

基于 MSCA 的符号网络函数模拟器

李儒章* 巫向东

(四川固体电路研究所 重庆 630060)

王兆明

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】 提出了一种改进的用于产生模拟电路符号网络函数的符号编码算法 MSCA 与原符号编码算法 (SCA) 相比, 该算法具有更简洁的编码单元, 更为准确的编码定理, 从而能明显地提高算法的效率和应用范围。基于 MSCA 用于模拟电路的符号网络函数模拟器 SNSAC 已经开发完成, 还介绍了 SNSAC 的基本结构和特点。最后给出了程序应用的两个例子。

关键词 模拟电路; 符号网络函数; 符号编码; 灵敏度分析
中图分类号 TN711.1

模拟电路的符号网络函数是指电路的端口特性 (如输入阻抗、电压传输函数) 由电路中的元件符号 (全部或部分元件) 和复频率 s 来表示, 它们通常具有如下的形式

$$H(s, P) = \sum_i^m d_{ni} p_{ni} s^i \left/ \sum_i^n d_{di} p_{di} s^i \right. \quad (1)$$

式中 P 为元件符号矢量, p_{ni} 和 p_{di} 分别为分子和分母中第 i 项的符号值; d_{ni} 和 d_{di} 为对应的系数。

与模拟电路的数字分析 (如 SPICE) 结果相比, 符号网络函数法具有许多优点, 一直备受关注。Gielen 等人对已有的符号网络函数产生算法及其应用作了较详细的归纳和介绍^[1], 其中有些算法或者要求进行较多的字符串处理, 或者要求对电路进行某种特殊变换, 或者其结果的化简不易进行。符号编码算法 (SCA) 成功地将元件符号用数字来表示^[2], 实现了系统方程的准数字化, 提高了计算机的处理效率。但该算法存在某些不足和局限性, 为此, 我们提出了一种改进的符号编码算法 (MSAC), 并完成了相应的程序设计。

1 符号编码算法

在式 (1) 的符号网络函数中, 其分子或分母中的任一项都可以简单看成三部分: 数字值 (系数)、符号串和复频率 s 的幂。如果将符号串中的元件符号用不同的正整数来表示就称为符号编码 (其条件是这种表示不能引起符号间的混淆)。符号编码算法就是在符号网络函数产生过程中, 将每个元件符号用一个编码单元 (N_d, N_c, N_s) 来表示, 其中, N_d 是元件系数值, N_c 是元件编码值, 而 N_s 则反映元件与复频率 s 的关系 (电容取 +1, 电感取 -1)。这样, 在电路系统方程的系数矩阵中, 每个填入位置填入的就不再是数值分析中的纯数字值或某些符号分析方法中的符号串, 而是该填入位置对应的编码单元值。在该方程求解以后, 再把符号恢复出来——符号反码, 即可以得到相应的符号网络函数。

编码单元中的 N_s 和 N_c 密切相关: $N_c \rightarrow$ 符号 \rightarrow 元件类型 $\rightarrow N_s$, 即每一项中 s 的幂次可以在反码出符号后获得。因此, SCA 中的编码单元可以简化为 (N_d, N_c) , 这不仅节约了存贮空间, 而且缩短了方程求解过程中所需的 CPU 时间。在具体的实现过程中, 还需设置两个伪符号“C”和“L”来分别表示没有被选为符号的电容或电感, 以保证在反码这些电容或电感时不至于丢失它们对复频率 s 的贡献。基于以上描述, 可以定义这种改进的符号编码算法 (MSCA):

- 1) 一个元件用一个编码单元 (N_d, N_c) 来表示, N_d 为数字部分, N_c 为编码部分;
- 2) 当某一元件被选为符号变量时, 其编码单元值为 $(1, N_c)$, N_c 为该元件的编码值;
- 3) 当某一元件没被选为符号变量时, 它的编码单元值为:

$$(N_d, 0) \text{—— 对于非电抗元件}$$

$$(N_d, N_c) \text{—— 对于电抗元件}$$

其中 N_d 为该元件的数字值, N_c 为该电抗元件对应的伪符号“C”或“L”的编码值

在方程求解过程中, 任意两个编码单元 $A_1 = (N_{d1}, N_{c1})$ 和 $A_2 = (N_{d2}, N_{c2})$ 之间的加法及乘法运算定义为:

加法: 如果 $N_{c1} = N_{c2}$, 则 $A_1 + A_2 = (N_{d1} + N_{d2}, N_{c1})$, 否则不执行任何运算

乘法: $A_1 \times A_2 = (N_{d1} \times N_{d2}, N_{c1} + N_{c2})$

为了保证得到正确的符号网络函数, 即在反码过程中不出现任何误码, 为此给出下面的定义及定理

定义 在编码过程中, 每个符号的编码值与一个确定的数有关, 称这个数为基码 O_i

定理 1 如果一个电路中共享一个符号名为 p 的元件个数为 n , 则在符号网络函数的分子或分母的任一项中, 其 p 的幂次最大为 n (即不存在 $p^i, i > n$)

文献 [3, 4] 描述了该定理 $n=1$ 时的情况

定理 2 (编码定理): 设定理 1 中最大的 n 为 N , 则存在这样一个最小基码 $O_i = 2^i \text{ (} i = 1, 2, \dots \text{)}$ 。当每一个符号按 O^0, O^1, O^2, \dots 进行编码时, 则正确的符号网络函数可以通过反码由克雷默法则求得的行列式值得到^[5]。

值得注意的是, SCA 中的基码是定理 2 给出的基码的两倍, 其结果是两种算法可分析的最大符号数相差一倍

2 MSCA 的程序实现及程序特点

2.1 系统方程的建立

利用改进的节点法 (MNA) 可建立如下形式的系统方程

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \\ E \end{bmatrix} \quad (2)$$

设方程的系数矩阵行列式值为 Δ , 而由方程右边的列矢量代替系数矩阵的第 i 列后所对应的行列式值为 Δ_i , 则第 i 个变量 X_i 可由克雷默法则表示为

$$X_i = \Delta_i \Delta^{-1} \quad X_i \in V \text{ 或 } X_i \in I \quad (3)$$

这样, 所求的网络函数可表示为

$$H = X_i / X_j = (\Delta_i \Delta^{-1}) / (\Delta_j \Delta^{-1}) = \Delta_i \Delta_j^{-1} \quad i \neq j \quad (4a)$$

程序实现中在网络的输入结点引入了一个单位电流 I_{in} 作为激励, 因此, 输入阻抗、转移阻抗和电流增益可表示为

$$H = X_i / I_{in} = \Delta_i \Delta \quad (4b)$$

应当说,由式(4)给出的具有编码信息的有理多项式,只有对其进行反码后才能得到真正的符号网络函数,具体过程略

2.2 程序实现及其算法比较

根据以上算法,我们开发了一个用于模拟电路符号网络函数的模拟器 SNSAC(Symbolic Network-function Simulator for Analog Circuits),该程序采用 C 语言模块化编程和动态空间分配技术,以菜单选择的形式设计。图 1 为程序的运行示意图,其灵敏度分析、函数化简及其化简精度都是交互式地由用户确定的,输出的符号网络函数采用多项式的形式。表 1 为 SNSAC 与基于 SCA 算法的 SNSPC 程序的特点比较,表 2 给出了两种算法导出不同结点梯形电阻网络^[2]的传输函数所需 CPU 时间的比较(工作平台为 HP712/100 工作站)分析过程中,电阻 $R_{2n}, R_{2n-2}, R_{2n-4}$ 和 R_{2n-6} 由符号表示。从这些结果看出,MSCA 及其相应的 SNSAC 不仅具有更大的适用范围,而且具有更快的分析速度

表 1 SNSAC 与 SNSPC 的比较

特点	SNSAC	SNSPC
SPICE 兼容的输入文件	是	是
可分析的元件种类	17	15
可分析的最大符号数	31	16
多个元件共享同一符号	可以	可以
并联两端元件的符号表示	可以	不可以
网络函数的灵敏度分析	可以	不可以
网络函数的化简	可以	不可以

表 2 CPU 时间的比较

	13	15	17	19	21
SCA	0.59 s	1.66 s	4.32 s	11.28 s	23.75 s
MSCA	0.35 s	0.96 s	2.61 s	6.82 s	18.07 s

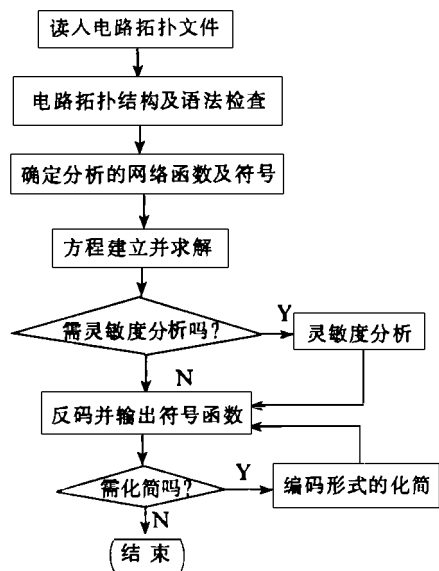


图 1 SNSAC 运行示意图

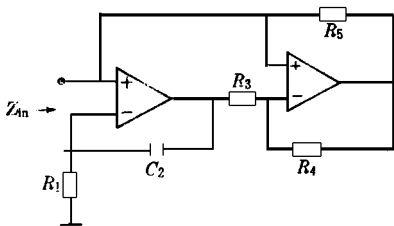


图 2 模拟电感的有源电路

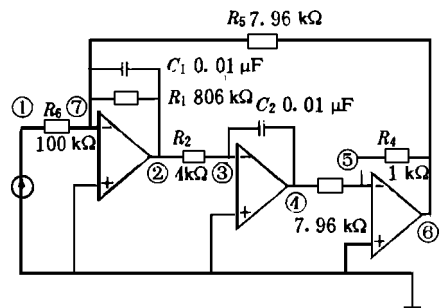


图 3 Tow-Thomas 有源滤波器

3 举 例

例 1 给出的是一个关于模拟实现电感元件的有源电路的例子,见图 2 通过 SNSPC 程序对该电路的输入阻抗进行模拟,得到的符号网络函数为

$$Z_{in} = g_4 C_2 s / g_1 g_3 g_5 = sL_0$$

例 2 给出了对图 3 所示的有源滤波器进行灵敏度分析的例子。在理想情况下,该滤波器在节点 ② 上的电压传输函数为

$$H_{ideal} = V_2 / V_1 = -C_2 g_4 g_6 s / (C_1 C_2 g_4 s^2 + C_2 g_1 g_4 s + g_2 g_3 g_5)$$

实际上,电容中存在泄漏系数,其作用可由一个等效串联电阻(ESR)来表示。对于树脂电容、陶瓷电容和钽电容而言,它们的泄漏系数分别为 0.007 5、0.000 2 和 0.04,则在工作频率为 1 000 Hz 时所引起的等效串联电阻值分别为 119Ω、3.17Ω 和 634Ω。在考虑电容的 ESR 后,相应的电压传输特性也将受到影响。利用 SNSAC 对 V_2 / V_1 关于 C_1 和 C_2 的等效串联电导 $g_{s1} (1/R_{s1})$ 和 $g_{s2} (1/R_{s2})$ 的灵敏度进行了分析(相应的电压传输函数和灵敏度函数的符号表达式略)。图 4a 为由符号网络函数计算得到的带通曲线,其中, H_{ideal} 为理想特性曲线, H_m 、 H_c 和 H_t 为考虑 ESR 后电容分别为树脂电容、陶瓷电容和钽电容对应的特性曲线(H_c 基本与 H_{ideal} 重合)。图 4b 为相同频范围内带通特性相对于 g_{s1} 和 g_{s2} 的灵敏度 $S_{g_{s1}}^H$ 和 $S_{g_{s2}}^H$ (R_{s1} 和 R_{s2} 为 119Ω) 很明显,在中心频率处灵敏度最大,向两边扩展,其灵敏度逐渐变小,这一变化与由图 4a 给出的特性一致。

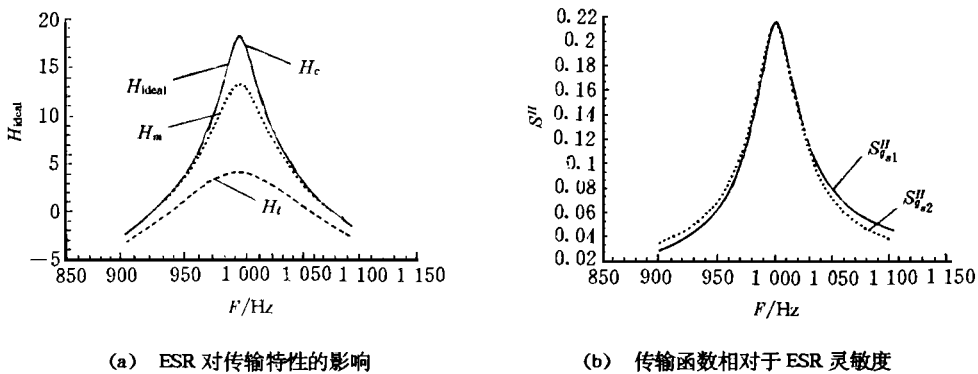


图 4 分析结果

4 结 论

本文介绍了一种改进的用于产生模拟电路符号网络函数的符号编码算法,由于编码单元减少了一个元素,编码定理更准确,因此,该算法的计算效率和应用范围均较以往算法有较大提高。基于这种算法,一个用于模拟电路的符号网络函数模拟器 SNSAC 已经完成,文中给出的一些数据和例子表明了该程序的部分功能和能力,可以有效地产生模拟电路符号网络函数。

参 考 文 献

- 1 Gielen G, Wambacq P, Sansen W. Symbolic analysis methods and applications for analog circuits: a tutorial review. Proceedings of IEEE, 1994, 82(2): 287~ 303
- 2 浦立清,兰家隆. 计算机实现符号网络函数的新算法. 电子科技大学学报, 1994, 23(4): 132~ 137
- 3 Jou S J, Hung C C. An efficient determinant approach to symbolic function for analog circuits. In Proc M SCAS, 1992: 827~ 830

- 4 Lin P M. A survey of application of symbolic network function. IEEE Trans Circuit Theory, 1973, 20(6): 732~ 737
- 5 Li R Z, Wu X D, Wang Z M et al. A new algorithm for generating symbolic network functions by computer. In Proc 4th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology, Beijing, 1995, 349~ 351

A Symbolic Network Function Simulator Based on MSCA

Li Ruzhang Wu Xiangdong

(Sichuan Institute of Solid-state Circuits Chongqing 630060)

Wang Zhaoming

(Dept. of Electronic Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract A modified symbolic coded algorithm (MSCA) for generating symbolic network functions of analog circuits is presented. Comparing with original symbolic coded algorithm (SCA), the new algorithm has simpler coded cell and more accurate definition for coded theorem. So, MSCA can obviously improve computation efficiency and enlarge application ranges. Based on the MSCA, a symbolic network function simulator for analog circuits (SNSAC) is implemented. The main characteristics and construction of the program are introduced. Finally, two application examples for the analog circuits are given.

Key words analog circuit; symbolic network function; symbolic code; sensitivity analysis

编辑 叶红

.....

· 科研成果介绍 ·

光纤环路阵列器件与传输技术研究

主研人员: 王旭 罗小兵 胡力

该项目对光纤环路及其阵列组件的构成技术、处理高速时域和频域信息的基础理论和基本技术开展了大量、深入的研究,建立了相应的数量模型。其主要内容为:

- 1) 较为详细地研究了光纤环形延迟线 (FORDL) 及其构成的递归阵列的信号处理特性,特别研究了 FORDL 作为陷波器件的应用; 2) 完成了光纤熔锥耦合工艺的自动控制,基本克服了 FORDL 及其阵列组件构成工艺和测量技术的难题; 3) 设计制作并测试了两只 FORDL 陷波器,陷波频率分别为 100 MHz 和 250 MHz,陷波深度分别 > 28 dB 和 > 31 dB,谐波测试在 0 GHz~ 3 GHz 频段内均匀度为 ± 3 dB; 4) 进行了环路阵列结构和非正定结构滤波器的实验研究,设计制作了一阶递归阵列结构的 IIR 窄带滤波器 (通带频率为 100 MHz, $Q \approx 8$) 和混合阵列结构的全通滤波器 (0 MHz~ 300 MHz 内幅度均匀度 < ± 2 dB)。

该研究成果属国内领先,国际先进水平,为进一步研制适用于雷达、电子对抗以及全光交换系统的信息处理技术打下了理论和工艺的基础。

· 科 卞 ·