

蔡氏电路的功能全同电路与拓扑等效 电路及其设计方法*

张新国¹⁾²⁾ 孙洪涛^{1)†} 赵金兰¹⁾ 刘冀钊²⁾ 马义德²⁾ 韩廷武¹⁾³⁾

1)(山东外国语职业学院信息工程学院, 日照 276826)

2)(兰州大学信息科学与工程学院, 兰州 730000)

3)(山东科技大学理学院, 青岛 266590)

(2014年4月23日收到; 2014年6月9日收到修改稿)

基于经典蔡氏电路方程的电容电压与电感电流变量及其状态方程归一化特点, 提出了三种标度化、优化的电路设计方法: 一种是方程变量都为电压的5运放电源限幅蔡氏电路, 便于大规模集成; 两种二极管非线性构成的功能全同蔡氏电路, 与限幅非线性电路优势互补, 可供大规模集成的细胞神经网络系统设计; 同时, 给出了与蔡氏电路为微分同胚电路的优化三次方蔡氏电路. 各电路设计方法适用于以三折线为主的三次型混沌电路. 最后, 将本文提出的电路设计方法应用于混沌保密通信, 实验表明该方法具有实用性和一定的应用价值.

关键词: 混沌, 蔡氏电路, 全同电路, 电路设计

PACS: 05.45.Ac, 05.45.Pq, 05.45.Xt

DOI: 10.7498/aps.63.200503

1 引言

1982年, 美国伯克利大学蔡少棠教授提出蔡氏电路^[1,2]是一个里程碑, 它开创了实际混沌电路的新纪元. 为便于叙述, 本文称这个电路为经典蔡氏电路. 经典蔡氏电路比较奇特, 带有明显的历史痕迹. 它的主要特点有: 1) 线性电感元件, 电阻、电容、电感元件是线性的; 2) 非线性部分由运算放大器实现, 是三段线性关系, 二端器件, 且利用了二极管嵌位或电源电压限幅; 3) 三个变量由2个电容电压与1个电感电流组成. 蔡氏电路所有参数的所有取值范围的集合构成蔡氏电路族, 电路变量输出数值相差很大, 其相图包括平衡点、各种周期、单涡流、双涡流、单叶周期等典型非线性的类型. 这些输出形态与变量数值范围是进行各种改进与替代蔡氏电路的考虑因素.

经典蔡氏电路的状态物理量是电压 V_{C1} , V_{C2} 与电流 I_L , 电压物理量可由示波器显示并观测, 而电流物理量却不能, 因此示波器只能显示波形 V_{C1} 与 V_{C2} 及相图 $V_{C1}-V_{C2}$ ^[3]. 针对这一问题, 在电感器的上端连接一级积分器, 其输出是与电感器电流成正比的电压信号^[4]. 但是电路仍然不够完善, 许多研究者提出多种蔡氏电路的等效电路与改进电路^[5-14], 丰富了蔡氏电路的类型.

然而, 蔡氏电路及其变形电路^[15,16]的精度比较差, 不易使用普通的电路元件实现, 不利于电路的大规模集成, 因此在某种程度上限制了其在混沌通信等对电路精度要求较高的领域中的应用. 因此, 有必要对现有的蔡氏电路进行改进. 具体的改进方向有两个: 一是保持经典蔡氏电路状态方程严格不变; 二是电路状态方程部分改变而电路物理形态拓扑结构不变. 前者的改进电路是功能全同蔡氏

* 山东省高等学校科研计划(批准号: J12LN95)和甘肃省自然科学基金(批准号: 3ZS041-A25-017)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: sht371322@163.com

电路, 后者是拓扑等效蔡氏电路. 此两个改进方向实质上均是对蔡氏电路的非线性部分的改进. 同时, 实现非线性部分的单元电路有很多, 如限幅非线性单元电路、二极管非线性单元电路、三次方非线性单元电路、sigmoid非线性单元电路等. 为了提高电路精度, 有必要研究不同非线性单元电路下蔡氏电路的改进电路设计方法.

基于上述蔡氏电路的改进方向、实现方法及减小电路误差有效方法的不足, 本文提出了普遍而实用的解决方案. 将本文的电路设计方法应用于混沌同步与保密通信, 实验数据表明其精度提高了2—3个数量级, 信噪比达到工程设计的要求, 为大规模集成神经网络电路实现提供了一定的理论及技术基础.

2 基本电路特性描述

2.1 三折线非线性特性在混沌电路中的运用

上述两种改进蔡氏电路的关键部分是蔡氏电路的非线性曲线. 蔡氏电路的非线性表达式中的核心因子

$$f_0(x) = 0.5(|x + 1| - |x - 1|) \quad (1)$$

为归一化限幅三折线非线性曲线, 曲线如图1(a)所示. 核心因子还有一种表达式是

$$g_0(x) = x - 0.5(|x + 1| - |x - 1|), \quad (2)$$

曲线如图1(b)所示.

为叙述方便, 将图1(a)形状称为中斜外平三次型曲线, 将图1(b)形状称为中平外斜三次型曲线.

与图1三折线曲线逼近的三次型曲线有三次方曲线、sigmoid曲线等, 与图1(a)对应的两种三次型曲线如图2所示.

图2(a)的表达式为

$$h_A(x) = 1.13x - 0.2x^3, \quad (3)$$

图2(b)的表达式为

$$\text{sgm}_A(x) = 1 - \frac{2}{1 + e^{2.3x}}, \quad (4)$$

是神经网络模型 sigmoid(x)

$$\text{sgm}(x) = \frac{1}{1 + e^x} \quad (5)$$

的变形.

与图1(b)对应的三次型曲线如图3所示.

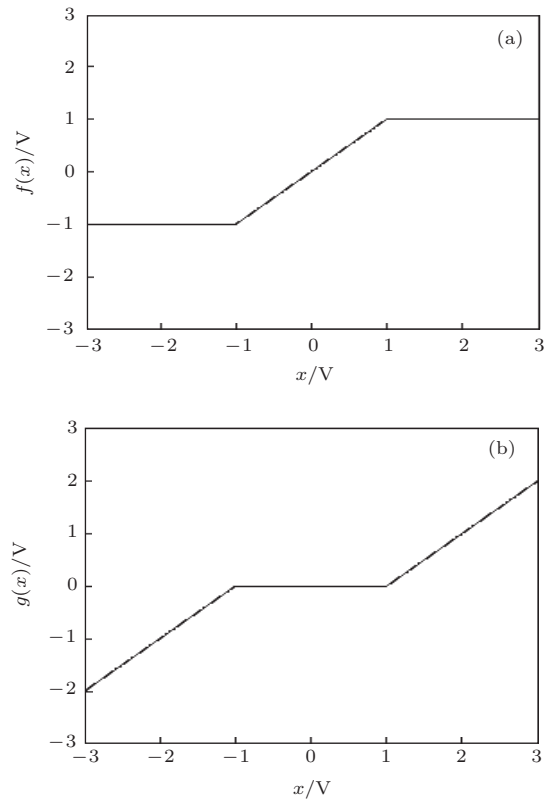


图1 蔡氏电路中的三折线非线性曲线 (a) 归一化限幅三折线非线性曲线; (b) 另一种三折线非线性曲线

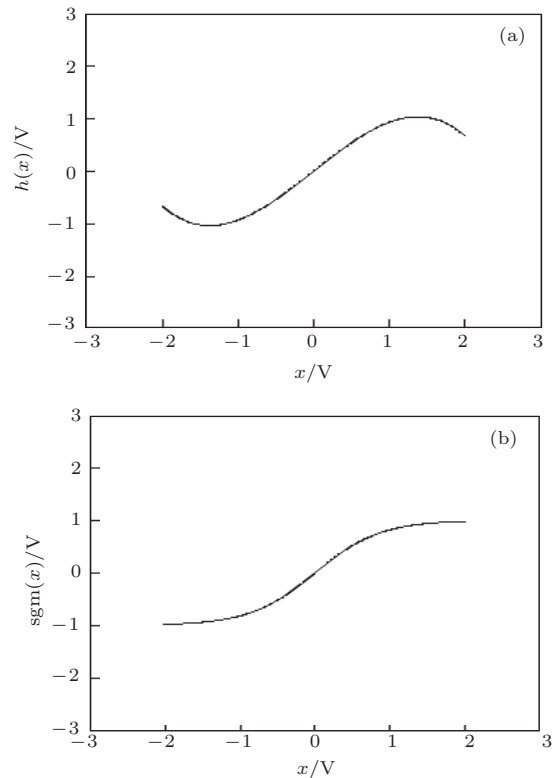


图2 中斜外平三次型曲线的逼近曲线 (a) 三次方型; (b) sigmoid型

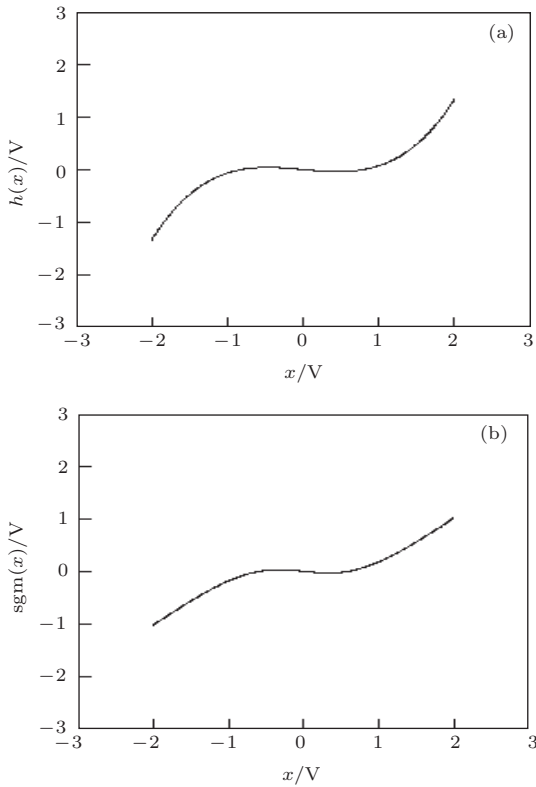


图3 中平外斜三次型曲线的逼近曲线 (a) 三次方型; (b) sigmoid 型

图3(a)的表达式为

$$h_B(x) = -0.13x + 0.2x^3 = x - h_A(x), \quad (6)$$

图3(b)的表达式为

$$\begin{aligned} \text{sgm}_B(x) &= x - \left(1 - \frac{2}{1 + e^{2.3x}}\right) \\ &= x - \text{sgm}_A(x). \end{aligned} \quad (7)$$

由于实际二极管的开关特性不是理想的, (10) 与 (8) 式及 (11) 与 (9) 式严格说来不全等, 仍然是拓扑等价的, 但是误差可以忽略, 本文第4节与第5节的蔡氏等同电路利用了这一原理.

3 完全由运算放大器构成的蔡氏电路

基于以上针对混沌电路中非线性单元电路的分析, 可以设计出不同的蔡氏电路. 理论和实验证

有了以上分析即可以设计蔡氏电路的功能全同电路与拓扑等效电路. 拓扑等效电路也称为微分同胚电路.

2.2 二极管非线性特性在混沌电路中的应用

图1曲线最早是由限幅运算放大器产生的, 也可以由开关二极管实现, 二极管表达式为

$$i_D(u) = i_{D0} \left(e^{\frac{qu}{kT}} - 1 \right), \quad (8)$$

其中, q 是电子电荷量, T 是绝对温度, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 为玻尔兹曼常数, 在常温例如 $T = 300 \text{ K}$, $kT/q = 26 \text{ mV}$. 双二极管反向并联非线性公式则为

$$i_{2D}(u) = i_{2D0} \left(e^{\frac{qu}{kT}} - e^{-\frac{qu}{kT}} \right). \quad (9)$$

理想硅材料二极管正向导通且电压降 0.7 V , 反向截止. 将理想二极管串联一电阻 R , 令 R 与 D 两端为输入电压 x , D 两端为输出电压 $f(x)$, 信号传递方式是电压-电压型, 且为静态函数, 如图4所示. 图4(a)是单二极管曲线, (b)是反向并联双二极管曲线.

这样, 二极管非线性函数归一化概念代之以“归0.7化”. 二极管两端电压 $f(x)$ 表达式分别为

$$f(x) = \begin{cases} 0.7 & (x > 0.7 \text{ V}) \\ x & (x \leq 0.7 \text{ V}) \end{cases} \quad (10)$$

与

$$f(x) = \begin{cases} -0.7 & (x < -0.7 \text{ V}) \\ x & (-0.7 \text{ V} \leq x \leq 0.7 \text{ V}) \\ 0.7 & (x > 0.7 \text{ V}) \end{cases} = 0.5(|x + 0.7| - |x - 0.7|). \quad (11)$$

明, 这些电路的状态方程都非常接近, 其动力学特性也极为相似, 并且可以有效减小电路误差.

3.1 全运放蔡氏电路原理

文献 [13, 14] 给出一种完全由运算放大器构成的蔡氏电路, 由6个运算放大器实现. 此电路无电感, 3个物理变量由运算放大器输出, 并且, 这是一个经过优化和归一化的蔡氏电路. 非线性部分利用运算放大器的电源限幅特性. 本文使用同样方法设

计出5个运算放大器实现的蔡氏电路(简称为5运放蔡氏电路),是后面电路的参考电路或对照电路,电路原理图与输出相图如图5所示.

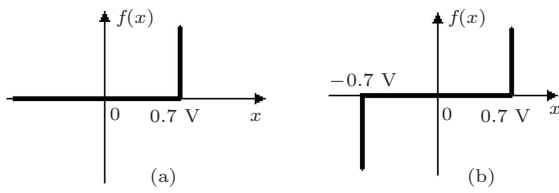


图4 二极管串接电阻后的电压传输特性曲线 (a) 单二极管; (b) 双二极管

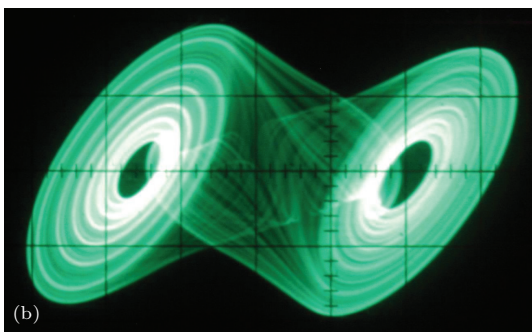
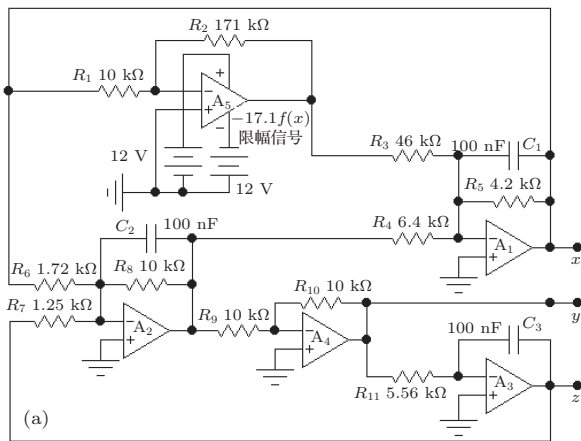


图5 5运放蔡氏电路原理图与输出相图 (a) 电路原理图; (b) $x-y$ 相图

电路中的非线性部分由 A_5 实现. 电路方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = 1.57y - 2.37x + 3.7f(x), \\ \dot{y} = 5.8x - y + 8z, \\ \dot{z} = -1.8y, \end{cases} \quad (12)$$

其中, $f(x)$ 如(11)式所示, (12)式电路元件数值设计考虑到电路元件的实用化,使用了市场采购到的元件. 电路原理图中的元件参数允许范围很大,这对于电路实现很有利. 例如, $R_6 = 1.72 \text{ k}\Omega$, 用1.7或1.8 $\text{k}\Omega$ 代替都可以.

3.2 归一化蔡氏电路与标度化蔡氏电路

(12)式与经典蔡氏电路公式^[1,2]相比,如果忽略了误差,二者是完全等同的;不同之处是,经典蔡氏电路方程是归一化方程, (12)式是标度化方程. 归一化方程的变量系数是1,但变量变化范围一般不是1;标度化方程的变量系数不是1,但变量变化范围可以接近于1. 电路方程的归一化是数学要求,标度化是物理要求. 混沌电路标度化的本质是扩大电路输出的可控电压动态变化范围从而成为某一设计值. 标度化设计破坏了归一化但是拓扑等价. 图5(a)是其中一个标度化设计,电路3个输出电压动态变化范围都是 $\pm 1.7 \text{ V}$,与经典蔡氏电路对比情况如表1所示. 由表1可知,标度化设计实现了3个电压变量变化范围的任意设计目标.

表1 经典蔡氏电路与全运放电路特性对比

原理	参数范围			精度/%
	x	y	z	
经典	$\pm 2.2 \text{ V}$	$\pm 0.4 \text{ V}$ (归一化)	$\pm 3 \text{ mA}$	10
全运放	$\pm 1.7 \text{ V}$	$\pm 1.7 \text{ V}$ (标度化)	$\pm 1.7 \text{ V}$	0.01

3.3 全运放蔡氏电路的特点

图5(a)所示的全运放蔡氏电路性能稳定可靠,电路设计中精度比经典蔡氏电路高出约3个数量级(见表1“精度”行),是目前各种蔡氏电路中性能最好的电路,它减少了混沌电路元件参数误差,包括温度环境误差、元件噪声误差等. 全运放蔡氏电路的这一设计方法可以应用于1988年蔡少棠提出细胞神经网络CNN (cellular neural network) 模型^[17,18].

4 全同蔡氏电路设计方法

下面提出两种全运放蔡氏电路,是二极管非线性蔡氏电路.

4.1 全同蔡氏电路之一: 反向并联二极管减法器非线性5运放蔡氏电路

反向并联二极管串接于减法器非线性子电路构成的全同蔡氏电路原理图如图6所示.

图6中,运算放大器 A_5 是线性减法器. 根据(11)式与图6电路, A_5 输出电压为

$$V_{5out} = \begin{cases} 0.7 \text{ V} & (x < -0.7 \text{ V}) \\ -x & (-0.7 \text{ V} \leq x \leq 0.7 \text{ V}) = -f(x). \\ -0.7 \text{ V} & (x > 0.7 \text{ V}) \end{cases} \quad (13)$$

图6 电路输出与图5(a)完全相同的波形图与相图.

4.2 全同蔡氏电路之二：反向并联二极管嵌位非线性5运放蔡氏电路

反向并联二极管嵌位后并接于A₅电路构成的全同蔡氏电路原理图如图7所示. 电阻R₁₂与二极管构成分压关系, 由(11)式确定. A₅输出电压与图6电路相同.

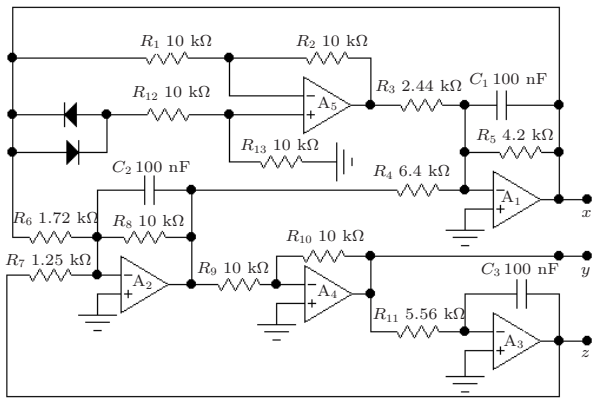


图6 双二极管减法器非线性5运放蔡氏电路原理图

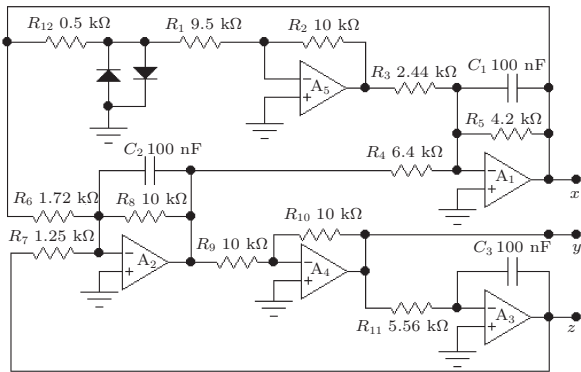


图7 双二极管嵌位非线性5运放蔡氏电路原理图

图7电路与(12)式是略有误差的, 并且电路功耗较大, 在设计中减少误差与减少功耗相矛盾. 但从工程方面来看实际影响很小, 在此不赘述.

5 蔡氏电路的微分同胚电路设计方法

蔡氏电路中的静态非线性部分(13)式是三次型曲线, 可以由三次方电路代替, (12)和(11)式合

起来逼近的方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = 2y + 1.37x - 0.5x^3, \\ \dot{y} = 5x - y + 6.67z, \\ \dot{z} = -2.33y, \end{cases} \quad (14)$$

称为三次方非线性蔡氏电路, 是一种微分同胚蔡氏电路, 电路原理图与输出相图如图8所示.

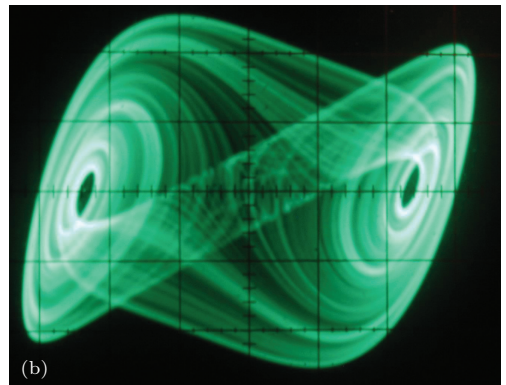
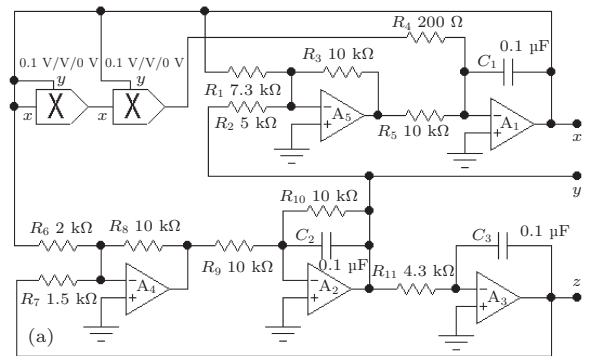


图8 三次方非线性蔡氏电路原理图与相图 (a) 电路原理图; (b) x-y相图

(14)式与图8电路是标度化电路, x, y, z变化范围都在±2 V左右. 文献[3]给出一个归一化结构相同的电路, x, y, z变化范围与经典蔡氏电路相同, 图8电路与文献[3]形成鲜明对照.

6 应用实例：蔡氏电路混沌调制保密通信

本文提出的功能全同蔡氏电路与拓扑等效蔡氏电路, 其特点是电路精度高, 为了验证这一结论,

将其组成主从式混沌调制保密通信电路进行试验。电路原理图如图9所示,由发送部分与接收部分组成,信道中传送的信号是混沌信号。

搭建电路实验成败的关键与输出指标的高低是收、发电路对应元件的参数一致性,标准误差为

$$R_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_{si} - e_{ri})^2}{n}}, \quad (15)$$

其中 e 为电路元件电阻与电容的测量参数值,下标 s 与 r 表示发送端与接收端, i 是标号,则 R_e 表示电路参数总误差,运算放大器 AD084 看作理想元件。

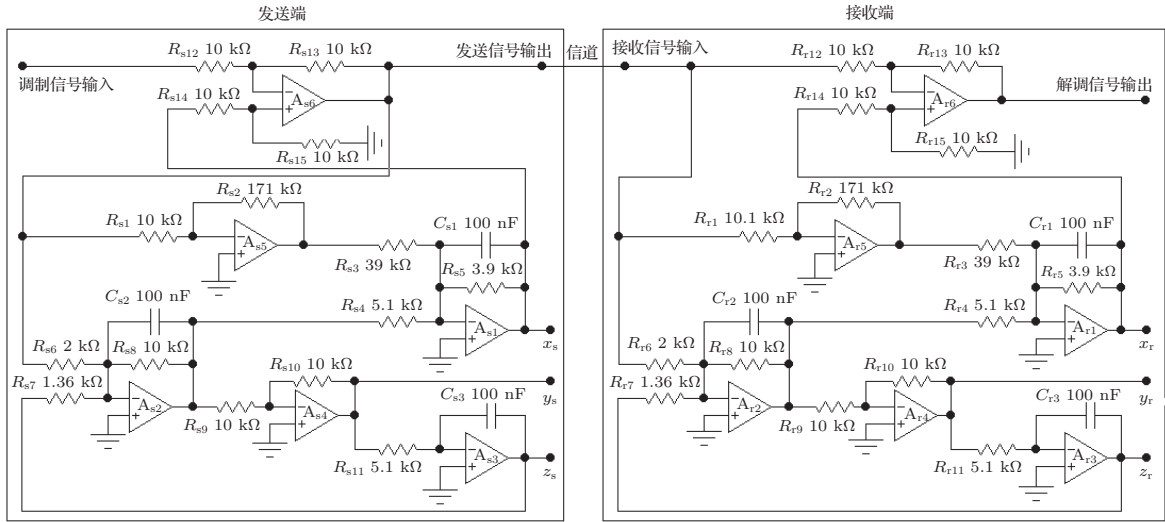


图9 5运放蔡氏电路混沌调制保密通信

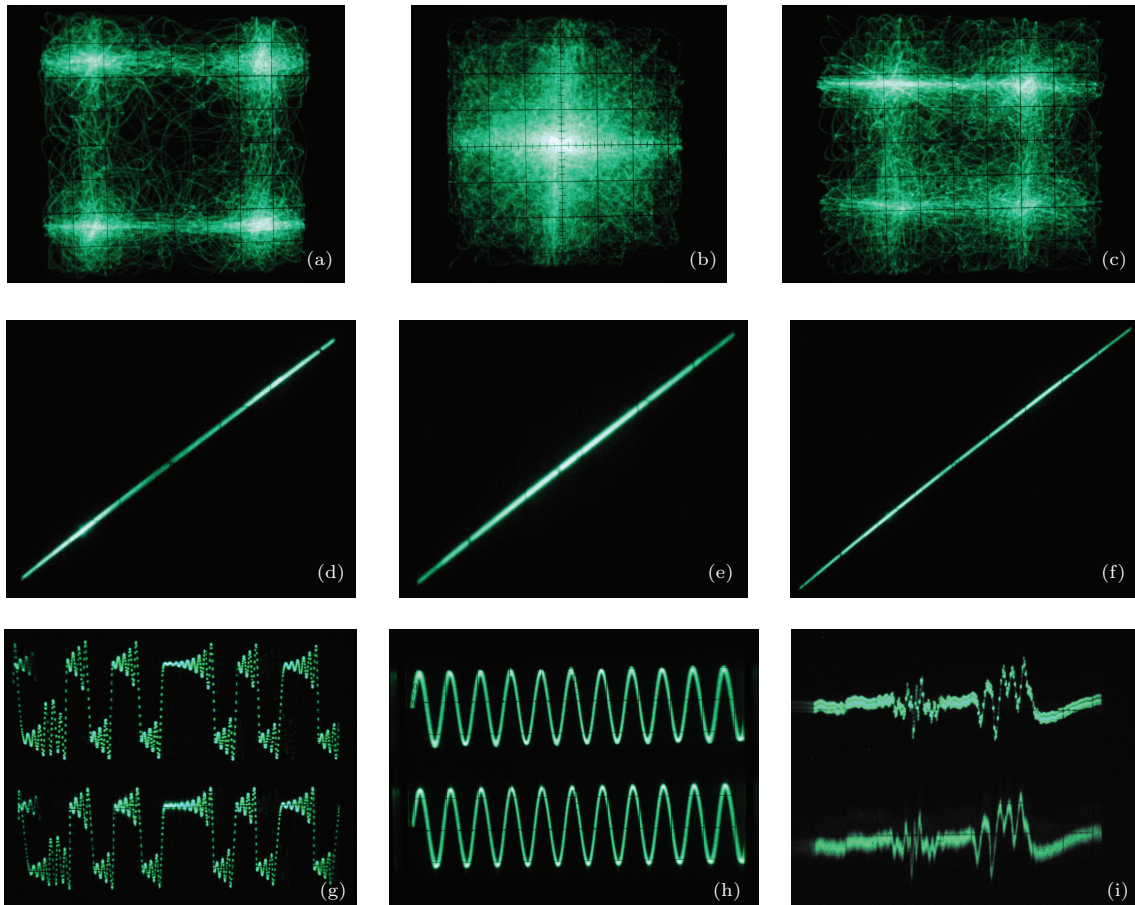


图10 5运放蔡氏电路混沌调制保密通信电路信号照片 (a)收发端不同步 X_s-X_r 相图; (b)收发端不同步 Y_s-Y_r 相图; (c)收发端不同步 Z_s-Z_r 相图; (d)收发端同步 X_s-X_r 相图; (e)收发端同步 Y_s-Y_r 相图; (f)收发端同步 Z_s-Z_r 相图; (g)收发状态信道波形与响应波形; (h)收发状态调制波形与解调波形; (i)收发状态调制波形与解调波形

只要仔细选择元件, 本电路能够达到理想化的实验效果. 物理实验电路输出的示波器显示照片如图 10 所示. 其中图 10(a), (b), (c) 是收、发端不同步时 X_s-X_r , Y_s-Y_r , Z_s-Z_r 相图, (d), (e), (f) 是收、发端同步时 X_s-X_r , Y_s-Y_r , Z_s-Z_r 相图; (g) 是收、发状态时 X_s 与 X_r 波形图, 且前者是信道波形; (h), (i) 是收、发状态时发送端输入调制信号波形与接收端输出解调信号波形.

由图 10(d), (e), (f) 可见, X_s-X_r , Y_s-Y_r , Z_s-Z_r 同步得很好, 当示波器置于 10 mV 档时仍然看不到噪声, 考虑到混沌信号幅度是伏特数量级, 因此该电路噪声系数 $\delta_N < 10^{-5}$. 由图 10(h), (i) 可见, 调制信号幅度是 10 mV, 示波器使用相同方法测量的失真度 $\delta_N < 10^{-2}$. 我们焊接了多块电路板, 所有实验结果与指标都是重复的, 并且使用其他电路, 例如洛伦兹电路也是重复的^[19], 这样的测量方法与测量结果尚未见到报道, 具有实际意义.

7 结 论

1982 年蔡少棠发明的经典蔡氏电路带有明显的时代特征, 电路方程变量是电容电压与电感电流, 电路状态方程被归一化. 蔡氏电路的非线性特性是三折线, 属于三次型函数, 这为其他类型的功能全同电路设计与微分同胚电路设计铺平了道路.

1) 经典蔡氏电路是 1988 年蔡少棠提出的 CNN 模型的一个特例. 但是经典蔡氏电路设计方法不便于实现 CNN. 本文提出的几种 5 运放蔡氏电路是优化、标度化设计, 可供大规模集成的 CNN 系统设计.

2) 本文提出的三次方蔡氏电路, 是蔡氏电路的微分同胚电路, 经过优化设计, 方程简练, 分析方便.

3) 本文提出的电路设计方法, 适用范围是三次型, 核心是非线性的三折线, 在这个范围内, 本电路设计方法具有普遍性.

在本文提出的电路中, 用阶跃电路、对称性原理与标度化方法, 可以得到所有电路相应的阶跃电路、对称性电路与标度化电路, 这种方法设计出来的电路很多, 不再赘述. 上述电路以及涉及的电路, 都适合于设计成混沌保密通信电路, 尤以混沌调制保密通信^[19-23] 为优.

参考文献

- [1] Chua L O, Komuro M, Takashi M 1986 *IEEE CAS* **33** 1073
- [2] Chua L O, Lin G N 1990 *IEEE CAS* **37** 885
- [3] Zhang X G, Ma Y D, Li S L 2011 *Nonlinear Circuit—Based Analysis and Design* (Vol.1) (Beijing: Higher Education Press) pp124—142 (in Chinese) [张新国, 马义德, 李守亮 2011 非线性电路——基础分析与设计 (北京: 高等教育出版社) 第 124—142 页]
- [4] Xu C F, Yan J C, Wang J S, Han T W, Zhang X G 2010 *Public Commun. Sci. Technol.* **29** 86 (in Chinese) [许崇芳, 严纪丛, 王金双, 韩廷武, 张新国 2010 科技传播 **29** 86]
- [5] Liu C X, Liu T, Liu L, Liu K 2004 *Soliton. Fract.* **22** 1031
- [6] Zhang X G, Cui H X, Yu R P, Li Y, Zhang X Q, Wei M S 2010 *J. Qufu Normal Univ.* **36** 91 (in Chinese) [张新国, 崔红霞, 于瑞萍, 李娅, 张兴芹, 魏曼莎 2010 曲阜师范大学学报 (自然科学版) **36** 91]
- [7] Zhang X G, Yan J C, Xu C F, Cui H X, Yu R P 2011 *J. Qufu Normal Univ.* **37** 50 (in Chinese) [张新国, 严纪丛, 许崇芳, 崔红霞, 于瑞萍 2011 曲阜师范大学学报 (自然科学版) **37** 50]
- [8] Lu Y Y, Xue L P 2003 *J. Electr. Electron. Education* **25** 67 (in Chinese) [卢元元, 薛丽萍 2003 电气电子教学学报 **25** 67]
- [9] Shao S Y, Min F H, Wu X H, Zhang X G 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 060501 (in Chinese) [邵书义, 闵富红, 吴薛红, 张新国 2014 物理学报 **63** 060501]
- [10] Wang G H, Li Yan 2004 *J. Air Force Engineer. Univ. (Natural Science Edition)* **5** 56 (in Chinese) [王国红, 李彦 2004 空军工程大学学报 **5** 56]
- [11] Li Z B, Huang J, Huang L, Wang M Z, Yao Y F 2014 *J. Xuzhou Instit. Technol. (Natural Sciences Edition)* **29** 36 (in Chinese) [李泽彬, 黄济, 黄雷, 汪明珠, 姚有峰 2014 徐州工程学院学报 (自然科学版) **29** 36]
- [12] Shao S Y, Min F H, Wang E R 2012 *J. Nanjing Normal Univ. (Engineering and Technology)* **12** 6 (in Chinese) [邵书义, 闵富红, 王恩荣 2012 南京师范大学学报 (工程技术版) **12** 6]
- [13] Zhang X G, Xu C F, Wang J S, Yan J C, Han T W 2010 *J. Shandong Univ. (Engineering Science)* **40** 134 (in Chinese) [张新国, 许崇芳, 王金双, 严纪丛, 韩廷武 2010 山东大学学报 (工学版) **40** 134]
- [14] Zhang X G, Zhang J F, Shi S J 2008 *Chinese Patent ZL200810129216.2* [张新国, 张剑锋, 史书军 2008 中国专利 ZL200810129216.2]
- [15] Chua L O 1992 *Archiv Elektronik Übertra-Gungstechnik* **46** 250
- [16] Fortuna L, Frasca M, Xibilia M G 2009 *Chua's Circuit Implementations: Yesterday, Today and Tomorrow* (Singapore: World Scientific)
- [17] Chua L O, Yang L 1988 *IEEE Trans. Circ. Syst.* **35** 1257
- [18] He Z Y, Zhang Y F, Lu H T 1999 *J. Commun.* **20** 59 (in Chinese) [何振亚, 张毅峰, 卢洪涛 1999 通信学报 **20** 59]

- [19] Yang Z M, Xiong L, Zhang X G, Zhang J, Ren W J 2010 *J. Northwest Normal Univ. (Natural Science)* **46** 40 (in Chinese) [杨志民, 熊丽, 张新国, 张洁, 任文娟 2010 西北师范大学学报 (自然科学版) **46** 40]
- [20] Yin Y Z 1998 *J. Electron.* **20** 93 (in Chinese) [尹元昭 1998 电子科学学刊 **20** 93]
- [21] Yin Y Z 1997 *Chinese Patent* 97112067.6 (in Chinese) [尹元昭 1997 中国专利 97112067.6]
- [22] Zhang X G, Shi S J, Zhang J F 2008 *Chinese Patent* ZL200810129217.7 (in Chinese) [张新国, 史书军, 张剑锋 2008 中国专利 ZL200810129217.7]
- [23] Guan X P, Fan Z P, Chen C L, Hua C C 2002 *Chaos Control and Its Application in Secret Communication* (Beijing: National Defence Industry Press) p341 (in Chinese) [关新平, 范正平, 陈彩莲, 华长春 2002 混沌控制及其在保密通信中的应用 (北京: 国防工业出版社) 第 341 页]

Equivalent circuit in function and topology to Chua's circuit and the design methods of these circuits*

Zhang Xin-Guo¹⁾²⁾ Sun Hong-Tao^{1)†} Zhao Jin-Lan¹⁾ Liu Ji-Zhao²⁾
Ma Yi-De²⁾ Han Ting-Wu¹⁾³⁾

1) (Department of Information Engineering, Shandong Foreign Language Vocational College, Rizhao 276826, China)

2) (School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

3) (College of Science, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

(Received 23 April 2014; revised manuscript received 9 June 2014)

Abstract

The characteristics of classical Chua's circuit variables proposed by Leon O. Chua are the voltage on capacitor, the current in inductor and its normalized equation of state. Based on these characteristics, in this paper, three optimized and scaled circuit design methods are proposed. One is the Chua's circuit with five operational amplifiers used for limiting power amplitude for integration. The other two are Chua's function equivalent circuits with nonlinear diode for cellular neural network system integration. At the same time, an optimized cubic form of Chua's diffeomorphism circuit is given. The methods of designing these circuits are applicable to the cubic random circuits dominated by three broken lines. The universality and practical application of design method are demonstrated in the experiment on chaos secure communication.

Keywords: chaos, Chua's circuit, circuit of congruent effect, circuit design

PACS: 05.45.Ac, 05.45.Pq, 05.45.Xt

DOI: 10.7498/aps.63.200503

* Project supported by the Higher Educational Science and Technology Program of Shandong Province, China (Grant No. J12LN95) and the Natural Science Foundation of Gansu Province, China (Grant No. 3ZS041-A25-017).

† Corresponding author. E-mail: sht371322@163.com