

基于电流反馈放大器的网格多涡卷混沌 电路设计与实现*

吴先明^{1)†} 何怡刚¹⁾²⁾ 于文新¹⁾

1) (湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082)

2) (合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

(2014年4月27日收到; 2014年5月15日收到修改稿)

提出了一种仅用电流反馈放大器实现网格多涡卷混沌系统的方法. 首先用电流反馈放大器设计非线性函数电路; 再用电流反馈放大器设计网格多涡卷混沌电路, 根据混沌吸引子参数确定电路参数, 由于电流反馈放大器具有较好的频率特性和端口特性, 使该电路的工作频率高、电路结构简单、使用元件少; 最后, 通过电路仿真验证该方法的可行性.

关键词: 网格多涡卷混沌吸引子, 电流反馈放大器, 电路实现

PACS: 05.45.Ac, 05.45.Pq

DOI: 10.7498/aps.63.180506

1 引言

多涡卷混沌吸引子的结构和动力学行为比洛伦兹混沌吸引子更具有复杂性, 使其在通信中广泛应用^[1]. 1993年, Suyken和Vandewalle^[2]提出了单方向的多涡卷混沌系统. 在此基础上, 人们利用不同的非线性函数实现了更为复杂的多涡卷混沌吸引子, 主要有饱和非线性函数(SNLF)、三角波函数、多项式等^[3-7], 这些电路主要采用运算放大器来设计混沌电路. 与运算放大器相比, 电流反馈放大器具有更好的频率特性, 从而可提高电路的工作频率, 而且其端口特性更好, 使电路结构更简单、使用更灵活^[8]. 因此, 采用电流反馈放大器设计混沌电路成为一个研究方向. 文献^[9]用电流反馈放大器和非线性元件实现了1个涡卷混沌吸引子; 文献^[10-12]用电流反馈放大器实现了2个涡卷混沌

吸引子; 文献^[13]采用电流反馈放大器和普通运算放大器实现一维多个涡卷混沌吸引子, 但饱和函数电路采用的是电压型有源器件, 使电路的工作频率难以得到进一步提高; 文献^[14-16]仅用电流反馈放大器设计了一维多涡卷混沌电路, 但电路结构复杂, 有源器件较多. 在单独使用电流传输器实现混沌电路方面, 文献^[17]设计了一维多涡卷混沌电路, 文献^[18, 19]设计了网格多涡卷混沌电路, 但这些电路的有源器件均较多, 电路的工作频率较低.

本文提出了一种仅用电流反馈放大器实现网格多涡卷混沌系统的方法, 并设计了一个混沌电路, 该电路由3个积分电路和2个非线性函数电路组成. 该混沌电路能产生网格多涡卷混沌吸引子, 电路结构简单, 所用元件少, 且电路的工作频率高. 电路仿真实验研究表明此方法可行.

* 国家杰出青年基金(批准号: 50925727)、国家自然科学基金(批准号: 51107034)、国防科技计划项目(批准号: C1120110004, 9140A27020211DZ5102)、教育部科学技术研究重大项目(批准号: 313018)和湖南省科技计划项目(批准号: 2011JJ4, 2011JK2023, 12JJA004)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jsdxwzm@126.com

$$N_{Sy} = \text{odd} \geq 3, \quad (10)$$

$$\pm B_{p_{j+1}} = \pm \sum_{j=0}^{(N_{Sy}-2)/2} 2jA_y,$$

$$N_{Sy} = \text{even} \geq 2. \quad (11)$$

设 $DR = 10.8 \text{ V}$, $N_{Sx} = 6$, $N_{Sy} = 3$ 以及

$a = 0.7$ 时, 通过 (1), (2), (3), (5), (7), (8), (10) 式可计算出 W , S , B_p 和 E_p , 其结果如表 1 所示, 数值仿真结果如图 2 所示. 同理, $N_{Sx} = 3$, $N_{Sy} = 4$, 通过 (1), (2), (3), (5), (6), (9), (11) 式可计算出 W , S , B_p 和 E_p , 其结果如表 1 所示, 数值仿真结果如图 3 所示.

表 1 6×3 和 3×4 多涡卷混沌吸引子参数

6 × 3-scroll		3 × 4-scroll	
$W_x = 1.8, W_y = 0.6$	$S = 2.52$	$W_x = 3.6, W_y = 0.9$	$S = 5.04$
$\pm E_j = \pm B_{pj}(x, y)$	$\pm E_{pj}(x, y)$	$\pm E_j = \pm B_{pj}(x, y)$	$\pm E_{pj}(x, y)$
0		0	
$\pm 1.8, \pm 0.3$	$\pm 0.3, \pm 0.6$	$\pm 1.8, \pm 0.9$	$\pm 0.45, \mp 0.45$
$\pm 3.6,$	$\pm 0.9, 0$		$\pm 1.35, \mp 1.35$
	$\pm 1.5, \mp 0.6$		$\pm 2.25, \pm 1.35$
	$\pm 2.1, \pm 0.6$		$\pm 3.15, \pm 0.45$
	$\pm 2.7, 0$		$\pm 4.05, \mp 0.45$
	$\pm 3.3, \mp 0.6$		$\pm 4.95, \mp 1.35$
	$\pm 3.9, \pm 0.6$		
	$\pm 4.5, 0$		
	$\pm 5.1, \mp 0.6$		

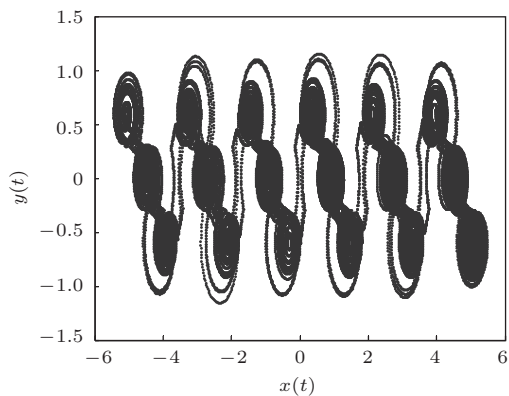


图 2 6×3 混沌吸引子 $x-y$ 平面

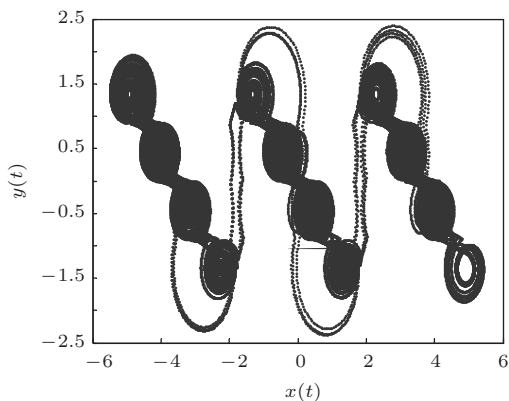


图 3 3×4 混沌吸引子 $x-y$ 平面

3 电路实现

3.1 电路设计

为了检验提出的方法的正确性, 用电流反馈放大器设计的饱和函数电路如图 4 所示, 图 4(a) 是饱和函数的基本单元电路, 图 4(b) 是以图 4(a) 为基本模块并联而成多涡卷饱和函数电路, 图 4(c) 是电压饱和函数 $f(x)$, 图 4(d) 是电压平移饱和函数 $f(x - E_j)$. 其中 k 为斜率, $\pm q$ 为转折点, $k = -V_{\text{sat}}/q$, AD844 的典型寄生元件参数为 $R_{xj} = 50 \Omega$, $R_{yj} = 10 \text{ M}\Omega$, $R_{zj} = 3 \text{ M}\Omega$, $C_{yj} = 2 \text{ pF}$, $C_{zj} = 4.5 \text{ pF}$. 考虑以上参数的影响, 根据图 4 可得

$$\begin{aligned} V_{\text{sat}} &= -\frac{R_b R_{zj}}{(R_b + R_{zj})(R_a + R_{xj})} (x - E_j) \\ &= -A_v (x - E_j), \\ I_j(x) &= \frac{|V_{\text{sat}}|}{R_c}, \\ I(x) &= -\sum_{j=1}^{N-1} I_j(x) = -\frac{1}{R_c} \sum_{j=1}^{N-1} f(x - E_j). \end{aligned}$$

给定不同的比较电压值, 则能构造出不同的阶梯函数电路, 产生不同数目的多涡卷混沌吸引子. 若要产生 2×2 网格多涡卷吸引子, 实现 $f(x)$ 函数和 $f(y)$ 函数都需要用 1 个基本单元电路; 若要产生 2×3 网格多涡卷吸引子, 实现 $f(x)$ 函数和 $f(y)$ 函数分别需要用 1 个和 2 个基本单元电路; 若要产生 3×2 网格多涡卷吸引子, 实现 $f(x)$ 函数和 $f(y)$ 函数分别需要用 2 个和 1 个基本单元电路; 若要产生 3×3 网格多涡卷吸引子, 实现 $f(x)$ 函数和 $f(y)$ 函

数都需要用 2 个基本单元电路.

同向积分器用图 5 所示的电路来实现, 其表达式为

$$V_{out} = \int \frac{1}{RC} V_{in} dt.$$

反向求和积分器用图 6 所示电路来实现, 其表达式为

$$V_{out} = - \int \frac{1}{C} \left(\frac{1}{R_1} V_1 + \frac{1}{R_2} V_2 + \frac{1}{R_3} V_3 \right) dt.$$

由上述分析可知, (1) 式的电路如图 7 所示.

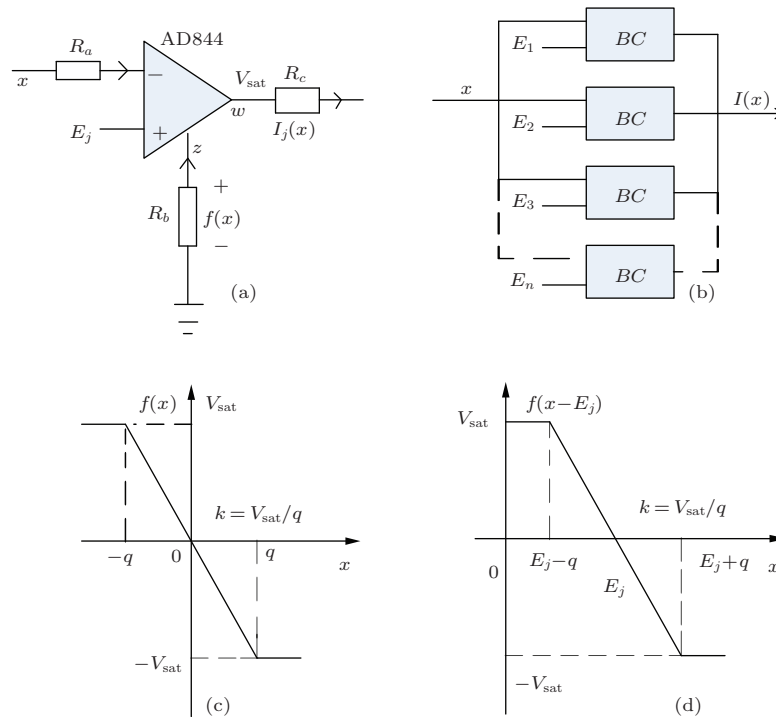


图 4 饱和函数 (a) 饱和函数基本模块; (b) 多涡卷饱和函数电路; (c) 电压饱和函数 $f(x)$; (d) 电压平移饱和函数 $f(x - E_j)$

为了减少 AD844 寄生参数的影响, $R_a, R_b, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ 的阻值选取尽量要大, 故设 $R_a = 1 \text{ k}\Omega, R_b = 1 \text{ M}\Omega$. 根据图 7 可得

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{y}{R_5 C_1} - \frac{R_6 i(y)}{R_5 C_1} \\ \dot{y} = \frac{z}{R_4 C_2} \\ \dot{z} = -\frac{x}{R_1 C_3} - \frac{y}{R_2 C_3} - \frac{z}{R_3 C_3} + \frac{i(x)}{C_3} \end{cases} \quad (12)$$

由 (1), (12) 式可得

$$C_1 = C_2 = C_3, R_1 = R_2 = R_3, R_4 = R_5,$$

$$R_{cix} \geq \frac{|V_{sat}|}{a C_3 A_x}, \quad (13)$$

$$R_{ciy} \geq \frac{a R_{cix} A_x R_6}{A_y R_5}. \quad (14)$$

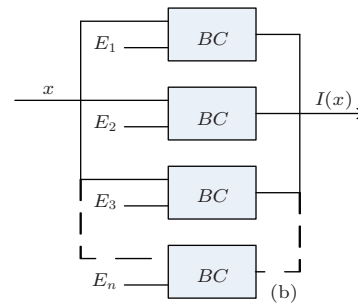


图 5 同向积分器

3.2 电路仿真

为了检验混沌电路设计的正确性, 设

$$V_{DD} = 10 \text{ V}, \quad V_{EE} = -10 \text{ V},$$

$$DR = 10.8 \text{ V}, \quad N_{Sx} = 3, \quad N_{Sy} = 3$$

以及 $a = 0.7$, 通过 (1), (2), (4), (6), (8), (10) 式可计算出 W , S , B_p 和 E_p , 其结果如表 2 所示. 设 $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_4 = R_5 = 7 \text{ k}\Omega$, $R_6 = 5 \text{ k}\Omega$, $C_1 = C_2 = C_3 = 2.2 \text{ nF}$ 时, 由 (13), (14) 式和表 2, 可得 $R_{cix} \geq 36 \text{ k}\Omega$, $R_{ciy} \geq 53 \text{ k}\Omega$. 用 Multsim 进行电路仿真, 虚拟示波器观察结果如图 8 所示.

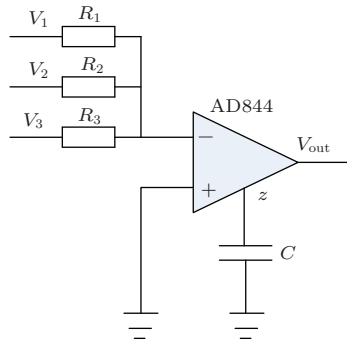


图 6 反相求和积分器

同理, $N_{Sx} = 2$, $N_{Sy} = 2$, 通过 (1), (3), (5), (7), (9), (11) 式可计算出 W , S , B_p 和 E_p , 其结果如表 2 所示. 由 (13), (14) 式和表 2, 可得 $R_{cix} \geq 23 \text{ k}\Omega$, $R_{ciy} \geq 23 \text{ k}\Omega$, 用 Multsim 进行电路仿真, 虚拟示波器观察结果如图 9 所示.

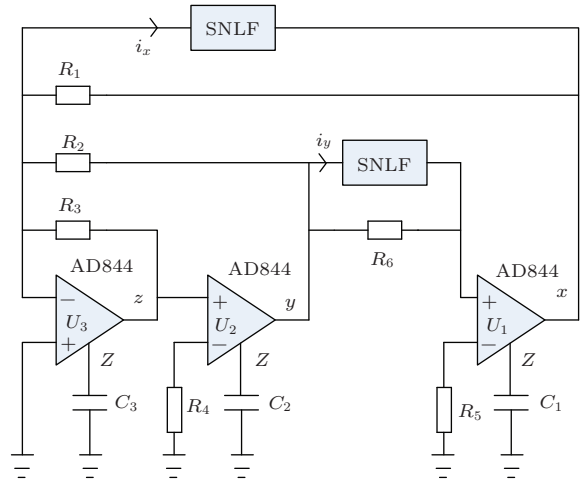


图 7 网格多涡卷混沌电路

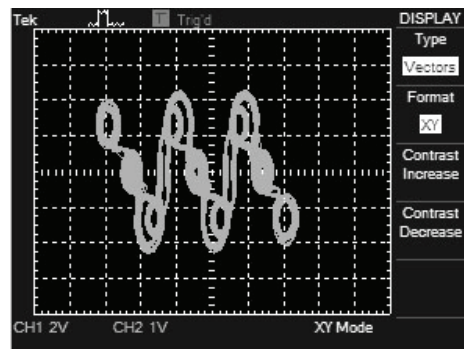


图 8 3×3 个混沌吸引子 $x-y$ 平面

表 2 2×2 和 3×3 多涡卷混沌吸引子参数

2×2 -scroll		3×3 -scroll	
$W_x = 5.4$, $W_y = 1.35$	$S = 7.56$	$W_x = 3.6$, $W_y = 1.2$	$S = 5.04$
$\pm E_j = \pm B_{pj}(x, y)$	$\pm E_{pj}(x, y)$	$\pm E_j = \pm B_{pj}(x, y)$	$\pm E_{pj}(x, y)$
$0, 0$	$\pm 1.35, \pm 1.35$	$\pm 1.8, \pm 0.6$	$0, 0$
	$\pm 4.05, \mp 1.35$		$\pm 1.2, \mp 1.2$
			$\pm 2.4, \pm 1.2$
			$\pm 3.06, 0$
			$\pm 4.8, \mp 1.2$

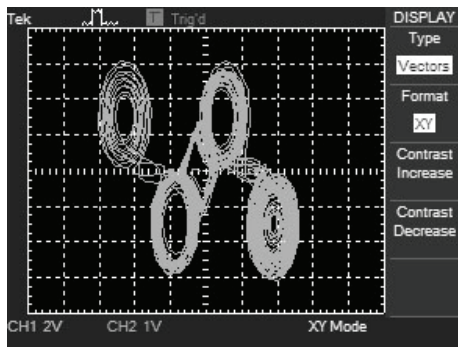


图 9 2×2 个混沌吸引子 $x-y$ 平面

对系统做尺度变换, 缩小电容来提高电路的工作频率. 当 $C_1 = C_2 = 100 \text{ pF}$, $C_3 = 143 \text{ pF}$ 时, 网格 2×2 涡卷混沌吸引子的频谱如图 10 所示.

由图 10 可知, 网格 2×2 涡卷混沌的中心频率为 250 kHz , 比文献 [18] 网格 2×2 涡卷混沌的中心频率 75 kHz 和文献 [19] 网格 2×2 涡卷混沌的中心频率 105 kHz 高. 在同等条件下, 经过多次试验, 发现该网格 2×2 涡卷混沌吸引子的频率比该网格

3×3 涡卷混沌吸引子的频率高. 仿真实验表明, 本文采用的电流反馈放大器具有很好的频率特性. 要使电路获得更高的频率, 需采用互补金属氧化物半导体技术来实现电流反馈放大器功能, 进而完成混沌电路设计.

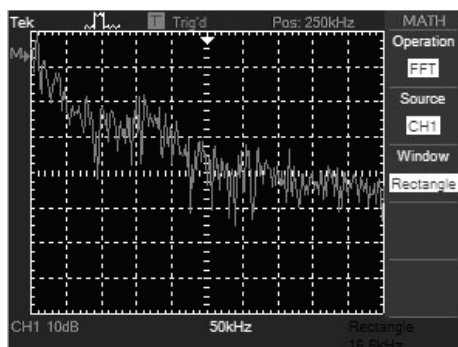


图10 网格 2×2 涡卷混沌吸引子的频谱

4 结 论

本文提出了一种仅用电流反馈放大器设计网格多涡卷混沌系统的方法, 设计了二维网格多涡卷混沌电路, 该电路由3个积分电路和2个非线性函数电路组成. 与文献[18, 19]相比, 该混沌电路的优点有: 1) 电流反馈放大器具有很好的高频特性, 使该混沌电路的工作频率更高; 2) 电流反馈放大器具有很好的端口特性, 使该混沌电路结构更简单, 使用元件更少.

参考文献

- [1] Trejo-Guerra R, Tlelo-Cuautle E, Cruz-Hernandez C, Sanchez-Lopez C 2009 *Int. J. Bifurc. Chaos* **19** 4217
- [2] Suykens J A K, Vandewalle J 1993 *IEEE Trans. Circ. Syst.* **40** 861
- [3] Lü J H, Chen G R, Yu X H, Leung H 2004 *IEEE Trans. Circ. Syst.* **51** 2476
- [4] Chen S B, Zeng Y C, Xu M L, Chen J S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 020507 (in Chinese) [陈仕必, 曾以成, 徐茂林, 陈家胜 2011 物理学报 **60** 020507]
- [5] Zhang C X, Yu S M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 119
- [6] Luo X H, Tu Z W, Liu X R, Cai C, Liang Y L, Gong P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 070510
- [7] Sanchez-Lopez C 2011 *Appl. Math. Comp.* **217** 4350
- [8] Ad844 Data sheet, <http://www.analogdevices.org> [2012-6-2]
- [9] Elwakil A S, Kennedy M P 1998 *Electron. Lett.* **34** 1161
- [10] Senani R, Gupta S S 1998 *Electron. Lett.* **34** 829
- [11] Elwakil A S, Kennedy M P 2000 *IEEE Trans. Circ. Syst.* **47** 76
- [12] Kilic R 2003 *Circ. Syst. Signal Process* **22** 475
- [13] Yalcin M E, Ozoguz S, Suykens J A K, Vandewalle J 2001 *Electron. Lett.* **37** 147
- [14] Trejo-Guerra R, Tlelo-Cuautle E, Sanchez-Lopez C, Munoz-Pacheco J M, Cruz-Hernandez C 2010 *Rev. Mex. Fis.* **56** 268
- [15] Munoz-Pacheco J M, Campos-Lopez W, Tlelo-Cuautle E, Sanchez-Lopez C 2012 *Trends Appl. Sci. Res.* **7** 168
- [16] Trejo-Guerra R, Tlelo-Cuautle E, Carbajal-Gomez V H, Rodriguez-Gomez G 2013 *Appl. Math. Comput.* **219** 5113
- [17] Sanchez-Lopez C, Trejo-Guerra R, Munoz-Pacheco J M, Tlelo-Cuautle E 2010 *Nonlinear Dyn.* **61** 331
- [18] Wang C H, Yin J W, Lin Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 210507 (in Chinese) [王春华, 尹晋文, 林愿 2012 物理学报 **61** 210507]
- [19] Lin Y, Wang C H, Xu H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 240503 (in Chinese) [林愿, 王春华, 徐浩 2012 物理学报 **61** 240503]
- [20] Munoz-Pacheco J M, Tlelo-Cuautle E 2009 *J. Appl. Res. Technol.* **7** 5

Design and implementation of grid multi-scroll chaotic circuit based on current feedback operational amplifier*

Wu Xian-Ming^{1)†} He Yi-Gang¹⁾²⁾ Yu Wen-Xin¹⁾

1) (*College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China*)

2) (*School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

(Received 27 April 2014; revised manuscript received 15 May 2014)

Abstract

In this paper, a method is proposed to realize the grid multi-scroll chaotic system with the current feedback operational amplifier (CFOA). Firstly, nonlinear circuit is designed based on the CFOA. Then the grid multi-scroll chaotic circuit is designed and relevant circuit parameters are calculated. Finally circuit simulation is conducted, and the results show that the circuit has a higher central frequency, needs less components, and possesses simpler circuit structure, good frequency characteristic and port characteristic of the CFOA.

Keywords: grid multi-scroll chaotic attractors, current feedback operational amplifier, circuit implementation

PACS: 05.45.Ac, 05.45.Pq

DOI: [10.7498/aps.63.180506](https://doi.org/10.7498/aps.63.180506)

* Project supported by the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 50925727), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51107034), the National Defense Advanced Research Project, China (Grant Nos. C1120110004, 9140A27020211DZ5102), the Foundation for Key Program of Ministry of Education, China (Grant No. 313018), and the Natural Science Foundation of Hunan Province, China (Grant Nos. 2011J4, 2011JK2023, 12JJA004).

† Corresponding author. E-mail: jsdxwzm@126.com