

Frequency Characteristics Analysis Based on Simplified Lorenz System

Qiujie Chen, Qiyu Yang, Fang Bao*

School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong
Email: 946387331@qq.com, *fainabao@126.com

Received: Nov. 5th, 2018; accepted: Nov. 20th, 2018; published: Nov. 27th, 2018

Abstract

In the hardware circuit of the chaotic system, the integral constant of the integrating circuits can be configured to change the size of the system time scale transformation. However, the different parameter configurations of the integrating circuits will change the frequency distribution range of the system signal. What effect does the change in the signal frequency distribution have on the nonlinear dynamic characteristics of the system? In this paper, the variation of the oscillation frequency range of the system signal is observed by changing the integral time constant in chaotic circuit. The circuit simulation of the simplified Lorenz system is used to analyze the oscillation frequency range and explore the potential influence for the chaotic system with different parameter configuration of the integrating circuits. The experimental results have showed that the different parameter configuration of integrating circuits can change the oscillation frequency range of the chaotic system signal, but it does not change the chaotic characteristics of the system. In the chaotic systems based on memristors whose volt-ampere characteristics exhibited vibration with frequency, the parameter configuration of integrating circuits might cause potential effect on nonlinear dynamic characteristics of the system.

Keywords

Simplified Lorenz System, Chaotic Circuit, Frequency Characteristics, Memristor

基于简化Lorenz混沌电路的频率特性分析

陈秋杰, 杨其宇, 鲍芳*

广东工业大学自动化学院, 广东 广州
Email: 946387331@qq.com, *fainabao@126.com

收稿日期: 2018年11月5日; 录用日期: 2018年11月20日; 发布日期: 2018年11月27日

*通讯作者。

摘要

在混沌系统的硬件电路中通过配置积分电路的积分常数可以改变系统时间尺度变换的大小,然而积分电路的不同参数配置会改变系统信号频率分布范围。信号频率分布范围的改变将对系统的非线性动力特性产生什么样的影响?本文通过改变混沌电路中的积分时间常数,观察系统信号的震荡频率范围的变化。利用简化Lorenz系统的电路仿真分析积分电路的参数配置对混沌系统信号的震荡频率范围改变,并探讨该改变对混沌系统非线性动力特性的潜在影响。实验结果显示积分电路的参数配置将改变混沌系统信号的震荡频率范围,但并不改变系统的混沌特性。在基于忆阻器的混沌系统中由于忆阻器所展示的随频率变化的伏安特性将对系统的非线性动力特性产生潜在影响。

关键词

简化Lorenz系统,混沌电路,频率特性,忆阻器

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混沌是非线性动力系统中的一种新的存在形式,是非线性动力系统的一个重要组成部分。混沌貌似有序却又无序,存在一定的确定性现象又不缺乏随机性。混沌系统具有正的 Lyapunov 指数,对于初始值的选取极其敏感,很微小的变化都会导致出现不同的结果。2008 年 HP 实验室发现的忆阻器实物模型[1]引发了忆阻器和基于忆阻器的混沌系统的研究热潮[2]-[8]。在通过搭建实际硬件电路来研究混沌系统方面[9] [10] [11],众多的研究者通常只改变某组混沌系统控制参数所对应的电路参数来获取系统吸引子相图,以验证控制参数对于系统的非线性动力特性的影响,并没有分析其系统信号频率范围以及该频率范围的选取范围对于原系统非线性动力特性的影响[2]-[10]。文献[1]的图 2(b)展示了随着频率的增加,忆阻器的伏安特性曲线由 100 Hz 时所拥有的八字环型在 1000 Hz 时坍塌为一条直线,此结果揭示在基于忆阻器的混沌电路实现中,由于忆阻器元器件的伏安特性将会随着信号频率的改变而变化,混沌电路信号的震荡频率范围改变可能对系统的非线性动力特性产生潜在影响。本研究以简化 Lorenz 系统为例,分析积分电路的参数配置对混沌系统信号的震荡频率范围改变及其对于非线性动力系统特性的潜在影响。

2. 简化 Lorenz 系统

简化 Lorenz 系统数学模型如(1)式所示,它具有丰富的动力学特性,其系统参数 c 在 $[-1.59, 7.75]$ 的范围内取值时系统处于混沌状态,当取值为 -1 时,该系统为经典的 Lorenz 系统[9] [10] [11] [12] [13]。

$$\begin{cases} \dot{x} = 10(y - x) \\ \dot{y} = (24 - 4c)x - xz + cy \\ \dot{z} = xy - 8z/3 \end{cases} \quad (1)$$

经变量比例压缩及时间尺度变换,数学模型(1)所对应的电路模型状态方程如(2)所示。改变电路模型的可调电阻 R_{14} 的阻值可以等效为改变系统(1)中参数 c 的值。

$$\begin{cases} dx/dt = \frac{1}{R_5 C_1} \left(\frac{R_3}{R_1} y - \frac{R_4 (R_1 + R_3)}{R_1 (R_2 + R_4)} x \right) \\ dy/dt = \frac{1}{R_{17} C_2} \left(\frac{R_{16}}{R_8} x - \frac{R_{16} R_7}{10 R_9 R_6} xz + \frac{R_{16} R_{14}}{R_{15}} \left(\frac{R_{11}}{R_{12} R_{10}} y - \frac{1}{R_{13}} x \right) \right) \\ dz/dt = \frac{1}{R_{22} C_3} \left(\frac{R_{20}}{10 R_{18}} xy - \frac{R_{21} (R_{18} + R_{20})}{R_{18} (R_{21} + R_{19})} z \right) \end{cases} \quad (2)$$

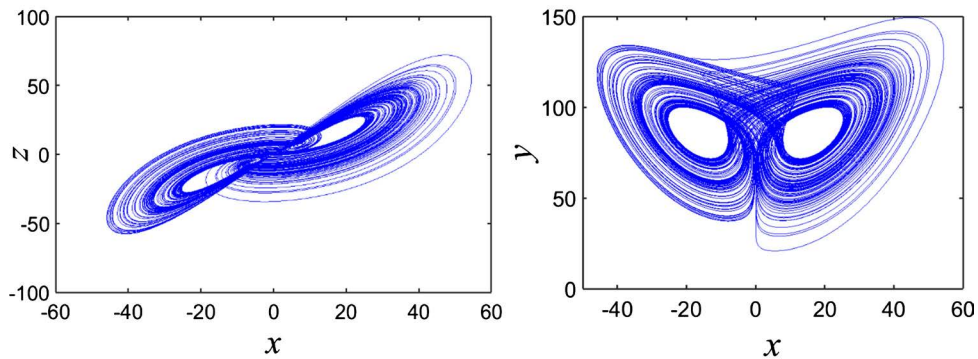


Figure 1. Phase portraits of chaotic attractor (x-y plane, x-z plane)

图 1. 混沌吸引子相图(x-y 平面, x-z 平面)

图 1 给出了当参数 $c = 3.4$ 时方程(1)的 MATLAB 仿真结果, 显示系统在该参数下处于混沌状态。

电路模型状态方程(2)的实现涉及时间尺度变换即积分电路中电阻 R 及电容 C 的配置。积分电路在滤波电路中属于低通滤波器的一种, 对于信号中的高频信息具有抑制作用。由于积分电路的电阻电容的取值决定积分时间常数 $\tau (= RC)$ 及滤波截止频率 $f_0 (= 1/(2\pi RC))$, 因此在混沌硬件电路的实现时需考虑由积分电路电阻电容参数的不同配置而导致系统信号频率震荡范围的变化是否会影响系统其它器件的电路特性, 以及是否会进一步影响混沌系统的非线性动力特性。例如文献[1]提出的 HP 忆阻器以及文献[14] [15] [16]中提及的忆阻器模型只在一定频带上保持着忆阻器的相关特性, 并非在全频带上保持相同的特性。[1] [14] [15] [16]。

图 2 中, 保持 $R_{14} = 3.4 \text{ k}\Omega$ (对应模型 1 的 $c = 3.4$) 及积分电阻 $R = 1 \text{ k}\Omega$ 参数不变, 分别设置积分电容 C 为 1 nF 、 100 nF 及 $4.7 \text{ }\mu\text{F}$, 通过 Multisim 仿真观察系统的信号频谱, 分析积分时间常数对于混沌电路的影响。

图 3 给出了简化 Lorenz 电路的系统信号在不同积分常数下的时域图, 横坐标分别为每一大格 1 ms (图 a)、 20 ms (图 b) 和 1 s (图 c), 纵坐标均表示每大格 5 V 电压。图 4 显示该简化 Lorenz 电路系统信号的频谱图(对应图 3 的时域图), 横坐标分别为每格 10 kHz (图 a)、 100 Hz (图 b) 和 20 Hz (图 c)。观察图 4 的频谱图可知, 采用 1 nF 电容时, 震荡信号基本落在 $f < 80 \text{ kHz}$ (滤波电路截止频率为 $f_0 = 159.2 \text{ kHz}$) 的范围之内, 而采用电容 $C = 100 \text{ nF}$ 和 $C = 4.7 \text{ }\mu\text{F}$ 时, 信号震荡频率分别只存在于 $f < 700 \text{ Hz}$ (滤波电路截止频率为 $f_0 = 1592.4 \text{ Hz}$) 和 $f < 20 \text{ Hz}$ (滤波电路截止频率为 $f_0 = 33.9 \text{ Hz}$) 的范围之内。非线性动力系统信号的震荡频率范围会随着积分时间常数的改变而改变, 系统最高的信号频率小于积分电路所设定的信号截止频率。

图 5 给出了在混沌系统控制参数 c 对应的电路可调电阻 R_{14} 的不同取值及不同积分常数的情况下, 系统从混沌状态过度到非混沌状态时的双环面现象时吸引子相图, 当积分时间常数选用 0.0047 s 或 10^{-4} s 时, 增大可调电阻器 R_{14} 阻值至 $7.38 \text{ k}\Omega$ 时系统从混沌状态转移至非混沌状态, 并呈现出周期为 2 的环面现象。

由图 3 至图 5 可以看出, 对于简化 Lorenz 混沌电路 R_{14} 的取值决定该电路的系统状态, 积分时间常数的选取不同不会改变该系统的非线性动力特性。随着积分时间常数的逐渐增大, 时域信号变化速度渐缓, 相轨迹在相同时间内表现得越稀疏, 导致不容易在示波器上观测到完整的轨迹连续混沌吸引子相图,

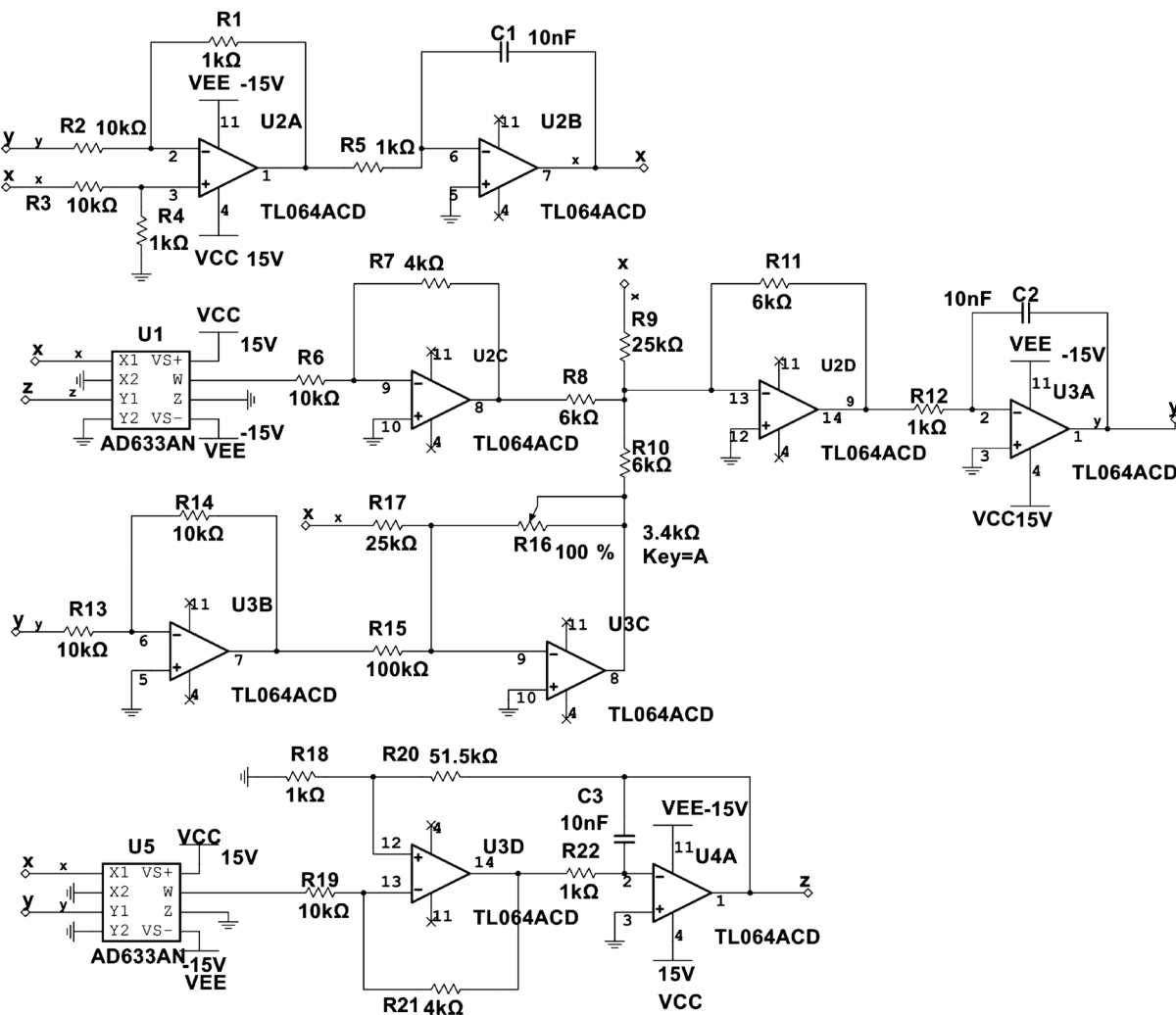


Figure 2. Circuit of simplified Lorenz system

图 2. 简化 Lorenz 电路图

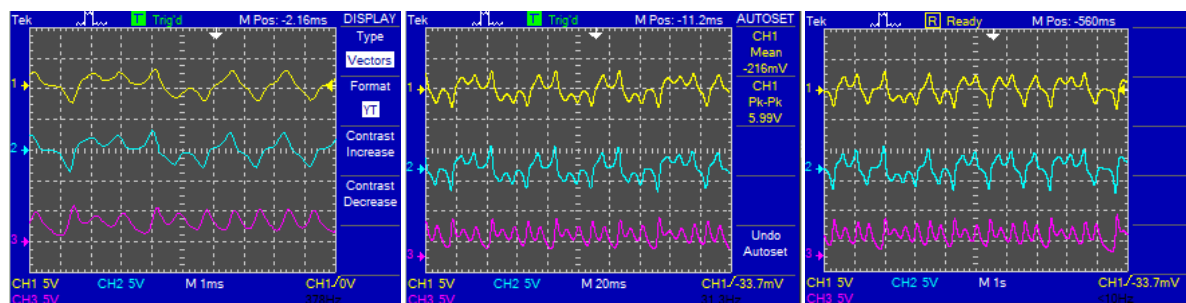
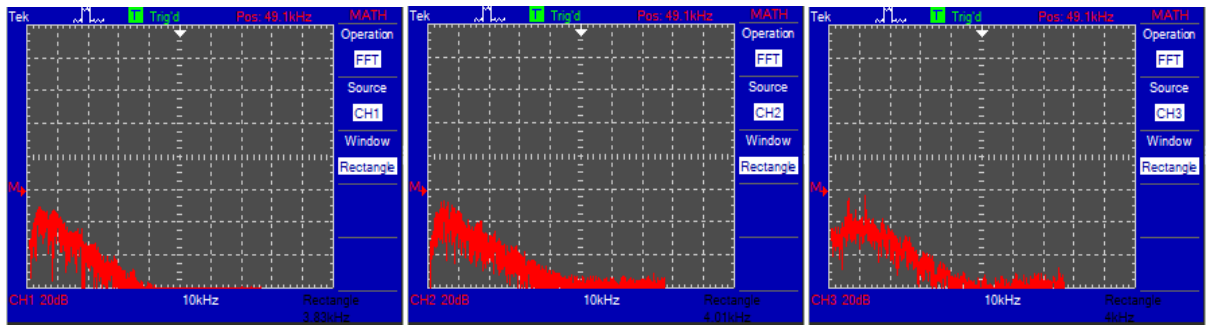
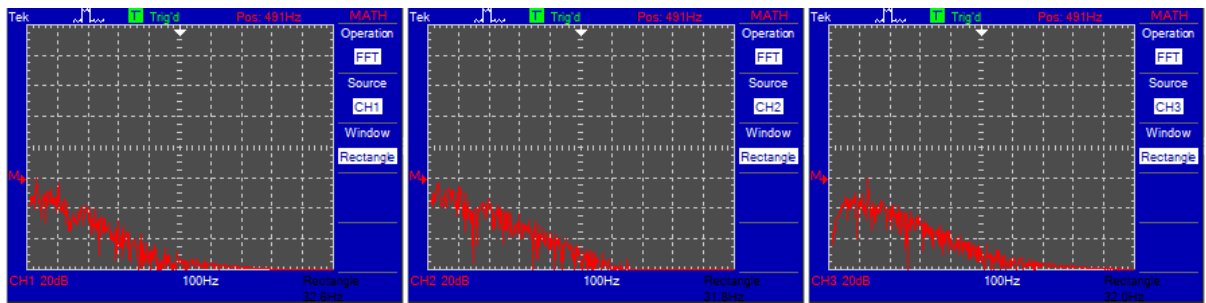


Figure 3. The signals $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ of simplified Lorenz circuit ($R = 1\text{ k}\Omega$, $R_{14} = 3.4\text{ k}\Omega$). (a) $C = 1\text{ nF}$; (b) $C = 100\text{ nF}$; (c) $C = 4.7\text{ }\mu\text{F}$

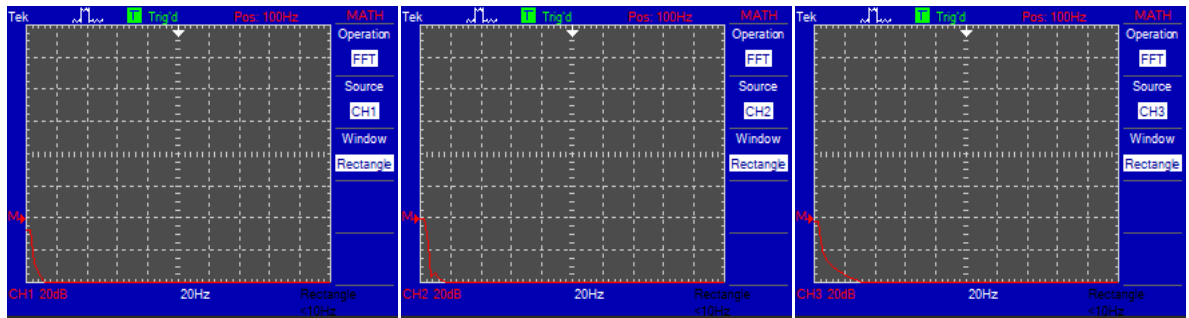
图 3. 简化 Lorenz 电路信号 $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ 时域图 ($R = 1\text{ k}\Omega$, $R_{14} = 3.4\text{ k}\Omega$)。 (a) $C = 1\text{ nF}$; (b) $C = 100\text{ nF}$; (c) $C = 4.7\text{ }\mu\text{F}$



(a)



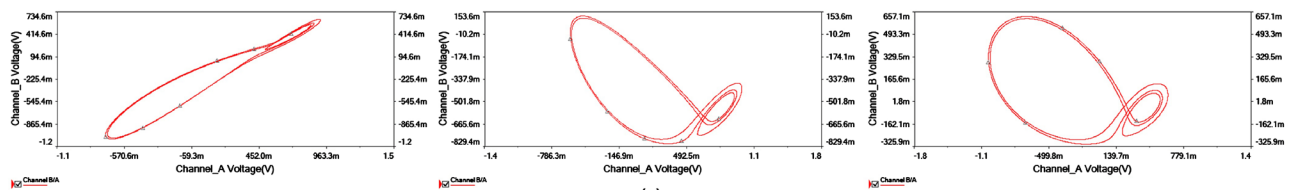
(b)



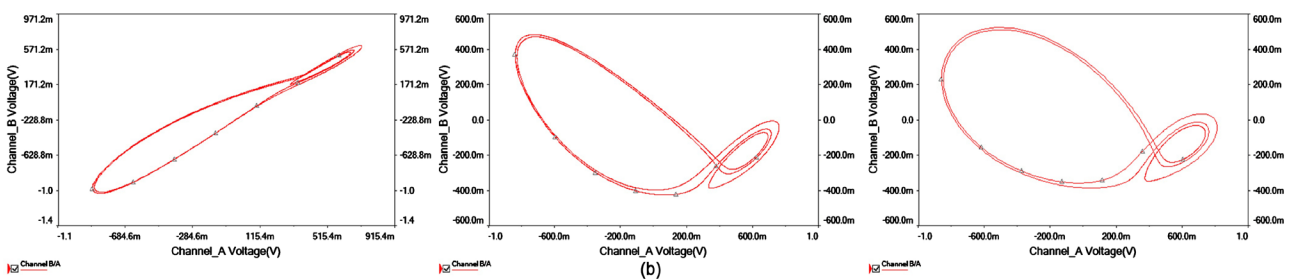
(c)

Figure 4. Spectrum of signals $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ of simplified Lorenz circuit ($R = 1\text{ k}\Omega$, $R_{14} = 3.4\text{ k}\Omega$). (a) $C = 1\text{ nF}$; (b) $C = 100\text{ nF}$; (c) $C = 4.7\text{ uF}$

图 4. 简化 Lorenz 电路信号 $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ 频谱图 ($R = 1\text{ k}\Omega$, $R_{14} = 3.4\text{ k}\Omega$)。 (a) $C = 1\text{ nF}$; (b) $C = 100\text{ nF}$; (c) $C = 4.7\text{ uF}$



(a)



(b)

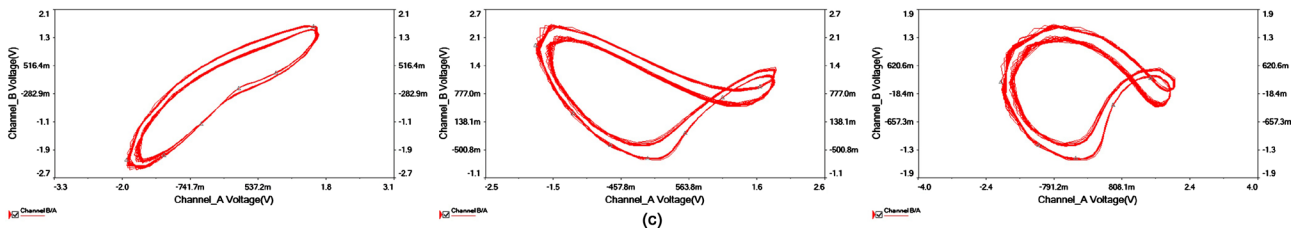
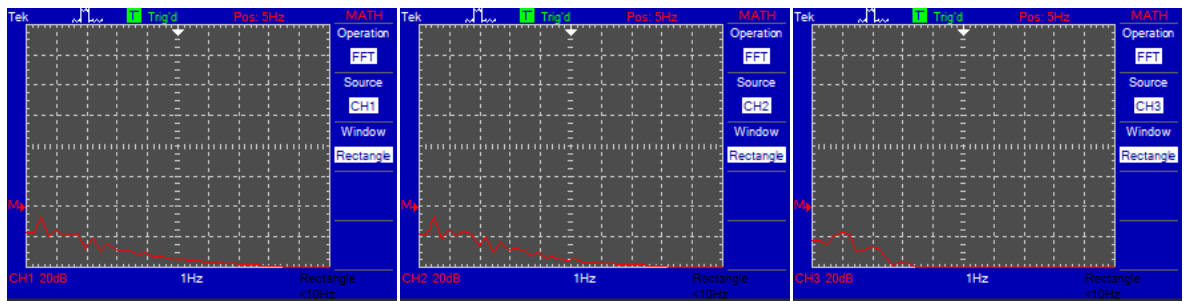
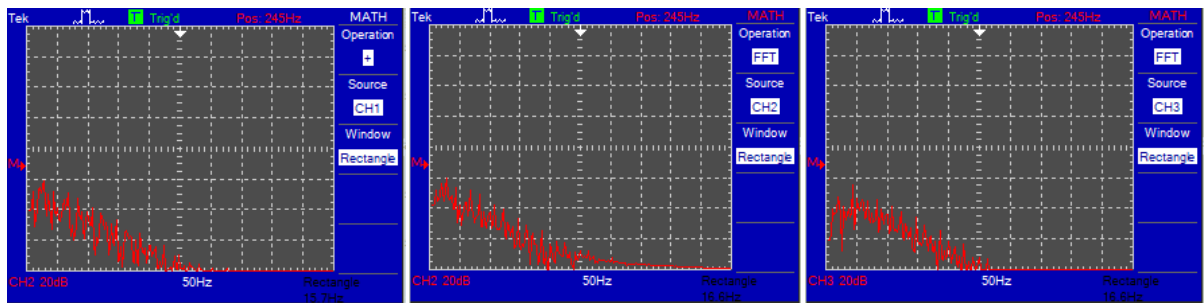


Figure 5. Phase portraits of attractors with different parameters. (a) $R_{14} = 7.38 \text{ k}\Omega$, $C = 4.7 \text{ }\mu\text{F}$; (b) $R_{14} = 7.38 \text{ k}\Omega$, $C = 100 \text{ nF}$; (c) $R_{14} = 5.55 \text{ k}\Omega$, $C = 1 \text{ nF}$

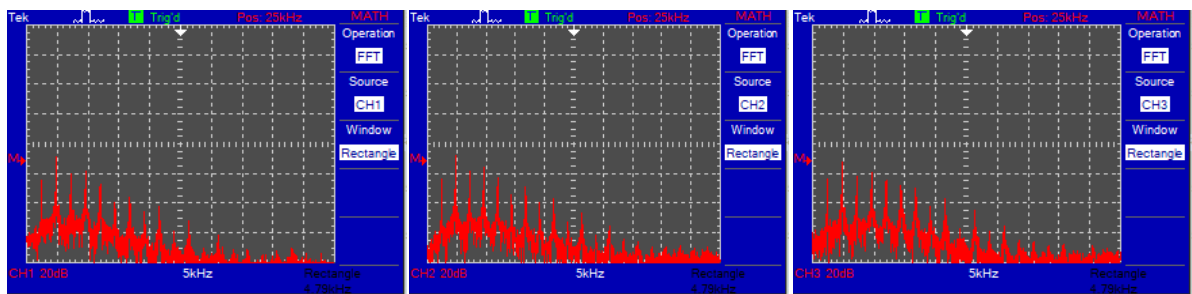
图 5. 不同参数下 x-y, x-z, y-z 平面吸引子相图。(a) $R_{14} = 7.38 \text{ k}\Omega$, $C = 4.7 \text{ }\mu\text{F}$; (b) $R_{14} = 7.38 \text{ k}\Omega$, $C = 100 \text{ nF}$; (c) $R_{14} = 5.55 \text{ k}\Omega$, $C = 1 \text{ nF}$



(a)



(b)



(c)

Figure 6. The spectrogram of $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ in non-chaotic state. (a) $R_{14} = 7.38 \text{ k}\Omega$, $C = 4.7 \text{ }\mu\text{F}$; (b) $R_{14} = 7.38 \text{ k}\Omega$, $C = 100 \text{ nF}$; (c) $R_{14} = 5.55 \text{ k}\Omega$, $C = 1 \text{ nF}$

图 6. 系统非混沌状态下 $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ 频谱图。(a) $R_{14} = 7.38 \text{ k}\Omega$, $C = 4.7 \text{ }\mu\text{F}$; (b) $R_{14} = 7.38 \text{ k}\Omega$, $C = 100 \text{ nF}$; (c) $R_{14} = 5.55 \text{ k}\Omega$, $C = 1 \text{ nF}$

但系统依旧保持着混沌特性。

图 6 显示电路在采用不同积分时间常数时 ($\tau = 0.0047 \text{ s}$, $\tau = 10^{-4} \text{ s}$, $\tau = 10^{-6} \text{ s}$), 非混沌状态下的频谱图。可以看出, 在相同条件下积分常数取值越大系统信号频率范围越窄, 系统频率范围分别为 $f < 7\text{Hz}$ (图

a), $f < 300$ Hz (图 b)。由图 6(c)可以看出, 此时系统信号比 $\tau = 0.0047$ s 及 $\tau = 10^{-4}$ s 时拥有更宽的频率范围($f < 50$ kHz)。进一步提高系统输出信号的频率, 即缩小积分时间常数使 $\tau = 10^{-6}$ s, 并逐渐增大可调电阻器 R_{14} 的阻值。当 $R_{14} = 5.55$ k Ω 时, 系统从混沌状态转移到非混沌状态, 并呈现出周期为 2 的环面现象。

由以上分析可知, 简化 Lorenz 电路积分时间常数的取值影响系统的信号频率范围, 积分时间常数越大, 系统信号震荡频率越低, 但并不改变该电路的非线性动力学特性。

3. 结论

在混沌系统的电路实现中, 积分电路选取不同的积分时间常数会使得电路的系统信号频率分布范围发生改变。对于简化 Lorenz 电路, 系统在低频范围内由于信号变化速度缓慢, 不容易在示波器上观测到轨迹连续的混沌吸引子相图。减小积分电路的时间常数可以提高系统信号频率, 在示波器上观测到完整的轨迹连续的混沌吸引子相图, 但不会改变系统的混沌特性。这意味着积分电路参数的改变仅仅导致简化 Lorenz 电路的系统信号频率范围发生改变, 不会改变原系统的非线性动力特性。在基于忆阻器的混沌电路中, 由于忆阻器的伏安特性会随着系统信号频率范围的变化而改变, 考虑到混沌电路本身对于系统初值的高度敏感性, 系统信号的震荡频率范围改变可能对原动力系统的非线性动力特性产生潜在影响, 此影响需要在后续的研究与实验中加以探索和验证。

基金项目

广东省自然科学基金资助项目(2014A030313510)。

参考文献

- [1] Strukov, D.B., Snider, G.S., Stewart, D.R., et al. (2008) The Missing Memristor Found. *Nature*, **453**, 80-83. <https://doi.org/10.1038/nature06932>
- [2] Wang, L., Drakakis, E., Duan, S., et al. (2012) Memristor Model and Its Application for Chaos Generation. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **22**, 241-252. <https://doi.org/10.1142/S0218127412502057>
- [3] 欧青立, 徐林波, 郭子叶, 等. 基于忆阻器的五阶 MCK 混沌电路研究[J]. 量子电子学报, 2016, 33(1): 56-62.
- [4] 李志军, 曾以成. 基于文氏振荡器的忆阻混沌电路[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(1): 88-93.
- [5] 谭志平, 曾以成, 李志军, 等. 浮地型忆阻器混沌电路的分析与实现[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9): 2123-2129.
- [6] 王伟, 曾以成, 孙睿婷. 含三个忆阻器的六阶混沌电路研究[J]. 物理学报, 2017, 66(4): 25-35.
- [7] 阮静雅, 孙克辉, 牟俊. 基于忆阻器反馈的 Lorenz 超混沌系统及其电路实现?[J]. 物理学报, 2016, 65(19): 19-29.
- [8] Bao, B.C., Xu, J.P., Liu, Z., et al. (2011) Dynamics Analysis of Chaotic Circuit with Two Memristors. *Science China Technological Sciences*, **54**, 2180-2187. <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4400-6>
- [9] Yan, W., Sun, K., He, S., et al. (2014) Dynamics of Fractional-Order Sinusoidally Forced Simplified Lorenz System and Its Synchronization. *European Physical Journal Special Topics*, **223**, 1591-1600. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2014-02181-3>
- [10] 孙克辉, 杨静利, 丁家峰, 等. 单参数 Lorenz 混沌系统的电路设计与实现[J]. 物理学报, 2010, 59(12): 8385-8392.
- [11] Sun, K., Liu, X., Zhu, C., et al. (2012) Hyperchaos and Hyperchaos Control of the Sinusoidally Forced Simplified Lorenz System. *Nonlinear Dynamics*, **69**, 1383-1391. <https://doi.org/10.1007/s11071-012-0354-x>
- [12] Wang, X., Chen, J., Lu, J., et al. (2012) A Simple Yet Complex One-parameter Family of Generalized Lorenz-Like Systems. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **22**, 1250116-1250116. <https://doi.org/10.1142/S0218127412501167>
- [13] 孙克辉. 混沌保密通信原理与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 49-52.
- [14] Valsa, J., Biolek, D. and Biolek, Z. (2011) An Analogue Model of the Memristor. *International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks Devices & Fields*, **24**, 400-408. <https://doi.org/10.1002/jnm.786>

- [15] 王晓媛, 齐维贵, 王兴元. 忆阻器的电路实现及其混沌动力学研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(8): 1080-1084.
- [16] Bao, B.C., Xu, J.P., Zhou, G.H., *et al.* (2011) Chaotic Memristive Circuit: Equivalent Circuit Realization and Dynamical Analysis. *Chinese Physics B*, **20**, 109-115.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2327-0853, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojcs@hanspub.org