

蔡氏电路系统的非线性反馈同步电路实现

马美玲, 闵富红, 邵书义, 黄苗玉

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 针对经典三阶蔡氏电路模型,通过电路无量纲方程的变换推导,直接从电路中引出3个系统状态变量,突破原先只能分析两个状态变量的传统简单模式,并提出一种利用符号函数的非线性投影同步控制方法. 基于Multisim11电路仿真软件,设计相应电路实现初始值不同的两个混沌系统的投影同步控制. 通过电路模拟验证了设计的正确性,为今后混沌系统同步的研究提供了新的思路.

[关键词] 蔡氏电路, 符号函数, 投影同步

[中图分类号] TP391.3 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2013)03-0001-08

Circuit Implementation of Nonlinear Feedback Synchronization for Chua's System

Ma Meiling, Min Fuhong, Shao Shuyi, Huang Miaoyu

(School of Electrical and Automatic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: From Chua's non-dimension state equation, three state variables can be obtained directly. It will make a breakthrough over the simple conventional mode which can only analyze two state variables, without destroying the structure of the circuit. A new idea of control circuit about the sign function is designed to realize the nonlinear feedback synchronization for two Chua systems with different methods. Based on the software Circuit Simulation Multisim 11, the circuit experiments are performed to confirm the feasibility of our method and also provide a new idea for the further investigation of synchronization.

Key words: Chua's circuit, sign function, synchronization control

近年来,混沌在神经网络、数字水印、保密通信和流体力学等方面得到了广泛的应用.同步是非线性动力学系统的一种非常普遍的现象,许多学者对混沌系统的同步控制进行了深入地研究^[1-5],并广泛应用到了生物学、医学、化学、电子学、信息科学和保密通信等领域.蔡氏电路是能够产生丰富混沌行为的经典混沌模型之一,包含3个储能元件和1个非线性电阻.通过改变部分电路结构,可以得到许多变形混沌系统电路,运动行为极为丰富.利用数值仿真软件对其进行同步控制的设计,已经取得了众多成果.但是,蔡氏电路的非线性部分的存在,阻碍了硬件电路设计的步伐,也使得同步控制设计思想难以在硬件电路中直接应用.许多学者在这一方面做出了大量的研究工作,禹思敏^[6]给出了蔡氏电路的无量纲方程的详细推导及电路仿真分析;文献[7,8]对蔡氏电路进行了模块化电路设计,避免了硬件电路中变量引出的困难.鉴于该模块化设计方法的出现,同步控制硬件电路的设计与应用也越来越广泛.邵克勇^[9]研究了统一混沌系统与具有不确定参数混沌系统的异结构同步控制,刘扬正等^[10]利用非线性反馈原理研究了混沌系统的同步控制.

然而,目前关于蔡氏电路的同步控制设计,大多都是摒弃了原始电路,在模块化设计的电路基础上进行的,这便需重新设计电路.这一做法在一定程度上改变了蔡氏电路的本质,也增加了电路设计的复杂程度.针对该问题,本文设计出简单的附加电路,从经典电路中直接引出了系统变量,并在此基础上设计了非

收稿日期:2013-05-15.

基金项目:国家自然科学基金(51075275)、教育部留学回国人员启动基金(教外司[2012]1707)、江苏省自然科学基金、江苏省六大人才高峰资助课题、江苏省研究生创新实践项目(CXLX13_391).

通讯联系人:闵富红,博士,副教授,研究方向:混沌系统同步与控制. E-mail: minfuhong@njnu.edu.cn

线性同步控制器,利用符号函数进行反馈控制,实现了蔡氏电路的投影同步控制,该同步方法适用于多种非线性电路控制,为今后混沌同步的研究提供了新的思路.

1 蔡氏电路模型描述

1.1 无量纲方程推导

蔡氏电路模型^[11]如图 1 所示,包含线性和非线性两个部分.线性部分由储能元器件电容 C_1 、 C_2 ,电阻 R 及电感元件 L 组成;非线性部分由两个运算放大器 U1A、U2A 以及 6 个电阻组成,即蔡氏二极管,是系统产生两个不稳定的平衡点的重要组成部分,其伏安特性关系表达式为:

$$I_N = G_1 U_{C_1} + 0.5 (G_0 - G_1) [|U_{C_1} + E| - |U_{C_1} - E|], \tag{1}$$

伏安特性曲线如图 2 所示,它是一个 3 分段线性函数,其中 G_0 、 G_1 分别表示伏安特性关系曲线的斜率; E 为转折点电压,取决于非线性部分阻值以及运算放大器工作电压 V_{CC} 的大小,

$$E = \frac{R_3}{R_3 + R_2} V_{CC}. \tag{2}$$

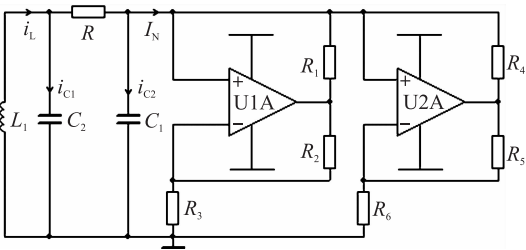


图 1 蔡氏电路模型
Fig. 1 The Chua's circuit

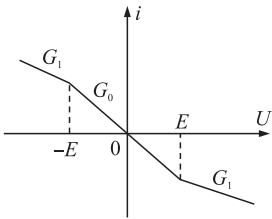


图 2 蔡氏二极管伏安特性曲线
Fig.2 The volt-ampere characteristics of Chua's diode

根据基尔霍夫定律 KCL 及 KVL,可以得到蔡氏电路的状态方程为:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dU_{C_1}}{dt} = \frac{U_{C_2} - U_{C_1}}{R} - I_N, \\ C_2 \frac{dU_{C_2}}{dt} = \frac{U_{C_1} - U_{C_2}}{R} + i_{L1}, \\ L_1 \frac{di_L}{dt} = -U_{C_2}. \end{cases} \tag{3}$$

令 $\tau = t/\tau_0$, $\tau_0 = RC_2$, τ 、 τ_0 为时间常数,具有时间量纲;令 $x_1 = U_{C_1}/E$, $y_1 = U_{C_2}/E$, $z_1 = Ri_{L1}/E$, 因此 x_1 、 y_1 、 z_1 具有电压量纲;令 $\alpha_1 = C_2/C_1$, $\beta_1 = R^2 C_2/L_1$, α_1 、 β_1 均为无量纲形式. 替换各变量后方方程(3)简化为无量纲形式:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{d\tau} = \alpha_1 \left[y_1 - x_1 - \frac{R}{E} I_N \right], \\ \frac{dy_1}{d\tau} = x_1 - y_1 + z_1, \\ \frac{dz_1}{d\tau} = -\beta_1 y_1. \end{cases} \tag{4}$$

其中,非线性函数 I_N 可以转换成无量纲的形式:

$$f(x_1) \equiv x_1 + \frac{R}{E} I_N = m_1 x_1 + 0.5 (m_0 - m_1) [|x_1 + 1| - |x_1 - 1|], \tag{5}$$

式中, $m_0 = RG_0 + 1$, $m_1 = RG_1 + 1$. 由此,得到蔡氏电路无量纲状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \alpha_1 [y_1 - f(x_1)], \\ \dot{y}_1 = x_1 - y_1 + z_1, \\ \dot{z}_1 = -\beta_1 y_1. \end{cases} \tag{6}$$

1.2 电路设计

下面利用 Multisim11 电路仿真软件进行电路设计与模拟. 为了方便电路仿真数据的取值,将系统的 3 个状态变量同时扩大 E 倍,得到变量 X_1 、 Y_1 、 Z_1 . 扩大后改变了变量时域波形的幅值,并不影响系统的状态及性能,但这样就可以使用电路中的直接测量值 U_{C_1} 、 U_{C_2} 来作为状态变量的值 X_1 、 Y_1 ,省去了换算的麻烦.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \alpha_1 [y_1 - f(x_1)], \\ \dot{y}_1 = x_1 - y_1 + z_1, \\ \dot{z}_1 = -\beta_1 y_1, \\ x_1 = \frac{UC_1}{E}, y_1 = \frac{UC_2}{E}. \end{cases} \xrightarrow{\text{扩大 } E \text{ 倍}} \begin{cases} \dot{X}_1 = \alpha_1 [Y_1 - f(X_1)], \\ \dot{Y}_1 = X_1 - Y_1 + Z_1, \\ \dot{Z}_1 = -\beta_1 Y_1, \\ X_1 = UC_1, Y_1 = UC_2. \end{cases} \quad (7)$$

依据式(7),从电路中不难看出从电容 C_1 、 C_2 两端引出测量电压 U_{C_1} 、 U_{C_2} ,即为状态变量 X_1 、 Y_1 . 而变量 Z_1 的变化取决于元件 R 和 L_1 ,难以从电路中直接测量. 针对该问题,大多数学者都是放弃原电路,从无量纲方程出发,设计模块化后的电路^[1,3]来研究 3 个状态变量的变化. 在此,本文给出一种方法,能够在不改变电路模型结构的基础上,直接引出 3 个变量进行非线性反馈同步控制. 虽然直接从电路中测量变量 Z_1 很麻烦,但是无量纲方程(7)给出了 Z_1 的微分量与变量 Y_1 的关系,在此可以利用两者所呈现的负线性关系来引出第 3 个变量. 如图 3 所示,由 Y_1 端经过电压跟随器 U3A,再经过积分电路 U4A 后便可以得到变量 Z_1 ,故有:

$$Z_1 = -\frac{1}{R_7 C_3} \int Y_1 d\tau. \quad (8)$$

比较(7)与(8)可得:

$$R_7 = \frac{1}{\beta_1 C_3}, \quad (9)$$

显然,每改变一次运动状态, R_7 的阻值应随参数 β_1 的变化而变化.

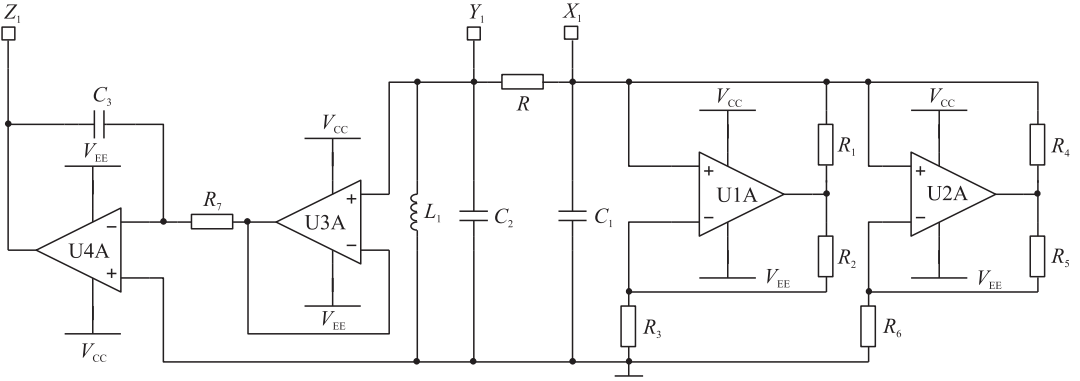


图 3 引出变量 Z_1 的蔡氏电路图

Fig. 3 The extraction of variable Z_1 of Chua's circuit

下面进行电路仿真,对上述理论分析进行验证. 电路中所有运算放大器均选用 TL082CD,工作电压 $V_{CC} = +15 \text{ V}$, $V_{EE} = -15 \text{ V}$. 线性部分电子元件 $C_1 = 10 \text{ nF}$, $L_1 = 15 \text{ mH}$, $C_2 = 100 \text{ nF}$, $C_3 = 100 \text{ }\mu\text{F}$;非线性部分电阻 $R_1 = R_2 = 22 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 3.3 \text{ k}\Omega$, $R_4 = R_5 = 220 \text{ }\Omega$, $R_6 = 2.2 \text{ k}\Omega$. 仿真时通过调节电阻 R 、 R_7 来确定系统处于何种运动状态.

选定系统参数 $\alpha_1 = 10$, $\beta_1 = 15$,依据上 $\beta_1 = R^2 C_2 / L_1$ 以及式(9),可知 $R = 1.5 \text{ k}\Omega$, $R_7 = 667 \text{ }\Omega$. 分别将 3 个电容 C_1 、 C_2 、 C_3 的初始值设为 0.01 V 、 0.02 V 、 0.03 V ,此时系统表现为双涡卷运动状态. 如图 4 给出了变量 X_1 – Z_1 以及 Y_1 – Z_1 的相平面图,很好地实现了变量 Z_1 的引出,与理论结果完全符合.

2 非线性反馈投影同步控制

通过前面的分析推导,我们已经引出了系统的 3 个状态变量,本节将在此基础上提出一种利用符号函数的反馈投影同步控制思想. 为了观察两个混沌系统的同步行为,以初始值不同的两个蔡氏系统分别为驱

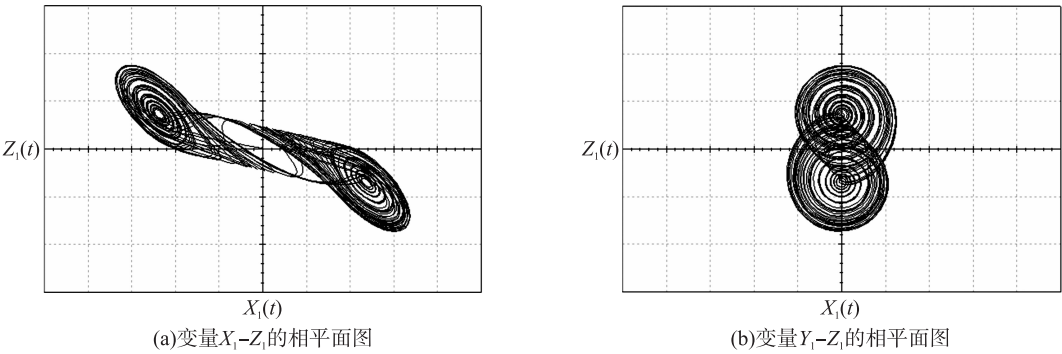


图 4 蔡氏电路系统的相平面图

Fig. 4 The phase plane for Chua's circuit

动系统和响应系统.
设驱动系统为:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = \alpha [Y_1 - f(X_1)], \\ \dot{Y}_1 = X_1 - Y_1 + Z_1, \\ \dot{Z}_1 = -\beta Y_1. \end{cases} \tag{10}$$

响应系统表示为:

$$\begin{cases} \dot{X}_2 = \alpha [Y_2 - f(X_2)] + u_1, \\ \dot{Y}_2 = X_2 - Y_2 + Z_2 + u_2, \\ \dot{Z}_2 = -\beta Y_2 + u_3. \end{cases} \tag{11}$$

其中, $U=(u_1,u_2,u_3)^T$ 是非线性控制向量. 这里提出一种新型同步控制器如下:

$$\begin{cases} u_1 = k_1 \cdot \text{sgn}(X_1 - P_1 X_2), \\ u_2 = k_2 \cdot \text{sgn}(Y_1 - P_2 Y_2), \\ u_3 = k_3 \cdot \text{sgn}(Z_1 - P_3 Z_2). \end{cases} \tag{12}$$

其中,比例函数矩阵为 $P=[P_1,P_2,P_3]^T$, $K=[k_1,k_2,k_3]^T$ 为控制增益.

同样,结合蔡氏电路无量纲方程推导的过程,从电路的角度分析响应系统(11)中控制器 U 的添加作用. 等式左边 X_2 、 Y_2 为电容电压值,其微分量可以近似理解为电流值,添加了控制器 U 实际上就是改变了电路中电流的大小. 因此,我们把控制器作用的实质近似理解为:在 3 个变量 X_2 、 Y_2 、 Z_2 的相应节点处添加控制电压 V_1 、 V_2 、 V_3 ,通过改变电路中反馈电流 i_1 、 i_2 、 i_3 的大小,从而达到控制电路的效果,响应电路的基本控制思想如图 5 所示.

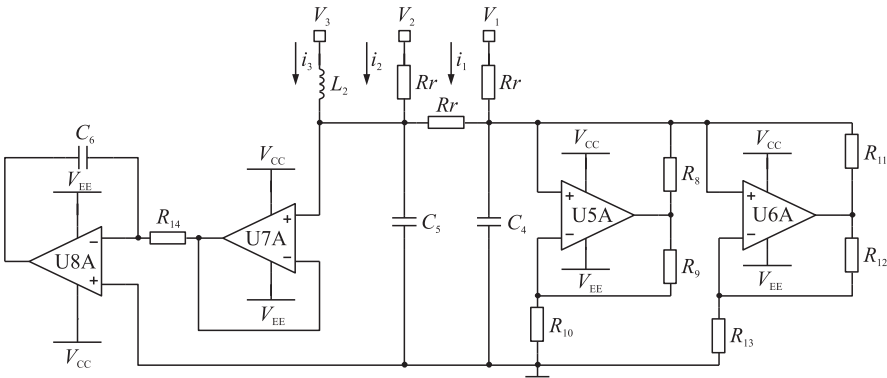


图 5 蔡氏电路同步控制设计

Fig. 5 The design of synchronization control for Chua's circuit

如何控制反馈电流的大小是本文控制器设置的关键. 在此有必要对响应系统进行无量纲方程推导,获得控制电压 V_1 、 V_2 、 V_3 的表达式.

$$\begin{cases} C_4 \frac{dU_{C_4}}{dt} = \frac{U_{C_5} - U_{C_4}}{Rr} + \frac{V_1 - U_{C_4}}{Rr} - I_N, \\ C_5 \frac{dU_{C_5}}{dt} = \frac{U_{C_4} - U_{C_5}}{Rr} + \frac{V_2 - U_{C_5}}{Rr} + i_{L_2}, \\ L_2 \frac{di_{L_2}}{dt} = -U_{C_5} + V_3. \end{cases} \quad (13)$$

令 $\tau = t/\tau_0$, $\tau_0 = RrC_5$, $x_2 = U_{C_4}/E_1$, $y_2 = U_{C_5}/E_1$, $z_2 = Rri_{L_2}/E_1$, $\alpha_2 = C_5/C_4$, $\beta_2 = Rr^2C_5/L_2$, 它们均为无量纲形式. 其中, E_1 为非线性电路中的转折点电压:

$$E_1 = \frac{R_{10}}{R_{10} + R_9} V_{CC}. \quad (14)$$

替换各变量后方程变为:

$$\begin{cases} \frac{dx_2}{d\tau} = \alpha_2(y_2 - x_2 - \frac{Rr}{E_1}I_N) + \alpha_2\left(\frac{V_1}{E_1} - x_2\right), \\ \frac{dy_2}{d\tau} = x_2 - y_2 + z_2 + \left(\frac{V_2}{E_1} - y_2\right), \\ \frac{dz_2}{d\tau} = -\beta_2 y_2 + \beta_2 \frac{V_3}{E_1}. \end{cases} \quad (15)$$

同理, 式中的非线性函数 I_N 可以转换成无量纲的形式:

$$f(x_2) \equiv x_2 + \frac{Rr}{E_1}I_N = m_1 x_2 + 0.5(m_0 - m_1)[|x_2 + 1| - |x_2 - 1|]. \quad (16)$$

为了与驱动系统保持一致, 扩大系统变量, 因此添加线性反馈控制器之后的响应系统表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = \alpha_2[y_2 - f(x_2)] + \alpha_2\left(\frac{V_1}{E_1} - x_2\right), \\ \dot{y}_2 = x_2 - y_2 + z_2 + \left(\frac{V_2}{E_1} - y_2\right), \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 y_2 + \beta_2 \frac{V_3}{E_1}, \\ x_2 = \frac{UC_4}{E_1}, y_2 = \frac{UC_5}{E_1}. \end{cases} \xrightarrow{\text{扩大 } E_1 \text{ 倍}} \begin{cases} \dot{X}_2 = \alpha_2[Y_2 - f(X_2)] + \alpha_2(V_1 - X_2), \\ \dot{Y}_2 = X_2 - Y_2 + Z_2 + (V_2 - Y_2), \\ \dot{Z}_2 = -\beta_2 Y_2 + \beta_2 V_3, \\ X_2 = UC_4, Y_2 = UC_5. \end{cases} \quad (17)$$

比较式(11)、式(12)、式(17)可得控制电压 V_1 、 V_2 、 V_3 的表达式如下:

$$\begin{cases} V_1 = \frac{k_1}{\alpha_2} \cdot \text{sgn}(X_1 - P_1 X_2) + X_2, \\ V_2 = k_2 \cdot \text{sgn}(Y_1 - P_2 Y_2) + Y_2, \\ V_3 = \frac{k_3}{\beta_2} \cdot \text{sgn}(Z_1 - P_3 Z_2). \end{cases} \quad (18)$$

符号函数的特点是无论输入为多少, 输出永远只有 0、1 或 -1 3 个值, 可以采用过零比较器来实现该功能. 如图 6 所示, 已知运放的饱和电压约为 13.5 V, 在用作过零比较器时, 当输入电压大于零, 输出 +13.5 V; 当输入电压小于零, 输出 -13.5 V; 当输入电压等于零, 输出 0 V.

为了达到符号函数电路的效果, 在其输出端采用两个电阻串联来进行分压, 使得输出值缩小 13.5 倍, 其中各个电阻的数值关系为

$\frac{r_1 + r_2}{r_2} = 13.5$, 这样当输入电压大于零, 输出 +1 V; 当运放输入小于零, 输出 -1 V; 当运放输入等于零, 输出 0 V.

设计含有符号函数的非线性反馈控制器如图 7 所示. 运算放大器 U9A、U13A、U17A 用作电压跟随器, 分别保证了驱动系

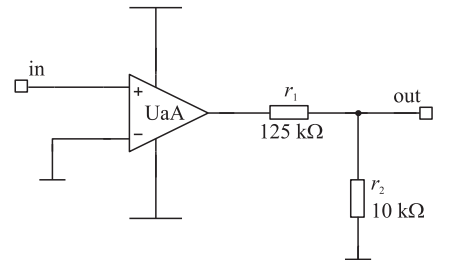


图 6 符号函数电路

Fig. 6 The sign function circuit

统变量 X_1 、 Y_1 、 Z_1 不受其他电路影响. 在设计控制电压 V_1 部分的电路时, 采用运算放大器 U10A、Us1A、U11A 和 U12A 依次构成减法电路、符号函数电路、求和电路和反相电路. 变量 X_1 、 X_2 经减法电路 U10A 输出 $(X_1 - P_1 X_2)$, 再通过 Us1A 变为 $\text{sgn}(X_1 - P_1 X_2)$, 最后经过 U11A 与 X_2 呈不同比例相加之后输出 $-[k_1/\alpha_2 (\text{sgn}(X_1 - P_1 X_2) + X_2)]$, 反相后输出值即为控制电压 V_1 .

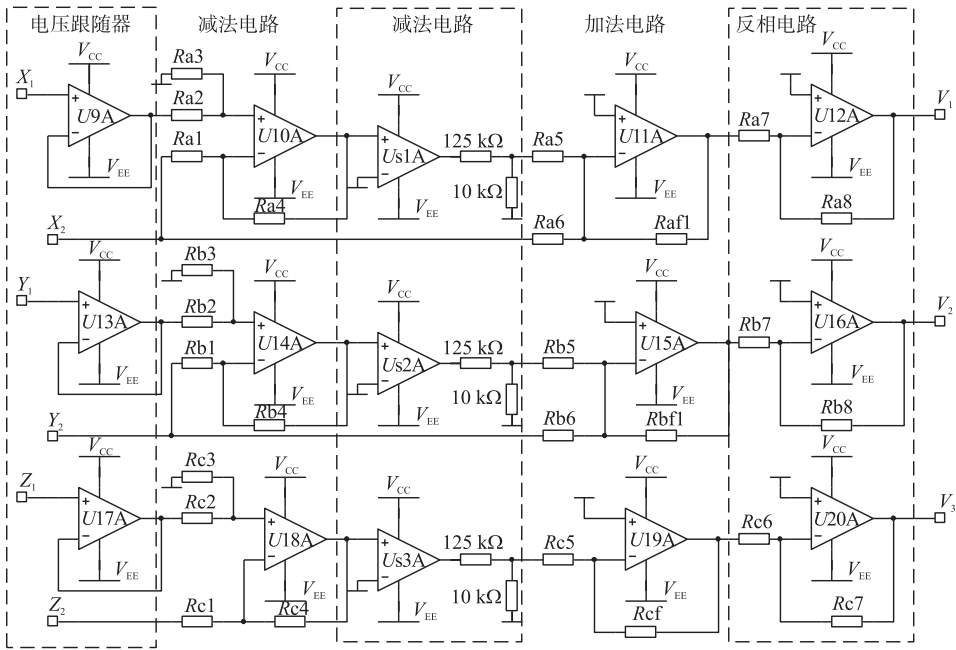


图 7 含有符号函数的非线性反馈同步控制器

Fig. 7 The nonlinear feedback synchronization controller including the sign function circuit

同理, 可以得到控制电压 V_2 、 V_3 的电路设计. 控制电路中的电阻关系如下:

$$\begin{cases} V_1 = \frac{R_{a8}}{R_{a7}} \left\{ \frac{R_{af}}{R_{a5}} \text{sgn} \left[\left(\frac{(R_{a1} + R_{a4}) R_{a3}}{R_{a2} + R_{a3}} \right) X_1 - \frac{R_{a4}}{R_{a1}} X_2 \right] + \frac{R_{af}}{R_{a6}} X_2 \right\}, \\ V_2 = \frac{R_{b8}}{R_{b7}} \left\{ \frac{R_{bf}}{R_{b5}} \text{sgn} \left[\left(\frac{(R_{b1} + R_{b4}) R_{b3}}{R_{b2} + R_{b3}} \right) Y_1 - \frac{R_{b4}}{R_{b1}} Y_2 \right] + \frac{R_{bf}}{R_{b6}} Y_2 \right\}, \\ V_3 = \frac{R_{c7}}{R_{c6}} \left\{ \frac{R_{cf}}{R_{c5}} \text{sgn} \left[\left(\frac{(R_{c1} + R_{c4}) R_{c3}}{R_{c2} + R_{c3}} \right) Z_1 - \frac{R_{c4}}{R_{c1}} Z_2 \right] \right\}. \end{cases} \quad (19)$$

图 8 为含有符号函数的非线性反馈控制驱动——响应系统整体电路连接图.

下面进行含有符号函数的非线性反馈同步控制的电路仿真实验. 调节电阻 $R = 1.5 \text{ k}\Omega$, $R_7 = 667 \text{ }\Omega$, $C_1 = 10 \text{ nF}$, $C_2 = 100 \text{ nF}$, $C_3 = 100 \text{ }\mu\text{F}$, $L_1 = 15 \text{ mH}$, $R_1 = R_2 = 22 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 3.3 \text{ k}\Omega$, $R_4 = R_5 = 220 \text{ }\Omega$, $R_6 = 2.2 \text{ k}\Omega$, 此时驱动系统参数 $\alpha_1 = 10$, $\beta_1 = 15$, 在同步控制器作用之前处于双涡卷运动状态; 调节电阻 $R_r = 1.8 \text{ k}\Omega$, $R_{14} = 463 \text{ }\Omega$, $C_4 = 10 \text{ nF}$, $C_5 = 100 \text{ nF}$, $C_6 = 100 \text{ }\mu\text{F}$, $L_2 = 15 \text{ mH}$, $R_8 = R_9 = 22 \text{ k}\Omega$, $R_{10} = 3.3 \text{ k}\Omega$, $R_{11} = R_{12} = 220 \text{ }\Omega$, $R_{13} = 2.2 \text{ k}\Omega$, 此时响应系统参数 $\alpha_2 = 10$, $\beta_2 = 22$, 在同步控制器作用之前表现为单倍周期运动状态.

由于所有运算放大器工作电压 $V_{cc} = 15 \text{ V}$, 根据(14)可知非线性电路中的转折点电压 E_1 约为 2 V . 以投影系数 $P_1 = P_2 = P_3 = 2$ 为例, 比较(18)和(19)可得同步控制电路中固定电阻值: $R_{a1} = R_{a3} = R_{b1} = R_{b3} = R_{c1} = R_{c3} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_{a2} = R_{a4} = R_{b2} = R_{b4} = R_{c2} = R_{c4} = 20 \text{ k}\Omega$, $R_{a6} = R_{b6} = R_{af} = R_{bf} = R_{cf} = 1 \text{ k}\Omega$, $R_{a7} = R_{b7} = R_{c6} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_{a8} = R_{b8} = R_{c7} = 10 \text{ k}\Omega$, 其他可调电阻如下:

$$R_{a5} = \frac{\alpha_2}{k_1} \text{ k}\Omega, \quad R_{b5} = \frac{1}{k_1} \text{ k}\Omega, \quad R_{c5} = \frac{\beta_2}{k_3} \text{ k}\Omega. \quad (20)$$

当控制器反馈系数设定为 $k_1 = 0.1$, $k_2 = 0.1$, $k_3 = 0.01$ 时, 可调电阻 $R_{a5} = 100 \text{ k}\Omega$, $R_{b5} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_{c5} = 2 \text{ 200 k}\Omega$. 图 9 为驱动系统与响应系统的时序比较图. 由仿真结果可以看出, 响应系统在驱动系统的控制下, 由周期运动迅速转变为双涡卷混沌运动, 两个系统表现为比例投影同步, 验证了该控制器的可行性.

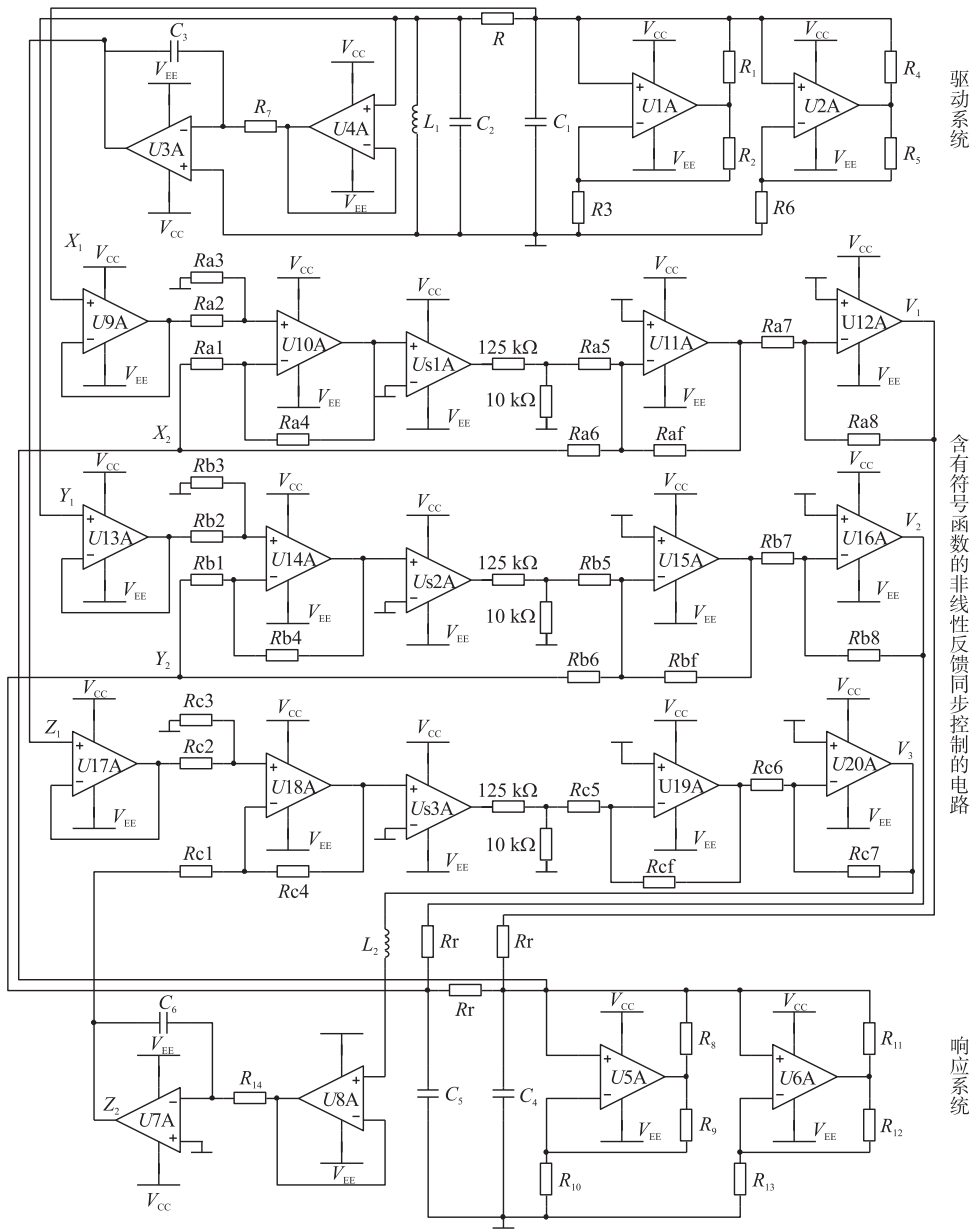
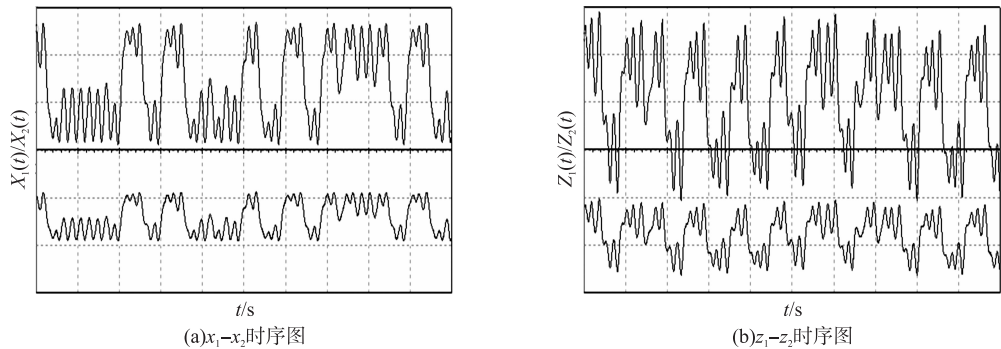


图 8 含有符号函数的同步控制驱动——响应电路

Fig. 8 The drive-response synchronization circuits including the sign function circuit



(a) $x_1, -x_2$ 时序图
示波器时间刻度: 2 ms/Div; A 通道刻度: 2 V/Div;
B 通道刻度: 2 V/Div

(b) $z_1, -z_2$ 时序图
示波器时间刻度: 2 ms/Div; A 通道刻度: 500 mV/Div;
B 通道刻度: 500 mV/Div

图 9 驱动电路与响应电路同步时序图(驱动电路为双涡卷运动状态,响应电路为周期运动状态,投影比例为 0.5 的投影同步)
Fig. 9 The time-histories of synchronization for drive system and response system
(The drive system appears double scroll attractors, and the response system appears periodic motions, and the scaling factor is 0.5)

3 结论

本文基于蔡氏电路模型,设计了一个简单附加电路,引出系统的第3个状态变量 z ,便于以后的电路设计.利用反馈控制原理,构造了基于符号函数的投影同步控制器电路,实现两个运动行为不同的蔡氏电路投影同步,通过示波器结果显示,证实了控制器的可行性.本文的研究方案为混沌系统电路特性的分析,以及保密通信应用提供了坚实的基础.

[参考文献](References)

- [1] 邵书义,闵富红,王恩荣.四阶蔡氏电路的数值仿真分析与电路实现[J].南京师范大学学报:工程技术版,2012,12(3):6-9.
Shao Shuyi, Min Fuhong, Wang Enrong. Numerical simulation analysis and circuit implementation of four-order Chua's system[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2012, 12(3): 6-9. (in Chinese)
- [2] Hu M F, Xu Z Y. Adaptive feedback controller for projective synchronization[J]. Nonlinear Analysis RWA, 2008, 9(3): 1 253-1 260.
- [3] 闵富红,王执铨.两个四维混沌系统广义投影同步[J].物理学报,2007,56(11):6 238-6 244.
Min Fuhong, Wang Zhiqian. Generalized projective synchronization of two four-dimensional chaotic systems[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(11): 6 238-6 244. (in Chinese)
- [4] Li C P, Deng W H, Xu D. Chaos synchronization of the Chua system with a fractional order[J]. Physics A, 2006, 360(2): 171-185.
- [5] 李农,李建芬,刘宇平,等.基于线性反馈控制的不确定混沌系统的参数辨识[J].物理学报,2008,57(3):1 404-1 407.
Li Nong, Li Jianfen, Liu Yuping, et al. Parameter identification based on linear feedback control for uncertain chaotic system[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(3): 1 404-1 407. (in Chinese)
- [6] 禹思敏.混沌系统与混沌电路—原理、设计及其在通信中的应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2011.
Yu Simin. Chaotic Systems and Chaotic Circuits-Principle, Design and Its Application in Communications[M]. Xi'an: Xidian University Publishing House, 2011. (in Chinese)
- [7] 冯朝文,蔡理,康强,等.一种新的三维自治混沌系统[J].物理学报,2011,60(3):1-7.
Feng Caowen, Cai Li, Kang Qiang, et al. A novel three-dimensional autonomous chaotic system[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(3): 1-7. (in Chinese)
- [8] 李亚,张正明,陶志杰.一个超混沌六阶蔡氏电路及其硬件实现[J].物理学报,2009,58(10):6 818-6 821.
Li Ya, Zhang Zhengming, Tao Zhijie. A hyperchaotic sixth-order Chua's circuit and its hardware implementation[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(10): 6 818-6 821. (in Chinese)
- [9] 邵克勇,马永晶,王婷婷,等.不确定混沌系统的异结构同步[J].物理学报,2013,62(2):020511:1-7.
Shao Keyong, Ma Yongjing, Wang Tingting, et al. Synchronization with different structures of uncertain chaotic system. [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 020511: 1-7. (in Chinese)
- [10] 刘扬正,费树岷,李平.变形蔡氏电路混沌同步的非线性反馈控制[J].系统工程与电子技术,2005,27(8):1 448-1 451.
Liu Yangzheng, Fei Shumin, Li Ping. Chaos synchronization in the modified Chua's circuits with a single variable of nonlinear feedback control[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(8): 1 448-1 451. (in Chinese)
- [11] 李雷,李文石.基于功耗特征的蔡氏电路混沌复杂性研究[J].电路与系统学报,2012,17(2):72-75.
Li Lei, Li Wenshi. The investigation of chaos complexity based on Chua's circuit power consumption. [J]. Journal of Circuits and Systems, 2012, 17(2): 72-75. (in Chinese)

[责任编辑:刘 健]