

## 跟着院士学科技

## 脑机接口技术正在打开一扇新大门

■张照星 叶泽祺 周立健

## 捕捉解读大脑中的“神经烟花”

脑机接口如同一位精通大脑语言的“翻译官”。

我们大脑中有超过860亿个神经元，它们时刻通过电信号交流，形成我们的思想、指令和情绪。这些微弱的电信号组成在一起，就像一场持续不断的烟花表演。脑机接口的工作，就是捕捉并解读这些“神经烟花”。

简言之，脑机接口是大脑与外部设备之间建立的直接通信通路。它绕过了传统的“神经—肌肉”输出路径，试图“破译”大脑的神经活动，将其转化为计算机或机器能够理解的指令。

以非侵入式脑机接口为例：当人脑想象右手运动时，大脑左侧初级运动皮层会产生特定的电信号模式。

头戴设备上的电极，宛如精密的“信号麦克风”，会捕捉到这些特定的电信号。信号经编解码算法被转化为可执行指令，驱动机器人、假肢、战术装备等外部设备。

实现脑机接口的效能，高质量的神经信号采集至关重要。

我们可以将采集神经信号的过程比作“聆听大脑的耳语”，当听到的信号质量越强、越清晰，我们“听懂”大脑意图的能力就越强。

不过，由于脑电信号天然具有信号强度微弱、信号来源复杂、信号个体差异大这3个特殊属性，科研人员想要获取清晰的脑电信号并不容易。

起初，科研人员借助侵入式采集设备，突破信号精度瓶颈。这类设备通过在大脑皮层植入微电极阵列，直接捕捉神经元放电电信号，能在最大限度上减少信号衰减，实现对运动意图的精准解码。

遗憾的是，侵入式采集设备需要依托对人体的手术才能实现，这限制了其大规模应用。

与之相对，非侵入式设备无需开颅植入电极，只需戴在头上，便能捕捉这些微弱的电信号。凭借“无创、易部署”的优点，非侵入式设备逐渐成为发展主流。

国防科技大学脑科学团队曾开发出一款脑控汽车，驾驶员头戴专用脑电帽，仅凭“向左”“向右”“加速”等念头就能操控车辆，使车辆平稳行驶。

此外，还有一种半侵入式采集设备。这类采集设备无需穿透大脑皮层，仅通过微创手段将电极置于颅骨与硬膜之间，就能实现对脑电信号的采集，一定程度上兼顾了侵入式的高精度与非侵入式的安全性。

## 从“备受质疑”到“备受重视”

一枚硬币大小的植入体嵌入颅骨，比发丝还细百倍的电极探入运动皮层，一位四肢截肢的试验者凭借单纯的意念，让屏幕上的赛车漂移过弯……

这是2025年中国首例侵入式脑机接口临床试验中的一幕。而在100多年前，当德国医生汉斯·贝格尔首次捕捉到人类的脑电波时，他的发现却被科学界质疑。

1924年，德国医生汉斯·贝格尔通过贴于头皮的铝箔片电极，首次记录下微弱的脑电信号。这一发现起初备受质疑，但他用超过1000次脑电记录的支持，为科学界开辟了一个全新的研究领域。

真正的转折发生在1969年：一只猴子的大脑神经无活动首次触发电表指针转动，证明了大脑可以直接控制外部设备。

1973年，科学家雅克·维达尔首次

请试想这样一个画面：深夜，实验室里一片寂静。电脑屏幕上，一个光标正在缓慢稳定地移动，最终精准落到目标区域。这一动作的实现，不是由人手操作鼠标控制的，而是仅凭一个人的意念，通过“思考”完成的。

这个画面的实现，依赖于脑机接口技术的进步。前不久，由中国科学院、中国工程院主办评选的2025年中国十大科技进展新闻、世界十大科技进展新闻中，脑机接口技术相关进展均入选其中。

无独有偶。去年底，在海南举办的“天象棋杯”中国象棋协会2025年总决赛中，脑机棋手韩彬彬佩戴非侵入式脑机接口设备，通过意念控制棋子，与象棋特级大师孟辰完成对弈。

那么，脑机接口技术今天有哪些新进展？未来对人类社会特别是军事领域将产生哪些影响？本期“跟着院士学科技”，我们邀请中国科学院院士、国防科技大学教授胡德文，为我们讲述——



工程师演示脑机接口手部运动反馈康复训练系统。

新华社发

提出“脑机接口”术语，试验中，试验者注视闪烁灯光产生脑电信号，进而控制虚拟光标移动。

进入21世纪，世界各国对脑机接口的重视程度不断增加。

2013年10月，欧盟发起了为期十年的“人脑计划”，旨在建立先进的信息技术、建模技术和超级计算平台，推动人类对大脑的模拟和理解；2014年9月，日本开展“Brain Minds”脑计划，运用数字化技术再现人脑结构，推动神经科学与计算机技术的深度融合……各国纷纷投入大规模资金持续开展技术研发活动，推动脑机接口技术“大步向前”。

如今，应用于脑机接口系统的算法不断迭代，将大脑意图转化为战术指令的速度和准确率不断提高，“大脑意图”与“行动响应”之间的距离正在加速缩小，脑机接口系统呈现出多模态融合升级发展的新趋势——

——与近红外光谱、眼动追踪等技术结合。科研人员将脑机接口技术与近红外光谱、眼动追踪等技术结合，大幅提升了复杂环境下脑电信号的可靠性。未来，采集脑电信号的设备将加速朝着更精准、更便捷、更低功耗的方向发展。

——与大模型和具身智能技术相结合。一方面，大模型通过优化学习策略提取通用神经网络特征，基于海量数据提前训练，高效学习神经信号规律，目前已在情绪识别、运动想象等多类场景中表现出良好的跨任务泛化性。另一方面，具身智能技术的融入，将实现“算法—设备—环境—任务”的全链路协同。通过与大模型的通用意图解码能力，以及具身智能的环境感知、动作执行能力相结合，脑机接口中“机”的能力将会被放大，“脑”的指令将会得到更灵活、更多样的响应。

未来，通过实现“一次训练、多场景能用”的突破，脑机接口技术最终将与人工智能“深度绑定”，走向通用化舞台，为人类生产、生活提供更多便利。

## 接入现实生活，创造无限可能

当前，脑机接口技术最直接的应用领域是医疗健康领域。

2023年，《自然》杂志报道了一位因渐冻症失去交流能力的患者。借助脑机接口设备，这位患者的脑信号被转化

为屏幕文字，失去发声能力的他实现了“重新开口”的梦想。

在这条通往“大脑内星辰大海”的征途上，脑机接口技术的潜力远不止于此。在教育领域，脑机接口设备可实时监测学生注意力，帮助教师优化教学方式；在娱乐行业，游戏公司已推出简易脑电手环，玩家可通过集中注意力释放“魔法技能”；日常生活中，日本研究人员开发出“意念家居”系统，用户凭借思维就能开灯关灯、调节空调……

我们看到，脑机接口技术正如藤蔓般蔓延至日常生活中的各个领域，给人们的生活带来诸多方便。

事实上，脑机接口技术在军事领域同样具有广阔的应用前景，将赋能未来战场，成为提升战斗力的“倍增器”。

——远程操控武器装备。士兵通过脑机接口控制无人机、机器人、装甲车等作战平台，能够实现武器装备的远程操控，减少人员暴露风险，提升作战灵活性。据悉，美国国防高级研究计划局的“下一代非手术神经技术”项目，旨在研发非侵入式脑电采集头盔，用于士兵与武器装备的交互控制。

——人体机能增强与外骨骼协同。结合外骨骼技术，脑机接口可帮助士兵增强力量和运动能力，减轻负重负担，提升单兵作战能力。例如，士兵通过脑机接口控制外骨骼装备，完成高强度的体力任务。

——战场态势感知与决策。士兵佩戴脑电采集头盔，有助于减少信息传递的中间环节，指挥员的意图通过数字

信号就能直接传递到作战单元，加快指令响应速度。同时，指挥官还能通过脑机接口与AI系统实时交互，拟制作战计划，共同分析战场数据，提升作战决策的效率和准确性。

此外，借助脑机接口设备，可以将士兵的感官与传感器连接，扩展士兵的感知范围，使士兵在复杂环境中全面感知战场态势，提前发现威胁。

例如，在排爆场景中，士兵的操控意图与环境中的爆炸物特征信号可实现同步解码，进而自动优化机器人动作精度。在飞行员状态监测任务中，融合大模型的多生参数处理能力与具身智能技术的实时反馈机制，可在“人一机—环境”的深度协同中，实现调整飞行姿态的预判与辅助。

不过，值得人们关注的是，技术越强大，相伴而生的问题往往也更严重：当最私密的想法、情绪都可能被读取，何为隐私和思想自由？如果人的情绪能被调节，人的部分决定能被算法干扰，人的自主性何在？如果脑机接口设备被黑客攻击，造成的后果又由谁来负责？

展望未来，脑机接口必将是一种被有限使用的技术。作为又一项拓展人类能力的工具，它如同望远镜一样，延伸了我们的视线。我们看到，脑机接口技术正在打开一扇新大门：那是一个思想与数字世界直接对话的时代，而我们都站在它的门槛上，既满怀期待，又需审慎前行。

本版制图：吴淮江



左图：胡德文近照。

AI修饰生成素描画

热爱可抵岁月漫长，当一个人真正热爱自己的研究领域时，科研就不再是一项枯燥的任务，而是充满乐趣的探索之旅。

——胡德文

## 神奇的“量子隧穿”现象

■朱祥论

## 趣问·新知

2025年的诺贝尔物理学奖，颁发给了在宏观尺度、涉及大量粒子的情况下，成功观测到量子隧穿现象的3位科学家。对此，诺贝尔物理学奖评委会主席激动地表示：“百年量子力学仍在不断带来新的惊喜！它不仅构成了所有数字技术的基础，更在孕育下一代科技革命。”

那么，到底什么是量子隧穿？试想这样一个画面：在你的面前有一座高山，而你手里只有一只皮球。如果想把这只皮球扔到山的那一边去，你必须赋予它足够强大的能量，让它能飞越山顶。这体现了我们日常世界的基本规则：没有足够的能量，就无法克服障碍。

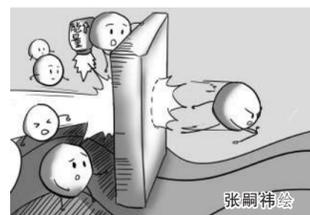
但在微观的量子世界里，事情变得奇妙无比。对于一个微小的粒子来说，即使它的能量不足以支撑它“翻越”眼前的“高山”，但它却有一种神奇的概率，能像幽灵一样径直“穿过”这道看似不可逾越的屏障。这种现象，就被称为量子隧穿。

你或许会想，这不就是“穿墙术”吗？要理解这种近乎魔法的行为，须从

微观粒子的性质说起。在微观世界中，粒子不再是一个个确定的、拥有固定形状的小球，而更像一片“迷雾”，这片“迷雾”在数学上被称为“波函数”。

这团迷雾可以延伸到空间的各处，总有一部分迷雾会渗透到另外一侧——这意味着微观粒子有一定概率出现在墙壁的另外一边，实现“穿墙而过”。

宏观世界里，宏观物体由大量微观粒子组成。想要实现量子隧穿，所有粒子需要协同一致。但在宏观尺度下，粒子间的相互作用复杂，容易受到干扰，因此宏观世界的量子隧穿概率低到可以完全忽略不计。这就解释了为什么你不能指望自己突然穿过家门前的墙壁——组成你的万亿亿个粒子要同时朝一个方向隧穿，这个概率比宇宙在此刻突然间消亡还要小得多。



张嗣禧绘

## 他山之石

2025年，美国国防高级研究计划局(DARPA)发布“杂交体”(HyBRIDS)生物混合机器人计划，旨在找到生物混合机器人新型设计方法，解决阻碍部署生物混合机器人系统的重大工程和设计问题。

近年来，美大力推进仿生混合机器人技术军事能力生成，加速融入全域作战链。

一是突出战场威胁感知。DARPA先后发布“泰勒斯”“持久活体生物传感器”等仿生混合机器人项目，打造战场环境监测新军，为满足多域战条件下情报获取、监视和侦察能力提供支撑。

二是拓展认知作战空间。美国持续推进“类器官”生物混合技术发展，谋求新域作战能力生成。2025年2月，美国国防威胁降低局、空军研究实验室、海军研究实验室等机构联合开展“大脑风暴”脑芯片平台开发，借助人工智能等技术，识别作战人员在不同环境下的脑神经活动变化，搜集控制脑神经信号。该项目试图通过制造“战场幻觉”实现认知迷惑，达到不战而屈人之兵的目的。

三是增强士兵作战效能。2024

## 美仿生混合型机器人加速融入作战链

■滕 璟

年底，DARPA提出“作战人员警觉赋能”项目，该项目利用近红外光谱的脑机接口技术，精确调控作战人员负责执行、记忆和决策的脑区，意图增强作战人员认知能力，提升战场决策效能。

## 无线信号“隔墙识人”

■董浩 卫怡博

凌晨，当你在卧室熟睡时，客厅的Wi-Fi信号正悄然记录你的呼吸节奏；夜晚，当你在家中走动，墙角的智能音箱通过看不见的无线电波感知着你的位置和动作……这不是科幻电影中的场景，2025年底，来自德国卡尔斯鲁厄理工学院的一项研究报告引发人们关注：科研人员可利用环境中已有的Wi-Fi信号，通过被动监听无线电波的传播变化，准确推断出在场人员的身份。

无线信号能够感知人体的奥秘，源于无线电波与人体相互作用的物理特性。当无线信号在空间中传播时，遇到人体主要会发生3种变化：反射、散射和衍射。

团队人员解释称，通过观察电波如何被人体反射等，无线信号就可以像相机一样“看到”周围环境和环境中的人。无线信号实现“隔墙识人”的整个过程，主要可分为3个环节。

首先，无线信号穿透障碍物或从门缝绕射，进入监控区域，遇到人体后产生携带人体信息的反射信号；其次，接收设备捕获这些反射信号后，提取信号数据信息；最后，接收设备通过人工智能算法和深度学习模型，解析提取而来的这些数据。特别是卷积神经网络和循环神经网络出现后，被用来识别不同活动对应的信号模式特征。

目前，这种基于无线信号的感知技术已在多个领域展现潜力。

在医疗健康领域，它有助于改变患

者监护方式。麻省理工学院研究人员开发的“Vital-Radio”系统能够借助无线电波监测呼吸和心率。对于独居老人来说，这种技术可以在不侵犯隐私的情况下，检测跌倒等紧急情况的发生，及时触发警报。

在智能家居方面，无线感知使环境真正“懂得”用户需求。通过识别用户的位置、姿态和活动，智能家居系统可以自动调节灯光亮度、空调温度，甚至根据用户的烹饪动作提供智能指导。与摄像头相比，无线感知在保护隐私方面具有天然优势——它记录的是抽象的活动模式，而不是具体的视觉图像。

然而，无线感知技术如同一把双刃剑，在带来便利的同时也引发人们对隐私和安全的担忧。

与摄像头不同，无线感知设备难以被肉眼察觉，可能在不为人知的情况下持续收集数据。如果犯罪分子通过分析无线信号的变化，偷听、记录我们在家庭、办公室等私密空间中的一举一动，后果则不堪设想。

或许在未来，无线感知技术的发展将迎来更大进步，但一个重要的前提是，我们必须通过持续的关注与技术保障来守护用户隐私，使其发展始终安全可控。

## 热点追踪