

# 微笑、平静、说谎和诚实的人脑蔡氏电路模型

李 雷, 李文石

(苏州大学电子信息学院, 江苏苏州 215006)

**摘 要:** 基于人脑和蔡氏电路都能表现复杂的混沌特征, 本文利用蔡氏电路为人脑建立电路模型. 文中利用 Multisim10<sup>®</sup> 仿真蔡氏电路, 提取纯阻  $R_1$  两端电压, 作为原始待分析数据. 类积分法、李亚普若夫指数、微窗口法和  $P$  分数等四种方法依次应用于选取数据分析窗口. 基于数据窗口, 分别调整电感  $L$  和非线性电阻参数  $R_5$ , 得到纯阻  $R_1$  的平均功率及其最小值  $P_{R1min}$  ( $1.56 \times 10^{-4} \text{W}$ ). 同时以  $P_{R1min}$  为底数, 利用 Log 函数计算  $R_1$  的平均功率对应的指数值. 对比最近几年人脑近红外耳穴信号研究成果,  $R_1$  平均功率指数与以微笑时人脑额区消耗功率为底数的人脑平静、诚实和说谎的功率消耗指数分布相同. 结合人脑实际消耗功率, 我们选取纯阻  $R_1$  最小平均功率对应的蔡氏电路并联, 实现平静、微笑、诚实和说谎的人脑额区蔡氏电路模型. 此电路模型为人脑非线性模型研究提供了一个崭新的研究思路.

**关键词:** 混沌; 蔡氏电路; 人脑; 数据窗口; 功率指数

**中图分类号:** TP918.8      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2013) 10-2100-04

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.10.035

## Human Brain Model of Smile, Calmness, Honesty and Lying: Chua's Circuit

LI Lei, LI Wen-shi

(School of Electronics and Information, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

**Abstract:** Based on the similarity of chaos in human brain and Chua's circuit, we propose the methods to model human brain with Chua's circuit. With the simulation of Multisim 10<sup>®</sup>, we set voltages across resistor  $R_1$  as original signals. Also, Analogous definite integral, Lyapunov, Micro-segmented windows and P values are applied to gain data window. Then, minimum mean power of  $R_1$  ( $P_{R1min}: 1.56 \times 10^{-4} \text{W}$ ) is discovered after tuning inductance  $L$  and nonlinear-resistor parameter  $R_5$ . Furthermore, we suppose  $P_{R1min}$  as log-base, and calculate the new indexes for each power of  $R_1$  as reference values. After compared with previous indexes of brain power consumption (BPC) in frontal lobe at cognitive states of calmness, honesty, or lying (BPC at smile as base), two-set indexes equal to each other. According to actual BPC, and with Chua's circuit corresponding to minimum mean power  $P_{R1min}$ , we accomplish human brain model in frontal lobe at cognitive states of calmness, honesty, lying and smile. This work will provide novel thinking for nonlinear modeling of human brain.

**Key words:** chaos; Chua's circuit; human brain; data window; power index

## 1 引言

蔡氏电路的提出使混沌研究易于电路仿真计算<sup>[1]</sup>; 非线性电阻与 RLC 网络的能量交互将引发蔡氏电路不同混沌态的演化; 人脑的混沌则来源于神经元与突触及其组成的多维神经网络的电化学反应<sup>[2,3]</sup>. 我们想从功耗角度, 利用电路态的蔡氏电路来模拟生物态的人脑<sup>[4]</sup>.

图 1 是蔡氏电路的结构图. 其中包括非线性电阻  $g(V_{c1})$  的电路实现: 两个并联的双运算放大器. 利用 Multisim10<sup>®</sup> 选取示波器采集纯阻  $R_1$  两端的电压 ( $V_{c1}$  和

$V_{c2}$ ). 使用 XY 模式显示  $V_{c1}$  和  $V_{c2}$  构造的混沌相图. 文中第二部分, 我们应用类积分法、李亚普若夫指数、微窗口分割法及  $P$  分数选取数据窗口, 实现被分析数据的一致性. 在文中第三部分, 先后考察电感  $L$  和非线性电阻参数  $R_5$ , 获取纯阻  $R_1$  的平均功率. 同时以此功率最小值为基础, 得到纯阻  $R_1$  平均功率指数分布. 最后发现以人脑微笑时消耗功率为底数的平静、诚实和说谎等认知态的功率消耗指数和纯阻  $R_1$  的平均功率指数相同. 结合人脑实际功率消耗数据, 建立以功率最小值对应的  $L$  和  $R_5$  等电参数 ( $L = 27 \text{mH}$ ;  $R_5 = 3.0 \text{k}\Omega, 3.2 \text{k}\Omega, 3.3 \text{k}\Omega$  和  $3.39 \text{k}\Omega$ ) 组成的蔡氏电路人脑模型.

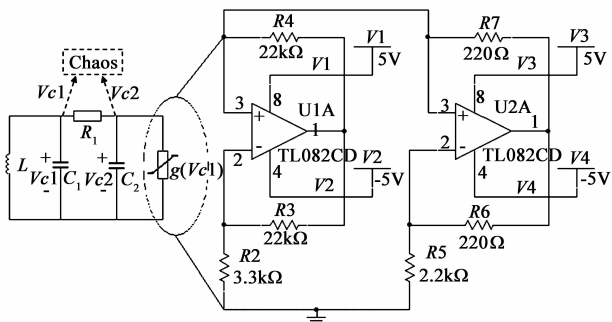


图1 蔡氏电路及非线性电阻结构<sup>[1]</sup>

## 2 数据窗口选取

### 2.1 类积分法

我们采用类积分法定义数据窗口的左边界,以降低  $R_1$  平均功率的计算误差。

蔡氏电路的参数值:

$$R_1 = 1.971\text{k}\Omega; C_1 = 100\text{nF}; C_2 = 10.25\text{nF};$$

$$L = 20\text{mH} \sim 50\text{mH}; R_5 = 2.20\text{k}\Omega \sim 3.40\text{k}\Omega.$$

首先调整电感  $L$  实现电路中电阻  $R_1$  的电压相图转变(我们称其代表蔡氏电路的工作状态):(1)  $L$  为  $20\text{mH} \sim 23.4\text{mH}$ , 相图表现为单旋吸引子;(2)  $L$  为  $23.5\text{mH} \sim 31.8\text{mH}$ , 相图表现为双旋吸引子;(3)  $L$  为  $31.9\text{mH} \sim 50\text{mH}$ , 相图表现为极限环。

所以,使用  $L$  的边界值确定数据窗口左边界,分别为  $20\text{mH}, 23.4\text{mH}, 23.5\text{mH}, 31.8\text{mH}$  和  $31.9\text{mH}$ 。

利用 Multisim10<sup>®</sup> 的双路示波器,采集每个  $L$  边界值对应的  $R_1$  两端电压  $V_{c1}$  和  $V_{c2}$  数据点为 16000 个,即数据长度  $i$  为 16000。根据功率定义,得到每个点的  $R_1$  瞬时功率,记为  $P(i)$ 。根据式(1)类积分法,得到  $R_1$  类平均功率,即平均功率的演进。参见图 2 所示。

$$\bar{P}(i) = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^{16000} P(i) \quad (1)$$

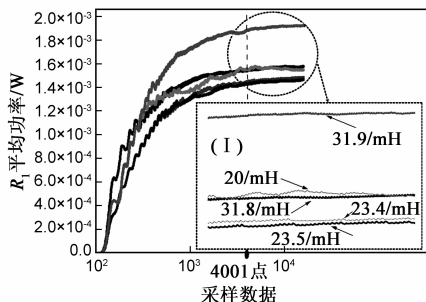


图2 不同电感 $L$ 时的电阻 $R_1$ 平均功率演进趋势

图 2 是不同  $L$  时的平均功率演进趋势图。X 轴为对数坐标形式表示的数据点;而其子图(I)为图 2 虚线框对应的放大部分(从 4001 点至 16000 点)。图中  $L = 23.4\text{mH}$  和  $23.5\text{mH}$  对应的两条平均功率演进曲线从最初的不同步增大演变为各自分离。同样的情况也显示在  $L$

$= 31.8\text{mH}$  和  $31.9\text{mH}$  两条曲线中。前者反映蔡氏电路的工作状态由单旋吸引子向双旋吸引子转变;而后者表示它由双旋吸引子向极限环转变。从 4001 点开始,平均功率演进趋于平缓,说明  $R_1$  的平均功率变化保持稳定。因此,确定第 4001 点为分析  $R_1$  平均功率的数据窗口左边界。

### 2.2 李亚普若夫指数

基于蔡氏电路归一化方程<sup>[1]</sup>的四个参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $m_0$  和  $m_1$ ,我们借助 Matlab<sup>®</sup> 利用矩阵奇值分解方法计算李亚普若夫指数,以验证 2.1 节的结论。

先固定  $m_0$  和  $m_1$ ,再先后调整  $\alpha$  和  $\beta$ ,可实现蔡氏电路不同电路状态的迁移。在非线形动力学中,李亚普若夫指数(Lyapunov)能表现非线性系统的迭代特征<sup>[5]</sup>。

根据蔡氏电路归一化方程,将  $L(20\text{mH}, 23.4\text{mH}, 23.5\text{mH}, 31.8\text{mH}$  和  $31.9\text{mH})$  等效为  $\beta(19.4, 16.6, 16.5, 12.2$  和  $12.16)$ 。 $\alpha$ ,  $m_0$  和  $m_1$  的值分别是  $10, -4.09 \times 10^{-4}, -7.58 \times 10^{-4}$ 。

图 3(I-III)分别指出李亚普若夫指数 1、2 和 3 与  $\beta$  的关系。图中: X 轴为数据采集点,从 50 点开始至 12050 点结束,以 500 点为步长;图 3(I)中 Y 轴为对数坐标下的李亚普若夫指数 1;图 3(II-III) Y 轴为线性坐标下的李亚普若夫指数 2 和 3。从图中可以发现:从 4001 点开始,李亚普若夫指数 1 趋于平缓,同时随着  $\beta$  的增大,其逐渐减小;李亚普若夫指数 2 和 3 的斜率分别趋于一致。李亚普若夫指数 1 能够表征蔡氏电路混沌程度,而其逐渐减小至 0 则说明蔡氏电路状态由混沌逐步衰减为稳定点。

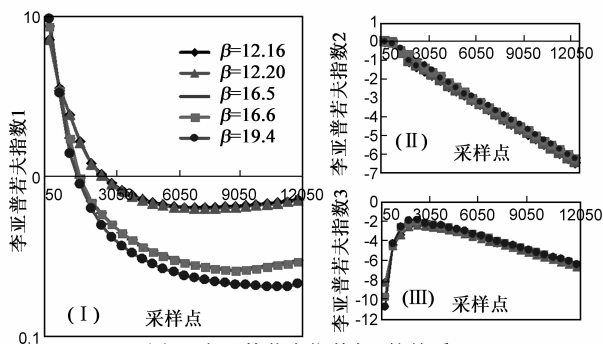


图3 李亚普若夫指数与 $\beta$ 的关系

李亚普若夫指数 1 的特征由 4001 点开始逐步一致,说明根据累积分法得出的  $R_1$  平均功率数据窗口的左边界是正确的。

### 2.3 微窗口分割法与 P 分数

计算准备:当  $L$  取值范围为  $20\text{mH} \sim 50\text{mH}$ , 电路状态由单旋吸引子、双旋吸引子和极限环等状态相互迁移。从  $20\text{mH}$  至  $50\text{mH}$  中选取具有代表混沌特征的 25 个  $L$ 。调整  $L$ , 依照 2.1 节的方法得到每个  $L$  对应的  $R_1$  两端电压  $V_{c1}$  和  $V_{c2}$ 。数据长度仍保持 16000。根据瞬时功率

定义,计算 16000 点的  $R_1$  瞬时功率  $P_{16000}$ ,进而平均便得到  $R_1$  的总平均功率  $P_{R1}$ .

微窗口分割法:假设数据窗口的准右边界为 16000.初始数据窗口是(4001 16000).按照步长 1000,将初始数据窗口分割为 12 个微窗口  $W_j(j=12)$ ,每个微窗口内数据点为 1000 点.将  $R_1$  在  $W_j$  内 1000 点的瞬时功率  $P_{1000}$  平均,得到  $R_1$  在  $W_j$  内的平均功率  $P_j$ .以上方法称为微窗口分割法.

按照此方法依次计算 25 个混沌特征  $L$  在微窗口  $W_j$  内的平均功率  $P_j$ .以  $R_1$  的总平均功率  $P_{R1}$  为参考值,计算出微窗口  $W_j$  内的平均功率  $P_j$  的 P 分数.见附录表 2 所示.因 P 分数值越大,可判别对比值与参考值的相似度越近.

表 1 中,  $W_1 - W_6$  窗口的 P 分数高于其他窗口.而在  $W_1 - W_6$  窗口,  $W_3 - W_6$  窗口的 P 分数的一致性明显高于其他窗口.最后我们选择  $W_3 - W_6$  窗口为  $R_1$  平均功率的数据微窗口.  $W_3 - W_6$  对应的数据点为 6001 - 10000.故以(6001 10000)为分析  $R_1$  平均功率的数据窗口.

表 1 各个微窗口对应的 P 分数值(参考值:  $P_{R1}$ )

窗口	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$W_6$
P 分数	0.94	0.53	0.92	0.79	0.91	0.74
窗口	$W_7$	$W_8$	$W_9$	$W_{10}$	$W_{11}$	$W_{12}$
P 分数	0.40	0.21	0.22	0.58	0.13	0.28

### 3 功率特征提取及分析

在蔡氏电路中,基于数据窗口(6001 10000),我们先调整电感  $L$  和非线性电阻研究蔡氏电路状态的演化,从而研究  $R_1$  的功率特征<sup>[6]</sup>.

#### 3.1 调整 $L$ 分析 $R_1$ 准最小功率

采用上述的 25 个特征  $L$  和  $R_1$  两端电压采集方法及功率计算方法,得到相应的  $R_1$  的总平均功率  $P_{R1}$ .见图 4 所示.

图 4 中:(1)  $L < 27\text{mH}$ :包括 A 点(23.4mH), B 点(23.5mH);由于非线性电阻模块和 RLC 模块能量的不匹配,从 22mH 开始,  $P_{R1}$  逐渐降低.(2)  $L = 27\text{mH}$  (C 点):  $P_{R1}$  降低到最小.(3)  $27\text{mH} < L < 31.8\text{mH}$  (D 点):非线性

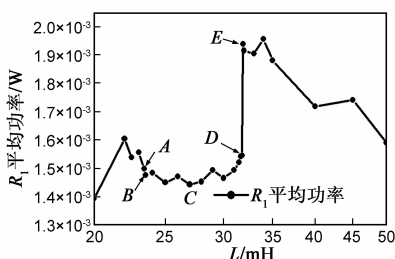


图 4  $R_1$  的平均功率与电感  $L$  的关系

电阻模块的能量匹配输入 RLC 模块,  $P_{R1}$  逐渐增大.(4)  $L > 31.8\text{mH}$ :包括 E 点(31.9mH);非线性电阻模块趋于饱和,不能继续向 RLC 输入能量,导致  $P_{R1}$  缓慢降低.

当  $L = 27\text{mH}$ ,  $R_5 = 2.2\text{k}\Omega$ ,  $R_1$  的最小平均功率位于 C 点,  $P_{R1\min} = 1.445 \times 10^{-3} \text{ W}$ .我们继续调整非线性电阻,验证 C 点处  $P_{R1}$  是否为最小功率.所以为了与后文区别,我们暂且称 C 点的  $P_{R1\min}$  为准最小功率.

#### 3.2 调整非线性电阻获取最小功率

在蔡氏电路仿真研究中,我们发现非线性电阻实现电路状态迁移的能力远远不如它对电路某一状态细节刻画的能力.因而,利用非线性电阻  $R_1$  来考察特定混沌状态的平均功率  $P_{R1}$ .

蔡氏电路数学模型中非线性电阻为线性电阻的分段形式( $x = V_{c1}$ )<sup>[1]</sup>:

$$h(x) = m_1 x + \frac{1}{2}(m_0 - m_1)(|x + 1| - |x - 1|) \quad (2)$$

$$m_1 = -\frac{1}{R_5} - \frac{1}{R_2} \quad (3)$$

$$m_0 = -\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_3} \quad (4)$$

从式(3-4)中可以看到,  $R_5$  的单独变化能够引起  $m_0$  和  $m_1$  的共同变化,即非线性电阻的全幅度变化.我们取  $L$  为 27mH,  $R_5$  为 2.2k $\Omega$  ~ 3.4k $\Omega$ ,此时被考察电路状态为双旋吸引子.

采用前述  $R_1$  两端电压采集方法及功率计算方法,得到  $R_1$  的平均功率  $P_{R1}$ .参见图 5  $R_1$  平均功率曲线所示. X 轴取值 2.2k $\Omega$  ~ 3.4k $\Omega$ ,扫描步长为 100 $\Omega$ .随着  $R_5$  的增大,  $P_{R1}$  从准最小功率  $1.445 \times 10^{-3} \text{ W}$  按指数形式减小.在 a 点处(3.39k $\Omega$ ),找到  $P_{R1}$  功率为最小,  $P_{R1\min}$  为  $1.56 \times 10^{-4} \text{ W}$ .  $R_5$  为 3.4k $\Omega$  时,  $P_{R1}$  略微增大,电路状态开始脱离双旋吸引子.因此  $P_{R1}$  的最小功率  $P_{R1\min}$  是  $1.56 \times 10^{-4} \text{ W}$ ,其中  $L = 27\text{mH}$ ,  $R_5 = 3.39\text{k}\Omega$ .

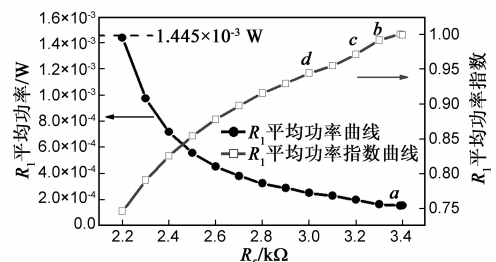


图 5 人脑蔡氏电路模型原理图

以  $P_{R1\min}$  为底数,求得  $P_{R1}$  的对数值,称为  $R_1$  功率指数.见图 5 中  $R_1$  功率指数分布曲线.其中, b 点, c 点和 d 点的指数值分别为 0.99, 0.97 和 0.94,它们对应的  $R_5$  分别是 3.3k $\Omega$ , 3.2k $\Omega$  和 3.0k $\Omega$ .

#### 3.3 人脑模型

以往的研究成果表明,人脑也表现出混沌特

征<sup>[7,8]</sup>. 当遇到外界刺激或人脑本体产生意识时,人脑激发对应的认知活动;如同蔡氏电路,当改变  $L$  或非线性电阻时,电路在不同状态间演变. 类比人脑与蔡氏电路,我们能够使用蔡氏电路尝试为复杂的人脑建立电路模型.

我们曾经报道<sup>[9]</sup>: 当人处于平静、微笑、诚实和说谎四种认知态时,人脑额区对应的耳额穴处的近红外透射光信号幅度存在一定的指数对应关系. 基于此观点,我们再提取四种认知态对应的人脑额区消耗功率: 以微笑时人脑消耗功率为底数,求得说谎、诚实和平时人脑消耗功率的对数值,称为人脑额区功率消耗指数,分别为 0.94, 0.97 和 0.99,恰好与蔡氏电路中非线性电阻  $R_5$  在  $3.0\text{k}\Omega$ 、 $3.2\text{k}\Omega$  和  $3.3\text{k}\Omega$  处功率指数相同. 于是微笑时人脑额区消耗功率可等效为纯阻最小平均功率  $P_{R1\min}$ ;并可得到说谎、诚实和平时  $P_{R1}$  为  $2.64 \times 10^{-4}\text{W}$ 、 $2.03 \times 10^{-4}\text{W}$  和  $1.70 \times 10^{-4}\text{W}$ .

与人脑实际消耗功率估计(25W)相比<sup>[10]</sup>,  $P_{R1}$  相差一个比例因子. 除了调整电源电压,可能的解决方法还如:将  $10^4$  个蔡氏电路并联,等效总  $P_{R1}$  为 2.64W、2.03W、1.70W 和 1.56W,对应人脑额区实际消耗功率.

最后我们得出人脑额区四种认知态蔡氏电路模型:  $L = 27\text{mH}$ ;  $R_5 = 3.0\text{k}\Omega$ 、 $3.2\text{k}\Omega$ 、 $3.3\text{k}\Omega$  和  $3.39\text{k}\Omega$ ;  $P_{R1} = 2.64 \times 10^{-4}\text{W}$ 、 $2.03 \times 10^{-4}\text{W}$ 、 $1.70 \times 10^{-4}\text{W}$  和  $1.56 \times 10^{-4}\text{W}$ ;  $N = 10000$ .

## 4 结论

基于由类积分法、李亚普若夫指数、微窗口分割法和 P 分数确定的数据窗口(6001 10000),我们重点分析了蔡氏电路中纯阻  $R_1$  的功率特征. 通过对比电感  $L$  和非线性电阻参数  $R_5$  的变化对蔡氏电路状态的影响,获得纯阻  $R_1$  的最小平均功率为  $1.56 \times 10^{-4}\text{W}$ (5V 供电). 类比人脑额区功率消耗指数和  $R_1$  功率指数及人脑实际消耗功率,我们建立了人脑额区在说谎、诚实、平静和微笑四种认知态的蔡氏电路模型.

我们首次从功耗角度研究人脑和蔡氏电路的相似性. 目前提出的电路模型仅囊括说谎、诚实、平静和微笑四种认知态. 立足人脑丰富的情感与意识,我们的长远目标是建立完整的人脑情感与意识的电路模型.

## 参考文献

- [1] L Chua, et al. The double scroll family[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1986, 33(11): 1072 - 1118.
- [2] C A Skarda, W J Freeman. How brains make chaos in order to make sense of the world[J]. Behavioral and Brain Sciences,

1987, 10(2): 161 - 195.

- [3] W J Freeman. Tutorial on neurobiology: from single neurons to brain chaos[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 1992, 2(3): 451 - 482.
- [4] E Chris, C S Terrence, et al. A large-scale model of the functioning brain[J]. Science, 2012, 338(6111): 1202 - 1205.
- [5] 杨爱波, 等. 基于空间栅格法的最大 Lyapunov 指数算法研究[J]. 电子学报, 2012, 40(9): 1871 - 1875.  
Yang Ai-bo, et al. An algorithm for computing the largest Lyapunov exponent based on space grid method[J]. Acta Electronica Sinica, 40(9): 1871 - 1875. (in Chinese)
- [6] 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 in China, 2012, 17(2): 72 - 75. (in Chinese)
- [7] R Pool. Is it healthy to be chaotic? [J]. Science, 1989, 4891(243): 604 - 607.
- [8] S J Schiff, K Jerger, D H Duong, et al. Controlling chaos in the brain[J]. Nature, 1994, 6491(370): 615 - 620.
- [9] Wenshi Li. Allometric power law modeling on brain chemistry complexity in self stimulus condition of calm, smile, truth and lie[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 20(1): 98 - 100.
- [10] R C Merkle. Energy limits to the computational power of the human brain [OL]. <http://www.merkle.com/brainLimits.html>, 1989 - 08.

## 作者简介



李 雷 男, 1983 年 8 月出生, 河北保定人. 2012 年 6 月获得苏州大学微电子学与固体电子学专业硕士学位. 2012 年 8 月开始攻读苏州大学电子信息学院信息与信号处理专业博士研究生. 研究方向为非线性器件、电路与系统的混沌特征研究.

E-mail: lei\_li56@163.com



李文石 男, 1963 年 8 月出生, 黑龙江哈尔滨人. 2009 年获得东南大学国家 ASIC 中心博士学位. 现为苏州大学电子信息学院教授. 研究兴趣包括模式分析与微电子系统设计.

E-mail: lwshi@suda.edu.cn