



# 脑机接口：近攻绝症，远或“人体冬眠”

陶虎认为，硅基器件和碳基生命融合，努力方向是以非侵入式损伤获得侵入式效果

## 嘉宾主讲

今天来和大家分享一下为何要做脑机接口，它的前景、挑战和上海的责任。“生命进化的新高度”解答了前半个问题，“BTIT(生命科技和信息科技的英文缩写)时代的新角色”回答了后半个问题。

### 生命进化的新高度

从进化的角度看，现代智人在十几万年前走出非洲，在地球存在不到万分之一的时间内，人类已进化成为地球的主宰。其重要原因之一是人类大脑选择了一条相对正确的进化路径，朝着更先进、更复杂的方式发展，从而产生了学习、情感、创作、艺术等等。

### 通过脑机接口直接把大脑接出来，充分发挥其优势

脑机接口的核心思路之一是如何能够绕过人类并不强大的五官和四肢，用万物之间最聪明的大脑与外部世界、外界装备进行沟通，这也是碳基生命和硅基生命融合的终极疆场。

从信息处理的效率来看，大脑是一台高性能功耗比的超算。用好大脑这个超算总体有两条思路。第一是类脑，诸如类脑芯片、类脑计算都是希望模拟大脑的计算方式，大幅提升性能功耗比。虽然科学家目前还不清楚大脑究竟如何思考，但类脑计算在视觉处理、智能驾驶、语音合成、大模型等领域，已取得了许多突破。

第二是通过脑机接口直接把大脑接出来。之前美国团队演示了用大脑可以控制多个无人机。这些也是脑机接口发挥作用的例子，由此有望进入“万物联脑、万物脑控”的时代。

### 治疗重症到增强能力，实现“人体冬眠”赴火星

目前脑机接口的研究分两个阶段。第一是我们正处的初级阶段，预计将较为漫长，主要用于治疗重大脑疾病包括渐冻症、自闭、抑郁、成瘾、痴呆等。大多数脑疾病都是大脑的异常放电所致，脑机接口可深入到大脑中观测其放电状况，进而反过来调控大脑，让大脑回归正常。

第二个阶段是把正常人变成增强人。目前，人类五官和四肢还配不上大脑。比如，人类视力有限，而通过红外传感器、激光传感器、X光传感器，就可看到更多信息。通过脑机接口接入视觉皮层就能获得超视觉；通过各种声音传感器，接入听觉皮层，就可获得超声波和次声波等各种频段的声音。以此通过更为强大的硅基科技来增强人类并不强大的五官和四肢的功能。

近来，随着航天技术的快速发展，大家对人体冬眠技术特别感兴趣，人体能量损耗大部分都用于维持基本的新陈代谢，而大脑耗能仅约20瓦。特别提一下，马斯克布局了无人驾驶、星际旅行、星间通讯、地底挖隧道、太阳能、人机对话，以及脑机接口，这些组合在一起就是“去火星并活下来”。如果未来移民火星，人体冬眠技术需要把除了大脑之外的其他器官降低到正常新陈代谢的1/10、1/100，但保留大脑的活力，并通过脑机接口继续工作、学习、娱乐、交流。

这些都是可期的人类生命进化的新高度。

## 集成电路方向的电极创新

按照使用方式，脑机接口主要分为两大类：非侵入式和侵入式。一般来说，后者性能会更好，但创伤更大。最近，核磁共振技术被用于非侵入式脑机接口，通过扫描大脑脑区的活跃程度来实现脑机接口应用。Utah电极、静脉血管支架电极等植入式脑机接口技术均作了积极探索，但手术创伤仍有待改进。

以马斯克为代表，尝试用集成电路技术做脑机接口，目前已成为前沿探索的一个热门研究方向。集成电路最大的优势是集成度高，可以在极小空间集成大规模神经电极，并进一步把电极、芯片、电池、天线都集成在一个微系统里。马斯克的Neuralink公司目前已融资8亿美元，估值约66亿美元，高于大多数科创板公司的估值。今年5月首次通过美国FDA(食品药品监督管理局)临床伦理，这意味着它可以在人身上试验。

### 为何脑机接口的侵入式的效果要强于非侵入式？

首先我们来理解一下为何侵入式更有效于非侵入式？即插进脑子里有何效果。从本质上说，大脑神经元放电，经过脑膜、颅骨、脑脊液、头皮、头发，脑电信号衰减非常大。如果只是信号衰减，通过放大、滤波等方法还可以恢复。但更重要的是，声光电磁热等在不同的组织界面会有散射，信号会拐弯，多次经过不同的组织界面，再进行测试的时候，脑电信号散射极为严重，很难精准地回溯到某个神经核团，更遑论具体的某个神经元放电。所以非侵入式对特别精细的脑电信号采集能力相对有限，更别说记忆的复制、知识的传递，目前来看都很困难。

### 为何马斯克的软电极比Utah的微针电极更具发展潜力？

Utah电极获得美国药监局的认可至今将近20年，但临床案例在全球范围内大约只有40例。对于一个医疗器械来说无疑是比较失败的，年均仅1-2个病人。但作为科研产品来说是非常成功的。它的具体做法是，把一百根微针阵列插入大脑，获取大脑活动，同时可以调控大脑，但其劣势也显而易见。

马斯克的Neuralink使用的电极跟Utah电极存在较大差别。Utah电极是一百根很硬的微针，而Neuralink的电极是软的，它可以是数十根线，每根线上有若干神经电极。在颅骨里的大脑非常柔软，相当于碗里放着一块嫩豆腐。人类正常活动时，这块“豆腐”也在碗里晃动，如有一百根细针不停地局部切割大脑，大脑就会受不了。这就是为什么Utah电极自获批以来应用的病例数很少，应用的对象无一例外是难以正常移动的渐冻症或高位截瘫病人。而柔性电极就像在嫩豆腐里放一根线，因为柔软随豆腐而动对大脑没有切割，从而可以减少神经疤痕的产生，因此也可以更长久地在体内工作。

### 为何上海的蚕丝蛋白包裹电极比马斯克更为先进？

我所在的中国科学院上海微系统与信息技术研究所团队也选择了集成电路的方向，作为神经工程领域的团队，成功研制了基于蚕丝蛋白的微可植入的柔性脑机接口。它与马斯克方案有何区别？

马斯克的植入方式是用一根钢针把柔性电极带进去。这样，每打一针都会有血窟窿，对



陶虎主讲

大脑创伤特别是急性损伤较大。同时因为针太硬，一旦蹭到血管就会造成颅内出血，必须先观察颅内哪里血管，提前做好植入路径的部署，再用机器人自动植入。那打开的这个孔如何塞回去？马斯克的方法是把脑机接口微系统做得和打开的颅骨一样大，以便能塞回去。但实际很有挑战性。因为力学性能与颅骨不同，它会受到挤压、存在气密性、水密性以及感染的挑战，临床效果还有待观察。

我们选择的是相对巧妙的植入方式。柔性电极外面包裹一层可控降解的蚕丝蛋白做的包裹物并精确控制电极强度，使其硬度介于血管和脑组织之间。插进去一旦碰到血管就会滑过去，没有碰到血管就插进去了，这意味着可盲插。我们制备的柔性电极直径仅0.1毫米，中医针灸针一般为0.25或0.3毫米。大多数临床上0.5毫米以下创口被认为人体可自愈。这就是我们的创新。

### 其他植入式脑机接口技术的进展

还有一种静脉血管支架电极，它充分借鉴了临床上非常成熟的静脉血管支架的方式。它在传统的静脉血管支架上缠绕柔性电极，通过静脉血管运送到大脑，即使在不开颅也能达到一定的效果。但缺点显而易见，一方面，只能到血管能到的地方，且必须是较大的血管。另一方面，隔着血管不管采集还是调控都会受到影响。此外，目前还只能做到8-16个通道，比较有限。

除了脑机接口，还有中枢神经接口。前段时间瑞士团队做了一项研究，通过脑机接口结合脊髓刺激，获取重度瘫痪病人的运动意图，在脊髓做一个刺激器控制下肢行走，做完手术不久就可以落地行走。也期待这项技术进一步的发展。

## BTIT时代的新角色

毫无疑问，脑机接口是BTIT时代的新角色，涉及微电子、神经科学、人工智能、计算机科学、材料学、机器人、心理学和临床医学，而上海有义务、有责任、有信心引领脑机接口这项重大技术的研究方向。

上海的信心、责任来源于国家布局、上海战略  
首先，脑机接口是标准的交叉学科，差距较大的学科交叉在一起，更能迸发出新活力和新机会。

其次，国家很早就布局了脑科学和脑机接口研究，不同地区不同特色，主要研究高地集中在北京、上海、浙江、广东也有很好的基础。

同时，上海在微电子等几个领域都有很好的学科优势。上海是中国重要对外窗口，集科技、人才、经济、金融之优势，而这些其实也都是脑机接口的优势。脑机接口现在站在科技最前沿，需要最尖端的人才、大量的资金投入和稳健的政府支持。

第三，从上海自身发展战略来看，三大先导产业集成电路、人工智能、生物医药，其重合交叉点就是BTIT，也包括脑机接口。现在我们用集成电路的方法来做脑机接口，包括电极、芯片、植入机器人；用人工智能的方式做大规模神经解码；我们针对的应用场景是临床脑疾病诊治。上海有复旦、交大、华东师大在内的一大批高水平大学，最近又引进了一大批人才；有像华山、瑞金、精神卫生中心等一大批神经和精神疾病领域排头的临床医院。当然，还有一大批病患愿意做这样新兴技术的临床试验，可谓“产学研医用”俱在，所以上海有义务、责任、基础，也有决心信心承接这项重任。

### 美国脑计划2.0对脑机接口的五大核心指标

美国目前引领了整个脑机接口技术的发展。但从美国脑计划2.0中对脑机接口技术的展望和指标来看，我国部署与此大体一致且具有中国特色。中国在电极、材料、植入方式等个别点上并不落后，但在系统性和工程性看差距还不小。

回溯过去一百年的科技发展史，可以称得上“全球性的科学计划”大约有四个。一是1940年代的“曼哈顿计划”(美国陆军部研制原子弹计划)。二是1960年代的“阿波罗计划”(1961年到1972年美国组织实施的载人登月飞行计划)。三是与我们更相关的1980年代的“人类基因组计划”。四是20世纪全面开始的“人类脑计划”。

2021年，上海交通大学与Science杂志提出“新世纪125个重大科

学问题”，大约12个问题与脑科学有直接或间接关系，脑科学在所有新问题中也是占比最大的学科。进一步梳理发现，一类是偏前沿的脑科学研究，例如意识的物质基础是什么，人类是如何演变的。另一类是偏应用相关的重大脑疾病的诊治，例如神经障碍能否诊治，神经退行性疾病能否诊治。

脑机接口是本世纪启动的“人类脑计划”的底层核心工具之一，涉及的学科更广，影响人群更广，需要的学科也更广，某种程度上讲，难度也更大。

人类脑计划中有四个关键词，第一是“大规模”。成人的大脑有860多亿神经元，现在最先进的科技只能在几百到几千个神经元的量级对大脑进行探索。第二是“长期稳定”。在脑科学领域需要长期稳定的记录，这些才是大且好的数据，这对工程学提出了巨大的挑战。第三是“动态”。需要实时获取大脑活动，甚至实时调控大脑。对于大脑这么精密且如此脆弱的器官，我们如何保证实时监测或调控呢？而且大脑思考的速度到底有多快，都还没有准确的证据。第四是“读写”。不但能够采集神经元活动，还希望能够调控它。如果只能读不能写，并不造成闭环。我们要做大脑增强，要做脑疾病诊治，更多的是应用写的能力来调控。

而最新的美国脑计划2.0，侧重于神经环路、大规模动态网络，包括对临床疾病应用的追求。其中，对脑机接口技术有五大展望和指标。第一，达到超高通道、高密度采集。希望未来能在在一万甚至十万的情况下进行，目前大约能做到几百最多几千通道。第二，实现长期稳定采集。希望从原来的几周增至几年。第三，可以用于自由行为动物。当可以自由行动时就可以做更高级的行为，比如社交。第四，能够多脑区同时记录。第五，从硬质电极转向柔性材料电极阵列。

很遗憾，美国在加大对创新神经技术支持的同时，进一步限制了出口管制。今年2月，美国在华盛顿召开了一次脑机接口出国管控会，美国政府与科研机构、企业的观点非常对立。美国一再强调加大管控，而科研院所和企业则希望愈加开放。

8月26日下午，163-2文汇报《脑机接口：生命进化新高度，BTIT时代新角色》在上海报业大厦43楼融媒创新空间演播室举办，腾讯会议室、文汇报视频号同步直播。

中国科学院上海微系统与信息技术研究所副所长陶虎主讲，华东师范大学脑科学与教育创新研究院常务副院长林龙年、哲学系何静教授同台对话，50位线上线下听众获赠NFT数字藏品。

技术支持为上海报业集团融媒创新空间运营团队。本次讲座由文汇报和上海树图区块链研究院联合主办。

整理 李念 金梦  
摄影 周文强  
版式 李洁

### 呼唤更多的创新，脑机接口的接口是重点考虑

虽然马斯克从集成电路方向切入，给脑机接口带来了重大的突破，但是，从技术架构来说仍是极富挑战，它包括用于信号采集、调制的电极，用于信号处理的芯片，用于神经解码的算法，用于电极植入的机器人，用于供电的电池，用于无线信息通讯的天线，而且所有都要集成封装在一个非常小的微系统里，并且整个功耗不能太大，这是极其困难的。

综合看，脑机接口技术的核心挑战是，如何能够最大限度发挥脑机接口优势，同时最低限度地损伤大脑。即希望达到侵入式脑机接口的效果，但只需要接近非侵入式脑机接口的损伤。为此，我们每天都在做系统级别的优化。

突破常需要非常规思维。脑机接口的难点在于不同组件之间的接口，比如，电极和芯片间的接口，芯片和算法间的接口，算法和无线通讯的接口。并不是说一万通道的电极就是最好的，关键是后端整个系统能否匹配，才是它能否大规模使用的决定性因素。例如，芯片能否匹配一万通道的电极的处理，无线传输能否传输如此之大的数据，数据功耗有多少，电池能否撑住等等。

超过脑机接口还有很多科技的想象力。

比如侵入和非侵入脑机接口的结合，脑控和脑脑的结合，自然脑和脑类器官的结合，中枢神经和外周神经的结合，脑机接口和髓鞘接口的结合，电生理和电化学的结合，类脑和脑的结合，脑机接口和大模型的结合。

神经科学和神经工程共同服务于人类脑计划。从神经工程角度看，我对这项前沿技术的前景充满期望。但我们必须要接受三个关键挑战。第一，安全高效获得高质量信号。第二，深刻理解神经编码机制。第三，合法合规、公平运用此项科技。

### 图片说明

- ①43楼融媒演播室宾主同框
- ②现场观众拍下陶虎主讲内容
- ③观众观看讲堂预热片，展示此前数字化讲座

