

经颅直流电刺激干预脑卒中的不同模式疗法的仿真对比

刘蒙蒙¹, 于洪丽²

1. 河北工程大学信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工业大学生命科学与健康工程学院, 天津 300130

【摘要】目的:分析阳极、阴极和双极经颅直流电刺激(tDCS)下脑卒中患者脑内电流分布情况,为不同模式tDCS应用于脑卒中患者康复治疗提供理论依据。**方法:**基于MRI数据重建头皮、颅骨、脑脊液和大脑4层头部组织结构,并导入有限元仿真软件结合成真实头模型。然后在大脑模型中构建脑卒中病灶,在头皮模型上构建阳极和阴极电极片模型。最后仿真分析阳极、阴极和双极tDCS在卒中大脑中的有效刺激区域、有效刺激深度和利用率。**结果:**仿真分析结果发现,阳极tDCS的有效刺激区域最集中、利用率最高,双极tDCS的有效刺激深度最深。此外,不同模式tDCS产生的电流密度峰值都位于病灶区域的边界处,大脑内部的有效刺激区域同样位于病灶位置。**结论:**tDCS是一种有潜力的脑卒中康复治疗方法,根据仿真结果可见,阳极和双极tDCS对卒中大脑的刺激效果在一定程度上可能优于阴极tDCS。

【关键词】经颅直流电刺激;脑卒中;真实头模型;有限元仿真

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2025)04-0510-07

Simulation and comparative study of different modes of transcranial direct current stimulation intervention in stroke

LIU Mengmeng¹, YU Hongli²

1. School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. School of Health Sciences and Biomedical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China

Abstract: Objective To analyze the cortical current distribution in stroke patients during anodal, cathodal and bi-hemispheric transcranial direct current stimulation (tDCS) interventions for providing a theoretical basis for the application of different modes of tDCS in the rehabilitation of stroke patients. **Methods** The 4 layers of head tissue structures including scalp, skull, cerebrospinal fluid and brain were reconstructed using MRI data, and assembled into a realistic head model using finite element simulation software. Then, the stroke lesion was constructed in the brain model, and the anode and cathode electrodes were constructed on the scalp model. Finally, the effective stimulation area, effective stimulation depth, and efficiency of anodal, cathodal and bi-hemispheric tDCS in the brain were simulated and analyzed. **Results** The results of simulation analysis showed that anodal tDCS had the strongest focusability and highest stimulation efficiency, while bipolar tDCS had the largest effective stimulation depth. In addition, the peak current densities generated by different modes of tDCS were all located at the boundary of the lesion area, and the effective stimulation areas inside the brain were also located at the lesion area. **Conclusion** tDCS is a promising treatment for rehabilitation following stroke. The simulation results indicate that anodal and bi-hemispheric tDCS may have superior stimulation effects than cathodal tDCS.

Keywords: transcranial direct current stimulation; stroke; realistic head model; finite element simulation

前言

脑卒中是导致成年人残疾的首要病因,全球每

年新发病例约1 220万例,超过1/2的幸存者伴有运动功能障碍^[1]。经颅直流电刺激(transcranial Direct Current Stimulation, tDCS)是一种新兴的无创脑刺激技术,具有安全、操作简单、耐受性强等优点,在脑卒中患者康复治疗中具有应用价值^[2-3]。tDCS干预脑卒中患者共分为阳极tDCS、阴极tDCS和双极tDCS 3种模式,施加阳极tDCS时,阳极电极片放置在患侧半球初级运动皮层(Primary Motor Cortex, M1),阴极电极片放置在健侧半球眶上区;施加阴极tDCS时,阳极电极片放置在患侧半球眶上区,阴极电极片放置

【收稿日期】2024-11-07

【基金项目】国家自然科学基金(51877068);河北省自然科学基金(H2022202081);天津市科技计划项目(22JCZJC00070);河北工程大学创新基金(SJ2401002070)

【作者简介】刘蒙蒙,博士,讲师,研究方向:生物医学电磁技术, E-mail: 1033868064@qq.com

【通信作者】于洪丽,博士,教授,研究方向:生物电磁与神经工程, E-mail: yhlzyn@hebut.edu.cn

在健侧半球M1区;施加双极tDCS时,阳极电极片放置在患侧半球M1区,阴极电极片放置在健侧半球M1区^[4-5]。然而,不同模式tDCS干预脑卒中患者的治疗效果仍存在争议^[6-8]。有必要进行建模仿真研究,为不同模式tDCS应用于脑卒中患者康复治疗提供理论依据。

最初的头部有限元仿真模型较为简单,常使用多层实体球来表示头皮、颅骨、脑脊液和大脑等组织结构^[9-10]。然而,简单的多层球模型无法准确呈现出真实头部组织结构细节,构建真实头模型是头部有限元仿真的重要基础。Wagner等^[11]首次基于MRI数据构建包括头皮、颅骨、脑脊液以及大脑等组织的头模型,并分析tDCS不同电极面积和刺激位置下大脑皮层电流分布。Datta等^[12]构建真实头模型,研究矩形电极和环形电极对大脑皮层刺激效果的差异。近年来基于真实头模型的仿真研究表明,皮层靶点的电流分布可以预测tDCS干预效果^[13-14]。tDCS干预脑卒中患者的电极面积、电极形状和刺激位置等都取得了较为统一的研究结果^[15-17]。但仍缺乏不同模式tDCS干预脑卒中患者的仿真对比研究。

本研究基于MRI数据重建包含头皮、颅骨、脑脊

液和大脑的4层真实头模型,并参考脑卒中患者实际梗死区域和面积,进一步构建脑卒中头模型。然后在脑卒中头模型上创建电极片,构建成阳极、阴极和双极tDCS干预脑卒中仿真模型。最后在有限元仿真软件中设置头部组织电特性和tDCS刺激参数,将仿真模型剖分成4面体结构进行数值求解。对比分析阳极、阴极和双极tDCS在卒中脑内的有效刺激区域、有效刺激深度和利用率,为不同模式tDCS应用于脑卒中患者康复治疗提供参考价值。

1 方法

1.1 头部组织结构重建

本研究采用Huang等^[18]公开的标准化MRI数据逆向重建真实头模型。首先利用Mimics软件(试用版)重建头皮、颅骨、脑脊液和大脑的实体模型如图1所示,图中颅骨眼窝处红色区域表示组织含有空洞,大脑最下部的黄线表示组织表面含有轮廓缺口。由于4层头模型较为粗糙,本身含有空洞和轮廓缺口,且各层组织之间含有空隙或相互交叉,因此不符合有限元仿真模型条件,需要进一步优化。

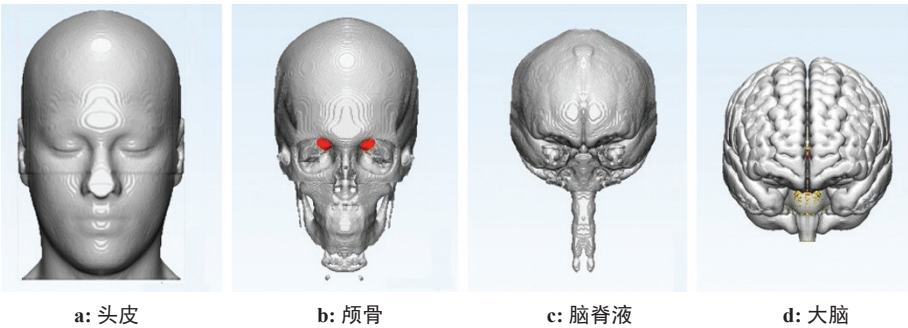


图1 头部结构

Figure 1 Structures of the head

1.2 头部组织模型优化

利用3-matic软件(试用版)剖分组织三维曲面模型。首先将头皮、颅骨、脑脊液和大脑模型进行三角剖分,然后手动删除各层模型的内表面,仅保留模型的外层,从而获取头部各层组织曲面模型。最后修补模型表面缺口,例如眼窝等处的空洞,得到头皮、颅骨、脑脊液和大脑的封闭曲面模型。手动剖分的曲面模型同样含有毛刺和空腔,利用Geomagic Studio软件(试用版)进一步优化曲面模型。首先软件会自动分析曲面中的非流形边、高度折射边、钉状物、小孔洞等问题。然后进行优化处理,包括删除钉状物、去除模型特征、填充空洞、平滑处理等。另一方面,模型冗余的复杂结构会增加有限元分析的错

误率和计算时间,需要手动去除模型中部分面部骨骼和脊髓处的脑脊液等结构。优化后的头皮、颅骨、脑脊液和大脑的曲面模型如图2所示。

1.3 仿真模型构建

将优化好的头皮、颅骨、脑脊液和大脑曲面模型导入Comsol软件(试用版),结合成4层真实头模型。参考脑卒中患者实际梗死区域和面积^[1],在大脑右侧半球M1区构建病灶组织如图3所示,其中蓝色区域为病灶,病灶区域长约为7 cm,宽约5 cm,最深处为2.8 cm。

根据不同模式tDCS电极摆放位置,在卒中头模型上创建阳极和阴极电极片模型如图4所示,其中红色区域为阳极电极片,蓝色区域为阴极电极片,电极

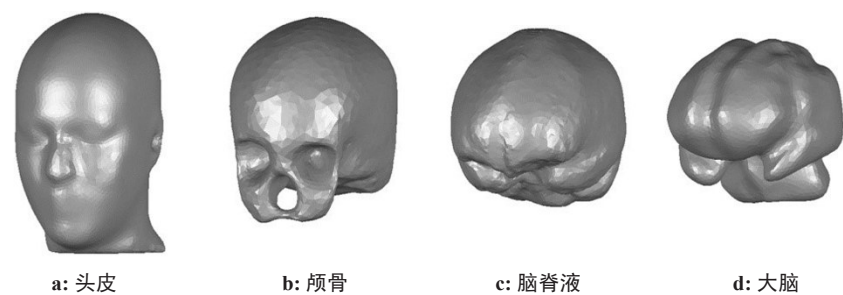


图2 优化后的头部曲面模型
Figure 2 Optimized head surface models

片尺寸为标准的 $(5\times7)\text{cm}^2$ 矩形电极片^[4-5]。对于阳极tDCS模型,阳极电极片放置在右侧(病灶侧)半球M1区,阴极电极片放置在左侧(健侧)半球眶上区;对于阴极tDCS模型,阴极电极片放置在左侧(健侧)半球M1区,阳极电极片放置在右侧(病灶侧)半球眶上区;对于双极tDCS模型,阳极电极片放置在右侧(病灶侧)半球M1区,阴极电极片放置在左侧(健侧)半球M1区。

1.4 边界条件及求解

本研究采用Comsol软件(试用版)进行阳极、阴极和双极tDCS有限元仿真分析。仿真环境选择三维空间,物理场选择AC/DC模块中的电流,研究域选择稳态域。定义头皮、颅骨、脑脊液、大脑和病灶组织

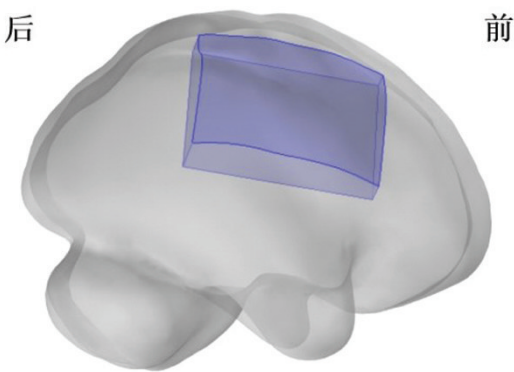


图3 病灶组织
Figure 3 Lesion tissues

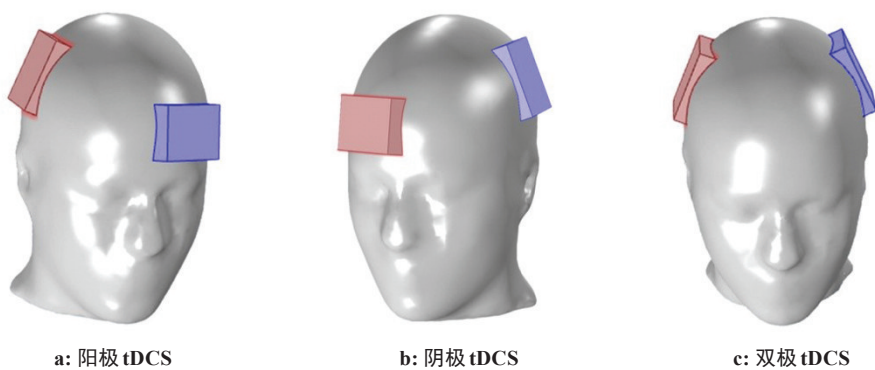


图4 仿真模型
Figure 4 Simulation models

的电特性如表1所示^[19]。然后设置tDCS参数,阳极电极片加1.8 mA直流电,阴极电极片接地,限制求解域为头模型和电极区域,求解域对外界呈电绝缘特性。最后将模型剖分成4面体网格,基于电场理论和4面体网格结构对模型求解。

1.5 评价指标和参数

tDCS的有效性应该符合以下准则:尽量减小对

非目标区域的干预,增强对目标区域的刺激效果。基于以上准则,评价tDCS的指标可分为有效刺激区域、有效刺激深度和电流利用率^[15]。其中有效刺激区域代表电流在大脑皮层上的聚集程度,有效刺激深度代表电流在脑内的最大作用深度,电流利用率是流经大脑的电流占总输入电流的比例。

有效电流密度是一个阈值,大脑皮层中的电流

表1 头部组织电特性
Table 1 Electrical properties of head tissues

组织名称	电导率/S·m ⁻¹	相对介电常数
头皮	0.332	200
颅骨	0.008	36
脑脊液	1.790	109
大脑	0.332	233
病灶	1.790	109

密度大于这个阈值的区域属于有效刺激区域^[20]。有效电流密度 J_f 的计算公式如下：

$$J_f = \frac{\sqrt{2}}{2} J_{\max}$$
 (1)

其中, J_{\max} 代表大脑皮层中电流密度的最大值。电流经过头皮、颅骨和脑脊液最终流入大脑,流经组织的电流占总电流的百分比即为组织电流率^[21]。其表达式为:

$$\varphi_p = \frac{I_p}{I_{\text{total}}} \times 100\%$$
 (2)

其中, φ_p 代表组织电流率, I_p 代表流经组织的电流, I_{total} 代表施加的总电流。

2 结果

2.1 不同模式 tDCS 的有效刺激区域

阳极、阴极和双极 tDCS 下卒中大脑皮层电流密度分布如图 5 所示,同时计算卒中大脑皮层电流密度值如表 2 所示。结果发现,不同模式 tDCS 下卒中大脑皮层电流的方向是由阳极电极片放置区域流向阴极电极片放置区域。其中阳极 tDCS 下电流主要集中在右侧病灶半球,即阳极刺激半球,电流密度峰值位于病灶区域的边界处。阴极 tDCS 下电流主要集中在左侧半球,即阴极刺激半球,值得关注的是电流密度峰值却在右侧半球病灶区域的边界处,且皮层电流密度峰值超过阳极和双极 tDCS。双极 tDCS 下电流分布在两侧半球,同样在右侧半球病灶区域的边界处电流密度最大,电流密度峰值大于阳极 tDCS,但小于阴极 tDCS。此外,阳极、阴极和双极 tDCS 下大脑皮层电流密度平均值基本相同。

以阳极 tDCS 下卒中大脑皮层最大电流密度值 0.279 A/m² 为准,根据有效电流密度计算公式得出,卒中大脑皮层电流密度值大于 0.197 A/m² 的区域为有效刺激区域。绘制阳极、阴极和双极 tDCS 下卒中大脑皮层有效刺激区域如图 6 所示,可以看出阳极 tDCS 下大脑皮层有效刺激区域位于右侧病灶半球的额叶以及病灶区域边界处。阴极 tDCS 下大脑皮层有效刺激区域主要位于左侧半球,同时在右半球病灶

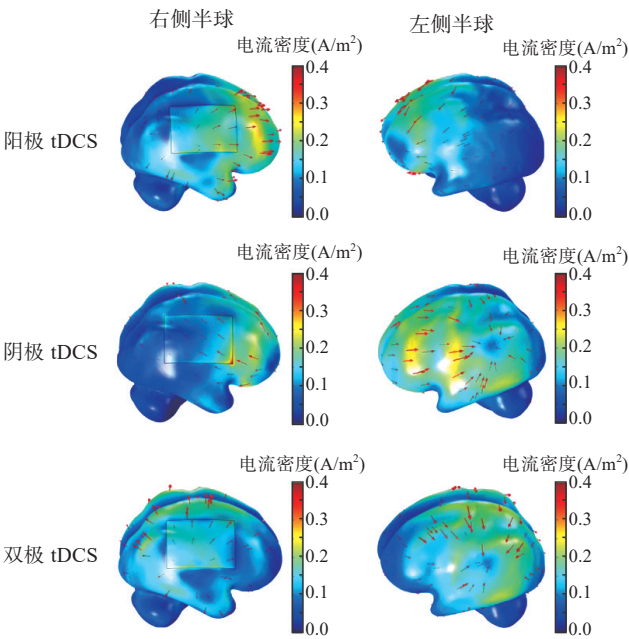


图5 卒中大脑皮层电流密度分布
Figure 5 Current density distributions on cerebral cortex in stroke

表2 卒中大脑皮层电流密度值(A/m²)
Table 2 Current density values on cerebral cortex in stroke (A/m²)

组别	最大电流密度	平均电流密度
阳极 tDCS	0.279	0.109
阴极 tDCS	0.368	0.114
双极 tDCS	0.331	0.111

区域的边界处电流较强。双极 tDCS 下大脑皮层有效刺激区域主要分布在左侧半球,同样在右半球病灶区域的边界处电流较强。图中可知,阳极 tDCS 在卒中大脑皮层上的有效刺激区域最集中。

2.2 不同模式 tDCS 的有效刺激深度

阳极、阴极和双极 tDCS 下卒中大脑冠状切面电流密度如图 7 所示,同时计算卒中大脑切面电流密度值如表 3 所示。结果发现,不同模式 tDCS 下卒中大脑内部电流主要集中在右半球病灶区域,电流密度峰值同样位于病灶区域边界处,但是阳极和双极 tDCS 下电流是从病灶皮层流入,而阴极 tDCS 下电流平行于病灶皮层流入。此外,阳极和双极 tDCS 下卒中大脑内部电流密度峰值基本相同,且大于阴极 tDCS,而阴极和双极 tDCS 下卒中大脑内部电流密度平均值基本相同,且大于阳极 tDCS。

由于卒中大脑切面电流密度峰值位于病灶局部边界,且远大于其他区域的电流密度值,因此以正常组织中的电流密度峰值 0.103 A/m² 为准,计算大脑切面有效电流密度值为 0.073 A/m²。绘制阳极、阴极和

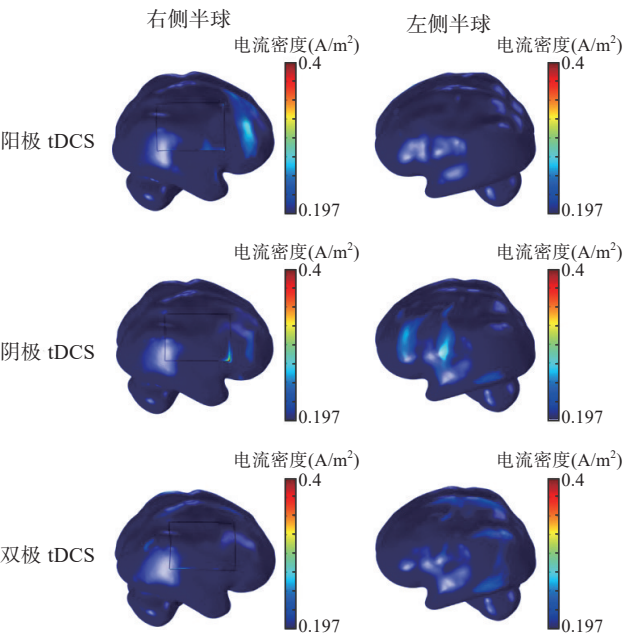


图6 卒中大脑皮层有效刺激区域
Figure 6 Effective stimulation areas on cerebral cortex in stroke

双极 tDCS 下卒中大脑切面有效刺激区域如图 8 所示,可以看出阳极和阴极 tDCS 下大脑内部有效刺激区域全部在右侧半球病灶位置,而双极 tDCS 下大脑内部有效刺激区域除了在右侧半球病灶位置,还局部分布在左侧半球。计算阳极、阴极和双极 tDCS 下卒中大脑有效刺激深度,见表 3,计算结果发现,双极 tDCS 有效刺激深度值最大,说明双极 tDCS 在卒中大脑中的有效刺激范围最深。

2.3 不同模式 tDCS 的利用率

组织电流率是流经组织的电流占总输入电流的比例。计算流经组织的电流,首先要做组织切面,然后求组织切面上电流密度的积分。选取组织切面的方法如下:连接阳极和阴极电极片的中心点,以连线为切面的法向,在连线的中点做切面。计算阳极、阴极和双极 tDCS 下卒中模型头皮、颅骨、脑脊液和大脑的组织电流率,如表 4 所示,结果可以看出,不同模式 tDCS 下头皮的电流率最高,而颅骨的电流率最低。此外,阳极 tDCS 下卒中大脑电流率最高,说明阳极 tDCS 在卒中大脑中的利用率最高。

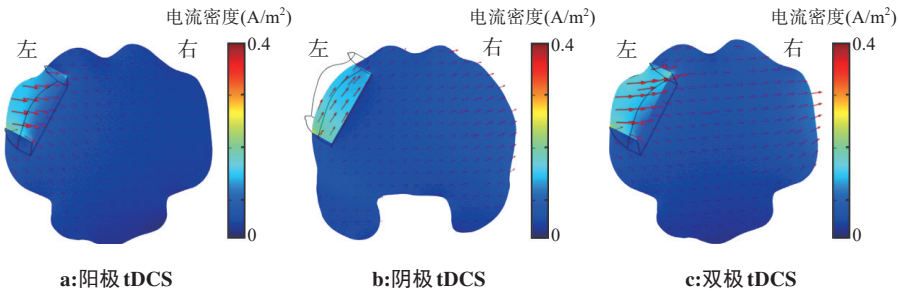


图7 卒中大脑切面电流密度分布
Figure 7 Current density distributions on brain section in stroke

表 3 卒中大脑切面电流密度值
Table 3 Current density values on brain section in stroke

组别	最大电流密度/A·m ⁻²	平均电流密度 A·m ⁻²	有效刺激深度/mm
阳极刺激	0.389	0.039	20
阴极刺激	0.255	0.053	18
双极刺激	0.392	0.054	25

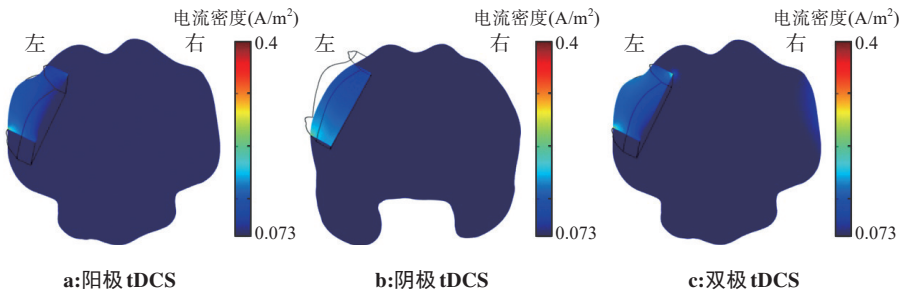


图8 卒中大脑切面有效刺激区域
Figure 8 Effective stimulation areas on stroke brain section

表 4 卒中大脑组织电流率(%)
Table 4 Current rate of brain tissues in stroke (%)

组别	头皮	颅骨	脑脊液	大脑
阳极刺激	46.48	1.58	19.94	32.00
阴极刺激	45.27	1.39	24.53	28.81
双极刺激	37.93	0.38	34.50	27.19

3 讨论及结论

本研究基于MRI数据重建4层真实头模型,并根据脑卒中患者真实病灶区域和面积进一步构建脑卒中头模型,探究阳极、阴极和双极tDCS下脑卒中患者脑内电流分布情况。仿真分析结果发现,阳极tDCS在卒中大脑中的有效刺激区域最集中、利用率最高,双极tDCS的有效刺激深度最深。此外,不同模式tDCS产生的皮层电流密度都位于病灶区域的边界处,大脑内部的有效刺激区域同样位于病灶位置。根据仿真结果可见,阳极和双极tDCS对卒中大脑的刺激效果可能优于阴极tDCS。

有学者研究发现,施加tDCS时,阳极电极片能够增强刺激脑区的皮层兴奋性,阴极电极片能够抑制刺激脑区的皮层兴奋性,而不同模式tDCS通过增强脑卒中患者患侧半球皮层兴奋性或抑制健侧半球皮层兴奋性,来促进患者的运动功能恢复^[22-24]。Herrera-Melendez等^[25]发现,阳极电极片在刺激皮层产生流入电流,使细胞膜电位发生去极化,从而兴奋刺激皮层,而阴极电极片在刺激皮层产生流出电流,使细胞膜电位发生超极化,从而抑制刺激皮层。本研究仿真分析同样发现,脑卒中患者施加阳极tDCS时,在患侧半球产生流入电流;施加阴极tDCS时,在健侧半球产生流出电流;施加双极tDCS时,在患侧半球产生流入电流,同时在健侧半球产生流出电流。

值得注意的是,本研究仿真结果发现,阴极tDCS除了在健侧半球产生流出电流,同时在患侧半球(病灶区域)产生平行于大脑皮层的电流,并且不同模式tDCS在大脑内部产生的电流都集中在病灶区域。Rushton^[26]研究认为tDCS通过刺激垂直于大脑皮层的锥体细胞产生作用,所以垂直于大脑皮层的法向电流决定了刺激效果。本研究仿真发现阳极和双极tDCS在病灶区域产生斜向内流入电流,而阴极tDCS产生平行于大脑皮层的电流,再次从侧面证明阴极tDCS对脑卒中患者的刺激效果有限。另一方面,Navarro-López等^[27]综述不同模式tDCS对脑卒中患者上肢运动功能影响的临床试验研究,结果发现相较于阳极和双极tDCS,阴极tDCS无显著改善趋势。本研究的仿真结果为不同模式tDCS应用于脑卒中患者康复治疗提供理论依据。未来计划直接采用脑卒

中患者MRI数据,构建包括头皮、颅骨、脑脊液、灰质、白质等更多层数的结构更加精密的个体化仿真模型,进一步探究不同模式tDCS干预脑卒中患者的个体化差异。

【参考文献】

[1] Saposnik G, Galanos LC, Guerrero R, et al. The world stroke academy: a world stroke organization global pathway to improve knowledge in stroke care[J]. Int J Stroke, 2022, 17(8): 829-834.

[2] Galli G, Miniussi C, Pellicciari MC. Transcranial electric stimulation as a neural interface to gain insight on human brain functions: current knowledge and future perspective[J]. Soc Cogn Affect Neurosci, 2022, 17(1): 4-14.

[3] Gowan S, Hordacre B. Transcranial direct current stimulation to facilitate lower limb recovery following stroke: current evidence and future directions[J]. Brain Sci, 2020, 10(5): 310.

[4] Lee JH, Jeun YJ, Park HY, et al. Effect of transcranial direct current stimulation combined with rehabilitation on arm and hand function in stroke patients: a systematic review and meta-analysis[J]. Healthcare (Basel), 2021, 9(12): 1705.

[5] Van Hoorweder S, Vanderzande L, Bloemers E, et al. The effects of transcranial direct current stimulation on upper-limb function post-stroke: a meta-analysis of multiple-session studies[J]. Clin Neurophysiol, 2021, 132(8): 1897-1918.

[6] Lima E, de Souza Neto JM, Andrade SM. Effects of transcranial direct current stimulation on lower limb function, balance and quality of life after stroke: a systematic review and meta-analysis [J]. Neurol Res, 2023, 45(9): 843-853.

[7] Ahmed I, Yeldan I, Mustafaoglu R. The adjunct of electric neurostimulation to rehabilitation approaches in upper limb stroke rehabilitation: a systematic review with network meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Neuromodulation, 2022, 25(8): 1197-1214.

[8] Tedla JS, Sangadala DR, Reddy RS, et al. Transcranial direct current stimulation (tDCS) effects on upper limb motor function in stroke: an overview review of the systematic reviews[J]. Brain Inj, 2023, 37(2): 122-133.

[9] Miranda PC, Lomarev M, Hallett M. Modeling the current distribution during transcranial direct current stimulation[J]. Clin Neurophysiol, 2006, 117(7): 1623-1629.

[10] Bikson M, Bulow P, Stiller JW, et al. Transcranial direct current stimulation for major depression: a general system for quantifying transcranial electrotherapy dosage[J]. Curr Treat Options Neurol, 2008, 10(5): 377-385.

[11] Wagner T, Fregni F, Fecteau S, et al. Transcranial direct current stimulation: a computer-based human model study[J]. Neuroimage, 2007, 35(3): 1113-1124.

[12] Datta A, Bansal V, Diaz J, et al. Gyri-precise head model of transcranial direct current stimulation: improved spatial focality using a ring electrode versus conventional rectangular pad[J]. Brain Stimul, 2009, 2(4): 201-207.e1.

[13] 王婕. 经颅直流电刺激的定向优化及机制研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.

Wang J. Research on targeted optimization and the mechanism of transcranial direct current stimulation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.

[14] Albizu A, Fang RG, Indahlastari A, et al. Machine learning and individual variability in electric field characteristics predict tDCS treatment response[J]. Brain Stimul, 2020, 13(6): 1753-1764.

[15] 王宏利, 于洪丽, 王超, 等. 基于真实头模型的经颅直流电刺激参数优选研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2021, 38(4): 638-646.

Wang HL, Yu HL, Wang C, et al. Effects of parameters selection with transcranial direct current stimulation based on real head model[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2021, 38(4): 638-646.

[16] Orrù G, Conversano C, Hitchcott PK, et al. Motor stroke recovery after tDCS: a systematic review[J]. Rev Neurosci, 2020, 31(2): 201-218.

[17] Bornheim S, Thibaut A, Beaudart C, et al. Evaluating the effects of

- tDCS in stroke patients using functional outcomes: a systematic review[J]. *Disabil Rehabil*, 2022, 44(1): 13-23.
- [18] Huang Y, Parra LC, Haufe S. The New York Head-a precise standardized volume conductor model for EEG source localization and tES targeting[J]. *Neuroimage*, 2016, 140: 150-162.
- [19] van der Cruysen J, Dooren RF, Schouten AC, et al. Addressing the inconsistent electric fields of tDCS by using patient-tailored configurations in chronic stroke: implications for treatment[J]. *Neuroimage Clin*, 2022, 36: 103178.
- [20] Carbutaru R, Durand DM. Toroidal coil models for transcutaneous magnetic stimulation of nerves[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2001, 48(4): 434-441.
- [21] Faria P, Hallett M, Miranda PC. A finite element analysis of the effect of electrode area and inter-electrode distance on the spatial distribution of the current density in tDCS[J]. *J Neural Eng*, 2011, 8(6): 066017.
- [22] Rizzo V, Terranova C, Crupi D, et al. Increased transcranial direct current stimulation after effects during concurrent peripheral electrical nerve stimulation[J]. *Brain Stimul*, 2014, 7(1): 113-121.
- [23] Camacho-Conde JA, Gonzalez-Bermudez MD, Carretero-Rey M, et al. Brain stimulation: a therapeutic approach for the treatment of neurological disorders[J]. *CNS Neurosci Ther*, 2022, 28(1): 5-18.
- [24] Fonte C, Varalta V, Rocco A, et al. Combined transcranial direct current stimulation and robot-assisted arm training in patients with stroke: a systematic review[J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2021, 39(6): 435-446.
- [25] Herrera-Melendez AL, Bajbouj M, Aust S. Application of transcranial direct current stimulation in psychiatry[J]. *Neuropsychobiology*, 2020, 79(6): 372-383.
- [26] Rushton WA. The effect upon the threshold for nervous excitation of the length of nerve exposed, and the angle between current and nerve[J]. *J Physiol*, 1927, 63(4): 357-377.
- [27] Navarro-López V, del-Valle-Gratacós M, Carratalá-Tejada M, et al. The efficacy of transcranial direct current stimulation on upper extremity motor function after stroke: a systematic review and comparative meta-analysis of different stimulation polarities[J]. *PM R*, 2024, 16(5): 496-510.

(编辑:陈丽霞)