

一种基于对数域电路的混沌振荡器

蔡理, 王森

(空军工程大学理学院, 陕西西安 710051)

摘要: 在类双涡卷混沌动态模型的基础上, 提出了一个变型的状态空间方程模型, 它适合于用对数域电路实现。通过对该系统的仿真研究结果表明, 此模型具有正的 Lyapunov 指数, 证实了其混沌动力学特性的存在。并给出了基于对数域电路的混沌振荡器的实现。

关键词: 混沌; 对数域电路; 振荡器; 跨导线性

中图分类号: TN713 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2007)02-0057-03

近年来, 随着混沌信号在通讯和密码系统中潜在的商业应用研究的进展^[1], 设计具有新特性且适合于集成电路实现的混沌振荡器已逐渐引起关注^[2], 譬如, 象适合于低电压、低功耗集成电路的实现, 以及扩展频率范围等方面的特性。对数域(log-domain)滤波技术^[3-4]的出现, 使得低电压、低功率和高频率集成电路设计成为可能^[4-7]。对数域信号处理的概念最初是由 Adams 在 1979 年提出, 而在 1990 年, Tsividis 等人引入了有关缩展(companding)的概念, 接着 Seevinck 提出的电流模式积分器本质上就是对数域积分器^[3]。直到 1993 年, Frey 才全面明确地提出了对数域滤波这一名称^[4]。应用对数域滤波器综合方法设计集成电路有以下优点: ①对数域滤波电路直接利用双极型晶体管的集电极电流与基射结电压的指数特性, 对信号进行缩展处理, 因而该种电路可以提供比较大的动态范围, 更适用于低电压、低功率应用; ②由于对数域电路是真正的电流模式电路, 所以适合于高频率工作; ③对数域电路的主要参数是便于电子调控的。本文研究了基于对数域电路的混沌振荡器数学模型的动力学特性和它的晶体管电路的实现, 并给出了仿真研究的结果。

1 类双涡卷混沌动力学模型及仿真分析

一个简单的类双涡卷混沌动力学模型可以由以下微分方程来描述^[2]:

$$\ddot{x}(t) = -a[\dot{x}(t) + \dot{x}(t) + x(t)] + f(x) \quad (1)$$

其中

$$f(x) = \text{sign}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

非线性函数 $f(x)$ 具有奇对称性, 且该系统通过调节单一参数 a 可以改变其动力学特性。这个系统在 a 为 0.50 到 0.95 之间, 可以出现类双涡卷混沌吸引子, 类似于蔡氏双涡卷混沌电路。

从微分方程式(1)可以得到很多组等效状态方程, 然而, 为了能用对数域电路实现方程式(1)的非线性动力学系统, 需要用指数状态空间的表示式来描述。因此, 我们进行了分析研究, 若令方程式(1)中的 $dx/dt = y$, $d^2x/dt^2 = z$, 这样直接得到状态方程后, 再经过适当变形后, 则可以表示为以下的状态空间形式:

$$dx/dt = -ax + y; dy/dt = -2x + y + z; dz/dt = -y - z + f_u(x) \quad (2)$$

其中 $f_u(x) = \text{sign}(x - u) + u$, 而 u 是一个适当的正常数, 这是由于要实现的是对数域电路, 所以, 需要保持系统的状态瞬时值总是为正的。状态方程组(2)在状态空间的三个子空间为

收稿日期: 2006-09-28

作者简介: 蔡理(1959-), 女, 福建永春人, 教授, 博士生导师, 主要从事集成滤波器等研究。

$$\Omega_1 = \{(x, y, z) | x > u\}, \quad \Omega_2 = \{(x, y, z) | x = u\}, \quad \Omega_3 = \{(x, y, z) | x < u\}$$

假设 $u=0$, 则在状态空间的三个子空间内分别具有以下唯一平衡点:

$$Q_1 = \left[\frac{1}{2}, \frac{a}{2}, \left(1 - \frac{a}{2}\right) \right] \in \Omega_1, Q_2 = (0, 0, 0) \in \Omega_2, Q_3 = \left[-\frac{1}{2}, -\frac{a}{2}, -\left(1 - \frac{a}{2}\right) \right] \in \Omega_3$$

在上述各子空间内, 状态方程组(2)均属于线性状态方程组, 故可令其系数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -a & 1 & 0 \\ -2 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.85 & 1 & 0 \\ -2 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

其中, 设 $a=0.85$, 这时, 则有平衡点为

$$Q_1 = (0.5, 0.425, 0.575), Q_2 = (0, 0, 0), Q_3 = (-0.5, -0.425, -0.575)$$

为了求出相应的特征根, 令 $|\lambda I - A| = 0$, 所以, 可求得在相应的平衡点 Q_1, Q_2 和 Q_3 处的特征值为一个实数值: $\lambda_1 = -0.9531$ 和一对共轭复数值: $\lambda_{2,3} = \alpha \pm j\beta = 0.0516 \pm j1.4476$, 可见 $\lambda_1 < 0$, 而 $\alpha > 0$ 。全部的平衡点均为鞍点。

对于方程式(2)的动力学系统, 我们选取初始值为 $(0.3, 0.5, 0.2)$, 而取 $a=0.85$ 和 $u=0.01$, 应用 MATLAB 对该系统进行数值仿真, 其双涡卷混沌吸引子的三维空间和 $x-y$ 相平面的状态轨迹如图 1 所示。采用 d_∞ 参数方法^[8] 近似估算出最大的 Lyapunov 指数等于 0.103, 它证实了混沌动力学特性的存在。

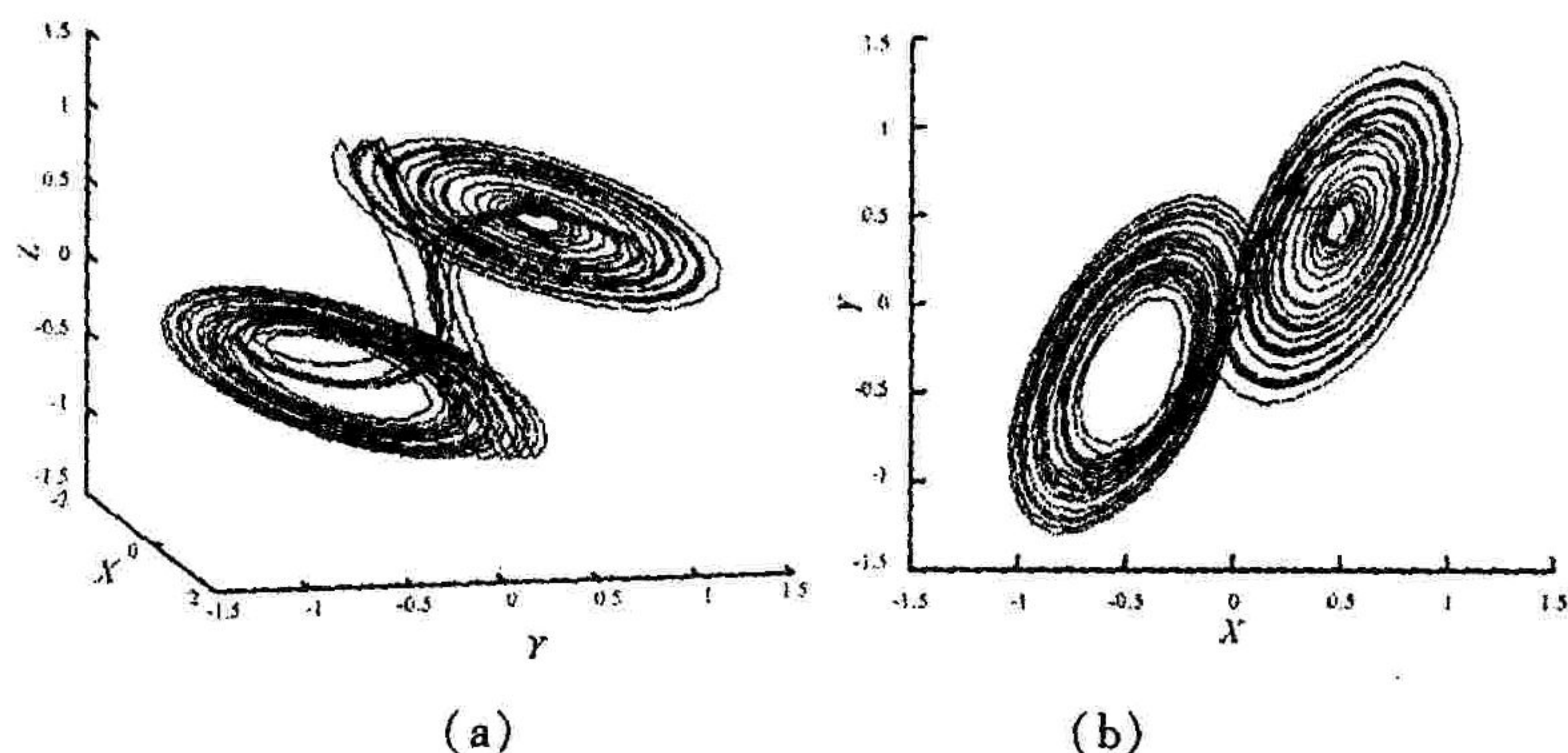


图 1 双涡卷混沌的三维空间和 $x-y$ 相平面的状态轨迹

这里需要说明的是定标问题, 方程式(1)和(2)为无量纲方程, 其中的时间 t 为归一化时间, 应该用 τ 表示, 因此, 无量纲时间 τ 变换为有量纲 $[s]$ 的时间 t 为

$$\frac{d}{d\tau} = \frac{CV_T}{I_b} \cdot \frac{d}{dt} = \frac{1}{\omega_0} \cdot \frac{d}{dt} \quad (3)$$

其中, $\omega_0 = I_b / (CV_T)$ 为时间定标常数。所以, 方程式(2)要变换为有量纲方程, 只要在其方程右手边全部乘以常数 ω_0 即可。在以下对数域电路实现的分析中, 均需采用有量纲方程。

2 对数域电路的实现

为了能将方程式(2)所描述的动力学系统用对数域电路实现, 需要采用下面的指数状态空间变换来得到: $x = I_b \exp(v_1/V_T)$; $y = I_s \exp(v_2/V_T)$; $z = I_s^2/I_b \exp(v_3/V_T)$; $f_u(x) = I_s^2/I_b \exp(v_u/V_T)$ 。其中, $I_b = CV_T \omega_0$ 是对数域电路中的偏置电流, $V_T = kT/q$ 为热电压, I_s 为反向饱和电流。将以上变换代入到方程式(2)中, 可得出下面的微分方程:

$$\begin{aligned} C \frac{dv_1}{dt} &= -aI_b + I_s e^{(v_2-v_1)/V_T}; C \frac{dv_2}{dt} = -2 \frac{I_b^2}{I_s} e^{(v_1-v_2)/V_T} + I_b + I_s e^{(v_3-v_2)/V_T} \\ C \frac{dv_3}{dt} &= -\frac{I_b^2}{I_s} e^{(v_2-v_3)/V_T} - I_b + I_b e^{(v_u-v_3)/V_T}; i_{out} = x = I_b e^{v_1/V_T} \end{aligned} \quad (4)$$

这样, 方程式(4)能用电容器、晶体管和电流源来实现, 即可得到对数域电路。由此得到的晶体管级电路实现如图 2 所示。方程式(1)中的 $f(x) = \text{sign}(x)$ 函数可以用一个电压比较器实现。当比较器输出是高电平时, 电流 I_{US} 等于 $2I_b$, 而当比较器输出是低电平时, I_{US} 为零。图 3 中的电流 i_{out} 先由电阻 R_x 转换为一个适当的电压, 然后将其与参考电压 V_{ref} 进行比较, V_{ref} 取决于相应的电流 uI_b 值。另外, 由于电路中所有的内节点都提供低阻抗, 所以, 该振荡电路可以获得比较高的工作频率。

采用 PSpice 对所实现的对数域混沌振荡电路进行仿真实验研究。图 3 电路中电容取为 $C_1 = C_2 = C_3 = 22 \text{ nF}$, 双极型晶体管用 Q2N2222, 比较器用 LM311, 取 $a=0.85$, $u=1.25$, 而偏置电流取为 $I_b = 400 \mu\text{A}$ 。得

到的结果与本文第1节中的数值仿真结果是一致的,如图3所示。

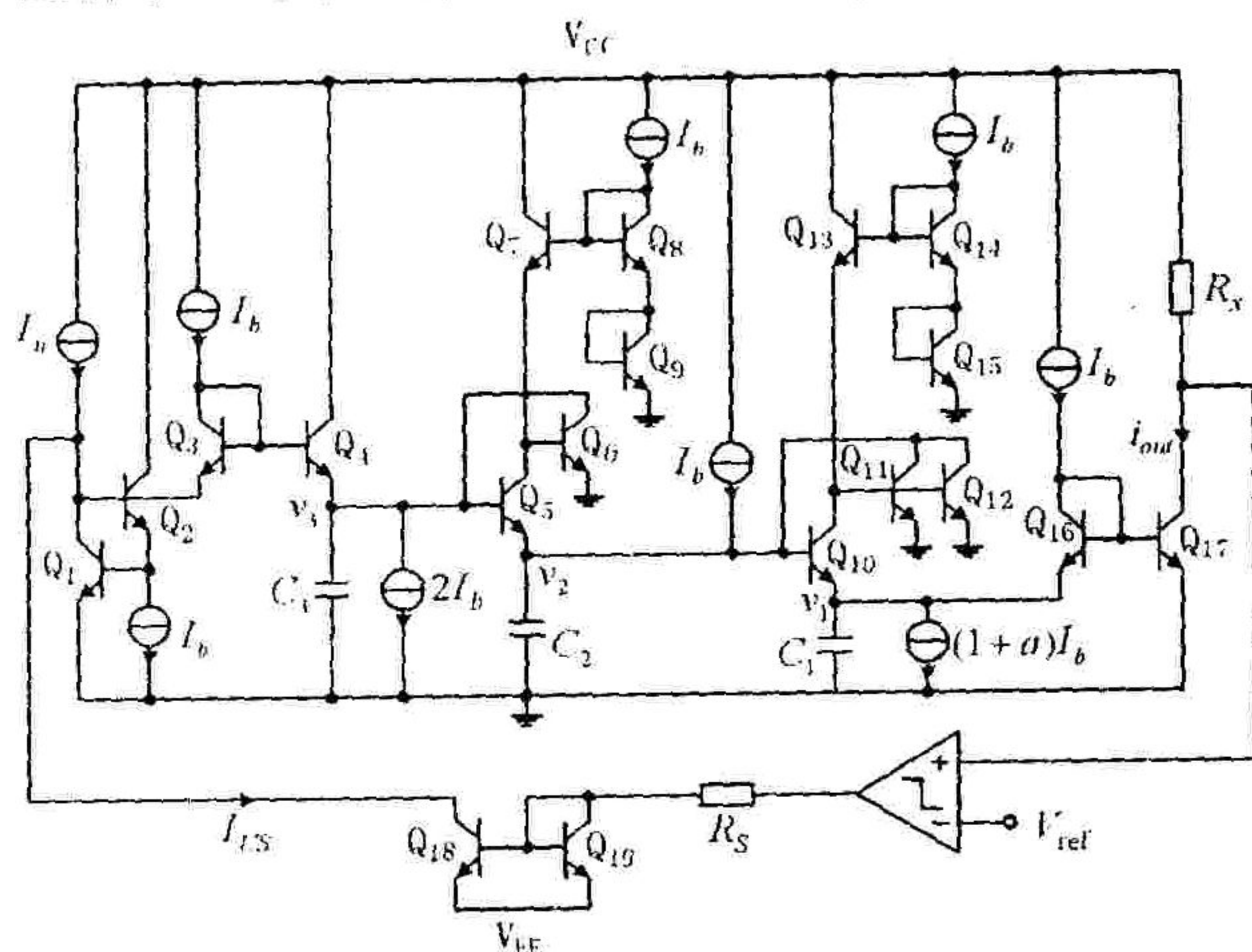


图2 基于对数域电路的混沌振荡器实现

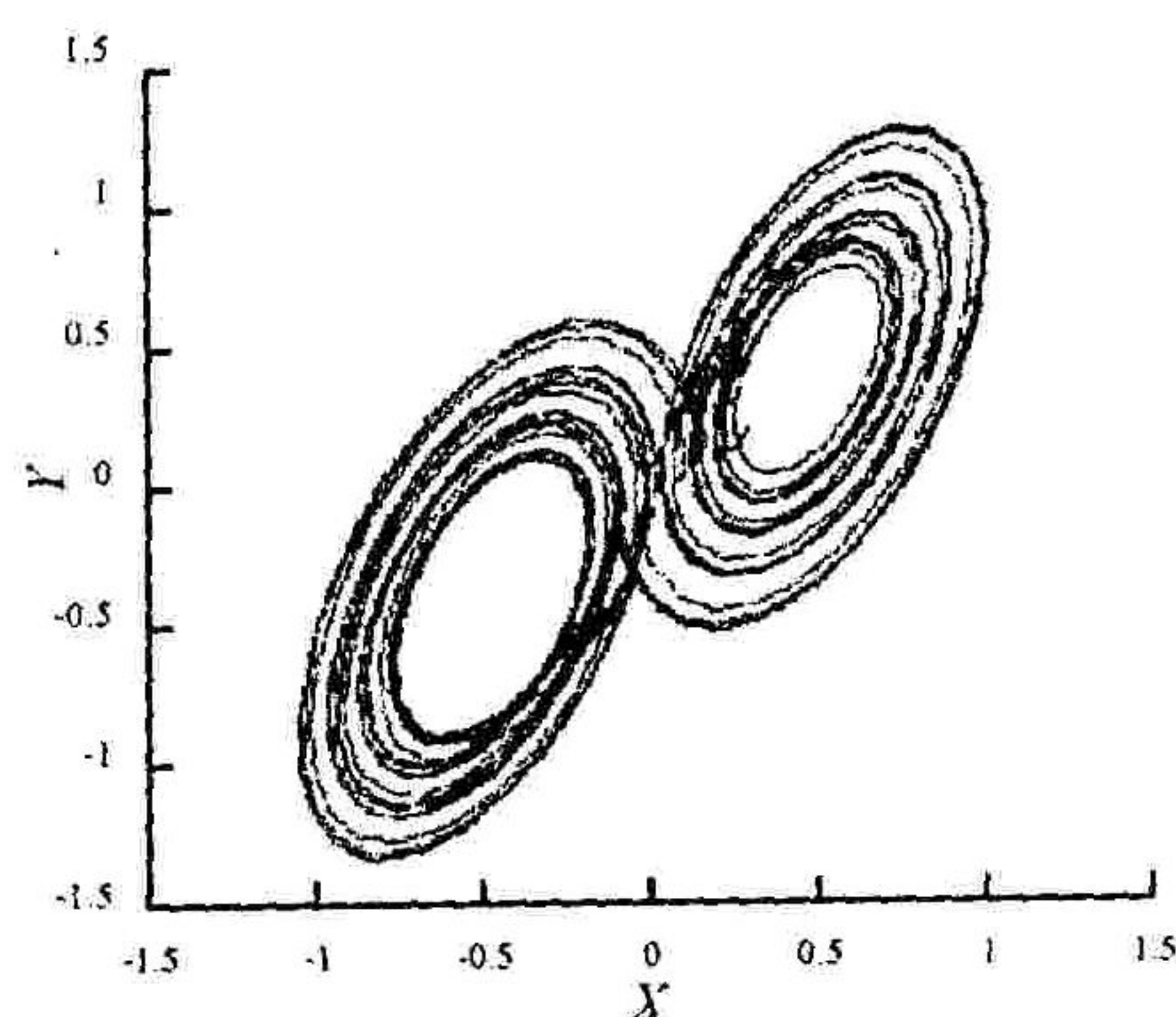


图3 $x-y$ 相平面轨迹仿真结果

3 结束语

本文在类双涡卷混沌动态模型的基础上,提出了一个变型的状态空间方程模型。该系统的仿真研究结果表明,在混沌振动过程中,出现了双涡卷混沌吸引子,正的 Lyapunov 指数说明其混沌动力学特性的存在。若变化它的参数和初始值,该模型呈现出丰富的混沌动力学行为。通过适当的指数状态空间变换,便可以采用对数域电路实现混沌振荡器,该电路具有低电压、低功率和高频率等特点。

参考文献:

- [1] Kolumban G, Kennedy M P, Chua L O. The Role of Synchronization in Digital Communications Using Chaos I. Fundamentals of Digital Communications[J]. IEEE Trans. Circuits Syst. I, 1997, 44(5): 927-935.
- [2] Elwakil A S, Kennedy M P. Construction of Classes of Circuit-Independent Chaotic Oscillator Using Passive-Only Nonlinear Devices[J]. IEEE Trans Circuits Syst. I, 2001, 48(3): 289-307.
- [3] Seevinck E. Companding Current-mode Integrator: A New Circuit Principle for Continuous-Time Monolithic Filters[J]. Electron Lett., 1990, 26(24): 2046-2047.
- [4] Frey D R. Log-domain Filtering: an Approach to Current-mode Filtering[J]. IEE Proc G, 1993, 140(6): 406-416.
- [5] Mulder J, Serdijn W A, Woerd A C, et al. Dynamic Translinear Circuits An Overview[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2000, 22(2): 111-126.
- [6] 蔡 理,马西奎. 低电压对数域滤波器的低功率性能分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2001, 2(4): 33-36.
- [7] 蔡 理,马西奎. 对数域电流模式带通滤波器的频率限制[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(10): 1075-1078.
- [8] Bonasera A, Bucolo M, Fortuna L, et al. The d_{∞} Parameter to Characterize Chaotic Dynamics[J]. IEEE IJCNN 2000, 5: 65-569.
- [9] 蔡 理,马西奎. 模拟集成滤波器发展综述[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2000, 1(2): 91-94.

(编辑:姚树峰)

A Chaotic Oscillator Based on Log-domain Circuits

CAI Li, WANG Sen

(The Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: A modified state-space equation model is presented, based on a model with double-scroll-like dynamics, which is appropriate for the realization of log-domain circuits. By simulating studies, the result shows that the model has a positive Lyapunov exponent, which verifies the existence of chaos. A chaotic oscillator with the log-domain circuits is also given.

Key words: chaos; log-domain circuit; oscillator; translinear