



脑机接口 50 年：从科幻概念到产业落地

● 高小榕

口的早期科幻描绘。

1946年，世界上第一台通用计算机“ENIAC”在美国宾夕法尼亚大学诞生。在随后的数十年，计算机科学为数字信号处理与人工智能的发展提供了基础。1969年，德国教授埃伯哈德·埃里希·费兹利用操作性条件反射原理，验证了灵长类动物运动皮质中单个神经元的活动能对控制模拟仪表盘指针产生条件反射，这是在脑机接口概念形成之前最早的脑机接口实践。

1973年，美国加州大学洛杉矶分校的计算机科学家雅克·维达尔在发表的论文中认为，放置在头皮上的电极可以检测到从人脑发出的实时信号，并预测随着神经科学家更好地理解神经活动，脑电信号有望用作计算机的控制信号。在该论文中，雅克·维达尔首次提出脑机接口的概念，并尝试让志愿者在电脑游戏中使用他们的脑电信号向宇宙飞船发射导弹。雅克·维达尔这项开创性工作标志着脑机接口概念与研究的诞生。

脑机接口研究的早期探索

脑机接口研究先驱在 20 世纪的前期工作为脑机接口研究奠定了重要的基础。1977年，雅克·维达尔开发了基于视觉事件相关电位的脑机接口系统，

通过注视同一视觉刺激的不同位置实现了对 4 种控制指令的选择。1988年，L.A. Farwell 和 E. Donchin 首次报道了基于 P300 的脑机接口，并实现了 P300 拼写器。20 世纪 90 年代初，出现了基于感觉运动节律的脑机接口。Jonathan R. Wolpaw 等训练用户自我调节 mu 节律的幅值，通过 mu 节律幅值的变化实现光标的一维控制。Gert Pfurtscheller 等构建了基于感觉运动节律的脑机接口系统，从事件相关去同步的时空模式区分想象左 / 右手运动。与此同时，基于事件相关电位的脑机接口范式也得到了进一步扩展。1992年，Erich E. Sutter 开发了一种基于伪随机序列调制的视觉诱发电位的脑响应接口，该系统利用视觉诱发电位可在一个 8 × 8 视觉键盘上识别用户注视的方向。1999年，N. Birbaumer 等利用慢皮层电位幅度变化控制光标一维运动，实现了名为思维翻译器的文字拼写脑机接口。同年，清华大学团队开发了四目标稳态视觉诱发电位脑机接口，并将其用于控制光标移动。1999年，首届国际脑机接口会议在十几个相近概念中确认“BCI (Brain-computer interface)”为特定专业词汇，并确认了其科学定义和评价标准。

脑机接口技术的应用实践

进入 21 世纪之后，脑机接口技术取得了许多突破性的进展，参与脑机接口研究的机构和相关科学出版物的数量都大大增加。脑机接口研究在算法、硬件、交互范式、系统应用 4 个方面均取得了很大的进步。

在算法研究方面，先进的脑电信号处理和机器学习算法应用于早期的脑机接口范式获得了显著的性能提升，直接的表现是先前持久的受试训练时间大大缩短。公开数据集的发展为开发新型的脑机接口目标识别算法带来了机遇。

在硬件方面，小型化多通道放大器技术日趋成熟，诸如干电极、水凝胶电极的新一代传感器不断涌现，这些记录硬件的进步加强了脑机接口系统的实用性。

在交互范式方面，混合脑机接口、情绪脑机接口、认知脑机接口等诸多新范式相继涌现并日益成熟。

在系统应用方面，近年来各种脑机接口的应用系统不断涌现，专为交流和运动康复设计的辅助型 / 康复型脑机接口已被广泛应用于实验研究和临床试验，并验证了这些系统适用于肌萎缩侧索硬化症、脑卒中、脊髓损伤和意识障碍患者。（下转第 9 版）

脑机接口概念的提出，距今正好 50 年。从 1973 年到 2023 年，历经半个世纪的发展，脑机接口取得了许多突破性的进展。随着各领域科学技术的进步，脑机接口逐渐从实验室演示阶段走向实际应用阶段。为了纪念这一特殊的历史时刻，我特别回顾了脑机接口 50 年来的发展历程，分享最新的研究成果和技术进展，探讨未来发展方向。

脑机接口概念的萌芽与诞生

脑机接口概念的提出并非偶然，是各种因素综合作用的结果。如果把脑机接口比作一幅拼图，前三块关键拼图依次是脑信息采集、计算机科学与信号分析技术、神经科学。1924年，脑电图之父、德国精神病学家汉斯·贝格尔在脑电图的发展方面取得了决定性的突破——从人的大脑中无创地记录神经电信号，为实现大脑直接与外界交互提供了条件。1938年，美国神经学家赫伯特·贾斯珀在寄给汉斯·贝格尔的圣诞贺卡中，畅想了从脑电波中解码语言的可能性。这是对脑机接



脓毒症免疫调理新策略可改善患者预后

● 姚咏明

和调控环节，最终解决了临床免疫功能障碍的诊疗难题。

系列研究证实，脓毒症状态下，机体免疫功能改变与监测具有重要临床价值。

第一，中性粒细胞作为重要的天然免疫反应细胞，其募集和迁移功能障碍严重影响烧伤脓毒症的发展与结局，密切监测其病理生理变化有助于脓毒症的早期识别及干预治疗。

第二，动态分析创伤患者树突状细胞免疫功能变化规律（包括人白细胞抗原（HLA）-DR 及共刺激分子 CD80/86 表达水平和抗原提呈能力）、

针对树突状细胞探索有效调控途径有助于脓毒症的诊断与治疗。

第三，监测 T 细胞增殖活性和凋亡数量，以及调节性 T 细胞免疫抑制能力能够更加精确地了解危重患者的免疫功能状态及预后判断。通过临床前瞻性试验和验证优化建立评价脓毒症免疫功能的数学模型，对患者免疫状态进行精准评估和动态监控，指导临床免疫调理治疗。

基于大量基础研究和临床发现，我们率先提出了脓毒症免疫调理新策略，即脓毒症发作时全身炎症反应失控和免疫功能抑制常常并存，应采取

抗炎措施与免疫刺激并举策略。动物实验证实，联合应用乌司他丁和 $\alpha 1$ 胸腺肽治疗能明显减轻机体过度炎症反应、改善免疫抑制状态，显著降低动物死亡率；多中心、随机对照临床试验显示，联合应用乌司他丁和 $\alpha 1$ 胸腺肽治疗能显著降低患者 28 天和 90 天病死率。这说明针对脓毒症等感染并发症复杂的病理生理反应，仅仅抗炎治疗难以奏效，兼顾并存的免疫功能障碍等关键环节是防治脓毒症、改善患者预后的重要发展方向。

（作者系解放军总医院转化医学研究中心教授）

科学研究从本质上来讲是不断提出问题 and 解决问题的过程，具有认识自然现象、揭示客观规律的本质属性。围绕临床重大需求，凝练关键科学问题是实现科研创新与突破的核心所在。以脓毒症（包括脓毒性休克、多器官功能障碍综合征）机体免疫反应失调研究为例，我们深刻解析了如何从危重症患者中发现问题，进而提出关键科学问题、深刻揭示重要发病机制