安全性做严格要求。

（二）脑机接口系统的关键指标

目前脑机接口技术正从“学术科学探索”走向“应用转化落地”。为推进产业落地工作的开展，本报告从性能和可用性两方面提出满足五大需求的脑机接口系统关键指标。性能指标包括响应时间、识别正确率、可输出指令数量和菲茨吞吐量，可用性指标包括易用性、长效性、鲁棒性、安全性和互操作性。易用性指标进一步通过准备时长、轻便性和舒适性体现。

表 1 脑机接口系统的关键指标

脑机接口系统关键指标	衡量指标
性能指标	响应时间
	识别正确率
	可输出指令数量
	菲茨吞吐量
可用性指标	易用性
	长效性
	鲁棒性
	安全性
	互操作性

来源：中国信息通信研究院

1.性能指标

在脑机接口研究中，往往以信息传输速率（Information transfer rate, ITR）作指标评价系统的性能。ITR 的大小与系统的响应时间、识

别正确率与可输出指令数量相关，是一项综合反映脑机接口系统多方面性能的指标。但仅以 ITR 作为性能指标，很多时候无法体现响应时间、识别正确率与可输出指令数量分项指标各自的重要性，甚至可能导致某项关键指标被忽视。因此本报告在分析系统性能指标时，从响应时间、识别正确率、可输出指令数量和菲茨吞吐量四个方面，综合评估描述脑机接口系统应具备的性能。

（1）响应时间

响应时间是指脑机接口系统对使用者单次脑意图响应所需的时长，具体包括单次响应所需的信号采集时长、脑信息解码时长（又称计算时长）和系统通信时长三部分。其中，所需的信号采集时长指脑机接口系统采集解码用生理信号所需要的时长。脑信息解码时长是指系统对所采信号进行解码以理解用户意图所需的时长。系统通信时长是数据包在系统各模块间传递的时延。响应时间可以有效反映脑机接口系统的通信效率，也是反映人机交互顺畅与否的核心关键指标。在不同范式、应用场景下，系统响应时间差异较大。对于头皮脑电（Electroencephalograph, EEG）、皮层脑电图（Electrocorticogram, ECoG）等实时性较高的电信号采集系统来说，比较理想的响应时间是：在脑状态检测场景下建议不大于 10 秒，在神经调控场景和对外交互场景下建议不大于 1 秒。对于以功能近红外光谱（Functional near-infrared spectroscopy, fNIRS）为代表的信号采集系统来说，由于血流动力学参数变化较触发事件具有滞后性，因此此类系统的交互响应时间较长。

（2）识别正确率

识别正确率是指脑机接口系统为识别人脑意图进行解码的正确率，该指标是衡量系统性能的核心指标。在脑机打字、脑控机器人等特定场景下，识别正确率经常用任务成功率表示。任务成功率是指成功完成控制任务的次数和控制任务执行总次数之间的比值。比较理想的识别正确率在脑状态检测场景下不应小于 85%，在神经调控场景下不应小于 95%，在对外交互场景下不应小于 95%。对脑机接口离线数据进行调参时，往往因为样本量较小而容易造成模型的过拟合。为验证脑机接口系统的泛化性，本报告中的识别正确率建议由实时在线验证实验所得（建议被试数量不少于 10 例）。

（3）可输出指令数量

可输出指令数量即脑机接口系统可以解码的脑意图种类，该指标可反映系统的交互能力。可输出的指令数越多反映系统可解码的大脑意识越丰富、可执行任务的行为越丰富。因此在睡眠检测、情绪识别、脑机打字等场景下，可输出指令数量对评价系统性能具有较高参考价值。从理想值看，睡眠检测场景下建议检出睡眠种类不应小于 5 种，情绪识别场景下建议检出情绪种类不应小于 4 种，在脑机打字场景下建议输出字符种类不应低于 40 种。在机器人、机械臂、无人机等复杂外部设备控制中，自由度不应小于 6 种。可输出指令数量和实际使用需求有关，需根据具体场景需求确定最佳范围。

（4）菲茨吞吐量

控制能力是指脑机接口系统将大脑神经活动转化为外设在实际场景中完成复杂控制操作的能力，脑机接口系统的控制能力和工作效率可用菲茨吞吐量¹（Fitts Throughput）指标衡量。脑机接口系统的菲茨吞吐量定义为：难度系数与移动到目标位置所需时间的比值，其中，难度系数是交互移动距离和目标尺寸两者比值取对数。

菲茨吞吐量来源于菲茨定律（Fitts Law），这是主要用于人机交互和人体工程学的人体运动预测模型，用难度系数和吞吐量来分别衡量任务难度和控制效果。在脑机接口研究中也多采用菲茨吞吐量作为系统控制效果的衡量指标。

以脑控虚拟鼠标移动为例，虚拟鼠标从起始物体 A 移动到目标物体 B 的难度系数由 AB 之间的距离以及目标物体 B 的尺寸决定，AB 间距离越大，目标物体 B 的尺寸越小，难度系数越大。不同难度系数下虚拟鼠标到达目标的所需时间不同，菲茨吞吐量是同时考虑运动速度和控制准确度的综合指标，数值越高体现脑机接口系统的控制效果越好。通常菲茨吞吐量达到 0.7 bits/s 可实现较为流畅的控制效果，1 bits/s 是更为理想的指标。

2. 可用性指标

可用性也是脑机接口系统走向产业落地的关键，是除了性能指标

¹ ISO 9241-9:2000 标准详细说明了非键盘输入设备的性能要求，并利用菲茨吞吐量作为性能度量。

之外的另一系统评价维度。系统可用性的衡量指标包括：易用性、长效性、鲁棒性、安全性和互操作性。

（1）易用性

易用性又可通过脑机接口系统的使用准备时长、轻便性和舒适性三个指标反映。

准备时长是指人员在脑机接口系统使用之前所需的准备时长和人机协同训练时长之和。准备时长具体包括调试准备时间、阻抗调整时间等。人机协同训练时长与系统使用者对系统的使用熟练度以及解码算法是否需要现场采集训练数据相关。此外，部分脑机接口系统需要针对不同使用者定制不同的解码算法参数，也会导致人机协同训练时间较长，从而使系统的易用性降低。非植入脑机接口系统比较理想的准备时长建议不大于 3 分钟。植入式脑机接口系统由于需要比较繁琐的植入过程，因此准备时长较长，需要尽量优化植入手段，提高系统易用性。

轻便性是指脑机接口系统的轻质与便携。轻质是指对使用者而言符合人体工学，且不造成明显伤害和负担。通常以重量指标衡量轻便性，为确保人体颈椎以上部分不受伤害。比较理想的头戴式脑机接口系统（含外设）重量不应大于 500 克，不超过 200 克将是更为理想的目标。便携是指易用使用和携带，信号传输方式是衡量便携的重要指标之一。比较理想的便携方式是摆脱有线连接，以蓝牙、Wi-Fi、超宽带或其他先进的无线通信方式进行数据传输。

舒适性同样是易用性的重要指标，体现在范式设计、外形设计、材料选取等方面。当前业内广泛使用的范式多源自二十世纪九十年代，历经三十余年发展，范式虽然奠定了实验研究的基础，但其交互方式普遍存在不符合人类自然行为的问题，由此导致面向消费级产品时用户接受度和配合度较低，即便是在医学领域应用也比较受限。因此舒适性以可定量定性的体验感、满意度等作为主要衡量指标，特别是对脑机接口消费级产品的落地具有重要意义。

（2）长效性

长效性指系统可稳定持续使用的时间，是用来衡量系统稳定性的重要考量。在非植入场景下，长效性体现在系统续航时间长。例如娱乐游戏时系统不会因用户出汗等干扰导致系统性能下降。在植入场景下，长效性体现在系统不会受生物组织分泌物和免疫系统干扰导致性能下降，电池续航需要能够保证 8 小时以上的持续脑电信号传输与分析。因此建议比较理想的非植入场景下，单次的稳定可用时长不小于 3 小时；植入场景下，有些国家规定稳定可用时长不应小于 1 年，常规情况下，医疗器械的理想植入时间是 10 年以上。

（3）鲁棒性

鲁棒性指标用来衡量脑机接口系统对抗外部扰动变化的能力。脑机接口系统需要在各类外部干扰环境下使用。正常环境本身就存在大量干扰信号，此外还包括强磁环境、超声波诊断治疗环境、放射治疗

环境等。这就要求脑机接口系统在所处的环境中，能够有效屏蔽大部分外界干扰，保证交互响应时间、识别正确率等性能指标维持在一个较高的水平。此外，在使用过程中，脑状态也不是一成不变的，因此鲁棒性还体现在具有一定的自适应能力，可随用户状态变化而自适应调整，确保系统性能指标在较小的范围内波动。

（4）安全性

安全性是脑机接口系统可用性的重要指标。**一是要保障脑机接口系统整体安全和数据安全。**硬件和软件具备基础的安全防范能力和手段，防护手段到位，确保能够有效抵御外部攻击，避免系统被篡改而做出错误指令。同时要确保使用者的信息不外泄，尤其是需要联网使用的设备，例如解码算法、脑电数据上云的系统需要确保信息安全；**二是要确保人身健康安全。**需要在符合常规安全要求基础之上，做出更适合脑机接口系统的安全专用要求。**三是要符合科技伦理安全。**需要制定完备的科技伦理制度，确保隐私信息不外泄、风险可控、尊重生命权利、增进人类福祉、保障公平公正。

（5）互操作性

互操作性是脑机接口系统应用落地和广泛发展的重要指标，体现了脑机接口系统之间实现跨系统访问、双向连接和交互控制的能力。互操作性一方面体现在同类型系统之间保持框架一致和接口一致，另一方面体现在脑机接口系统能在电脑、手机、增强现实（AR）设备、

虚拟现实（VR）设备等其他智能终端上互通互用和即插即用。系统应根据此方面的技术标准要求，开发相关接口和可互通的系统平台。互操作性能力指标可以通过系统符合互操作标准的程度来衡量。

三、脑机接口关键技术

脑机接口作为新兴技术，为大脑与外部直接交互提供了新的解决思路，在新一轮的技术升级中被给予厚望。脑机接口产业落地有赖于关键技术的突破和革新。目前全球在脑机接口关键技术研究方面发展蓬勃，但依然存在亟需解决的若干问题。对此，业界也正在尝试多种手段予以突破。

脑机接口关键技术包括采集技术、刺激技术、范式编码技术、解码算法技术、外设技术和系统化技术。其中，采集技术研发重点包括采集端和信号处理端。采集端常规技术手段包括电采集、磁采集、近红外采集等手段，其中电采集为主流研发方向，磁和近红外等采集技术因为成本和技术成熟度等制约，距离应用落地相对更远。信号处理端涉及模拟芯片和数字芯片。由于当前脑机接口系统所用的数字芯片多为行业通用芯片，所以重点介绍模拟芯片的发展。刺激技术重点介绍脑深部电极刺激（Deep Brain Stimulation, DBS）闭环控制的进展，以及脑机接口技术在助盲领域的最新进展。范式编码和解码算法技术介绍了当前主流研究进展。由于外控技术和系统化技术的创新多在于工程集成，因此不在此介绍。

脑机接口技术的应用场景按照信息流向分为脑状态检测、神经调

控和对外交互三类。从信息流向来看，脑状态检测是信息从大脑流向外部和外设，神经调控则是信息从外部和外设流向大脑，而对外交互则是信息的双向流动，因此重点围绕信息的利用、交互和反馈来介绍脑机接口系统在不同场景下的典型应用以及系统在各方面性能上的需求。



来源：中国信息通信研究院

图 3 脑机接口关键技术

（一）采集技术

1. 植入式电极

植入式微电极是脑机交互的关键基础，被广泛应用于基础神经科学、脑疾病的诊断治疗以及脑机交互通信等领域。植入式微电极通过将以离子为载体的神经电信号转换为以电子为载体的电流或电压信号，从而获取大脑神经电活动信息。植入到大脑中的微电极可以高空

间分辨率和时间分辨率方式，精确记录电极附近单个神经元的动作电位，从而实时监测大脑活动。传统的植入式微电极由金属和硅等硬质材料制备而成，形成了以密西根电极和犹他电极为主的硬质电极。随着微纳加工技术和电极材料不断发展，微电极趋向于柔性、小型化、高通量和集成化发展，形成了以微丝电极、硅基电极和柔性电极为主的多元化发展局面。

高性能柔性微电极对长期稳定慢性记录具有重要意义。硬质微电极和脑组织之间存在机械失配问题，会对生物体的正常活动造成继发性脑损伤，不适用于长时间的慢性实验。具有高生物相容性的柔性微电极器件有利于缓解免疫反应，提高信号质量，对实现大脑活动长期稳定的慢性记录具有重要意义。利用低杨氏模量生物材料和高性能界面材料制备柔性电极成为该领域的热点。

高通量微电极将为拓展全脑神经科学研究奠定重要基础。为了获取更丰富的神经元动态，神经微电极被要求同时记录尽可能多的单个神经元的电活动。现有植入式微电极通量远小于大脑神经元数目，发展新型高通量微电极，实现批量化的高时空分辨率脑电信号采集，对于追踪神经环路活动以及解析全脑尺度的神经网络功能等基础神经科学研究至关重要。

多功能微电极有力促进多种激励方式综合调控。通过集成电刺激、药物注射和光刺激等功能，植入式微电极在读取生物体大脑活动信息的同时，还能调控生物体生命活动，实现生物体和外部设备的双向通

信。研究多功能的神经微电极器件，搭建闭环系统，可实现癫痫等脑疾病的诊治和神经功能恢复等应用。

2.非植入式电极

非植入式电极应用场景广泛。非植入式电极不需要进行手术植入，直接放置于头皮上即可进行脑电信号采集，因此也称为无创电极，其安全无创特性更易被使用者接受，因此在非临床脑疾病诊疗、消费级脑科学应用等场景中得到了广泛的应用。

改进的干电极是电极产业落地的主流选项。随着基于头皮脑电的脑机接口系统在便携性、快速应用及舒适度等方面的应用需求增长，电极的改进成为亟需解决的关键问题。传统的湿电极尽管信号质量好，但其专业的操作需求，耗时长，用后清洗等固有缺点无法规避。因此无膏的干电极技术逐渐发展起来以适应新的应用场景和需求。基于金属材料或导电聚合物材料的多脚柱式/爪式干电极、基于导电纤维的刷毛式干电极、基于微机械加工工艺的微针电极及电容式电极等，在提高使用便捷性的同时，也通过材料改进和结构设计优化不断地降低电极与皮肤的接触阻抗，提高使用舒适度和应用性。

凝胶半干电极具有潜在的广阔应用前景。干电极实现了脑机接口系统的便捷应用，但其与头皮的电连接仅靠微量的汗液，接触阻抗较高，且强烈依赖于压力，因此舒适度和信号质量及稳定性成为该项技术需要突破的技术难题。半干电极利用材料或结构特性，释放少量导电液到头皮，以降低电极与头皮的界面阻抗。基于材料体系的凝胶半

干电极物理化学特性可调，通过材料组分配比的优化可兼顾电化特性和机械特性，从而得到使用舒适度较好且信号质量可与湿电极匹敌的性能，是一种极具应用前景的电极技术。

3. 芯片

随着集成电路技术的快速发展以及电路与神经科学融合研究的持续探索，脑信号采集技术朝着微型化、轻量化、高通量、分布式采集的方向不断前进。针对脑机接口的应用、算法、硬件以及范式的研究内容也逐渐丰富，植入式与非植入式脑机接口系统通过电极与采集硬件对脑信号进行采集、处理和解码，从而实现对脑科学基础理论、脑疾病以及脑控外设的探索与研究。脑信号采集芯片是将脑信号直接转化为数字信号的核心硬件，也是脑信号读取与解码，脑部疾病诊断与调控所依赖的工具。

针对脑部信号的生理特性以及应用场景，在定制化脑信号采集芯片设计过程中存在诸多技术挑战。精密放大器是脑信号采集芯片中的核心模块，在脑机接口应用场景中需要满足多重技术参数要求。对于脑信号来说，其幅值微弱（几十 μV 到几个 mV ）、频率低（0.5 Hz 到数 kHz），因此易受外界噪声干扰，从而导致信号质量不佳。为了保持最佳的信号质量，脑信号采集模块的部分关键参数，例如信号噪声、共模抑制比（CMRR）、电源抑制比（PSRR）、增益匹配、运动伪影等需要优化。多个脑信号采集参数之间存在相互制约的关系，多参数的统筹优化是当前脑信号采集芯片设计的核心问题之一。

信号噪声是脑信号采集过程中最大的干扰源之一。由于前端放大器的闪烁噪声与脑信号在频谱上部分重叠，采取简单的滤波工作难以提取纯净脑信号，因此对较低频率的脑信号使用斩波放大技术，将所采集的信号调制到较高频率以避开放大器的闪烁噪声。斩波技术在交流耦合仪表放大器中实现了良好噪声和功耗平衡，但放大器的输入阻抗在斩波调制过程中会降低到兆欧范围以下，导致信号在进入放大器前产生衰减。为解决输入阻抗降低的问题，有团队提升了正反馈回路的输入阻抗。还有团队采用电容组对输入阻抗升压回路的电容进行校准，也有团队采用调整电路耦合的方式来切换斩波器和输入电容的位置，避免因斩波调制导致的输入阻抗降低。

共模抑制比是衡量系统应对环境干扰的关键参数。针对微弱脑信号，高共模抑制比可以保证信号不被共模扰动²掩盖，从而提高信号质量。此外，在多通道神经信号采集过程中，由于电极在植入大脑后产生的一系列生物相容性问题，导致电极阻抗可能随植入时间增多而明显提升（数个月后可高达 $100\text{k}\Omega$ 至数 $\text{M}\Omega$ ），继而影响脑信号的信噪比以及系统共模抑制比。为保证采集信号质量，前端放大器电路采用共模反馈技术以及共模前馈技术以提高系统级共模抑制比。

采集芯片的微型化设计是植入式脑机接口系统核心技术挑战之一。为了将采集芯片缩小至可植入的尺寸范围，针对片上有源/无源器件的微型化是相关研究中的技术难题。具有电容耦合的全差分放大器

² 共模扰动也称共模干扰，是电源线对环境中的电子设备产生的一种干扰。

结构通过采用晶体管搭建的伪电阻（Pseudo Resistor）结构可大幅缩小片上无源器件的面积，同时伪电阻提供了较大的阻抗以及较低的高通截止频率，适合设计微型化的脑信号采集芯片。采用时分复用/正交频分复用等技术通过固定的采集单元对多个通道的脑信号进行同步采集，也可明显降低片上面积。

针对不同的脑机接口应用以及采集芯片面对的一些技术难题，国内外有许多团队提出了解决方案。例如针对采集过程中的电极间直流偏置引起斩波放大器输出饱和的问题，一种直流伺服反馈回路技术通过积分器将输出端的直流分量提取并反馈至输入端，有效抑制了电极间的直流偏置。对于采集芯片的超低功耗需求，有团队设计了基于反相器结构的超低压斩波放大器，非常适合植入式场景。针对芯片微型化的问题，放大器与 DAC 结合的数字-模拟混合反馈技术可大幅缩小采集芯片的片上面积。针对脑信号采集过程中的共模干扰问题，基于电荷泵（charge pump）的共模反馈技术通过对输入端的共模扰动信号进行动态反馈，能有效抵抗高达 15V 的共模扰动。对于采集芯片的无线供电问题，线圈的无线电感传输技术被应用在植入式脑机接口芯片中，通过外部传输线圈以及中继线圈和片上耦合线圈，实现了对体内采集芯片的无线供电以及采集到的脑电信号无线传输。体表网络无线传输技术（Body area network, BAN）解决了无线供电时线圈难对准的问题，利用被试者的身体表面对采集到的信号以及能量进行无线传输，适用于可穿戴的脑机接口场景。在提升系统集成度方面，目前已

有将信号采集、存储、以及基于 AI 的信号归类识别等模块集成在一起的脑机接口片上系统，实现了较高的系统集成度。针对于高通量植入式脑机接口芯片，有些公司设计了带有动作电位识别的高集成度采集芯片，该芯片与数千个柔性电极相结合，实现了对高通量脑信号的采集。

（二）刺激技术

1. 闭环脑深部电刺激技术

脑深部电极刺激（Deep Brain Stimulation, DBS）一种非常具有代表性的植入式电极刺激技术。DBS 通过植入体内的脑起搏器发放弱电脉冲，刺激癫痫、帕金森的病灶脑区，抑制病灶区神经元的异常无规则放电，进而抑制相关症状，使患者恢复自如活动和自理能力。传统的 DBS 调参需要基于微电极信号分析、刺激效果分析、影像定位、核磁分析等多技术手段选择治疗触点。借助脑机接口技术，脑内电极不仅具有单向刺激功能，还可进行周围神经元信号采集，以做到精准触点选择。就技术发展进度看，目前可以做到信号采集之后由医生根据生物标志物和与患者的交互反馈进行触点选择，未来还将向自适应角度发展，自适应技术研发方向包括：

通过优化的信号处理方法实现自适应调控。如在机器学习、深度学习基础上对患者脑电数据进行预测分类，为医生提供分类结果以助于诊断，提升触点选择的精准度。另外，在患者体态姿势发生变化导致电极与靶组织之间距离改变时，例如咳嗽、打喷嚏、深呼吸时，可

根据诱发复合动作电位调控刺激以避免发生瞬时过度刺激。

通过刺激参数空间拓展改善自适应调控。刺激参数空间包括触点、幅度、频率、脉宽的选择。目前在常用单极恒频刺激的基础上已开发交叉电脉冲模式、变频刺激及多触点不同频刺激技术，极大地拓宽了刺激参数空间，实现更好的症状调控。

依托多样生物标志物实现自适应刺激调控。当前国内外知名 DBS 厂商正在尝试基于生物标志物实现自适应刺激调控，例如检测神经递质浓度，通过血清素、去甲肾上腺素、多巴胺脱氧血红蛋白度、氧合血红蛋白的浓度识别治疗效果并作为依据来动态调整刺激幅度。也有基于血流水平、范围或预定血流值矩阵等血流信息调节刺激幅度、脉冲宽度、脉冲率和占空比等指标。

通过磁共振相融 DBS 技术实现自适应调控下的脑网络探索。现有磁共振兼容 DBS 技术解决了在强磁场下电极发热、移位及感应电流等安全隐患，使植入 DBS 的患者能在 3.0T 磁共振下进行长时间的同步刺激及扫描。在解决临床需求的同时，也使 DBS 成为探索刺激相关脑网络变化的直接媒介，通过功能磁共振解析刺激相关局部及整体脑网络改变，为新靶点的发现及适应症的拓展提供依据。

2.视觉调控技术

植入式视觉调控技术对盲人群体提高生活质量具有重大意义，相关研究已经开展。全球绝大多数研究团队在开环视觉重建的研究中，研究方向逐渐从视网膜刺激向皮层刺激转移。目前主要集中在电刺激

初级视觉皮层（V1）以获得人工视觉感知。这就需要进行刺激电极的植入。最新的实验已经植入了超过 10 块犹他阵列，通道数达到 1024。该系统还包括采集视频的摄像头，采集到的图像信息通过信号处理获得简单的二维灰度图像（目前还没有具有色彩的植入式人工视觉输入），并据此刺激初级视觉皮层神经元。受试者通过植入电极可以在有限的视野范围内看到一些灰度调制的低分辨率点阵图像。目前的研究结果表明，用小电流电刺激初级视觉皮层神经元（V1 neurons）会激活直径数百微米的皮层区域，从而获得简单的视觉知觉，称为光幻视（phosphenes）。电刺激可以改变大脑皮层的信息流，影响到正常视觉观测内容。由于电刺激是相对粗糙的刺激方式，因此获得的视觉感知也相对粗糙。目前研究致力于通过多个电极同时刺激，让受试者感知到具体图像或连贯动作。2020 年发表在 Science 上的研究结果表明，通过植入大规模 1024 通道电极并进行训练，可以使非人灵长类正确识别字母，辨识运动方向等。如何通过不同模式刺激增强受试者感知连贯形状的能力，并最大限度向其传递视觉信息依然是未来研究重点。

目前的植入式视觉调控研究多为开环脑机接口系统，开环脑机接口系统难以实现精确刺激模型，且电刺激也难以与真实的视觉刺激保持一致，因此存在不可控风险且难以实现精细视觉输入。因此闭环视觉调控是未来重要的技术探索方向。

（三）范式编码技术

大脑的各种思维与响应活动千变万化，且同时发生，因此很难直

接从中准确解码特定类型的活动。在脑机接口系统中，用范式来表征对预定义的大脑意图的编码方案。**范式定义为：在编码任务中，对希望识别的大脑意图用可检测、可区分、可采集的脑信号予以对应，从而实现对大脑意图的可识别输出。**在过去的几十年中，出现了许多脑机接口范式，常见典型的有运动想象范式、稳态视觉诱发电位范式、P300 范式。这些范式往往根据是否有外部刺激和辅助而分为被动式和主动式范式。

1. 被动式范式

视觉诱发电位刺激范式 P300 朝向界面布局优化、人脸图像拼写和融合物理刺激方向发展。传统的视觉 P300 电位刺激范式下，拼写器允许受试者通过闪烁不同的行和列来选择目标，但没有考虑两个相邻符号连续闪烁对结果的影响。近年有大量研究针对 P300 电位刺激范式的拼写界面布局开展优化工作，有效消除了相邻符号闪烁带来的影响。一些研究发现面部符号可以比传统 P300 字符拼写范式诱导更高的 P300 电位。因此许多研究尝试用人脸图像代替数字或字母符号，使每个符号在以一定频率闪烁时都会变成人脸图像，而不是简单的颜色或大小变化，实现了 P300 电位刺激范式的解码性能提升。最近也有研究发现，在视觉 P300 电位刺激范式中添加其他形式的物理刺激可以提高使用者的表现，例如使用偏光镜增强刺激、基于积极情绪的视听组合刺激、引入声音和视频刺激等方式。因此将 P300 电位与其他物理刺激融合的范式研究也是近年的热点。

稳态视觉诱发电位 (Steady-state visual evoked potentials, SSVEP)

刺激范式朝向更高效、更舒适和更自然发展。SSVEP 范式脑机接口主要应用方向包括：高速率脑机接口打字交互系统、特殊群体脑机报警系统、自然场景的脑机目标选择系统等。为支撑上述三大应用场景，SSVEP 范式的主要发展趋势包括：

更高效：SSVEP 范式编码从最初 4 目标编码已发展至 160 目标编码，且编码的识别响应性能也在持续提升，因而实现的高速率 SSVEP-BCI 系统的性能也在不断提升。后续 SSVEP 会持续研究更高效、可分性更好的范式编码。

更舒适：SSVEP 范式刺激的最佳频带为 8~15Hz，该频带的多目标闪烁刺激虽然实现的系统性能优异，但也容易诱发视觉疲劳，因而在实际落地应用中受到了一定的阻力。目前 SSVEP 舒适刺激的方式主要包括降低亮度变化率、提高刺激频率、减小刺激目标面积以及采用空间编码（外周视野）刺激等。上述研究已取得了较大的进展，并不断继续推进中。

更自然：SSVEP 刺激范式的每个刺激块需要按固定频率进行闪烁且具有一定的面积，因而在实际应用过程中仅与脑机打字场景最为贴合，即将字符绘于对应的闪烁目标块上即可。目前已有部分 SSVEP 范式采用空间编码的方式将中央视野区域空出，在视野外周进行刺激编码，进而实现更贴近自然应用场景的应用。也有适当降低 SSVEP 闪烁块面积并与生活场景结合的编码思路，受限于刺激面积变小对响应

强度的影响，为保障系统的识别正确率与响应速度，此类应用的 SSVEP 编码目标数较少。此外，SSVEP 的主要响应脑区位于后脑枕叶，因而往往需要佩戴脑电帽，不利于生活自然场景使用。为解决该问题，部分研究采用时频混合或时空频融合的编码方式，尝试提升无毛发区的 SSVEP 响应强度，取得了一定的进展。为了 SSVEP 脑机接口在生活场景落地，上述研究仍在持续推进中。

2. 主动式范式

运动想象（Motor Imagery, MI）范式朝向更精细发展。运动想象是一种非常重要的主动式脑机接口范式，用于识别大脑对四肢和舌头的运动意图。其无需外界条件刺激和明显的动作输出就能诱发大脑感觉运动皮层的特定响应。现已广泛应用于基于脑机接口的假肢、机械臂和轮椅等设备控制、字符拼写及临床中风康复治疗等场景。

基于运动想象范式的脑机接口已经发展多年，经过数十年的研究，大肢体部位的 MI 控制已经基本发展成熟，而对更细微运动做出想象并有效识别（例如不同手指的伸缩、握拳、不同手势的运动想象等）是运动想象范式编码的发展方向。

运动相关皮层电位范式朝向多肢体运动意图解码和连续运动解码发展。运动相关皮层电位（Movement-related cortical potential, MRCP）是一种可以从低频头皮脑电中捕捉到的与运动规划、执行相关的神经活动信号。MRCP 主要由三部分组成，即与运动准备相关的准备电位（Readiness potential, RP）、与运动发生、起始相关的运动电位（Motor

potential, MP) 以及与运动执行、运动性能相关的运动监测电位 (Movement-monitoring potential, MMP)。相较于 SSVEP 和 P300 等被动式脑机接口范式, MRCP 和运动想象是不依赖于外部刺激的、由人体真实运动意图诱发的主动式脑机接口范式。而相较于运动想象, MRCP 不依赖于重复的运动想象。因此, MRCP 具有自然、真实、可以反映人的实际运动意图等优点。典型的 MRCP 范式包括点到点的上肢运动 (如 center-out)、连续运动追踪式的上肢运动 (如 PTT)、指定动作类型的上肢或下肢运动 (如手腕内旋/外旋) 等。由于 MRCP 具有可反映运动意图的特性, 其对发展与运动康复、运动功能诊断、日常生活辅助等相关的运动脑机接口具有重要价值。目前, MRCP 主要发展趋势包括从单肢体到多肢体的运动意图解码、从离散分类问题到连续回归问题的连续运动参数解析、与神经假肢、外骨骼、机械臂等外设结合的人体运动增强和康复治疗等。

(四) 解码算法技术

1. 植入式主流解码技术

卡尔曼滤波器成为当前主流解码方法。以运动控制为例, 早期的植入式脑机接口解码大都使用维纳滤波器线性解码系统。此类解码系统不包含运动学过程模型, 而是将群体神经元的反应作为输入, 将空间坐标内的运动速率作为输出, 通过最优线性估计的方法进行解码。早期很多脑机接口实验室都用该方法进行解码。后来, 为满足控制过程中的解码连续性需求, 需要有运动模型作参考以修正和优化解码器

输出，卡尔曼滤波器成为当前的主流解码方法，其在离线、实时以及临床试验中都得到了广泛的应用。卡尔曼滤波的优点是算法简单，而且可以不需考虑神经元具体编码内容即可解码，因此可以实时快速解码。其缺点在于解码效果一般，且每次实验之前都需较长的校准时间，另外，卡尔曼滤波解码的系统鲁棒性相对较差。为解决这些问题，国际上提出了很多方法，其中最具前景的方法主要包括类脑解码器设计和神经学习。

类脑解码器成为新一代解码方法。最近一些皮层神经元群体编码特性研究结果表明，虽然大量的神经元被记录并用于脑机接口的解码，但因大脑神经元的信息编码相对于运动是冗余的，用于控制的神经元群体反应维度要低于神经元数量。因此在理论上可以找到一个隐藏或潜在的低维状态空间来描述在该控制条件下的有效神经元群体反应，并将这个状态空间中的潜变量映射到相关行为或运动控制变量用于运动控制。将这些编码特性应用于解码器设计，得到类脑的解码器可用于脑机接口控制。目前学术研究结果表明，此类稳定子空间是存在的。此方法的优势是虽然记录到的神经元群体信号有高噪声且会发生变化，但其在子空间上的动力学过程一直稳定，因此可以有效去除不稳定记录以及神经元发放变化带来的干扰，从而获得更为鲁棒的脑机接口系统。

神经学习提供新的解码思路。当前还有一种前沿的脑机接口解码方法是通过训练大脑进行学习来使用脑机接口，即神经学习（也称脑

机器学习)。脑机接口系统中存在两个学习系统，一个是解码器的机器学习，另外一个就是具有强大学习能力的神经系统。脑机接口初期的实验都体现了大脑学习本身的重要意义，但如何让大脑学会使用脑机接口的解决方案尚不完善。脑机接口系统在使用过程中，闭环控制的练习可以导致神经元为适应用户的运动系统而发生变化。因此，闭环过程中的解码器与开环时的解码器可能完全不同，结果表明提供快速的反馈比过滤错误更为重要，因此诞生了改进闭环性能的技术，一般被称为闭环解码器适应（Closed-Loop decoder Adaptation, CLDA）。此类方法根据闭环脑机接口使用期间记录的数据实时改进解码器，让解码器根据用户当前神经信号的性质来决定解码器的结构。此外，用户的神经系统也在实时学习如何应用这个解码器。两者的相互结合以及相互促进得到了一个“脑机双学习”的融合式脑机接口系统。此系统可以在神经信号不稳定时依然输出稳定的表现，且仅需少量校准即可即插即用，同时鲁棒性极高，在适应新的应用场景时有同时保留已学控制技巧并探索新控制方式的特性，因此极大的提高了脑机接口系统在实际应用中的可能性。

2.非植入式主流解码技术

分解算法是非植入式脑机接口系统的主流解码算法。分解算法广泛应用于脑机接口系统的去噪与意图解码。分解算法通常使用矩阵分解或提取空间滤波器来增加不同类别意图的解码可分离性。大多数分解算法都是为特征提取而设计的，矩阵特征分解后通常需要连接到分

类器。独立成分分析（ICA）是使用广泛的分解算法之一。ICA 一方面可对不同源信号进行特征分析，另一方面还可用于去噪（例如去除眨眼成分、伪影信号等）。在解码脑意图时，不同脑机接口范式的分解算法存在差异。运动想象范式解码多采用通用空间模式（CSP）及衍生算法。CSP 可最大化不同分布的方差信号，例如对左右手运动想象进行分类。在 CSP 基础上逐渐衍生出滤波器组 CSP（FBCSP）、提议判别滤波器组 CSP（DFBCSP）、临时约束的稀疏组空间模式（TSGSP）等。稳态视觉诱发电位（SSVEP）解码多采用典型相关分析（CCA）及衍生算法。CCA 算法有效解决了以往非空域分解算法难于处理的导联挑选问题。近十年学者提出诸多 CCA 改进算法，例如滤波器组 CCA（FBCCA）、任务相关成分分析（TRCA）、集成 TRCA（eTRCA）、任务相关成分分析算法（mTRCA、TDCA 等）。视觉 P300 电位解码算法依托 xDAWN 算法和 DCPM 算法。目前有增强 P300 诱发电位的 xDAWN 算法以及将空间模式提取和模式匹配结合的 DCPM 算法。

近十年以黎曼几何为代表的流形算法在脑机接口系统中广泛应用。黎曼几何算法通常可以用于对称正定（SPD）矩阵的空间上应用运算，进而提供一个统一的框架来处理不同的脑机接口范式。例如基于最小均值距离（MDM）和带有测地线滤波（FgMDM）算法对 MI 任务进行分类。MDM 类似于使用欧式距离而不是黎曼距离的最近邻算法。FgMDM 将协方差投影到切线空间，将线性判别分析（LDA）应用于切线向量，然后将它们投影回带有选定分量的 SPD 空间。黎

曼框架由于具有扩展性，因此易于多场景应用并与机器学习方法结合。

深度学习算法在近年被引入脑机接口解码研究。基于 CNN 网络结构设计的 ShallowConvNet 和 DeepConvNet 模仿了 FBCSP 中的时间和空间滤波器，性能接近 FBCSP。进一步利用深度可分离卷积代替普通卷积提出的 EEGNet 在 SSVEP 范式应用中取得了很好的效果。CNN 网络模型具有的批处理归一化功能也可用于视觉 P300 范式的解码。进一步还有诸多深度学习的改进模型，例如 CNN-RNN 架构、CNN-LSTM 架构。还有一些研究侧重于脑机接口的数据扩增，进而得到更多的训练数据，提升解码效果。典型的数据扩增网络模型包括循环的对抗网络（RGAN）、增强 MI 数据的 C-LSTM 模型等。

迁移学习算法的进步是脑机接口走向应用落地的关键。许多机器学习算法的训练数据与测试数据来自相同的特征分布。此类算法在脑机接口应用中，虽然面向单个被试在短时间内可以取得良好性能，但在不同被试或相同被试不同时间的情况下性能则大幅下降。这些问题被称为跨被试和跨时间的可变性问题。为了减轻这两个问题的影响，通常需要一个校准阶段来在每个会话开始时收集足够的训练数据，但这会明显增加系统使用的准备时间。迁移学习旨在利用源域中的先验信息改进目标域中预测函数的学习过程，解决跨会话和跨主体的可变性问题。脑机接口的早期迁移学习算法侧重于分解算法的改进。而后黎曼几何法进一步促进了脑机接口的迁移学习算法进步。近年来，深度学习算法也开始应用于迁移学习领域。此外，其他领域的迁移学习

方法也在脑机接口研究中有一定的借鉴，例如信息几何（STIG）的光谱传输算法在快速序列视觉呈现范式（RSVP）的验证；融合转移分量分析（TCA）和联合分布适应（JDA）提出的用于脑机接口的流形嵌入知识转移（MEKT）方法。

四、典型应用场景和需求

（一）脑状态检测

1. 脑功能评估与辅助诊断

（1）场景描述

脑机接口系统已逐步应用于脑功能评估与辅助诊断。由于头皮脑电（Electroencephalograph, EEG）信号具有高度非线性且随机特点，使用信号处理技术可以很容易区分正常和异常的大脑活动，因此脑部受伤等症状或疾病都可以使用脑电图来诊断许多与神经病学相关的疾病，例如癫痫、睡眠障碍、肿瘤、抑郁症、自闭症等疾病。

（2）关键需求

在准确方面，基于脑信号解码的疾病辅助诊断已逐渐在临床上应用落地。经过对产业相关技术现状的调研，**此类系统最关键的指标即为识别正确率**，通常需要达到 90% 以上。当然，也并非一味追求高识别正确率，而由不同疾病以及支撑技术发展现状决定。

在高效方面，脑功能评估与辅助诊断对系统的响应交互速度要求相对不高，大致有 15 分钟出结果即可。当然根据技术发展水平而言，

实际操作中还是越快越好。但是对人机协同训练时长要求较高，因为抑郁症、自闭症等患者的测试配合度通常远低于常人，准备过程的耗时需要尽量缩短。

在稳定方面，脑疾病辅助诊断设备的需求不高，通常是在固定的使用环境应用，对外界干扰可以做一定的场地限制。

在易用方面，脑疾病辅助诊断设备的需求相对较低，检测过程通常不会持续太久，且在临床环境使用，使用者对轻便的需求相对不明显，只要不对使用者造成明显负担即可。

2.脑纹识别

（1）场景描述

在当前的数字信息社会中，个人身份验证技术是个人和企业安全系统中必不可少的工具。脑纹具有高隐蔽性、不可窃取性、不可仿制性以及必须活体等方面的独特优势，因此在机密性、安全性要求较高的应用场合中，可以使用脑电波进行身份识别。

（2）关键需求

在准确方面，基于脑电信号的身份验证、识别将在个人消费支付、军事设备控制上应用落地。经过对产业相关技术现状的调研，我们认为脑电身份验证系统最关键的指标即为验证识别正确率，通常需要大于等于 99%。

在高效方面，基于脑电的身份验证和识别对系统的响应交互速度

有一定要求。在稳定采集脑电信号的前提下，一般需要 1 分钟内输出结果。在公安刑侦、金融支付等场合均需要应用任务能快速部署，因此设备的准备过程耗时需要尽量缩短。

在稳定方面，脑电身份验证识别对系统的稳定性要求较高。具体体现在三个方面：一是具有跨任务状态的稳定性；二是具有跨时段的稳定性；三是具有跨系统的稳定性。前两者的稳定性可以通过算法模型来增强。最后的跨系统的稳定性，需要脑机接口行业尽快建立起数据采集的通用标准。

在易用方面，脑电身份验证识别对系统便携易用需求相对较高，验证识别过程通常不能持续太久，最好是干电极、金属电极或者生物凝胶电极等易用操作传感设备，避免使用操作繁琐的湿电极。

3.安全监控

（1）场景描述

传统的安全生产监管模式长期以来都是围绕制度安全和设备安全展开，对人员状态突变造成的安全事故无法预测预警，当事故发生后无法对现场人员进行及时发现救助，也无法从人员角度对安全隐患进行排查分析。脑机接口系统基于对大脑状态的实时读取和解析，将作业人员和生产作业安全相关的大脑状态进行了综合数字化呈现，结合大数据技术赋能人员安全生产监管，实现人员安全事故的预测预警、事故发生的自动报警和现场反馈自救，也让管理者能够从人员安全数据的角度进行风险隐患排查。因此脑机接口系统可用于危化品生产、

施工作业、应急救援、冶炼生产等众多场景。

（2）关键需求

在准确方面，由于涉及作业人员的安全，系统必须具有极高识别正确率，确保在极端状态下准确及时的进行事故预警和报警。为此，要保留适度的算法冗余度，**在降低误报率的条件下尽量提升准确度**，确保在安全事故发生时准确率达到 99% 以上。

在高效方面，复杂工况环境要求脑机接口系统做到无干扰快速响应。为此，要搭建以高精度微弱脑电信号采集和实时分析系统，结合高效稳定的无线传输技术，具有互操作性的跨平台应用程序接口，最终实现即戴即用、实时监测和秒级响应。

在稳定方面，工业场景的规模化商用要解决三个主要问题，一是在工况作业等高噪声强干扰场景中获取高信噪比的脑电信号，需要积累各种作业工况环境中脑电参数数据库，不断优化工程算法滤波器，提升整体信号质量；二是少量通道条件下实现复杂脑状态实时分析计算。工业场景的条件限制导致只能采用少量信息通道，这对低信息量条件下的实时脑状态分析对算法提出了更高的要求；三是脑机接口系统在工业场景规模化商用中，不同群体和个体之间的差异对于鲁棒性构成了严峻挑战。为此，需要根据实际场景数据不断优化算法，迭代数据模型，提升脑机接口系统的鲁棒性。

在易用方面，在真实恶劣环境中应用要确保高精度微弱脑电信号采集设备小型化、便携化、可穿戴。这需要在已有防护装备中进行便

携化脑机接口系统的嵌入式改造，并在电极性能、人因工程、材料设计、防水防尘等诸多方面进行优化定型，既要满足现场人员无痕式佩戴的舒适度体验，又要适应各种高温、高湿、高粉尘的外界强干扰环境，保证高精度脑电信号的稳定采集和传输效率。

（二）神经调控

神经调控技术利用植入性或非植入性技术，采用电刺激或药物手段改变中枢神经、外周神经或自主神经系统活性从而来改善患病人群的症状。脑机接口相关的神经调控技术主要包括脑深部电极刺激（DBS）、迷走神经刺激（VNS）、经颅磁刺激（TMS）、经颅交流刺激（tACS）、经颅直流刺激（tDCS）、经颅超声刺激（TUS）、经颅电刺激和神经反馈（Neurofeedback）技术。

1. 有创神经调控

（1）场景描述

DBS 是典型的有创型神经调控技术。传统的方法是通过脉冲电刺激实现调控。其电流、频率、脉宽等参数通过医生“试错”的方式对调控效果进行观察并调整。随着脑机接口技术的进步，闭环的神经调控通过增加感知模块可以对不同脑状态进行实时调控，这种刺激效果更灵活，更适应、更自动化，从而达到更好的治疗效果和更小的副作用。国外已经进入成熟商业化应用的领域包括癫痫、帕金森、强迫症等，正在探索中的疾病包括成瘾、抑郁、阿尔兹海默症等神经疾病。

（2）关键需求

在准确方面，应用于医疗领域的神经调控设备产生的脉冲刺激有一定限制，对神经组织损失较小且可逆，同时神经调控具备短期和长期的两种作用机制，因此，对识别正确率未作苛刻要求。

在高效方面，人机交互响应速度随病种而导致要求不同。癫痫等疾病对快速响应的要求较高，在脑电已发生改变且临床症状出现前做出判断，并以刺激方式抑制癫痫发作。现有的商业设备数据显示，约 4 秒计算时间能完成癫痫发作的监测和刺激的反馈。对于抑郁、帕金森等疾病，对快速响应交互性要求则相对较低，不大于 4 秒即可。

在稳定方面，采用微创或有创神经调控技术能够在一定程度上避免颅骨对采集和刺激信号造成衰减，因此在复杂环境下通常能够实现人机稳定交互以及快速应用体验。但要防止在极端恶劣环境条件下应用此技术（例如，电磁干扰、极端温度、压力变化），从而对设备产生信号干扰，从实践来看，已有证据表明 RFID 设备、高压氧仓、强电磁干扰环境有可能导致信号伪迹，从而产生误刺激。闭环神经调控的应用由于以有创或微创为主，因此对长期稳定使用要求较高。一方面要求神经界面能够长期稳定进行采集和刺激，减少由于纤维蛋白增生导致的采集和刺激失效；另一方面要求功耗更低以降低人体损害，以及电池容量更大以实现长期工作，避免频繁更换电池等二次手术造成新的创伤。从当前技术发展来看，神经刺激器的工作有效期已经从传统的三至五年延长至十年甚至更长时间，并已开发安全的可充电技术，

满足在人体内长期稳定的工作需求。

在易用方面，植入医疗器械为满足更加轻便的需求当前多通过微创方案解决。传统的神经刺激器体积较大，约 30cm^3 左右，且需要在胸内和脑内植入并通过引线连接。采用微创技术则可实现轻便性目标，植入体的体积仅需颅骨切除，或者磨骨即可植入，从而减少手术创伤以及术后并发症几率，因此有创植入正在朝向微创植入方向发展。

2. 无创神经调控

（1）场景描述

孤独症（又称自闭症）谱系障碍是一种严重的神经发育疾病，据美国疾病控制与预防中心（CDC）2021 年 12 月调查结果显示，在过去二十年里美国自闭症患病率持续上升，2018 年调查的 8 岁儿童中自闭症患病率为 2.27%，高于上一个报告期（2016 年）的 1.85%。我国的自闭症患病率调查数据为至少 1%。作为脑机接口技术的重要研究和应用方向，基于神经反馈的数字疗法是自闭症领域技术发展的前沿和必然趋势。国际公认的应用行为分析（applied behavior analysis, ABA）疗法有效率一般不超过 50%。现已有实践表明，疑似或确诊的孤独症谱系障碍患者在康复过程中，针对社交与交流缺陷，通过非侵入式可穿戴脑机接口系统，结合智能神经反馈训练技术，进行基于大脑实时信号的评测和闭环干预，并与应用行为分析、言语治疗、作业（职能）治疗等方法结合，能够促进神经可塑性，提高社交脑功能，提升行为训练效果。

（2）关键需求

在准确方面，需要以医疗级别脑电帽 90% 以上的信号精度记录脑电波，以 85% 以上的识别正确率解码社交脑的脑电生物学指标，并以符合患者学习风格的方式提供反馈。

在高效方面，需要能够在 200Hz 以上的采样率、2000ms 以内的解码和反馈速度，以非人工的方式为患者提供有效的强化。

在稳定方面，有实践表明，通过符合患者学习风格的方式构建交互方式，让超过 95% 的患者坚持每周使用系统 3 次以上，总时长超过每周 3 小时则使用效果较好。且脑机接口系统与应用软件的通讯方式在实践中表明，需要有稳定的短距离无线连接能力，通信线路在 3 小时内应保持不中断。

在易用方面，应用软件需要具有互操作性，能适配多种主流操作系统、多款市面主流终端设备，操作需要降低门槛、降低专业知识门槛，让康复机构初级康复师、患者及家属均可快速入门使用。系统也应不需要涂抹导电膏和佩戴有线设备等，这样能促进患者在医院以外的地方接受治疗。

（三）对外交互

1. 协助沟通

（1）场景描述

脑机接口可为渐冻症、中风康复患者等失去语言交流功能的人员

实现脑电打字系统，提高患者的生活质量。未来还可应用于人与人之间的隐秘交互，该交互过程无声响和无肢体动作。

脑机打字从技术应用角度可分为植入式脑机接口打字系统与非植入式脑机接口打字系统。上述两种系统对关键特征的需求存在差异。

植入式脑机接口打字系统对使用者会造成一定的脑部创伤，但由于采集的信号质量更高，因此具有更强的系统性能。因此植入式脑机打字系统在快速响应、高准确率、长期稳定方面需求强烈。同时受限于植入式系统的技术发展现状，存在稳定交互、快速应用、轻便易用方面的需求，使用者只需要在固定、安全、噪声稳定的环境长期使用即可。

非植入式脑机接口打字系统相比植入式脑机打字系统采集的信号质量较低，但具有快速应用、安全无创的特点。该系统在快速响应交互、识别正确率方面的要求较高，但系统性能低于植入式系统。非植入式脑机打字系统在快速应用体验、轻便性、抗干扰实现稳定交互方面也有很高的需求。但在长时稳定交互方面要求较植入式系统相对较低。

最近，也有通过介入式植入电极的脑机接口打字系统。该系统通过颅内血管的支架式电极采集信号，避免了对脑组织的创伤。此种植入方式的脑机接口系统除了在快速响应、高准确率及轻便易用方面有很高的要求，而且对长效性的要求也非常高。

（2）关键需求

在准确方面，识别正确率指标是脑机打字系统的核心竞争力，通常脑机打字系统的正确率应高于 95%才具有较好的实用效果。

在高效方面，脑机打字系统优劣的重要指标之一就是响应时间。脑机打字系统的单次响应时间理想值在 0.5 秒~1.5 秒之间，响应时间低于 0.5 秒时较难保持识别正确率，单次响应时间超过 1.5 秒也将导致用户体验较差。

在稳定方面，目前的脑机打字系统大多应用于固定环境，因此对抗干扰性能的要求并不迫切。但从需求出发，在未来脑机打字系统用于人与人之间隐秘交互方面则需具备较强的抗干扰稳定交互能力。植入式脑机接口系统都需要保证至少 1 年的稳定使用时长，1 年是长期随访期的最低要求，也是可以开展临床试验的最低要求。作为医疗器械，稳定使用时长最好在十年以上。

在易用方面，植入式脑机打字系统的轻便性要求相对较低，在脖子以上的非植入式系统配重不应大于 500g，最好小于 200g，同时最好能减少导电膏的使用。在准备时长方面，植入式需要手术花费一定时间。非植入式脑机打字系统目前需要在 10 分钟内完成装配准备调试，该时间越短越好。在人机协同训练时长方面，植入式与非植入式系统均希望采用“冷启动”的方式，即使用者可直接开展系统应用，机器在使用过程中快速迭代解码算法，在 10 分钟甚至更短时间内达到针对个体优化的脑信息解码精准度。

2.面向医疗康复的外设控制

（1）场景描述

据估计，世界上近 1%的人口患有脑血管疾病后遗症。这些后遗症包括运动功能受损、一般认知缺陷、生成或处理语言困难以及情绪状态的改变，这些现象是中风后常见现象。这些患者中近 30%患有慢性运动障碍，其中偏瘫是中风后最常见的致残病症。因此，卒中后康复的主要目标是恢复运动功能，更有效的康复干预措施需求迫切。迄今为止，运动康复是脑机接口在中风领域研究最多的应用。

用于神经康复的脑机接口系统仅需通过记录和解码患者进行特定心理任务产生的局部脑信号，就可以向外部康复设备传输指令。其主要目标是促进相关大脑区域的神经活动，并促进神经重塑。采集的脑信号通常通过以下方式由外部设备反馈给患者：一是向患者提供关于想象的视觉运动任务反馈，例如在虚拟环境中加强运动想象训练；二是通过康复机器人等外部器械带动患者的运动损伤部位运动，完成“闭环”的感觉运动回路。

（2）关键需求

在准确方面，面向医疗康复的脑机接口系统解码准确率是患者完成有效康复的基本保证，系统的解码精度高不仅能够准确的完成康复流程，促进神经元的康复能力提升，并且更高的准确性会提高患者的信心和动力水平，更好地提升治疗效果。此外，更高的准确度也可能

使患者更具有参与度，而准确性较低的脑机接口康复系统因无效反馈频出，可能导致患者产生挫败感，因此对康复产生负面影响，因此应尽量控制运动意图解码正确率不低于 85%。

在高效方面，快速解码也是康复系统中不可缺少部分，外部设备的运作是根据患者的大脑活动进行改变的，康复系统能够实时的根据患者脑活动做出相应动作，从而有利于增强患者的代入感。因此，从受试者开始进行脑活动到外部设备做出动作响应需尽量保持在 3s 以内，以提升患者的使用感及康复系统的实用价值。

在稳定方面，康复类脑机系统需要具备一定的抗干扰能力及长期使用稳定特性。一方面，康复类脑机接口系统的目标不仅限于在医院中的辅助康复训练，还希望在未来能扩展至患者家中或户外活动场景，这就需要系统具有较强的抗环境噪声能力。此外，康复类脑机接口系统也需要长期稳定，尤其是在医疗应用场景中，如不能在较长的时间保持性能稳定，则会造成临床医生与患者的使用困扰。

在易用方面，康复范式的设计也是关键环节之一，对于不同的运动损伤患者需要制定不同的康复范式，例如下肢运动损伤与手部运动损伤的患者需要分别制定下肢以及上肢的康复范式，并且和虚拟现实技术结合设计更具有沉浸感的康复范式能够让患者有代入感，增强受损神经元的参与程度。因此，需要对患者进行全面的临床和神经生理学评估，以全面分析和制定个性化的康复计划。此外，有必要探索在没有感觉反馈的情况下是否可以实现与临床类似的康复效果。如果仅

使用视觉或虚拟现实反馈即可获得同等康复效果，则可以带来更便携、更简单且价格合理的家用康复系统。

五、展望与建议

（一）未来展望

经过数十年的科学探索与技术论证，脑机接口已从科幻成为科学，并处于从科学研究到产业落地的关键时期。就脑机接口目前的发展情况，在今后一段时间，脑机接口的基础学科研究和应用落地都将得到长足发展，从而有望促进脑机接口市场规模不断扩大。

1. 技术展望

在基础学科研究方面，一方面，脑机接口技术自身受外界成熟条件影响得以长足发展，由于神经科学、工程学、计算机学、材料学等多学科的不断成熟完善，脑机接口技术在采集、刺激、编码和解码等方面取得进一步突破，脑机接口产品的“准确、高效、稳定、易用、安全”能力有效提升；另一方面，脑机接口技术将加速神经技术与类脑计算技术的融合，助力脑科学研究更好的认清大脑工作机理，实现认识大脑、解码大脑和调控大脑的目的。当前脑科学研究在大脑学习、情感记忆等机理研究方面达到突破阈值，未来可能在高级智能方向形成大力突破，进而对当前以数学为基础的人工智能技术造成颠覆性影响，引发以人工智能为代表的计算技术革新。

2.应用展望

在应用方面，脑机接口的产业应用实践将具有显著的社会效益。体现在：**一是促进人民健康生活水平质量提升**，特别是对神经疾病群体（渐冻症、癫痫、帕金森等）生活质量改善起到显著推动作用，推动医疗、康养产业数字化和智能化；**二是推动前沿科技创新**，人才短缺、老龄化严重威胁、抗灾救援等问题一直困扰人类生活，人类能力的增强对于弥合差距和满足行业需求至关重要，脑机接口技术将推动人体增强和替代技术发展，对人类生活和社会活动产生颠覆性影响。**三是助力经济发展**，脑科学与多领域融合将呈现应用行业广、辐射范围大的特点。

3.市场展望

尽管当前脑机接口核心软硬件产品全球市场估算在十多亿美元，神经调控软硬件产品全球市场规模约百亿美元，但如满足报告所提出的愿景，则有助于推动神经系统疾病的数字疗法走向应用，届时则撬动达到数千乃至万亿规模的睡眠调控、消费娱乐、神经疾病治疗市场。根据中国残联统计数据，我国肢体残疾 2472 万人，视觉障碍群体将近 1800 万，有听力残疾人数达 2780 万人。据不完全统计，我国老年痴呆患病率有 6%，抑郁症和焦虑症的患病率接近 7%，其它神经系统疾病患者过千万，并随着老龄化程度提高而快速增长。因此预测神经重塑、神经替代、神经调控脑机接口技术将拥有数十万亿规模的市场空间。

（二）发展建议

脑机接口应用落地离不开关键技术的突破，工程技术的革新，科研工具平台的支撑，标准体系的推动、测试验证体系的完善，科技伦理的共识。因此，脑机接口产业在发展中**对“多学科协作、多行业协同”**的诉求非常强烈。有必要面向脑机接口领域，形成“产学研用医政”协同创新体系，因此建议：

一是以科研资源共享机制推动学术协同。脑机接口的技术发展离不开数据、仪器、人才等科研资源。构建面向脑机接口领域科研资源共享机制，搭建科研资源共享平台，有效地支撑知识创造和科学研究，促进科研团队协作，促进交叉学科间合作，为高水平科学研究和高层次人才培养提供有力保障。

二是以联盟合作方式推动产业协同。成立脑机接口产业联盟，从科学研究、产品研发、测试应用、临床实践、标准制定与政策配套等方面凝聚产业力量，搭建行业内沟通交流合作的良好平台，组织国内外专家形成合力，互通有无。推动协同创新，使政府、企业和科研高校之间形成密切沟通合作模式，促进科技成果转化，引领应用场景探索开拓等。协调组织核心技术攻关研究和基础关键研发要素设施建设，推进软硬件等共性产业技术研发，推动技术及产业融合发展。

三是以标准和测试研究推动应用落地。落实《国家标准化发展纲要》中“推动标准化与科技创新互动发展”的工作思路。在“脑智芯连，思行无碍”行业发展总体愿景目标下，针对脑机接口系统关键需

求和性能指标开展标准研究和测评验证等工作，从而促进采集、编码、解码等核心技术的演进，以量化的标准和评价体系对脑机接口产品进行效能评估，推动脑机接口标准化工作的高质量发展，促进应用尽早落地，造福人民生命健康。

四是以科技伦理保障应用安全。一方面开展多方对话与合作，梳理原则清单，共同制定具有可操作性的伦理准则和行业公约，另一方面，面向脑机接口领域，在技术、实验、数据方面加强科技伦理制度化建设，建立健全科技伦理审查和风险评估制度。

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

