

基于混沌信号的经皮神经电刺激仪的设计

郑金存¹, 张 慧², 梁伟江³, 聂国朝³, 陈铁军¹, 王洪乾⁴

1. 玉林师范学院电子与通信工程学院, 广西 玉林 537000; 2. 玉林师范学院生命科学与技术学院, 广西 玉林 537000; 3. 玉林师范学院纳米医药中心, 广西 玉林 537000; 4. 玉林市红十字会医院, 广西 玉林 537000

【摘 要】传统的电刺激仪器都是采用三角波、方波与非对称波等信号作为刺激信号源,或是将一些特定的信号先进行存储、然后再输出作为信号源,这些信号都呈现出周期性,作用于人体时容易使人产生适应性,随着刺激次数的增多而使效果逐渐变差,论文设计了一个基于混沌模型的非周期信号的电刺激系统。首先是在 MATLAB 软件的 Simulink 平台下构建出混沌模型,然后借助于 DSP Builder 软件将混沌模型转换为 FPGA 的工程文件,通过 Simulink 平台的模型仿真及 Modelsim 软件的行为级仿真,仿真无误后将工程文件在 Altera 公司的开发平台 Quartus 软件下进行编译、综合,最后生成可执行文件,下载到 FPGA 芯片即产生了混沌信号;将信号进行电压放大,功率放大,接入电极,实现了基于混沌信号的电刺激系统。所设计的系统获得了新型的电刺激效果,通过改变混沌方程的参数以及改变信号的输出频率,可以改变刺激时的直观感觉,由于人体的生物信号本身具有复杂的混沌特性,用它作用于人体所具有的更深层次的生物效应还需更多的探索研究。

【关键词】经皮神经电刺激; 电刺激仪; 混沌信号; FPGA

【DOI 编码】doi:10.3969/j.issn.1005-202X.2015.01.021

【中图分类号】R318.6

【文献标识码】A

【文章编号】1005-202X(2015)01-86-06

Design of Transcutaneous Nerve Electric Stimulation Instrument Based on the Chaotic Signal

ZHENG Jin-cun¹, ZHANG Hui², LIANG Wei-jiang³, NIE Guo-chao³, CHEN Tie-jun¹, WANG Hong-qian⁴

1. School of Electronics and Communication Engineering, Yulin Normal University, Yulin 537000, China; 2. School of Life Science and Technology, Yulin Normal University, Yulin 537000, China; 3. NanoMedicine Center of Yulin Normal University, Yulin 537000, China; 4. YulinRed Cross Hospital, Yulin 537000, China

Abstract: Objective The three signals periodic triangle wave, square wave, and asymmetric wave, and the specific store-output signal are often used in the conventional electrical stimulation instruments as the stimulus sources. However, the periodic signal is easy to produce adaptation in the treatment whose effect will decrease gradually with the increasing times. To work well in electric stimulation, we designed a novel system based on the non-periodic chaotic signal. **Methods** Building a chaotic model in the Simulink of MATLAB was the first step. Then the model was converted into the FPGA project file by using the DSP Builder software. And the file was simulated under the Simulink and Modelsim. After the correction, the file was compiled and synthesized. Finally the executable file was downloaded into the FPGA chip and the chaotic signal was generated. Electrical stimulator was created when the voltage and power of the chaotic signal had been amplified. **Results** A novel stimulus effect is achieved by using the stimulator based on the chaotic signal. And the stimulus effect can be changed by the varied Chaotic parameters. **Conclusion** The electrical stimulation instrument based on the chaotic signal changes the design concept of the traditional stimulation instrument. It is necessary to carry out more experiments to apply in the biological effect of human-beings because of the chaos of biological signals.

Key words: transcutaneous nerve electric stimulation; electric stimulator; chaotic signal; FPGA

【收稿日期】2014-08-30

【基金项目】国家自然科学基金 (81260227); 广西科技攻关计划项目 (1298003-2-11); 广西教育厅项目 (201203YB154; 2013YB198); 玉林师范学院校级重点项目 (2014YJZD04)

【作者简介】郑金存 (1979-), 讲师, 硕士, 研究方向: 信号处理及医疗仪器设计; E-mail: fangxin_112@163.com。

【通讯作者】聂国朝 (1960-), 硕士生导师, 研究方向: 生物医学纳米材料, 肿瘤纳米靶向造影剂研究; E-mail: bccu518@163.com。

前言

电刺激疗法是临床康复及神经疾病治疗的重要方法, 是一种花费少、效果好、容易操作的物理治疗方法。在我国人口基数大、老龄化问题突出并且医疗条件相对落后的情况下, 推广电刺激疗法具有重要的意义^[1-3]。然而目前的电刺激仪主要是以方波、三角波、非

对称脉冲波等固定的波形作为刺激信号源^[34],或是将人体的肌电信号存储,然后输出作为刺激源^[5]。这些预先被存储的信号虽然波形有差异,但都呈现出周期性,人体对这些呈周期性的刺激信号容易产生适应性,治疗的效果会随着治疗次数的增多而逐渐变差。一些刺激仪采用音乐信号或者噪声信号作为信号源,从一定程度上缓解了适应性的问题。但是完全随机的信号作用于人体时容易使人产生抵触感,刺激时间过长会使人产生烦躁的感觉。基于上述存在的问题,本文采用混沌信号作为电刺激仪的信号源。

混沌的过程是有序的演变与不确定性结果的有机结合:混沌信号从波形上看类似于无规则的随机噪声;但它又遵循确定的演变规律,由混沌方程产生的各路信号之间能够产生复杂而优美的吸引子^[6]。混沌信号是无周期序列中的有序信号,用它作为电刺激信号源,既可以利用它的随机性缓解人体对电信号的适应性,同时又可以利用混沌信号的规则性增强电刺激过程中的舒适感。本研究用 FPGA 芯片实现了 Lorenz 混沌系统,并实现了降频升压等功能,利用产生的三路混沌信号通过人体皮肤刺激内部神经,在人体上作了初步的测试,获得了新的刺激效果,为电刺激仪的设计提出了一种新的方向。

1 混沌信号的 FPGA 设计方法

1.1 刺激仪的总体设计框图

低频电信号作用于人体有多种形式,最为安全的是通过贴在皮肤上的电极将刺激信号导入到人体神经的刺激方法,称为经皮神经电刺激法。本文在设计及测试时主要是以经皮神经电刺激法作为设计基础,开发了一种基于混沌信号的电刺激仪,与传统的设计方法不同的是,它的刺激信号源不是预先存储的周期信号,而是通过混沌方程的迭代运算而逐步产生的非周期信号。通过改变方程的参数可以实时地调节及控制混沌信号的输出,可以获得不同的刺激效果。将可控的混沌信号应用到电刺激仪的设计是一种积极地尝试,论文首先用硬件实现了混沌信号的产生。

随着 FPGA(可编程门阵列)技术的发展与成熟,采用 FPGA 芯片设计电路系统突显出更多的优势,利用 FPGA 数字技术实现混沌系统也成为了一个新的发展方向^[6]。FPGA 是一种半定制的硬件,只要改变系

统的程序就可以改变硬件结构,这从很大的程度上缩短了开发时间,并且节约开发成本。用 FPGA 产生混沌信号,首先将混沌方程离散化,然后将离散方程用 FPGA 内部的数字逻辑来实现。由于 FPGA 电路具有高速的并行运算能力与精确的时钟同步能力,混沌方程中的多路混沌信号可通过控制全局时钟而实现并行同步输出,有效地满足了电刺激仪的设计需求。

整个系统的框图如图 1 所示,首先是通过 FPGA 技术产生混沌信号,混沌信号经 DA 转换,运算放大。再经过运算放大器进行信号电压放大(正负 3 V),进而通过功率放大器进行功率放大,最后输出电刺激仪所需的刺激电压(正负 15 V 及以上),将产生的刺激信号通过皮肤作用于人体神经。

1.2 混沌信号的 DSP Builder 模型的建立

系统设计的第一步是用 FPGA 芯片产生混沌信号,最有效地开发方法是借助于 DSP Builder 平台设计整个系统。DSP Builder 是 Mathworks 公司与 ALTERA 公司联合开发的系统设计工具,它首先是在 MATLAB 平台下用 Simulink 软件构建出系统的模型^[6],然后再通过 Signal Compiler 控件将系统模型转换成用 VHDL 硬件描述语言组成的 FPGA 工程文件。进而用 FPGA 的开发平台 Altera Quartus 对上述的工程文件进行综合、编译,最后将可输出文件下载到 FPGA 芯片即可实现混沌系统。通过 DSP Builder 平台、各种算法模型在 FPGA 硬件上快速实现,使开发效率成倍提高。

洛伦兹(Lorenz)混沌系统是经典的混沌模型,本文采用洛伦兹模型作为混沌信号的信号源,其系统方程为^[7]:

$$\begin{cases} \dot{x} = -\alpha x + \alpha y \\ \dot{y} = \rho x - y - xz \\ \dot{z} = xy - \beta z \end{cases}$$

当 $\alpha=10, \beta=8/3, \rho=28$ 时系统呈现混沌状态,但采用这组参数时,系统产生信号的幅度太大,不适用 FPGA 硬件来实现,为了使幅度变到合理的范围,通常把方程的参数变换为 $\alpha=9, \beta=1.5, \rho=35$ 并且取采样时间间隔 $dt=0.01$,则被离散化的 Lorenz 系统方程为:

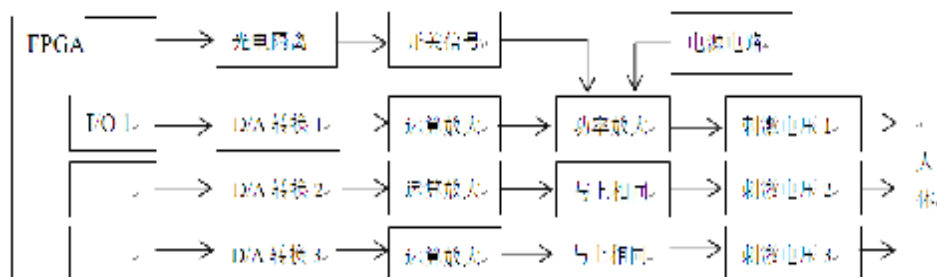


图 1 硬件电路设计框图

Fig.1 Diagram of the Hardware Circuit

$$\begin{aligned}x(k+1) &= 0.91x(k) + 0.09y(k) \\y(k+1) &= 0.35x(k) + 0.99y(k) - 0.2x(k)z(k) \\z(k+1) &= 0.985z(k) + 0.05x(k)y(k)\end{aligned}$$

要构建此系统,首先是在 MATLAB 软件的 Simulink 环境下,借助于 DSP Builder 软件提供的功能模块,构建了图 2 所示的离散混沌系统^[7]。即是用 DSP Builder 提供的模块完成离散方程中的各种运算,主要包括增益放大模块,乘法模块,加法模块,延时模块等,系统将初始值 $x(0)$ 、 $y(0)$ 、 $z(0)$ 分别设置为 0、1、1,则系统在单位冲击脉冲的作用下,系统按照混沌方程的运算规则在晶振频率 (40 MHz) 的速度下进行迭代运算,输出 $x(k)$ 、 $y(k)$ 、 $z(k)$ 三路混沌信号。信号从波形上看类似于随机信号,但每两路信号之间又产生了具有规则形状的相位吸引子,如图 3 所示。

为了能用 DA 模块输出三路混沌信号,需要将数

据经过一定的变换,由于系统采用的是 12 位精度的并行 DA 转换模块,则 12 位二进制能表示的最大的数值为 4096,所以首先需将上述的离散信号 $x(k)$ 、 $y(k)$ 都分别乘上 990 和 860 进行幅度放大,并且都加上一个直流常数 2000 使单极性信号变成双极性信号, $z(k)$ 信号乘上 1300 也变成双极性信号,信号 $x(k)$ 、 $y(k)$ 、 $z(k)$ 的幅度在 0 到 4096 数据范围内波动,如图 3 所示。数据在经过 DA 模块后,数字 0 对应于 -3 V 信号输出,中点 2048 对应了 0 V 的输出,4096 则对应于 +3 V 数据输出,数值在 0~4096 间变化的数字就对应了 DA 模块中 -3V 到 +3V 的双极性输出电压信号。

1.3 混沌信号的硬件实现

图 2 的系统模型构建完成后,在 Simulink 中运行程序,结果如图 3 所示,混沌模型产生了明显的混沌吸引子,表示混沌建模无错误。更进一步是需要把算法在硬件上实现,为了确保硬件实现的可行性,使用

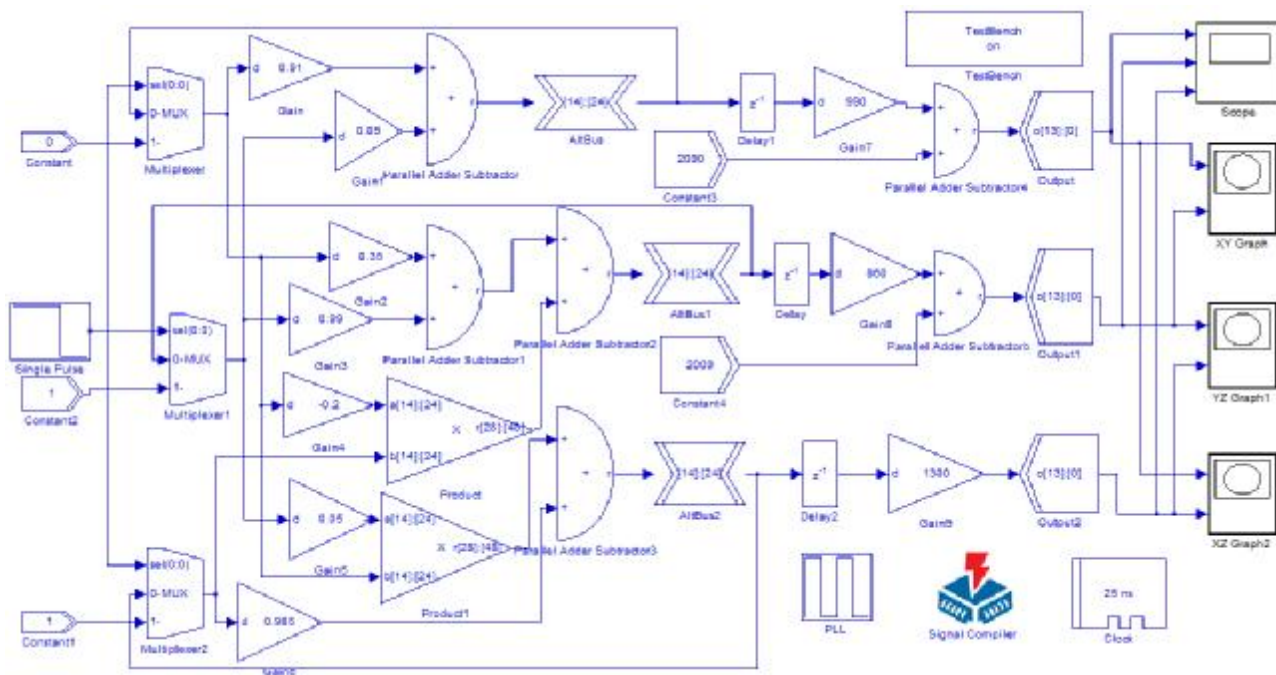
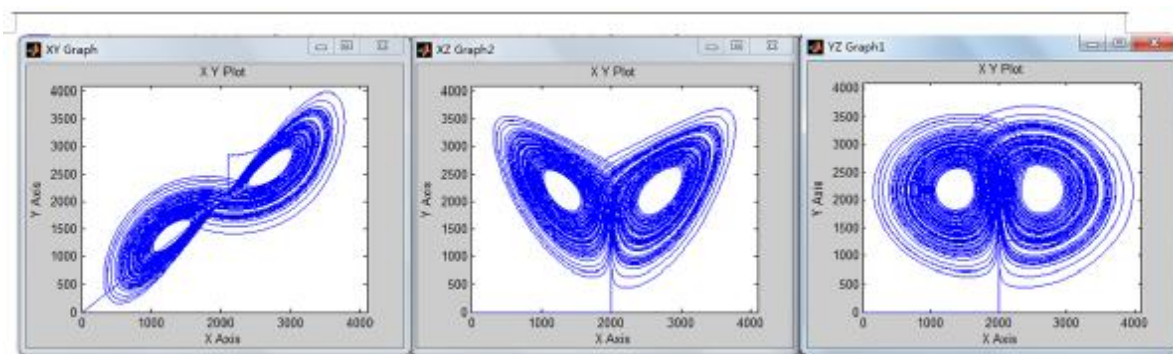


图 2 基于 DSP Builder 的混沌信号的设计模型图

Fig.2 The Model of Chaotic Signals Based on DSP Builder



(a) the phase diagram of signal 1 and 2 (b) the phase diagram of signal 2 and 3 (c) the phase diagram of signal 1 and 3

图 3 Simulink 平台下信号的混沌吸引子

Fig.3 Simulation of Chaotic Attractor By the Simulink on MATLAB

Modelsim 仿真软件对系统进行行为级的仿真是重要的一步,仿真无误后则可将模型在 FPGA 硬件上实现。

论文采用了 Altera 公司 Cyclone 系列的 EP1C12-Q240C8N 芯片设计混沌系统,芯片采用 PQ240 封装,容量为 130 万门,采用的配置芯片为 Altera 公司的专用配置 PROM 芯片 EPCS1S,实现加电自动配置的功能,系统晶振的频率为 40 MHz。

在混沌模型仿真无误后,采用 DSP Builder 中的 Signal Compiler 模块将所建立的混沌模型编译成由 VHDL 语言组成的 FPGA 工程文件,然后将工程文件在 FPGA 的开发平台 Quartus 软件下进行合成、综合及布局布线。编译完成后,需要通过手工配置对 FPGA 进行引脚分配,使 FPGA 芯片的引脚与外部的晶振引脚、复位信号按键、以及三路 DA 模块相连。先是通过 36 个 I/O 引脚输出 3 路混沌信号 $x(k)$ 、 $y(k)$ 、 $z(k)$,每路信号为 12 位,则方程中运算所得到的混沌信号通过 DA 转换后变成了模拟电压输出,被用作为电刺激仪的信号源。其次是通过另外的 3 个 I/O 引脚输出 DA 转换芯片的时钟信号,并且通过 12 个 I/O 引脚输出 6 路选择信号及 6 路开关保护信号。设置完成后执行下载操作,则图 2 中的各个功能模块就转换成了相应的硬件电路,芯片内部的各个部分随着晶振的震荡频率进行迭代运算,产生三路混沌信号。

1.4 混沌信号的输出及 DA 转换

DA 模块是将数字信号转换为模拟信号的重要模块,为了能用模拟电压值输出了 $x(k)$ 、 $y(k)$ 、 $z(k)$,三路混沌信号,设计了三组结构相同的 DA 转换模块^[7-8]。转换芯片采用 12 位并行的高速数模转换芯片 DAC902E,它将 FPGA 输出的 12 位数字信号转换为电流型输出信号。两路电流信号采取差分互补的方式输入到运放芯片,电流信号将转换为电压输出的信号,如图 4 所示。运放芯片采用 OPA690,芯片 OPA690 内置负电压转换模块,由单端 5 V 供电,可以提供正负 5 V

的供电电源,根据差分放大电路的原理。改变 R3 及 R8 的大小可以改变输出信号的电压幅度。当取 R3、R8 都为 4 K 的时候,输出信号为 -3 V 到 +3 V。

为了保证三路 DA 模块的同步输出,需要给模块加上统一的时钟信号。设计中将系统的全局时钟信号作为 DA 模块的转换时钟,在没有分频之前,全局时钟的频率即为系统的晶振频率 40 MHz,由于硬件中的混沌方程是按全局时钟的频率而进行运算的,即每隔一个时钟周期,混沌方程输出一组数据,用全局时钟作为 DA 转换的时钟信号则正好保证了方程运算过程中的每一个数据都通过 DA 模块输出,而没有数据的丢失。

系统上电后,则硬件系统开始进行混沌运算,从三块 DA 转换模块中输出了三路混沌信号,如图 5 所示。产生的混沌信号是幅度为 -3 V 到 +3 V 的双极性信号,从信号波形可以看出,混沌信号既具有一定的重复性,也具有一定的随机性,用它作为电刺激的信号源是一种积极的探索。

根据混沌的理论,并根据图 3 的仿真结果,用硬件输出的三路混沌信号之间应能产生优美的相位吸引子。测试中将任意两路信号输入安捷伦示波器,观察其相位特性,并将相位图通过示波器自带的存储功能进行存储,其结果如图 6 所示,三路信号间产生了明显的吸引子。由于方程进行了离散化,所以所产生的吸引子也是离散的,并带有少量的失真,但用数字设计方法的灵活性依然突显了它的设计优势。

2 信号的降频处理及信号的升压变换

在上述的系统中,信号的输出速度是由系统的晶振频率决定的,系统采用的是 40 MHz 的晶振,DA 模块的时钟信号也与系统时钟相同,则按此速率输出的信号频率相当高。而在电刺激信号中,所要求的电刺激信号的频率在 100 Hz 以下。因此必需对所产生的三路混沌信号进行降频处理,由于混沌信号是非周期

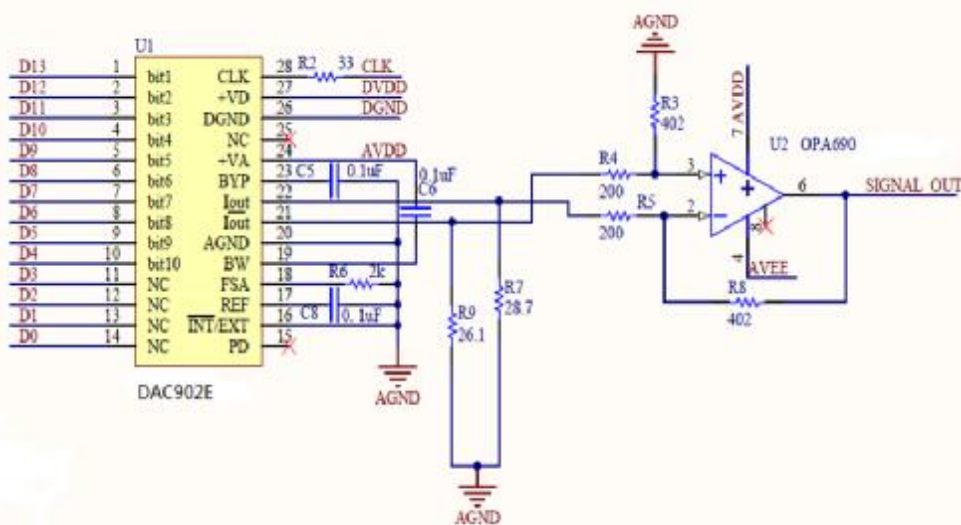


图 4 DA 转换电路原理图

Fig.4 Schematic Diagram of D/A Conversion Circuit

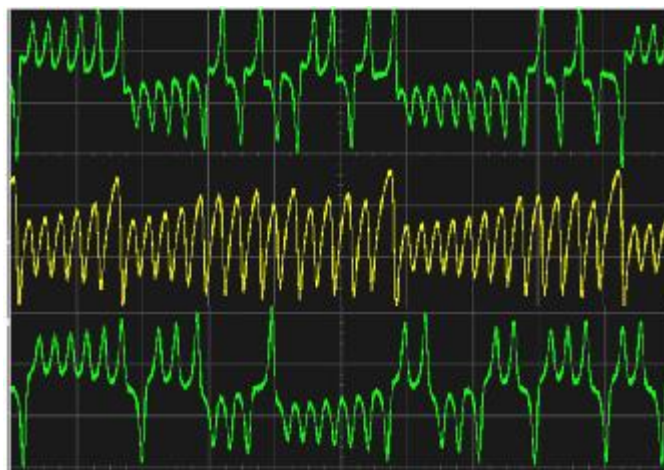


图 5 系统输出的 3 路混沌信号时域图

Fig.5 Three Signals Output By Chaotic System

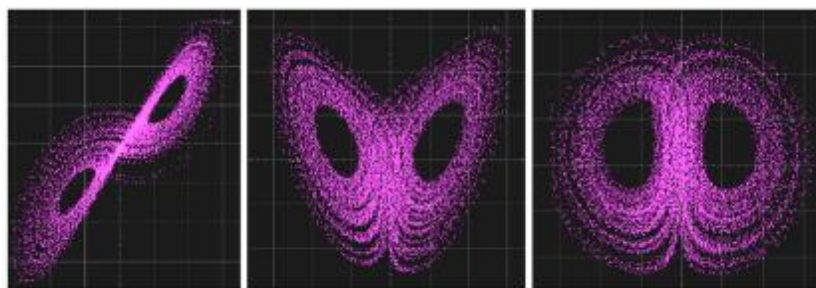


图 6 用示波器观察到的混沌吸引子

Fig.6 Chaotic Attractor observed by Oscilloscope

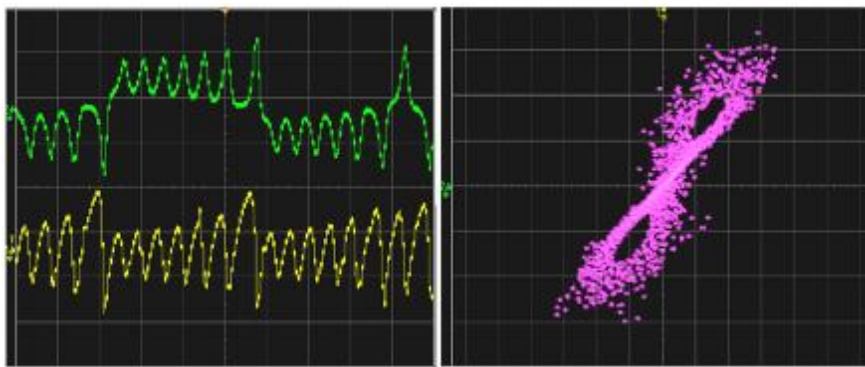


图 7 降频后的两路混沌信号(左)以及相图(右)

Fig.7 Two Signals Whose Frequency are Turned Down and New Chaotic Attractor

信号,所以文中降频处理是指将频率下降到人体感觉到舒适为宜。

可以通过两种方法达到信号降频的目的:一种是更换晶振,降低晶振的频率,但是这种方法需要更改硬件,参数的调整不灵活;二是将系统的时钟频率进行计数延时,也就是设计一段延时程序,对系统的全局时钟进行计数,在计数值达到设定的数值后,系统才产生一次 0 到 1 的交替变化,利用延时后的交替变化的波形代替原来的全局时钟,就达到了降频的目的。所设定的计数数值越大,则延时的时间就越长,所对应的时钟频率也就越低,输出的信号频率也就越

低。其具体的操作方法就是在 FPGA 工程文件中、找到对应的时钟模块,将一段用 VHDL 语言描述的延时程序添加到时钟实体中,用延时后的时钟代替原来的系统时钟。通过调整延时的数值,信号的频率就可调整到电刺激仪所需要的频率范围。

通过降频后的 $x(k)$ 与 $y(k)$ 两路信号如图 7 的左图所示,信号的频率降低后,信号的波形在时域上变得比原来稀疏,但是两路信号之间仍然能产生混沌的吸引子,吸引子的轮廓清晰、如图 7 的右图所示,这说降频所得到的低频的混沌信号依然具有混沌的特性。

混沌信号的产生是系统设计的关键,要使用混沌

信号作用于人体,还需要将混沌信号放大为电压信号或者电流信号。电流模式广泛应用于植入式电刺激模式,而电压信号则常用于表面功能电刺激^[9],因此本设计采用了电压刺激模式,由于产生的信号是 100 Hz 左右的低频信号,信号的频率恰好属于音频的频率范围(20 Hz~20 kHz),因此在测试时,我们直接将产生的混沌信号通过音频功率放大器进行放大,音频功率放大技术已经是一种应用广泛、稳定性高的功率放大技术,放大后的信号平滑而没有毛刺。采用电极片将放大后的信号通过皮肤导入,调节输出功率旋钮,当输出信号幅度正负 15 V 的范围时,肌肉有了明显的收缩感,获得了一种新的刺激效果。

3 结束语

本研究提出了利用混沌信号作为刺激信号的电刺激仪的设计方法,用 MATLAB 的 Simulink 软件构建出混沌模型,并用 FPGA 设计出硬件系统,产生的混沌信号经降频及升压后作用于人体,在人体上做了初步地测试,获得了一种新的刺激效果,达到了预期的目的。然而更多的问题还有待更深入的探索,首先是这种刺激信号所引起的更深层次的生物效应还需要更进一步的研究,其次是由三路信号组成的面阵的刺激效果也值得更多的探索^[11],再次就是哪一种混沌模型具有最佳的刺激效果也还需要更漫长的探索。

【参考文献】

- [1] 燕铁斌. 神经肌肉电刺激及其在痉挛性瘫痪治疗中的临床应用[J]. 中国康复理论与实践, 2003, 9(3): 155-158.
Yan TB. Neuromuscular electrical stimulation and its clinical application in the treatment of spastic paralysis[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2003, 9(3): 155-158.
- [2] 燕铁斌. 积极推广神经肌肉电刺激技术在中枢神经损伤中的应用[J]. 中国康复医学杂志, 2007, 22(10): 865-866.
Yan TB. Promote the application of neuromuscular electrical stimulation technology in central nerve injury actively[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2007, 22(10): 865-866.
- [3] 郑金存. 一种视力保健仪: 中国, 0710176.2[P]. 2013-03-13.
Zheng JC. A vision health instrument: Chinese patent, 0710176.2[P]. 2013-03-13.
- [4] 李海云, 王永发, 李菁锦, 等. 一种单片机控制的电脉冲刺激脑瘫病治疗仪的研制[J]. 医疗设备信息, 2003, 18(12): 12-14.
Li HY, Wang YF, Li JJ, et al. An apparatus based on microprocessor control for epilepsy treatment [J]. Information of Medical Equipment, 2003, 18(12): 12-14.
- [5] 徐敏. 功能性电刺激治疗系统的研制[D]. 北京交通大学, 2009.
Xu M. The Research of the therapeutic system with functional electrical stimulation [D]. Beijing Jiaotong University, 2009.
- [6] Zheng JC, Tang ZL, He YH, et al. Sensitive detection of weak absorption signal in photoacoustic spectroscopy by using derivation and wavelet transform [J]. J Appl Phys, 2008, 103: 1-4.
- [7] 陈谟. 混沌系统电路实现研究 [D]. 南京理工大学, 2009.
Chen S. The research on circuit implementation of chaotic system [D]. Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [8] 裴跃生. 基于 FPGA 的便携式低频脉冲治疗仪的研制[D]. 重庆大学, 2009.
Pei YS. Development of a portable low frequency electronic pulse therapeutic apparatus based on FPGA [D]. Chongqing University, 2009.
- [9] 郑科佳. 应用于表面阵列电极的可编程多通道刺激器的研制[D]. 华中科技大学, 2012.
Zheng KJ. Development of programmable multichannel stimulator used for surface array electrodes [D]. Huazhong University of Science and Technology, 2012.