

## 可调空间聚焦低频脉冲电磁场发生装置研制

焦明克<sup>1</sup>, 胡劼<sup>2</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 楼林<sup>1</sup>, 耿西亮<sup>1</sup>, 王忠明<sup>1</sup>, 廖西江<sup>1</sup>, 许文娟<sup>1</sup>, 付勇<sup>1</sup>

1. 兰州军区乌鲁木齐总医院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 新疆医科大学附属中医院, 新疆 乌鲁木齐 830000

**【摘要】目的:**研制空间聚焦和频率强度可调的低频脉冲电磁场(Pulsed Electromagnetic Fields, PEMF)发生装置。**方法:**采用以单片机STC89C52为基础的智能可调低频脉冲信号发生器产生不同频率占空比的低频脉冲信号;该信号经预放大滤波后,由PA19构成的功率放大电路进行放大,驱动后级可调空间聚焦电磁场发射架;PEMF强度和空间分布通过特斯拉计HT108进行测量。**结果:**PEMF发生装置能够产生频率0~2 kHz、占空比10%~80%和强度0~400 mT可调的PEMF,且空间聚焦效果明显。**结论:**PEMF发生装置具有输出PEMF各参数可调范围大、电磁场聚焦范围空间可调等优点,适合用于电磁场非热生物效应研究。

**【关键词】**低频脉冲;占空比;电磁场;生物效应;空间聚焦

**【中图分类号】**R312; Q68

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2016)03-0248-04

## Development of low frequency pulsed electromagnetic fields generator with adjustable space focus

JIAO Ming-ke<sup>1</sup>, HU Jie<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, LOU Lin<sup>1</sup>, GENG Xi-liang<sup>1</sup>, WANG Zhong-ming<sup>1</sup>, LIAO Xi-jiang<sup>1</sup>, XU Wen-juan<sup>1</sup>, FU Yong<sup>1</sup>

1. Urumqi General Hospital of Lanzhou Military Region, Urumqi 830000, China; 2. Affiliated Traditional Chinese Medicine Hospital, Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, China

**Abstract: Objective** To develop a low frequency pulsed electromagnetic fields (PEMF) generator with adjustable frequency, intensity and space focus. **Methods** Based on the single chip STC89C52, the intelligent adjustable low frequency pulsed signal generator was designed to output the low frequency pulsed signals with different frequencies and duty cycles. After the signals were pre-amplified and filtered, the preprocessed signals were amplified by the power amplifier circuit composed of PA19 to drive the adjustable space focus electromagnetic fields transmitting mechanism. Finally, the PEMF intensity and distribution of electromagnetic fields were measured by using Teslameter HT108. **Results** The proposed PEMF equipment generated adjustable PEMF with the frequency of 0-2 kHz, duty cycle ranging from 10% to 80%, and intensity ranging from 0 mT to 400 mT. And the space focus effect of PEMF was obvious. **Conclusion** The PEMF generator with wide adjustable range of output PEMF parameters and adjustable space focus was suitable for the non-thermal biological effect of electromagnetic fields.

**Key words:** low frequency pulsed; duty cycle; electromagnetic fields; biological effect; space focus

### 前言

低频脉冲电磁场(Pulsed Electromagnetic Fields, PEMF)的非热生物效应能够改变信使RNA水平和蛋

白质合成,以及改变细胞膜结构,影响离子通道和渗透性(例如使Ca<sup>2+</sup>水平发生变化)等<sup>[1-2]</sup>,使细胞电活动和新陈代谢行为变化,导致细胞增殖率改变<sup>[3]</sup>,从而具有防止组织细胞凋亡<sup>[4]</sup>、减低血液粘稠度<sup>[5]</sup>、改善血液循环和促进受损神经再生等功效<sup>[6-8]</sup>。然而其具体的应用效果和最佳效应的PEMF参数设置尚缺乏研究。因此作为PEMF非热生物效应实际应用的研究基础,设计能够产生多参数可调PEMF的电磁场发生装置具有重要意义。现有电磁场发生装置可调参

**【收稿日期】**2015-11-10

**【基金项目】**国家自然科学基金(81301344)

**【作者简介】**焦明克(1978-),男,工程师,博士,主要研究方向:生物医学信号检测及电磁医学应用。Tel:0991-4992871;E-mail:jmkkok@126.com。

数少,在极低频率磁场可达 2 T,但无法满足连续照射需求;而频率稍高在 30 Hz, 磁场强度则仅约为 50 mT, 相关报道应用于非热生物效应实验的 PEMF 强度也多为 10 Gs 左右<sup>[9]</sup>。最重要的是磁场无法实现频率、幅值和占空比独立连续可调,且磁场强度电磁场发射线圈结构单一,多为螺线管线圈<sup>[10-12]</sup>。因此本研究设计了具有多参数可调,可调范围大、有磁场空间聚焦效果的 PEMF 发生装置。

## 1 材料和方法

### 1.1 系统设计总体结构

本研究设计的 PEMF 发生装置主要包括智能可调低频脉冲信号源发生部分,信号滤波预放大和功率放大电路部分,可调磁场空间聚焦电磁场发射线圈部分以及电源模块等,结构如图 1 所示。智能可调低频脉冲信号源采用 STC89C52 单片机产生脉冲信号,输出幅值、占空比和频率可通过程序控制调节的脉冲信号<sup>[13]</sup>。该信号经多级滤波电路滤除干扰噪声后,由输出功率放大电路进行放大,驱动后级磁场空间聚焦可调的电磁场发射线圈,最终产生合适参数的低频脉冲电磁场。

### 1.2 低频脉冲信号源的设计

低频脉冲信号源的构成主要包括 STC89C52 单片机、D/A 数模转换模块、LCD 液晶显示模块和参数按键选择设置电路等。通过参数调节按键、程序软件控制 STC89C52 单片机和数模转换器产生需要

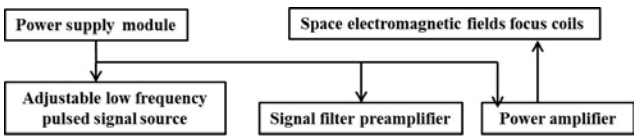


图1 系统结构图  
Fig.1 Block diagram of instrument system

的低频脉冲信号和 LCD 参数显示。控制按键可以分别对频率、占空比和幅值等信号参数进行输出设定,最终可输出幅值在 0~5 V、频率在 0~2 kHz 和占空比在 10%~80% 可调的低频脉冲信号<sup>[12]</sup>。

### 1.3 信号滤波、放大电路

本设计前级由放大器芯片 TLE2074 构成跟随器和预放大电路,实现了隔离前级噪声功能。为使输出低频脉冲信号不受噪声干扰影响,采用 TLE2074 芯片构成 2 kHz 的四阶低通滤波器,对高频干扰信号进行滤波。经滤波后的信号送入后级由 APEX 公司的 PA19 芯片构成的功率放大电路,PA19 芯片具有转换率高(最高放大输出电压可达 35 V,输出最大峰值电流可达 5 A)增益带宽积高、共模抑制比大等优点<sup>[14]</sup>。为了得到可调范围大且稳定的输出脉冲电磁场,保证电路安全稳定,设计由 PA19 芯片构成的功率放大电路为压控电流源电路。由于该电路驱动的负载为治疗电感线圈,根据感性负载电路的稳定性分析及补偿原则,对电路反馈回路进行补偿。滤波功率放大电路如图 2 所示。

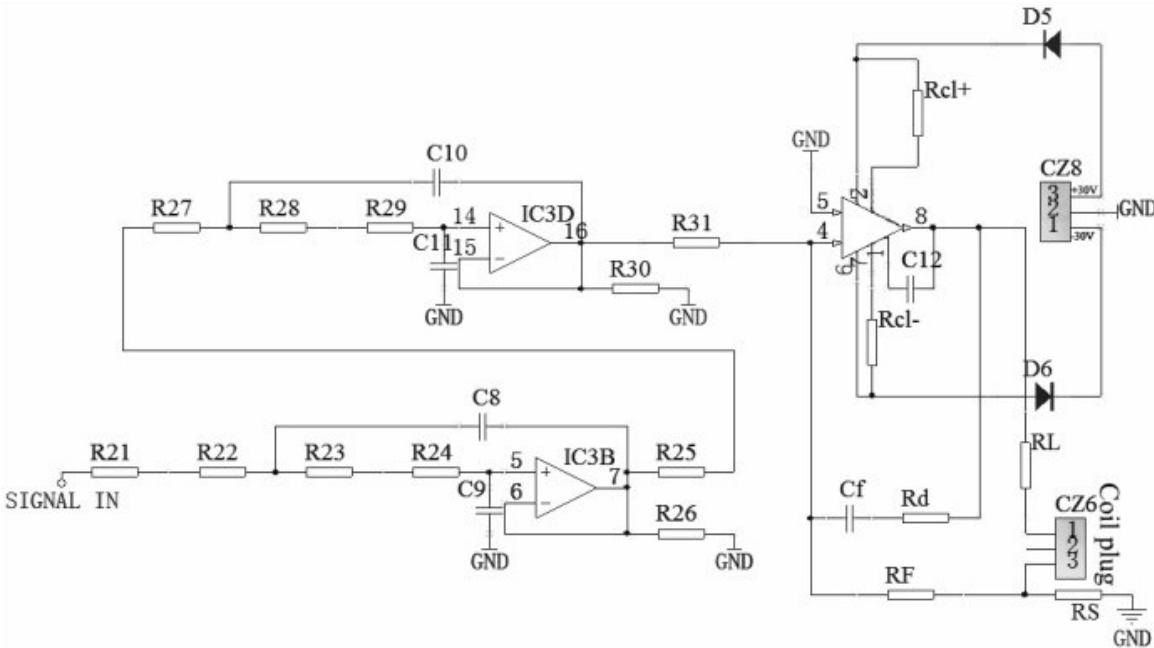
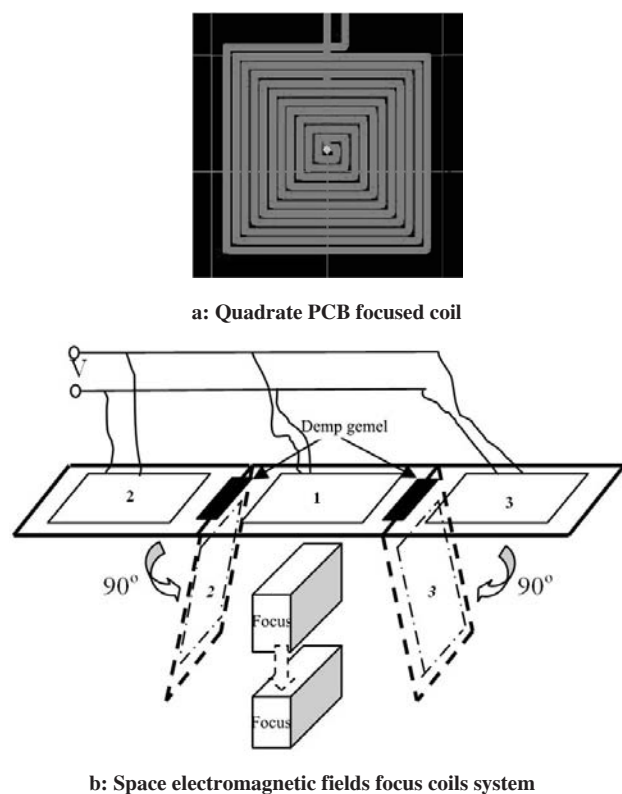


图2 滤波功放电路图  
Fig.2 Filter and power amplifier circuit

### 1.4 空间聚焦磁场发射线圈

该线圈可以对不同部位和深度的组织进行电磁场能量聚焦照射。该电磁场聚焦发射线圈主要包括:3块方形PCB聚焦线圈和聚焦调节机构。PCB方形聚焦线圈呈正方形,边长8 cm,如图3a所示。三线圈电感、结构、大小相同。3块方形PCB聚焦线圈1、2和3分别固定在3块树脂板上,通过两个阻尼铰链连接,可折叠角度为 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ,由同一信号源电压供电。3块线圈分别产生3个能量聚焦于线圈垂直中心线的电磁场,3个电磁场中心线通过聚焦调节结构实现不同的空间重叠角度,从而调整整个电磁场发射系统的一个照射焦点,使电磁场能量集中,实现控制3个线圈垂直中心线电磁场的交叠聚焦于病灶,如图3b所示。



b: Space electromagnetic fields focus coils system

图3 脉冲电磁场发射线圈

Fig.3 Pulsed electromagnetic field transmitting coil

## 2 结果

接通PEMF发生装置电源,待系统运行稳定,调节使其输出120 Hz、占空比50%、电流0.3 A的低频脉冲信号。采用可测量交流磁场的特斯拉计HT108(上海,HengTong,测量范围0~2000 mT)对线圈产生的电磁场强度进行测量,该特斯拉计测量传感器探

头长4 cm、宽5 mm、高2 mm,测量磁场时将传感器探头前端霍尔元件凹面置于所测空间磁场位置。

### 2.1 单个线圈输出电磁场测试

插接单一PCB线圈,采用特斯拉计HT108分别对120 Hz、占空比50%、电流0.3 A的低频脉冲信号驱动产生的PEMF强度进行测量。从垂直PCB线圈中心线开始,横向向外每增加1 cm距离测量1次,测量探头距线圈平面垂直距离分别为1、2、3和4 cm的磁场测量结果分别记为 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$ ,测量结果如表1所示。从表1可看到在垂直线圈中心线的同一空间平面随着测量点向外推进,磁场强度不断降低,在线圈中心处磁场强度最大,表明单个线圈聚焦效果明显。从表1中亦可观察到随着离线圈平面垂直距离的增大,整个空间磁场强度逐渐减小,且在线圈垂直中心线上磁场强度最大。

表1 聚焦线圈电磁场强度空间分布测量结果(mT)

Tab.1 Measurement results of space distribution of electromagnetic field intensity of PCB focused coil (mT)

Sidelong distance (cm)	$G_1$	$G_2$	$G_3$	$G_4$
0	37	31	24	21
1	33	27	21	18
2	28	24	19	15
3	23	18	15	13
4	18	14	12	10

### 2.2 空间聚焦电磁场测试

采用120 Hz、占空比50%、电流1 A的低频脉冲信号驱动整个空间聚焦磁场发射线圈,3个相同的聚焦线圈并联作为负载接入功率放大电路,每个线圈中电流约为0.3 A。首先将特斯拉计HT108磁场探测探头置于中间线圈1的垂直轴线,且距离平面2 cm处,不断改变线圈2和3的折叠角度分别为 $0^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 和 $90^{\circ}$ ,测量空间聚焦磁场强度,如图4上方曲线所示。当探测探头距离线圈1平面为3 m,线圈2和3的折叠角度分别为 $0^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 和 $90^{\circ}$ ,测量空间聚焦磁场强度,如图4下方曲线所示。随着折叠角度的增大,所测磁场强度不断增大,在折叠角度为 $90^{\circ}$ 时磁场强度约为 $0^{\circ}$ 时的3倍,达到约100 mT。且探头距离线圈1的距离越远,测量的磁场强度越小。而采用120 Hz、占空比50%、电流4 A的低频脉冲信号驱动空间聚焦线圈时,同理测得最大磁场强度可达400 mT。

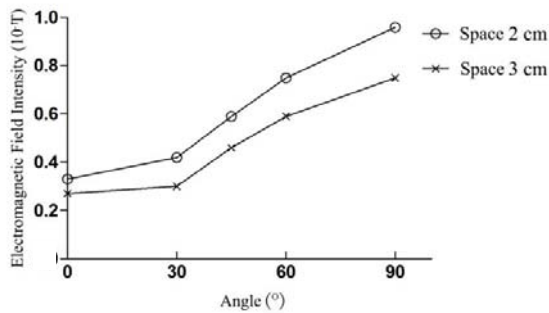


图4 空间磁场聚焦强度分布

Fig.4 Distribution of space electromagnetic field intensity

### 3 讨论

PEMF的非热生物效应已被应用于不同组织创伤修复以及康复治疗<sup>[3-4, 8]</sup>。然而针对不同的病理生理, PEMF的最佳作用参数尚不明确, 因此研制能够产生不同参数PEMF的低频脉冲发生器成为进一步研究的基础<sup>[8]</sup>。

本研究设计研制了能够产生可调幅度、占空比、频率的PEMF, 通过按键即可实现设定输出需要的PEMF, 操控方便。通过实验测试表明, PEMF发生装置不仅能够实现单个线圈磁场聚焦, 而且能够实现磁场的空间聚焦, 根据病灶位置深度, 调整空间聚焦位置, 更有利于不同病理方位深度的照射治疗。而磁场的空间分布检测也表明越靠近线圈中心电磁场强度越大, 因此在应用过程中如果需要大的电磁场强度, 需要病灶组织尽量靠近线圈中心。本研究采用场强仪对负载线圈产生的电场进行测试, 其场强小于15 V/m, 且其频率小于2 kHz, 故其几乎无电热效应。

本研究研制的PEMF发生器理论上能够满足不同PEMF非热生物效应的实验研究及部分临床治疗的需要, 具有较大实用价值。然而聚焦线圈面积的大小及形状对磁场的影响和实际非热生物效应的作用效果尚不清楚, 需要做进一步的研究探索。

### 【参考文献】

- [1] KUDO T A, KANETAKA H, SHIMIZU Y, et al. Induction of neuritogenesis in PC12 cells by a pulsed electromagnetic field via MEK-ERK1/2 signaling[J]. Cell Struct Funct, 2013, 38(1): 15-20.
- [2] SISKEN B F, KANJE M, LUNDBORG G, et al. Pulsed

- electromagnetic fields stimulate nerve regeneration *in vitro* and *in vivo*[J]. Restor Neurol Neurosci, 1990, 1: 303-309.
- [3] BYERS J M, CLARK K F, THOMPSON G C. Effect of pulsed electromagnetic stimulation on facial nerve regeneration[J]. Arch Otolaryngol Head Neck Surg, 1998, 124: 383-389.
- [4] STRAUCH B, PATEL M K, NAVARRO J A, et al. Pulsed magnetic fields accelerate cutaneous wound healing in rats[J]. Plast Reconstr Surg, 2007, 120: 425-430.
- [5] OHKUBO C, OKANO H, USHIYAMA A, et al. EMF effects on microcirculatory system[J]. Environmentalist, 2007, 27: 395-402.
- [6] XU S, OKANO H, OHKUBO C. Acute effects of whole-body exposure to static magnetic fields and 50-Hz electromagnetic fields on muscle microcirculation in anesthetized mice[J]. Bioelectrochemistry, 2001, 53(1): 127-135.
- [7] SHERAFAT M A, HEIBATOLLAHI M, MONGABADI S, et al. Electromagnetic field stimulation potentiates endogenous myelin repair by recruiting subventricular neural stem cells in an experimental model of white matter demyelination[J]. J Mol Neurosci, 2012, 48(1): 144-153.
- [8] 焦明克, 胡劼, 焦琳, 等. 低频脉冲电磁场对冻伤组织血液循环的影响[J]. 中国医学物理学杂志, 2013, 30(1): 3946-3949.
- JIAO M K, HU J, JIAO L, et al. The effect of low frequency pulsed electromagnetic fields on blood circulation in frostbite tissue[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2013, 30(1): 3946-3949.
- [9] JING D, SHEN G H, HUANG J H, et al. Circadian rhythm affects the preventive role of pulsed electromagnetic fields on ovariectomy-induced osteoporosis in rats[J]. Bone, 2010, 46(2): 487-495.
- [10] 牛中奇, 侯建强, 周永军, 等. 生物电磁剂量学及人体吸收电磁剂量的数值分析[J]. 生物医学工程学报, 2006, 25(5): 580-584.
- NIU Z Q, HOU J Q, ZHOU Y J, et al. The bioelectromagnetics dosimetry and numerical analysis of electromagnetic dose absorbed by human body[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2006, 25(5): 580-584.
- [11] SMITH T L, WONG-GIBBONS D, MAULTSBY J. Microcirculatory effects of pulsed electromagnetic fields[J]. J Orthop Res, 2004, 22(1): 80-84.
- [12] 鲁雯, 王先运, 刘世民, 等. 低频脉冲磁场治疗仪的研制及临床应用[J]. 中国矫形外科杂志, 1998, 5(5): 443.
- LU W, WANG X Y, LIU S M, et al. The design of clinic application of low frequency pulsed magnetic fields treatment equipment[J]. The Orthopedic Journal of China, 1998, 5(5): 443.
- [13] 焦明克, 楼林, 耿西亮, 等. 基于单片机的智能可调低频脉冲信号源的研制[J]. 医疗卫生装备, 2014, 11: 12-14.
- JIAO M K, LOU L, GENG X L, et al. The development of intelligent adjustable low frequency pulsed signals generator based on single chip[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2014, 11: 12-14.
- [14] 焦明克, 秦明新, 梁文文, 等. 新型MIT激励源和最佳激励线圈的设计与实现[J]. 生物医学工程学报, 2009, 26(2): 234-238.
- JIAO M K, QIN M X, LIANG W W, et al. Design and implementation of a new type excitation source and the optimal excitation coil for MIT[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2009, 26(2): 234-238.