

基于Rössler混沌模型的神经电刺激系统的设计与实验研究

郑金存^{1,3}, 聂国朝², 刘永建³, 龙佳佳⁴, 张慧⁵, 伍春华²

1. 玉林师范学院电子与通信工程学院, 广西 玉林 537000; 2. 玉林师范学院纳米医药中心, 广西 玉林 537000; 3. 玉林师范学院广西高校复杂系统优化与大数据处理重点实验室, 广西 玉林 537000; 4. 广西壮族自治区民族医院康复医学科, 广西 南宁 530001; 5. 玉林师范学院生命科学与技术学院, 广西 玉林 537000

【摘要】基于Rössler混沌模型的神经电刺激系统的实现方法,介绍了设计原理、实现过程及测试方案。混沌信号的规则性保证了电刺激的舒适感,混沌信号的内随机性保持了电刺激的多样性,并通过变化混沌方程中的参数,获得了丰富的电刺激效果。为了探索混沌电刺激的应用优势,设计了基于机器视觉的非接触测量系统,实验结果表明混沌电刺激能使青蛙腿部保持较大的幅度持续抖动,具有潜在应用优势,而连续波与疏密波的持续刺激使青蛙腿部的抖动幅度衰减更快,这可能是由于混沌电刺激延缓了耐受的产生或者是降低了电刺激的疲劳程度。混沌模型使得电刺激的规则性与多样性得到统一,可改善当前市售电针仪所存在的一些问题,其统一的数学模型为规范当前电刺激仪的设计提供了新的方向。

【关键词】青蛙;Rössler混沌模型;神经电刺激;混沌应用;电刺激参数

【中图分类号】R318.6

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2017)11-1142-08

Design and experimental research of an electrical nerve stimulation system based on Rössler chaotic model

ZHENG Jincun^{1,3}, NIE Guochao², LIU Yongjian³, LONG Jiajia⁴, ZHANG Hui⁵, WU Chunhua²

1. School of Electronics and Communication Engineering, Yulin Normal University, Yulin 537000, China; 2. Nano Medicine Center of Yulin Normal University, Yulin 537000, China; 3. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Complex System Optimization and Big Data Processing, Yulin Normal University, Yulin 537000, China; 4. Department of Rehabilitation Medicine, Guangxi Zhuang Autonomous Region National Hospital, Nanning 530001 China; 5. School of Life Science and Technology, Yulin Normal University, Yulin 537000, China

Abstract: This report presents a new design for electrical nerve stimulation system based on Rössler chaotic model, and describes the design principles, procedures and test methods. The result shows that the chaotic signal is an ideal signal source in the electrical nerve stimulation. The regularity of chaotic signals provides comfort for patients during treatment, and the randomness within chaotic signal maintains the diversity of the electrical stimulation. Various electrical stimulation effects are achieved by varying the chaos equation parameters. In order to explore the application advantages of chaotic electric stimulation, a non-contact measurement system based on machine vision is designed. The experimental results show that the chaotic electric stimulation can make the frog leg maintain continue vibration in a large amplitude, with potential application advantages, while the periodic stimulation (continuous wave and sparse-dense wave) attenuates the jitter of the frog leg faster, which may be due to the delay in the generation of tolerance or the reduction of the fatigue level of electrical stimulation because of the chaotic electrical stimulation. Chaos model makes the rules and diversity be included in electrical stimulation procedure and improves the performance of the current commercially available electrical stimulator. The unified mathematical model provides a new direction for the standard of the current electrical stimulation parameters.

Keywords: frog; Rössler chaotic model; electrical nerve stimulation; chaos application; electrical stimulation parameters

【收稿日期】2017-06-29

【基金项目】国家自然科学基金(81660508);广西高校复杂系统优化与大数据处理重点实验室开放基金(2015CSOBDP0302)

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

【通信作者】聂国朝, 硕士, 研究方向: 生物医学纳米材料, 肿瘤纳米靶向造影剂, E-mail: bccu518@163.com

前言

神经电刺激技术一直是神经系统疾病的有效治疗方法^[1-3]。其主要的应用形式分为植入式电刺激与非植入式电刺激。植入式电刺激是通过手术将电极植入人体内部,其复杂的操作过程只能在大型医疗机构实施,难以普及;非植入式的电刺激具有非常灵

活的应用形式,电流可通过贴在皮肤表面的电极刺激人体神经,称为经皮神经电刺激,也可通过针灸针破皮刺入,将电信号经针灸针导入人体部位治疗疾病,称为电针治疗。由于非植入式电刺激具有治疗成本低,副作用小,操作相对简单等特点,受到了广泛应用。对于我国,普及发展电刺激应用具有重要的意义^[4]。然而,临床上的一些实际问题阻碍了经皮神经电刺激技术与电针技术的应用及推广。首先,我国对电刺激仪的参数指标(波形、频率、幅度、脉宽等)尚缺乏规范标准,其次是对仪器操作缺乏统一的操作规程,这使得不同的操作者在使用电刺激治疗某些疾病时,取得了不一致的效果。例如一些研究小组把电刺激技术治疗慢性疼痛的疗效归结为“安慰剂”的作用,而大多数的研究小组则认为判定电针无效的草率结论是由于操作方法不规范及实验设计不合理引起的^[4]。

为了使电针治疗的效果具有可比性,仪器的参数应该具有相对统一的规范标准。规范电刺激参数的难点在于:电针参数的多样性与规则性是相互矛盾的。使电刺激仪输出较单一的电刺激参数,这很容易实现,但规则的电刺激信号会使人体在治疗过程中产生适应性,降低治疗的效果,所谓的适应性是指在固定频率和幅值的电脉冲序列的刺激下,刺激效果会随时间延长而逐渐减弱的现象,这是当前电针治疗存在的主要缺陷。把随机信号、音乐信号和被调制的脉冲信号应用于电刺激仪器,可以改善适应性对治疗效果的影响,但这些信号都缺乏规则性,完全随机的信号刺激人体时会使人产生烦躁的感觉,目前在临床上应用较少。

理想的电刺激波形应该是规则性与多样性的统一,规则性保证刺激的舒适感,多样性延缓耐受的产生。而混沌信号正是具备了规则性与多样性的特征,当混沌方程的参数改变时,输出信号从周期信号逐渐过渡到非周期的混沌信号,可获得形式多样的电刺激感。混沌信号是由统一的数学模型产生,利用统一的数学模型规范,这对当前电针仪器的设计及生产具有重要的指导意义。

将混沌理论应用于神经电刺激技术是康复医学领域的新思路,景军^[5]提出了混沌序列在电刺激应用中的设计思路,但未阐述具体的实现方法及测试效果。刘显波等^[6]的专利(混沌多维电刺激系统)介绍了基于混沌电路的神经电刺激系统,但该系统采用模拟电路实现,输出信号的幅度及频率难以调整到适合于神经电刺激所需的参数,应用受限。本研究将Rössler混沌模型应用于神经电刺激系统的设计

中,介绍了系统的设计方法及最终的测试结果,较为完整地阐述了混沌模型在康复医学领域的应用。实验结果表明,Rössler混沌信号在神经电刺激的应用中具有潜在优势,混沌数学模型对规范神经电刺激参数具有指导意义。

1 系统设计方法

1.1 Rössler混沌信号用于神经电刺激系统设计的理论基础

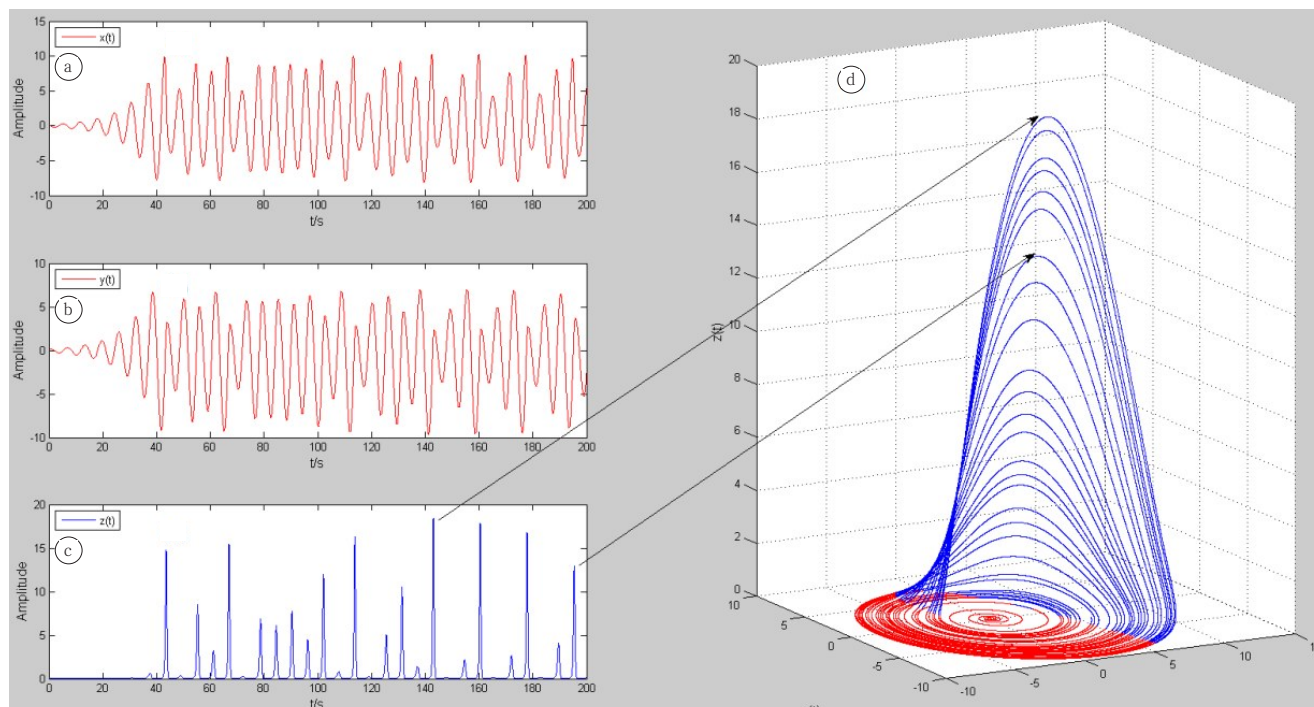
混沌是无序与有序的统一,是局部不稳定和整体稳定的统一,是非线性系统所独有的一种非周期运动形式,至今对混沌没有统一的定义。混沌所具有的遍历性、有界性、内随机性是系统设计的基础。

气象学家Lorenz在研究大气热对流时引入了一个非线性微分方程组,Rössler对该方程组进行了简化,得到只含一个非线性项且能产生混沌运动的微分方程组,其动力学方程如系统(1)所示。其中 x 、 y 、 z 为输出的三路混沌波形,文中用 $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$ 表示 x 、 y 、 z 随时间 t 的输出波形,方程中的 α 、 β 、 γ 为混沌参数,改变混沌参数可改变信号的输出特性。

当Rössler混沌系统(1)中的参数 $\alpha=0.2$ 、 $\beta=0.2$ 、 $\gamma=5.1$ 时,系统处于混沌状态,系统的时域波形图如图1所示。图1a的 $x(t)$ 与图1b的 $y(t)$ 是具有一定规律的震荡信号;图1c的 $z(t)$ 是持续时间非常小、形状类似于冲激函数 $\delta(t)$ 的脉冲波形;图1d描述了 $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$ 的三维相图。从图1c~d可看出, $z(t)$ 信号的形状一直保持相对规则的脉冲信号,其脉冲宽度会有微量的变化,同时 $z(t)$ 的幅度与频率随机地变化,体现了规则性与多样性的统一^[7]。

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -y - z \\ \frac{dy}{dt} = x + \alpha y \\ \frac{dz}{dt} = \beta + z(x - \gamma) \end{cases} \quad \text{系统(1)}$$

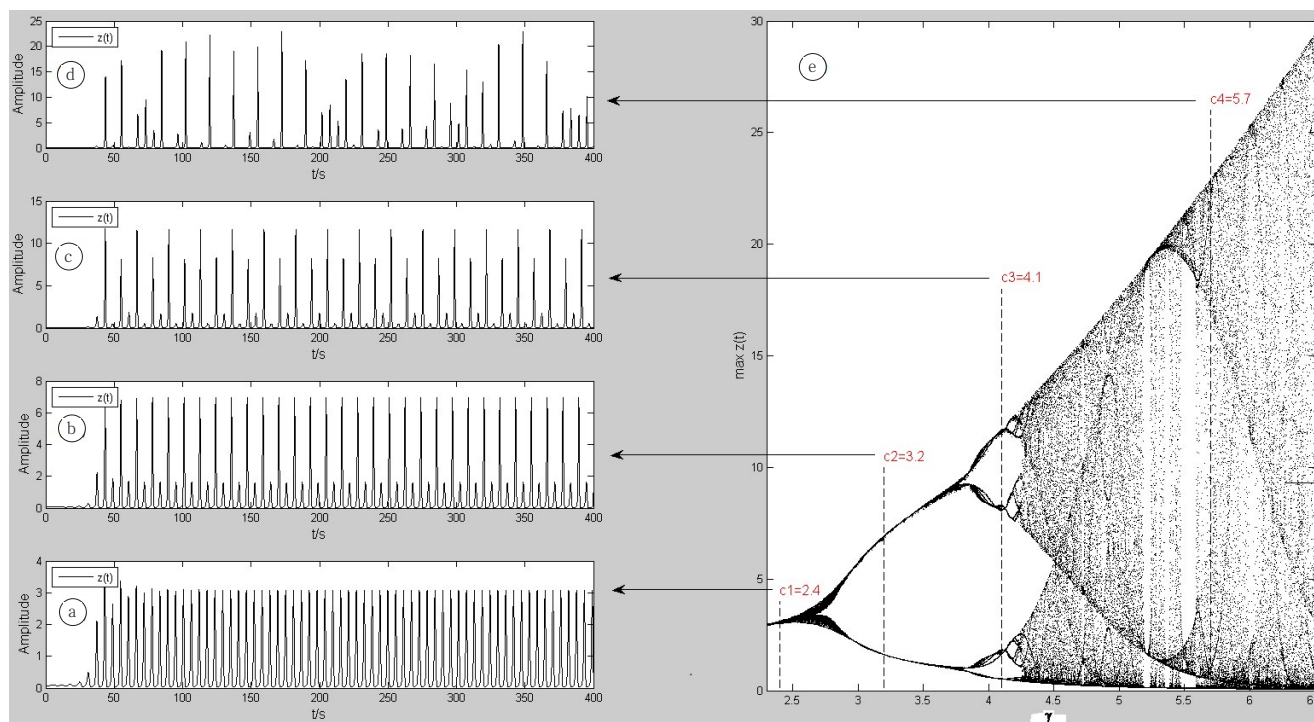
将系统(1)的参数 α 、 β 固定为0.2, $x(0)$ 、 $y(0)$ 、 $z(0)$ 初始状态分别为0.01、0.01、0.02,变化参数 γ 的值,其 $z(t)$ 的输出过程如图2所示。当 γ 的值从2.3变化到2.6时,输出的 $z(t)$ 为图2a所示的单周期信号,具有相同的幅值;当 γ 的值大于2.6(如 $\gamma=3.2$ 时),输出的 $z(t)$ 为具有二种不同输出幅度的双周期信号,其输出幅度值分别为1.8和7.0,如图2b所示;当 γ 为4.1时,输出 $z(t)$ 为4种不同幅度的周期信号,其输出的幅度分别为0.8、2.0、8.0、12.0,如图2c所示;当 γ 的值继续增大, $z(t)$ 的输出信号逐渐进入混沌状态,其输出信号不再是周期的规则信号,而是具有随机特性的多幅度



a: Output waveform of $x(t)$; b: Output waveform of $y(t)$; c: Output waveform of $z(t)$; d: Three-dimensional phase diagram of $x(t)$ - $y(t)$ - $z(t)$

图1 Rössler混沌输出

Fig.1 Output of Rössler chaotic system



a: $\gamma=2.4$; b: $\gamma=3.2$; c: $\gamma=4.1$; d: $\gamma=5.7$; e: Bifurcation diagram for the $z(t)$ of Rössler chaotic system

图2 混沌系统的 $z(t)$ 输出

Fig.2 $z(t)$ of Rössler chaotic system

输出信号;当 $\gamma=5.7$ 时, $z(t)$ 脉冲的输出幅度在 0 至 23 之间随机变动,如图 2d 所示。

图 2e 图描述了 $z(t)$ 信号的分岔过程,图中的横轴为参数 γ 的值,取值为 2.3~6.5,纵轴为参数 γ 所对应

的 $z(t)$ 输出幅度的极大值。由图可知,信号 $z(t)$ 的输出首先是单周期输出,随着 γ 值的增大, $z(t)$ 信号出现了二周期、四周期、八周期的分岔现象和幅度不等的多类型脉冲输出,当系统处于混沌状态时, $z(t)$ 的幅度及频率都随机地变化,并且脉宽有微量变化。变化的信号经调制后通过电极作用于人体时,会产生不同的刺激感。变化的幅度、脉宽和频率为电刺激提供了多样性,延缓了电刺激耐受性的出现,而始至终保持的脉冲输出又保证了电刺激的舒适感,混沌信号 $z(t)$ 是理想的电刺激信号源^[8-10]。

图2所示的 $z(t)$ 信号是大于0 V的正电压脉冲,是单极性脉冲。由于电荷不平衡的原因,单极性脉冲作用于人体时会使机体产生热效应,并可能产生电解、电泳和极化等现象,影响治疗效果^[11]。因此临床上都采用交流双向脉冲信号作为刺激信号源,本研究为此设计了转换电路,将单脉冲信号变为双极性脉冲信号,实现了理想的电刺激效果。

1.2 混沌电刺激系统的硬件实现

混沌电刺激系统首先是用PC机与数据采集卡产生混沌信号,再对混沌信号进行调制、放大,变成适宜于神经电刺激所需的高电压、低电流的刺激信号,系统的整体框图如图3所示。系统用PC机在LABVIEW开发平台下构建Rössler混沌模型,然后将混沌模型中的 $z(t)$ 信号采用NI(National Instruments)公司的数据采集卡(型号:USB 6251)进行数据输出,其采集卡具有2个16位的模拟量输出通道,经变换后的 $z(t)$ 通过此模拟通道输出,混沌模型的构建及数据输出在作者之前的工作中有介绍^[12],在此不再赘述,主要论述将混沌信号转换为脉冲电刺激信号的实现方法。

为了防止电刺激过程中产生极化现象,采用双

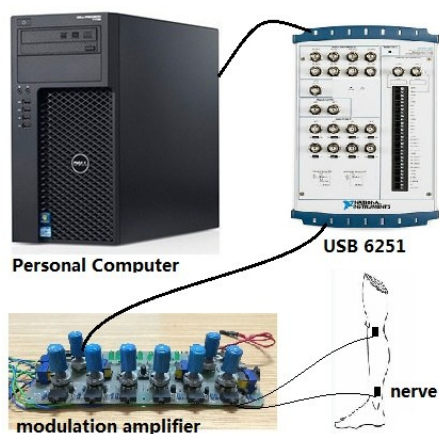


图3 混沌电刺激系统的整体框图

Fig.3. System diagram of electrical nerve stimulator based on chaotic system

向对称脉冲波或双向非对称脉冲波是理想的解决方案。对称脉冲波的正电压波形与负电压波形完全对称,电刺激时能使两电极片的正极与负极的概念完全消失,在植入式电刺激中使用较多。而非植入式电刺激数采用双向非对称脉冲波,其波形如图4d所示,其脉冲的正电压波形与负电压波形不对称,但上下两部分的面积相同,可以很大程度上降低适应性对治疗效果的影响,因此被国内外大部分仪器生产商所采用。

图2e可看出,当参数 α 、 β 固定时, $z(t)$ 的整体输出幅度随着 γ 的增大有较大的波动,此信号作用于神经时,受试者会因为刺激信号的大范围波动而产生不适感。为此,程序设计时先将 $z(t)$ 的信号进行归一化处理,即把产生的 $z(t)$ 信号的每一个值除以 $z(t)$ 序列中的最大值,把原始信号的最大值变成幅度为1的信号。除此之外,还需将归一化的 $z(t)$ 信号做翻转及幅值移位的处理,即用常数1减去经归一化的 $z(t)$ 值,处理的 $z(t)$ 信号如图5b所示。经变换后,原来为0的点变成了1,原来为1的点变成了0,实现了信号翻转及幅度变化处理。

经变换后的 $z(t)$ 信号从NI采集卡的模拟输出通道输出,用示波器观察到的波形如图4a所示。图4a与图5b的波形几乎完全一致,说明NI公司的数据采集卡具有高精度的数据再现能力,PC机仿真的数据与实际的输出数据保持高度一致,为提高系统可靠性提供了保障。

为了把图5b的混沌信号 $z(t)$ 转换为非对称的脉冲波,作者设计了如图6所示的变换电路,主要是利用三极管的开关特性对脉冲信号 $z(t)$ 进行变换,然后通过变压器将该脉冲波形的幅度放大,使其符合电刺激所需的电压标准。

图6的a、b两端是信号的输入,c、d两端是信号的输出。当a、b两端的电压高于0.7 V时,三极管Q1导通,则图中3点处为低电平,三极管Q2、Q3截止。变压器T1的输入及输出都为0 V,即c、d两端的电压为0 V。当a、b两端有低于0.7 V的电平脉冲时,三极管Q1截止,则电路中的3点处为高于0.7 V的电平,则Q2导通,三极管Q3的基极8点为高电平,三极管Q3导通,此时,把变压器的输入端接入12 V的高电平,电压经过变压器T1的放大,可使输出产生电流小于40 mA的电刺激波形,满足电刺激的需求。电压的范围可通过调节电位器R8进行调整。当a、b两端输入电压低于0.7 V时,变压器的输出端从负电压逐渐衰减到0,构成了脉冲波的负半部分的波形。

电路先用NI multisim软件进行仿真测试,仿真的输入为图6左边椭圆所示的窄脉冲波,此脉冲波与



a: Transformed $z(t)$ signal; b: Bipolar asymmetric pulse wave; c: Amplified detail signal of Fig. 4a; d: Amplified detail signal of Fig. 4b

图4 示波器测量结果

Fig.4. Measurements with an oscilloscope

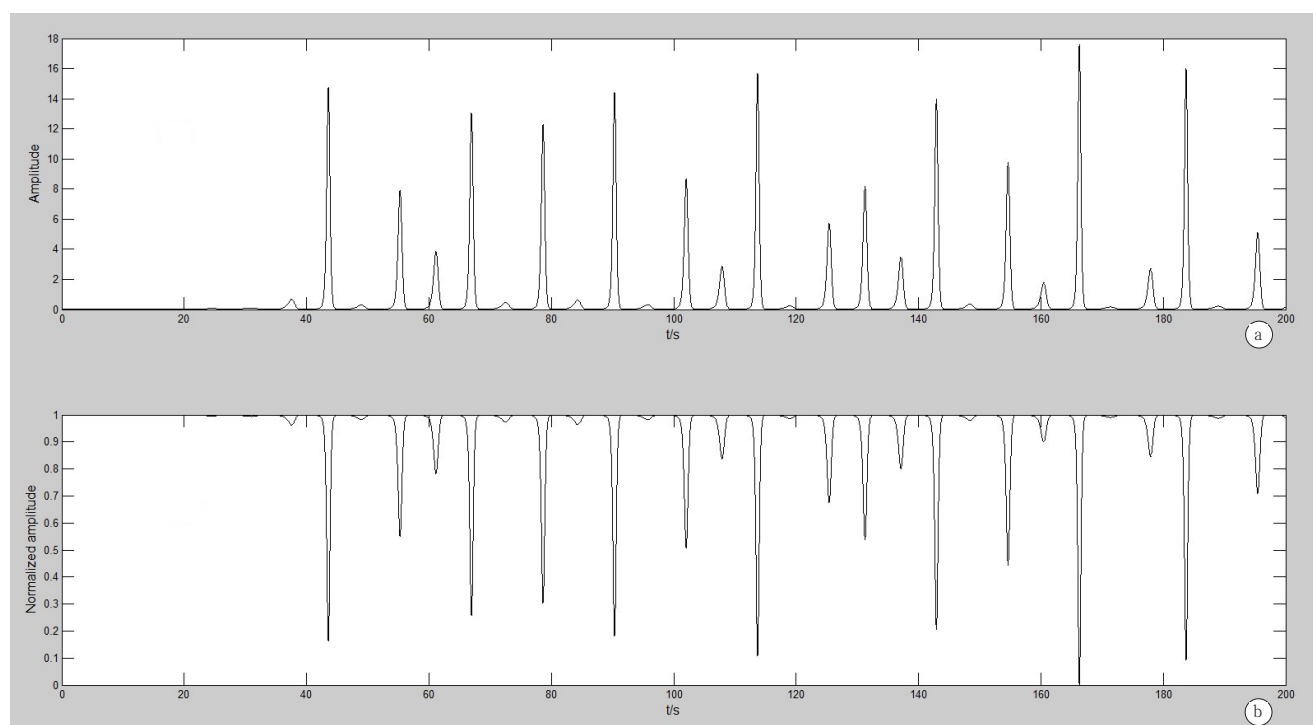


图5 原始的 $z(t)$ 信号(a)和变换后的 $z(t)$ 信号(b)

Fig.5 Original $z(t)$ signal (a) and transformed $z(t)$ signal (b)

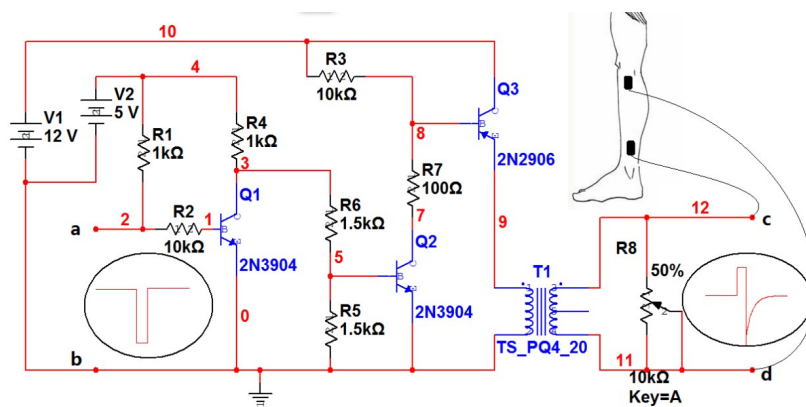


图6 Rössler混沌信号变换为双极性非对称脉冲的电路图

Fig.6 Circuit diagram for transforming Rössler chaotic signal to bipolar asymmetric pulse

变换后的 $z(t)$ 信号相当。经电路变换后,输出了图6右边椭圆所示的双极性非对称脉冲波。实现了信号的变换,可通过调节R8的值改变输出的大小,通过变压器T1实现放大。

将图4a所示的数据采集卡输出的波形输入到图6的a、b两端,则从图6的c、d两端输出了双极性非对称脉冲波,用示波器观察到的波形如图4b所示,实现了单极性向双极性的转变,获得了基于混沌信号的电刺激波形,并满足了电刺激的需求。

2 混沌电刺激效果测试

为了测试混沌电刺激的效果,采用经皮神经电刺激的方法,通过粘附在作者皮肤上的两电极片导入混沌信号,测试方法如图6所示。当参数 α 、 β 的值固定为0.2, γ 的值从2.4变化到5.7时,输出波形如图7所示,相应的电刺激效果如表1所示。当参数 γ 逐渐由小变大时,电刺激的波形由简单变复杂,电刺激的感觉也逐渐多样化。基于混沌模型的电刺激系统包含了现有的市售电针仪的所有电刺激波形,并且在改变参数 γ 时,输出端也产生了新颖的电刺激效果。由于混沌系统具有统一的数学模型,将此模型用于规范整个电针行业的仪器设计具有指导作用。

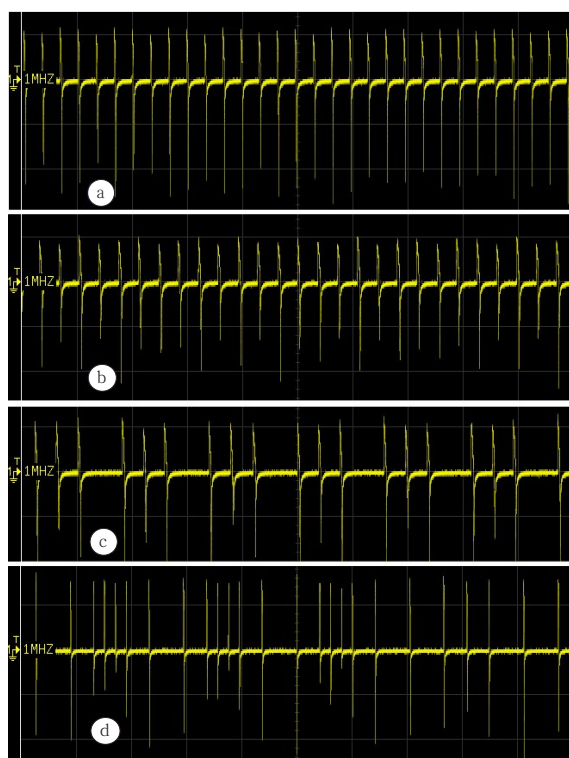


图7 示波器测量到的双极性非对称脉冲串(a: $\gamma=2.4$; b: $\gamma=3.2$; c: $\gamma=4.1$; d: $\gamma=5.7$)

Fig.7 Bipolar asymmetric pulse wave measured with an oscilloscope (a: $\gamma=2.4$; b: $\gamma=3.2$; c: $\gamma=4.1$; d: $\gamma=5.7$)

3 混沌电刺激的动物实验测试

混沌模型用于神经电刺激的思路之前已有提出,但要验证混沌电刺激的实际效果却相当困难。因为电刺激仪器在我国属于二类医疗器械,即便是使用条件较为宽松的电针仪,要走上临床验证也须经过严格的规程审查,难以获得大量的、有用的临床对照数据,本研究通过动物实验数据对混沌电刺激的效果进行了初步的验证。

青蛙的腓肠肌实验在生理学课程中得到了广泛的普及,实验过程为将不同频率不同幅度的电信号作用于腓肠肌标本,引起标本不同形式的收缩。然而,之前的实验都是在离体的形式下进行的,要将青蛙的腿部剪下做成标本,并且需要用任氏液保持腓肠肌神经的活性。而对于不经处理的、无损伤的活体动物,由电信号刺激其腓肠肌所引起的收缩情况却很少有研究。但活体的电刺激与临床的应用模型更为接近,值得更多的探索,为此作者构建了实验平台,设计了对照实验。

为了获取对照数据,实验选取临床上广泛使用的华佗牌电针仪(型号:SDZ-V)作为对照仪器,这是由于华佗牌电针仪在市场上有很大的保有量并具有完善的性能指标,在电刺激仪器中具有代表性。

将电信号通过针灸针导入青蛙的腿部神经时,会引起青蛙腿部不同程度的抖动,为了测量不同电参数刺激引起的抖动情况,作者设计了基于机器视觉技术的非接触测量系统^[13],其测试的原理如图8所示。首先是用白纸制作一个特殊的靶标,靶标的中心点是黑白对比程度最高的点,称为鞍点。将此靶标悬挂于青蛙的腿部,其腿部的抖动会使鞍点位置改变,用工业相机记录该鞍点的位置变化情况,并用程序计算总的振动路径即可记录下青蛙腿部的抖动情况。由于靶标是采用白纸制作,质量非常轻,对青蛙腿部的振动测量不会有影响。

实验所采用的工业相机为Imaging工业相机(德国映美精,型号:DMK23G618),其相机的最高拍摄帧率可达120 fps,根据采样定理,该相机可以有效地记录下青蛙腿部的抖动情况。测量系统采用Halcon开发平台(德国MVTec公司)进行开发,该软件的鞍点检测指令(critical_points_sub_pix)可以有效地对鞍点的位置进行跟踪,进而反映出青蛙腿部的抖动情况。由于青蛙在电刺激时偶尔会产生大幅度的应急响应,为消除此影响,在设计程序时还需考虑将大幅度的抖动数据去除,同时还需将测量时的灯光,触发信号等外部条件调到最佳,以保证测量的精确度。由于篇幅的原因,在此不再详细描述。

表1 不同参数下的混沌电刺激效果的特性分析
Tab.1 Effect comparison of electrical nerve stimulation with different parameters

α, β	γ	$z(t)$	Stimulation effect
$\alpha=0.2, \beta=0.2$	2.4	1 periodic orbit	Simple waveform; comfort during the electrical stimulus
	3.2	2 periodic orbits	The stimulation effect becomes rich, similar to the alternation of two different intensity of massage
	4.1	4 periodic orbits	The stimulus model becomes more diverse, delaying the emergence of tolerance
	5.7	Chaos	The stimulation effect is the most abundant, which can solve the problem of adaptability for simulating waves to body to some extent

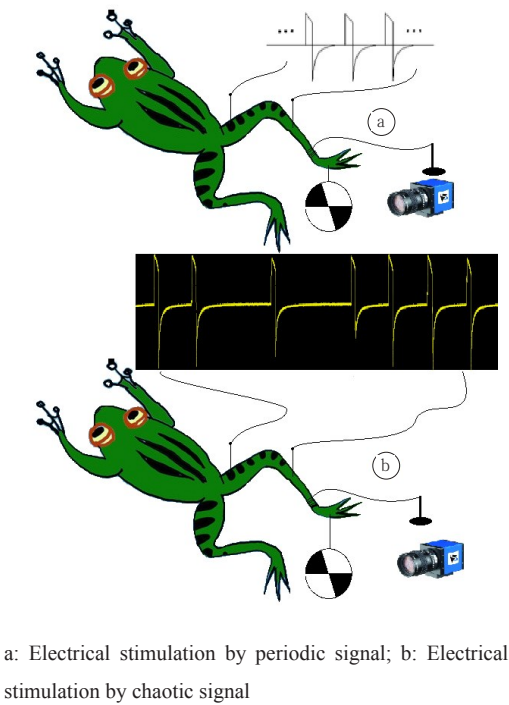


图8 动物实验原理图
Fig.8 Trial of animal control

实验时将单只青蛙用装置固定于实验桌上,青蛙的上半身不能任意挪动,但腿部悬空能自由抖动,对青蛙身体不造成损伤。青蛙的腿部末端用绳子束缚住,使腿部能在一定程度上收缩,但不能完全收缩,以防止完全收缩时电针的两极短路而损坏电路。

用针灸针(苏州医疗用品厂有限公司,直径为0.35 mm、长度为3.5 cm)破皮刺入青蛙腿部的腓肠肌坐骨神经处。每只青蛙刺激3次,第一次是用华佗牌电针仪输出的“连续波(频率为20 Hz)”刺激,第二次是用华佗牌电针仪输出的“疏密波(频率为2~20 Hz)”刺激,第三次是采用本文所介绍的混沌脉冲信号刺激(波形如图7所示),其输出波形在周期与非周期波形之间随机变化。在整个实验期间都不拔针,每次

刺激的时间为35 min,暂停60 min后,换成另外一种信号进行刺激,3种刺激方式顺序不固定,最大程度上保证3次刺激的外部条件相同。

调节输出功率旋钮,青蛙的腿部开始抖动,工业相机通过悬挂在青蛙腿上的靶标测量出其抖动的幅度(在图像上反映为像素的数目),把每次刺激时初始的抖动幅度设为一固定值,之后输出功率不再改变,记录下35 min的刺激时间内青蛙腿部抖动的总路径,反映出动物的腿部神经在电刺激下的特征行为。

用12只青蛙对上述的过程进行重复实验,每只青蛙的3种刺激信号均采用随机顺序。测试的结果表明,在刺激条件相对一致的情况下,在对12只青蛙刺激后,不同的刺激信号所引起的青蛙腿部的振动总距离有差异。其中,由20 Hz连续波所引起的振动路径值最小,设其总振动路径值为S;由2~20 Hz的疏密波所引起的振动总路径较长,其数值为S的1.12倍;由本文所介绍的混沌信号所引起的振动总路径最长,其数值为S的1.34倍。这说明青蛙腿部在混沌信号的电刺激下具有最大幅度的抖动路径,并说明改变电刺激信号的波形、频率、强度都有可能延缓耐受的产生,这与文献所报道的结果一致^[14-16]。虽然当前临床上都普遍采用“连续波、断续波、疏密波”作为电刺激波形,但有可能这些波形不是最优的电刺激信号。本文所提出的方法使刺激信号的波形、频率、强度都在一定范围内变化,增加了刺激的多样性,有可能比当前临床上所广泛使用的电刺激仪器具有更好的效果。

4 结 论

本研究采用Rössler混沌模型实现了新型的电刺激系统,利用统一的数学模型实现了丰富的电刺激效果,为电刺激仪的设计提供了一个新的参考方

向。混沌模型在电刺激中的应用存在潜在的应用优势,首先,如果将动物的肌电信号或脑电信号与混沌方程的其中一个参数(例如文中的参数 γ)相关联,即可获得基于动物电信号的闭环电刺激系统^[17],这可能可以在很大程度上降低对肌电信号或脑电信号处理的复杂度。其次是采用自供电混沌电路设计方法可在很大程度上降低电刺激电路的功耗^[18],这对延长植入式电刺激器件的寿命可能是一种理想的方案,混沌模型在神经电刺激方面的应用还有广阔的探索空间。然而,本文所设计的动物实验还有多处需要改进,例如如何消除动物的个体差异对实验结果的影响,以及如何保证多次刺激的刺激条件一致,今后我们将联合医学研究人员展开更多的探索。

【参考文献】

- [1] 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 T B. Promote the application of neuromuscular electrical stimulation technology in central nerve injury actively[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2007, 22(10): 865-866.
- [2] BJORDAL J M, JOHNSON M I, LJUNGGREEN A E. Transcutaneous electrical nerve stimulation (TENS) can reduce postoperative analgesic consumption. A meta-analysis with assessment of optimal treatment parameters for postoperative pain[J]. Eur J Pain, 2003, 7(2): 181-188.
- [3] GROPPETTI D, PECILE A M, SACERDOTE P, et al. Effectiveness of electroacupuncture analgesia compared with opioid administration in a dog model: a pilot study[J]. Br J Anaesth, 2011, 107(4): 612-618.
- [4] DESANTANA J M, WALSH D M, VANCE C, et al. Effectiveness of transcutaneous electrical nerve stimulation for treatment of hyperalgesia and pain[J]. Curr Rheumatol Rep, 2008, 10(6): 492-499.
- [5] 景军. 基于传统中医针灸理论的脑血管疾病物理治疗系统研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2008.
JING J. Study of ACVD therapeutic system based on TCM acupuncture and moxibustion theory [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2008.
- [6] 刘显波, 雷敏, 孟光. 混沌多维电刺激系统: CN102335482A[P]. 2012-02-01.
LIU X B, LEI M, MENG G. Chaotic multidimensional electro stimulation system: CN102335482A[P]. 2012-02-01.
- [7] BANERJEE C, DATTA D, DATTA D. A random bit generator using Rössler chaotic system [C]// International Conference on Computational Advancement in Communication Circuits and Systems, 2015: 81-87.
- [8] FRANÇOIS M, DEFOUR D, BERTHOMÉ P. A pseudo-random bit generator based on three chaotic logistic maps and IEEE 754-2008 floating-point arithmetic [M]. Heidelberg: Springer International Publishing, 2014: 229-247.
- [9] ZHANG C X, TANG W K, YU S M. A new chaotic system based on multiple-angle sinusoidal function: design and implementation [J]. Int J Bifurcat Chaos, 2009, 19(6): 2073-2084.
- [10] 郑金存, 张慧, 梁伟江, 等. 基于混沌信号的经皮神经电刺激仪的设计[J]. 中国医学物理学杂志, 2015, 32(1): 86-91.
ZHENG J C, ZHANG H, LIANG W J, et al. Design of transcutaneous nerve electric stimulation instrument based on the chaotic signal[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2015, 32(1): 86-91.
- [11] SOOKSOOD K, STIEGLITZ T, ORTMANN M. An experimental study on passive charge balancing[J]. Ad Radio Sci, 2009, 7: 197-200.
- [12] 郑金存, 张慧, 覃斌毅, 等. 变参数混沌信号应用于经皮神经电刺激的探索研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2015, 32(5): 1031-1037.
ZHENG J C, ZHANG H, QIN B Y, et al. Exploration research of treatment effect improvement of transcutaneous electrical nerve stimulation using parameter-changing chaotic signal[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2015, 32(5): 1031-1037.
- [13] 王海波, 邹海龙, 张如照. 基于视觉测量的挖掘机工作装置姿态测量系统[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 302-308.
WANG H B, ZOU H L, ZHANG R Z. Attitude measurement system for excavator's manipulator based on vision measurement [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 302-308.
- [14] DESANTANA J M, SANTANA-FILHO V J, SLUKA K A. Modulation between high-and low-frequency transcutaneous electric nerve stimulation delays the development of analgesic tolerance in arthritic rats[J]. Arch Phys Med Rehabil, 2008, 89(4): 754-760.
- [15] LIEBANO R E, RAKEL B, VANCE C G, et al. An investigation of the development of analgesic tolerance to TENS in humans[J]. Pain, 2011, 152(2): 335-342.
- [16] SATO K L, SANADA L S, RAKEL B A, et al. Increasing intensity of TENS prevents analgesic tolerance in rats[J]. J Pain, 2012, 13(9): 884-890.
- [17] 封洲燕, 陈丹, 肖乾江. 一种闭环式神经电刺激系统的设计[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(2): 279-285.
FENG Z Y, CHEN D, XIAO Q J. Design of a novel closed-loop neural electrical stimulation system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(2): 279-285.
- [18] ZHANG Y J, YANG Y, ZHANG Y. Theoretical study of electric energy consumption for self-powered chaos signal generator[J]. Sci China Tech Sci, 2014, 57(6): 1063-1067.

(编辑:谭斯允)