第12卷 第1期 电子科学学刊 Vol. 12, No. 1
1990年1月 JOURNAL OF ELECTRONICS Jan., 1990

线性有源网络的高效模拟和优化设计*

曲 明
(上海交通大学电子工程系,上海)

摘要 本文给出了适合于线性有源网络优化设计的一种有效方法. 在电路优化设计中，计算费用主要取决于目标函数计算. 通常情况下，一个线性网络的模拟要求解维数较高的线性方程. 电路优化设计中一个很重要的特点是独立可调设计参数的数目较小，依据线性网络的性质,将其表征为一个多端口网络,在优化之前建立混合参数矩阵，每次目标函数计算中仅需求解一个维数和设计参数数目相同的方程,因而非常省时.

关键词 有源网络;混合矩阵;模拟;优化

1. 引言

已有几篇很好的文章对电子线路的优化设计作了综述[1-3]. 通常认为电子线路的优化设计是费时的,其主要费用在于对网络的电特性的模拟.一般优化设计以交互的方式进行,以便使他们可以了解和控制优化设计过程[4]. 这样就对优化设计的速度提出了较高的要求. 降低计算费用的方法有两种: (1) 减少目标函数的计算次数，即减少电路模拟的次数. 近二十多年以来,有效的非线性规划方法的研究一直是个活跃的领域[5]. (2) 减少优化过程中每次电路模拟的费用,即改善电路分析方法,使之更为有效. 本文就第二个方面来探讨提高线性有源网络优化设计的效率问题.

对于线性网络来说，电路模拟中经常采用的节点分析法和修改节点分析法都需要求解一个维数较高(至少等于独立节点数)的方程,即使采用稀疏矩阵技术,在每次模拟中也要重新进行 LU 分解,因而使得计算费用较高. 但是,电子线路优化设计中一个重要的特点是独立可调的设计参数的数目很小,特别是在有源网络和IC电路中，这一特点更为明显.一般情况下，$n \leqslant 10$[2,4]. 这是因为在设计参数之间存在相关性，明显的例子是 RC 有源滤波器的设计[6],独立可调的参数是不多的. 正是基于上述特点,可将优化过程中电路模拟的求解空间加以压缩,使得目标函数的计算费用降低. 本文描述的方法中,充分利用这一特点,将求解空间由高维压缩至低维,即求解一个维数低得多的方程.

2. 线性有源网络的模拟

线性电阻性 n 端口网络的混合分析在文献[7]中有详尽的描述，并给出了有效的算法. 我们将所有电容、独立电压源以及需要优化的电阻作为电压端口抽出,将输出端作为电流端口抽出,形成一个线性电阻性网络 $\hat{N}$. 对于网络 $\hat{N}$ 混合矩阵存在的条件为

(1) 受控电压源和独立电压源(包括电压端口)不构成回路;

1988年1月12日收到,同年10月修改定稿.

(2) 受控电流源和独立电流源(包括电流端口)不构成割集。

只要满足以上条件，用文献[7]中方法建立混合矩阵

$$\begin{bmatrix} I_{opt} \\ I_C \\ I_E \\ V_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & H_{14} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & H_{24} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & H_{34} \\ H_{41} & H_{42} & H_{43} & H_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{opt} \\ V_C \\ V_E \\ I_{out} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中，I_{opt} 和 V_{opt} 分别为要优化的电阻、电容对应的端口电流和端口电压向量；I_C 和 V_C 分别为不参加优化的电容对应的端口电流和端口电压向量；V_{out} 和 I_{out} 分别为输出端对应的端口电压和端口电流向量。

需要说明的是，实际优化设计中抽出的网络 $\hat{N}$ 可能不满足条件，这可以采用支路分裂和合并的处理方法加以解决，具体的做法见后面的例子。

(1) 式中，注意到这样的事实，$I_{out}=0$；且电容元件方程 $I_C = sCV_C$，在分块和矩阵处理后得

$$\begin{bmatrix} I_{opt} \\ V_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \widetilde{H}_{11}(s) & \widetilde{H}_{12}(s) \\ \widetilde{H}_{21}(s) & \widetilde{H}_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{opt} \\ V_E \end{bmatrix} = \widetilde{H}(s) \begin{bmatrix} V_{opt} \\ V_E \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中，

$$\widetilde{H}(s) = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{13} \\ H_{41} & H_{43} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{12} \\ H_{42} \end{bmatrix} [sC - H_{22}]^{-1} [H_{21} \ H_{23}] \tag{3}$$

我们称 $\widetilde{H}(s)$ 为复混合矩阵。

参加优化的电阻和电容的元件方程为

$$I_{opt} = \begin{bmatrix} sC_{opt} \\ G_{opt} \end{bmatrix} V_{opt} \tag{4}$$

消去 I_{opt} 并整理得

$$\left\{ \begin{bmatrix} sC_{opt} \\ G_{opt} \end{bmatrix} - \widetilde{H}_{11}(s) \right\} V_{opt} = \widetilde{H}_{12}(s) V_E \tag{5}$$

$$V_{out} = [\widetilde{H}_{21}(s) \ \ \widetilde{H}_{22}(s)] \begin{bmatrix} V_{opt} \\ V_E \end{bmatrix} \tag{6}$$

网络响应可以通过(5)式和(6)式求得。注意到(5)式是一个维数和优化元件数目相同的方程，在优化过程中，不断变化的参数是 C_{opt} 和 G_{opt}，因而每次目标函数计算只需求解方程(5)，而这个方程维数低，因此节约了计算时间。

很多有效优化算法需要有导数信息。下面推导网络响应对优化参数的灵敏度计算式。对某个待优化参数 h，对(5)式求导数经整理得

$$\left\{ \begin{bmatrix} sC_{opt} \\ G_{opt} \end{bmatrix} - \widetilde{H}_{11}(s) \right\} \frac{\partial}{\partial h} V_{opt} = -\frac{\partial}{\partial h} \begin{bmatrix} sC_{opt} \\ G_{opt} \end{bmatrix} V_{opt} \tag{7}$$

对(6)式求导数，给出灵敏度计算式

$$\frac{\partial}{\partial h} V_{out} = \widetilde{H}_{21}(s) \frac{\partial}{\partial h} V_{opt} \tag{8}$$

$\frac{\partial}{\partial h}\begin{bmatrix} sC_{\text{opt}} \\ G_{\text{opt}} \end{bmatrix}$ 可以方便地形成．V_{opt} 在(5)式的求解过程中已知，由(7)式和(8)式可算出灵敏度．如果采用 LU 分解算法，(5)式和(7)式的系数矩阵相同，仅需分解一次，由此可以进一步节约计算时间．

3. 网络的优化设计——策略和算法

设网络的响应为 $R_j(x)$，$j=1, 2, \cdots, m$，网络的设计指标为

$$a_j \leqslant R_j(x) \leqslant b_j, \quad j=1, 2, \cdots, m$$

电路的优化设计可以归纳成如下的极小极大问题

$$\min_x \{\max_i f_i(x)\} \tag{9}$$

式中，

$$f_i(x) = R_i(x) - a_i$$
$$f_{i+m}(x) = b_i - R_i(x), \quad i=1, 2, \cdots, m$$

C. Charalambous 和 J. W. Bandler 发展了一种求解 minimax 问题的有效方法[8,9]． 本文采用了 Charalambous 的加速方法[9]，此法已成功地用于非理想开关电容滤波器优化设计中，有关程序实现的具体描述见[10]．

下面给出有源网络优化设计的简略算法．

(1) 预处理　(a) 输入网络拓扑和元件参数，设置优化元件参数，并按第二小节的方法抽出电压和电流端口；(b) 利用文献[7]中算法建立 (1) 式形式的混合矩阵 H，计算(3)式，建立复混合矩阵 $\tilde{H}(s)$．

(2) 优化　选择合适的优化算法，如文献[9]中介绍的方法，进行优化迭代运算．在优化过程中，每次目标函数计算包括解方程(5)，由(6)式求出响应并形成目标函数．灵敏度的计算是在(5)式系数矩阵 LU 分解的基础上，根据(7)式进行一次回代并由(8)式求出参数的灵敏度．

如算法所述，复混合矩阵的建立放在预处理中，仅需执行一次，优化中每次目标函数计算只要求解(5)式和(6)式，方程(5)的维数和优化参数的数目相同，因而非常省时．

4. 例子

图 1(a) 为一 RC 有源低通滤波器，按文献[6]中方法设计，其指标为：通带截止频率

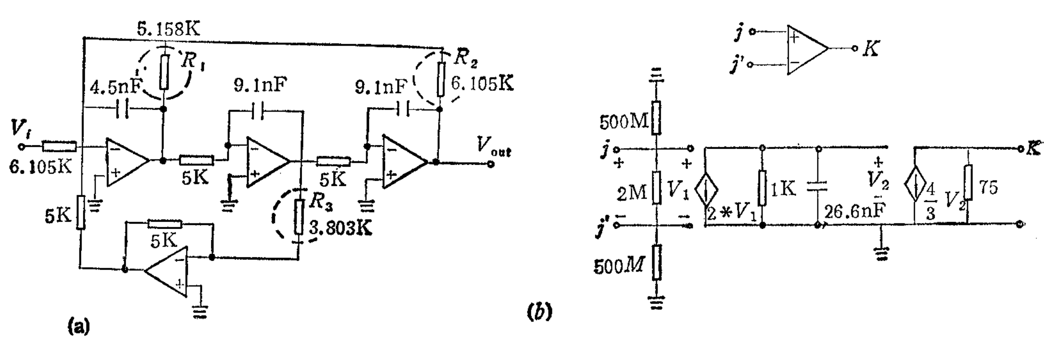

图 1　(a) RC 具源 Chebychev 低通滤波器　(b) μA741 线性宏模型[9]

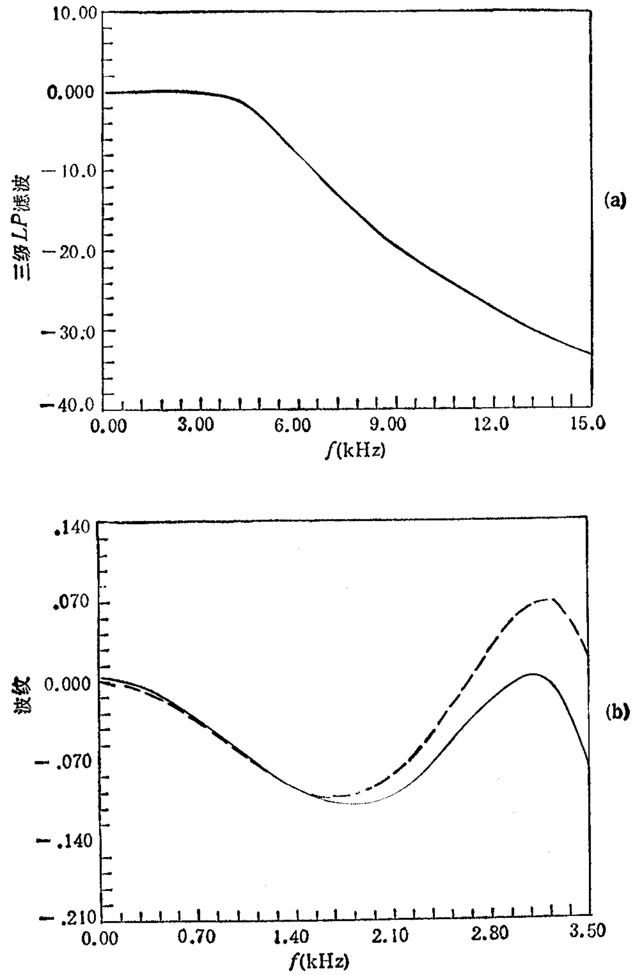

图 2 (a) 滤波器响应 (b) 通带波纹: ---优化前——优化后

$f_p = 3.5\text{kHz}$，通带最大波纹 0.1dB，阻带截止频率 $f_s = 14\text{kHz}$，阻带最小抑制 $A_{min} = 30\text{dB}$。

当图 1(a) 中运放采用图 1(b) 所示的宏模型代替时，其通带响应不满足设计要求(如图 2 所示)。 在优化过程中，调节电阻 R_1、R_2 和 R_3 来改善电路性能。 R_1 和 C_1 构成回路，不满足第二小节所述的条件，处理的方法是将电阻 R_1 分成两个电阻的串联，即 $R_1 = R_{1,0} + R'_1$，这样就避免了上述困难。令 $R_1 = 5000 + R'_1$，$R_2 = 3000 + R'_2$，$R_3 = 6000 + R'_3$，优化变量定义为 $x = [R'_1\ R'_2\ R'_3]^T/100$，则 $x^{(0)} = [1.58\ 8.03\ 1.05]^T$，求得最优点为 $x^* = [1.07\ 7.82\ 1.08]^T$，即通过优化设计，$R_1$、$R_2$ 和 R_3 的最佳阻值为 5107，3782 和 6108Ω。 在目标函数中，对 Chebyshev 型滤波器仅需 f_s 处的抑制大于 30dB 便可以保证阻带不变坏。优化前后的波纹示于图 2(b)。

若采用节点分析法或者修改节点分析法，至少每次目标函数的计算要建立一个 11 阶的复数方程，并在每个频率点上求解这个方程，而采用本文方法只建立一次复混合矩阵，

在此之后的目标函数计算中，只求解一个 3 阶复数方程，极大地提高了优化速度．

5. 结论

本文给出的方法对于线性有源网络的优化设计是有效的．当要优化的参数不是很多时(通常是这种情况)，本文方法可以相当程度地减少目标函数的计算费用，这对费时的电路优化设计是实用的．

王豪行副教授曾与本文作者进行过多次讨论，并仔细审阅了本文初稿，在此表示谢意．

参 考 文 献

[1] G. C. Temes, D. A. Calahan, *Proc. IEEE*, **55**(1967), 1832—1863.

[2] R. K. Brayton, et al., *Proc. IEEE*, **69**(1981), 1334—1362.

[3] J. W. Bandler, et al., *Math. Prog. Study*, **11**(1979), 1—64.

[4] K. J. Antreich, et al., Proc. ISCAS, Chicago, 1983, 538—541.

[5] J. E. Dennis, J., *Proc. IEEE*, **72**(1984), 1765—1776.

[6] Y. Harry, F. Lam, Analog and Digital Filters: Design and Realization, Prentice-Hall Inc., 1979.

[7] L. O. Chua, P. M. Lin, Computer-Aided Analysis of Electronic Circuits: Algorithms and Techniques, Prentice-Hall Inc., 1975.

[8] C. Charalambous, J. W. Bandler, *Int. J. System Sci*, **7**(1976), 377—391.

[9] C. Charalambous, 应用数学与计算机数学，1982 年，第 3 期，第 13—28 页.

[10] 曲明，王豪行，第一届全国计算机应用联合学术会议论文集，北京，1988.1.

EFFICIENT SIMULATION AND OPTIMIZATION OF LINEAR ACTIVE NETWORKS

Qu Ming

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai)

Abstract An efficient method for the optimization of linear network is presented. The computation cost in circuit optimization mainly depends on the simulation of network. In general, the simulation of a linear network needs to solve high dimension linear equations. An important characteristic in circuit optimization is that the number of independently tunable parameters is small. In term of the property of linear networks, the circuit is described by a multiport network in present method, and the hybrid matrix is established. The dimension of the equations to be solved is the same as the number of optimization parameters in objective function evalutions, so this method is very efficient.

Key words Active network; Hybrid matrix; Simulation; Optimization