

离子迁移忆阻混沌电路及其在语音保密通信中的应用

闵国旗 王丽丹 段书凯

Chaotic circuit of ion migration memristor and its application in the voice secure communication

Min Guo-Qi Wang Li-Dan Duan Shu-Kai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 210507 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.210507

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.210507>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种参数优化的混沌信号自适应去噪算法

[A parameter optimization nonlinear adaptive denoising algorithm for chaotic signals](#)

物理学报.2015, 64(4): 040503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.040503>

蔡氏电路的功能全同电路与拓扑等效电路及其设计方法

[Equivalent circuit in function and topology to Chua's circuit and the design methods of these circuits](#)

物理学报.2014, 63(20): 200503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.200503>

基于电流反馈放大器的网格多涡卷混沌电路设计与实现

[Design and implementation of grid multi-scroll chaotic circuit based on current feedback operational amplifier](#)

物理学报.2014, 63(18): 180506 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.180506>

Stadium 型介观器件腔中粒子逃逸率的研究

[Escape rates of particles in Stadium mesoscopic devices](#)

物理学报.2014, 63(17): 170509 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.170509>

简化 Lorenz 多涡卷混沌吸引子的设计与应用

[Design and application of multi-scroll chaotic attractors based on simplified Lorenz system](#)

物理学报.2014, 63(12): 120511 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.120511>

离子迁移忆阻混沌电路及其在语音保密通信中的应用*

闵国旗 王丽丹[†] 段书凯

(西南大学电子信息工程学院, 重庆 400715)

(2015年6月9日收到; 2015年7月7日收到修改稿)

忆阻器是一种具有记忆功能和纳米级尺寸的非线性元件, 作为混沌系统的非线性部分, 能够使系统的物理尺寸大大减小, 同时可以得到各种丰富的非线性曲线, 提高混沌系统的复杂度和信号的随机性. 因此, 本文采用离子迁移忆阻器的磁控模型设计了一个新的混沌系统. 通过理论推导、数值仿真、Lyapunov 指数谱、分岔图和 Poincaré 截面图研究了系统的基本动力学特性, 并分析了改变不同参数时系统动力学行为的变化. 同时, 建立了模拟该系统的 SPICE 电路, SPICE 仿真结果与数值分析相符, 从而验证该混沌系统的混沌产生能力. 最后, 利用线性反馈同步控制方法实现了新构造的离子迁移忆阻混沌系统的同步, 并且采用该同步方法有效实现了语音信号的保密通信. 数值仿真证实了新混沌系统的存在性以及同步控制应用的可行性.

关键词: 离子迁移忆阻器, 混沌系统, 动力学分析, SPICE 设计

PACS: 05.45.Ac, 05.45.Pq, 05.45.Vx, 05.45.Xt

DOI: 10.7498/aps.64.210507

1 引言

忆阻器的概念最早由 Chua 于 1971 年提出^[1]. 在 2008 年 Williams 小组制造了世界上第一个物理实现的忆阻器, 并推导出了 HP 忆阻器的数学模型^[2], 此后忆阻器日益受到学术界和工业界的重视. 忆阻器理论模型已在非线性科学领域得到广泛的研究^[3,4], 其物理实现吸引着材料科学越来越多的关注^[5,6].

在过去三十年, 各种混沌发生器的理论研究和物理实现有了很大的进步和发展^[7-10]. 然而, 由于混沌发生器有着更加复杂的混沌行为, 在物理上实现混沌发生器的技术将比预期要难, 因此其在工业界的应用受到一定的限制. 忆阻器具有纳米级尺

寸和突出的非线性特性, 它的出现可以显著推进这一传统研究. 值得注意的是, 由于忆阻器具有类似奇对称的电荷磁通的特性, 或忆阻系统^[7,8], Itoh, Muthuswamy 和 Chua 采用一个分段线性的非线性忆阻器替换蔡氏振荡器中的蔡氏二极管, 提出了若干以蔡氏电路为基础的忆阻混沌振荡电路. 在这个开创性发现的推动下, 很多探索已经致力于各种忆阻混沌系统研究, 包括系统设计, 物理实现和动力学分析^[9,11-13]. 最近, 基于忆阻器的几个混沌振荡器已经构建完成^[8-14].

此外, 混沌理论更加注重在工程应用方面的研究. 目前, 人们对于混沌的研究由认识阶段进入了控制和应用阶段. 自从计算机被应用于实现同步控制以来^[15], 国内外已经提出了很多不同的控制

* 国家自然科学基金(批准号: 61372139, 61571372, 61101233, 60972155)、新世纪优秀人才支持计划(批准号: 教技函[2013]47号)、教育部“春晖计划”科研项目(批准号: z2011148)、中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: XDJK2016A001, XDJK2014A009)、留学人员科技活动项目择优资助经费(批准号: 国家级, 优秀类, 渝人社办(2012)186号)、重庆市高等学校优秀人才支持计划(批准号: 渝教人(2011)65号)、重庆市高等学校青年骨干教师资助计划(批准号: 渝教人(2011)65号)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: ldwang@swu.edu.cn

混沌的方法^[15-19], 如线性反馈控制^[14]、非线性反馈控制^[17,18]、自适应控制^[17], Backstepping控制方法等^[2], 一些学者还对混沌保密通信进行了研究^[21,22], 如, Kocarev和Cuomo等采用混沌掩盖法以掩盖传输信息^[23-25]. 在工程实践中, 由于线性反馈控制结构简单、经济且易于实现, 故线性反馈控制方法具有很高的应用价值, 因此, 本文利用线性反馈控制方法实现了忆阻混沌系统的混沌同步, 采用混沌掩盖的方法将该同步方法应用于保密通信, 将特定的语音信号调控到混沌系统的状态变量中进行加密, 与混沌信号的输出信号一起传送到接收端, 发送系统和接收系统同步以后, 在接收端解密恢复出语音信号, 达到掩盖特定的语音信号的目的, 并且可以无失真的恢复出特定的语音信号.

因忆阻器具有丰富的器件特性, 研究者开始对忆阻器的应用前景产生越来越多的兴趣. 目前, 大部分研究集中于忆阻器在存储器和模拟神经网络中的应用^[26,27], 而鲜有对忆阻器在语音保密传输中的应用研究. 基于此, 本文设计了一个基于离子迁移忆阻器的混沌系统, 并采用混沌掩盖的方法将线性反馈同步方法应用于保密通信中, 对促进忆阻器的应用很有意义.

在本文通过理论推导、数值仿真、Lyapunov指数谱、分岔图和Poincaré截面图研究了该忆阻混沌系统的基本动力学特性, 并分析了改变不同参数时系统动力学行为的变化, 验证了系统的混沌特性^[28,29], 同时建立了模拟该系统的SPICE电路^[7,9], 对之前的数值仿真进行了分析验证; 介绍了忆阻混沌同步的线性反馈控制理论, 数值模拟实验证明了该方法的有效性, 且由此设计的控制器简单易操作, 最后将其应用到语音保密通信中发挥作用.

2 基于离子迁移忆阻器的混沌系统及基本动力学特性

2.1 基于离子迁移忆阻器的混沌系统模型

已有的三维Liu混沌系统表达为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y - x), \\ \dot{y} &= -xz + cx, \end{aligned}$$

$$\dot{z} = -bz + hx^2. \quad (1)$$

由文献^[3]可知, 当参数 $a = 10, b = 2.5, c = 40$ 时, 系统(1)为混沌系统.

在Liu系统的状态方程上做些变换, 并加入离子迁移忆阻器的磁通变量, 得到一个新的三维混沌系统. 基于离子迁移忆阻器的新混沌系统的状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= a(y - x) + yz, \\ \dot{y} &= -xz + cx, \\ \dot{z} &= -bz - 10^5 f(-|x|), \end{aligned} \quad (2)$$

其中, x, y 和 z 是状态变量, a, b 和 c 是系统参数. $f(\cdot)$ 满足离子迁移忆阻器的磁通与电荷之间的关系^[7,9], 精确的表达式可以表示为

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x - c_3}{R_{\text{OFF}}}, & x < c_1, \\ \frac{\sqrt{2kx + M(0)^2} - M(0)}{k}, & c_1 \leq x < c_2, \\ \frac{x - c_4}{R_{\text{ON}}}, & x \geq c_2. \end{cases} \quad (3)$$

这里

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{R_{\text{OFF}}^2 - M^2(0)}{2k}, \\ c_2 &= \frac{R_{\text{ON}}^2 - M^2(0)}{2k}, \\ c_3 &= \frac{(R_{\text{OFF}} - M(0))^2}{2k}, \\ c_4 &= \frac{(R_{\text{ON}} - M(0))^2}{2k}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$k = \frac{(R_{\text{ON}} - R_{\text{OFF}})u_v R_{\text{ON}}}{D^2}. \quad (5)$$

x 是离子迁移磁控忆阻器的输入磁通, 其中 R_{ON} 和 R_{OFF} 分别表示忆阻器的极限值, $M(0)$ 表示忆阻器的初始值, $W(t)$ 是依时间而变化的 TiO_{2-x} 厚度, 而 D 是薄膜的厚度. R_{ON} 是当 $W(t)$ 等于0时候的值, R_{OFF} 是当 $W(t)$ 等于 D 时候的值, u_v 表示氧空缺的平均移动量. 忆阻器的初始状态为 $R_{\text{ON}} = 100 \Omega, R_{\text{OFF}} = 20 \text{ k}\Omega, M(0) = 16 \text{ k}\Omega, D = 10 \text{ nm}$ 和 $\mu_V = 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$, 并选择初始状态 $(x, y, z) = (10, 10, 10)$, 当参数 $a = 8, b = 6, c = 15$ 时, 系统存在一个典型的混沌吸引子.

2.2 理论分析

2.2.1 对称性和不变性

做变换 $(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, z)$, 系统(2)的方程仍保持不变, 即系统的图像关于 z 轴是对称的, 且这种自然的对称性对所有的系统参数都成立.

2.2.2 耗散性和吸引子的存在性

由于散度

$$\begin{aligned} \nabla V &= \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{z}}{\partial z} \\ &= -(a+b) = -14 < 0. \end{aligned} \quad (6)$$

由于 $a+b > 0$, 则系统(2)是耗散的, 并以指数形式收敛

$$\frac{dV}{dt} = e^{-(a+b)t}. \quad (7)$$

即体积元 V 在 t 时刻收缩为体积元 $V e^{-(a+b)t}$. 这意味着, 当 $t \rightarrow +\infty$ 时, 包含系统轨线的每个小体积元以指数速率 $-(a+b)$ 收缩到零, 导致系统所有的轨线最终会被限制在一个体积为零的极限子集上, 其极限运动将收敛到一个体积为零的吸引子上, 这说明了吸引子的存在性.

2.2.3 平衡点及稳定性

为了求解系统(2)的平衡点, 令参数为 $a = 8$, $b = 6$, $c = 15$. 并且方程组为

$$\begin{aligned} a(y-x) + yz &= 0, \\ -xz + cx &= 0, \\ -bz - 10^5 f(-|x|) &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

求解(8)式可得到系统的四个平衡点为 $S(0, 0, 0.0335)$; $S_1(-17.9598, -6.2469, 15)$; $S_2(0, 0, -105.8668)$; $S_3(-0.7252, -0.2522, 15)$;

在平衡点 $S(-1.959799, 0, 0, -19.9799)$, 对系统(2)进行线性化得 Jacobian 矩阵

$$\begin{aligned} J &= \begin{bmatrix} -8 & 8+z & y \\ -z+15 & 0 & -x \\ \frac{-dbf(-|x|)}{dt} & 0 & -6 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -8 & 8.0335 & 0 \\ 14.9665 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (9)$$

为了求平衡点 $S(0, 0, 0.0335)$ 相应的特征根, 令 $\det(J - \lambda I) = 0$, 得到相应的特征值 $\lambda_1 = -15.6719$, $\lambda_2 = 7.6719$, $\lambda_3 = -6$. 其中 λ_1 和 λ_3 为负实根, λ_2 为正实根; 根据 Routh-Hurwitz 条件, 可知平衡点 S_0 为鞍点. 由此可见平衡点 S_0 是不稳定的.

在平衡点 $S_2(0, 0, -105.8668)$, 采用同样的方法可求相应的特征根 $\lambda_1 = -98.3867$, $\lambda_2 = 90.3867$, $\lambda_3 = -6$, 该平衡点对应的特征值都是有 2 个负实根和 1 个正实根, 因此, 平衡点 S_2 是不稳定的鞍点.

通过同样的计算方法可得平衡点 $S_1(-17.9598, -6.2469, 15)$ 和 $S_3(-0.7252, -0.2522, 15)$ 相应的特征根分别为 $\lambda_1 = -19.0976 + 34.1817i$, $\lambda_2 = -19.0976 - 34.1817i$, $\lambda_3 = 24.1952$ 和 $\lambda'_1 = -15.2442 + 22.3879i$, $\lambda'_2 = -15.2442 - 22.3879i$, $\lambda'_3 = 16.4885$. 因为两平衡点所对应的特征值都是有一个正实数和一对共轭复根, 因此平衡点 S_1 和 S_3 都是不稳定的鞍焦点.

从上述分析可知, 系统(2)有两个不稳定的鞍点和两个不稳定的鞍焦点. 从理论上证明了该系统有存在混沌特性的可能性.

2.3 混沌吸引子

当 $a = 8$, $b = 6$, $c = 15$ 时, 系统(2)存在一个典型的混沌吸引子. 本文采用四阶龙格库塔法进行数值仿真, 得到混沌吸引子, 如图 1 所示. 由图可知系统(2)的混沌吸引子轨线在特定的吸引域内具有遍历性.

系统(2)产生的时间序列具有非周期性, 而且对初始值极为敏感, 其时域波形如图 2 所示, 对初始值敏感特性如图 3 所示, 即使初始值 x 只相差 0.0000001 ($x_0 = 10$, $x'_0 = 10.0000001$, 其余初始值不变 $y_0 = 10$, $z_0 = 10$), 在时间 $t < 10$ s 的过程中, 两曲线没有明显的区别, 而在 $t > 10$ s 时, 两曲线表现出截然不同的时间演化曲线, 这表明了系统的运动状态对初始条件极为敏感. 系统的频谱是连续谱并且频谱图中有一系列的峰值, 如图 4 所示, 进一步表明系统(2)是混沌系统.

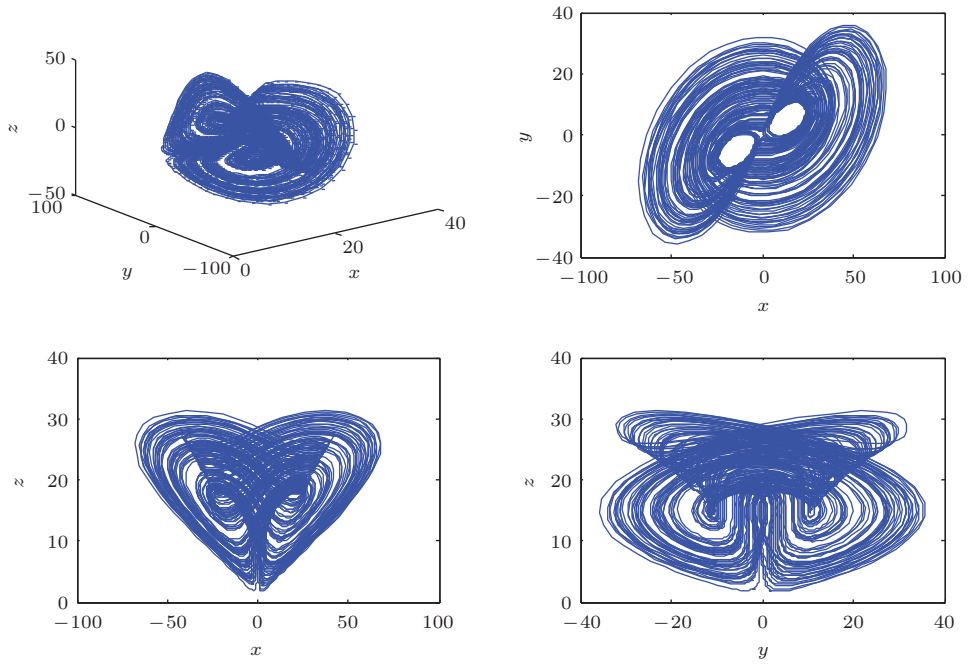


图1 系统(2)的混沌吸引子

Fig. 1. The chaotic attractors of system (2).

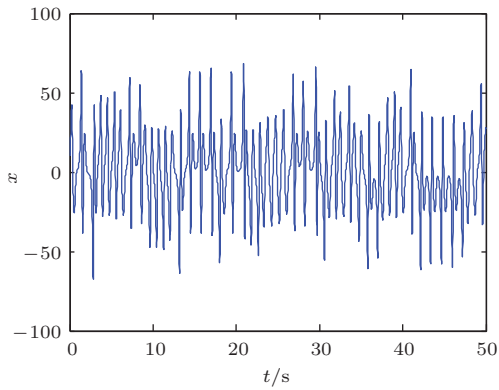


图2 状态变量x的时域波形图

Fig. 2. The time domain waveform curve of the state variable x .

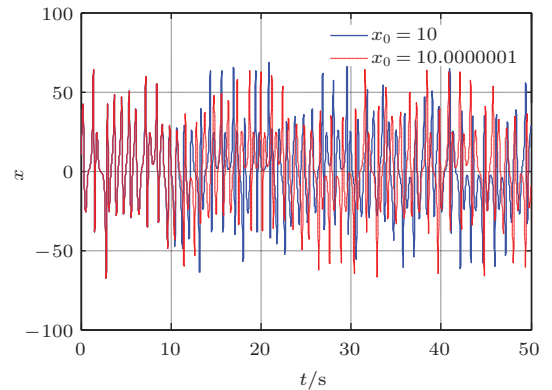


图3 状态变量x对初值的敏感性

Fig. 3. The sensitivity of the state variable x to initial value.

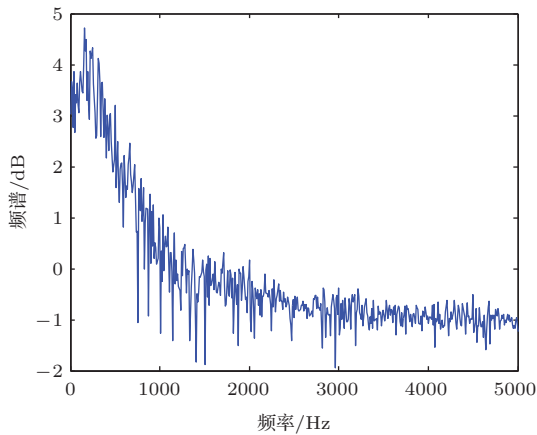


图4 系统(2)的频谱图

Fig. 4. The power spectrum of system (2).

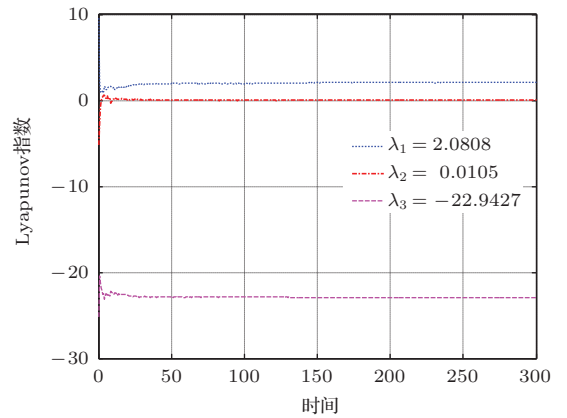


图5 系统(2)的Lyapunov指数谱

Fig. 5. The Lyapunov exponent spectrum of system (2).

2.4 Lyapunov指数和Lyapunov维数

由混沌理论知道, 在状态空间混沌吸引子的相邻轨线之间呈现彼此排斥的趋势, 并以指数速率相互分离, 而Lyapunov指数正是定量描述轨线收缩或扩张的量. 利用Jacobi方法计算其Lyapunov指数, 得到 $\lambda_1 = 2.080$, $\lambda_2 = 0.0105$, $\lambda_3 = -22.9427$, Lyapunov指数谱如图5所示. 显然, 第一个指数大于零, 第二个指数在误差允许范围内等于零, 最后一个小于零, 因此该吸引子是混沌吸引子.

设某一系统的Lyapunov指数为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ (从大到小排列), 若该系统具有混沌吸引子, 则必须同时满足以下条件: 1) 至少存在一个正的Lyapunov指数 $\lambda_i > 0$; 2) 至少存在某一 $\lambda_i = 0$ (实际数值计算只是逼近这个数); 3) Lyapunov指数谱之和为负. 上面计算得到的一个正的Lyapunov指数表明该吸引子是混沌吸引子, 据此李雅普诺夫维数为

$$D_\lambda = i + \frac{S_i}{|\lambda_{i+1}|} = 2 + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{|\lambda_3|} = 2 + \frac{2.080 + 0.0105}{|-22.9427|} = 2.0911. \quad (10)$$

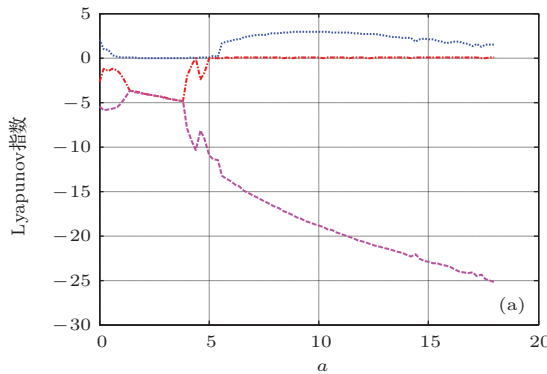
进一步说明吸引子有着复杂的分型结构.

通过上述理论分析和数值仿真证明, 这个系统确实是一个新的混沌系统.

2.5 系统参数的影响

随着系统参数的改变, 系统平衡点的稳定性将会发生变化, 从而系统也将处于不同的状态. 用分岔图、最大Lyapunov指数谱图(LE谱)和轨道图可以很直观地分析出各个系统参数变化时系统的变化情况.

1) 固定参数 $b = 6, c = 15$, 改变 $a, a \in [0, 18]$.



当 a 在 $[0, 18]$ 变化时, 系统的LE谱以及关于 a 的分岔图如图6所示. 当有一个LE大于零的时候, 系统处于混沌状态. 由图6(a)可见, 随着 a 的变化, 系统的最大LE时而大于零, 时而等于零, 说明在 a 变化的过程中混沌与周期轨交替出现. 实际上, 随着参数的变化, 混沌与周期解之间的过渡没有很明确的界限. 图7给出了参数 a 取定一些值时系统的轨道图. 当 $a = 2, 3$ 和 4 时系统均是周期的, 当 $a = 6$ 时, 系统存在一个混沌吸引子.

2) 固定参数 $a = 8, c = 15$, 改变 $b, b \in [0, 18]$.

当 b 在 $[0, 18]$ 变化时, 系统的LE谱以及关于 b 的分岔图如图8所示. 由图8(a)可知, 随着 b 的变化, 系统的最大LE由大于零过渡到等于零. 图8(b)也反映出随 b 的变化, 系统由混沌状态过渡到周期解. 图9给出了参数 $b = 16$ 和 6 时系统的轨道图.

3) 固定参数 $a = 8, b = 6$, 改变 $c, c \in [0, 18]$.

当 c 在 $[0, 18]$ 变化时, 系统的LE谱以及关于 c 的分岔图如图10所示. 由图10(a)可知, 随着 c 的变化, 系统的最大LE从小于零, 再等于零, 再过渡到大于零. 图10(b)图也反映出随 c 的变化, 系统由周期解过渡到混沌状态. 图11给出了参数 $c = 2$ 和 5.8 时系统的轨道图.

从以上分析可知, 参数 a, b 和 c 对系统状态影响很大, 由于参数变化范围没有固定, 本文只是在系统(2)处于一个典型吸引子的参数附近进行了变化. 可见, 该系统的动力学特征十分丰富. 由于该系统参数个数较多, 系统处于混沌状态的参数范围也较大, 这更加有利于将混沌系统应用于保密通信系统中, 因为一个好的保密系统的条件之一就是其密钥空间要大, 而本文提出的混沌系统正好可以满足这个条件.

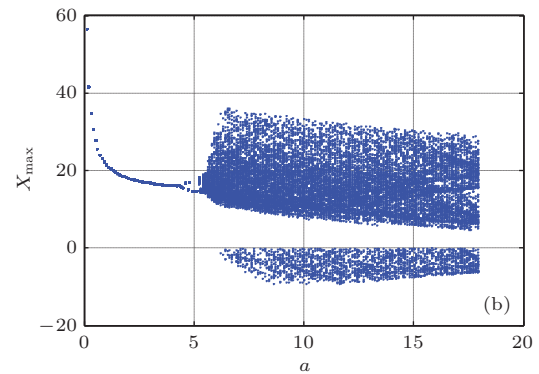


图6 a 变化时系统的LE谱和分岔图 (a) LE谱; (b) 分岔图

Fig. 6. The LE spectrum and bifurcation diagram of the system with the change of a : (a) LE spectrum; (b) bifurcation diagram.

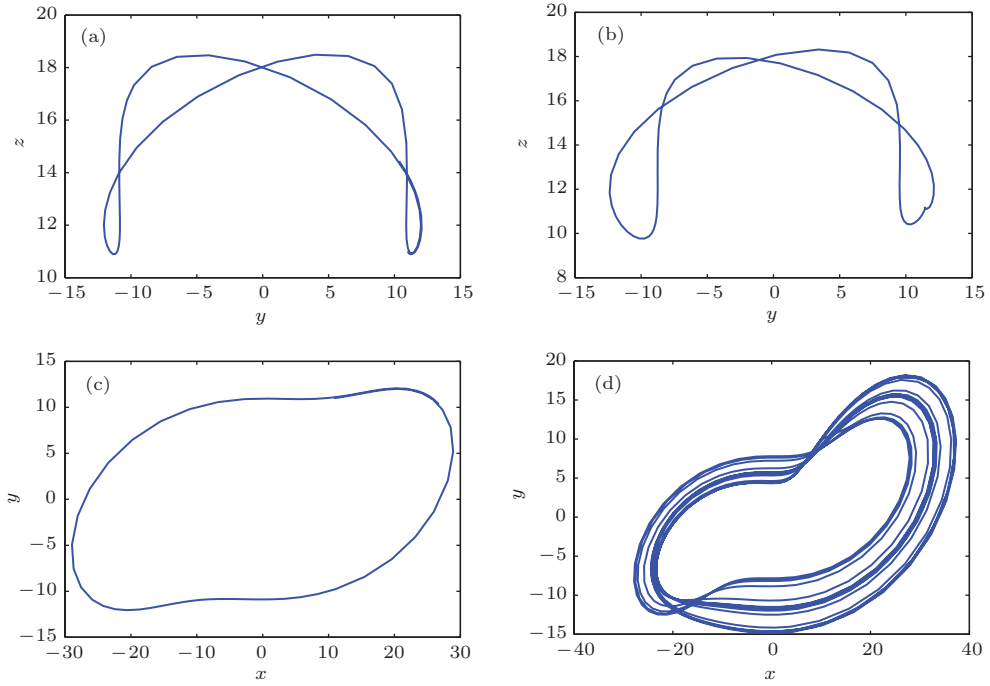


图7 $a = 2, 3, 4$ 和 6 时系统的轨道图 (a) $a = 2$ 时周期轨道的 yz 平面相图; (b) $a = 3$ 时周期轨道的 yz 平面相图; (c) $a = 4$ 时周期轨道的 xy 平面相图; (d) $a = 6$ 时混沌吸引子的 xy 平面相图

Fig. 7. When $a = 2, 3, 4$ and 6 , the orbital diagrams of the system: (a) When $a = 2$, the yz plane phase diagram of periodic orbit; (b) when $a = 3$, the yz plane phase diagram of periodic orbit; (c) when $a = 4$, the xy plane phase diagram of periodic orbit; (d) when $a = 6$, the xy plane phase diagram of chaotic attractor.

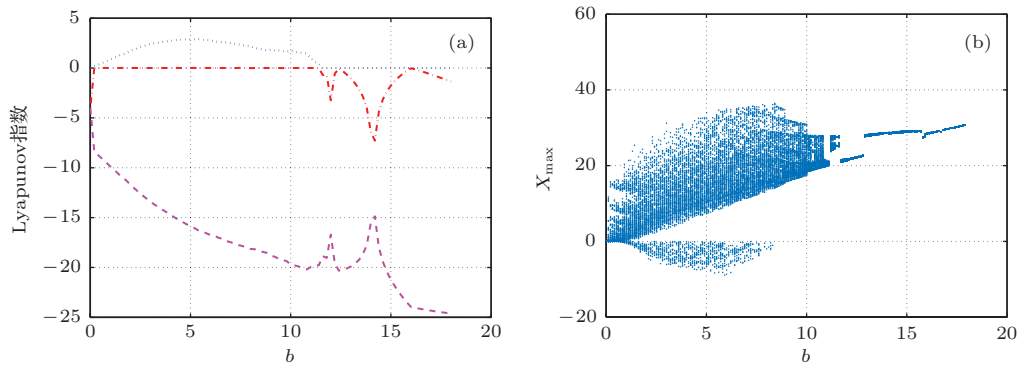


图8 b 变化时系统的 LE 谱和分岔图 (a) LE 谱; (b) 分岔图

Fig. 8. The LE spectrum and bifurcation diagram of the system with the change of b : (a) LE spectrum; (b) bifurcation diagram.

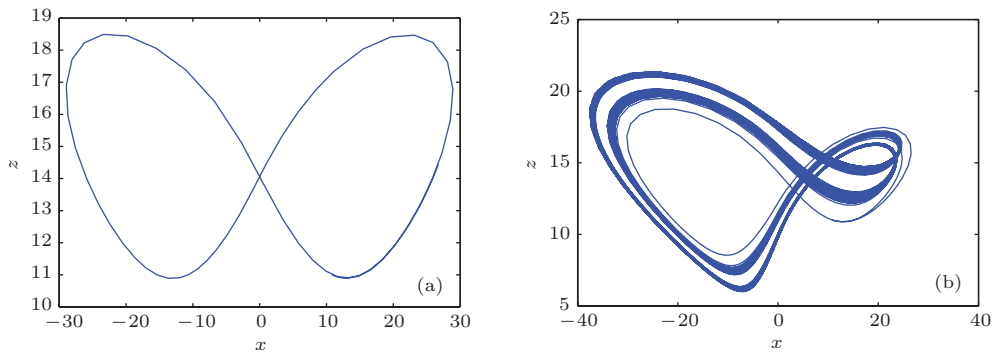


图9 $b = 16$ 和 6 时系统的轨道图 (a) $b = 16$ 时周期轨道的 xz 平面相图; (b) $b = 6$ 时混沌吸引子的 xz 平面相图

Fig. 9. When $b = 16$ and 6 , the orbital diagrams of the system: (a) When $b = 16$, the xz plane phase diagram of periodic orbit; (b) when $b = 6$, the xz plane phase diagram of chaotic attractor.

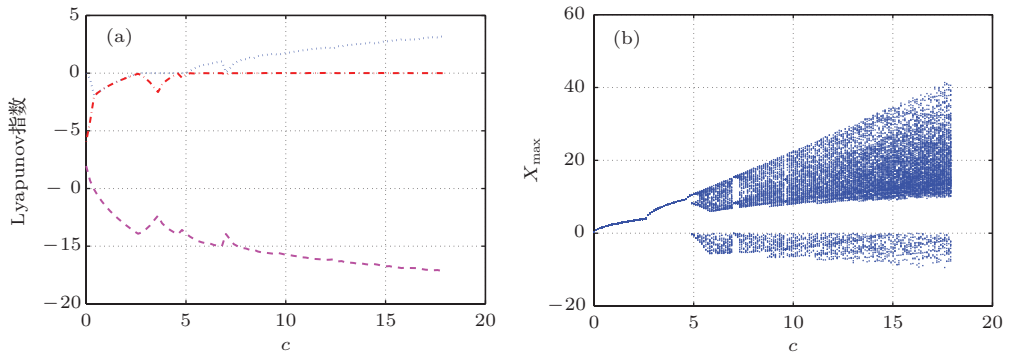


图 10 c 变化时系统的 LE 谱和分岔图 (a) LE 谱; (b) 分岔图

Fig. 10. The LE spectrum and bifurcation diagram of the system with the change of c : (a) LE spectrum; (b) bifurcation diagram.

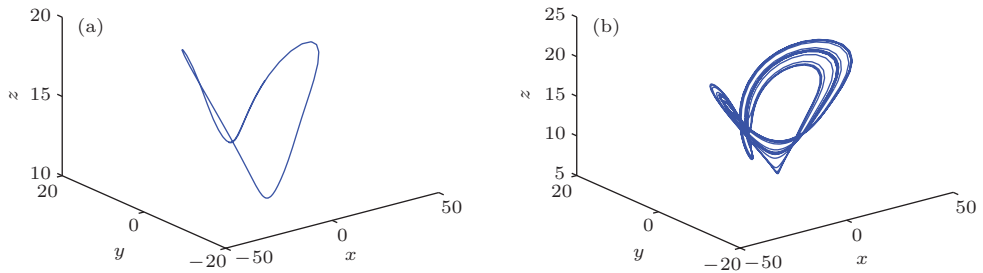


图 11 $c = 2$ 和 5.8 时系统的轨道图 (a) $c = 2$ 时周期轨道的 xyz 三维相图; (b) $c = 5.8$ 时混沌吸引子的 xyz 三维相图
 Fig. 11. When $c = 2$ and 5.8 , the orbital diagrams of the system: (a) When $c = 2$, the xyz three-dimensional phase diagrams of periodic orbit; (b) when $c = 5.8$, the xyz three-dimensional phase diagrams of chaotic attractor.

2.6 Poincaré 截面图

为了利于观察系统的动力学特性, Poincaré 截面的选取要恰当, 此截面不能包含系统的轨线, 也不能与轨迹相切. 在给定的某组参数下, 本文

选取了相空间中穿过某一个平衡点的平面作为 Poincaré 截面, 然后观察 Poincaré 截面上截点的情况, 由此判断在这组固定的参数下系统的运动是否为混沌的.

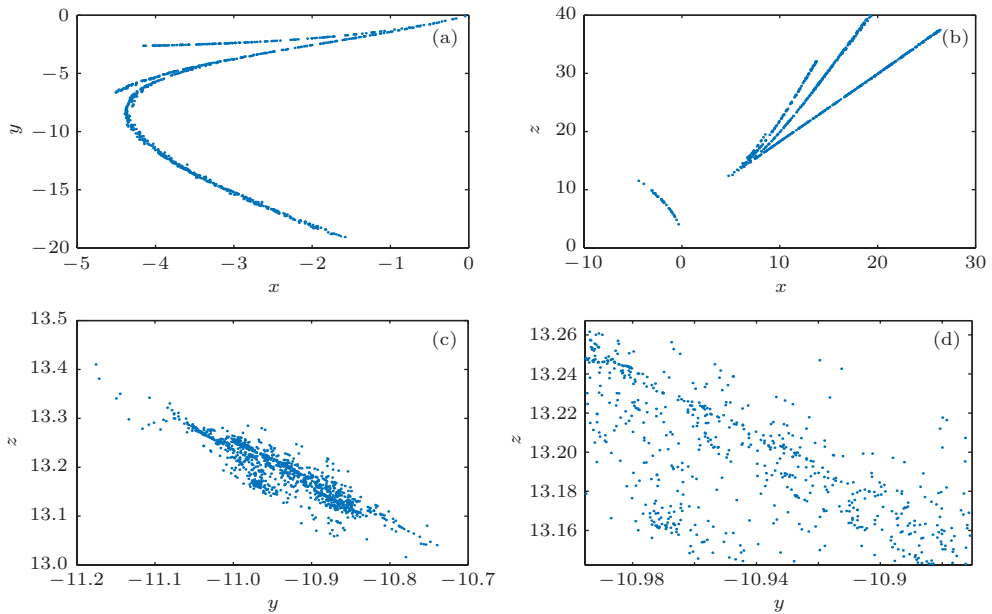


图 12 系统 (2) 的 Poincaré 截面图 (a) $z = 0$; (b) $y = 0$; (c) $x = 0$; (d) 为图 (c) 的局部放大

Fig. 12. Poincaré map of system (2): (a) $z = 0$; (b) $y = 0$; (c) $x = 0$; (d) partial enlargement of (c).

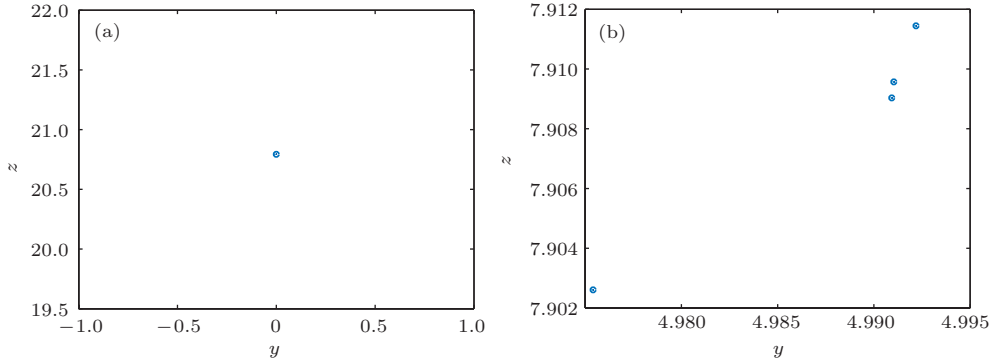


图 13 系统 (2) 的 Poincaré 截面图 (a) $a = 3, b = 6, c = 15$; (b) $a = 8, b = 16, c = 15$

Fig. 13. Poincaré map of system (1): (a) $a = 3, b = 6, c = 15$; (b) $a = 8, b = 16, c = 15$.

固定 $a = 8, b = 6, c = 15$ 时, 系统有一个 LE 大于零, 可见系统处于混沌状态, 图 12 展示了此时系统在几个截面上的 Poincaré 截面图.

由图 12 可以看出, Poincaré 截面图上有一些成片的具有分形结构的密集点, 吸引子的叶片清晰可见, 进一步说明了此时系统的运动是混沌的.

固定 $a = 3, b = 6, c = 15$ 和 $a = 8, b = 16, c = 15$ 时, 系统有一个 LE 等于零, 另外两个 LE 小于零, 可知系统均为周期的. 图 13 展示了在这两组参数下系统在截面 yz 上的 Poincaré 截面图. 由图 13 可见, Poincaré 截面图上只有少数离散的点, 表明系统的运动是周期的.

2.7 混沌吸引子的模拟实现和 SPICE 仿真

为了验证系统 (2) 的混沌行为, 设计了可以实现该混沌系统的电路. 该电路由三路模拟运算电路组成, 分别实现系统 (2) 中的状态 x, y 和 z 的运算. 用到的元器件有 LM348 运放、忆阻器、二极管、乘法器、电容和电阻等. 电路如图 14 所示.

加入电路中的电源 $V_{CC} = +30\text{ V}, V_{EE} = -30\text{ V}$. 该混沌电路包含三个模块. 每个模块对应系统 (2) 中一个变量的无量纲方程. 电路中的电压节点 v_x, v_y 和 v_z 分别代表混沌系统中的状态变量. 运算放大器 U_1 和 U_2 用来实现下面的公式:

$$v_x = -\frac{1}{R_5 C_1} \int \left(-\frac{R_4}{R_1} v_y + \frac{R_4}{R_2} v_x - \frac{R_4}{R_3} v_y v_z \right) dt = \frac{R_4}{R_5 C_1} \int \left(\frac{v_y}{R_1} - \frac{v_x}{R_2} + \frac{v_y v_z}{R_3} \right) dt, \quad (11)$$

也即是

$$\dot{v}_x = \frac{R_4}{R_5 C_1} \left(\frac{v_y}{R_1} - \frac{v_x}{R_2} + \frac{v_y v_z}{R_3} \right). \quad (12)$$

和 (12) 式对比, 令 $R_1 = R_4 = 8\text{ k}\Omega, R_2 = R_3 = 1\text{ k}\Omega, R_5 = 1\text{ M}\Omega$, 和 $C_1 = 1\text{ }\mu\text{F}$, 得到

$$\dot{v}_x = 8(v_y - v_x) + v_y v_z. \quad (13)$$

同理可得到

$$\dot{v}_y = \frac{R_{10}}{R_{11} C_2} \left(-\frac{v_x v_z}{R_8} + \frac{v_x}{R_9} \right), \quad (14)$$

其中 $R_8 = R_{10} = 15\text{ k}\Omega, R_9 = 1\text{ k}\Omega, R_{11} = 1\text{ M}\Omega$, 和 $C_2 = 1\text{ }\mu\text{F}$, 即

$$\dot{v}_y = -v_x v_z + 15v_x. \quad (15)$$

运算放大器 U_7 和 U_8 被用来实现绝对值电路. 二极管选用 D120NQ045 模型. 当 $v_x \leq 0$ 时, D_1 导通, D_2 截止, 反相端“-”虚短, 运算放大器 U_7 的输出电压为 $v_{U7} = 0$, 运算放大器 U_8 为加法器, 输出电压 $v_{U8} = -\frac{R_{20}}{R_{17}} v_x$; 当 $v_x \geq 0$ 时, 运放 U_7 输出电压小于零, D_1 截止, 只要 U_7 达到 -0.7 V , D_2 就导通, 此时 U_7 相当于一个反相输入的比例放大器, 运算放大器 U_7 的输出电压为 $v_{U7} = -\frac{R_{16}}{R_{14}} v_x$, 运算放大器 U_8 为加法器, 输出电压 $v_{U8} = -\left(\frac{R_{20}}{R_{17}} v_x + \frac{R_{20}}{R_{18}} v_{U7} \right)$, 即 $v_{U8} = -\frac{R_{20}}{R_{17}} v_x + \frac{R_{16} R_{20}}{R_{14} R_{18}} v_x$, 综上所述可知:

$$v_{U8} = \begin{cases} -\frac{R_{20}}{R_{17}} v_x + \frac{R_{16} R_{20}}{R_{14} R_{18}} v_x, & v_x \geq 0, \\ -\frac{R_{20}}{R_{17}} v_x, & v_x < 0. \end{cases} \quad (16)$$

当 $R_{14} = R_{16} = R_{17} = R_{20} = 1\text{ k}\Omega, R_{15} = R_{18} = 500\text{ }\Omega$ 时, U_8 的输出电压为 $v_{U8} = |v_x|$. 运算放大器 U_9 的输出电压为: $v_{U9} = -\frac{R_{22}}{R_{21}} |v_x|$. 令 $R_{21} = R_{22} = 1\text{ k}\Omega$, 可得 $v_{U9} = -|v_x|$.

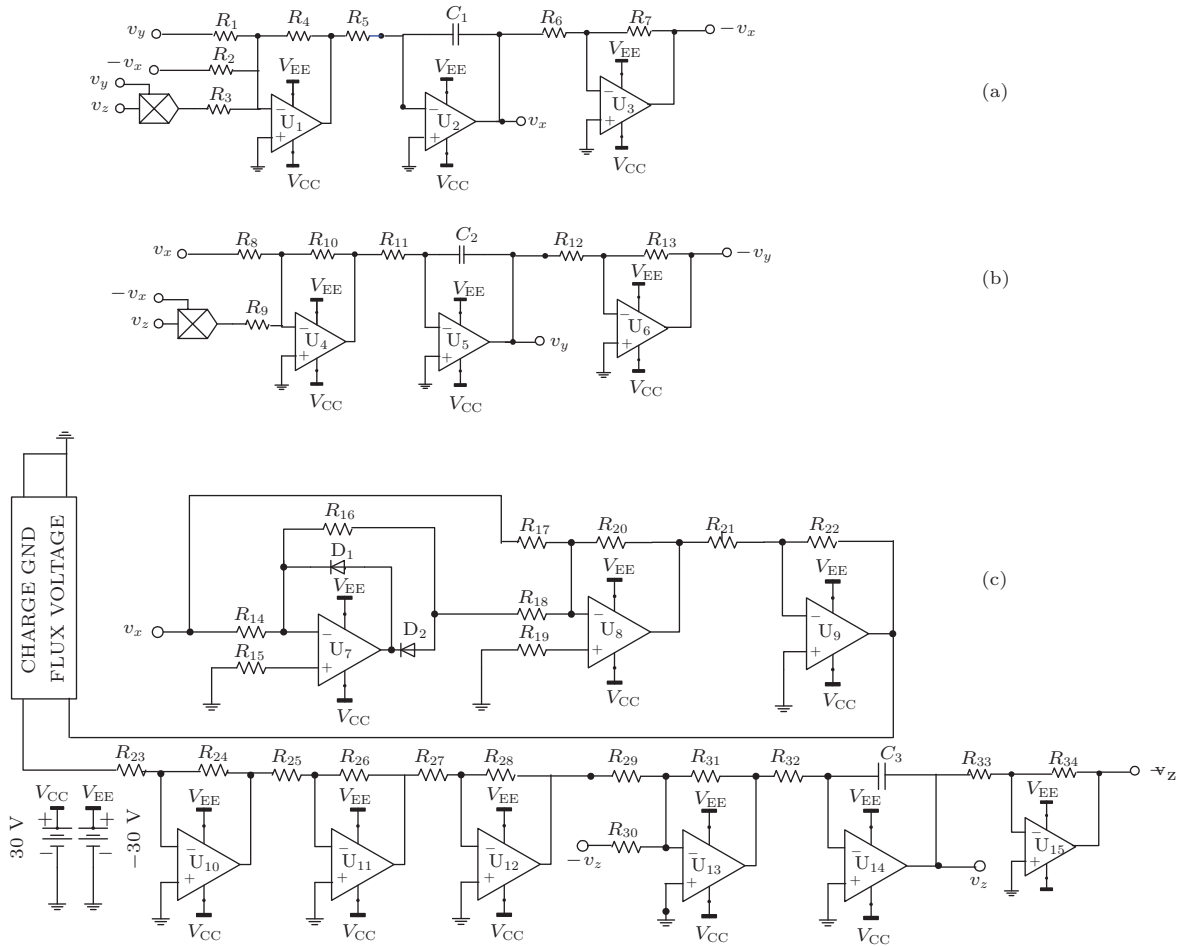


图 14 磁控忆阻混沌系统的电路图 (a), (b), (c) 分别对应系统 (2) 中各式

Fig. 14. Circuit of migration memristor chaotic system; (a), (b), (c) corresponding to the state equations of the system (2).

U₉ 的输出作为磁通控制忆阻器的输入, 磁通控制忆阻器的参数设置为 $R_{ON} = 100 \Omega$, $R_{OFF} = 20 \text{ k}\Omega$, $M(0) = 16 \text{ k}\Omega$, $D = 10 \text{ nm}$ 和 $\mu_V = 10^{-14} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$.

运算放大器 U₁ 和 U₁₁ 主要用来对信号进行两级放大, 每一级放大的增益分别是 100 和 1000. 经过两级放大后, 忆阻器的电荷被放大了 100000 倍, 运算放大器 U₁₂ 实现一个反比例器. 令 $R_{23} = 100 \Omega$, $R_{25} = 10 \Omega$, $R_{24} = R_{26} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_{27} = R_{28} = 1 \text{ k}\Omega$, 得到

$$\begin{aligned} v_{U_{12}} &= -\frac{R_{24}R_{26}R_{28}}{R_{23}R_{25}R_{27}}f(-|x|) \\ &= -10^5 f(-|x|). \end{aligned} \quad (17)$$

运算放大器 U₁₃ 和 U₁₄ 分别实现一个加法和器和一个积分器.

$$v_z = v_{U_{14}}$$

$$= -\frac{1}{R_{33}C_3} \int \left(-\frac{R_{32}}{R_{29}}v_{U_{12}} + \frac{R_{32}}{R_{30}}v_z \right) dt. \quad (18)$$

整理得

$$\dot{v}_z = -\frac{1}{R_{33}C_3} \left(-\frac{R_{32}}{R_{29}}v_{U_{12}} + \frac{R_{32}}{R_{30}}v_z \right). \quad (19)$$

把 $R_{32} = R_{29} = 6 \text{ k}\Omega$, $R_{30} = 1 \text{ k}\Omega$, $R_{33} = 1000 \text{ k}\Omega$, $C_3 = 1 \mu\text{F}$ 和 $v_{U_{12}}$ 代入上式得

$$\dot{v}_z = -6v_z - 10^5 f(-|x|). \quad (20)$$

PSPICE 的仿真时间设置为 300 s, 最大仿真步长设置为 0.01 s. 忆阻混沌系统的电路仿真结果如图 15 所示, 对比图 1 中的 $x-y$, $x-z$, $y-z$ 相图和图 2 中的 $t-x$ 时域图, 可知混沌吸引子电路实验与数值仿真结果一致, 从而验证了该混沌吸引子存在于三维忆阻电路中.

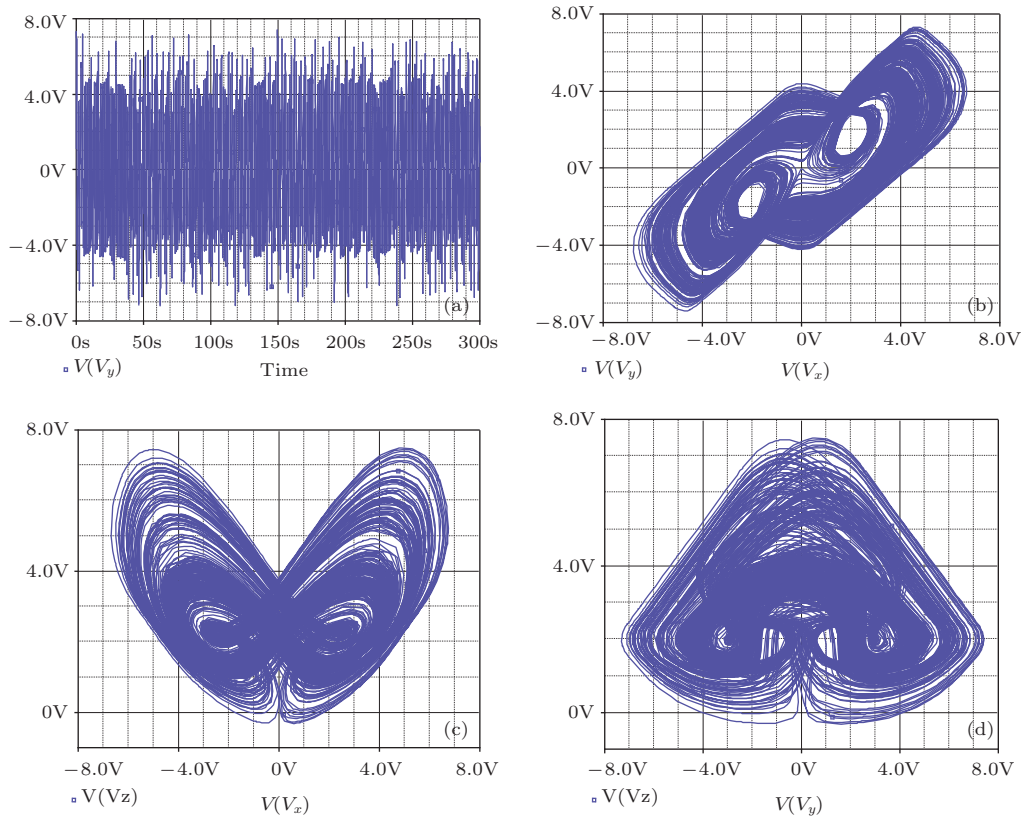


图 15 (a) 表示状态变量 x 在 SPICE 仿真中的时域波形; 图 (b), (c), (d) 分别表示在 SPICE 仿真中的 $x-y$, $x-z$, $y-z$ 的相图
 Fig. 15. (a) The time domain waveform of state variables x in the SPICE simulation; (b), (c), (d) are the phase diagrams of the SPICE simulation in $x-y$, $x-z$, $y-z$.

3 忆阻混沌系统的线性反馈同步及其在语音保密通信中的应用

本节主要讨论以下几个问题, 首先介绍了混沌系统的线性反馈同步控制理论, 进行了数值模拟实验以证明该方法的有效性. 由此设计的控制器简单易操作, 最后将其应用到语音保密通信中掩盖特定语音, 并且可以无失真地恢复此特定语音.

3.1 忆阻混沌系统的线性反馈同步

假设有驱动系统和响应系统, 分别用 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 表示其状态向量. 驱动系统的状态方程表示为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a(y_1 - x_1) + y_1 z_1, \\ \dot{y}_1 &= cx_1 + x_1 z_1, \\ \dot{z}_1 &= -bz_1 - 10^5 f(-|x_1|). \end{aligned} \quad (21)$$

响应系统的状态方程表示为

$$\dot{x}_2 = a(y_2 - x_2) + y_2 z_2,$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_2 &= cy_2 + y_2 z_2 + k(y_1 - y_2), \\ \dot{z}_2 &= -bz_2 - 10^5 f(-|x_2|). \end{aligned} \quad (22)$$

其中 k 为线性耦合系数.

定义同步误差

$$e_1 = x_2 - x_1, e_2 = y_2 - y_1, e_3 = z_2 - z_1. \quad (23)$$

得到如下的同步误差系统:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= a(e_2 - e_1) + e_2 z_2 + y_1 e_3, \\ \dot{e}_2 &= ce_1 + e_1 z_2 + x_1 e_3 + k(y_1 - y_2), \\ \dot{e}_3 &= -be_3. \end{aligned} \quad (24)$$

定理 1 对于系统 (24), 当控制器取 $u = -ke_2$ (k 为充分大的反馈增益) 时, 所得到的闭环系统是渐近稳定的, 从而 (21) 和 (22) 式实现级渐近同步.

证明 将控制器 $u = -ke_2$ 代入 (24) 式中, 得闭环系统

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= a(e_2 - e_1) + e_2 z_2 + y_1 e_3, \\ \dot{e}_2 &= ce_1 + e_1 z_2 + x_1 e_3 - ke_2, \\ \dot{e}_3 &= -be_3. \end{aligned} \quad (25)$$

选取 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2). \quad (26)$$

将 V 沿系统 (24) 的轨迹对时间 t 求导, 得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + e_3 \dot{e}_3 \\ &= -e_1^2 - ke_2^2 - be_3^2 + (a + c + 2z_2)e_1e_2 \\ &\quad + x_1e_2e_3 + y_1e_1e_3. \end{aligned} \quad (27)$$

由于混沌系统是耗散系统, 轨迹是有界的, 所以存在常数 $M > 0$, 使得 $|x| < M$, $|y| < M$, $|z| < M$. 因此,

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -e_1^2 - ke_2^2 - be_3^2 + (a + c + 2M)|e_1||e_2| \\ &\quad + M|e_2||e_3| + M|e_1||e_3| \\ &= -(|e_1|, |e_2|, |e_3|)R(|e_1|, |e_2|, |e_3|)^T, \end{aligned} \quad (28)$$

其中

$$R = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{a+c+2M}{2} & -\frac{M}{2} \\ -\frac{a+c+2M}{2} & k & -\frac{M}{2} \\ -\frac{M}{2} & -\frac{M}{2} & b \end{bmatrix}. \quad (29)$$

可见, 只要选取适当的增益 k , 使得

$$k > \frac{(M^2 + b)(a + c + 2M)^2 + M^2}{4b - M^2}. \quad (30)$$

矩阵 R 就是正定的, 根据 Lyapunov 稳定性理论知闭环系统 (25) 是渐近稳定的, 从而系统 (21) 和 (22) 能实现同步.

3.2 数值仿真

利用 Matlab 验证控制器的有效性. 取系统参数 $a = 8, b = 6, c = 15$, (21) 和 (22) 式的初值分别为 $(0, 1, 0)$ 和 $(1, 0, 0)$. 取控制系数 $k = 10$ 时, 在线性反馈控制下, (21) 和 (22) 式的同步误差曲线如图 16 所示, 其中 $e_1 = x_2 - x_1, e_2 = y_2 - y_1, e_3 = z_2 - z_1$. 从图中可以看出, 在线性反馈控制下, (21) 和 (22) 式经过一个暂态过程后误差变量 e_1, e_2, e_3 全部趋向于零, 这说明驱动系统和响应系统达到了完全同步, 验证了线性控制器的有效性.

根据 Routh-Hurwitz 稳定性判据系统 (25) 是稳定的, 同步效果图如图 17 所示. 由图可知, 驱动系统和响应系统的对应变量实现了完全同步. 其中 x_1 是驱动信号, x_2 是响应信号.

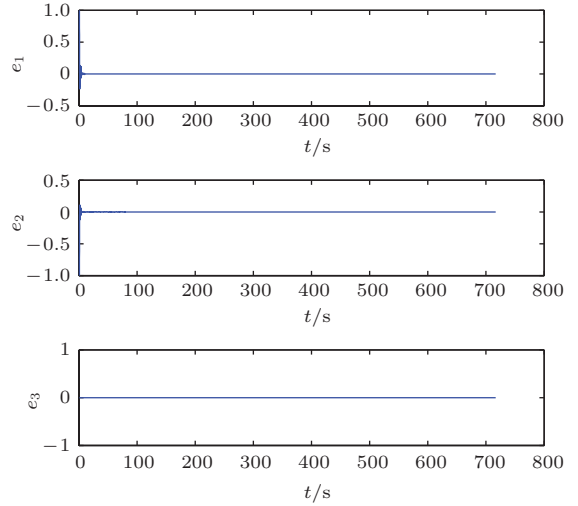


图 16 两系统的同步误差曲线

Fig. 16. Synchronous error curve of two systems.

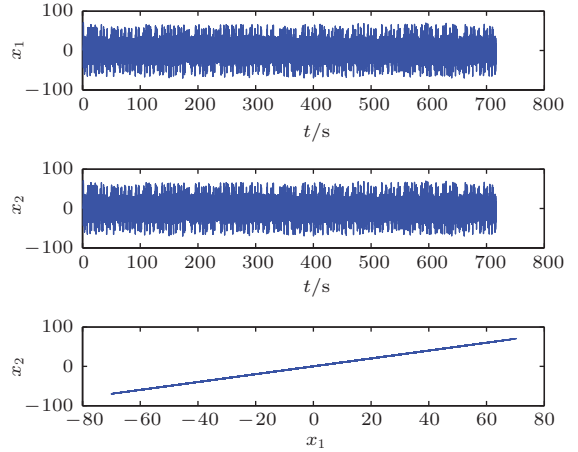


图 17 x_1, x_2 的时域波形图和相位图

Fig. 17. The time domain waveform and phase diagram of x_1 and x_2 .

3.3 忆阻混沌同步在语音保密通信中的应用

语音保密通信系统原理如下图 18 所示. 在线性反馈同步控制的基础上进行保密通信的研究.

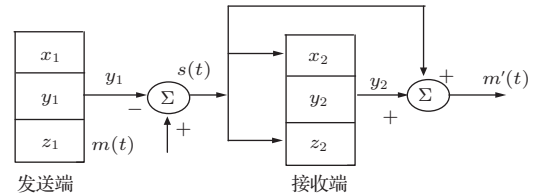


图 18 混沌掩盖保密通信原理图

Fig. 18. The principle diagram of the chaos masking secure communications.

发射系统

$$\dot{x}_1 = a(y_1 - x_1) + y_1z_1,$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= cx_1 + x_1z_1 + km(t), \\ \dot{z}_1 &= -bz_1 - 10^5 f(-|x|). \end{aligned} \quad (31)$$

响应系统的状态方程表示为

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= a(y_2 - x_2) + y_2z_2, \\ \dot{y}_2 &= cx_2 + x_2z_2 + k(s(t) - y_2), \\ \dot{z}_2 &= -bz_2 - 10^5 f(-|x|). \end{aligned} \quad (32)$$

其中, $s(t) = m(t) - y_1$ 表示信道中传输的信号, $m(t)$ 表示要传输的有用语音信号, 以比混沌信号小的多的强度调制在混沌信号中. 在 $s(t)$ 的驱动下, 发射系统与接收系统的混沌信号可以近似同步, 即 $y_1 \approx y_2$, 在接收端通过混沌同步提取信号

$$\begin{aligned} m'(t) &= s(t) + y_2 \\ &= m(t) - y_1 + y_2 \approx m(t). \end{aligned} \quad (33)$$

通过以上分析论证, 就可以恢复隐藏在混沌系统中有用的语音信号. 用 Matlab 软件进行仿真, 仿真结果如图 19. 由仿真结果可知, 在接收端构建同步机理后, 可解密出原始语音信号, 与原始语音对比可知信号并未失真, 播放解密后的信号可以听到清晰的语音, 说明系统达到完全同步以后, 语音信号能够被有效地恢复出来. 可见加密和解密都取得了理想的效果.

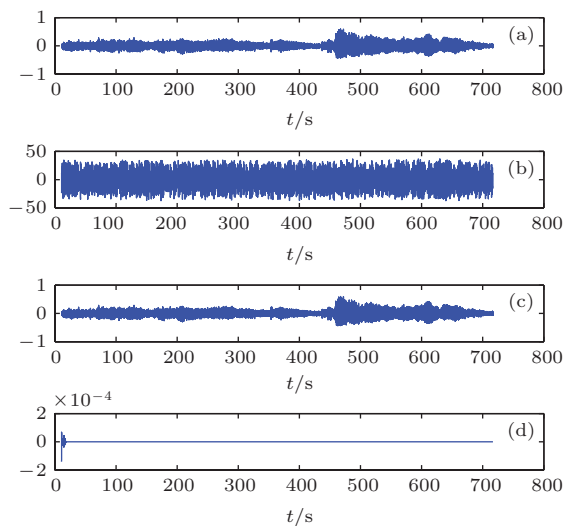


图 19 基于忆阻混沌系统同步的语音保密通信仿真图 (a) 加密前音频信号; (b) 加密后音频信号; (c) 解密后音频信号; (d) 解密后音频信号与加密前音频信号的误差

Fig. 19. Simulation of speech secure communication based on the synchronization of memristor chaotic system: (a) Audio signal before encryption; (b) encrypted audio signal; (c) audio signal after decryption; (d) the error of decrypted audio signal and the audio signal before encryption.

4 结 论

忆阻器是一种最新元器件, 体积小, 功耗低, 在混沌电路中有着很高的应用价值. 本文基于离子迁移忆阻器, 构建了一个新三维混沌系统, 通过 Lyapunov 指数谱、分岔图、功率谱和 Poincaré 截面图等方法研究了该系统的基本动力学特性, 并探究了不同参数对系统动力学行为的影响, 验证了该系统的混沌特性. 此外, 本文还通过 SPICE 电路对该混沌系统进行了模拟仿真, 采用线性反馈方法实现了驱动系统与响应系统的同步, 并结合混沌掩盖保密通信的具体实例和数值模拟方法进一步验证了所给方案的有效性, 即基于离子迁移忆阻混沌系统的线性同步控制方法, 应用到保密通信可以达到掩盖并无失真还原特定语音的目的, 进而提高系统的抗破译性及安全性.

参考文献

- [1] Chua L O 1971 *IEEE Trans. Circ. Theor.* **18** 507
- [2] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, Williams R S 2008 *Nature* **453** 80
- [3] Kavehei O, Iqbal A, Kim Y S, Eshraghian K, Al-Sarawi S F, Abbott D 2010 *Proc. R. Soc. A* **466** 2175
- [4] Biolk Z, Biolk D, Biolková V 2009 *Radio. Eng.* **18** 210
- [5] Pershin Y V, Di Ventra M 2008 *Phys Rev B* **78** 3309
- [6] Jo S H, Kim K H, Lu W 2009 *Nano let.* **9** 870
- [7] Hu X F, Chen G R, Duan S K, Feng G 2014 *In Memristor Networks (Springer International Publishing)* (pp351–364)
- [8] Muthuswamy B, Kokate P P 2009 *IETE Tech Rev.* **26** 417
- [9] Wang L D, Drakakis E, Duan S K, He P F, Liao X F 2012 *Int J Bifurcat Chaos* **22** 1250205
- [10] Zhong G Q, Man K F, Chen G R 2002 *Int J Bifurcat Chaos* **12** 2907
- [11] Bao B C, Shi G D, Xu J P, Liu Z, Pan S H 2011 *Sci China Technol Sc.* **54** 2180
- [12] Bao B C, Xu J P, Zhou G H, Ma Z H, Zou L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 120502
- [13] Bao B C, Feng F, Dong W, Pan S H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 068401
- [14] Corinto F, Ascoli A, Gilli M 2012 *IEEE World Congress on Computational Intelligence, WCCI, Brisbane, Australia, June 2012* p10–15
- [15] Pecora L M, Carroll T L 1990 *Phys rev let.* **64** 821
- [16] Wang F Q, Liu C X 2006 *Phys Lett A* **360** 274
- [17] Park J H 2005 *Chaos, Soliton & Fract.* **25** 579
- [18] Chen Z S, Sun K H, Zhang T S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2580 (in Chinese) [陈志盛, 孙克辉, 张泰山 2005 物理学报 **54** 2580]

- [19] Hegazi A S, Agiza H N, El-Dessoky M M 2002 *Int J Bifurcat Chaos* **12** 1579
- [20] Park J H 2006 *Chaos, Soliton & Fract.* **27** 1369
- [21] Li Z G, Xu D L 2004 *Chaos, Soliton & Fract.* **22** 477
- [22] Lu J G 2005 *Chaos, Soliton & Fract.* **25** 221
- [23] Kocarev L, Halle K S, Eckert K, Chua L O 1992 *Int J Bifurcat Chaos* **2** 709
- [24] Cuomo K M, Oppenheim A V, Strogatz S H 1993 *IEEE T CIRCUITS-II* **40** 626
- [25] Pehlivan I, Uyaroglu Y, Yogun M 2010 *Sci Res Essays.* **5** 2210
- [26] Vontobel P O, Robinett W, Kuekes P J, Stewart D R, Williams R S, Straznický J 2009 *Nanotechnology* **20** 21
- [27] Jo S H, Chang T, Ebong I, Bhadviya B B, Mazumder P, Lu W 2010 *Nano Lett.* **10** 1297
- [28] Wang Z J, Chen Z Q, Yuan Z Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3956 (in Chinese) [王杰智, 陈增强, 袁著祉 2006 物理学报 **55** 3956]
- [29] Tang L R, Li J, Fan B, Zhai M Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 785 (in Chinese) [唐良瑞, 李静, 樊冰, 翟明岳 2009 物理学报 **58** 785]
- [30] Liu W B, Chen G R 2003 *Int J Bifurcat Chaos* **13** 261

Chaotic circuit of ion migration memristor and its application in the voice secure communication*

Min Guo-Qi Wang Li-Dan[†] Duan Shu-Kai

(School of Electronic and information engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(Received 9 June 2015; revised manuscript received 7 July 2015)

Abstract

A memristor is a nonlinear element of nanoscale size with memory function and when it works as the nonlinear part in a chaotic system, the physical size of the system will be greatly reduced, rich nonlinear curve will be produced, and at the same time, the complexity of the chaotic systems and the randomness of signals will be enhanced. So in this paper, a new chaotic system is designed based on an ion migration memristor. The complex dynamic characteristics of the memristive system are investigated by means of theoretical derivation, numerical simulation, Lyapunov exponent spectrum, power spectrum, and Poincaré map. In addition, the change of system dynamic behaviors with the different parameters are analyzed. Then, a SPICE-based analog circuit is presented. The SPICE simulation results are in conformity with the numerical analysis, and thus verify that the chaotic systems can produce chaos. The linear feedback control structure is simple, economic and easy to realize in engineering practice, so the linear feedback control method has a high application value. At present, most studies focus on memristors' applications in memory and analog neural networks, but little research work is for voice security transmission. Therefore, by using the method of linear feedback control of chaotic synchronization, this paper proves the effectiveness of this method by numerical simulation experiments. As a result, it can achieve secure communication of voice signals. Finally, we conclude that the linear synchronous control method based on memristive chaotic system when applied to the secure communications can achieve the purpose of covering a specific speech. In addition, this method is able to restore the specific speech signal without distortion, which is very meaningful for the promotion of applications of memristor.

Keywords: ion migration memristor, chaotic system, dynamics analysis, SPICE design

PACS: 05.45.Ac, 05.45.Pq, 05.45.Vx, 05.45.Xt

DOI: 10.7498/aps.64.210507

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61372139, 61571372, 61101233, 60972155), the New Century Excellent Talents in University (Grant No. [2013]47), the "Spring Sunshine Plan" Research Project of Ministry of Education of China (Grant No. z2011148), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant Nos. XDJK2016A001, XDJK2014A009), the Excellent Talents in Scientific and Technological Activities for Overseas Scholars, Ministry of Personnel in China (Grant No. 2012-186), the University Excellent Talents Supporting Foundations in of Chongqing (Grant No. 2011-65), and the University Key Teacher Supporting Foundations of Chongqing (Grant No. 2011-65).

[†] Corresponding author. E-mail: ldwang@swu.edu.cn