

一种基于压控型忆阻器的忆容器模型

吴梦雯, 甘朝晖, 吴宇鑫

(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 分析了忆阻器与忆容器之间的关系, 提出了基于电压控制型忆阻器的忆容器模型. 用 Pspice 软件对该模型进行了仿真实验, 发现该模型中忆容器的忆容值与忆阻器的忆阻值成线性关系, 忆容器的电压—电荷曲线呈现典型的非线性迟滞回线特性. 在验证了所提出忆容器模型正确性的基础上, 进一步分析了忆容器的电气特性.

关键词: 忆容器; 忆阻器; 模型; Pspice

中图分类号: TM50

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)11-0166-06

A Memcapacitor Model Based on Voltage-controlled Memristor

WU Meng-wen, GAN Zhao-hui, WU Yu-xin

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: In this paper, a model for transferring a voltage-controlled memristor into memcapacitor is described, of which the realization is on the basis of an analysis of the relationship between memristor and memcapacitor. Results of Pspice simulation indicate that: in the model the relationship between memristance and memcapacitance is linear, and the $v-q$ characteristic of the memcapacitor is a typically non-linear pinched hysteretic loop. After conforming the correctness of the model, a further Pspice simulation is conducted in order to analyze and observe the characteristics of memcapacitor.

Key words: memcapacitor; memristor; model; Pspice

1 引言

1971 年, 蔡少棠教授从基本电路理论的完备性方面推测应该还存在一种表征电荷和磁通关系的基本电路元件, 并把该元件命名为忆阻器^[1]. 直到 2008 年, 惠普实验室的科学家才在实验中发现了忆阻器实物^[2]. 2009 年蔡教授又在忆阻器的基础上拓展出记忆元件(memory device)的概念, 将其推广到电容和电感这两种元件上, 提出了忆容器(memcapacitor)和忆感器(meminductor)的相关概念^[3], 并指出忆容器的电荷与电压之间的关系以及忆感器的电流与磁通之间的关系同忆阻器的电压与电流之间的关系一样, 都具有迟滞回线的特性.

自从忆阻器实物发现以后, 研究人员提出了多种忆阻器的仿真模型. 文献[2]中根据流过忆阻器的

电荷量与元件掺杂区域宽度之间的关系提出了忆阻器的线性杂质漂移模型, 文献[4]中指出忆阻器的磁通与电荷量之间的关系可以是分段线性的, 并提出了一种分段线性的忆阻器模型. 文献[5]中介绍了忆阻器的 Pspice 仿真模型. 作为忆阻器的拓展, 忆容器和忆感器的相关特性也引起了研究人员的注意, 对它们的研究也逐渐深入开展起来. Y. V. Pershin 和 M. Di Ventra 提出了一种用忆阻器和其他元件构成忆容器和忆感器的方法^[6], 该方法从忆阻器、忆容器、忆感器的基本定义着手, 通过三者之间的线性变换关系来构造出忆容器和忆感器的模拟电路. 但是, 这两种模拟电路都引入了寄生电阻. D. Biolek 和 V. Biolkova 指出了 Pershin 等人提出的忆容器模拟电路的不足^[7-8], 并推导出了不含有寄生电阻的忆容器模型. 文献[9-10]中各自提出了一种通用的

忆阻器、忆容器和忆感器的相互转换模型,在固定的电路结构中更换某些位置的元器件就可以实现忆阻器、忆容器和忆感器的相互转换,但忆容器和忆感器在电路中应用的电气特性并没有得到分析和研究。

忆阻器是表征电荷和磁通量关系的一种电路元件,它们可以被分为电流控制型忆阻器和电压控制型忆阻器这两类。现有的基于忆阻器的忆容器模型都是基于电流控制型忆阻器的忆容器模型^[7-8],而电压控制型忆阻器与忆容器之间转换关系的研究还不多。本文在分析电压控制型忆阻器与忆容器之间关系的基础之上,提出一种基于电压控制型忆阻器的忆容器等效电路,并且用 Pspice 软件进行了电路仿真实验,以验证该方法的正确性。

2 忆阻器与忆容器的转换条件

经典电路理论中的四个基本变量(电流 i , 电压 v , 电荷 q 和磁通 φ) 经过两两组合可产生六种电路关系。现有三种无源元器件电阻(R)、电容(C) 和电感(L) 分别表征 v 和 i 、 q 和 v 、 φ 和 i 之间的关系,图 1 描述的是经典无源元器件之间的电学关系。但是,表征电荷 q 和磁通 φ 之间关系的元器件一直没有被发现。

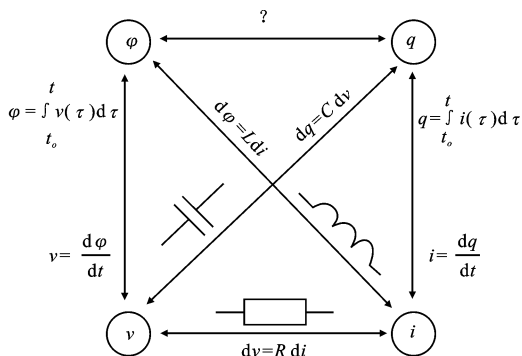


图 1 经典无源元器件的电学关系

通过蔡教授和惠普实验室科学家们的研究,发现了表征电荷和磁通量关系的忆阻器。忆阻器及由它拓展而来的忆容器和忆感器进一步拓宽了电路理论中的基本元件概念。其中,忆阻器(MR)、忆容器(MC)和忆感器(ML)分别表征磁通 φ 和电荷 q 、电荷的积分 σ 和磁通 φ 、磁通的积分 ρ 和电荷 q 的关系,图 2 中描述了这三种记忆元件的电学关系。但是,在现实世界中还没有发现忆容器和忆感器的实物。为了研究忆容器和忆感器的特性,我们可以根据记忆元件的相互关系,通过已经发现的忆阻器的模型来构造忆容器和忆感器的模型。

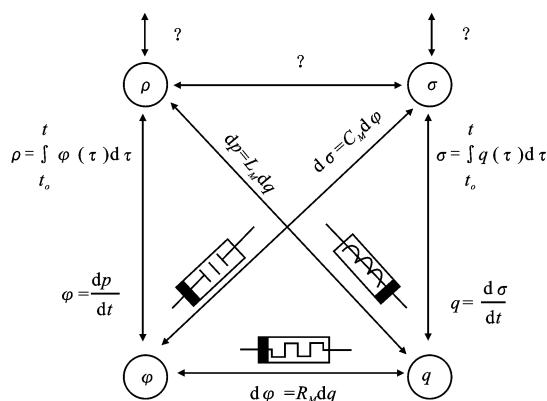


图 2 记忆元件的电学关系

使用忆阻器模型来构造的忆容器和忆感器模型可以有很多种,其中最简单的就是通过线性变换构造的忆容器和忆感器模型。表 1 中描述了忆阻器与忆容器之间的转换关系。转换方式 1 表示的是电压控制型忆阻器变成忆容器的转换关系。转换方式 2 表示的是电流控制型忆阻器变成忆容器的转换关系。以表 1 中的转换方式 1 为例进行说明。忆容器等效电路模型建立的基础是:忆阻器的磁通 φ_2 与忆容器的电荷积分 σ_1 之间、忆阻器电荷量 q_2 与忆容器磁通 φ_1 之间的关系应符合以下关系式,即

$$\sigma_1 = K_x \cdot \varphi_2 \quad (1)$$

$$\varphi_1 = K_y \cdot q_2 \quad (2)$$

表 1 忆阻器与忆容器转换关系

转换方式	电路转换关系示意图	转换关系式
1	MC ← MR ($q(\varphi)$)	$(\sigma_1, \varphi_1) \leftrightarrow (\varphi_2, q_2)$ $\int i_1 dt = K_x \cdot v_2$ $\sigma_1 = K_x \varphi_2$ $\varphi_1 = K_y q_2$ $C_m = \frac{k_x}{k_y} R_m$
2	MC ← MR ($\varphi(q)$)	$(\sigma_1, \varphi_1) \leftrightarrow (q_2, \varphi_2)$ $\int i_1 dt = K_x \cdot i_2$ $\sigma_1 = K_x q_2$ $\varphi_1 = K_y \varphi_2$ $C_m = \frac{k_x}{k_y} G_m$

又由于 $\rho = \int_{t_0}^t \varphi(\tau) d\tau$, $\sigma = \int_{t_0}^t q(\tau) d\tau$, $q = \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau$, $\varphi = \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau$, 将式(1)、式(2)等号左右两边微分可得

$$q_1 = K_x \cdot v_2 \quad (3)$$

$$v_1 = K_y \cdot i_2 \quad (4)$$

将式(3)中的电荷量用电流的积分表示,可得

$$\int i_1 dt = K_x \cdot v_2 \quad (5)$$

由此可知,使用电压控制型忆阻器构造忆容器需满

足以下关系式:

$$v_1 = K_y \cdot i_2$$

$$\int i_1 dt = K_x \cdot v_2$$

根据忆容器忆容值的定义可知, 忆容器的忆容值 C_m 如式(6)所示:

$$C_m = \frac{d\sigma_1}{d\varphi_1} = \frac{K_x \cdot d\varphi_2}{K_y \cdot dq_2} = \frac{K_x R_m}{K_y} \quad (6)$$

从式(6)可知, 忆容器的忆容值 C_m 与忆阻器的阻值 R_m 之间是一种线性关系. 同理, 表 1 中的转换方式 2 也可推导出来. 下文将介绍使用转换方式 1 实现电压控制型忆阻器构造的忆容器模型.

3 忆容器模型的实现

根据上文分析的忆阻器转换成忆容器的条件, 本节设计了一种电压控制型忆阻器构造的忆容器模型, 如图 4 所示. 在这个忆容器模型中使用了第二代电流传输器(CCII+)电路, 该电路如图 3 所示. CCII+ 的 z 端电流跟随 x 端电流, 且 I_z 与 I_x 方向相同. CCII+ 的 x 端电压跟随 y 端电压. CCII+ 的 y 端输入电流为 0, 且与 y 端电压无关. 即

$$I_x = I_z \quad (7)$$

$$V_x = V_y \quad (8)$$

$$I_y = 0 \quad (9)$$

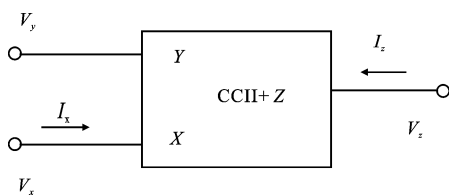


图 3 CCII+ 的电路符号

由于 CCII+ 具有以上所述的这些特性, 因此, CCII+ 十分适合用来构造忆容器模型. 图 4 为电压控制型忆阻器构造的忆容器模型. 其中, 虚线框表示的是忆容器模型. i_1 和 v_1 表示忆容器的电流和电压, 方向如图所示. i_2 和 v_2 表示忆阻器的电流和电压, 方向如图所示.

结合 CCII+ 的相关性质, 分析图 4 所示的忆容器模型, 可得

$$i_2 = v_1 / R_x \quad (10)$$

$$v_2 = \frac{1}{C} \int i_1 dt \quad (11)$$

上式表明图 4 中的模型满足电压控制型忆阻器构造忆容器的条件. 其中, $k_x = C, k_y = R_x$, 由式(6)可得忆容器的忆容值:

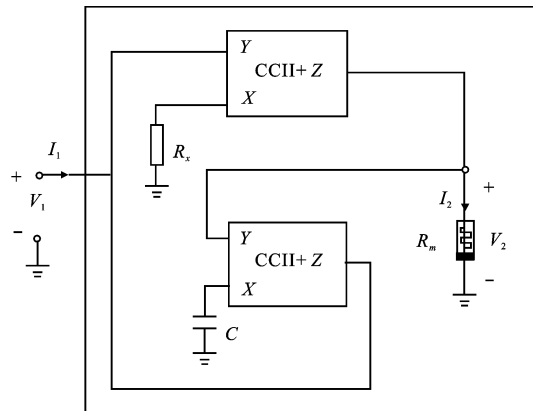


图 4 电压控制型忆阻器构造的忆容器模型

$$C_m = \frac{d\sigma_1}{d\varphi_1} = \frac{K_x \cdot d\varphi_2}{K_y \cdot dq_2} = \frac{K_x R_m}{K_y} = \frac{C}{R_x} R_m \quad (12)$$

由式(12)可知, 忆容器的容值与忆阻器的阻值成比例关系, 比例系数与电阻阻值 R_x 和电容值 C 有关. 在该忆容器模型中, 可以通过调整电阻阻值 R_x 和电容的容值 C 来控制忆容器容值与忆阻器阻值之间的比例关系.

4 忆容器模型的仿真实验

为了验证所设计电路模型的正确性, 本文采用 Pspice 仿真软件对图 4 电路进行了仿真. 图 4 电路中的 CCII+ 是用电流反馈型运放 AD844 实现的.

4.1 忆容器的基本特性

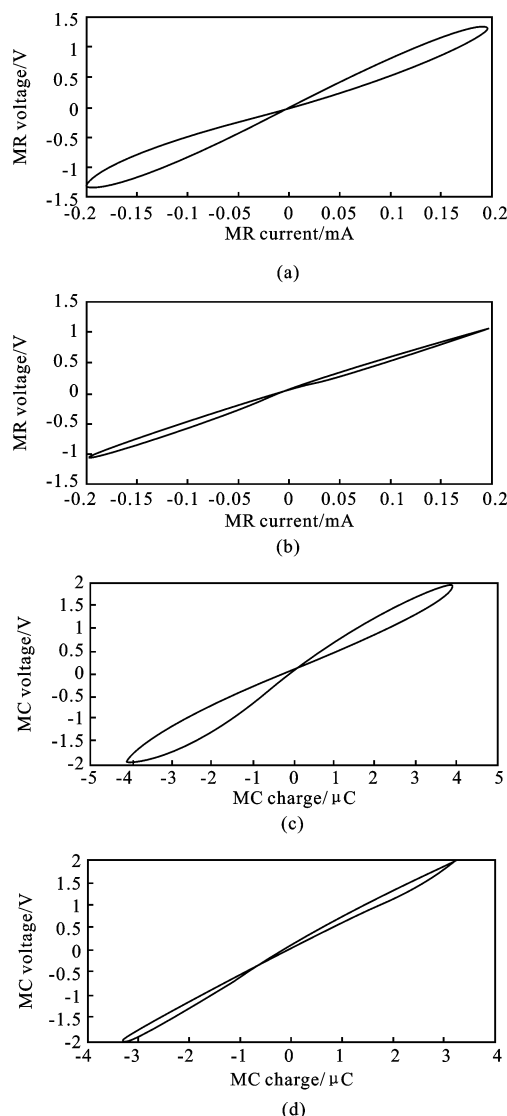
为了验证所设计的电路模型是否是忆容器, 首先进行的是忆容器基本特性的仿真实验. 忆容器模型的输入信号为幅值 2 V 的正弦波, 其中 $R_x = 10 \text{ k}\Omega, C = 3 \text{ }\mu\text{F}$, 忆阻器采用文献[5]中提出的忆阻器 Spice 模型. 当输入信号的频率分别为 3 Hz, 10 Hz 时, 忆阻器的 $i-v$ 曲线和忆容器的 $q-v$ 曲线如图 5 所示.

图 5(a)和(b)分别为忆阻器在输入信号频率分别为 3 Hz 和 10 Hz 时的电压-电流曲线, 从图中可以看出忆阻器的 $i-v$ 曲线为“8”字形迟滞回线, 并且随着输入信号频率的增加逐渐趋近于一条直线.

图 5(c)和(d)分别为忆容器在输入信号频率分别为 3 Hz 和 10 Hz 时的电荷-电压曲线, 从图中可以看出忆容器的 $q-v$ 曲线也是“8”字形的迟滞回线, 并且随着频率的增加逐渐趋近于一条直线. 这表明忆容器的电气特性也是非线性的, 本文所设计的忆容器模型是正确的, 可以用来仿真忆容器的电气特性.

4.2 忆容器的阶跃响应特性

本节设计了一个实验, 给忆容器模型施加阶跃

图5 忆阻器 $i-v$ 曲线和忆容器 $q-v$ 曲线

信号,观测它的阶跃响应波形以得到忆容器模型的阶跃响应特性。

对图4中的忆容器施加一个2 V的阶跃信号,如图6(a)中虚线所示,该信号的纵坐标在图6(a)左侧,范围为0~4 V。忆容器的响应电流如图6(a)中点画线所示,该信号的纵坐标在图6(a)右侧,范围为-1 mA到1 mA。在信号施加后的0~0.5 s,忆容器的电流值为0.6 mA,0.55 s后忆容器的电流值为0。图6(b)中点画线所示的是忆容器模型中忆阻器的阻值,该信号的纵坐标在图6(b)右侧,范围为0~20 k Ω ,在信号施加后的0~0.5 s,忆阻器的阻值由初始值1 k Ω 逐渐上升直至0.5 s达到饱和值16 k Ω ,忆阻器的电压也逐渐上升直至0.5 s后维持恒定值,如图6(a)中实线所示(纵坐标在图6(a)左侧,范围为0~4 V)。当忆阻器的阻值饱和后,忆阻器的

电压也就维持恒定。图6(b)中虚线所示的忆容器的电容值(纵坐标在图6(b)左侧,范围为0~300 μ F)也是由10 μ F逐渐上升至160 μ F后饱和。

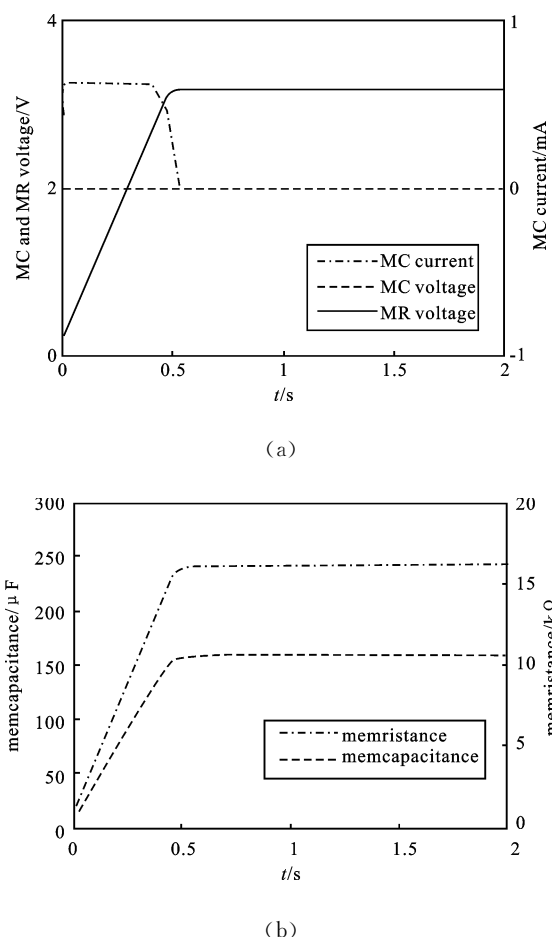


图6 忆容器阶跃响应特性

从以上忆容器的阶跃响应特性可以看出,忆容器具有饱和前“通直流”,饱和后“隔直流”的特性。

4.3 忆容器容值调整

在实际电路应用中,往往需要使用特定容值的忆容器。在本文所提出的忆容器模型中,忆容器的容值可以通过改变电容的容值 C 、电阻阻值 R_x 和忆阻器的阻值 R_m 来调整。课题组的成员在前期工作中提出了一种改进的忆阻器模型^[11],并基于该模型实现了一个可调节忆阻器阻值的控制电路。本节实验中,我们采用该控制电路来调节忆阻器的阻值,再通过图4所示的忆容器模型来调整忆容器的容值。

对图4的忆容器模型施加一个5 V,0.1 Hz的正弦波信号,通过检测忆容器的电压、电流,我们可以计算出忆容器的容值。图7所示曲线分别是忆容器模型中电容分别取 $C=500$ nF, $C=1$ μ F, $C=10$ μ F, $C=100$ μ F, $C=150$ μ F时,忆容器的容值和忆阻器阻值的关系曲线。从图7(a)~(e)可以发现,随

着电容值 C 的逐渐增加, 忆容器容值与忆阻器阻值的比值也逐渐增加, 符合式(12)所描述的比例关系. 通过选取适当的电容值, 并配合忆阻器阻值的变化范围, 可以使忆容器模型的容值在 $0.1 \mu\text{F}$ 至 $200 \mu\text{F}$ 范围内进行调整.

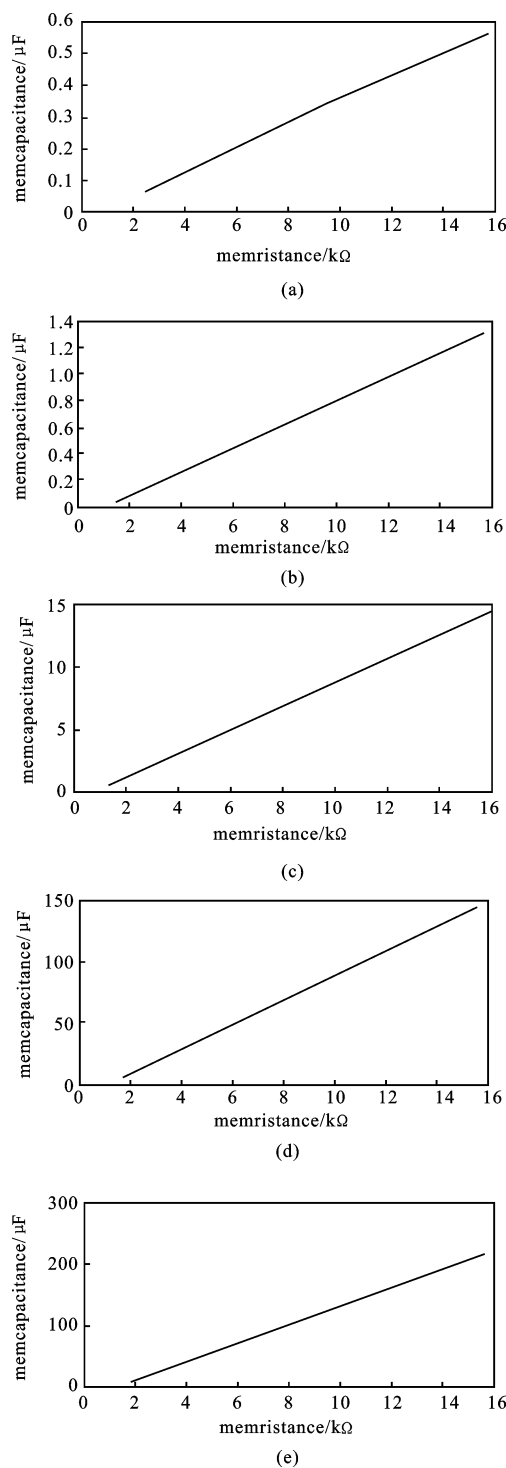


图7 电容 C 取不同容值时忆阻器阻值与忆容器容值关系曲线

在电容 C 容值保持不变的情况下, 忆阻器阻值

的调整也能改变忆容器的容值. 对图4所示的忆容器模型施加 5 V , 0.1 Hz 的正弦波信号, 模型中的 $R_x = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 150 \mu\text{F}$, 利用文献[11]中的控制电路控制忆阻值的阻值, 分别作出 $R_m = 2 \text{ k}\Omega$ 、 $R_m = 10 \text{ k}\Omega$ 、 $R_m = 15 \text{ k}\Omega$ 时, 忆容器容值随时间变化的曲线, 分别如图8(a)~(c)所示. 此时, 忆容器的容值分别为 $30 \mu\text{F}$, $150 \mu\text{F}$, $225 \mu\text{F}$. 从图8(a)~(c)可以发现, 由于忆阻器的阻值保持不变, 忆容器的容值也保持不变, 改变忆阻器的阻值, 忆容器的容值也发生变化, 它们之间的比例关系符合式(12).

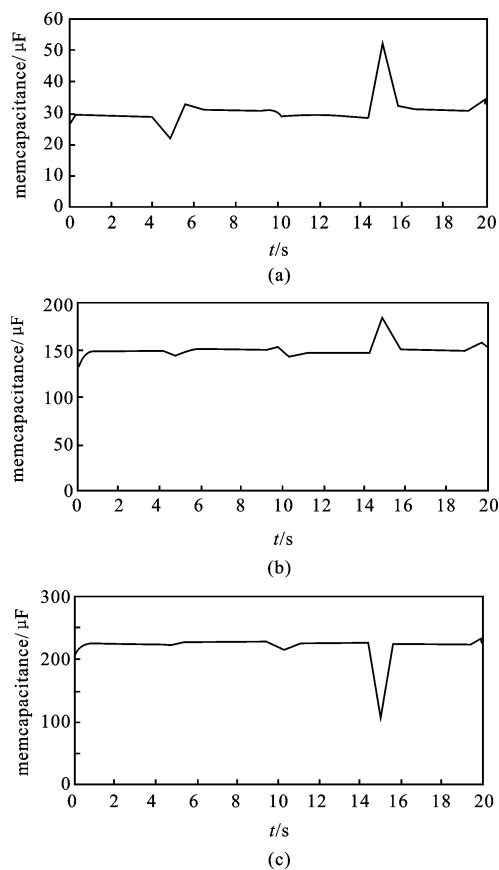


图8 忆阻器阻值取不同值时忆容器容值随时间变化曲线

从图8中还可以发现忆容器的容值曲线会有所波动, 主要的原因是: 忆容器的容值是通过公式 C_m

$$= \frac{d\sigma_1}{d\varphi_1} = \frac{\int i dt}{v}$$
 计算得到的, 该忆容器模型的电荷量与电压值在信号过零时同时为零, 由计算公式算出的忆容器的容值会发生较大的误差.

除了模型中的电容值 C 、电阻阻值 R_x 和忆阻器的阻值 R_m 会影响忆容器的容值以外, 忆阻器的初始阻值 R_{init} 也会影响忆容器的忆容值. 图9中的曲线是电阻 $R_x = 10 \text{ k}\Omega$, 电容 $C = 10 \mu\text{F}$, 忆阻器阻值的初始值分别为 $R_{\text{init}} = 1 \text{ k}\Omega$, $R_{\text{init}} = 10 \text{ k}\Omega$ 时忆容器

容值随忆阻器阻值变化的曲线。

从图9中可以发现,二条曲线的斜率不变,即忆容器容值与忆阻器阻值的比例关系不变,但是,忆阻器的初始阻值明显影响忆容器容值的变化范围。另外,当忆阻器的阻值过大时,将会使忆容器模型中的电压幅值超过电流传输器能够处理的范围,从而造成忆容器模型出现失真。因此,在调整忆容器容值的时候,应当考虑选取合适的忆阻器阻值的初始值。

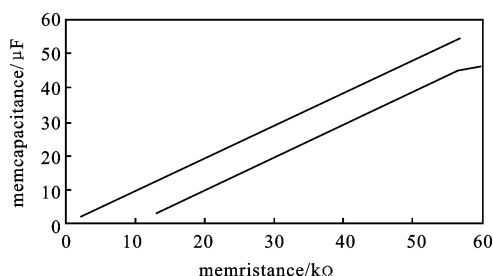


图9 忆阻器阻值取不同初始值时忆容器容值随忆阻器阻值变化曲线

5 结束语

本文首先从记忆元件的定义上分析了忆阻器与忆容器之间的关系,并在此基础上推导出了电流控制型和电压控制型忆阻器实现忆容的变换关系式。其次,使用CCII+构造了基于压控型忆阻器的忆容器等效电路,用Pspice软件进行了电路仿真实验,发现所提出的忆容器模型的电压—电荷曲线呈现典型的非线性迟滞回线特性。由此,验证了忆容器等效电路的正确性。最后,在仿真实验的基础上分析了忆容器模型的性质。

参考文献:

- [1] Chua LO. Memristor-the missing circuit element[J]. IEEE Transactions on circuit theory, 1971, 18(5): 507-519.
- [2] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The missing memristor found [J]. Nature, 2008, 453

(7191): 80-83.

- [3] Ventra M D, Pershin Y V, Chua L O. Circuit elements with memory: memristors, memcapacitors and meminductors [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(10): 1717-1724.
- [4] Itoh M, Chua L O. Memristor oscillators[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2008, 18 (11): 3183-3206.
- [5] Biolek D, Biolek Z, Biolkova V. SPICE modeling of memristive, memcapacitive and meminductive systems [C] // Circuit Theory and Design. Antalya: IEEE, 2009: 249-252.
- [6] Pershin Y V, Ventra M D. Memristive circuits simulate memcapacitors and meminductors[J]. Electronics Letters, 2010, 46(7): 517-518.
- [7] Biolek D, Biolkova V. Mutator for transforming memristor into memcapacitor [J]. Electronics Letters, 2010, 46(21): 1428-1429.
- [8] Biolek D, Biolkova V, Kolka Z. Mutators simulating memcapacitors and meminductors[C]// Proceedings of the 2010 IEEE Asla Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS). Kuala Lumpur: IEEE, 2010: 800-803.
- [9] 李志军, 曾以成, 谭志平. 一个通用的记忆器件模拟器[J]. 物理学报, 2014, 63(9): 1-7.
- [10] Yu D S, Liang Y, Herbert H C. A universal mutator for transformations among memristor, memcapacitor, and meminductor [J]. IEEE Transactions on circuit and system—II: Express Briefs, 2014, 61 (10): 758-762.
- [11] 段宗胜, 甘朝晖, 王勤. 一种改进的忆阻器的 SPICE 模型及其仿真[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(8): 193-199.

作者简介:

吴梦雯 女, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为记忆元件应用. E-mail: wumengwen0805@foxmail. com.