

规范化分段线性化网络的可控开关模型¹

温郑铨 杜培明 郭春生

(华东冶金学院自动化系 马鞍山 243002)

摘要 本文提出应用 PSpice 提供的可控开关和多维受控源构成各种规范化分段线性化器件的模型, 它使得可用 PSpice 来分析一般的规范化分段线性化网络, 这是有工程意义的。文中有详尽的算例。

关键词 规范化分段线性化, 模型, PSpice, 可控开关

中图分类号 TN711.1

1 引言

L. O. Chua 教授等^[1]提出了著名的规范化分段线性化数学表达式:

$$f(X) = a_0 + a_1 X + \sum_{j=1}^n \{b_j |X - X_j| + C_j \text{sgn}(X - X_j)\} \quad (1)$$

和 (1) 式中各系数的表达式, 其中 X_j 表示第 j 个折点处变量的值, 当函数在第 j 个折点处不连续时, 就有 $C_j \text{sgn}(X - X_j)$ 项, 函数连续则没有此项。

L. O. Chua 的理论把分段线性化这个古老的命题提到一个新的高度, 也提供一个处理强非线性网络的有力工具。商业化的网络分析软件尚未接纳 (1) 式, 如著名的 PSpice 软件允许独立电源是时间的分段线性化函数, 而其它器件尚不能是分段线性化函数。L. O. Chua 等^[2-4]论证了 (1) 式在网络分析中的普遍意义, 提出了规范化的 Katzenelson 算法和阻性网络的算例。在文献 [5-7] 中改进和推广了 L. O. Chua 的算法, 使其适用于规范化分段线性化动态网络, 也提供了算例。然而, 上述算法, 至今仍是研究性的, 除了专门研究此课题者, 其他人尚难计算规范化分段线性化网络。

本文提出应用 PSpice 所提供的受控开关和多维受控源构成规范化分段线性化器件的模型, 它使 PSpice 成为进一步研究规范化分段线性化网络动态过程的有力工具, 也使所有熟悉 PSpice 的工程技术人员, 可仿真工程中遇到的规范化分段线性化网络。因此, 所提出的模型既有助于规范化分段线性化理论的研究, 也有明显的工程意义。

2 规范化分段线性化阻性器件的模型

2.1 压控电阻和流控电阻的模型

L. O. Chua 提出的 (1) 式, 从特性曲线看, 一般规范化分段线性化特性都是由具有不同截距 X_j 和斜率 (可为负的) 的单象限斜线组合而成的。

¹ 1996-06-28 收到, 1997-04-03 定稿

PSpice 提供电压控和电流控两种开关^[8], 有四个参数可选定, 即 R_{on} ; R_{off} ; I_{on}/V_{on} ; I_{off}/V_{off} , 如流控开关选 $R_{on} = 1 \times 10^{-6}\Omega$; $R_{off} = 1 \times 10^6\Omega$; $I_{on} = 1\mu A$; $I_{off} = -1\mu A$ (甚至可选 $\pm 1nA$), 这对大多数网络而言, 可认为理想开关。PSpice 提供的多维受控源是受网络中多个电压或电流的控制, 且从设偏置值至正比于控制量的一次方、二次方、至若干次方之和。这里用其一次方的特性。如电压控电阻, 其模型如图 1 所示。

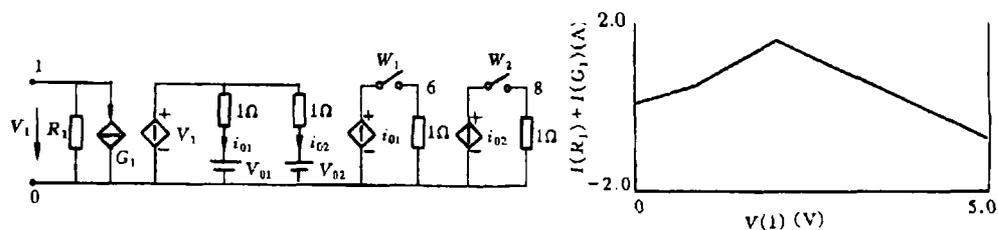


图 1 压控电阻的模型电路和特性

图 1 模型电路中 R_1 相应于特性中通过原点的线段, 另两个线段的折点为 V_{01} 和 V_{02} , 其电流控制开关 W_1 和 W_2 , 压控电流源 G_1 则受第 6 和第 8 节点电压的控制, 其电流值为

$$i_{G1} = m_1 V(6) + (m_2 - m_1) V(8), \quad (2)$$

其中 m_1 和 m_2 分别表示第一和第二折线段的斜率。

如流控电阻的特性通过原点并有两个折线段, 其模型和特性如图 2 所示。从图 2 可见流控电阻是 R_1 与多维电压控电压源 E_1 串联, V_{01} 和 V_{02} 在数值上等于特性曲线两个折点的电流值, 其它与图 1 相类似。

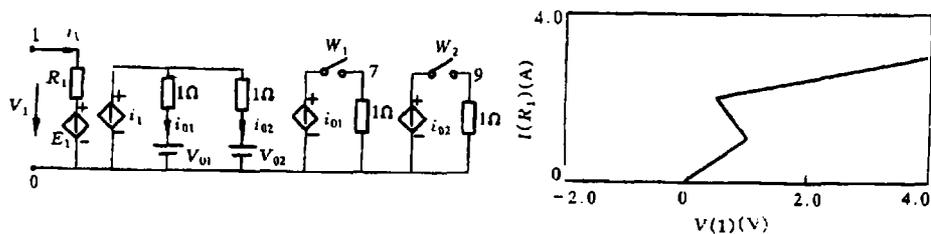


图 2 流控电阻的模型电路和特性

2.2 线性段不连续的阻性器件的模型

函数在折点上不连续是满足表达式 (1) 式的, 设 $i = f(v)$ 有一个不连续的折点, 其模型电路和特性如图 3。

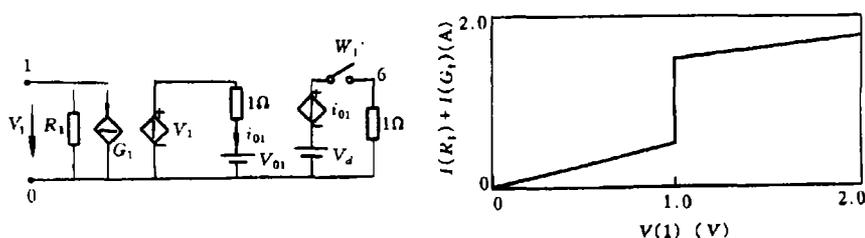


图3 电流跃变的压控电阻模型和特性

当电压 V_1 刚超过 V_{01} 时, W_1 闭合, 但 i_{01} 极小, 加入 V_d 使节点 6 立即出现一个电压 V_d , 它使受控源 G_1 的电流形成跳变特性。

2.3 回线特性的模型

L. O. Chua 提出的 (1) 式是单值的, 故回线特性不是规范化分段线性化特性。L. O. Chua 在文献 [9] 中论证了回线特性不是阻性的。但具有回线特性的器件或装置在工程上还是常见的, 故在此提出。

如图 4 所示, 模型使器件的电压 V_1 沿下部的线段上升到 V_{01} 时, 特性跳变而进入上部线段, 因控制回路中附加一个 $KV(6)$, 只有当 V_1 沿上部线段减少到 $V(1) = V_{01} - KV(6)$ 时, W_1 才会打开, 特性从上部线段跳至下部线段, 故形成回线特性。 K 的值由回线特性的形状来决定。显然, 是个简单的计算。

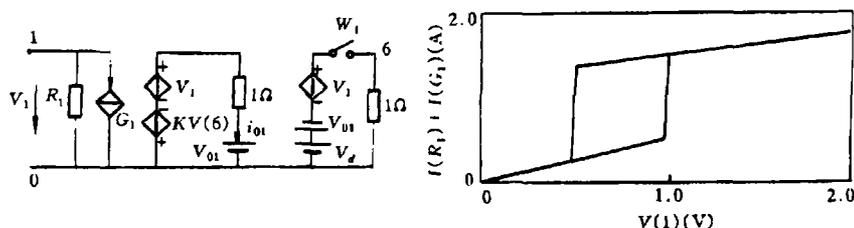


图4 回线特性的模型和特性

3 规范化分段线性化受控源的模型

上节讨论的压控电阻就是一个受自身端压控制的受控电流源, 而流控电阻就是一个受自身电流控制的受控电压源。因而只要将控制量变为网络中其他端点的电压或电流。上节所述的模型就变为通常的四种受控源的模型, 故不赘述了。

4 规范化分段线性化动态元件的模型

4.1 磁控电感和荷控电容的模型

对于磁控电感, 其模型电路如图 5。图 5(a) 的磁控电感的模型中 L_0 是通过原点的线段, $i_{L0} \times L_0$ 是磁链 (即节点 5 的电压), 用其来控制流控开关, 控制回路中的 V_{01} 和 V_{02} 在数值上等于折点的磁链值。多维受控电流源的关系式与前相同。应说明的是 $i_{L0} \times L_0$ 是 L_0 中的磁

链, 是将整个非线性电感的磁链等效地看成集中于 L_0 中, 这是按端点特性建模的方法, 模型端点的特性与整个非线性元件相同. 图 5(b) 是相应的特性.

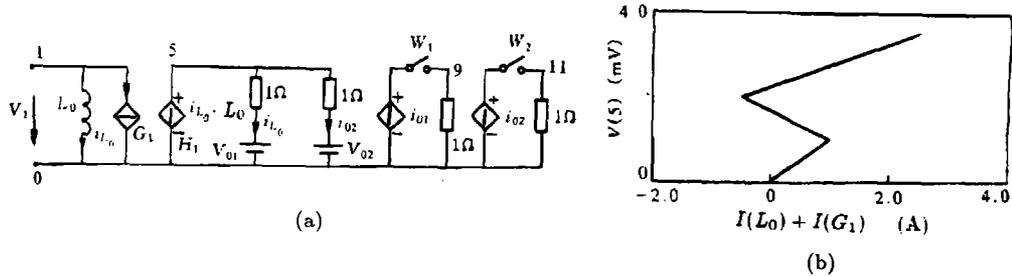


图 5 磁控电感的模型和特性

荷控电容的模型电路如图 6 所示. 磁控电感的模型是 L_0 与受控电流源并联, 荷控电容是 C_0 与受控电压源串联, 磁链相应于电荷, 图 6 的解释与图 5 是完全类同的.

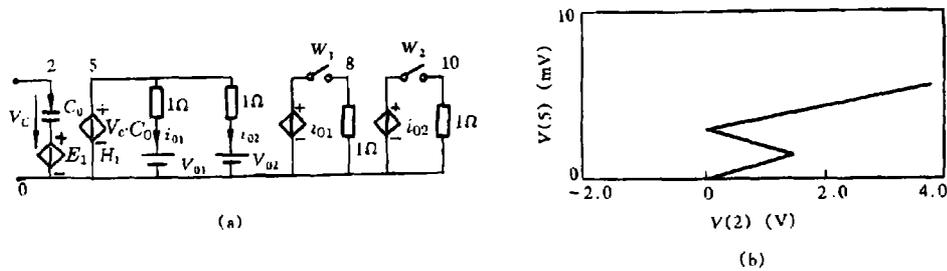


图 6 荷控电容的模型和特性

4.2 流控电感和压控电容的模型

对于分段线性化的流控电感, 根据最基本的元件特性 $\Psi = f(i)$ 和 $U_L = d\Psi/dt$ 可得出

$$U_L = d\Psi/dt = d\Psi/di \cdot di/dt. \tag{3}$$

由于 $\Psi = f(i)$ 是分段线性化的, 设有两个折点, 故 $d\Psi/di$ 是矩形波, 也是分段线性化函数, 因而 (3) 式可用单位阶跃函数表示为

$$U_L = m_0 \frac{di}{dt} + (m_1 - m_0) \frac{di}{dt} \cdot 1(i - i_{01}) + (m_2 - m_1) \frac{di}{dt} \cdot 1(i - i_{02}) \tag{4}$$

图 7 中 L_0 表示 $\Psi = f(i)$ 特性中通过原点的线段, 也就是 (4) 式中的 m_0 , 受 i_L 控的电压源控制流控开关, V_{01} 和 V_{02} 在数值上等于特性曲线中折点处的电流值, 而流控开关的作用就相当于 $1(i - i_{01})$ 和 $1(i - i_{02})$, 流控开关回路中的电压源是 $m_0 \cdot (di/dt)$ 的值, 故多维电压源:

$$E_1 = (m_1 - m_0)/m_0 \cdot V(8) + (m_2 - m_1)/m_0 \cdot V(10) \tag{5}$$

图 7(b) 的纵坐标是 $S[V(2)]$, 它表示整个电感端压对时间的积分, 这是 PSpice 本身具有的功能, 故图中曲线就是 $\Psi \sim i$ 的特性, 只因计算时间是毫秒而不是秒, 故 Ψ 的比例因子是 10^{-3} .

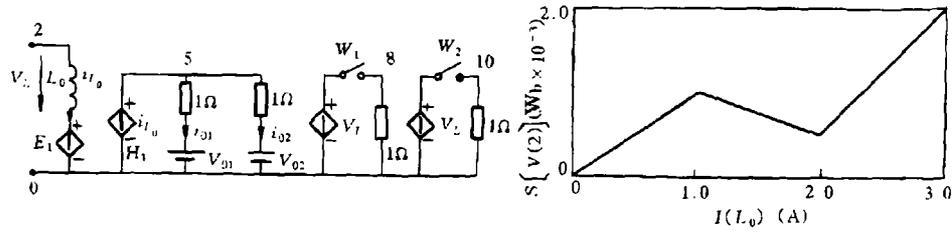


图7 流控电感的模型和特性

规范化分段线性化压控电容的模型如图 8 所示。压控电容模型电路中的物理量与流控电感是对偶的, 控制电路也类同, 不赘述。

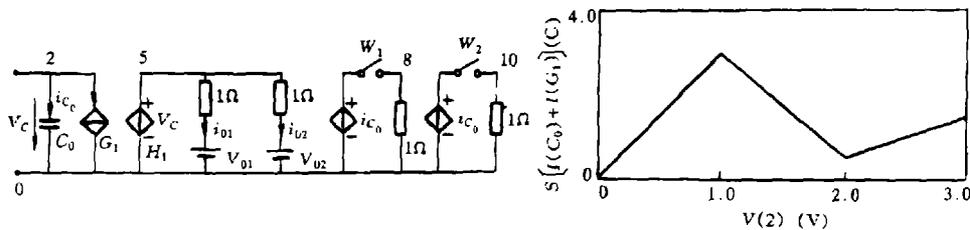


图8 压控电容的模型和特性

4.3 关于初始值的讨论

动态过程离不开初始值, 动态元件模型的主电路都是一个线性动态元件和一个多维受控源的串并联。如果是零初值, 模型中的线性动态元件也为零初值。如非零值就必须考虑模型电路和原电路初值的一致性。如果磁控电感的初值为 $\Psi(0)$, 根据 $\Psi-i$ 特性, 元件的初始电流为 $i_L(0)$, 而模型电路中给定的电流初值就是 $i_{L0}(0) = i_L(0)$, 因初始时刻 G_1 中没有电流。其它动态元件的处理方法也完全类同。总之, 必须考虑容易处理的初值问题。

5 仿真实例

本节应用提出的模型电路, 计算著名的 Chua 氏混沌电路。

当初始值 $V_{c1}(0) = 1V$; $V_{c2}(0) = 0V$; $i_{L1}(0) = 0A$, R_1 的特性和其它元件的参数如图 9 所示, 按本文的模型 (模型中流控开关的控制值为 $\pm 1nA$), 其计算结果与现有文献一致。

在图 9 电路中, 将电阻 RR 变为分段线性化, 其折点在 $\pm 1.5V$, 后段斜率只增加 5.78%, 再将 C_2 变为分段线性化, 其特性和相应的计算结果示于图 10。

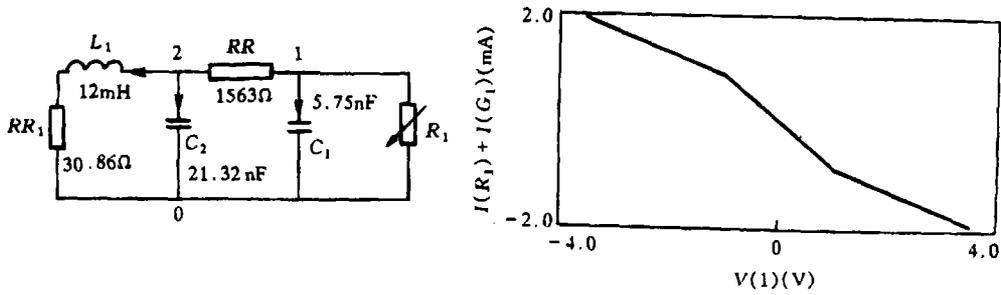


图 9 蔡氏混沌电路

至此，图 9 所示蔡氏电路中已有两个电阻和一个电容为分段线性化元件了。这里不分析混沌现象的变化，因为本文是研究建模的，关键在于用提出的模型后计算的正确性，考虑三个分段线性模型的主电路后，蔡氏电路如图 11(a) 所示，应用 PSpice 对节点 1 验证 KCL，其误差曲线示于图 11(b)。KCL 的绝对差值不超过 $\pm 200\text{pA}$ ，可见模型的正确性。

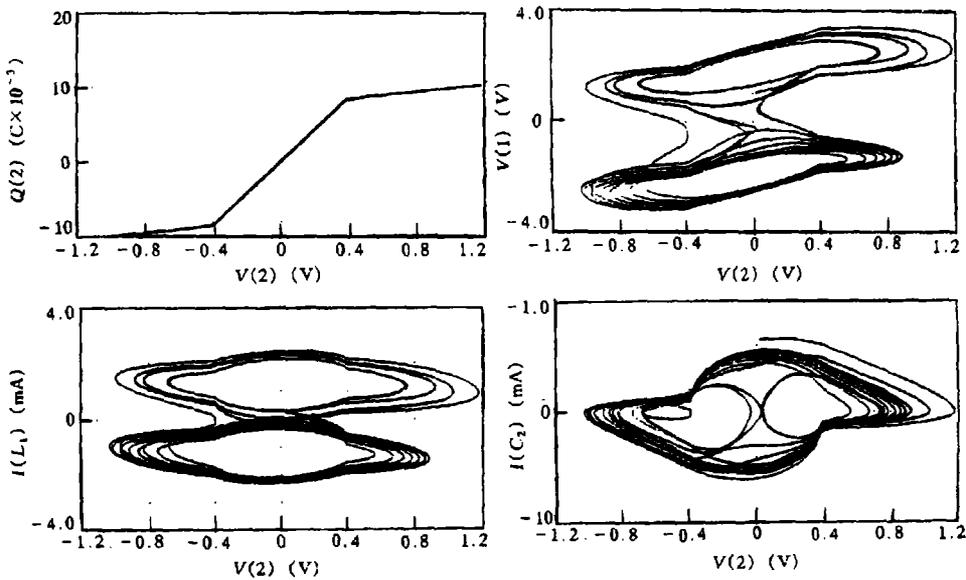


图 10 RR 和 C_2 为分段线性化的计算结果

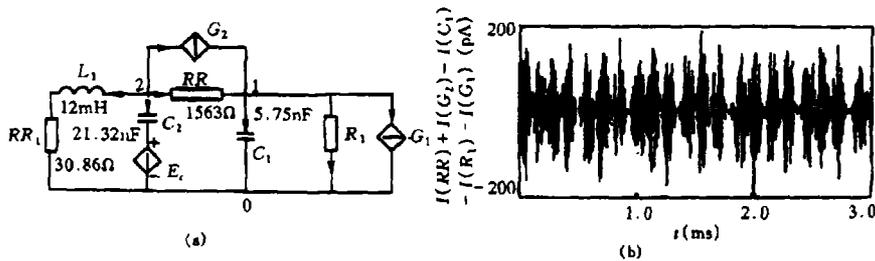


图 11 考虑模型主电路后的蔡氏电路和误差曲线

6 结 语

(1) 本文所提出的模型的主回路很简单, 控制回路的规律性很强, 方便实用。(2) 本文应用的是 PSpice 的 5.1 版本 (1992), 其新版本功能更强, 建立了上述模型后, 新版的 PSpice 可能是进一步研究规范化分段线性化动态网络的有力工具。(3) 有了 PSpice 所接受的模型, 就能使广大熟悉 PSpice 的工程技术人员研究具有工程实际意义 (如电力电子电路) 的规范化分段线性化网络。

参 考 文 献

- [1] Chua L O, Kang S M. Section-wise piecewise-linear function: Canonical representation, properties, and applications. IEEE Proc. 1977, 65(6): 915-927.
- [2] Chua L O, Ying P R L. Canonical piecewise-linear analysis. IEEE Trans. on CAS, 1983, CAS-30(3): 125-140.
- [3] Chua L O, Deng A C. Canonical piecewise-linear analysis: part II-Tracing driving-point and transfer characteristics. IEEE Trans. on CAS, 1985, CAS-32(5): 417-443.
- [4] Chua L O, Deng A C. Canonical piecewise-linear analysis: Generalized breakpoint hopping algorithm. Int. J. Circuit Theory and Appl., 1986, 14(1): 35-52.
- [5] 温郑铨. 规范化分段线性化动态网络的高效算法. 电子学报, 1990, 18(6): 85-91.
- [6] 温郑铨, 陈玉燕. 含特线曲线族器件的规范化分段线性化动态网络的算法. 电子科学学刊, 1994, 16(3): 275-283.
- [7] 温郑铨. 规范化分段线性化动态网络的改进节点法. 电子学报, 1994, 22(8): 87-90.
- [8] Rashid M H. Spice for Circuits and Electronics Using PSpice. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1990, Chapt. 4-5.
- [9] Kennedy M P, Chua L O. Hysteresis in electronic circuits: A circuit theorist's perspective. Int. J. Circuit Theory and Appl., 1991, 19(3): 471-515.

THE CONTROLLED-SWITCH MODELS FOR CANONICAL PIECEWISE-LINEAR NETWORK

Wen Zhengquan Du Peiming Guo Chunsheng

(Department of Automation, East China Institute of Metallurgy, Maanshan 243002)

Abstract In this paper, the models of canonical piecewise-linear devices are constructed by the controlled-switch and controlled-source of multidimensions, which are supported by PSpice. So that, the general canonical piecewise-linear network can be analyzed with the PSpice. The models present an engineering application value. The examples are discussed in detail also.

Key words Canonical piecewise-linear, Model, PSpice, Controlled-switch

温郑铨: 男, 1933 年生, 教授, 主要研究规范化分段线性化理论及其应用和图象处理技术在控制系统中的应用。

杜培明: 男, 1964 年生, 副教授, 主要研究图象处理技术在控制系统中的应用。

郭春生: 男, 1970 年生, 助教, 从事电子技术课程的教学。