

# 基于微控制器数字硬件实现的 网格涡卷超混沌系统\*

徐煜明<sup>1)†</sup> 包伯成<sup>2)</sup> 徐 强<sup>1)</sup>

1) (常州工学院计算机信息工程学院, 常州 213002)

2) (江苏技术师范学院电气信息工程学院, 常州 213001)

(2009 年 12 月 15 日收到; 2009 年 12 月 28 日收到修改稿)

基于微控制器(MCU)设计了一个通用的四维混沌系统数字硬件实验电路,由此实现了 $9 \times 7$  网格涡卷的混沌和超混沌吸引子的生成. 本文基于由 Colpitts 振荡器模型延伸出的四维多涡卷超混沌系统,通过引入单位锯齿波函数替换原系统中的三角波函数,构建了一个便于 MCU 数字硬件实现的新的网格涡卷超混沌系统,并对新系统网格涡卷吸引子的形成机理进行了分析和数值仿真. 通过采用 Euler 算法对新系统进行离散化,在实验电路的有效动态范围内可以生成比原系统更多网格涡卷数量的吸引子. 实验结果有效验证了本文基于 MCU 实现的网格涡卷超混沌系统的可行性.

**关键词:** 网格涡卷超混沌系统, 单位锯齿波函数, 微控制器, 数字硬件实现

**PACC:** 0545

## 1. 引 言

相比于传统的单涡卷和双涡卷混沌系统,多涡卷混沌系统呈现出更为复杂的结构和动力学行为,在保密通信和信息隐藏等领域具有较好的应用前景<sup>[1-3]</sup>. 已有很多文献通过采用不同的分段线性或者非线性函数改造不同的低维混沌系统,以求获得特征根为指数 2 的涡卷平衡点,以达到生成各类多涡卷混沌吸引子<sup>[1-24]</sup>. 因此,多涡卷混沌吸引子的生成模型和相应的电路实现是目前混沌研究领域的热点.

从多涡卷混沌吸引子的生成模型研究角度来分析,可以分成两个层面,一是寻找到具有不同动力学特性的低维混沌系统,如归一化 Chua 电路方程<sup>[3,5-8]</sup>、Jerk 方程<sup>[2,8-12]</sup>和类 Lorenz 系统族方程<sup>[13]</sup>等,以这些混沌系统方程为框架,通过引入一个分段线性或者非线性函数对原系统方程进行改进;另一是基于一个低维混沌系统方程寻找到不同特性的分段线性或者非线性函数,如阶跃函数<sup>[7,9]</sup>、饱和函数<sup>[3,12,14]</sup>、三角波函数<sup>[4,10]</sup>、锯齿波函数<sup>[5]</sup>、

时滞函数<sup>[2,7]</sup>和多段非线性偶函数<sup>[13]</sup>等,来改造系统方程中的一些线性或非线性项. 这样形成的新系统就具有足够数量的指数 2 平衡点,并由此产生相应数量的混沌吸引子的涡卷. Colpitts 振荡器是一种典型的类正弦振荡电路,在一定的电路参数条件下,也可以实现混沌振荡,生成一个单涡卷的混沌吸引子<sup>[25]</sup>. 但目前基于 Colpitts 混沌振荡器模型实现的多涡卷混沌和超混沌系统的研究成果鲜有报道<sup>[4]</sup>,本文基于文献[4]提出的多涡卷超混沌系统,通过引入分段线性的单位锯齿波函数改进原模型,构造出了一个新的多涡卷混沌系统,进一步拓展以 Colpitts 混沌振荡器方程为框架的生成模型的研究.

从多涡卷混沌吸引子的电路实现研究角度分析,主要分成两类,一类是利用运算放大器、电阻和电容等分立元器件形成各自独立的功能模块连接组成电路模拟硬件实现<sup>[2,4-24]</sup>;另一类则是近几年兴起的采用超大规模 FPGA, DSP 等数字处理芯片经过 D/A 转换输出构成电路数字硬件实现<sup>[3,25-29]</sup>. 由于分立元器件的离散性较大,给电路设计及调试带来一定的困难,尤其是产生多涡卷混沌吸引子,电路通用性差,不利于推广和应用. 随着嵌入式技

\* 江苏省自然科学基金(批准号: BK2009105)资助的课题.

† E-mail: xuyum@czu.cn

术的发展,周武杰等<sup>[26]</sup>采用数字处理技术,对连续时间无量纲状态方程进行离散化处理,用 FPGA 技术实现了  $2 \times 2, 3 \times 3, 4 \times 4$  网格涡卷蔡氏混沌吸引子. 文献[27]基于数字信号开发技术 DSP Builder, 用 FPGA 技术产生混沌信号, 由于 FPGA 实现时需消耗大量的硬件资源, 为了保证算法的精度, 只能满足一些较简单的混沌信号. 微控制器 (MCU) 是一种应用广泛、技术通用且功能强大的微处理芯片, 目前尚未见到基于 MCU 芯片实现混沌系统的研究成果报道. 本文提出了采用 MCU 芯片实现新提出的四维网格涡卷超混沌吸引子的数字硬件电路, 通过编程对时序进行控制, 该电路通用性强, 不受硬件资源的限制, 软件可移植性好, 可以适用于其他一般混沌电路的数字硬件实现.

## 2. 采用锯齿波函数实现的四维多涡卷超混沌系统

### 2.1. 四维改进型 Colpitts 振荡器模型

文献[4]基于三阶单涡卷混沌 Colpitts 振荡器模型得到了一个四维多涡卷超混沌系统, 其状态方程表达为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mu[z - f_M(y)], \\ \dot{y} &= \mu[z + f_N(w)], \\ \dot{z} &= -0.5(x + y)/\mu - z, \\ \dot{w} &= x + y, \end{aligned} \quad (1)$$

其中控制参数  $\mu > 0, M$  和  $N$  均为正整数. 在文献[4]中,  $f_M(y)$  和  $f_N(w)$  是两个三角波函数, 这里, 为了便于硬件电路实现系统(1), 并考虑到在硬件实验电路的有效动态范围内生成更多网格涡卷数量的吸引子, 我们采用了两个具有单位幅度和单位振荡频率的锯齿波函数. 可利用  $f_k(\xi)$  统一表示  $f_M(y)$  和  $f_N(w)$ , 其数学表示式为

$$f_k(\xi) = \sum_{k=1}^K \{ \text{sgn}[\xi + (k - 0.5)] + \text{sgn}[\xi - (k - 0.5)] \} - 2\xi, \quad (2)$$

式中  $K$  为正整数. 图 1 给出了  $K=3$  时单位锯齿波函数  $f_k(\xi)$  的曲线图例, 从图 1 中可以很容易确定每个线性段的特性, 如斜率和零点.

### 2.2. 多涡卷混沌吸引子的形成机理

令  $\dot{x} = \dot{y} = \dot{z} = \dot{w} = 0$ , 可得  $x = -y, f_M(y) = 0, z$

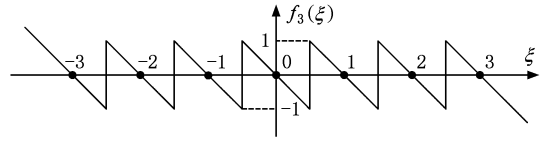


图 1  $K=3$  时锯齿波函数  $f_k(\xi)$  的曲线图

$= 0, f_N(w) = 0$ , 这说明系统(1)的平衡点完全是由两个单位锯齿波函数  $f_M(y)$  和  $f_N(w)$  的零点形成的. 这里, 我们只考虑指数 2 的平衡点, 它由图 1 中标注为“·”的零点构成. 因此, 四维多涡卷超混沌系统有  $(2M + 1) \times (2N + 1)$  个指数 2 平衡点  $Q_{ij} = (-i, i, 0, j)$ , 位于  $z = 0$  的  $x \times w$  和  $y \times w$  平面网格上, 这里  $i = 0, \pm 1, \dots, \pm M$  和  $j = 0, \pm 1, \dots, \pm N$ . 选择系统(1)中单位锯齿波函数的参数为  $M=4, N=3$ , 在  $y \times w$  平面网格上, 系统(1)的指数 2 平衡点分布如图 2 所示, 用“·”来标注. 图 2 中系统(1)有  $9 \times 7$  个指数 2 平衡点, 由此可生成  $9 \times 7$  个涡卷混沌吸引子.

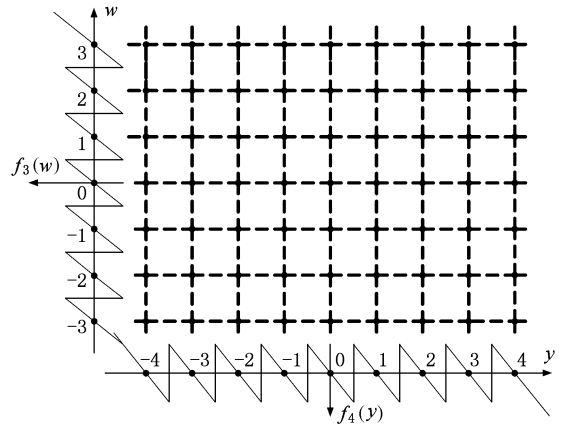


图 2 系统(1)在  $y \times w$  平面网格上的指数 2 平衡点

系统(1)在平衡点  $Q_{ij} = (-i, i, 0, j)$  处的 Jacobian 矩阵为

$$J_{Q_{ij}} = \begin{bmatrix} 0 & -\mu f'_M(i) & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu & \mu f'_N(j) \\ -\frac{0.5}{\mu} & -\frac{0.5}{\mu} & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $f'_M(i) \triangleq df_M(y)/dy|_i, f'_N(j) \triangleq df_N(w)/dw|_j$ , 有

$$f'_k(k) = \left. \frac{df_k(\xi)}{d\xi} \right|_k = -2. \quad (4)$$

即有  $f'_M(i) = f'_N(j) = -2$ , 在此平衡点附近线性化系统得到以下特征方程:

$$g(\lambda) = \lambda^4 + \lambda^3 + (1 + 2\mu)\lambda^2 + \mu(3 + 4\mu)\lambda + 4\mu^2 = 0. \quad (5)$$

注意到该四次多项式的系数在  $\mu > 0$  时均为正数, 因此对所有  $\lambda > 0$  都有  $g(\lambda) > 0$ . 根据 Routh-Hurwitz 稳定判据, 系统稳定的充分必要条件是

$$(1 + 2\mu) - \mu(3 + 4\mu) > 0,$$

$$\mu(3 + 4\mu)[(1 + 2\mu) - \mu(3 + 4\mu)] - 4\mu^2 > 0.$$

即

$$4\mu^2 + \mu - 1 < 0,$$

$$16\mu^3 + 16\mu^2 + 3\mu - 3 < 0. \quad (6)$$

数值计算表明当  $\mu > 0.3904$  时, 系统不能满足(6)式的充分必要条件, 即系统不稳定, 这时方程(5)式有两个负实根 (或两个实部为负数的共轭复根) 和两个实部为正数的共轭复根. 因此,  $\mu = 0.3904$  是 Hopf 分岔的临界点, 当  $\mu > 0.3904$  时系统的平衡点

$Q_{ij}$  为指数 2 的不稳定鞍结. 在此条件下, 指数 2 平衡点  $Q_{ij}$  附近的系统运行轨线均可演变为一个具有独立混沌吸引域的吸引子涡卷.

当  $\mu = 0.5$  和  $\mu = 1$  时, 系统(1)的指数 2 平衡点  $Q_{ij}$  的四个特征根分别是  $\lambda_{1,2} = 0.1779 \pm i1.3946$ ,  $\lambda_{3,4} = -0.6779 \pm i0.2152$  和  $\lambda_{1,2} = 0.5 \pm i1.9365$ ,  $\lambda_3 = -1$ ,  $\lambda_4 = -1$ .

### 2.3. 9 × 7 涡卷混沌和超混沌吸引子

当  $\mu = 0.5$  时, 系统(1)可产生 9 × 7 网格涡卷、9 涡卷和 7 涡卷的混沌吸引子. 图 3 给出了 9 × 7 网格涡卷混沌吸引子在  $x-w$  和  $y-w$  平面上的投影, 此参数值所对应的 Lyapunov 指数分别为  $L_1 = 0.2602$ ,  $L_2 = 0$ ,  $L_3 = -0.589$ ,  $L_4 = -0.6726$ , Lyapunov 维数为  $d_L = 2.2062$ .

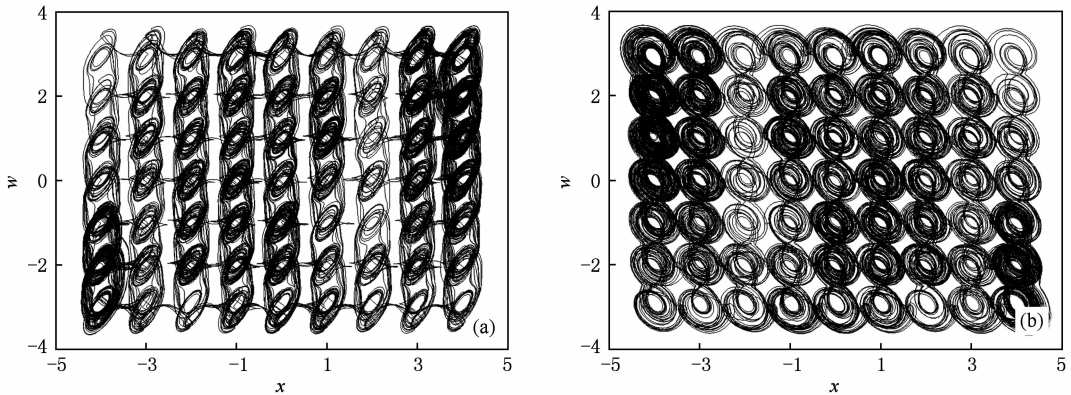


图 3 四维 9 × 7 网格涡卷混沌吸引子 (a)  $x-w$  平面; (b)  $y-w$  平面

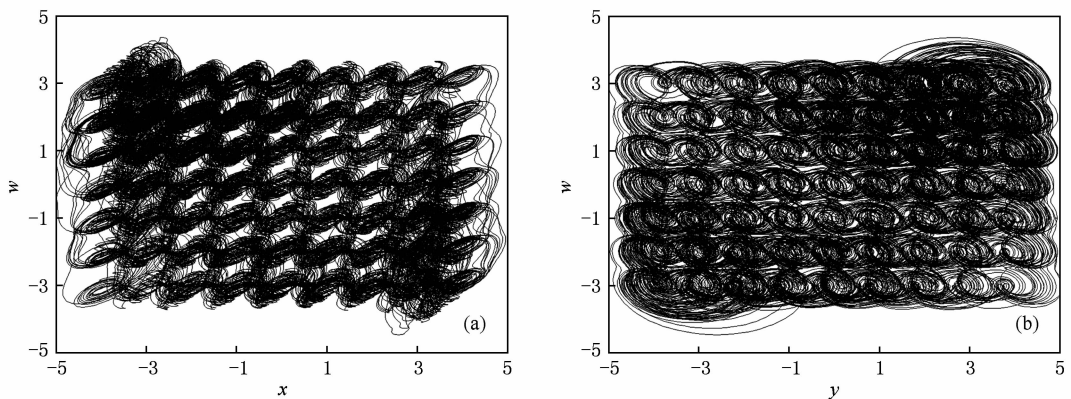


图 4 四维 9 × 7 网格涡卷超混沌吸引子 (a)  $x-w$  平面; (b)  $y-w$  平面

当  $\mu = 1$  时, 系统(1)则产生了网格涡卷超混沌吸引子. 图 4 给出了 9 × 7 网格涡卷超混沌吸引子在  $x-w$  和  $y-w$  平面上的投影. 相应的 Lyapunov 指数分

别为  $L_1 = 0.4327$ ,  $L_2 = 0.1128$ ,  $L_3 = -0.6922$ ,  $L_4 = -0.8534$ , Lyapunov 维数为  $d_L = 3.3529$ .

比较图 3 和图 4, 不难观察出,  $\mu = 0.5$  时混沌吸

引子形成的每个涡卷在截面上的 Poincaré 映射是孤立的;而  $\mu = 1$  时超混沌吸引子形成的每个涡卷在整个截面上的 Poincaré 映射连成了一体,即表示超混沌吸引子在更多方向上分离,其动力学行为表现的更为复杂.

### 3. 基于 MCU 的数字硬件电路设计和实验观察

#### 3.1. 网格涡卷超混沌系统的 MCU 数字电路设计

基于 MCU 硬件实现的四维网格涡卷超混沌系统的原理图如图 5 所示,主要由 MCU 电路、磁耦合隔离电路、D/A 转换电路等三部分构成,四路通道模块化设计,通过 JTAG 接口对 MCU 片内 Flash 进行编程,实现  $x, y, z, w$  四维电压信号输出. 核心芯

片 MCU 采用 AVR 微控制器器件 ATmega128L,在内部定时器模块的作用下,由软件控制  $PB_0-PB_2, PD_0-PD_2, PE_0-PE_2, PF_0-PF_2$  接口,输出 SPI 时序信号,与四路 D/A 转换电路建立数据链路.  $PB_0, PD_0, PE_0, PF_0$  输出控制信号,  $PB_1, PD_1, PE_1, PF_1$  输出时钟信号,  $PB_2, PD_2, PE_2, PF_2$  串行输出数字信号.

D/A 转换电路选用了基于  $\Sigma-\Delta$  结构的 16 位数模转换器件 AD420,具有 SPI 串行通信接口,通过 LATCH, CLOCK, DATA IN 端口与微控制器相接,最大速率可达 3.3 Mbit/s. LATCH 为内部缓冲存储器控制输入端, CLOCK 为时钟输入端, DATA IN 为串行数字信号输入端. 在 LATCH 控制信号有效时,通过 CLOCK 时钟触发, AD420 内部缓冲存储器可连续接收数字信号,实现持续稳定的模拟量输出,非常适合于高精度远程控制系统.

为了提高系统的可靠性,抑制数字信号与模拟

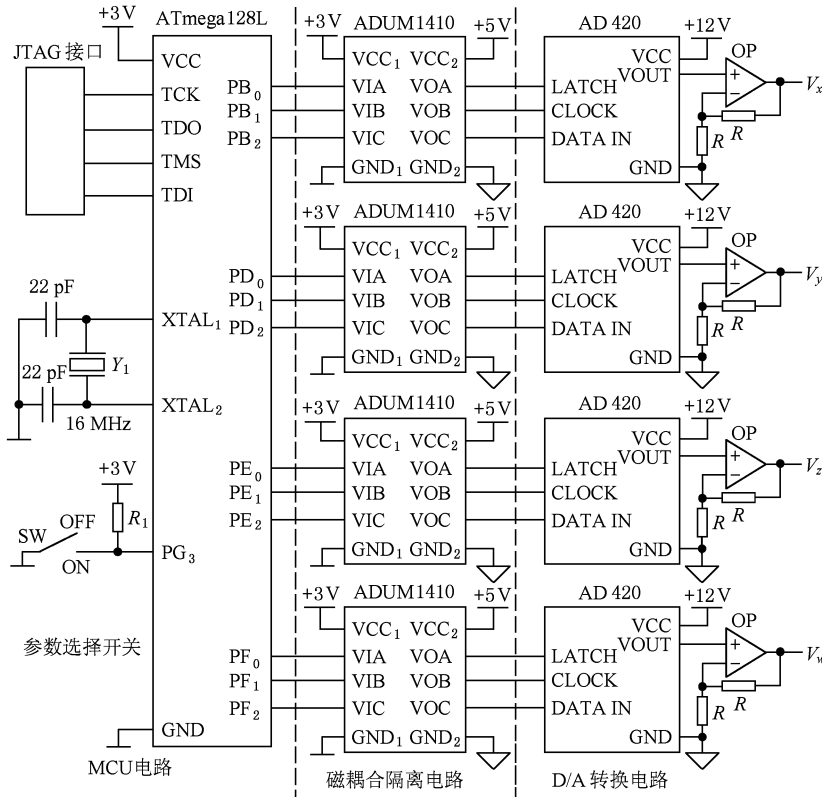


图 5 基于 MCU 的网格涡卷超混沌电路

信号之间相互干扰,在微控制器与 D/A 转换电路之间,设计了数字信号隔离通道. 采用了基于芯片级变压器的磁耦合数字隔离器 ADUM1410,与传统的光电耦合器(如 TLP521 系列)相比,由于磁耦合隔离器取消了影响转换效率的光电转换环节,因此其

功耗仅为光电耦合器的 1/10—1/60,提高了电流传输的稳定性,减小了信号传输的非线性失真,脉宽失真 < 3 ns 且具有直流校正功能,比光电耦合器具有更高的数据传输速率、时序精度和瞬态共模抑制能力,保证了 D/A 转换电路输出模拟信号的稳

定性.

图 5 中 D/A 转换电路采用了电压模式设计, VOUT 电压输出范围为 0 V—+5 V. 为了在实验中获得更宽的电压动态范围, 增加了一级同相放大电路, 图中的 OP 运算放大器选用 TL082, R 取 5 kΩ, 可得到 2 倍的电压增益, 输出电压动态范围扩大至 0 V—+10 V. SW 为参数选择开关, 上拉电阻 R<sub>1</sub> 取 1 kΩ, 当 SW 处于 ON 或 OFF 位置时, PG<sub>3</sub> 端口输入低电平或高电平. 通过软件判断 PG<sub>3</sub> 逻辑状态, 选择参数  $\mu = 0.5$  或  $\mu = 1$ , 实现混沌或超混沌信号输出.

### 3.2. 9 × 7 涡卷混沌和超混沌吸引子的数字化实现和实验观察

在对上述数值仿真结果进行数字硬件实现之前, 需要对相应的连续系统进行离散化处理. 通常有三种离散化方法, 即 Euler 算法、改进的 Euler 算法和 Runge-Kutta 法, 这三种离散化的方法各有优缺点, 其中 Runge-Kutta 法精度较高. 这里我们采用最简单的离散化方法即 Euler 算法进行系统 (1) 的离散化处理<sup>[3]</sup>, 得到

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= h\mu[z_n - f_M(y_n)] + x_n, \\ y_{n+1} &= h\mu[z_n + f_N(w_n)] + y_n, \\ z_{n+1} &= h[-0.5(x_n + y_n)/\mu - z_n] + z_n, \\ w_{n+1} &= h(x_n + y_n) + w_n, \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $h$  为采样间隔, 且有

$$\begin{aligned} f_k(\xi_n) &= \sum_{k=1}^K \{ \text{sgn}[\xi_n + (k - 0.5)] \\ &\quad + \text{sgn}[\xi_n - (k - 0.5)] \} - 2\xi_n. \end{aligned} \quad (8)$$

根据上述离散化系统 (7), 用 C 语言可以设计出基于 MCU 的程序, 其程序流程图如图 6 所示. 程

序中  $h$  取 0.05,  $n$  为迭代次数,  $\mu$  的取值由参数选择开关 SW 的状态决定.  $\mu = 0.5$  时输出为混沌吸引子,  $\mu = 1$  时输出为超混沌吸引子. 程序中的计算数值采用浮点数, 由于计算结果只需保存第  $n$  次和第  $n+1$  次相关量值, 所以微控制器 SRAM 空间不受迭代次数  $n$  的制约, 即系统硬件资源不受  $n$  影响.

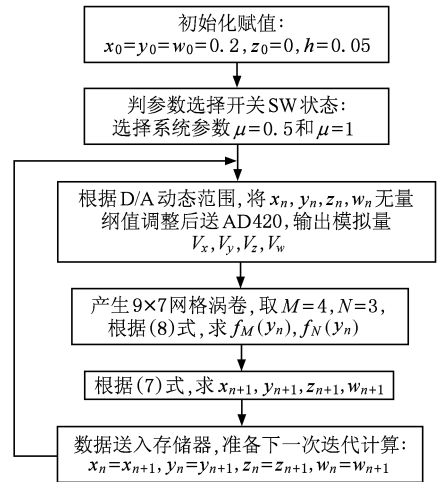


图 6 程序流程框图

采用安捷伦 DSO7032A 数字示波器可实验观察到离散化系统 (7) 在  $x-w$  平面和  $y-w$  平面的相轨图, 分别如图 7 和图 8 所示. 图 7 显示的是  $\mu = 0.5$  时的 9 × 7 网格涡卷混沌吸引子在  $x-w$  平面和  $y-w$  平面上的实验输出, 而图 8 显示的是  $\mu = 1$  时的 9 × 7 网格涡卷超混沌吸引子在  $x-w$  平面和  $y-w$  平面上的实验输出. 不难发现, 系统 (7) 的运行轨迹在  $\mu = 1$  时较在  $\mu = 0.5$  时更为复杂. 此外, 图 7、图 8 的实验输出结果与图 3、图 4 的数值仿真完全一致, 表明了本文基于 MCU 数字硬件实现的网格涡卷超混沌系统是可行的.

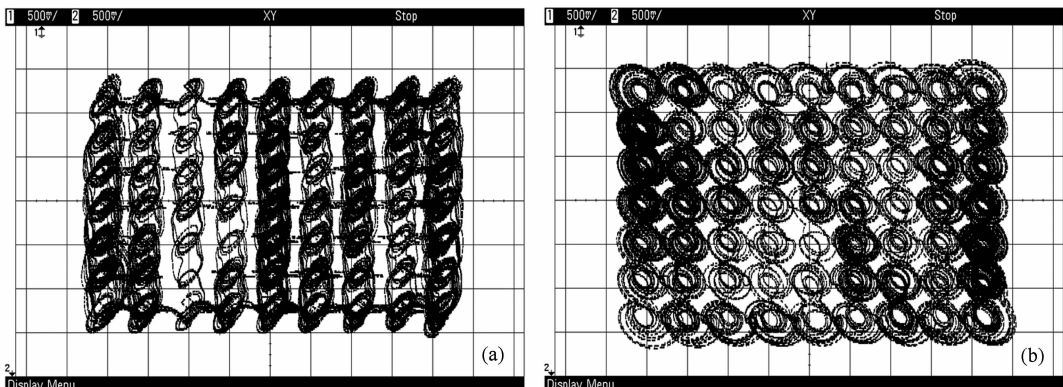


图 7 基于 MCU 实现的 9 × 7 网格涡卷混沌吸引子 (a)  $x-w$ ; (b)  $y-w$  平面

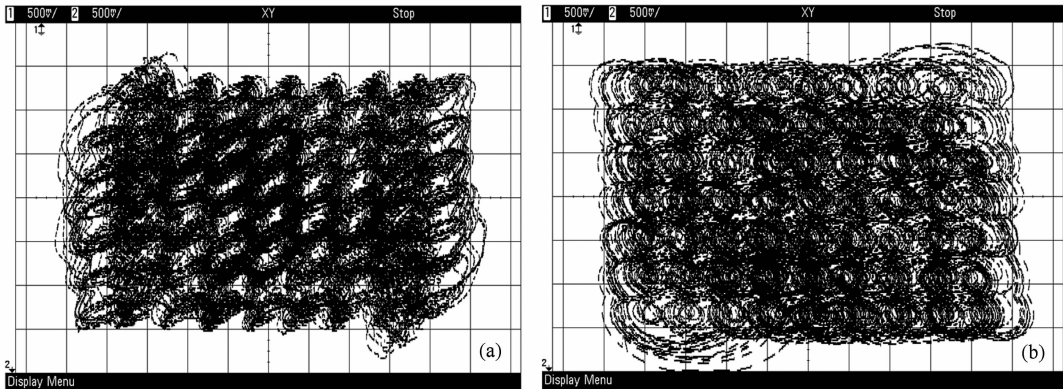


图8 基于MCU实现的 $9 \times 7$ 网格涡卷超混沌吸引子 (a) $x-w$ 平面;(b) $y-w$ 平面

## 4. 结 论

首先对文献[4]基于Colpitts振荡器模型延伸构造出的四维多涡卷超混沌系统,本文通过引入单位锯齿波函数替换该系统中的三角波函数构建了一个新的四维网格涡卷超混沌系统.新系统具有指数2的网格涡卷平衡点,在较宽的控制参数区间,可生成网格涡卷混沌或超混沌吸引子.然后基于微控制器设计了一个通用的四维混沌系统的数字硬件电路,对提出的网格涡卷超混沌系统采用Euler算法进行离散化处理,并通过编程在该电路上实现了 $9 \times 7$ 网格涡卷的混沌和超混沌吸引子.利用单位锯

齿波改造的网格涡卷超混沌系统,可以在实验电路的有效动态范围内生成比原系统更多网格涡卷数量的吸引子.

实验输出结果与数值仿真结果完全一致,该结论证实了基于MCU数字硬件实现网格涡卷超混沌电路的可行性.基于MCU数字硬件实现混沌电路的实施方法,以及对一般连续混沌系统的离散化处理思路,也可推广到一般混沌系统的数字化硬件电路设计中去.通过软件编程实现时序控制,其硬件电路不仅具有通用性,而且软件设计思路可移植,具有较强的可操作性和可实现性,为混沌信号的产生和控制提出了一种新思路,有着潜在的工程应用前景.

- [1] Yalcin M E 2007 *Int. J. Bifur. Chaos* **17** 4471
- [2] Lü J H, Chen G R 2006 *Int. J. Bifur. Chaos* **16** 775
- [3] Zhou W J, Yu S M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 113 (in Chinese) [周武杰、禹思敏 2009 物理学报 **58** 113]
- [4] Bao B C, Liu Z, Xu J P, Zhu L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1546 (in Chinese) [包伯成、刘中、许建平、朱雷 2010 物理学报 **59** 1546]
- [5] Wang F Q, Liu C X, Lu J J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3289 (in Chinese) [王发强、刘崇新、逯俊杰 2006 物理学报 **55** 3289]
- [6] Yu S M, Lin Q H, Qiu S S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2084 (in Chinese) [禹思敏、林清华、丘水生 2004 物理学报 **53** 2084]
- [7] Zhang C X, Yu S M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 120 (in Chinese) [张朝霞、禹思敏 2009 物理学报 **58** 120]
- [8] Lü J H, Murali K, Sinha S, Leung H, Aziz-Alaoui MA 2008 *Phys. Lett. A* **372** 3234
- [9] Liu M H, Yu S M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5707 (in Chinese) [刘明华、禹思敏 2006 物理学报 **55** 5707]
- [10] Yu S M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1500 (in Chinese) [禹思敏 2005 物理学报 **54** 1500]
- [11] Yu S M, Lü J H, Leung H, Chen G R 2005 *IEEE Trans. Circuits Syst. I* **52** 1459
- [12] Lü J H, Yu S M, Leung H, Chen G R 2006 *IEEE Trans. Circuits Syst. I* **53** 149
- [13] Yu S, Tang W K S, Lü J H, Chen G R 2008 *IEEE Trans. Circuits Syst. II* **55** 1168
- [14] Deng W H, Lü J H 2007 *Phys. Lett. A* **369** 438
- [15] Yalcin M, Özoguz S 2007 *Chaos* **17** 033112
- [16] Deng W H, Lü J H 2006 *Chaos* **16** 043120
- [17] Yu S M, Lin Q H, Qiu S S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 25 (in Chinese) [禹思敏、林清华、丘水生 2003 物理学报 **52** 25]
- [18] Yu S M, Lü J H, Tang W K S, Chen G R 2006 *Chaos* **16** 033126
- [19] Radwan A, Soliman A, Elwakil A 2007 *Int. J. Bifur. Chaos* **17** 227
- [20] Wang F Q, Liu C X 2007 *Chin. Phys.* **16** 942

- [21] Wang F Q, Liu C X 2006 *Chin. Phys.* **15** 2878 [周武杰、禹思敏 2008 物理学报 **57** 4738]
- [22] Wang F Q, Liu C X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1983 (in Chinese) [王发强、刘崇新 2007 物理学报 **56** 1983]
- [23] Chen L, Peng H J, Wang D S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3337 (in Chinese) [谌 龙、彭海军、王德石 2008 物理学报 **57** 3337]
- [24] Luo X H, Li H Q, Dai X G 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7511 (in Chinese) [罗小华、李华青、代祥光 2008 物理学报 **57** 7511]
- [25] Maggio G M, Feo O D, Kennedy M P 1999 *IEEE Trans. Circuits Syst. I* **46** 1118
- [26] Zhou W J, Yu S M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4738 (in Chinese)
- [27] Yu S M, Lü J H 2007 *Proc. 26th Chinese Control Conf.* (Vol. 6) (Beijing: Beijing Uni. of Aeronautics and Astronautics Press) P409 (in Chinese) [禹思敏、吕金虎 2007 第 26 届中国控制会议论文集(第六卷)(北京:北京航空航天大学出版社)第 409 页]
- [28] Zhang Z, Chen G R, Yu S M 2009 *Int. J. Circ. Theor. Appl.* **37** 31
- [29] Zhang Y, Yu S M, Liu M H 2007 *J. Circ. and Syst.* **12** 39 (in Chinese) [张 钰、禹思敏、刘明华 2007 电路与系统学报 **12** 39]

## Grid-scroll hyperchaotic system based on microcontroller digital hardware implementation \*

Xu Yu-Ming <sup>1)†</sup> Bao Bo-Cheng <sup>2)</sup> Xu Qiang <sup>1)</sup>

1) (School of Computer and Information Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China)

2) (School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213001, China)

(Received 15 December 2009; revised manuscript received 28 December 2009)

### Abstract

Based on the microcontroller (MCU), a universal digital hardware experimental circuit for four-dimensional chaotic system is designed, from which  $9 \times 7$ -grids scroll chaotic and hyperchaotic attractors are generated. Reference [1] has presented a four-dimensional multi-scroll hyperchaotic system extended from Colpitts oscillator model. In this paper, a new four-dimensional grid-scroll hyperchaotic system is constructed by introducing a unit sawtooth wave function to replace the triangular function in the original system, which is realized by utilizing MCU digital hardware implementation easily. Analysis and numerical simulations are performed for the formation mechanism of grid-scroll attractor in the new system. By using Euler algorithm to discretize the proposed grid-scroll hyperchaotic system, an attractor with more grid-scroll number than that of the original system can be generated in the effective dynamic range of the experimental circuit. Experimental results verified the feasibility of grid-scroll hyperchaotic system based on MCU implementation.

**Keywords:** grid-scroll hyperchaotic system, unit sawtooth wave function, microcontroller (MCU), digital hardware implementation

**PACC:** 0545

\* Project supported by the Natural Science Foundations of Jiangsu Province, China (Grant No. BK2009105).

† E-mail: xuyum@czu.cn