



华中科技大学

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



脑机接口与机器学习实验室

BRAIN-COMPUTER INTERFACE AND MACHINE LEARNING LABORATORY

脑机接口

伍冬睿

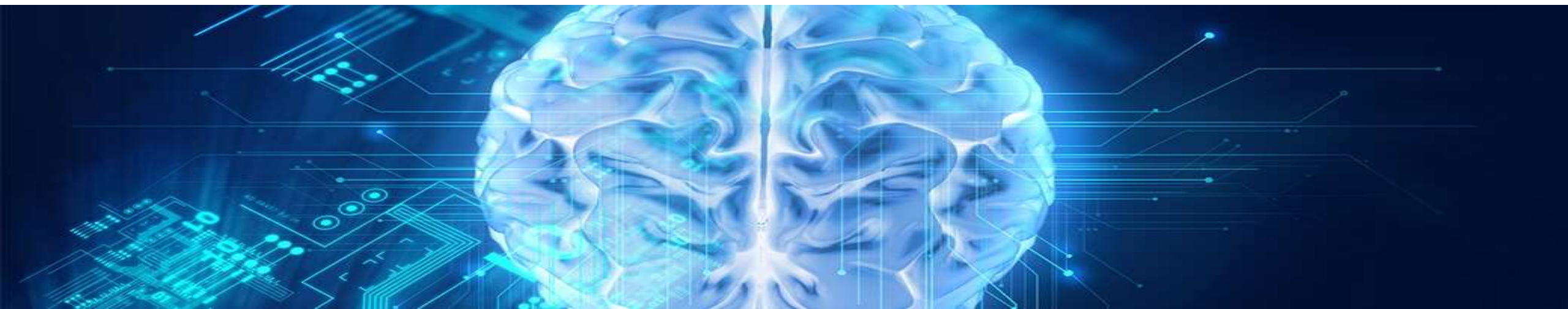
华中科技大学 人工智能与自动化学院

脑机接口与机器学习实验室



目录

- 大脑基础
- 脑机接口简介
- 非侵入式脑机接口
- 半侵入式脑机接口
- 侵入式脑机接口

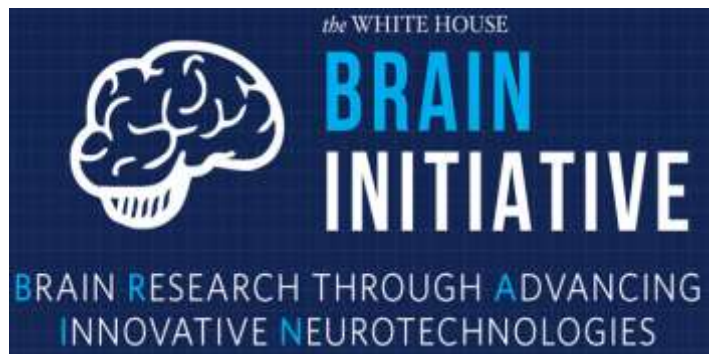


全球脑计划



Human Brain Project

- 2013-2023
- €1b



- 2013-2025
- \$5b



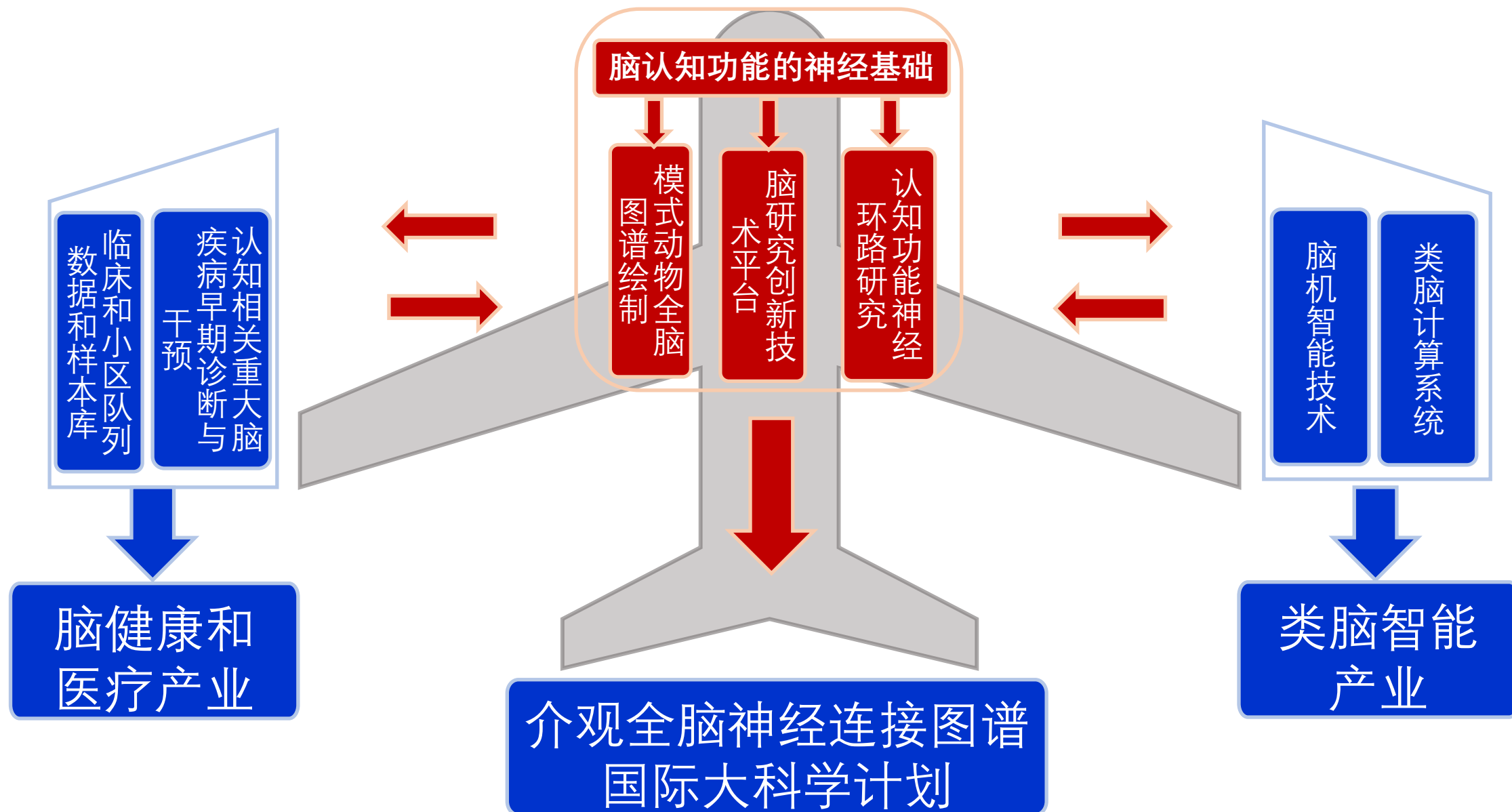
- 2015-



Brain/MINDS

- 2014-

中国脑计划



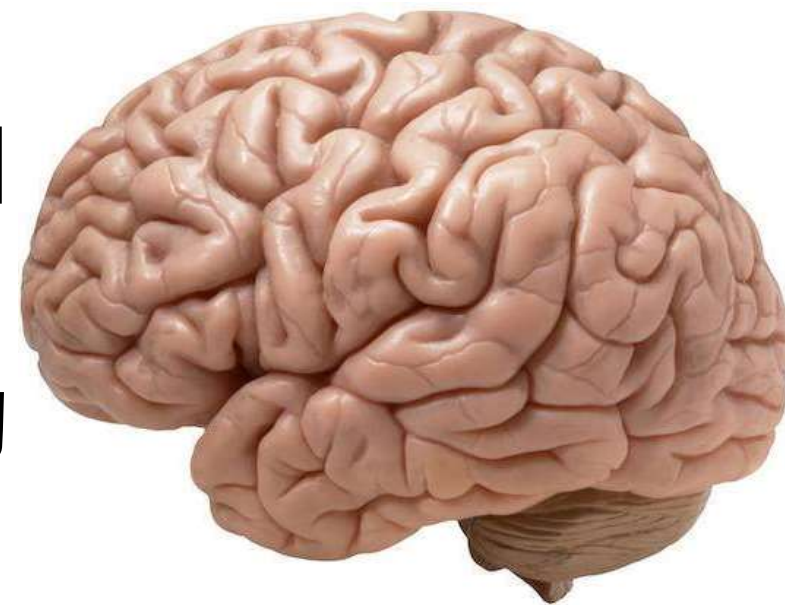
关于大脑

- 大脑是一个复杂的器官，位于头骨内部，管理着我们神经系统的活动
- 是中枢神经系统（CNS）的一部分
- 位于颅腔前部和上部区域，并存在于所有椎骨中
- 脑脊髓液是在颅骨中漂浮的透明液体，从物理和免疫方面保护大脑
- 大脑不是肌肉，不像肌肉一样由肌细胞组成，而是由数百亿个由轴突和树突相互连接的神经元组成的
- 大脑调节身体的每一个功能：从呼吸、吃饭、跑步，到理性、陷入爱情或争论的能力



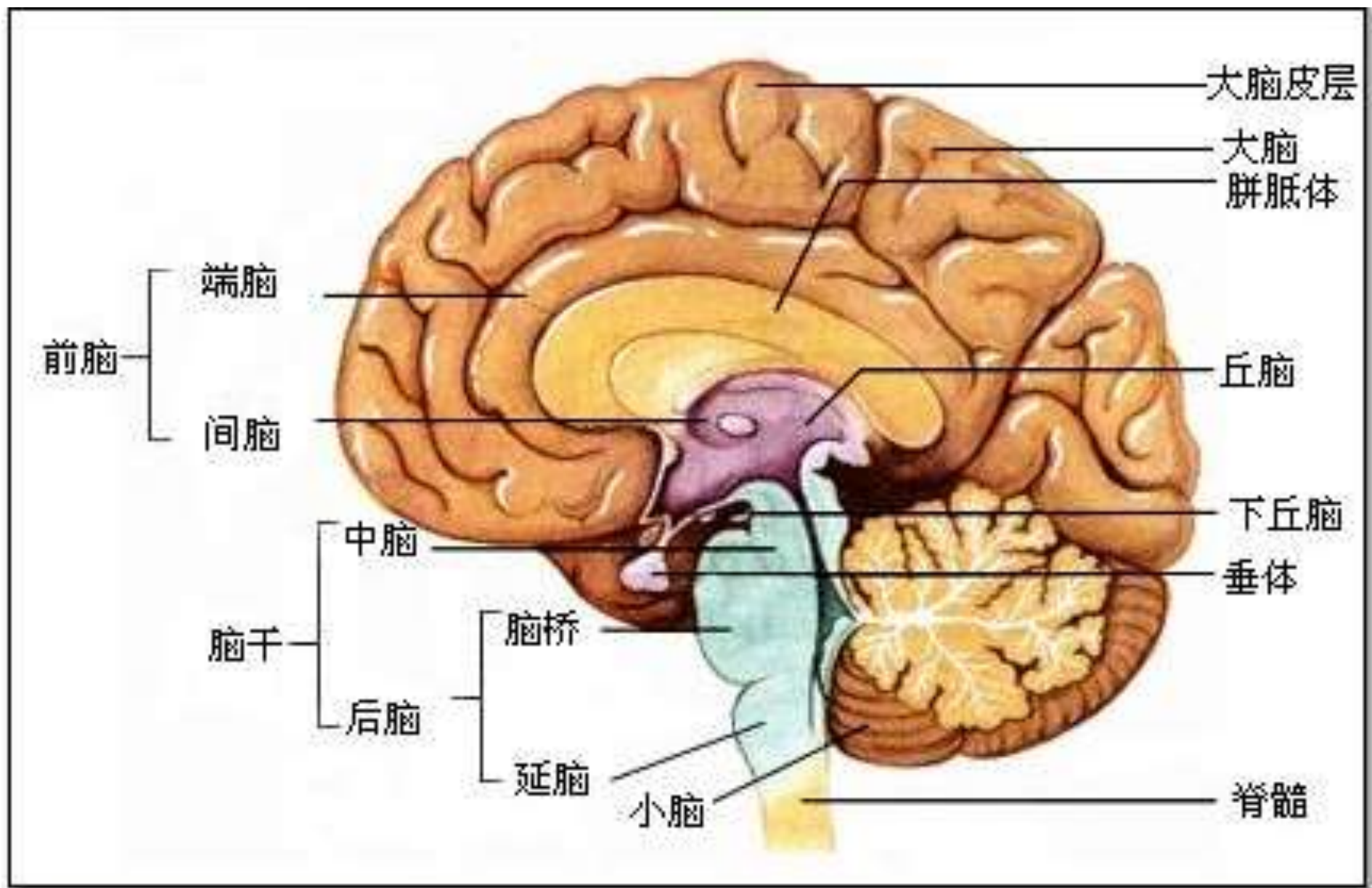
人类大脑

- 人类大脑是所有动物中进化最复杂的
- 更大，会卷起和折叠，在本身形成凹槽和折痕，使其有典型的褶皱外观
- 成人脑通常重1 ~ 1.5千克，体积平均为1600立方厘米

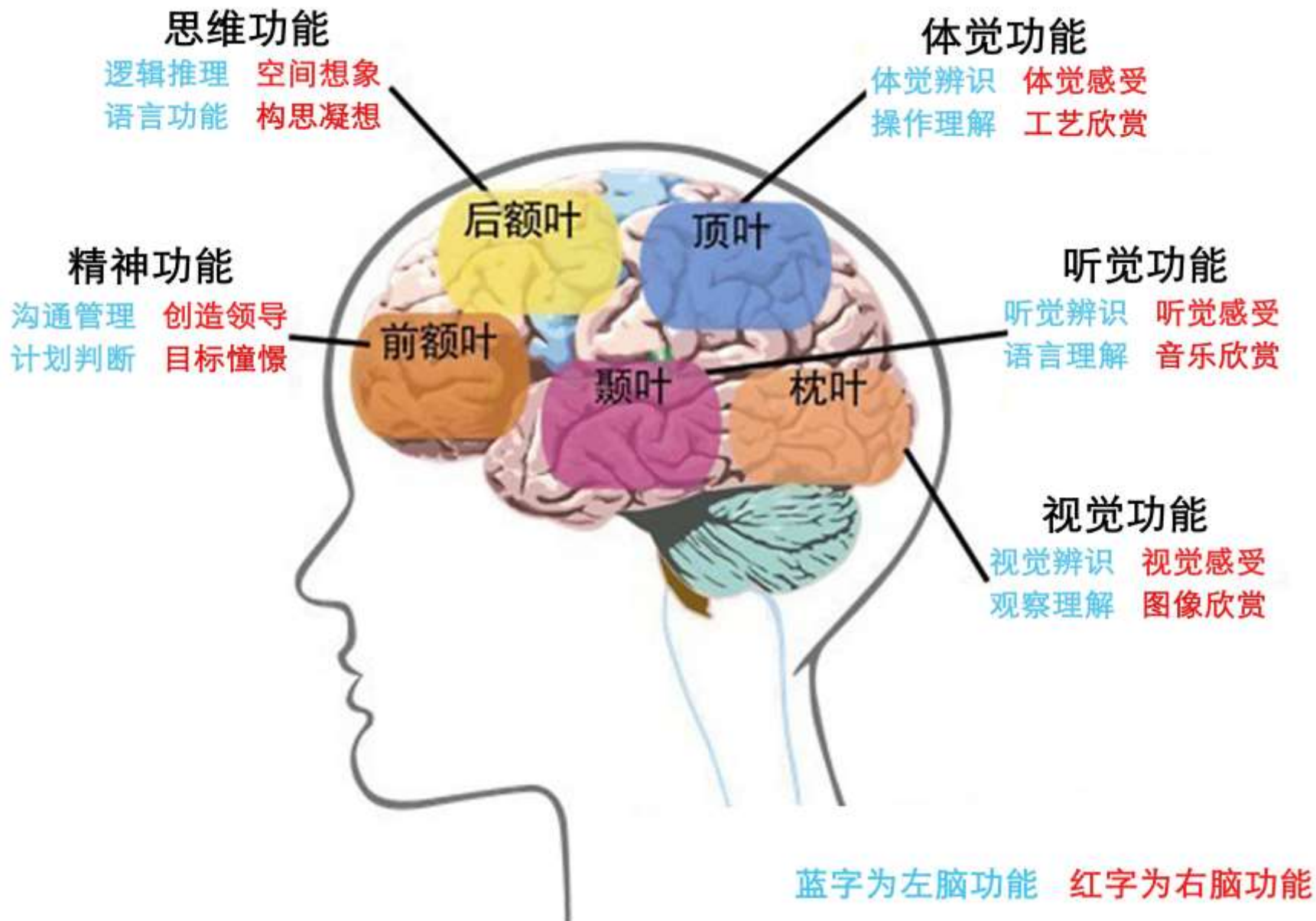


- 人脑有约860 亿个神经元细胞
- 个人的智商与脑的重量间没有必然的联系，而与细胞间连接的数目和有效性有关

大脑结构地图



大脑功能地图

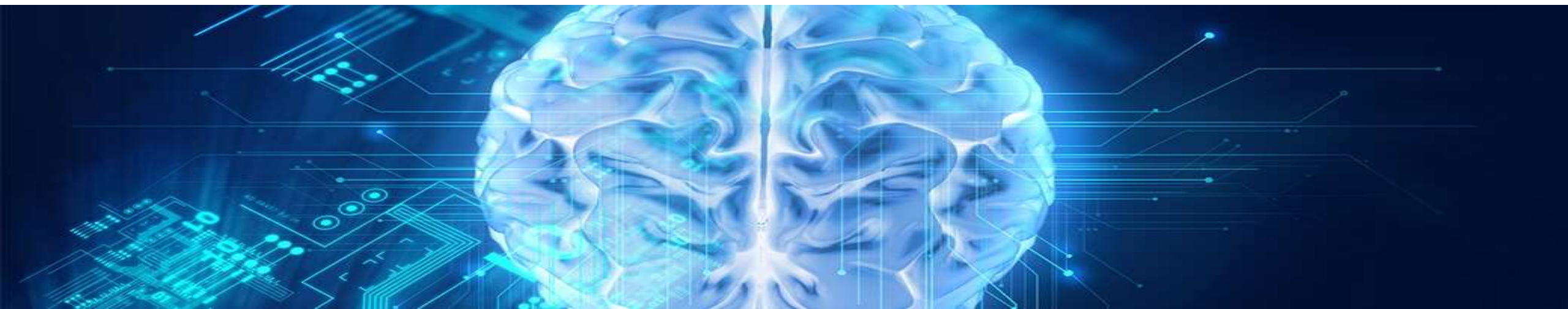


大脑可塑性 (Plasticity)

- 人的大脑具有极强的可塑性，许多功能取决于后天的训练
- 2000年, Sharma等人的实验: 把幼年鼯鼠的视觉神经和听觉神经剪断, 交换后接合: 眼睛接到听觉中枢, 耳朵接到视觉中枢。鼯鼠长大后, 依然发展出了视觉和听觉。这意味着大脑中视觉和听觉的计算方法是通用的
- 2009年, Vuillerme和 Cuisinier为盲人发明了一套装置, 将摄像机的输出表示成二维微电极矩阵, 放在舌头表面。盲人经过一段时间的学习训练, 可以用舌头 “看到” 障碍物
- 2011年, 人们发现许多盲人独自发展出一套 “声纳” 技术, 他们可以通过回声来探测并规避大的障碍物。Thaler等研究表明, 他们 “声纳” 技术采用的并不是听觉中枢, 而是原来被废置的视觉中枢
- 如果大脑某个半球的一个区域受损, 产生功能障碍, 依随时间流逝, 另一半球的对称区域会 “接替” 受损区域, 掌管相应功能
- 种种研究表明, 大脑实际上是一台 “万用学习机器”, 同样的学习机制可以用于完全不同的应用

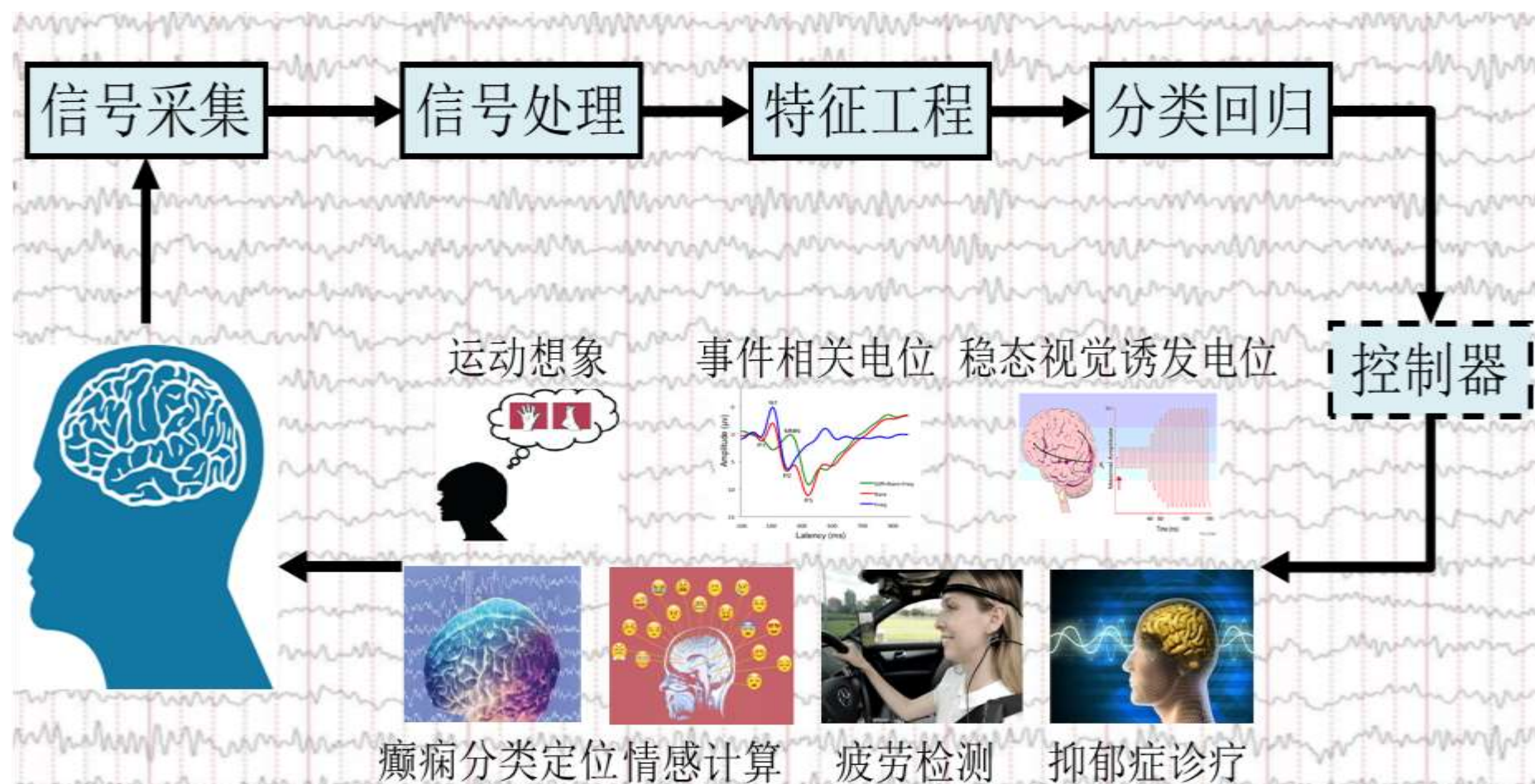
目录

- 大脑基础
- **脑机接口简介**
- 非侵入式脑机接口
- 半侵入式脑机接口
- 侵入式脑机接口

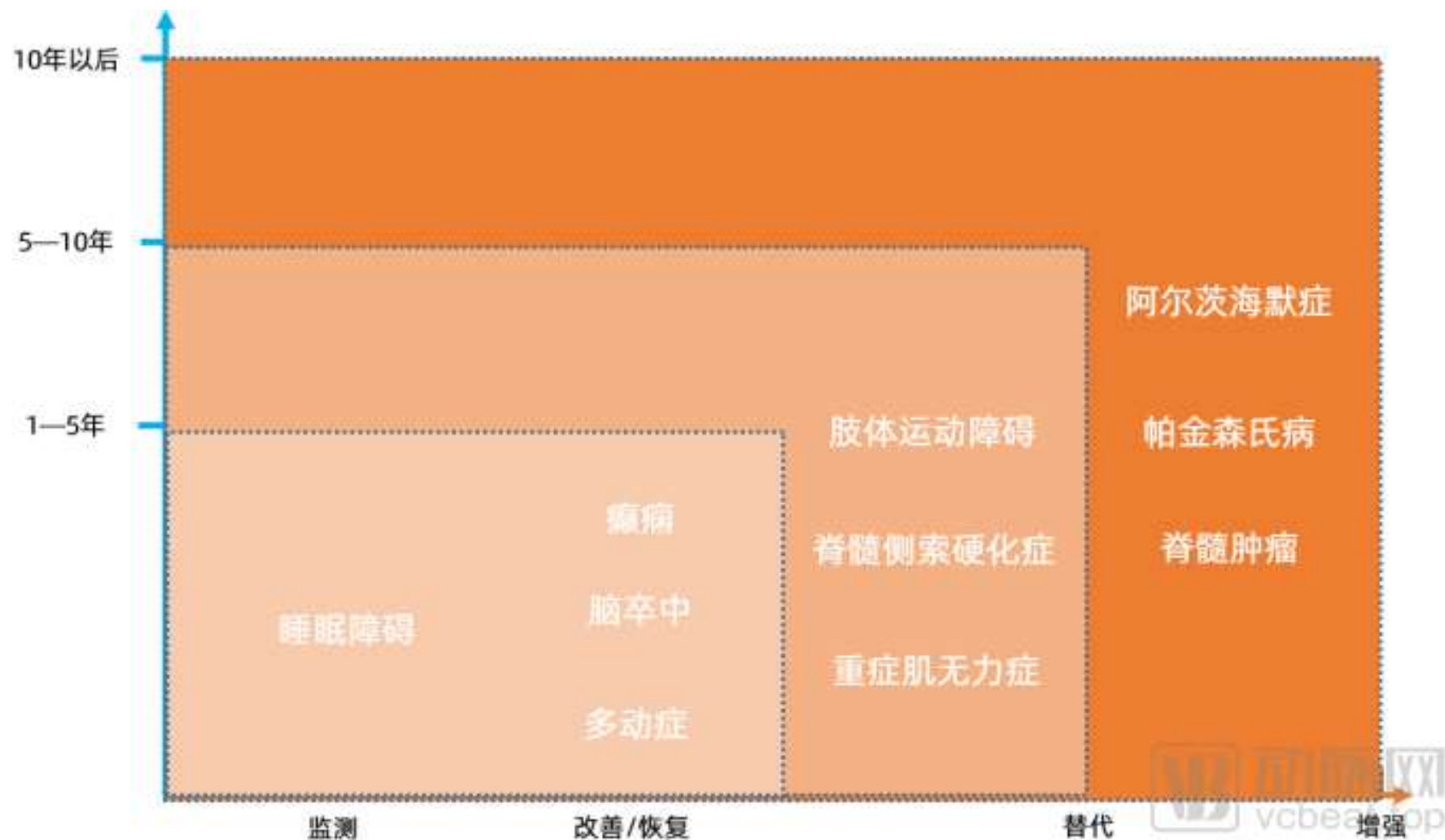


脑机接口 (Brain-Computer Interface, BCI)

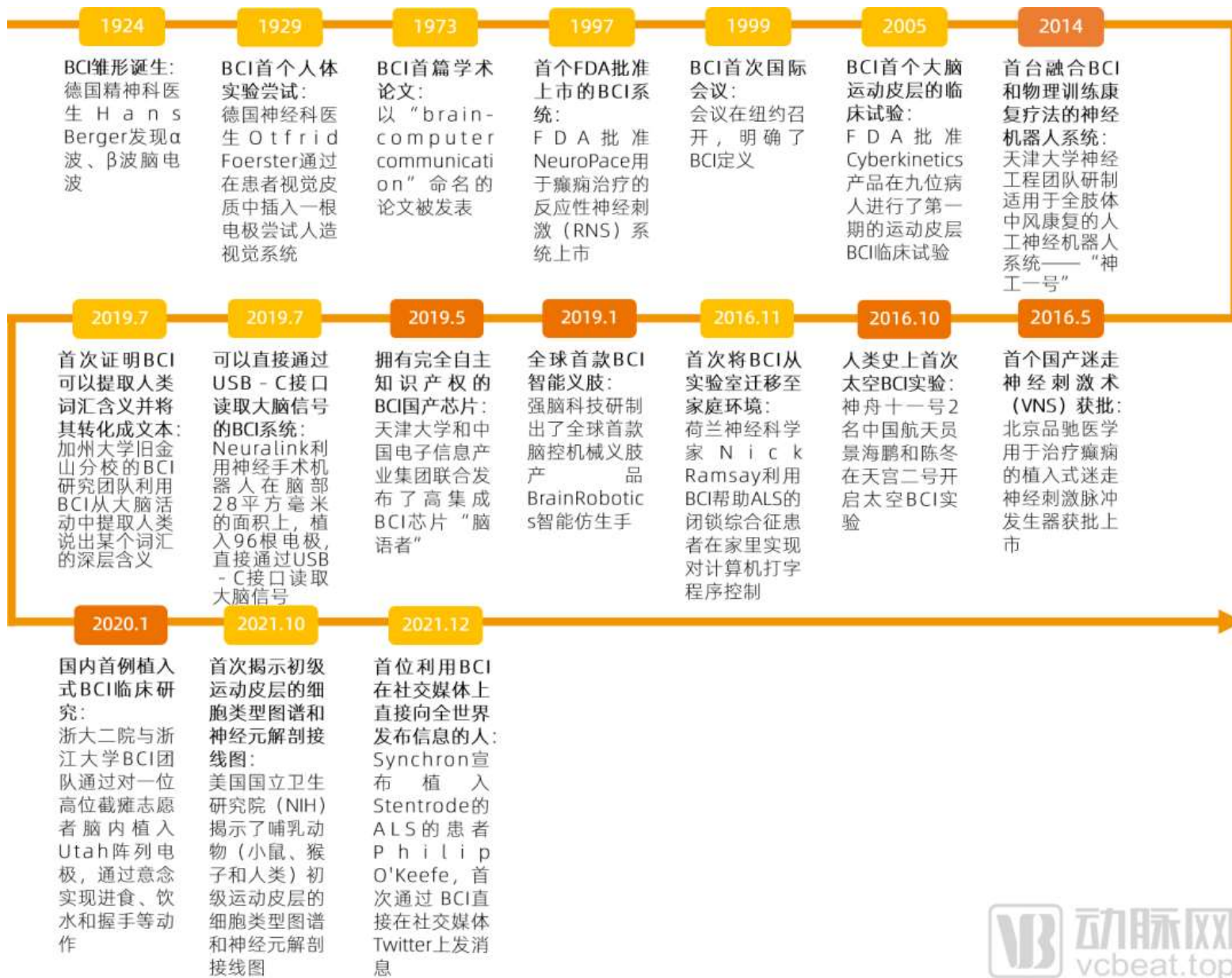
- ◆ 大脑和外部设备的直接交互通道
- ◆ 研究、测绘、帮助、增强或修复人体认知或感觉运动功能



脑机接口 (Brain-Computer Interface, BCI)



脑机接口发展重大事件



早期BCI

- José Manuel Rodríguez Delgado, 耶鲁大学, 1969年: 开发了一种可植入芯片（刺激接收器, stimociever）, 利用无线电刺激大脑, 通过遥测技术发送大脑活动的电信号, 从而控制受控体自由移动
- Delgado公牛实验: 通过遥控器将电刺激信号传递到公牛脑部的基底节区尾状核, 阻止了奔跑中的公牛



BCI名词来历



- UCLA的 Jacques Vidal 教授1973年首次创造了 Brain-Computer Interface (BCI) 这个名词
- Vidal 教授被公认为是 BCI 的发明者

Copyright 1973. All rights reserved

TOWARD DIRECT BRAIN-COMPUTER COMMUNICATION

9027

JACQUES J. VIDAL¹

*Brain Research Institute,
University of California, Los Angeles, California*

Electroencephalographic or EEG signals collected on the human scalp are sustained fluctuations of electrical potential that reflect corresponding variations in the upper layers of the brain cortex below the scalp surface. The signal structure is that of a stochastic time series with almost stationary epochs of various lengths separated by sharper transitions or disruptions. Amplitudes are small (up to a few tens of microvolts) and spectral decomposition reveals that very little power remains at frequencies above 30 Hz. Most of it is contained at very low frequencies (< 1 Hz) and within the narrow bands of specific rhythms (and particularly of the 8–13 Hz alpha rhythm) that appear and disappear somewhat randomly in time. Signals collected on two or more electrodes exhibit changing levels of correlation, due either to physical proximity (that is, sharing of immediate influences from the cortical surface) or to actual coordination between different cortical sites, thus reflecting shared neuron activity within the brain itself. Spectral content and correlation have been related to various emotional and behavioral states.

Imbedded in this sustained “spontaneous” or “ongoing” electrical activity, short, distinctive (0.5–2 sec) waveforms can be found that are evoked, for instance, when a brief sensory message (stimulus) such as a brief illumination of the visual field or a tap on the forearm is received by the subject. These “evoked responses” are small (a few microvolts) and somewhat buried in the ongoing activity. The characteristics of the stimulus determine the evoked potential waveform together with the stimulus “environment,” such as the level of attention of the subject, the “expectation set,” and the meaning of the stimulus in the context of the experiment.

Can these observable electrical brain signals be put to work as carriers of information in man-computer communication or for the purpose of controlling such external apparatus as prosthetic devices or spaceships? Even on the sole basis of the present states of the art of computer science and neurophysiology, one may suggest that such a feat is potentially around the corner.

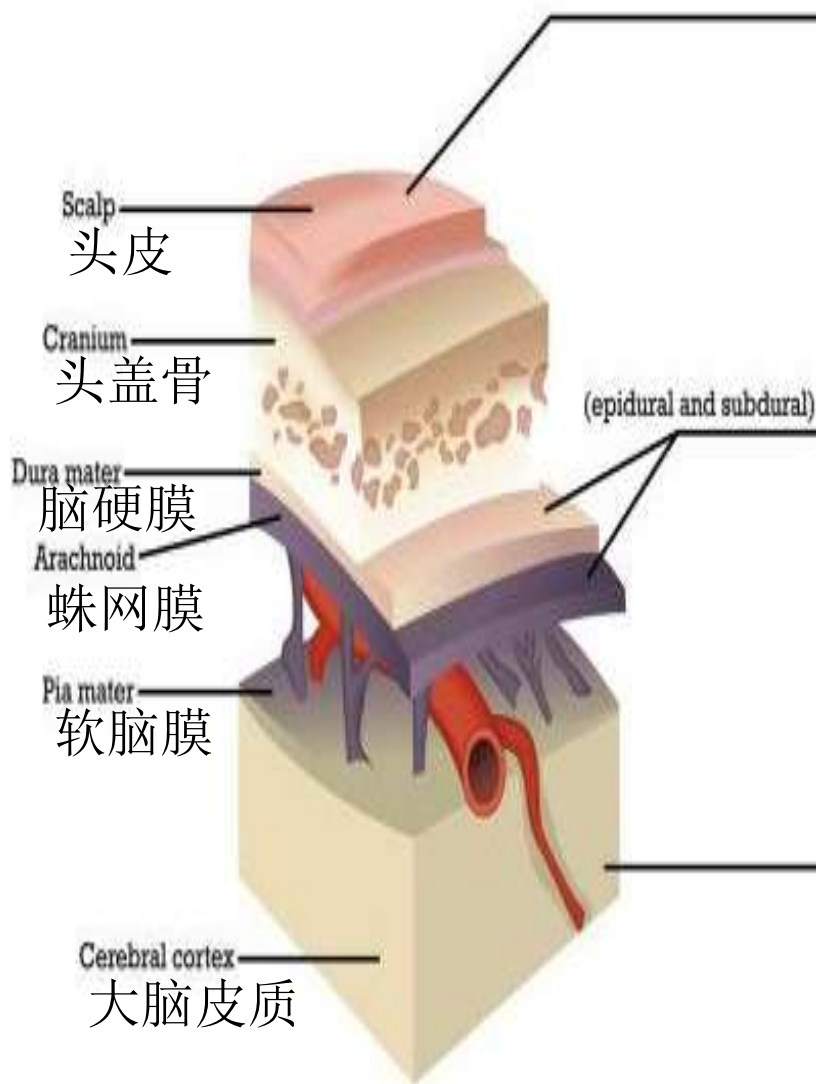
The Brain Computer Interface project, described later in this chapter, was meant to be a first attempt to evaluate the feasibility and practicality of utilizing the brain

¹ Research supported in part by NSF Grants GJ-32221, GK-31463X, and AFOSR 72-2384.

现代BCI实验设置



BCI信号来源



◆ 非侵入式(EEG):

- ✓ 容易穿戴, 无需手术
- ✓ 信号空间分辨率较差
- ✓ 不能有效利用高频信号
- ✓ 使用前需校准

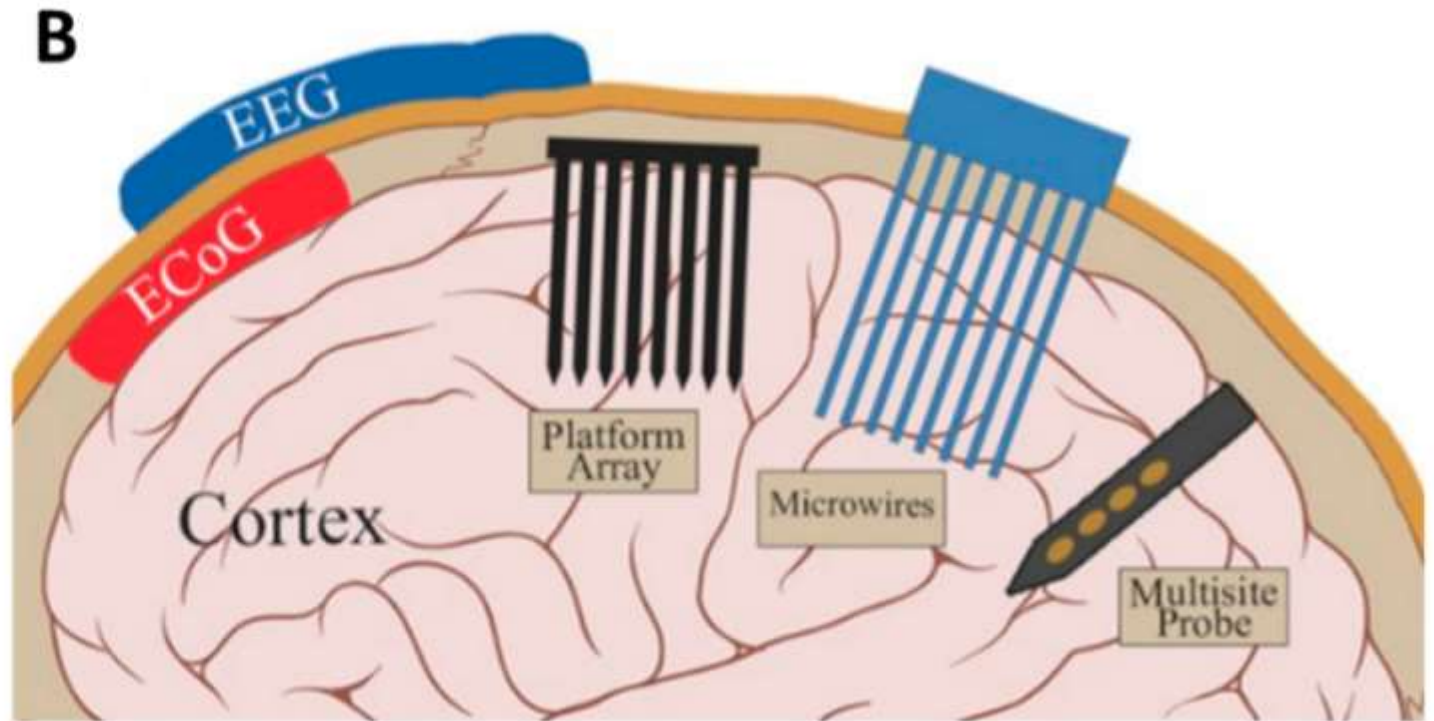
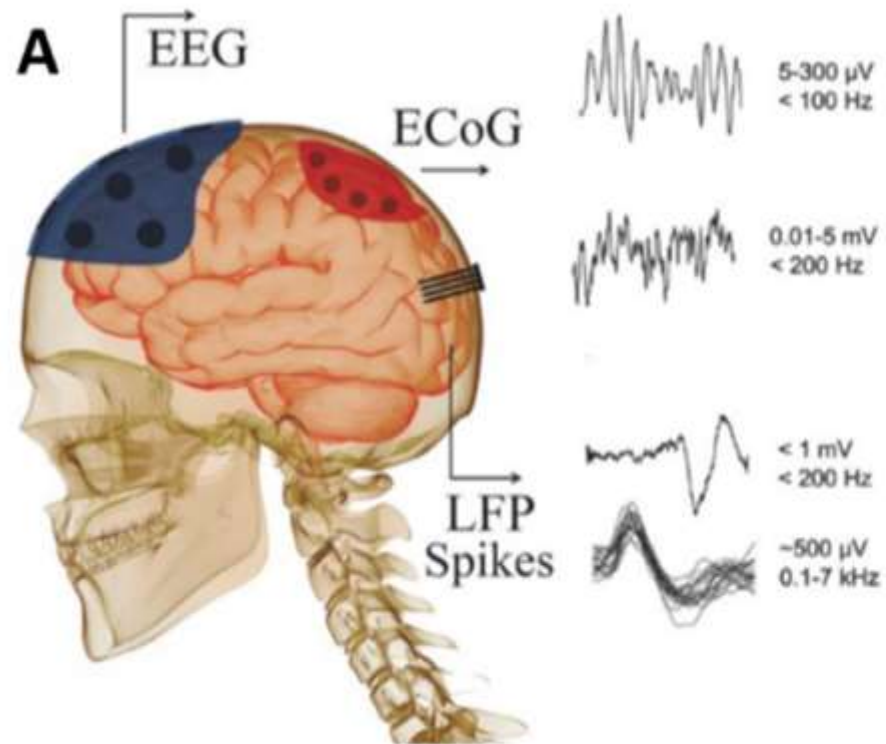
◆ 半侵入式(ECoG):

- ✓ 植入于头盖骨和大脑皮层之间
- ✓ 信号质量介于非侵入式和侵入式之间
- ✓ 手术风险比侵入式小

◆ 侵入式:

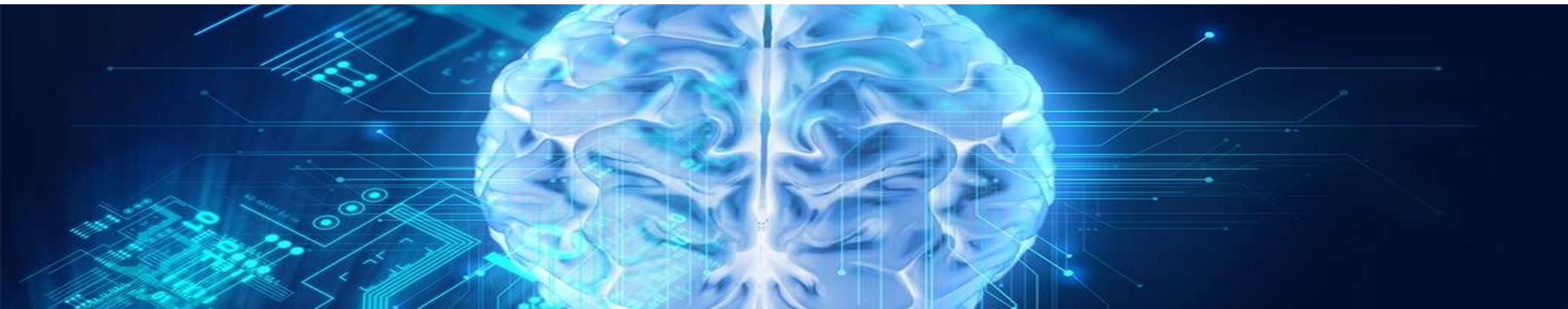
- ✓ 恢复视觉、听觉、肢体运动
- ✓ 植入大脑皮层

BCI信号来源



目录

- 大脑基础
- 脑机接口简介
- **非侵入式脑机接口**
- 半侵入式脑机接口
- 侵入式脑机接口



非侵入式BCI信号：头皮脑电图 (EEG)

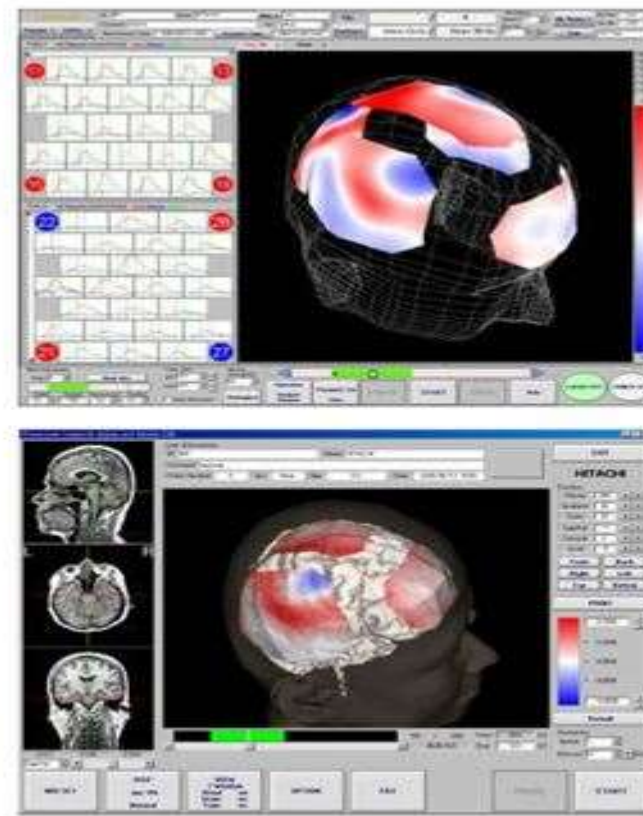
- 通过脑电帽，将人体脑部自身产生的微弱生物电于头皮处收集，并放大记录而得到的曲线图
- 脑电图测量来自大脑中神经元的离子电流产生的电压波动
- 无法检测电流起源的深度
- 空间分辨率：几厘米；时间分辨率：毫秒；电压：几十微伏



非侵入式BCI信号：功能性近红外光谱技术

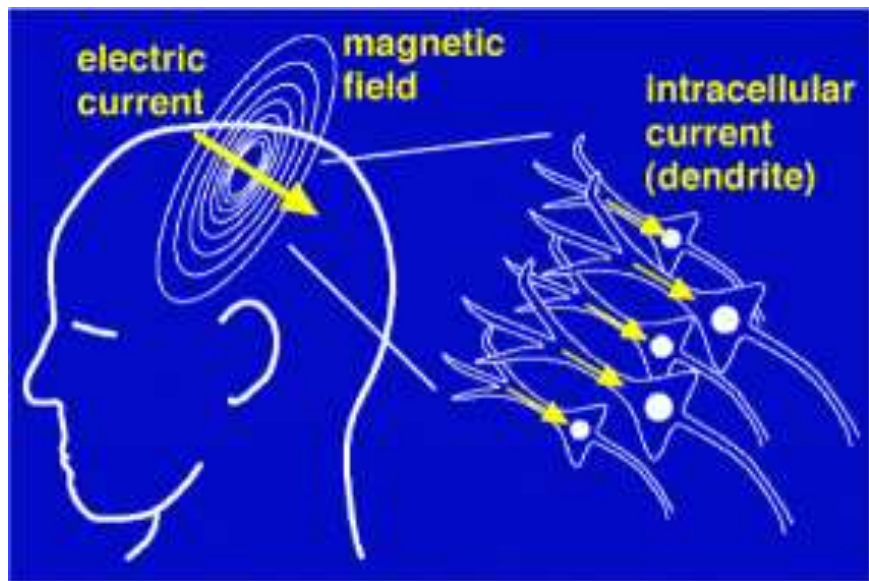
(functional near-infrared spectroscopy , fNIRS)

- 利用血液的主要成分对600—900nm近红外光良好的散射性，从而获得大脑活动时氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的变化情况
- 只能检测靠近颅骨（几厘米）的神经元活动。不易受肌电影响
- 用于自然情境下的高级认知、发展心理学、异常心理学等研究



非侵入式BCI信号：脑磁图 (Magnetoencephalography, MEG)

- 测量脑的神经活动时产生的电信号所产生的磁信号
- 地球磁场强度为0.00005特斯拉，而脑磁场强度是地球磁场强度的亿万分之一



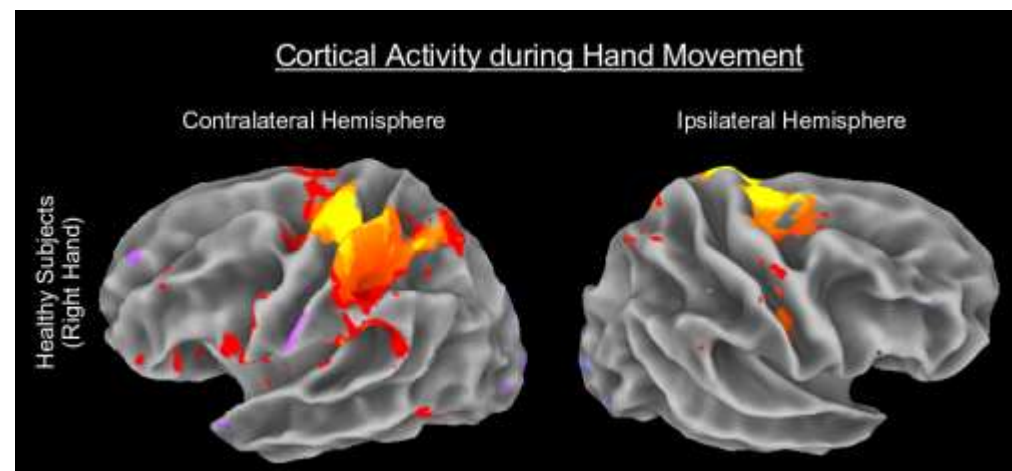
- **应用：**
 - 大脑感觉和认知的基础研究
 - 术前病理区域定位
 - 神经反馈



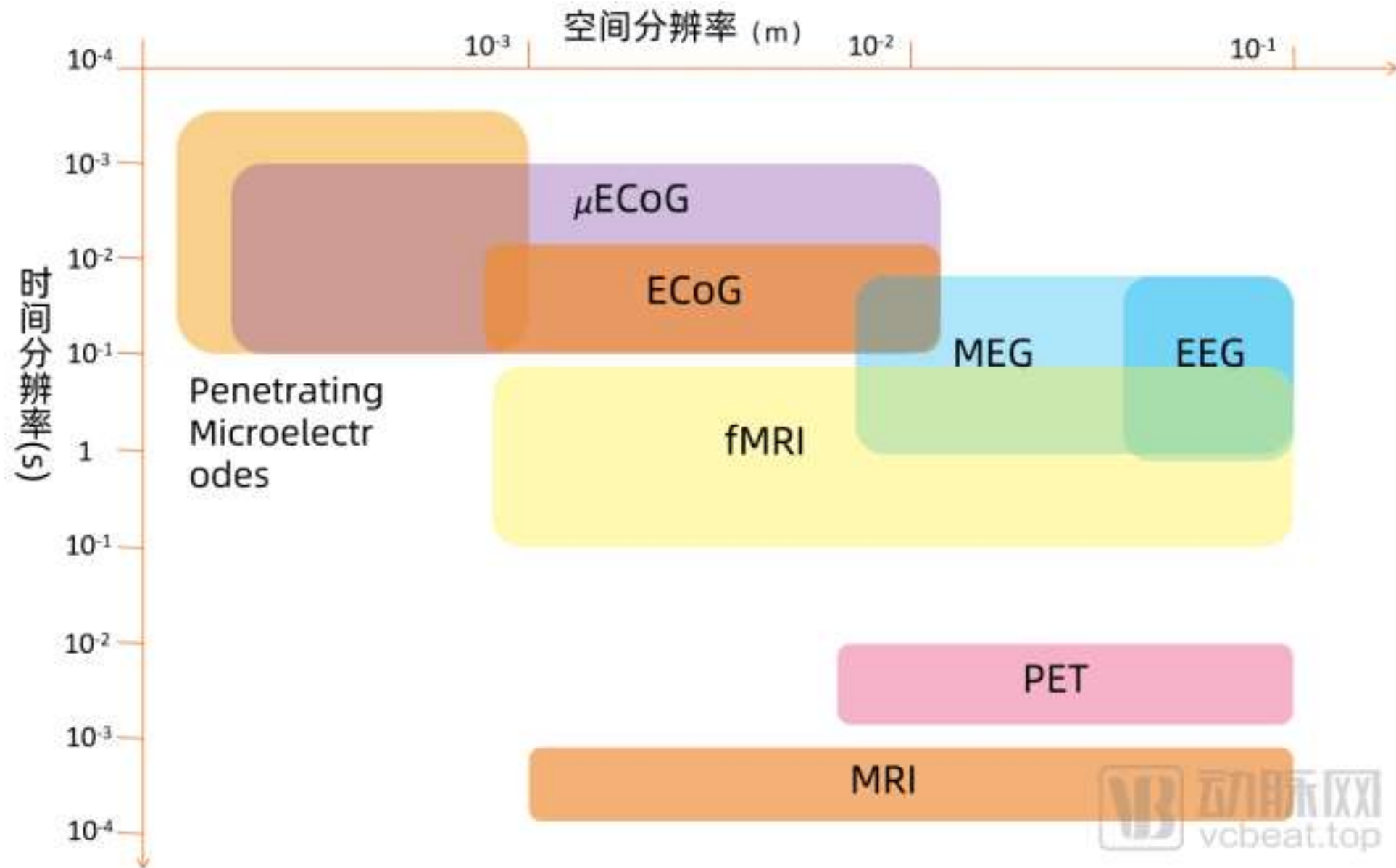
非侵入式BCI信号：功能磁共振成像

(Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)

- 利用磁共振造影来测量神经元活动所引发之血液动力的改变
- 大脑内部的血液流动和神经激发耦合：大脑活动强烈的区域，血流量也增加
- 空间解析度：毫米
- 时间解析度：秒
- **应用：**
 - ✓ 评估大脑手术风险
 - ✓ 研究正常或病变或受伤大脑如何工作



不同信号时空分辨率比较



运动想象应用：无人机控制

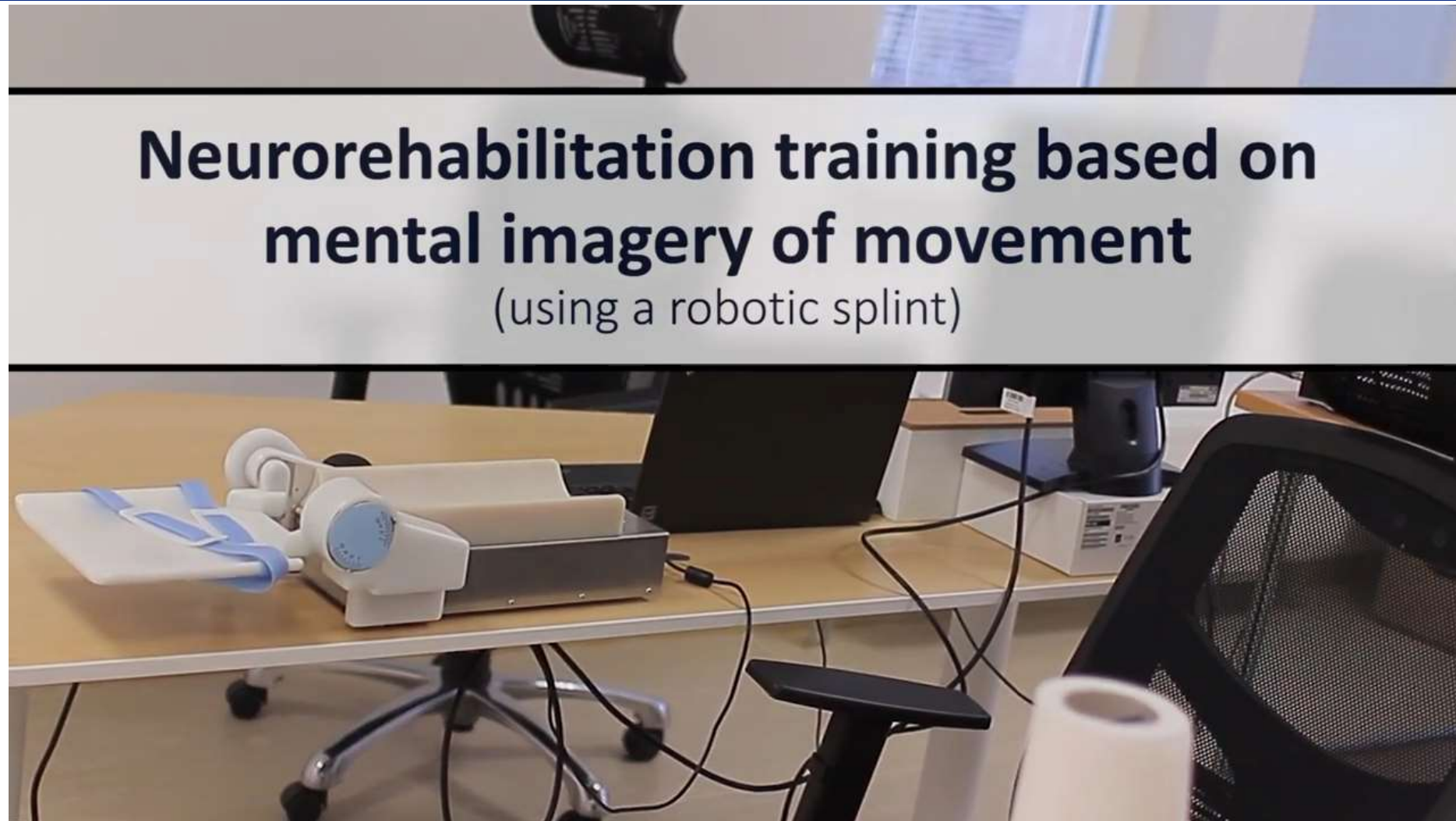


Bin He, University of Minnesota

运动想象应用：中风康复



运动想象应用：中风康复



北京天坛医院：招募296例缺血性脑卒中患者，随机分配到脑机接口组($n=150$) 和对照组($n=146$)；从基线到1个月时FMA-UE评分变化的主要疗效指标，脑机接口组13.17分，对照组9.83分，平均差异**3.35**分，提升**34%**

SSVEP应用：文字输入 (2)

noninvasive **High-Speed Spelling with a Noninvasive Brain-Computer Interface**

Xiaogang Chen, Yijun Wang, Masaki Nakanishi, Xiaorong
Gao, Tzyy-Ping Jung and Shangkai Gao
Tsinghua University, Beijing, China
University of California, San Diego
Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

Published in *Proc. of the National Academy of Sciences (PNAS)*
of the USA, 2015. Email: wangyj@semi.ac.cn

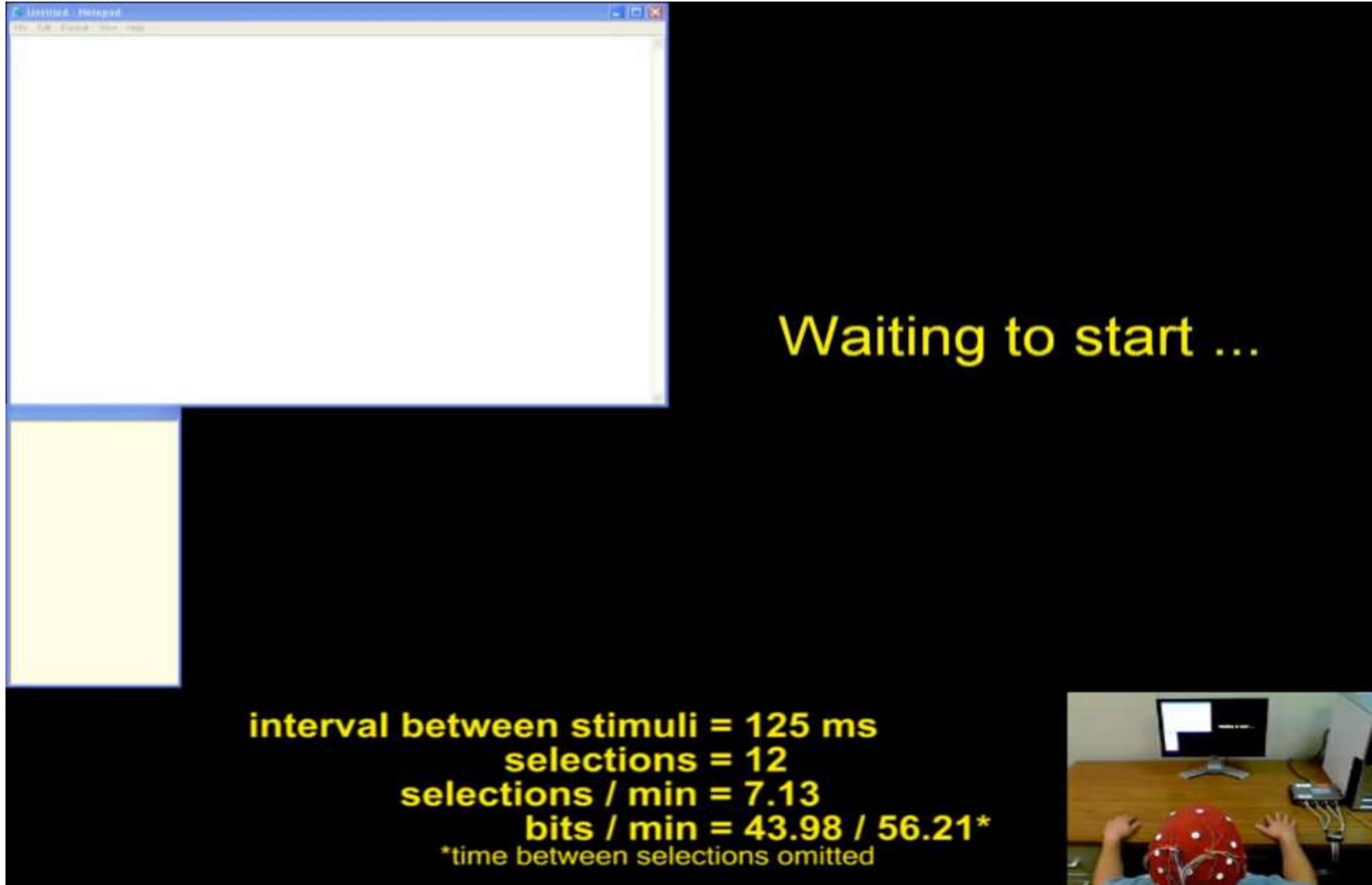
Tsinghua, UCSD, CAS, 2015

SSVEP应用：小车控制

脑控无人车

华中科技大学

P300应用：文字输入 (2)



The image shows a computer screen with a black background. On the left, there is a white rectangular area representing a text input field, with a smaller yellow rectangular area below it. To the right of the white area, the text "Waiting to start ..." is displayed in yellow. At the bottom left, the following text is shown in yellow: "interval between stimuli = 125 ms", "selections = 12", "selections / min = 7.13", "bits / min = 43.98 / 56.21*", and "*time between selections omitted". In the bottom right corner, there is a small inset video showing a person wearing a red EEG cap with white electrodes, sitting at a desk with a computer monitor and keyboard.

Waiting to start ...

interval between stimuli = 125 ms
selections = 12
selections / min = 7.13
bits / min = 43.98 / 56.21*
*time between selections omitted

BCI应用：疲劳状态监测



SmartCap, Australia

BCI应用：游戏



MindFlex, USA

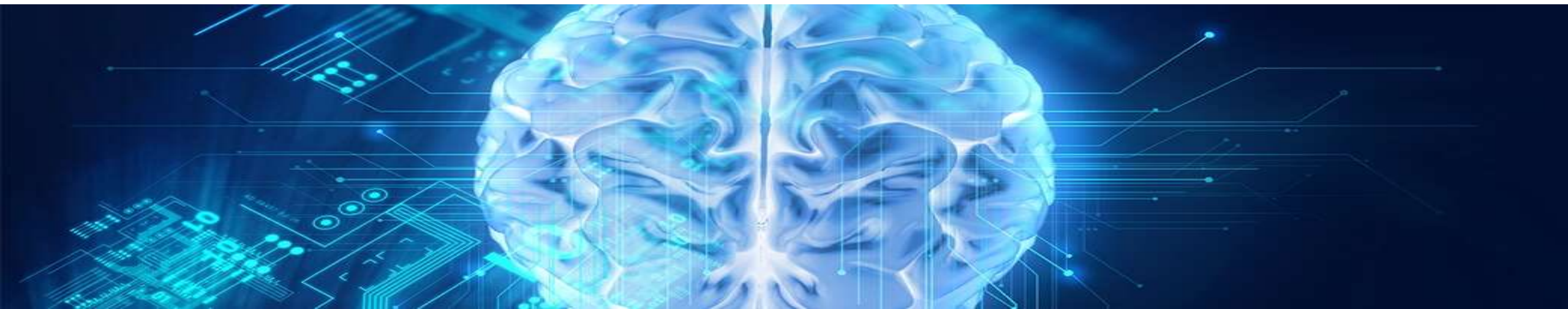
BCI应用：fMRI视觉重构



Jack Gallant, UC Berkeley

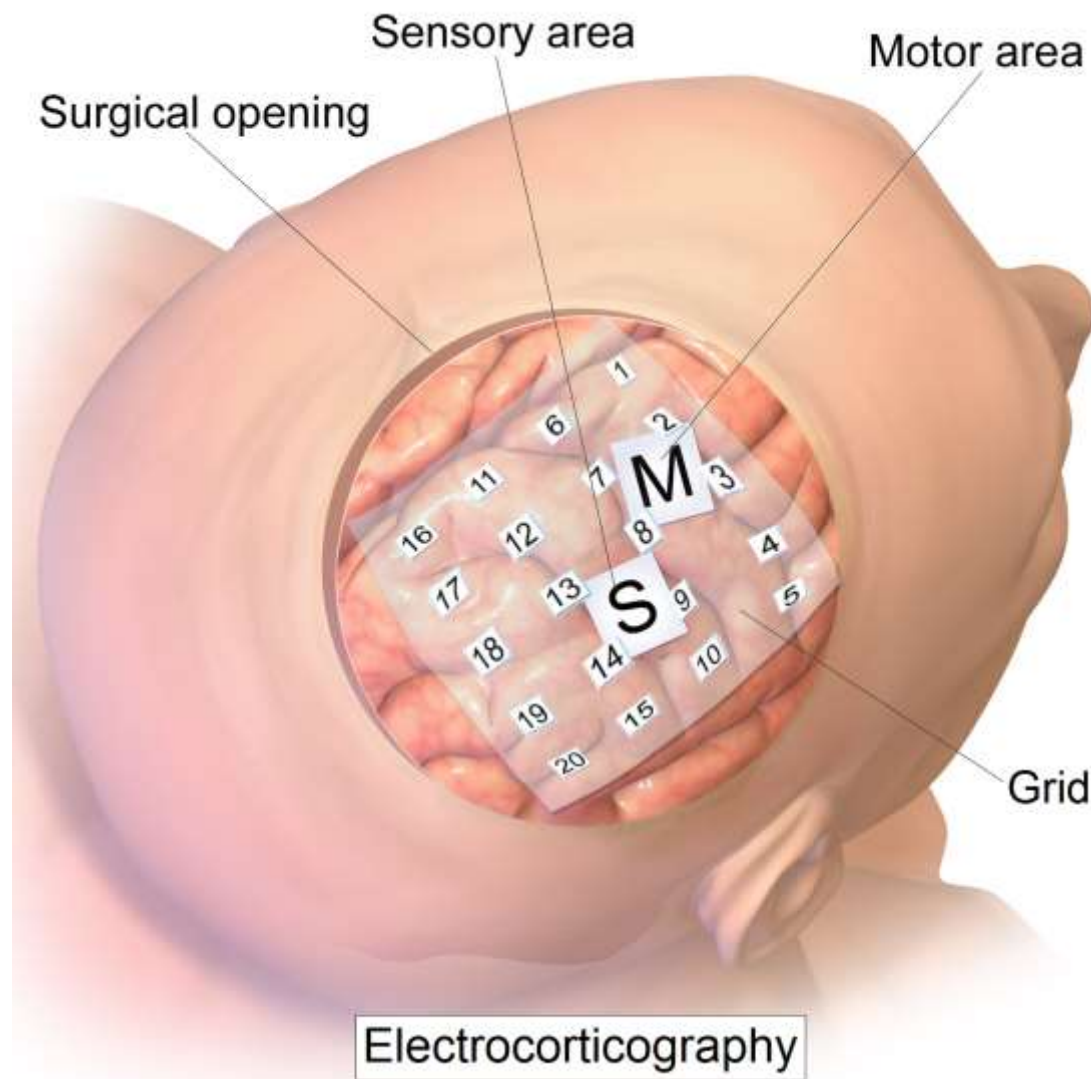
目录

- 大脑基础
- 脑机接口简介
- 非侵入式脑机接口
- **半侵入式脑机接口**
- 侵入式脑机接口

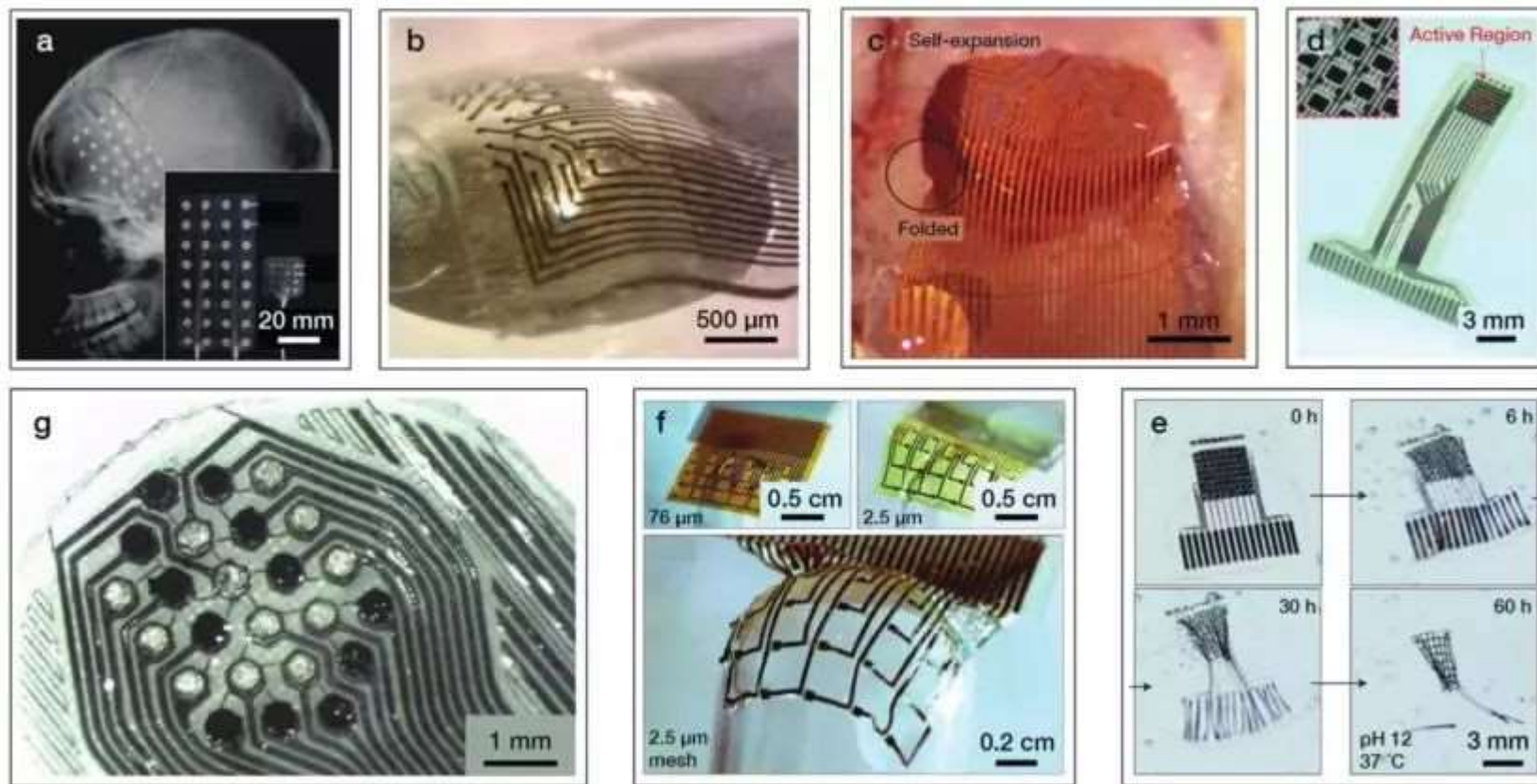


半侵入式大脑信号：皮层脑电图 (Electrocorticography, ECoG)

- 用直接放置在大脑皮层上的电极来记录脑电信号
- 空间解析度：<1毫米
- 时间解析度：<1毫秒
- 可用带宽：1-200Hz
- 电压幅值：50-100 微伏
- 应用：
 - ✓ 术前癫痫发作区域定位
 - ✓ 癫痫手术效果预测
 - ✓ 大脑皮层功能研究



ECoG电极



- a) 标准商用ECoG阵列与微型ECoG阵列的比较 (Ad-Tech公司)
- b) 微ECoG阵列与曲线表面贴合
- c) 微ECoG阵列展开并自扩张在大鼠脑的皮质表面上
- d) 生物可吸收单晶硅纳米膜micro-ECoG阵列
- e) 逐渐溶解在pH=12缓冲液中的d)
- f) 由可溶解的丝素蛋白膜制成的适形ECoG阵列
- g) 铂金涂层PEDOT: pTS电极 (深色) 和裸铂电极 (浅色) 的多材料阵列

半侵入式脑机接口应用：重构所听



Pasley, B.N., David, S.V., Mesgarani, N., Flinker, A., Shamma, S.A., Crone, N.E., Knight, R.T. and Chang, E.F.. Reconstructing speech from human auditory cortex. PLoS Biology, 2012.

半侵入式脑机接口应用：重构所说



Chang, E.F. and Anumanchipalli, G.K.. Toward a speech neuroprosthesis. JAMA, 2020

半侵入式脑机接口应用：重构所想



Metzger, S.L., Liu, J.R., Moses, D.A. et al. Generalizable spelling using a speech neuroprosthesis in an individual with severe limb and vocal paralysis. Nat Commun 13, 6510 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33611-3>

ECoG应用：运动功能和触觉恢复



Ohio State University, 2020

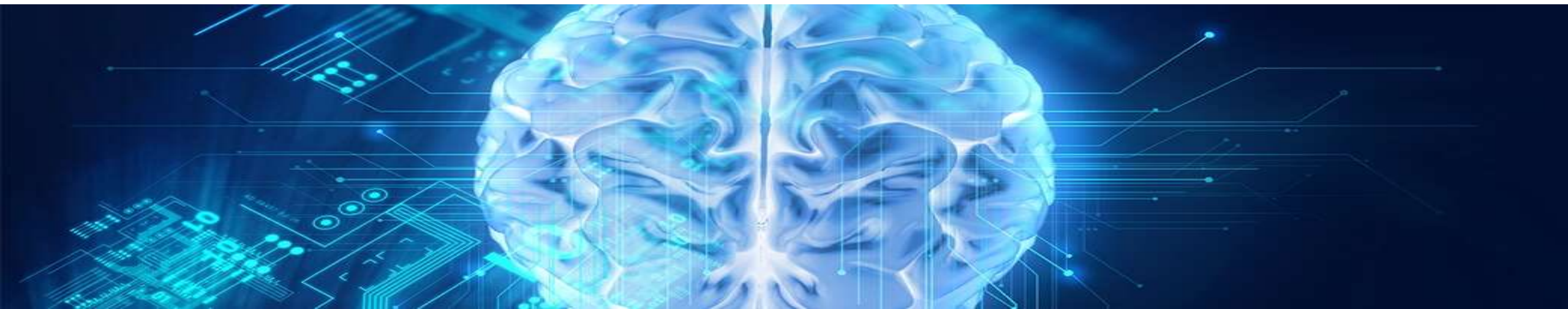
应用：运动功能恢复



Lorach, H., Galvez, A., Spagnolo, V. et al. Walking naturally after spinal cord injury using a brain–spine interface. *Nature* 618, 126–133 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06094-5>.

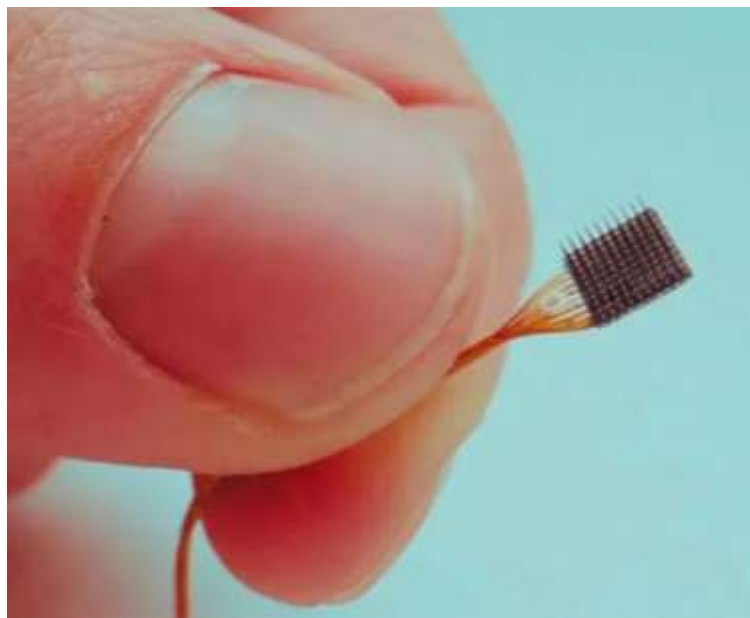
目录

- 大脑基础
- 脑机接口简介
- 非侵入式脑机接口
- 半侵入式脑机接口
- **侵入式脑机接口**

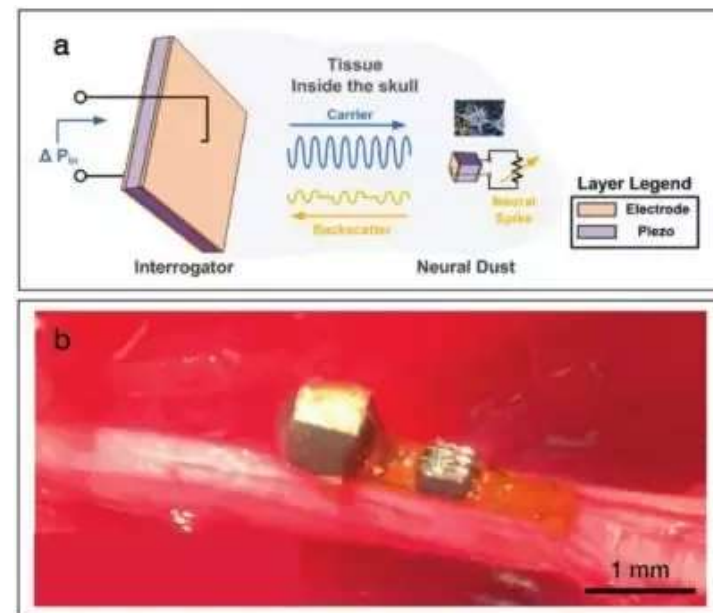
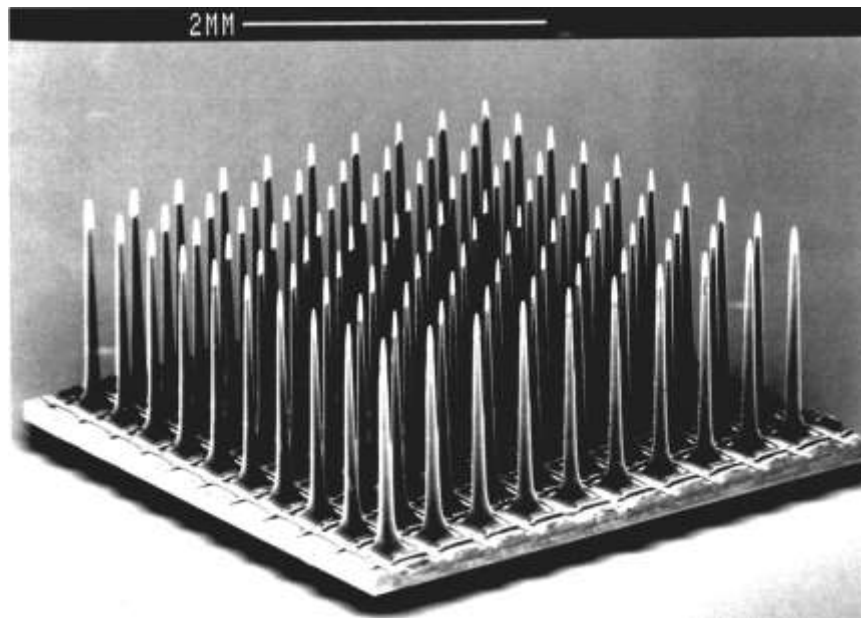


侵入式BCI信号采集设备

- 修复视力、听觉或运动功能
- 通过手术直接植入脑灰质
- 信号质量优于 EEG 和 ECoG
- 人体因排异反应在电极附近结痂，导致信号质量下降



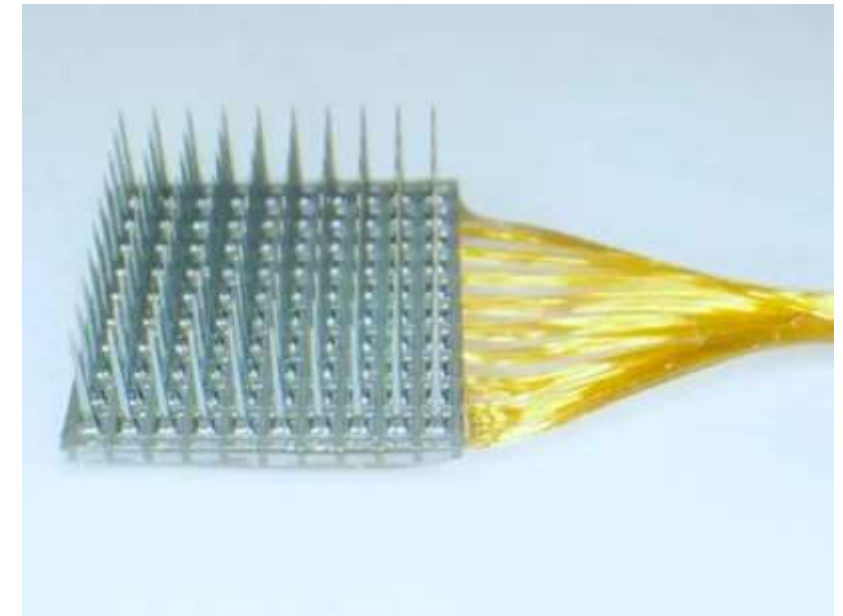
犹他阵列 Utah Array



神经粉尘 Neuro dust

Utah Array

- 犹他大学 Richard Normann 为了应用于视觉假体而发明的高通道数微电极阵列
- 迄今为止唯一获得 FDA 批准的高通道微电极平台
- 已在数十名患者构成的样本中进行了总计超过 30,000 天的研究
- 可记录来自单个神经元的信号，继而给各种商业化的应用提供基础
- 拥有通过手术将犹他阵列植入瘫痪患者的脑组织并维持正常工作长达八年记录
- 每个植入物 100 个有源电极通道；可定制多达 1,024 个通道
- 典型配置包括四到六个设备（400-600 个电极）
- 能够可靠地从单个神经元和高分辨率信号的总和中获取信号
- 用于急性或慢性记录的各种连接器类型
- 电极部位金属选项：氧化铱或铂
- 标准电极长度：0.5-1.5 mm（研究）或 1.0-1.5 mm（临床）



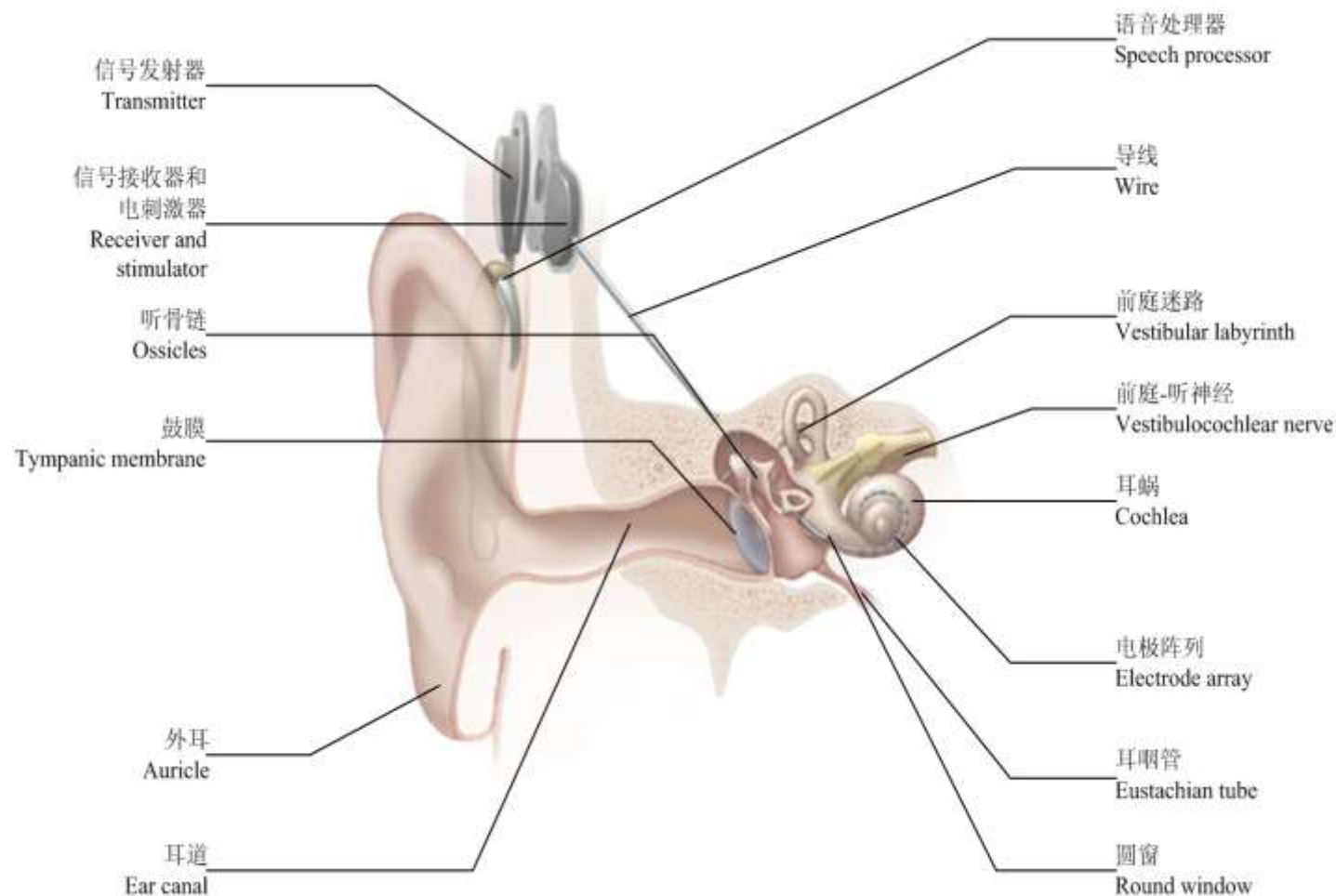
应用：人工耳蜗（1）

- 一种植入式听觉辅助设备，使重度失聪的病人（聋人）产生一定的声音知觉
- 与助听器等听觉辅助设备不同，人工耳蜗的工作原理不是放大声音，而是对位于耳蜗内、功能尚完好的听神经施加脉冲电刺激

- 截止2020年底，已有80万例手术
- 大多数人工耳蜗设备由植入部分和体外部分组成：

✓**体外部分：**麦克风、语音处理器、向植入部分发送指令的信号发射器

✓**植入部分：**信号接收及解码模块、刺激电极阵列



应用：人工耳蜗（2）



Advanced Bionics®

应用：视觉恢复 (1)

- 视觉脑机接口方面的一位先驱是William Dobelle。他的皮层视觉脑机接口主要用于后天失明的病人
- 1978年，Dobelle在一位男性盲人Jerry的视觉皮层植入了68个电极的阵列，并成功制造了光幻视。病人可以在有限的视野内看到灰度调制的低分辨率、低刷新率点阵图像。该视觉假体系统是便携式的，病人可以无需医师帮助独立使用
- 2002年，Jens Naumann成为了接受Dobelle的第二代皮层视觉假体植入的16位病人中的第一位。第二代皮层视觉假体的特点是能将光幻视更好地映射到视野，创建更稳定均一的视觉。其光幻视点阵覆盖的视野更大。接受植入后不久，Jens就可以自己在研究中心附近慢速驾车漫游



应用：视觉恢复 (2)



William Dobelle, 2002

应用：视觉重建



Yang Dan, UC Berkeley, 1999

应用：运动控制



Schwartz lab, University of Pittsburgh, 2008

应用：行为增强



浙江大学，2020

应用：NeuraLink

- ❑ 2019 年，NeuraLink 推出了第一个植入式脑机接口设备，将1024根电极线植入至大脑，采集大脑活动电信号，再无线传输到设备
- ❑ 2020 年，NeuraLink 公布了硬币大小、电池供电的 N1 芯片植入计划，即一个可置于人类颅顶部位的设备，通过植入方式与人脑连接，使脑机之间获得实时传输能力。同时还展示了其成功采集到的猪脑电信号
- ❑ 2021 年，NeuraLink展示了植入脑机接口的猴子玩乒乓球电子游戏
- ❑ 2022 年 12 月，NeuraLink 展示了植入脑机接口的猴子意念打字
- ❑ 2024 年 3 月，NeuraLink 让四肢瘫痪8年的患者利用脑机接口在屏幕上移动计算机光标来打开和关闭音乐流、玩在线国际象棋、电子游戏《文明 6》



订阅

Long-term, it is possible to shunt the signals from the brain motor cortex past the damaged part of the spine to enable people to walk again and use their arms normally

由 Google 翻译自 英语

从长远来看，可以将来自大脑运动皮层的信号分流到脊柱受损部分，使人们能够再次行走并正常使用手臂

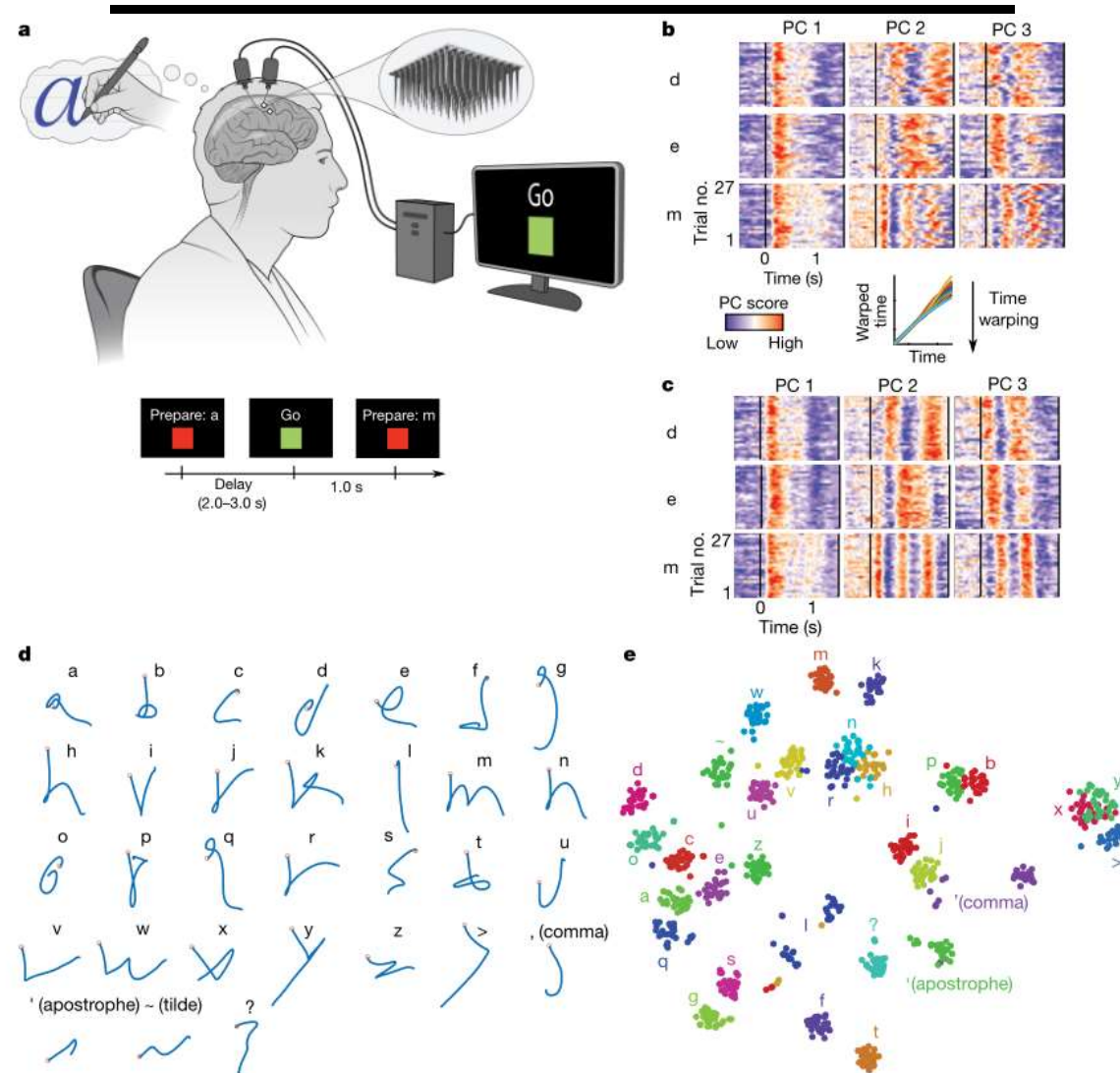


应用：NeuraLink



Elon Musk, NeuraLink, 2021

应用：文字输入



Willett, F.R., Avansino, D.T., Hochberg, L.R. et al. High-performance brain-to-text communication via handwriting. *Nature* 593, 249–254 (2021).

应用: Synchron

"The future of communication is brain-computer interfaces.
With the tools of this new technological revolution
we can make human life better."

- Stephen Hawking 2018

脑机接口：未来



当地时间5月7日 马斯克在Joe Rogan采访中称
脑机接口将在一年内植入人脑 进行人体试验

目前脑机还没有进入人体试验阶段

Elon Musk, NeuraLink, 2020

华中科技大学 脑机接口与机器学习实验室

科学问题

精准、安全、隐私保护的无创脑机接口系统

现状

解码不精准

用户脑电个体差异大
个性化校准费时费力

安全待探究

脑电对抗攻击危害大
安全防御策略研究少

隐私易泄露

脑电包含隐私信息多
隐私保护法律要求严



挑战

实现高效精准解码

确保系统安全可靠

保护用户隐私信息

学术成果

单用户
封闭场景

精准解码

- 数据对齐
- 迁移学习

单用户
开放场景

对抗安全

- 对抗攻击
- 安全防御

多用户
开放场景

隐私保护

- 隐私风险
- 隐私保护



中国脑机接口比赛全国总冠军、教育部青年科学奖、中国自动化学会自然科学一等奖、中国自动化学会青年科学家奖、IEEE SMC 学会青年科学家奖、IEEE Fellow

华中科技大学 脑机接口与机器学习实验室

言语想象脑机接口：通过脑电信号直接解码用户言语



帮助严重语言障碍病人 (肌萎缩侧索硬化症、闭锁综合征等)
恢复**基本语言沟通**能力和**控制外部设备**能力



智能家居



无声通信



华中科技大学

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



脑机接口与机器学习实验室

BRAIN-COMPUTER INTERFACE AND MACHINE LEARNING LABORATORY

敬请批评指正！

伍冬睿

华中科技大学 人工智能与自动化学院

脑机接口与机器学习实验室

