

doi:10.3969/j.issn.1672-5565.2013.04.12

基于混合优化算法的经颅磁刺激线圈阵列设计

杨龙成, 陆继庆*, 刘冀成

(成都信息工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:为了研究对经颅磁刺激激励线圈聚焦性能的优化,利用混合优化算法与 CST 软件的外部通信接口,建立优化的激励线圈模型。依据多信道线圈阵列方法,利用磁场叠加原理,对影响磁场分布的线圈可调参数进行分析,结合混合优化算法对可调参数进行优化。结果对比显示,经优化的线圈阵列有良好的磁聚焦性,其刺激强度与聚焦程度都有了不同程度提高,可用于改善 TMS 系统聚焦性能,实验有助于进一步探索全面优化激励线圈的空间结构。

关键词:经颅磁刺激;混合优化算法;CST;线圈阵列

中图分类号:R978.1+6 文献标识码:A 文章编号:1672-5565(2013)-04-309-08

Design of coil array for TMS based on hybrid optimization algorithm

YANG Long-cheng, LU Ji-qing*, LIU Ji-cheng

(Chengdu University of Information Technology, Sichuan Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to study the transcranial magnetic stimulation optimization incentive focusing performance of coil, we used of external communication interface hybrid optimization algorithm with CST software, established an incentive coil model optimization. According to the multi channel coil array method, and the superposition principle of magnetic field, magnetic field distribution of the adjustable parameters were analyzed, combined with the adjustable parameter optimization based on hybrid optimization algorithm. The results showed that the optimized coil array had good magnetic focusing, its stimulus intensity and degree of focus was obviously improved to different extent, it can be used to improve the focusing performance of the TMS system. Our experiment can further help to explore the comprehensive optimization of spatial structure in excitation coil.

Keywords: Transcranial Magnetic Stimulation(TMS); Hybrid Optimization Algorithm; CST; Coil Array

有研究表明,经颅磁刺激(Transcranial magnetic stimulation, TMS)对人体安全,无痛,无损伤,重复性好,且疗效明显^[1-5]。但由于磁刺激仪的磁刺激线圈对磁场的汇聚能力差、刺激重复性差、定位不准,且磁刺激技术本身的缺陷影响了经颅磁刺激的进一步发展。研究者们经过研究,设计出各种不同线圈阵列^[6-7],而线圈的各特性参数决定刺激的准确性和刺激深度^[8],因此经颅磁刺激过程中头部内电磁场分布的准确模拟受线圈参数的影响,所以要提高电磁场模拟的精度和实现磁场更好的聚焦性,就需要将线圈参数进行全面优化,逐步改善经颅磁刺激

系统磁聚焦性能。本文设计新型的简单经颅磁刺激线圈,对影响磁场分布的线圈可调参数进行分析,用高级语言编写的优化算法及其与 CST 软件的外部通信接口,完成对经颅磁刺激的优化求解,达到改善磁刺激磁场的聚焦效果。

1 线圈模型设计

1.1 两个方框形线圈模型

模型由两个边长相等的正方形子线圈组成,分别水平放置在上下两个不同平面,如图 1。

收稿日期:2013-05-06;修回日期:2013-09-21.

资助项目:国家自然科学基金(60971043);四川省教育厅重点项目(08ZA098)。

作者简介:杨龙成,男,硕士生,研究方向:电磁场数值计算,信号处理与医学生物;E-mail:ylc8824@sina.cn.

* 通讯作者:陆继庆,男,副教授,研究方向:电磁场数值计算、智能化仪表与自动化装置、人工智能以及计算机测控技术等;E-mail:lujiqing@cuit.edu.cn.

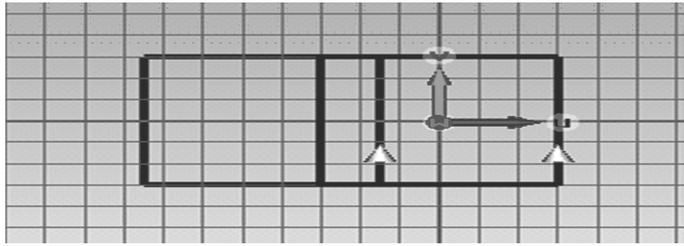


图 1 两方形线圈 CST 结构图

Fig.1 Two square coils of CST structure graph

两子线圈电流有 4 种方案,分两种情况讨论线圈边长和线圈重叠间距对磁场分布影响。

(1) 线圈注入方向相同的 1A 电流

图 2 是几组线圈参数下磁感应强度分布图。图 a 与 b、c 与 d、e 与 f 两两各为一组,线圈边长依次为 100 cm、160 cm、160 cm,线圈重叠间距依次为 0.9×

100 cm、0.9×160 cm、0.75×160 cm,两线圈所在平面垂直距离均为 3 cm。

由图 2 分析线圈边长和线圈重叠间距对磁场分布的影响为:子线圈边长越大越好,子线圈重叠间距对磁场的分布影响不大。

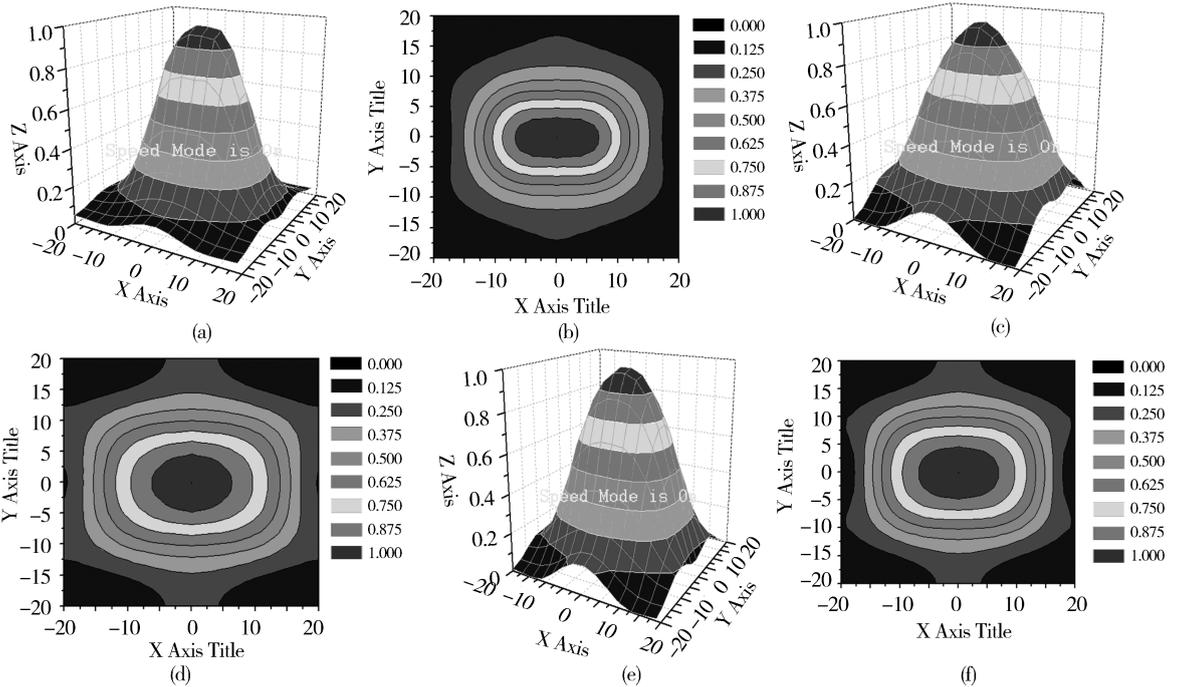


图 2 平面线圈模型生成的 B 场分布

Fig.2 Magnetic field distribution established by plane coil model

注:图 a,c,e 是归一化磁感应强度幅值分布图;b,d,f 是二维等高线分布图。

Notes:Figure a,c,e is a normalized amplitude distribution of magnetic field strength;Figure b,d,f is a two-dimensional contour map.

(2) 线圈注入方向相反的 1A 电流

图 3 是不同线圈参数组合的磁感应强度分布图。图 a 与 b、c 与 d 中线圈的边长为 80 cm,前组线圈重叠间距 0.9×80 cm、后组 0.4×80 cm,两线圈平面垂直距离均为 3 cm。

由图 3 分析线圈边长和线圈重叠间距对磁场分布的影响为:线圈边长越小,磁场分布越好,线圈重叠间距对磁场分布影响也不大;随着线圈 Z 方向距

离的增加,磁场出现中心凹陷情况。

上述研究表明,子线圈注入反向电流时,磁场分布较好。

1.2 三个方形线圈模型

通过以上模型的讨论和研究,在图 1 所示的两方形线圈模型基础上加入第 3 个线圈,线圈的形状可为长方形,或其他模型。如图 4,3 个子线圈所在平面两两间的间距相同。

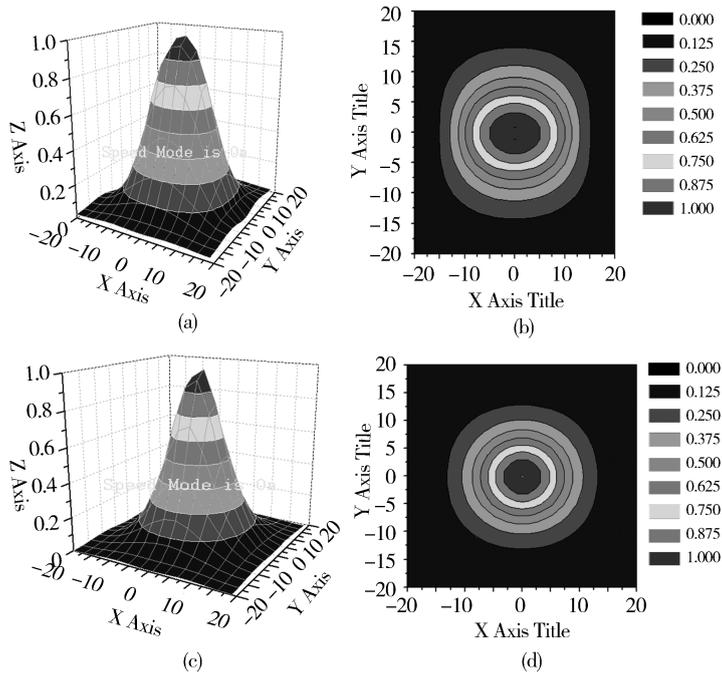


图 3 平面线圈模型生成的 B 场分布

Fig.3 Magnetic field distribution established by plane coil model

注:图 a,c 是磁感应强度归一化幅值分布图;图 b,d 是二维等高线图

Notes:Figure a,c is a normalized amplitude distribution of magnetic field strength;Figure b,d is a two-dimensional contour map.

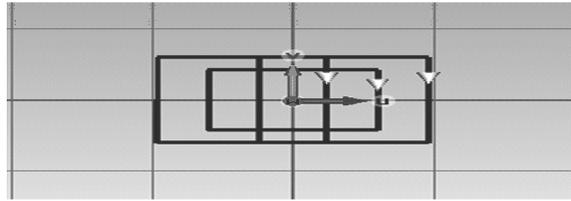


图 4 三方框形线圈 CST 模型

Fig.4 Three square coils of CST model

图 4 线圈模型中共有 12 种电流方案,根据第三个子线圈是否注入电流,分两种情况研究磁场。其中有 6 种模型的聚焦性能对比线圈好。图 5 列出

了这 6 种电流方案,图 a、b、c、d 为新加入线圈注入电流的情况,e 和 f 为无电流情况。

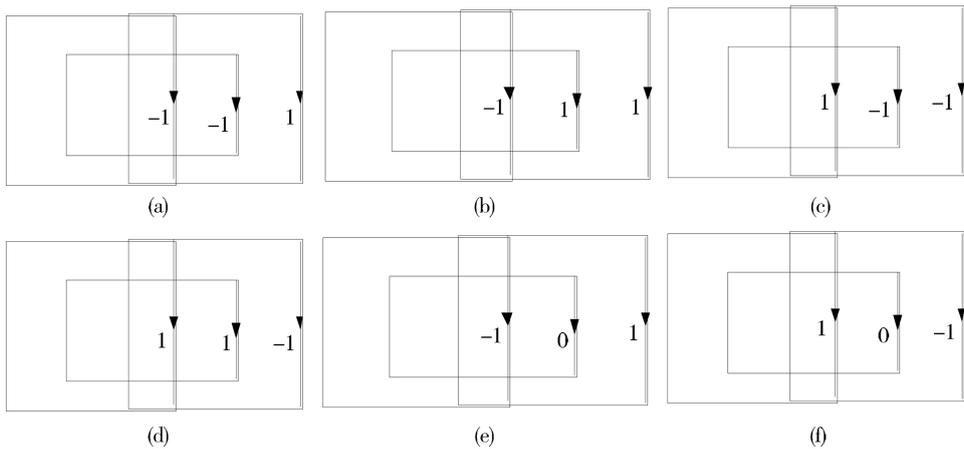


图 5 线圈电流组态

Fig.5 The coil current configuration

图6给出两组线圈参数模型的磁场强度分布图。每两个线圈所在平面的垂直距离为3 cm。图a、b中线圈边长80 cm,左边线圈+1 A电流,右边线圈-1 A电流,重叠距离为 0.4×80 cm,第三个线圈

边长为32 cm的正方形,电流+5 A;图c、d中边长60 cm,左边线圈-1 A,右边线圈1 A,重叠距离 0.1×60 cm,第三个线圈的长60 cm,宽为42 cm,电流为+1 A。

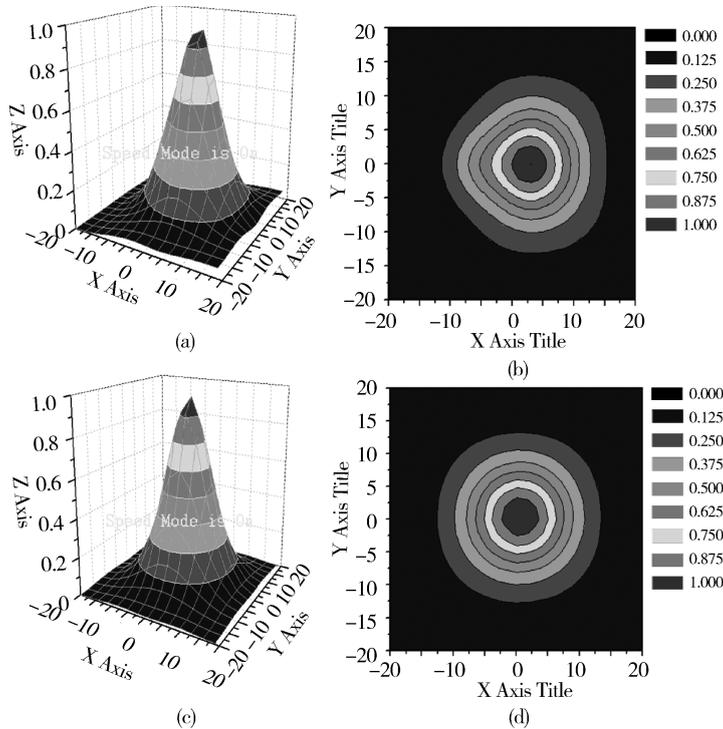


图6 平面线圈模型生成的B场分布

Fig.6 Magnetic field distribution established by plane coil model

注:图a、c是归一化磁场强度幅值分布图;图b、d是二维等高线分布图。

Notes: Figure a, c is a normalized amplitude distribution of magnetic field strength Figure b, d is a two-dimensional contour map.

从图中可知这两组参数的磁场分布聚焦都较好,磁场的聚焦性能与上方加入的第三个线圈的电流密切相关,电流越大聚焦越好。相比于其他4种模型此模型的磁场分布整体要好。

2 混合优化算法与CST的联合使用

2.1 混合优化算法

从遗传算法^[9-13]和粒子群算法^[14-17]的大量研究中可知两种算法搜索机制的异同之处和各自的优缺点,都属于全局搜索算法。结合粒子群算法中粒子是基本单位且无需编码,遗传算法交叉和变异操作对最优解有破坏影响,但粒子群算法可对最优解保存,粒子群算法主要处理连续问题的这些特性实现本文的混合优化算法(PSO-GA)。此混合算法是在粒子群算法的每一次迭代后期加入遗传算法的交叉与变异^[18]操作。

混合算法中的变异是高斯变异。高斯表达式如公式(1)所示,式子中 $gbest_{fitness}$ 表示粒子全局最优

解, $pbest_{fitness}[i]$ 表示粒子局部最优解的适应度值, $fitness[i]$ 表示粒子适应度值。粒子替换公式为公式(2)和(3)所示,公式(2)为迭代次数在 $1/2$ 最大次数前的变异粒子替换公式,公式(3)为迭代次数大于或等于 $1/2$ 最大迭代次数的变异粒子替换公式, x_{ir} 表示第 i 个粒子第 r 维的位置, $gbest_{ir}$ 表示全局最优解第 r 维位置。

$$Gaussian[i] = \exp\left(-\frac{gbest_{fitness}^2 + pbest_{fitness}[i]^2}{2 * fitness[i]^2}\right) \quad (1)$$

$$x_{ir} = x_{ir} + Gaussian[i] * (x_{ir} - gbest_{ir}) \quad (2)$$

$$x_{ir} = x_{ir} - Gaussian[i] * (x_{ir} - gbest_{ir}) \quad (3)$$

通过人们公认的纯数学测试函数^[19-20]的有效评估,得出PSO-GA在多峰搜索中存在明显的优势,其性能更适合磁场的优化。

2.2 混合优化算法与CST软件数据通信

线圈模型的优化对象主要是线圈的参数特性,如线圈的半径,注入线圈的电流及线圈的空间位置等。通常我们根据计算线圈的先验知识确定线圈参

数的解空间,将此解空间作为优化算法初始种群的范围及计算精度的依据,然后优化算法依据其制定的初始种群产生方法产生初始种群,CST 与高级语言的数据通信接口将初始种群所表示的线圈参数输入 CST,CST 软件根据所输入的参数建立模型,计算模型及进行结果处理,最后通过数据接口将优化算

法所需的场结果输出,用于优化算法的适应度计算,此过程就为 CST 软件与优化算法的单个通信,而算法种群个体通常不止一个,所以计算一代种群需进行这样的通信多次。图 7 给出混合优化算法与 CST 通信的联合求解整体步骤流程:

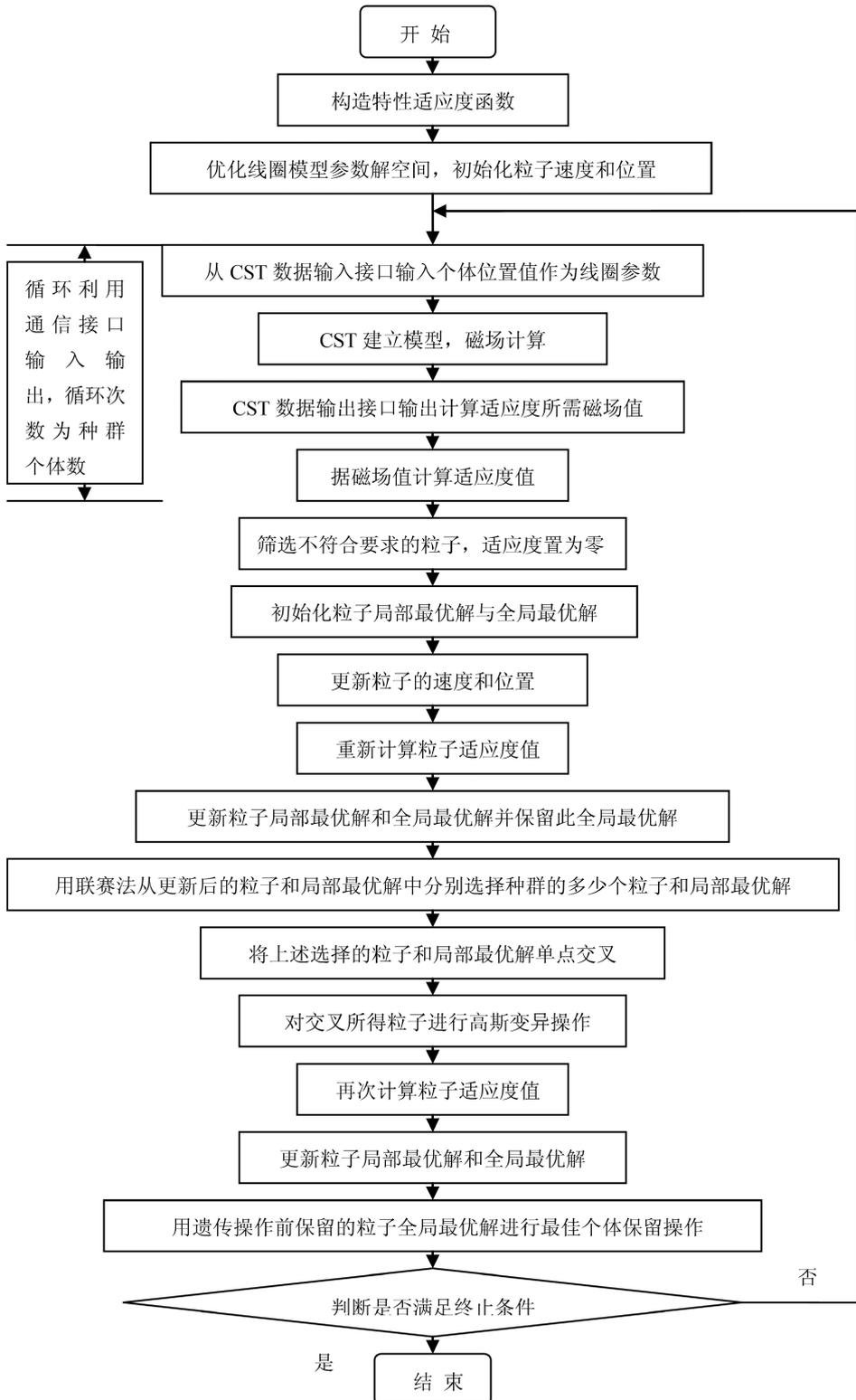


图 7 线圈模型优化流程图

Fig.7 Optimization coil model for processing

3 模型的优化

上述提出的线圈阵列模型中 3 方框形线圈模型结构简单,磁场分布较好,所以为了得到用于 TMS 的激励线圈,同时验证 CST 与优化算法接口的可用性,对此模型进行了优化。

3.1 适应度函数

适应度函数反映了目标函数的特性,线圈优化中算法的每一个个体都代表一组线圈参数,同时对应一种线圈模型,即对应一种场分布。本文对磁感应强度进行了归一化处理,防止出现磁场值和磁场分布同比例增长带来的计算或对比的错误。根据大量的计算经验,本文使用的场值适应度函数如下公式(4)所示。

$$fitness = \frac{B_{arrN}}{B_{arrn}} * \exp(-10 * \frac{4 * N}{2 * N_{0.98} + N_{0.9} + N_{0.8}}) \quad (4)$$

线圈优化计算中,CST 计算空间设置为 100 cm

×100 cm×100 cm,磁感应强度取值平面为 Z=-4 平面。公式(4)中 B_{arrN} 表示输出平面上,输出点 B 场归一化值的平均值, B_{arrn} 表示计算平面中心向外延伸 4 cm×4 cm 方形范围内 B 场输出值的归一化平均值,N 表示从 CST 输出的 B 场取值点总数, $N_{0.98}$ 表示 B 场输出平面磁感应强度归一化值大于等于 0.98 的点,同理可得 $N_{0.9}$, $N_{0.8}$ 。计算适应度算法中利用 $N_{0.98}$ 与计算平面中心周围 10 cm×10 cm 范围内,归一化值大于或等于 0.98 点的总数比较,将聚焦点限制在计算平面中心周围 6 cm×6 cm 平面内且去除了多峰情况。此适应度函数反映了实际应用所需磁场分布的特性,将磁场问题转换为数学模型,用于 TMS 优化计算。

3.2 优化参数选取与优化结果

优化线圈的匝数为 100 匝,电流取 +1 A,0 A 和 -1 A 三个值。优化参数如表 1 所示。

表 1 3 方框形线圈优化参数表

Table 1 3 square coils optimization parameter table

参数	参数取值范围	步长	最大速度	种群大小为 5,计算最大迭代次数为 50(优化值)
两正方形子线圈的重叠距离	[0,10.000] cm	0.000 1 cm	10.000 cm	8.398 cm
每两子线圈所在平面的垂直距离	[1.000,2.000] cm	0.001 0 cm	1.000 cm	1.722 cm
长方形线圈长	[3.000,10.000] cm	0.001 0 cm	7.000 cm	4.468 cm
长方形线圈宽	[3.000,5.000] cm	0.001 0 cm	2.000 cm	4.235 cm
长方形线圈的电流	[-1,0,1] A	1 A	2 A	-1 A
两正方形子线圈的边长	[3.000,10.000] cm	0.000 1 cm	7.000 cm	5.918 cm

按照上述优化所得参数,在 CST 软件中建立模型,如图 8 所示,计算空间与优化 B 场取值空间一致 20 cm×20 cm×20 cm,其他计算条件与优化计算设置一致。计算 Z=-4 平面归一化 B 场幅值分布和二维等高线图(见图 9)。

为了对比优化效果,在单线圈尺寸和刺激强度尽量接近的情况下选取边长为 8 cm 对比线圈,注入电流大小为 1 A。图 10 为对比单线圈的归一化 B 场幅值分布和二维等高线图。从图 11 可同时看出两种模型刺激强度和聚焦程度的对比。

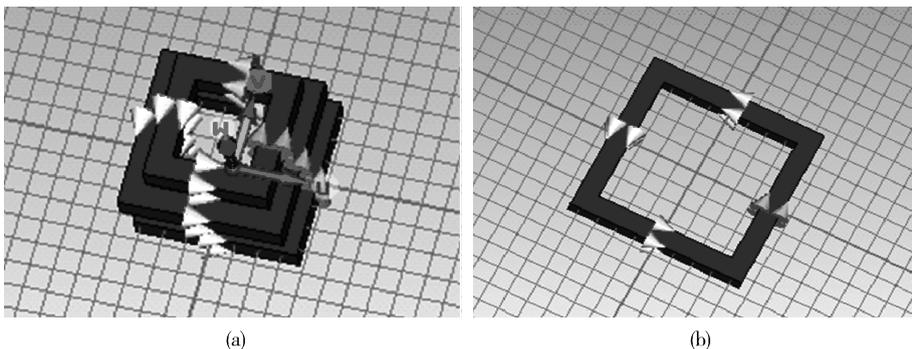


图 8 a 优化模型 b 单线圈模型

Fig.8 a Optimization model b Single coil model

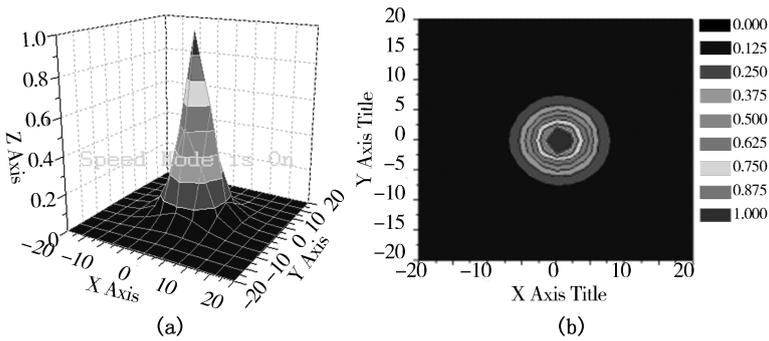


图 9 优化模型

Fig.9 Optimization model

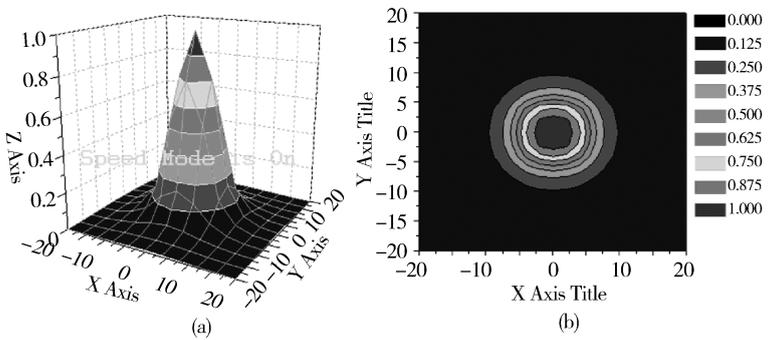


图 10 单线圈模型

Fig.10 Single coil model

注:a 为归一化 B 场幅值分布图,b 为二维等高线分布图。

Notes:Figure a is the normalized B field amplitude distribution Figure b is a two-dimensional contour map.

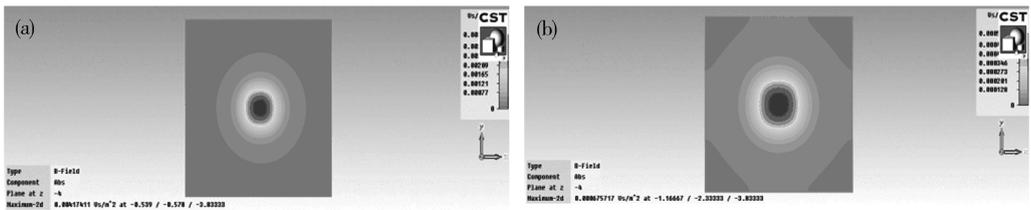


图 11 a 优化模型 B 场分布 b 单线圈 B 场分布

Fig.11 Optimization model of B distribution Single coil model of B distribution

上述对比结果显示,优化模型无论在聚焦性还是刺激强度上都优于对比单线圈模型,因此该模型可用于 TMS 中。

4 结论

结合遗传算法与粒子群算法的基本特性设计了混合优化算法;用高级语言编程控制 CST 软件,实现 CST 软件与高级语言程序的数据通信接口及联合 CST 软件的 TMS 优化求解;对当前新型的线圈阵列模型中影响磁场分布的参数进行了讨论,用 TMS 优化算法优化了其中磁场分布集中且结构简单的模型,优化结果对比显示,3 方框形线圈的刺激强度和

聚焦程度都有不同程度的提高,得到用于 TMS 的优化激励线圈模型,为全面优化激励线圈的空间结构研究提供了参考依据与实用价值。

参考文献 (References)

- [1] Angela Ziluk, Azra Premji, Aimee J. Nelson. Functional connectivity from area 5 to primary motor cortex via paired-pulse transcranial magnetic stimulation[J].Neuroscience Letters,2010,484:81-85.
- [2] 乔清理,王明时,田心.经颅磁刺激的原理方法和应用[J].中国生物医学工程学报,2004,21(4):259-265.
- [3] 王小明,龙存国,吴壁华,张国元,李秋茹,赵小琼,郑霞清.反复经颅磁刺激安全性的实验研究[J].中国临床康复,2003,7(13):1896.
- [4] 吴原,岩永书册,矢野直次.磁刺激对脊髓前角细胞兴奋性的影响[J].临床神经电生理学杂志,2003,12(1):3.
- [5] Jacob Jolij, Victor A.F.Lamme.Transcranial magnetic stimulation-

- induced 'visual echoes' are generated in early visual cortex [J]. *Neuroscience Letters*, 2010, 484: 178-181.
- [6] 刘冀成, 黄卡玛, 胡雅毅, 华伟. 功能磁刺激线圈阵列设计与场分布计算[J]. *航天医学与医学工程*, 2004, 17(5): 365-369.
- [7] 刘冀成, 黄卡玛, 郭兰婷, 张弘, 胡雅毅. 基于遗传算法的经颅磁刺激线圈阵列设计与场分布计算[J]. *生物医学工程学杂志*, 2005, 22(2): 303-306.
- [8] 郑建斌, 霍小林, 吴昌哲, 于阳. 经颅磁刺激系统各主要参数实现的量化设计[J]. *中国临床康复*, 2004, 8(34): 7655-7657.
- [9] 崔姗姗. 遗传算法的一些改进及其应用[D]. 北京: 中国科技大学, 2010.
- [10] Holland John. Genetic algorithms [J]. *Scientific American*, 1992, 4: 44-50.
- [11] 赵云珍. 遗传算法及其改进[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.
- [12] 吕晋君. 遗传算法的改进及其在优化上的应用研究[D]. 太原理工大学, 2010.
- [13] Altenberg Lee, Thomas Back E D, Kaufmann Morgan. Fitness Distance Correlation analysis; an Instruction counterexample [C]. US: IN Proceedings of the 7th International Conference on Genetic Algorithm, 1997.
- [14] 蒋晓鸣, 雷霖, 王厚军. 一种改进惯性权重的变异微粒群优化算法[J]. *计算机技术与发展*, 2008, 18(6): 79-82.
- [15] 刘晶晶. 粒子群优化算法的改进与应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [16] 罗德相. 粒子群算法改进方法研究[D]. 南京: 广西民族大学, 2009.
- [17] 陆克中, 张秋华, 孙兰娟. 一种改进的粒子群优化算法及其仿真[J]. *计算机技术与发展*, 2007, 17(11): 88-91.
- [18] 刘晶晶, 吴传生. 一种带交叉算子的改进的粒子群优化算法[J]. *青岛科技大学学报*, 2008, 29(1): 77-79.
- [19] 刘冀成. 基于改进遗传算法的生物电磁成像与磁场聚焦应用[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [20] Thomas Back. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice* [M]. New York: Oxford University Press, 1996.