

基于忆阻器的正弦波振荡电路设计

尹 力,甘朝晖,段宗胜

(武汉科技大学 信息科学与工程学院,湖北 武汉 430081)

摘 要: 为了解决传统的正弦波振荡电路难以起振和调频不便的问题,使用由忆阻器构成的等效电容电路和等效忆感电路,设计了一种正弦波振荡电路. SPICE 仿真实验结果证实了设计的可行性. 所设计的振荡电路,在起振、调频方面相比于传统的正弦波振荡电路具有很大优势.

关键词: 正弦波振荡电路;忆阻器;SPICE

中图分类号: TN75

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)11-0126-06

Design of Sine-Wave Oscillator Circuit Based on Memristor

YIN Li, GAN Zhao-hui, DUAN Zong-sheng

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: In order to solve the problem of start-up and adjusting frequency in traditional sine-wave oscillation circuit, a sine-wave oscillator circuit based on memory capacitor and memory inductance equivalent circuit which is made of memristor is proposed in the paper. The proposed circuit is simulated by SPICE, the results show that the circuit have a great advantage in terms of start-up and adjusting frequency compared with traditional sine-wave oscillation circuit.

Key words: sine-wave oscillation circuit; memristor; SPICE

1 引言

正弦波振荡电路是一种无需外加激励信号就能产生正弦波信号的电路,在测量、电子工程和无线电通讯等技术领域被广泛应用. 常见的正弦波振荡电路,例如,文氏电桥振荡电路、考毕兹振荡器、克拉泼振荡器、西勒振荡器等,一般由放大电路、选频网络和正反馈网络组成. 当振荡电路电源接通后,元件的噪声引起的电扰动相当于一个初始激励信号,它含有丰富的谐波. 经选频放大后,某一频率的正弦波反馈到放大电路的输入端,若反馈信号与放大电路输入信号的相位相同且放大倍数足够大,则输出幅度会逐渐增大,最后当反馈信号和输入信号的大小相等时输出信号稳定下来. 上述工作原理决定了正弦波振荡电路必须要同时满足相位平衡和幅值平衡

两种条件. 相位平衡和幅值平衡条件对电路的连接形式和元器件参数的匹配提出了严格的要求. 因此,传统的正弦波振荡电路往往因为元器件参数间的匹配无法满足振幅平衡条件而难以起振.

蔡少棠教授在分析电路基本变量之间关系时提出了忆阻器的概念,它用以描述电荷 q 与磁通量 φ 之间的关系^[1]. 将忆阻器的概念推而广之,如果器件的阻抗与系统的内部状态有关,则这种器件可以统称为忆阻系统^[2]. M. Di Ventra 等人进一步提出了记忆电路元件的概念,他认为记忆器件不仅仅限于忆阻系统,还包括忆容和忆感系统^[3]. 到目前为止,忆阻器实物^[4]已经被研发出来了,但是市场上还找不到完全满足忆容或者忆感系统特性的器件. Y. V. Pershin 和 M. Di Ventra^[5-6]使用忆阻器和其它基本电路元件设计出了忆容和忆感电路,该电路可以

收稿日期: 2013-01-25; 修回日期: 2013-03-06

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2011CDC075)

分别模拟电容和电感的基本特性,其等效电容 $C(t)$ 和等效电感 $L(t)$ 的量值均能够在一定范围内连续改变.为了叙述方便,本文以下部分称这两种电路分别为等效忆容电路和等效忆感电路.

本文使用等效忆容和等效忆感电路,设计一种正弦波振荡电路.由于振荡电路中用来起振和调频的电容和电感量可以在一定范围内连续调整,因此,本文设计的正弦波振荡电路,当等效电感 $L(t)$ 的初始量值无法使电路起振时,可以通过改变等效电感 $L(t)$ 的量值来完成参数的匹配而起振,同时可以通过改变等效电容 $C(t)$ 的量值来调整振荡频率.相比于传统的正弦波振荡电路,在起振和频率调整方面具有很大优势.

2 忆阻器

2.1 忆阻器的概念和性质

1971年,美国加州大学伯克利分校的蔡少棠(Leon Chua)教授发表论文预测了忆阻器(Memristor, Memory 和 Resistor 的合成词)的存在^[1],并将其称为继电阻、电容和电感之外的第四种基本电路元件.2008年,惠普(HP)实验室宣布成功研制出了固态的忆阻器^[4].该忆阻器是一种具有记忆特性的非线性纳米元件,忆阻的物理量纲与电阻相同,其阻值取决于流过忆阻器的电荷总量.当给忆阻器施加正向电压时,流经忆阻器的电流为正,其阻值减小;当电压反相时,流经忆阻器的电流为负,其阻值增加.断电后,忆阻器能保持断电时的电阻值.

Zdeněk BIOLEK 等人在 HP 实验室忆阻器原型的基础上,提出了一种忆阻器 SPICE 模型^[7-8],可以自由修改边界效应条件等参数以改变忆阻器的性质.这些参数分别是忆阻器的初始值 R_{init} ,最大值 R_{off} ,最小值 R_{on} ,金属氧化物薄膜厚度 D ,离子迁移率 μ 和用以表征离子非线性迁移特性的窗函数的参数 p ,在忆阻器尚未工业化生产的情况下,为研究者分析其电气特性提供了一个便捷的途径.文献[9]考虑到离子迁移是需要一定强度的电场这一要素,在 Zdeněk BIOLEK 等人设计模型的基础上,提出一种具有阈值电压 V_T 的忆阻器模型,并设计了一种忆阻器阻值控制电路以控制忆阻器阻值的变化.忆阻器的阻值变化与控制电压的极性和施加电压时间的长短有关,通过调节控制信号的极性和保持时间,可

以控制忆阻器阻值的连续变化.

2.2 忆容等效电路和忆感等效电路

蔡少棠教授在提出忆阻器的概念之后,又提出了忆阻系统的概念,认为忆阻器是广义忆阻系统中的一个特例^[2].在此基础上, M. Di Ventra 等人将记忆元件扩充到忆容系统和忆感系统中,并设计出了具有电容特性的等效忆容电路和具有电感特性的等效忆感电路^[5-6].

2.2.1 忆容等效电路

忆容等效电路由忆阻器 M 、电容器 C_1 、电阻 R 和运算放大器 A_1 组成,其电路结构如图 1 所示.

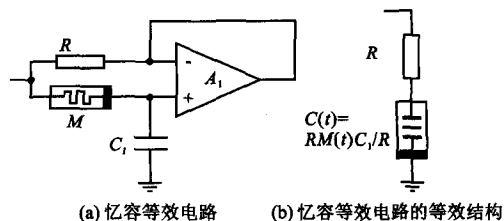


图 1 忆容等效电路的电路结构

由放大器“虚短”的概念可知,图 1(a) 中电容 C_1 上端的电势与电阻 R 右端的电势相等.因此, Y. V. Pershin 等人认为可以将该电路看作等效电容 $C(t)$ 与电阻 R 的右端串联,如此则有等式(1)成立.

$$C(t) = C_1 \cdot R_M(t)/R \quad (1)$$

因为忆阻值 $R_M(t) = (V_{\text{in}} - V_-)/I$,通过电容 C_1 的电流 $I = C_1 \cdot \frac{dV_-}{dt}$,所以等效电容 $C(t)$ 满足等式(2).当电阻 $R \ll R_M$ 时,可以将电路等效为图 1(b) 所示的电路.

$$C(t) = \frac{V_{\text{in}} - V_-}{R \cdot \frac{dV_-}{dt}} \quad (2)$$

由式(1)可知,等效电容 $C(t)$ 的量值取决于忆阻器的阻值 $R_M(t)$.由于忆阻器的阻值 $R_M(t)$ 可以在一定范围内连续改变,所以等效电容 $C(t)$ 的量值也可以在一定范围内连续改变.

为了进一步验证上述电路所具有的电容特性, Y. V. Pershin 等人分析了这些电路在外加方波信号时的响应,如图 2 所示.其中 V_{in} 为忆容等效电路的输入电压, V_- 为运算放大器 A_1 反相端的电压,即电容的电压 V_C .

2.2.2 忆感等效电路

忆感等效电路由忆阻器 M 、电阻 R 、电容器 C_1

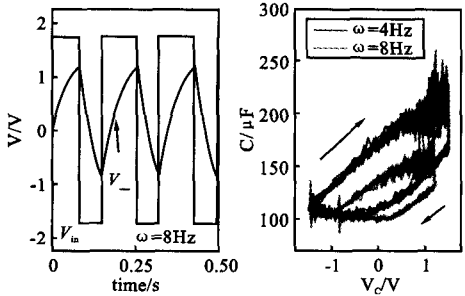


图 2 忆容等效电路的仿真曲线

和运算放大器 A_1 组成,其电路结构如图 3 所示.

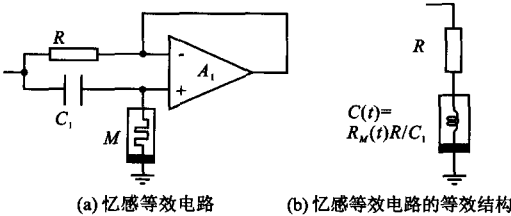


图 3 忆感等效电路的电路结构

忆感等效电路与忆容等效电路的结构类似,只是将忆阻器 M 与电容 C_1 的位置互换,其等效电感为:

$$L(t) = R \cdot R_M(t) \cdot C_1 \quad (3)$$

由式(3)可知,等效电感 $L(t)$ 的量值取决于忆阻器的阻值 $R_M(t)$,通过改变忆阻器的阻值 $R_M(t)$ 可以实现等效电感 $L(t)$ 量值的连续改变.

为了进一步验证上述电路所具有的电感特性,Y. V. Pershin 等人同样分析了这些电路在外加方波信号时的响应,如图 4 所示. 其中 V_{in} 为忆感等效电路的输入电压, V_- 为运算放大器 A_1 反相端的电压,即为等效电感的电压 V_L ,其波形的变化与外加电压的极性有关.

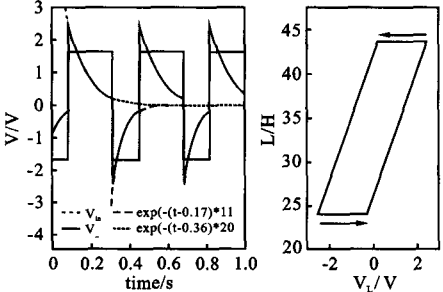


图 4 忆感等效电路的仿真曲线

3 忆阻器构成的正弦波振荡电路

由上节的分析可知,等效电容 $C(t)$ 和等效电感 $L(t)$ 不仅分别具有电容和电感的特性,同时其电容量和电感量值在一定范围内连续改变. 在 LC 选

频网络中用等效忆容 $C(t)$ 代替电容,等效忆感 $L(t)$ 代替电感,可以组成 $L(t)C(t)$ 选频网络,相比于 LC 选频网络, $L(t)C(t)$ 选频网络能够更加方便地改变电感和电容的量值. 在此基础上,本文设计了如图 5 所示的正弦波振荡电路,其输出信号为 V_o .

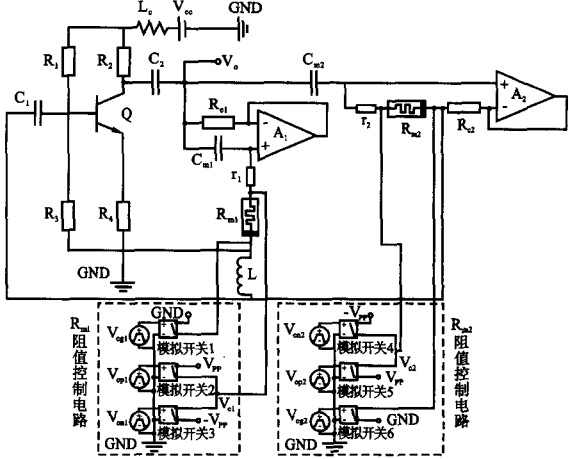


图 5 基于忆阻器的正弦波振荡电路

在图 5 中, A_1 、 A_2 为理想运算放大器, R_{m1} 和 R_{m2} 为忆阻器, R_{m1} 阻值控制电路和 R_{m2} 阻值控制电路分别用于控制忆阻器 R_{m1} 和 R_{m2} 的阻值,其原理与文献[9]中提到的阻值控制电路类似. 以忆阻器 R_{m1} 为例,当 V_{cp1} 和 V_{q1} 为高电平时,模拟开关 2 和模拟开关 1 导通,此时 R_{m1} 阻值控制电路的输出端 $V_{c1} = V_{pp}$,即 R_{m1} 两端压差为 V_{pp} ;当 V_{on1} 和 V_{q1} 为高电平时,模拟开关 3 和模拟开关 1 导通,此时 R_{m1} 阻值控制电路的输出端 $V_{c1} = -V_{pp}$,即 R_{m1} 两端压差为 $-V_{pp}$;其中 V_{cp1} 和 V_{on1} 不同时为高电平. V_{pp} 大于忆阻器的阈值电压 V_T ,当压差为 V_{pp} 时,忆阻器阻值减小,当压差为 $-V_{pp}$ 时,忆阻器阻值增大.

由上节的分析可知,该电路可等效为如图 6 所示的电路,其中等效电感 $L(t) = R_{c1}(R_{m1} + r_1)C_{m1}$,等效电容 $C(t) = C_{m2}(R_{m2} + r_2)/R_{c2}$.

在图 6 中,等效电感 $L(t)$ 、电感 L 和等效电容 $C(t)$ 组成 $L(t)C(t)$ 选频网络,选频网络的三个端点 1、2 和 3 与三极管 Q 的三个电极分别连接;电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 作为偏置电阻为三极管 Q 提供合适的偏置电流,使共射级放大电路获得稳定的静态工作点;电容 C_1 和 C_2 为耦合电容;电源 V_{cc} 通过高频扼流圈 L_c 接到三极管 Q 的集电极.

由等效电感 $L(t)$ 、电感 L 和等效电容 $C(t)$ 组成的谐振回路谐振时 1、3 两端近似呈现纯电阻特性,

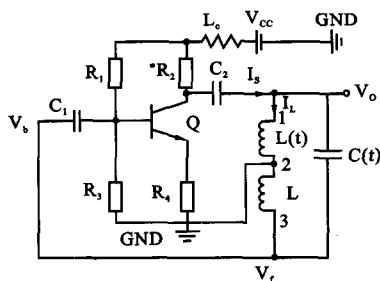


图6 基于忆阻器的正弦波振荡电路的等效电路

且回路电流 I_L 近似为回路外输入电流 I_s 的 Q 倍,其中 $Q \gg 1$,即回路外输入电流的影响可以忽略不计。当选取2端为交流参考电位点时,1和3两端电位极性相反,由于在纯电阻负载的条件下,共射级放大电路具有倒相作用,所以反馈信号 V_f 与输入信号 V_o 同相,满足相位平衡条件。

正弦波振荡电路产生持续震荡的振幅平衡条件为式(4):

$$|A_v \dot{F}_v| = 1 \quad (4)$$

其中 A_v 为放大电路的增益, F_v 为反馈系数,由式(4)可以得出图6中电路的振幅平衡条件为:

$$\left| A_v \frac{L}{L(t)} \right| = 1 \quad (5)$$

欲使电路能够自行建立振荡,必须要满足

$\left| A_v \frac{L}{L(t)} \right| > 1$ 。考虑电感 $L(t)$ 与 L 之间的互感 M , 电路的振荡频率可近似表示为式(6):

$$f = f_0 \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{(L + L(t) + 2M)C}} \quad (6)$$

由于图5所示的电路可以通过改变忆阻器 R_{m1} 的阻值来调整等效电感 $L(t)$ 的量值,可以通过改变忆阻器 R_{m2} 的阻值来调整等效电容 $C(t)$ 的量值,由公式(5)、(6)可知,当等效电感 $L(t)$ 的量值无法使振幅平衡条件满足时,可以通过改变其电感量值来使电路起振,同时可以通过改变等效电容 $C(t)$ 的量值来调整正弦波振荡频率的大小。

4 仿真实验

为了验证本文设计的电路是否满足设计要求,通过 SPICE 仿真软件对该电路进行了一系列仿真。本文实验是在文献[7]提出的忆阻器模型上实现的,忆阻器 R_{m1} 和 R_{m2} 的相关参数均为: $R_{on} = 100 \Omega$, $R_{off} = 16k\Omega$, $R_{init} = 11k\Omega$, $D = 10nm$, $\mu = 10^{-14} m^2 s^{-1} V^{-1}$, $p = 1$, $V_T = 1.2V$ 。在图5中,电路

其它元件的参数如下:电容 $C_{m1} = 2200pF$, $C_{m2} = 1pF$;电感 $L = 2.2\mu F$;电阻 $R_1 = 33k\Omega$, $R_2 = 6.8k\Omega$, $R_3 = 33k\Omega$, $R_4 = 1k\Omega$, $r_1 = r_2 = 10\Omega$, $R_{c1} = R_{c2} = 1\Omega$ 。

4.1 起振实验

本文设计的电路可以通过改变忆阻器 R_{m1} 的阻值来调整等效电感 $L(t)$ 的量值,而等效电感 $L(t)$ 的量值决定了振荡电路是否会满足振幅平衡条件而起振。当等效电感 $L(t)$ 的初始量值无法使电路起振时,可以通过调整其电感量值来使电路起振。

忆阻器 R_{m1} 阻值控制电路输出的控制信号 V_{cl} 一直为 $0V$ 时,忆阻器 R_{m1} 的阻值将保持不变,此时电感 $L(t)$ 的量值也不变。通过 SPICE 仿真可以得到如图7所示输出信号 V_o 的波形。由图7可知输出信号逐渐衰减到 $0V$ 。由以上结果可知等效电感 $L(t)$ 的初始量值无法使电路起振。

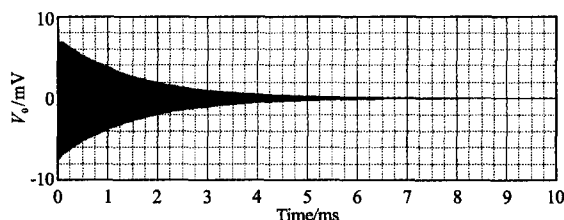


图7 起振实验中不施加控制信号时输出信号的波形

忆阻器 R_{m1} 阻值控制电路输出如图8(a)所示的控制信号 V_{cl} ,通过 SPICE 仿真得到如图9所示的输出信号 V_o 的波形。

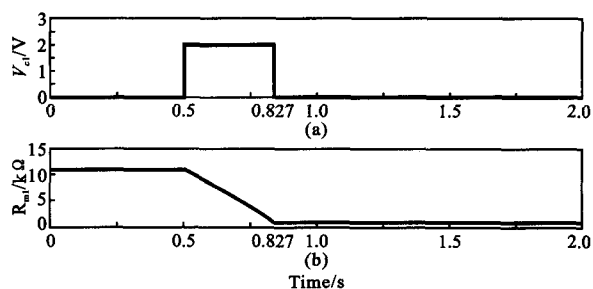


图8 起振实验中忆阻器的阻值控制曲线

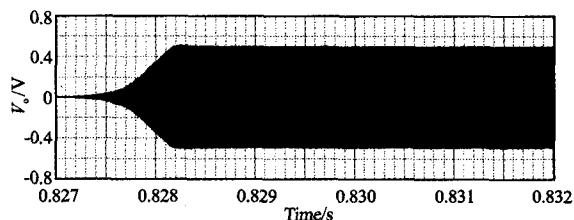


图9 起振实验中施加控制信号时输出信号的波形

从图8可知:在 $0 \sim 0.5s$ 时,控制信号 V_{cl} 的幅值小于 V_T ,忆阻器 R_{m1} 的阻值保持不变,此时等效

电感 $L(t = 0.5) = 24.222\mu\text{H}$;

在 $0.5 \sim 0.827\text{s}$ 时, 控制信号 V_{c1} 的幅值大于 V_T , 忆阻器 R_{m1} 的阻值减小为 $0.97\text{K}\Omega$, 此时等效电感 $L(t = 0.827) = 2.156\mu\text{H}$;

在 $0.827 \sim 2\text{s}$ 时, 控制信号 V_{c1} 的幅值小于 V_T , 忆阻器 R_{m1} 的阻值保持不变, 此时 $L(t = 2) = 2.156\mu\text{H}$. 通过施加控制信号 V_{c1} , 等效电感 $L(t)$ 的值有了明显的减小.

由图 9 可知, 在 $t = 0.827\text{s}$ 以后, 振荡电路由于等效电感 $L(t)$ 量值的变化而振荡起来. 对比图 9 和图 7 的结果, 可以看出当等效电感 $L(t)$ 的初始量值无法使电路满足振幅平衡条件而起振时, 可以通过改变等效电感 $L(t)$ 的量值来使电路起振.

4.2 频率调整实验

本文所设计的电路可以通过改变忆阻器 R_{m2} 的阻值来调整等效电容 $C(t)$ 的量值, 而等效电容 $C(t)$ 的量值决定了振荡频率的大小, 因此可以通过改变其电容量值来调整正弦波的振荡频率.

忆阻器 R_{m1} 和 R_{m2} 的阻值控制电路分别输出如图 10(a) 所示的控制信号 V_{c1} 和 V_{c2} , 通过 SPICE 仿真得到如图 11 所示的输出信号 V_o 的波形.

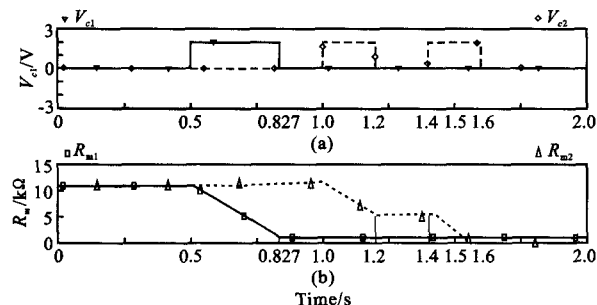


图 10 频率调整实验中忆阻器的阻值控制曲线

从图 10 中可知, 在 $t = 0.5\text{s}$ 到 $t = 0.827\text{s}$ 之间时, $V_{c1} = 2\text{V}$, $V_{c2} = 0\text{V}$, 持续时间为 0.327s , 控制信号 V_{c1} 的幅值大于 V_T , 控制信号 V_{c2} 的幅值小于 V_T , 所以忆阻器 R_{m1} 的阻值减小为 $0.97\text{k}\Omega$, 忆阻器 R_{m2} 的阻值保持不变, 此时等效电感 $L(t = 0.827) = 2.156\mu\text{H}$, 等效电容 $C(t = 0.827) = 11.01\text{nF}$, 在 $t = 0.827\text{s}$ 到 $t = 1\text{s}$ 之间, 由图 11(a) 可知电路的振荡频率为 714kHz ;

在 $t = 1\text{s}$ 到 $t = 1.2\text{s}$ 之间时, $V_{c1} = 0\text{V}$, $V_{c2} = 2\text{V}$, 持续时间为 0.2s , 控制信号 V_{c1} 的幅值小于 V_T , 控制信号 V_{c2} 的幅值大于 V_T , 所以忆阻器 R_{m2} 阻值减小为 $5.4\text{k}\Omega$, 忆阻器 R_{m1} 保持不变, 此时等效电感

$L(t = 1.2) = 2.156\mu\text{H}$, 等效电容 $C(t = 1.2) = 5.41\text{nF}$, 在 $t = 1.2\text{s}$ 到 $t = 1.4\text{s}$ 之间, 由图 11(b) 可知电路的振荡频率为 1005kHz ;

在 $t = 1.4\text{s}$ 到 $t = 1.6\text{s}$ 之间时, $V_{c1} = 0\text{V}$, $V_{c2} = 2\text{V}$, 持续时间为 0.2s , 控制信号 V_{c1} 的幅值小于 V_T , 控制信号 V_{c2} 的幅值大于 V_T , 所以忆阻器 R_{m2} 阻值减小为 100Ω , 忆阻器 R_{m1} 保持不变, 此时等效电感 $L(t = 1.6) = 2.156\mu\text{H}$, 等效电容 $C(t = 1.6) = 110\text{p}$, 在 $t = 1.6\text{s}$ 到 $t = 2.0\text{s}$ 之间, 由图 11(c) 可知电路的振荡频率为 7008kHz .

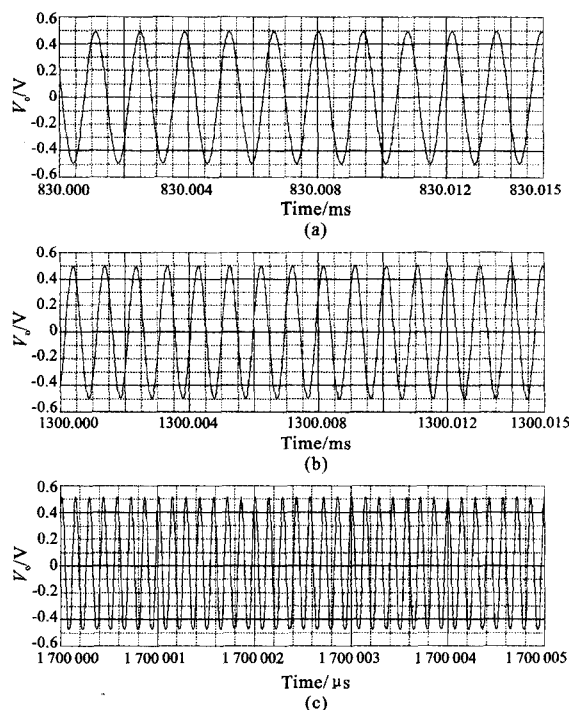


图 11 频率调整实验中施加控制信号时输出信号的波形

由以上结果可知, 通过改变忆阻器 R_{m2} 阻值的大小可以改变等效电容 $C(t)$ 的量值, 等效电容 $C(t)$ 的量值变化时, 电路的振荡频率发生了改变. 因此, 本电路可以很容易地调整振荡频率的大小.

仿真实验结果证明本文设计的电路很好地实现了振荡电路起振和振荡频率可调的功能.

5 结束语

本文使用改进的忆阻器 SPICE 模型、忆容和忆感等效电路, 设计了一种基于忆阻器的正弦波振荡电路. 由于忆感等效电路的等效电感值能在较大范围内变化, 当等效电感的初始量值无法满足振幅平衡条件时, 可以通过改变电感的量值来使电路起振. 由于忆容等效电路与可变电容器相比具有更好的稳

定性,相比于传统的用可变电容器调整振荡频率的方法,本文设计的电路具有更好的稳定性且易于实现自动控制。

参考文献:

- [1] Chua L O. Memristor-the missing circuit element [J]. IEEE Trans Circuit Theory, 1971(18):507-519.
- [2] Chua L O, Kang S M. Memristive devices and systems [J]. Proc of the IEEE, 1976, 64(2):209-223.
- [3] Di Ventra M, Pershin Y V, Chua L O. Circuit elements with memory: memristors, memcapacitors, and meminductors[J]. Proceedings of the IEEE, 2009 (97):1717-1724.
- [4] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The missing memristor found[J]. Nature, 2008(453):80-83.
- [5] Pershin Y V, Di Ventra M. Practical approach to programmable analog circuits with memristors[J]. IEEE Transactions on Circuits and System I: Regular Papers, 2010, 57(8):1857-1864.
- [6] Pershin Y V, Di Ventra M. Memristive circuits simulate memcapacitors and meminductors [J]. Electronics Letters, 2010(4):517-518.
- [7] Biolekzdeněk, Biolek Dalibor, Biolkov Viera. Spice model of memristor with nonlinear dopant drift[J]. Radioengineering, 2009, 18(2):210-214.
- [8] Biolek D, Biolek Z, Biolkova V. SPICE modeling of memristive, memcapacitive and meminductive systems[C]// Proceedings of the European Conference on Circuit Theory and Design, Antalya, IEEE, 2009:249-252.
- [9] 段宗胜,甘朝晖,王勤. 一种改进的忆阻器的 SPICE 模型及其仿真[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(8):193-199.

作者简介:

尹力男, (1988-), 硕士研究生. 研究方向为嵌入式系统、忆阻器及忆阻系统.

甘朝晖男, (1969-), 博士, 教授. 研究方向为控制理论及应用、智能控制、新型电力传动系统、信号与信息处理、模式识别等.