

基于二极管桥与串联 RL 滤波器的一阶广义忆阻模拟器

武花干¹, 包伯成², 徐 权²

(1. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏南京 210094; 2. 常州大学信息科学与工程学院, 江苏常州 213164)

摘 要: 针对现有忆阻模拟器过于复杂, 提出了一种简单的广义忆阻模拟器. 该模拟器是仅由二极管桥和串联 RL 滤波器构成的一阶忆阻等效电路. 对广义忆阻模拟器的输入端口伏安关系建立了数学模型并进行了相应的特征分析. 数值仿真与电路实验的结果表明: 该模拟器符合广义忆阻器的定义, 可展示出忆阻紧磁滞回线的本质特征. 新提出的广义忆阻模拟器电路结构简单, 无接地限制, 便于电路实现和应用接入.

关键词: 忆阻模拟器; 二极管桥; RL 滤波器; 紧磁滞回线

中图分类号: TN911.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)10-2129-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.10.036

First Order Generalized Memristor Emulator Based on Diode Bridge and Series RL Filter

WU Hua-gan¹, BAO Bo-cheng², XU Quan²

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China;

2. School of Information Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu 213164, China)

Abstract: As the existing memristor emulator is excessively complicated, a simple generalized memristor emulator is proposed. The emulator is a first order memristor equivalent circuit, which is merely composed of a diode bridge and a series RL filter. The mathematical model of the input port voltage-current relation of the generalized memristive emulator is established, and the corresponding characteristic analyses are performed. The results by numerical simulation and circuit experiments indicate that the emulator meets the definition of generalized memristor, and can exhibit the fingerprint of pinched hysteresis loop of a memristor. The proposed generalized memristor emulator has simple circuit structure and no grounded restriction, which is convenient for circuit implementation and application access.

Key words: memristive emulator; diode bridge; RL filter; pinched hysteresis loops

1 引言

尽管忆阻器作为第四种新的电路元件已被证实具有物理可实现性^[1], 然而因技术实现难度大、整体造价高, 忆阻器件在短时间内无法达到商用, 使得研究人员目前还不能从市场上方便地获取到该器件用于各项科学研究. 因此, 利用电阻、电容、运算放大器、模拟乘法器等分立元器件实现各种忆阻模型电路^[2~5], 或者基于特殊拓扑形式的电路构建一些广义忆阻电路^[6,7], 以及在忆阻等效电路基础上通过转换器建立多种忆感或忆容等效电路等^[8~11], 都为忆阻或忆阻系统及其拓展应用的研究作出了重要贡献. Kim 等人利用固态分立元器件实现了基于 HP TiO₂ 物理结构的忆阻模型电路, 并研究了不同极性的两个或多个忆阻模拟器在串联、并联以及

混联结构下的忆阻特性^[2]. Muthuswamy 提出了基于三次非线性函数的磁控忆阻模型电路, 并获得了忆阻混沌系统的电路实验结果^[3]. 包伯成等人提出了分段二次非线性函数的忆阻模型电路^[5], 并开展了简单忆阻电路的时域与频域特性^[12,13]以及忆阻混沌电路的动力学特性^[5]等研究. 文献^[7]则基于二极管桥电路提出了一种广义忆阻电路, 进一步拓展了忆阻模拟器的实现形式.

一个电路是否等效实现了或者具备了一个忆阻元件的特性, 在于该电路的输入端口能否呈现出忆阻的三个本质特征^[14]: (1) 当施加双极性周期信号时, 电路端口伏安关系特性展示出一条原点收缩的紧磁滞回线; (2) 从临界频率始, 磁滞旁瓣面积随激励频率增大而单调减小; (3) 当频率趋近于无限大时, 紧磁滞回线收缩为一个单值函数. 忆阻的本质特征是用来检验一个器件或

系统是否为忆阻或忆阻系统的有效判据.文献[7]提出的基于二极管桥级联 RLC 滤波器组成的广义忆阻模拟器,与已报道的忆阻等效电路相比^[2-6],在电路结构上具有较大的优势.考虑到该模拟器中的滤波器是一个二阶电路,由此建立的二阶广义忆阻模型较为复杂.为了进一步简化模拟器电路并建立起较为简单的一阶广义忆阻模型,利用一阶 RL 滤波器替换掉原有滤波器,提出了一种新的广义忆阻模拟器.利用数学模型的数值仿真和物理电路的实验测试分别检验该模拟器是否具备忆阻的三个本质特征,从而判定该模拟器是否为一种有效忆阻等效电路.

2 广义忆阻模拟器

一些含有光敏电阻^[6]、二极管桥^[7]等特殊拓扑形式的电路,其外部特性可呈现出忆阻的紧磁滞回线特性,且端口的伏安关系符合广义忆阻系统的数学定义式.一个广义忆阻系统可表示为^[15]

$$\begin{cases} y(t) = g(\mathbf{x}, u, t)u(t) \\ \frac{d\mathbf{x}}{dt} = f(\mathbf{x}, u, t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $u(t)$ 与 $y(t)$ 分别代表系统的输入与输出变量, \mathbf{x} 是系统的 n 维内部状态变量, $g(\cdot)$ 为系统转移特性函数, $f(\cdot)$ 是 n 维矢量函数. 如果一个器件或者电路的端口伏安关系满足广义忆阻系统的定义, 那么该器件或电路就可称为广义忆阻器, n 为忆阻器的阶数. 进一步地, 当 $y(t)$ 表示流入端口的电流, $u(t)$ 表示端口电压时, 该器件或电路是一个 n 阶广义压控忆阻器, $g(\cdot)$ 为系统的忆导; 反之, 则是一个 n 阶广义流控忆阻器, $g(\cdot)$ 为系统的忆阻.

文献[7]提出的模拟器是一个由二极管桥级联 RLC 滤波器构成的二阶电路, 其数学模型较为复杂, 难以定量分析. 用 RL 滤波器替换 RLC 滤波器, 可得到如图 1 所示的由二极管桥级联 RL 滤波器构成的一阶电路. 为了证实图 1 电路的端口伏安关系是否具备忆阻的本质特征, 首先需要导出该电路的端口伏安关系式, 然后利用数值仿真进行相应的特征分析.

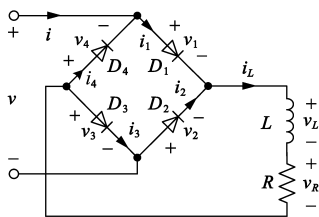


图1 广义忆阻模拟器原理图

如图 1 所示的二极管桥电路是由 4 个具有相同特征参数的二极管相互连接构成的. 根据二极管的正向

特性, 在二极管 D_k ($k=1, 2, 3, 4$) 正向导通时, 流经该二极管的电流 i_k 可以表示为

$$i_k = I_S(e^{2v_k} - 1) \quad (2)$$

式中, v_k 为二极管 D_k 两端的电压, i_k 为流过 D_k 的电流; $\rho = 1/(2nV_T)$, I_S 、 n 与 V_T 代表二极管的特征参数, 分别指反向饱和电流、发射系数与热电压. 由文献[7]可知, 二极管桥中处于平行位置的两个二极管的两端电压相等, 即有 $v_1 = v_3$ 、 $v_2 = v_4$.

在与二极管 D_1 的阳极和阴极相连的两个节点处应用基尔霍夫电流定律(KCL), 可得到 KCL 方程分别为

$$i = i_1 - i_2 \quad (3)$$

$$i_L = i_1 + i_2 \quad (4)$$

式中, i 与 i_L 分别代表输入电流与流经电感 L 的电流. 沿由电压源 v 、二极管 D_1 与 D_2 构成的回路应用基尔霍夫电压定律(KVL), 有电压关系式

$$v_2 = v_1 - v \quad (5)$$

沿由电压源 v 、二极管 D_1 、电感 L 、电阻 R 与二极管 D_3 构成的回路应用 KVL, 且由关系式 $v_1 = v_3$ 可得到 KVL 方程

$$2v_1 = v - v_L - v_R \quad (6)$$

其中, v_L 与 v_R 分别为电感 L 与电阻 R 两端的电压.

将式(2)代入式(4)并应用式(5), 整理得

$$i_L = 2I_S e^{\rho(2v_1 - v)} \cosh(\rho v) - 2I_S \quad (7)$$

从而解得

$$v_1 = \frac{1}{2\rho} \ln\left(\frac{i_L + 2I_S}{2I_S e^{-\rho v} \cosh(\rho v)}\right) \quad (8)$$

基于式(8)结果, 可导出图 1 电路的端口伏安关系及电感电流的状态方程. 首先, 将式(2)代入式(3)并应用式(5), 得

$$i = I_S e^{2\rho v_1} (1 - e^{-2\rho v}) \quad (9)$$

代入式(8), 有

$$\begin{aligned} i &= \frac{i_L + 2I_S}{2e^{-\rho v} \cosh(\rho v)} (1 - e^{-2\rho v}) \\ &= (i_L + 2I_S) \tanh(\rho v) \end{aligned} \quad (10)$$

其次, 将式(8)代入式(6), 得

$$v_L = v - v_R - \frac{1}{\rho} \ln\left(\frac{(i_L + 2I_S) e^{\rho v}}{2I_S \cosh(\rho v)}\right) \quad (11)$$

根据电感元件伏安关系的微分形式, 即 $v_L = L di_L/dt$, 进一步得到

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v - i_L R}{L} - \frac{1}{L\rho} \ln\left(\frac{(i_L + 2I_S) e^{\rho v}}{2I_S \cosh(\rho v)}\right) \quad (12)$$

由式(10)和(12), 图 1 电路的端口伏安关系及电感电流的状态方程可重写为

$$\begin{cases} i = G_M(i_L, v, t) v = (i_L + 2I_S) \tanh(\rho v) \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{v}{L} - \frac{i_L R}{L} - \frac{1}{L\rho} \ln\left(\frac{(i_L + 2I_S) e^{\rho v}}{2I_S \cosh(\rho v)}\right) \end{cases} \quad (13)$$

式中,

$$G_M(i_L, v, t) = \rho(i_L + 2I_S) \frac{\sum_{m=0}^{\infty} (\rho v)^{2m} / (2m + 1)!}{\sum_{m=0}^{\infty} (\rho v)^{2m} / (2m)!}$$

式中, m 为整数. 式(13)即为描述图 1 电路输入端口的伏安关系, 与式(1)作比较, 式(13)符合广义忆阻的定义式, 输入变量为端口电压且状态变量只有 1 个. 由此说明, 图 1 电路确实是一阶广义压控忆阻器的等效电路.

3 紧磁滞回线

为了验证图 1 所示的广义忆阻模拟器是否具有忆阻特性, 分别以三组不同的电路元件参数为例, 利用式(13)进行 MATLAB 数值仿真, 观察正弦电压激励时模拟器的输入端口伏安关系曲线.

采用 1N4148 二极管所具有的特征参数进行数值仿真, 即 $I_S = 2.682\text{nA}$, $n = 1.836$, $V_T = 25\text{mV}$ ($T = 293\text{K}$)^[7]. 选择输入正弦电压为 $v = V_m \sin(2\pi ft)$, 这里 V_m 和 f 分别代表振幅和频率. 设定激励振幅 $V_m = 4\text{V}$, 激励频率 f 分别为 200Hz、1kHz 以及 10kHz. 当电感 $L = 154\text{mH}$ 和电阻 $R = 100\Omega$ 、 $L = 278\text{mH}$ 和 $R = 570\Omega$, 以及 $L = 458\text{mH}$ 和 $R = 1\text{k}\Omega$ 时, 式(13)所表示的图 1 输入端口的伏安关系均可展示出在原点收缩的紧磁滞回线, 分别如图 2(a)、(b)和(c)所示. 此外, 从图中也不难观察到, 随着激励频率 f 的增大, 紧磁滞回线旁瓣面积逐渐变小, 且当其趋向于无穷大时, 紧磁滞回线最终将收缩为一条非线性单值函数.

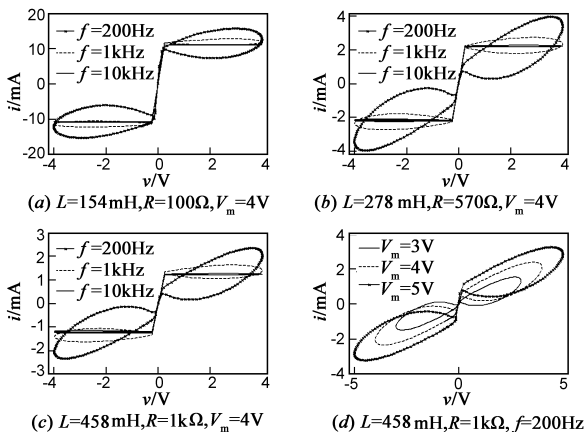
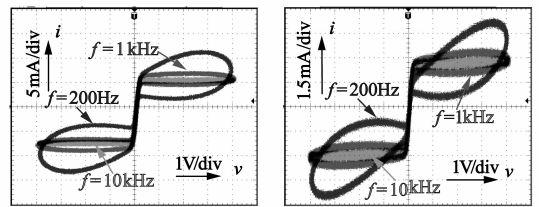


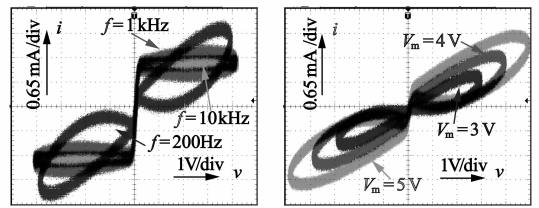
图2 不同参数时的紧磁滞回线

假设 $L = 458\text{mH}$ 和 $R = 1\text{k}\Omega$, 当激励频率 $f = 200\text{Hz}$, 振幅 V_m 分别为 3V、4V 以及 5V 时, 式(13)所表示的图 1 输入端口伏安关系曲线如图 2(d)所示, 随着激励振幅的变化, 伏安关系曲线始终为在原点收缩的紧磁滞回线. 同样地, 在另外两组元件参数下, 输入端口伏安关系曲线也始终为在原点收缩的紧磁滞回线. 因此, 从数

值仿真结果来看, 图 1 所示的广义忆阻模拟器具备了忆阻的三个本质特征.



(a) $L=154.15\text{mH}$, $R=100\Omega$, $V_m=4\text{V}$ (b) $L=278.52\text{mH}$, $R=570\Omega$, $V_m=4\text{V}$



(c) $L=458.45\text{mH}$, $R=1\text{k}\Omega$, $V_m=4\text{V}$ (d) $L=458.45\text{mH}$, $R=1\text{k}\Omega$, $f=200\text{Hz}$

图3 不同参数时的伏安关系实验结果

4 电路实验验证

采用四个 1N4148 二极管构成二极管桥电路, 由包漆线和磁芯绕制的电感串接上精密电阻器组成 RL 滤波器. 需说明的是, 实际电感并非理想电感, 寄生有等效串联电阻 (Equivalent Series Resistance, ESR), 因此图 1 电路电阻 R 的值为电路实验中精密电阻器的值与电感 ESR 值的总和. 利用 LCR 电桥测试仪可测得实验所需的电感值及相应的 ESR 值. 例如, 电路实验中使用的一个自制电感, 经 LCR 电桥测试可测得电感值为 458.45mH , ESR 值为 31.64Ω .

利用型号为 RIGOL DG2041A 的函数发生器为实验电路提供正弦电压, 振幅 $V_m = 4\text{V}$, 频率分别为 200Hz、1kHz 与 10kHz. 当在实验电路中依次接入不同参数的三组元件: $L = 154.15\text{mH}$ 和 $R = 100\Omega$ 、 $L = 278.52\text{mH}$ 和 $R = 570\Omega$, 以及 $L = 458.45\text{mH}$ 和 $R = 1\text{k}\Omega$, 由数字示波器 Tektronix TDS3034c 获得的输入端口电压和流入电流在电压 - 电流平面的相轨图分别如图 3(a)、(b)和(c)所示. 当元件参数为 $L = 458.45\text{mH}$ 和 $R = 1\text{k}\Omega$, 激励频率 $f = 200\text{Hz}$, 激励振幅 V_m 分别为 3V、4V、5V 时, 获得的输入端口电压和流入电流在电压 - 电流平面的相轨图如图 3(d)所示. 对比图 2 可知, 电路实验结果与数值仿真结果基本一致, 也说明了图 1 所示的广义忆阻模拟器具备忆阻的三个本质特征.

需说明的是, 这里仅在 3 组不同元件参数下对图 1 所示的广义忆阻模拟器进行了验证, 实际上无论是从数值仿真还是电路实验来看, 能使图 1 所示电路输入端口的伏安关系具备忆阻特性的元件参数的取值很多, 然而从电路实现角度考虑, 一些串联电阻取值过小或者电感取值过大的情况都需舍弃. 串联电阻的取值过

小,该模拟器作为负载接入应用电路,可能造成应用电路重载;而电感取值较大,会导致电感的制作难度加大.

5 结论

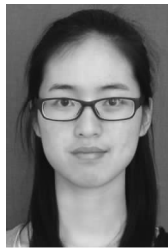
基于忆阻模拟器,可以利用实验手段方便地开展忆阻元件及其各种应用电路的特性分析.通过二极管桥级联一阶 RL 滤波器,本文提出了一种新的广义忆阻模拟器.该模拟器的数学模型是一维的,易于电路分析;相应的电路结构简单,电路参数可调,且无接地限制,便于应用接入.本文分别在 3 组不同的元件参数下,对所提出的模拟器输入端口的伏安关系进行了数值仿真与电路实验的研究,两者结果表明该模拟器可呈现原点收缩的紧磁滞回线,具备了忆阻的三个本质特征,确实是一种有效的忆阻等效电路.关于模拟器的有效性参数区间分布的问题,将在后续的论文中作进一步的研究.

参考文献

- [1] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The missing memristor found[J]. *Nature*, 2008, 453: 80 – 83.
- [2] Kim H, Sah M P, Yang C J, et al. Memristor emulator for memristor circuit applications[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2012, 59(10): 2422 – 2431.
- [3] Muthuswamy B. Implementing memristor based chaotic circuits [J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2010, 20(5): 1335 – 1350.
- [4] Yu D S, Liang Y, Chen H, et al. Design of a practical memcapacitor emulator without grounded restriction[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2013, 60(4): 207 – 211.
- [5] Bao B C, Xu J P, Zhou G H, et al. Chaotic memristive circuit: equivalent circuit realization and dynamic analysis[J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(12): 070504.
- [6] Wang X Y, Fitch A L, Iu H H C, et al. Implementation of an analogue model of a memristor based on a light-dependent resistor[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(10): 108501.
- [7] Corinto F, Ascoli A. Memristive diode bridge with LCR filter [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(14): 824 – 825.
- [8] Pershin Y V, Di Ventra M. Emulation of floating memcapacitors and meminductors using current conveyors[J]. *Electronics Letters*, 2011, 47(4): 243 – 244.
- [9] Wang X Y, Fitch A L, Iu H H C, et al. Design of a memcapacitor emulator based on a memristor [J]. *Physics Letters A*, 2012, 376: 394 – 399.

- [10] 梁燕,于东升,陈昊.基于模拟电路的新型忆感器等效模型[J]. *物理学报*, 2013, 62(15): 158501.
Liang Y, Yu D S, Chen H. A novel meminductor emulator based on analog circuits[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(15): 158501. (in Chinese)
- [11] Sah M P, Budhathoki R K, Yang C, et al. Expandable circuits of mutator-based memcapacitor emulator [J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2013, 23(5): 1330017.
- [12] Bocheng Bao, Fei Feng, Wei Dong, et al. Voltage-current relationship and equivalent circuit implementation of parallel flux-controlled memristive circuits[J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(6): 068401.
- [13] 包伯成,邹相,胡文,等.有源忆阻器伏安关系与有源忆阻电路频率特性研究[J]. *电子学报*, 2013, 41(3): 593 – 597.
Bao B C, Zhou X, Hu W, et al. Voltage-current relationship of active memristor and frequency characteristic of active memristive circuit[J]. *Acta Electronica sinica*, 2013, 41(3): 593 – 597. (in Chinese)
- [14] Adhikari S P, Sah M Pd, Kim H, et al. Three fingerprints of memristor[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2013, 60(11): 3008 – 3021.
- [15] Di Ventra M, Pershin Y V, Chua L O. Circuit elements with memory: memristors, memcapacitors, and meminductors [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2009, 97(10): 1717 – 1724.

作者简介



武花干 女,1987 年出生于江苏泰州,现为南京理工大学博士生,主要研究领域为非线性电路与系统;记忆元件与记忆系统.

E-mail: jingzhan9000@yeah.net



包伯成(通讯作者) 男,1965 年出生于江苏常州,现为常州大学信息科学与工程学院教授,硕士生导师,主要从事记忆元件与记忆系统、开关功率变换器、非线性电路与系统等方面的工作.

E-mail: mervinbao@126.com