

The equivalent model of memristor and its application in high order active filter circuit

Chen Bohua Tian Yukun Dong Jia

Tianjin University of Technology and Education, Tianjin, 300350, China

Abstract

To address challenges in physical fabrication of memristors and design/performance optimization of memristor-based filter circuits, this study employs a comprehensive approach integrating theoretical analysis, model development, simulation, and experimental validation. The research focuses on three key aspects: equivalent circuit design for memristors, active high-pass filter circuits utilizing memristors, and programmability enhancement of memristors. Two types of equivalent circuits—single-ended grounded and universal configurations—are designed to simulate fundamental memristor electrical characteristics. Additionally, first-order, second-order, and fourth-order active high-pass filter circuits are constructed to evaluate their filtering performance across different orders. Results demonstrate that the proposed equivalent circuits effectively replace traditional memristors, with higher-order filters exhibiting superior performance. Notably, the cutoff frequency can be dynamically adjusted by modifying the memristor resistance value. These findings establish memristors as promising candidates for filter circuit applications, providing a practical solution to design challenges in memristor-based filter circuits.

Keywords

memristor; equivalent circuit; filter circuit; cutoff frequency; programmability

忆阻器等效模型及其在高阶有源滤波电路中的应用

陈柏华 田育坤 董佳

天津职业技术师范大学, 中国 · 天津 300350

摘 要

针对忆阻器实物制备困难、基于忆阻器的滤波电路设计及性能调控存在挑战等问题, 本文采用理论分析、模型构建、仿真与实验验证相结合的方法, 对忆阻器等效电路、基于忆阻器的有源高通滤波电路及忆阻器可编程性展开研究。设计了单端接地和通用型两种忆阻器等效电路, 模拟忆阻器基本电学特性; 构建了一阶、二阶和四阶有源高通滤波电路, 分析不同阶数电路的滤波效果。结果表明, 所设计的等效电路可有效替代忆阻器, 高阶滤波电路滤波效果更优, 通过改变忆阻值可动态调整截止频率。研究得出忆阻器在滤波电路中具有良好应用潜力的结论, 为解决忆阻滤波电路设计难题提供了可行方案。

关键词

忆阻器; 等效电路; 滤波电路; 截止频率; 可编程性

1 绪论

1.1 国内外研究现状

忆阻器作为第四种基本电路元件, 由加州理工大学蔡少棠教授于 1971 年首次提出, 他用忆阻器来定义电荷量与磁通量的关系, 推断其具有记忆电荷量的特性, 用 M 来表示^[1]。2008 年, 惠普公司的 Strukov 团队在《Nature》发文, 认为 Pt/TiO₂/Pt 三明治叠层结构器件在电压扫描过程中出现捏滞回线是忆阻现象, 并构建了忆阻模型^[2]。这一现象证实了蔡绍棠教授提出的忆阻器的特性。

忆阻器的成功研制激发了国内外研究人员的探索热情,

大量相关文章开始出现^[3-5]。2010 年, Pershin 和 Ventra 在 IEEE 上发表了一篇论文, 提出一种基于数字电位器和微控制器基础上的忆阻器模型, 利用这个模型^[6], 分别设计了具有忆容、忆感特性的忆容、忆感电路。经多次试验, 证明了该器件的等效电容及忆感回路的电感值连续可调。

在国内, 人民教育出版社在 1980 年和 1981 年分别出版了蔡绍棠教授的《非线性网络理论引论》和《非线性电路理论》的译著, 译者分别是电子科技大学虞厥邦教授和清华大学肖达川教授^[7-8]。华中科技大学、西南大学、中国科学院微电子研究院等高校和科研院所展开了关于忆阻器的相关研究^[9-12]。2023 年 10 月, 清华大学吴华强团队成功研制出全球首颗全系统集成的忆阻器存算一体芯片^[13]。该芯片, 在人工智能等领域应用前景广阔。此外, 国内学者在忆阻混沌电路、人工神经网络权值存储等领域也取得显著进展。

【作者简介】陈柏华(2004-), 男, 中国福建福州人, 在读本科生, 从事微电子科学与工程(师范类)研究。

1.2 研究问题

尽管忆阻器研究已取得显著进展，但实际应用仍面临诸多问题。从自身来看，其实物化对材料和工艺要求极高，需在纳米尺度精确控制材料结构与性质以实现电阻可控变化，且其特性易受温度、电压、湿度等外界因素影响，可靠性与稳定性难以保障，这些限制了大规模生产应用。

在与滤波电路结合方面，传统滤波器性能参数固定，难以灵活调整；虽可利用忆阻器阻值可调特性动态调控滤波器性能，但忆阻滤波电路设计仍是一大挑战，目前相关研究多处于理论和仿真阶段，实际电路常存在滤波效果不理想、稳定性差等问题。

此外，忆阻器等效电路设计有待完善：因实物制备困难，研究多采用等效电路模拟其特性，但现有等效电路在精度和适用性上不足，尤其在可编程滤波电路中表现难达预期。同时，高阶忆阻滤波电路研究较少，且多集中于巴特沃斯滤波器，对贝塞尔、椭圆、切比雪夫等其他类型滤波器研究不足，限制了忆阻器在滤波领域的广泛应用。

1.3 研究目的及意义

本研究旨在围绕忆阻器在滤波电路中的应用，解决当前忆阻滤波电路研究存在的问题，推动其实用化。具体包括：设计可准确模拟忆阻器电学特性的等效电路模型，为相关研究提供可靠模拟器件，缓解实物制备难题；基于忆阻器及等效电路，设计性能优良的一、二、四阶有源高通滤波电路，通过改变忆阻值动态调整截止频率，探究不同阶数电路的滤波效果差异，为高阶电路设计提供参考。

本研究意义显著：理论上可完善忆阻器理论体系，丰富滤波电路设计方法，为电子电路领域发展提供新思路；实际应用中，忆阻滤波电路具备体积小、功耗低、性能可调等优势，在无线通信、音频处理等领域前景广阔，所设计的等效电路和可编程电路可为工程实践提供可行方案，推动忆阻器技术产业化，助力电子信息产业发展。

2 滤波器与忆阻器的理论基础

2.1 滤波器

滤波器是允许特定频率信号通过而阻止其他频率信号的电子电路，按传输频率分为低通、高通、带通和带阻滤波器；按元件类型分为无源与有源滤波器。无源滤波器由电容、电阻、电感组成，结构简单但性能有限；有源滤波器含运算放大器等有源元件，具备放大、增益控制功能，适用于高精度场景。

其主要特性参数包括截止频率（信号开始显著衰减的频率点）、通带带宽（允许通过的频率范围）、阻带带宽（显著衰减的频率范围）、阻带衰减（对无用信号的屏蔽能力）及阻抗（影响信号传输效率）。

滤波器在生活中应用广泛，如无线充电垫保障电磁兼容、家庭自动化设备过滤环境噪声、音频设备优化音质、计

算机稳定电源供应等。

2.2 忆阻器

忆阻器是一种新型电子元件，电阻值随通过的电荷量可逆变化，具有非易失性（断电后仍能保持信息），凭借低能耗、高速度、可扩展性等优势，成为下一代存储技术的核心候选。

其工作原理基于离子迁移机制：电流通过时引发内部材料结构变化，导致电阻改变，反向电流可使其恢复原状。制作材料主要包括金属氧化物（如 TiO_2 ）、过渡金属硫化物（如 MoS_2 ）、有机材料、钙钛矿型材料和硅基材料等，材料特性直接影响其电学性能与稳定性。

忆阻器应用广泛：在非易失性存储领域，性能优于 SRAM、DRAM 等传统存储器，集成面积小、能耗低、读写速度快；在神经形态计算领域，可模拟人脑突触功能，实现高效信息处理且功耗极低。

2.3 理想忆阻器 SPICE 模型

惠普实验室的忆阻器模型为 TiO_2 功能层夹于两铂电极间的三明治结构，总忆阻值随混合区宽度变化。通过引入 Joglekan 窗函数，建立符合边界迁移模型的 PSPICE 模型，仿真显示其 V-I 特性呈理想捏滞回线，电流随正弦电压周期性变化，为忆阻器电路设计提供了理论基础。

2.4 双极性阈值忆阻器行为模型

为刻画忆阻器阈值特性，Biolek 提出双极性阈值模型，借助平滑阶跃函数和绝对值函数削弱数学收敛影响。PSPICE 仿真表明，该模型仅呈现高阻态和低阻态，电压超过阈值时电阻状态改变，可准确描述实际忆阻器件的双极性阈值行为。

3 忆阻等效电路及在滤波电路中的设计

3.1 忆阻器等效电路模型

忆阻器实物化面临材料控制、工艺技术等难题，研究人员通过设计等效电路模拟其特性。在单端接地忆阻模型基础上，提出通用型忆阻等效电路如图 3-1，等效导纳具有记忆特性，仿真显示其 V-I 特性呈斜 8 字形，频率越高越接近直线，高频时忆阻效应消失，扩大了应用场景。

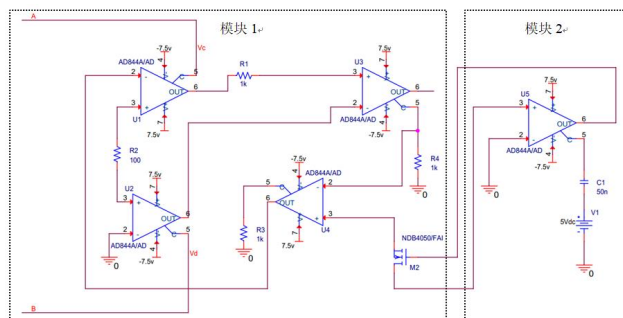


图 3-1 忆阻器等效电路图

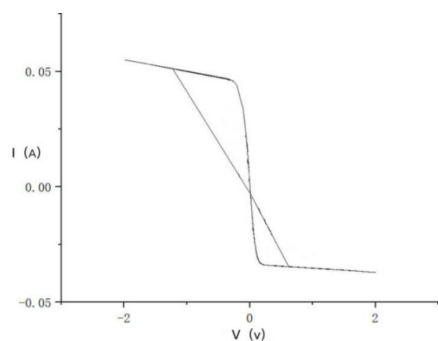


图 3-2 等效忆阻电路仿真

3.2 一阶有源高通滤波电路

忆阻器实物化受材料控制、工艺技术等难题制约,研究人员通过设计等效电路模拟其特性。单端接地忆阻等效模型由运算放大器、电容、模拟乘法器等组成,仿真显示其 V-I 特性呈斜 8 字形,频率越高越接近直线,高频时忆阻效应消失。通用型忆阻等效电路由电压控制浮地阻抗电路和电流积分器构成,等效导纳具记忆特性,可模拟忆阻器电学行为,拓宽了应用场景。

3.3 二阶有源高通滤波电路

基于巴特沃斯滤波器设计的二阶有源高通滤波电路,用忆阻器替代电阻后,通过改变忆阻值可动态调整截止频率。通过仿真可知,输入频率低于截止频率时抑制明显,高于时无显著衰减,且忆阻值增大时幅频特性曲线反向偏移,分辨率提高。二阶等效忆阻滤波电路截止频率约 995Hz,实验验证其滤波效果符合预期。

3.4 四阶忆阻有源高通滤波电路

四阶滤波电路由两级二阶电路级联而成,采用两个忆阻器分别调节两级截止频率。

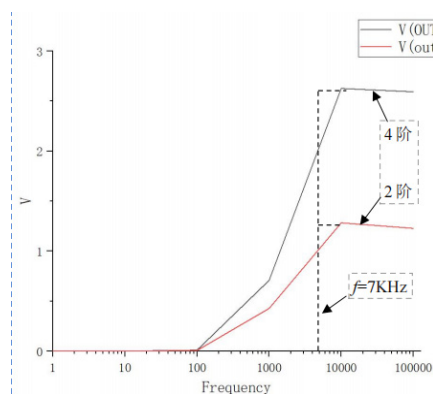


图 3-3 频域特性图

该四阶等效忆阻滤波电路的幅频特性如图 3-3 所示,其幅频特性更陡峭,过渡带更窄,滤波效果优于二阶电路。该电路截止频率约 7KHz,表现出优异的高通特性,实际搭建电路测试验证了其有效性。

3.5 实验验证

搭建一阶、二阶、四阶等效忆阻滤波电路,测试表明

在截止频率范围内,电路对低频信号衰减显著,高频信号无明显抑制,与仿真结果一致,证实了等效忆阻电路在实际滤波中的可行性。

4 总结与展望

4.1 工作总结

本文设计忆阻器理想模型及两种等效电路,仿真验证其可实现忆阻器基本电学特性;构建基于忆阻器及等效电路的一、二、四阶有源高通滤波电路,显示高阶电路滤波效果更优,且等效电路可替代忆阻器实现功能;还设计两种忆阻器编程电路,应用于一阶滤波电路可调节截止频率。

4.2 展望

未来将完善忆阻电路模型以接近实际器件,将可编程电路应用于高阶滤波实现截止频率实时调整,拓展忆阻滤波电路在多种类型滤波器中的研究,优化等效忆阻电路设计以提升其在可编程电路中的性能,推动忆阻器在滤波领域的实际应用。

参考文献

- [1] Chua L. Memristor-the missing circuit element[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1971, 18(5): 507-519.
- [2] Strukov DB, Snider GS, Stewart DR, et al. The missing memristor found[J]. Nature, 2008, 453(7191): 80-83.
- [3] Rose GS. Overview: Memristive devices, circuits and systems[C]. in: Paris, eds. Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. France: IEEE, 2010: 1955-1958.
- [4] Merrih-Bayat F, Shouraki SB. Memristor-based circuits for performing basic arithmetic operations[J]. Procedia Computer Science, 2011, 3: 128-132.
- [5] Joglekar YN, Wolf SJ. The elusive memristor: properties of basic electric circuits[J]. European Journal of Physics, 2009, 30(4): 661-663.
- [6] Pershin YV, Di Ventra M. Memristive circuit simulates memcapacitors and meminductors[J]. Electronics Letters, 2010, 18(6): 517-518.
- [7] 蔡少棠. 非线性网络理论引论下册[M]. (虞厥邦). 北京: 人民教育出版社, 1981: 100-108.
- [8] 蔡少棠. 非线性电路理论[M]. (刘小河). 北京: 人民教育出版社, 2009: 35-45.
- [9] 李伟. 基于硫系化合物的类神经元突触的认知存储器件研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [10] 张金箭. 碲基硫系化合物材料的忆阻特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [11] 董哲康. 基于忆阻器的组合电路及神经网络研究[D]. 成都: 西南大学, 2015.
- [12] 刘明. 新型阻变存储技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 78-83.
- [13] Zhang W, Yao P, Gao B, et al. Edge learning using a fully integrated neuro-inspired memristor chip[J]. Science, 2023, 381(6663): 1205-1211.