

文章编号: 2095-4980(2022)03-0286-06

多功能 8 字线圈的优化设计与实验

杨龙成, 孙连海, 胡俊, 孙睿

(成都师范学院 计算机科学学院, 四川 成都 611130)

摘要: 为了改善线圈磁聚焦性能, 扩大线圈功能应用, 改进 8 字线圈, 通过混合优化算法优化线圈主要可变参数, 得出不同尺寸的 8 字线圈。建立线圈仿真模型, 优化仿真分析 8 字线圈的聚焦性与功能效果。制作与仿真模型一致的实验模型, 使用长为 1 m、宽为 1 m、厚度为 5 mm 的均匀钢板与一根实心导管来测试验证仿真结果。通过对比函数证明了理论仿真的有效性。改进后不同尺寸的 8 字形线圈模型可以实现多功能运用, 在一定的聚焦性下, 该线圈可以灵活运用到亥姆赫兹线圈、经颅磁刺激线圈阵列的模型以及功能磁刺激线圈阵列中。

关键词: 8 字线圈; 混合优化算法; 亥姆赫兹线圈; 经颅磁刺激; 功能磁刺激

中图分类号: R318.6; TP312; TM155 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2020064

Optimization design and experiment of multifunctional 8-shaped coil

YANG Longcheng, SUN Lianhai, HU Jun, SUN Rui

(College of Computer Science, Chengdu Normal University, Chengdu Sichuan 611130, China)

Abstract: In order to improve the magnetic focusing performance of coil and expand the application of coil function, the 8-shaped coil is improved. And the main variable parameters of the coil are optimized through a hybrid optimization algorithm. And 8-shaped coils with different sizes are obtained. The coil simulation model is established, and the focusing and functional effects of the optimized 8-shaped coil are analyzed through optimization simulation. An experimental model consistent to the simulation model is built, and the simulation results are verified by using a uniform steel plate with 1 m of length, 1 m of width, and 5 mm of thickness and a solid conduit. The effectiveness of theoretical simulation is proved through comparison function. The improved 8-shaped coil model with different sizes can realize multi-function application. Under certain focusing, the coil can be flexibly applied to Helmholtz coil, Transcranial Magnetic Stimulation(TMS) coil array model and Functional Magnetic Stimulation(FMS) coil array.

Keywords: 8-shaped coils; hybrid optimization algorithm; Helmholtz coils; Transcranial Magnetic Stimulation(TMS); Functional Magnetic Stimulation(FMS)

磁聚焦技术的发展, 对激励或是发射线圈阵列的要求迫在眉睫^[1-3]。传统的 8 字形线圈广泛应用于经颅磁刺激(TMS)^[4-5]与功能磁刺激(FMS)^[6]研究。近些年, 黄卡玛、刘冀成等在该领域做了进一步的研究, 但是在 TMS 和 FMS 技术中, 线圈的检测深度、强度和聚焦度^[7-10]一直都是研究的重点和难点。许多学者对线圈进行了多方面的研究, 无论是单线圈还是多线圈模型种类很多^[10-12], 性能各有差异, 但 8 字形线圈仍然是目前科研领域最常用的模型。依据使用的功能不同, 各领域研究设计出了多种 8 字形线圈, 但是模型的功能单一化, 未能使一种线圈多场合或是多领域发挥作用。因此, 本文提出改进型 8 字形线圈, 优化得到同一线圈的不同尺寸, 分析其聚焦性能, 从而能适用于多种运用模式中。

本文首先从传统的 8 字型线圈出发, 分析线圈的主要可变参数, 设计一种改进型 8 字形线圈模型, 运用改进算法^[13-14]设计的混合优化算法^[15-17]对模型进行优化, 优化出不同尺寸的多功能的 8 字型线圈模型, 从而研究不同尺寸模型的仿真效果, 分析其聚焦性能。本文还建立实验测试平台, 实验平台与理论仿真条件几乎一致, 通过实验, 检验仿真模型的实际磁场分布效果, 进一步验证理论仿真研究所预测的结果。

收稿日期: 2020-02-24; 修回日期: 2020-06-18

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51978089); 四川省成都大学模式识别与智能信息处理重点实验室开放基金项目(2021-15); 成都师范学院校级项目(2019ZZBS201; 2020JG31; CS21ZC01)

1 方法

1.1 线圈设计

根据毕奥-萨伐尔定律，由磁场叠加定理得知，对于闭合的圆形线圈，线圈在空间任一点 $P(x,y,z)$ 处感应磁场 \mathbf{B} 的矢量表达见式(1)~式(3)。

$$\mathbf{B}_x = \frac{a\mu_0 I(t)}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{z \cos \theta}{|\mathbf{r}|^3} d\theta \quad (1)$$

$$\mathbf{B}_y = \frac{a\mu_0 I(t)}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{z \sin \theta}{|\mathbf{r}|^3} d\theta \quad (2)$$

$$\mathbf{B}_z = \frac{a\mu_0 I(t)}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{[a - x \cos \theta - y \sin \theta]}{|\mathbf{r}|^3} d\theta \quad (3)$$

式中： a 为圆形线圈的半径；矢径 \mathbf{r} 从线圈电流元指向 P 点； θ 为由线圈中心 $(0,0,0)$ 指向点 P_0 的矢径与 X 轴的正向夹角，且 $\theta \in [0, 2\pi)$ 。由式(1)~式(3)可知，线圈在空间某一点 $P(x,y,z)$ 产生的感应磁场强度 \mathbf{B} 与线圈的半径 a 、通入线圈的电流大小 $I(t)$ 以及 P 点的位置有关。磁感应强度影响刺激或探测深度，为了获得所需的磁感应强度，需要合理地设计线圈的尺寸和线圈相对于目标点的位置。

相对于Barker等早期使用的圆形线圈，8字形线圈的磁场分布说明了磁场聚焦性有明显的提高。但在2个线圈各自边缘处存在较大的磁场，聚焦不够良好，磁场能量分散，对预想目标区域进行定点刺激或探测时，效果不够理想，仍会引起大面积非目标区域的干扰，所以设计良好尺寸的线圈有助于改善线圈的磁场性能。传统8字型线圈在2个圆相接处形成磁场，聚焦度不够良好，不利于定点刺激，即使增加电流来达到刺激或探测的强度与深度，但是感应磁场衰减得快，不利于磁场聚焦。为了改善强度、深度与聚焦度，本文采用平面线圈模型，设计的8字线圈在平面上相互交错，见图1。

对于TMS或FMS线圈阵列，2个线圈的半径为2 cm，相互交错，线圈位于 $XOY(Z=0)$ 平面内，重叠区域等于或小于一个线圈半径长度。对于亥姆赫兹线圈，2个线圈的半径为30 cm，相互交错，线圈位于 $XOY(Z=0)$ 平面内，重叠区域等于或小于一个线圈半径长度。

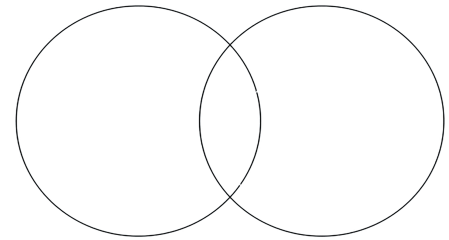


Fig.1 Improved 8-shaped coils model
图1 改进8字形线圈模型

1.2 优化方法

结合遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[13]和粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[15,18]各自的特性实现混合优化算法PSO-GA^[17]。由式(1)~式(3)可知，采用改进的优化算法对线圈模型的线圈参数进行优化。

1) 参数选择：a) 个体编码，将逆时针方向的电流设为正值，顺时针方向的电流设为负值，本文设定电流范围为 $i \in (-2.56, 2.56)$ A，重叠区域为 $d \in (0, r)$ cm，半径 $r=2$ cm或者 $r=30$ cm；b) 种群规模，根据适应函数值选取的一组解；c) 采用自适应交叉和变异策略^[15]；d) 最佳个体保留：将父代种群中适应度值最高的5% N 个体直接复制到子代种群中；e) 引入惯性因子^[16]与收缩因子^[17]。

2) 适应度函数：优化算法以适应度函数评估个体质量的好坏，如何将计算区域的磁场值转为适应度函数，是线圈模型优化的重点。本文设计的适应度函数：

$$fitness_{mag} = 100 \times \exp\left(-50 \times \frac{S_{87.5}}{S} \times \frac{\mathbf{B}'_{avg}}{\mathbf{B}_{cen}}\right) \times \frac{\mathbf{B}'_{avg}}{\mathbf{B}_{avg}} \times \frac{\mathbf{B}_{cen}}{\mathbf{B}_{max}} \quad (4)$$

式中： \mathbf{B}_{cen} 为计算区域中心处的磁场； \mathbf{B}_{max} 为计算区域的最大磁场值； $S_{87.5}$ 为大于0.875倍 \mathbf{B}_{cen} 所占的面积； S 为整个计算区域的面积。以中心点为中心向外扩展选取小区域 S_1 ，希望磁场聚焦在 S_1 内，设 $S_2=S-S_1$ ， S_2 中的平均磁场值为 \mathbf{B}_{avg} 。当 S_2 中存在大于0.875倍 \mathbf{B}_{cen} 的磁场值时，将该磁场值设为0，进行以上处理后 S_2 中的平均磁场值为 \mathbf{B}_{avg} 。 $S_{87.5}/S$ 越小，表明磁聚焦性越好； $\mathbf{B}'_{avg}/\mathbf{B}_{cen}$ 、 $\mathbf{B}'_{avg}/\mathbf{B}_{avg}$ 和 $\mathbf{B}_{cen}/\mathbf{B}_{max}$ 越大，表明磁场能量主要集中在中心区域。

1.3 仿真条件设置

通过混合优化算法对线圈的各参数进行优化,并根据优化后参数重新设计线圈阵列,进行电磁效果仿真。由于磁聚焦技术也广泛用于瞬变电磁(Transient Electromagnetic Methods, TEM)领域^[12-13],为了说明线圈磁聚焦的多功能,下面对亥姆赫兹线圈、TMS或FMS线圈、TEM线圈阵列相应的参数进行优化仿真设置。

本文采用有限元积分软件进行建模与仿真,线圈交叉的中心对称点设定为坐标原点,长轴方向为X轴,短轴方向为Y轴,垂直于线圈平面的方向为Z轴。按照图1线圈尺寸参数分别进行建模。线圈匝数为10匝,采用常用铜材料制作的铜线进行绕制,仿真参数如下:亥姆赫兹线圈与TEM线圈的空间磁场计算区域为200 cm×200 cm×200 cm,计算步长为1 cm, TMS与FMS线圈阵列的空间磁场计算区域为10 cm×10 cm×10 cm,计算步长为0.1 cm。为了减小计算出的磁场强度值误差,本文在做二维等高线磁场分布图与三维磁场值分布图时,均采用数值归一化处理。据参数选择进行优化的结果见表1,并得出磁场分布图。

表1 优化后的各线圈参数

Table1 Optimized coil parameters

parameter	r/cm	i/A	d/cm
Helmholtz coils	30	2.0	18~21
TMS/FMS coil array	2	2.3	1.3~1.5
TEM coil array	30	1.7	10~13

1.4 实验

通过建立和仿真一致的环境,并保持线圈尺寸、电特性以及计算区域与仿真条件的一致。考虑测试的有效性,本文使用长为1 m、宽为1 m、厚度为5 mm的均匀钢板来测试亥姆赫兹与TEM线圈的磁场分布结果,将神经细胞模拟成一个实心导管来测试经颅磁刺激线圈的磁场分布结果。设计检测电路与控制系统,采集以步长为采样点的电压值,每个采样点采集5次,去掉最大值与最小值,然后求取每个采样点的平均值,最后换算成对应点的磁场强度值。实验检测模型见图2。

为了对比实验结果与仿真结果,分析优化后的线圈在X轴方向上的磁场强度分布情况,根据实际测量与适应度函数的要求,分别选取了4个参数来进行比较: B_{\max} 为计算区域的最大磁场值, $S_{0.875}$ 为大于0.875倍 B_{\max} 所占的面积, S 为整个计算区域的面积, B_{avg} 为聚焦小区域的平均磁场值,对比采用的函数见式(5)。式(5)中, λ 是一个校正系数,本身没有物理意义, y_1 函数是对亥姆赫兹线圈产生磁场的比较函数,值越大越好。 y_2 函数是对其他2种线圈产生磁场的比较函数,值越小越好,下标 z 表示取值的参考高度,式中的磁场值都做了归一化处理,减小误差。

$$y = \begin{cases} y_1 = \lambda \left[\frac{S_{0.875}}{S} \times \frac{B_{\text{avg}}}{B_{\max}} \right]_z \\ y_2 = \lambda \left[\frac{S_{0.875}}{S} \times \frac{1 - B_{\text{avg}}}{B_{\max}} \right]_z \end{cases} \quad (5)$$

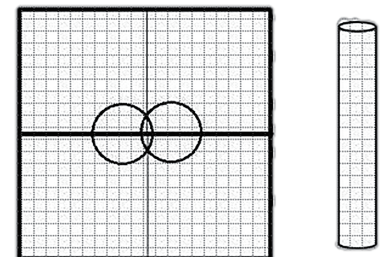


Fig.2 Test model

图2 实验检测模型

2 结果

2.1 仿真结果

1) 亥姆赫兹线圈仿真实验分析,见图3。利用混合优化算法优化设计线圈,以此产生高能量匀强磁场。两线圈的半径都为30 cm,平面重合区域的中心点距离两圆圆心都在[18,21]范围内。由2D图与曲线图可知,线圈的磁感应强度幅值在中心区域非常均匀,均匀度>87.5%的区域大约在轴向与径向都为-30~30 cm,说明优化的线圈阵列性能较好,具有非常好的磁场分布均匀性,更有利于开展医学实验。

2) TMS或FMS线圈阵列仿真实验分析,见图4。利用混合优化算法优化设计线圈,以此产生良好的刺激效果。线圈阵列模型的磁聚焦优化有良好的效果,在不同的刺激深度平面上,聚焦的平面很清晰,梯度分布很明显,也很陡,并且磁场的87.5%及以上的能量集中在半径约为2.0 cm的较小范围内,归一化极大值1.0与极小值 1.375×10^{-8} 之比达到7个数量级,更加有利于定点刺激,较好地实现了磁聚焦,改善了刺激的深度、强度与聚焦度。

3) TEM线圈阵列仿真实验分析,见图5。利用混合优化算法优化设计线圈,实现良好的探测效果。优化后得到的线圈阵列的磁场归一化极大值1.0与极小值 3.268×10^{-9} 之比达到了8个数量级。不同的深度或高度,磁场分布梯度较好,阵列模型中87.5%及以上的磁场能量集中在半径约为20.0 cm区域内。阵列模型的几何中心处磁场强度最大,能量集中区域很小,聚焦性能明显提高,同时又较好地抑制了非目标区域的磁场强度,较容易对小目标物质进行检测,提高了检测的精确度与准确度,从而很好地实现了磁聚焦,有效地提升了探测的效果。

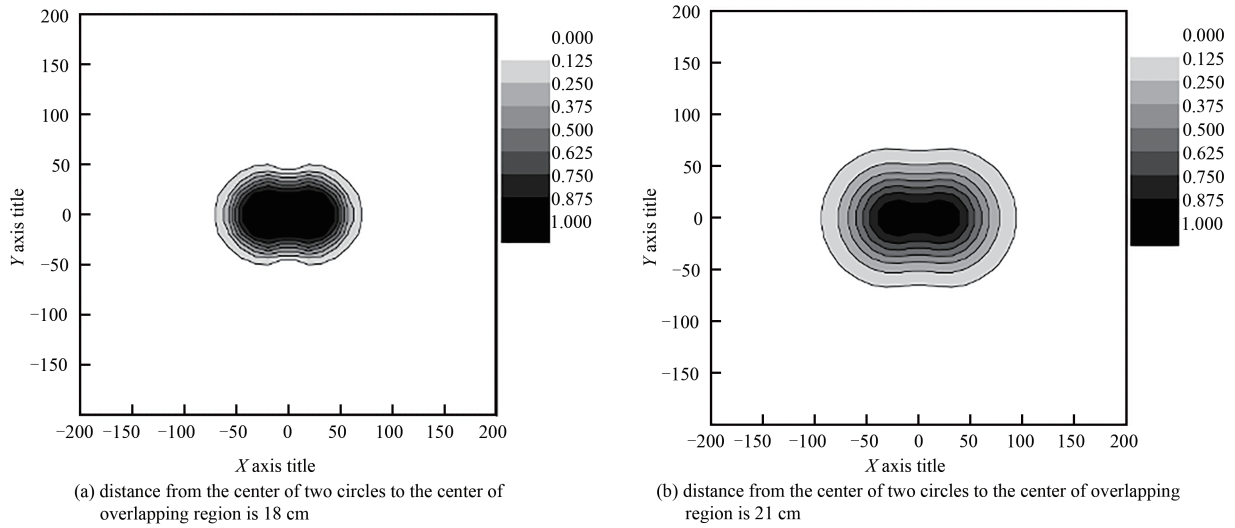


Fig.3 Helmholtz coil simulation
图3 亥姆赫兹线圈仿真实验图

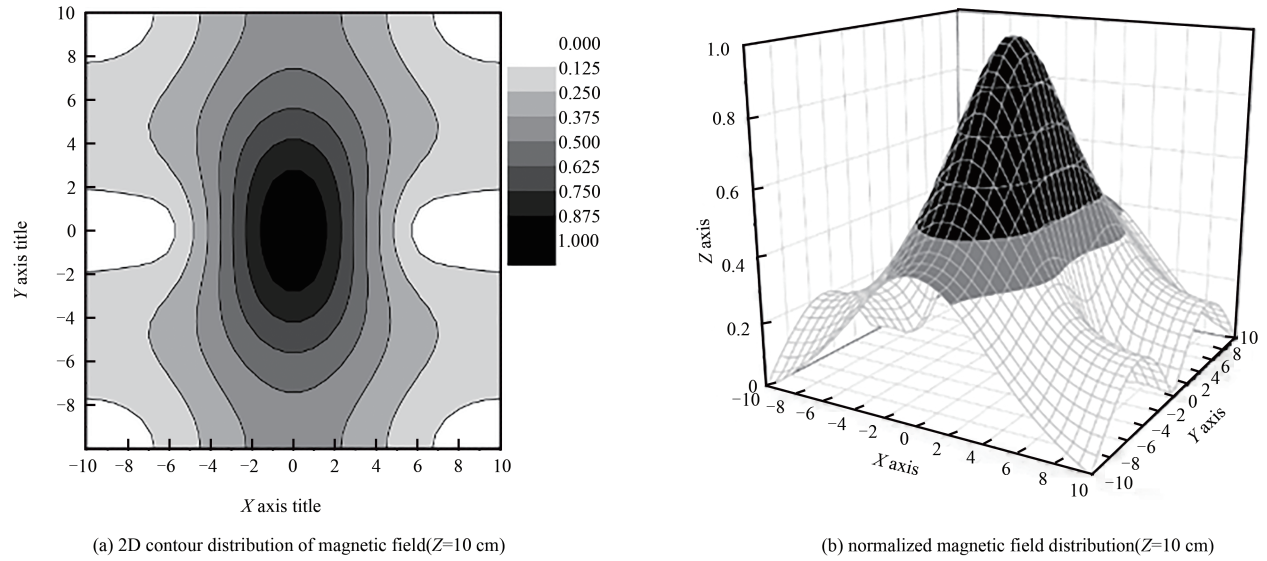


Fig.4 TMS or FMS coil array simulation
图4 TMS或FMS线圈阵列仿真实验图

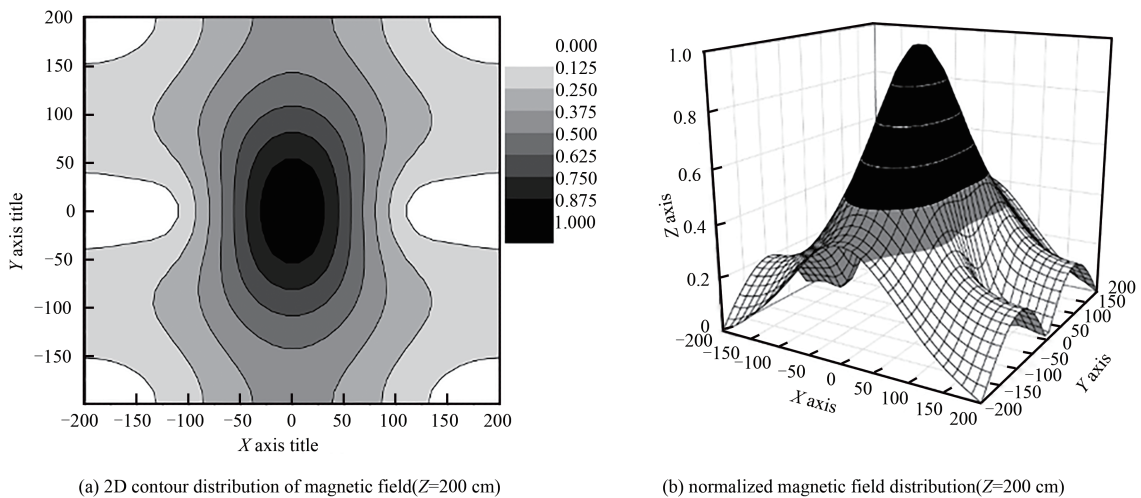


Fig.5 TEM coil array simulation
图5 TEM线圈阵列仿真实验图

2.2 实验结果

在实验条件与仿真基本一致的情况下, 根据对比函数进行实验数据采集, 仿真与实验数据结果见表 2。通过数据对比发现, 聚焦区域面积大小有 5% 以内误差, 聚焦区域内的平均磁场值有 5% 以内的误差, 对于 y 值的大小, 亥姆赫兹线圈产生的比值比其他两种大, 区域内的恒定磁场容易建立, 面积可以控制, 而对于 TEM 与 TMS 线圈来说, 聚焦性能良好, 实验数据接近仿真数据, 也表明了仿真与实验结果具有一定的可比性, 即实验检测验证了仿真研究的有效性。

表 2 实验结果与仿真结果的数据对比
Table 2 Comparison of experimental results and simulation results

coil type	S/cm^2	$S_{87.5}/\text{cm}^2$	B_{avg}	y	remarks
Helmholtz coils	40 000	600	0.82	0.012 3 λ	simulation data($Z=200$ cm)
	40 000	582	0.79	0.011 5 λ	experimental data($Z=200$ cm)
TMS/FMS coil array	40 000	400	0.91	0.000 9 λ	simulation data($Z=200$ cm)
	40 000	419	0.89	0.001 2 λ	experimental data($Z=200$ cm)
TEM coil array	100	4.00	0.930	0.002 8 λ	simulation data($Z=10$ cm)
	100	4.13	0.904	0.001 0 λ	experimental data($Z=10$ cm)

3 讨论

建立改进型 8 字型线圈模型, 通过混合优化算法优化线圈参数, 依据不同使用优化得出几种模型的不同参数, 仿真不同半径线圈类型产生的磁场能量分布, 用于模拟分析改进 8 字型线圈的功能特性。仿真分析得出如下结果: 对半径为 30 cm 的亥姆赫兹线圈进行磁场仿真, 发现平面重合区域的中心点距离两圆圆心都在 [18,21] 范围内, 线圈磁感应强度幅值在中心区域非常均匀, 且能量分布集中。说明优化的线圈阵列性能较好, 具有较好的磁场分布均匀性, 优化模型可代替亥姆赫兹线圈开展相应的实验。对半径为 2 cm 的 TMS、FMS 线圈进行磁场仿真, 在不同的刺激深度平面上, 聚焦的平面很清晰, 梯度分布很明显也很陡, 并且磁场的 87.5% 及以上的能量集中在半径约为 2.0 cm 的较小范围内, 更加有利于定点刺激, 较好地实现了磁聚焦。说明优化的模型可较好地改善 TMS、FMS 技术刺激的深度、强度与聚焦度。对半径为 30 cm 的 TEM 线圈进行磁场仿真, 不同的深度或高度, 磁场能量分布梯度较好, 能量集中区域很小, 聚焦性能明显提高, 同时又较好地抑制了非目标区域的磁场强度, 较容易对小目标物质进行检测, 提高了检测的精确度与准确度, 从而很好地实现了磁聚焦。说明优化模型可有效地提升 TEM 技术的探测效果。本文线圈的优化设计有一定的聚焦性能, 但是未与其他聚焦性较好的线圈设计做出比较, 下一步进行线圈聚焦性能的比较研究。

为了进一步证明理论仿真的有效性, 开展了实验检测对比, 通过建立和仿真几乎一致的条件, 构建对比函数, 从聚焦面积、聚焦区域的平均磁场值来对比较评价, 实验方法证明了理论仿真的有效性, 所以改变一种线圈的摆放位置、重叠区域的大小、电流的大小与方向, 都可以扩大同一种线圈的应用范围。

4 结论

本文研究了同一种线圈在不同方面的功能应用, 首先设计改进型 8 字形线圈, 依据功能的不同, 通过优化算法优化出不同参数值的线圈模型, 然后进行理论仿真分析其磁场分布情况, 说明同一种优化线圈功能的多样性, 最后建立和仿真条件一致的实验环境, 通过对比函数的数据对比证明了理论仿真的有效性, 最终表明同一种线圈通过设置不同的参数, 可以实现功能的应用延伸。

参考文献:

- [1] 熊慧, 王玉领, 付浩, 等. 一种应用于经颅磁刺激脉冲宽度可调的节能型激励源[J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 679–686. (XIONG Hui, WANG Yuling, FU Hao, et al. An energy efficient excitation source for transcranial magnetic stimulation with controllable pulse width[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 679–686.) doi:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190373.
- [2] 李江涛, 郑敏军, 曹辉. 经颅磁刺激技术的研究进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1168–1178. (LI Jiangtao, ZHENG Minjun, CAO Hui. Research progress in transcranial magnetic stimulation technology[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1168–1178.) doi:10.13336/j.1003-6520.hve.201604005037.
- [3] 杨龙成, 胡俊, 孙连海, 等. 激励信号类型及周期对线圈聚焦和检测深度的影响[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(3): 475–480. (YANG Longcheng, HU Jun, SUN Lianhai, et al. Influence of excitation signal type and the cycle on the coil focusing

- and the detection depth[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(3):475-480.)
- [4] ROTH Y, LEVKOVITZ Y, PELL G S, et al. Safety and characterization of a novel multi-channel TMS stimulator[J]. Brain Stimulation, 2014,7(2):194-205.
- [5] 杨龙成,孙连海,胡俊,等. 经颅磁刺激硬件电路改进研究[J]. 成都师范学院学报, 2018,34(7):87-93. (YANG Longcheng, SUN Lianhai, HU Jun, et al. On improvement of hardware circuit of transcranial magnetic stimulation[J]. Journal of Chengdu Normal University, 2018,34(7):87-93.) doi:10.3969/j.issn.2095-5642.2018.07.087.
- [6] 王毅,沈强,蒋大宗. 功能磁刺激中线圈的改进[J]. 航天医学与医学工程, 2001,14(4):261-263. (WANG Yi, SHEN Qiang, JIANG Dazong. Improvement of coils used in functional magnetic stimulation[J]. Space Medicine&Medical Engineering, 2001, 14(4):261-263.) doi:10.16289/j.cnki.1002-0837.2001.04.007.
- [7] 周亚男,张红卫,郝冬梅,等. 经颅磁刺激中刺激线圈的仿真研究[J]. 北京生物医学工程, 2016,35(4):360-366. (ZHOU Yanan, ZHANG Hongwei, HAO Dongmei, et al. Simulation study of stimulating coil in transcranial magnetic stimulation[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2016,35(4):360-366.)
- [8] 李江涛,曹辉,郑敏军,等. 多通道经颅磁刺激线圈阵列的驱动与控制[J]. 电工技术学报, 2017,32(22):158-165. (LI Jiangtao, CAO Hui, ZHENG Minjun, et al. The drive and control of multi-channel transcranial magnetic stimulation coil array[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017,32(22):158-165.) doi:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.170142.
- [9] 郝丹丹,赵雯,吴国立,等. 基于 Ansoft Maxwell 经颅磁刺激线圈参数化设计[J]. 燕山大学学报, 2018,42(4):326-330. (HAO Dandan, ZHAO Wen, WU Guoli, et al. Parameterized design of transcranial magnetic stimulation coil based on Ansoft Maxwell[J]. Journal of Yanshan University, 2018,42(4):326-330.) doi:10.3969/j.issn.1007-791X.2018.04.007.
- [10] 熊慧,高毅娟,刘近贞. 基于经颅磁刺激的线圈阵列设计方法研究[J]. 航天医学与医学工程, 2018,31(5):545-550. (XIONG Hui, GAO Yijuan, LIU Jinzhen. Study on coil array design method based on transcranial magnetic stimulation[J]. Space Medicine&Medical Engineering, 2018,31(5):545-550.) doi:10.16289/j.cnki.1002-0837.2018.05.010.
- [11] 李江涛,郑敏军,曹辉,等. 高聚焦度经颅磁刺激线圈的研究[J]. 中国科技论文, 2017,12(11):1235-1239. (LI Jiangtao, ZHENG Minjun, CAO Hui, et al. Study on transcranial magnetic stimulation coil with high focality[J]. China Sciencepaper, 2017,12(11): 1235-1239.)
- [12] GUADAGNIN V, PARAZZINI M, FIOCCHI S, et al. Deep transcranial magnetic stimulation: modeling of different coil configurations[J]. IEEE Transactions on Bio-medical Engineering, 2015,63(7):1543-1550.
- [13] 杨龙成,孙连海,张娇,等. 基于改进遗传算法的磁聚焦线圈阵列优化设计[J]. 成都师范学院学报, 2018,34(1):97-105. (YANG Longcheng, SUN Lianhai, ZHANG Jiao, et al. Optimization design of coil array for magnetic focusing based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Chengdu Normal University, 2018,34(1):97-105.) doi:10.3969/j.issn.2095-5642.2018.01.097.
- [14] DENG Z D, LISANBY S H, PETERCHEV A V. Coil design considerations for deep transcranial magnetic stimulation[J]. Clinical Neurophysiology, 2014,125(6):1202-1212.
- [15] 杨龙成,陆继庆,张帅. 基于混合遗传算法的经颅磁刺激线圈阵列优化设计[J]. 航天医学与医学工程, 2014,27(1):32-36. (YANG Longcheng, LU Jiqing, ZHANG Shuai. Transcranial magnetic stimulation coil array optimization based on hybrid genetic algorithm[J]. Space Medicine&Medical Engineering, 2014,27(1):32-36.) doi:10.16289/j.cnki.1002-0837.2014.01.013.
- [16] 杨龙成,陆继庆,张帅,等. 基于混合优化算法的磁聚焦线圈阵列设计与优化[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2014, 37(6):942-946. (YANG Longcheng, LU Jiqing, ZHANG Shuai, et al. Coil array design and optimization in magnetic focusing based on hybrid optimization algorithm[J]. Journal of Sichuan Normal University(Natural Science), 2014,37(6):942-946.)
- [17] 杨龙成. 基于混合优化算法的TEM线圈阵列设计与仿真[D]. 成都:成都信息工程大学, 2015. (YANG Longcheng. Design and simulation of TEM coil array based on hybrid optimization algorithm[D]. Chengdu, Sichuan, China: Chengdu University of Information Technology, 2015.)
- [18] 熊慧,胡小伟,刘近贞. 基于混合粒子群和模拟退火算法的聚焦性优化[J]. 航天医学与医学工程, 2016,29(1):34-38. (XIONG Hui, HU Xiaowei, LIU Jinzhen. Focality performance optimization based on hybrid particle swarm and simulated annealing algorithm[J]. Space Medicine&Medical Engineering, 2016,29(1):34-38.) doi:10.16289/j.cnki.1002-0837.2016.01.006.

作者简介:

杨龙成(1988-),男,成都市人,硕士,讲师,主要研究方向为计算电磁学、计算机应用等。email: 151083@cdnu.edu.cn.

胡俊(1982-),男,成都市人,博士,教授,主要研究方向为计算机科学与技术等。

孙连海(1974-),男,成都市人,硕士,高级实验师,主要研究方向为计算机应用等。

孙睿(1982-),男,成都市人,博士,副教授,主要研究方向为计算机应用等。