

非线性忆阻器的串并联研究 及在图像处理中的应用^①

董哲康¹, 段书凯¹, 胡小方², 王丽丹¹

1. 西南大学 电子信息工程学院, 重庆 400715;

2. 香港城市大学 机械与生物医学工程系, 香港 999077

摘要: 忆阻器是一种新型的非线性动态可变电阻器, 其阻值变化依赖于通过它的电荷量或磁通量. 作为第四种基本电路元器件, 忆阻器具有不同于电阻、电容和电感的独特性能, 在非易失性存储器、神经形态系统、非线性电路等众多领域中有巨大的应用潜能. 基于惠普忆阻器模型, 推导了一种带有窗函数的闭合形式的电荷控制忆阻器数学模型, 该模型能够模拟忆阻器边缘附近的非线性离子迁移现象, 同时能够保证忆阻器的边界条件, 使忆阻器工作在正常的工况内, 是一种更接近实际器件的忆阻器模型. 进一步分情况对忆阻器的串并联电路进行理论推导. 最后, 基于忆阻器串并联电路的性质, 将忆阻器与数字图像处理相结合, 利用忆阻器实现图像处理所需的非线性映射函数. 大量的计算机仿真验证了提出的方案在图像取反、对比度伸缩及图像灰度调整应用中的有效性. 该方案的提出有望进一步推动数字图像处理的发展, 促进数字图像处理硬件的实现.

关键词: 忆阻器; 电荷控制模型; 串并联电路; 图像处理; 映射函数

中图分类号: TM54

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2015)02-0153-09

1971年, 蔡少棠(Leon Chua)教授根据电路理论公理化体系的完备性定义了磁通量和电荷之间的关系, 提出了忆阻器的概念, 并且称之为除了电阻, 电感, 电容之外的第四种基本元器件^[1]. 2008年5月, 美国惠普实验室的研究人员报道了基于二氧化钛的交叉阵列存储结构, 并指出交叉点处的存储单元即为Chua预言的忆阻器^[2-3], 立刻引起了学术界和工业界的广泛关注. 实验证实, 纳米忆阻器具有独特的开关转换机制、自动的记忆功能、连续的输入输出特性, 在非易失性存储器、人工神经网络、大规模集成电路、非线性电路和图像处理等方面有着巨大的应用潜能^[4-7]. 目前, 对忆阻器理论模型和器件性能的研究日益深入, 多种忆阻器数学模型被提出且用于各种应用中^[8-10], 其中部分数学模型未考虑非线性离子迁移现象, 即所谓的理想忆阻器模型或线性离子迁移忆阻器模型^[11]. 然而, 实际中一个小的电压就会在纳米忆阻器中形成巨大的电场, 导致一种快速而显著的能量势垒的减小, 使得离子迁移表现出非线性^[12]. 理想的忆阻器模型不能完全模拟实际器件的特性, 因此建立非线性离子迁移忆阻器模型引起了研究者的更多兴趣.

① 收稿日期: 2014-02-11

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(教技函[2013]47号); 国家自然科学基金(61372139, 61101233, 60972155); 教育部“春晖计划”科研项目(z2011148); 留学人员科技活动项目择优资助经费(国家级, 优秀类, 渝人社办[2012]186号); 重庆市高等学校优秀人才支持计划(渝教人[2011]65号); 重庆市高等学校青年骨干教师资助计划(渝教人[2011]65号); 中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK2014A009, XDJK2013B011).

作者简介: 董哲康(1989-), 男, 杭州人, 研究生, 主要从事忆阻器及忆阻系统和神经网络方面的研究.

通信作者: 段书凯, 教授, 博士研究生导师. Email: duansk@swu.edu.cn.

随着信息技术的快速发展,现代数字图像处理技术在理论和应用上都取得了重大的突破,并在测绘、矿产探测等领域发挥着重要的作用^[13]. 目前,大部分的图像处理技术都是完全基于计算机软件平台,这种单纯的软件处理方式,难以满足日益增加的处理量和快速适时的处理需求. 因此,数字图像处理的硬件实现,即高速、精确的图像处理电路的设计和实现具有更明显的发展优势和必要性. 本文在深入研究忆阻器理论的基础上,推导了一种更为实际的非线性电荷控制忆阻器模型并对其串并联电路特性进行了分析和研究. 进一步利用忆阻器的串并联电路实现了几种映射函数,成功运用于图像处理中. 该方案不仅有望大大推动数字图像处理的发展,且有望促进更具空间优势的微型图像处理器的硬件实现.

1 非线性离子迁移忆阻器模型

忆阻器是一种具有记忆功能的无源非线性二端元件,其阻值可变且受控于供给电源的强度、极性以及供电时间^[4]. 惠普忆阻器物理模型如图 1 所示,其中, D 是二氧化钛薄膜的总厚度,约为 10 nm, w 是掺杂层的厚度.

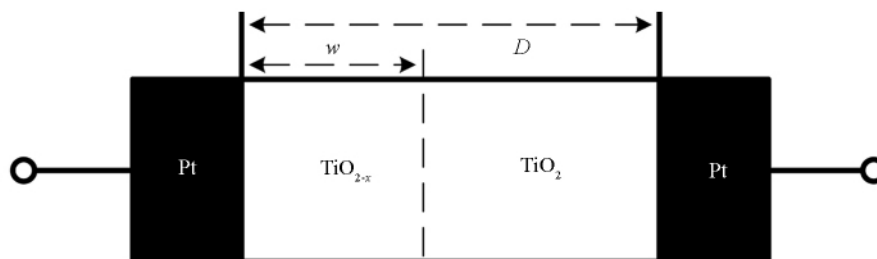


图 1 惠普忆阻器模型

惠普忆阻器数学模型可以表示为

$$M(t) = R_{\text{on}} \left(\frac{w(t)}{D} \right) + R_{\text{off}} \left(1 - \frac{w(t)}{D} \right) \quad (1)$$

其中 R_{on} 和 R_{off} 分别为 $w = D$ 和 $w = 0$ 时的极限忆阻值,令 $x = \frac{w}{D}$, $\in [0, 1]$, 则,

$$M(t) = R_{\text{off}} + (R_{\text{on}} - R_{\text{off}})x(t) \quad (2)$$

掺杂层和无掺杂层之间的边界移动速度为

$$\frac{dx}{dt} = ki(t)f(x) \quad k = \frac{\mu_v R_{\text{ON}}}{D^2} \quad (3)$$

其中, $\mu_v \approx 10^{-14} \text{ m}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$ 是平均的离子迁移率. 离子迁移现象可由式(3)右边的窗函数 $f(x)$ 来模拟. 基于文献[2,12,14-15], 本文采用的窗函数为

$$f(x) = 4x - 4x^2 \quad (4)$$

将窗函数代入等式(3), 通过积分求解, 得到最终的忆阻值表达式, 如下:

$$M(t) = M_0 + \Delta R \left(\frac{1}{1 + e^{4kq(t)}} - \frac{1}{2} \right) \quad (5)$$

进一步, 根据忆阻器的物理限制 $R_{\text{on}} \leq M(t) \leq R_{\text{off}}$, 可以得到有效的 $q(t)$ 范围, 即:

$$\frac{1}{4k} \ln \frac{0.5R_{\text{off}} + 0.5R_{\text{on}} - M_0}{0.5R_{\text{on}} - 1.5R_{\text{off}} + M_0} \leq q(t) \leq \frac{1}{4k} \ln \frac{1.5R_{\text{on}} - 0.5R_{\text{off}} - M_0}{M_0 - 0.5R_{\text{off}} - 0.5R_{\text{on}}} \quad (6)$$

这里, 定义 $q(t)$ 的最小值和最大值分别为 c_1, c_2 , 得到闭合形式电荷控制非线性忆阻器模型:

$$M(t) = \begin{cases} R_{\text{off}} & q(t) < c_1 \\ M_0 + \Delta R \left(\frac{1}{1 + e^{4kq(t)}} - \frac{1}{2} \right) & c_1 \leq q(t) < c_2 \\ R_{\text{on}} & q(t) \geq c_2 \end{cases} \quad (7)$$

通过数值分析, 得到该忆阻器模型中相关变量之间的关系曲线, 如图 2 所示. 图 2(a)显示了忆阻器两

端的电压和电流之间呈现的经典的“斜8”磁滞回线;图2(b)表征了忆阻器阻值和经过忆阻器的电荷量之间的关系。值得注意的是,图2中忆阻器的特性曲线与 Hyongsuk Kim 在文献[14—15]中相一致,验证了提出的电荷控制的非线性忆阻器模型的有效性和正确性。

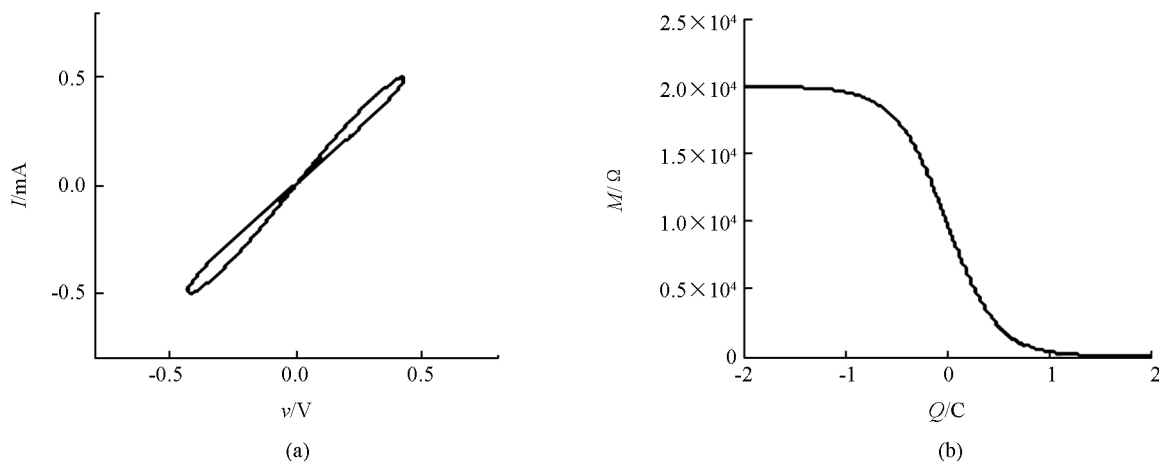


图2 非线性忆阻器模型仿真结果

2 忆阻器的串并联特性分析

2.1 忆阻器串联特性

在串联电路中,首先考虑由两个忆阻器构成的简单忆阻系统。值得注意的是,忆阻器是一种具有极性的无源二端元器件,所以在研究忆阻器串联问题时要分成极性同向和极性反向两种情况来讨论,如图3所示。

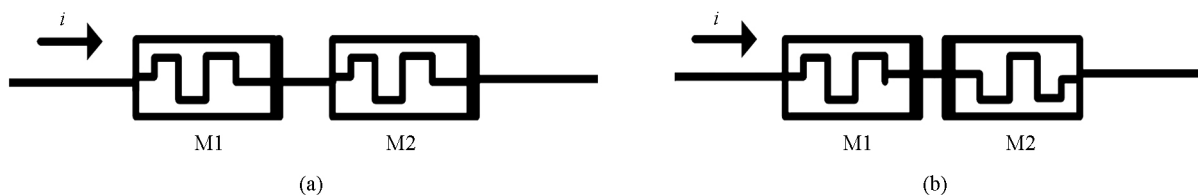


图3 两个忆阻器串联电路

设两个忆阻器的忆阻值分别为 M_1 和 M_2 , 加载在它们两端的电压分别为 U_1 和 U_2 , 流经两个忆阻器的电流分别为 I_1 和 I_2 。该忆阻系统的等效忆阻值为 M , 等效电压为 U , 等效电流为 I 。根据欧姆定律以及串联电路的一般特性,得到两个忆阻器串联时等效忆阻值的表达式:

$$M = \frac{U}{I} = (U_1 + U_2)/I = (M_1 I_1 + M_2 I_2)/I = M_1 + M_2 \quad (8)$$

进一步,当串联的忆阻器个数为任意正整数 n 的时候,得到:

$$M = \frac{U}{I} = (U_1 + U_2 + \dots + U_n)/I = (M_1 I_1 + M_2 I_2 + \dots + M_n I_n)/I = M_1 + M_2 + \dots + M_n = \sum_{i=1}^n (M_i), n \in \mathbf{N}^* \quad (9)$$

2.2 忆阻器并联特性

类似地,在忆阻器并联电路中,也需要分忆阻器同向并联和忆阻器反向并联两种情况进行讨论分析。

同样的,根据欧姆定律和并联电路的基本性质,可得两个忆阻器并联时等效忆阻值的表达式:

$$M = \frac{U}{I} = (M_1 I_1)/(I_1 + I_2) = \frac{M_1}{1 + \frac{I_2}{I_1}} = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \quad (10)$$

进一步,当忆阻器并联的个数为 n (n 为正整数),得到:

$$M = \frac{U}{I} = (M_1 I_1) / (I_1 + I_2 + \dots I_n) = \frac{M_1}{1 + \frac{I_2}{I_1} + \dots \frac{I_n}{I_1}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{M_i})}, n \in \mathbf{N}^* \quad (11)$$

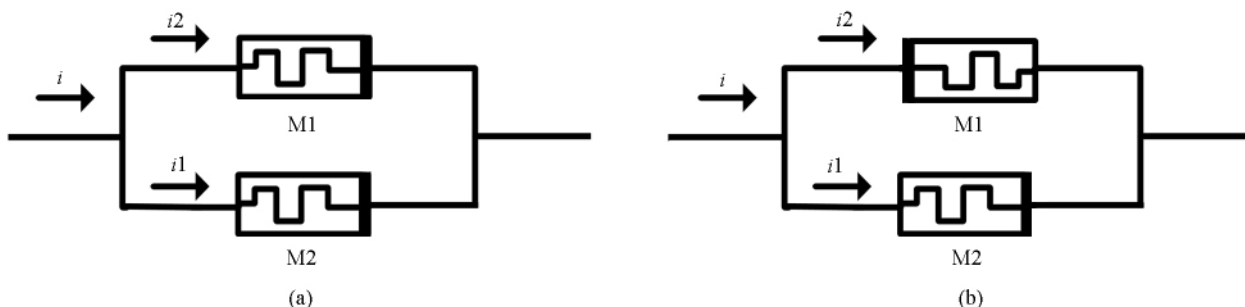


图 4 两个忆阻器并联电路

3 忆阻器串并联系统应用于图像处理

图像处理,是运用计算机软件对图像进行处理分析,以达到所需结果的技术,一般指数字图像处理^[16].映射函数处理数字图像是一种应用广泛的技术,其核心思想是利用一个预先设定的映射函数对初始图像的像素值作处理,输出新的像素值,实现图像处理的功能^[14, 17].这种图像处理技术的优势明显,但也存在不足:在一般情况下,用软件实现的非线性映射函数不具备在线实时修改能力,而处理不同类型的图像需要使用不同的映射函数,当对大规模,复杂图像进行实时处理时,需要按要求随时更改映射函数,从而导致处理效率降低;同时,映射函数设定的难度会随着图像规模和复杂度的增加而增加;此外,该技术仍然基于计算机软件平台,没有实现图像处理硬件化的突破.

运用忆阻器串并联系统特性实现所需的非线性映射函数能够有效地解决上述问题:首先,通过控制编程信号,能够有目的地调整忆阻器特性曲线的形状,故而能够根据图像处理的需求在线改变图像处理的映射函数,显著提高大规模复杂图像处理的效率;其次,运用忆阻器件处理图像能够促进数字图像处理的硬件化;同时,由于忆阻器件的纳米级尺寸,还有望实现数字图像微型处理器.本文以 3 种常见的图像处理操作为例,介绍忆阻器串并联实现数字图像处理的过程,具体参数设置及忆阻器连接方式见表 1.

表 1 图像处理过程中忆阻器各项参数

忆阻器	处 理 过 程			
	图像取反	图像对比度伸缩		图像灰度调整
	同向串联	同向并联	反向并联	同向并联
忆阻器 M1 参数	$R_{on}=100\ \Omega$	$R_{on}=200\ \Omega$	$R_{on}=200\ \Omega$	$R_{on}=200\ \Omega$
	$R_{off}=20\ \text{k}\Omega$	$R_{off}=100\ \text{k}\Omega$	$R_{off}=100\ \text{k}\Omega$	$R_{off}=100\ \text{k}\Omega$
	$M_0=10\ \text{k}\Omega$	$M_0=63183\ \Omega$	$M_0=63183\ \Omega$	$M_0=63183\ \Omega$
	$D=10\ \text{nm}$	$D=10\ \text{nm}$	$D=10\ \text{nm}$	$D=10\ \text{nm}$
	$\mu_v=10^{-14}\ \text{m}^2\ \text{s}^{-1}\ \text{V}^{-1}$	$\mu_v=10^{-14}\ \text{m}^2\ \text{s}^{-1}\ \text{V}^{-1}$	$\mu_v=10^{-14}\ \text{m}^2\ \text{s}^{-1}\ \text{V}^{-1}$	$\mu_v=10^{-14}\ \text{m}^2\ \text{s}^{-1}\ \text{V}^{-1}$
忆阻器 M2 参数	$R_{on}=100\ \Omega$	$R_{on}=200\ \Omega$	$R_{on}=100\ \Omega$	$R_{on}=100\ \Omega$
	$R_{off}=20\ \text{k}\Omega$	$R_{off}=100\ \text{k}\Omega$	$R_{off}=100\ \text{k}\Omega$	$R_{off}=100\ \text{k}\Omega$
	$M_0=10\ \text{k}\Omega$	$M_0=63183\ \Omega$	$M_0=63214\ \Omega$	$M_0=63214\ \Omega$
	$D=10\ \text{nm}$	$D=10\ \text{nm}$	$D=10\ \text{nm}$	$D=10\ \text{nm}$
	$\mu_v=10^{-14}\ \text{m}^2\ \text{s}^{-1}\ \text{V}^{-1}$	$\mu_v=10^{-14}\ \text{m}^2\ \text{s}^{-1}\ \text{V}^{-1}$	$\mu_v=10^{-14}\ \text{m}^2\ \text{s}^{-1}\ \text{V}^{-1}$	$\mu_v=10^{-14}\ \text{m}^2\ \text{s}^{-1}\ \text{V}^{-1}$

3.1 图像取反 (Image Reverse)

如图 5,将两个相同的忆阻器串联得到的忆阻值和电荷量之间的关系曲线作为图像取反的映射函数.

由于图像的像素值都是大于0的正整数,所以图5(a)中电荷量的值为负数的曲线部分在作为映射函数处理数字图像的时候自动失效,而映射函数真正有效处理部分如图5(b).

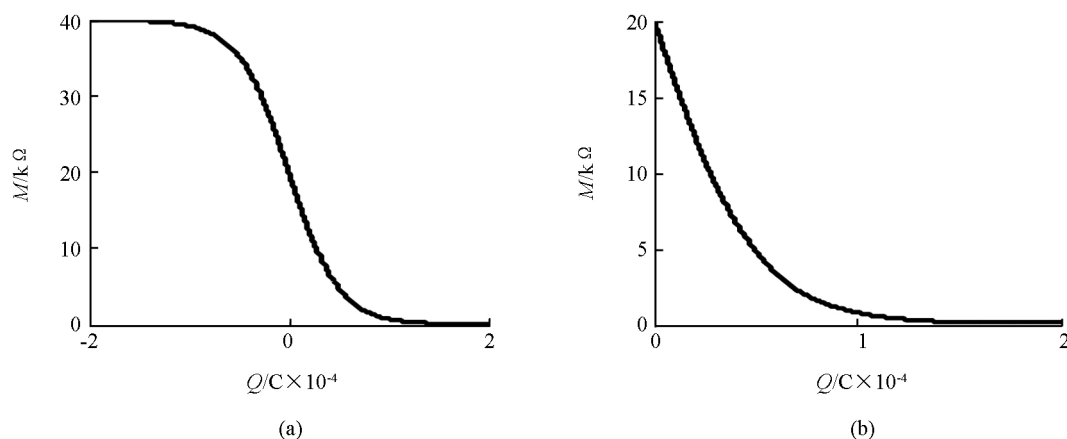


图5 图像取反的映射函数

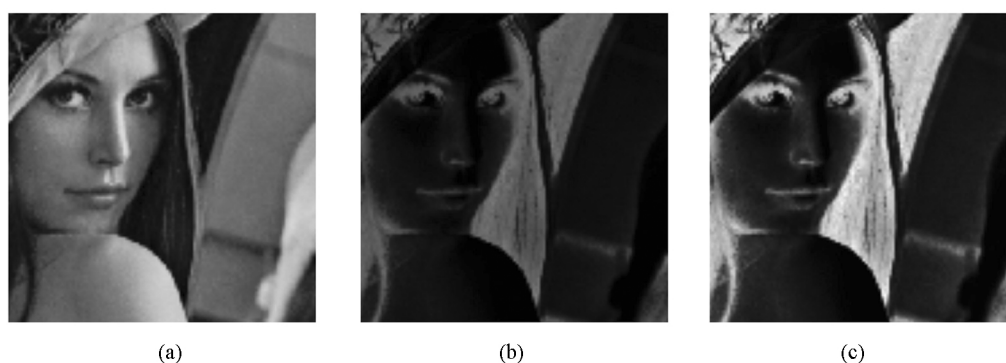


图6 图像取反仿真结果

图6中,(a)图为初始图像,(b)图为单个忆阻器忆阻值和电荷量的特性曲线作为非线性映射函数的处理结果,(c)图为两个相同忆阻器串联之后忆阻值和电荷量的特性曲线作为映射函数的处理结果.实验表明忆阻器的特性曲线作为非线性映射函数能够有效的对数字图像进行取反操作.

3.2 图像对比度伸缩(Contrast Stretching Operator)

图像的对比度伸缩操作是运用非线性映射函数 $f(x)$ 来提高图像中的重点部分和细节,从而能够更清晰、准确地表达数字图像的主体内容和中心思想^[17].

图7中第三行函数图像分别表示了两种类型的图像对比度伸缩映射函数,其中虚线为映射函数的阈值.

利用上述得到的两种非线性映射函数处理同一幅图像,仿真结果如下图8所示.

图8中,(a)、(d)为初始图像,(b)、(e)分别为上述两种忆阻非线性映射函数,(c)、(f)分别为经过这两种忆阻映射函数处理之后得到的输出图像.经分析,第一种映射函数 $f(x)$ 将输入图像的像素值划分成两个子集,小于阈值的像素值经过映射函数处理之后趋于0,而大于阈值的像素值则按照一定的比例增加;第二种映射函数 $g(x)$ 中存在两个阈值,将输入图像的像素值划分为三个子集,经过映射函数处理后,第一部分的像素值完全趋于0值,而第二部分的像素值则按照一定的比例增加,相反,第三部分的像素值则按照一定比例减小.比较两种映射函数,第一种映射函数结构简单,适合处理复杂度低的图像,而第二种映射函数结构相对复杂,适用于处理复杂度高的图像.

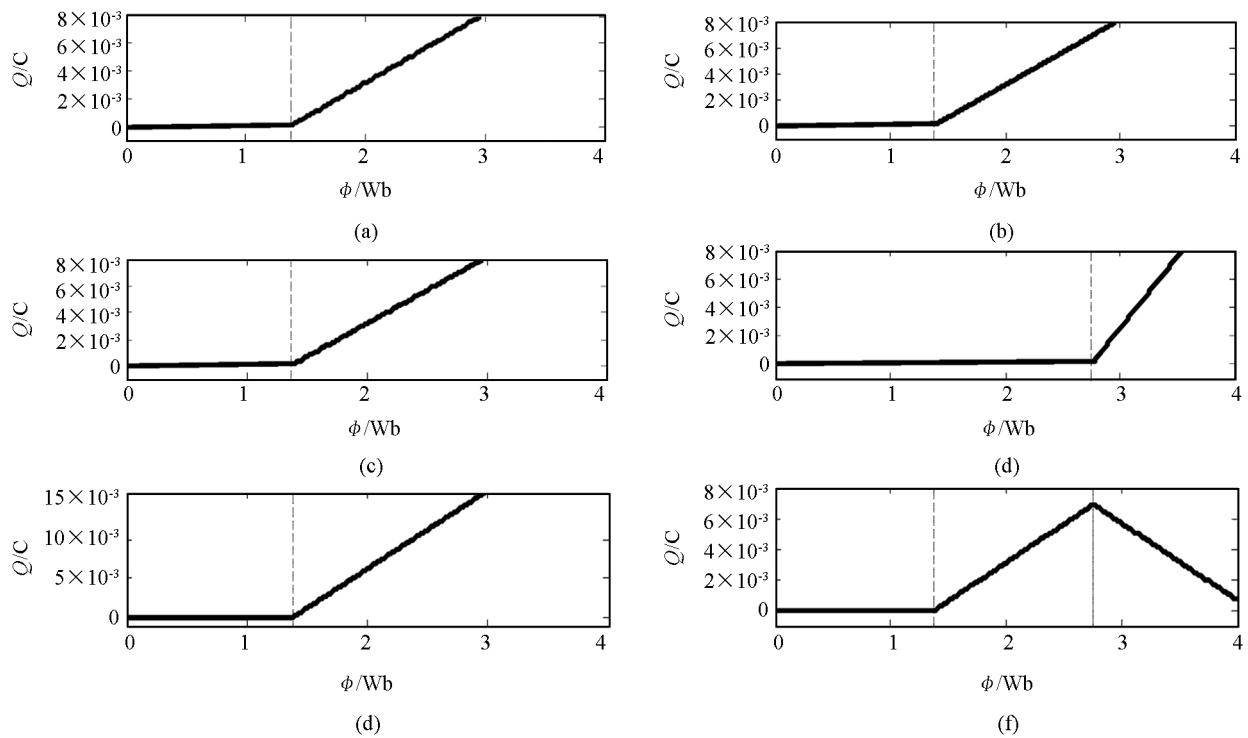


图 7 图像对比度伸缩的映射函数

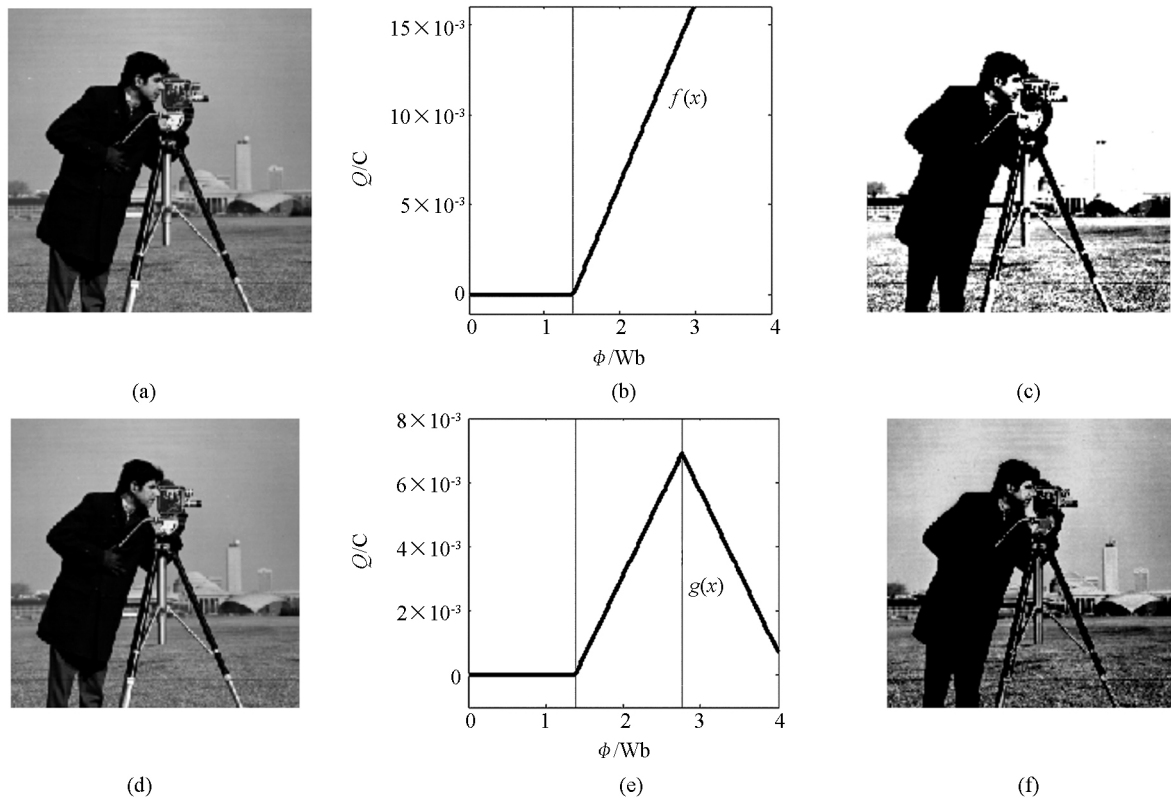


图 8 图像对比度伸缩操作仿真结果

3.3 图像灰度调整(Image Gray-scale Adjusting)

将两个不同的忆阻器同向并联,可以得到图像灰度调整的映射函数,如下所示.

图 9 中, (a)、(b) 分别为两个独立的忆阻器电荷量和磁通量之间的特性曲线, (c) 图则为这两个忆阻器经过同向并联之后得到的电荷量和磁通量之间的特性曲线, 即图像灰度调整的映射函数.

如图10所示,其中(a)图为初始图像,(c)图为初始图像的像素值直方统计图,(b)图为输出图像,(d)图为输出图像的像素值直方统计图.显然,经过映射函数处理得到的输出图像的像素值更为集中,大多数都集中在100~175之间,而初始图像的像素值则较为均匀的分布在0~255之间.实验结果验证了提出方案的有效性,为后续数字图像处理的发展提供了全新的思路.

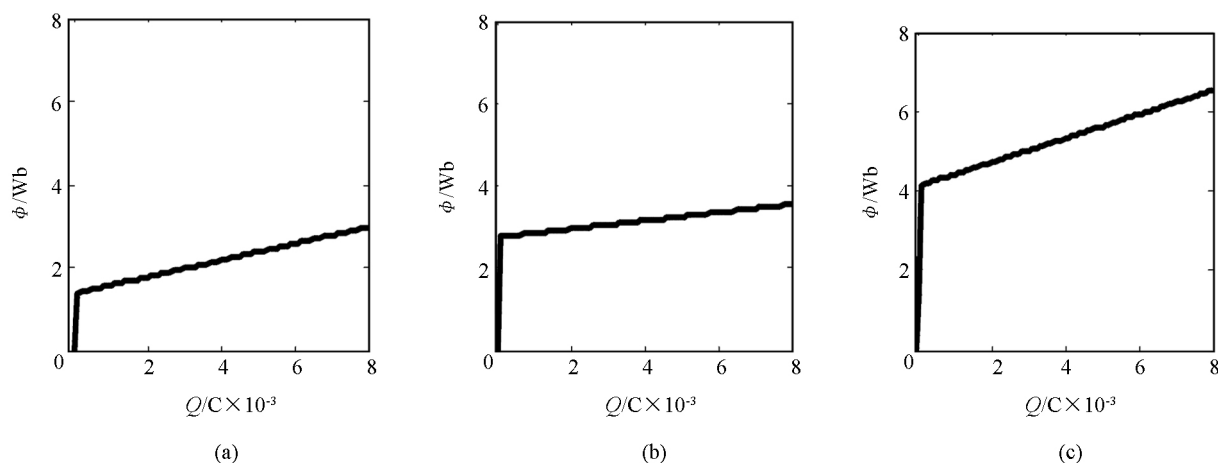


图9 图像灰度调整的映射函数

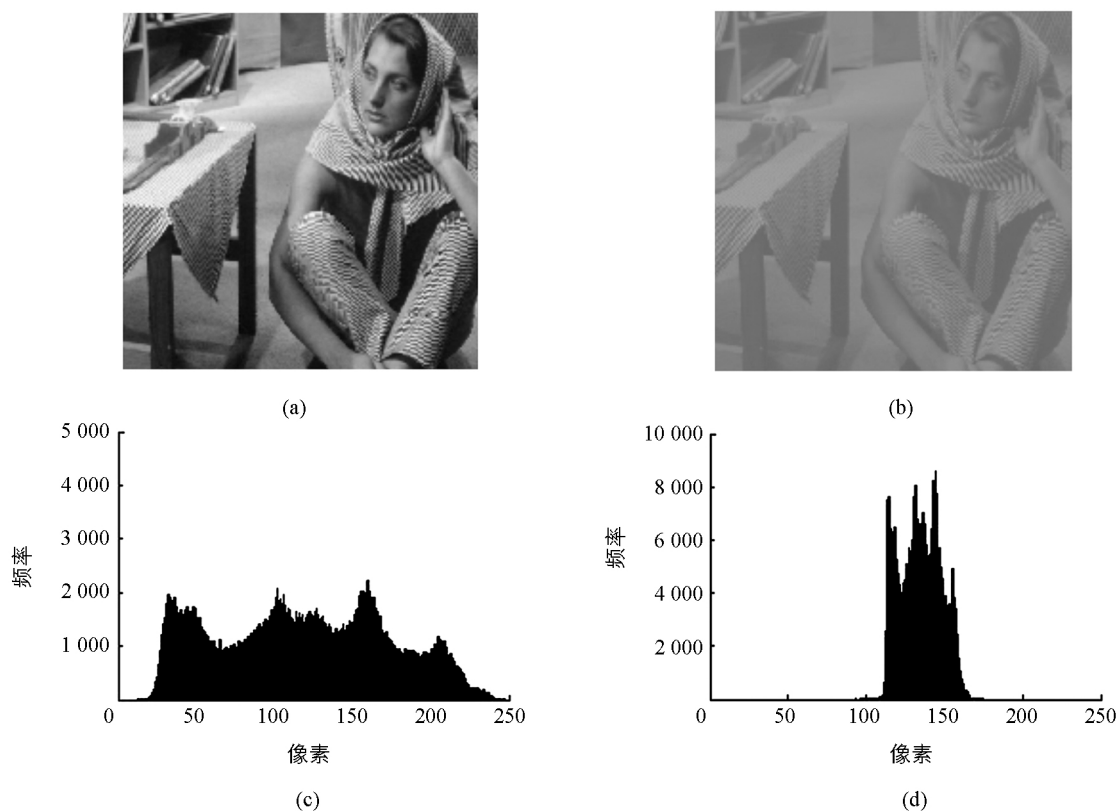


图10 灰度调整仿真结果

4 结论

本文理论分析并推导了一种电荷控制的非线性忆阻器模型,得到了两种更为直观的忆阻器本构关系表达式,通过数值分析验证了该数学模型的正确性.基于该模型,分两种情况对忆阻器串并联电

路进行了理论推导,研究了忆阻器的串并联特性.将忆阻系统和数字图像处理相结合,模拟数字图像处理中的映射函数.通过调整忆阻器的可变参数以及连接方式,得到不同的非线性映射函数,用于处理不同的数字图像.本文通过图像取反,图像对比度伸缩以及图像灰度调整三个例子验证了提出方案的有效性和正确性.

相比于其他学者基于单个忆阻器的研究思路,本文分析并深入研究了忆阻器组合形式的基本特性和应用潜能,具有更加广阔的研究前景.同时,通过选择不同的忆阻器及组合方式,得到多种非线性曲线,为用简单的忆阻系统电路实现经典的非线性函数提供了理论和实验的依据.相比之前使用功放和其他元件的电路实现方式,大大简化了电路结构,该方案可进一步运用到神经网络和非线性电路等领域.最后,基于忆阻器件的纳米级尺寸优势,本文的研究成果有望在硬件上实现数字图像处理的微处理器,实现软硬件相结合,进一步推进数字图像处理的发展.

参考文献:

- [1] CHUA L O. Memristor-the Missing Circuit Element. IEEE Trans [J]. 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] WILLIAMS R S. How We Found the Missing Memristor [J]. IEEE spectrum, 2008, 45(12): 28—35.
- [4] HU X F, DUAN S K, WANG L D, et al. Memristive Crossbar Array with Applications in Image Processing [J]. Science of China Information Science, 2011, 41(4): 500—512.
- [5] DUAN S K, HU X F, WANG L D, et al. Memristor-Based RRAM with Applications [J]. Science of China Information Sciences, 2012, 42(6): 754—769.
- [6] HU X F, DUAN S K, WANG L D, et al. Analog Memory Based on Pulse Controlled Memristor [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(5): 642—647.
- [7] GAO S Y, DUAN S K, WANG L D. On Memristive Cellular Neural Network and Its Application in Noise Removal and Edge Extraction [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2011, 33(9): 63—70.
- [8] MCDONALD N R, PINO R E, ROZWOOD P J, et al. Analysis of Dynamic Linear and Non-Linear Memristor Device Models for Emerging Neuromorphic Computing Hardware Design [C] //The 2010 International Joint Conference on Neural Networks. Barcelona, Spain, 2010: 1—5.
- [9] MAHVASH M, PARKER A C. A Memristor SPICE Model for Designing Memristor Circuits [C] //IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems. Seattle, USA, 2010: 989—992.
- [10] BATAS D, FIEDLER H. A Memristor SPICE Implementation and a New Approach for Magnetic Flux-Controlled Memristor Modeling [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2011, 10(2): 250—255.
- [11] WANG L D, DRAKAKIS E, DUAN S K, et al. Memristor Model and Its application for Chaos Generation [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2012, 22(8): 1250205.
- [12] BIOLEK Z, BIOLEK D, BIOLKOVÁ V. SPICE Model of Memristor with Nonlinear Dopant Drift [J]. Radio Engineering, 2009, 18: 210—214.
- [13] 冈萨雷斯. 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [14] ADHIKARI S P, YANG C, KIM H, et al. Memristor Bridge Synapse-Based Neural Network and Its learning [J]. IEEE Transactions. On Neural Networks and Learning Systems, 2012, 23(9): 1426—1435.
- [15] KIM H, SAH M, YANG C, et al. Memristor Bridge Synapses [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(6): 2061—2070.
- [16] PRATT W K. Digital Image Processing [M]. 3rd Edition. New York: Wiley Inter-Science, 1991.

Study on the Series-Parallel Connection Circuits of Nonlinear Memristors and Their Applications in Image Processing

DONG Zhe-kang¹, DUAN Shu-kai¹,
HU Xiao-fang², WANG Li-dan¹

1. School of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Department of Mechanical and Biomedical Engineering, City University of Hong Kong, HK 999077, China

Abstract: The memristor is a new type of non-linear dynamic variable resistors, the change in whose resistance depends on the past history of voltage or current in the device. Being the fourth fundamental circuit element with dynamic variable resistance, the memristor is unlike other resistors, capacitors and inductors, for it has a number of unique properties that have found attractive potentials in some promising fields such as nonvolatile memory, neuromorphic system and nonlinear circuit. In this paper, a mathematical closed-form charge-governed HP memristor model is presented with constructive procedures. In particular, this model is more realistic as it takes the nonlinear dopant drift effect near the terminals and the boundary conditions into account by adding a popular window function. Furthermore, the characteristics of the memristor series-parallel circuits have been analyzed. Based on the findings of the study, we propose to implement the mapping function required in image processing with the memristor-based combinational circuits. This scheme may contribute to further development of the modern image processing, especially in the hardware realization of image processors. Simulations have demonstrated the effectiveness of the proposed scheme by several conventional applications, including image reverse, contrast stretching and gray-scale adjusting.

Key words: memristor; charge-governed model; series-parallel circuit; image processing; mapping function

责任编辑 汤振金