

# 脑机接口在脑卒中运动功能障碍的应用

王春雨<sup>1</sup>, 张蓉<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>青海大学, 青海 西宁

<sup>2</sup>青海省人民医院, 青海 西宁

收稿日期: 2022年5月8日; 录用日期: 2022年5月25日; 发布日期: 2022年6月10日

## 摘要

随着脑卒中发病率的增加, 其所致的肢体功能运动障碍严重影响人们的正常生活, 且目前治疗及康复效果难以达到人们的期望, 脑机接口技术开始进入临床工作者的视野。脑机接口(Brain-Computer Interface, BCI)是一种新型、且不依赖于人体自身神经传导组织的人机交互技术, 它通过体外连接机器为脑卒中肢体功能障碍的患者提供了治疗措施和康复的可能。近些年来, BCI在康复治疗中具有重要的研究价值, 且在神经功能康复及肢体障碍运动辅助等方面都已经被证实是有效的, 且应用于临床治疗中, 这也引起了更多的临床工作者致力于BCI治疗脑卒中后运动功能障碍的研究中。根据现有BCI的研究结果及应用, 本文准备从BCI的分类、原理、在脑卒中患者中的应用等几个方面来进行综述, 同时也探讨了目前BCI技术应用于临床治疗脑卒中肢体功能障碍所存在的问题及难点, 并进一步分析、展望BCI技术在脑卒中未来的发展方向。

## 关键词

脑卒中, 脑机接口, 运动功能障碍, 综述

# Application of Brain Computer Interface in Motor Dysfunction of Stroke Patients

Chunyu Wang<sup>1</sup>, Rong Zhang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Qinghai University, Xining Qinghai

<sup>2</sup>Qinghai Provincial People's Hospital, Xining Qinghai

Received: May 8<sup>th</sup>, 2022; accepted: May 25<sup>th</sup>, 2022; published: Jun. 10<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

With the increase of the incidence of cerebral apoplexy, the limb dysfunction caused by it serious-

\*通讯作者。

ly affects people's normal life, and the current treatment and rehabilitation effect is difficult to meet people's expectations, so brain computer interface technology began to enter the field of vision of clinical workers. Brain-computer interface (BCI) is a new human-computer interaction technology independent of the human body's own nerve conduction tissue. It provides therapeutic measures and rehabilitation possibilities for stroke patients with limb dysfunction through external connected machines. In recent years, BCI has an important research value in rehabilitation therapy, and has been proved to be effective in neurological rehabilitation and impaired limb movement assistance, and has been applied in clinical treatment, which has also aroused more clinical workers to devote themselves to the study of BCI in the treatment of motor dysfunction after stroke. According to the existing research results and application of BCI, this paper intends to review the classification, principle and application of BCI in stroke patients, also discusses the problems and difficulties existing in the application of BCI technology in the clinical treatment of stroke limb dysfunction, and further analyzes and prospects the future development direction of BCI technology in stroke.

## Keywords

Stroke, Brain Computer Interface, Motor Dysfunction, Review

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

脑卒中(cerebral stroke)是一种急性脑血管疾病,是由于脑血管病变导致脑组织损伤的一类疾病,临床上分为缺血性和出血性卒中。当今社会,人们生活水平的提高,导致高血脂、高血压、老龄化人群的不断增长,这些导致脑卒中的发病率不断升高[1]。脑卒中患者会出现一系列病后症状,最常见的便是肢体运动功能障碍[2],其中对人体影响最大的也最常见的是上肢的运动功能障碍,因生活中上肢运动功能的重要性及生活中上肢的精密度要求,成为医生和病人迫切需要解决的问题,目前,为了解决这一问题,许多研究工作者大力发展康复医学技术[3],如重复经颅磁刺激(rTMS)、神经肌肉电刺激、针灸等,但这些基本上都建立在外周治疗的基础上,未能有效康复患者的大脑神经系统,所以带来的治疗效果及治疗期望都是有限的[4] [5],此时人们都希望技术的革新与发展能改变这一现状,脑机接口(brain computer interface, BCI)便在这个时候应运而生,并逐步发展,且在近 10 年进入飞快发展期,越来越多的人投入到 BCI 的工作中去,展示出了 BCI 广阔的研究前景。

本文概述了 BCI 的分类、工作原理、功能、效果等,同时探讨了目前 BCI 技术应用于临床中仍存在的问题及难点,并对 BCI 未来的发展进行分析。

## 2. 脑机接口概述

### 2.1. BCI 的定义

脑机接口(BCI)在临床上是一种新兴的脑机交互治疗技术,它通过机器设备连接人的大脑与肢体,利用设备采集大脑发出的神经信号,并分析、传出信号,从而使人或动物等生命体在身体本身神经传导障碍的情况下实现大脑与肢体的连接,控制肢体运动并产生行为活动,并通过反馈从而达到大脑康复的目的。反之,假如只是仅仅记录、分析、处理大脑信号但不实现与外周环境的肢体的实时交互,这种单纯

的信号整理, 则并不能称为 BCI。BCI 是通过这种交互的功能来控制计算机、语音合成器、辅助器具等设备来满足人们某些功能的需求[6], 并通过这些功能, 从而改善患者的生存质量, 实现患者的康复意愿, 甚至替代患者的肢体或其它功能, 并同时降低医疗费用的作用。

## 2.2. BCI 的分类

需要说明的是, 作为脑机交互系统, BCI 所采集、分析的信号来源于大脑, 而非其它神经系统。从 BCI 信号采集形式的角度, 可以分为表明脑电图、皮质脑电图、皮质内脑电图、基于电信号或磁信号的脑磁图、功能性核磁 BCI 等。基于大脑神经信号的位置及种类不同, 信号采集则具有不同的安全性及准确性[6], 会影响不同的脑卒中肢体功能障碍的治疗效果。从 BCI 信号采集的方式, 可将 BCI 可分为侵入式脑机接口(IBC)与非侵入式脑机接口(NBCI) 2 种, 从目前研究的结果来看, NBCI 在信号采集的精度上是不如 IBC 的, 但 NBCI 的安全性则是明显优于 IBC, NBCI 还具有方便、简单的优点, 也正因为 NBCI 对人体的创伤小, 广泛受到研究者及受试者欢迎, 特别是在临床工作中, 更受到广大患者的欢迎, 依从性较高[5]。

## 3. BCI 治疗脑卒中患者肢体功能障碍的工作原理与理论基础

### 3.1. BCI 治疗脑卒中患者肢体功能障碍的工作原理

相较于传统的神经传导通路, BCI 另辟蹊径, 它通过重新建立一个体外通道来替代脊髓及神经系统, 从而实现大脑 - BCI 外机 - 肢体的控制通道, 再通过 BCI 反馈到大脑, 达到治疗目的。BCI 包括四个部分, 分别是采集信号、解析信号、执行动作、神经反馈[7]。这四个组成部分各司其职, 缺一不可, 从而实现人类不用通过传统的神经传导系统便能执行大脑指挥的动作, 同时也促进了患肢的康复及患肢功能的改善。通过这种模式, BCI 弥补了传统康复手段治疗的缺点, 增加趣味性的同时, 通过代偿方式实现直接实现大脑功能的重塑, 并有利于肢体功能的康复治疗[8] [9], 实现患者肢体的临床康复。

### 3.2. BCI 治疗脑卒中患者肢体功能障碍的理论基础

简单来讲, BCI 相当于抛开传统神经传导系统, 并形成了由脑机交互系统替代的传导通路, 通过大脑发出信号, 并将信号分析输出到患侧肢体, 产生有效活动, 再反馈到大脑, 并促使大脑不同程度的恢复, 这样便形成一个循环, 不仅有利于脑卒中肢体障碍的恢复, 而且也可以通过反馈机制影响大脑神经功能, 促进大脑可塑性功能的发生, 促进脑卒中患者肢体恢复, 同样也为脑卒中患者的肢体康复提供了新的治疗方向[6]。而这里提到的 BCI 影响患者大脑神经的可塑性是指: 人体的大脑神经系统在外界因素作用下, 可以通过学习或运动等方式来调整大脑神经的结构、功能和传导的能力, 我们可以应用这一可塑性的功能来促进大脑神经功能的康复, 从而改善脑卒中患者肢体功能的障碍。神经可塑性的可塑程度是以活动及思维为前提的, 受时间、空间、环境的影响, 通过有目的性的活动, 从而促进神经功能的康复[10]。其机制包括树突发芽、轴突发芽、备用通路利用、突触数量增加等方面[11]。由于在脑卒中患者肢体功能障碍的康复治疗过程中, 神经可塑性在脑卒中患者患肢康复过程中起着举足轻重的地位, 怎样利用大脑的可塑性来治疗脑卒中患者的运动功能障碍是当今社会的一个热门问题, 但同时也是一个难点问题[12]。在这一大环境下, 更是促进了 BCI 的快速发展。

临床治疗上, 改善脑卒中患者的肢体功能障碍除了通过外周肌肉锻炼之外, 主要是通过大脑神经功能的可塑性, 如约束诱导运动疗法、功能性电刺激、带体重支持的跑步机训练和虚拟现实疗法, 从而实现大脑功能的康复, 而 BCI 同样是应用这个原理来工作的[13]。我们可以利用 BCI 来治疗存在肢体功能障碍的脑卒中患者的时候, 通过利用一个体外传导系统连接大脑与功能障碍肢体, 通过大脑神经信号控制

肢体活动,再由肢体活动反馈到大脑,从实现受损神经组织的重塑,这样我们便可以促进大脑神经功能的恢复及患者肢体的康复。除此之外,当我们把 BCI 联合其它模式(如外周肌肉电刺激)来治疗脑卒中引起的肢体功能障碍时,可以利用外周刺激通过 BCI 来激活大脑,从而再利用大脑形成的中枢信号,扩散到外周,促使目标运动的产生,不仅促进了脑卒中患者肌肉的收缩、促进肢体康复[14]。另外,我们正在着手研究 BCI 联合其它中枢刺激方式来进一步表明 BCI 在神经系统康复的应用,为临床治疗提供参考。

## 4. BCI 治疗脑卒中后运动功能障碍进展

### 4.1. BCI 在脑卒中后上肢运动功能障碍中的应用

在 2013 年的时候, Varkuti 等[15]利用应用 BCI 对 6 例慢性期脑卒中患者进行 4 周时间的治疗后,就已经发现其中 5 例患者的 Fugl-Meyer 上肢功能评分明显提高,表明了 BCI 在慢性脑卒中肢体功能障碍治疗方面的有效性。2017 年, MCCONNELL A C 等应用 BCI 联合机器人在治疗 9 例慢性脑卒中的患者中发现 BCI 对于上肢运动障碍治疗的有效性,同时也表明该联合方案对于脑卒中患者神经可塑性的改善也是有效的[16]。当然,随着 BCI 开始应用到临床中,人们就开始关心 BCI 的安全性, Ang 等[17]通过研究表明肯定观点,叙述了 BCI 的安全性,并同时肯定了 BCI 可以增强脑卒中患者肢体运动,有利于肢体功能的恢复。

### 4.2. BCI 在脑卒中后下肢运动功能障碍中的应用

BCI 在治疗脑卒中患者上下肢体运动功能障碍的机制基本相同,许多研究者为了证实 BCI 对下肢功能有效,也做出了许多研究,如 Do 等[18]发现,如果进行一侧下肢进行背屈位和踝中立位时可引起另外一侧 BCI 连接的下肢踝背屈,这为人们解决脑卒中患者下肢功能障碍提供了思路。方文垚等[19]发现应用 BCI 后,脑卒中患者下肢 Fugl-Meyer 评分及肌力评定较治疗前显著提高,表明 BCI 在治疗脑卒中后下肢运动功能障碍中的有效性。有研究者通过观察患者的行走距离,发现 BCI 患者组的 10 m 步行速度以及下肢运动诱发电位较常规组显著提高,这表明 BCI 在患者的行走功能方面是有帮助的[20]。

## 5. BCI 治疗脑卒中运动功能障碍存在的不足

BCI 作为一种区别于传统的治疗方式,近些年开始应用于临床,并受到临床工作者及患者的认可,尤其在治疗脑卒中肢体功能障碍方面效果较为肯定,尽管如此,BCI 仍处于初始阶段,仍存在很多问题[21]。由于外界环境因素、脑卒中个体本身的差异、BCI 机器本身的质量等诸多方面的因素,会对大脑信号的采集、分析、反馈等方面产生影响,从而会影响肢体治疗的有效性,导致错过治疗有效期[22]。目前 BCI 的发展尚处于初级阶段,其作用机制未完全明确,特别无法对不同类型、程度、部位等多方面因素的脑卒中患者有具体的治疗参数与方案,这同样会影响治疗的有效性,这需要临床工作者及研究者投入大量的临床研究去确定,为未来脑卒中肢体功能患者提供标准治疗方案。前文也介绍到 BCI 分为 IBCI 和 NBCI,也介绍了二者之间的有差异,同样由于 NBCI 的易接受但精准度较低,所以临床中我们需要进一步增加 NBCI 采集信号机定位的精准度。

## 6. BCI 治疗脑卒中运动功能障碍的展望

目前,BCI 治疗脑卒中后运动功能障碍已开始逐渐应用到临床,且效果较为肯定,这为临床工作者在治疗脑卒中后肢体运动功能患者带来了新的思路,由于现实临床工作中,不会单一应用 BCI 来治疗脑卒中患侧肢体,BCI 联合其它康复手段必然是未来的 BCI 趋势。Johnson 等[23]通过联合 BCI 和重复经颅磁刺激(repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, rTMS)治疗脑卒中患者的肢体运动障碍,证实了 BCI



联合 rTMS 治疗脑卒中肢体运动功能障碍的有效性, 该联合方案为临床脑卒中的肢体治疗提供了依据。同样, 经颅直流电刺激(transcranial Direct Current Stimulation, tDCS)是近些年来康复治疗中的热门因素, Hong X 等[24]通过研究证明了 BCI 和 tDCS 联合应用可以促使慢性脑卒中患者的大脑可塑性的发生。这也为 BCI 联合 tDCS 在治疗脑卒中患者肢体功能障碍方面的可能性提供有效依据, 同样给临床研究者提供了临床思路, 可进一步去验证。

目前, BCI 的许多功能有效性得到肯定, 仍不可否认的是, 脑机接口在治疗脑卒中功能障碍方面仍然面临着许多困难, 如 BCI 作为一种新型脑机技术, 机器本身在收集、处理、传递信息等方面的精确性仍需提高, 这不仅需要机器制造对机器软件及硬件的升级, 来减少外界或患者本身等诸多因素引起的干扰, 同样更需要临床研究工作者对研究的精益求精, 来为 BCI 技术的升级提供有效依据, 减少目前 BCI 需要较长期的应用才能在肢体康复中取得理想效果这一现状, 从而节约患者的时间及经济成本, 为患者谋福利。

## 参考文献

- [1] Mozaffarian, D., Benjamin, E.J., Go, A.S., *et al.* (2016) Heart Disease and Stroke Statistics—2016 Update: A Report from the American Heart Association. *Circulation*, **133**, 447-454. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000366>
- [2] Young, B.M., Nigogosyan, Z., Remsik, A., *et al.* (2013) Changes in Functional Connectivity Correlate with Behavioral Gains in Stroke Patients after Therapy Using a Brain-Computer Interface Device. *Frontiers in Neuroengineering*, **7**, Article No. 25. <https://doi.org/10.3389/fneng.2014.00025>
- [3] Amartin, J. (2005) Vicarious Function within the Human Primary Motor Cortex? A Longitudinal fMRI Stroke Study. *Brain*, **128**, 1122-1138. <https://doi.org/10.1093/brain/awh456>
- [4] Soekadar, S.R., Birbaumer, N., Slutzky, M.W., *et al.* (2014) Brain-Machine Interfaces in Neurorehabilitation of Stroke. *Neurobiology of Disease*, **83**, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.nbd.2014.11.025>
- [5] Thakor, N.V. (2013) Translating the Brain-Machine Interface. *Science Translational Medicine*, **5**, 210ps17. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3007303>
- [6] Nicolasalonso, L.F. and Gomezgil, J. (2012) Brain Computer Interfaces, a Review. *Sensors*, **12**, 1211-1279. <https://doi.org/10.3390/s120201211>
- [7] Schwartz, A.B., Cui, X.T., Weber, D.J., *et al.* (2006) Brain-Controlled Interfaces: Movement Restoration with Neural Prosthetics. *Neuron*, **52**, 205-220. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.09.019>
- [8] Hsu, W.Y., Cheng, C.H., Liao, K.K., *et al.* (2012) Effects of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation on Motor Functions in Patients with Stroke: A Meta-Analysis. *Stroke*, **43**, 1849-1857. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.111.649756>
- [9] Park, J., Lee, N., Cho, Y., *et al.* (2015) Modified Constraint-Induced Movement Therapy for Clients with Chronic Stroke: Interrupted Time Series (ITS) Design. *The Journal of Physical Therapy Science*, **27**, 963-966. <https://doi.org/10.1589/jpts.27.963>
- [10] Gittler, M. and Davis, A.M. (2018) Guidelines for Adult Stroke Rehabilitation and Recovery. *JAMA*, **319**, 820-821. <https://doi.org/10.1001/jama.2017.22036>
- [11] Wang, W., Collinger, J.L., Perez, M.A., *et al.* (2010) Neural Interface Technology for Rehabilitation: Exploiting and Promoting Neuroplasticity. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America*, **21**, 157-178. <https://doi.org/10.1016/j.pmr.2009.07.003>
- [12] 琚芬, 赵晨光, 袁华, 等. 脑机接口在康复医学中的应用进展[J]. 中国康复, 2017, 32(6): 508-511.
- [13] Stark, A., Meiner, Z., Lefkowitz, R., *et al.* (2012) Plasticity in Cortical Motor Upper-Limb Representation Following Stroke and Rehabilitation: Two Longitudinal Multi-Joint FMRI Case Studies. *Brain Topography*, **25**, 205-219. <https://doi.org/10.1007/s10548-011-0201-2>
- [14] 陈树耿, 贾杰. 脑机接口在脑卒中手功能康复中的应用进展[J]. 中国康复理论与实践, 2017, 23(1): 23-26.
- [15] Varkuti, B., Guan, C., Pan, Y., *et al.* (2013) Resting State Changes in Functional Connectivity Correlate with Movement Recovery for BCI and Robot-Assisted Upper-Extremity Training after Stroke. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, **27**, 53-62. <https://doi.org/10.1177/1545968312445910>
- [16] McConnell, A.C., Muioli, R.C., Brasil, F.L., *et al.* (2017) Robotic Devices and Brain-Machine Interfaces for Hand Re-

- 
- habilitation Post-Stroke. *Journal of Rehabilitation Medicine*, **49**, 449-460. <https://doi.org/10.2340/16501977-2229>
- [17] Ang, K.K., Guan, C., Phua, K.S., *et al.* (2014) Brain-Computer Interface-Based Robotic End Effector System for Wrist and Hand Rehabilitation: Results of a Three-Armed Randomized Controlled Trial for Chronic Stroke. *Frontiers in Neuroengineering*, **7**, Article No. 30. <https://doi.org/10.3389/fneng.2014.00030>
- [18] Do, A., Wang, P., King, C.E., *et al.* (2011) Brain-Computer Interface Controlled Functional Electrical Stimulation System for Ankle Movement. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, **8**, 2-14. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-8-49>
- [19] 方文垚, 刘昊, 杨柳, 等. 脑机接口技术在脑卒中偏瘫患者下肢运动功能康复治疗中的应用[J]. 山东医药, 2018, 58(10): 66-68.
- [20] Mrachacz-Kersting, N., Jiang, N., Stevenson, A.J., *et al.* (2016) Efficient Neuroplasticity Induction in Chronic Stroke Patients by an Associative Brain-Computer Interface. *Journal of Neurophysiology*, **115**, 1410-1421. <https://doi.org/10.1152/jn.00918.2015>
- [21] 明东, 安兴伟, 王仲朋, 等. 脑机接口技术的神经康复与新型应用[J]. 科技导报, 2018, 36(12): 31-37.
- [22] Carmichael, S.T. and Chesselet, M.F. (2002) Synchronous Neuronal Activity Is a Signal for Axonal Sprouting after Cortical Lesions in the Adult. *Journal of Neuroscience*, **22**, 6062-6070. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.22-14-06062.2002>
- [23] Johnson, N.N., Carey, J., Edeiman, B.J., *et al.* (2017) Combined rTMS and Virtual Reality Brain-Computer Interface Training for Motor Recovery after Stroke. *Journal of Neural Engineering*, **15**, Article ID: 016009. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aa8ce3>
- [24] Hong, X., Lu, Z.K., The, I., *et al.* (2017) Brain Plasticity Following MI BCI Training Combined with tDCS in a Randomized Trial in Chronic Subcortical Stroke Subjects: A Preliminary Study. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 9222. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08928-5>