

精准神经调控：技术、临床与商业融合的全面报告

执行摘要与引言

新的神经系统治疗范式：精准的承诺

神经科学和生物医学工程的交汇点正在催生一场深刻的变革，其核心是精准神经调控技术。这一新兴领域有望从根本上改变我们对神经及精神系统疾病的治疗方式，从帕金森病、癫痫、慢性疼痛到中风后遗症和重度抑郁症。本报告旨在全面剖析精准神经调控的技术版图、临床应用进展、产业生态系统、关键技术瓶颈以及未来的战略方向。其核心论点是：神经调控正从传统的“粗放式”干预，迈向一个以靶向性、适应性和个性化为特征的精准新时代。这一转变不仅由技术本身驱动，更源于我们对大脑神经环路日益深入的理解，以及人工智能、机器人技术和虚拟现实等赋能科技的深度融合¹。

定义该领域：从粗放干预到靶向自适应疗法

精准神经调控是指利用先进技术手段，以高空间分辨率、高时间分辨率和细胞类型特异性，对神经系统的特定环路或细胞群进行靶向调节，从而恢复或优化其功能¹。这与传统的干预手段形成鲜明对比。例如，药物治疗通常作用于全身，缺乏靶点特异性；而早期的

神经调控设备（如开环深部脑刺激）则以一种持续、静态的方式进行刺激，其作用机制往往不甚明确¹。

精准神经调控的精髓在于其“闭环”和“自适应”特性。系统能够实时“读取”患者的神经生理信号（即生物标志物），如脑电波、神经元放电或诱发电位，然后通过算法解码患者的意图或病理状态，并据此动态调整刺激参数（“写入”），形成一个智能化的治疗闭环。这种模式使得治疗从“一刀切”的方案，转变为真正意义上的个性化精准医疗。

报告范围与结构

本报告将系统性地梳理精准神经调控的全貌。首先，我们将深入探讨构成该领域的技术版图，包括核心的侵入性与非侵入性调控技术，以及脑机接口（BCI）、人工智能（AI）、康复机器人和虚拟现实（VR）等关键赋能技术。其次，我们将剖析当前面临的核心技术瓶颈，特别是生物兼容性、信号保真度、网络安全和人因工程等挑战。再次，我们将分析该领域的产业生态和商业模式，涵盖市场规模、主要参与者、监管路径和报销困境。随后，报告将全面评估精准神经调控在各大疾病领域的临床转化进展和治疗效果。最后，我们将综合所有分析，提炼出关键趋势，并为投资者、企业、临床医生和政策制定者提供前瞻性的战略建议。

精准神经调控的技术版图

精准神经调控的技术版图呈现出一种显著的分化与融合趋势。一方面，以高风险、高精度为特征的侵入式技术，如高通道脑机接口，正由 Neuralink 和 Blackrock Neurotech 等公司推动，瞄准那些传统疗法无效的严重神经系统疾病，其高昂的研发成本和手术风险被潜在的巨大临床价值所平衡⁷。另一方面，以安全、便捷为导向的非侵入式技术，如经颅

聚焦超声（tFUS）和时间干涉（TI）刺激，其空间聚焦能力不断提升，并与虚拟现实、软体机器人等消费级平台深度融合，旨在开拓更广泛的康复治疗和健康管理市场，满足院外和家庭场景的需求。

然而，真正的创新突破并不仅仅局限于单一技术的纵向发展，而更多地体现在这些不同技术路径的横向协同与系统集成上。例如，利用非侵入式脑机接口解码患者的运动意图，进而控制外骨骼机器人辅助其进行物理训练，同时通过虚拟现实游戏提供任务导向的沉浸式反馈，这种“读取-解码-执行-反馈”的闭环康复生态系统，正是精准神经调控未来发展的核心形态。它将高精度的神经科学与人性化的交互设计相结合，共同致力于实现更高效、更个性化的功能重塑。

核心调控技术：重塑神经系统的工具箱

侵入性刺激技术

深部脑刺激 (Deep Brain Stimulation, DBS)

- **机制与技术：** DBS 通过外科手术将电极植入大脑深部特定核团（如丘脑底核 STN、苍白球内侧部 GPi 或丘脑腹中间核 VIM），通过植入式脉冲发生器（IPG）释放高频电脉冲，以调节异常的神经环路活动。技术的演进正从传统的开环（持续）刺激，转向闭环或自适应 DBS（aDBS）。aDBS 系统能够感知与症状相关的生物标志物（如帕金森病中的 β 波段过度同步化），并据此实时调整刺激参数，从而在提升疗效的同时，减少能耗和声音含糊、平衡障碍等副作用。
- **主要参与者与产品：**
 - **美敦力 (Medtronic):** Percept™ PC/RC 系列是其旗舰产品，搭载 BrainSense™ 技



术，是首个能够同时感知和记录脑信号并提供治疗的 DBS 系统¹⁴。

- **波士顿科学 (Boston Scientific):** Vercise Genus™系统配备了行业领先的 16 触点 Cartesia™定向电极，能够实现电流的精准“引导”，从而更精确地靶向目标区域，减少副作用¹⁶。
- **雅培 (Abbott):** Infinity™ DBS 系统同样采用定向电极技术，并创新性地使用苹果 iPod Touch 作为患者控制器，提升了用户体验¹⁷。

脊髓刺激 (Spinal Cord Stimulation, SCS) 与背根神经节刺激 (Dorsal Root Ganglion, DRG Stimulation)

- **机制与技术：**SCS 通过植入脊髓硬膜外腔的电极传递电脉冲，依据“门控理论”及其他神经化学机制来阻断或调节疼痛信号向大脑的传递²⁴。关键技术创新包括高频 10 kHz 刺激（如 Nevro 公司的 HFX 平台），它能在不产生感觉异常（麻刺感）的情况下提供卓越的镇痛效果；以及闭环 SCS，它能根据脊髓诱发的复合动作电位（ECAP）自动调节刺激强度，以应对患者姿势变化引起的刺激变化。DRG 刺激则是一种更具靶向性的方法，直接作用于感觉信号传入中枢的第一站——背根神经节，对局灶性神经病理性疼痛尤其有效²⁷。
- **主要参与者与产品：**
 - **Nevro:** 其 HFX™平台以专有的 10 kHz 高频疗法为核心，在治疗难治性背腿痛和疼痛性糖尿病神经病变（PDN）方面积累了大量临床证据³⁰。
 - **雅培 (Abbott):** Proclaim™ DRG 神经刺激系统是目前唯一获得 FDA 批准用于治疗下肢复杂性局部疼痛综合征（CRPS）的 DRG 疗法¹⁸。

迷走神经刺激 (Vagus Nerve Stimulation, VNS)

- **机制与技术：**VNS 通过刺激颈部的左侧迷走神经，其传入纤维将信号传递至脑干的孤束核（NTS），进而广泛调节与癫痫和情绪相关的脑区（如丘脑、杏仁核、前额叶皮层）的活动³²。现代 VNS 系统（如 LivaNova 的 SenTiva™）集成了自动刺激（AutoStim）功能，可通过监测心率的突然升高（常与癫痫发作相关）来自动触发额外的刺激，并允许通过体外磁铁进行手动按需刺激³⁵。

- **主要参与者与产品：** LivaNova 是 VNS 领域的市场领导者，其 VNS Therapy®系统（包括 Symmetry®和 SenTiva®型号）已获批用于治疗难治性癫痫和难治性抑郁症

35。

响应性神经刺激 (Responsive Neurostimulation, RNS)

- **机制与技术：** RNS 系统是一种独特的闭环颅内神经调控设备。它通过植入在癫痫灶附近或内部的电极，持续监测局部脑电活动（ECoG）。当其内置算法检测到预示癫痫即将发作的特征性异常放电时，系统会在毫秒内自动传递短暂的电脉冲，以中断异常活动，从而在患者无感知的情况下阻止临床癫痫的发作⁴²。
- **主要参与者与产品：** NeuroPace 公司的 RNS® System 是该领域的代表，专为药物难治性局灶性癫痫患者设计，特别是那些不适合接受切除性手术的患者⁴²。

非侵入性刺激技术

经颅磁刺激 (Transcranial Magnetic Stimulation, TMS)

- **机制与技术：** TMS 利用置于头皮上方的线圈产生快速变化的磁场，该磁场无创地穿透颅骨，在下方的大脑皮层中感应出电流，从而使神经元去极化或超极化，调节皮层兴奋性。重复性 TMS（rTMS）能够诱导类似长时程增强（LTP）或长时程抑制（LTD）的神经可塑性变化，其机制主要与谷氨酸能神经递质系统有关⁴⁶。深部 TMS（dTMS）采用特殊的 H 型线圈，能够比传统 8 字形线圈刺激到更深、更广的脑区⁵¹。
- **主要参与者与产品：** BrainsWay 是 dTMS 技术的领导者，其专有的 H-coil 技术平台已获得 FDA 批准，用于治疗重度抑郁症、强迫症和戒烟等⁵¹。

经颅聚焦超声 (transcranial Focused Ultrasound, tFUS)

- **机制与技术：** 低强度聚焦超声（LIFU）是一种新兴的非侵入性神经调控技术，它利

用超声波的机械效应（而非热效应）来调节神经元活动。其优势在于能够以毫米级的空间分辨率无创地聚焦于大脑深部结构，这是传统电磁刺激技术难以企及的。其作用机制被认为与激活机械敏感性离子通道有关。

- **主要参与者与产品：**Insightec 公司的 Exablate Neuro 平台是磁共振引导下聚焦超声（MRgFUS）领域的领导者，已获批用于对药物不敏感的特发性震颤和帕金森病震颤的治疗⁵⁹。

时间干涉 (Temporal Interference, TI) 刺激

- **机制与技术：**TI 刺激是一种前沿的非侵入性深部脑刺激技术。它通过在头皮上施加两对（或多对）频率略有差异的高频电场（如 2000 Hz 和 2010 Hz）。由于神经元对单个高频电场不敏感，因此表层皮层不会被激活。然而，在两个电场相交的深部目标区域，会产生一个低频的包络波（频率为二者之差，如 10 Hz），这个低频波能够有效驱动深部神经元的活动。这从原理上解决了传统经颅电刺激（tES）深度与焦点的权衡难题。目前该技术仍处于早期研究阶段，面临着对网络效应的依赖和可能对浅层脑区产生抑制效应等挑战。

脑机接口 (BCI)：核心通信通道

- **定义与功能：**脑机接口（BCI）是一种不依赖于外周神经和肌肉系统的通信与控制技术，它通过直接采集和解码大脑信号，建立大脑与外部设备（如计算机或机器人）之间的直接交互通道⁶⁷。其核心工作流程包括三个模块：信号采集、信号处理与解码、控制接口与外部设备⁷⁵。
- **在精准神经调控中的角色：**在精准神经调控的框架下，BCI 扮演着至关重要的“读取”角色。它并非一种独立的治疗手段，而是实现闭环调控的必要前提。BCI 负责从大脑中提取反映患者意图或病理状态的神经信息，而其他神经调控技术则负责根据这些信息进行精准的“写入”或干预，从而形成一个完整的、智能化的“感知-决策-执行”

闭环。

追求精准：从宏观环路到单细胞

精准神经调控的核心目标在于提升干预的特异性，这体现在空间、时间和细胞三个维度上。

- **实现空间、时间和细胞特异性：**

- **空间精准性** 指的是将刺激能量精确地聚焦于特定的神经核团或环路节点，同时最大限度地减少对周围非目标区域的影响。在这方面，经颅聚焦超声（tFUS）技术展现出巨大潜力，其空间分辨率可达毫米级别³。侵入性的深部脑刺激（DBS）通过定向电极（Directional Leads）技术，能够将电流塑形并引导至特定方向，从而实现对目标核团内更精细亚区的刺激，提高了治疗窗口¹⁶。
- **时间精准性** 意味着能够在毫秒级别的时间尺度上进行干预，这对于模仿或中断大脑内快速的神经动力学过程至关重要。基于脑电（EEG）或皮层脑电（ECoG）的脑机接口（BCI）技术具有天然的时间优势，能够实时捕捉与运动意图或癫痫发作前兆相关的瞬时神经活动⁷⁶。
- **细胞特异性** 是神经调控的终极前沿，旨在选择性地调控特定类型的神经元（如兴奋性神经元或抑制性中间神经元）。这一目标目前主要通过尚处于实验阶段的光遗传学（Optogenetics）和声遗传学（Sonogenetics）技术来实现。这些技术通过基因工程手段，使特定细胞群表达对光或超声敏感的蛋白，从而实现对这些细胞的精准控制¹。

- **闭环系统的兴起：**

从开环到闭环是精准神经调控的范式革命。传统的开环系统以预设的、恒定的参数进行持续刺激，而不考虑患者实时的生理状态变化¹⁰。闭环系统则引入了生物标志物（biomarker）作为反馈信号，实现了刺激的智能化和个性化自适应调节⁹。

- **在帕金森病治疗中**，自适应 DBS（aDBS）系统通过监测丘脑底核（STN）的 β



波段（13-30 Hz）病理性振荡，仅在 β 波活动异常增强时才启动刺激，从而在保证疗效的同时，显著降低能耗和副作用¹¹。

- 在癫痫治疗中，NeuroPace 公司的 RNS®系统是闭环调控的典范。它能持续监测癫痫灶的脑电活动，一旦识别出癫痫发作的前兆波形，便立即施加电刺激予以抑制，防患于未然⁴²。
- 在慢性疼痛治疗中，闭环脊髓刺激（SCS）系统通过监测刺激诱发的复合动作电位（ECAP）来维持恒定的神经激活水平，避免了因患者体位变化导致的刺激过度或不足，提供了更稳定持久的镇痛效果。

闭环调控的本质是赋予神经调控系统“感知”和“决策”的能力，使治疗从被动的干预转变为与患者神经系统的主动交互，这是实现真正个性化精准医疗的核心。

赋能技术生态系统

精准神经调控的实现，离不开一个由人工智能、康复机器人和沉浸式技术构成的强大赋能生态系统。这些技术将解码的神经意图转化为有意义的行动和反馈，从而闭合了“感知-行动”的康复环路。

人工智能：神经解码的引擎

从脑机接口采集到的高带宽、高维度的原始神经信号本身是嘈杂且难以解读的。人工智能，特别是深度学习算法，是将其转化为可用控制指令的关键引擎⁶⁷。

- **深度学习模型的应用：**卷积神经网络（CNN）和循环神经网络（RNN）等深度学习架构被广泛应用于处理脑电（EEG）和皮层脑电（ECoG）信号。CNN 擅长从信号中提取空间和时间上的局部模式，而 RNN 则能有效处理信号的时间序列特性⁸⁴。这些

模型能够对复杂的神经信号进行分类，从而解码出用户的运动意图、语言想象甚至情绪状态。

- **个性化与自适应：**AI 算法的另一个核心优势在于其自适应能力。通过持续学习用户的独特神经活动模式，AI 解码器能够不断优化，减少用户所需的训练时间，并提高控制的准确性和鲁棒性，实现真正的个性化⁸⁶。

康复机器人：将神经意图转化为物理行动

康复机器人是神经意图的物理执行器，它们将 BCI 解码的指令转化为实际的肢体运动，帮助患者完成功能性训练。

- **刚性与软体外骨骼的对比：**传统的刚性外骨骼机器人（如 Lokomat）由金属连杆和电机驱动，能够提供强大而精确的辅助力，但其重量大、体积庞大、穿戴不便，且刚性结构可能与人体关节产生非自然的约束力，甚至导致二次损伤⁹⁰。相比之下，软体康复机器人（Soft Robotics）采用柔性材料（如硅胶、织物）和气动或线驱动等驱动方式，具有轻便、柔顺、安全的特点，能更好地贴合人体，实现更自然的交互。这使其特别适合于家庭康复场景，尽管在输出力和控制精度方面仍面临挑战⁹⁰。
- **核心驱动与传感技术：**柔顺驱动器（Compliant Actuators），如串联弹性驱动器（SEA）和气动人工肌肉（PAM），通过引入弹性元件，能够在保证安全交互的同时，提高能量效率和力控制的保真度¹⁰¹。柔性传感器（Flexible Sensors）则能够无创地集成在穿戴设备中，用于监测人体的运动姿态和交互力，为闭环控制提供反馈¹⁰⁷。
- **BCI-机器人集成：**BCI 与康复机器人的结合，构建了从“想到”到“做到”的直接神经通路。患者通过运动想象产生的脑电信号，经 BCI 解码后直接控制外骨骼或功能性电刺激（FES）设备，驱动瘫痪的肢体运动。这种主动参与的训练模式被证实能更有效地激活大脑的神经可塑性，促进功能恢复¹¹²。

沉浸式技术 (VR/AR)：通过任务导向的参与驱动神经可塑性

神经可塑性的核心原则是大量、重复、有意义的任务导向训练。然而，传统的康复训练往往枯燥乏味，导致患者依从性差，训练强度不足。虚拟现实（VR）和增强现实（AR）技术通过创造沉浸式、交互式和游戏化的环境，完美地解决了这一痛点。

- **游戏化（“严肃游戏”）的力量：**通过将康复训练设计成有趣的游戏（即“严肃游戏”），如钓鱼、烹饪或对战，可以显著提高患者的内在动机和参与度。积分、升级、奖励等机制提供了持续的正向反馈，促使患者完成数以百计的重复动作，从而达到有效刺激神经重塑所需的训练剂量。
- **多感官反馈的增强效应：**VR 环境能够整合视觉、听觉、力/触觉等多种感官反馈。例如，当患者在虚拟世界中抓住一个苹果时，不仅能看到和听到成功的提示，还能通过触觉手套感受到真实的抓握感。这种多通道、高度同步的感觉输入被认为能更强烈地激活大脑皮层，加速感觉运动环路的重建。
- **临床应用：**VR/AR 技术已广泛应用于中风、脑损伤、阿尔茨海默病等多种神经系统疾病的运动和认知康复中，并被证实能有效改善患者的功能表现和生活质量。

技术	作用机制	侵入性	空间分辨率	时间分辨率	主要临床应用	主要商业参与者
深部脑刺激 (DBS)	通过植入电极，用高频电脉冲调节深部核团的神经活动，抑制	高	毫米级	实时	帕金森病、特发性震颤、肌张力障碍、强迫症、癫痫。	美敦力、波士顿科学、雅培



	异常振荡。					
脊髓刺激 (SCS)	通过植入硬膜外腔的电极，调节脊髓背柱的神经传导，以阻断疼痛信号。	高	厘米级	实时	慢性神经病理性疼痛、缺血性疼痛。	Nevro、雅培、波士顿科学
迷走神经刺激 (VNS)	刺激颈部迷走神经，通过其传入通路广泛调节脑干及皮层网络活动。	高	低（非靶向）	实时	难治性癫痫、难治性抑郁症。	LivaNova
响应性神经刺激 (RNS)	实时监测癫痫灶脑电，在检测到发作前兆时自动给予刺激以中止发作。	高	毫米级	毫秒级	药物难治性局灶性癫痫。	NeuroPac e
经颅磁刺激 (TMS)	利用脉冲磁场在皮层感应电流，调节神经元兴	无	厘米级	毫秒级	重度抑郁症、强迫症、戒烟。	BrainsWay

	奋性，诱导神经可塑性。					
经颅聚焦超声 (tFUS)	利用低强度聚焦超声的机械效应，无创地调节深部或皮层神经元活动。	无	毫米级	秒级	特发性震颤、帕金森病（研究中：多种神经精神疾病）。	Insightec
时间干涉刺激 (TI)	利用两个高频电场的干涉在深部脑区产生低频包络，实现无创深部刺激。	无	厘米级	实时	仍处于临床前研究阶段。	N/A

关键技术瓶颈与创新前沿

尽管精准神经调控的前景广阔，但其从实验室走向广泛临床应用仍面临一系列严峻的技术瓶颈。这些挑战的核心，归根结底是设备与人体之间“接口”的难题。对于侵入式设备，其根本瓶颈在于材料科学：如何让植入物在生理环境中长期稳定地工作，而不被机体的免疫系统（即异物反应）排斥和破坏，是决定其寿命和性能的关键¹¹⁷。对于非侵入式设备，其核心瓶颈则在于物理学：如何让能量（电、磁、声）在无损、精准地穿透颅骨和软组织的同时，保持足够高的空间分辨率，以靶向特定的深部神经环路⁶⁷。

所有其他挑战，如植入物的供能、高带宽数据的无线传输与实时处理、乃至网络安全风险，都源于或加剧于这一根本性的“接口”问题。因此，在生物相容性材料、微纳加工技术、以及新型能量传递物理机制上的突破，是推动整个领域向前发展的先决条件和创新前沿。

脑机接口的挑战

信号保真度与侵入性的权衡

脑机接口技术面临一个根本性的权衡：信号质量与手术风险。

- **侵入式 BCI (Intracortical/ECoG):** 通过手术将微电极阵列直接植入大脑皮层 (Intracortical) 或放置于大脑表面 (ECoG)，能够绕过颅骨的屏障，记录到高质量、高信噪比 (SNR)、高时空分辨率的神经信号¹²³。这使得解码复杂的运动意图或语言成为可能。例如，Neuralink 等公司正在开发拥有数千个通道的侵入式系统⁷。然而，其代价是高昂的手术风险，包括感染、出血，以及长期的生物相容性问题¹²³。
- **非侵入式 BCI (EEG/fNIRS):** 将电极或传感器放置在头皮上，完全无创，因此安全性高、成本低、易于推广⁶⁷。但其信号在穿过颅骨和头皮时会严重衰减和模糊，导致空间分辨率低、信噪比差，且极易受到肌肉活动等伪影的干扰，这限制了其在精细控制任务中的应用。
- **微创 BCI (Minimally Invasive):** 为了在该权衡中找到最佳平衡点，一些公司正在探索微创路径。其中的代表是 Synchron 公司的 Stentrode™ 技术，它通过血管介入的方式，将一个类似支架的电极阵列经由颈静脉送达至大脑运动皮层附近的血管中，从而在无需开颅手术的情况下记录到比头皮脑电更优的信号¹³⁶。

生物相容性：克服异物反应

对于长期植入的侵入式设备，最大的挑战来自于人体的免疫系统，即异物反应（Foreign Body Response, FBR）。

- **问题所在:** 任何植入体内的“异物”都会触发一系列复杂的生物学反应。首先，血液和组织液中的蛋白质会迅速吸附在植入物表面；随后，中性粒细胞和巨噬细胞等免疫细胞被招募至植入位点，试图清除异物；最终，成纤维细胞和胶质细胞（在大脑中）会增生，形成一层致密的纤维结缔组织或胶质瘢痕，将植入物包裹起来¹¹⁷。这层瘢痕组织会使电极与神经元之间的距离增大，导致电极阻抗升高，信噪比下降，最终导致信号记录失效。此外，植入物与柔软的脑组织之间巨大的机械失配（刚度差异）会因微小移动而持续刺激周围组织，加剧炎症反应。
- **解决方案——材料科学的进步:** 解决 FBR 的关键在于让植入物“融入”生物环境。主要策略是开发新型生物相容性材料，特别是柔性材料，以减小机械失配。传统电极材料如硅（杨氏模量约 170 GPa）和金属，与脑组织（杨氏模量约 10 kPa）的刚度相差数万倍。而新型柔性聚合物材料，如聚二甲基硅氧烷（PDMS）、聚酰亚胺（PI）和水凝胶，其杨氏模量可低至 MPa 甚至 kPa 级别，与脑组织更为接近¹³⁸。使用这些材料作为电极的基底或涂层，可以显著减轻对周围组织的机械刺激，从而减缓 FBR 的进程，延长植入物的有效寿命。

硬件限制：微型化、功耗与数据传输

- **供能挑战:** 如何为微小的植入物提供长期稳定的电力是一大难题。一次性电池需要通过手术定期更换，增加了患者的创伤和感染风险；可充电电池虽然延长了使用寿命，但需要患者频繁地通过无线方式充电，对患者的依从性提出了要求，且充电效率和安

全性仍需完善¹⁴⁴。

- **数据带宽与处理瓶颈:** 高通道数（如数千通道）的 BCI 系统每秒会产生海量神经数据。如何将如此庞大的数据流无损、低功耗地从植入物无线传输到体外处理单元，是一个巨大的工程挑战。这不仅对无线通信带宽提出了极高要求，也对植入物内部的信号压缩和处理芯片的功耗和计算能力构成了严峻考验¹⁴⁷。实时解码这些高维数据流，也对外部计算机的算力提出了极高要求。

系统级障碍

网络安全与神经伦理：保护隐私的最后疆域

随着神经调控技术能够直接读写大脑信息，其安全和伦理问题变得空前突出。

- **安全威胁:** 针对 BCI 系统的网络攻击不再是科幻情节。潜在的威胁包括：
 - **“脑窃听” (Brain Tapping):** 恶意截取未经加密的脑电信号，可能泄露用户的思维、情绪、偏好甚至银行密码等高度敏感的隐私信息¹⁴⁹。
 - **“误导性刺激攻击” (Misleading Stimuli Attack):** 通过向 BCI 系统输入伪造的感觉反馈或直接刺激大脑，可能操纵用户的决策或行为，这在控制车辆或武器等应用中后果不堪设想¹⁵⁷。
 - **“对抗性攻击” (Adversarial Attack):** 针对用于神经解码的机器学习模型，通过向输入信号中添加人难以察觉的微小扰动，可以欺骗模型做出错误的分类，导致系统失控¹⁵⁴。
- **防御对策:** 应对这些威胁需要多层面的防御策略，包括对传输的神经数据进行端到端强加密、建立严格的访问控制机制，以及开发专门针对神经信号的“对抗性训练”方法来增强 AI 模型的鲁棒性¹⁵²。

- **伦理困境:** 精准神经调控引发了一系列深刻的伦理问题，例如“思想隐私权”的界定、神经数据的所有权和使用权、技术滥用导致的人类增强与社会公平问题，以及当人机融合系统出错时责任的归属问题等。这些问题需要技术、法律、伦理和社会的共同探讨和规范。

人因工程：依从性、可用性与数字鸿沟

技术的最终成功取决于人的接受和有效使用。

- **依从性与动机:** 康复治疗的本质是高强度的重复性训练，过程往往枯燥乏味，导致患者依从性差，是影响疗效的最大障碍之一。这正是游戏化和 VR 技术被大力引入康复领域的核心原因——通过提升趣味性和内在动机，让患者“愿意练、坚持练”。
- **可用性与可及性:** 随着康复场景向家庭转移，设备必须轻便、易于穿戴和操作，尤其是对于老年人或活动不便的患者。此外，“数字鸿沟”是一个不容忽视的社会问题，经济条件、受教育程度和技术素养的差异可能导致一部分最需要康复服务的人群反而无法从新技术中获益。因此，开发低成本、易于使用的设备，并提供完善的远程指导和支持服务，是确保技术公平可及的关键。

技术	侵入性	空间分辨率	时间分辨率	典型通道数	信噪比 (SNR)	优势	劣势
EEG	非侵入式	厘米级 (~10 mm)	毫秒级 (<1 ms)	32-256	低	安全、便携、成本低、时间分辨率高	空间分辨率低、易受伪影干扰、信号质量差
ECoG	侵入式	毫米级 (1-3 mm)	毫秒级 (<1 ms)	64-256	中	信号质量	需要开颅

						优于 EEG、空 间分辨率 较高	手术、有 感染风 险、覆盖 范围有限
微电极阵 列	侵入式	微米级 (单个神 经元)	毫秒级 (<1 ms)	96 (Utah Array) 至 >100 0 (Neurali nk)	高	信号质量 最高、可 记录单个 神经元活 动	手术风险 高、生物 相容性挑 战大、长 期稳定性 问题

产业与商业生态系统

精准神经调控的市场正在沿着两条截然不同的路径演化，形成了独特的双轨生态系统。第一条轨道是传统的医疗器械市场，由美敦力、波士顿科学等行业巨头主导。他们销售高价值的侵入式设备（如 DBS、SCS 系统）给医院，遵循成熟的 FDA 审批和医保报销流程，市场格局稳定，利润丰厚¹³。第二条轨道则是一个充满活力但也极不确定的新兴技术生态，由 Neuralink、Synchron 等风险资本支持的创业公司以及众多数字疗法（DTx）和康复机器人公司构成。他们致力于开发颠覆性技术（如高带宽 BCI、软体机器人），并探索全新的商业模式，如直接面向消费者（DTC）或与企业雇主合作。

这两条轨道之间的张力，尤其体现在监管和报销模式的碰撞上，将深刻影响整个行业的未来走向。新兴企业能否成功，不仅取决于技术上的突破，更在于他们能否开辟出新的市场，或者迫使既有的监管和支付体系为他们的创新买单。

市场分析：一个千亿级的机遇

精准神经调控相关市场正经历高速增长，预计在未来十年将形成一个巨大的产业集群。

- **市场细分与规模：**

- **神经调控设备市场：**作为核心市场，预计到 2030 年全球市场规模将达到 116.1 亿美元，年复合增长率（CAGR）约为 9.2%¹⁶³。其中，内部（植入式）设备占据主导地位，但外部（非侵入式）设备的增长速度更快¹⁶³。
- **神经义肢市场 (Neuroprosthetics):** 包括 BCI 驱动的假肢等，预计到 2034 年市场规模将超过 629.8 亿美元，CAGR 高达 15.62%¹⁶⁶。
- **康复机器人/设备市场：**这是一个快速增长的蓝海市场，预计到 2026 年中国市场规模将达到 941.5 亿元人民币，CAGR 约为 15.9%。
- **家用医疗设备市场：**随着康复场景向家庭转移，该市场也迎来增长机遇，预计到 2027 年全球市场规模将达到 564.5 亿美元¹⁶⁷。

- **增长驱动力：**市场增长的主要驱动力高度一致，包括全球人口老龄化、神经系统疾病（如中风、帕金森病）和慢性疼痛患病率的持续上升，以及患者对微创、非药物疗法偏好的增加¹⁶⁹。
- **区域动态：**目前，北美是全球最大的市场，这得益于其完善的医疗保健体系、高昂的研发投入和领先的医保报销政策。然而，亚太地区，特别是中国，由于庞大的人口基数、快速增长的医疗需求和政府对创新技术的大力支持，被普遍认为是未来增长最快的市场¹⁷³。

企业格局与竞争动态

精准神经调控领域的企业格局呈现出“巨头引领、新贵挑战、专精特新”的多元化特征。

- **传统行业领导者：**

- **美敦力 (Medtronic):** 全球神经调控领域的绝对领导者，其 DBS 产品（Percept 系列）和 SCS 产品在市场上占据主导地位。公司战略重点在于通过



BrainSense™等技术推动闭环、自适应调控，并持续扩展适应证¹⁴。

- **波士顿科学 (Boston Scientific):** 在 DBS 和 SCS 领域是美敦力的主要竞争对手。其核心竞争力在于 Vercise™系统的定向电极技术，能够实现更精准的电流引导，以及在产品组合上的持续创新¹⁶。
- **雅培 (Abbott):** 通过收购圣犹达医疗 (St. Jude Medical)，雅培在神经调控领域获得了强大的市场地位，其产品线覆盖 DBS (Infinity™系统)、SCS (Proclaim™系列) 和 DRG 刺激，特色在于其专有的 BurstDR™刺激模式和用户友好的 iOS 设备控制器¹⁷。
- **LivaNova:** VNS 领域的领导者，其 VNS Therapy®系统在难治性癫痫和抑郁症治疗中拥有深厚的临床积累和市场基础³⁵。
- **颠覆性 BCI 挑战者：**
 - **Neuralink:** 由埃隆·马斯克创立，目标宏大，旨在通过高带宽（数千通道）、全植入、机器人辅助手术的 BCI 技术，率先解决重度瘫痪问题，并最终实现人机共生。其技术路线激进，备受瞩目¹⁴⁷。
 - **Synchron:** 采取了截然不同的微创策略，其 Stentrode™设备通过血管介入方式植入，避免了开颅手术，极大地降低了安全风险，使其在商业化和监管审批上可能更具优势¹³⁶。
 - **Blackrock Neurotech:** 作为神经科学研究领域的“标准普尔”，其 Utah Array 电极阵列被广泛应用于学术研究。公司正将其深厚的科研基础转化为商业化的临床产品，如 MoveAgain 系统¹³⁶。
 - **Precision Neuroscience:** 专注于开发柔性、薄膜、高密度的皮层表面电极 (Layer 7)，提供了一种介于传统 ECoG 和穿刺式微电极之间的微创解决方案⁸。
- **康复机器人专家：**
 - **傅利叶智能 (Fourier Intelligence, 中国):** 从专业的康复机器人（如 ArmMotus™上肢机器人、ExoMotus™下肢外骨骼）起家，逐步构建了名为 RehabHub™的智能化康复解决方案生态，并进一步拓展至通用机器人领域 (GR-1)，展现出平



台化和生态化的战略雄心¹⁸⁶。

- **司羿智能 (Syrebo, 中国):** 专注于手功能康复领域，其核心产品为基于软体机器人技术的康复手套。公司战略聚焦于提供高性价比、适用于家庭和社区的便携式设备，并已建立了广泛的全球销售网络¹⁹³。
- **Imago Rehab (美国):** 作为哈佛大学的衍生公司，其商业模式的创新性不亚于技术本身。它将软体康复手套与远程医疗（Telehealth）平台深度整合，为患者提供“设备+服务”的一体化居家康复解决方案，直接对接保险支付，探索出了一条清晰的商业化路径¹⁹⁹。

上市之路：从实验室到患者

将精准神经调控技术转化为商业产品，需要跨越监管审批和市场准入两大关卡。

- **穿越监管迷宫:** 在美国，神经调控设备通常被归为风险最高的 III 类医疗器械，需要通过最严格的上市前批准（PMA）途径，这意味着必须提供充分的非临床和临床试验证据来证明其安全性和有效性。对于像 BCI 这样的全新技术，FDA 设立了“预提交（Pre-Submission）”程序和“突破性设备（Breakthrough Device）”通道，以促进早期沟通和加速审评。此外，FDA 还发布了针对植入式 BCI 设备的“跨越式指南（leap-frog guidance）”，旨在为这一快速发展的领域提供初步的监管思路和框架，显示出监管机构积极适应技术创新的姿态²⁰⁴。
- **破解报销难题:** 获得监管批准只是第一步，能否获得医保或商业保险的报销，是决定产品能否被市场广泛接受的关键。这是一个巨大的挑战，尤其对于数字疗法（DTx）和居家康复设备²⁰⁷。由于缺乏成熟的支付模式，许多公司正在探索多元化的商业路径，包括：
 1. **传统医保报销:** 效仿德国的 DiGA（数字健康应用）模式，通过提供严格的临床证据来获得国家医保的覆盖。
 2. **直接面向消费者 (DTC/OTC):** 绕过医生和保险公司，直接向患者销售，但这要求

产品价格亲民且易于使用。

3. **企业雇主福利:** 将康复或心理健康服务作为企业福利计划的一部分, 由雇主买单。
4. **与制药公司合作:** 将数字疗法与特定药物捆绑, 作为整体治疗方案的一部分, 由制药公司承担推广和支付的成本²⁰⁹。

公司	核心技术	主要适应证	侵入性	代表产品/技术	监管/市场状态
美敦力	DBS, SCS, 盆底神经刺激	帕金森病, 癫痫, 慢性疼痛	高	Percept™ DBS, Inceptiv™ SCS	市场领导者, FDA/CE 批准
波士顿科学	DBS, SCS	帕金森病, 特发性震颤, 慢性疼痛	高	Vercise Genus™ DBS (定向电极)	主要市场参与者, FDA/CE 批准
雅培	DBS, SCS, DRG 刺激	帕金森病, 慢性疼痛, CRPS	高	Infinity™ DBS, Proclaim™ DRG	主要市场参与者, FDA/CE 批准
LivaNova	VNS	难治性癫痫, 难治性抑郁症	高	VNS Therapy® System (Symmetry, SenTiva)	VNS 市场领导者, FDA/CE 批准
Nevro	高频 (10 kHz) SCS	慢性背腿痛, 疼痛性糖尿病神经病变	高	HFX™ iQ 智能 SCS 平台	高频 SCS 领导者, 被 Globus Medical 收购
NeuroPace	响应性神经刺激 (RNS)	药物难治性局灶性癫痫	高	RNS® System	闭环癫痫治疗领导者, FDA 批准



BrainsWay	深部经颅磁刺激 (dTMS)	重度抑郁症, 强迫症, 戒烟	无	Deep TMS™ (H-Coil 技术)	dTMS 市场领导者, FDA/CE 批准
Insightec	磁共振引导聚焦超声 (MRgFUS)	特发性震颤, 帕金森病震颤	无	Exablate Neuro	FUS 市场领导者, FDA/CE 批准
Neuralink	高带宽柔性电极阵列 BCI	瘫痪	高	The Link (N1 植入体), R1 手术机器人	人体临床试验阶段 (PRIME 研究)
Synchron	血管内支架电极 BCI	瘫痪	微创	Stentrode™	人体临床试验阶段 (COMMAND 研究)
Blackrock Neurotech	犹他阵列 (Utah Array)	瘫痪, 神经科学研究	高	Utah Array, MoveAgain BCI System	研究市场领导者, 临床产品获 FDA 突破性设备认证
Precision Neuroscience	柔性皮层表面电极阵列	瘫痪, 术中脑功能标测	微创	Layer 7 Cortical Interface	获 FDA 510(k)临时植入许可
傅利叶智能	康复机器人, 人形机器人	中风, 脊髓损伤等运动功能障碍	无	ArmMotus™, ExoMotus™, RehabHub™	全球商业化销售
司羿智能	软体手功能康复手套	手功能障碍 (中风等)	无	Syrebo® 康复机器人手套	全球商业化销售, 获 FDA/CE 认证
Imago Rehab	软体康复手套 + 远程医疗平台	中风后手功能康复	无	Imago Glove + Telehealth Service	商业化运营, 对接保险报销

	台				
--	---	--	--	--	--

临床转化与治疗影响

精准神经调控技术的最终价值在于其临床疗效。现有证据表明，这些技术在多种神经系统疾病中展现出显著的治疗潜力。一个清晰的模式正在浮现：神经调控技术本身并非“灵丹妙药”，而是作为一种强大的“放大器”，能够显著增强传统康复训练的效果。无论是通过 BCI 实现主动参与，还是通过 VR/游戏化提升训练强度和依从性，这些技术的核心作用在于更有效地驱动和利用大脑的神经可塑性。

临床研究的荟萃分析（meta-analysis）一致显示，当神经调控与物理治疗、作业治疗等康复手段相结合时，患者在运动功能评分（如 FMA、ARAT）和疼痛指数上取得了具有统计学意义的显著改善²¹³。然而，这些改善在多大程度上能转化为日常生活能力（ADL）的实质性提升，证据尚不完全一致，这凸显了未来研究需要更关注功能性、真实世界场景下的评估。因此，临床成功的关键在于优化“技术干预”与“康复训练”的协同方案，实现 1+1>2 的治疗效果。

恢复运动功能：中风、脊髓损伤与帕金森病

中风康复

中风是导致成年人长期残疾的首要原因，而精准神经调控为中风后功能恢复提供了多种创新途径。

- **脑机接口 (BCI):** BCI 技术在中风康复中的应用核心是“变被动为主动”。通过解码患者的运动意图，BCI 系统可以驱动功能性电刺激 (FES) 或机器人外骨骼，辅助患者完成其“想要”做的动作。多项荟萃分析证实，与单独的常规康复 *a propos* 比较，BCI 结合 FES 或机器人的训练能够更显著地改善患者上肢运动功能，Fugl-Meyer 评分 (FMA-UE) 的平均差 (MD) 可达 3.7 至 4.4 分²¹⁸。
- **迷走神经刺激 (VNS):** VNS 与康复训练配对 (VNS-Rehab pairing) 是一种新兴疗法。其原理是在患者进行特定康复动作的瞬间给予 VNS，以增强与该动作相关的神经环路的可塑性。荟萃分析显示，这种配对疗法能有效提升上肢 FMA 评分，平均差约为 3.6 分²¹⁷。美国 FDA 已于 2021 年批准了该疗法用于慢性缺血性卒中导致的中重度上肢运动障碍。
- **康复机器人:** 软体康复手套和下肢外骨骼在临床试验中表现出色。多项针对软体手套的随机对照试验 (RCT) 的荟萃分析表明，与常规康复相比，使用软体手套训练能显著提高 FMA-UE 评分 (MD 可达 6.52) 和 Action Research Arm Test (ARAT) 评分²²⁵。同样，下肢外骨骼辅助步态训练也被证实能改善患者的步行速度和平衡能力²²⁷。
- **虚拟现实/严肃游戏:** Cochrane 系统综述等高质量证据指出，虽然 VR 本身不一定优于传统疗法，但当其作为附加疗法以增加总训练量时，能有效改善上肢功能和日常生活活动能力²¹⁴。另一项荟萃分析发现，遵循神经康复原则设计的“严肃游戏”，其疗效显著优于传统疗法，在上肢功能、活动和参与度方面的标准化平均差 (SMD) 分别为 0.47、0.25 和 0.66²³⁵。

脊髓损伤 (SCI)

对于脊髓损伤导致的瘫痪，精准神经调控的目标是“绕过”损伤部位，重建大脑与肢体之间的连接。瑞士洛桑联邦理工学院的研究是该领域的里程碑，他们通过植入式 BCI 解码大脑的行走意图，并将其转化为对脊髓损伤部位下方的硬膜外电刺激信号，成功使瘫痪患者

重新站立和行走⁷⁵。此外，地面机器人辅助步态训练（GRAGT）等技术也被证明可以显著改善慢性 SCI 患者的步幅、步行距离和下肢力量。

帕金森病 (PD)

DBS 是治疗中晚期帕金森病运动症状的成熟疗法。多项荟萃分析证实，与单纯药物治疗相比，DBS（靶向 STN 或 GPi）能够更有效地改善患者的震颤、僵直和运动迟缓等症状。然而，也需要注意到，DBS 手术本身存在风险，包括颅内出血、感染等并发症，并且可能对患者的认知功能（特别是语言流畅性）产生一定的负面影响²¹⁵。

控制癫痫与疼痛

癫痫

对于药物难治性癫痫，神经调控提供了重要的非药物治疗选择。

- **DBS:** 针对丘脑前核（ANT）的 DBS 已被证明可以有效降低癫痫发作频率，但实现完全无发作的比例较低²³⁹。
- **VNS:** VNS 是治疗难治性癫痫的常用手段，尤其对全面性发作效果较好。荟萃分析显示，VNS 能显著增加癫痫频率降低 50% 以上的患者比例，且安全性良好¹⁸³。
- **RNS:** RNS 系统在临床试验中表现出优异的疗效和安全性。荟萃分析显示，RNS 治疗可使癫痫发作频率平均降低约 68%，且疗效随时间推移而增强，部分患者甚至可以实现长期无发作²⁴⁵。

慢性疼痛

- **SCS/DRG:** 高频 SCS 和闭环 SCS 技术的发展，使得脊髓刺激在治疗慢性神经病理性疼痛（如失败背部手术综合征）方面取得了比传统 SCS 更优越的疗效，且无感觉异常的副作用。DRG 刺激则为局灶性、难以治疗的神经痛（如 CRPS）提供了精准的靶向治疗方案。荟萃分析证实，这些先进的神经刺激技术在缓解疼痛和改善功能方面均显著优于传统药物治疗²⁷。

应对精神与认知健康挑战

抑郁症

- **VNS:** 对于治疗抵抗性抑郁症（TRD），VNS 作为一种辅助疗法，多项荟萃分析显示其应答率和缓解率均显著高于常规治疗（TAU），且疗效具有累积效应，长期随访中持续改善²⁵¹。
- **TMS:** TMS，特别是靶向背外侧前额叶皮层（DLPFC）的 rTMS，是治疗抑郁症的有效非侵入性手段。荟萃分析表明，其疗效中等，尤其对伴有焦虑症状的抑郁症患者效果更佳²⁵⁷。

强迫症 (OCD)

DBS 和 TMS 均被用于治疗难治性 OCD。荟萃分析显示，靶向内囊前肢（ALIC）/腹侧纹状体（VC/VS）或 STN 的 DBS，以及靶向 DLPFC 或辅助运动区（SMA）的 TMS，均能显著降低患者的 Y-BOCS 量表评分，有效缓解强迫症状²⁶⁰。

认知障碍

针对阿尔茨海默病（AD）等认知障碍，精准神经调控尚处于探索阶段。VR 技术被用于认知训练，特别是改善轻度认知障碍（MCI）和 AD 患者的空间定向能力，初步研究显示出积极效果。而 DBS 刺激记忆相关环路（如海马体、穹窿）的尝试也正在进行中，旨在延缓认知衰退⁶⁷。

感觉重建与假肢控制

靶向肌肉神经再支配 (TMR)

TMR 是一项革命性的外科技术，它将被截断的肢体残端神经重新连接到邻近的、功能冗余的肌肉上。这不仅为肌电假肢提供了更丰富、更直观的控制信号源，还通过为神经提供“靶点”而显著减轻了幻肢痛和残肢神经瘤痛²⁶⁹。

感觉反馈

为假肢提供感觉反馈是提升其功能和用户接受度的关键。通过在假肢上安装传感器（如压力、温度传感器），并将这些信息通过电刺激或振动反馈等方式传递给用户的残存肢体或神经，可以重建闭环的感觉运动控制。这不仅能让用户“感受”到他们所接触的物体，还能显著提高操作的精细度，增强对假肢的本体感和拥有感。



适应证	干预措施	关键结局指标	合并效应量	证据质量	核心结论
中风 (上肢)	BCI + FES/机器人	FMA-UE	MD = 3.69 - 4.37	中等	BCI 结合主动训练显著优于常规康复。
中风 (上肢)	VNS + 康复	FMA-UE	MD $\approx$ 3.59	中等	VNS 配对康复可有效促进运动功能恢复。
中风 (上肢)	软体机器人手套	FMA-UE	MD $\approx$ 6.52	中等	软体机器人手套在改善手功能方面效果显著。
中风 (上肢)	严肃游戏	UL 功能 (SMD)	SMD = 0.47	中等	设计良好的严肃游戏疗效优于传统疗法。
帕金森病 (运动症状)	DBS vs. 药物治疗	UPDRS-III	显著改善	高	DBS 能有效控制中晚期运动症状，但有手术风险。
难治性癫痫	RNS	癫痫发作频率	平均降低 ~68%	中等	RNS 在减少局灶性癫痫发作方面非常有效，且疗效持久。
慢性神经病理性疼痛	高频 SCS	疼痛缓解率	RR = 2.44	中等	高频 SCS 在长期镇痛方面优于传统

					SCS。
难治性抑郁症 (TRD)	VNS + TAU	缓解率	OR $\approx$ 4.99	中等	VNS 是 TRD 的有效辅助治疗手段，长期疗效佳。
强迫症 (TROCD)	DBS	Y-BOCS 评分	平均降低 47%	中等	DBS 对难治性 OCD 症状有显著的缓解作用。

综合分析 with 战略建议

综合分析：技术、医学与商业的交汇趋势

对精准神经调控领域的全面审视揭示了四个相互关联的核心趋势，它们共同塑造着该领域的未来走向。

- 闭环的必然性：**从 DBS 到 SCS，再到 BCI 驱动的康复系统，从开环到闭环的转变是所有模态技术演进的共同方向。这不仅是一次技术升级，更是一场理念革命。它标志着神经调控从一种静态、单向的干预，演变成为一种动态、双向的对话。这种基于实时生物标志物的自适应调节，是实现真正个性化医疗的基石，也是提升疗效、降低副作用、优化能耗的根本途径。
- 家庭成为新诊所：**技术的进步正在推动康复服务场景的去中心化。软体机器人技术解决了传统设备笨重、昂贵、不便携的问题；VR/AR 技术解决了居家康复缺乏趣味性和监督的难题；而远程医疗平台则打通了患者与治疗师之间的地理障碍。这些技术的融合，使得高强度、个性化的康复训练走出医院，进入家庭成为可能。这不仅能大

幅降低医疗成本，更能满足患者对便捷性和生活质量的追求。

3. **数据成为新资产**：闭环系统在运行过程中会产生海量的、纵向的、高维度的神经与行为数据。这些数据是前所未有的宝贵资产。对于患者个体，它可以用于精细化地调整治疗方案；对于科研，它可以用于揭示疾病的深层机制；对于产业，它可以用于训练更强大的 AI 解码模型。然而，数据的大量产生也带来了严峻的挑战，数据的所有权、隐私保护和网络安全问题成为必须优先解决的战略性问题。
4. **系统协同而非单兵作战**：未来的竞争优势将不属于拥有单一最强技术的公司，而属于能够构建最有效协同生态系统的平台。一个成功的精准神经调控解决方案，必然是一个集成了多种技术的复杂系统：它需要 BCI 作为“传感器”来读取意图，需要 AI 作为“大脑”来解码信息，需要机器人或 FES 作为“效应器”来执行动作，还需要 VR/AR 作为“激励器”来提供反馈和动机。这种系统级思维将是未来产品开发和商业成功的关键。

未来展望：AI 驱动的个性化神经调控十年

展望未来十年，精准神经调控领域有望在以下几个方面取得突破性进展：

- **临床应用的成熟与普及**：基于 BCI 的闭环神经调控系统将从实验室走向临床，首批针对重度瘫痪患者的商业化产品有望获批上市。同时，随着成本的降低和易用性的提升，非侵入式技术将更广泛地应用于康复、疼痛管理、精神健康等领域，甚至进入消费级健康市场。
- **AI 的深度赋能**：AI 将在神经调控中扮演更核心的角色。更强大的解码算法将能够从噪声中提取更精细的神经信息，实现对更复杂意图（如连续语音）的解码。AI 还将驱动治疗方案的自动化生成与优化，根据患者的实时数据动态调整康复计划，实现“千人千面”的精准治疗。
- **新靶点与新适应证的拓展**：借助连接组学等先进成像技术，研究人员将发现更多与

特定疾病相关的神经环路新靶点，为 DBS、TMS 等技术开辟新的适应证，例如阿尔茨海默病、成瘾、创伤后应激障碍等。

- **技术的融合与无感化：**不同技术间的界限将更加模糊。植入物将变得更小、更柔性、生物相容性更好，甚至具备生物可降解性。无线供能和数据传输技术将更加成熟，最终实现“无感植入”。穿戴式设备将与衣物无缝集成，实现全天候的生理状态监测与干预。

战略要务：对关键利益相关者的行动建议

为了抓住精准神经调控带来的历史性机遇，并应对其挑战，各方利益相关者需采取积极的战略行动。

- **对于投资者：**
 - **关注平台型公司：**优先投资那些致力于构建整合“感知-解码-执行-反馈”完整闭环的平台型公司，而非仅拥有单一环节技术的公司。
 - **押注核心瓶颈突破：**重点关注在生物相容性材料（用于侵入式接口）和新型能量穿透技术（用于非侵入式接口）等核心瓶颈领域取得关键突破的初创企业。
 - **审慎评估商业模式：**除了技术本身，应仔细审查公司对监管路径和报销模式的理解与战略规划，这是其商业成功的关键。
- **对于开发者与企业：**
 - **坚持用户中心设计：**从研发早期就让患者和临床医生深度参与，确保产品的可用性、舒适性和临床实用性，以解决用户依从性这一根本问题。
 - **将安全作为核心竞争力：**必须将网络安全和数据隐私作为产品的核心设计要素，而非事后补丁。建立透明、可信的数据治理框架，将是赢得用户和监管机构信任的关键。
 - **构建强有力的临床证据：**临床试验的设计应超越单纯的统计学显著性，更要证明



产品在真实世界中对患者功能独立性和生活质量的实质性改善。这是说服支付方买单的唯一途径。

- 对于临床医生与医疗机构：

- **拥抱技术并保持审慎：** 积极了解和学习新技术，但坚持以严格的循证医学证据作为临床应用的依据。
- **创新临床工作流程：** 主动探索如何将远程监控、居家康复等新模式整合到现有的诊疗流程中，以提高效率和扩大服务范围。
- **推动专业教育与培训：** 倡导并参与针对新型神经调控技术的专业培训和继续教育项目，培养能够熟练运用这些新工具的下一代临床专家。

- 对于政策制定者与监管机构：

- **建立敏捷的监管框架：** 借鉴 FDA 的“跨越式指南”等做法，发展能够适应技术快速迭代的敏捷监管科学与路径，在保证安全的前提下，不扼杀创新。
- **明确并标准化报销路径：** 联合医保部门，为数字疗法和新型神经调控设备建立清晰、统一、可预期的报销标准和流程，这是激励产业投资和确保患者公平可及性的核心政策杠杆。
- **主动引领伦理与法律规范：** 必须抢在技术大规模应用之前，牵头制定关于神经数据隐私、安全和所有权的法律法规，为这一新兴领域划定明确的伦理红线，确保技术向善发展。

引用的著作

1. Precision Neurotechnologies for Human Therapeutics ... - ARIA, 6. 14, 2025, <https://www.aria.org.uk/media/vk5pxuxr/precision-neurotechnologies-for-human-therapeutics-programme-thesis.pdf>
2. Spatio-temporal resolution of various neuromodulation methods. The open... - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/figure/Spatio-temporal-resolution-of-various-neuromodulation-methods-The-open-circle-represents_fig5_264232606
3. The future of transcranial ultrasound as a precision brain interface | PLOS Biology, 6. 14, 2025, <https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.3002884>
4. Targeted Neuromodulation of Perceptual Decision-Making Networks Causally Dissociates Sensory and Metacognitive performance | bioRxiv, 6. 14, 2025,



- <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2025.05.15.653831v1>
5. Advanced Temporally-Spatially Precise Technologies for On-Demand Neurological Disorder Intervention - PubMed Central, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10190591/>
 6. Mechanisms of deep brain stimulation - PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4760496/>
 7. 脑机接口，等待一个医疗器械的诞生 - 中青在线, 6. 14, 2025, http://m.cyol.com/gb/articles/2025-03/25/content_Zv7AwLs2qe.html
 8. Top 10 Global Brain-Computer Interface (BCI) Companies In 2025, 6. 14, 2025, <https://alltechmagazine.com/top-10-global-brain-computer-interface-bci-companies-in-2025/>
 9. Closed Loop Deep Brain Stimulation: a systematic scoping review - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/365174979_Closed_Loop_Deep_Brain_Stimulation_a_systematic_scoping_review
 10. Closed Loop Deep Brain Stimulation for PTSD, Addiction, and Disorders of Affective Facial Interpretation - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2018.00300/full>
 11. Simulation of Closed-Loop Deep Brain Stimulation Control Schemes for Suppression of Pathological Beta Oscillations in Parkinson's Disease - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2020.00166/full>
 12. (PDF) Closed-Loop Adaptive Deep Brain Stimulation in Parkinson's Disease: Procedures to Achieve It and Future Perspectives - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/370671579_Closed-Loop_Adaptive_Deep_Brain_Stimulation_in_Parkinson's_Disease_Procedures_to_Achieve_It_and_Future_Perspectives
 13. Closed-Loop Adaptive Deep Brain Stimulation in Parkinson's Disease: Procedures to Achieve It and Future Perspectives - PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10357172/>
 14. Our Products - DBS for Parkinson's Disease | Medtronic, 6. 14, 2025, <https://www.medtronic.com/en-us//patients/treatments-therapies/deep-brain-stimulation-parkinsons-disease/about-dbs-therapy/dbs-products.html>
 15. New Directional Lead System Is Latest in a Wave of Deep Brain Stimulation Technology Advances - Consult QD, 6. 14, 2025, <https://consultqd.clevelandclinic.org/new-directional-lead-system-is-latest-in-a-wave-of-deep-brain-stimulation-technology-advances>
 16. Vercise™ Cartesia™ X and Vercise™ Cartesia™ HX Directional ..., 6. 14, 2025, <https://www.bostonscientific.com/us/en/healthcare-professionals/products/deep-brain-stimulation-dbs-systems/vercise-cartesia-x->



- [and-vergence-cartesia-hx-directional-leads/fp00000495.html](#)
17. Deep Brain Stimulation (DBS) ft. Abbott & Boston Scientific, 6. 14, 2025, <https://www.parkinsonsresource.org/news/articles/things-to-know-right-now-deep-brain-stimulation-dbs-ft-abbott-boston-scientific/>
 18. Neuromodulation for Chronic Pain | Abbott, 6. 14, 2025, <https://www.neuromodulation.abbott/us/en/healthcare-professionals/hcp-chronic-pain.html>
 19. Abbott's Neuromodulation Products | Abbott, 6. 14, 2025, <https://www.neuromodulation.abbott/us/en/healthcare-professionals.html>
 20. Industry-Leading Neuromodulation Therapies | Abbott, 6. 14, 2025, <https://www.neuromodulation.abbott/us/en/home.html>
 21. Neuromodulation for Chronic Pain | Abbott, 6. 14, 2025, <https://www.neuromodulation.abbott/int/en/healthcare-professionals/hcp-chronic-pain.html>
 22. At the Forefront of Mending the Brain | Abbott Newsroom, 6. 14, 2025, <https://www.abbott.com/corpnewsroom/strategy-and-strength/how-abbott-innovates-brain-health.html>
 23. Neuromodulation Advancements and Chronic Pain | Abbott Newsroom, 6. 14, 2025, <https://www.abbott.com/corpnewsroom/pain-and-movement/neuromodulation-advancements-give-hope-to-people-with-chronic-pain.html>
 24. Spinal Cord Stimulation - StatPearls - NCBI Bookshelf, 6. 14, 2025, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK553154/>
 25. What Does the Mechanism of Spinal Cord Stimulation Tell Us about Complex Regional Pain Syndrome?, 6. 14, 2025, <https://californiapainmedicinecenter.com/wp-content/uploads/2022/11/What-Does-the-Mechanism-of-Spinal-Cord-Stimulation-Tell-Us-about-Complex-Regional-Pain-Syndrome.pdf>
 26. Mechanisms of spinal cord stimulation for the treatment of pain: Still in the dark after 50 years - PubMed Central, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6491991/>
 27. A meta-analysis of modern neuro-stimulation modalities-Advances ..., 6. 14, 2025, <https://surgicalneurologyint.com/surgicalint-articles/a-meta-analysis-of-modern-neuro-stimulation-modalities-advances-in-neuro-stimulation-techniques/>
 28. Dorsal Root Ganglion Stimulation for Lower Extremity Neuropathic Pain Syndromes: An Evidence-Based Literature Review - PMC - PubMed Central, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9464732/>
 29. Systematic Literature Review of Dorsal Root Ganglion Neurostimulation for the Treatment of Pain - Oxford Academic, 6. 14, 2025, <https://academic.oup.com/painmedicine/article-abstract/21/8/1581/5893043>
 30. SCS - USA - Nevro, 6. 14, 2025, <https://www.nevro.com/safety/scs/>

31. New Data Demonstrates Long-Term Improvements in Pain Intensity with Nevro's High-Frequency Spinal Cord Stimulation Therapy, 6. 14, 2025, <https://nevro.com/English/us/investors/investor-news/investor-news-details/2024/New-Data-Demonstrates-Long-Term-Improvements-in-Pain-Intensity-with-Nevros-High-Frequency-Spinal-Cord-Stimulation-Therapy/default.aspx>
32. Mechanism and Applications of Vagus Nerve Stimulation - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/1467-3045/47/2/122>
33. Vagus nerve stimulation: mechanisms and factors involved in memory enhancement, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/human-neuroscience/articles/10.3389/fnhum.2023.1152064/full>
34. Vagus Nerve Stimulator - StatPearls - NCBI Bookshelf, 6. 14, 2025, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK562175/>
35. VNS Therapy™ is an epilepsy treatment designed to reduce the frequency, severity and recovery times of people suffering from seizures. - LivaNova, 6. 14, 2025, <https://www.livanova.com/epilepsy-vnstherapy/en-us>
36. VNS Therapy™ for Drug-Resistant Epilepsy (DRE) | LivaNova Australia, 6. 14, 2025, <https://www.livanova.com/epilepsy-vnstherapy/en-au/hcp>
37. Vagus Nerve Stimulation (VNS) Therapy for Epilepsy - LivaNova, 6. 14, 2025, <https://www.livanova.com/epilepsy-vnstherapy/en-us/epsy-gateway>
38. New Difficult to Treat Depression Approach | LivaNova US, 6. 14, 2025, <https://www.livanova.com/depression/en-us>
39. LivaNova to Announce Fourth-Quarter and Full-Year 2024 Results - Business Wire, 6. 14, 2025, <https://www.businesswire.com/news/home/20250121495059/en/LivaNova-to-Announce-Fourth-Quarter-and-Full-Year-2024-Results>
40. LIVN Investor Relations - LivaNova PLC - Alpha Spread, 6. 14, 2025, <https://www.alphaspread.com/security/nasdaq/livn/investor-relations>
41. Investor Relations | LivaNova PLC, 6. 14, 2025, <https://investor.livanova.com/>
42. Responsive Neurostimulation for Seizures | Epilepsy Foundation, 6. 14, 2025, <https://www.epilepsy.com/treatment/devices/responsive-neurostimulation>
43. RNS System, VNS, DBS | Epilepsy Neurostimulation Devices - NeuroPace, 6. 14, 2025, <https://www.neuropace.com/blog/epilepsy-neurostimulation-device-rns-vns-dbs/>
44. Responsive neurostimulation device - Wikipedia, 6. 14, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Responsive_neurostimulation_device
45. NeuroPace | A Smarter Way to Treat Epilepsy, 6. 14, 2025, <https://www.neuropace.com/>
46. Possible Mechanisms Underlying the Therapeutic Effects of Transcranial Magnetic Stimulation - PMC - PubMed Central, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4468834/>
47. Transcranial magnetic stimulation - Wikipedia, 6. 14, 2025,



- https://en.wikipedia.org/wiki/Transcranial_magnetic_stimulation
48. Mechanism of Action for rTMS: A Working Hypothesis ... - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/physiology/articles/10.3389/fphys.2017.00457/full>
 49. The Use of Transcranial Magnetic Stimulation in Attention Optimization Research: A Review from Basic Theory to Findings in Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder and Depression - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2075-1729/14/3/329>
 50. Mechanisms of Action of TMS in the Treatment of Depression - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38844713/>
 51. BrainsWay Announces Published Review Results Highlighting Potential of Deep TMS™ to Treat Parkinson's Disease, 6. 14, 2025, https://www.brainsway.com/news_events/brainsway-announces-published-review-results-highlighting-potential-of-deep-tms-to-treat-parkinsons-disease/
 52. Why Brainsway Deep TMS? - NuMe TMS, 6. 14, 2025, https://www.numetms.com/blog/e_21/From-the-Desk-of-Dr.-Kent/2017/1/Why-Brainsway-Deep-TMS-
 53. Deep Transcranial Magnetic Stimulation (Brainsway TMS) Therapy - Foley, AL: J Douglas Brown, DC, DACNB, IFMCP, 6. 14, 2025, <https://www.mindperformancecenter.com/services/deep-tms-brainsway-therapy>
 54. Deep TMS in the Treatment of Major Depression - BrainsWay, 6. 14, 2025, <https://www.brainsway.com/knowledge-center/deep-transcranial-magnetic-stimulation-dtms-in-the-treatment-of-major-depression-an-exploratory-systematic-review-and-meta-analysis/>
 55. Just finished 36 sessions of dTMS on Brainsway machine. : r/rtms - Reddit, 6. 14, 2025, https://www.reddit.com/r/rtms/comments/q0budo/just_finished_36_sessions_of_dtms_on_brainsway/
 56. Investor Relations - BrainsWay, 6. 14, 2025, <https://investors.brainsway.com/investor-relations/>
 57. Contact Investor Relations - BrainsWay, 6. 14, 2025, <https://investors.brainsway.com/contact-ir/>
 58. BrainsWay's Patented Technology For Investors, 6. 14, 2025, <https://www.brainsway.com/investor-relations/>
 59. Insightec: Therapeutic Power of Focused Ultrasound Treatment, 6. 14, 2025, <https://insightec.com/>
 60. Focused Ultrasound Treatment is Proven Effective Treatment to ..., 6. 14, 2025, <https://insightec.com/news/focused-ultrasound-treatment-is-proven-effective-treatment-to-curb-tremor-for-at-least-five-years/>
 61. About Us: Mission, Leadership, Press & More - Insightec, 6. 14, 2025, <https://insightec.com/about-us/>



62. INSIGHTEC Company Overview, Contact Details & Competitors - LeadIQ, 6. 14, 2025, <https://leadIQ.com/c/insightec/5a1d988123000054008732ad>
63. Invest in Insightec private stocks | OurCrowd.com, 6. 14, 2025, <https://www.ourcrowd.com/companies/insightec>
64. Industry Profile: Insightec - Focused Ultrasound Foundation, 6. 14, 2025, <https://www.fusfoundation.org/posts/industry-profile-insightec/>
65. Charles River and Insightec Announce Strategic Collaboration to Advance Therapeutic Development Utilizing Focused Ultrasound in Neuroscience - Investor Relations, 6. 14, 2025, <https://ir.criver.com/news-releases/news-release-details/charles-river-and-insightec-announce-strategic-collaboration/>
66. Exablate Procedure Solutions for Healthcare - Insightec, 6. 14, 2025, <https://insightec.com/healthcare-professionals/>
67. 脑机接口：拓展人脑疆界的革命性技术与神经外科学的未来, 6. 14, 2025, <https://xhyxzz.pumch.cn/cn/article/doi/10.12290/xhyxzz.2025-0152>
68. 脑机接口——脑信息读取与脑活动调控技术 - SciEngine, 6. 14, 2025, <https://www.sciengine.com/doi/pdf/DE8A72C9D227477DA37949031E5054CE>
69. 脑机接口技术在医疗健康领域应用白皮书 - 中国信息通信研究院, 6. 14, 2025, <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202107/P020210715603240201817.pdf>
70. 什么是脑机接口_脑机接口的工作原理 - 亚马逊云科技, 6. 14, 2025, <https://www.amazonaws.cn/knowledge/what-is-brain-computer-interface/>
71. 脑机接口 - 维基百科，自由的百科全书, 6. 14, 2025, <https://zh.wikipedia.org/zh-cn/%E8%84%91%E6%9C%BA%E6%8E%A5%E5%8F%A3>
72. 脑机接口——人机融合时代的终极密钥- 松禾资本【专注科技投资】, 6. 14, 2025, <http://www.pinevc.com.cn/article/1275.html>
73. Sweat-Resistant Wearable Robotic Sensors for Rehabilitation - Intelligent Living, 6. 14, 2025, <https://www.intelligentliving.co/sweat-resistant-wearable-robotic-sensors-for-rehabilitation/>
74. 脑机接口技术发展现状及未来展望, 6. 14, 2025, <http://www.xml-data.cn/KXYSH/html/fa609caf-1911-4e95-a301-434a006877ec.htm>
75. 脑机接口：拓展人脑疆界的革命性技术与神经外科学的未来 - 协和医学杂志, 6. 14, 2025, <https://xhyxzz.pumch.cn/cn/article/pdf/preview/10.12290/xhyxzz.2025-0152.pdf>
76. Summary of over Fifty Years with Brain-Computer Interfaces—A Review - PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7824107/>
77. Optogenetics and chemogenetics: key tools for ... - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/neural-circuits/articles/10.3389/fncir.2025.1516839/full>
78. Ultrasound and Sonogenetics: A New Perspective for Controlling Cells with Sound - PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8653683/>



79. Sonogenetics for noninvasive and cellular-level neuromodulation in rodent brain | bioRxiv, 6. 14, 2025, <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.01.28.919910.full>
80. Biomarkers and Stimulation Algorithms for Adaptive Brain Stimulation - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2017.00564/full>
81. 脑机接口：拓展人脑疆界的革命性技术与神经外科学的未来 - 协和医学杂志, 6. 14, 2025, <https://xhyxzz.pumch.cn/article/doi/10.12290/xhyxzz.2025-0152>
82. Unveiling Thoughts: A Review of Advancements in EEG Brain Signal Decoding into Text, 6. 14, 2025, <https://arxiv.org/html/2405.00726v1>
83. A Review of Brain-Computer Interface-Based Language Decoding: From Signal Interpretation to Intelligent Communication - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/1/392>
84. (PDF) Deep Learning Algorithms in EEG Signal Decoding ..., 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/353990045_Deep_Learning_Algorithms_in_EEG_Signal_Decoding_Application_A_Review
85. Deep learning approaches for neural decoding across architectures and recording modalities | Request PDF - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/348727626_Deep_learning_approaches_for_neural_decoding_across_architectures_and_recording_modalities
86. [2503.16567] Exploring Deep Learning Models for EEG Neural Decoding - arXiv, 6. 14, 2025, <https://arxiv.org/abs/2503.16567>
87. Synergizing Artificial Intelligence with Neuromodulation ... - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/research-topics/71384/synergizing-artificial-intelligence-with-neuromodulation-for-movement-disorder-management>
88. Machine Learning for Personalized Brain Stimulation: AI-Optimized Neuromodulation Treatments - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/390108226_Machine_Learning_for_Personalized_Brain_Stimulation_AI-Optimized_Neuromodulation_Treatments
89. (PDF) The AI Revolution in Neuromodulation: How OpenAI o3, GPT-5 (upcoming), and Google AI Research Assistant Are Transforming Deep Brain Stimulation - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/389321730_The_AI_Revolution_in_Neuromodulation_How_OpenAI_o3_GPT-5_upcoming_and_Google_AI_Research_Assistant_Are_Transforming_Deep_Brain_Stimulation
90. Soft pneumatic muscles for post-stroke lower limb ankle rehabilitation: leveraging the potential of soft robotics to optimize functional outcomes - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2023.1251879/full>
91. A Survey on Flexible Exoskeleton Robot - Sci-Hub, 6. 14, 2025, <https://www.sci->

- hub.se/downloads/2020-05-23/2d/xing2020.pdf
92. Soft pneumatic muscles for post-stroke lower limb ankle rehabilitation: leveraging the potential of soft robotics to optimize functional outcomes, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10539589/>
 93. Neural Network Adaptive Control of Hand Rehabilitation Robot Driven by Flexible Pneumatic Muscles - White Rose Research Online, 6. 14, 2025, <https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/176185/1/Neural%20Network%20Adaptive%20Control%20of%20Hand%20Rehabilitation%20Robot%20Driven%20by%20Flexible%20Pneumatic%20Muscles.pdf>
 94. Soft and Hard Robotics for Movement Rehabilitation, Analysis and Modelling | Request PDF, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/340890773_Soft_and_Hard_Robotics_for_Movement_Rehabilitation_Analysis_and_Modelling
 95. Soft exoskeletons | Soft Robotics Class Notes - Fiveable, 6. 14, 2025, <https://library.fiveable.me/soft-robotics/unit-9/soft-exoskeletons/study-guide/wHgeFmFMCUAxisKi>
 96. Update on Current Technologies for Deep Brain Stimulation in Parkinson's Disease - PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7502302/>
 97. Robotic Devices used in Rehabilitation - Physiopedia, 6. 14, 2025, https://www.physio-pedia.com/Robotic_Devices_used_in_Rehabilitation
 98. A Brief Review of Rehabilitation Wearable Robots for the Upper and Lower Limbs, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/377557459_A_Brief_Review_of_Rehabilitation_Wearable_Robots_for_the_Upper_and_Lower_Limbs
 99. Design and Dimension Optimization of Rigid-Soft Hand Function Rehabilitation Robots, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/390726529_Design_and_Dimension_Optimization_of_Rigid-Soft_Hand_Function_Rehabilitation_Robots
 100. Soft assistive robotic wearables get a boost from rapid design tool | MIT News, 6. 14, 2025, <https://news.mit.edu/2022/soft-assistive-robotic-wearables-get-boost-rapid-design-tool-0503>
 101. (PDF) Compliant actuator designs - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/224587361_Compliant_actuator_designs
 102. The New Generation of Compliant Actuators for Use in Controllable Bio-Inspired Wearable Robots | Request PDF - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/308985068_The_New_Generation_of_Compliant_Actuators_for_Use_in_Controllable_Bio-Inspired_Wearable_Robots
 103. Compliant Mechanisms and Actuators for Exoskeletons and Human-Robot Interactions, 6. 14, 2025, https://www.mdpi.com/journal/machines/special_issues/4QMHP87576
 104. USE OF COMPLIANT ACTUATORS IN PROSTHETICS AND REHABILITATION

- ROBOTICS, 6. 14, 2025,
https://www.worldscientific.com/doi/10.1142/9789814415958_0003
105. Compliant Actuators for Hand Exoskeletons - YouTube, 6. 14, 2025,
https://www.youtube.com/watch?v=Ca_mWatrOnA
 106. Soft Exosuits | Harvard Biodesign Lab, 6. 14, 2025,
<https://biodesign.seas.harvard.edu/soft-exosuits>
 107. Wearable Movement Sensors for Rehabilitation: A Focused Review of Technological and Clinical Advances - PubMed Central, 6. 14, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6700726/>
 108. Elastic Actuators and Flexible Sensors for Exoskeleton ... - Frontiers, 6. 14, 2025,
<https://www.frontiersin.org/research-topics/66874/elastic-actuators-and-flexible-sensors-for-exoskeleton-robots>
 109. Soft and stretchy fabric-based sensors for wearable robots - Wyss Institute, 6. 14, 2025,
<https://wyss.harvard.edu/news/soft-and-stretchy-fabric-based-sensors-for-wearable-robots/>
 110. Flexible Electronics and Devices as Human-Machine Interfaces for Medical Robotics - PMC, 6. 14, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9035141/>
 111. Flexible Multifunctional Sensors for Wearable and Robotic Applications - ResearchGate, 6. 14, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/330152714_Flexible_Multifunctional_Sensors_for_Wearable_and_Robotic_Applications
 112. Brain-Computer Interface Robotics for Hand Rehabilitation After Stroke: A Systematic Review | medRxiv, 6. 14, 2025,
<https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2019.12.11.19014571v1.full-text>
 113. Hybrid Brain-Computer Interface Controlled Soft Robotic Glove for Stroke Rehabilitation, 6. 14, 2025,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38648145/>
 114. An EEG/EMG/EOG-Based Multimodal Human-Machine Interface to Real-Time Control of a Soft Robot Hand - Frontiers, 6. 14, 2025,
<https://www.frontiersin.org/journals/neurorobotics/articles/10.3389/fnbot.2019.00007/full>
 115. SSVEP-Based Brain Computer Interface Controlled Soft Robotic Glove for Post-Stroke Hand Function Rehabilitation - ResearchGate, 6. 14, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/361481528_SSVEP-Based_Brain_Computer_Interface_Controlled_Soft_Robotic_Glove_for_Post-Stroke_Hand_Function_Rehabilitation
 116. A Personalized Multimodal BCI-Soft Robotics System for Rehabilitating Upper Limb Function in Chronic Stroke Patients - MDPI, 6. 14, 2025,
<https://www.mdpi.com/2313-7673/10/2/94>
 117. Brain Tissue Responses to Neural Implants Impact Signal Sensitivity and Intervention Strategies - PMC - PubMed Central, 6. 14, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4304489/>
 118. Foreign Body Reaction to Implanted Biomaterials and Its Impact in Nerve



- Neuroprosthetics - PMC - PubMed Central, 6. 14, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8081831/>
119. Research Progress on the Flexibility of an Implantable Neural ..., 6. 14, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8954487/>
120. A Review of the Biocompatibility of Implantable Devices: Current Challenges to Overcome Foreign Body Response - PMC - PubMed Central, 6. 14, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2769826/>
121. Editorial: Biocompatibility of implanted devices ... - Frontiers, 6. 14, 2025,
<https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2024.1505912/full>
122. Investigating Immunomodulatory Biomaterials for Preventing the Foreign Body Response, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2306-5354/10/12/1411>
123. 脑机接口：现状，问题与展望 - 生物化学与生物物理进展, 6. 14, 2025,
<http://www.pibb.ac.cn/pibbcn/article/html/20200072>
124. 非侵入式脑—机接口编解码技术研究进展 - 中国图象图形学报, 6. 14, 2025,
<https://www.cjig.cn/rc-pub/front/front-article/download/38873405/lowqualitypdf/%E9%9D%9E%E4%BE%B5%E5%85%A5%E5%BC%8F%E8%84%91%E2%80%94%E6%9C%BA%E6%8E%A5%E5%8F%A3%E7%BC%96%E8%A7%A3%E7%A0%81%E6%8A%80%E6%9C%AF%E7%A0%94%E7%A9%B6%E8%BF%9B%E5%B1%95.pdf>
125. The Evolving Landscape of Non-Invasive EEG Brain-Computer Interfaces, 6. 14, 2025, <https://www.bme.utexas.edu/news/the-evolving-landscape-of-non-invasive-eeeg-brain-computer-interfaces>
126. 2022 年脑机接口研究进展 - 信号处理, 6. 14, 2025,
<https://signal.ejournal.org.cn/cn/article/pdf/preview/10.16798/j.issn.1003-0530.2023.08.003.pdf>
127. Modulating Brain Activity with Invasive Brain-Computer Interface: A Narrative Review - PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9856340/>
128. 脑机接口技术赋能人类未来 - 清华大学, 6. 14, 2025,
<https://www.tsinghua.edu.cn/info/1182/118062.htm>
129. Optical Noninvasive Brain-Computer Interface Development: Challenges and Opportunities, 6. 14, 2025, <https://www.jhuapl.edu/content/techdigest/pdf/V35-N04/35-04-Blodgett.pdf>
130. How does invasive vs non-invasive BCI compare? - Patsnap Synapse, 6. 14, 2025, <https://synapse.patsnap.com/article/how-does-invasive-vs-non-invasive-bci-compare>
131. 医疗器械专题之脑机接口, 6. 14, 2025,
https://pdf.dfcfw.com/pdf/H301_AP202503041644026495_1.pdf
132. 脑机接口研究综述 Review of Brain-Computer Interface Technology, 6. 14, 2025, https://pdf.hanspub.org/airr20230100000_30366267.pdf



133. Long-term intracortical microelectrode array performance in a human: a 5 year retrospective analysis - ResearchGate, 6. 14, 2025,
[https://www.researchgate.net/publication/353720771 Long-term intracortical microelectrode array performance in a human a 5 year retrospective analysis](https://www.researchgate.net/publication/353720771_Long-term_intracortical_microelectrode_array_performance_in_a_human_a_5_year_retrospective_analysis)
134. 脑机接口领域发展态势 - 生命科学, 6. 14, 2025,
https://lifescience.sinh.ac.cn/webadmin/upload/20250218102624_3900_4631.pdf
135. Non-Invasive Brain-Computer Interfaces: State of the Art and Trends - PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11861396/>
136. Wisear, 6. 14, 2025, <https://www.wisear.io/posts/invasive-bci-trailblazers-neuralink-blackrock-synchron-and-the-pioneers-using-their-tech>
137. 7 brain-computer interface companies you need to know - MassDevice, 6. 14, 2025, <https://www.massdevice.com/brain-computer-interface-bci-companies/>
138. Enhancing biocompatibility of the brain-machine interface: A review - PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11416625/>
139. Research Progress on the Flexibility of an Implantable Neural Microelectrode - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2072-666X/13/3/386>
140. Implantable Thin Film Devices as Brain-Computer Interfaces: Recent Advances in Design and Fabrication Approaches - MDPI, 6. 14, 2025,
<https://www.mdpi.com/2079-6412/11/2/204>
141. Advancements in Flexible Electrode Implantation for Invasive Brain-Computer Interfaces, 6. 14, 2025,
[https://www.researchgate.net/publication/389159230 Advancements in Flexible Electrode Implantation for Invasive Brain-Computer Interfaces](https://www.researchgate.net/publication/389159230_Advancements_in_Flexible_Electrode_Implantation_for_Invasive_Brain-Computer_Interfaces)
142. Flexible Electrodes for Brain-Computer Interface System | Request PDF - ResearchGate, 6. 14, 2025,
[https://www.researchgate.net/publication/370550544 Flexible Electrodes for Brain-Computer Interface System](https://www.researchgate.net/publication/370550544_Flexible_Electrodes_for_Brain-Computer_Interface_System)
143. ABT Investor Relations - Abbott Laboratories - Alpha Spread, 6. 14, 2025,
<https://www.alphaspread.com/security/nyse/abt/investor-relations>
144. Advancing neurostimulation: The impact of smaller batteries on ..., 6. 14, 2025,
<https://www.htworld.co.uk/news/advancing-neurostimulation-the-impact-of-smaller-batteries-on-implanted-devices-lead25/>
145. Meta-analysis and review of rechargeable implantable pulse generators for spinal cord stimulation and deep brain stimulation - PMC, 6. 14, 2025,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11634974/>
146. Rechargeable Implantable Neurostimulators: How Much Battery Capacity Remains After 10 Years? (1486) - Neurology.org, 6. 14, 2025,
[https://www.neurology.org/doi/10.1212/WNL.96.15 supplement.1486](https://www.neurology.org/doi/10.1212/WNL.96.15_supplement.1486)
147. 首款高带宽无线脑-机接口在人体临床试验中表现良好 - 生物通, 6. 14, 2025,
<https://www.ebiotrade.com/newsf/2021-4/20210402083246683.htm>



148. Brain-Computer Interfaces: Exploring the Last Frontier - byFounders VC, 6. 14, 2025, <https://www.bfounders.vc/insights/brain-computer-interfaces>
149. Ethical Frontiers: Navigating the Intersection of Neurotechnology and Cybersecurity, 6. 14, 2025, <https://www.scientificarchives.com/article/ethical-frontiers-navigating-the-intersection-of-neurotechnology-and-cybersecurity>
150. The Rise of Neurotech and the Risks for Our Brain Data: Privacy and Security Challenges, 6. 14, 2025, <https://www.newamerica.org/future-security/reports/the-rise-of-neurotech-and-the-risks-for-our-brain-data/privacy-and-security-challenges/>
151. 脑机接口技术伦理规范考量- PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10162913/>
152. Cybersecurity for Brain-Computer Interfaces: Protecting Neural Data - - Akitra, 6. 14, 2025, <https://akitra.com/cybersecurity-for-brain-computer-interfaces/>
153. BCI Security – UW BioRobotics Laboratory, 6. 14, 2025, <https://wp.ece.uw.edu/brl/neural-engineering/bci-security/>
154. EEG-Based Brain-Computer Interfaces are Vulnerable to Adversarial Attacks | IEEE SMC, 6. 14, 2025, <https://www.ieeesmc.org/wp-content/uploads/2021/03/BCIattack.pdf>
155. Brain-Computer Interface Applications: Security and Privacy Challenges - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/280948092_Brain-Computer_Interface_Applications_Security_and_Privacy_Challenges
156. 对脑机接口若干不准确或错误的认知与误导性宣传 - 上海市神经科学学会, 6. 14, 2025, <https://www.ssn.org.cn/news/362.html>
157. The brain computer interface market is growing – but what are the risks?, 6. 14, 2025, <https://www.weforum.org/stories/2024/06/the-brain-computer-interface-market-is-growing-but-what-are-the-risks/>
158. (PDF) Adversarial Attacks and Defenses in Physiological Computing ..., 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/360894030_Adversarial_Attacks_and_Defenses_in_Physiological_Computing_A_Systematic_Review
159. Adversarial Attacks and Defenses in Images, Graphs and Text: A Review, 6. 14, 2025, <https://www.mi-research.net/en/article/doi/10.1007/s11633-019-1211-x>
160. Adversarial Neural Network Training for Secure and Robust Brain-to-Brain Communication, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/378949640_Adversarial_Neural_Network_Training_for_Secure_and_Robust_Brain-to-Brain_Communication
161. Paper Digest: Recent Papers on Generative Adversarial Network, 6. 14, 2025, <https://www.paperdigest.org/2020/04/recent-papers-on-generative-adversarial-network/>
162. nctaa 4.0 - Indira College of Engineering and Management (ICEM), 6. 14, 2025,



- https://indiraicem.ac.in/assets/pdf/NCTAAI4.0_Proceeding.pdf
163. Neuromodulation Devices Market Size and CAGR by 2030 - The Insight Partners, 6. 14, 2025, <https://www.theinsightpartners.com/reports/neuromodulation-devices-market>
 164. Neuromodulation Devices Market Expects a 9.2% CAGR (2030) - The Insight Partners, 6. 14, 2025, <https://www.theinsightpartners.com/pr/neuromodulation-devices-market>
 165. Neuromodulation Devices Market Size, Trend, Demand Analysis till 2032, 6. 14, 2025, <https://www.emergenresearch.com/industry-report/neuromodulation-devices-market>
 166. Neuroprosthetics Market Size to Hit USD 62.98 Bn by 2034 - Precedence Research, 6. 14, 2025, <https://www.precedenceresearch.com/neuroprosthetics-market>
 167. Home Medical Equipment Market to Reach \$56.45 Billion by 2027, 6. 14, 2025, <https://www.alliedmarketresearch.com/press-release/homecare-medical-equipment-market.html>
 168. U.S. Home Medical Equipment Market Size to Surpass US\$ 21.13 BN By 2030 - BioSpace, 6. 14, 2025, <https://www.biospace.com/u-s-home-medical-equipment-market-size-to-surpass-us-21-13-bn-by-2030>
 169. Neuromodulation Devices Market Size, Growth Outlook 2035 - Market Research Future, 6. 14, 2025, <https://www.marketresearchfuture.com/reports/neuromodulation-devices-market-1337>
 170. Home Medical Equipment Market Size, Share, Demand Forecast by 2033 - Straits Research, 6. 14, 2025, <https://straitsresearch.com/report/home-medical-equipment-market>
 171. Internal Neuromodulation Devices Market Size & Competitors, 6. 14, 2025, <https://www.researchandmarkets.com/report/internal-neuromodulation-devices>
 172. Neuromodulation Market Size, Trends - Share & Research Report ..., 6. 14, 2025, <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/neuromodulation-market>
 173. Neuroprosthetics Market Size, Share, Scope, Analysis & Forecast, 6. 14, 2025, <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/global-neuroprosthetics-market-size-and-forecast/>
 174. Neuromodulation Market Size, Share & Trends Report | 2033 - Straits Research, 6. 14, 2025, <https://straitsresearch.com/report/neuromodulation-market>
 175. Invasive Neuromodulation 2025 Trends and Forecasts 2033: Analyzing Growth Opportunities - Archive Market Research, 6. 14, 2025, <https://www.archivemarketresearch.com/reports/invasive-neuromodulation-314119>
 176. Investor Relations | Medtronic - Overview, 6. 14, 2025, <https://investorrelations.medtronic.com/>



177. Q4 FY25 MDT Earnings Presentation - Medtronic investor relations, 6. 14, 2025, https://investorrelations.medtronic.com/image/Earnings_Presentation_FY25Q4_FINAL.pdf
178. May 2025 - Medtronic investor relations, 6. 14, 2025, <https://investorrelations.medtronic.com/image/Q4FY25-Marketing-Handout-Final.pdf>
179. BSX Investor Relations - Boston Scientific Corp - Alpha Spread, 6. 14, 2025, <https://www.alphaspread.com/security/nyse/bsx/investor-relations>
180. Boston Scientific announces results for first quarter 2025, 6. 14, 2025, <https://news.bostonscientific.com/2025-04-23-Boston-Scientific-announces-results-for-first-quarter-2025>
181. Q4 2024 Financial & Operational Highlights - Boston Scientific ..., 6. 14, 2025, <https://investors.bostonscientific.com/~media/Files/B/Boston-Scientific-IR-V3/FOH/q4-2024-financial-operational-highlights.pdf>
182. How do Neuralink's "threads" compare with the BlackRock MicroFlex array? - Reddit, 6. 14, 2025, https://www.reddit.com/r/Neuralink/comments/g7h66u/how_do_neuralinks_threads_compare_with_the/
183. Clinical Benefit of Vagus Nerve Stimulation in Intractable Epilepsy: A Systematic Review and Meta-analysis | medRxiv, 6. 14, 2025, <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2025.05.10.25327360v1>
184. FDA Clears Brain-Computer Interface Device for the Measurement and Stimulation of Cortical Brain Activity - Practical Neurology, 6. 14, 2025, <https://practicalneurology.com/news/fda-clears-braincomputer-interface-device-for-the-measurement-and-stimulation-of-cortical-brain-activity/2474229/>
185. FDA clears Precision Neuroscience's minimally invasive brain-computer interface implant, 6. 14, 2025, <https://www.fiercebiotech.com/medtech/fda-clears-precision-neurosciences-minimally-invasive-brain-computer-interface-implant>
186. About Us - FOURIER-Robotics, 6. 14, 2025, <https://www.fftai.com/about-us>
187. Fourier Intelligence RehabHub™ - YouTube, 6. 14, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=Zx3UezdJYZU>
188. Fourier (company) - Wikipedia, 6. 14, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_\(company\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_(company))
189. On its 10th anniversary, Fourier aims to introduce humanoid robots into the health and rehabilitation care scenario | The Frontline, 6. 14, 2025, <https://eu.36kr.com/en/p/3287569366459272>
190. Fourier Rehab and Brooks Rehabilitation Sign Strategic MOU to Advance Research in Robotic Neurorehabilitation, 6. 14, 2025, <https://brookсреhab.org/resources/fourier-rehab-and-brooks-rehabilitation-to-advance-research-in-robotic-neurorehabilitation/>



191. Fourier GR-1 starts pre-sale and commercialization of humanoid robots can be expected (with concept stocks) - Moomoo, 6. 14, 2025, <https://www.moomoo.com/news/post/27890878/hong-kong-stock-concept-tracking-fourier-gr-1-starts-pre>
192. Fourier Intelligence Raises Tens of Millions in Series C+ Financing Round, 6. 14, 2025, <https://www.volcanics.com/post/fourier-intelligence-raises-tens-of-millions-in-series-c-financing-round>
193. Rehabilitation Robots Market Size Expected to Reach USD 1776.24 Mn by 2034, 6. 14, 2025, <https://www.globenewswire.com/news-release/2025/02/21/3030522/0/en/Rehabilitation-Robots-Market-Size-Expected-to-Reach-USD-1776-24-Mn-by-2034.html>
194. About Us - Shanghai Siyi Intelligent Technology Co., Ltd, 6. 14, 2025, <https://www.syrebo.com/about-us>
195. Hand Rehab Gloves for Home Use - SIYI INTELLIGENCE - Syrebo, 6. 14, 2025, <https://www.syrebo.com/rehabilitation-system-for-clinic/hand-rehab-gloves.html>
196. East Asian rehab robotics take US, Australia and more briefs | MobiHealthNews, 6. 14, 2025, <https://www.mobihealthnews.com/news/asia/east-asian-rehab-robotics-take-us-australia-and-more-briefs>
197. One More Certificate: Syrebo Hand Rehabilitation Robot Achieves TGA Certification in Australia - PR Newswire APAC, 6. 14, 2025, <https://enmobile.prnasia.com/releases/apac/one-more-certificate-syrebo-hand-rehabilitation-robot-achieves-tga-certification-in-australia-474087.shtml>
198. The Challenges and Opportunities of Digital Therapeutics (DTx ...), 6. 14, 2025, <https://medwave.io/2024/02/the-challenges-and-opportunities-of-digital-therapeutics-dtx-reimbursement/>
199. Soft Robotic Glove for Neuromuscular Rehabilitation - Wyss Institute, 6. 14, 2025, <https://wyss.harvard.edu/technology/soft-robotic-glove/>
200. Invest in Imago Rehab: AI & robotics for the \$210B rehab industry - Wefunder, 6. 14, 2025, https://wefunder.com/imago?trk=public_post_main-feed-card_reshare-text
201. Imago Rehab Profile - HigherGov, 6. 14, 2025, <https://www.highergov.com/awardee/imago-rehab-inc-104254226/>
202. Imago Rehab 2025 Company Profile: Valuation, Funding & Investors | PitchBook, 6. 14, 2025, <https://pitchbook.com/profiles/company/489242-71>
203. Imago Rehab on Wefunder 2024 - Kingscrowd, 6. 14, 2025, <https://kingscrowd.com/imago-rehab-on-wefunder-2024/>
204. Regulatory Overview for Neurological Devices - FDA, 6. 14, 2025, <https://www.fda.gov/medical-devices/neurological-devices/regulatory-overview-neurological-devices>
205. Implanted Brain-Computer Interface Devices for ... - Federal Register, 6. 14, 2025, <https://www.federalregister.gov/documents/2019/02/25/2019->

[03144/implanted-brain-computer-interface-devices-for-patients-with-paralysis-or-amputation-nonclinical](#)

206. FDA finalizes brain-computer interface guidance, issues draft for glycemic control devices, 6. 14, 2025, <https://www.raps.org/news-and-articles/news-articles/2021/5/fda-finalizes-brain-computer-interface-guidance-is>
207. Rehabilitation Equipment Market Growth, Drivers, and Opportunities, 6. 14, 2025, <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/rehabilitation-equipment-market-194775519.html>
208. home rehabilitation products services Market Predictions and ..., 6. 14, 2025, <https://www.datainsightsmarket.com/reports/home-rehabilitation-products-services-1493408>
209. Are We at a Tipping Point for Prescription Digital Therapeutics? - MMIT, 6. 14, 2025, <https://www.mmitnetwork.com/thought-leadership/tipping-point-prescription-digital-therapeutics/>
210. The Emerging Business Models For Digital Therapeutics - Med Device Online, 6. 14, 2025, <https://www.meddeviceonline.com/doc/the-emerging-business-models-for-digital-therapeutics-0001>
211. How To Get Digital Therapeutics Reimbursed — Faces of digital health, 6. 14, 2025, <https://www.facesofdigitalhealth.com/blog/dtx-alliance-reimbursement>
212. Exploring the potential of digital therapeutics: An assessment of ..., 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11406628/>
213. Effects of brain-computer interface based training on post-stroke ..., 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40033447/>
214. Virtual reality for stroke rehabilitation | Cochrane, 6. 14, 2025, https://www.cochrane.org/CD008349/STROKE_virtual-reality-stroke-rehabilitation
215. Deep brain stimulation for Parkinson's disease: systematic review with meta - BMJ Medicine, 6. 14, 2025, <https://bmjmedicine.bmj.com/content/bmjmed/3/1/e000705.full.pdf>
216. Comparison between deep brain stimulation and magnetic resonance-guided focused ultrasound in the treatment of essential tremor: a systematic review and pooled analysis of functional outcomes, 6. 14, 2025, <https://jnnp.bmj.com/content/91/12/1270>
217. Vagus nerve stimulation paired with rehabilitation for motor function ..., 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36600569/>
218. Brain Computer Interface Treatment for Motor Rehabilitation of Upper Extremity of Stroke Patients—A Feasibility Study - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/neuroscience/articles/10.3389/fnins.2020.591435/full>
219. Brain-computer interfaces for post-stroke motor rehabilitation: a meta-analysis - PMC, 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5945970/>
220. Therapeutic Effectiveness of Brain Computer Interfaces in Stroke Patients: A

- Systematic Review – Scientific Archives, 6. 14, 2025,
<https://www.scientificarchives.com/article/therapeutic-effectiveness-of-brain-computer-interfaces-in-stroke-patients-a-systematic-review>
221. Vagus Nerve Stimulation Paired With Upper-Limb Rehabilitation After Stroke: One-Year Follow-up – X-MOL, 6. 14, 2025, <https://m.x-mol.net/paper/detail/1267571075668537344>
 222. Effect of vagus nerve stimulation paired with rehabilitation for upper limb function improvement after stroke: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials – ResearchGate, 6. 14, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/356599152_Effect_of_vagus_nerve_stimulation_paired_with_rehabilitation_for_upper_limb_function_improvement_after_stroke_a_systematic_review_and_meta-analysis_of_randomized_controlled_trials
 223. Efficacy and Safety of Vagus Nerve Stimulation on Upper Limb Motor Recovery After Stroke. A Systematic Review and Meta-Analysis – Frontiers, 6. 14, 2025,
<https://www.frontiersin.org/journals/neurology/articles/10.3389/fneur.2022.889953/full>
 224. Effect of vagus nerve stimulation paired with rehabilitation for upper limb function improvement after stroke: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials – PubMed, 6. 14, 2025,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34839304/>
 225. The Application of Soft Robotic Gloves in Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials – MDPI, 6. 14, 2025,
<https://www.mdpi.com/2076-3425/13/6/900>
 226. The Application of Soft Robotic Gloves in Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials – PubMed, 6. 14, 2025,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37371378/>
 227. Comparison of Efficacy of Lokomat and Wearable Exoskeleton-Assisted Gait Training in People With Spinal Cord Injury: A Systematic Review and Network Meta-Analysis – PubMed, 6. 14, 2025,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35493806/>
 228. Effect of wearable exoskeleton on post-stroke gait: A systematic review and meta-analysis, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35525427/>
 229. Effect of wearable exoskeleton on post-stroke gait: A systematic review and meta-analysis, 6. 14, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/360457247_Effect_of_wearable_exoskeleton_on_post-stroke_gait_a_systematic_review_and_meta-analysis
 230. Effect of Robot-Assisted Wearable Exoskeleton on Gait Speed of Post-Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis of a Randomized Controlled Trials – Physical Therapy Rehabilitation Science, 6. 14, 2025,
<https://www.jptrs.org/journal/view.html?doi=10.14474/ptrs.2022.11.4.471>
 231. Comparison of Efficacy of Lokomat and Wearable Exoskeleton-Assisted Gait

- Training in People With Spinal Cord Injury: A Systematic Review and Network Meta-Analysis - Frontiers, 6. 14, 2025,
<https://www.frontiersin.org/journals/neurology/articles/10.3389/fneur.2022.772660/full>
232. Investigation of the Effectiveness of the Robotic ReStore Soft Exoskeleton in the Development of Early Mobilization, Walking, and Coordination of Stroke Patients: A Randomized Clinical Trial - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2218-6581/13/3/44>
233. Flexible exoskeleton-assisted training enhances lower limb motor function after stroke: a systematic review and meta-analysis - PubMed, 6. 14, 2025,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40106023/>
234. Efficacy and safety of using a unilateral lower limb exoskeleton combined with conventional treatment in post-stroke rehabilitation: a randomized controlled trial - Frontiers, 6. 14, 2025,
<https://www.frontiersin.org/journals/bioengineering-and-biotechnology/articles/10.3389/fbioe.2024.1441986/full>
235. pubmed.ncbi.nlm.nih.gov, 6. 14, 2025,
[https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34130713/#:~:text=Results%3A%20Meta%20Analysis%20of%2042,0.46%3B%20P%20%3D%200.02\)%20and](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34130713/#:~:text=Results%3A%20Meta%20Analysis%20of%2042,0.46%3B%20P%20%3D%200.02)%20and)
236. Serious games for upper limb rehabilitation after stroke: a meta ..., 6. 14, 2025,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34130713/>
237. Deep brain stimulation for Parkinson's disease: systematic review with meta-analysis and trial sequential analysis | BMJ Medicine, 6. 14, 2025,
<https://bmjmedicine.bmj.com/content/3/1/e000705>
238. Deep Brain Stimulation in Parkinson Disease: A Meta-analysis of the Long-term Neuropsychological Outcomes - iris@unitn, 6. 14, 2025,
<https://iris.unitn.it/retrieve/e3835199-9543-72ef-e053-3705fe0ad821/1Deep%20Brain%20Stimulation.pdf>
239. Deep brain and cortical stimulation for epilepsy - Sprengers, M ..., 6. 14, 2025,
<https://www.cochranelibrary.com/cdsr/doi/10.1002/14651858.CD008497.pub3/full>
240. Comparison of Deep Brain Stimulation of the Hippocampus to Thalamic Targets and Responsive Neurostimulation for Adult Intractable Epilepsy: A Systematic Review and Meta-Analysis - PubMed, 6. 14, 2025,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39736312/>
241. Deep Brain Stimulation Offers Benefit for Intractable Epilepsy | MDedge - The Hospitalist, 6. 14, 2025, <https://blogs.the-hospitalist.org/content/deep-brain-stimulation-offers-benefit-intractable-epilepsy>
242. National Institute for Health and Care Excellence IP806/2 Deep brain stimulation for refractory epilepsy in adults - NICE, 6. 14, 2025,
<https://www.nice.org.uk/guidance/ipg678/documents/consultation-comments-and-responses>

243. Clinical Benefit of Vagus Nerve Stimulation in Intractable ... - medRxiv, 6. 14, 2025, <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2025.05.10.25327360v1.full.pdf>
244. Effects of vagus nerve stimulation on cognitive function in patients with epilepsy: a systematic review and meta-analysis - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/neurology/articles/10.3389/fneur.2024.1332882/full>
245. Responsive neurostimulation for patients with refractory mesial ..., 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12118465/>
246. Responsive Neurostimulation for the Treatment of Refractory Focal Epilepsy, 6. 14, 2025, <https://www.southcarolinablues.com/web/public/brands/medicalpolicyih/external-policies/responsive-neurostimulation-for-the-treatment-of-refractory-focal-epilepsy/>
247. Systematic Review and Meta-Analysis of Responsive Neurostimulation in Epilepsy, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/362542710_Systematic_Review_and_Meta-analysis_of_Responsive_Neurostimulation_in_Epilepsy
248. Closed-Loop Spinal Cord Stimulation in Chronic Pain Management: Mechanisms, Clinical Evidence, and Emerging Perspectives - MDPI, 6. 14, 2025, <https://www.mdpi.com/2227-9059/13/5/1091>
249. Long-Term Efficacy and Safety of High-Frequency Spinal Stimulation for Chronic Pain: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38595082/>
250. Long-Term Efficacy and Safety of High-Frequency Spinal ..., 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/379723844_Long-term_Efficacy_and_Safety_of_High-frequency_Spinal_Stimulation_for_Chronic_Pain_A_Meta-analysis_of_Randomized_Controlled_Trial
251. A patient-level meta-analysis of studies evaluating vagus nerve stimulation therapy for treatment-resistant depression - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23482508/>
252. Full article: A patient-level meta-analysis of studies evaluating vagus nerve stimulation therapy for treatment-resistant depression, 6. 14, 2025, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.2147/MDER.S41017>
253. A narrative review on invasive brain stimulation for treatment-resistant depression - SciELO, 6. 14, 2025, <https://www.scielo.br/j/rbp/a/swHHpdsNtQyMcp34cFMdPjd/>
254. Vagus nerve stimulation (VNS) therapy in patients with treatment resistant depression: A systematic review and meta-analysis - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31978785/>
255. Vagus Nerve Stimulation for Depression: A Systematic Review - Frontiers, 6. 14, 2025,

- <https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2019.00064/full>
256. (PDF) Vagus nerve stimulation (VNS) therapy in patients with treatment resistant depression: A systematic review and meta-analysis - ResearchGate, 6. 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/338824186_Vagus_nerve_stimulation_VNS_therapy_in_patients_with_treatment_resistant_depression_A_systematic_review_and_meta-analysis
 257. Symptom Provocation and Clinical Response to Transcranial Magnetic Stimulation: A Systematic Review and Meta-Analysis - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40465306>
 258. [Article] Accelerated Theta-Burst Stimulation for Treatment-Resistant Depression: A Randomized Clinical Trial Matheus Rassi F Ramos et al. JAMA Psychiatry. 2025. : r/Scholar - Reddit, 6. 14, 2025, https://www.reddit.com/r/Scholar/comments/1k3v5lr/article_accelerated_thetaburst_stimulation_for/
 259. Transcranial Magnetic Stimulation as a Treatment of Depression and Other Psychiatric/Neurologic Disorders | Providers | Blue Cross NC, 6. 14, 2025, <https://www.bluecrossnc.com/providers/policies-guidelines-codes/commercial/behavioral-health/updates/transcranial-magnetic-stimulation-tms>
 260. Deep brain stimulation and treatment-resistant obsessive-compulsive disorder: A systematic review | Revista de Psiquiatria y Salud Mental (English Edition) - Elsevier, 6. 14, 2025, <https://www.elsevier.es/es-revista-revista-psiquiatria-salud-mental-486-articulo-deep-brain-stimulation-treatment-resistant-obsessive-compulsive-S2173505019300032>
 261. Deep brain stimulation for obsessive-compulsive disorder and treatment-resistant depression: systematic review - PubMed, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20202203/>
 262. Efficacy of deep brain stimulation for treatment-resistant obsessive ..., 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36127157/>
 263. Motor cortical inhibitory deficits in patients with obsessive-compulsive disorder—A systematic review and meta-analysis of transcranial magnetic stimulation literature - Frontiers, 6. 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/psychiatry/articles/10.3389/fpsy.2022.1050480/full>
 264. TMS for the Treatment of OCD - Psychiatric Times, 6. 14, 2025, <https://www.psychiatrictimes.com/view/tms-for-the-treatment-of-ocd>
 265. The Efficacy of Transcranial Magnetic Stimulation in the Treatment of Obsessive-Compulsive Disorder: An Umbrella Review of Meta-Analyses | CNS Spectrums - Cambridge University Press, 6. 14, 2025, <https://www.cambridge.org/core/journals/cns-spectrums/article/efficacy-of-transcranial-magnetic-stimulation-in-the-treatment-of-obsessivecompulsive->



[disorder-an-umbrella-review-of-](#)

[metaanalyses/CF404360CDB0AE548B7EF80EC04CDAE6](#)

266. Efficacy and Safety of Deep Transcranial Magnetic Stimulation for Obsessive-Compulsive Disorder: A Prospective Multicenter Randomized Double-Blind Placebo-Controlled Trial - Psychiatry Online, 6. 14, 2025,

<https://psychiatryonline.org/doi/10.1176/appi.ajp.2019.18101180>

267. A Meta-analysis of Transcranial Magnetic Stimulation in Obsessive-Compulsive Disorder, 6. 14, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37343662/>

268. (PDF) A Meta-Analysis of the Effectiveness of Different Cortical Targets Used in Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation (rTMS) for the Treatment of Obsessive-Compulsive Disorder (OCD) - ResearchGate, 6. 14, 2025,

[https://www.researchgate.net/publication/323072865_A_Meta-](https://www.researchgate.net/publication/323072865_A_Meta-Analysis_of_the_Effectiveness_of_Different_Cortical_Targets_Used_in_Repetitive_Transcranial_Magnetic_Stimulation_rTMS_for_the_Treatment_of_Obsessive-Compulsive_Disorder_OCD)

[Analysis of the Effectiveness of Different Cortical Targets Used in Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation rTMS for the Treatment of Obsessive-Compulsive Disorder OCD](https://www.researchgate.net/publication/323072865_A_Meta-Analysis_of_the_Effectiveness_of_Different_Cortical_Targets_Used_in_Repetitive_Transcranial_Magnetic_Stimulation_rTMS_for_the_Treatment_of_Obsessive-Compulsive_Disorder_OCD)

269. 神经功能康复：神经肌肉重建技术的进步和更严峻的挑战, 6. 14, 2025,

<https://www.sjzsyj.com.cn/CN/10.4103/NRR.NRR-D-24-00613>

270. Targeted Muscle Reinnervation—an Up-to-Date Review: Evidence ..., 6. 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12081100/>

271. COMPLETE: Targeted Muscle Reinnervation: A Neural Interface for Artificial Limbs, 6. 14, 2025, <https://www.sralab.org/research/labs/bionic-medicine/projects/complete-targeted-muscle-reinnervation>

272. Targeted Muscle Reinnervation | OHSU, 6. 14, 2025,

<https://www.ohsu.edu/sites/default/files/2024-04/13.%20Targeted%20Muscle%20Reinnervation%20-%20A.%20Chi.pdf>

273. Targeted Muscle Reinnervation (TMR) or Regenerative Peripheral Nerve Interface (RPNI) for pain prevention in patients with limb amputation: a protocol for a systematic review and meta-analysis | medRxiv, 6. 14, 2025,

<https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2024.12.23.24319539v2.full>