

文章编号: 2095-4980(2017)04-0676-08

新型多翼统一混沌系统

李 鑫, 曾以成, 王 维, 孙睿婷

(湘潭大学 物理与光电工程学院, 湖南 湘潭 411105)

摘 要: 通过引入多个线性状态反馈控制项和非线性状态反馈控制项, 提出了一个新型多翼统一混沌系统。在不同的系统参数下均能产生关于原点对称的真实四翼混沌吸引子, 还能产生蝴蝶吸引子、蝙蝠形吸引子和新型多翼混沌吸引子。采用常规的动力学分析方法研究了产生新型多翼混沌吸引子系统的基本动力学特性, 例如相图、耗散性分析、李雅普诺夫指数谱和分岔图。结果表明系统可以产生丰富的混沌行为, 该新型多翼混沌吸引子可以随参数的变化实现关于 x 轴对称的双翼混沌吸引子和关于原点对称的真实四翼混沌吸引子。

关键词: 四维混沌系统; 双翼混沌吸引子; 真实四翼混沌吸引子; 新型多翼混沌吸引子

中图分类号: TN914.42; TP309.7

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0676

New type of the multi-wing unified chaotic system

LI Xin, ZENG Yicheng, WANG Wei, SUN Ruiting

(Department of Optoelectronic Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China)

Abstract: A new type of the multi-wing unified chaotic system is proposed by introducing more nonlinear state feedback controllers and linear state feedback controllers. The real four-winged chaotic attractors which are symmetric about the origin with different system parameters can be achieved including the butterfly shaped chaotic attractor, bat-shaped chaotic attractors and the new types of the multi-wing chaotic attractors by changing the system parameters. The dynamic properties of the circuit are demonstrated by means of phase diagrams, dissipative analysis, Lyapunov exponent spectra and bifurcation diagrams. Numerical simulation results show that the system produces a new type of the multi-wing chaotic attractors and exhibits complicated chaotic behaviors with the evolution of the system parameters. The double-wing chaotic attractors which are symmetric about the x axis and the real four-winged chaotic attractors which are symmetric about the origin can be achieved.

Keywords: four-dimensional chaotic system; double-winged chaotic attractor; real four-winged chaotic attractor; new type of the multi-wing chaotic attractor

混沌在神经网络、数字水印、保密通信等方面有广泛的应用^[1-3], 生成具有复杂动力学特性和拓扑结构的混沌系统是研究和应用混沌的重要基础。研究具有复杂拓扑结构的混沌系统有 2 个主要方向, 一个是利用非光滑函数来构建多涡卷混沌吸引子, 另一个是采用光滑自治系统来构建多翼混沌吸引子。

目前, 在混沌电路设计方面, 已经有许多技术利用非光滑非线性函数产生多涡卷混沌吸引子^[4-7]。然而, 如何用光滑非线性项产生多翼(超过 2 个)的混沌吸引子仍然存在着技术上的挑战。尽管 Liu 和 Chen^[8]构造了一个带有 5 个平衡点的三维自治系统能产生四翼混沌吸引子, 然而他们在另一篇文献中说明了该四翼吸引子实际不存在, 它是同时存在的 2 个双翼混沌吸引子由于靠得太近和数值误差原因导致的一种数值假象^[9]。最近, 王繁珍^[10]等人通过在 Qi^[11-12]等人构造出的四维自治混沌系统中引入 1 个线性状态反馈控制项, 破坏系统的相似性, 产生了穿越上下吸引域界限的对角双翼混沌吸引子, 进一步, 随着参数的演化, 上下混沌吸引子与对角混沌吸引子融合成一个真实四翼混沌吸引子。

本文在文献[10]提出的四维混沌系统模型基础上, 通过引入多个线性状态反馈控制项和非线性状态反馈控制项, 提出了一个新型多翼统一混沌系统。在不同的系统参数下均能产生关于原点对称的真实四翼混沌吸引子, 还

能产生蝴蝶吸引子、蝙蝠形吸引子和新型多翼混沌吸引子,且该新型多翼混沌吸引子可以随参数的变化实现关于 x 轴对称的双翼混沌吸引子和关于原点对称的真实四翼混沌吸引子,即提出的新型多翼统一混沌系统,只需改变系统参数就可实现多种吸引子形态,实现方法简单。基于多翼混沌系统在工程实践中有更好的应用前景^[13],本文提出的新型多翼统一混沌系统在保密通信和信息安全等领域有潜在的应用价值。

1 新型多翼统一混沌系统

文献[10]提出的四维混沌系统状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y-x) + yzw \\ \dot{y} = b(x+y) - xzw \\ \dot{z} = -cz + xyw + ey \\ \dot{w} = -dw + xyz \end{cases} \quad (1)$$

式中: a, b, c, d 是实参数; e 为线性状态反馈控制项的控制参数。当 $a=25, b=2, c=15, d=35, e=0$ 时, 系统产生 2 个双翼混沌吸引子, 如图 1(a)、(b)。

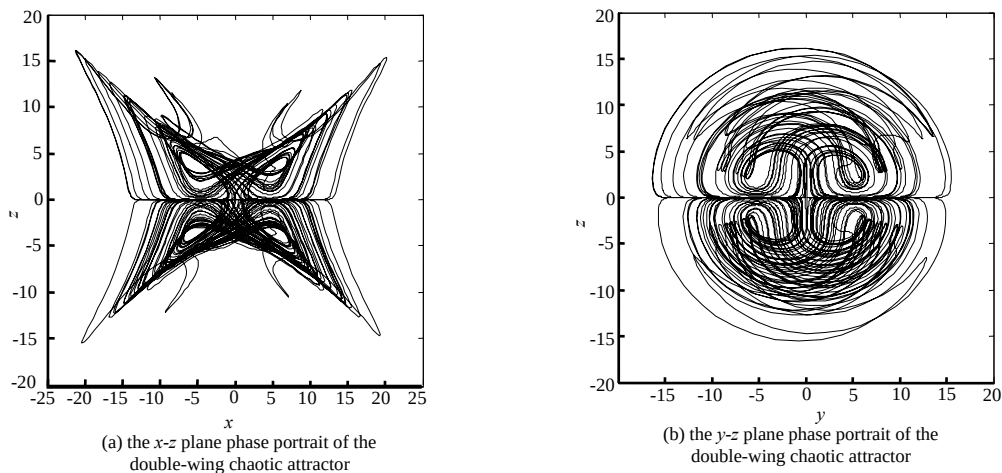


Fig.1 Double-wing chaotic attractors

图1 双翼混沌吸引子

当系统第 3 个方程引入一个线性状态反馈控制项 ey 时, 系统的相似性被破坏, 受控系统产生穿越上下吸引域界限的主对角和次对角混沌吸引子, 进一步, 随着参数的演化, 上下混沌吸引子与对角混沌吸引子融合成一个真实四翼混沌吸引子, 即当 $a=50, b=7, c=13, d=20, e=6$ 时, 系统产生真正的四翼混沌吸引子, 如图 2(a)、(b)。

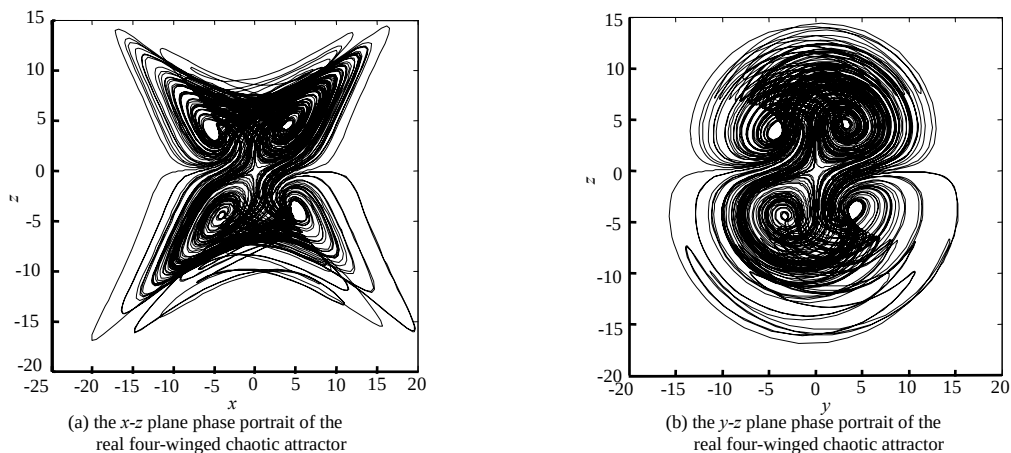


Fig.2 Four-winged chaotic attractors

图2 四翼混沌吸引子

1.1 引入不同反馈项的新型多翼统一混沌系统

通过观察上述混沌系统状态方程和混沌吸引子, 发现引入的线性状态反馈控制项可以改变吸引子的结构形态。

而文献[10]是在状态方程的 $\dot{z}$ 项引入一个线性状态反馈项,由此就可以思考以下几个问题:

- 1) 线性状态反馈控制项的作用?
- 2) 若在 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{w}$ 任一项中引入一个线性状态反馈控制项会怎样?
- 3) 若在 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{w}$ 任意 2 项、3 项和 4 项中引入线性状态反馈控制项会怎样?
- 4) 若引入的非线性状态反馈控制项是否会产生相同的吸引子?
- 5) 若引入非线性状态反馈控制项+线性状态反馈控制项是否会产生新的混沌吸引子?

本文根据以上几个问题进行理论分析和仿真研究,从而提出了一个新型多翼统一混沌系统。

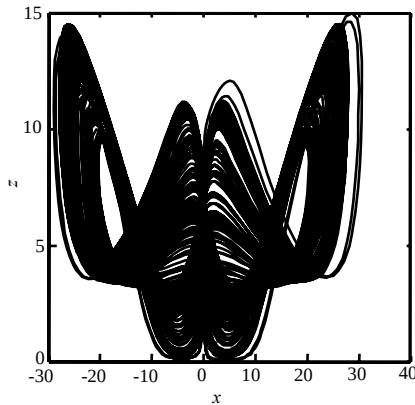
提出的新型多翼统一混沌系统状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y-x) + yzw + ex + \alpha xw \\ \dot{y} = b(x+y) - xzw + fz \\ \dot{z} = -cz + xyw + gy + \beta xy + \gamma x^2 \\ \dot{w} = -dw + xyz + hz + px + \lambda y^2 \end{cases} \quad (2)$$

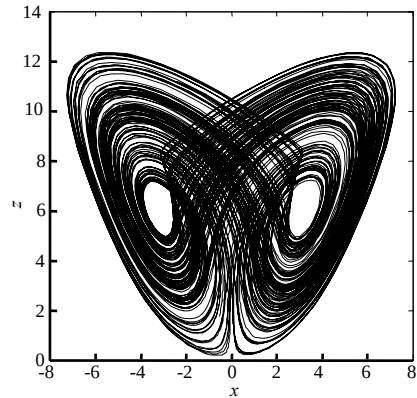
式中: a, b, c, d 为实参数; e, f, g, h, p 为线性状态反馈控制项参数; $\alpha, \beta, \gamma, \lambda$ 为非线性状态反馈控制项参数。

当参数 a, b, c, d 给定($a=50, b=7, c=13, d=20$), 系统分为以下几种情况:

- 1) 在 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{w}$ 任一项中引入一个线性状态反馈控制项, 只有在 $\dot{w}$ 项引入线性状态反馈控制项 px 或 hz 时, 系统才可以产生真实四翼混沌吸引子($p=8$ 或 $h=6$), 如图 2(a)、(b)。
- 2) 在 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{w}$ 任意 2 项、3 项和 4 项中引入线性状态反馈控制项, 除在 $\dot{x}, \dot{y}$ 两项中引入线性状态反馈控制项不能产生真实四翼混沌吸引子, 其他情况均可实现。
- 3) 在 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{w}$ 状态方程中引入非线性状态反馈控制项, 可以产生不同于其他吸引子形态的蝙蝠形混沌吸引子($\alpha=9$)和蝴蝶吸引子($\gamma=6$ 或 $\beta=6$), 如图 3(a)、(b)。
- 4) 在 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{w}$ 状态方程中引入非线性状态反馈控制项+线性状态反馈控制项, 产生蝴蝶吸引子($g=6, \beta=8$ 或 $p=-8, \lambda=4$), 如图 3(b)。



(a) the x - z plane phase portrait of the bat-shaped chaotic attractor



(b) the x - z plane phase portrait of the butterfly chaotic attractor

Fig.3 Special shaped chaotic attractors

图 3 特殊形状混沌吸引子

综述以上 4 点可以得出以下结论:

- 1) 系统(1)在未引入线性状态反馈控制项 ey 时, 系统右边函数中的第 3 个和第 4 个方程具有相似性, 该相似性不利于系统动力行为形成一个四翼吸引子。也正是由于这种相似性, 在 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{w}$ 任一项中引入一个线性状态反馈控制项, 只有在 $\dot{z}$ 项和 $\dot{w}$ 项引入线性状态反馈控制项 gy, px 或 hz 时, 打破 2 个方程地位相等的状态, 才能够产生真实四翼混沌吸引子。换句话说, 想得到四翼混沌吸引子必须打破系统的相似性, 即引入一个或多个线性状态反馈控制项, 但线性状态反馈控制项必须至少有 1 个要加在 $\dot{z}$ 项或 $\dot{w}$ 项上。
- 2) 引入非线性状态反馈控制项以及非线性状态反馈控制项+线性状态反馈控制项, 系统均不能产生真实四翼混沌吸引子, 但能够产生蝴蝶吸引子和蝙蝠形吸引子。

1.2 新型多翼混沌系统

本文是在已有文献提出的模型基础上, 通过引入线性和非线性 2 种反馈控制项来讨论反馈控制项对系统产生

真实四翼混沌吸引子的影响。1.1 节的研究已经阐述了非线性反馈控制项不能使系统产生四翼混沌吸引子, 只有系统引入一个或多个线性反馈控制项, 且至少有 1 个加在 $\dot{z}$ 项或 $\dot{w}$ 项时, 才会产生四翼混沌吸引子:

- 1) 不引入线性反馈项时, 系统在结构上具有相似性, 产生 2 个靠得很近的双翼混沌吸引子。
- 2) $\dot{z}$ 项或 $\dot{w}$ 项引入一个线性反馈项时, 打破系统结构的相似性, 产生真实的四翼混沌吸引子。
- 3) $\dot{z}$ 项和 $\dot{w}$ 项均引入一个线性反馈项时, 产生了不同于系统(1)的新的混沌吸引子, 即新型多翼混沌吸引子。

通过理论分析和大量的仿真实验发现, 当在系统的 $\dot{z}$ 项和 $\dot{w}$ 项均引入 1 个线性反馈项时, 改变系统控制参数, 可以使系统产生双翼、四翼以及一类不同于其他吸引子形态的新型多翼混沌吸引子, 该系统可以产生非常丰富的动力学行为, 具有良好的研究价值。

此时, 系统(2)状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y-x) + yzw \\ \dot{y} = b(x+y) - xzw \\ \dot{z} = -cz + xyw + gy \\ \dot{w} = -dw + xyz + hw \end{cases} \quad (3)$$

式中: a, b, c, d 是实参数; g, h 为线性状态反馈控制项的控制参数。

- 1) 当系统参数和控制参数均改变时:

- ① 当 $a=25, b=2, c=15, d=35, g=h=0$ 时, 系统实现为关于 x 轴对称的双翼混沌吸引子, 如图 1(a)、(b);
- ② 当 $a=50, b=7, c=13, d=20, g=6, h=0$ 时, 系统实现为关于原点对称的真实四翼混沌吸引子, 如图 2(a)、(b)。

- 2) 当系统参数给定, 只改变控制参数 h 时:

- ① 当 $a=35, b=6, c=5, d=15, g=8, h=5$ 时, 系统实现为关于原点对称的真实四翼混沌吸引子, 举例如图 4(a)、(b);
- ② 当 $a=35, b=6, c=5, d=15, g=8, h=15$ 时, 系统实现为一类不同于其他吸引子的特殊混沌吸引子, 即新型多翼混沌吸引子。举例如图 4(c)、(d)。

为更好地了解系统(3)的性能, 将对该系统的基本动力学特性及随参数变化的敏感性进行数值模拟和理论分析, 如 Lyapunov 指数、耗散性、频谱、Poincare 截面、分岔图等。

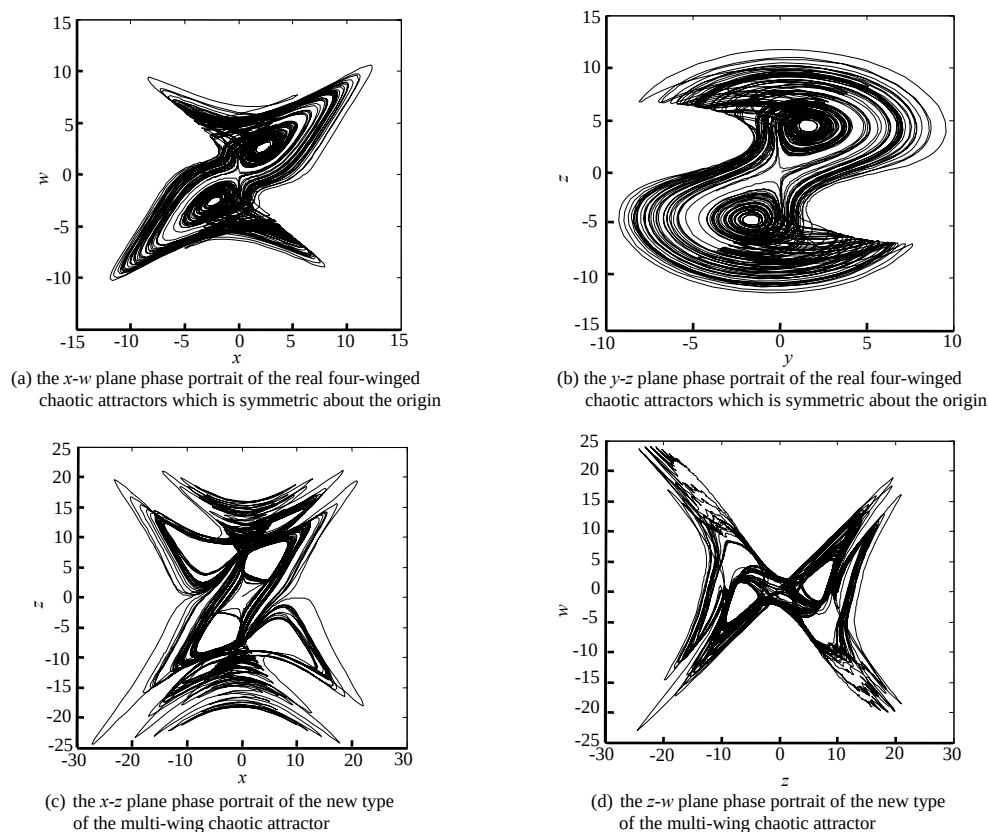


Fig.4 Chaotic attractors

图4 混沌吸引子

2 基本的动力学特性

1) 李雅普诺夫指数:

当系统参数 $a=35, b=6, c=5, d=15, g=8, h=-15$ 时, 利用 Wolf 方法计算得到此系统的 Lyapunov 指数为: $\lambda_1 = 4.8742, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -9.992, \lambda_4 = -43.898$, 由此可知系统(3)有一个正的李雅普诺夫指数, 处于混沌状态。

2) 耗散性:

由于系统(3)的耗散度为:

$$\nabla V = \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \dot{x}_2}{\partial x_2} + \frac{\partial \dot{x}_3}{\partial x_3} + \frac{\partial \dot{x}_4}{\partial x_4} = -a + b - c - d \quad (4)$$

当 $-a + b - c - d < 0$ 时, 则系统是耗散的, 且以指数形式收敛。

$$\frac{dV}{dt} = e^{-(a-b+c+d)t} \quad (5)$$

可以看出相体积元 V_0 在时刻 t 时收缩为体积元 $dV/dt = e^{-(a-b+c+d)t}$ 。意味着当 $t \rightarrow \infty$ 时, 包含系统轨线的每个体积元以指数率 $-a + b - c - d$ 收缩到零。当 $a = 35, b = 6, c = 5, d = 15, g = 8, h = -15$ 时, $-a + b - c - d = -49 < 0$ 。因此, 该系统所有轨线最终会被限制在一个体积元为零的集合上, 且它渐进运动固定在一个吸引子上^[14]。

3) Poincare 截面:

图 5 显示了当系统参数 $a = 35, b = 6, c = 5, d = 15, g = 8, h = -15$ 时, 该系统中混沌吸引子在相空间的庞加莱截面图。通过观察可以看到, 庞加莱截面上是一曲线弧分散的点集, 而且具有自相似的分形结构, 所以表明此时系统处于混沌状态。

4) 功率谱:

功率谱分析是识别混沌的一个重要手段。根据傅里叶变换理论, 分析得到周期信号的频谱是离散的谱线, 而对非周期运动, 因其不能展开成傅里叶级数, 只能进行傅里叶积分, 故非周期运动的频谱是连续的。也就是说, 若信号频谱图只含一个或者几个独立的能量峰, 则对应于周期信号; 若无明显的能量峰并且频谱是连续的, 则表明该系统是非周期信号, 对混沌系统来说可能存在混沌解^[15]。

图 6 显示了当系统参数 $a = 35, b = 6, c = 5, d = 15, g = 8, h = -15$ 时, 混沌系统中 x 变量的功率谱。观察发现频谱是连续的, 并无明显能量峰, 表明该系统可能存在混沌解。

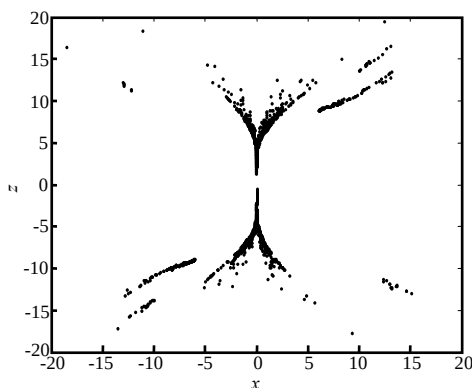


Fig.5 Poincare section
图 5 Poincare 截面

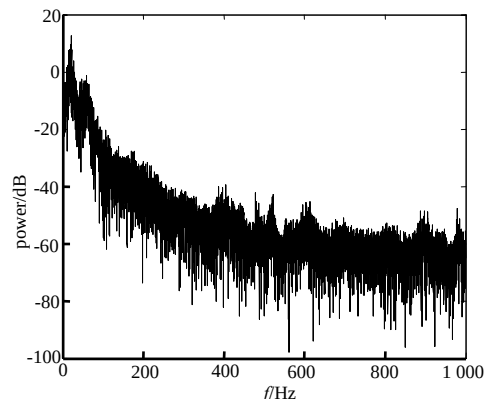


Fig.6 Power spectrum
图 6 功率谱

3 系统参数敏感性分析

当系统参数 $a = 35, b = 6, c = 5, d = 15, g = 8$ 和 h 改变时, 固定其他参数, 让 h 在 $[-25, 25]$ 范围内变化。

图 7 和图 8 是随 h 变化的分岔图和 Lyapunov 指数谱, 可以看出分岔图和 Lyapunov 指数谱有很好的 consistency。图 9 是系统随参数变化的平面相图, 结合图 7、8、9, 可以更加直观地观察到系统在不同参数下的吸引子形态以

及几种吸引子之间随参数变化而相互演变的过程。

1) 当参数 $h \in [-25, 16)$, 结合图 7、8、9(a)~(e), 可以看出系统(3)处于混沌状态, Lyapunov 有一个为正, 分岔图表明系统进行了倍周期分岔, 相图表明系统产生了新型多翼混沌吸引子和真实四翼混沌吸引子两种形态的混沌吸引子。

2) 当参数 $h \in [16, 25]$, 结合图 7、8、9(f), 可以看出系统(3)处于稳定状态, Lyapunov 一个为 0, 其余为负, 分岔图和相图表明系统进入稳定态, 稳定状态初期存在多个周期窗口。

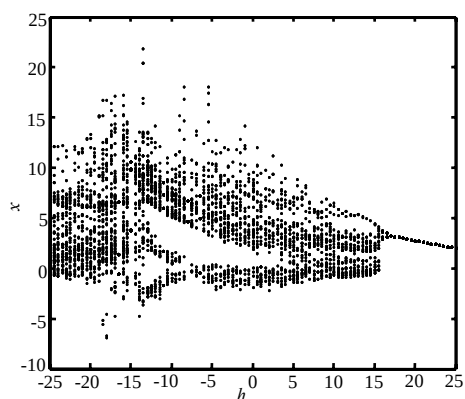


Fig.7 Bifurcation diagrams changing as the parameter h
图 7 随 h 变化的分岔图

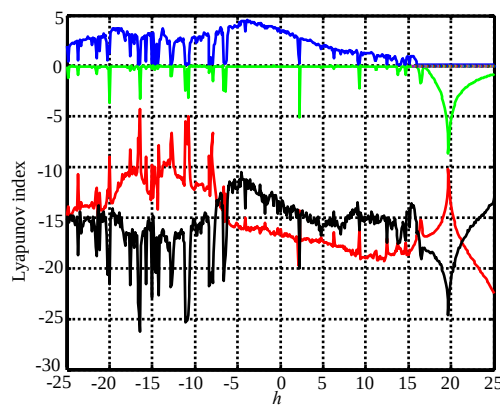
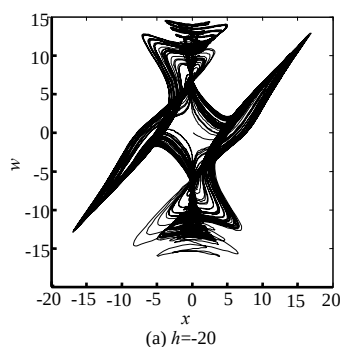
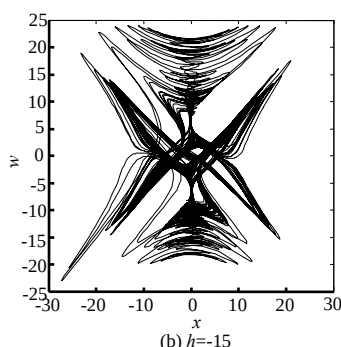


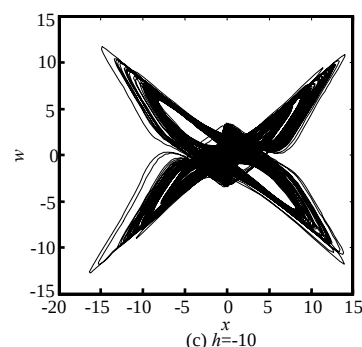
Fig.8 Lyapunov exponent spectra changing as the parameter h
图 8 随 h 变化的 Lyapunov 指数谱图



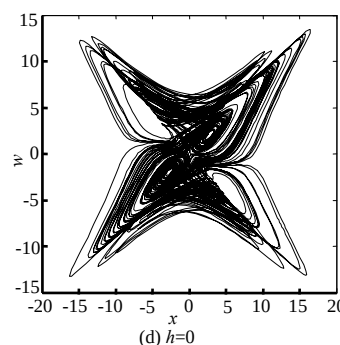
(a) $h = -20$



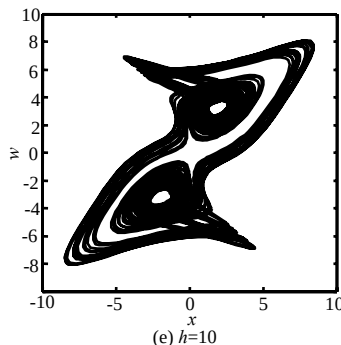
(b) $h = -15$



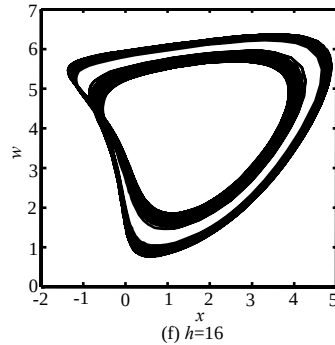
(c) $h = -10$



(d) $h = 0$



(e) $h = 10$



(f) $h = 16$

Fig.9 Chaotic attractors of x - w plane changing as the parameter h
图 9 随参数 h 变化的 x - w 平面混沌吸引子

综上所述, 在系统中引入线性反馈控制项的作用是打破原系统结构上的相似性, 使系统的动力学行为发生改变, 从而产生不同形态的混沌吸引子。引入反馈控制项的方式有多种, 哪种反馈方式最优或哪种反馈的鲁棒性最强, 值得进一步研究, 大量的仿真实验表明: 当在系统的 $\dot{z}$ 项和 $\dot{w}$ 项均引入一个线性反馈项, 系统状态方程如式(3)所示时, 系统更容易产生丰富的动力学行为, 此种方法对于产生多种形态的混沌吸引子比较好。

4 结论

文献[10]通过在四维系统中引入线性状态反馈控制项,破坏原系统的部分对称性,在不同的参数下系统产生了能穿越上下吸引域的对角周期轨或对角双翼混沌吸引子,进一步产生了关于原点对称的真实四翼混沌吸引子。在此理论研究基础上,通过引入多个线性状态反馈控制项和非线性状态反馈控制项,提出了一个新型多翼统一混沌系统。在不同的系统参数下系统均能产生关于原点对称的真实四翼混沌吸引子,还能产生蝴蝶吸引子、蝙蝠形吸引子和新型多翼混沌吸引子,且该新型多翼混沌吸引子可以随参数的变化实现关于 x 轴对称的双翼混沌吸引子和关于原点对称的真实四翼混沌吸引子,即提出的新型多翼统一混沌系统,只需改变系统参数就可实现多种吸引子形态,实现方法简单。

对产生新型多翼混沌吸引子的系统进行基本动力学特性的数值模拟和理论分析,同时对 Lyapunov 指数谱和分岔图进行分析,从而详细讨论了系统参数对混沌行为的敏感性。基于多翼混沌系统在工程实践中有更好的应用前景,本文提出的新型多翼统一混沌系统在保密通信和信息安全等领域有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] 魏德志,陈福集,郑小雪. 基于混沌理论和改进径向基函数神经网络的网络舆情预测方法[J]. 物理学报, 2015,64(11): 110503. (WEI Dezhi, CHEN Fuji, ZHENG Xiaoxue. Internet public opinion chaotic prediction based on chaos theory and the improved radial basis function in neural networks[J]. Acta Phys. Sin., 2015,64(11):52-59.)
- [2] 曲长波,杨晓陶,史双宇. 基于复合混沌系统的多小波鲁棒水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2014,50(24):91-95. (QU Changbo, YANG Xiaotao, SHI Shuangyu. Robust watermarking algorithm based on hybrid chaotic system and multiwavelet[J]. Computer Engineering and Application, 2014,50(24):91-95.)
- [3] 刘乐柱,张季谦,许贵霞,等. 一种基于混沌系统部分序列参数辨识的混沌保密通信方法[J]. 物理学报, 2014,63(1): 010501. (LIU Lezhu, ZHANG Jiqian, XU Guixia, et al. A chaotic secure communication method based on chaos systems partial series parameter estimation[J]. Acta Phys. Sin., 2014,63(1):32-37.)
- [4] 陈仕必,曾以成,徐茂林,等. 用多项式和阶跃函数构造网格多涡卷混沌吸引子及其电路实现[J]. 物理学报, 2011, 60(2):020507. (CHEN Shibei, ZENG Yicheng, XU Maolin, et al. Construction of grid multi-scroll chaotic attractors and its circuit implementation with polynomial and step function[J]. Acta Phys. Sin., 2011,60(2):105-111.)
- [5] SUYKENS J A K, VANDEWALLE J. Generation of n-double scrolls[J]. IEEE Trans. Circ. Sys., 1993,40(11):861-867.
- [6] CHUA L O, ROSKA T. The CNN paradigm[J]. IEEE Trans. Circ. Sys., 1993,40(3):147-156.
- [7] 李昂,常青. 一种高安全性的复合混沌序列的性能研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):362-368. (LI Ang, CHANG Qing. Performance of a new compound chaotic sequence with high security[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):362-368.)
- [8] LIU Wenbo, CHEN Guanrong. A new chaotic system and its generation[J]. Int. J. Bifurcation and Chaos, 2003,23(1):261-267.
- [9] LIU Wenbo, CHEN Guanrong. Can a three-dimensional smooth autonomous quadratic chaotic system generate a single four-scroll attractor[J]. Int. J. Bifurcation and Chaos, 2003,14(4):1395-1403.
- [10] 王繁珍,齐国元,陈增强,等. 一个四翼混沌吸引子[J]. 物理学报, 2007,56(6):3137-3144. (WANG Fanzhen, QI Guoyuan, CHEN Zengqiang, et al. On a four-winged chaotic attractor[J]. Acta phys. Sin., 2007,56(6):3137-3144.)
- [11] QI Guoyuan, DU Shengzhi, CHEN Guanrong, et al. On a four-dimensional chaotic system[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2005(23):1671-1682.
- [12] 张宇辉,齐国元,刘文良,等. 一个新的四维混沌系统理论分析与电路实现[J]. 物理学报, 2006,55(7):3307-3314. (ZHANG Yuhui, QI Guoyuan, LIU Wenliang, et al. Theoretical analysis and circuit implementation of a new four dimensional chaotic system[J]. Acta phys. Sin., 2006,55(7):3307-3314.)
- [13] GRASSI G. Novel four-wing and eight-wing attractors using coupled chaotic Lorenz systems[J]. Chin. Phys. B, 2008,17(9): 3247-3251.
- [14] LIU Chongxin, LIU Tao, LIU Ling, et al. A new chaotic attractor[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2004(22):1031-1038.
- [15] 王春兴. 基于 MATLAB 实现经典功率谱估计[J]. 曲阜师范大学学报, 2011(2):59-62. (WANG Chunxing. Achieve power spectrum estimation based on MATLAB[J]. Journal of Qufu Normal University, 2011(2):59-62.)

作者简介:



李 鑫(1990-), 女, 辽宁省阜新市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为多涡卷混沌电路.email:wlylixin@126.com.

曾以成(1962-), 男, 湖南省涟源市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为混沌微弱信号检测.

王 维(1990-), 男, 湖南省湘潭市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为多涡卷混沌电路.

孙睿婷(1990-), 女, 黑龙江省佳木斯市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为混沌电路的同步.

(上接第 675 页)

作者简介:



陈栩杉(1987-), 男, 南京市人, 讲师, 主要研究方向为政治工作信息化、智能信息处理、信号检测和参数估计.email:cxs_papip@163.com.

张雄伟(1965-), 男, 浙江省嘉兴市人, 教授, 主要研究方向为语音与图像处理、多媒体信息处理、数字通信.

杨吉斌(1978-), 男, 安徽省明光市人, 副教授, 主要研究方向为语音信号处理、智能信息处理.

乔 林(1991-), 男, 山西省临汾市人, 硕士, 主要研究方向为模拟信息转换器、语音信号处理.

李轶南(1989-), 男, 石家庄市人, 硕士, 主要研究方向为语音信号处理、智能信息处理.

王 文(1990-), 女, 江苏省盐城市人, 硕士, 主要研究方向为图像与视频处理.