

功能性电刺激在脑卒中作业治疗的理论和应用

李睿

中山大学孙逸仙纪念医院康复医学科

1. 功能性电刺激的基本理论

功能性电刺激 (Functional electrical stimulation, FES) 是利用一定强度的低频脉冲电流, 通过预先设定的刺激程序来刺激易兴奋组织, 如肌肉, 从而代偿或重建神经损伤患者的缺失功能 (如诱发肌肉运动或模拟正常的自主运动), 以达到改善或恢复被刺激肌肉或肌群功能的目的^[1]。FES 是通过刺激神经纤维并激活下位运动神经元, 使用的基本前提是所刺激的肌肉需在解剖上具备完整的神经支配, 因此适用于偏瘫、脑性瘫痪或截瘫等中枢神经损伤后肢体功能障碍患者的治疗。广义 FES 的对象不止是骨骼肌, 还包括可以被刺激的各种机体组织, 如平滑肌、括约肌、耳蜗神经, 视觉神经等。目前临床上较常用的 FES 主要包括上肢 FES、下肢 FES、膀胱直肠 FES 及呼吸功能 FES 等。

功能性电刺激作为神经肌肉电刺激的一种, 其基本治疗原理与其他类型的电刺激有着相似之处。它是通过对神经细胞或肌肉细胞的刺激, 使细胞内外的离子分布发生改变, 引起动作电位, 实现肌肉细胞的收缩。但 FES 除了上述的生理学基础外, 现代医学研究发现, 功能性的神经肌肉电刺激可以通过外周和中枢双重调节改善肢体功能障碍。FES 在外周的直接作用是促进肌肉局部血液循环, 增加肢体的本体感觉和多关节正常运动感觉的信息输入, 保持关节活动范围, 使瘫痪肌群的肌肉细胞出现肥大, 且低频率的电流持续刺激快肌纤维可使其生理特性向慢肌纤维 (抗疲劳性) 转变^[2]。FES 在中枢的间接作用是改善失用的皮质脊髓通路和其他间接通路, 通过功能性活动模式向中枢神经系统的不断传递, 建立皮质中的兴奋痕迹, 使得大脑运动皮质区 “动作定型” 的完成^[3]。因此, 大脑可塑性的理论是 FES 提高受损肢体功能的主要理论基础。

2. 功能性电刺激在脑卒中作业治疗的临床运用

脑卒中后患者的作业治疗可根据损伤程度、部位和病程的不同略有侧重, 其主要内容包括良肢位摆放、改善关节活动功能、改善上肢和手的治疗性运动、感知觉和认知功能训练、ADL 活动能力训练以及生活辅具和环境改造指导等。其中与 FES 相结合的脑卒中作业治疗在改善下肢运动功能, 提高其转移能力和偏瘫上肢日常使用方面均有较高的临床价值。

从工程学角度来说，一套完整的 FES 系统一般包括控制器、刺激器、刺激界面（电极）、传感器和受试对象（瘫痪患者的肌肉系统）。根据上述组件的差别可以将 FES 分为不同类型。从临床使用方面，FES 涉及的主要治疗参数包括脉宽、频率、上升/下降时间、通断时间比、治疗时间和电流强度等 6 项内容。具体参数的设置会因治疗目的和治疗内容的不同有所调整，但鉴于 FES 是低频电刺激，在频率上基本以引起肌肉最适收缩的 30-40Hz 为主（<20 Hz 的刺激所产生的效应小，而>50 Hz 的高频率刺激容易产生肌肉强直收缩，肌肉易疲劳）^[4]，脉宽为 200-300 μ s。按照刺激部位的不同，卒中患者的 FES 治疗主要包括与行走相关的下肢 FES 和与抓取相关的上肢 FES。

（1）与行走相关的 FES 治疗

20 世纪 60 年代美国医生 Liberson（1961）对偏瘫患者的治疗是功能性电刺激最初的临床应用^[3]。他利用电刺激腓神经（胫前肌肌腹处）成功矫正了偏瘫患者步态摆动期足下垂的问题（图 1）。但之后的 30 年间，FES 主要用于治疗慢性期脑卒中患者的下肢功能障碍。直到 90 年代，康复理念强调功能康复的早期介入，FES 的应用范围逐渐增加，治疗时间的选择也逐渐扩大到脑卒中的各个病期。燕铁斌等^[5]在国内较早开始使用 FES 治疗早期脑卒中患者偏瘫下肢的研究，结果发现早期借助 FES 进行功能训练可以延缓偏瘫患者下肢痉挛的发生和痉挛程度，改善下肢运动能力，提高日常生活自理能力。随后，陆续有更多的国内学者将 FES 运用于卒中后早期下肢功能的改善。FES 治疗从单通道（刺激一组肌群）或双通道转变为更接近步行模式的多通道刺激（四通道或者 8 通道，图 2），从单一电刺激转变为与其他下肢训练结合的多重任务治疗（如 FES 与下肢循环运动结合，FES 与减重支持系统结合，或者 FES 与步态机器人结合等）。虽然目前的研究仍有许多机制不明确，但大部分结果显示，多通道模拟正常步行周期的 FES 可以平衡下肢肌群间收缩能力，优化步态模式，提高步行安全性等^[6]。安全有效的步行能力是脑卒中患者成功社区生活的有效保障，因此 FES 的联合使用在一定程度上加速了卒中患者下肢功能康复的进程。



图 1 治疗足下垂的 FES



图 2 多通道 FES 步行训练

(2) 与上肢功能相关的 FES 治疗

我们知道正常上肢功能随环境变化的可能性明显多于下肢，不仅包括够取、抓握，还包括支撑、转移、平衡等多重任务。因此，上肢功能的恢复情况是影响偏瘫患者日常生活独立的重要因素。Kwakkel 等研究发现^[7]，经常规康复治疗后，大脑中动脉缺血性脑卒中患者发病后 6 个月时仅有 11.6% 的患者可以恢复偏瘫侧手功能。卒中后上肢屈肌协同模式、腕手肌张力异常增高等问题均可妨碍偏瘫手重新获得抓握功能。患侧手的异常迫使患者更倾向于使用健侧上肢代偿，进一步加重了患侧肢体废用综合症的出现。多项研究表明，结合 FES 的上肢任务导向性训练可以明显改善卒中患者偏瘫上肢的功能。其中一项随机对照研究发现，经过 6 周的 FES 结合任务导向性训练，偏

瘫组的手功能测试成绩及 Fugl-Meyer 评分均较对照组明显提高^[8]。目前，FES 在上肢功能的研究仍在不断开发中。根据刺激器的设置不同，FES 的治疗主要包括单纯上肢电刺激和外部控制的 FES 治疗两大类型。

① 单纯循环电刺激：上肢单纯的循环功能性电刺激是按照芯片预先设定好的刺激程序完成电刺激治疗，多见于肩关节半脱位治疗和双关节联合运动使用。在肩关节半脱位方面，刺激部位以冈上肌和三角肌后束多见，刺激强度为足以引起肌肉收缩的程度为宜，每次刺激时间从 30min/d 逐渐过渡到 1.5h/d，甚至有研究使用植入式电极后进行 6-7h/d 的刺激时间。Meta 分析^[9]指出半脱位的 FES 治疗对于急性期或恢复期的卒中患者有一定疗效，但对慢性期患者治疗效果不佳。使用 FES 治疗肩关节半脱位也是许多国家脑卒中治疗指南的推荐方法。

在上肢双关节联合运动方面，较少使用单纯刺激。已有证据显示，单纯的循环刺激较难提高偏瘫患者的上肢功能，Thrasher 等 (Thrasher et al, 2008) 对严重上肢功能障碍的慢性期患者只进行 FES 治疗，不接受任何上肢功能训练，每次治疗 45min，治疗 16 周，结果显示无主动运动参与的 FES 治疗没有提高慢性期卒中患者的手功能。因此，双关节联合刺激通常也将 FES 与任务导向性训练相结合。Kimberley 等^[10]对脑卒中后 6 个月以上患者进行了一项双盲研究。FES 组以频率 50 Hz，脉冲波宽 200s，通电/断电比为 5s/15s 的参数刺激前臂产生抓握及手腕屈伸动作。每天刺激 6 h，共 10 d，在 3 周内完成。安慰刺激组使用相同的装置但不通电流，结果显示 FES 组的手功能较安慰刺激组改善更为明显。但 6h 的治疗时间在临床难以实施，且治疗中电流大小无法根据实际需要进行调节。早期的一些研究也指出，FES 双通道刺激腕部和手部，完成双关节任务导向性的联合运动，可改善卒中患者上肢 Fugl-Meyer 评分和 Barthel 指数评分。并且，在随访研究中^[11]，患者腕手的功能改善可以维持 6 个月以上。可见在 FES 作用下，较弱的自主努力就可以产生较大的运动。我科基于下肢多通道 FES 治疗卒中步态的研究出发，使用多通道 FES 治疗卒中患者偏瘫上肢功能性够取（分别刺激肩外展、伸肘、伸腕和伸指肌群，频率 40Hz，脉宽 300 μs，刺激时间 30min）也收到了较好的临床效果（图 3），特别对于慢性期、上肢功能恢复较差的患者。



图 3 多通道上肢 FES 的任务导向训练

② 外部控制的上肢电刺激:这是一种通过外在控制刺激器的开关完成 FES 治疗的方法。外部控制的方式主要包括患侧肌电信号控制腕手运动 (ICFES)、健侧上肢直接控制手部放开的动作和健侧腕手的肌电信号控制患侧腕手运动 (CCFES)。

患侧肌电信号控制是以患侧目前的肌电水平作为刺激阈值,当患侧伸腕、伸指肌群肌电水平达到阈值,刺激器会引出一刺激扩大运动范围来帮助患者完成功能性活动,若多次不能达到要求电位时,系统会调低肌电阈值。使用肌电阈值触发模式治疗卒中患者的研究显示,治疗后患者的伸腕、伸指功能明显改善。fMRI 的研究同样发现^[12],反馈式的功能性电刺激在患侧大脑皮层初级运动皮质 (M1 区) 的激活强度明显高于单纯刺激组。

另外两种外部控制均使用健侧控制,前一种是患者主动抓握物体,当需要释放物体时,健侧手手动控制电刺激开关使手指松开物体;而后一种是近几年研究较多的上肢 FES (图 4),即先采集健侧进行目标性功能活动的肌电值,然后双侧上肢同时进行训练,当患侧无法达到健侧采集到的肌电值时,就会得到一次外部刺激(患侧分别贴有记录电极和刺激电极)。对侧控制的 FES 会在整个训练过程中控制患侧上肢,不在某一特定时间点,患者需要持续控制自己的运动范围和动作质量,也可以随时掌握休息时间,患者在训练中不断强化注意力,双侧的训练也有利于激活脑部神经元和功能的重组,平衡半球间的兴奋与抑制的平衡。Knutson JS 等人^[13]将单纯电刺激和对侧控制性的电刺激治疗卒中患者,结果发现,对侧控制组在 FMA 和 BBT (盒子积木测试) 评分中均高于单纯刺激组。杨迪等人^[14]使用 CCFES 联合运动治疗脑卒中患者 3 周,实验组上肢 FMA、MBI、患侧腕背伸肌 RMS/健侧腕背伸肌 RMS、腕背伸关节活动度均较治

疗前有明显改善，但一天2次的CCFES治疗与一天1次的CCFES治疗在肌电指标有提高，而在功能评分方面没有显著差异。有研究发现，CCFES治疗组MBI平均得分由轻度依赖（40分）上升为生活基本自理（66分），这在一定程度上提高卒中患者主动参与治疗的信心和满意度。



图4 对侧控制的上肢FES治疗（CCFES）

3. 功能性电刺激上肢运用的新方向

随着神经闭环调控理论（中枢-外周-中枢）和计算机技术的不断发展，脑卒中功能性电刺激的运用不再局限于单纯的电刺激治疗或者只针对某一运动能力的提高，更多地是将FES作为组合治疗的一项，与其他中枢神经康复技术配合使用，比如FES结合镜像疗法、FES结合脑电控制系统^[15,16]（如使用视觉诱发电位产生的脑电信号触发FES，但脑电信号的抗干扰力是影响其临床使用的重要原因）、FES结合虚拟现实系统（如佩戴FES在模拟的超市、居家或公园环境中完成生活化的上肢功能训练）以及FES结合经颅磁刺激（如使用线圈以1.0Hz的强度刺激健侧大脑M1区）等。

脑卒中后作业治疗的重要目标是帮助患者实现ADL独立，回归生活，因此，FES的家居使用也是近几年研发的主要方向。FES与机器人或外部手功能辅具相结合的神经支具类^[17]，即可穿戴式FES其中一种形式。穿戴式FES既可以解决偏瘫上肢功能性活动训练强度不足的问题，也可以提高患侧在日常生活中的使用频率。国外常见的类型有HandMaster系统、仿生手套系统（高位截瘫患者多用）以及Freehand系统等（图5）。

国内近几年也涌现出部分便携式多通道上肢治疗系统的研究，但产品化的成熟系统在国内仍不多见。此类神经支具通常采取多组肌群的表面电极或插入式电极，刺激部位多以腕手功能为主，刺激电流较低。虽然神经支具的设备在不断更新（如有线控制变为无线遥感控制，设备体积不断缩小等），但实际使用率并不普遍，这可能与所需的患者上肢基础功能高、产品价格以及佩戴的舒适性等因素有关。



图 5 上肢穿戴式 FES (NESS H2000™ 系统)

4. 结语

功能性电刺激在脑卒中作业治疗中已有较广泛的运用。利用 FES 可帮助不同病程的卒中患者提高上下肢运动功能，以完成功能性步行、抓握物体等更加日常生活的活动内容。从临床运用来看，配合 FES 的任务导向性训练（如步行、够物）更具备实用价值。同时，FES 与功率踏板、上下肢机器人、脑机协同或虚拟现实等新技术结合是 FES 应用范围的补充和拓展。虽然 FES 的使用参数仍没有统一或者标准的要求，如刺激时间（30min/45min/1h?）、刺激强度、治疗频率（一周几次？治疗 3 周/6 周?）等，但近几年 FES 的研究数目呈现逐年增加的趋势，研究设计和研究内容也在不断提高，如随机对照实验的数目增加，卒中患者的功能障碍严重程度由轻变重，FES 在脑部影像学的改变等。研究质量和复杂性的提高可以帮助临床工作者更科学地使用 FES，并从循证医学的观点解释和完善 FES 的作用机制。同时，FES 的家居实用性和便携性也是 FES 后期技术开发的热点和难点。

参考文献

- [1] 张定国, 朱向阳. 功能性电刺激研究在中国的回顾、现状与展望. [J] 中国康复理论与实践, 2010, 16(9), 848-850.
- [2] 王欣, 王宁华. 功能性电刺激在改善运动功能方面的作用. 中国康复理论与实践, 2009, 15: 238-241.
- [3] 燕铁斌. 康复医学前沿. [M] 北京, 人民军医出版社, 2014.



- [4] 李奎成, 刘晓艳, 刘四文等. 任务导向的功能性电刺激疗法在脑外伤患者手和上肢功能恢复中的应用. 中华物理医学与康复杂志. 2013, 35(8), 621-626.
- [5] 游国清, 燕铁斌. 功能性电刺激及其在脑卒中后偏瘫患者中的应用. 中华物理医学与康复杂志. 2007, 29(2), 142-145.
- [6] 张顺喜, 郭永亮, 贺灵慧等. 基于正常行走模式的功能性电刺激对脑卒中患者行走功能即时影响的随机对照研究. [J] 中国康复理论与实践, 2019, 34(5): 527-533.
- [7] Kwakkel G, Kollen B and Twisk J. Impact of time on improvement of outcome after stroke. Stroke 2006; 37: 2348 - 2353
- [8] Jostdottir J, Thorsen R, Aprile I, et al. Arm rehabilitation in post stroke subjects: a randomized controlled trial on the efficacy of myoelectrically driven FES applied in a task-oriented approach [J]. PLoS One, 2017, 12(12): 1-16.
- [9] Eraifej J, Clark W, France B, et al. Effectiveness of upper limb functional electrical stimulation after stroke for the improvement of activities of daily living and motor function: a systematic review and meta-analysis [J]. Syst Rev, 2017, 6(1):40-61.
- [10] Kimbedey TJ, Lewis SM, Auerhach EJ, et al. Electrical Stimulation driving functional improvements and cortical in subjects with stroke. Exp Brain Res, 2004, 154: 450-460.
- [11] 林子玲, 陈玲, 燕铁斌等. 功能性电刺激改善脑卒中患者上肢功能的随机对照研究. 中国康复医学杂志, 2010, 25: 152-155.
- [12] 邢亮, 张通, 顾越等. 反馈式功能性电刺激治疗对脑梗死患者上肢运动功能恢复的影响及其机制的 fMRI 研究. 中华神经医学杂志. 2013, 12(6), 604-609
- [13] Makowski NS, Knutson JS, Chae J, et al. Neuromuscular electrical stimulation to augment reach and hand opening after stroke. Conf Proc IEEE EngMed BiolSoc, 2011, 139: 3055-3058.
- [14] 杨迪, 王强, 高正玉等. 对侧控制型功能性电刺激对亚急性期脑卒中患者上肢运动功能恢复的影响. 中华物理医学与康复杂志. 2020, 42(6), 523-527.
- [15] 唐千七, 张通. 脑机接口控制的功能性电刺激对脑卒中患者上肢功能障碍的康复效果[J]. 中国康复理论与实践, 2021, 27(7): 802-806
- [16] Cervera MA, Soekadar SR, Ushiba J, et al. Braincomputer interfaces for post-stroke motor rehabilitation: a meta-analysis [J]. Ann Clin Transl Neurol, 2018, 5(5): 651-663.
- [17] Hart RL, Kilgore KL, Peckham PH. A comparison between control methods for implanted FES hand-grasp systems. IEEE Trans Rehabil Eng, 1998, 6: 208-218.

