

无创深部定位脑刺激：提升运动表现

近些年,无创脑刺激在体育领域用于提高专业运动员、普通健康人群运动能力的尝试,愈发得到关注。回顾以往无创脑刺激相关研究发现,虽然大多数实验样本量较小,但其在改善运动学习,提高肌肉力量和减缓肌肉疲劳等方面具有潜在优势(卞秀玲等,2018;王开元等,2019)。其中,经颅直流电刺激(Transcranial Direct Current Stimulation, tDCS)相关研究结果表明,tDCS可提高运动耐力、肢体最大力量、最大输出功率和无氧做功能力。经颅磁刺激(Transcranial Magnetic Stimulation, TMS)也可用来探究运动中皮层适应性变化,帮助我们理解大脑网络是如何优化负责协调复杂运动学习中的运动程序(Lauber et al.,2018),进而为提高运动能力奠定神经动作控制的理论基础。然而,无创脑刺激如何改善运动学习,提高运动表现的神经生理学机制尚不十分明确。目前,耐力提升存在3种机制推测:1) tDCS可以改善人体运动动机,减少肌肉疼痛,调节肌肉协同做功;2) 刺激后神经驱动增强、脊髓层级上疲劳的减少;3) 接受刺激后大脑可以在不改变运动命令的前提下,调整感觉运动整合和相关认知需求。最大力量或做功能力提升存在两种机制推测:1) tDCS可增加皮质脊髓兴奋性,减少皮质内短间隙抑制和增加交叉激活,达到改善最大力量或做功能力的目的;2) 自感疲劳度的降低(Angius et al.,2018)。

尽管 tDCS 和 TMS 具有运动能力增强的作用,但某些实证研究结果却对这一结论持怀疑态度,其可能的原因有:1) 不同研究的刺激方案、电极大小和放置位置的差异,以及刺激电场本身较差的聚焦性(Miranda et al.,2013),使得靶区以外的其他脑区也受到波及,从而对最终结果产生影响;2) 运动皮层下肢控制区域相较于上肢的体积更小,又位于大脑左右半球纵裂深处,需要对上覆区域加大作用强度,刺激才可能会触及深处目标位置,但因加大刺激强度所引发的副作用目前还不得而知。综上,理想层面上的刺激方法应该同时具有聚焦、深入和非侵入的特点。

2017年 *Cell* 杂志上刊登了一篇关于“通过相位干涉电场(Temporal Interference Electrical Fields, TI)进行无创深部脑刺激”的原创文章(Grossman et al.,2017),使得理想中兼具无创和聚焦的新型深层脑刺激技术开始走进现实。该技术将频率在 kHz 范围内稍有不同的两个电场 E_1 、 E_2 输送至脑,其中, kHz 级别的电场不会使神经元被激发放电,而两电场可以在深部脑区形成一个频率差值 $[\Delta f = E_1(f + \Delta f) - E_2(f)]$ 的包络波,这一低频的包络波足以激发选定区域的神经元活动,且不影响临近和上层覆盖组织。例如,一组 2 kHz 和 2.01 kHz 的高频电场同时作用于脑,神经元会对干涉电场差频即 10 Hz 产生响应,激发放电,但对 2 kHz 的载波无响应,这种高频电场的相互干涉使聚焦定位成为可能(图1)。该技术背后的生物物理原理是,神经元每个动作电位产生后有较长不应期(约 1 ms),致其无法继续跟随较高频率(>1 kHz)的电刺激产生神经冲动。

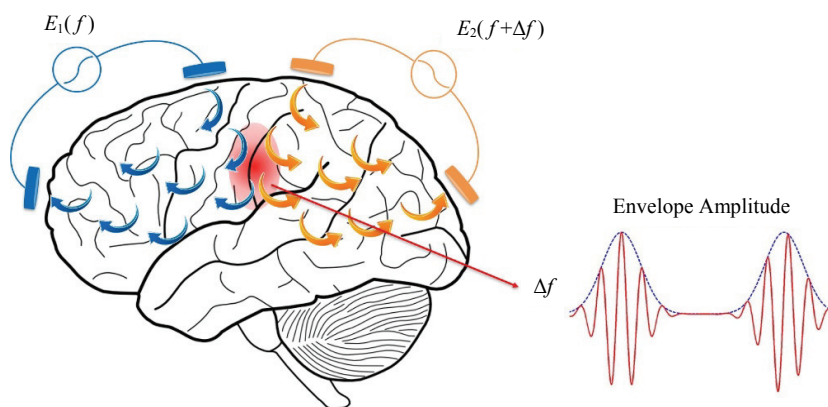


图1 利用干扰电场进行深部脑区定位(修改自 Grossman, N., et al., 2017)

为了验证 TI 刺激方式的有效性,研究人员将其应用于麻醉小鼠,利用神经电生理学手段——全细胞膜片钳技术记录刺激-响应情况,在体确认差频可引起深部目标脑区神经元激发放电。相较于常规无创脑刺激方式, TI 技术主要具备以下几个特点:1) 聚焦性:两个存在细微差频的高频电场可在脑区某处进行交汇,聚集性地刺激该目标位置;2) 深入性:高频电流可在不影响上覆组织的情况下进入深部脑区,其差值频率信号可对深处脑区神经元进行电生理活动的调节;3) 易操纵

性：在保持两组电极位置和电流总和不变的基础上，通过调节电流的相对比例，可完成三维体内任意一刺激位点的切换，未来还可通过增加电极组数实现多点同步刺激的可能。

就竞技体育领域而言，运动员成绩优异与否与其多方面素质（运动能力、运动学习、心理技能）息息相关。当前，动作捕捉、记录解析（运动影像、神经影像、肌电图和脑电图学等）等手段已形成较为完善成熟的科学体系，用于改善专业运动员技术动作，以期进一步提升运动表现。在以毫秒、毫米差异为制胜关键的竞技体育运动中，成绩的分毫提升将为国际顶级运动员提供突破个人能力边界的可能性。相较于 tDCS、TMS，TI 技术对刺激脑区更聚焦、更深入、更易操纵的特性将为体育科技发展带来一束破局曙光。与此同时，其在运动医学领域也提供了众多研发创新的着眼点。

创伤性脑损伤（Traumatic Brain Injury, TBI），包括脑震荡，是竞技体育中常见的运动损伤类别之一，如果康复不彻底，即使是轻度脑损伤也会影响个体日常活动并阻碍其回归到正常的学习、工作和生活中。随着时间推进，伤者将表现出多样化症状，其中，偏头痛、创伤性失忆和抑郁等认知损害相关症状是极其重要的预后评测指标。目前，使用药物治愈该运动损伤的临床证据仍旧十分有限，运动员成功回归运动场也应基于以下两点：没有 TBI 相关症状且不再服用任何可能掩盖或改变 TBI 症状的药物。如果在病程不适时间介入药物治疗，遮掩还未痊愈的病症并让运动员重返运动场将很有可能造成更加严重的二次伤害。已有研究表明，无创脑刺激方式，如 TMS、tDCS 有治疗 TBI 相关症状的潜力且耐受性良好（Dhaliwal et al.,2015），但由于病程发展过程中，伤者会展现出多种临床症状，不同阶段需要康复的目标脑区不尽相同，因此，TI 技术的易操纵性可能会在 TBI 预后康复过程中更具应用优势与前景。

当然，TI 脑刺激应用于人体尚处于初始实验阶段，从模型计算、动物实验跨越到人体应用存在诸多问题亟待解决。未来应在现有研究结果的基础上，根据人脑解剖结构特点和脑部电刺激安全使用指南，不断调整相关参数，以期获取最佳人脑 TI 电刺激范式（包括电极放置位置、电流强度、不同目标脑区与相关连接区域的选择等），从而奠定其应用于人脑的安全性和高效性。我们坚信，伴随神经科学技术的高速发展，无创 TI 深部定位脑刺激在提高人类运动能力，推动体育科学研究，促进运动损伤康复等领域充满着希望。

参考文献：

- 卞秀玲,王雅娜,王开元,等,2018.经颅直流电刺激技术及其在提升运动表现中的应用[J].体育科学,38(5):66-72.
- 王开元,刘宇,2019.科技助力奥运——新科技与挑战[J].中国体育科技,55(1):5-12.
- ANGIUS L,PASCUAL-LEONE A,SANTARNECCHI E,2018.Chapter 17-Brain stimulation and physical performance[M]// MARCORA S, SARKAR M. Progress in Brain Research.Elsevier:317-339.
- DHALIWAL S K,MEEK B P,MODIRROUSTA M M,2015.Non-Invasive brain stimulation for the treatment of symptoms following traumatic brain injury[J]. Frontiers Psychiatry,6:119.
- GROSSMAN N, BONO D,DEDIC N,et al.,2017.Noninvasive deep brain stimulation via temporally interfering electric fields[J].Cell,169(6):1029-1041.e16.
- LAUBER B,GOLLHOFER A,TAUBE W,2018.Differences in motor cortical control of the soleus and tibialis anterior[J].J Exp Biol, 221(20): jeb174680.
- MIRANDA P C, MEKONNEN A,SALVADOR R,et al.,2013. The electric field in the cortex during transcranial current stimulation[J]. NeuroImage, 70:48-58.

（上海体育学院 殷可意 刘宇）