

基于 Multisim10.0 的非线性电路分析方法仿真研究

王翠珍 唐金元 纪明霞 邵红

(海军航空工程学院青岛校区 青岛 266041)

摘要: 非线性电路具有频率变换作用,在通信系统中广泛应用于对信号的调制、解调和混频等处理功能。非线性电路不满足叠加定理,通常采用开关函数分析法、时变电路分析法和环形电路分析法等解析法对其分析,数学分析复杂,较难理解。Multisim10.0 电路仿真软件仪器丰富、器件齐全,电路仿真波形观察直观。借助于 Multisim10.0 电路仿真软件,对上述 3 种非线性电路分析方法进行了仿真,并根据仿真结果从非线性电路输入、输出波形变换和频谱变换两方面分析了非线性电路的作用。基于 Multisim 10.0 的电路仿真分析,简化了非线性电路分析方法,有助于对非线性电路频率变换作用的理解。

关键词: 非线性电路;开关电路;时变电路;环形电路;仿真;频谱

中图分类号: TN7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1004

Simulation research of nonlinear circuit's analysis method based on Multisim 10.0

Wang Cuizhen Tang Jinyuan Ji Mingxia Shao Hong

(Qingdao Branch of Naval Aeronautical Engineering Institute, Qingdao 266041, China)

Abstract: In communication systems, nonlinear circuit was widely used because it could transform frequency. But nonlinear circuit could not analyzed by superposition theorem, it need to be analyzed by switching function method, time-varied circuit analysis method, and ring circuit analysis method. It is difficult to be analyzed by analytical method, and it is often more difficult to be understood. With the help of Multisim 10.0 circuit simulation software, the nonlinear circuit can be analyzed from input wave and output wave and spectrum transform. The analysis of the circuit based on Multisim 10.0 is simple and it is also easy to be understood.

Keywords: nonlinear circuit; switch circuit; time-varied circuit; ring circuit; simulation; spectrum

1 引言

在通信系统中,有大量的非线性电路,这些非线性电路主要用以完成频率变换等作用,如调幅、检波、混频等。非线性电路中至少要有一个非线性元件,如晶体管、场效应管、变容二极管等,含有非线性元件的非线性电路需要用非线性微分方程来描述,若该非线性元件为时变参量元件,则该非线性电路需用变系数微分方程描述。大多数的非线性微分方程求解相当困难。因此,在无线电技术中常用工程上适用的一些近似分析法,如开关函数分析法、时变电路分析法、环形电路分析法等。用这些方法分析非线性电路虽然可以使电路的数学分析相对简单一些,但是电路功能的理解却依然困难,若在用上述方法分析电路功能的同时,用 Multisim 10.0 电路仿真软件^[1-5]对非线性电路

分析方法进行仿真,将有助于对电路功能的理解。

2 开关函数分析法及其仿真

非线性电路中,若非线性元件受一个大信号控制,轮流导通和截止,实际上起着开关的作用。如图 1(a) 所示中, v_2 是一个振幅足够大的信号,而 v_1 是一个小信号,二极管 VD 受 v_2 控制工作于开关状态。若 v_2 为方波信号,幅度为 V_{2m} ,角频率为 ω_2 , $v_1 = V_{1m} \cos \omega_1 t$,且 $V_{2m} \gg V_{1m}$,则 v_2 的正半周使二极管 VD 导通,设二极管正向电阻为 r_D ,通过负载 R_L 的电流为 $i = \frac{1}{r_D + R_L}(v_1 + v_2)$,而在 v_2 负半周,二极管截止,通过负载的电流为零。因此,负载 R_L 上的电流和电压分别为:

$$i = \begin{cases} \frac{1}{r_D + R_L}(v_1 + v_2), & v_2 \geq 0 \\ 0, & v_2 < 0 \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2015-01

$$v_L = R_L \times i = R_L \times \frac{v_1 + v_2}{r_D + R_L} (v_2 \geq 0 \text{ 时}),$$

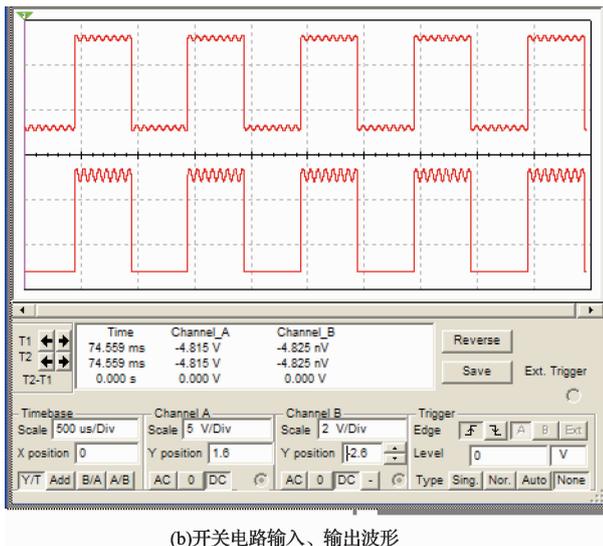
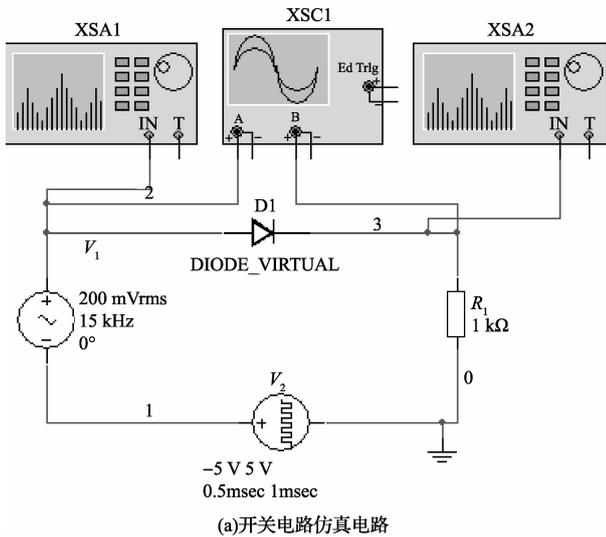


图1 开关电路波形

通过图1(a)仿真电路可以观察其输入、输出电压波形观察。图1(b)中示波器显示波形中上波形为电路的输入波形,是 v_1 (正弦信号、小信号)和 v_2 (方波信号、大信号)的叠加,下波形是负载电压波形,说明负载上仅在大信号 v_2 正半周有电压输出。

因为 v_2 是周期性函数,所以:

$$i = \frac{v_1 + v_2}{r_D + R_L} \cdot S(\omega_2 t) \quad (2)$$

式中

$$S(\omega_2 t) = \begin{cases} 1, v_2 \geq 0 \\ 0, v_2 < 0 \end{cases} \quad (3)$$

称为开关函数,它是与控制信号 v_2 具有相同周期的方波信号(角频率为 ω_2)。

将 $S(\omega_2 t)$ 展开为傅里叶级数,表示为:

$$S(\omega_2 t) = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \cos \omega_2 t - \frac{2}{3\pi} \cos 3\omega_2 t + \dots =$$

$$\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{2}{(2n-1)\pi} \cos(2n-1)\omega_2 t$$

因此:

$$v_L = R_L \times \frac{v_1 + v_2}{r_D + R_L} \cdot$$

$$\left[\frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \frac{2}{(2n-1)\pi} \cos(2n-1)\omega_2 t \right] \quad (4)$$

再将 v_1 、 v_2 代入上式,并进行三角函数运算、整理后,即可求得电流 v_L 的频谱。电压 v_L 中包含以下频谱成分: ω_1 、 ω_2 ; $\omega_1 + \omega_2$ 、 $|\omega_1 - \omega_2|$; $\omega_1 + (2n-1)\omega_2$ 、 $|\omega_1 - (2n-1)\omega_2|$; $2n\omega_2$; 直流成分等(这里 $n = 1, 2, 3, \dots$)。频谱变换过程可从仿真图形中观察。图2中的频谱分析仪 XSA1 和 XSA2 分别测量输入信号频谱和输出信号频谱。从图中可以看出电路输入信号频谱与输出信号频谱不同,实现了频谱变换^[7]。

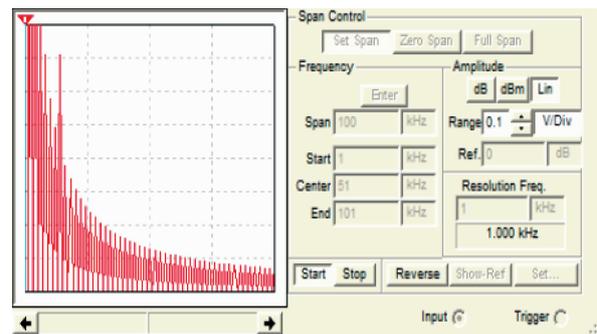


图2 开关电路输入、输出信号频谱

如果 ω_1 是高频载波频率 ω_c , ω_2 是低频信号频率 Ω ,并用中心频率为 ω_c 、通频带宽度略大于 2Ω 的带通滤波器作为负载,则负载上得到的电压将是一个单音调制的调幅波。

如果 ω_2 是本振频率 ω_0 , ω_1 是信号频率 ω_s ,负载回路为调谐于 $\omega_0 - \omega_s$ 或 $\omega_0 + \omega_s$ 的带通滤波器,则输出电压只有频率为 $\omega_0 - \omega_s$ 或 $\omega_0 + \omega_s$ 的信号,这就是混频^[6]的过程。

3 时变电路分析法及其仿真

2个不同频率的信号 v_1 、 v_3 同时作用于伏安特性为 $i = f(v)$ 的非线性器件 D3(二极管)上,静态工作点为 V_Q (图3(a)中的 v_2),其中 v_1 信号幅值较大,其变化范围涉及器件特性曲线中较大范围的非线性部分(但使器件导通),器件的特性参量主要由 $V_Q + v_1$ 控制。 v_3 远小于 v_1 ,可

近似认为对器件工作状态没有影响。电路输入信号波形如图3(b)所示,上为输入信号波形(v_1 、 v_2 、 v_3 叠加的结果),下为输出信号波形。

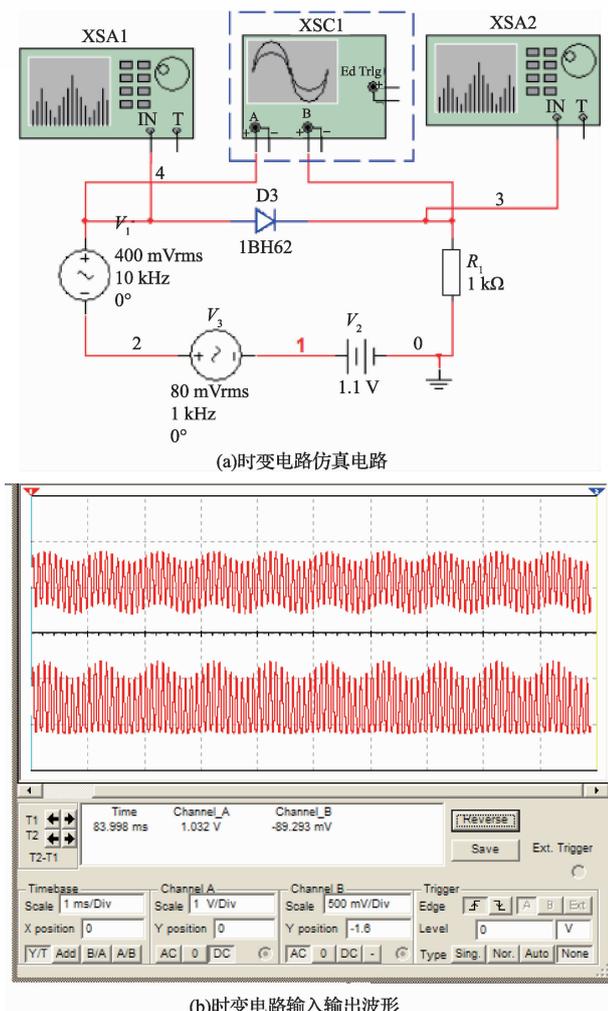


图3 时变电路原理,输入输出波形

此时流过器件的电流为:

$$i = f(v) = f(V_Q + v_1 + v_3)$$

因为 $v_3 \ll v_1$, 可将 $V_Q + v_1$ 看成器件的交变工作点, 则 i 可在其工作点 $(V_Q + v_1)$ 展开成泰勒级数:

$$i = f(V_Q + v_1) + f'(V_Q + v_1) \cdot v_3 + \frac{1}{2!} f''(V_Q + v_1) \cdot v_3^2 + \dots = \frac{1}{n!} f^{(n)}(V_Q + v_1) \cdot v_3^n + \dots$$

若 v_3 足够小, 可忽略 v_3 的二次及高次谐波分量, 则:

$$i = f(V_Q + v_1) + f'(V_Q + v_1) \cdot v_3$$

式中: $f(V_Q + v_1)$ 是 $v_3 = 0$ 时随 v_1 变化的电流, 称为时变静态电流, $f'(V_Q + v_1)$ 随 $(V_Q + v_1)$ 而变化, 称为时变电导 $g(t)$ 。因此, 上式可写为:

$$i \approx I_0(t) + g(t)v_3$$

当 $v_1 = V_{1m} \cos \omega_1 t$ 时, $g(t)$ 可用级数表示为:

$$g(t) = g_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} g_n \cos n \omega_1 t$$

则在 $v_3 = V_{3m} \cos \omega_3 t$ 时, 电流表达式为:

$$i = I_0(t) + \left[g_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} g_n \cos n \omega_1 t \right] \cdot V_{3m} \cos \omega_3 t$$

1) 联系 i 与 v_3 之间的系数是 $g(t)$, 而 $g(t)$ 受控于 v_1 , 随时间变化, 因而 $g(t)$ 对于 v_3 而言是时变系数。

2) i 中除了含有 $I_0(t)$ (即 ω_1 及其各次谐波分量)、 ω_3 外, 还出现 $n\omega_1 \pm \omega_3$ 的组合频率分量; 即时变电路可实现频谱变换作用。这一点也可以通过仿真电路的频谱图观察。图4(a)为输入信号的频谱图, 只有2个频率分量(1 kHz和10 kHz, 是输入信号的频率), 图4(b)为输出信号频谱图, 输出信号中有很多频谱分量(1 kHz、10 kHz、 $n \times 10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$ 等)。

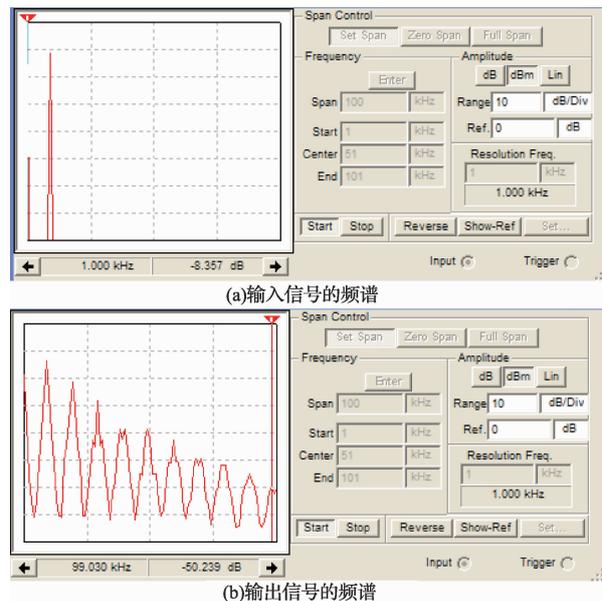


图4 时变电路频谱

4 环形电路分析方法及其仿真

在高质量的或工作频率较高的通信设备中, 常使用二极管平衡电路或环形电路实现调幅^[6-10]和混频, 这2种电路利用电路的对称性可以抵消部分谐波分量, 使得电路的抗干扰性能大幅提高。由于环形电路是2路平衡电路的反向叠加, 其输出信号谐波分量抵消更多, 输出幅度为平衡电路的2倍, 这里以环形电路为例介绍。

环形电路的结构如图5(a)所示。

D1~D4 构成二极管环形电路, V_2 、 V_3 是低频信号源, V_1 是开关信号。由于 V_1 信号幅度较大, 在其正半周时, D2、D3 导通, V_2 、 V_3 信号通过 D3、D2 加到负载 R_1 、 R_2 上, 形成输出电压; 在 V_1 负半周时, D1、D4 导通, V_2 、 V_3 信号通过 D1、D4 加到负载 R_2 、 R_1 上形成输出电压。 R_2 上输出波形如图5(b)上波形图所示, 下波形为开关信号的波形, 上波形的包络即为 V_2 或 V_3 的波形。

环形电路的频谱变换可以通过频谱仪测量。如图5(a)中的频谱仪 XSA1 和 XSA2 分别测量输入信号和输出信号的频谱, 二者频谱图如图6所示。

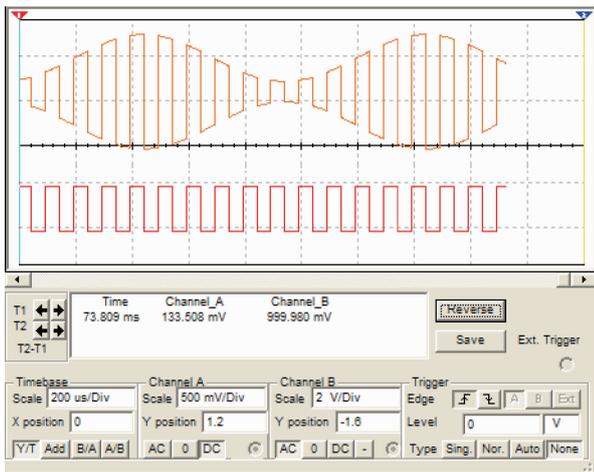
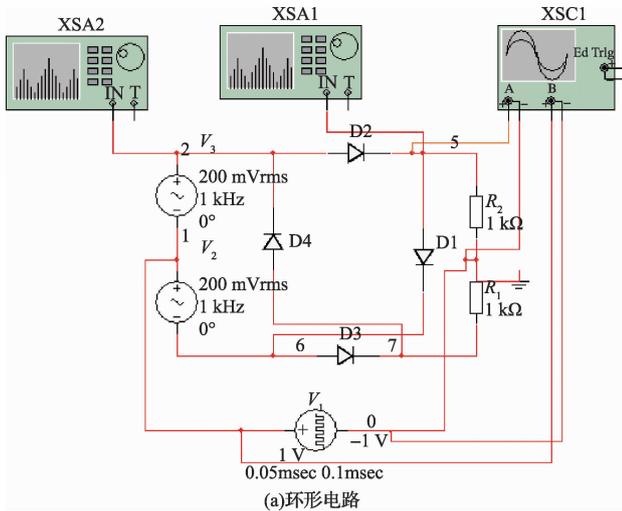
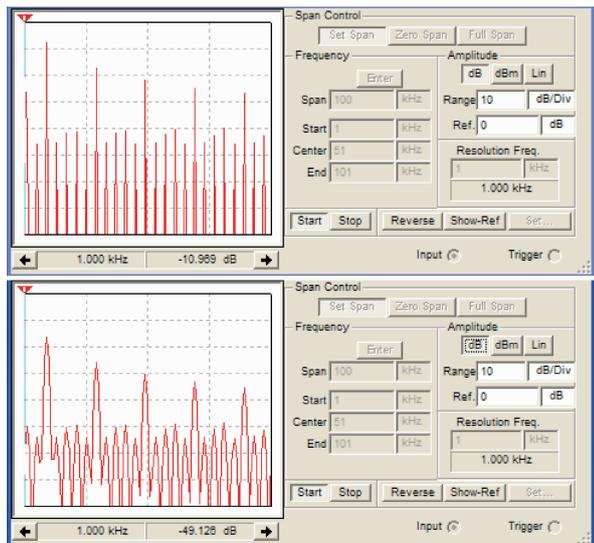


图5 环形电路与仿真波形



通过图5(b)可以看出:

1) 环形电路具有频率变换作用, 并且其频谱分量比开关电路的频谱分量(图2(b)所示)要少, 输出信号的幅度

更大, 因此, 环形电路在通信设备和雷达设备中广泛应用。

2) 环形电路的开关信号采用是方波信号, 由于方波信号的频谱分量较多, 与低频信号共同经过环形电路的频谱变换后, 输出信号的频谱分量也较多。因此, 环形电路频谱变换时, 开关信号多采用正弦信号, 如将 V_1 换为幅度为 2 V、频率为 10 kHz 的正弦波时, 电路输入信号只有 2 个频率分量, 即 1 kHz(低频信号频率)和 10 kHz(开关信号频率), 输出信号频率分量比输入信号为开关信号时明显减少(可通过频谱仪观察), 说明环形电路有频率变换能力的同时, 若开关信号采用正弦信号, 输出信号的频谱会更纯净。

5 结论

在通信电路中, 频率变换是一个非常重要的概念, 但理解较困难, 借助于 Multisim 10.0 电路仿真软件, 可以较好地非线性电路的输入、输出关系通过波形变化、频谱变换展现出来, 对学员理解有很大的帮助。

Multisim10.0 电路仿真软件不仅可以仿真非线性电路的开关函数法、时变分析法和环形电路法, 还可以对幂级数法和折线分析法进行仿真分析, 这些分析方法可用于对调幅、检波、混频和高功放等电路分析, 为通信电路的分析、设计和应用提供调试平台。

参考文献

- [1] 康学福. 滤波电路频率特性的仿真分析[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(1): 40-42.
- [2] 陈新, 张桂香. 电磁感应无线充电的联合仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(4): 434-440.
- [3] 李轩, 何玉珠, 刘永华. 基于 Multisim 的双极性串行码仿真技术研究[J]. 电子测量技术, 2012, 35(1): 96-99.
- [4] 吴凌燕. 基于 Multisim10 的正弦波振荡器电路仿真[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(7): 75-76.
- [5] 王希东, 孔路平. 数字调制参数校准仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(8): 7-13.
- [6] 唐金元, 史凤隆, 王翠珍. 基于 Multisim10.0 的高电平调幅电路仿真研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(6): 86-88.
- [7] 张肃文. 高频电子线路[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 381-383.
- [8] 唐卫斌, 刘宝盈. Multisim 在高频电路课程教学中的应用[J]. 商洛学院学报, 2011, 25(4): 18-22.
- [9] 吴凌燕. 基于 Multisim 11 的串联谐振电路特性研究[J]. 国外电子测量技术, 2011, 30(8): 84-86.
- [10] 刘允峰. 基于 Multisim 的数字时钟设计[J]. 现代电子技术, 2012, 35(10): 184-185.

作者简介

王翠珍, 1968 年出生, 副教授。主要研究方向为电子技术应用领域的教学和科研工作。
E-mail: wanghjgd@163.com