

# 含运算放大器网络的计算机辅助分析

滕玉鹃

(吉林工学院自动化系, 长春 130012)

**摘要** 借助计算机对含运算放大器的网络进行拓扑分析, 通过确定网络的电流图和电压图的共有树的方法, 求出全符号的网络函数。

**关键词:** 电流图; 电压图; 运算放大器; 符号网络函数

## 1 前 言

运算放大器目前在有源网络的综合和设计中占有很重要的地位, 应用也十分普遍。随着集成电路的迅速发展, 网络规模越来越大, 传统的手工设计方法已无法满足设计的需要。而近些年迅速发展起来的电路 CAA 与 CAD 技术为电路分析和设计带来了新的生命力。计算机以其快速的运算能力, 手工估算无法达到的精度以及大容量的存储功能使它成为设计人员的得力工具。

最早的电网络分析设计程序都是纯数值程序, 计算出来的结果是数字而不是函数。到了 1970 年前后, 有些程序不仅能在计算机上产生含有复频率  $S$  符号的网络函数, 而且能产生部分电路元件用符号表示的部分符号网络函数, 甚至全部元件皆用符号表示的全符号网络函数。全符号网络函数不仅在分析频响特性方面十分有用, 而且具有以下几方面的优越性:

1. 符号网络函数比数值解能更直接、更清楚地反映网络的特性。
2. 在用数字计算机分析网络时, 数值误差的一个重要来源是由于机器字长限制所引起的舍入误差。使用符号参数, 可以大大地改善最终计算结果的精度。
3. 符号分析法为计算线性网络的灵敏度提供了一种有效方法。而且, 由于灵敏度表达式仍旧是符号参数的函数, 每个元件参数对灵敏度的影响可以一目了然, 有助于优化设计。

本文正是基于这一目的, 对含运算放大器的网络给出了便于用计算机实现的全符号分析的算法。

## 2 网络函数的表达式

含运算放大器的  $n$  端网络如图 1 所示。假定激励电流源  $I_s$  加在节点 1 和  $n$  之间, 节点  $n$  为参考节点。描述这一网络的节点方程式为:

$$Y_n \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} I_s \quad (1)$$

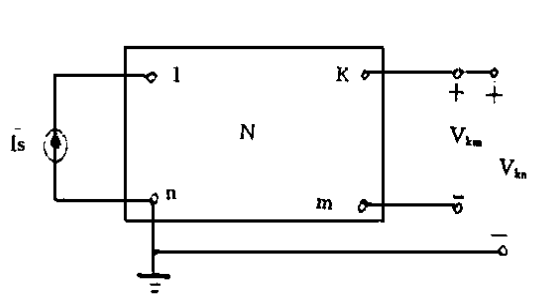


Fig. 1 N-Port network containing operational Amplifiers

其中:  $Y_n$  为该网络的节点导纳矩阵。解方程式(1), 各节点相对节点  $n$  的电压为:

$$V_{in} = \frac{\Delta_{ik}}{\det Y_n} I_s \quad i = 1, 2, \dots, (n-1) \quad (2)$$

由此可得:

$$\text{输入阻抗} \quad Z_{1n} = \frac{V_{1n}}{I_s} = \frac{\Delta_{11}}{\det Y_n} \quad (3)$$

$$\text{转移阻抗} \quad Z_{kn, 1n} = \frac{V_{kn}}{I_s} = \frac{\Delta_{1k}}{\det Y_n} \quad (4)$$

$$Z_{km, 1n} = \frac{V_{km}}{I_s} = \frac{\Delta_{1k} - \Delta_{1m}}{\det Y_n} \quad (5)$$

$$\text{电压传输系数} \quad T_{kn, 1n} = \frac{V_{kn}}{V_{1n}} = \frac{\Delta_{1k}}{\Delta_{11}} \quad (6)$$

$$T_{km, 1n} = \frac{V_{km}}{V_{1n}} = \frac{\Delta_{1k} - \Delta_{1m}}{\Delta_{11}} \quad (7)$$

以上各式中  $\Delta_{1i}$  均为  $Y_n$  的一阶代数余子式。

有源网络节点导纳矩阵的行列式(或一阶代数余子式)等于网络对应的电流图和电压图(或对其作适当变换后的图)的所有共有树的树支导纳积的代数和。下面将通过实例说明如何进行拓扑分析求出  $Y_n$  的行列式或一阶代数余子式。

## 3 含运算放大器网络的电流图和电压图

图 2 是一个典型的双二阶高通滤波器, 网络共有 10 个节点, 参考节点为接地点(设为节点 0), 各支路电流参考方向如图。根据(6)式, 电压传输系数为:

$$T_{90,10} = \frac{V_0}{V_i} = \frac{V_{90}}{V_{10}} = \frac{\Delta_{19}}{\Delta_{11}}$$

理想运算放大器可用零泛器模型表示<sup>[3]</sup>, 其对应的电流图和电压图分别如表 1 所示。因此, 含运算放大器的网络在画其电流图时, 将运算放大器输出端点与接地点短接, 画电压图时, 将同相和反相输入端之间的两个节点短接。对图 2, 画出其电流图和电压图如图 3 所示。

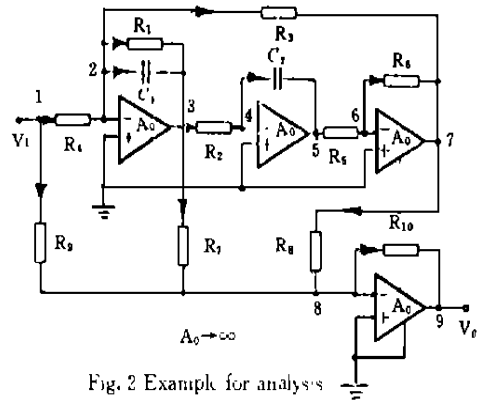
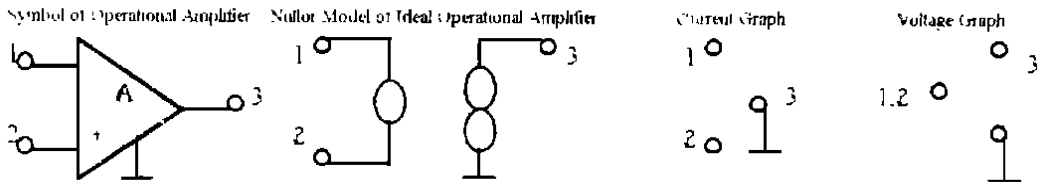


Fig. 2 Example for analysis

Tab. 1 Current graph and voltage graph of operational amplifier



其中: 支路 b1, b2, b3, ..., b12 分别对应元件 R1, R2, R3, ..., R10, C1, C2 所在支路。

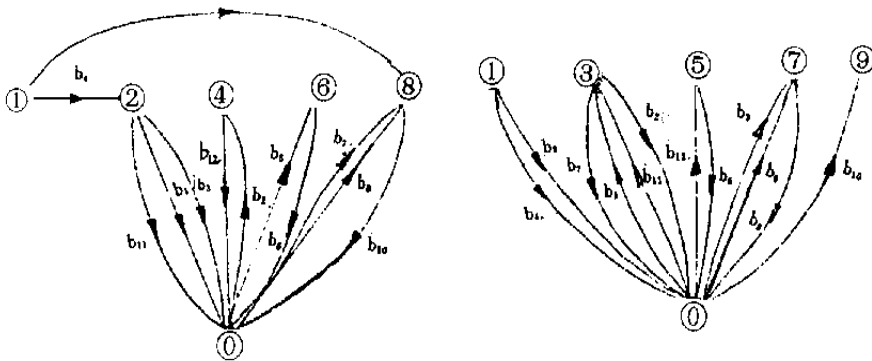


Fig. 3 Current graph and voltage graph

## 4 计算机辅助分析

上述含运放网络的电流图和电压图的基本关联矩阵可利用计算机直接生成。

首先根据各元件在网络中的联接关系输入一信息表(可暂不考虑运放), 对图中每条支路根据其参考方向输入起始节点号和终止节点号, 借助计算机生成不含运放网络的关联矩阵如下:

$$A = \begin{matrix} & \text{b1} & \text{b2} & \text{b3} & \text{b4} & \text{b5} & \text{b6} & \text{b7} & \text{b8} & \text{b9} & \text{b10} & \text{b11} & \text{b12} \\ \begin{matrix} \textcircled{1} \\ \textcircled{2} \\ \textcircled{3} \\ \textcircled{4} \\ \textcircled{5} \\ \textcircled{6} \\ \textcircled{7} \\ \textcircled{8} \\ \textcircled{9} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

考虑含运放网络的电流图应将运放输出端点同接地点短接, 所以应划去 A 中该点对应的那一行(划去③, ⑤, ⑦, ⑨行), 得到含运放网络电流图的基本关联矩阵:

$$A_i = \begin{matrix} & \text{b1} & \text{b2} & \text{b3} & \text{b4} & \text{b5} & \text{b6} & \text{b7} & \text{b8} & \text{b9} & \text{b10} & \text{b11} & \text{b12} \\ \begin{matrix} \textcircled{1} \\ \textcircled{2} \\ \textcircled{4} \\ \textcircled{6} \\ \textcircled{8} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

由于含运放网络的电压图中运放的同相和反相输入端的两节点短接, 因此将 A 中两节点对应的两行内容相加, 并划去任一行(此例中节点②, ④, ⑥, ⑧应同地短接, 所以对对应划去矩阵 A 中②, ④, ⑥, ⑧行即可), 由此得电压图的基本关联矩阵:

$$A_v = \begin{matrix} & \text{b1} & \text{b2} & \text{b3} & \text{b4} & \text{b5} & \text{b6} & \text{b7} & \text{b8} & \text{b9} & \text{b10} & \text{b11} & \text{b12} \\ \begin{matrix} \textcircled{1} \\ \textcircled{3} \\ \textcircled{5} \\ \textcircled{7} \\ \textcircled{9} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

计算  $\Delta_{11}$  时, 将电流图和电压图中的节点①同参考点短接, 去掉短路掉的边 b4 和 b9, 如此变化后两图的所有共有树为 b1b6b10b12, b6b10b11b12, b2b3b5b10(详见文献[2]), 其树支导纳积的代数 sum 即为  $\Delta_{11}$ ,

$$\Delta_{11} = \frac{SC2}{R1R6R10} + \frac{S^2C1C2}{R6R10} + \frac{1}{R2R3R5R10} = \frac{C1C2}{R6R10} \left( S^2 + S \frac{1}{R1C1} + \frac{R6}{R2R3R5C1C2} \right)$$

同理, 计算  $\Delta_{19}$  时, 将电流图中的节点①同参考点短接, 电压图中的节点⑨同参考点短接, 并去掉短路掉的边 b10, 求出两图的所有共有树为 b2b4b5b8, -b2b3b5b9, -b6b9b11b12, b4b6b7b12, -b1b6b9b12, 即:

$$\Delta_{19} = \frac{1}{R2R4R5R8} - \frac{1}{R2R3R5R9} - \frac{S^2C1C2}{R6R9} + \frac{SC2}{R4R6R7} - \frac{SC2}{R1R6R9}$$

整理得图 2 二网络的电压传输系数为:

$$T_{90,10} = \frac{V_0}{V_i} = \frac{\Delta_{19}}{\Delta_{11}} = -\frac{R10}{R9} \cdot \frac{S^2 + S \frac{1}{R1C1} \left( 1 - \frac{R1R9}{R4R7} \right) + \frac{R6}{R2R3R5C1C2} \left( 1 - \frac{R3R9}{R4R8} \right)}{S^2 + S \frac{1}{R1C1} + \frac{R6}{R2R3R5C1C2}}$$

## 5 结束语

符号网络函数是电网络理论的新内容,其作用已得到普遍的承认。本文提供的算法不仅求出的是全符号网络函数,而且结果中不含相消项。借助计算机求出含运算放大器网络的全符号网络函数,对于分析大规模电路将是一项非常有意义的工作。

### 参 考 文 献

- [1] 张珍华,计算机辅助电路分析与程序设计. 北京:人民邮电出版社,1995:1-73
- [2] 滕玉鹃,乐全根,寻找公共树的一种计算机算法. 光学精密工程,1995,3(6):122-127
- [3] 王定中,零泛器电路分析. 北京:高等教育出版社,1987:55-72

## Computer Aided Analysis of Networks Containing Operational Amplifiers

Teng Yujuan

(*Department of Automation, Jilin Institute of Technology, Changchun 130012*)

### Abstract

Network containing operational amplifiers is topologically analysed by computer. The method of defining common trees between current graph and voltage graph is used for obtaining the all symbolic network function.

**Key words** : Current graph; Voltage graph; Operational amplifier; Symbolic network function

滕玉鹃 女,1964年10月生。1991年毕业于武汉工学院(硕士),研究方向:电网络分析。现在吉林工学院自动化系任教。主要专长:电路CAD和多媒体制作。