

6-6-2020

Memcapacitor Model Based On Memristor

Zhaohui Gan

1. *School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;;*

Yuxin Wu

1. *School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;;*

Jiang Min

2. *School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;*

Shiyong Zhang

1. *School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Memcapacitor Model Based On Memristor

Abstract

Abstract: After physical model discovery of memristor in HP lab, the researchers put forward the concept of memcapacitor according to circuit theory. However, the physical object of the memcapacitor has not been found so far. In order to research the memcapacitor, researchers often use other components and circuits to simulate a memcapacitor. After analyzing the existing model of memcapacitor, *a new nonlinear transformation method is proposed to transform a memristor into a memcapacitor, by which a nonlinear model of memcapacitor based on the memristor is constructed.* The Pspice simulation experiments showed that *the model successfully simulated the basic characteristics of the memcapacitor, and the model is very meaningful for the development and application of the memcapacitor and its related circuits.*

Keywords

memristor, memcapacitor, nonlinear, model

Recommended Citation

Gan Zhaohui, Wu Yuxin, Jiang Min, Zhang Shiyong. Memcapacitor Model Based On Memristor[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(12): 3176-3184.

一种基于忆阻器的忆容器模型

甘朝晖¹, 吴宇鑫¹, 蒋旻², 张士英¹

(1.武汉科技大学信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081; 2.武汉科技大学计算机科学与技术学院, 湖北 武汉 430065)

摘要: 惠普实验室在发现忆阻器实物以后, 研究人员根据电路理论提出了忆容器的概念。但是, 直到目前, 忆容器的实物还没有被发现。为了研究忆容器, 科研人员往往用其它的元件及电路来模拟忆容器。在详细分析了现有的忆容器模型以后, 研究了忆阻器与忆容器之间的变换关系, 提出了一种新的非线性转换方法以实现忆阻器到忆容器的变换, 并在此基础上构造了一种基于忆阻器的非线性忆容器模型。经过 Pspice 仿真实验发现, 该模型成功地模拟了忆容器的基本特性, 该模型对忆容器及其相关电路的发展及应用是非常有意义的。

关键词: 忆阻器; 忆容器; 非线性; 模型

中图分类号: TN710

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 12-3176-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201712031

Memcapacitor Model Based On Memristor

Gan Zhaohui¹, Wu Yuxin¹, Jiang Min², Zhang Shiyong¹

(1.School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2.School of Computer Science and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: After physical model discovery of memristor in HP lab, the researchers put forward the concept of memcapacitor according to circuit theory. However, the physical object of the memcapacitor has not been found so far. In order to research the memcapacitor, researchers often use other components and circuits to simulate a memcapacitor. After analyzing the existing model of memcapacitor, a new nonlinear transformation method is proposed to transform a memristor into a memcapacitor, by which a nonlinear model of memcapacitor based on the memristor is constructed. The Pspice simulation experiments showed that the model successfully simulated the basic characteristics of the memcapacitor, and the model is very meaningful for the development and application of the memcapacitor and its related circuits.

Keywords: memristor; memcapacitor; nonlinear; model

引言

蔡少棠教授于 1971 年提出了忆阻器的概念^[1],



收稿日期: 2015-11-09 修回日期: 2015-12-25;
基金项目: 国家自然科学基金(41571396);
作者简介: 甘朝晖(1969-), 男, 湖北武汉, 博士, 教授, 研究方向为忆阻器及忆阻系统, 人工智能及机器人; 吴宇鑫(1988-), 男, 湖北宜昌, 硕士, 研究方向为嵌入式及其应用, 忆阻器及忆阻系统; 蒋旻(1975-), 女, 湖南隆回, 博士, 教授, 研究方向为计算机视觉, 机器人自动导航。

进而将记忆元件的特性进行推广, 得出了忆容器和忆感器的概念^[2]。研究人员根据理论已经研发出了忆阻器的实物, 但至今还没有发现忆容器的实物。因此, 研究人员只能通过仿真模型来研究忆容器。忆容器的仿真模型可以通过以下 2 种方法得到:

1) 使用运算放大器、电阻、电容、忆阻器等电路器件, 构造出具有容性特性的二端口电路来模拟忆容器。

2)使用电流传输器、电阻、电容、忆阻器等器件,从忆阻器和忆容器的本构关系出发构造线性变换电路来模拟忆容器。

M. Di Ventra 等使用第一种方法设计了一种具有电容特性的等效忆容电路^[3]。该方法构造出的忆容器不可避免地引入了一个寄生电阻,使得模型不仅不够简易而且不利于分析忆容器的相关特性。D. Bialek 等人在指出了 M. Di Ventra 所设计模型不足的基础上,设计了一种基于电流传输器的忆容器转换电路^[4],该电路模型没有寄生电阻,且通过 PSpice 仿真发现该模型更加精确。X.Y. Wang 等提出了一种基于模拟电路的忆阻器模型,并在此模型的基础上,应用线性变换理论设计了不依赖于记忆器件的忆容器模型^[5],并验证了此忆容器模型的频率响应特性。

李贵三等提出了一种浮地型忆容器^[6],没有使用忆阻器,电路结构更加简单,能够更灵活的应用。李志军等人提出了一种通用记忆器件模拟转换电路^[7],该转换电路能够在不改变电路拓扑结构的前提下,通过外接不同性质的元件分别模拟出浮地的忆阻器、忆容器和忆感器。Dongsheng Yu 等人在分析了接地忆容器模型的局限性之后,提出了一种浮地忆容器模型^[8],并同时提出了一种通用的记忆器件的转换方法^[9],能够通过更换一部分电路元件来实现忆阻器、忆容器和忆感器之间的相互转换。

基于转换电路来模拟忆容器的方法,基本上都是使用的线性电路,也就是用线性变换的方法来实现的记忆元件本构变量之间的一种线性变换关系。这样得到的新的记忆器件的特性实质上就是忆阻器的“特性”,不会出现一些新的特性,因此基于线性变换方法构造的变换电路是具有一定的局限性的。本文提出了一种记忆元件的非线性转换方法,并在此基础上设计了一种把忆阻器转换成忆容器的非线性转换电路模型,为忆容器模型的构造以及忆容器的应用提供了一种新的思路。

本文所提出的忆容器模型与已有的忆容器模型相比,最大的优势在于不需要改变电路的拓扑结

构以及电路元件的参数,仅施加不同的控制信号就可以得到不同特性的忆容器模型,同时,忆容器的容值还可以实时进行调整,这种特性在很多电路中都会得到广泛的应用。

1 忆阻器转换成忆容器的条件

传统的二端电路元件电阻(R)、电容(C)、电感(L)是通过四个电路变量来描述的,它们分别为:电流 i 、电压 u 、电量 q 和磁通量 φ 。为了方便描述忆容器,研究人员又提出了一个电路变量,即时域下电量对时间的积分 σ 。公式(1)描述了这些电路变量之间的关系。

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t q(\xi) d\xi, \quad q(t) = \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi, \quad \varphi(t) = \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi \quad (1)$$

蔡少棠等研究发现忆阻器由 q 与 φ 来描述,进而推断出忆容器由 σ 与 φ 来描述^[1]。描述记忆元件特性的这些电路变量称为记忆元件的本构变量。两种不同记忆元件之间互相转换的条件是它们的本构变量之间要符合一种对应关系。如果这种对应关系是线性的,那么,完成两种不同记忆元件之间互相转换的电路就是线性电路, Dalibor Bialek 等人提出了基于线性变换的各种记忆元件之间互相转换的转换方式^[10],其中,忆阻器(MR)与忆容器(MC)线性变换的关系如表 1 所示。表 1 中,CCMR、VCMC 和 VCMR 分别为荷控忆阻器、磁控忆容器与荷控忆阻器的简称,CCMR-VCMC 表示将荷控忆阻器变换为磁控忆容器,VCMR-VCMC 表示将磁控忆阻器变换为磁控忆容器。

表 1 中的电压、电流均为时域下的瞬时值。 K_x 、 K_y 为常量。 C_m 为 VCMC 的容值。 R_m 为 CCMR 的阻值。 G_m 为 CVMR 的导纳^[10]。

根据表 1 可以知道 CCMR 和 VCMC 的本构变量之间符合以下对应关系式,将这种关系用函数表示,可以记作:

$$\sigma_1 = f(\varphi_2) \quad (2)$$

$$\varphi_1 = g(q_2) \quad (3)$$

式中: φ_2 、 q_2 为 CCMR 的磁通和电荷量瞬时值; σ_1 ,

φ_1 为 VCMC 的电荷积分和磁通量瞬时值。

上述函数关系既可以是线性的，也可以是非线性的，有两种方式可以实现非线性的函数关系。第一种方法是引入一个新变量，把 CCMR-VCMC 之间线性转换条件中的比例系数 K_x 或 K_y 换成这个新的变量，那么该转换条件就描述着一种非线性的转换关系。第二种是直接让表征记忆元件本构变量之间对应关系的函数 $f(x)$ 和 $g(x)$ 为非线性函数，这样就构造了本构变量之间的非线性对应关系。本文将使用第一种方法来构造 CCMR-VCMC 之间的非线性转换关系，并在此基础上提出一种非线性转换电路以完成忆容器模型的建立。

表 1 忆阻器与忆容器线性转换关系
Tab. 1 Linear transformation of memristor and memcapacitor

转换方式	电路转换关系示意图	转换关系式
CCMR-VCMC		$\int i_1 dt = K_x \cdot v_2$ $v_1 = K_y \cdot i_2$ $C_m = \frac{K_x}{K_y} \cdot R_m$
VCMR-VCMC		$\int i_1 dt = K_x \cdot i_2$ $v_1 = K_y \cdot v_2$ $C_m = \frac{K_x}{K_y} \cdot G_m$

2 忆阻器转换成忆容器的非线性电路

如图 1 所示，本文所提出的非线性转换电路由一个电阻 R 、一个电容 C 、一个乘法器和二个分别标记为 U_1 和 U_2 的跨导运算放大器 AD844 所组成。电阻和电容的取值为： $R=10\text{ k}\Omega$ ， $C=3\text{ }\mu\text{F}$ 。

根据跨导运算放大器 AD844 的特性可知，其 Z 端电流 I_Z 跟随其 X 端电流 I_X ，且 I_Z 与 I_X 同向。其 X 端的电压跟随其 Y 端的电压，Y 端输入电流为 0。对于 U_1 可以得到， $i_3=0$ ， $v_R=v_1$ ， $i_R=v_R/R$ ， $i_2=i_R$ ，因此，可以得到 i_2 与 v_1 的关系式，如公式(4)所示。

$$i_2 = v_1 / R \tag{4}$$

同理，对于 U_2 可以得到， $v_c = \frac{1}{C} \int i_c dt$ ， $i_c=i_4$ ，

$v_c=-v_2 \cdot U_S(t)$ ，因此， v_2 与 i_1 的关系式如下

$$v_2 \cdot U_S(t) = \frac{1}{C} \int i_1 dt \tag{5}$$

式中： i_1 和 v_1 为忆容器电流和电压的瞬时值； i_2 和 v_2 为忆阻器电流和电压的瞬时值； $U_S(t)$ 为一个时变的控制电压，方向如图 1 所示。乘法器将 $U_S(t)$ 和 v_2 进行乘法运算，使得表 1 中的 K_x 由常数变成了一个随时间变化的值 K_{x2} 。

这种变化也可以通过对比公式(4)、(5)与表 1 中 CCMR-VCMC 的转换公式得出，对于非线性转换的 CCMR-VCMC 电路，相关比例系数 $k_{x2}=C \cdot U_S(t)$ ， $k_{y2}=R$ ，因此忆容器忆容值的计算由公式(6)所述。

$$C_m = \frac{d\sigma_1}{d\varphi_1} = \frac{K_{x2} d\varphi_2}{K_{y2} dq_2} = \frac{K_{x2}}{K_{y2}} R_m = \frac{C \cdot U_S(t)}{R} R_m \tag{6}$$

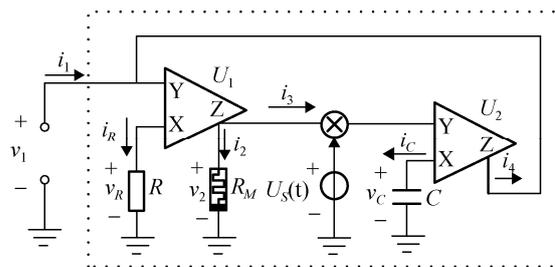


图 1 一种非线性 CCMR-VCMC 转换电路
Fig. 1 A nonlinear CCMR-VCMC conversion circuit

3 仿真实验

为了验证本文所提出方法的正确性，本节对图 1 中的忆容器电路进行了 PSpice 仿真，分别观察 $U_S(t)$ 为斜坡和周期信号时忆容器的相关特性。实验使用的忆阻器 PSpice 模型是文献[11]所提出的模型。由于忆容器的 $q-v$ 曲线、忆阻器阻值和忆容器容值的实时曲线要经过计算才能得到，因此，本文选择使用 matlab 来计算和处理实验数据和绘制曲线。

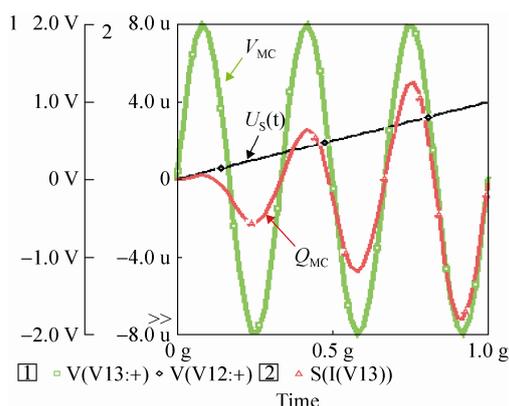
3.1 $U_S(t)$ 为斜坡信号

当 $U_S(t)$ 为斜坡信号时，设 $U_S(t)=kt+b$ ，其中， k 为斜率， b 为初始值。实验中， $U_S(t)$ 的斜率设置为 1，初始值为 0。图 2 为输入电压信号分别为 3 Hz、

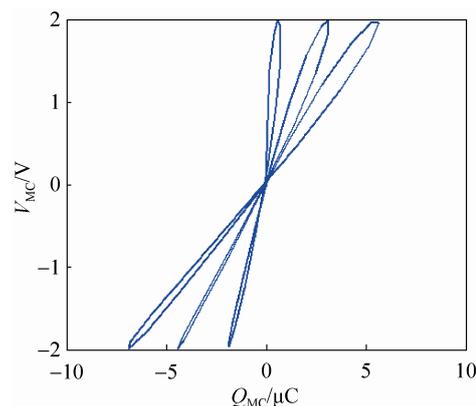
5 Hz 正弦波时忆容器在 0~1 s 时间内 $q-v$ 曲线的实验结果。可以看到, 忆容器的 $q-v$ 曲线呈现了多个“8”字形。“8”字形个数为激励信号在 1 s 内的周期数。通过观察 $q-v$ 曲线的形成过程, 可以知道这些 $q-v$ 曲线所形成的“8”字形在 1、3 象限内顺时针旋转。且随着时间的推移, 忆容器的 $q-v$ 迟滞回线收缩程度变大, 导致“8”字形越明显。

忆容器 $q-v$ 曲线的收缩程度就是在激励信号的一个周期内, 忆容值变化范围的大小。如果在激励信号的一个周期内, 忆容值的变化范围越大, $q-v$ 曲线的收缩程度越大, $q-v$ 曲线的“8”字形越明显; 反之, 如果忆容值变化范围很小, 甚至是保持不变, 则 $q-v$ 曲线收缩程度越小, 甚至会成为一条直线。图 2(a)和图 2(c)描述的是当激励信号为 2 V、频率分别为 3 Hz 和 5 Hz 的正弦电压, $U_S(t)$ 的斜率为 1,

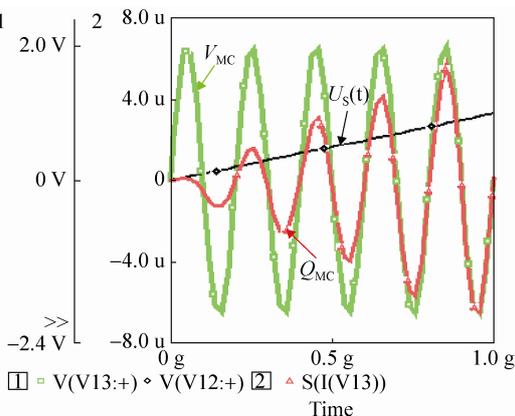
初始值为 0 的斜坡信号时, 忆容器的电压和电荷波形, 图 2(b)和图 2(d)是激励信号为 2 V、频率分别为 3 Hz 和 5 Hz 时, 忆容器的 $q-v$ 曲线。由于 $U_S(t)$ 的电压值会随着时间的不断增大, 忆容器的电流不再是一个幅值相同的正弦信号, 该信号的幅值会不断增大, 即随着斜坡信号的不断增大, 忆容器电荷量的变化范围也不断增大。由忆容值的计算公式可知, 忆容器在电压不变的情况下, 如果流经它的电荷量的变化范围变大, 则忆容值在一个周期信号内的变化范围变大, 相对应的 $q-v$ 曲线的“8”字形会变得更加明显。比较图 2(b)和图 2(d), 当激励信号频率由 3 Hz 上升至 5 Hz 时, 可以看到 $q-v$ 曲线收缩程度变大。这与基于线性变化的 CCMR 转 VCMC 模型在激励信号频率上升时, 迟滞回线收缩程度更大的特性一致。



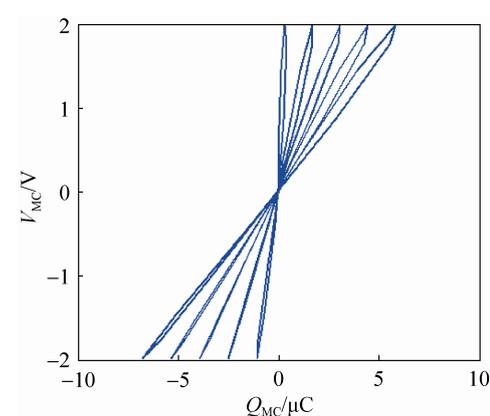
(a) $U_S(t)$ 斜率为 1, 输入信号为 3Hz 正弦波时的 V_{MC} 、 Q_{MC} 曲线



(b) $U_S(t)$ 斜率为 1, 输入信号为 3Hz 正弦波时忆容器 $q-v$ 曲线



(c) $U_S(t)$ 斜率为 1, 输入信号为 5Hz 正弦波时的 V_{MC} 、 Q_{MC} 曲线



(d) $U_S(t)$ 斜率为 1, 输入信号为 5Hz 正弦波时忆容器 $q-v$ 曲线

图 2 $U_S(t)$ 斜率为 1, 施加不同频率激励时忆容器 $q-v$ 曲线

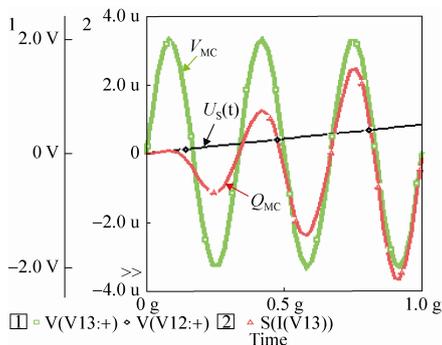
Fig. 2 $q-v$ curve of the memcapacitor when different frequency excitation are applied and the slope of $U_S(t)$ is 1

将激励信号保持为 2 V、3 Hz 的正弦波不变，改变控制信号的参数。在初始值为 0 时，分别将斜率 k 设置为 0.5 和 -1，则忆容器的 $q-v$ 曲线如图 3 所示。对比图 3(b)与图 2(b)，虽然曲线形状相似，但当 $U_S(t)$ 的斜率 k 变小时，在激励信号一个周期内忆容值的变化范围会随之变小。这个现象可以由忆容器的计算公式 $C_m = \frac{C \cdot U_S(t)}{R} R_m = \frac{C \cdot (kt+b)}{R} R_m$ 来解释。由于 $U_S(t)$ 不会改变施加在忆阻器上的电压值，故在两种情况下，忆阻值 R_m 的变化范围是一致的。 k 变小，忆容值 C_m 的变化范围就会变小。图 3(d)是 $U_S(t)$ 的斜率 k 为 -1 时，忆容器的 $q-v$ 曲线。可以观察到该曲线在 2、4 象限内逆时针旋转，且随着时间的推移，忆容器的 $q-v$ 迟滞回线的收缩程度变大，“8”字形越来越明显。

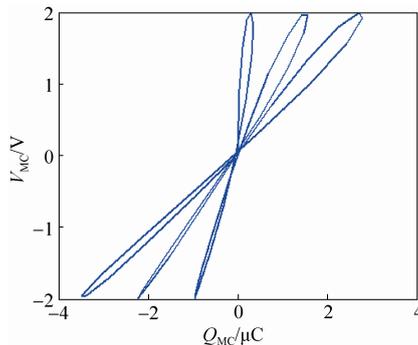
3.2 $U_S(t)$ 为周期信号

激励信号保持为 2 V、5 Hz 的正弦波，当 $U_S(t)$

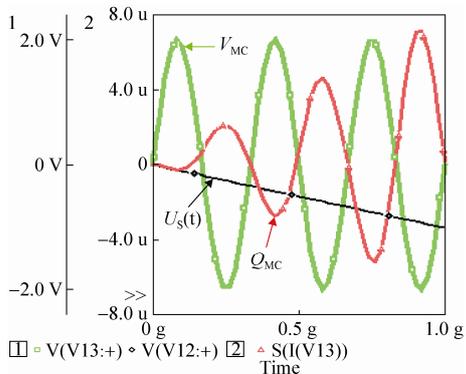
为 ± 1 V 频率分别为 5 Hz、2.5 Hz 的方波信号时，忆容器的 $q-v$ 曲线实验结果如图 4 所示。由于方波信号后半周期的电压值为 -1 V，导致忆容器的电流发生翻转，对比基于线性变化的 CCMR 转 VCMC 模型的 $q-v$ 曲线，可以知道原本在 3 象限内的曲线，关于 y 轴对称到第 4 象限内，如图 4(b) 所示。当 $U_S(t)$ 为 2.5 Hz 的方波信号时，忆容器 $q-v$ 曲线分布在 4 个象限中，如图 4(d) 所示。这是由于方波信号的周期为激励信号的两倍，在方波信号的前半周期内，控制信号为正电压，忆容器的 $q-v$ 曲线为在 1、3 象限内的“8”字形；在方波信号的后半周期内，控制信号为负电压，忆容器的电流发生翻转，忆容器的 $q-v$ 曲线落在 2、4 象限了。因此，当 $U_S(t)$ 为 2.5 Hz 方波信号时，忆容器 $q-v$ 曲线分布在 4 个象限中。由于方波信号只改变忆容器的电流方向，因此，图 4 中的 $q-v$ 曲线没有发生偏移。



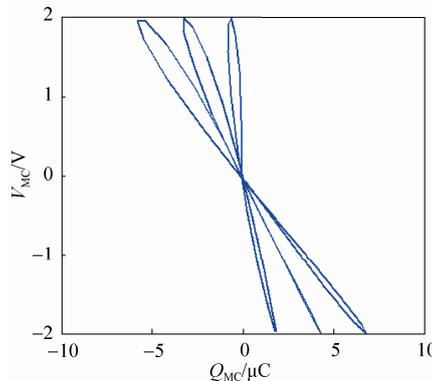
(a) $U_S(t)$ 斜率为 0.5, 激励为 3Hz 正弦波时的 V_{MC} 、 Q_{MC} 曲线



(b) $U_S(t)$ 斜率为 0.5, 激励为 3Hz 正弦波时的忆容器 $q-v$ 曲线



(c) $U_S(t)$ 斜率为 -1, 激励为 3Hz 正弦波时的 V_{MC} 、 Q_{MC} 曲线



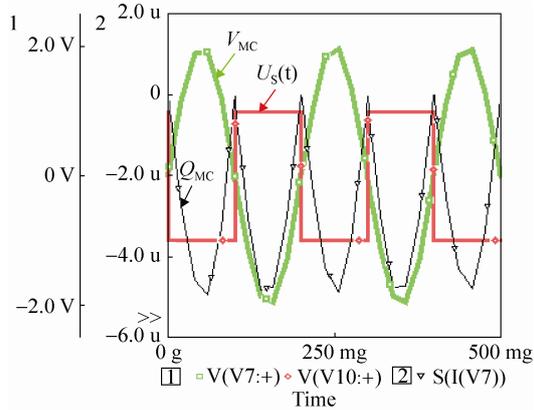
(d) $U_S(t)$ 斜率为 -1, 激励为 3Hz 正弦波时的忆容器 $q-v$ 曲线

图 3 $U_S(t)$ 为不同斜率的斜坡信号时忆容器的 $q-v$ 曲线

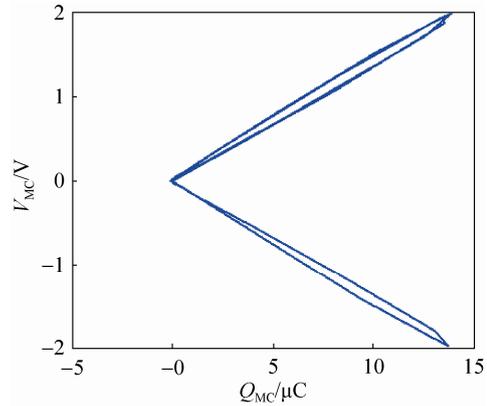
Fig. 3 $q-v$ curve of the memcapacitor when $U_S(t)$ is a slope signal with different slopes

上述实验中的方波信号实际上只是改变了忆容器的电流方向, 如果 $U_S(t)$ 为不同频率的正弦信号, 则既可以改变忆容器电流的方向, 又可以改变忆容器的电流大小。如果 $U_S(t)$ 是幅值为 1 V, 频率分别为 5 Hz、2.5 Hz 的正弦信号, 则忆容器的 $q-v$

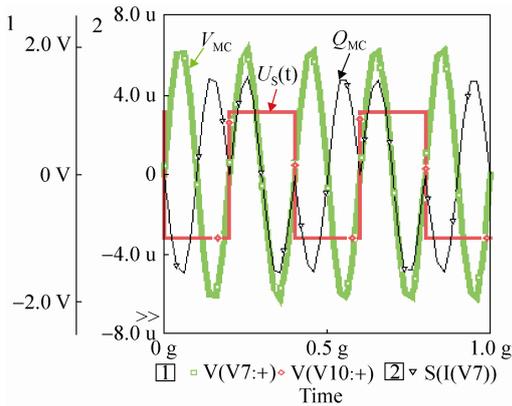
曲线如图 5 所示。对比图 4 和图 5, 可以看到在正弦信号下, $q-v$ 曲线发生了偏移。由于 $U_S(t)$ 改变了忆容器电流的大小, 导致忆容器电荷量的变化不再是关于零点对称的。



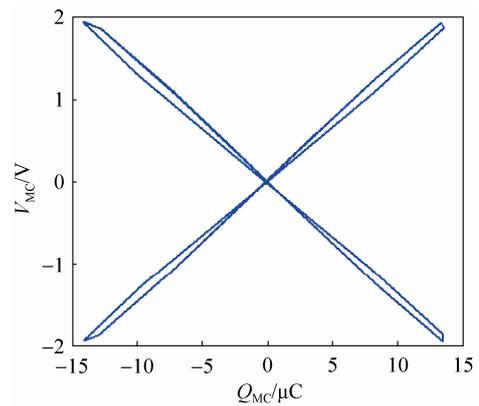
(a) $U_S(t)$ 为 5 Hz 方波时的 V_{MC} 、 Q_{MC} 曲线



(b) $U_S(t)$ 为 5 Hz 方波时的忆容器 $q-v$ 曲线



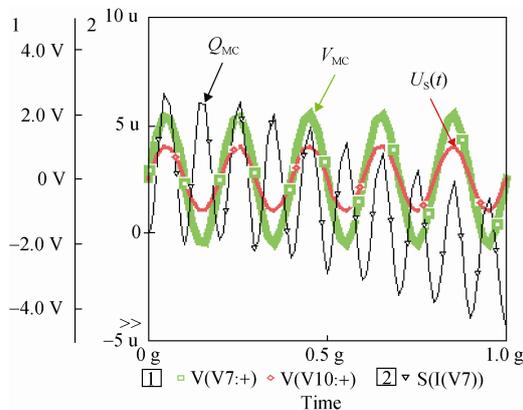
(c) $U_S(t)$ 为 2.5 Hz 方波时的 V_{MC} 、 Q_{MC} 曲线



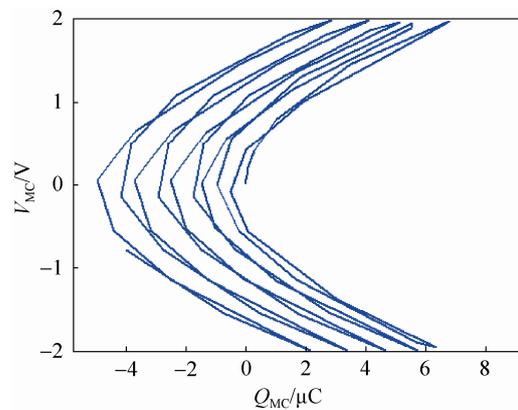
(d) $U_S(t)$ 为 2.5 Hz 方波时的忆容器 $q-v$ 曲线

图 4 $U_S(t)$ 为频率不同的方波信号时忆容器的 $q-v$ 曲线

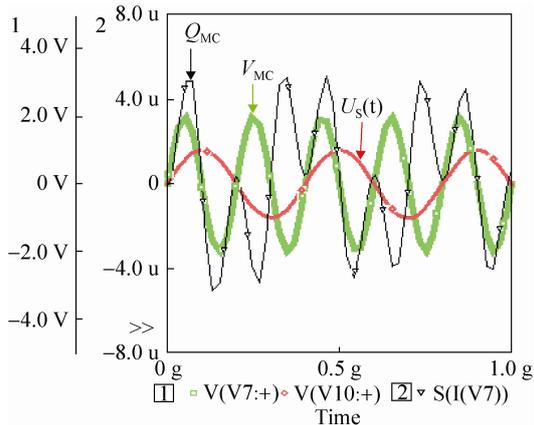
Fig. 4 $q-v$ curve of the memcapacitor when $U_S(t)$ is a square wave signal with different frequencies



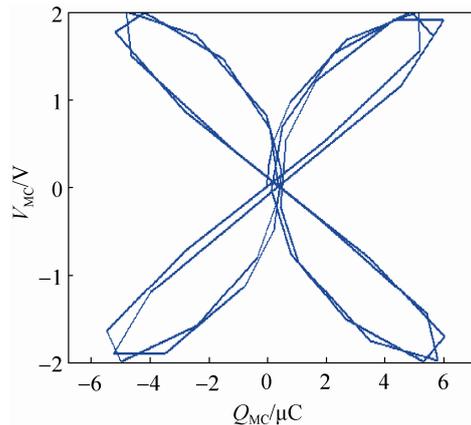
(a) $U_S(t)$ 为 5 Hz 正弦波时的 V_{MC} 、 Q_{MC} 曲线



(b) $U_S(t)$ 为 5 Hz 正弦波时的忆容器 $q-v$ 曲线



(c) $U_S(t)$ 为 2.5 Hz 正弦波时的 V_{MC} 、 Q_{MC} 曲线



(d) $U_S(t)$ 为 2.5 Hz 正弦波时的忆容器 $q-v$ 曲线

图 5 $U_S(t)$ 为频率不同的正弦波信号时忆容器的 $q-v$ 曲线

Fig. 5 $q-v$ curve of the memcapacitor when $U_S(t)$ is a sinusoidal signal with different frequencies

上述实验是通过观察忆容器的 $q-v$ 曲线来归纳忆容器的相关特性。实际上还可以通过观察忆容值和忆阻值随时间变化的曲线来归纳基于非线性变化的忆容器所具有的其他特性。

当 $U_S(t)$ 为 1 V、2.5 Hz 的正弦信号，激励信号为 2 V、5 Hz 的正弦信号时，图 1 中转换电路的波形如图 6 所示。图 6(a) 中的红色波形为忆容器两端的电压波形，即 2 V、5 Hz 的正弦电压激励信号，图 6(a) 中的绿色波形为忆阻器两端的电压波形，由于忆阻器的忆阻值会随着信号的通过而发生变化，忆阻器的电压不再是一个标准的正弦波，但它的频率还是 5 Hz。图 6(b) 中的绿色曲线为 $U_S(t)$ 信号，红色曲线为乘法器输出端的电压。图 6(c) 中的绿色曲线为流经忆容器的电流(电流坐标轴的范围是 -0.4~ 0.4 mA)，红色曲线为流经忆容器的电荷量(电荷量坐标轴的范围是 -6 ~6 μ C)。在图 6(c) 中可

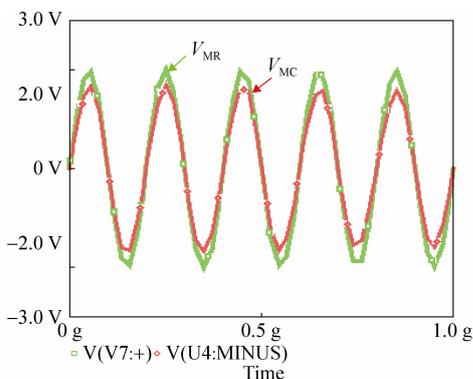
以看到，忆容器的电流不再是周期信号了，而忆容器的电荷量是一个 2.5 Hz 的周期信号。

由 PSpice 中得到的忆容器和忆阻器电流、电压的仿真数据，按照公式(7)、(8)就可以计算出忆阻器的忆阻值和忆容器的忆容值。

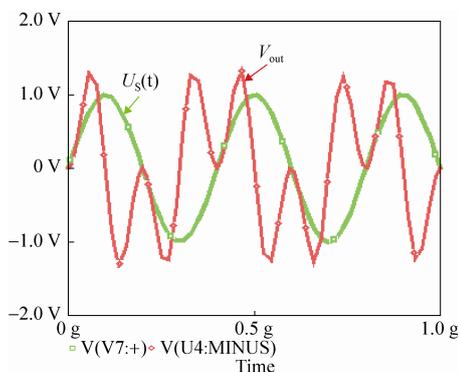
$$R_m = d\phi_2/dq_2 = v_2/i_2 \tag{7}$$

$$C_m = d\sigma_1/d\phi_1 = \int i_1 dt/v_1 \tag{8}$$

该转换电路中忆阻值和忆容值随时间变化的曲线如图 6(d) 所示。虚线是忆阻值曲线，实线是忆容值曲线。从曲线中可以观察到，忆容值与忆阻值波形的频率已经不再相同。另外，忆容值还会出现负值。由于忆容值是通过忆容器电荷除以它的电压计算而来的，当这两个值同时为零时，会导致计算结果出现较大的误差，因此，所计算的忆容值有时会出现较大的毛刺。



(a) 忆容器和忆阻器的电压曲线



(b) $U_S(t)$ 和乘法器输出端的电压曲线

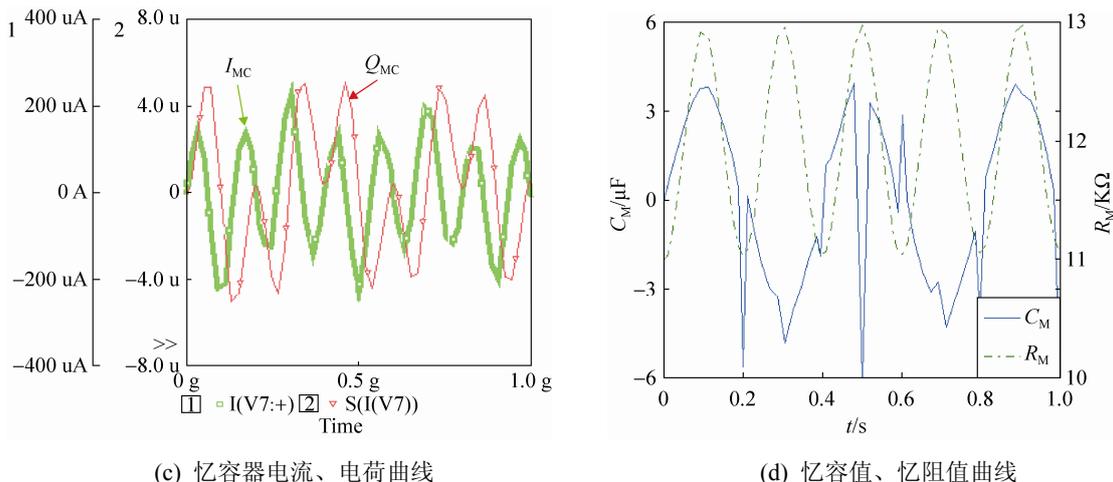


图 6 激励信号 $U_S(t)$ 为正弦信号时忆容器的相关变量曲线

Fig. 6 Curves of the memcapacitor of the related variables when excitation signal $U_S(t)$ is a sinusoidal signal

为进一步分析实验结果, 选取 0.5 s 内实验数据加以分析, 实验数据如表 2 所示。 U_S 为 $U_S(t)$ 信号的瞬时值, R_m 为忆阻器阻值, C_m 为忆容器的容

值。由表 2 分析可得, $U_S(t)$ 为正弦波信号, C_m 的值也是一个正弦波, 它们之间满足公式(6)的关系。

表 2 $U_S(t)$ 为 2.5 Hz 正弦波信号时的实验数据

Tab. 2 Experimental data when $U_S(t)$ as a 2.5 Hz sinusoidal signal

t (ms)	U_S (mV)	R_m (k Ω)	C_m (μ C)	t (ms)	U_S (mV)	R_m (k Ω)	C_m (μ C)
0.200	3.142	11.000	0.002	186.725	207.012	11.102	0.416
0.215	3.383	11.000	0.002	198.802	18.820	11.027	-5.621
0.246	3.867	11.000	0.003	210.685	-167.04	11.082	0.120
0.308	4.835	11.000	0.004	225.905	-395.77	11.334	-1.025
0.431	6.770	11.000	0.009	245.905	-660.19	11.875	-2.106
0.677	10.640	11.000	0.020	265.905	-859.98	12.463	-2.949
1.170	18.380	11.001	0.044	285.905	-975.59	12.874	-3.282
2.156	33.855	11.002	0.094	305.905	-995.70	12.950	-4.842
4.127	64.778	11.008	0.194	325.905	-918.34	12.662	-3.727
8.069	126.408	11.032	0.396	345.905	-751.09	12.121	-2.919
15.953	247.980	11.122	0.800	365.905	-510.32	11.531	-2.001
31.722	477.924	11.450	1.605	385.905	-219.60	11.119	-1.231
51.722	725.973	12.028	2.573	396.174	-60.068	11.037	-1.881
71.722	902.960	12.586	3.357	408.480	132.809	11.064	1.172
91.722	991.558	12.911	3.772	420.616	318.203	11.229	1.373
111.722	983.096	12.878	3.784	440.616	595.584	11.720	2.260
130.963	884.039	12.518	3.307	460.616	814.665	12.318	3.173
150.963	696.333	11.942	2.493	480.616	954.001	12.795	3.953
170.963	440.465	11.378	1.515	500.616	999.953	12.969	-6.124

4 结论

本文分析了忆阻器转换为忆容器的条件, 提出

了一种忆阻器转换为忆容器的非线性实现方法, 并以此方法为基础, 提出了一种简单的非线性转换电路来实现忆容器的模型。本文所提出的电路模型在

施加不同激励信号时, 会呈现出一些规律性的特性, 并且可以通过控制信号来调整忆容器的忆容值。这样一种新型的非线性忆阻器转换为忆容器的电路模型, 不仅对非线性电路特性的研究具有一定的指导意义, 同时也拓宽了忆容器的应用范围。

参考文献:

- [1] Chua L O. Memristor-The Missing Circuit Element[J]. IEEE Transactions on circuit theory (S0018-9324), 1971, 18(5): 507-519.
- [2] Ventra M D, Pershin Y V, Chua L O. Circuit Elements With Memory: Memristors, Memcapacitors and Meminductors[J]. Proceedings of the IEEE (S0018-9219), 2009, 97(10): 1717-1724.
- [3] Pershin Y V, Ventra M D. Memristive circuits simulate memcapacitors and meminductors[J]. Electronics Letters (S0013-5194), 2010, 46(7): 517-518.
- [4] Biolek D, Biolkova V. Mutator for transforming memristor into memcapacitor[J]. Electronics Letters (S0013-5194), 2010, 46(21): 1428-1429.
- [5] X.Y. Wang, A.L. Fitch, H.H.C. Lu, et al. Design of a memcapacitor emulator based on a memristor[J]. Phys. Lett. A (S0375- 9601), 2012, 376(4): 394-399.
- [6] 李贵三, 于东升. 悬浮型忆容器电路模型及其滤波电路分析[J]. 系统仿真学报, 2014, 27(1): 201-208.
Li Guisan, Yu Dongsheng. Analysis of Floating Memcapacitor Emulator and Its Application in Filter Circuits[J]. Journal of System Simulation, 2014, 27(1): 201-208.
- [7] 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): 098501.
Li Zhijun, Zeng Yicheng, Tan Zhiping. A universal emulator of mem-elements[J]. Acta Phys. Sin., 2014, 63(9): 098501.
- [8] Yu D S, Liang Y, Chen H, et al. Design of a practical memcapacitor emulator without grounded restriction[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems II: Express Briefs (S1549-7747), 2013, 60(4): 207-211.
- [9] 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 (S1549-7747), 2014, 61(10): 758-762.
- [10] Biolek D, Biolkova V, Kolka Z. Mutators simulating memcapacitors and meminductors[J]. Proceedings of Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, 2010: 800-803.
- [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): 193-200.
DUAN Zong-sheng, GAN Zhao-hui, WANG Qin. An Improved Memristor SPICE Model and Simulation[J]. Microelectronics & Computer, 2012, 29(8): 193-200.

《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 发布了 2017 版《中国学术期刊国际引证年报》, 《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”。

《年报》(2017 版)采用的统计源期刊为 20192 种, 涵盖 WoS 收录的 SCI 期刊 8874 种、SSCI 和 A&HCI 期刊 4645 种, ESCI 期刊 5578 种; 增补期刊 1762 种。参照中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 计算期刊影响力指数(CI), 对国内 6210 种学术期刊排序, 遴选了人文社科、自然科学与工程技术两个类别的 TOP10%为国际影响力品牌学术期刊。TOP5%以内的期刊为“最具国际影响力学术期刊”、TOP5-10%之间的为“国际影响力优秀学术期刊”。