

文章编号:1671-6833(2016)03-0092-05

折叠变形磁刺激圆形线圈空间磁场分析

张春兰¹, 逯 迈², 陈小强¹, 魏孔炳³

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃省电力设计院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要: 为了进一步提高圆形线圈的刺激聚焦度, 设计了沿不同位置折叠变形的圆形线圈. 通过数值模拟分析了变形折叠位置与折叠角度的圆形线圈空间磁场的分布. 与传统圆形线圈相比, 单侧离园心 0.5、1、1.5 cm 处折叠的变形圆形线圈磁场聚焦度明显提高, 最佳折叠角分别是 $60^\circ \sim 90^\circ$ 、 $60^\circ \sim 105^\circ$ 和 $75^\circ \sim 105^\circ$. 而单侧离园心 2 cm 处折叠变形圆形线圈、双侧离园心 2 cm 处折叠变形圆形线圈, 空间磁场聚焦未能提高.

关键词: 经颅磁刺激; 变形圆形线圈; 磁场分布; 数值模拟

中图分类号: R318.6 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2016.03.021

0 引言

经颅磁刺激首先由 Baker 等^[1]于 1985 年提出, 为了改善圆形线圈的聚焦度, Ueno^[2]于 1988 年提出了著名的八字线圈. 经过近三十年的发展, 已被用于神经与精神疾病如抑郁、帕金森等的治疗, 且取得了很好的疗效, 同时也是脑功能研究中的重要工具^[3-4].

磁刺激的关键技术是感应电磁场分布及其聚焦性, 经颅磁刺激时, 需要对靶位置刺激, 避免非靶位置的刺激, 因而聚焦性的提高最为重要^[5-8], 研究磁刺激聚焦度的重要方法是数值模拟研究^[9-11].

笔者为了降低磁刺激过程中对非靶位置的刺激, 分别设计了离园心 0.5、1、1.5、2 cm 处单侧和双侧变形折叠圆形线圈, 并对这几种类型的线圈进行空间磁场分布计算. 结果表明: 离园心 0.5、1.0、1.5 cm 处的单侧折叠聚焦度有明显的提高, 且最佳折叠角分别为 $60^\circ \sim 90^\circ$ 、 $60^\circ \sim 105^\circ$ 和 $75^\circ \sim 105^\circ$. 而单侧离园心 2 cm 处折叠变形圆形线圈、双侧离园心 2 cm 处折叠变形圆形线圈, 空间磁场聚焦未能提高.

1 理论推导

将传统线圈沿平行于 x 轴的直线折起任意角

度 β , 如图 1 所示.

对于 P 点的计算需要对折起部分和未折起部分积分, 其中未折起部分, 直接将 P 点积分即可, 得到 B_{x1} 、 B_{y1} 、 B_{z1} ; 折起部分, 需对 P 点空间坐标转换, 转换公式^[12]如式(1)所示, 再转换成新的球坐标, 对折起部分进行积分.

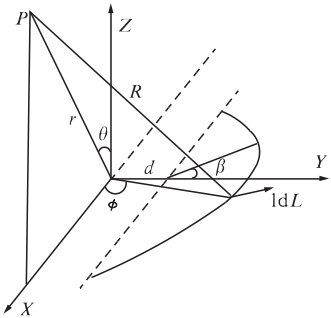


图 1 单侧折叠线圈球坐标系

Fig. 1 Spherical coordinates for circular coil with unilateral bending

折起部分积分以后得到 B'_{x2} 、 B'_{y2} 、 B'_{z2} , 然后还原为未折叠平面下的 B_{x2} 、 B_{y2} 、 B_{z2} ,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

变换公式如公式(2)^[12]所示, 由此可得到沿三个坐标轴的分量, 将未折叠和已折叠的空间磁

收稿日期:2015-10-12; 修订日期:2015-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51267010); 甘肃省杰出青年基金资助项目(1308RJDA013)

通信作者:逯迈(1968—), 男, 甘肃天水人, 兰州交通大学教授, 博士, 主要从事生物医学电磁学、电磁暴露安全评估研究, E-mail: mai.lu@hotmail.com.

场分量相叠加,最终求得矢量和磁场强度 B .

$$\begin{bmatrix} B_{x2} \\ B_{y2} \\ B_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B'_{x2} \\ B'_{y2} \\ B'_{z2} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

图 2 所示为双侧对称折叠. 此处分为 3 部分: 未折起部分、左侧折起部分和右侧折起部分. 折起部分的坐标转换可参照单侧折叠的转换公式,将求得的 3 部分磁场分量相叠加,最终求得矢量和磁场强度 B .

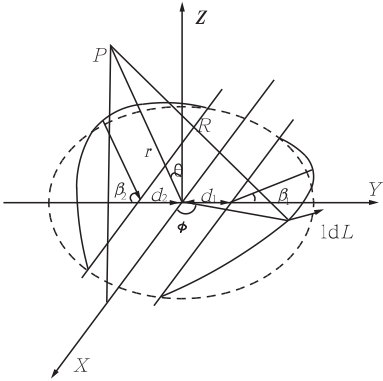


图 2 双侧折叠线圈球坐标系
Fig.2 Spherical coordinates for circular coil with bilaterally bending

2 单侧折叠变形圆形线圈对空间磁场分布影响

采用数值积分法,对单侧折叠线圈进行空间磁场计算仿真,分别为离圆心 0.5、1、1.5、2 cm 处折叠的变形圆形线圈. 这里重点介绍沿平行与直径且离圆心 1.0 cm 的直线沿任意角度折叠. 基本参数设置为半径 $a = 2.5$ cm,脉冲电流峰值为 10 000 A,共 10 匝.

图 3 是单侧折叠线圈在折叠角度是 30° 、高度为 -8 mm 的平面磁场的三维模拟图. 图 4 单侧折叠的变形圆形线圈(折起 30°) Z 平面不同高度的磁感应强度. 图 5 是离圆心 1.0 cm 单侧折叠的变形圆形线圈折起不同角度在 $z = -3$ mm 时的磁感应强度.

由图 4 可知,离线圈的距离越大,最高点的衰减越明显,即离线圈的距离不能太远,否则聚焦度反而下降.

由图 5 可以看出,在离圆心 1 cm 处折叠的变形圆形线圈,在高度一定且角度不同时,双峰变为单峰,且最高点数值减少不明显,即折叠后的线圈比传统圆形线圈聚焦度有很大的提高.

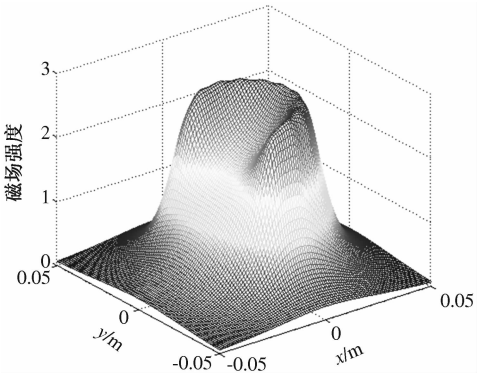


图 3 单侧折叠的变形圆形线圈折起 30° 时高度 $z = -8$ mm 平面的磁感应强度
Fig.3 The magnetic induction density at the position of $z = -8$ mm plane for circular coil unilaterally bended with an angle of 30 degree

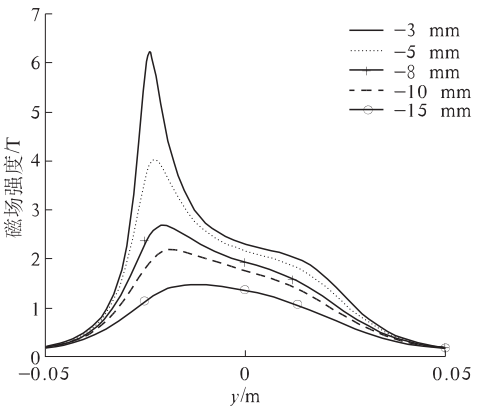


图 4 单侧折叠的变形圆形线圈(折起 30°) z 平面不同高度的磁感应强度
Fig.4 The magnetic induction density at the different position on z plane for circular coil unilaterally bended with an angle of 30 degree

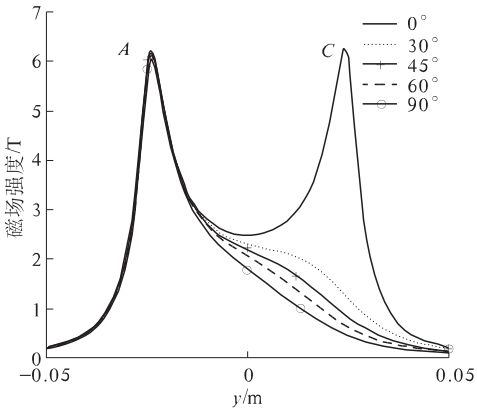


图 5 单侧折叠的变形圆形线圈折起不同角度在 $z = -3$ mm 时的磁感应强度
Fig.5 The magnetic induction density for different bending angles at the height of $z = -3$ mm

图 6 是不同位置的单侧折叠变形圆形线圈在不同折叠角度且 $Z = -8$ mm 时的空间磁场分布

图. 从图 6 可以看出, 离圆心相同距离时, 随着角度的增大, 最高点和传统圆形线圈相比没有明显的下降, 但是右半部分的衰减很明显, 以很快的速度下降, 聚焦度得到提高. 然而对比离圆心 1 cm 和 2 cm 单侧折叠, 在相同角度时, 发现离圆心 2 cm 的单侧折叠衰减相对缓慢.

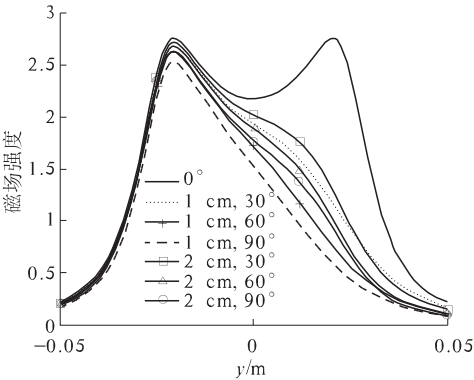


图 6 单侧不同位置折叠的变形圆形线圈折起不同角度在 $z = -8\text{ mm}$ 时的磁感应强度

Fig. 6 The magnetic induction density for different bending angles at the height of $z = -8\text{ mm}$

表 1 ~ 4 为不同位置的单侧折叠圆形线圈折起不同角度时在 $z = -3\text{ mm}$ 时对比传统圆形线圈的两磁场峰值 A 点和 C 点的百分比.

表 1 离圆心 0.5 cm 处单侧折叠变形圆形线圈感应强度值随折起角度的变化规律

Tab. 1 Dependence of magnetic induction density on bending angles for circular coil unilaterally bended along a line 0.5 cm away from the coil center				
折起角度/(°)	A 点磁场强度/T	占传统线圈 A 点百分比/%	C 点磁场强度/T	占传统线圈 C 点百分比/%
0	6.291 6	100.0	6.291 6	100.0
15	6.255 4	99.4	2.236 6	36.0
30	6.218 4	98.8	1.286 7	21.1
45	6.178 2	98.2	0.876 2	14.4
60	6.131 7	97.5	0.661 0	10.6
75	6.074 7	96.6	0.540 3	8.2
90	6.000 5	95.4	0.471 2	6.7
105	5.898 7	93.8	0.431 4	5.6

注: A、C 点见图 5.

表 1 ~ 4 分别为离圆心 0.5、1、1.5、2 cm 的单侧折叠变形圆形线圈的变化规律. 为了保证未折起侧(A 点)有足够的磁场峰值以及折起侧(C 点)有较大的磁场衰减, 定义未折起侧磁场峰值占传统圆形线圈峰值的 95% 以上, 折起侧占传统圆形线圈磁场峰值的 10% 以下的变形圆形线圈为最佳变形线圈, 其折起角度为最佳折起角^[13].

表 2 离圆心 1 cm 处单侧折叠变形圆形线圈感应强度值随折起角度的变化规律

Tab. 2 Dependence of magnetic induction density on bending angles for circular coil unilaterally bended along a line 1 cm away from the coil center

折起角度/(°)	A 点磁场强度/T	占传统线圈 A 点百分比/%	C 点磁场强度/T	占传统线圈 C 点百分比/%
0	6.291 6	100.0	6.291 6	100.0
15	6.263 1	99.6	2.236 6	35.5
30	6.234 2	99.1	1.286 7	24.5
45	6.202 8	98.6	0.876 2	13.9
60	6.166 0	98.0	0.661 0	10.5
75	6.120 0	97.3	0.540 3	8.6
90	6.058 5	96.3	0.471 2	7.5
105	5.971 1	94.9	0.431 4	6.9

注: A、C 点见图 5.

表 3 离圆心 1.5 cm 处单侧折叠变形圆形线圈感应强度值随折起角度的变化规律

Tab. 3 Dependence of magnetic induction density on bending angles for circular coil unilaterally bended along a line 1.5 cm away from the coil center

折起角度/(°)	A 点磁场强度/T	占传统线圈 A 点百分比/%	C 点磁场强度/T	占传统线圈 C 点百分比/%
0	6.291 6	100.0	6.291 6	100.0
15	6.270 0	99.7	2.199 0	35.0
30	6.248 3	99.3	1.248 4	19.8
45	6.224 7	98.9	0.864 7	13.7
60	6.196 9	98.5	0.687 7	10.9
75	6.161 3	97.9	0.603 7	9.6
90	6.112 5	97.2	0.563 5	9.0
105	6.040 6	96.0	0.544 1	8.6
120	5.926 1	94.2	0.534 3	8.5

注: A、C 点见图 5.

从表 1 可以看出, 60° ~ 90° 的 A 点磁场值所占比例分别为 97.5% ~ 95.4%, C 点磁场值所占比例分别为 10.6% ~ 6.7%, 基本符合最佳折起角条件. 从表 2 可以看出, 60° ~ 105° 的 A 点磁场值所占比例分别为 98% ~ 94.9%, C 点磁场值所占比例分别为 10.5% ~ 6.9%, 基本符合最佳折起角条件. 从表 3 可以看出, 75° ~ 105° 的 A 点磁场值所占比例分别为 97.9% ~ 96%, C 点磁场值所占比例分别为 9.6% ~ 8.6%, 基本符合最佳折起角条件. 从表 4 可以看出, 虽然 A 点磁场所占比例很高, 但是 C 点磁场值衰减也相当缓慢, 不符合最佳折起角的条件.

表 4 离圆心 2 cm 处单侧折叠变形圆形线圈感应强度值随折起角度的变化规律

Tab.4 Dependence of magnetic induction density on bending angles for circular coil unilaterally bended along a line 2 cm away from the coil center

折起角度/(°)	A 点磁场值 B/T	占传统线圈 A 点百分比/%	C 点磁场值 B/T	占传统线圈 C 点百分比/%
0	6.291 6	100.0	6.291 6	100.0
15	6.275 9	99.8	2.140 2	34.0
30	6.260 2	99.5	1.236 7	19.7
45	6.243 1	99.2	0.925 7	14.7
60	6.222 9	98.9	0.805 8	12.8
75	6.196 8	98.5	0.757 1	12.0
90	6.160 5	97.9	0.736 5	11.7
105	6.105 7	97.0	0.727 3	11.6
120	6.015 6	95.6	0.722 8	11.5
135	5.851 7	93.0	0.719 9	11.4

注:A、C 点见图 5。

3 双侧折叠变形圆形线圈对空间磁场分布影响

图 7 是双侧对称折叠线圈在折叠角度是 30°,高度为 -8 mm 的平面磁场的三维模拟图.由图 7 可知,双侧折叠后出现双峰,聚焦度明显不如单侧折叠的效果好.由于双侧折叠聚焦度反而变差,故不宜采用该方法.

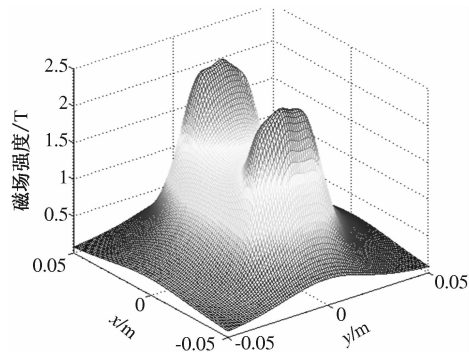


图 7 双侧对称折叠的变形圆形线圈折起 30°时高度 $z = -8$ mm 平面的磁感应强度

Fig.7 The magnetic induction density at the position of $z = -8$ mm plane for circular coil bilaterally bended with an angle of 30 degree

4 结论

(1)随高度沿 z 轴负方向增加,单侧折叠和双侧折叠线圈的空间磁场与传统圆形线圈相似,峰值逐层衰减,但是衰减速度不同.

(2)离圆心 0.5 cm 处的单侧折叠变形圆形线圈的最佳折叠角是 $60^{\circ} \sim 90^{\circ}$,离圆心 1 cm 处的

单侧折叠变形圆形线圈的最佳折叠角是 $60^{\circ} \sim 105^{\circ}$,离圆心 1.5 cm 处的单侧折叠变形圆形线圈的最佳折叠角是 $75^{\circ} \sim 105^{\circ}$,对靶位置的刺激强度基本不变的情况下,减少了对非靶位置的刺激.

(3)离圆心 2 cm 处的单侧折叠变形圆形线圈没有最佳折叠角,虽然未折叠部分衰减很小,但是折叠部分的衰减过于缓慢,因此效果不是很理想.

(4)双侧折叠聚焦效果没有单侧折叠效果好,双侧折叠以后出现两个峰值,聚焦度反而下降.

参考文献:

[1] BARKER A T,JALINOUS R,FREESTON I L. Non-invasive simulation of the human motor cortex [J]. Lancet,1985,325:1106-1107.

[2] SHOOGO U,TASHIRO T,HARADA K. Localized stimulation of neural tissues in the brain by means of a paired configuration of time-varying magnetic fields [J]. Appl Phys, 1988, 64(10):5862-5864.

[3] BERARDELLI A,SUPPA A. Recent advances in the pathophysiology of parkinson's disease: evidence from fMR and TMS studies [J]. Experimental neurology, 2011,227(1):10-12.

[4] LEVKOVITZ Y,SHEER A,HAREL E V,et al. Differential effects of deep TMS of the prefrontal cortex on apathy and depression [J]. Brain stimulation,2011, 23(6):529-536.

[5] LU M,SHOOGO U, THORLIN N T, et al. Calculating the current density and electric field in human head by multichannel transcranial magnetic stimulation [J]. IEEE Transactions on magnetics,2009,45 (3):1662-1665.

[6] 蒲丽娜,殷涛,安好,等. 提高脑神经磁刺激感应电场聚焦性能的线圈参数优化方法的研究 [J]. 生物医学工程研究,2008,27(2):74-78.

[7] 于阳,李玥,张广浩,等. 适用于临床及动物试验的高频重复经颅磁刺激系统设计与应用 [J]. 高压电技术,2013,39(1):181-187.

[8] 尹宁,徐桂芝,于洪丽,等. 磁刺激穴位对大脑功能网络的影响 [J]. 生物医学工程学报,2013,32(2):184-190.

[9] LAAKOS I,HIRATA A. Effects of coil orientation on the electric field induced by TMS over the hand motor area [J]. Phys Med Biol,2014,59(1):203-218.

[10] 范春珍,王俊俏,程永光,等. 铁磁壳层纳米颗粒周围局域电场的研究 [J]. 郑州大学学报(工学版), 2013,34(3):26-19.

[11] LU M,SHOOGO U,THORLIN T,et al. Calculating the activating function in the hum an brain by transcranial magnetic stimulation [J]. IEEE Transactions on mag- netics,2008,44 (6) :1438 – 1441.

[12] 魏孔炳,董绪伟,逯迈,等. 经颅磁刺激圆形线圈变 形对空间磁场分布的影响[J]. 科学技术与工程, 2014,14(3) :13 – 17.

[13] 魏孔炳,逯迈,董绪伟,等. 磁刺激八字线圈变形对 空间磁场与感应电场分布的影响[J]. 中国生物医 学工程学报,2014, 33(4) :425 – 430.

Analysis of the Magnetic Induction Field Distribution for Deformed Round Coil with Bending Angle in Magnetic Stimulation

ZHANG Chunlan¹, LU Mai, CHEN Xiaoqiang¹, WEI Kongbing³

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Lab of Opto-Technology and Intelligent Contral of Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu E-lectric Power Design Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to improve the stimulation focality, the deformed round coils with different bending angles at different positions have been designed. 3D distributions of the magnetic induction fields have been obtained through numerical simulations, and the results were compared with that of conventional round coil. Results show that stimulation focality can be well improved when the coil was unilaterally bended along a line 0.5 cm and 1 cm and 1.5 cm away from the coil center, and the best bending angle was 60° ~ 90°, 60° ~ 105° and 70° ~ 105° respectively. While for other cases i. e. unilaterally bending 2 cm away from the coil center, bilat-erally bending etc. , the focality become worse.

Key words: transcranial magnetic stimulation; deformed round coil ; magnetic field distribution numerical simulation

(上接第 91 页)

Cooling Performance Study of Ionic Wind Excited by Needles-Net Structure

WANG Jing, CAI Yixi, BAO Weiwei, LI Huixia

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Based on the principle of corona discharge, a needles-net structure generator was designed. The i-onic wind excitation was implemented, and it was used for high power LED chip heat dissipation. The experi-mental study of generator’s electrical properties change and its effect on the properties of high power LED heat dissipation under different discharge gap, voltage polarity and electrode arrangement were carried out. The cooling performances of the ionic wind generator and the cooling fan were compared. The results show that, the heat dissipation performance of negative corona discharge is superior to the positive corona discharge under the same conditions, and the discharge spacing is smaller, the lower LED pin temperature it is. The best cool-ing performance will be reached at 1 × 11 needles array form, and the lowest LED pin temperature is 52.3℃ when the discharge power is more than 10 W. The device can realize the heat dissipation effect more close to a cooling fan, and it is suitable for high power LED chip heat dissipation.

Key words: corona discharge; ionic wind; high power LED; enhancement of heat transfer; junction tempera-ture