DOI：10.12287/j.issn.2096-8965.20200114

·生物新技术·

# 脑机接口等新兴科技对传统外科重建肢体功能的启示

李铁，徐文东*

（复旦大学附属华山医院手外科，上海 200040；
复旦大学附属静安区中心医院肢体功能重建中心，上海 200040；
国家老年疾病临床医学研究中心，上海 200044；
上海市人工智能医疗辅助器具工程研究中心，上海，200030）

**【摘要】**肢体瘫痪是人类致残的最主要原因，仅脑卒中等造成的偏瘫在我国就达两千余万患者，长期“无医可治”。中国原创的左右颈七神经交叉移位，将瘫痪上肢神经换接到同侧健康大脑，不仅偏瘫肢体功能显著恢复，更进一步更新发展了传统脑科学理论。然而对于脊髓损伤后肢体瘫痪或严重肢体残缺患者来说仅依靠医学方法尚不能有效治疗。近年来，围绕传统脑电技术发展而来的脑机接口等新兴技术衍生出的交叉学科逐渐兴起，拥有能够解决医学遗留难题的潜能，在国内外掀起一番热潮。作为国家战略需求，研究者应当抓住机会，加大力度支持跨领域、多学科融合，共同研发肢体功能重建新方案，实现新兴科技与中国原创技术融合的再次突破。

**【关键词】**脑机接口；肢体功能重建；左右颈七神经交叉移位术；多学科融合

**中图分类号：**R608　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2096-8965（2020）01-0086-04

# The inspiration of emerging technologies such as brain-computer interface on conventional surgical treatment for limb function reconstruction

Li Tie, Xu Wendong*

(Department of Hand Surgery, Huashan Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China;
Limb Function Reconstruction Center, Jing'an District Central Hospital, Fudan University, Shanghai 200040, China;
The National Clinical Research Center for Aging and Medicine, Shanghai 200044, China;
Engineering Research Center of Artificial Intelligence Medical Auxiliary Equipments, Shanghai 200030, China.)

**【Abstract】**Limb paralysis is the main cause of human disability. Hemiplegia caused by stroke alone has affected more than 20 million patients in China, and there is currently no cure for this disease. We created the original contralateral C7 to C7 cross nerve transfer surgery that swapped the link of the brachial nerve of the paralyzed side to the ipsilateral healthy brain. Not only did hemiplegic limb function recover significantly, it also broke the traditional neuroscience theory. However, for patients with limb paralysis or severe limb disability after spinal cord injury, the practicality of traditional medical methods is still facing the doubt of effectiveness. In recent years, interdisciplinary cooperation derived from emerging technologies such as brain-computer interfaces based

**基金项目：**国家自然科学基金（创新研究群体项目：82021002；重点项目：81830063；青年项目：81801363）；上海市科委科研计划项目（19MC1910500；18411950100）；上海市卫生和计划生育委员会科研课题资助项目（20184Y0111；201640176）；上海市“医苑新星”青年医学人才培养资助计划。

**通讯作者：**徐文东（1970–），男 ，上海人，博士生导师。主要从事中枢及外周神经损伤的脑重塑机制和肢体障碍功能重建领域创新工作。E-mail: Wendongxu@fudan.edu.cn

on the development of traditional EEG technology have gradually risen. They have the potential to solve the problems left over from traditional medicine and have taken a great upsurge at home and abroad. As a national strategic demand, we should seize this opportunity to increase our efforts to support cross-field and multi-disciplinary integration to jointly develop new solutions for limb function reconstruction, and achieve another breakthrough in the integration of emerging technologies and Chinese original technologies.

**【Keywords】** Brain-computer interface; Limb function reconstruction; Contralateral C7 to C7 cross nerve transfer; Multi-disciplinary integration

四肢是人类最普遍最基本的器官，因为疾病、工伤、交通事故及意外伤害等导致的肢体瘫痪是人类致残的最主要原因，这类患者人数巨大，他们失去了最基本的行走、抓取物体等功能，如何通过科技创新改善他们的生活质量是健康中国乃至全世界人民健康所面临的重大挑战之一。传统外科通过手术的方法恢复肢体功能有限，尤其是面对复杂外伤后肢体残缺以及高位脊髓损伤后肢体瘫痪等严重肢体功能障碍常常束手无策。随着电子信息技术、材料工程等新兴产业的发展，传统医学面临发展的新机遇，也迎来了新挑战。2020年8月，硅谷“钢铁侠”马斯克创办的公司Neuralink（神经链接）展示了被植入脑机接口设备的小猪，引起外界对这一技术的广泛关注和学术界的激烈讨论。本文通过浅谈脑机接口的发展及应用，简单阐述了肢体功能重建领域与这些新兴科技可能产生的碰撞，呼吁未来更多的跨领域合作研究的开展。

## 1 脑机接口技术打开新世界大门

近年来，围绕传统脑电技术发展而来的脑机接口（Brain-computer Interface，BCI）[1, 2]等新兴技术衍生出的交叉学科逐渐兴起，拥有能够解决传统医学遗留难题的潜能，在国内外掀起一番热潮。脑机接口又称为脑机融合感知或大脑端口，该技术发明的初衷是将活体动物或人类的大脑与电子设备直接连接，对感觉、运动、语言等功能障碍的人群具有非常重要的意义。国内外多项临床实验证明，脑机接口技术可以帮助控制机械臂、恢复瘫痪肢体的感觉和运动等[3, 4]，同样依托脑机接口技术在肢体功能康复方面也取得了一些进展和技术积累[5–7]。在脑机接口技术及附属产业高速发展的现在，最新的前沿动态莫过于轰动一时的埃隆·马斯克公司产品Neuralink。

2020年美国当地时间8月28日，埃隆·马斯克创办的脑机接口企业Neuralink举办发布活动，公开了可实时记录脑电活动的Neuralink，该装置能够舒适地放置在脑部，其目的在于创造能够解决脑部或脊髓损伤问题的设备。马斯克在发布会现场展示了多头植入Neuralink装置的实验猪，并展现了设备可以实时读取脑部的生物电活动状态，同时指出一个大脑中可以放置多个Neuralink。除此之外，马斯克在发布会上还重点展示了第二代手术机器人，能够自动识别大脑的位置，配合自研的纫针（Thread），根据外科医生的决定将极细的电极线放置在正确的位置。

一般民众或科幻小说爱好者看到这里想必都非常激动，“记忆存储”“意念交流”“电子永生”等科幻概念在脑海中浮现，这一事件在坊间引起了广泛的讨论，而那些理念正是马斯克创办Neuralink公司的终极目标。

## 2 脑机接口最初的模样

近十年来，面向运动的脑机接口的研究大量涌现。在发展算法重建运动皮层神经元对运动的控制方面，Fetz领导的小组证实了猕猴可以在闭环的操作性条件作用后快速学会自由地控制初级运动皮层中单个神经元的放电频率[8]。随着机械工程学的发展，Andersen、Donoghue、Nicolelis和Schwartz等研究团队[9–13]能够使用神经集群记录技术实时捕捉运动皮层中的复杂神经信号，并可以用来控制外部设备。

其中，脑机接口的先驱，杜克大学医学院神经科学特聘教授，脑机接口之父Miguel教授团队制造出一种计算机电子旁路，可将采集到的脑电信号绕过损伤部位，以数字形式传输至一个可穿戴式的全新机械身体中。他们最初的实验是在一只恒河猴身上展开的[13]。通过不断的训练，Miguel团队成功让这只猴子在不活动四肢的情况下，直接用大脑控制机械手臂和自动驾驶，完成奖励任务。后期实验发现，脑机接口不但可以控制单臂，也可以通过皮

层同化来实现脑机接口控制双臂[14]。在临床上，他们采用的是非侵入性方案，设计使用的一种扁平传感器紧贴在患者头皮表面，来记录脑电信号；然后让患者在虚拟现实环境中观看和训练[15, 16]，等逐渐适应了操作之后，Miguel便给患者使用机械助行器，最后再为他们装上设计好的外骨骼。在2014年巴西世界杯开幕式上，Miguel曾用脑机接口技术让一位脊柱T4以下身体瘫痪9年的患者，在这场世界杯中仅仅通过想象将足球踢了出去。这一奇迹般的故事说明了患者在Miguel为他训练的这些时日里，7节脊椎恢复了感知、活动和运动控制方面的功能。这种现象的机制在于通过利用感觉运动脑区的可塑性，患者可能将神经义肢同化为其身体模式的一部分[16]。Miguel教授指出，脑机接口的意义远远超过了他以往几十年来一直寻找的大脑研究新方法：其可转换成新的治疗手段，来帮助全世界饱受痛苦的脊柱损伤的患者们。

与Miguel非侵入式方案不同，法国格勒诺布尔大学在2019年也提出了他们的半侵入式方案[17]，脑电采集装置覆盖于硬膜外，相比微电极直接插入大脑的优势在于能覆盖更大的皮层表面且空间位置在之后很长一段时间不易改变，保证了一段时间内信号质量的一致性。该方案专为颈髓损伤导致四肢瘫痪的患者设计，通过一个由大脑控制的神经假体，由患者的大脑控制，以无监督的方式，并满足长期植入设备的要求（无线，完全植入，长期生物兼容）。完整的脑机接口系统包括一个64通道的完全植入式硬膜外的脑电记录仪，一个有四肢的电动外骨骼，嵌入式解码算法和软件。该系统目前正处于概念验证阶段，已初步获得了安全性、长期耐受性和潜在收益的评估。

## 3 如何真正实现“脑控”机械臂等外围设备

要实现真正“脑控”外围设备，实现感觉运动控制，首先得研究其连接通路。正常成人自然状态下完成肢体动作包含两条关键通路：一是大脑控制自己的身体去完成目标动作；二是在这个过程中不断得到来自身体或是周遭环境的反馈作用，通过不断调整达成既定的动作结果。脑机接口则不依赖于这种正常通路，但同样也有两条关键的通路：一是脑-机通路，从大脑提取信号，然后反映于外部世界，比如说控制体外机械等；二是机-脑通路，将外部世界的信号传递回大脑。有这两条完整的通路是非常重要的，意味着形成了完整的信号闭环，闭环控制可以根据输出的结果计算误差然后反馈到控制器从而迅速地调整以获得更好的精度[18]。这是一种只通过脑电信号与其他外围设备的控制和通讯达到“脑—机”交互而驱使功能运动的方案，通过组合使用功能电刺激器[19]、外骨骼[4]等装置可有效恢复中枢损伤后偏瘫肢体的运动功能。

研究发现脑机接口系统改善患肢功能恢复机制在于促进脑卒中患者的中枢神经重塑，表现为病灶对侧对病灶同侧大脑运动功能的代偿[20]，所以将脑机接口系统运用于脑卒中等偏瘫患者的康复训练是可行的。如果脑机接口运用于瘫痪肢体可能会引发肌肉的快速疲劳，所以通常运用到外骨骼装置上。非侵入性脑机接口（Brain-machine Interfaces，BMIs）通常与神经假体应用或通讯辅助设备连接来应用于偏瘫患者的功能恢复中，在这种BMI范式中，运动皮层的输出和输入通路同时被激活，通过试图将瘫痪手指运动的皮层活动转换到外骨骼从而驱动手指运动，并且产生附带的视觉和躯体感觉反馈[4]。为了识别被试的运动意图，脑机接口通常从大脑皮层活动中解码运动信号，以控制外骨骼和神经假体进行日常活动。此外，Tang等[3]提出了一种基于事件相关的去同步/同步（ERD/ERS）方法，解码自我诱导的脑电运动信号来控制外骨骼，证明了运动执行模式的分类准确率高于运动想象，可用于在线控制阶段。

然而，上述研究成果就是真正的“脑控”吗？回顾马斯克Neuralink公司今年的发布会所展示的设备可以发现，其在工程学方面确实有一定的突破，表现在更细的电极、更小的芯片、更稳定快速的无线传输以及手术机器人等方面。但是在实用性方面仍然遭受到很多质疑，因为只有真正解决在人脑皮层或神经元中解析出有用的控制信号才能真正实现“脑控”。所以，无论是侵入性的Neuralink，还是BMI外骨骼系统，从某种意义上来说，都未真正完成“人机交互”。如何将外部信号准确地翻译成神经信号，以及如何将植入的信号转换成意识？有待未来科学家们研究解决。目前基于这一类理论的研究严重缺失，科学家们尚且无法完全通过科技的手段破解人类大脑的奥秘。

## 4 新形势下多学科融合肢体功能重建领域的战略意义

在未来，随着脑机接口等新兴技术的不断完

善，很多“渐冻人”患者、严重瘫痪患者也将从中受益。脑机接口有望让这些瘫痪患者重新恢复肢体功能，再次自如行走、抓握物体。与此同时，脑机接口技术的应用也并不只局限在医疗康复领域，未来的项目将是多学科合作的典范，它将涉及教育、健康及心理等各个方面[21]。所以，在脑机接口等新兴科技快速发展的浪潮下势必迎来“医工结合”研发的新形势，生物医学以及外科学如何发展似乎必然要与这些新兴科技挂钩，这种多学科融合研发模式的发展也会是今后科学界所面对的一座大山。对于脑机接口将为人类带来怎样的未来生活，我们拭目以待。

十九届五中全会在坚持创新驱动发展，全面塑造发展新优势的建议中提出，要瞄准脑科学、人工智能等前沿领域，实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目。在脑科学领域，我国提出了以“一体两翼”为蓝图的脑计划，即以研究脑认知的神经原理为“主体”，研发脑重大疾病诊治新手段和脑机智能新技术为“两翼”。

纵观脑科学领域，国外研究者在脑认知原理、信号提取、医工结合等方面进展迅速，国内水平与之仍有差距，处于跟跑阶段。但其中，在一侧脑严重损伤后，如何开发健侧半脑潜能的研究领域，我国实现国际领跑。通过将控制肢体的神经根（颈七）在颈部进行交叉移位的原创外科技术，配合后期康复充分开发健康半球的潜能，达到一侧半球司管双侧上肢的目的。这种基于脑可塑理论发展而来的修复残障上肢功能的新方案是神经科学的一大进步，打破了偏瘫患者“无医可治”的僵局，已在国内外，包括欧美等发达国家推广应用。该成果发表在世界权威期刊《新英格兰医学杂志》[22]上，并被评价为“颠覆性的，对改善患者医疗有最重要意义”，列在《新英格兰医学杂志》2018年10篇最受瞩目研究榜首。

围绕脑机接口技术的发展，广大医学家们也得到了许多启示，如何利用这些新兴科技获得肢体功能重建领域诊疗研究上的突破，关键在于多领域、多学科的人才培养与合作，我们构建大型的肢体功能重建中心必须抓住先机，培养跨领域的人才，加强学科之间的交叉融合，深入研究内在的脑科学原理，保持中国原创研究在国际上的领先地位。

## 参考文献


[1] CARMENA J M, LEBEDEV M A, CRIST R E, et al. Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates[J]. PLoS Biol, 2003, 1(2): E42.

[2] BOWSHER K, CIVILLICO E F, COBURN J, et al. Brain-computer interface devices for patients with paralysis and amputation: a meeting report[J]. J Neural Eng, 2016, 13(2): 023001.

[3] TANG Z, SUN S, ZHANG S, et al. A brain-machine interface based on ERD/ERS for an upper-limb exoskeleton control[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2050.

[4] HORTAL E, PLANELLES D, RESQUIN F, et al. Using a brain-machine interface to control a hybrid upper limb exoskeleton during rehabilitation of patients with neurological conditions[J]. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation, 2015, 12: 92.

[5] 常琪, 单新颖, 毕胜 . 基于脑电图的脑机接口在肢体康复中的应用进展[J]. 中国康复医学杂志, 2019, 34 (12) : 1488-1492.

[6] 朱玉连, 梁思捷 . 脑机接口技术治疗脑卒中后运动功能障碍研究进展[J]. 康复学报, 2020, 30(2): 162-166.

[7] USHIBA J, SOEKADAR S R. Brain-machine interfaces for rehabilitation of poststroke hemiplegia[J]. Prog Brain Res, 2016, 228: 163-183.

[8] EATON R W, LIBEY T, FETZ E E. Operant conditioning of neural activity in freely behaving monkeys with intracranial reinforcement[J]. Journal of Neurophysiology, 2016, 117(3):1112-1125.

[9] INOUE Y, MAO H W, SUWAY S B, et al. Decoding arm speed during reaching[J]. Nat Commun, 2018, 9(1):5243.

[10] SAIF-UR-REHMAN M, LIENKÄMPER R, PARPALEY Y, et al. SpikeDeeptector: a deep-learning based method for detection of neural spiking activity[J]. Journal of Neural Engineering, 2019, 16(5): 056003.

[11] JAROSIEWICZ B, SARMA A A, BACHER D, et al. Virtual typing by people with tetraplegia using a self-calibrating intracortical brain-computer interface[J]. Sciences Translational Medicine, 2015, 7(313): 313ra179.

[12] RABBANI Q W, MILSAP G, CRONE N E. The potential for a speech brain-computer interface using chronic electrocorticography[J]. Neurotherapeutics, 2019, 16: 144-165.

[13] NICOLES MAL, DIMITROV D, CARMENA J M, et al. Chronic, multisite, multielectrode recordings in macaque monkeys[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences , 2003, 100(19):11041-11046.

[14] IFFT P J, SHOKUR S, LI Z, et al. A brain-machine interface enables bimanual arm movements in monkeys[J]. Sci Transl Med, 2013, 5(210): 210ra154.


（下转第95页）