

DOI: 10.19816/j.cnki.10-1594/tn.2022.03.005

脑机接口技术现状与发展

——采访中国科学院半导体研究所王毅军研究员

张莹^{1,2}, 张柏雯^{1,2}

(1.北京市科学技术研究院信息与人工智能技术研究所 北京 100089; 2.《微纳电子与智能制造》编辑部 北京 100089)

编者按:脑机接口技术的发展实现了智能设备与人类多领域的沟通,已成为脑科学中重要的探索方向之一。在“中国脑计划”等一系列战略政策推动下,中国学者在脑机接口领域取得了令人瞩目的进展,逐步从单纯的科研学术探索走向应用转化落地。研制出高效、准确、稳定、安全和易用的核心技术,并深入至康复训练、生产制造、智能生活、教育娱乐等多个方面,是脑机接口技术发展的愿景目标。我国学者们在范式编解码、采集电极材料工艺等多个方面,研发水平已达到国际先进。在今后一段时期,脑机接口技术有望从技术上引发以人工智能为代表的革新,从应用场景中产生显著的社会效益,推动用前沿科技提高人类生活质量的进程。《微纳电子与智能制造》有幸采访到中国科学院半导体研究所王毅军研究员,为读者讲述脑机接口技术的前沿研究现状和未来发展展望。

关键词:脑机接口;稳态视觉诱发电位;芯片;半导体电极

中图分类号:R318 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**310

王毅军,中国科学院半导体研究所研究员,博士生导师,2015年入选国家高层次人才计划青年项目,2021年入选北京脑科学与类脑研究中心“北脑学者”。分别于2001年和2007年在清华大学获得生物医学工程学士和博士学位。2008年至2015年在美国加州大学圣迭戈分校神经计算研究所先后任博士后研究员和助理项目科学家。长期从事神经工程和计算神经科学的研究,研究兴趣包括脑机接口、生物医学信号处理和机器学习。发表SCI论文110余篇,谷歌学术引用>10 000次。获IEEE EMBS最佳论文奖、IOP中国高被引论文奖。开发的视觉诱发电位脑机接口长期保持世界最高信息传输速率。

《微纳电子与智能制造》:您和您的研究团队多年从事稳态视觉诱发电位(SSVEP)的研究,取得了令人瞩目的成绩。目前这项范式在世界上研究达到怎样的程度?您和您团队最近的研究方向主要是针对哪些问题而展开?

王毅军:SSVEP是无创脑机接口三大范式之一,最初是由清华大学高上凯和高小榕教授团队提出的,至今在国内已有20多年的发展,目前在传输速率、识别准确率等方面均处于国际领先水平。与所有脑机接口范式一样,SSVEP研究的终极目标也



是实现新一代人机交互技术,因此研究目标主要是围绕如何实现高速有效的信息传输而展开。从技术上实现这一目标主要有3个衡量指标:识别速度、指令数、识别准确率。目前,我们课题组的SSVEP范式的识别速度可达到15个英文单词/分钟,或者20个中文文字/分钟。这个速率在国际上处于领先地位,并且与有创脑机接口技术水平相当。指

令数是评价 SSVEP 范式是否能用于实际场景的关键因素,一个脑机接口系统如果指令数足够高,相应的传输速度也会加快。系统传输速率的理论估值取决于带宽和信噪比,目前我们的 SSVEP 范式识别速率与理论上限还有一定差距,希望在未来 5 年中,识别的指令数能突破 1 000 种以上,不止用于字符输入,还能实现画曲线、光标追踪等功能。

《微纳电子与智能制造》:SSVEP 具体的应用场景有哪些?结合实际的技术应用落地,您认为目前 SSVEP 领域的研究还需要有哪些方面的提升?

王毅军:SSVEP 可帮助残障人士实现高速文字输入、自然场景的视觉目标选择,及用于一些娱乐游戏场景中。如何更快更准地解码神经信号是用于实际的关键。这依赖于神经科学对大脑工作机制的了解,目前已有的解码技术十分有限,还需要未来融合神经机制、智能算法等多个方面,并结合合适的编码技术对其继续进行深入的研究。编码问题的解决要依靠无线通讯及调制解调等多个技术综合,每个指令都对应着一个独特的编码序列。此外,实际应用还要解决的问题是用户体验,例如如何实现无闪烁感的交互,如何研制出便携式脑电采集设备等。

《微纳电子与智能制造》:非植入式和植入式是脑机接口的两大研究方向,本期专刊大部分文章也来自于这两个方向,如植入式脑机接口方面的柔性电极、柔性微针阵列干电极技术,在非植入式脑机接口方面,有运动想象、P300 范式的研究或综述。这两种脑接口类型的优势和劣势各是什么?您对它们各自的发展方向有怎样的预测?

王毅军:非植入式脑机接口采用的头皮脑电信号带宽窄,信噪比较低,但是由于成本较低、无创,普通用户的接受程度较高。非植入式脑机接口主要有 SSVEP、运动想象和 P300 范式三个研究方向。相对于 P300 与 SSVEP,运动想象识别的指令少,被试者需要一定的训练才能完成,所以更适用于残障人士康复训练。植入式脑机接口,也称为有创脑机接口,多数依靠几百甚至几千通道的电极阵列,电极需要贴在大脑皮层表面或者植入大脑内部。这种方式的优点是可以直接记录神经元活动,信号信噪比高、带宽较宽,解码精度高,能解码更复杂的大脑活动。但是在实际临床应用时,也有一定的局限性,如有创伤和感染风险,长期来看,还存在生物相容性和信号稳定性等问题。从应用的角度,存在成本比较高,实用性较低的问题。目前植入式脑机接口多用于残疾人辅助和癫痫等精神疾病治疗。

《微纳电子与智能制造》:无论是脑电技术的分析,还是半导体电极的发展,都离不开芯片的应用。目前我国芯片技术受到美国限制,特别是脑机接口领域,目前国内芯片厂商能否支持脑机接口的相关研究?国内芯片技术是否能跟上脑机接口产业化或商业化的发展?会出现“卡脖子”现象吗?

王毅军:2018 年美国商务部拟“禁运脑机接口技术”,2021 年又再次重申。不少脑机接口技术都是军民两用,所以在这种大环境下的限制更加凸显。但是由于脑机接口技术发展时间较短,许多技术尚处在研究初期,因此算法技术的管控和限制还不是太明显。但是我们也必须关注到国内在脑电采集硬件涉及到的高精度 ADC 等芯片技术方面与美国还有较大差距。自 2018 年后,国内开始布局相应的应对策略,目前在非侵入式脑机接口方面,已经有几家公司研制出了性能相当的采集芯片。此外,值得我们注意的是一些脑机接口系统中涉及的算法软件平台一旦被管控,短时间内我们很难制定出有效的应对措施。无创式脑机接口这个领域目前对大数据的依赖性不强,在数据这一部分,国内可以通过自采数据开展研究。例如每年我们都会将世界机器人大赛的脑控机器人比赛采集并公开较大样本的脑电数据用于研究。

《微纳电子与智能制造》:与脑机接口相关的半导体电极,是中科院半导体所最具代表性的研究成果之一。硬质电极和柔性电极在脑机接口领域擅长的应用场景分别是哪些?这几年半导体所在无创电极中有哪些成果?

王毅军:植入与非植入脑机接口的电极都可以分为硬质电极与柔性电极。在植入式脑机接口电极发展的早期,基本是以金属丝为主的传统硬质电极,这种电极的优势是植入方便,一般由几百个通道构成,但是生物相容性差,随时间推移,记录到的信号越来越少。近些年发展的柔性电极,由于创伤小,采集生物信号信噪比高,电极的杨氏模量与人类脑组织更加匹配,得到了广泛的应用。面临的主要问题是如何在大脑的电解质环境下,保持电极的稳定性,这对推动植入式脑机接口应用尤为重要。最近的热点新闻,马斯克的 Neuralink 公司研制的植入式脑机接口也只是局限在动物实验,美国食品药品监督管理局(FDA)尚未批准此类技术在人体实验中的应用。非植入式脑机接口电极的研制主要考虑舒适度与信号质量的问题,硬质干电极在脑电帽中需要较大压力固定,用户体验低。柔性材料抗运动干扰能

力更强,与皮肤更贴合,运动噪声更低,所以更适用于运动场景。半导体所这几年开发了一系列微针电极和无创脑电电极,并且与企业合作实现转化。微针电极采用微纳加工,目前以小批量生产、个性化定制为主,主要是面向科研单位。为了改善无创脑机接口的用户体验,近年来新型电极,如干电极和半干电极也被积极推广。柔性爪式干电极可以穿过头发接触到头皮,半干电极中的凝胶电极,无需在脑电试验后清洗头发,成本不高,无论商业还是科研环境中都是比较受欢迎的。我们还开发了可用于 SSVEP 信号采集的耳部电极,未来可以与一般的耳机融合,提高用户体验。

《微纳电子与智能制造》:脑机接口是一个多学科交叉的领域,涉及材料学、智能算法设计、神经细胞科学、医学手术技术等各个方面,您认为,在学科融合协同发展上最大的阻碍是什么?

王毅军:脑机接口在国内起步较晚,早期研究中学科之间的交叉也很少。我们发现不少由算法设计的专业人员开发的脑机接口算法虽然满足离线算法评估的评价指标,但是却无法真正用于实现在线的脑机接口系统。随着信息、技术的发展,生物医学工程等医工交叉专业逐步培养出一些能够从医学与工程学等多个领域考虑实际科学问题和关键技术的人才。但是目前这一点在国内的发展还比较初步,特

别是临床医生与工程领域研究人员交流存在信息不对称的问题,致使脑机接口科研项目落地具有一定难度。但是近期随着脑机接口产业联盟等组织的成立,越来越多地将临床、硬件、软件的科学工作者聚集起来,有望推进多学科的脑机接口技术发展。

《微纳电子与智能制造》:在脑机接口技术推广至临床或实用的道路上,对于您所熟悉的研究领域,最需要弥补的空缺或者是技术短板有哪些方面?

王毅军:我认为目前脑机接口在通信的信道容量上还有较大的空间才能达到上限。其次是神经信号的非平稳特性使得脑电模型需要重新训练,限制了很多实际场景的使用。此外,个体差异也是脑机接口技术的一个研究重点。人脑个体差异大,受环境干扰严重,任何范式都有一定比例的受试者无法使用。除了改进算法,我们也找到一些新方法,如一小部分无法使用 SSVEP 的被试者,可以用脑磁替代,还有一些被试对闪烁刺激不敏感,但对有纹理的图片却会激发有效的响应。想要更好地解决这些问题,设计出实用的解码算法,就需要更深入地了解视觉通路的相应机制。最后,还需关注无线通信技术的发展,如何将这些技术用于神经信号的编码调制,仍有很多问题待解决。融合脑科学、通信、人工智能及材料、芯片技术,未来才能真正实现脑机互联,实现“脑智芯连,思行无碍”的行业愿景。