

复旦AI4S突破：脑脊接口助瘫痪者重新行走

年初复旦CNS成果集中涌现之后，复旦AI for Science(科学智能，下文简称AI4S)，即人工智能与科学研究的深度融合，再出重磅成果。3月3日晚上8点，全球首批第4例、通过脑脊接口让瘫痪者重新行走的临床概念验证手术在复旦附属华山医院成功实施。今年1月至2月，全球首批3例临床概念验证手术于复旦附属中山医院完成，标志着脊髓损伤治疗进入“神经功能重建”新纪元。

让瘫痪者再次站立和行走。这一跨越“不可能”的奇迹，源自复旦大学类脑智能科学与技术研究院加福民团队全球首创的“三合一”脑脊接口技术——通过微创手术在脑与脊髓间搭建“神经桥”，仅需4小时同步植入电极，术后24小时，人工智能辅助下患者即可恢复腿部运动。

“手术结束后24小时，病人腿就抬起来了”

“3,2,1,抬左腿。很好。3,2,1,抬右腿再走一步。”一个奇迹正在发生：在科研与医务人员的耐心指导和鼓励下，34岁的患者小林(化名)集中精力、用力控制自己的大脑意图和肢体，顺利迈出了第一步、第二步……

脊髓损伤导致的瘫痪，在医学界一直被视作“不治之症”。走路，本是再简单不过的事，对于小林和千万瘫痪病人而言，几乎是遥不可及的梦。

两年前，小林在离地面三米高的地方不慎坠落，导致脊髓外伤后截瘫。尽管治疗手段极其有限，但小林和家人一直没有放弃任何可能。两年来，他做过不少康复训练，在妻子陪伴下辗转昆明、广州、北京等地求医。

转机出现在去年10月5日，复旦大学官方微信公众号发布加福民团队的研究成果。从中他获悉，加福民团队研发的新一代用于脊髓损伤患者的植入式脑脊接口技术取得新进展，正在招募志愿者。他当天就报了名。

人的脊髓一旦损伤，大脑和脊髓神经元之间的联系就会被中断，轻者造成机体的部分感觉丧失，重者半身不遂、四肢瘫痪，甚至全身瘫痪。神奇的是，术后第一天，3位受试者都可以躺在床上自主抬左右腿。

当时，在场所有医护人员都“感到不可思议”——对于脊髓损伤患者，远端肢体受到的影响最为严重，患者脚背翘起说明其踝关节活动正常，印证了脑脊接口使患者的神经通路得到重建。

1月8日术后，小林的身体变化快到以“天”计算：第3天就实现脑控状态下的双下肢自主运动；第10天，在重力悬吊支撑下可通过自身运动意图自主控制双侧下肢跨步；第14天，运动反应能力逐步提升，右腿可快速反应抬高跨越移动的障碍物，悬吊下独立使用站立架行走可超过5米。

“我现在要做些类似‘解码’的工作，努力用意念来控制自己的身体重新学会走路。我是抱着顺其自然的心来的，手术能有这样的效果，我非常开心。”小林坦言。



本报记者 李玲 摄

2月底再回中山医院随访，小林的脊椎损伤感觉平面(身体两侧具有正常感觉功能的最低脊髓节段)有所下移，脚会发热出汗、有酥麻感，站的时候感到腿部肌肉收缩、大小便也开始有感觉……诸多变化令人欣喜。

同样感到重获新生的，还有来自河北的小赵、来自山东的小温，以及这次从塞尔维亚受伤辗转转到华山手术的海员小周，他们分别在2月5日、2月25日、3月3日成功手术。

微创手术+轻量级AI算法，让瘫痪患者实时、精准控制肌肉

脑机接口，是在躯体与外部设备间创建连接通路，大脑神经元发电形成的脑电波会被接口识别，进而通过外部设备实现所谓的“意念”控制。这也是埃隆·马斯克(Elon Musk)采取的技术路线。

这一思路默认患者肢体已“报废”，只能接入外部设备，比如机械臂、遥控轮椅、鼠标。

加福民则选择了另一条路——通过植入式脑脊接口技术，在大脑和脊髓间搭建一条“神经桥”，采集、解码脑电信号，给特定神经根进行时空电刺激，让瘫痪者再次掌控自己的肢体，而非依靠外部设备。

设想很美好，现实却很骨感。放眼全球，经验几乎为零。唯一先例，来自2023年瑞士洛桑联邦理工学院团队在Nature发表的论文。他们通过采集数据、电刺激、神经解码等手段连接神经通路，让患者自主控制瘫痪肌肉。原理基本一致，但具体方法和效果迥异——瑞士方案要在患者双侧开颅，植入两块芯片，创面达到两个掌心大小，极易导致感染。此外，脑部和脊髓的手术，间隔长达2年。而加福民团

队采取微创手术，通过2个直径1毫米左右的电极芯片植入到运动脑区，脑部、脊髓的手术可以在4小时左右一次完成，手术效率较前者显著提高。

这是因为加福民团队采取了“三合一”的方法，将多台设备集合为一台脑部植入式微型设备，不仅大大降低手术创伤，也有助于提高脑电信号采集稳定性和效率，具有“高精度、高通量、高集成、低延时”的特点。

目前可用于植入人体的成熟电极通道数比较少，信息量受限的情况下，如何实现对人体运动解码的实时性、准确性，是团队面临的巨大挑战。

解决办法，就是设计一套运算速度快、运算能力准确、算力需求低的轻量级AI算法模型。“如果患者想抬腿，但算法没有解码出来，或者只是晚了几秒，患者可能就会摔跤。”加福民说，团队花了将近3年时间，才在算法层面实现了对大脑运动意图实时解码的突破。

此外，每个人的脊髓生理结构都不一样，且人体运动非常复杂，站着抬腿和坐着抬腿的脑电信号都会有所差异。如何精准刺激脊髓特定神经根，是另一个难题。

为此，加福民团队搭建了电刺激参数-神经激活-肌肉骨骼运动仿真计算平台，根据仿真人受到电刺激后的仿真计算结果在电脑上调整参数，排除掉大多数无效刺激参数，效率大大提升。

如今，在患者康复训练现场，红外运动摄像头用于实时记录患者步态。团队每天记录下患者的脑电、肌电和步态等康复数据，用于进一步优化仿真模型，“相当于把人给数字化，精准控制病人的运动意图和肢体动作。”随着模型不断优化，病人逐

渐适应模型，就会越走越好。

多年与脊髓损伤患者打交道，加福民认为康复过程的最大痛点就是患者信心。区别于传统康复方法时间长、见效慢，新一代脑脊接口技术让患者在每天的训练中都能够看到自身变化，治疗信心和意愿也大大增强，从而进入正向循环。

硬件产品有望年底进入临床，面向全球招募患者

针对创新医疗技术临床试验所面临的高昂成本和复杂环节，复旦大学附属医院充分发挥其临床科研优势，整合多学科医疗资源，深度推进医工交叉融合创新。

在中山医院领导和各级部门支持下，中山医院为3位临床试验提供人员、场地等全方位保障。期间，加福民团队与神经内科、神经外科、康复医学科、影像科等多科室专家紧密配合，就临床试验方案开展多轮讨论。

第一次面向社会公开招聘患者，共有300多位患者报名参加临床试验，综合考虑患者的年龄、病情、心理健康等各项条件，联合团队最终选取的受试者均为男性“90”后。

加福民解释，目前研发的脑脊接口设备仅适用于成年患者，且参与临床试验的患者每日要进行5-7小时的康复训练，这需要患者和患者家属的积极配合。

1月8日，原本预计6小时完成的首例脑脊接口植入手术，4小时左右顺利完成。中山医院神经内科丁晶、康复科余情负责术前评估、术后观察与康复，神经外科余勇和胡凡分别负责植入脊髓电极和脑部电极。多学科交叉队伍紧密配合，为临床试验的成功打下基础。

早在四年前，余勇就开始开展脊髓电极植入术工作，但主要用于顽固性神经病理性疼痛病

人的治疗。脊髓电刺激能否在瘫痪患者治疗中发挥作用？他起初心里也没底，“但科学需要我们不断探索和尝试。”参与手术的临床医生，用“震撼”形容第一次看到小林站立画面。

“任何医生听到这个技术都会很兴奋。”胡凡认为，此次临床研究让大家亲眼看到了治疗瘫痪的可能性，既然站立、行走是可行的，不断优化脑脊接口系统治疗方案，或许能够在未来帮助患者完成更加精细的动作，并向更多医院推广。

更令人兴奋的是，团队还在受试者身上发现了脑脊接口对神经重塑的作用。在瑞士团队的研究中，脑脊接口植入手术后6个月左右出现神经重塑效果，即患者在外部刺激的情况下也能自主控制瘫痪肌肉。而小林在术后不到2周，就表现出了神经重塑效果。加福民团队将进一步观察，以了解其背后机制。

一个更为大胆的假设也随之浮现——脑脊接口技术可能只是手段，而非目标。“如果通过植入脑脊接口，加上三五年的康复训练，患者的神经重新连接、得到重塑，最终我们可能会为患者摆脱设备，而不是终身依赖它。”加福民认为，“舍筏登岸，这才是最好的脑脊接口技术。”

下一步，加福民团队计划继续联合中山医院、华山医院等临床单位，开展更多脑脊接口临床概念验证工作，积累更多真实数据，进一步迭代算法。

同时，团队将完善“三合一”颅骨植入式脑脊接口微型设备，完成第三方产品型式检验，做好产品注册临床试验准备。

在此基础上，他们还将研发针对脊髓损伤患者的系列神经调控新方法、新技术，如针对轻症患者开发穿戴式神经调控装备、多模态运动监测系统。

“过去，大家熟悉的是国外的高端医疗器械国产化，但现在我们进入了‘无人区’，在全球首次实现了新一代原创性脑脊接口系统方案。”加福民说。

该研究得到了上海市科委、卫健委等相关部门和上海颠覆性技术创新中心的高度重视。为加快颠覆性技术突破，抢抓脑机接口的发展机遇，培育未来产业，上海市于2025年初出台了《上海市脑机接口未来产业培育行动方案(2025-2030年)》，加福民团队积极融入上海建设脑机接口科创高地的热潮中，将技术和设备尽快转化落地，让中国原创颠覆性技术走向世界，为全球2000万脊髓损伤患者推开希望之门。

本报记者 殷梦昊
实习记者 曾译萱 方东妮