

# 皮层微创脑机接口传感器发展现状与趋势\*

白睿钰<sup>1,2</sup> 王炫棋<sup>1,2</sup> 张梓墨<sup>1,2</sup> 吉博文<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学无人系统技术研究院, 西安 710072;

2. 西北工业大学无人飞行器技术全国重点实验室, 西安 710072)

**摘要:**脑机接口(Brain-Computer Interface, BCI)传感器作为脑电信号采集与调控的前端器件,是BCI技术的核心基础部件之一。其中,皮层微创BCI传感器贴附在硬脑膜上或硬脑膜下,未进入脑组织,植入安全性高。此类传感器通常用来采集来自大脑皮质区域(如运动区、视觉区、语言区)的信号,这为许多其他脑功能和一般BCI应用(如皮质康复)开辟了可能性,已成为近年来科研与临床应用的焦点。因此,聚焦皮层微创BCI传感器在商业及科研领域的发展现状,并对未来技术及应用趋势进行分析和展望,能为BCI学术和产业界提供参考和借鉴。

**关键词:**脑机接口;传感器;微创;皮层脑电

**中图分类号:**R318.6

**文献标志码:**A

**引用格式:**白睿钰,王炫棋,张梓墨,等.皮层微创脑机接口传感器发展现状与趋势[J].信息通信技术与政策,2024,50(5):18-25.

**DOI:**10.12267/j.issn.2096-5931.2024.05.003

## 0 引言

脑机接口(Brain-Computer Interface, BCI)技术是生物智能与机器智能相融合的关键技术,是实现智能人机交互高阶形态的关键途径。2023年2月,美国商务部工业与安全局(Bureau of Industry and Security, BIS)公开表示要进一步加大对包括电极在内的BCI技术出口至中国的限制。2024年1月,中国工业和信息化部、教育部、科学技术部等七部门对外发布《关于推动未来产业创新发展的实施意见》<sup>[1]</sup>,指出BCI是具有显著战略性、引领性、颠覆性和不确定性的前瞻性新兴产业。其中,亟需突破脑机融合的核心器件——BCI传感器相关关键技术。BCI传感器作为脑电信号

采集和刺激调控的前端传感器,在神经科学基础研究、运动感知能力损伤修复以及脑疾病诊治方面发挥了重要作用,得到BCI产业联盟的高度重视<sup>[2]</sup>。按照侵入大脑程度的不同,可以将BCI传感器分为无创、微创和有创3类,其中皮层微创脑机接口传感器既能获得高质量皮层脑电图(Electrocorticogram, ECoG)(幅值:0.01~5 mV;响应频率<200 Hz),同时开颅不进脑,可有效降低手术风险,已成为科研向临床应用转化的关键技术方向之一。

电极作为BCI传感器获取信号的关键器件,如何实现高时空分辨率、保形贴附大脑表面以及长期在体安全工作,已成为未来发展必须考虑的要害。“一代材料、一代器件”,材料为电极器件功能实现提供了重要

\* 基金项目:科技创新2030——“脑科学与类脑研究”重大项目(No. 2022ZD0208601、2022ZD0208600);国家自然科学基金项目(No. 62204204);重庆市自然科学基金面上项目(No. cstc2021jcyjmsxmX0825)

基础,而设计和制造是电极器件满足使用要求的重要途径。因此,本文将首先剖析成熟的商业化皮层电极器件的发展情况;接着,分析科研级皮层电极器件的最新进展,并举例说明超柔性、自展开和可降解3种新特性;最后,从技术和应用两个维度,剖析并研判皮层微创BCI传感器的发展趋势。

## 1 商业化皮层电极器件发展现状

目前,商业化皮层电极器件已具备较高的可靠性,全球多个商业化公司开发的硅胶电极已具备临床使用资质,部分公司开发的新型电极正在获取临床使用资质的过程中。2023年10月,美国 Precision Neuroscience 公司宣布,其“第7层大脑皮层”(Layer 7)高密度皮层电极器件获得美国食品药品监督管理局(Food and Drug Administration, FDA)的“突破性医疗器械”认定。这表明新型皮层电极器件正在加快推进商业化进程。下面将从临床和非临床两方面对商业化皮层电极器件的现状进行概述和分析。

### 1.1 临床商业化皮层电极器件

一些大规模皮层电极器件在植入大脑时不直接与神经元接触,造成创伤小,已经被不少公司推向临床应

用,用于半侵入式脑电信号记录,辅助治疗癫痫、瘫痪等疾病。例如美国 PMT、AD-TECH,奥地利 g. tec,法国 DIXI Medical,德国 Inomed 等国际领先企业,已成功研发商业化皮层电极器件产品,并投入临床使用(见图1(a))。此类电极器件通道数可达256导,其封装多采用医用硅橡胶,导电材质则以铂或铂铱合金为主,具有 $\geq 7$ 年的稳定在体工作能力<sup>[3]</sup>。据本文调研,目前国内仅华科精准(北京)医疗科技有限公司(简称“华科精准”)等少数公司能够提供临床商用颅内皮层电极产品(如华科恒生系列),其通道数 $\leq 64$ 导,专用于短期( $\leq 30$  D)癫痫术中和术后监测。成熟的临床商业化皮层电极器件,可用于多类神经疾病患者的颅内脑电信号监测和神经调控,例如在癫痫外科手术中大脑皮层电刺激技术(Electrical Cortex Stimulation, ECS)是一项非常重要的定位技术,它和颅内电极脑电记录定位技术共同组成颅内脑电监测技术。大脑皮层电刺激作为大脑功能区定位的最佳方式,早已成为脑功能定位的金标准<sup>[4]</sup>。

### 1.2 非临床商业化皮层电极器件

另外,随着微型电子机械系统(Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)和激光加工技术等的不断

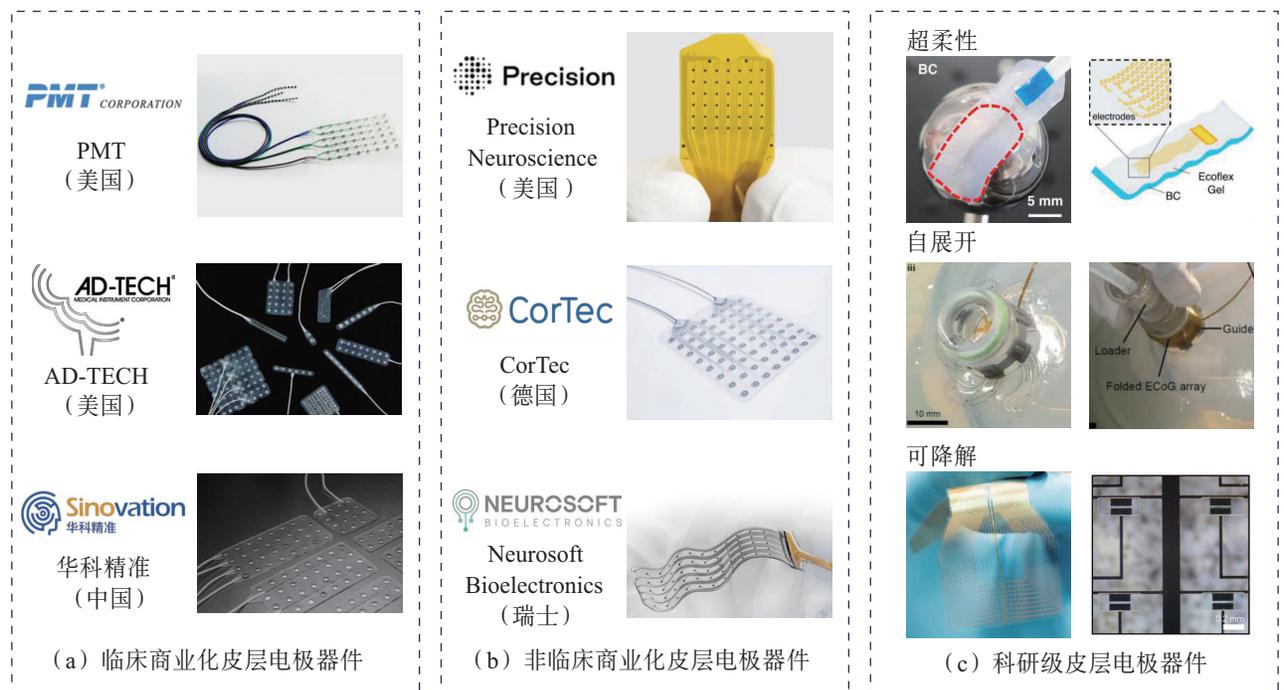


图1 皮层电极器件发展现状

进步,电极尺寸越来越小,具有在亚毫米尺度上记录颅内脑电活动的能力<sup>[5]</sup>。国际上一些新近成立的BCI公司推出了正处于临床验证阶段而未正式投入临床使用的皮层电极器件产品。例如,美国 Precision Neuroscience、德国 Cortec、瑞士 Neurosoft Bioelectronics 等公司已在官网销售系列化皮层电极器件产品(见图 1(b))。美国 Precision Neuroscience 公司的 Layer 7 电极器件最高通道数达 1 024 导,最小电极点尺寸为 20  $\mu\text{m}$ ,封装和导电材料分别采用聚酰亚胺聚合物薄膜和金/铂等贵金属。2023 年 6 月,该电极器件被暂时放置在接受脑肿瘤切除术的多名患者的大脑皮层上开展研究,目前尚未对外销售。德国 CorTec 公司通过超短脉冲飞秒激光微加工技术,研制了基于医用硅橡胶和铂铱合金的皮层微电极 Airray 系列,人体植入时间 $\leq 30$  D,最小可加工电极点尺寸为 40  $\mu\text{m}$ ,单个器件通道数 $\leq 32$ ,导线采用电阻焊完成一对一连接,连接过程比较费时费力。瑞士 Neurosoft Bioelectronics 公司在硅胶上沉积图形化金属或刮涂导电浆料,并与柔性印刷线路板(Printed Circuit Board, PCB)导线进行一次性整体图形化接口焊接和硅胶封装,使得电极器件具有良好的软性,可以折叠贴附在大脑沟回中,通道数 $\leq 64$ ,最小可加工电极点尺寸约 100  $\mu\text{m}$ 。该公司电极器件的可靠性尚未得到验证,距离临床使用还有较大差距,暂处于商业起步阶段。目前,国内非临床商业化皮层电极器件较少,代表企业有上海脑虎科技有限公司、科斗(苏州)脑机科技有限公司等,均尚未获得临床使用资质。空间分辨率是皮层微电极器件的优势,而如何打破高密度需求下的材料生物相容性瓶颈,获得食品药品监管单位的医疗器械认证,是植入式皮层电极器件必须直面的问题。

## 2 科研级皮层电极器件发展现状

除了商业化皮层电极器件,国内外多个 BCI 课题组也在实验室开发了各类新型皮层电极器件。这些电极器件形式新颖,采用新材料且设计与制造过程不尽相同,具有超柔性、自展开、可降解、可延展、高通量、高透明、多模态、核磁兼容等特性,以大小鼠、兔、猪、猴为实验对象,为未来商业化皮层电极器件发展提供了重要思路。下面对科研级皮层电极器件的 3 类代表特性进行详细介绍(见图 1(c))。

### 2.1 代表特性一:超柔性

皮层微电极器件常使用聚酰亚胺、聚对二甲苯等柔性聚合物材料(杨氏模量约 2~4 GPa)作为衬底,但自身不具有延展变形能力,难以适配皮层组织曲面,因此近年来一些研究者开始采用更加柔软、服帖的材料,如硅胶、水凝胶等,逐步形成从追求“薄”到“软”的转变。例如,2023 年,西北工业大学吉博文教授课题组采用生物相容性材料细菌纤维素薄膜作为电极基底(吸水后杨氏模量仅 120 kPa),并与分形离散的聚对二甲苯衬底柔性电极相结合,开发了同时具有超柔性和高保湿性的皮层电极器件“脑膜”<sup>[6]</sup>。该“脑膜”可以与任意大脑沟回形成紧密贴附界面,适应软脑组织因为呼吸、运动、血管搏动造成的微变形,无论是在急性还是慢性植入过程中,均表现出优异的信号采集能力。

### 2.2 代表特性二:自展开

传统皮层电极器件需要在进行开颅手术后,将其覆盖在颅脑开窗处,这使手术开颅窗大小至少与皮层电极器件尺寸相当,导致手术创口较大,术后出现并发症的概率升高。为了解决开颅创口尺寸大这一难题,有研究者创新性地提出了植入后能够自动展开的皮层电极器件。例如,2023 年,瑞士洛桑联邦理工大学 Stephanie Lacour 教授课题组从软体机器人学中获得灵感,使电极器件中每个螺旋形的手指在敏感的脑组织上依次轻轻展开<sup>[7]</sup>。彼时,电极阵列看起来像橡胶手套,每个螺旋形手指的一侧有柔性电极图案。贴附在大脑上的“橡胶手套”从内向外翻转,并被折叠在圆柱形装载器内,为了部署,液体被注入到每个倒置的手指中,当电极阵列在大脑上展开时会将倒置的手指旋转并贴附在大脑上。该可展开电极阵列已在小型猪身上成功地进行了测试,未来将通过 Neurosoft Bioelectronics 公司开展临床技术转化。

### 2.3 代表特性三:可降解

在一些仅需短时准确记录皮层脑电信号的应用场景中,使用方往往希望任务完成后电极器件能够自主降解,以避免二次移除手术给患者带来的潜在伤害。可除传统电极外,负责采集脑电信号的还有晶体管,主要包括有机晶体管和硅基晶体管两类。其中,有机晶体管作为皮层脑电传感器,通道与电解液直接接触,可以同时传导离子电流和电子电流,能实现约 1 ms 的高跨导以及约 1 kHz 的快速响应速度,因此可以有效提

升信噪比,减少电极与脑组织的电学阻抗失配现象。例如,2023年,香港城市大学于欣格、电子科技大学于军胜和复旦大学宋恩名组成研究团队,联合开发出一种以聚乳酸-羟基乙酸共聚物为基底的新型生物可降解、超薄、轻质、柔性、高通量有机电化学晶体管神经接口<sup>[8]</sup>,具有1.42 ms和20 μm的高时空分辨率,信噪比高达37 dB,可连续高保真映射神经信号和在执行功能后实现生物安全、主动降解,并在各种条件下(如麻醉、癫痫发作、电刺激等)对大鼠脑皮层表面电活动成功地进行实时监测、验证。

综上所述,科研级皮层电极器件在材料、结构、工艺方面取得了创新,但距离形成商业化产品仍有一定距离,需要经历更多的测试、检验、优化、迭代过程。科研级皮层电极器件往往止步于论文,不是局限于技术可行性,而是由于产品化需要投入大量资金和人员,需对产品成本和质量进行严格把关,并对应用市场需求进行充分调研,这也是科研级BCI器件落地成为商业化BCI产品需要考虑的现实问题。

### 3 皮层微创BCI传感器的技术趋势

根据商业化皮层电极器件及科研级皮层电极器件的上述发展现状,对皮层微创BCI传感器的发展规律进行综合分析,可以判断其未来技术发展将主要聚焦于如何实现更高通量、更软界面和更长寿命3个方

面<sup>[5]</sup>(见图2)。在高通量方面,未来上百乃至上千通道商业化皮层电极器件的大规模普及将助力神经科学研究对大脑功能和疾病模型有更加深刻的认识。在软界面方面,具有优异稳定性、机械强度、生物相容性、安全性和易于图形化等特点的软材料应用于皮层电极器件,能从根本上赋予其超柔性,有效解决器件与组织的力学失配难题。在长寿命方面,植入式BCI传感器属于第三类医疗器械,审批受到药监部门严格监管,其长期在体可靠工作的能力是重中之重。下面将对上述三方面技术趋势作详细分析。

#### 3.1 发展趋势一:高通量

自20世纪60年代起,BCI电极器件通道数大约每70个月翻一番,发展速度远远落后于集成电路。当前,最先进的商业化皮层电极器件最高通道数仅为1 024导,主流的临床商用皮层电极器件最高通道数一般不超过64导,二者之间数量级的鸿沟主要产生于器件阵列的电极位点尺寸和间距差异。站在神经科学高级研究工具的角度,高密度微型皮层电极器件被越来越多的研究人员所重视。然而,在实际使用过程中,在最基本的区域使用通道数量有限且电极间距离最佳的电极器件就足以提供高解码性能,并非通道数量越多越好。相对于电极器件通道数量的增加,更大的挑战是高通量电极器件与电路部分如何可靠连接,大量神经信号如何实现高保真放大滤波和模数转换,高通量数据

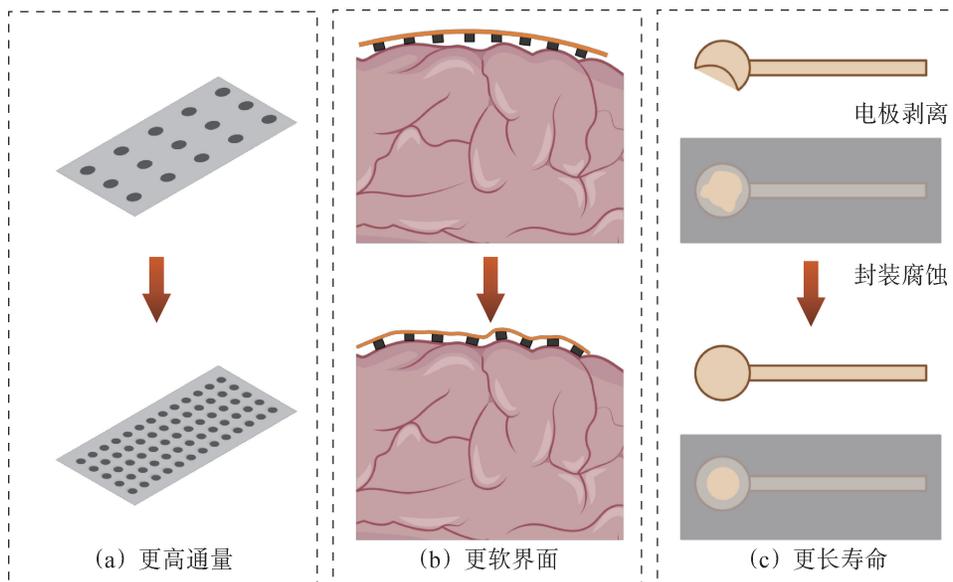


图2 皮层微创脑机接口传感器的技术发展趋势

如何进行算法处理,以及由此带来的传输、供电等问题。

### 3.2 发展趋势二:软界面

脑组织的杨氏模量仅 0.4~15 kPa,柔性聚合物衬底不具有可延展变形能力,无法很好地适应脑组织微动变形,力学匹配性一般,且常常为了获得更好的保形能力而牺牲厚度,几微米厚度易起皱导致操作困难,且容易破损。因此,越来越多的研究者将弹性硅胶(杨氏模量百千帕至兆帕)和超柔性水凝胶(杨氏模量几千帕至兆帕)作为电极器件基底,其厚度一般在百微米至几毫米之间。超柔性水凝胶是含水量高的三维网状材料,具有与软组织类似的结构,通过分子设计,超柔性水凝胶可达到与脑组织接近的力学性能及生物学性能,可以最大程度地减少组织—电极界面的力学失配,比弹性硅胶更具优势,但同时其精细化微纳加工难度更大,防水封装能力也严重不足。可见,软界面的形成更多依赖于材料本身属性,能够保证电极器件在脑组织表面更稳定地工作。

### 3.3 发展趋势三:长寿命

皮层电极器件最常见的结构是由两层薄膜绝缘层和一层导电层组成的“三明治”结构,其中异质材料界面失效机制和调控方法是决定其服役寿命的核心问题。皮层电极器件植入的生物环境十分复杂:一方面炎症反应会恶化环境;另一方面,自身必须具备抵御腐蚀、分层、溶胀、溶解、机械应变和持续电刺激的能力<sup>[9]</sup>。皮层电极器件入体内后的失效模式主要有两种:一是电极内在工程失效,二是生物环境变化诱发失效。失效原因主要来自三方面:一是金属表面由电化学反应引起的腐蚀和应变,二是层间粘附力下降导致分层,三是绝缘层因针孔或渗水失效。可见,提高皮层电极器件异质材料界面的可靠性,是提升其在体工作寿命上限的必由之路。

## 4 皮层微创 BCI 传感器的应用趋势

目前的皮层 BCI 设备通常用来采集来自大脑皮质区域(如运动区、视觉区、语言区)的信号,这为许多其他脑功能和一般 BCI 应用开辟了可能性。下面列举、分析皮层微创 BCI 传感器在癫痫监测、脑控外骨骼、语言解码、视觉恢复、行走恢复 5 类典型场景中的应用(见图 3)。

### 4.1 癫痫监测

癫痫是一种由大脑神经元异常放电引发的慢性疾

病。据世界卫生组织公开的数据,全球每年新增癫痫患者数约 500 万。癫痫已成为神经领域的第二大常见病。针对难治性癫痫,采用基于闭环理念的 BCI 神经刺激器,能够同时进行电生理诊断与电刺激治疗。该器件通过在颅内植入脉冲发生器、多触点电极实时监测并识别癫痫特征脑电波,并于癫痫发作前或初发时自动触发精准电刺激以抑制异常脑电活动,实现“脑—机—脑”闭环诊治(见图 3(a))。2021 年,杭州佳量医疗科技有限公司已成功完成国内首例自主研发闭环 BCI 神经刺激系统 III 期临床植入手术,该系统的成功植入标志着 BCI 技术在难治性癫痫上取得了重要突破,其中皮层电极器件主要起到了采集信号并预判癫痫发作的作用。

### 4.2 脑控外骨骼

脑卒中(即中风)是现存致残率第三高的疾病,且 50% 以上的幸存者患有严重的后遗症。这类患者患侧肢体失去主动运动能力,必须借助外力才能被动运动。脑控外骨骼可以根据用户的中枢神经信号,解析多种运动意图,从而辅助中风患者构建新的运动神经通路。BCI 技术与外骨骼系统的结合,为中风患者恢复肢体运动功能提供了全新的手段。2019 年,法国格勒诺布尔大学 Alim Louis Benabid 科研团队报道了一种用于四肢瘫痪患者外骨骼长期稳定双手控制的自适应闭环 ECoG 解码器<sup>[10]</sup>(见图 3(b))该科研团队通过开颅手术将两个具有 64 个电极阵列的可植入无线记录系统(WIMAGINE)置于患者运动皮层上方的颅骨中,用于记录 ECoG 信号。WIMAGINE 能够解码并实时更新运动皮层神经信号,以闭环的方式响应患者的运动意图,从而帮助患者操控外骨骼、跟随运动意图进行辅助康复训练。2023 年,清华大学洪波教授团队、博睿康科技(常州)股份有限公司联合开发的无线微创 BCI 系统 NEO 进入临床试验阶段,两位高位截瘫患者分别通过该系统实现了意念控制光标移动、意念控制数据手套外骨骼持握。其中,皮层电极器件放置在硬膜外,造成创伤小,不会破坏大脑神经组织。

### 4.3 语言解码

语言是人类特有的高级认知功能,是人类交流的重要工具。脑脊髓外伤、脑肿瘤、脑卒中、渐冻症等各类脑疾病可使患者丧失语言表达能力,造成严重的语言功能障碍,严重影响患者的生活质量,给社会和家庭

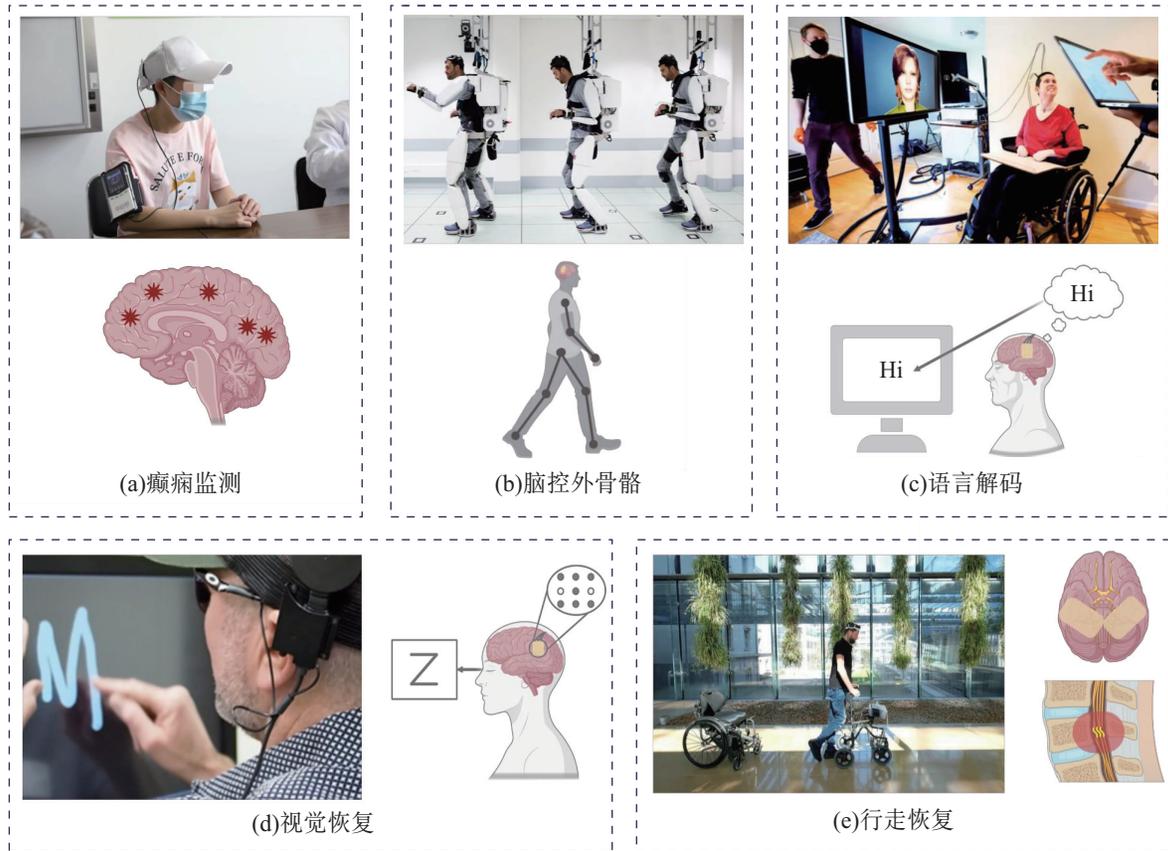


图3 皮层微创脑机接口传感器典型应用场景

造成负担。语言解码类 BCI 技术能够将神经活动直接转换为语音信号,对因神经功能障碍而无法正常交流的群体具有革命性的意义。2023 年,美国加州大学旧金山分校 Edward Chang 科研团队将 253 通道高密度 ECoG 电极器件放置在中风瘫痪且语言不清楚患者与口面部运动相关的大脑皮层区域,成功地将患者的大脑信号输出为文本、音频、面部表情<sup>[11]</sup>。在递归神经网络和语言模型的帮助下,该电极器件能以平均每分钟 78 个单词的速度进行解码,对 1 024 个单词的解码错误率为 25.5%。此外,患者能通过数字化身和模拟面部动作的软件“说话”,依托数字化身表达微笑、皱眉、惊讶等面部表情(见图 3(c))。

#### 4.4 视觉恢复

对盲人来说,重见光明是遥不可及的梦想。尽管在“仿生眼”成为现实之前,仍有若干技术障碍有待克服,但近期的一些科学研究已经给人类带来了希望,即 BCI 技术有朝一日可能为全世界的视力障碍者带来有

用的视觉功能。2020 年,美国贝勒医学院 Daniel Yoshor 教授带领的研究团队越过眼睛,直接将视觉信息从相机传递到植入大脑的皮层电极器件上,通过动态电流刺激大脑皮层,成功地在受试者脑海中呈现指定的图像,使其能够把刺激正确地识别为特定字母<sup>[12]</sup>(见图 3(d))。此后,研究人员改进了传统电极器件,将电流转向和动态刺激相结合,通过精准的电流控制,依次激活不同的电极位点,从而使患者能够在大脑中对图片轮廓进行绘制。尽管这项技术仍处于早期阶段,但被植入的皮层电极设备有望在未来对大脑进行多重刺激,并在一定程度上恢复人体视力。

#### 4.5 行走恢复

脊髓损伤会破坏大脑与控制行走的脊髓区域之间的通信,导致瘫痪。脑脊髓接口(Brain-Spine Interface, BSI)可以在大脑和脊髓间建立数字化连接,使患者可以通过意志来控制肌肉活动时间和幅度,更好地恢复对站立和行走的自然控制。2023 年,瑞士洛桑联邦邦理

工学院 Grégoire Courtine 及其同事研究的脑脊髓接口成功地帮助受试者实现了自然站立和直立行走,且使之在关闭植入设备后,仍能在拐杖的辅助下行走<sup>[13]</sup>(见图 3(e))。该接口由一个植入的记录和刺激系统组成,可以无限、实时地记录腰骶脊髓对应的皮质活动,并对腰骶脊髓进行电刺激,其中皮层电极器件由 64 个电极(8×8 网格)组成,主要植入在感觉运动皮层区域。未来,脑脊髓接口能够在大脑和脊髓间构建“数字桥梁”,为更多瘫痪患者恢复行动能力提供可能。

## 5 结束语

BCI 是具有显著战略性、引领性、颠覆性和不确定性的前瞻性新兴产业,需突破脑机融合关键技术和核心器件,需探索在医疗康复、无人驾驶、虚拟现实等领域的应用,加快形成新质生产力。本文结合国内外最新案例,从发展现状、未来技术与应用趋势两方面,对皮层微创 BCI 传感器进行了概述和分析。皮层电极器件记录的脑电信号质量虽然不及全植入式电极器件,但相比非植入式头皮脑电信号质量要好很多,近年来在多种医疗应用场景中已展现出巨大潜力,为患者恢复运动、语言、视觉等能力提供了无限可能,将作为关键底层硬件技术满足脑科学研究与脑疾病诊治的需要。

### 参考文献

- [1] 工业和信息化部,教育部,科学技术部,等. 关于推动未来产业创新发展的实施意见[Z], 2024.
- [2] 中国信息通信研究院,脑机接口产业联盟. 脑机接口技术发展与应用研究报告(2023年)[R], 2023.
- [3] RAO V R. Chronic electroencephalography in epilepsy with a responsive neurostimulation device: current status and future prospects [J]. *Expert Review of Medical Devices*, 2021, 18(11):1093-1105.
- [4] BORCHERS S, HIMMELBACH M, LOGOTHETIS N, et al. Direct electrical stimulation of human cortex: the gold standard for mapping brain functions? [J]. *Nature Reviews Neuroscience*, 2012, 13(1):63-70.
- [5] 吉博文,王明浩,周宇昊,等. 植入式柔性神经微电极最新进展[J]. *微纳电子与智能制造*, 2022, 4(3):8-18.
- [6] JI B, SUN F, GUO J, et al. Brainmask: an ultrasoft and moist micro-electrocorticography electrode for accurate positioning and long-lasting recordings [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2023, 9(1):126.
- [7] SONG S, FALLEGGGER F, TROUILLET A, et al. Deployment of an electrocorticography system with a soft robotic actuator [J]. *Science Robotics*, 2023, 8(78):eadd1002.
- [8] WU M, YAO K, HUANG N, et al. Ultrathin, soft, bioresorbable organic electrochemical transistors for transient spatiotemporal mapping of brain activity [J]. *Advanced Science*, 2023, 10(14):2300504.
- [9] WELLMAN S M, ELES J R, LUDWIG K A, et al. A materials roadmap to functional neural interface design [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(12):1701269.
- [10] BENABID A L, COSTECALDE T, ELISEYEV A, et al. An exoskeleton controlled by an epidural wireless brain-machine interface in a tetraplegic patient: a proof-of-concept demonstration [J]. *The Lancet Neurology*, 2019, 18(12):1112-1122.
- [11] METZGER S L, LITTLEJOHN K T, SILVA A B, et al. A high-performance neuroprosthesis for speech decoding and avatar control [J]. *Nature*, 2023, 620(7976):1037-1046.
- [12] BEAUCHAMP M S, OSWALT D, SUN P, et al. Dynamic stimulation of visual cortex produces form vision in sighted and blind humans [J]. *Cell*, 2020, 181(4):774-783.
- [13] LORACH H, GALVEZ A, SPAGNOLO V, et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain-spine interface [J]. *Nature*, 2023, 618(7963):126-133.

### 作者简介:

- 白睿钰** 西北工业大学无人系统技术研究院、西北工业大学无人飞行器技术全国重点实验室硕士研究生在读,主要研究方向为脑机接口 MEMS 传感器设计与制造
- 王炫棋** 西北工业大学无人系统技术研究院、西北工业大学无人飞行器技术全国重点实验室博士研究生在读,主要研究方向为神经接口传感器
- 张梓墨** 西北工业大学无人系统技术研究院、西北工

业大学无人飞行器技术全国重点实验室硕士研究生在读, 主要研究方向为脑机接口 MEMS 传感器制造与应用  
吉博文 西北工业大学无人系统技术研究院、西北工业大学无人飞行器技术全国重点实验室副教

授、博士生导师、院长助理, 西北工业大学三航脑科学与脑技术研究中心核心骨干, 中国信息通信研究院脑机接口产业联盟专家, 长期从事可植入脑机接口器件、可穿戴柔性电子器件等研究工作

## Development status and trends of minimally invasive cortical brain-computer interface sensors

BAI Ruiyu<sup>1,2</sup>, WANG Xuanqi<sup>1,2</sup>, ZHANG Zimo<sup>1,2</sup>, JI Bowen<sup>1,2</sup>

- (1. Institute of Unmanned System Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2. National Key Laboratory of Unmanned Aerial Vehicle Technology, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** As a vital element in brain-computer interface (BCI) technology, sensors serve as the front devices for electroencephalogram acquisition and regulation. Among them, the minimally invasive cortical BCI sensors can attach epidurally or subdurally without penetrating into the brain tissue, ensuring the safe implantation. These sensors are typically employed to collect signals from specific cortical areas including movement, vision, and language, which open up possibilities for various brain functions and general applications like cortical rehabilitation, as well as the focus of scientific research and clinical application. Therefore, focusing on the current development status of minimally invasive BCI sensors in both business and research domains, and analyzing and looking forward to future technologies and application trends, can provide reference and inspiration for the academic and industrial fields of BCI.

**Keywords:** brain-computer interface; sensors; minimal invasion; cortical electroencephalogram

(收稿日期:2024-04-07)