**DOI**：10.13245/j.ht.xxxxxx

基于忆阻器的典型电路设计

王锡胜舜

（华中科技大学电子信息与通信学院，湖北 武汉 430074）

摘要 根据忆阻器及可编程电路在未来的广泛应用前景，设计了使用简单、应用广泛的三种基于忆阻器的典型可编程电路：可编程放大电路、可编程电位器和可编程矩形波振荡器。电路仿真过程涉及Simulink和LTspice两种软件，它们分别从数字电路及模拟电路两个方面实现了可编程原理。在设计与分析电路时，首先介绍了每种软件的元件建模方法；然后以此为基础，分别搭建电路；最后观察并记录忆阻器在电路中的表现。通过和传统的电路相比较，基于忆阻器的可编程电路实现了可编程模块的具体电路结构，并依据其产生的调制信号，能够对电路中忆阻器元件进行实时可控编程，验证了可编程电路的优越性能。

关键词 忆阻器；电路设计；仿真；Simulink；LTspice

中图分类号 TN609 文献标志码 A 文章编号 16-4512(xxxx)xx-xxxx-xx

Typical Circuit Design Based on Memristor

*WANG Xishengshun*

(School of Electronic Information and Communication，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，China)

**Abstract** According to the prospect of memristors and programmable circuits in the future，three typical memristor-based circuits with simple use and wide application are designed：programmable amplification circuits，programmable potentiometers and programmable rectangular wave oscillators。The circuit simulation process involves two software，Simulink and LTspice，which implement the programmable principle from the aspects of digital circuit and analog circuit respectively。In the design and analysis of circuits，the component modeling methods of each software are first introduced；Then，based on this，the circuits are built separately；Finally，the behavior of the memristor in the circuit is observed and recorded。Compared with the traditional circuit，the memristor-based programmable circuit realizes the specific circuit structure of the programmable module，and according to the modulated signal generated，the memristor components in the circuit can be programmed in real time，which verifies the superior performance of the programmable circuit。

**Key words** Memristor; Simulation; Simulink; LTspice

引言

忆阻器是近五十年内高速发展应用的一种新兴元器件，在改进存储芯片结构[1]，拟合人脑神经元细胞膜电位变换[2]~[4]，图像加密及解码[5]等领域有着难以估量的应用前景。这种改革式的电路元件，有希望突破传统电路的局限。一个重要问题在于面对不同的应用场景时，忆阻器的模型甚至需要完全打破，重新设计适用于当前问题的新模型。结构的不规范，电路种类繁杂，使得忆阻器系统的可拓展性降低。为了解决这个问题，对于多次重复应用的典型电路的研究改进尤为重要。

本文旨在设计改进三种典型电路，分别从数学原理和电路原理的角度分析忆阻器在电路中的作用，以及改进调制模块及电路结构，以期获得更好的电路特性。

1 忆阻器的背景知识与应用前景

1.1 忆阻器存在的理论依据

在电路理论中，电阻(resistor，R)、电容(capacitor，C)、电感(inductor，L)，是三种电路基本元件。三种元件分别将四种电路基本参数中的两种联系起来。蔡绍棠[6]教授提出了忆阻(Memristor，M)的概念用来描述仅剩的两种变量，磁通量Φ和电流I中存在的关系，用如下的公式描述：

 或 (1)

其中，M表示忆阻。

1.2 忆阻器的物理特性

最早由Hewlett-Packard (HP)实验室发现在纳米维度下，金属-金属氧化物-金属的结构通强电流转型后，阻值的具体变化方向取决于激励源的方向[7]~[8]。根据控制忆阻器变化的激励源种类的不同，可以分为荷控(流控)忆阻器与磁控(压控)忆阻器[9]。它们的激励源分别为电流源与电压源。

本文采用磁控活动型忆阻器模型。这种模型很好的描述了忆阻器的阈值行为，其状态方程如下：

 (2)

式中是忆阻器的忆导函数，是忆阻器系统无量纲状态变量(即忆阻值)，故，是的微分表达式。

2 典型电路设计

2.1 忆阻器元件建模

忆阻器是一种两端电气元件，它可以被看作是一种基于电阻开关的非易失性存储器形式[10]。本文的忆阻器建模涉及两种仿真软件，下面将分别介绍每种建模方式。

Simulink中的元件建模，采用数字电路设计方法，运用加法器、乘法器、选择器、微分器等基础元器件拟合忆阻器的物理特性。其数学表达式如下：

 (3)

搭建电路如下。



图1 Simulink忆阻器建模原理图

该电路图可分为三个部分级联，第一部分用于产生；第二部分通过两个比较判别器达到类似于表达式的效果；第三部分将前两个部分产生的信号耦合，作最终处理得到信号，并通过示波器显示波形。该电路图中i(t)为输出，V(t)为输入。二者的比值，即该电路系统的电导值由公式(3)确定，具体的设计参数如下：

表2 Simulink仿真参数设置

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| /V | *α*/ | *β*/ | / | / |
| 0.5  0.5 | 500  500 | 1000  1000 | 0  20 | 500  500 |

LTspice中的元件建模，采用了Knowm公司开源的忆阻器模型，使用spice语言约束元器件的电气特性。此模型足以完成此次仿真任务，故本文未建立其他模型，后文仿真均基于此模型完成。模型的边界非线性条件添加的窗函数为Joglekar[11]~[12]。可以更换为Fuzzy或其他适用于不同仿真的窗函数[13]~[14]。具体参数如下。

表2 LTspice元件建模参数表

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| / | / | / | /m |  |
| 100 | 16K | 11K | 10N | 1 |

注：其中D表示薄膜宽度，p表示Joglekar窗函数的参数。

2.2 基于忆阻器的可编程放大电路

放大器的数学原理体现在输入输出端的效果等效于输入信号乘以一个固定的放大倍数，且放大倍数由忆阻器的阻值和反馈电阻共同决定。忆阻器的阻值变化会随激励源的方向、大小，改变，并且忆阻器只对低频信号有忆阻特性，即只有低频信号可以作为调制信号。当放大器输入端接入高频信号，此时忆阻器趋近于定值电阻。

本部分的电路设计主要通过Simulink完成。设计思路在于，利用忆阻器的“记忆”特性，即外加偏置阻值改变的特性，对运放放大电路进行改进，将反向输入端的接地电阻更换为忆阻器，通过外加激励的方式，动态编程忆阻器，进而达到对放大电路的编程效果。主要电路分为调制模块及原理模块，调制模块包含调制信号的产生及编程，原理模块包含接收调制信号作用于忆阻器，并实现放大功能。具体电路如下。



(1) (2)

图2 (1)可编程放大电路数字原理图，(2)Programmable step（调制模块）详述

图2中(1)分为两个部分，第一部分将调制信号与输入信号耦合，待作用于放大电路；第二部分完成了放大电路的数字原理，并用示波器展示输出波形，图中Memristor模块即为图1所示。图2中(2)为左侧图中Programmable Step模块（即调制模块）的详细结构，输出为一段有限持续期的脉冲信号，该调制信号的长度由调制模块的输入决定，调制信号的幅值由两个阶跃信号的幅度共同决定。

2.3 基于忆阻器的电位器

电位器作为一种典型的忆阻器应用电路，其原理在于利用忆阻器的记忆特性，做出可编程的电位器[15]。避免了传统电位器阻值精度低，难以精确校准，和数字电位器阻值变化不连续的弊端。但是，忆阻器作为非线性器件，想要精准的校准阻值仍然存在困难，可以采用近似函数拟合或其他方法来减小误差。

该电路本文设计了两种，一种为通过Simulink实现的数字电路，另一种为通过LTspice实现的模拟电路。数字电路设计思路分为两个部分：调制模块和原理模块，调制模块可以组合产生有限作用期的调制信号；原理模块通过加法器实现信号的耦合，示波器显示调制结果。模拟电路设计思路在于，基于MOS管设计桥式电路，随着激励的电压相对大小不同，一次性只有两个MOS管被接通。不同的接通情况，会导致流过跨接在桥上的忆阻器的电流方向相反。忆阻值增大或者减小，只需要控制激励信号的相对大小即可。以下实现了两种桥式电路：单桥与双桥电路。工作原理基本相同，不同之处仅在于单桥电路通过对比信号地电位控制电流流向，而双桥电路通过对比桥上两端的相对电位控制电流流向。

数字电位器电路结构如下：



(1)



(2)

图3 Simulink数字电位器原理图：(1)主电路图；(2)Programmable Step模块详述

图3中(1)同样可分为两部分，第一部分用于调制信号的产生与输入信号的耦合；第二部分为忆阻器模块及绘制输出信号。图3中(2)主要通过延迟器产生调制信号，左上部分用于正向偏置信号的产生，右下部分用于反向偏置信号的产生，通过正负号识别偏置的方向。

模拟电位器电路结构如下：



(1) (2)

图4 LTspice模拟电位器：(1)双桥电路；(2)单桥电路

图中A，B间的元件为忆阻器。R1，R2为100KΩ，R3，R4为1 KΩ；V1为90V提供MOS管的工作电压；V2为5V直流，V3，V6为周期方波，作为调制信号控制忆阻器阻值；V4，V5为-0.5V，V7为0.01V，V8为-0.01V，用于实时测量忆阻器阻值。

2.4 基于忆阻器的矩形波振荡电路

振荡电路在很多领域有着广泛的应用，尤其在通信电子线路中，尤为常见，也极为重要，故选取矩形波振荡电路作为示例，探寻忆阻器模型仿真在更广泛的背景的应用。本部分内容主要通过LTspice实现，在2.2设计的数字电位器的基础上改进完成。设计思路在于，将传统可调占空比的矩形波振荡电路中的滑动变阻器，更换为两个并联的忆阻器，并通过电位器分别的调控其阻值。具体电路采用图4(1)所示的双桥电路，如下：



图5 LTspice矩形波发生器原理图

图中R1，R4为1 KΩ，R2为2.7 KΩ，R3为20 KΩ，C1为80μF，用于起振，并控制振荡信号的幅度、周期与占空比；V1为15V，V2为-15V，用于提供运算放大器的工作电压；V3为-1V，V4为2V，V7为0.01V用于测量忆阻器阻值；V5为5V直流，V6为5V周期方波，作为调制信号控制忆阻器阻值。

3 仿真结果阐述及分析

3.1 忆阻器模型验证

在Simulink的仿真中，使用的是理想矩形窗函数，即由两个阶跃函数构成的窗函数，为忆阻器提供非线性边界条件。而在LTspice的仿真中，选择Joglekar窗函数。后文的图像均基于Joglekar窗函数所绘制，二者虽然有所差异，但是在本文的仿真可以忽略不计。

记录当忆阻器的导通电阻不同，忆阻器特性曲线会发生的变化。此时激励源为正弦波电压源，频率为1 Hz，振幅为1 V，将此激励源的参数作为基准参数，后文中简称为基准参数。分别设置忆阻器的导通电阻为100 Ω和250 Ω，忆阻器的电压-电阻曲线如下：



图6 忆阻器电阻滞回曲线

结果表明，不同的导通电阻不会影响最大电阻，但会提高最小电阻的下限，表现在图中为忆阻滞回曲线变得狭窄。如果设置导通电阻为0 Ω，此时的忆阻器将几乎变为一个定值电阻。然而，相对于11 KΩ的最大阻值而言，150 Ω的阻值变化几乎可以忽略，但是反映在电路中对忆阻器最小阻值的影响却是不容忽视的。这正是非线性元器件的特殊之处。后文的仿真中，为了获取忆阻器更大的变化范围，使实验结果对比更加明显，均采用100 Ω的导通电阻。

接下来，保持导通电阻不变，再次修改基准参数，分别绘制了激励信号频率和激励信号幅值对于忆阻器阻值的作用曲线。仿真结果如下图所示：



(1) (2)

图7 忆阻器电压-电流特性曲线：(1)频率变化；(2)幅值变化

可以看出，随着频率的升高，忆阻器阻值逐步减小，随着幅度的升高，忆阻器阻值逐渐增大。此时，如果进一步增加频率，或者减小幅值，忆阻器阻值将进一步减小，最终将滞回曲线会重合为一条正比例直线，此时忆阻器在电路中的作用等价于一个固定阻值的定值电阻。这个独特的性质的优势在于，可以设计电路结构使要处理的信号处于相对较高的频段（对于HP实验室的忆阻器模型，即使只有10 Hz，也足以被近似为一个定值电阻），而调制信号位于低频或者是直流，这样，当调制信号以外的信号作用在忆阻器上时，忆阻器对外的表现等同于定值电阻，但是当接收到调制信号时，又可以表现为受控记忆元件。这个性质在后文可编程放大电路、可编程电位器中尤为重要。

3.2 Simulink的可编程放大电路

由于忆阻器在高频信号条件下，表现类似于定值电阻，故输入信号为一高频信号，调制信号采用直流，通过调制模块对输入信号的作用，期望观察到不同的稳态放大倍数。仿真参数设置为，第一次调制信号的幅值为1 V，第二次调制信号的幅值为0.1 V。结果如下：



(1) (2)

图8 放大倍数随调制信号的变化：(1)调制信号幅值为1 V；(2)调制信号幅值为0.1 V

从图中可以看出，当调制信号幅值为1 V时，放大器的稳态放大倍数在12左右；当改变调制信号输入为0.1 V，放大器的稳态放大倍数上升为17左右。这是由于反向激励源的幅值增加致使在相同作用时间内忆阻器阻值下降更多，进而使运算放大器的放大倍数增大。

可以观察到在第二次仿真中，放大倍数出现了扰动，呈现周期性的起伏，这是由于忆阻器的非线性作用为输出信号叠加了干扰相位。由于在2.1的Simulink中，采用的是理想矩形窗函数，可以优化为Biolek窗函数或者Jolekar窗函数提高忆阻器系统对相位的精确度。

3.3 Simulink的数字电位器及LTspice的模拟电位器

首先分析Simulink的仿真结果。仿真方法为通过设置调制模块的信号幅值，分别观察不同幅值的正向偏置或者反向偏置对忆阻器阻值得调控效果。



(1) (2)

图9 Simulink数字电位器结果图：(1)调制信号为正；(2)调制信号为负

仿真结果显示，通过施加适当的激励，当激励源正向通过忆阻器时，阻值增大；当激励源反向通过忆阻器，阻值减小。由于忆阻器非线性器件，阻值不是均匀变化，但阻值是连续的，且随调制信号的变化而变化。

接下来，分析LTspice的模拟电位器。考虑第一种情况，图4中，电源V2是5 V直流电源，V3是幅度5 V占空比为50 %的方波，桥上电流正向流过忆阻器；再考虑第二种情况，调换电源V2与V3的参数，此时电源V2是幅度5 V占空比为50 %的方波，V3是5V的直流电源，桥上电流反向流过忆阻器。两种情况下会导致忆阻器的阻值向不同的方向变化。



图10 LTspice模拟电位器结果图

仿真结果所呈现的波形，可以看出，当激励信号作用于忆阻器，不同方向导致的结果正是忆阻器阻值增大或者减小的不同。这是由于当激励源正向作用于忆阻器，流过忆阻器的电流方向为从A到B，此时，HP忆阻器模型中的掺杂区会在激励的作用下向非掺杂区移动，使得忆阻器对外的总阻值减小；当激励源反向作用于忆阻器，对应流过忆阻器的电流方向为从B到A，此时非掺杂区向掺杂区移动，使得忆阻器对外的总阻值增大。

这种区域的移动实际上是忆阻器内部带电粒子和空穴的相对移动，是一个非线性的过程，体现在图中为，每一次的阻值变化为曲线，且每一段曲线的斜率在逐渐减小。而当激励源停止作用时忆阻器会记忆当前的阻值，对外表现为定值电阻。但由于无法不施加电流测得电路中的忆阻器阻值，故每一段曲线中间的直线存在微小的斜率，这正是由于测定电阻时施加的电流产生的误差。

值得注意的一点在于，图中两条曲线总是从11 KΩ开始变化，这是由于忆阻器模型区别于真实忆阻器无法真正“记忆”阻值，每次仿真结束后会被重置为设定好的初始阻值。

3.4 LTspice的矩形波发生器

通过改进后的电路，期望的结果应是，未施加额外偏置时，由忆阻器作为基础元件构成的振荡电路可以正常完成波形产生的功能，振荡波形稳定；当施加适当偏置电压时，可以观察到振荡波形的占空比和周期发生变化，且变化后的波形仍足够稳定，矩形波足够平坦。



图11 矩形波的占空比调制

分析图像，可以看出，振荡产生的波形足够稳定，且当改变图5电路的直流偏置V4的值时，矩形波的占空比发生了改变。具体结果是，调制源幅度增大，占空比减小。产生这种结果的原因在于，电路结构中设置的偏置时长不变，且两个DCP模块对于忆阻器的作用相反，当偏置电压增大时，会使得两个忆阻器的阻值之差增大，并联结构使得总阻值减小，振荡电路的时间常数减小，从而表现为占空比减小。

值得注意之处在于，两次仿真的波形幅度和相位都产生了一定程度的偏移，但是不影响仿真结果的成立。这种误差的原因在于，振荡电路的稳态振荡频率不够高，在该频率下，忆阻器还未完全退化为定值电阻，保留了一部分“记忆”的特性，阻值的变化进而影响了相位和振幅。

此外，还需要考察在改变电容器的容抗大小时，振荡电路的工作状况。具体测试方法为，固定直流偏置的大小为2 V，分别减小C1为20 μF和增大C1至80 μF，记录矩形波的时域波形图。



图12 矩形波的周期调制

从图中可以看出，电容C1的改变显著改变了振荡波形的频率，同时维持了占空比为50%不变，且振荡的电压更加稳定。综上述，忆阻器的在振荡电路中正确的发挥了作用，达到了占空比和周期分别可调的效果。更由于该电路仅需改变直流偏置的大小和作用时间，且两个DCP模块可以分别设置偏置源，进行分别调控，也可以保持一个忆阻器，仅调制另一个。

为了追求更精确的调制效果，可以更换忆阻器模型，例如，双曲(sinh，cosh，tanh)荷控，双曲磁控忆阻器模型[16]~[17]；分数阶神经网络[18]；多值存储阵列设计[19]；以及全球第一款商用忆阻器芯片Knowm中采用的亚稳态开关模型[20]等。

4 结论

本文在基于忆阻器的可编程电路理论的基础上，设计实现了可编程放大电路、可编程电位器以及可编程矩形波振荡器的可编程模块，并完成了电路参数及其结构的改进。放大电路突出表现忆阻器在可编程调制模块的作用下，对于电路放大倍数的调制作用；电位器突出表现忆阻器在调制信号的作用下，阻值连续可调的特性，并分别从数字电路和模拟电路两种方向实现双向偏置，并展示了偏置结果；矩形波振荡器突出表现在模拟电源的作用下，矩形波的周期、占空比分别可调的特性，证明本文设计的DCP电路具有可拓展性。文中重点设计了三种典型电路的可编程模块，此三种典型电路虽广泛应用，但电路结构相对简单，忆阻器模型相对简陋，工程实践无法制作如此理想的忆阻器，其电路性能会下降，距离应用还需要进一步改进优化。

**参 考 文 献**

[1]Liu L, Xiong W, Liu Y, et al. Designing High‐Performance Storage in HfO2/BiFeO3 Memristor for Artificial Synapse Applications[J]. Advanced Electronic Materials, 2020, 6(2): 1901012.

[2]Kumar S, Wang X, Strachan J P, et al. Dynamical memristors for higher-complexity neuromorphic computing[J]. Nature Reviews Materials, 2022, 7(7): 575-591.

[3]Huh W, Lee D, Lee C H. Memristors based on 2D materials as an artificial synapse for neuromorphic electronics[J]. Advanced Materials, 2020, 32(51): 2002092.

[4]Sangwan V K, Hersam M C. Neuromorphic nanoelectronic materials[J]. Nature nanotechnology, 2020, 15(7): 517-528.

[5]Kong X, Yu F, Yao W, et al. Memristor-induced hyperchaos, multiscroll and extreme multistability in fractional-order HNN: Image encryption and FPGA implementation[J]. Neural Networks, 2024, 171: 85-103.

[6]Chua L. Memristor-the missing circuit element[J]. IEEE Transactions on circuit theory, 1971, 18(5): 507-519.

[7]Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The missing memristor found[J]. nature, 2008, 453(7191): 80-83.

[8]Chua L. Resistance switching memories are memristors[J]. Handbook of memristor networks, 2019: 197-230.

[9]Romero F J, Ohata A, Toral-Lopez A, et al. Memcapacitor and meminductor circuit emulators: A review[J]. Electronics, 2021, 10(11): 1225.

[10]Feali M S. Using volatile/non-volatile memristor for emulating the short-and long-term adaptation behavior of the biological neurons[J]. Neurocomputing, 2021, 465: 157-166.

[11]Joglekar Y N, Wolf S J. The elusive memristor: properties of basic electrical circuits[J]. European Journal of physics, 2009, 30(4): 661.

[12]Prodromakis T, Peh B P, Papavassiliou C, et al. A versatile memristor model with nonlinear dopant kinetics[J]. IEEE transactions on electron devices, 2011, 58(9): 3099-3105.

[13]Singh J, Raj B. An accurate and generic window function for nonlinear memristor models[J]. Journal of Computational Electronics, 2019, 18: 640-647.

[14]Li J, Dong Z, Luo L, et al. A novel versatile window function for memristor model with application in spiking neural network[J]. Neurocomputing, 2020, 405: 239-246.

[15]Shin S, Kim K, Kang S M. Memristor applications for programmable analog ICs[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2010, 10(2): 266-274.

[16]MIN F, WANG Z, CAO Y, et al. Multistability analysis of a dual-memristor circuit based on hyperbolic function[J]. Acta Electonica Sinica, 2018, 46(2): 486.

[17]Guo M, Xue Y, Gao Z, et al. Dynamic analysis of a physical SBT memristor-based chaotic circuit[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2017, 27(13): 1730047.

[18]向易, 阮晓莉, 李必文. 基于忆阻器分数阶神经网络的多 Mittag-Leffler 稳定[J]. 湖北师范大学学报: 自然科学版, 2017, 37(4): 48-55.

[19]Sun J, Kang K, Sun Y, et al. A multi-value 3D crossbar array nonvolatile memory based on pure memristors[J]. The European Physical Journal Special Topics, 2022, 231(16): 3119-3130.

[20]Wang F, Wang F. Floating Memcapacitor Based on Knowm Memristor and Its Dynamic Behaviors[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(12): 5134-5138.