

1-4-2019

## Design and Characteristic Analysis of Floating Flux-controlled Meminductor Emulator

Yang Ling

*School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*

Shi Ying

*School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*

Bingmeng Hu

*School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*

Chen Lu

*School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*

*See next page for additional authors*

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.

---

# Design and Characteristic Analysis of Floating Flux-controlled Meminductor Emulator

## Abstract

**Abstract:** *A mathematical model of a flux-controlled meminductor is proposed, which is directly from the definition. A practical floating flux-controlled meminductor emulator is implemented with common off-the-shelf components based on the model, which does not contain any memristor. In the different signals and parameters, the system-level circuit simulation experiments are presented by Matlab and Multisim simulation platform. The implementation of hardware circuit and the results of performance tests are presented.* Software simulation and hardware test results show that the flux-current relation of the equivalent meminductor typically behaves as a pinched hysteresis loop characteristic and depends on the frequencies and amplitudes of applied voltage stimulus, which indicates that it is a kind of nonlinear inductor with memory and accords with the concept of meminductor. It provides for the devices simulation entities to carry out new application circuits in electronic field.

## Keywords

floating, flux-controlled meminductor, emulator, hysteretic loop

## Authors

Yang Ling, Shi Ying, Bingmeng Hu, Chen Lu, and Su Jing

## Recommended Citation

Yang Ling, Shi Ying, Hu Bingmeng, Chen Lu, Su Jing. Design and Characteristic Analysis of Floating Flux-controlled Meminductor Emulator[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(4): 1337-1346.

## 一种浮地磁控忆感模拟器的设计及其特性分析

杨凌, 石莹, 胡丙萌, 陈璐, 苏婧

(兰州大学, 信息科学与工程学院, 兰州 730000)

**摘要:** 直接从忆感器的定义出发, 建立了一种磁控忆感器的数学模型, 基于该模型采用通用电路元器件设计了一种不包含忆阻器的磁控忆感器“浮地”电路模拟器, 借助 Matlab 和 Multisim 仿真工具软件, 进行了等效忆感电路模拟器在不同信号、不同参数下的系统级仿真实验, 完成了硬件电路的实现及性能测试。软件仿真和硬件测试结果均表明: 所设计的磁控忆感器具有磁通-电流之间的自收缩磁滞回线特性, 是一种具有记忆特性的非线性电感, 这与理论概念上的忆感器特性相吻合, 从而为忆感器在电子学领域产生新的应用电路提供了器件模拟实体。

**关键词:** 浮地; 磁控忆感器; 模拟器; 磁滞回线特性

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 04-1337-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201804016

## Design and Characteristic Analysis of Floating Flux-controlled Meminductor Emulator

Yang Ling, Shi Ying, Hu Bingmeng, Chen Lu, Su Jing

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

**Abstract:** A mathematical model of a flux-controlled meminductor is proposed, which is directly from the definition. A practical floating flux-controlled meminductor emulator is implemented with common off-the-shelf components based on the model, which does not contain any memristor. In the different signals and parameters, the system-level circuit simulation experiments are presented by Matlab and Multisim simulation platform. The implementation of hardware circuit and the results of performance tests are presented. Software simulation and hardware test results show that the flux-current relation of the equivalent meminductor typically behaves as a pinched hysteresis loop characteristic and depends on the frequencies and amplitudes of applied voltage stimulus, which indicates that it is a kind of nonlinear inductor with memory and accords with the concept of meminductor. It provides for the devices simulation entities to carry out new application circuits in electronic field.

**Keywords:** floating; flux-controlled meminductor; emulator; hysteretic loop

## 引言

1971年, 蔡少堂教授根据电路变量组合完备性的原理提出了忆阻的概念<sup>[1]</sup>。2008年5月, 惠普



收稿日期: 2016-05-09 修回日期: 2016-07-10;  
作者简介: 杨凌(1966-), 女, 甘肃张掖, 硕士, 副教授, 研究方向为非线性电路及人工神经网络; 石莹(通讯作者 1995-), 男, 内蒙古包头, 本科, 研究方向为电子电路。

实验室宣布成功制造了物理实现的忆阻器<sup>[2]</sup>, 同年11月, 在伯克利大学举行的忆阻器和忆阻系统国际研讨会上, 定义了忆容器和忆感器两种记忆元件, 这两种新的电路元件是在忆阻器基础上的推广, 它们与忆阻器的相同之处是都具有记忆能力, 不同之处在于这两种元件能存储能量。这些新的记忆元件在电子学领域的出现, 展示了一个新的未知的领域, 将有可能导致一系列的变革, 同时也提供

了一个新的工具,可以从一个新的角度来观察旧的科学问题<sup>[3]</sup>。

由于制造技术的严格限制,记忆元件尚未进入商业化生产阶段,所以还无法从市场直接购得实际的元件,研究人员通常通过搭建记忆元件的电路模拟器(即二端口等效电路)对其进行研究。相对于忆阻器,忆容器和忆感器的仿真模型和电路模拟器研究较少,而且大部分忆容器和忆感器的模拟器都是基于忆阻器来实现<sup>[4-10]</sup>。Biolk等<sup>[4]</sup>提出了通过二端口电量关系的线性变换将忆阻器转化为忆容器和忆感器的思想。Pershin等<sup>[5]</sup>提出了一个简单的变类器,可以将忆阻器转换为忆容器和忆感器,但他们所实现的忆容器和忆感器中包含了一个串联的寄生电阻,且提出的模拟器只能实现“接地”方式,不能任意接入电路使用。梁燕等<sup>[6]</sup>基于光耦电阻的阻值可控性建立了一种磁通控制型忆阻器的等效电路模型,进而设计了一种磁通控制型忆感器的等效电路并研究了其韦-安(即磁通-电流)关系的非线性,其所实现的忆阻器及忆感器也只能实现“接地”方式。史致远<sup>[7]</sup>等采用文献[8]中的忆阻模拟器,并根据文献[5]的方法建立了一种忆感器的电路模拟器,并通过 Matlab 仿真分析和硬件电路测试研究了忆感器的韦-安关系,他们设计的忆感器模拟器同样受制于“接地”限制。为了使所设计的电路模拟器可以任意接入电路使用, Pershin等<sup>[9]</sup>改进了文献[5]的电路,采用第二代电流传输器将“浮地”忆阻器转换为“浮地”忆容器和忆感器,但仅限于理论分析。Yu等在文献[10-11]中采用通用电路元器件完成了一种磁控忆阻器的“浮地”设计,并分别实现了由“浮地”磁控忆阻器到忆容器和忆感器的转换。Sah等<sup>[12]</sup>采用第二代电流传输器实现了由“接地”忆阻器到“浮地”忆感器的转换。上述有关忆容器和忆感器的模拟器设计中,均包含两部分内容,一是忆阻器的电路模拟器设计,二是转换电路的设计,因此电路实现较为繁琐。

文献[13]直接从忆容器的定义出发,建立了其数学模型,并设计了不包含忆阻器的忆容器的电路

模拟器,但其所设计的忆容器依然受制于“接地”限制。本文借鉴文献[13]的思想,直接从忆感器的定义出发,建立了一种磁控忆感器的数学模型,并基于该模型,采用通用模拟电路元器件完成了其“浮地”电路模拟器的设计,最后通过软件仿真实验和硬件电路测试研究了其基本电特性。

## 1 忆感器的定义及其分类

忆感器的磁通-电流( $\varphi-i$ )关系与其所经历的历史有关。文献[3]定义了两类忆感系统—电流控制型忆感系统和磁通控制型忆感系统。

一个  $n$  阶电流控制型忆感系统如式(1)所示。

$$\begin{cases} \varphi(t) = L_M(x, i, t)i(t) \\ \dot{x} = f(x, i, t) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\varphi(t)$  为忆感器在时刻  $t$  的磁通;  $i$  表示  $t$  时刻流经忆感器的电流;  $x$  是系统的状态变量;  $f(\cdot)$  为  $n$  维连续的矢量函数;  $L_M$  为忆感,其大小取决于系统的状态变量  $x$ 。由此电流控制型忆感器可以表示为

$$\varphi(t) = L_M \left[ \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \right] i(t) \quad (2)$$

一个  $n$  阶磁通控制型忆感系统如式(3)所示。

$$\begin{cases} i(t) = L_M^{-1}(x, \varphi, t)\varphi(t) \\ \dot{x} = f(x, \varphi, t) \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $L_M^{-1}$  为忆感值的倒数。由此磁通控制型忆感器(简称磁控忆感器)可以表示为

$$i(t) = L_M^{-1} \left[ \int_{t_0}^t \varphi(\tau) d\tau \right] \varphi(t) \quad (4)$$

## 2 磁控忆感器的“浮地”电路模拟器设计

根据磁控忆感器的定义,类似于忆阻器<sup>[2]</sup>和忆容器<sup>[13]</sup>的建模方法,本文提出了一种磁控忆感器的数学模型,如式(5)所示。

$$\frac{1}{L_M(t)} = \frac{1}{L_{M \max}} + x(t) \left( \frac{1}{L_{M \min}} - \frac{1}{L_{M \max}} \right),$$

$$L_M \in (L_{M \min}, L_{M \max}) \quad (5)$$

其中,  $L_{M \min}$  和  $L_{M \max}$  表示最小忆感值和最大忆感值, 系统状态变量  $x(t)$  随磁通的变化率用窗函数  $window(x)$  描述, 如式(6)所示。

$$\dot{x} = k\varphi(t)window(x) \quad (6)$$

其中,  $k$  为实常数。在记忆元件的建模中, 常用的窗函数有矩形窗<sup>[3,5]</sup>、Jogleke 窗<sup>[14]</sup>和 Biolek 窗<sup>[15]</sup>, 为简化电路模拟器的设计, 本文借鉴文献[13]的建模方法, 取线性窗函数, 即令  $window(x) = 1$ , 则系统的状态变量函数可表示为

$$x(t) = x_0 + k \int_0^t \varphi(\tau) d\tau \quad (7)$$

其中,  $x_0$  表示初始状态, 对应忆感器的初始值  $L_{M0}$ , 将式(7)带入式(5)可得

$$\frac{1}{L_M(t)} = \frac{1}{L_{M0}} + k' \int_0^t \varphi(\tau) d\tau \quad (8)$$

其中,  $k' = k \left( \frac{1}{L_{M \min}} - \frac{1}{L_{M \max}} \right)$ 。

将式(8)带入式(4)可得

$$i(t) = \left( \frac{1}{L_{M0}} + k' \int_0^t \varphi(\tau) d\tau \right) \varphi(t) \quad (9)$$

由以上推导可知, 本文所提出的磁控忆感电路模拟器的设计包括三部分工作: 一是磁通产生电路的设计; 二是磁通积分电路的设计, 实现式(7)也即式(6)的功能; 三是由磁通控制  $L_M^{-1}$  的电路设计, 实现式(9)的功能。其中, 主要涉及到磁通  $\varphi(t)$  的产生(即电压积分),  $\varphi(t)$  的积分、放大以及  $\varphi(t)$  与其积分量(即状态变量  $x(t)$ )之间的乘法运算等, 上述运算关系可方便地采用运放、乘法器等模拟电子元件实现。为使所设计的忆感模拟器可以方便地接入电路使用, 需要考虑其二端口的“浮地”设计。具体实现电路及各元件参数如图 1 所示。

图 1 中, U1、U2、U6、U7、U8 均为电流反馈型运放 AD844, U3、U4 为通用型集成运放 LM358, U5 为乘法器 AD633。U1、U2 对忆感器的端口电压  $v_A$  和  $v_B$  进行差分运算, 以获得忆感器的端口电压。U3 构成积分电路以获取磁通  $\varphi(t)$ 。U4 对磁通进行积分以获取状态变量  $x(t)$ 。引入并联电阻  $R_8, R_9$  的作用是抑制积分电路的零漂, 阻止运放输出饱和。乘法器 U5 完成磁通  $\varphi(t)$  与状态变量  $x(t)$  之间的乘法运算, 并与  $R_3$  和 U6、U7 和 U8 共同建立了忆感器磁通与电流之间的非线性数学关系。

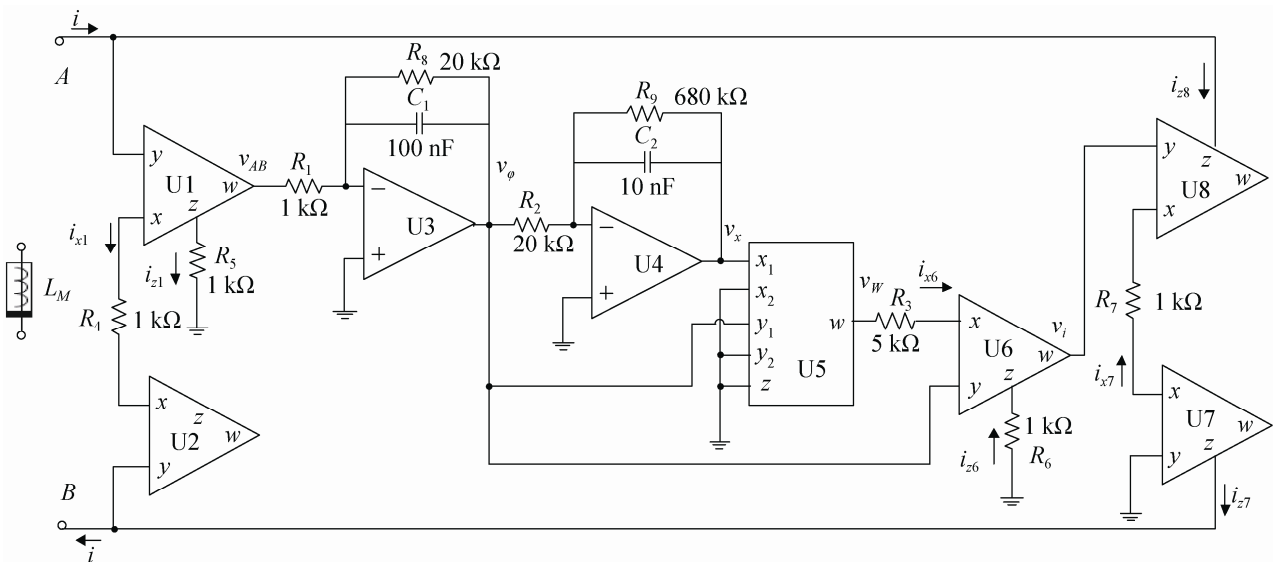


图 1 磁控忆感器的“浮地”电路模拟器

Fig.1 A flux-controlled floating meminductor emulator

根据电流反馈型运放 AD844 端口特性,  $x$  端电压跟随  $y$  端电压,  $z$  端电流跟随  $x$  端电流, 且  $i_x$ ,  $i_z$  方向相同,  $w$  端电压跟随  $z$  端电压,  $y$  端输入电流为  $0A$ , 可知,

$$v_y = v_x, \quad i_z = i_x, \quad v_z = v_w, \quad i_y = 0 \quad (10)$$

令  $R_4=R_5$ , 根据式(10)所描述的 AD844 的端口特性, 可得电路模拟器的端口电压  $v_{AB} = v_A - v_B$ ,  $v_{AB}(t)$  经过积分电路 U3 获得代表磁通的电压  $v_\varphi(t) = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^t v_{AB}(\tau) d\tau = -\frac{1}{R_1 C_1} \varphi(t)$ ,  $v_\varphi(t)$  经过积分电路 U4 以获得代表状态变量  $x(t)$  的电压  $v_x(t) = -\frac{1}{R_2 C_2} \int_0^t v_\varphi(\tau) d\tau$ , 根据 AD633 的输入输出规律, 可得 U5 的输出电压为

$$v_w t = \frac{1}{10} v_\varphi t v_x(t) = -\frac{1}{10 R_1^2 R_2 R_3 C_1^2 C_2} \varphi(t) \int_0^t \varphi(\tau) d\tau$$

由于电流反馈运算放大器 AD844 的  $x$  端和  $y$  端存在虚短路, 可得流入 U6  $x$  端的电流为

$$i_{x6} t = \frac{v_w t - v_\varphi t}{R_3} = \left( \frac{1}{R_1 R_3 C_1} - \frac{1}{10 R_1^2 R_2 R_3 C_1^2 C_2} \int_0^t \varphi(\tau) d\tau \right) \varphi(t)$$

由图并根据 AD844 的特性可得 U6 的输出电压为  $v_1 t = -R_6 i_{z6}(t) = -R_6 i_{x6}(t)$ ,  $i_{x7} t = -\frac{v_1 t}{R_7}$ 。

由于  $R_6=R_7$ , 所以有  $i_{x6}(t) = i_{x7}(t)$ 。

由图 1 并根据 AD844 的特性可得忆感模拟器的端口电流为  $i(t) = i_{z8}(t) = i_{x7}(t) = i_{x6}(t)$ 。

由上述分析可见, U6、U7 和 U8 实质上构成由  $i_{x6}$  控制的双端输出的电流控制电流源, 并反馈为忆感器的两个端口电流, 在图 1 所示电流方向下

$$i(t) = \left( \frac{1}{R_1 R_3 C_1} - \frac{1}{10 R_1^2 R_2 R_3 C_1^2 C_2} \int_0^t \varphi(\tau) d\tau \right) \varphi(t) \quad (11)$$

比较式(11)与式(9)可知,  $L_{M0} = R_1 R_3 C_1$ ,

$k'^{-1} = 10 R_1^2 R_2 R_3 C_1^2 C_2$ , 则电路的设计完全符合所建磁通控制型忆感器的模型定义。在图 1 所示的电路元件参数下, 磁控忆感器的  $L_{M0} = 0.5H$ ,  $k' = 10^5 H^{-1} Wb^{-1} s^{-1}$ 。

对无源磁控忆感器的有源二端口等效设计主要是通过  $i_{x6}$  控制的双端输出的电流控制电流源来实现的, 电流源输出的两个端口电流的大小相等、方向相反, 保证了忆感器的输入电流与输出电流的大小相等、方向相反, 从而满足了无源忆感器的二端口特性。

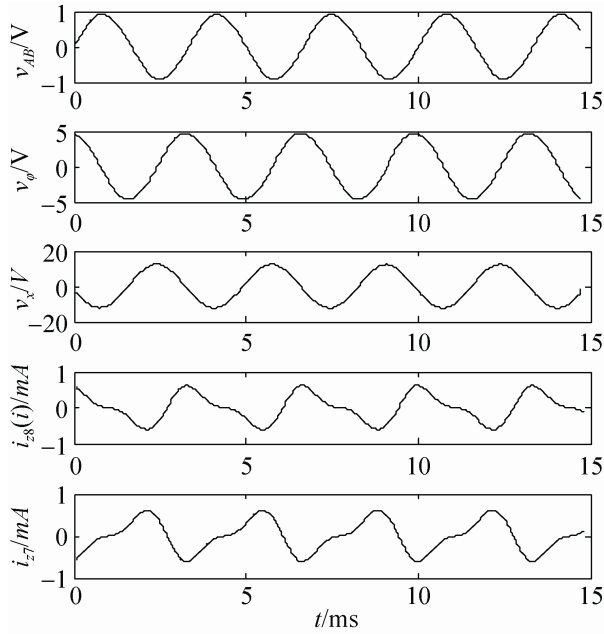
电路的“浮地”设计主要是通过电流反馈运放 U1 和 U2 对忆感器的两个端口电压进行差分运算实现的, 且模拟器的 A 和 B 端口完全对称并且等效, 任意一端口均可以“浮地”也可以“接地”, 故图 1 所示的磁控忆感器的电路模拟器可方便地任意接入电路使用。

### 3 磁控忆感模拟器的基本电特性分析

不同于传统电感元件, 忆感器的显著特点是电感值的受控性。以下采用 Matlab 和 Multisim 的混合仿真方法, 对磁控忆感等效电路及其韦安关系进行仿真分析。在图 1 所示电路参数设置下, 端口施加不同的交变激励电压, 研究本文所设计的磁控忆感器的基本电特性。

#### 3.1 韦-安关系

首先, 基于 Multisim 仿真平台, 在图 1 所示电路的端口施加正弦激励电压  $u(t) = A \cdot \sin(2\pi f t)$ , 其中取  $f=300 \text{ Hz}$ ,  $A=1V$ , 将数据导入 Matlab 仿真软件, 画出  $v_x(t)$ 、 $v_\varphi(t)$  和  $i(t)$  的波形如图 2(a)所示。其次, 分别改变电压的频率  $f$  和幅度  $A$ , 用示波器观察通过忆感器的磁通与电流之间的变化曲线。为了比较不同频率及不同幅度变化时忆感器的韦-安(磁通-电流)关系曲线的变化情况, 画出了不同正弦电压信号激励下, 本文所设计的磁控忆感模拟器的韦-安变化关系如图 2(b)(c)所示。



(a) 时域波形

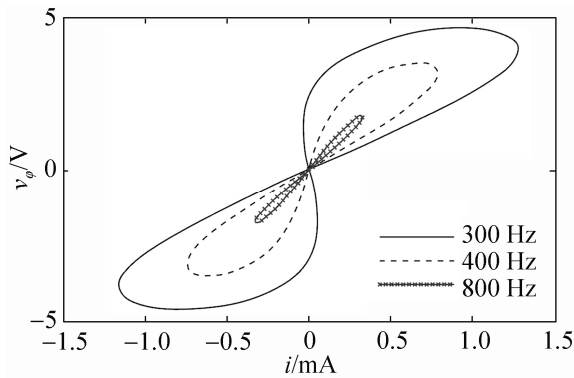
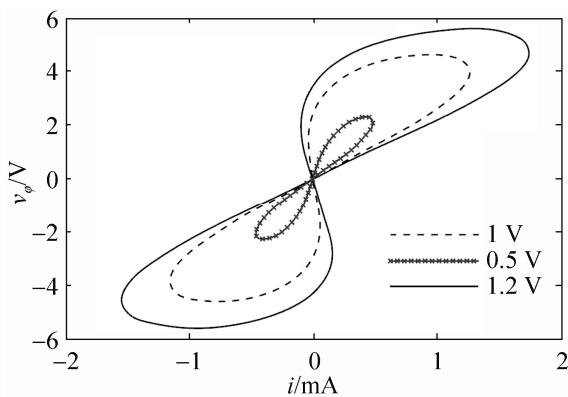
(b) 固定  $A=1V$ , 取不同的  $f$  值(c) 固定  $f=300Hz$ , 取不同的  $A$  值

图2 正弦电压激励下磁控忆感模拟器的韦-安关系  
Fig.2 The flux-current characteristic of meminductor emulator in sinusoidal input

由图 2(a)可见, 当对图 1 所示的电路施加正弦交变电压时,  $v_{AB}(t)$ 、 $v_{\phi}(t)$  和  $v_x(t)$  依次会产生  $\pi/2$  的相移, 从而表明了模拟器电路中两个积分器的正确性和有效性。  $i_{z8}$  和  $i_{z7}$  大小相等、方向相反, 这与理论分析的结果相一致, 表明仿真的忆感器符合无源二端口元件的端口电流特性。结合图 2(a)~(c) 可以看出, 忆感器的电流与磁通同时过零点, 韦-安关系相图呈现磁滞环形, 忆感器表现出典型的非线性特性。

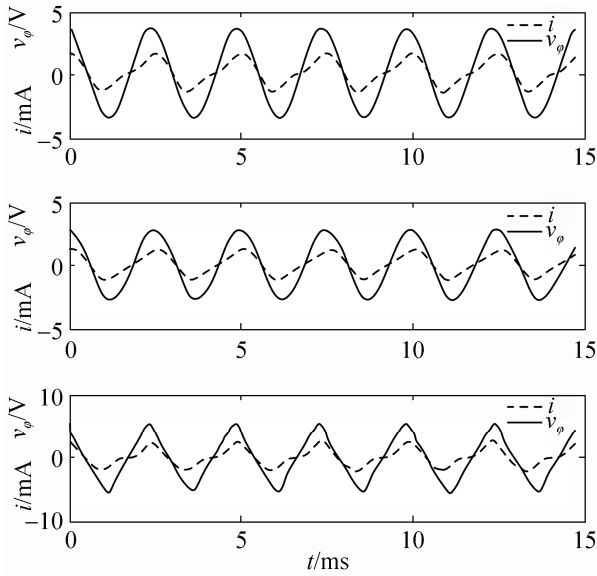
由图 2(b)(c)可见, 当固定激励信号的幅值时, 随着频率的逐渐增大, 磁滞环逐渐向内收缩, 直至退化为直线, 这说明, 当激励信号频率很高时, 忆感器将退化为线性电感, 而失去其记忆性; 当固定激励信号的频率时, 幅值减小, 磁滞环向内收缩。忆感器输入端口的韦-安关系曲线不仅与输入电压的频率有关, 而且与输入电压的幅值有关。

接着在图 1 所示电路的端口分别施加正弦波、方波和三角波电压信号, 并取交变信号的幅值  $A=1V$ , 频率  $f=400Hz$ , 采用上述同样的 Multisim 和 Matlab 混合仿真方法, 得到磁控忆感模拟器在不同交变信号激励下的韦-安时域波形和相图如图 3 所示。

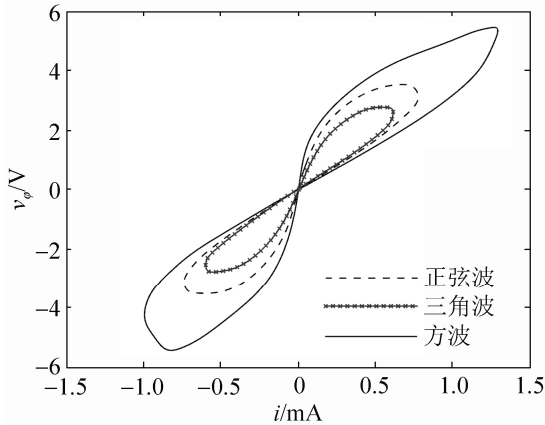
由图 3 可见, 在不同的交变电压信号激励下, 本文所设计的磁控忆感器的电流与磁通均同时过零点, 韦-安关系相图均呈现自收缩磁滞回线特性, 符合忆感器所应具有的基本特性<sup>[3,16,17]</sup>。

### 3.2 忆感倒数-磁通关系

由前述分析可知,  $v_{\phi}(t)$  的变化可以反映忆感磁通的变化。分析(8)与(13)式, 可以得到, 忆感倒数的值可以由  $v_x(t)$  加一个常数并经过线性变换即可得到, 因此  $v_x(t)$  的变化可以反映忆感倒数 ( $L_M^{-1}$ ) 的变化。取  $A=1V$ ,  $f$  分别为 300Hz、400Hz、800Hz, 得到代表磁通控制型忆感器的忆感倒数与磁通的相图如图 4 所示。



(a) 时域波形



(b) 韦-安关系

图3 不同交变信号激励下磁控忆感模拟器的韦-安关系  
Fig.3 The flux-current characteristic in the different alternating signals

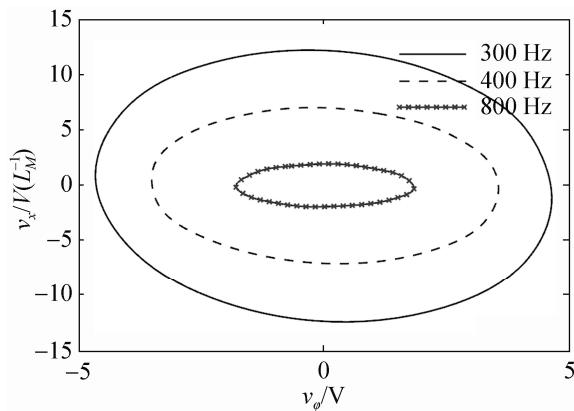


图4 不同频率信号激励下磁控忆感模拟器的  $L_M^{-1}$ - $\varphi$  关系  
Fig.4 The  $L_M^{-1}$ - $\varphi$  characteristics in different frequency signals

由图4可见,除最大值最小值外,同一个忆感值的倒数均对应有两个磁通的值。同一频率下,忆感值有最大值和最小值点,且出现在磁通为零的时刻。随着频率的增加,  $v_x(t)$  和  $v_\varphi(t)$  的变化范围均逐渐减小,这是由于  $v_x(t)$  和  $v_\varphi(t)$  分别与输入电压信号的频率  $f$  和频率的平方  $f^2$  成反比关系。忆感值倒数的范围也逐渐变小,即忆感值的变化范围逐渐减小,最终将趋于忆感值的初始值  $L_{M0}$ 。

### 3.3 电荷-磁通积分关系

由磁控忆感器的定义式  $L_M(\varphi) = \frac{d\rho}{dq} c^{[18]}$ , 其中

$\rho = \int_0^t \varphi(\tau) d\tau$  可知, 忆感值实质等于  $\rho-q$  图像的

斜率, 则忆感值倒数实质等于  $q-\rho$  图像的斜率。经过对图1电路的推导可知,  $v_x(t)$  可反映  $\rho$  的变化。图5所示为忆感模拟器在不同频率下的  $q-v_x$  关系相图。

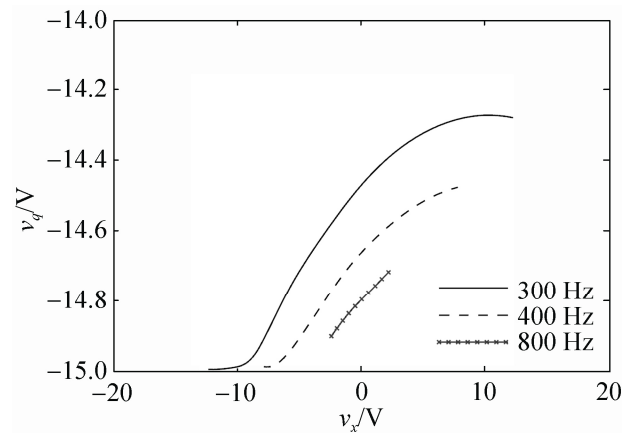


图5 不同频率信号激励下磁控忆感模拟器的  $q-\rho$  关系  
Fig.5 The  $q-\rho$  characteristics in different frequency signals

由图5可见,在同一频率下,  $q-\rho$  特性曲线为一条弯曲连续的曲线,斜率在变化,表明忆感值倒数不是一个定值。随着频率的增加,  $q$  和  $v_x$  的变化范围逐渐减小,图像的斜率变化范围也逐渐变小,即忆感值逐渐趋向于一个定值。以上实验现象与图2(b)和图4结论相吻合。



### 3.4 忆感值随时间、频率的变化关系

基于 Matlab 仿真平台,分别在图 1 所示电路端口施加正弦波、方波和三角波电压信号,取交变信号的幅值  $A=1V$ , 频率变化范围与图 2(b)相同,可画出本文所设计的磁控忆感器的忆感值随时间、频率变化的三维关系如图 6 所示。

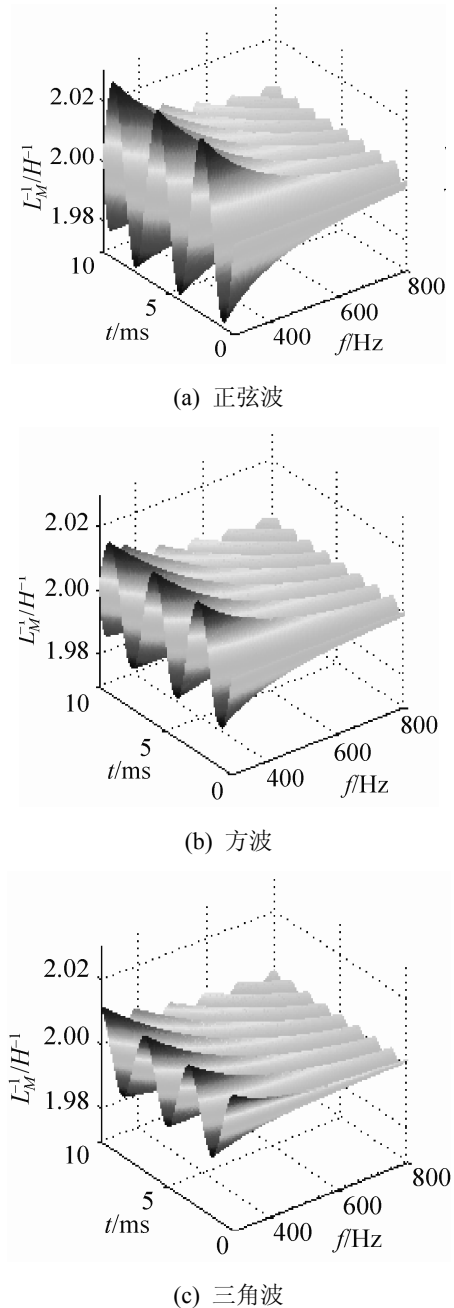


图 6 不同交变信号激励下磁控忆感模拟器  $L_M^{-1} - f - t$  三维关系

Fig.6 3 D plot of  $L_M^{-1} - f - t$  of the flux-controlled meminductor emulator in the different alternating signals

以下以激励信号为正弦电压  $u(t) = A \cdot \sin(2\pi ft)$  为例说明。在图 1 所示电路参数下,由于忆感器的初始值为  $L_{M0}=0.5H$ ,  $\varphi_0 = 0Wb$ ,  $k' = 10^5 H^{-1}Wb^{-1}s^{-1}$ , 所以根据式(7)以及对图 1 电路的推导可得

$$x(t) = -\frac{A}{(2\pi f)^2} \sin(2\pi ft) \quad (12)$$

由式(12)可知,系统的状态变量  $x(t)$  的大小与频率  $f$  的平方成反比,所以随着  $f$  的增加,  $x(t)$  逐渐减小。进一步由式(8)可得

$$\frac{1}{L_M(t)} = \frac{1}{L_{M0}} - \frac{Ak'}{(2\pi f)^2} \sin \sin(2\pi ft) \quad (13)$$

可见,本文所设计的磁控忆感器的忆感值  $L_M(t)$  是频率的函数,随着  $f$  的增大,  $\frac{1}{L_M(t)}$  的变化范围逐渐减小,即忆感值  $L_M(t)$  的变化越来越平缓,  $L_M(t)$  最终趋于忆感值的初始值  $L_{M0}$ 。图 6(b)(c) 分别为方波和三角波经过傅里叶级数展开得到的结果。

表 1 所示为正弦信号激励下,不同频率、不同时间下忆感值的数值列表。可以看出,频率增大时,忆感值的相对变化范围变小,数值分析与理论分析和仿真结果一致。

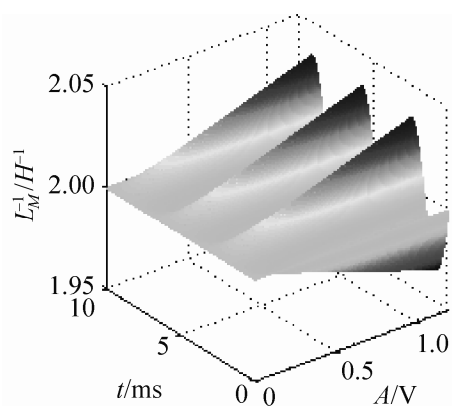
表 1 不同频率、时间下忆感值对比

Tab.1 Comparison of meminductance values at different frequencies and times

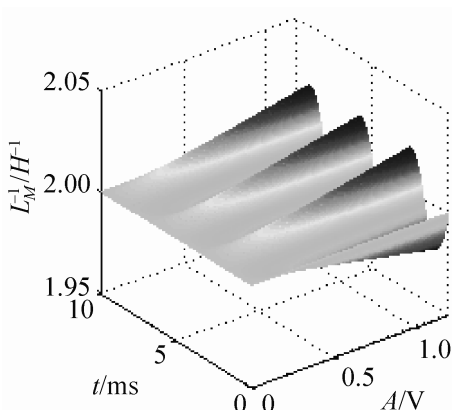
频率/Hz	时间/ms					
	0	0.5	1	1.5	2	2.5
300	0.500	0.505	0.506	0.502	0.495	0.493
400	0.500	0.503	0.502	0.497	0.496	0.500
800	0.500	0.501	0.499	0.501	0.499	0.500

### 3.5 忆感值随时间、幅度的变化关系

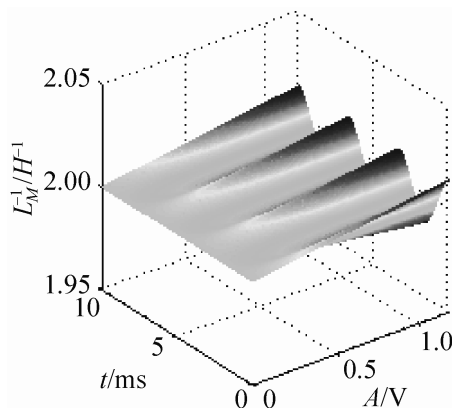
类似的,在图 1 所示电路参数下,由于忆感器的初始值为  $L_{M0}=0.5H$ ,  $\varphi_0 = 0Wb$ , 常数  $k' = 10^5 H^{-1}Wb^{-1}s^{-1}$ , 取  $f=300Hz$ , 幅度变化范围与图 2(c)相同,可画出本文所设计的磁控忆感器的忆感值随时间、幅度变化的三维关系如图 7 所示。



(a) 正弦波



(b) 方波



(c) 三角波

图7 不同交变信号激励下  
磁控忆感模拟器  $L_M^{-1} - A - t$  三维关系  
Fig.7 3D plot of  $L_M^{-1} - A - t$  of the flux-controlled  
meminductor emulator in the different alternating signals

可见, 本文设计的磁控忆感器的忆感值  $L_M(t)$  是输入信号幅度的函数, 随着  $A$  的减小,  $\frac{1}{L_M(t)}$  的变化范围逐渐减小, 即忆感值  $L_M(t)$  的变化越来越

平缓,  $L_M(t)$  最终趋于忆感值的初始值  $L_{M0}$ 。图7(b)~(c)分别为方波和三角波经过傅里叶级数展开得到的结果。

从图6和图7所示的忆感值随时间的变化截面可以看出, 本文所设计的磁控忆感器的忆感值随时间是连续性变化的, 任一时刻的忆感值都与其上一时刻的忆感值相关, 体现了忆感器的记忆特性。

## 4 硬件实现及实验验证

图1所示的电路的硬件实现如图8所示, 其中, U1、U2、U6、U7、U8 选取为 AD844N 型电流反馈运算放大器芯片, U3、U4 选取为 LM358P 通用运放芯片, U5 选取为 AD633JN 型乘法器。由于在测量过程中涉及到测量电流的需要, 可以从图1电路中分析出忆感器的电流与 U6 的输出电压(图1中以  $v_i$  标出)的大小成正比, 比例系数为电阻  $R_6$  的阻值, 从而可以间接测量电流。

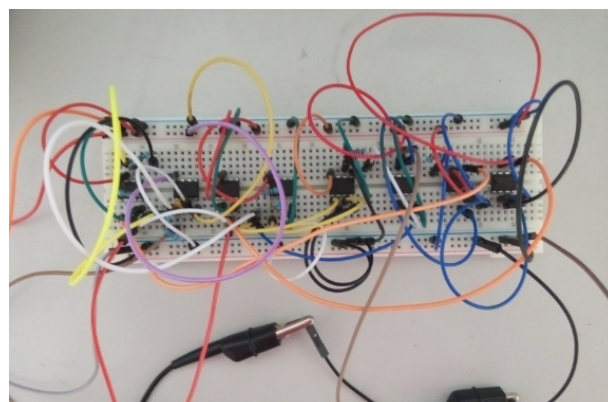


图8 磁控忆感器硬件电路

Fig.8 Hardware circuit of the flux-controlled meminductor

输入激励为 1V 的正弦波测量本文所设计的磁控忆感器的特性, 取频率  $f=300$  Hz、 $f=400$  Hz 和  $f=800$  Hz, 观察忆感器的韦-安关系曲线, 如图9所示。可以看到, 低频激励下忆感器的磁通电流不完全同相, 韦-安关系在一、三象限呈滞回特性曲线。随着频率的增大, 忆感器的磁通-电流呈线性关系, 滞回曲线逐渐变窄, 并最终退化为一根直线, 这与理论及仿真分析的结果相吻合。

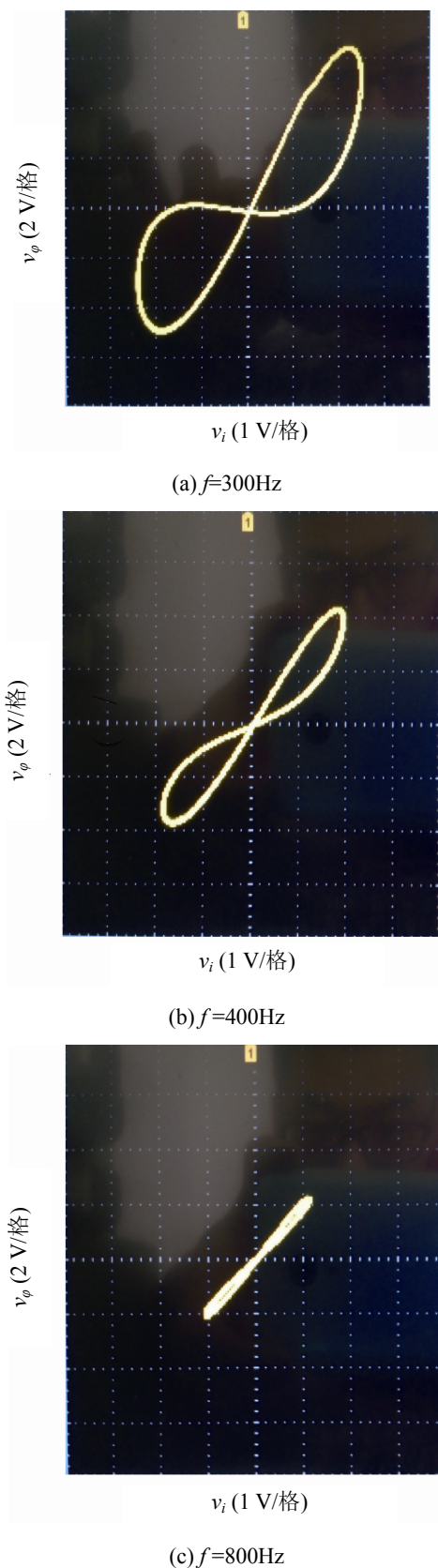
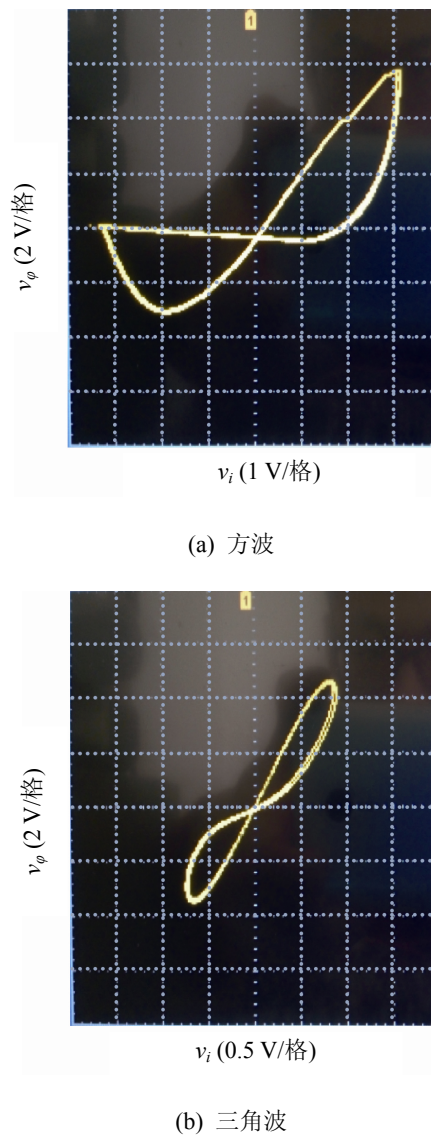


图9 不同频率激励下忆感器韦-安关系

Fig.9 The flux-current characteristic in different frequency signals

取频率  $f=400\text{ Hz}$ , 方波和三角波激励下的韦-安相图如图 10 所示, 可以看出, 这与图 3 仿真分析的结果相吻合。

图10 不同交变信号激励下忆感器韦-安关系  
Fig.10 The flux-current characteristic in the different alternating signals

## 5 结论

本文直接从忆感器的定义出发, 为简化电路实现, 提出了一种用线性窗函数描述的磁控忆感器模型, 并采用通用电路元器件设计了可任意接入电路使用的“浮地”电路模拟器。基于 Matlab 和 Multisim 混合仿真平台, 研究了该磁控忆感器在不同交变电

压信号以及不同参数设置下的韦-安关系和忆感值随时间、频率和幅度的变化关系，并实现了其硬件电路的搭建与测试。仿真电路分析、数值分析和硬件电路测试均表明：所设计的磁控忆感器与理论概念上的忆感器特性相吻合，从而为忆感器在电子学领域产生新的应用电路提供了器件模拟实体。

### 参考文献：

- [1] CHUA L O. Memristor-the missing circuit element [J]. IEEE Trans Circuit Theory (S0018-9324), 1971, 18(5): 507-519.
- [2] STRUKOV D B, SNIDER G S, STEWART D R, et al. The missing memristor found [J]. Nature (S0028-0836), 2008, 453(7191): 80-83.
- [3] VENTRA D M, 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.
- [4] BIOLEK D, BIOLKOVÁ V, KOLKA Z. Mutatorssimulating memcapacitors and meminductors [C]//IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems (APCCAS), 2010. USA: IEEE, 2010: 800-804.
- [5] PERSHIN Y V, VENTRA D M. Memristive circuits simulate memcapacitors and meminductors [J]. Electronics Letters (S0013-5194), 2010, 46(7):517-518.
- [6] 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, 2013, 62(15): 158501.  
Liang, Yan, Dong-Sheng Yu, Hao Chen. A novel meminductor emulator based on analog circuits [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(15): 158501.
- [7] 史致远, 王春丽, 包伯成, 等. 忆感等效电路的特性分析与实验验证[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(6): 845-848.  
Shi Z Y, Wang C L, Bao B C, et al. Characteristic analysis and experimental verification for meminductor equivalent circuit[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(6): 845-848.
- [8] MUTHUSWAMY B. Implementing memristor based chaotic circuits [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos (S0218-1274), 2010, 20(5): 1335-1350.
- [9] PERSHIN Y V, VENTRA D M. Emulation of floating memcapacitors and meminductors using current conveyors [J]. Electronic Letters (S0013-5194), 2011, 47(4):243-244.
- [10] 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 (S1549-7747), 2013, 60(4): 207-211.
- [11] YU D S, CHEN H, IU H H C. A Meminductive Circuit Based on Floating Memristive Emulator [C]// 2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), USA: IEEE, 2013: 1692-1695.
- [12] SAH M P, BUDHATHOKI R K, CHAN G Y, et al. A Mutator-Based Meminductor Emulator Circuit[C] // 2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), USA: IEEE, 2014: 2249-2252.
- [13] FOU DA M E, RADWAN A G. Charge controlled memristor-less memcapacitor emulator [J]. Electronics Letters (S0013-5194), 2012, 48(23):1454-1455.
- [14] JOGLEKAR Y N, WOLFSJ. The elusive memristor: Properties of basic electrical circuits [J]. European Journal of Physics (S0143-0807), 2009, 30(4): 661-675.
- [15] BIOLEK Z, BIOLEK D, BIOLKOVÁ V. SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift [J]. Radio engineering (S1210-2512), 2009, 18(2):210-214.
- [16] BIOLEK D, BIOLEK Z, V. BIOLKOVÁ V. Pinched hysteretic loops of ideal memristors, memcapacitors and meminductors must be 'self-crossing'[J]. Electronics Letters (S0013-5194), 2011, 47(25):1385-1387.
- [17] PERSHIN Y V, VENTRA D M. Teaching Memory Circuit Elements via Experiment-Based Learning [J]. IEEE Circuits and Systems Magazine (S1531-636X), 2012, 12(1): 64-74.
- [18] BIOLEK D, BIOLEK Z, BIOLKOVÁ V. SPICE modeling of memristive, memcapacitive and meminductive systems [C]// European Conference on Circuit Theory and Design, USA: IEEE, 2009: 249-252.