物理实验教学

忆阻器用于实验教学尝试*

—— 以倍压整流电路为例

王廷江

（西南大学荣昌校区基础部　重庆　402460）

（收稿日期：2021－06－30）

摘　要：以倍压整流电路为例，探究了如何将忆阻器引入到本科实验教学之中，不但可以加深学生对忆阻器的理解，还可以提高学生的学习兴趣.

关键词：忆阻器　倍压整流电路　伏安关系　实验教学

忆阻器于1971年由Chua L. O提出[1]，Strukov等人于2008年第一次成功制作出忆阻器件[2]，由于忆阻器的优异性能，使其有着广阔应用前景，已成为物理、电子、材料等领域研究热点. 若能将忆阻器融入本科课程教学之中将对开拓学生的创新思维有十分重要作用，但却受到忆阻器本身原理的复杂性，制作上的高难度性及学生相关知识的缺乏等制约. 近年来随着忆阻器实现方式不断拓展，相继发现了部分传统电路及其改进型也具有忆阻特性[3~5]. 这类忆阻电路结构简单，学生易学易懂，因此以传统电路为突破口，以学生自主探究为主，用忆阻器的端口特性为判据，通过虚拟实验、硬件实验及数值仿真相互印证，探究出了多类传统基本电路及其改进型具有忆阻特性. 本文以图1所示的二倍压整流电路为例来说明探究过程.

1　实验探究

1.1　虚拟仿真实验

让同学们通过诸如PsPice和Multisim等仿真软件构建传统电路及改进型电路自主进行实验，在端口施加 $u=U_{\mathrm{m}}\sin(2\pi f)t$ V 的激励电源，观察记录不同参数下及不同电源幅值和频率下的端口伏安特性曲线，将其与忆阻器端口特性相对比，探寻满足忆阻器特性的元件参数组合和相应激励电源的频率取值范围. 该过程安全、高效、方便，不受时空限制，不受实验次数和一些随机因素影响，使实验内容在时间和空间上得以延伸. 如用Multisim12所构建图1所示二倍压整流电路，当电路参数选取为：$C_1=C_2=100\ \mu$F，$R=1\ \mathrm{k}\Omega$，二极管用IN4148型. 在激励电源取 $U_{\mathrm{m}}=3$ V，频率 f 分别为10 Hz，100 Hz时，u-i 关系曲线如图2(a)和(b)所示. 图2(a)没有在原点收缩的紧磁滞回线，在此频率下不具有忆阻特性，而图2(b)在原点收缩为紧磁滞回线，并随频率增大磁滞回线旁瓣面积会逐渐缩小，此频率范围电路具备忆阻特性.

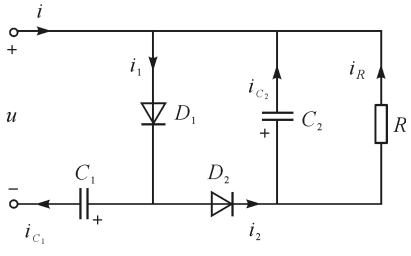
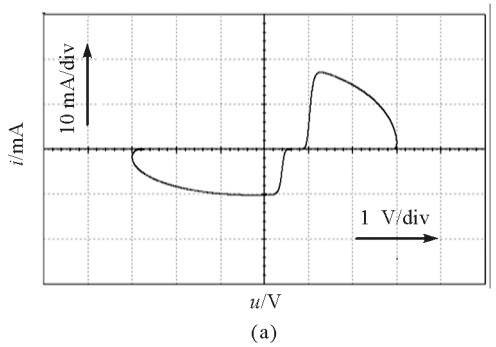


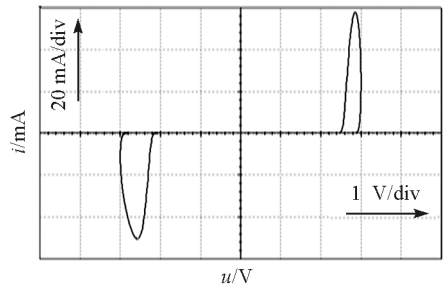
图1　二倍压整流电路图



(a)

* 西南大学教育教学改革研究项目，项目编号：2019JY044

作者简介：王廷江(1969－　)，男，硕士，副教授，主要从事电工理论与新技术、生物电子电路、非线性电路与系统研究.

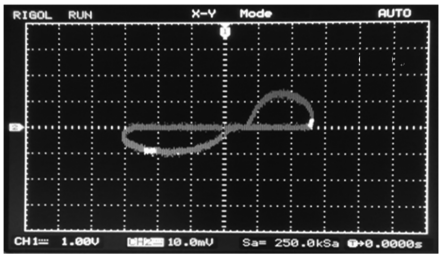


(b)

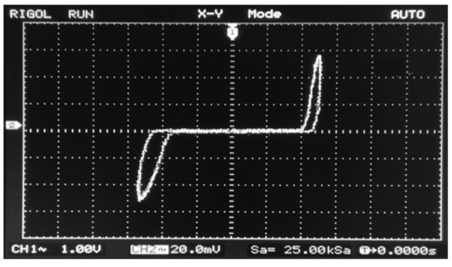
图 2　不同频率下紧磁滞回线虚拟实验图

1.2　电路实验验证

完善实验室管理模式，开放实验室，让学生能充分利用空闲时间，十分便捷地进入实验室自主实验，通过实验箱或面包板搭建电路来验证虚拟实验结果. 比如用绿扬 YB1602 函数发生器作激励源，由 RIGOL(DS1102E 型) 数字示波器采集实验结果，电路端口电压由 CHI 通道采集，端口流入电流由另接入一只 1 Ω 电阻两端电压通过 CH2 通道采集. 取 $C_1=C_2=100\ \mu\text{F}$，$R=1\ \text{k}\Omega$，二极管用 IN4148 型，$U_\text{m}=3$ V，当频率 f 分别为 10 Hz，100 Hz 时，$u-i$ 关系曲线如图 3(a) 和 3(b) 所示. 可见硬件实验结果与虚拟实验结果基本一致，其他元件参数及电源频率及幅值实验结果也与虚拟实验结果基本吻合.



(a)



(b)

图 3　不同频率下紧磁滞回线物理实验图

2　建模与数值仿真

2.1　数学建模

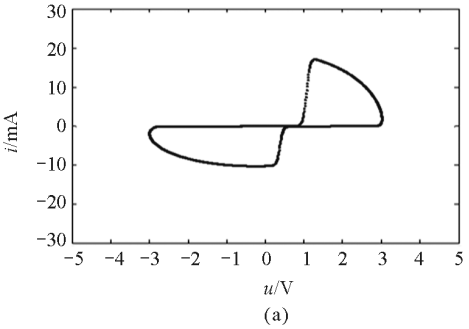
在教师引导下围绕电路端口特性开展模型建立，依据元件电流与电压间关系及电路基本定律(如 KCL，KVL 等) 可得图 1 电路的端口伏安关系及电容电压的状态方程

$$\begin{cases} i = I_\text{S}\exp\left[2\rho(u-u_{C_1})\right]-I_\text{S}\exp\left[2\rho(u_{C_1}-u-u_{C_2})\right] \\ \dfrac{\text{d}u_{C_1}}{\text{d}t} = \dfrac{I_\text{S}\exp\left[2\rho(u-u_{C_1})\right]-I_\text{S}\exp\left[2\rho(u_{C_1}-u-u_{C_2})\right]}{C_1} \\ \dfrac{\text{d}u_{C_2}}{\text{d}t} = \dfrac{I_\text{S}\{\exp\left[2\rho(u_{C_1}-u-u_{C_2})\right]-1\}}{C_2}-\dfrac{u_{C_2}}{RC_2} \end{cases} \tag{1}$$

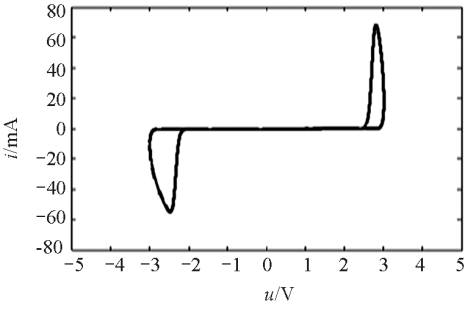
式中 u 为端口输入电压，i 为端口输入电流，C_1，C_2 分别为电容器容量，u_{C_1}，u_{C_2} 分别为电容器两端电压，I_S 为二极管反向饱和电流，$\rho=\dfrac{1}{2nV_T}$，其中 n 与 V_T 为二极管的发射系数与热电压.

2.2　数值仿真

依据式(1) 用 Matlab 软件进行数值仿真，将仿真结果与虚拟实验和电路实验结果进行对比. 如取 $C_1=C_2=100\ \mu\text{F}$，$R=1\ \text{k}\Omega$，选用 IN4148 型二极管，其特征参数为 $I_\text{S}=2.682$ nA，$n=1.836$，$V_T=25$ mV($T=293$ K)，激励电源为 $u=U_\text{m}\sin(2\pi f)t$ V，当 $U_\text{m}=3$ V，f 分别为 10 Hz，100 Hz 时，其伏安关系仿真曲线分别如图 4(a) 和 4(b) 所示，仿真结果与虚拟实验和电路实验结果基本一致. 其他元件参数及电源频率及幅值下的仿真结果也与虚拟实验和电路实验结果基本一致.



(a)



(b)

图 4　不同频率下紧磁滞回线数值仿真图

光的直线传播在地球测量中的应用

祁灏昕　　牛全福

（兰州理工大学土木工程学院　甘肃 兰州　730050）

（收稿日期：2021－07－22）

摘　要：以著名的十大物理实验之一埃拉托色尼测量地球周长为例，总结了 4 种测量地球半径的简单物理方法. 利用光的直线传播和太阳光可以看作平行光的物理知识，通过人眼观察，辅以直尺、绳索、计时器、水容器等简单的测量工具，经过几何光学计算，就可以比较准确地得到地球的周长或半径，并分析了测量中误差产生的原因. 实验中对物理概念及规律的应用，对现代的大地测绘工作、光的直线传播的应用以及新的物理实验的开发可以提供有益的启示.

关键词：物理方法　测量　地球半径

1　引言

2002 年，美国两位学者根据在全美物理学家的调查结果，提出了有史以来最出色的十大物理实验，结果刊登在了美国《物理世界》杂志上，埃拉托色尼测量地球圆周实验位列第七.

古希腊的埃拉托色尼第一次比较准确地测出了地球的半径，对人类认识地球产生了巨大影响. 1037 年比鲁尼采用另外一种方法测量了地球的半径. 近代也有两种方法测量地球半径，一种是Dannis

3　结束语

以传统电路为模板，将忆阻器引入到课程教学之中，通过自主虚拟实验、硬件实验、数值仿真等环节探究了多种类型的忆阻模拟器，使学生对忆阻器认识从陌生到逐步熟悉，极大激发了学生对忆阻器学习的兴趣和激情，引导、培养了学生创新意识、协作精神和理论联系实际的作风，为后续开设综合性、设计型、创新性的忆阻器实验项目打下坚实基础.

参 考 文 献

1　Chua L. O. Memristor: The Missing Circuit Element[J]. IEEE Trans. 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: 80 ～ 83

3　Corinto F, Ascoli A. Memristive Diode Bridge with LCR Filter[J]. Electron Letters, 2012, 48(14): 824 ～ 825

4　Bao B C, Jing J Y, Feng W H. Generalized Memristor Consisting of Diode Bridge with First Order Parallel RC Filter[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2014, 24(11): 1450143

5　武花干，包伯成，徐权. 基于二极管桥与串联 RL 滤波器的一阶广义忆阻模拟器[J]. 电子学报，2015，43(10)：2129 ～ 2132

Attempt on Using Memristor in Experimental Teaching

——Taking the Voltage Doubling Rectifier Circuit as an Example

Wang Tingjiang

(Department of Basic Science Rongchang campus, Southwest University, Chongqing　402460)

Abstract: Taking voltage doubling rectifier circuit as an example, this paper explores how to introduce memristor into undergraduate experimental teaching. not only can deepen students' understanding of the memristor, but also can improve the students' interest in learning.

Key words: memristor voltage; doubler rectifier circuit; voltage-current relationship; experimental teaching