

脑机接口：现状，问题与展望*

葛松¹⁾ 徐晶晶^{1,2)**} 赖舜男¹⁾ 杨娜娜¹⁾ 林衍旒¹⁾ 许胜勇^{1)**}

¹⁾ 北京大学信息科学技术学院电子学系, 教育部纳米器件物理与化学重点实验室, 北京 100871;

²⁾ 山东大学微电子学院, 济南 250100)

摘要 本文综述现有脑机接口技术的最新发展, 并讨论这些脑机接口技术的局限和存在的问题, 如高估人类个体大脑的功能、对大脑信息存储方式缺乏了解等。基于大脑信息存储的“二维码”模型, 我们认为目前的脑机接口技术方案仅适用于一些简单的应用场景, 如了解受测者的情绪变化、生命活动的状态, 以及控制体外器械等, 而无法通过脑机接口技术获取脑内诸如记忆与思考等信息的精准细节。我们也提出, 向大脑输入信息的脑机接口技术有较大的发展空间, 比如发展具有多种调控效果、物理和生化技术结合的深脑刺激装置, 有可能广泛应用于抑郁症、癫痫等脑疾病的治疗, 以及应用于短期脑力的增强。本文对于目前的脑机接口研究领域具有一定的警示和启发意义。

关键词 人类大脑, 脑机接口, 脑电极, 脑探针, 大脑记忆机制

中图分类号 Q6, TN710

DOI: 10.16476/j.pibb.2020.0072

人类智慧代表了地球生物圈的最高水平。有关人脑的研究, 不仅涉及生物学、医学、心理学, 也涉及工程技术、物理、化学、数学、社会学、伦理学等, 是一个广泛交叉的研究领域。对脑的研究计划已成为当前很多国家的战略热点, 如美国^[1]、欧盟^[2]、加拿大^[3]、中国^[4]、日本^[5]、韩国^[6]、澳大利亚^[7]等。

在众多复杂的脑科学研究相关难题中, 有两个问题促使脑机接口研究蓬勃发展。这两个问题分别是人类文明知识的爆炸式发展和生物大脑发展迟缓之间的矛盾, 以及人类平均寿命快速增长和大脑工作寿命有限之间的矛盾。

第一个问题使得人类个体能够为文明进步作贡献的时间长度非常有限。从有记载的10 000年前的农业社会开始, 人们面临艰难困苦的社会问题和危险四伏的自然环境, 通过发明语言、符号、工具和彼此交流合作, 逐渐积累发展出灿烂的古代文明, 其绘画、雕塑、建筑、音乐、诗歌、书法、哲学、日用器具、服饰、法律、道德等文明成果, 至今仍让人叹为观止。最近二三百年来, 尤其是最近50年, 现代社会出现指数式的信息增长趋势, 人类文明知识总量的增长速度远远超越了其生物大脑的进化速

度。生物学家普遍认为在过去2 000年里人类个体大脑没有显著的生物学进化^[8]。这导致在现阶段一个年轻人需要花费20年左右时间才能学会人类文明的基本技能和某些领域的专门知识与技能, 而要达到某个细分领域文明的前沿、能够为文明的发展作出新贡献, 则还需要再投入10~20年、甚至更长的学习时间。随着科学技术和人类文明的进一步加速发展, 所有个体都会面临学习能力无法跟上信息发展速度的大问题。另一方面的现实是, 由于大脑内大多数神经元细胞无法增生, 人们在50~60岁便出现脑力下降。超长时间的教育和中老年时期脑力下降这两个因素同时存在, 使得一个受到最好、最强的现代教育的人类个体能为社会发展和文明进步作出重要贡献的有效时间很短, 平均20~30年, 甚至只有10年。

第二个问题使得人类进入老龄化社会的风险越

* 国家“变革性技术关键科学问题重点专项”(2017YFA0701302)资助。

** 通讯联系人。

徐晶晶. Tel: 15600932686, E-mail: xujj@sdu.edu.cn

许胜勇. Tel: 010-62762999, E-mail: xusy@pku.edu.cn

收稿日期: 2020-07-24, 接受日期: 2020-09-15

来越大. 绝大多数人群在50~70岁便开始出现记忆力下降、痴呆、抑郁、癫痫、脑肿瘤、脑萎缩等严重倾向, 不仅难以维持顶级脑力活动, 也使得生活质量剧烈下降. 但与此同时, 随着现代科技和医疗技术的发展, 很多国家和地区的人类预期寿命增加到80~90岁, 在可预见的1个世纪里, 地球人类的总体预期寿命将突破100岁. 从统计角度看, 这意味着未来50年里, 会有30%~60%的人群, 能够活到90~120岁. 如果这群人普遍都脑力低下、甚至痴呆, 这将给人类社会带来巨大的文化问题、伦理问题和经济问题.

如何解决这两大难题? 全球的科学家和医学专家们正在积极寻找不同的方案与路径. 随着机器人、物联网和人工智能技术的迅速发展, 一些之前仅存在于科幻小说和电影的情景, 比如智能机器人超越人类、人机结合生物体、电子人(cyborg)等, 已经成为科学家的研究热点和人们的日常话题. 以Alpha Zero为典型代表的各类AI (artificial intelligence) 算法技术在围棋、金融交易等展现人类高超智力传统领域的表现已经远远超越了人类, 目前正在大数据医疗、智能交通、复杂决策甚至音乐和绘画创作等领域突飞猛进. 这些进展, 为美国、欧盟、中国的脑科学计划, 以及世界各地蓬勃开展的各类脑科学研究, 带来了极大的压力和动力. 深入理解人类大脑的工作机制, 能够促进开发人类大脑的智慧潜力. 由于生物大脑的进化速度远远落后于人类文明的总体发展速度, 仅仅依赖开发个体大脑的潜力来解决上述两个难题, 恐怕不容乐观. 因此, 人们开始加速探索将AI和人类大脑结合的可能性.

若把人类大脑当作一台高效、低能耗的信息处理系统, 这里关键的技术是“脑机接口”(brain-computer-interface, BCI)^[9], 也就是能够将人类大脑和计算机系统连接起来的接口器件与系统. 人类发明了各类高速运算的计算机系统, 不仅能够在一块指甲大小的芯片上存储整部百科全书, 也能够在一部手掌大小的手机上完成海量极其复杂的计算和通讯功能. 这些功能都已经远远超过了个体大脑的信息存储能力和信息处理能力. 那么, 能不能通过脑机接口, 把我们在计算机芯片中实现的功能, 直接转移到人类大脑之中? 如此知识的传授不再是在课堂由老师讲课传授, 而是由植入大脑中的芯片直接输入. 另一方面, 能不能通过将各类传感器器件植入在大脑中、贴附在脑皮层之上或者头皮外

围, 获得大脑思考活动的准确信息? 一个代表案例是埃隆·马斯克等在2016年7月成立的Neuralink公司与其宏伟计划. 这个计划的短期目标是治疗老年痴呆症、帕金森病等脑部疾病, 其长远计划, 是通过植入一些“芯片和电缆”将人脑与AI融合来增强人类大脑的功能.

有关脑机接口的讨论已经很多. 本文概要讨论脑机接口技术在信息输出、输入两方面的进展和面临的挑战, 并以脑内信息存储方式为切入点, 分析现有脑机接口技术存在的误区和发展前景.

1 脑机接口分类

人脑在感知外界刺激(如视觉、听觉等)、进行思维活动、产生主观意识时, 伴随其神经系统的运行, 会有一系列生化反应和电学活动, 产生可以测量的脑电信号. 狭义地定义, 脑机接口技术就是通过采集大脑皮层神经系统活动产生的脑电信号, 经过放大、滤波等方法, 将其转化为可以被计算机识别的信号, 从中辨别人的真实意图. 通过脑机接口技术, 既可以让外部设备读懂大脑神经信号, 将思维活动转换为指令信号, 来实现大脑对外部设备的操控; 也有可能通过脑机接口, 把计算机内的信息直接输入到大脑, 从而极大地缩短人类学习新知识和新技能的过程.

笼统而言, 不妨把各类脑机接口按照其功能分为(1)能够单向获取大脑信息、(2)能够向大脑单向输入信息, 以及(3)能够与大脑双向交流信息这3大类. 目前见诸文献和已经有初步产品的脑机接口, 主要集中在第一类, 也就是单向获取部分简单的大脑信息. 目前主要应用于病人的康复训练, 比如通过脑机接口将大脑的命令传递给外骨骼、机械臂、光标等外设使其能够进行行走、手臂拿放物体、操作平板电脑等一些简单的动作. 少量的器件与系统属于第二类, 利用脑机接口技术修复受损的神经功能, 比如通过人工假眼或者人工耳蜗的方式去恢复一定的视力、听力等. 然而, 第三类互动式装置还处在起步阶段, 双向的互动式脑机接口技术, 不仅可以接收神经系统信号还能够刺激神经系统, 是未来的发展方向. 研究表明, 互动式装置能够用于增强两个大脑区域之间或者大脑与脊髓之间的连接, 可能成为治疗中风和脊髓受伤患者的一种全新康复工具. 国内NeuraMatrix的公司, 旨在自主研发出具有生物友好性、可长期植入、与神经系统直连的无线超小信息交互终端设备, 目前产品

已经到动物实验阶段, 可为新药研发提供全新药效评估手段。

根据脑机接口与大脑的连接方式, 可以分为侵入式、非侵入式和半侵入式脑机接口^[10]。侵入式脑机接口要求微电极植入头骨下的大脑皮层中, 直接接触神经元细胞。在这种情况下, 信号可能会被以高质量产生采集, 但随着时间的推移容易出现疤痕组织, 从而影响后续的信号接收。此外, 一旦种植了侵入式脑机接口/探针, 就不可能将其移动来测量大脑的其他部分。非侵入式脑机接口设置在颅骨外。在这种情况下, 信号可能是低质量的, 但是由于避免手术, 非侵入式脑机接口仍然是目前实践中优选的方式。在半侵入式脑机接口中, 电极植入到颅骨下方, 但是并未深入脑皮层, 使用脑皮层电图记录脑信号。

脑机接口也可分为依赖性接口和独立性接口^[10]。依赖性脑机接口需要来自受试者某种程度的运动控制, 可以帮助受试者更容易地做事情, 例如玩视频游戏和移动轮椅; 而独立性脑机接口不需要任何控制, 严重残疾的受试者需要独立的脑机接口。脑机接口还可以分为同步和异步两种类型^[10]。当用户与系统的交互在特定时间段完成时, 脑机接口系统被称为同步, 即系统必须强制主体在特定时间段与其交互, 否则系统将无法接收主体信号。在异步脑机接口系统中, 受试者能够在任何时间段执行其心理任务, 系统将对她/他的心理活动做出反应。因此, 受试者可以在任何时间段自由活动。当然, 脑机接口技术还可以依据其他变量来分类, 本文不作赘述。

2 获取脑内信息的脑机接口技术

目前获取脑内信息的技术方式有很多种, 包括功能核磁共振成像技术 (functional magnetic resonance imaging, fMRI)、功能近红外光成像 (functional near-infrared, fNIR)、脑磁图 (magnetoencephalography, MEG)、正电子发射断层扫描 (positron Emission Computed Tomography, PET) 和单光子发射计算机断层扫描 (single photon emission computed tomography, SPECT or SPCT)、头皮处的脑电图 (electro-encephalogram, EEG)、硬脑膜处的脑电图 (electrocorticographic, ECoG) 和侵入式脑电极 (intracortical BCIs) 等。这些技术可以从不同方面采集大脑的活动信息来分析大脑活动、了解大脑的生理状况、监测受试者的

健康状况、研究大脑的工作机制。

其中, 功能核磁共振成像技术、功能近红外光成像、脑磁图、正电子发射断层扫描和单光子发射计算机断层扫描等技术可以在较大的范围内获得大脑总体信息、结构信息、组织活跃程度和组织变异信息等, 已经在医疗诊断方面被广泛应用。例如, 正电子发射断层扫描 (PET) 和单光子发射计算机断层扫描 (SPECT) 技术能够监测大多数大脑的宏观活动, 有效地诊断脑功能紊乱、昏迷和各类脑疾病, 基本没有副作用。

脑机接口技术典型工作流程如图1所示。由大脑活动产生的电信号是从头皮, 皮层表面或大脑内部记录下来, 分析反映BCI用户意图的特定特征 (如脑电节律的幅度或单个神经元的放电速率), 这些功能被转换为命令, 这些命令可操作于替换、还原、增强、补充或改善自然输出 (即神经肌肉) 的应用程序^[11]。

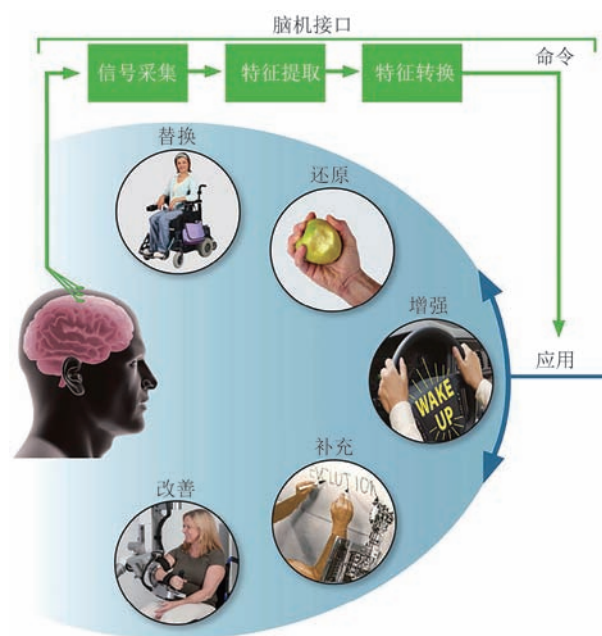


Fig. 1 Basic design and operation of a brain-computer interface (BCI) system^[11]

图1 脑机接口技术工作流程示意图^[11]

要了解大脑局部区域工作状态的具体信息, 在研究和应用上采用非侵入式、半侵入式和侵入式脑机接口技术。

2.1 非侵入式脑机接口

脑电图 (EEG) 技术是目前最成熟的脑机接口技术。EEG 是一种典型的非侵入式脑机接口技术, 其方法是将电极阵列贴附在头皮上, 运用精密复杂

的仪表实现多路脑电图信号同时采集、分析,以获得大脑不同区域细胞群自发性、节律性电活动所产生的5~100 μV量级的电位差随时间变化曲线,其中脑电图的常见频率为0.5~30 Hz,也有更高一点的频率分析。

脑电图主要用于医疗临床检测各类脑功能与脑疾病,如诊断癫痫^[12]、睡眠检测^[13]、大脑功能检测^[14]和其他局灶性脑病,以及解码运动意图、通过读取脑电图控制机械臂或外骨骼的运动。EEG还能通过对大脑进行一些电刺激,激发潜能,进而提

升脑功能^[15]。

EEG技术广泛应用于大脑信号的监测和研究。加利福尼亚大学圣地亚哥分校神经计算研究所利用108通道高密度脑电图去研究在有节奏的听觉提示下协调步态运动以解析皮层动力学^[16],研究证明了EEG数据与运动学之间存在显著关系,其数据集适用于解决与提示步态和步态调整相伴的脑电图动力学的许多问题。图2是数据采集时受试者的照片、电极布局 and 实验的流程。

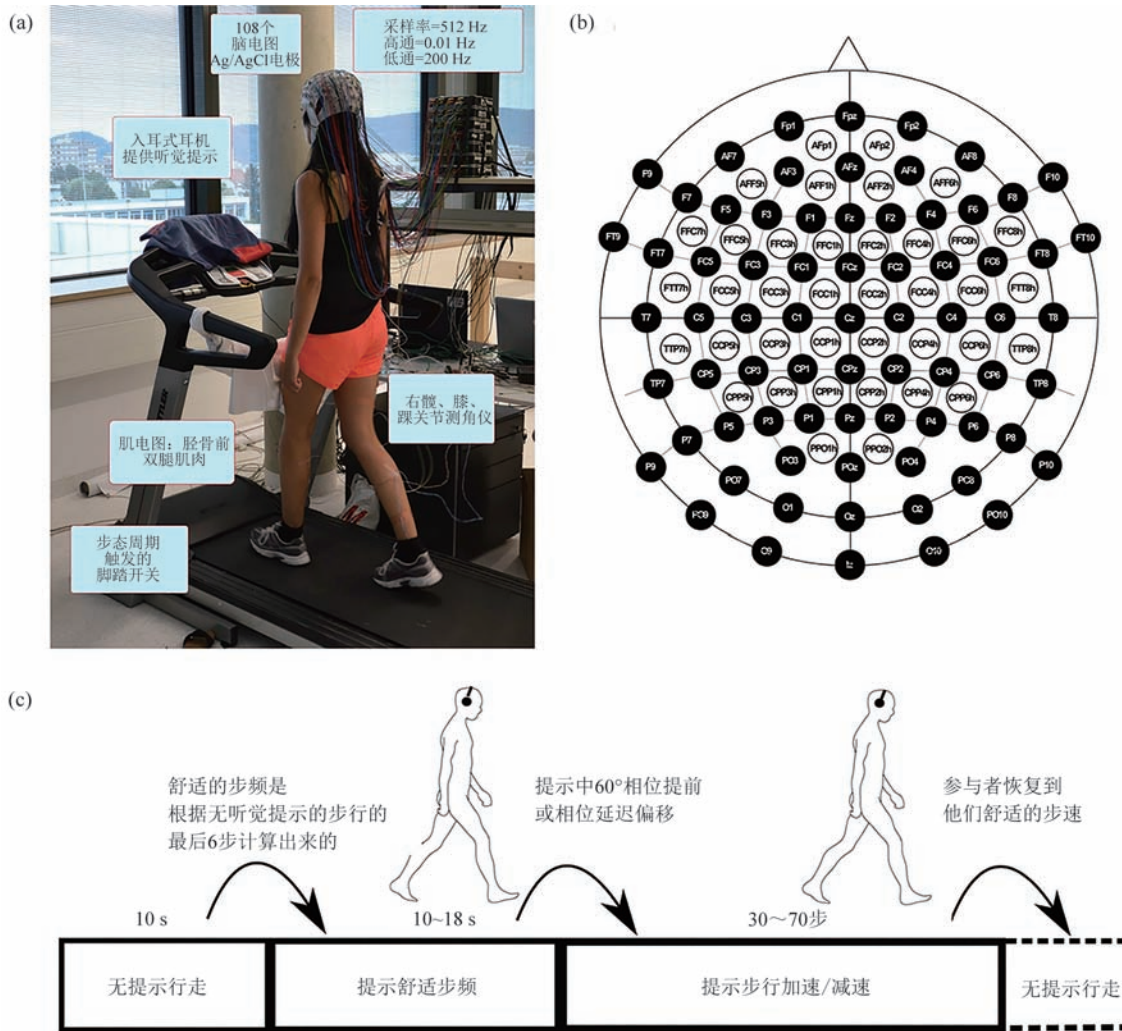


Fig. 2 Experimental setup and paradigm of a auditory gait pacing task^[16]

图2 听觉提示下协调步态运动数据采集的实验装置和流程^[16]

(a) 实验装置,受试者在跑步机上行走,并通过入耳式耳机传递有节奏的听觉提示以改变步伐。(b) 电极布局,108个EEG电极通道以记录运动变化中的脑电信号变化。(c) 实验过程,受试者先维持舒适步行速度,再调整步长、频率和听觉提示音同步,再恢复原舒适步速,记录实验中的脑电信号。

在另外一个成功案例中,带有32个Ag/AgCl电极的EEG系统被用于研究驾驶员在复杂操作环境下(压力和认知疲劳)的行为决策,直接研究感

觉系统、大脑、行为三者之间相互作用的关系^[17]。

EEG技术还广泛应用于解码运动意图、控制机械臂或外骨骼等外部设施的运动。日本国家技术

研究中心 2018 年将 EEG 与一种感觉刺激器并联使用, 潜意识地刺激与用户预期运动相对应的感觉模式, 并通过解码预测误差来从用户的脑电图 (EEG) 解码其运动意图是否与潜意识感觉刺激相

匹配^[18]. 图 3 是其实验流程图和装置图, 实验观察到了零培训下, 受试者单次尝试解码准确度的中位数高达 87.2%.

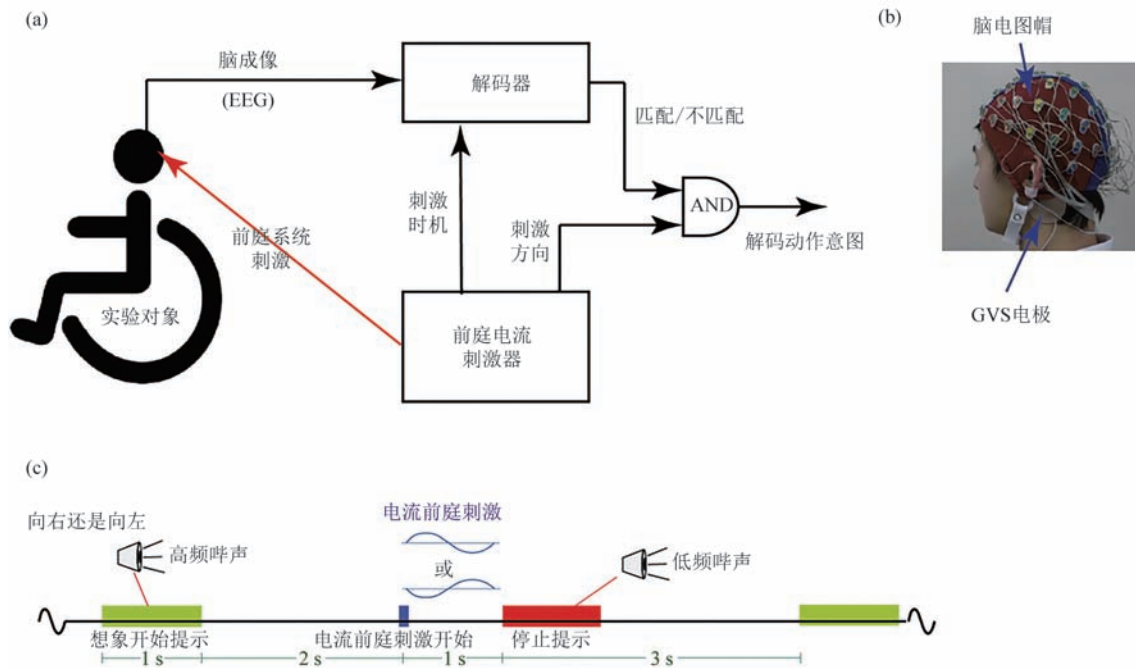


Fig. 3 Experimental setup and paradigm of movement intention decoding by utilizing sensory prediction errors^[18]

图3 利用感觉预测误差进行运动意图解码实验的装置和流程图^[18]

(a) 方案框图: 实验使用一个与 EEG 并行的感觉刺激器, 并解码刺激是否与用户运动意图对应的感觉反馈相匹配. 实验模拟了轮椅转弯的场景, 并使用了电刺激前庭刺激器. (b) 在脑电图记录过程中, 参与者被贴上了电流前庭刺激 (galvanic vestibular stimulation, GVS) 电极, 能引起一种左右转向的感觉. (c) 实验时间表: 使用立体声扬声器和高频哔声, 要求参与者想象坐在旋转椅上向左或向右旋转. 在每一个提示结束后 2 s 应用潜意识 GVS, 随机对应于右转或左转, 接下来是 3 s 的休息时间, 并发出低频哔声的停止提示音.

外骨骼是人与机器融合以恢复、替代或增强强度、耐力等人类身体能力的示例^[19]. 最近的研究采用超数字机器人肢体 (supernumerary robotic limbs, SRL) 增强效果, 例如麻省理工学院机械工程系研发的可穿戴机械臂^[20], 能抓住多个物体^[21]、支撑重物^[22]. 实验结果表明, 参与者能够使用 BCI 可靠地控制机械臂执行任务, 同时不影响自己的手臂完成其他任务. 日本京都研究所同样研发了可优化增强 BCI 控制机器人四肢活动的系统^[23].

日本国际高级电讯研究所石黑浩实验室研发了可以实现增强一个健康人的身体技能与认知能力的系统^[24]. 实验装置和实验过程如图 4 所示. 结果表明, 单个任务的总体绩效中位数为 67.5%, 多任务的总体绩效中位数为 72.5%.

EEG 还有很多其他应用. 比如雷恩大学、卡昂诺曼底大学用 EEG 技术研究了马^[25]、猴^[26]等动物对人类声音的反应, 他们将人声与动物过去的经历相联系并使动物产生相对应的情绪状态. 德国莱比锡马克斯·普朗克人类认知与脑科学研究所神经病学系利用 62 通道的 EEG 系统研究人的心理评估和情绪与脑电信号的关联^[27].

综上, EEG 可以了解大脑内部活动及发生部位提供很好的线索, 也实现了读取部分脑内指令, 从而可以靠“心中所想”来控制一些简单的外部设备. 但是, 由于 EEG 技术是透过头盖骨和头皮组织接收脑电信号, 通常无法收集到脑电信息的详细细节. 相对而言, 侵入式和半侵入式更能实现精确读取大脑的局部信息.

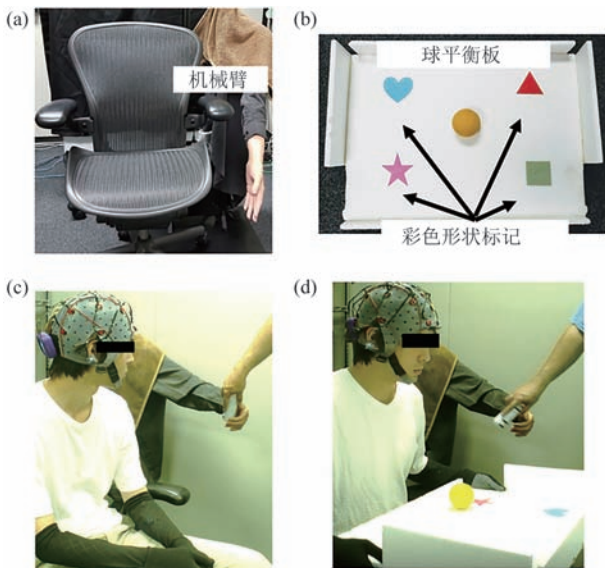


Fig. 4 Experimental setup and paradigm of BMI control of a third arm for multitasking [24]

图4 第三臂多任务BMI控制的实验装置和流程 [24]

(a) 椅子侧面有类人的机械臂。(b) 带有颜色标记的球和平衡板。(c) 单个任务：参与者想象用机械臂抓取或释放瓶子的动作。(d) 多任务：参与者想象抓住瓶子的目标导向动作，同时用自己的双手平衡板上的球。

2.2 侵入式脑机接口

侵入式脑机接口通常需要进行神经外科手术，将微电极直接植入大脑皮层的特定部位，或者大脑深部位置，用于采集和监测脑内特定功能区域的信号。这类技术主要用于临床科研、监测，以及帮助瘫痪患者控制假肢或者实现神经控制虚拟活动等。

随着技术的发展，侵入式脑皮层电极有很多种类。其中，犹他电极 (Utah array) 是一种典型的多通道电极阵列 (图5)。犹他电极具有高密度、高通量、尺寸小、损伤小等优点。现今科学研究主要使用美国 Cyberkinetics 公司研发生产的犹他阵列电极 [28]。

法国蒂莫尔神经科学研究所利用植入的 10×10 犹他阵列电极，同时大量记录两只猕猴在实行抓握任务期间，运动皮层中的电生理数据，用来协助研究运动电生理信号的机制 [29]，图6是此实验的两只猕猴犹他电极植入位置图。

美国巴特尔纪念研究所对植入 96 通道、长度 1.5 mm 犹他电极的受试者进行研究，利用大脑运动皮层的活动来恢复运动感觉功能，让大脑记录的信号经由功能性电刺激 (functional electrical stimulation, FES) 去刺激肌肉收缩 [30]，图7是实

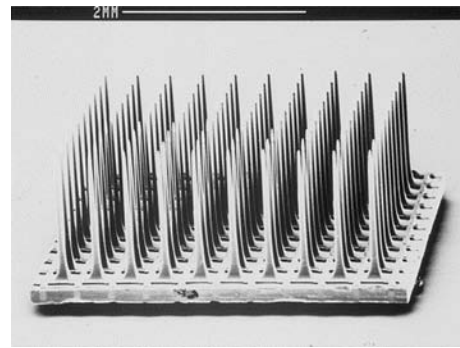


Fig. 5 Utah electrode array [28]

图5 犹他电极阵列 [28]

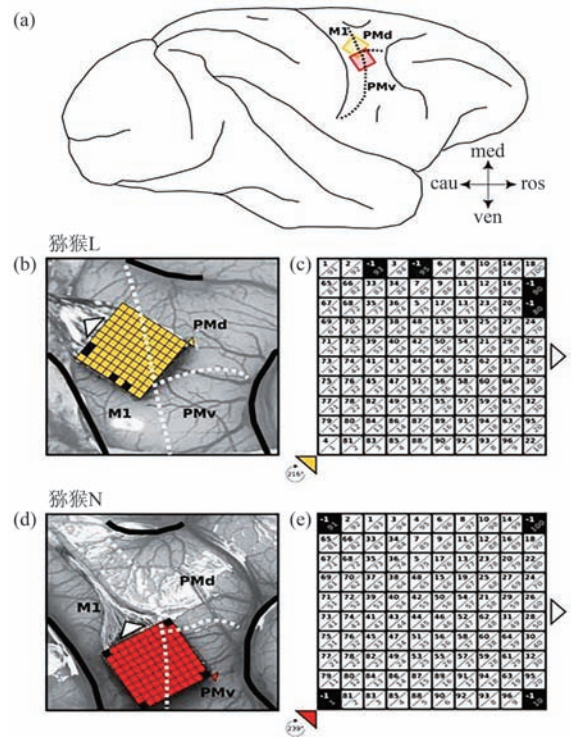


Fig. 6 Implant locations of the Utah arrays and fabrication settings during massively parallel recordings in macaque motor cortex [29]

图6 猕猴运动皮层大规模并行记录实验的犹他电极植入位置图和阵列方案 [29]

(a) 猕猴皮层的示意图以及两只猕猴的阵列植入位置。(b, d) 手术期间拍摄的植入部位特写照片，显示每只猴子的阵列的确切位置。(c, e) 每个阵列方案均显示10×10电极网格，不导电电极以黑色表示。

验流程图。该技术被证明可以帮助瘫痪患者重新获得对肌肉刺激的自主和平稳分级控制，进而能够灵巧地操作精致的物体。

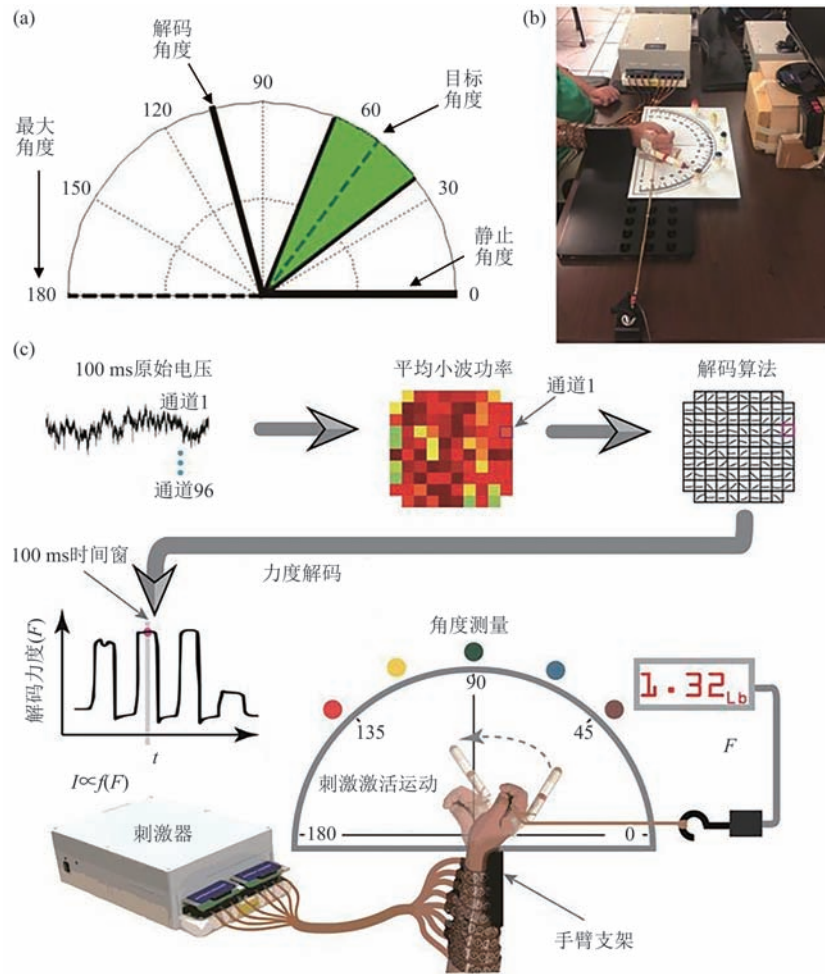


Fig. 7 Decoding graded muscle contraction from intracortical activity to control participant's wrist movement [30]

图7 皮层活动解码肌肉收缩以控制受试者手腕运动 [30]

(a) 用于虚拟分级肌肉收缩实验的示例屏幕. (b) 使用BCI-FES系统进行肌肉收缩实验的照片. (c) 肌肉收缩实验中分级控制的流程图.

埃隆·马斯克 (Elon Musk) 于 2016 年成立的 Neuralink 公司, 旨在通过可植入人脑的设备, 帮助人类与人工智能相结合. 该公司 2019 年发布了他们的新成果: 一种可扩展的高带宽脑机接口系统, 其中包含 3 个主要组件——超细聚合物探针, 神经外科手术机器人和定制的高密度电子设备 [31]. 图 8 是脑机接口系统中传感器部分的封装图.

为了植入微米量级的探针, Neuralink 公司设计出了对应的手术机器人, 可以像缝纫机一样将一根根电极快速而稳定地植入到皮层中, 保证了实验的准确性、安全性和效率. 图 9 是手术机器人手术器件的探针图和长期植入电极的大鼠图.

人们也研制了其他各类能够检测大脑深部神经元活动信号的电极阵列. 比如 Neuropixels 探针, 是目前用最少探针数记录最多神经元电信号的植入电

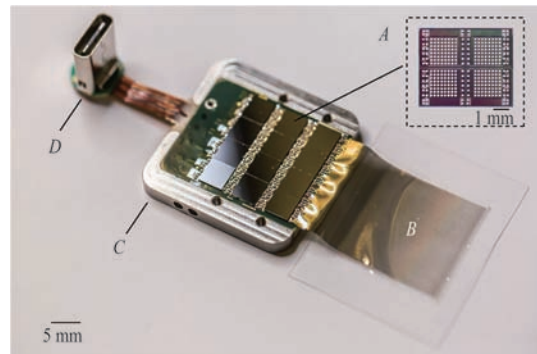


Fig. 8 Package sensor device diagram of the scalable high-bandwidth brain-machine interface system [31]

图8 可扩展高带宽脑机接口的封装传感器设备图 [31]

A: 能够处理256通道数据的单个神经处理专用集成电路, 封装设备包含12个此类芯片, 总共3 072个通道. B: 聚对二甲苯-c基材上的聚合物线. C: 钛制外壳 (盖子已卸下). D: 用于电源和数据的数字USB-C连接器.

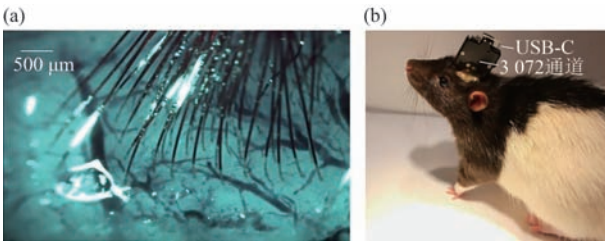


Fig. 9 Micro probes for implantation and long-term implantation [31]

图9 微米级探针植入过程和长期植入 [31]

(a) 手术期间皮质表面植入的探针, 手术机器人保证出血量最少。
(b) 长期植入大鼠体内的包装好的传感器设备。

极技术. 这种电极是一种集信号记录、放大、滤波和数字化于一体的有源神经电极, 肯尼斯组的研究人员用两根这样的探针记录到横跨5个脑区、多达700多个神经元的活动 [32]. 2019年他们组又用八根这样的探针研究小鼠大脑的自发活动, 可同时记录到10 000多个神经元的信息和整个大脑中大约3 000个神经元的活动 [33]. 图10是电极插入图和大规模记录的神经元信息.

总之, 侵入式脑机接口电极具有高精度、高分辨率、高信噪比的优势. 但是, 侵入式的脑机接口存在重大的安全隐患, 因其涉及开颅、将探针植入灰质等操作, 不可避免地会造成一些神经元细胞的坏死, 具有一定的危害性, 所以对人类受试者植入

时往往涉及到伦理问题. 另外, 虽然植入式电极会采集到最高质量的脑电信号, 但随着时间的推移, 其周围易形成瘢痕组织的积聚, 从而导致采集到的信号变弱, 甚至采集不到信号.

美国神经科学家菲利普·肯尼迪曾在20世纪90年代末, 经美国食品及药物管理局的临床批准后通过将特制电极植入一名瘫痪病人的脑内, 成功让这名病人学会了用意识控制电脑光标. 2014年, 肯尼迪又自愿开展一项勇敢的实验: 将3个玻璃-金丝电极到植入自己大脑来试图破解人类语言. 术后两天, 肯尼迪突发下巴不可控颤抖、牙齿互撞等症状, 并且出现语言障碍, 位于电子元件上方的头皮切口也久未愈合. 尽管之后肯尼迪接受了手术恢复, 也只能实现将电极部分取出, 而他的发音问题尚未解决.

肯尼迪实验结果表明, 一旦在脑内植入电极, 有可能造成永久性的脑功能损伤以及相关后遗症, Neuralink的植入电极也存在相同的巨大风险. 然而, 由于目前植入电极阵列的人类案例较少, 还不能从统计上获得明确的风险预估.

2.3 半侵入式脑机接口

鉴于侵入式脑机接口的安全隐患, 除了深脑信号的采集, 研究者对侵入式脑机接口的使用慢慢趋于谨慎. 现在主要使用8×8或16×16的平面电极阵列覆盖大脑皮层表面的方法来进行脑皮层信号采集, 也叫做脑皮层电流描记法 (ECoG), 即半侵入

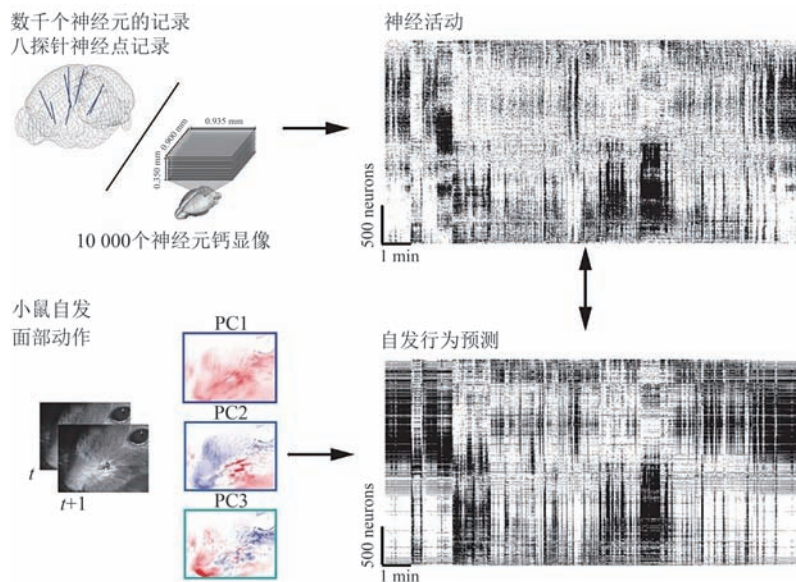


Fig. 10 Large-scale neural population recordings can be predicted from behavior [33]

图10 大规模的神经元记录可以从行为预测 [33]

实验中的电极插入图和小鼠面部动作及对应的神经元信息.

式脑机接口. 半侵入式脑机接口的装置植入颅骨内部, 但置于脑膜外而非灰质内. 脑皮层电图 (ECoG) 测量的信号更清晰, 可以在手术之前、期间或之后进行, 比 EEG 具有更好的精度和灵敏度.

美国纽约州奥尔巴尼市纽约市卫生局在 2008 年利用 ECoG 技术进行了利用人体皮层电信号控制二维光标运动的实验^[34]. 图 11 是实验中 5 名受试者的电极阵列在大脑上位置图. 结果表明, 人们可以利用想象的或实际的与运动任务相关的脑皮层活动来快速实现二维运动控制. 其对控制权的获取远远快于此前对基于 EEG 的 BCI 控制的报道, 这些发现进一步证明 ECoG 可能是 BCI 技术临床应用的强大而实用的替代品.

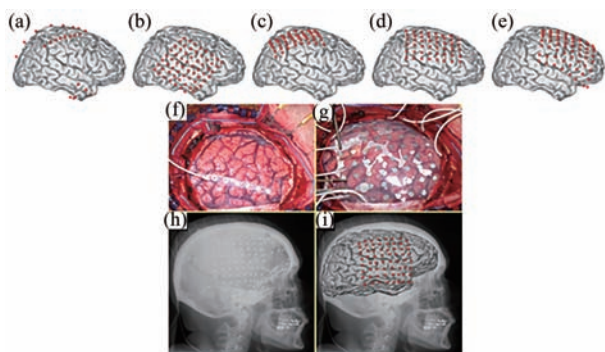


Fig. 11 Electrode locations in the five subjects projected onto a standard brain and ECoG array in situ in the test of using electrocorticographic signals in humans to control two-dimensional movement^[34]

图11 皮层信号控制二维光标运动实验中5名受试者的电极位置投射到标准大脑上和ECoG原位阵列^[34]

(a~e) 5名受试者的电极位置投射到标准大脑上. (f) 开颅手术后大脑暴露. (g) 大脑表面上的8×8电极网格. (h) 横向X射线图像. (i) 平均脑模板和电极位置共同标记到X射线图像.

2019年, Facebook 公布了其在半侵入式脑机接口项目的最新研究成果. 受其赞助的加州大学旧金山分校 (UCSF) 的脑机接口技术研究团队使用高密度脑电图 (ECoG) 录音来检测受试者听到问题大声回答时的脑信号, 对话语发声进行解码^[35]. 图 12 是实验中实时解码语音的示意图. 结果表明, 在交互式对话环境中可以实时解码语音, 这对于无法交流的患者具有重要意义.

ECoG 还可以用在感觉运动皮层的研究上. 感觉运动皮层的大脑活动一直是 BCI 研究的重点, 因为它可以用作控制信号的来源. 荷兰乌得勒支大学

医学中心利用 ECoG 记录下与手部运动有关的神经活动^[36], 也基于 ECoG 记录到的感觉运动皮层活动, 成功区分不同咬合架 (嘴唇、舌头、下巴、喉) 的运动, 以及同一咬合架的不同运动. 实验证明, ECoG 可以精确地对一个咬合架 (舌头) 的不同运动进行分类, 并且可以在非常小的皮质区域 (大约 1 cm²) 中对咬合架运动进行分类^[37]. 该研究结果可促进语音 BCI 的发展, 为重度瘫痪的人们提供一种与肌肉无关的沟通工具.

ECoG 同样可以用在视觉皮层的研究上. 瑞士日内瓦洛桑联邦理工学院神经工程中心神经修复中心和生物工程研究所通过放置在兔子对侧皮质中的 ECoG 阵列 (4×8 阵列和 200 μm 铂电极组成), 去测量受到闪光和电刺激时的视觉皮质电位^[38], 能够进一步研究电刺激在视觉系统中的作用, 从而发展为盲人患者的视觉假体.

运动缺陷是中枢神经系统损伤最令人遗憾的方面之一. 尽管脑机接口发展在肌肉和神经的功能性电刺激方面正在取得进展, 但对于如何使用大脑中的神经信号来控制自身由于瘫痪而不受约束的肢体运动, 则知之甚少. 专注于运动神经修复术的 BCI 旨在恢复瘫痪个体的运动或提供辅助装置, 例如, 个体与电脑或机器人手臂的接口, 以最低限度培训要求实现高水平控制, 这表明了该技术在现实世界应用于运动障碍患者的潜力.

韩国国家研究基金会利用 ECoG 双向预测了非人类灵长类动物的运动^[39]. 图 13 是猴子进行 3 种手臂运动任务并记录其 ECoG 信号图示. 结果证明, 硬膜外 ECoG 信号可提供足够水平的解码精度, 可以延展研究用于人类应用和各种神经修复领域中的单手和双手操作.

乌得勒支大学医学中心 2019 年使用高密度 ECoG 网格解码来自感觉运动皮层的口语音素^[40]. 实验能够在声音发作之前, 通过感觉运动皮层对离散的语音音素进行高性能分类, 电极间隔为 4 mm 或更小, 准确率可以超过 75%. 由此可以进一步开发颅内脑计算机接口系统, 该系统旨在将解码后的语音转换为计算机生成的语音或控制辅助设备的指令.

清醒开颅手术中, 利用 ECoG 对患者皮层直接进行刺激, 可以确认功能区域的定位和保存. 德国慕尼黑工业大学对 16 名患者进行分析, 发现清醒患者的排列熵评分显著高于麻醉下的患者. 因此这个方法是监测整个手术过程中患者意识的可行且合

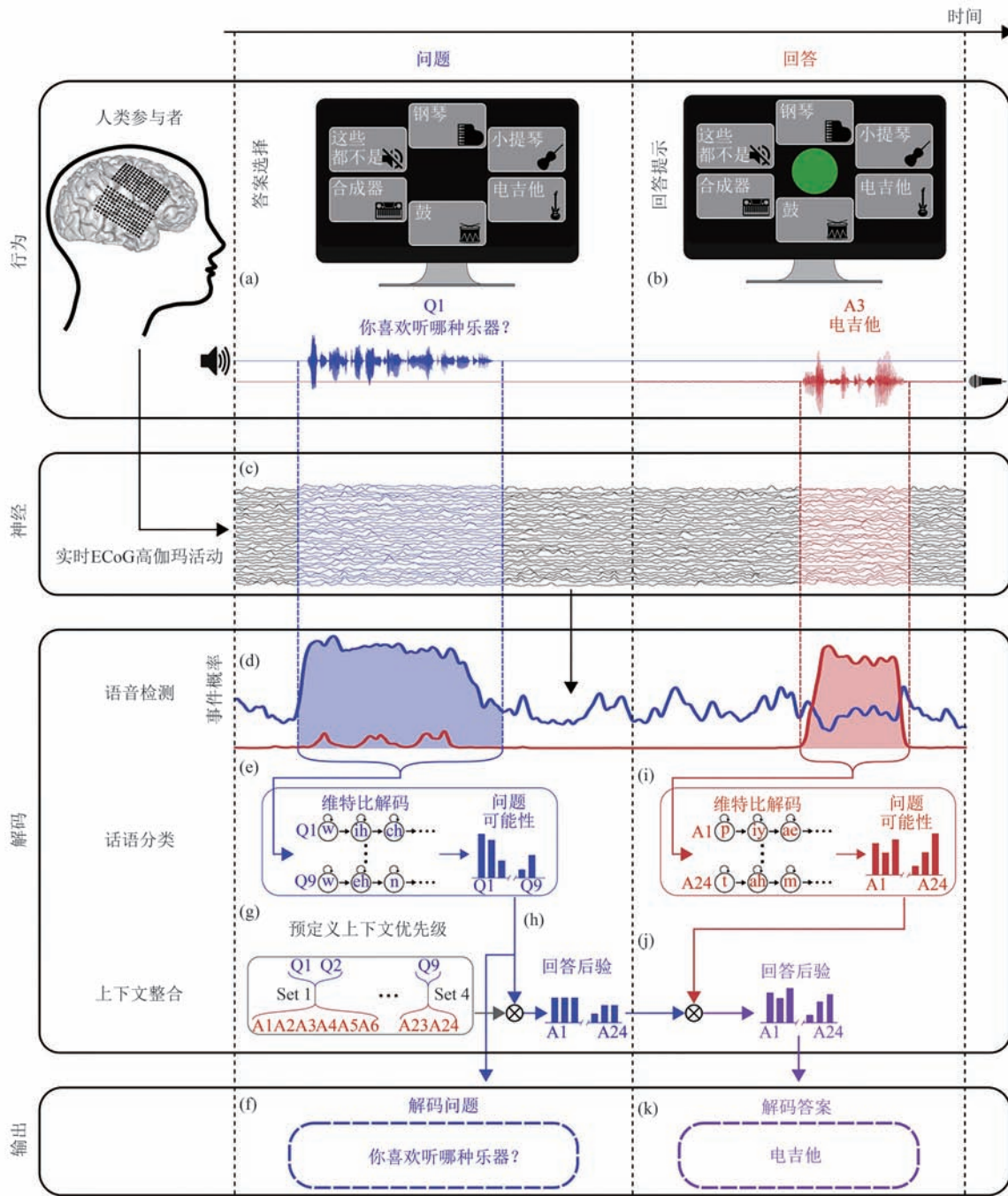


Fig. 12 Schematic of real-time speech decoding during a question (blue) and answer (red) task [35]

图12 问题（蓝色）和答案（红色）任务期间的实时语音解码示意图 [35]

(a) 每个试验中，参与者都会听到一个问题，并在屏幕上看到一组可能的答案选择。(b) 当屏幕上出现绿色的响应提示时，指示参与者自由选择并口头给出答案。(c) 从跨颞叶和额叶皮层植入的ECoG电极获得皮质活性，然后实时过滤以提取出高的 γ 活性。(d) 语音检测模型使用高伽玛活动的时空模式来预测在每个时间点是否听到了问题或没有回答。(e) 当语音检测模型检测到问题事件时，高伽玛活动的时间窗口将传递到问题分类器，该问题分类器使用电话级别的维特比解码来计算问题发声的可能性。(f) 可能性最高的问题将作为解码后的问题输出。(g) 为了整合问题和答案，设计了激励集，以使每个答案仅适用于某些问题（上下文优先）。(h) 将这些上下文先验与预测的问题可能性相结合，以获得答案先验。(i) 当语音检测模型检测到答案事件时，神经活动的时间窗口将传递到答案分类器，该分类器使用电话级别的维特比解码来计算答案发声的可能性。(j) 上下文整合模型将这些答案可能性与答案先验相结合，以得出答案后验概率（紫色）。(k) 具有最高后验概率的答案作为解码后的答案输出。

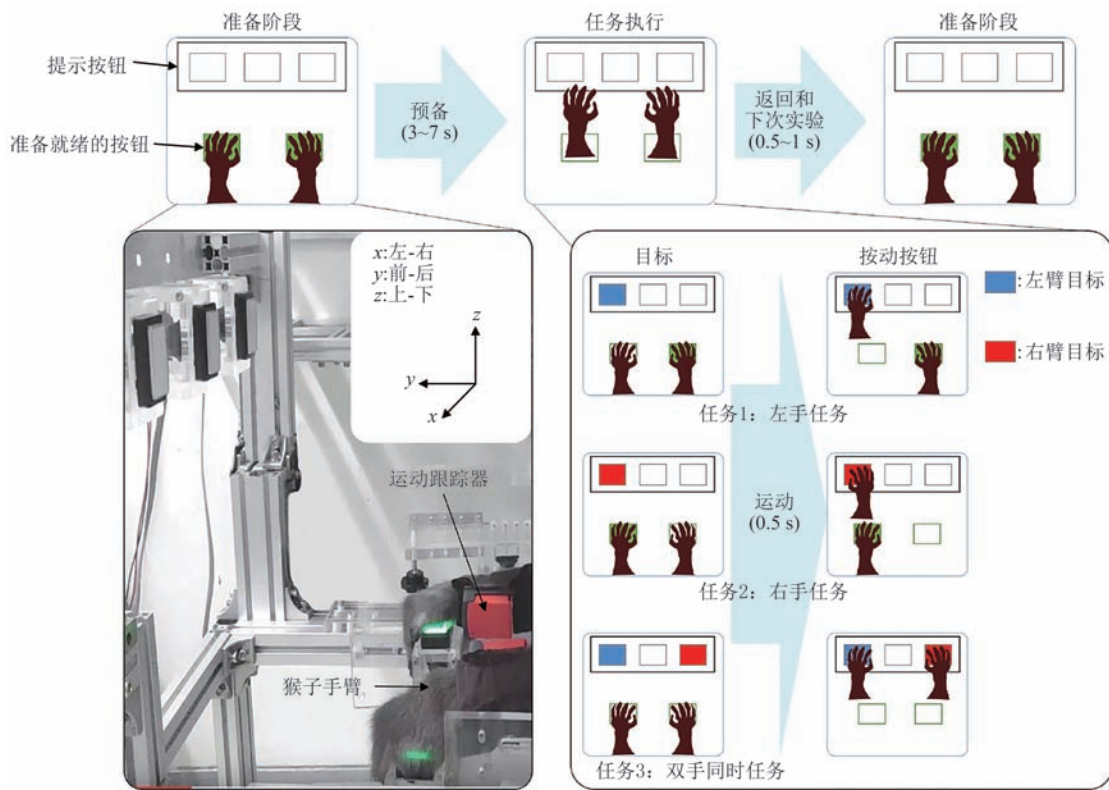


Fig. 13 Experiment protocol and three arm movement tasks of predicting the both arm trajectories by continuously decoding the brain signals from the epidural ECoG [39]

图13 通过连续解码硬膜外ECoG的脑信号预测双臂运动轨迹实验方案和3种手臂运动任务 [39]

猴子坐在椅子上, 记录ECoG信号和手臂运动轨迹, 共有3种类型的手臂运动任务——左手任务、右手任务和双手同时任务, 每个任务都被随机点亮。

适的选择. 它不受患者或肿瘤特异性特征的影响, 并且显示出与以前的脑电图测量结果相同的年龄相关变化 [41].

哈佛大学带来了植入人脑计算机界面的另一种可能: 他们开发了一种“电子网”, 可以通过注射注入脑组织 [42]. 图 14 是可注入电子网的原理图. 通过注射器注射, 从直径小于 100 μm 的针头展开亚微米厚、厘米级大孔网状电子器件, 可以将电子元件注入到人工腔和生物腔中, 也可以注入到致密的凝胶和组织中, 器件的成品率可达 90% 以上. 这种“电子网”可以张开, 从而接触多个神经元, 进行体内多路神经记录, 网状设备很稳定, 可以连续几个月记录单个神经元的电活动。

综上, 半侵入式脑机接口由于避免了颅骨阻碍信号, 并且减少了外部产生的干扰信号, 能够探测到比非侵入性脑机接口更高分辨率的信号, 接收的信息更加清晰. 与此同时, 相较于侵入性脑机接口, 其在大脑颅骨组织中形成瘢痕组织的风险更低, 不会因破坏神经元细胞而造成不可逆的伤害,

并且能够减少伦理方面的制约, 更容易找到受试者. ECoG 是一种非常具有前途的 BCI 模式。

3 向大脑输入信息的脑机接口技术

与脑内信息读取的技术相比, 向脑内输入信息的脑机接口技术的种类和数量则少很多. 常见的脑内信息输入技术包括电磁信号输入 (深脑刺激技术、经颅刺激技术等) 和光学信号输入 (光遗传技术)。

3.1 有创输入信号的脑机接口技术——深脑刺激技术和 ECoG 技术

目前, 广泛应用到临床医疗中的脑内信息输入技术, 主要是深部脑刺激技术 (deep brain stimulation, DBS), 其采用图像引导立体定向技术, 将电极阵列植入到大脑深皮层下的相关神经核团, 通过外置控制器调整刺激参数, 来刺激相关的神经核团, 以达到控制症状, 甚至治疗疾病的目的 [43].

DBS 技术是近年最有应用前景的神经外科治

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/166140222240010103>