

颅内游走！脑机接口“动态电极”来了

●本报记者 刁雯蕙

在脑机接口等神经接口系统中,电极是连接电子设备和生物神经系统的核心界面传感器,是“接口”的核心所在。然而,当前植入式电极均是静态的,植入后只能固定位置、局限采集,在免疫反应中“被动挨打”乃至传导失效,严重制约了脑机接口的应用和未来发展。

近日,中国科学院深圳先进技术研究院(以下简称深圳先进院)研究员刘志远、副研究员韩飞团队联合研究员徐天添团队,以及东华大学教授严威团队,历经5年多协同攻关的研究成果发表于《自然》。团队成功研发出如头发丝般纤细、柔软可拉伸、可自由驱动的神纤维电极——NeuroWorm(神经蠕虫)。研究首次提出了脑机接口“动态电极”的新范式,打破了植入式电极的静态传统,为脑机接口电极研究与应用开辟了新方向。

植入式脑机接口 电极开启“游走”模式

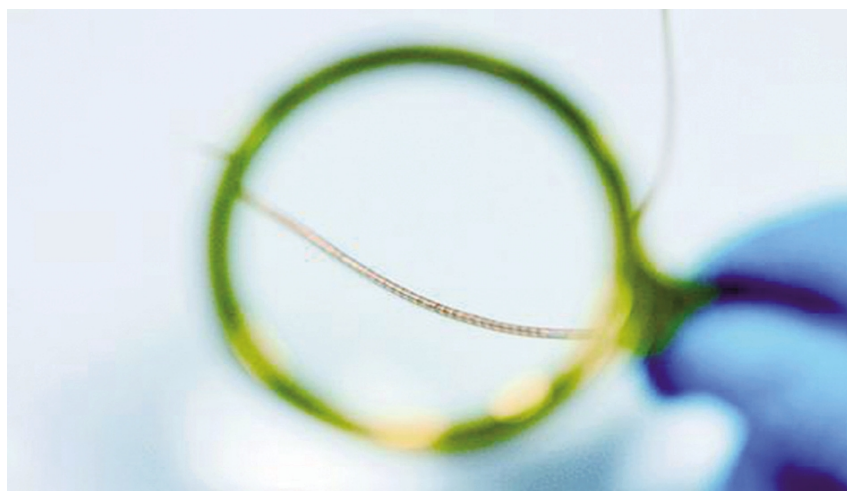
脑机接口分为非植入式、半植入式与全植入式。其中,全植入式脑机接口技术因电极直接与神经元“对话”,具有其他方式无法企及的监测精度和更丰富的功能。然而,传统植入式电极植入后不仅无法动态调整植入位置,也无法对周边环境作出响应性调整。

在2020年11月的一次例会上,刘志远和课题组成员讨论:“从临床需求看,如果我们开发出一种非常细、非常软又能运动的多通道纤维电极,或许能弥补当前电极领域的不足。”

但得到这种电极并非易事,不仅要解决多个技术难点,还需要不同领域的工程技术人才一起合作。徐天添团队长期专注于磁驱动微型机器人研究,在磁性材料制备及微纳机器人精确操控方面积累了丰富的经验。

针对传统柔性电极的静态特性及其导致的问题,刘志远在和徐天添探讨后,决定两个课题组共同探索如何在柔性电极中引入微小磁性组件,并利用外部磁场使电极植入后仍具备可调节、可运动的动态特性。

研究团队首先要解决的难题,便是



放大镜视野下的60通道神经纤维电极。

研究团队供图

如何在一根直径约200微米的纤维上布局数十个独立的电极通道。这相当于在一根头发丝上拆分并雕刻出数十根长度一致、彼此不能交叉的细线,还要保证这根纤维足够柔软、可拉伸。

团队成员谢瑞杰此前制备出厚度仅数百纳米的超薄薄膜电极。在此基础上,他想到,如果将薄膜“卷起来”,就能变成微米尺度的纤维。经过超薄柔性薄膜制备、导电图案设计、软硬接口设计和制造等多个精细步骤,研究团队历时5年多,终于制备出拥有沿着纤维长度方向独立分布的、多达60个通道、直径仅196微米的柔软可拉伸纤维电极。

为了让制备的电极“动起来”,团队在电极一端增加了微小的磁头,结合高精度磁控系统 and 即时影像追踪技术,使电极能够在体内自主调控前进方向,并稳定记录高质量生物电信号。这样的“动态电极”可以在兔子颅内“游走”,根据需要主动更换监测目标。研究团队将其命名为NeuroWorm。

在外周肌肉上也能“动起来”

研究团队表示,NeuroWorm的诞生不仅为脑机接口开辟了新路径,而且其应用远不止于大脑——他们首次实现了电极在肌肉内的长期植入与稳定工作。

与大脑相比,外周肌肉在运动过程中会产生更大幅度的形变和拉伸,对电极的柔软性、耐久性和信号稳定性提出了更高要求。NeuroWorm凭借微型化、可拉伸的结构优势,在肌肉内依然能紧密贴合组织,并保持高质量信号采集,

在脑机接口等神经接口系统中,电极是连接电子设备和生物神经系统的核心界面传感器,是“接口”的核心所在。然而,当前植入式电极均是静态的,植入后只能固定位置、局限采集,在免疫反应中“被动挨打”乃至传导失效,严重制约了脑机接口的应用和未来发展。

为外骨骼控制、康复辅助以及日常环境中的人机协同提供了可能。

团队利用微创植入技术,成功使NeuroWorm在大鼠腿部肌肉内稳定工作超过43周。值得一提的是,电极植入13个月后,其周围形成的纤维包裹层厚度平均不足23微米,周围组织的细胞凋亡率与正常组织相当,展现了优异的长期生物相容性。相比之下,传统不锈钢丝电极在相同条件下包裹层厚度超过451微米,且伴随显著的细胞凋亡反应。

与此同时,在外部磁场的操控下,NeuroWorm在肌肉表面实现游走,可在植入后一周内每天变换位置进行监测。

“研究过程中,我们不仅要确保电极信号传输的稳定性、防水性,还要精准控制电极在实验动物体内运动。在很长一段时间里,我们大部分工作是不不断改进、调整,进行动物实验测试,最终得到了符合要求的电极。”韩飞回忆。

“这一成果标志着生物电子学领域的重要突破,使传统的被动固定式植入电极首次迈向可主动控制、智能响应、

与生物组织协同运动的全新阶段,为神经系统功能的长期动态监测提供了全新的技术路径。”徐天添表示。

多学科协同助推脑机接口发展

近年来,随着人工智能、神经生物学、生物传感器与柔性电子等的不断突破,脑机接口技术已不再依赖单一学科的驱动,更需要多学科的深度融合与协同合作。正是在这一背景下,深圳先进院通过整合院内多学科力量,实现了“动态电极”的新范式突破,同时布局推进柔性生物界面电极的产业化发展。

此前,刘志远团队基于柔软可拉伸导电材料的技术积累,率先实现了柔软可拉伸电极阵列的工程化量产,并通过了相关的二类医疗器械注册,应用于体表高密度肌电监测与刺激等场景,尝试取代传统的硬质不可拉伸电极阵列,已实现向包括欧洲客户在内的电生理公司供货。

“尽管我们取得了一些应用突破,又提出了‘神经蠕虫’的新理念,但电极植入后仍面临免疫排斥和长期稳定工作等挑战。如何实现电极与人体组织更好地融合,提高信号读取精准度和稳定性,是未来的重要研究方向。”刘志远表示,未来植入式电极还需在驱动方式、速度控制、材料优化、功能集成、长期相容性等方面开展研究,这需要全球科学家的共同努力。

徐天添介绍,研究团队首次将磁控驱动技术应用于植入式电极,也为磁控微纳机器人领域带来宝贵的经验和数据,有望推广到早期的植入式医疗设备中,为动态监测生理信号提供新的解决方案。

据了解,该研究有望为纤维器件制备提供新思路,也为脑科学研究、神经调控、脑机接口、人机协同等领域提供新工具。未来,研究团队将继续在动态柔性电极和“活性”主动响应型柔性电极领域进行深入研究,推动脑机接口技术的发展。

相关论文信息:

<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09344-w>