

电针理疗电传导机制建模与分析

秦雨萍^{1,2,3}, 杨济宁^{1,2,3}, 徐晶^{1,2,3}, 余远昱^{1,2,3}, 王久江^{1,2,3}

1. 内江师范学院人工智能学院, 四川 内江 641100; 2. 内江师范学院智慧医疗工程应用实验室, 四川 内江 641100; 3. 内江师范学院内师-容天智慧医疗工程应用联合实验室, 四川 内江 641100

【摘要】目的: 为了有效分析电针治疗肌无力过程中, 信号在机体内的扩散情况, 提高信号阵列对于机体刺激的效果。**方法:** 以中国数字人右手手臂影像数据集为数据基础, 研发出用于分析电针理疗效果的有限元仿真几何结构模型。将模型导入到有限元仿真软件中, 通过有限元建模的方法, 建立电针理疗电信号传导理论模型, 向电针的正负两极分别注入载波频率为1、2、5 kHz, 幅度为 ± 20 mA与-5 mA的电流信号, 以此分析信号在手臂中的传播机制。**结果:** 仿真分析发现, 在正极附近产生最大为10 V的耦合电压, 该电压对人体几乎是无害的, 同时在正极周围会形成一个约1 cm半径的作用区域, 该区域即为理疗的作用区域。同时通过分析手臂内轴线上的电势与电流分布发现, 由于组织阻抗受频率增大的影响, 组织电容效应越来越明显, 耦合电势逐渐减小, 但理疗关键因素的电流分布几乎不会受到影响。**结论:** 刺激频率的增大会降低耦合电势且治疗效果不会受到任何影响, 因此在后期治疗中, 可以通过增加频率来降低耦合电势对人体的伤害。

【关键词】 肌无力; 电针; 有限元模型; 传导机制; 理疗

【中图分类号】 R318; Q42

【文献标志码】 A

【文章编号】 1005-202X(2022)08-0980-07

Modeling and analysis of electrical signal transmission mechanism in electroacupuncture physiotherapy

QIN Yuping^{1,2,3}, YANG Jining^{1,2,3}, XU Jing^{1,2,3}, YU Yuanyu^{1,2,3}, WANG Jiujiang^{1,2,3}

1. School of Artificial Intelligence, Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China; 2. Smart Medical Engineering Applications Laboratory, Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China; 3. NJNM-OMNISKY Smart Medical Engineering Applications Joint Laboratory, Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China

Abstract: Objective To analyze the signal diffusion in the body during electroacupuncture treatment of myasthenia, thereby improving the effect of signal array on body stimulation. **Methods** Based on the image data set of Chinese digital human right arm, a finite element simulation geometric model for analyzing the therapeutic effect of electroacupuncture physiotherapy was developed and then import into finite element simulation software. A theoretical model of electrical signal transmission in electroacupuncture physiotherapy was established using finite element modeling method. The positive and negative electrodes of the electroacupuncture were input with current signals with carrier frequencies of 1, 2 and 5 kHz and amplitudes of ± 20 mA and -5 mA, so as to analyze the transmission mechanism of the signal in the arm. **Results** The simulation analysis shows that the maximum coupling voltage of 10 V was generated near the positive electrode, which was almost harmless to human body, and that an action area with a radius of about 1 cm would be formed around the positive electrode, which was the action area of physiotherapy. Meanwhile, by analyzing the distributions of potential and current on the inner axis of the arm, it was found that due to the effects of frequency increase on the tissue impedance, the tissue capacitance effect became more and more obvious, and the coupling potential declined gradually, but the electric current distribution, the key factor of physiotherapy, was hardly affected. **Conclusion** The increase of stimulation frequency will reduce the coupling potential, and the therapeutic effect will not be affected. Therefore, the hurt of coupling potential to human body can be reduced by increasing the frequency in the treatment.

Keywords: myasthenia; electroacupuncture; finite element model; transmission mechanism; physiotherapy

【收稿日期】 2022-03-19

【基金项目】 国家重点研发计划(2016YFC0100800, 2016YFC0100802); 四川省科技创新创业苗子工程重点项目(2022JDRC0134); 四川省重点研发计划(重大专项)(2021YFSC0040); 四川省国际港澳台科技创新合作重点研发项目(2022YFH0110); 中国博士后科学基金面上项目(2020M683294); 成都医学院四川应用心理学研究中心资助项目(CSXL-21103); 内江师范学院科研团队项目(17TD03, 2021TD02)

【作者简介】 秦雨萍, 硕士, 副教授, 研究方向: 偏微分方程、神经调控技术, E-mail: qin_yup@yeah.net

前言

肌无力是由于神经肌肉传递障碍所引发的一种慢性疾病,主要表现为神经肌肉接头传递障碍引起的骨骼肌收缩无力^[1]。造成这一系列原因是由于乙酰胆碱受体抗体(AChRAb)介导下伴有细胞免疫依赖及补体参与,最终累及神经肌肉接头,引起传递障碍。日常行为表现除了骨骼肌无力外,患者还常常表现有极易疲劳,活动后加重的现象。虽然经过休息和药物治疗后症状会有所减轻或缓解,但效果并不明显,并且长时间使用药物治疗还容易引起机体产生抗药性,变得更加难以治疗^[2]。为了解决这个问题,中医提出针灸治疗辅助电针干预的方式实施理疗,从而恢复肌肉活力。电针治疗即通过向目标区域对实施针灸的电针注入电流信号,通过针灸与电流疏导实施有效配合,从而对目标区域实施治疗。电针治疗是精准治疗肌无力比较好的方法^[3-4]。

为了分析电针信号在靶向区域信号的扩散情况,本文结合解剖学基础与生物组织结构学基础^[5],以及前期研究的数字人模型,提出使用有限元的方法建立电针理疗信号扩散模型;通过向模型中对中心电极注入+20 mA电流,外围电极注入-5 mA电流,载波频率分别为1、2、5 kHz电流信号,分析电针理疗法电信号在手臂模型内部的传导机制,为肌无力精准微创治疗提供理论依据。

1 模型基础

人体手臂由各种组织(皮肤、脂肪、肌肉、骨骼等),关节(腕关节、肘关节、指关节等)以及血管和神经系统所组成,由于血管和神经组织比较微小,在建模过程中容易形成奇点,从而让模型失去鲁棒性,同时在本研究中,主要是研究电针通电时,电信号在组织中的扩散情况,因此本研究仅考虑主要组织对信号传递的影响,即皮肤、脂肪、肌肉以及骨骼4种组织电针信号在理疗时信号的扩散情况。

根据容积导体理论得知,在准静态模式下,人体生物电信号是十分微弱的。当刺激信号频率为1 kHz~1 MHz时,人体中绝大多数组织的电磁特性可以近似看作是准静态电场^[6]。因此在模型初始化状态时,标准模型中总的电荷密度为0。

1.1 电势控制方程

根据容积导体理论,准静态电场情况下,容积导体各方向电流近似为0^[6],从而有 $\nabla \cdot \vec{J} \approx 0$;由此得到电势的控制方程为:

$$\nabla \cdot (-\tilde{\sigma} \nabla \varphi(R)) \approx 0 \quad (1)$$

其中, $\tilde{\sigma}$ 表示介质的复电导率 $\tilde{\sigma} = \sigma + i\epsilon_0\epsilon_r$, R 表示曲

面上点的极坐标位置, φ 表示导体内的感应电势。

1.2 注入电流控制

在理疗过程中,理疗电信号通过电针直接注入人体体内,电针与组织各位置的接触面均有电流信号流入,其控制方程为:

$$\frac{\partial \varphi(R)}{\partial R_s} = \frac{\vec{J}_{\text{impressed}}}{\tilde{\sigma}} \quad (2)$$

其中, R_s 表示电针与组织接触面表面积。在刺激系统中,由1根正极4根负极作用于目标靶区,则正负电极施加电流满足:

$$\vec{J}_{\text{impressed}}(R_s) = \begin{cases} j, \text{Electrode}(+) \\ 0, \text{Others} \\ -j/4, \text{Electrode}(-) \end{cases} \quad (3)$$

其中, j 表示电针电极注入的电流密度,且 $j = \frac{I}{s}$, I 表示注入电极的电流强度, s 表示电子与组织接触处表面积,通过文献得知,为了不伤害人体组织,同时也让患者在电理疗时不产生明显刺痛感^[7-8],耦合产生的电势要小于36 V。结合前期研究,电流的取值范围为 $I \leq 20 \text{ mA}$ ^[9-10]。

2 有限元模型建立

2.1 模型几何结构构建

结合前面的研究^[9-10],将构建好的人体右臂几何模型作为研究区域,在COMSOL Multiphysics 5.5中实施几何建模,如图1所示。

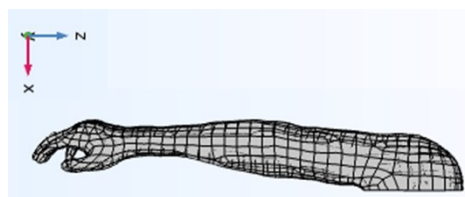


图1 手臂几何结构模型建立

Figure 1 Geometric modeling of the arm

2.2 网格划分

在网格剖分中,考虑到电针直径小于0.1 mm,且皮肤组织部厚度也仅为1 mm,为了保证模型计算的鲁棒性,同时也为计算机计算预留足够的计算资源,使用自由四面体网格类型对简化的手臂模型实施划分,网格序列类型使用用户控制,单元格大小使用较细化,剖分完成后,得到域单元数为899 811,边界单元数为214 479,边单元数为37 174。网格划分完成后效果图如图2所示。

2.3 模型计算参数设定

在模型中,对电针的正负两极分别注入载波频



图2 网格剖分效果图
Figure 2 Mesh generation

率为1、2、5 kHz,幅度为+20 mA与-5 mA的电流信号,以此来分析理疗过程中电信号在手臂内的扩散情况。在模型计算开始时,将人体组织电参数^[11-12]赋值给对应的组织,在模型初始化状态时,假定模型中各部分电势均为0,分析电流引起的物理场变化。

3 结果与分析

将赋值电参数完成后的手臂模型在 COMSOL Multiphysics 5.5 中执行计算(资源参数:CPU: Intel(R)

Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20 GHz;内存:96.0 GB;系统:64 位 Windows 10),用时 4 438 s 得出电针刺激仿真结果,如图 3~图 11 所示。分析图 3 发现,信号主要集中在电极区域,这充分证明电针理疗主要作用于电极排列控制的靶区以及信号的属性。

图 4、图 5 分别分析手臂 yz 截面、xz 截面电势、电流密度分布图,从图中可以看出,5 个电极成 X 型分

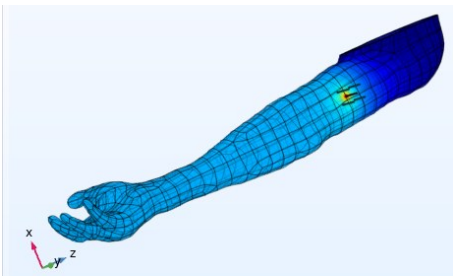


图3 电势空间分布图
Figure 3 Spatial distribution of the potential

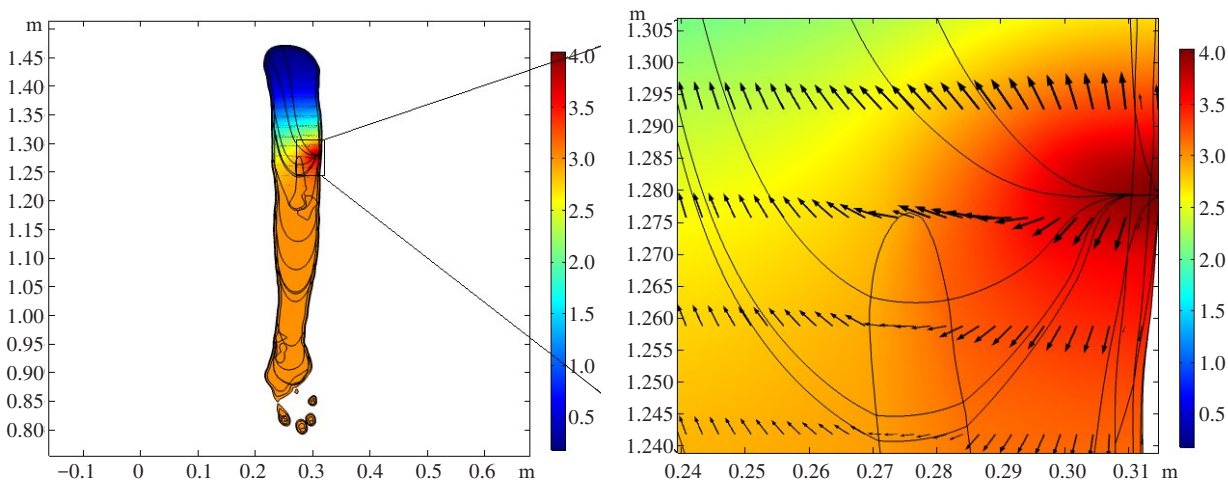


图4 手臂yz截面电势、电流密度分布图
Figure 4 Distributions of potential and current density in yz section of the arm

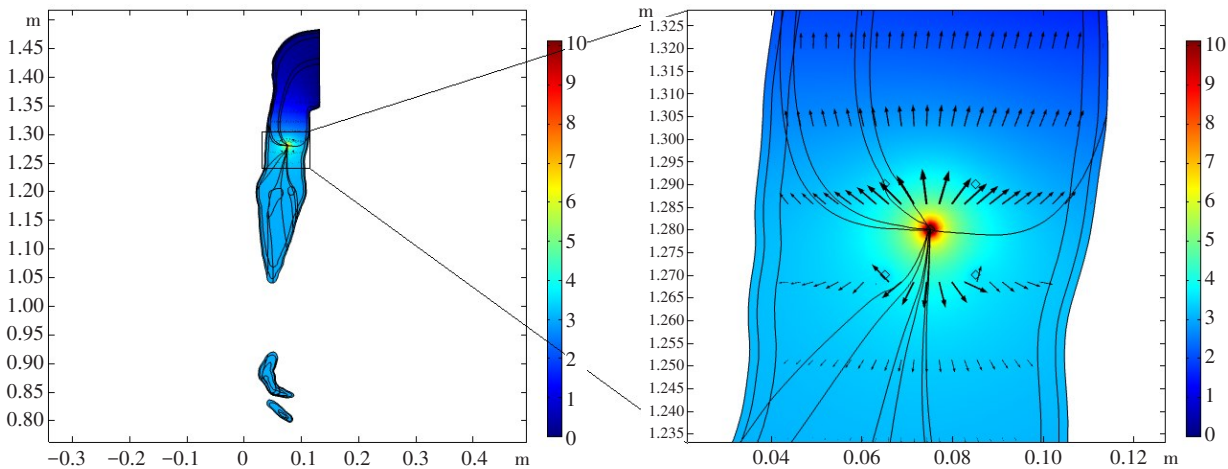


图5 手臂xz截面电势、电流密度分布图
Figure 5 Distributions of potential and current density in xz section of the arm

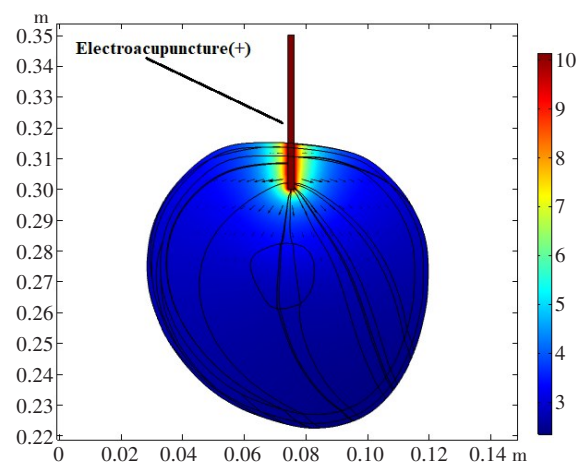


图6 正极电针xy截面电势、电流密度分布图

Figure 6 Distributions of potential and current density in xy section of the positive electrode electroacupuncture

布,中心位置(交叉点)为信号正极输入端,最外围的4个电极的信号负极输入端。电信号由处于中心的正极向外围的负极扩散,在体内形成一个近似圆形区域,该区域即为电针物理治疗的有效区域。该区域最大感应电势为10 V,这是人体所能承受的,且对人体不会造成伤害。当电针通电时,正极电针与负极电针形成回路,促进体内离子运动,加强体液循环,有效地对靶向区域实施理疗。

图6为正极电针在通电后对手臂实施针刺研究时电扩散图;图7、图8则分别表示正极电针xy截面轴线上不同频率电势、电流分布图;图9为负极电针xy截面电势、电流密度分布图;图10、图11则分别表示负极电针xy截面轴线上不同频率电势、电流分布

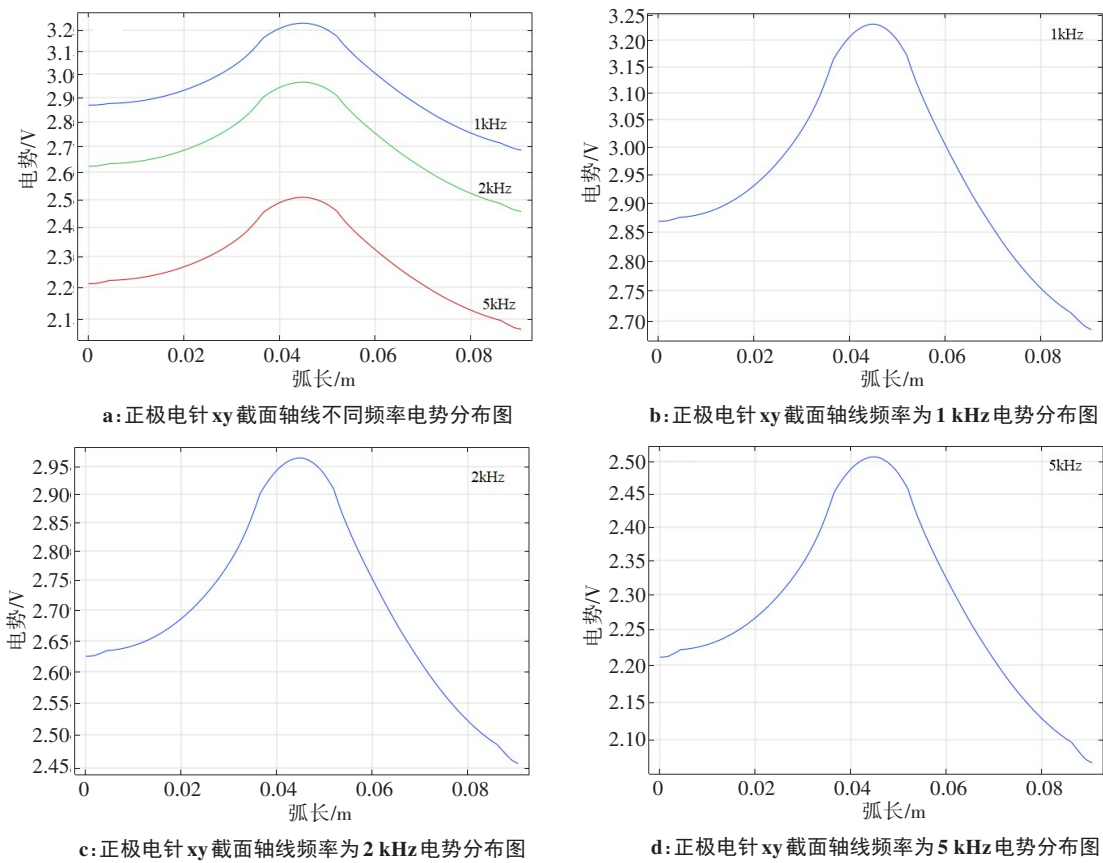


图7 正极电针xy截面轴线上不同频率电势分布图(垂直于电针方向)

Figure 7 Potential distributions at different frequencies on the xy section axis of the positive electrode electroacupuncture (perpendicular to the direction of electroacupuncture)

图。从图6与图9分析发现,由于针头完全裸漏,信号在接触组织处开始扩散,同时因为组织的阻抗原因,信号的扩散主要集中在电针附近,图7与图10充分证明了这一结论。同时,从图7与图10还发现,随着刺激信号频率的不断增加,容积导体内部同一位置的感应电势逐渐降低,但空间域变化趋势却没发

生变化,这是因为随着刺激信号频率的不断增加,组织的电导率变小,介电常数逐渐变大,组织电容效应逐渐增强。但导体内电流密度变化较小,这是因为电流密度仅受电导率的影响所引起,在1~10 kHz范围电导率变化非常小,故电流密度变化并不明显,如图8和图11所示。

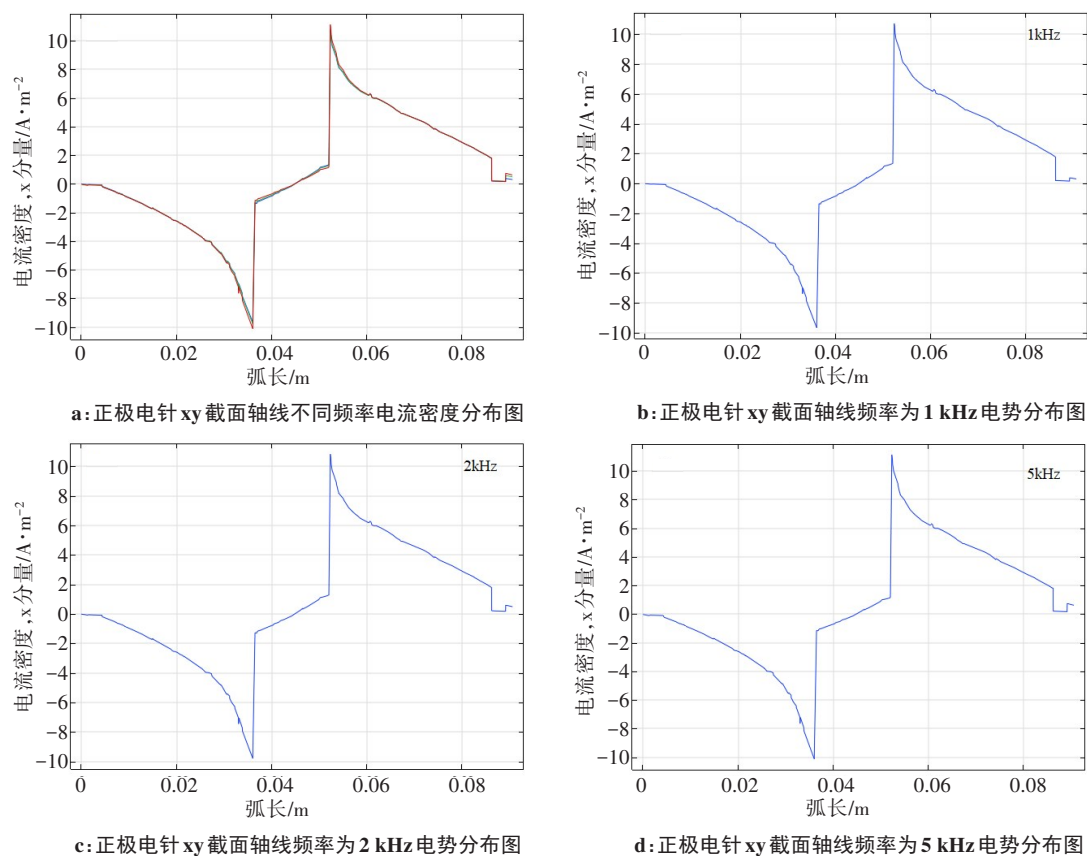


图 8 正极电针 xy 截面轴线上不同频率电流分布图(垂直于电针方向)

Figure 8 Current distributions at different frequencies on the xy section axis of the positive electrode electroacupuncture (perpendicular to the direction of electroacupuncture)

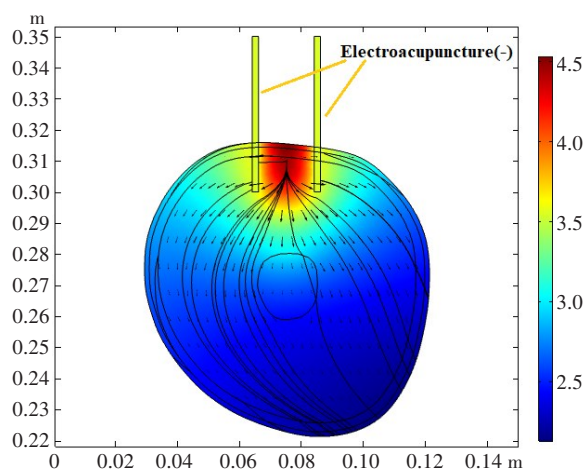


图 9 负极电针 xy 截面电势、电流密度分布图

Figure 9 Distributions of potential and current density in xy section of the negative electrode electroacupuncture

4 结 论

本文以电针理疗为研究对象,以中国数字人右手手臂数据集作为数据基础,研发出用于分析电针理疗效果的有限元仿真几何结构模型,虽然充分考虑了组织的几何结构特性,但是该研究仍然存在一定的局限性,主要存在以下问题:(1)在模型计算中,

为了保证模型的鲁棒性与提升计算机的计算速度,将手臂中神经组织与血管组织作了进一步简化,该简化过程可能会影响部分计算结果^[13-15],特别是血液流动引起的流体动力影响,在下一步研究中需要增加力学混合场加以研究;(2)通过文献得知,电针理疗过程中,除了电效应外还有热效应及化学效应,在下一步模型修正中,计划通过电场+热场+电化学多物理场混合建模的方式构建多物理场,从而更加准确地分析电针理疗中复杂的物理场效应^[16-25]。

5 结 论

本文以电针理疗为研究对象,结合前期以中国数字人右手手臂研发出来的有限元仿真几何结构模型,将模型导入到有限元仿真软件中,通过有限元建模的方法,建立电针理疗电信号传导理论模型,以此来分析信号在人体手臂内的传导情况。通过分析发现,当通过电针的正负两极分别注入载波频率为 1、2、5 kHz,幅度为 +20 mA 与 -5 mA 的电流信号时,会在正极附近产生最大为 10 V 的耦合电压,该电压对人体几乎是无害的,同时在正极周围会形成一个约 1 cm 半径的作用区域,该区域即为理疗的作用区域。

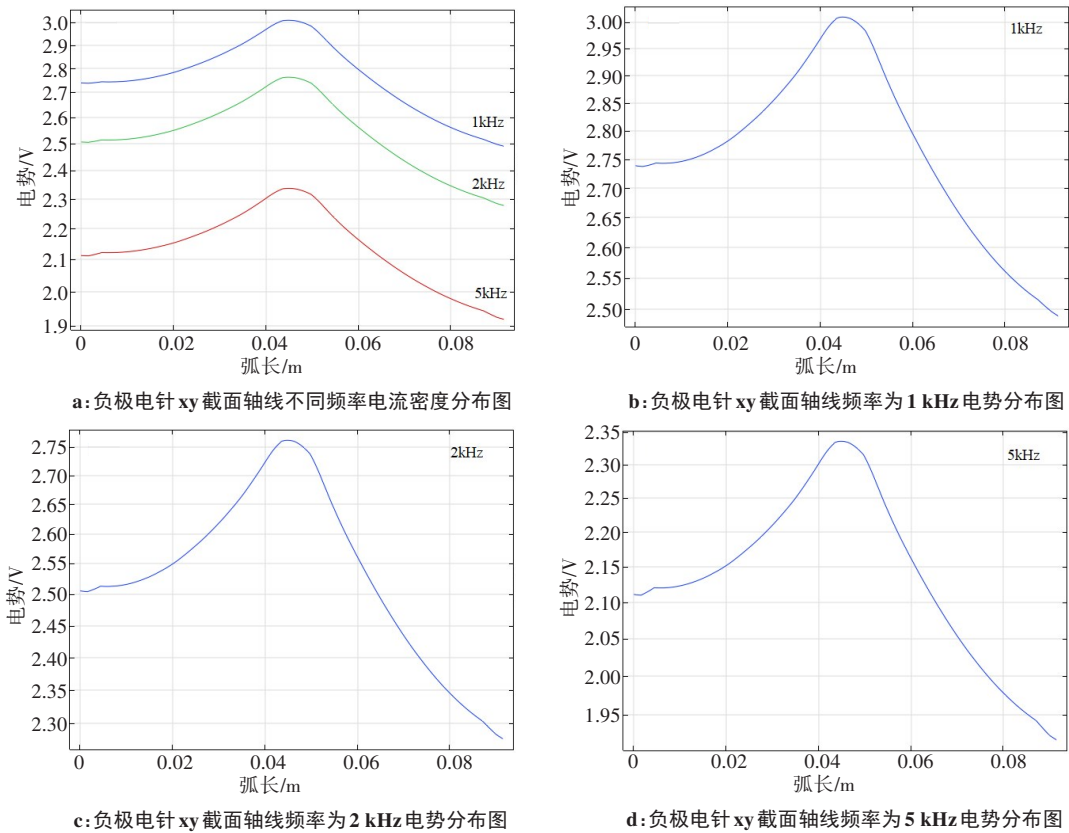


图 10 负极电针 xy 截面轴线上不同频率电势分布图(垂直于电针方向)

Figure 10 Potential distributions at different frequencies on xy section axis of the negative electrode electroacupuncture (perpendicular to the direction of electroacupuncture)

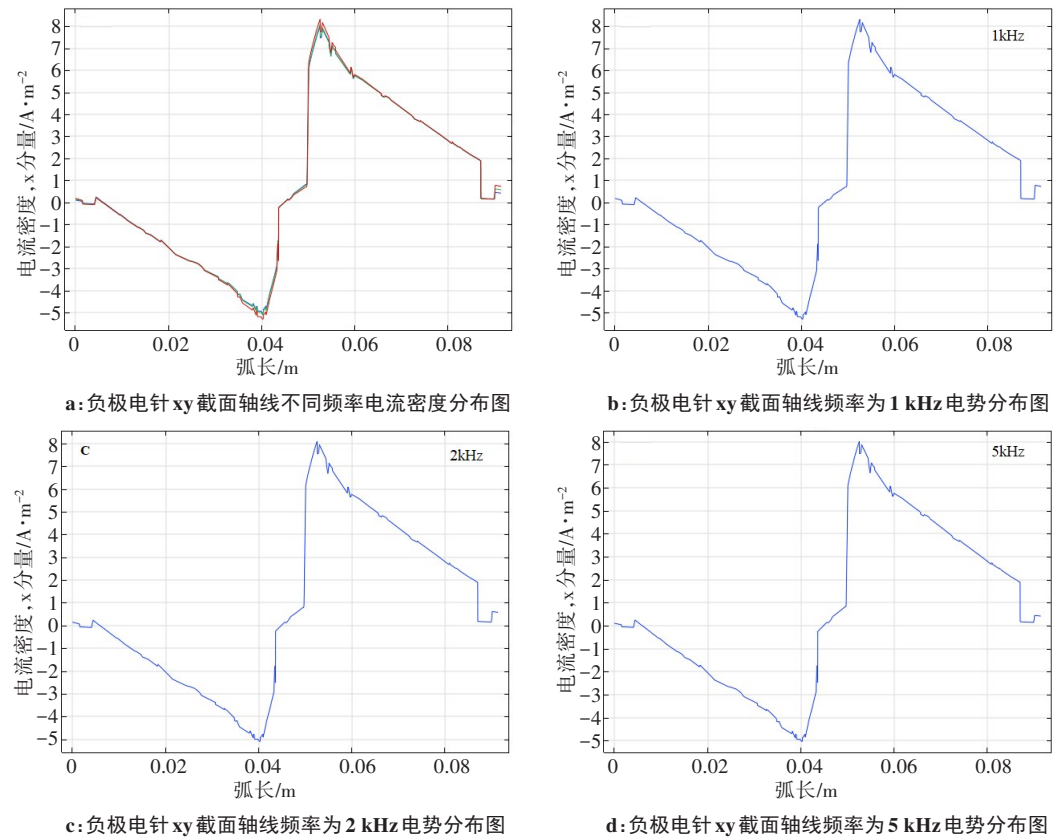


图 11 负极电针 xy 截面轴线上不同频率电流分布图(垂直于电针方向)

Figure 11 Current distributions of different frequencies on xy section axis of the negative electrode electroacupuncture (perpendicular to the direction of electroacupuncture)

同时通过分析手臂内轴线上的电势与电流分布发现,由于组织阻抗受频率增大的影响,组织电容效应越来越明显,耦合电势逐渐减小,但理疗关键因素的电流分布几乎不会受到影响。因此在后期治疗中,可以通过增加频率来降低耦合电势对人体的伤害。

【参考文献】

- [1] 李柱一.《中国重症肌无力诊断和治疗指南(2015年简版)》解读[J]. 中华医学信息导报, 2015, 30(18): 222-223.
Li ZY. Interpretation of Chinese guidelines for diagnosis and treatment of myasthenia gravis (2015 edition)[J]. China Medical News, 2015, 30(18): 222-223.
- [2] 张楠,王海荣. 针刺治疗重症肌无力[J]. 中华针灸电子杂志, 2019, 8(4): 137-138.
Zhang N, Wang HR. Acupuncture for myasthenia gravis[J]. Chinese Journal of Diagnostics (Electronic Edition), 2019, 8(4): 137-138.
- [3] 王曙辉. 温电针治疗重症肌无力102例疗效观察[J]. 中国针灸, 1999(9): 5-6.
Wang SH. Observation on therapeutic effect of 102 cases of myasthenia gravis treated by electroacupuncture with the needle warmed by burning moxa [J]. Chinese Acupuncture and Moxibustion, 1999(9): 5-6.
- [4] 吴云天,王曙辉,崔星,等. 温电针治疗对重症肌无力患者血清IL-6的影响[J]. 当代医学, 2010, 16(21): 24-25.
Wu YT, Wang SH, Cui X, et al. Effect of warm electroacupuncture on serum IL-6 in patients with myasthenia gravis [J]. Contemporary Medicine, 2010, 16(21): 24-25.
- [5] Pun SH, Gao YM, Mak PU, et al. Quasi-static modeling of human limb for intra-body communications with experiments [J]. IEEE Trans Inform Technol Biomed, 2011, 15(6): 870-876.
- [6] Plonsey R, Heppner EB. Considerations of quasi-stationarity in electrophysiological systems[J]. Bull Math Biophys, 1967, 29(4): 657-664.
- [7] Seo H, Kim HI, Jun SC. The effect of a transcranial channel as a skull/brain interface in high-definition transcranial direct current stimulation-a computational study[J]. Sci Rep, 2017, 7: 40612.
- [8] Grossman N, Bono D, Dedic N, et al. Noninvasive deep brain stimulation *via* temporally interfering electric fields[J]. Cell, 2017, 169: 1029-1041.
- [9] Zhang S, Pun SH, Mak PU, et al. Experimental verifications of low frequency path gain channel modeling for implantable medical device (IMD)[J]. IEEE Access, 2019, 7: 11934-11945.
- [10] Zhang S, Liu YH, Qin YP, et al. Experimental verification of human-limb channel modeling for muscular-tissue characteristics[J]. IEEE Access, 2019, 7: 122769-122783.
- [11] Gabriel C, Gabriel S, Corthout E. The dielectric properties of biological tissues: I. literature survey[J]. Phys Med Biol, 1996, 41(11): 2231-2249.
- [12] Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz[J]. Phys Med Biol, 1996, 41(11): 2251-2269.
- [13] Makarov SN, Noetscher GM, Yanamadala J, et al. Virtual human models for electromagnetic studies and their applications[J]. IEEE Rev Biomed Eng, 2017, 10: 95-121.
- [14] Wu T, Tan LW, Shao Q, et al. Chinese adult anatomical models and the application in evaluation of RF exposures[J]. Phys Med Biol, 2011, 56(7): 2075-2089.
- [15] Noetscher GM, Yanamadala J, Makarov SN, et al. Comparison of cephalic and extracephalic montages for transcranial direct current stimulation-a numerical study[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2014, 61(9): 2488-2498.
- [16] Liu S, Wang Z, Su Y, et al. A neuroanatomical basis for electroacupuncture to drive the vagal-adrenal axis[J]. Nature, 2021, 598: 641-645.
- [17] Onuora S. Intensive electroacupuncture reduces OA pain[J]. Nat Rev Rheumatol, 2021, 17: 2.
- [18] Lee DY, Jiu YR, Hsieh CL. Electroacupuncture at Zusanli and at Neiguan characterized point specificity in the brain by metabolomic analysis[J]. Sci Rep, 2020, 10: 10717.
- [19] Chavan S, Tracey K. Regulating innate immunity with dopamine and electroacupuncture[J]. Nat Med, 2014, 20: 239-241.
- [20] Hsiao IH, Liao HY, Lin Y. Optogenetic modulation of electroacupuncture analgesia in a mouse inflammatory pain model [J]. Sci Rep, 2022, 12: 9067.
- [21] Chen ZX, Li Y, Zhang XG, et al. Sham Electroacupuncture methods in randomized controlled trials[J]. Sci Rep, 2017, 7: 40837.
- [22] Kou RZ, Chen H, Yu ML. et al. Acupuncture for behavioral changes of experimental depressive disorder: a systematic review and meta-analysis[J]. Sci Rep, 2017, 7: 9669.
- [23] Schwartz L, Mirochnick M, Bauchner H. et al. Electrical stimulation of acupuncture meridians may blunt salivary cortisol stress response in premature infants[J]. Pediatr Res, 1997, 41: 176.
- [24] Lacey J, Tershakovec A, Foster G. Acupuncture for the treatment of obesity: a review of the evidence[J]. Int J Obes, 2003, 27: 419-427.
- [25] Guo XR, Gui F, Guo MQ, et al. The preventive effect of computed tomography image-guided electroacupuncture combined with continuous femoral nerve block on deep vein thrombosis after total knee arthroplasty based on an adaptive algorithm [J]. World Neurosurg, 2021, 149: 362-371.

(编辑:陈丽霞)