



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104298110 B

(45)授权公告日 2017.02.15

(21)申请号 201410499229.4

(56)对比文件

(22)申请日 2014.09.26

CN 101848077 A, 2010.09.29,

(65)同一申请的已公布的文献号

CN 102332976 A, 2012.01.25,

申请公布号 CN 104298110 A

审查员 张毅

(43)申请公布日 2015.01.21

(73)专利权人 江西理工大学

地址 341000 江西省赣州市红旗大道86号

(72)发明人 张小红 程鹏 吴政泽

(74)专利代理机构 南昌新天下专利商标代理有限公司 36115

代理人 施秀瑾

(51)Int.Cl.

G05B 13/04(2006.01)

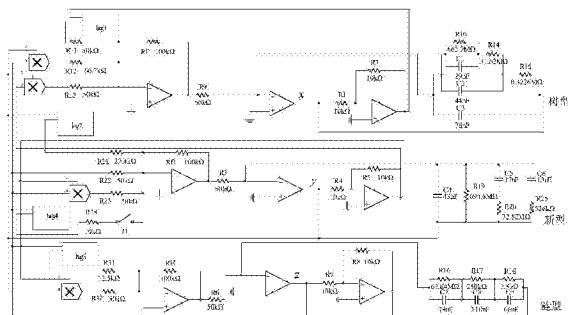
权利要求书1页 说明书6页 附图10页

(54)发明名称

一种异分数阶时滞混沌系统的延时稳定控制电路设计方法

(57)摘要

一种异分数阶时滞混沌系统的延时稳定控制电路设计方法，包括以下步骤：建一个三维异分数阶混沌系统；引入时滞变量 $\tau_i > 0$ ($i = 1, 2, 3$)，构建其含时滞量的动力学方程；采用 Multisim 模拟电路仿真平台，利用分数阶链型、树型、混合型和新型4种电路单元的电路，设计 (S1) 和 (S2) 中的系统方程的组合电路原理图；通过增加延时 δ_i ($i = 1, 2, 3$) 及线性反馈增益量，设计延时反馈稳定控制器。本发明设计了一种异分数阶混沌系统的含时滞量 τ_i ($i = 1, 2, 3$) 混沌系统，并对其进行了延时量为 δ_i ($i = 1, 2, 3$) 的线性反馈稳定控制器，设计的电路实现了异分数阶时滞混沌系统的延时稳定控制。



1. 一种异分数阶时滞混沌系统的延时稳定控制电路设计方法, 其特征是包括以下步骤:

S1: 基于分数阶理论构建一个三维异分数阶混沌系统;

$$\begin{cases} \frac{d^{q_1}x}{dt^{q_1}} = -ax + dyz + y^2 \\ \frac{d^{q_2}y}{dt^{q_2}} = by - ez - xz \\ \frac{d^{q_3}z}{dt^{q_3}} = -cz + xy \end{cases}$$

其中, $0 < q_i \leq 1$, $i = 1, 2, 3$ 为系统的阶数, x, y, z 为状态变量, a, b, c, d, e 是系统参数, a, b, c, d, e 均为实数;

S2: 在 S1 所述的三维异分数阶混沌系统的动力学方程的变量中, 引入时滞变量 $\tau_i > 0$, $i = 1, 2, 3$, 构建其含时滞量的动力学方程;

$$\begin{cases} \frac{d^{q_1}x}{dt^{q_1}} = -ax(t - \tau_1) + dy(t)z(t) + y^2(t) \\ \frac{d^{q_2}y}{dt^{q_2}} = by(t - \tau_2) - ez(t) - x(t)z(t) \\ \frac{d^{q_3}z}{dt^{q_3}} = -cz(t - \tau_3) + x(t)y(t) \end{cases}$$

其中 $\tau_i > 0$, $i = 1, 2, 3$ 为系统的时滞常数;

S3: 采用 Multisim 模拟电路仿真平台, 利用分数阶链型、树型、混合型和新型 4 种电路单元的电路, 对 S1 和 S2 系统进行不同分数阶值组合电路的仿真, 设计 S1 和 S2 中的系统方程的组合电路原理图;

S4: 对 S2 中的系统方程, 通过增加延时 δ_i , $i = 1, 2, 3$ 及线性反馈增益量, 设计延时反馈稳定控制器, 分析计算线性参数 k_i , $i = 1, 2, 3$ 的取值范围, 实现对 S2 中的系统方程进行稳定性控制;

$$\begin{cases} \frac{d^{q_1}x}{dt^{q_1}} = -ax(t - \tau_1) + dy(t)z(t) + y^2(t) + k_1x(t - \delta_1) \\ \frac{d^{q_2}y}{dt^{q_2}} = by(t - \tau_2) - ez(t) - x(t)z(t) + k_2y(t - \delta_2) \\ \frac{d^{q_3}z}{dt^{q_3}} = -cz(t - \tau_3) + x(t)y(t) + k_3z(t - \delta_3) \end{cases}$$

其中 k_i , $i = 1, 2, 3$ 为控制增益, δ_i , $i = 1, 2, 3$ 为线性延时反馈项的延时时间;

S5: 通过 Multisim 模拟电路仿真平台设计延时反馈稳定控制器, 以实现异分数阶时滞混沌系统的延时稳定性控制电路设计。

一种异分数阶时滞混沌系统的延时稳定控制电路设计方法

技术领域

[0001] 本发明属于非线性动力学和自动控制领域,特别涉及分数阶混沌系统电路构建和延时稳定性控制技术。

背景技术

[0002] 混沌现象是自然界中普遍存在的一种宏观无序、微观有序的非线性现象,近年来混沌理论获得了巨大而深远的发展,各种新混沌系统的提出层出不穷。分数阶微积分是研究任意阶次的微分、积分算子特性及应用的数学问题,是整数阶微积分概念的延伸和推广。由于分数阶混沌系统模型本身的复杂性,微分动力学方程中相同分数阶的混沌系统研究较多,相应的仿真电路也集中在整数阶或同分数阶设定下的实现。关于微分方程中各变量不同阶数(异阶)及其电路单元交叉的异元组合电路的仿真鲜有研究报道。

[0003] 混沌系统的随机性和长期不可预测性使得系统难以控制,因此人们试图通过一些特殊的方法使原本混沌的系统稳定到混沌吸引子内某一周期轨道或平衡点上。1990年Ott等首次在平衡点上将控制系统局部线性化,以达到混沌系统的稳定性控制,随后各国研究人员又研究出线性化误差系统的渐近稳定方法,通过构造线性化误差系统的Lyapunov函数,通过一些时滞量导出稳定性条件,以达到时滞混沌反馈控制。直到如今,混沌系统的稳定性控制问题依然是混沌领域的一个研究热点问题。

[0004] 严格来说,任何实际系统的当前状态不可避免的受到过去状态的影响,即当前状态变化率不仅依靠当前时刻的状态,而且也依赖于过去某时刻或者某段时间的状态,系统的这种特性称之为时滞,具有时滞的系统称为时滞系统。时滞广泛存在于多种物理系统中,如振荡电路、激光、核反应、神经网络和通信网络等。时滞系统为无穷维状态空间,能够产生多于维数的正的Lyapunov指数,因此结构简单的时滞系统也可具有非常复杂的动力学行为。由于信号传输速度的限制,任何信号的传输都需要一定的时间,因而每路信号的传输时间也会不尽相同,特别是对于复杂分数阶的时滞混沌系统,研究系统状态的延时稳定性具有极其重要的价值。

发明内容

[0005] 本发明的目的是提出一种异分数阶时滞混沌系统的延时稳定控制电路设计方法。

[0006] 本发明是通过以下技术方案实现的。

[0007] 本发明包括以下步骤:

[0008] (S1)、基于分数阶理论构建一个三维异分数阶混沌系统(动力学方程);

[0009] (S2)、在(S1)所述的三维异分数阶混沌系统的动力学方程的变量中,引入时滞变量 $\tau_i > 0$ ($i = 1, 2, 3$),构建其含时滞量的动力学方程;

[0010] (S3)、异分数阶组合电路仿真。采用Multisim模拟电路仿真平台,利用分数阶链型、树型、混合型和新型4种电路单元的电路,对(S1)和(S2)系统进行不同分数阶值组合电路的仿真,设计(S1)和(S2)中的系统方程的组合电路原理图并仿真;

[0011] (S4)、延时稳定性控制系统设计。对(S2)中的系统方程,通过增加延时 δ_i ($i=1,2,3$)及线性反馈增益量,设计延时反馈稳定控制器,分析计算线性参数 k_i ($i=1,2,3$)的取值范围,实现对(S2)中的系统方程进行稳定性控制;

[0012] (S5)、延时稳定性控制电路仿真。通过Multisim模拟电路仿真平台设计延时反馈稳定控制器,以实现异分数阶时滞混沌系统的延时稳定性控制电路设计。电路仿真结果可直观验证系统收敛稳定的状态变化轨迹,即经过一段时间震荡,异分数阶时滞混沌反馈系统可稳定到平衡点上。

[0013] 进一步说,本发明的具体步骤如下:

[0014] 步骤1:分数阶混沌系统模型的构建

[0015] 基于分数阶理论构建一个分数阶混沌系统,其动力学状态方程为:

$$[0016] \begin{cases} \frac{d^{q_1}x}{dt^{q_1}} = -ax + dyz + y^2 \\ \frac{d^{q_2}y}{dt^{q_2}} = by - ez - xz \\ \frac{d^{q_3}z}{dt^{q_3}} = -cz + xy \end{cases} \quad (1)$$

[0017] 其中, $0 < q_i \leq 1$ ($i=1,2,3$)为系统(1)的阶数,x,y,z为状态变量,a,b,c,d,e是系统参数,a,b,c,d,e均为实数。当 $a=2$, $b=3.65$, $c=8$, $d=3$, $e=2$ 时,系统(1)的三个Lyapunov指数分别为 $L_1=0.7730$, $L_2=0.00008$, $L_3=-7.1231$ 。由于该系统的三个Lyapunov指数中一个为正,一个趋近于零,一个为负,并且其和小于零,系统的Lyapunov维数:

$$[0018] D_L = j + \frac{1}{|L_{j+1}|} \sum_{i=1}^j L_i = 2 + \frac{L_1 + L_2}{|L_3|} = 2.1085 \quad (2)$$

[0019] 所以系统(1)存在一个典型的混沌吸引子如图1所示。

[0020] 步骤2:分数阶异时滞混沌系统的构建

[0021] 对于系统(1),引入时滞变量 τ_i ($i=1,2,3$),构建其时滞动力学方程为:

$$[0022] \begin{cases} \frac{d^{q_1}x}{dt^{q_1}} = -ax(t-\tau_1) + dy(t)z(t) + y^2(t) \\ \frac{d^{q_2}y}{dt^{q_2}} = by(t-\tau_2) - ez(t) - x(t)z(t) \\ \frac{d^{q_3}z}{dt^{q_3}} = -cz(t-\tau_3) + x(t)y(t) \end{cases} \quad (3)$$

[0023] 其中 $\tau_i > 0$ ($i=1,2,3$)为系统的时滞常数。

[0024] 为了不失一般性,本发明中 τ_i ($i=1,2,3$)取值全不相同即异时滞系统。当 $q_1=q_2=0.95$, $q_3=0.9$, $a=2$, $b=3.65$, $c=8$, $d=3$, $e=2$, $\tau_1=0.03$, $\tau_2=0.05$, $\tau_3=0.01$ 时,计算可知其最大Lyapunov指数为 $L_{max}=1.2635$,因此系统(3)此时处于混沌状态。

[0025] 步骤3:异分数阶组合电路设计与仿真

[0026] (1)异分数阶组合电路设计

[0027] 对于一个特定的三维分数阶混沌系统,当阶次 q_1 、 q_2 和 q_3 取不同情况组合时,排列的结果参见表1,一共有 $6+18+3=27$ 种排列组合方式。由于对于每一个 q_i ($i=1,2,3$)值均有链型、树型、混合型和新型4种电路单元选择,这样任何一种组合就有 $4^3=64$ 种电路单元设计方式,从而对于任意三维的分数阶 q_1 、 q_2 和 q_3 取值,分数阶混沌系统组合电路方式共有 $64 \times 27=1728$ 种。本发明中, q_1 、 q_2 和 q_3 的取值可以为0.9和0.95,因此对应的选择种取值方式分别如下:

[0028] 方式一: $q_1=q_2=q_3=0.9$; $q_1=q_2=q_3=0.95$ (q_i 全部相同);

[0029] 方式二: $q_1=0.9$, $q_2=q_3=0.95$; $q_1=q_2=0.9$, $q_3=0.95$; $q_1=0.95$, $q_2=q_3=0.9$; $q_1=q_2=0.95$, $q_3=0.9$; $q_1=q_3=0.95$, $q_2=0.9$; $q_1=q_3=0.9$, $q_2=0.95$ (q_i 不全相同)。

[0030] 对于上述两种取值方式中的每一组异元电路组合数量均为 $C_4^1 C_3^1 C_2^1 = 4 \times 3 \times 2 = 24$ 种。

[0031] 表1不同 q_1 , q_2 , q_3 排列的组合数

[0032]

q_1, q_2, q_3	q_1, q_2, q_3 组合数	q_1, q_2, q_3 组合排列
q_1, q_2, q_3 全部相同	3	$q_1, q_1, q_1, q_2, q_2, q_2, q_3, q_3, q_3$ $q_1, q_1, q_2, q_1, q_1, q_3, q_2, q_2, q_1, q_2, q_2, q_3, q_3, q_1, q_3, q_3, q_2,$
q_1, q_2, q_3 不全相同	$C_3^1 \times C_3^2 \times C_2^1 = 18$	$q_1, q_2, q_2, q_1, q_3, q_3, q_2, q_1, q_1, q_1, q_3, q_1, q_1, q_1, q_3, q_1, q_1, q_1, q_2, q_3, q_2, q_3, q_1, q_1, q_1, q_3, q_2, q_2, q_3,$
q_1, q_2, q_3 全部不同	$P_3^3 = 6$	$q_1, q_2, q_3, q_1, q_3, q_2, q_2, q_1, q_3, q_1, q_2, q_3, q_1, q_3, q_1, q_2, q_1, q_1, q_2,$

[0033] (2)时滞电路仿真

[0034] 为了简化电路设计而又不失一般性,本发明从 q_i ($i=1,2,3$)不全相同组合方式中任意选择了一种 $q_1=q_2=0.95$, $q_3=0.9$ 组合方式进行多元电路仿真实验。由于各电子元件允许电压的有限性,因此,为了可靠的进行电路实验,需要先将系统的输出信号减小为原来的 $1/2$,取 $a=2$, $b=3.65$, $c=8$, $d=3$, $e=2$, $q_1=q_2=0.95$, $q_3=0.9$ 并且对应的单元电路分别为树型、新型、链型时,设计系统(1)的电路原理图并进行仿真实验,如图2所示,各变量的电路仿真相图如图3~图5所示,与图1的数值计算结果有极其相似的吻合性,从而验证电路设计的正确性;再取时滞 $\tau_1=0.03$, $\tau_2=0.05$, $\tau_3=0.01$,根据延时单元电路如图6所示,其时滞 τ 的近似表达式如下:

$$[0035] \tau \approx n\sqrt{2LC} \quad (4)$$

[0036] 其中n为LCL滤波器数目且 $n \geq 1$,设计系统(3)的电路原理图进行仿真实验,如图4

所示。

[0037] 步骤4: 延时反馈稳定性控制

[0038] (1) 延时反馈稳定性控制的分析与设计

[0039] 对于异分数阶时滞混沌系统(3), 对其加入线性延时反馈项, 将其稳定到系统的平衡点位置, 其受控系统为:

$$[0040] \begin{cases} \frac{d^{q_1}x}{dt^{q_1}} = -ax(t-\tau_1) + dy(t)z(t) + y^2(t) + k_1x(t-\delta_1) \\ \frac{d^{q_2}y}{dt^{q_2}} = by(t-\tau_2) - ez(t) - x(t)z(t) + k_2y(t-\delta_2) \\ \frac{d^{q_3}z}{dt^{q_3}} = -cz(t-\tau_3) + x(t)y(t) + k_3z(t-\delta_3) \end{cases} \quad (5)$$

[0041] 其中 k_i ($i=1, 2, 3$) 为控制增益, δ_i ($i=1, 2, 3$) 为线性延时反馈项的延时时间。

[0042] 对于系统(5), 易知原点 $O(0, 0, 0)$ 是其平衡点, 对该系统在平衡点进行线性化后, 得其 Jacobi 矩阵为:

$$[0043] \mathbf{J}_0 = \begin{bmatrix} -2+k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 3.65+k_2 & 0 \\ 0 & 0 & -8+k_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

[0044] 由其特征值方程 $|\lambda I - J_0| = 0$ 得系统的特征根分别为:

[0045] $\lambda_1 = -2+k_1; \lambda_2 = 3.65+k_2; \lambda_3 = -8+k_3 \quad (7)$

[0046] 对于分数阶自治系统, 无论状态变量为何值, 只要受控系统(5)的特征值的实部均不大于零, 则受控系统(5)可以渐近稳定到平衡点, 即只需 $-2+k_1 \leq 0, 3.65+k_2 \leq 0, -8+k_3 \leq 0$; 也即当控制增益 $k_1 \leq 2, k_2 \leq -3.65, k_3 \leq 8$ 时, 系统(5)最终趋于稳定。

[0047] (2) 延时反馈稳定性控制电路仿真

[0048] 本发明中选取 $k_1 = 0, k_2 = -10, k_3 = 0$ 进行电路仿真, 系统的延时反馈控制器如图5 所示, 其中延时单元 lag4 即 δ_2 的延时为 0.02, $\delta_1 = \delta_3 = 0$ 仿真结果如图6所示。

[0049] 本发明以新构建的三维分数阶混沌系统为基础, 对其进行了基本的动力学特性分析, 证实了系统的混沌特性并确定其混沌吸引子的存在。利用分数阶链型、树型、混合型和新型4种电路单元的电路进行了不同分数阶值(异分数阶)组合电路的仿真实验, 组合电路数共有1728种。本发明中从 q_i 不全相同这类组合方式中, 任意选择一种电路单元组合进行了分析和仿真实验。实验结果表明, 异分数阶电路仿真与计算机数值计算具有极高的吻合度, 证实了异分数阶电路设计的有效性和灵活性, 同时验证了该分数阶混沌系统在物理上的可实现性。本发明设计了该异分数阶混沌系统的含时滞量 τ_i ($i=1, 2, 3$) 混沌系统, 并对其进行了延时量为 δ_i ($i=1, 2, 3$) 的线性反馈稳定控制器, 设计的电路实现了异分数阶时滞混沌系统的延时稳定控制。

附图说明

[0050] 图1为本发明异分数阶混沌系统的各空间混沌吸引子相图。

- [0051] 图2为本发明异分数阶混沌系统的组合电路原理图。
- [0052] 图3为本发明异分数阶混沌系统的组合电路仿真x-y相图。
- [0053] 图4为本发明异分数阶混沌系统的组合电路仿真x-z相图。
- [0054] 图5为本发明异分数阶混沌系统的组合电路仿真y-z相图。
- [0055] 图6为本发明时滞单元电路图。
- [0056] 图7为本发明分数阶异时滞混沌系统的组合电路原理图。
- [0057] 图8为本发明分数阶异时滞混沌系统组合电路仿真x-y相图。
- [0058] 图9为本发明分数阶异时滞混沌系统组合电路仿真x-z相图。
- [0059] 图10为本发明分数阶异时滞混沌系统组合电路仿真y-z相图。
- [0060] 图11为本发明延时反馈控制器电路图。
- [0061] 图12为本发明延时反馈稳定控制电路原理图。
- [0062] 图13为本发明延时反馈稳定控制电路仿真状态变量x受控波形。
- [0063] 图14为本发明延时反馈稳定控制电路仿真状态变量y受控波形。
- [0064] 图15为本发明延时反馈稳定控制电路仿真状态变量z受控波形。

具体实施方式

- [0065] 以下将结合附图对本发明作进一步的详细描述。
- [0066] 实施例1。设计实现异分数阶混沌系统(1)的组合电路
- [0067] 为了简化电路设计而又不失一般性,本发明从 $q_i(i=1,2,3)$ 不全相同组合方式中任意选择了一种 $q_1=q_2=0.95, q_3=0.9$ 组合方式进行多元电路仿真实验。由于各电子元件允许电压的有限性,因此,为了可靠的进行电路实验,需要先将系统的输出信号减小为原来的 $1/2$,取 $q_1=q_2=0.95, q_3=0.9$ 并且对应的单元电路分别为树型、新型、链型时,其Multisim电路原理图如图2所示。根据系统电路原理图及电路基本理论,可得系统的数学方程如(8)式所示。

$$\begin{cases}
 \frac{d^{0.95}x}{dt^{0.95}} = -\frac{R_{f1}}{R_{11}R_9C_1}x + \frac{R_{f1}}{10R_{12}R_9C_1}yz + \frac{R_{f1}}{10R_{13}R_9C_1}y^2 \\
 \frac{d^{0.95}y}{dt^{0.95}} = \frac{R_{f2}}{R_{21}R_3C_2}y - \frac{R_{f2}}{R_{22}R_3C_2}z - \frac{R_{f2}}{10R_{23}R_3C_2}xz \\
 \frac{d^{0.9}z}{dt^{0.9}} = -\frac{R_{f3}}{R_{31}R_6C_3}z + \frac{R_{f3}}{10R_{32}R_6C_3}xy
 \end{cases} \quad (8)$$

- [0069] 将方程(8)和(1)进行比较,可得:

$$[0070] a = \frac{R_{f1}}{R_{11}R_9C_1}, \quad b = \frac{R_{f2}}{R_{21}R_3C_2}, \quad c = \frac{R_{f3}}{R_{31}R_6C_3}, \quad 2d = \frac{R_{f1}}{10R_{12}R_9C_1},$$

$$[0071] 2 = \frac{R_{f1}}{10R_{13}R_9C_1} = \frac{R_{f2}}{R_{22}R_3C_2} = \frac{R_{f2}}{10R_{23}R_3C_2} = \frac{R_{f3}}{10R_{32}R_6C_3}.$$

- [0072] 令 $C_1=C_2=C_3=33nF, R_{f1}=R_{f2}=R_{f3}=100k\Omega, R_3=R_6=R_9=50k\Omega, R_{12}=166.7k\Omega,$

$R_1=R_2=R_4=R_5=R_7=R_8=10k\Omega$, $R_{11}=R_{13}=R_{22}=R_{23}=R_{32}=50k\Omega$, $R_{21}=27.4k\Omega$, $R_{31}=12.5k\Omega$ 时,用Multisim对该电路方程进行了仿真实验,仿真结果如图3~图5所示。与图1比较可以看出,电路仿真实验结果与数值计算结果十分吻合,故该异分数阶组合混沌系统电路是可以物理实现的。为了确保异元电路设计的有效性,对方式二中的其余5种取值分别也进行了异元电路仿真,仿真结果与使用基于广义的Adams-Basforth-Moulton算法的Matlab数值计算高度吻合,进一步说明了该设计思想的有效性。

[0073] 实施例2。设计实现异分数阶时滞混沌系统(3)的组合电路

[0074] 本发明所采用时滞单元电路如图6所示,时滞 τ 的近似表达式如(4)式所示。由于低通滤波器网络会受到信号频率的限制,而该时滞单元电路在截止频率 $f_c=1kHz$ 以下时具有平稳特性。当噪声频率和有用信号频率接近时,单级滤波器无法达到预期效果。此时需要选用多级滤波器来避免噪声干扰,在输入与输出之间设n=10组T型滤波器,端口处配置匹配电阻 $R_{28}=R_{30}=1k\Omega$,且通带内的特性阻抗为常数。取 $R_{26}=R_{27}=R_{29}=10k\Omega$, $R_{33}=22k\Omega$ 。

[0075] 对于系统(3),当时滞单元 $lag_i(i=1,2,3)$ 的对应时滞 $\tau_i(i=1,2,3)$ 的数值分别为 $\tau_1=0.03, \tau_2=0.05, \tau_3=0.01$ 时,由(4)式可以算出各自时滞单元电路中LC的数值分别为 $1mH, 4.5nF; 1mH, 12.5nF; 1mH, 0.5nF$ 。当 $q_1=q_2=0.95, q_3=0.9, a=2, b=3.65, c=8, d=3, e=2, \tau_1=0.03, \tau_2=0.05, \tau_3=0.01$ 时,系统(3)的电路原理图如图7所示,仿真结果如图8~图10所示,电路仿真结果表明此分数阶异时滞混沌系统在物理上是可以实现的。

[0076] 实施例3。设计实现延时反馈稳定控制

[0077] 本发明中选取 $k_1=0, k_2=-10, k_3=0$ 进行电路仿真,系统的延时反馈控制器如图11所示,其中延时单元 lag_4 即 δ_2 的延时为0.02, $\delta_1=\delta_3=0$ 。由(4)式可以算出时滞单元电路中LC的数值为 $1mH, 8nF$ 。延时稳定性控制电路原理图如图12所示,其中 $R_{24}=10k\Omega$ 。在 $t=1s$ 时闭合开关J1,电路实验仿真稳定性控制结果如图13~图15所示,仿真结果表明此延时控制器设计的有效性,同时也说明了在此异元分数阶异时滞混沌系统中,只需加入一个延时控制器即可实现系统的稳定性控制。

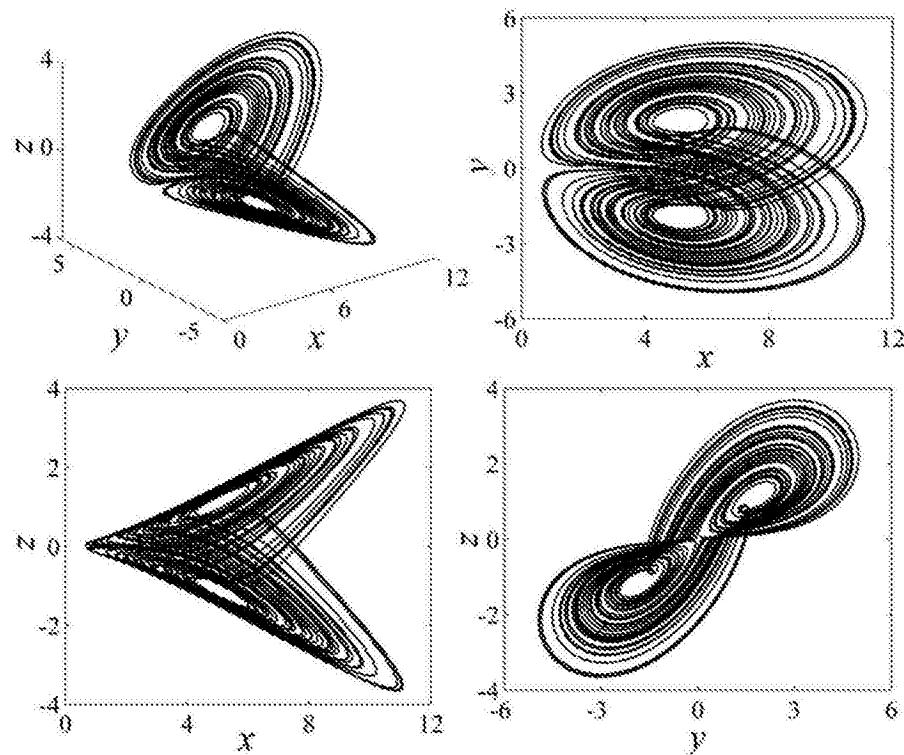


图1

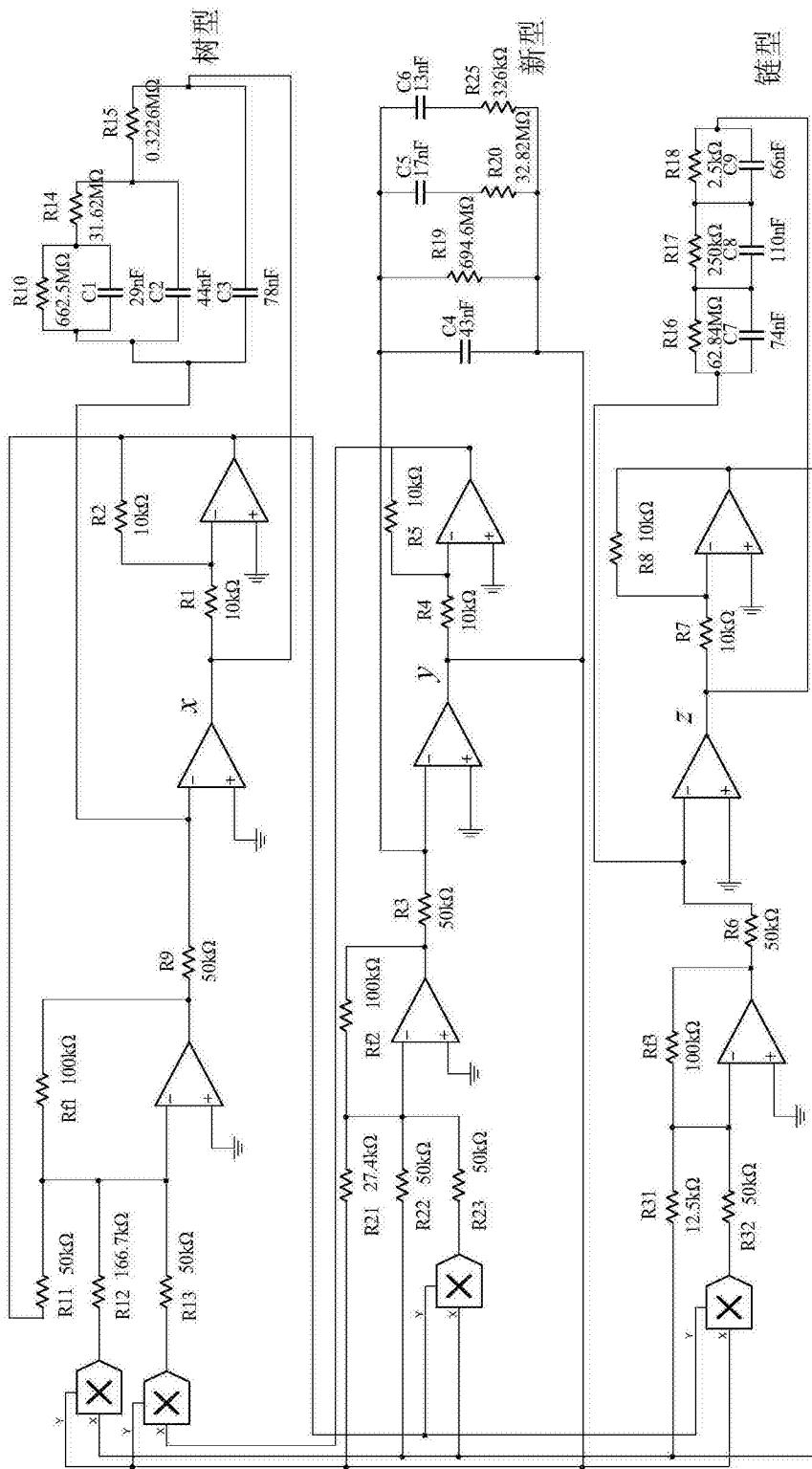


图2

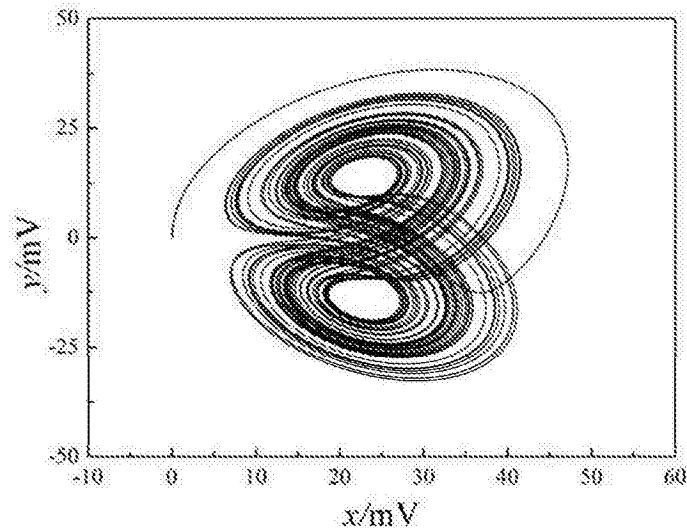


图3

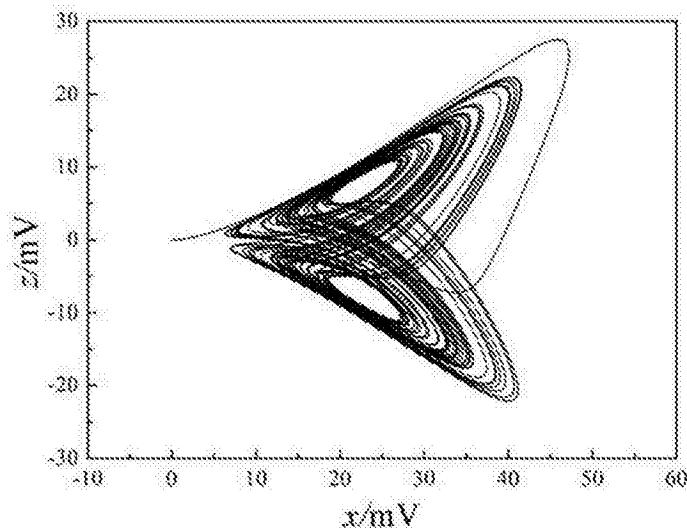


图4

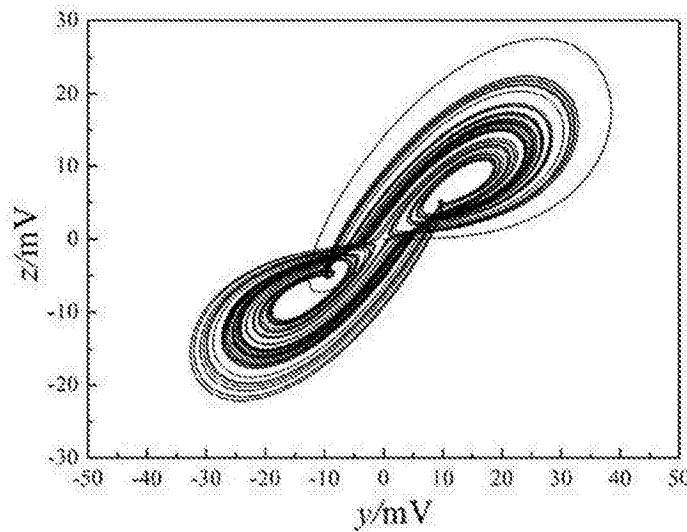


图5

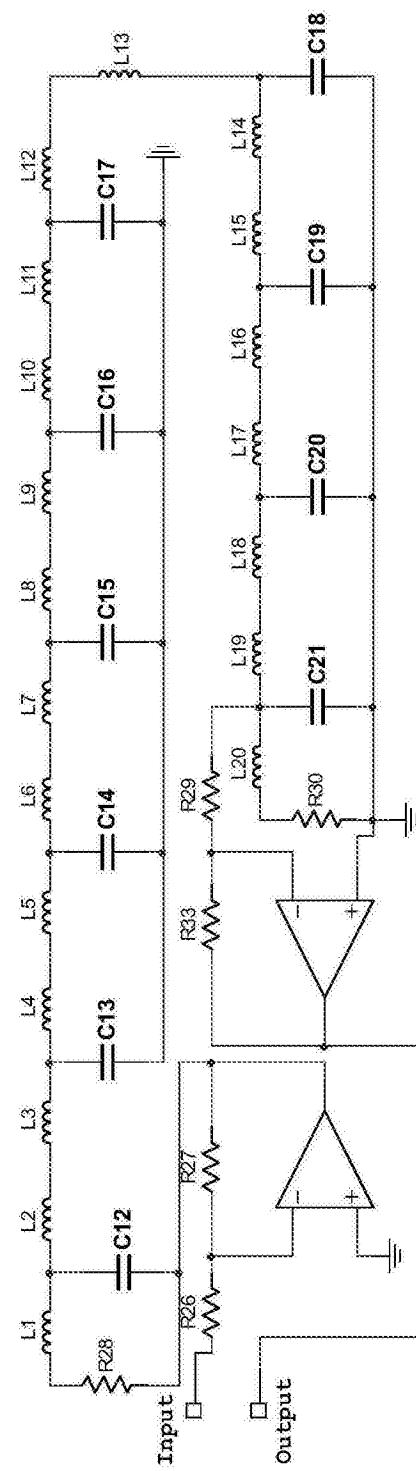
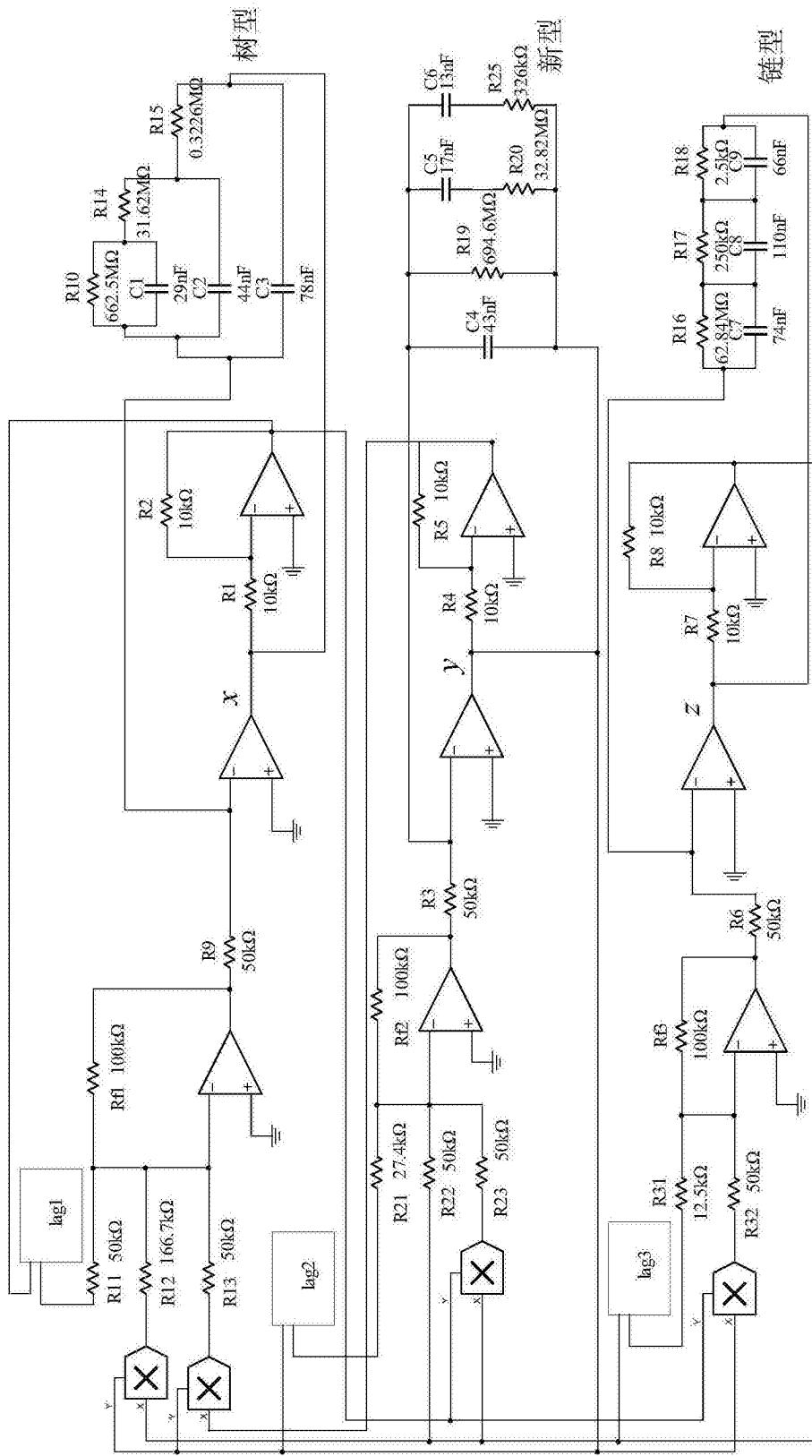


图6



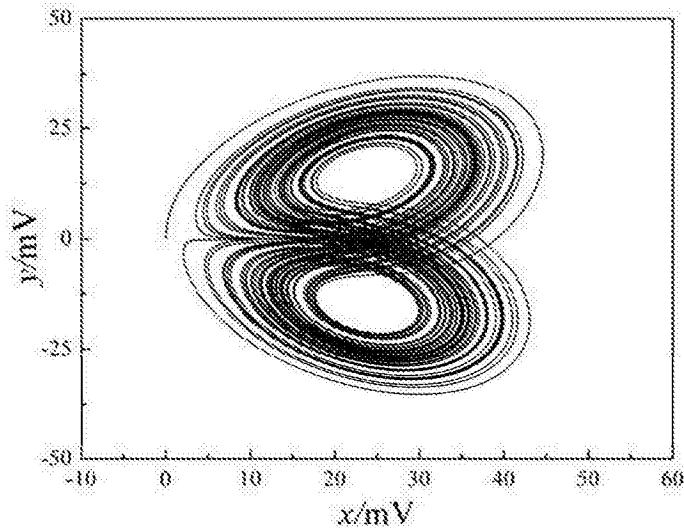


图8

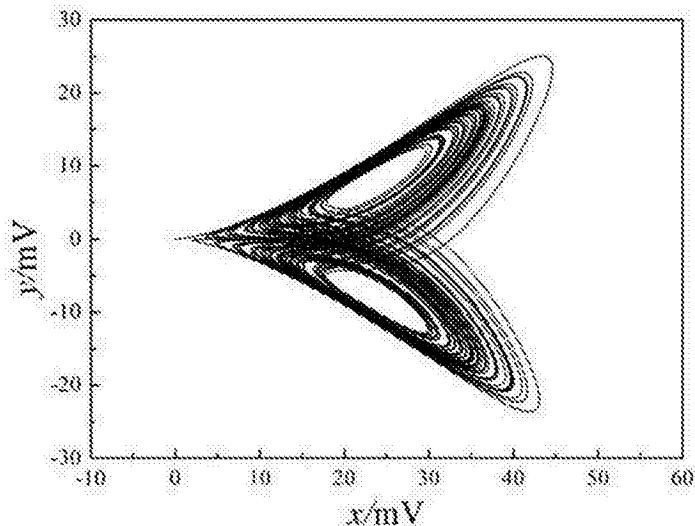


图9

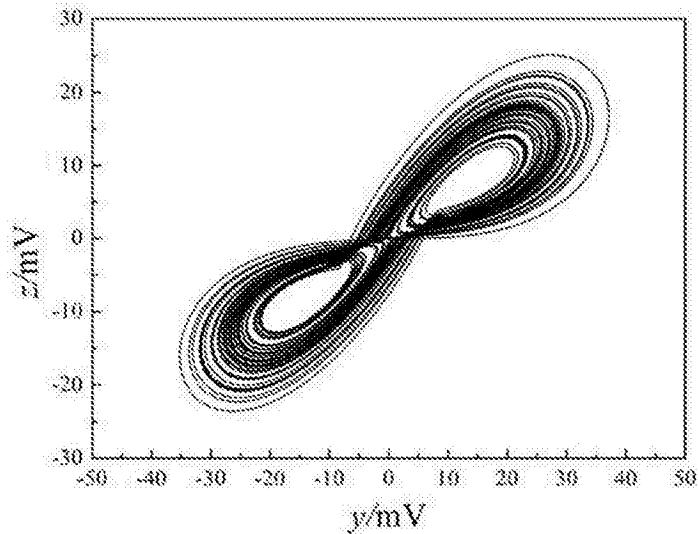


图10

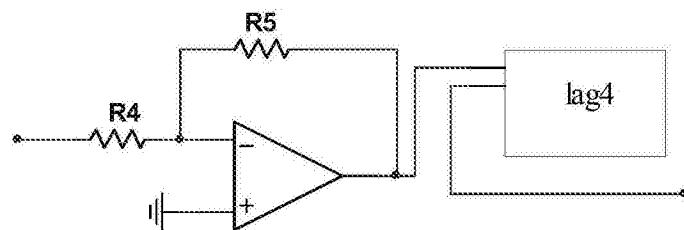


图11

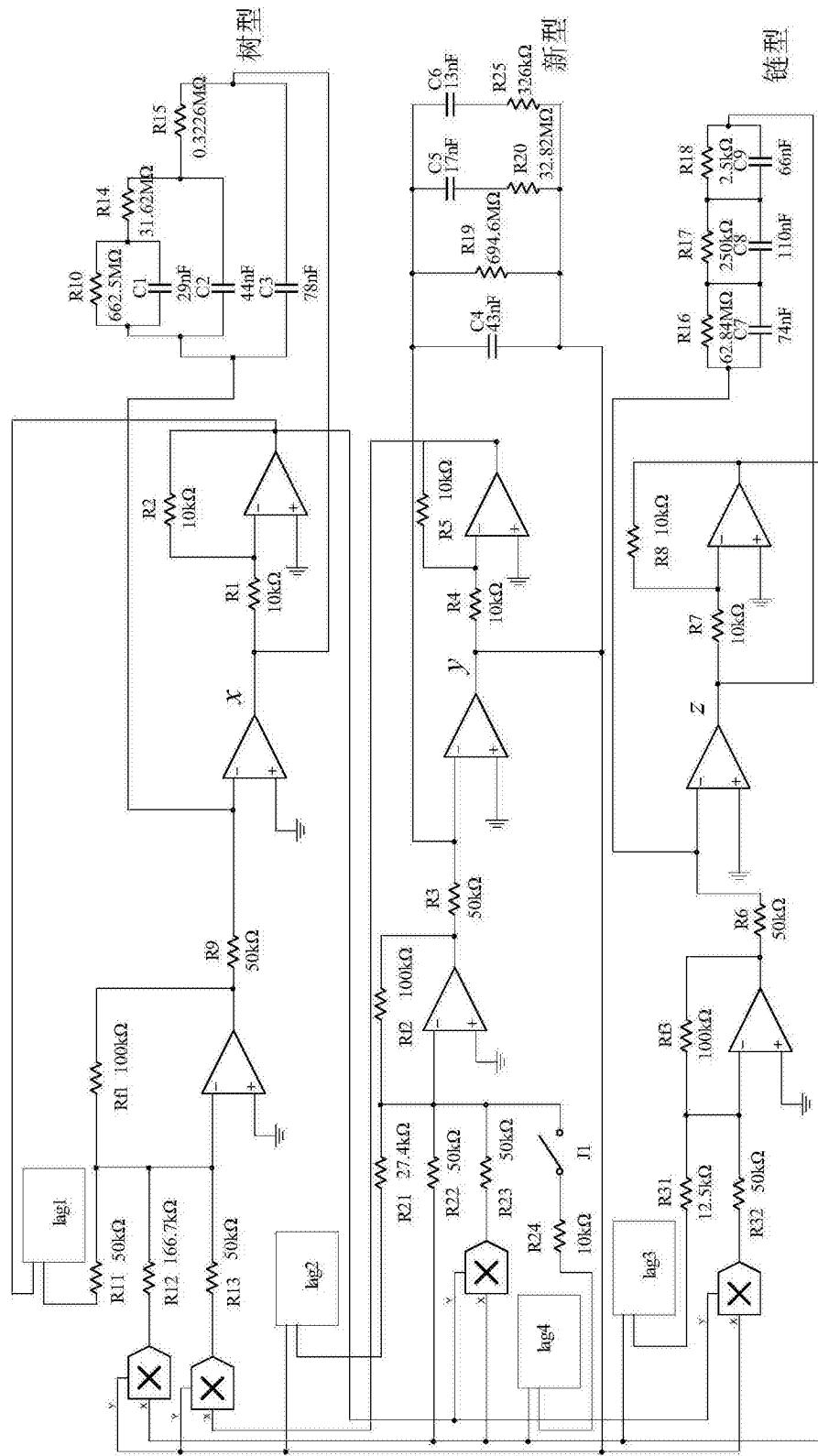


图 12

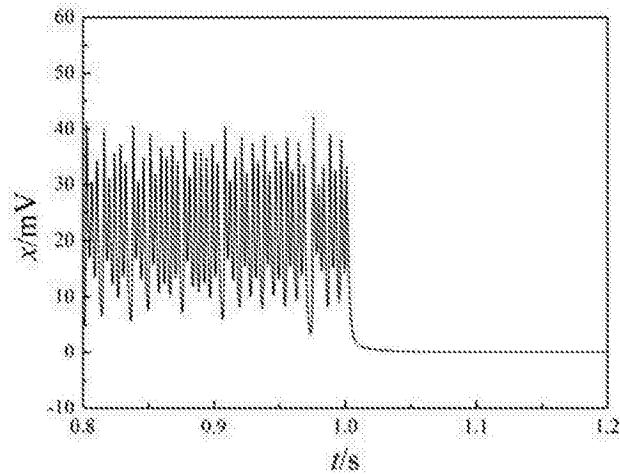


图13

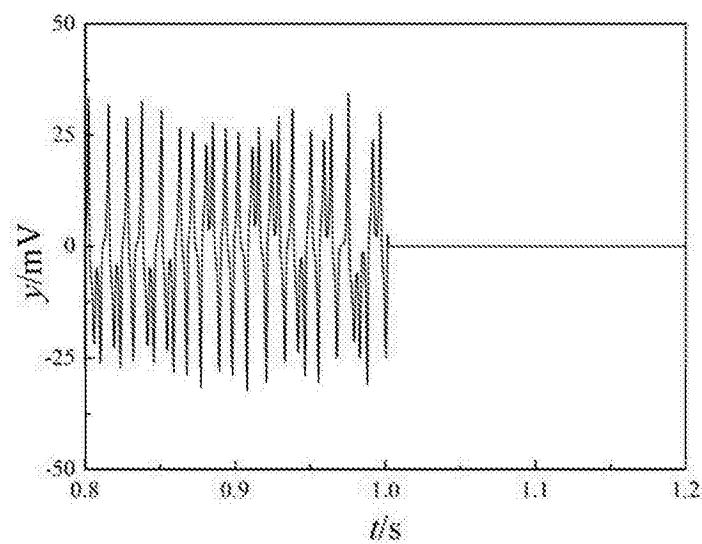


图14

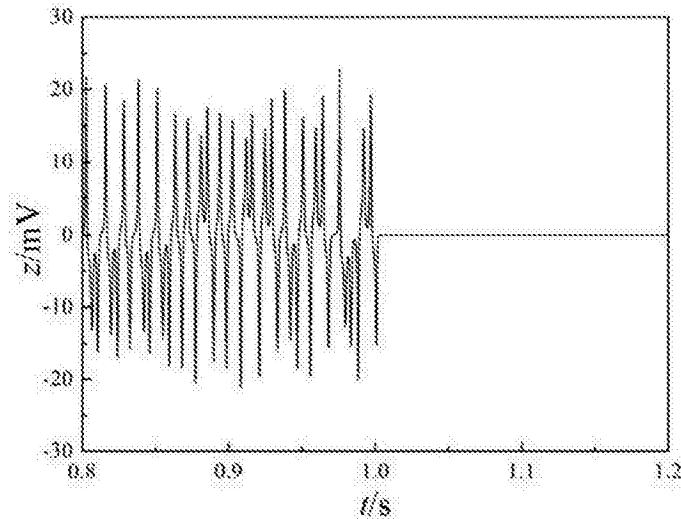


图15