

脑电神经反馈：一种前景广阔的注意力训练方法

周茂洋^{1,3}, 高子奇^{2,3}, 史康⁴, 刘建军⁵, 梁伟³, 毋琳³, 张俊鹏³, 武圣君³

(1. 军事医学科学院, 北京 100850; 2. 空军 93671 部队, 南阳 474350; 3. 空军军医大学医学心理学系, 西安 710032;

4. 空军军医大学教务处, 西安 710032; 5. 空军第 986 医院门诊部, 西安 710032)

摘要: 脑电神经反馈 (EEG-NF) 是一种注意力训练中的热门方法因其安全无创、无副作用、易于联合应用等优点, 受到越来越广泛的关注, 在注意缺陷障碍 (ADHD) 的治疗等方面表现优异。然而, 目前这种方法在注意力训练中的应用还比较局限。抱着对脑电神经反馈广阔前景的预期, 本文对脑电神经反馈训练中出现的重点问题进行了总结, 描绘了这种方法未来的前景和改进方向, 以期在未来更好的应用这种技术。

关键词: 神经反馈; 脑电; 注意力训练; 注意缺陷障碍

中图分类号: B842.5

文献标识码: A

文章编号: 1003-5184(2023)06-0509-07

1 EEG-NF 的简介

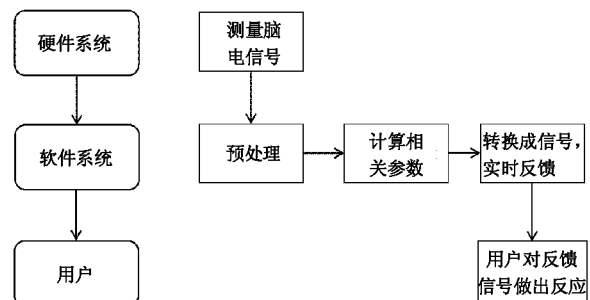
脑电神经反馈 electroencephalogram - neurofeedback, EEG-NF 即一种基于脑电图的无创大脑刺激形式通过脑机接口把从个体大脑中提取的电生理活动特征以实时反馈刺激的形式呈现给个体, 使个体在反馈刺激的强化作用下学习自我调节大脑活动。

脑电神经反馈是历史最为悠久应用最为广泛的神经反馈方式, 它早在上世纪 60 年代就被 Wyrwicka 和 Serman 应用在了对猫感觉运动皮层的神经反馈中 (Wyrwicka, Serman, & Behavior, 1968)。发展到今天, 它已经在临床研究和神经科学启发的研究中得到了较大规模的运用 (Enriquez - Geppert, Smit, Pimenta, & Arns, 2019)。它可以作为一种治疗工具使偏离的大脑活动正常化并作为一种辅助疗法用于治疗认知障碍和心理疾病 (Markiewicz, 2017), 也可以作为一种提高健康参与者的认知能力的训练 (Gruzelier, 2014; Mirifar, Beckmann, & Ehrlenspiel, 2017; Son, Does, Band, & Putman, 2020), 还可以作为一种研究神经振荡在认知和行为中的因果作用的实验方法 (Bagherzadeh, Baldauf, Pantazis, & Desimone, 2020; Clarke, Barry, Karamacoska, & Johnstone, 2019; Deiber et al., 2020)。

1.1 EEG-NF 的基本步骤

脑电神经反馈遵循以下的基本步骤 (Enriquez - Geppert et al., 2019): (1) 测量参与者的脑电生理活动。(2) 进行预处理。(3) 根据预先选择的大脑参数 (特定的频带或脑电位) 进行计算。(4) 转换成信号, 实时反馈给用户。(5) 大脑活动的某些特征可以被参与者感知。

通过这种反馈, 参与者可以学会自我调节自己的大脑活动, 从而直接改变认知和行为的潜在神经



EEG-NF反馈步骤及原理

机制。

1.1.1 脑电信号的获取

测量大脑电生理活动依靠的是测量头皮电活动的电极。最新的带有干电极的脑电图记录系统是便携式的 (Puce & Hamalainen, 2017), 具有蓝牙/Wi-Fi 功能 (Gargiulo et al., 2010), 可由智能手机控制 (Stopczynski, Stahlhut, Larsen, Petersen, & Hansen, 2013), 受试者甚至可以在实验室外散步 (Debener, Minow, Emkes, Gandras, & de Vos, 2012)。

1.1.2 脑电信号的处理

这一项包括了对脑电信号的预处理和计算预先设定的大脑参数两步。预处理是对脑电信号的常规处理, 一般依靠相关软件。常用的处理软件有: MATLAB、EDFbrowser、EDFlib 和 MNE 等。MATLAB 是学术界应用最为广泛的一款软件, 提供了信号处理和统计分析等多个工具箱, 功能强大, 几乎已成为 EEG 信号处理的标配。

计算预先设定的大脑参数即分析选定的脑电特征。常选用的脑电特征是频率 (脑电图频带的功率比)、连接性特征 (两个或多个大脑区域之间的关联程度和脑波在时间上的相位、振幅和频率的相似性) (Heinrich, Gevensleben, Strehl, & Psychiatry,

2007)和慢皮层电位(调节特定的事件相关电位,反映了局部皮层的唤醒和注意力水平)。

1.1.3 神经反馈的实施

将以上步骤获取的数字信息转化为刺激再呈现给受试者的过程就是神经反馈中的反馈。反馈的形式是多种多样的,最常见的反馈是改变任务的难度(Debettencourt, Cohen, Lee, Norman, & Turk-Browne, 2015)、获得某种奖励(Gruzelier, Foks, Steffert, Chen, & Ros, 2014)和引入某种提示。这种提示可以是视觉(Ordikhani - Seyedlar, Lebedev, Sorensen, & Puthusserypady, 2016)、听觉(Gadea, Aliño, Garijo, Espert, & Salvador, 2016)或是触觉(Fleury, Lioi, Barillot, & Lecuyer, 2020)的,也可以是多种感觉组合的。

1.1.4 参与者对大脑活动进行自我调节

学会如何对自己的大脑活动进行自我调节是一项需要参与者自身努力的工作,参与者的动机很大程度上会影响训练的效果。过低的动机会使参与者难以跨过训练中的障碍(Hofmann, Schmeichel, & Baddeley, 2012),无聊的任务会使参与者失去继续训练的兴趣(Ute, 2014);而过高的动机可能会导致认知超载而对训练产生负面影响(Matthias, Erika, Manuel, Christa, & Guilherme, 2013)。

1.2 标准的脑电神经反馈方案

1.2.1 SCP 训练

SCP(slow cortical potential)即皮层慢电位。SCP神经反馈是建立在皮层激活和抑制的自我调节的基础上的,而这种激活和抑制分别与特定的事件相关电位即皮层慢电位偏移的电负性和电正性有关(Enriquez - Geppert et al., 2019)。这种训练的目的在于提高SCP的自我调节能力,从而在一定程度上提高其调节皮层兴奋性的能力(Omejc, Rojc, Battaglini, & Marusic, 2019)。

1.2.2 SMR 训练

SMR(sensori - motor rhythm)即感觉运动节律。SMR节律记录在感觉运动皮层上,受丘脑腹侧基底控制,在运动安静状态下增强,因此增强SMR节律可以减少不安和运动冲动,促进注意力放松和持续集中(Sterman & Self - regulation, 1996)。临床上已经证明SMR训练可以改善注意力有关的警觉状态(Micoulaud - Franchi, Bat - Pitault, Cermolacce, & Vion - Dury, 2011)。

1.2.3 TBR 训练

TBR(theta/beta rhythm)即 θ/β 节律。 θ/β 比值是认知加工能力的一个标志,与P300潜伏期有关,而与振幅无关(Clarke et al., 2019)。而P300被发现与许多认知过程有关,包括决策、信号概率、注

意力、辨别力、不确定性解决、刺激相关性和信息传递(Dinteren, Arns, Jongsma, & Kessels, 2014)。Clarke等人在2019年的一项研究支持了 θ 和 β 的比值是认知加工能力的一个标志的假设(Clarke et al., 2019)。

2 EEG - NF 的实际应用

2.1 EEG - NF 在 ADHD 治疗中的应用

早在上世纪70年代,就出现了第一个使用EEG - NF治疗ADHD的阳性试验(Lubar & Shouse, 1976),在本世纪,设计良好的随机对照试验大量开展(Moriyama et al., 2012)。现如今,根据APA制定的证据评级指南,“标准”神经反馈协议被认为是治疗ADHD的“有效和特异的V级水平”,被认为是治疗ADHD的一种可行方案(Enriquez - Geppert et al., 2019)。

尽管长期以来,对于EEG - NF对ADHD的疗效的质疑层出不穷,有的质疑EEG - NF的训练效果来自安慰剂效应(Thibault & Raz, 2017),有的发现此方法效果不如药物治疗(Geladé et al., 2017),还有的发现在长期随访中脑电频谱的改变没有特异性(Janssen et al., 2020),但这些质疑的提出都是为了更好的改进这种方法,而不是否定这种方法。

EEG - NF已经通过了大量的临床实践,2019年的一项meta分析显示,现有的三个标准的神经反馈训练方案,即TBR训练,SMR训练和SCP训练,被证明是有效和具体的(Enriquez - Geppert et al., 2019)。而且不断有新的研究对这种方法进行效果的证实,无论是在临床效果上还是在神经机制上。2022年的一项meta分析显示,与单独药物治疗ADHD患者相比,使用脑电图 - 药物联合治疗在改善患者的全身症状和注意力不集中症状上有着明显的益处(Lin et al., 2022)。2021年的一项临床实验也显示,在神经反馈训练后,ADHD患者的神经有效连接性(effective connectivity)有显著改善(Wang et al., 2021)。

对比ADHD治疗的其他方法,EEG - NF的优点是明显的。首先,它不像药物治疗那样会带来难以避免的不良反应(Khajehpiri et al., 2014),不像正念冥想训练那样疗效难以确定(Evans et al., 2018),也不像经颅电刺激那样有潜在的危险性(Wurzman, Hamilton, Pascual - Leone, & Fox, 2016)。而且,它可以作为上述几种方法的辅助治疗手段起到很好的效果。

2.2 EEG - NF 在其他方面的应用

脑电神经反馈广泛用于神经、躯体和精神疾病的治疗,包括抑郁症、厌食症、阅读障碍、书写障碍、精神分裂症、药物滥用、PTSD和老年痴呆症等疾病

的治疗 (Markiewicz, 2017)。EEG - NF 的使用和研究已进一步扩展到健康人群 (Viviani & Vallesi, 2021), 并已被用于改善运动员的表现训练 (Mirifar et al., 2017), 辅助外科手术 (Kratzke et al., 2021) 等方面。

3 EEG - NF 的前景与未来发展

作为一种重要的认知训练和精神疾病治疗方法, EEG - NF 当前仍是研究的热点问题。一方面, 研究者希望通过改进 EEG - NF 的方案来将其应用在更多的领域, 取得更有说服力的实验结果; 另一方面, 由于 fMRI 等技术以及神经生物学和脑科学的进步, 将 EEG - NF 与其他技术联合应用以及进一步探明 EEG - NF 的相关机制的研究也有了进一步的突破。

3.1 EEG - NF 方案的改进

对 EEG - NF 的方案改进可以归为两个方向。一是将已有的 EEG - NF 方案进一步标准化, 二是在 EEG - NF 方案的细节上做出灵活的改进, 因为 EEG - NF 过程中的一些细节如个人动机、反馈方式和疗程设置等对 EEG - NF 的效果也有着较大的影响。

比如, 2020 年的一项研究 (Sekhavat, 2020) 通过一个多人注意力训练赛车游戏, 利用脑电信号来调整游戏的难度参数, 以鼓励玩家提高和保持注意力水平, 通过提升参训者的动机, 起到了很好的训练效果。另外, 改变反馈的形式也是一种很好的尝试, 传统的 EEG - NF 依赖视觉或听觉进行反馈。视听结合的 (Wang, Wang, & Hou, 2020)、依赖触觉的 (Wang, Li, Afzal, Zhang, & Zhang, 2019), 甚至依赖 Virtual Reality (Juliano et al., 2020; Vourvopoulos et al., 2019) 的 EEG - NF 方案都取得了很好的效果。

3.2 EEG - NF 应用范围的扩展

EEG - NF 最经典的应用人群是 ADHD 患者, 其次是抑郁、焦虑、自闭症、癫痫、睡眠障碍等精神疾病患者 (Mirifar et al., 2017) 以及需要康复治疗的脑创伤、脑卒中等神经系统疾病患者 (Pichiorri & Mattia, 2020)。在这些应用人群中, 临床研究和理论研究大量开展, 但与此同时, 新的应用人群的探索也在进行中。比较保守的探索把应用人群扩展到老年人 (Bielas & Michalczyk, 2021; Jiang, Abiri, & Zhao, 2017) 和学习障碍的学生 (Azizi, Drikvand, & Sepahvandi, 2018), 这些人本身的认知能力就弱于常人, 在它们身上进行 EEG - NF 与在 ADHD 患者身上类似。

对正常人群的 EEG - NF 应用的探索也在进行中, 尽管过程并不顺利。2018 年的一篇综述对在健康人群中开展的 EEG - NF 进行了总结 (Azizi et

al., 2018), 结果并不乐观。近期的研究也没有得到乐观的结果 (Son et al., 2020)。但考虑到现有的 EEG - NF 方案是为了治疗 ADHD 等精神疾病, 只能说现有的 EEG - NF 方案难以起到对健康人的提升效果, 而不能从整体上否认 EEG - NF 对健康人的效果。

3.3 相关机制的研究

EEG - NF 的神经机制十分复杂, 当前学界对其了解还远远不够。长期以来, 对 EEG - NF 方案有效性评估主要依赖观察脑电频谱的改变、认知能力的改变以及这两者间的对应关系, 而对 EEG - NF 诱导的神经可塑性的研究主要还停留在理论阶段。但随着脑科学的进步, 探索 NF 的神经可塑性效应 (Batail et al., 2019) 的相关研究越来越多, 如 ADHD 儿童神经反馈前后静息 EEG 有效连通性差异的研究 (Wang et al., 2021)、脑 - 机接口一小时后大脑可塑性的改变 (Aggensteiner et al., 2019) 等。这些研究的结果大多是乐观的, 但 EEG - NF 的神经机制还需要更深入的研究。

另外, 神经反馈本身的相关机制也有待进一步探究, 如反馈学习机制的综合模型和自我调节的神经机制。虽然对有关问题的研究已经取得了一些成果 (Gaume, Vialatte, Mora - Sánchez, Ramdani, & Vialatte, 2016; Ordikhani - Seyedlar et al., 2016), 但距离形成有实用价值的完备体系还有很远的距离。另外, 一些心理因素如意识在神经反馈学习中的作用也受到了人们的关注 (Muñoz - Moldes & Cleere-mans, 2020; Nan, Yang, Wan, Zhu, & Hu, 2020), 它们对神经反馈也有很大的影响 (Kadosh & Staunton, 2019)。

3.4 与其他方法的联合应用

EEG - NF 最具前景的方面就是与其他方法的联合应用, 常见的注意力训练方法如认知训练、视频游戏和正念冥想, 都可以与 EEG - NF 联合应用。

2015 年的一项基于 EEG - NF 改进的对老年人的认知训练 (Lee et al., 2015), 显示出良好的效果; 2019 年的一项 EEG - NF 研究联合认知训练游戏以尝试加强健康老年女性和认知障碍女性的注意力 (Jirayucharoensak, Israsena, Pan - Ngum, Hemrungrojn, & Maes, 2019), 显示了 EEG - NF 与认知训练游戏联合应用可能取得更好的疗效。关于视频游戏与 EEG - NF 的联合应用还在构想中, 在 2020 年的一篇论文中 (Sagiadinou & Plerou, 2020), 提出了一个结合了神经反馈技术和视频游戏实施关于 ADD 和 ADHD 治疗的三重框架。2019 年的一项针对运动员的研究 (Crivelli, Fronda, & Balconi, 2019), 显示了正念 - 神经反馈联合方案在改善运动情境下的心理

健康和注意力调节方面的可行性和潜力。

另一种可行的思路是联合应用 EEG 和 fMRI, fMRI 具有高空间分辨率,克服了 EEG - NF 无法进行空间定位的缺陷(Weiskopf, 2012),也为进一步探究 EEG - NF 的神经机制提供了工具(Wang et al., 2021)。

4 现阶段 EEG - NF 应用中的重点问题

4.1 实验设计问题

实验设计方面存在的问题为 EEG - NF 带来了许多质疑,因为前些年尽管产生大量的研究成果,但许多关于 EEG - NF 的研究结果的显著性和实验设计的严谨性欠佳,如受试者数量少或在双盲和随机对照方面欠缺考虑(Omejc et al., 2019)。不过,近些年 EEG - NF 实验设计的科学性有了明显的改善,出现了一些设计严密的随机对照实验(Aggensteiner et al., 2019; Geladé et al., 2017)。

双盲是排除安慰剂作用、提高实验严谨性的重要手段,但有时对双盲的适当放弃更加有利于研究的进展。前人的大量研究已经表明了 EEG - NF 确实有效,放弃双盲虽然有损实验严谨,但可以让研究者们放开手脚,因为双盲本身就会影响神经反馈的效果(Logemann, Lansbergen, Van Os, Böcker, & Kenemans, 2010)。双盲意味着就算是脑电反馈治疗师也接受不到真实的受试者的实时信号,就无法有效的手动调整奖励阈值或只能使用自动奖励阈值调整,这会很大程度上影响 EEG - NF 的效果(Logemann et al., 2010)。EEG - NF 的治疗效果很大一部分来自于神经反馈这一部分,即来自于参与者的反馈学习和自我调节,如果过于注重实验的严谨性而忽略 EEG - NF 作为一种心理治疗手段的属性,就难免止步不前。令人欣慰的是,EEG - NF 的研究方向确实正在从评估该方法有效性的经典临床标准(将标准化双盲随机实验视为最佳方法)向更适合神经心理治疗的其他方法转变(Omejc et al., 2019)。

4.2 长期效果问题

EEG - NF 在 ADHD 的治疗中能否达到长期效果一直是一个悬而未决的问题,这方面相关的研究很少,一篇发表在 2019 年的对 ADHD 的 NF 治疗长期效果的 meta 分析仅仅纳入了 10 篇文章(Van Doren et al., 2019)。尽管也有研究对 EEG - NF 的长期效果评估得到了乐观的结论(Aggensteiner et al., 2019)。然而,由于反对论据的存在(Janssen et al., 2020)和相关研究的严重匮乏,EEG - NF 的长期效果还需要更多研究的证实。

4.3 方案的实行问题

尽管已经有了标准的 EEG - NF 方案,但因为

缺乏详细的指南和国际标准,训练中使用的参数,如何调整奖励阈值以及疗程的具体设置等大量的内容还需要施训者和研究人员根据自身经验和具体情况独立选择(Omejc et al., 2019)。缺乏监管和公认的标准还导致了行业的乱象(Enriquez - Geppert et al., 2019)。

5 总结与展望

虽然现阶段 EEG - NF 还存在许多问题,但这不影响它在注意力训练领域的巨大潜力。不断改进的 EEG - NF 技术,未来可能应用在医生、飞行员和军人等注意力要求极高的职业培训中。EEG - NF 在神经可塑性方面的研究成果,为存在学习困难的学生和存在注意力缺陷的儿童带来了希望。EEG - NF 有望作为一种注意力训练方法在未来得到更广泛的应用和更深入的研究。

参考文献

- Aggensteiner, P. M., Brandeis, D., Millenet, S., Hohmann, S., Ruckes, C., Beuth, S., ... Holtmann, M. (2019). Slow cortical potentials neurofeedback in children with ADHD: Comorbidity, self-regulation and clinical outcomes 6 months after treatment in a multicenter randomized controlled trial. *European Child Adolescent Psychiatry*, 28(8), 1087 - 1095. <https://doi.org/10.1007/s00787-018-01271-8>
- Azizi, A., Drikvand, F. M., & Sepahvandi, M. A. (2018). Comparison of the Effect of Cognitive Rehabilitation and Neurofeedback on Sustained Attention Among Elementary School Students with Specific Learning Disorder: A Preliminary Randomized Controlled Clinical Trial. *Applied Psychophysiol Biofeedback*, 43(4), 301 - 307. <https://doi.org/10.1007/s10484-018-9410-8>
- Bagherzadeh, Y., Baldauf, D., Pantazis, D., & Desimone, R. (2020). Alpha Synchrony and the Neurofeedback Control of Spatial Attention. *Neuron*, 105(3), 577 - 587. doi: 10.1016/j.neuron.2019.11.001
- Batail, J. M., Bioulac, S., Cabestaing, F., Daudet, C., Drapier, D., Fouillen, M., ... Vialatte, F. (2019). EEG neurofeedback research: A fertile ground for psychiatry? *L'Encephale*, 45(3), 245 - 255. <https://doi.org/10.1016/j.encep.2019.02.001>
- Bielas, J., & Michalczyk, Ł. (2021). Beta Neurofeedback Training Improves Attentional Control in the Elderly. *Psychological Reports*, 124(1), 54 - 69. <https://doi.org/10.1177/0033294119900348>
- Clarke, A. R., Barry, R. J., Karamacoska, D., & Johnstone, S. J. (2019). The EEG Theta/Beta Ratio: A marker of Arousal or Cognitive Processing Capacity? *Applied Psychophysiol Biofeedback*, 44(2), 123 - 129. <https://doi.org/10.1007/s10484-018-09428-6>
- Crivelli, D., Fronda, G., & Balconi, M. (2019). Neurocognitive

- Enhancement Effects of Combined Mindfulness – Neurofeedback Training in Sport. *Neuroscience*, 412, 83 – 93. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2019.05.066>
- Debener, S., Minow, F., Emkes, R., Gandras, K., & de Vos, M. (2012). How about taking a low – cost, small, and wireless EEG for a walk? *Psychophysiology*, 49(11), 1617 – 1621. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2012.01471.x>
- Debettencourt, M. T., Cohen, J. D., Lee, R. F., Norman, K. A., & Turk – Browne, N. B. (2015). Closed – loop training of attention with real – time brain imaging. *Nature Neuroscience*, 18(3), 470 – 475. <https://doi.org/10.1038/nn.3940>
- Deiber, M. P., Hasler, R., Colin, J., Dayer, A., Aubry, J. M., Baggio, S., ... Ros, T. (2020). Linking alpha oscillations, attention and inhibitory control in adult ADHD with EEG neurofeedback. *Neuroimage Clinical*, 25, 102145. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2019.102145>
- Dinteren, R. V., Arns, M., Jongsma, M. L., & Kessels, R. P. (2014). P300 development across the lifespan: A systematic review and meta – analysis. *PLoS One*, 9(2), e87347. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087347>
- Evans, S., Ling, M., Hill, B., Rinehart, N., Austin, D., & Sciberras, E. (2018). Systematic review of meditation – based interventions for children with ADHD. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 27(1), 9 – 27. <https://doi.org/10.1007/s00787-017-1008-9>
- Fleury, M., Lioi, G., Barillot, C., & Lecuyer, A. (2020). A Survey on the Use of Haptic Feedback for Brain – Computer Interfaces and Neurofeedback. *Frontiers in Neuroscience*, 14, 528. <https://doi.org/10.3389/fnins.2020.00528>
- Gadea, M., Aliño, M., Garijo, E., Espert, R., & Salvador, A. (2016). Testing the Benefits of Neurofeedback on Selective Attention Measured Through Dichotic Listening. *Applied Psychophysiol Biofeedback*, 41(2), 157 – 164. <https://doi.org/10.1007/s10484-015-9323-8>
- Gargiulo, G., Bifulco, P., Cesarelli, M., Jin, C., McEwan, A., & van Schaik, A. (2010). Wearable dry sensors with bluetooth connection for use in remote patient monitoring systems. *Studies in Health Technology and Informatics*, 161, 57 – 65. <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-659-1-57>
- Gaume, A., Vialatte, A., Mora – Sánchez, A., Ramdani, C., & Vialatte, F. B. (2016). A psychoengineering paradigm for the neurocognitive mechanisms of biofeedback and neurofeedback. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 68, 891 – 910. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.06.012>
- Geladé, K., Bink, M., Janssen, T. W., van Mourik, R., Maras, A., & Oosterlaan, J. (2017). An RCT into the effects of neurofeedback on neurocognitive functioning compared to stimulant medication and physical activity in children with ADHD. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 26(4), 457 – 468. <https://doi.org/10.1007/s00787-016-0902-x>
- Gruzelier, J. H. (2014). EEG – neurofeedback for optimising performance. I: A review of cognitive and affective outcome in healthy participants. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 44, 124 – 141. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.09.015>
- Gruzelier, J. H., Foks, M., Steffert, T., Chen, M. J., & Ros, T. (2014). Beneficial outcome from EEG – neurofeedback on creative music performance, attention and well – being in school children. *Biological Psychology*, 95, 86 – 95. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2013.04.005>
- Heinrich, H., Gevensleben, H., & Strehl, U. J. (2007). Annotation: Neurofeedback – Train your brain to train behaviour. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 48(1), 3 – 16. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2006.01665.x>
- Hofmann, W., Schmeichel, B. J., & Baddeley, A. D. (2012). Executive functions and self – regulation. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(3), 174 – 180. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.01.006>
- Janssen, T. W. P., Geladé, K., Bink, M., van Mourik, R., Twisk, J. W. R., Maras, A., & Oosterlaan, J. (2020). Long – term effects of theta/beta neurofeedback on EEG power spectra in children with attention deficit hyperactivity disorder. *Clinical Neurophysiology: Official Journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, 131(6), 1332 – 1341. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2020.02.020>
- Jiang, Y., Abiri, R., & Zhao, X. (2017). Tuning Up the Old Brain with New Tricks: Attention Training via Neurofeedback. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 9, 52. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2017.00052>
- Jirayuchareonsak, S., Israsena, P., Pan – Ngum, S., Hemrungroj, S., & Maes, M. (2019). A game – based neurofeedback training system to enhance cognitive performance in healthy elderly subjects and in patients with amnesic mild cognitive impairment. *Clinical Interventions in Aging*, 14, 347 – 360. <https://doi.org/10.2147/cia.S189047>
- Juliano, J. M., Spicer, R. P., Vourvopoulos, A., Lefebvre, S., Jann, K., Ard, T., ... Liew, S. L. (2020). Embodiment Is Related to Better Performance on a Brain – Computer Interface in Immersive Virtual Reality: A Pilot Study. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(4). <https://doi.org/10.3390/s20041204>
- Kadosh, K. C., & Staunton, G. (2019). A systematic review of the psychological factors that influence neurofeedback learning outcomes. *NeuroImage*, 185, 545 – 555. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.10.021>
- Khajehpiri, Z., Mahmoudi – Gharaei, J., Faghihi, T., Karimzadeh, I., Khalili, H., & Mohammadi, M. (2014). Adverse reactions of Methylphenidate in children with attention deficit – hyperactivity disorder: Report from a referral center. *Journal of Research in Pharmacy Practice*, 3(4), 130 – 136. <https://doi.org/10.4103/2279-042x.145389>
- Kratzke, I. M., Campbell, A., Yefimov, M. N., Mosaly, P. R., Adapa, K., Meltzer – Brody, S., ... Mazur, L. M. (2021). Pi-

- lot Study Using Neurofeedback as a Tool to Reduce Surgical Resident Burnout. *Journal of the American College of Surgeons*, 232(1), 74 – 80. <https://doi.org/10.1016/j.jamcollsurg.2020.08.762>
- Lee, T. S., Quek, S. Y., Goh, S. J., Phillips, R., Guan, C., Cheung, Y. B., ... Krishnan, K. R. (2015). A pilot randomized controlled trial using EEG – based brain – computer interface training for a Chinese – speaking group of healthy elderly. *Clinical Interventions in Aging*, 10, 217 – 227. <https://doi.org/10.2147/cia.S73955>
- Lin, F. L., Sun, C. K., Cheng, Y. S., Wang, M. Y., Chung, W., Tzang, R. F., Chiu, H. J., Cheng, Y. C., & Tu, K. Y. (2022). Additive effects of EEG neurofeedback on medications for ADHD: A systematic review and meta – analysis. *Scientific Reports*, 12(1), 20401. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23015-0>
- Logemann, H. N., Lansbergen, M. M., Van Os, T. W., Böcker, K. B., & Kenemans, J. L. (2010). The effectiveness of EEG – feedback on attention, impulsivity and EEG: A sham feedback controlled study. *Neuroscience Letters*, 479(1), 49 – 53. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2010.05.026>
- Lubar, J. F., & Shouse, M. N. (1976). EEG and behavioral changes in a hyperkinetic child concurrent with training of the sensorimotor rhythm (SMR): A preliminary report. *Biofeedback and Self – regulation*, 1(3), 293 – 306. <https://doi.org/10.1007/bf01001170>
- Markiewicz, R. (2017). The use of EEG Biofeedback/Neurofeedback in psychiatric rehabilitation. *Psychiatria Polska*, 51(6), 1095 – 1106. <https://doi.org/10.12740/pp/68919>
- Matthias, W., Erika, K. S., Manuel, N., Christa, N., & Guilhaume, W. J. (2013). Control beliefs can predict the ability to up – regulate sensorimotor rhythm during neurofeedback training. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 478. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00478>
- Micoulaud – Franchi, J. A., Bat – Pitault, F., Cermolacce, M., & Vion – Dury, J. J. (2011). Neurofeedback dans le trouble déficit de l'attention avec hyperactivité; de l'efficacité à la spécificité de l'effet neurophysiologique. *Annales Médico – psychologiques, Revue Psychiatrique*, 169(3), 200 – 208. <https://doi.org/10.1016/j.amp.2011.02.007>
- Mirifar, A., Beckmann, J., & Ehrlenspiel, F. (2017). Neurofeedback as supplementary training for optimizing athletes' performance: A systematic review with implications for future research. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 75, 419 – 432. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.02.005>
- Moriyama, T. S., Polanczyk, G., Caye, A., Banaschewski, T., Brandeis, D., & Rohde, L. A. (2012). Evidence – based information on the clinical use of neurofeedback for ADHD. *Neurotherapeutics: The journal of the American Society for Experimental NeuroTherapeutics*, 9(3), 588 – 598. <https://doi.org/10.1007/s13311-012-0136-7>
- Muñoz – Moldes, S., & Cleeremans, A. (2020). Delineating implicit and explicit processes in neurofeedback learning. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 118, 681 – 688. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.09.003>
- Nan, W., Yang, L., Wan, F., Zhu, F., & Hu, Y. (2020). Alpha down – regulation neurofeedback training effects on implicit motor learning and consolidation. *Journal of Neural Engineering*, 17(2), 026014. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/ab7c1b>
- Omejc, N., Rojc, B., Battaglini, P. P., & Marusic, U. (2019). Review of the therapeutic neurofeedback method using electroencephalography: EEG Neurofeedback. *Bosnian Journal of Basic Medical Sciences*, 19(3), 213 – 220. <https://doi.org/10.17305/bjbm.2018.3785>
- Ordikhani – Seyedlar, M., Lebedev, M. A., Sorensen, H. B., & Puthusserypady, S. (2016). Neurofeedback Therapy for Enhancing Visual Attention: State – of – the – Art and Challenges. *Frontiers in Neuroscience*, 10, 352. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00352>
- Pichiorri, F., & Mattia, D. (2020). Brain – computer interfaces in neurologic rehabilitation practice. *Handbook of Clinical Neurology*, 168, 101 – 116. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63934-9.00009-3>
- Puce, A., & Hamalainen, M. S. (2017). A Review of Issues Related to Data Acquisition and Analysis in EEG/MEG Studies. *Brain Sciences*, 7(6), 58. <https://doi.org/10.3390/brainsci7060058>
- Rance, M., Walsh, C., Sukhodolsky, D. G., Pittman, B., Qiu, M., Kichuk, S. A., ... Hampson, M. (2018). Time course of clinical change following neurofeedback. *Neuroimage*, 181, 807 – 813. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.05.001>
- Sagiadinou, M., & Plerou, A. (2020). Brain – Computer Interface Design and Neurofeedback Training in the Case of ADHD Rehabilitation. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 1194, 217 – 224. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32622-7_19
- Sekhavat, Y. A. (2020). Collaboration or battle between minds? An attention training game through collaborative and competitive reinforcement. *Entertainment Computing*, 34, 100360. <https://doi.org/10.1016/j.entcom.2020.100360>
- Son, D. V., Does, W., Band, G., & Putman, P. (2020). EEG Theta/Beta Ratio Neurofeedback Training in Healthy Females. *Applied Psychophysiol Biofeedback*, 45(3), 195 – 210. <https://doi.org/10.1007/s10484-020-09472-1>
- Sterman, M. B. J. B. (1996). Physiological origins and functional correlates of EEG rhythmic activities. *Implications for Self – regulation*, 21(1), 3 – 33. <https://doi.org/10.1007/BF02214147>
- Stopczynski, A., Stahlhut, C., Larsen, J. E., Petersen, M. K., & Hansen, L. K. (2013). The Smartphone Brain Scanner: A Mobile Real – time Neuroimaging System. *Plos One*, 9(2), e86733. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086733>

- Thibault, R. T. , & Raz, A. (2017). The psychology of neurofeedback: Clinical intervention even if applied placebo. *The American Psychologist*, 72(7), 679 – 688. <https://doi.org/10.1037/amp0000118>
- Ute, S. J. (2014). What learning theories can teach us in designing neurofeedback treatments. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 894. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00894>
- Van Doren, J. , Arns, M. , Heinrich, H. , Vollebregt, M. A. , & Strehl, U. (2019). Sustained effects of neurofeedback in ADHD: A systematic review and meta – analysis. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 28(3), 293 – 305. <https://doi.org/10.1007/s00787-018-1121-4>
- Viviani, G. , & Vallesi, A. (2021). EEG – neurofeedback and executive function enhancement in healthy adults: A systematic review. *Psychophysiology*, e13874. doi: 10.1111/psyp.13874
- Vourvopoulos, A. , Pardo, O. M. , Lefebvre, S. , Neureither, M. , Saldana, D. , Jahng, E. , & Liew, S. L. (2019). Effects of a Brain – Computer Interface With Virtual Reality(VR) Neurofeedback: A Pilot Study in Chronic Stroke Patients. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 210. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00210>
- Wang, D. X. , Li, T. , Afzal, N. , Zhang, J. C. , & Zhang, Y. R. (2019). Haptics – mediated approaches for enhancing sustained attention: Framework and challenges. *Science China – Information Sciences*, 62(11), 26. <https://doi.org/10.1007/s11432-018-9931-1>
- Wang, J. X. , Wang, W. Q. , & Hou, Z. G. (2020). Toward Improving Engagement in Neural Rehabilitation: Attention Enhancement Based on Brain – Computer Interface and Audiovisual Feedback. *Ieee Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 12(4), 787 – 796. <https://doi.org/10.1109/tcds.2019.2959055>
- Wang, S. , Zhang, D. , Fang, B. , Liu, X. , Yan, G. , Sui, G. , . . . Wang, S. (2021). A Study on Resting EEG Effective Connectivity Difference before and after Neurofeedback for Children with ADHD. *Neuroscience*, 457, 103 – 113. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.12.038>
- Weiskopf, N. (2012). Real – time fMRI and its application to neurofeedback. *Neuroimage*, 62(2), 682 – 692. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.10.009>
- Wurzman, R. , Hamilton, R. H. , Pascual – Leone, A. , & Fox, M. D. (2016). An open letter concerning do – it – yourself users of transcranial direct current stimulation. *Annals of Neurology*, 80(1), 1 – 4. <https://doi.org/10.1002/ana.24689>
- Wyrwicka, W. , & Serman, M. B. J. P. (1968). Instrumental conditioning of sensorimotor cortex EEG spindles in the waking cat. *Physiology & Behavior*, 3(5), 703 – 707. [https://doi.org/10.1016/0031-9384\(68\)90139-X](https://doi.org/10.1016/0031-9384(68)90139-X)
- Zotev, V. , Mayeli, A. , Misaki, M. , & Bodurka, J. (2020). Emotion self – regulation training in major depressive disorder using simultaneous real – time fMRI and EEG neurofeedback. *NeuroImage Clinical*, 27, 102331. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2020.102331>

Electroencephalogram Neurofeedback: A Promising Attention Training Method

Zhou Maoyang^{1,3}, Gao Ziqi^{2,3}, Shi Kang⁴, Liu Jianjun⁵, Liang Wei³, Wu Lin³, Zhang Junpeng³, Wu Shengjun³

(1. Academy of Military Medical Sciences, Beijing 100850; 2. Air Force Unit 93671, Nanyang 474350;

3. Department of Military Medical Psychology, Air Force Medical University, Xian 710032;

4. Office of Academic Affairs, Air Force Medical University, Xian 710032;

5. Outpatient Department, The 986th Hospital of PLA AF, Xian 710032)

Abstract: EEG – NF is a popular method of attention training. It has attracted more and more attention because of its advantages of safety, non – invasive, no side effects and the great effect of combined use of EEG – NF with other methods. It has been excellent in the treatment of some diseases such as attention deficit disorder(ADHD). However, the application of EEG – NF on attention training is still limited. With the expectation to the broad prospect of EEG – NF, this paper summarizes the key problem on EEG – NF, and predicts possible future developments, in order to apply EEG – NF in the future better.

Key words: neurofeedback; electroencephalogram; attention training; ADHD