

# 模拟电路优化模型的构造及实现方法

何 斌

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘要** 根据优化设计理论, 提出一种电路优化设计的实用方法, 可以提高优化设计的效率。

**关键词:** 模拟电路; 优化

## 1 引言

电路优化设计是电子系统现代化设计的重要组成部分。由于电路系统的设计为多性能指标设计, 并且每个性能指标一般都是元件参量的非线性函数, 因此, 电路优化设计是多目标有约束非线性规划问题。在实际应用中经常将多目标规划问题转化为单目标规划问题求解。一般有两种常用方法: 一种是对主目标进行优化求解, 次目标转化为约束条件; 另一种是依据某一算法对目标函数加权, 将其转化为单目标求解。前者是在非劣解集的子集中寻求满意解, 后者是在非劣解集中搜索满意解。虽然, 后者优于前者, 但优化模型构造要复杂。本文针对模拟电路设计的具体特点, 探讨有关模拟电路优化模型的构造问题, 并给出例子, 说明具体应用方法。

## 2 优化方法

应用何种优化方法, 主要取决于方法的可靠和有效性, 即寻优成功概率, 计算迭代次数。在这两方面, 单目标函数优化方法比较成熟。因此, 多目标优化问题都尽可能转化为单目标优化问题求解。这里采用线性加权系数法将多目标问题转化为单目标问题求解, 调节权系数搜索符合设计要求的满意解。

### 2.1 数学模型<sup>[1]</sup>

若设计变量为  $\bar{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ , 目标函数为  $F_i(\bar{X}), (i = 1, 2, \dots, p)$ , 约束条件  $g_j(\bar{X}) \leq 0, (j = 1, 2, \dots, q)$ , 权系数  $W_i > 0, (i = 1, 2, \dots, p)$ , 且用  $k$  表示迭代次数。

则有

$$\min_{i=1}^p W_i^{(k)} F_i(\bar{X}^{(k)}) \quad (1)$$

$$s. t. \quad g_j(\bar{X}^{(k)}) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, q;$$

每次循环迭代用确定的  $\bar{X}^{(k)}$ ,  $W_i^{(k)}$  为初值, 选择适当的单目标优化方法对(1) 进行寻优求解, 调节权系数  $W_i^{(k)} \rightarrow W_i^{(k+1)}$ , 进行下一次循环迭代, 直到求出满意解为止。

## 2.2 确定设计变量

根据优化理论, 应该将影响电特性的所有参变量都确定为设计变量(或状态变量), 但在实际应用中很难做到这一点, 只能选择一些电路参变量为设计变量, 因此如何选择设计变量直接影响最后优化结果。采用以灵敏度的大小为基准来选择设计变量的方法, 在实际应用中可以取得较好的效果。

设电路的参变量有  $N$  个, 而设计性能指标函数为  $f_1(\bar{X}), f_2(\bar{X}), \dots, f_p(\bar{X})$ , 则有

$$\Delta f_i(\bar{X}) = \sum_{j=1}^N \frac{\partial f_i}{\partial X_j} \Delta X_j \quad (i = 1, 2, \dots, p)$$

$$\text{若令 } S_j^i = \frac{\partial f_i}{\partial X_j}$$

则有

$$\Delta f_i(\bar{X}) = \sum_{j=1}^N S_j^i \Delta X_j \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (2)$$

(2) 式中  $S_j^i$  就是灵敏系数, 它反应各个参变量的单位变化引起相应设计性能指标变化的大小。若给定一个阈值小量  $\delta$ , 那么对于任意一个  $f_i(\bar{X})$ , 在参变量的标称值  $x_j^0$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 处, 计算  $S_j^i$ , 就有两个参变量集合产生,  $U_1^i, U_2^i$ , 其中:

$$U_1^i = \{X_j | S_j^i < \delta, j = 1, 2, \dots, N\} \quad (3)$$

$$U_2^i = \{X_j | S_j^i > \delta, j = 1, 2, \dots, N\} \quad (4)$$

对应  $f_1(\bar{X}), \dots, f_p(\bar{X})$  可以有  $U_1^1, U_1^2, \dots, U_1^p; U_2^1, U_2^2, \dots, U_2^p$

$$U_2 = U_2^1 \cup U_2^2 \cup \dots \cup U_2^p \quad (5)$$

若  $U_2 = \Phi$ , 则  $X_j \in U_2$  是影响  $f_i(\bar{X})$  ( $i = 1, \dots, p$ ) 变化的参变量, 并确定为设计变量。

若  $U_2 \neq \Phi$ , 则  $\delta$  值设定量太大, 改变  $\delta$  值, 进行(3) - (5) 计算。

用上述方法选取设计变量; 开始时可以将  $\delta$  值取得小一些, 然后可以逐渐增大, 减少设计变量的数量。

## 2.3 目标函数的构成

电路的设计指标可以用两种方式给出, 一种是用信号输出标准波形为指标; 另一种是以数值做为指标。分别用  $f_i^*(\bar{X}), f_i^*$  表示两种不同方式的性能指标, 目标函数的数学表示如下

$$f_i(\bar{X}) = f_i^*(\bar{X}) \quad (6)$$

$$f_i(\bar{X}) = f_i^* \quad (6)$$

由(6)(6)可得

$$f_i(\bar{X}) - f_i^*(\bar{X}) = 0 \quad (7)$$

$$f_i(\bar{X}) - f_i^* = 0 \quad (7)$$

若设计指标 $f_i(\bar{X})$ 的允许误差为 $\Delta f_i$ ,则令

$$F_i(\bar{X}) = f_i(\bar{X}) - f_i^*(\bar{X}) - \Delta f_i \quad (8)$$

$$F_i\bar{X} = f_i(\bar{X}) - f_i^* - \Delta f_i \quad (8)$$

若将 $f_i^*$ 做为 $f_i^*(\bar{X})$ 的特殊值,则可以得到一个通式

$$F_i(\bar{X}) = f_i(\bar{X}) - f_i^*(\bar{X}) - \Delta f_i \quad (9)$$

电路优化设计,就是求解 $\bar{X}^*$ 使

$$\min F_i\bar{X} \quad (i = 1, 2, \dots, p) \quad (10)$$

上述各公式中,没有给出 $f_i(\bar{X})$ 的情况,因这种情况可以转化为 $-f_i(\bar{X}) - f_i^*(\bar{X})$ 的目标函数,可以用(7)(7)相同的方法处理。

在(9)中 $\Delta f_i$ 作用主要是保证 $F_i(\bar{X}) = f_i(\bar{X}) - f_i^*(\bar{X}) > 0$ 的成立。因为(10)的优化解 $\bar{X}$ 使 $F_i(\bar{X}^*) = f_i(\bar{X}^*) - f_i^*(\bar{X}^*)$ 极小,所以在具体应用时,最好加入一个松弛量 $\Delta f_i$ 使其更加符合设计指标要求。

## 2.4 确定约束条件

优化设计约束条件主要有两种:性态约束和界限约束。性态约束指由设计变量按照特定的规律确定的特性要求;界限约束就是设计变量的边界区间。对应到具体的电路优化设计,就是非设计指标的一些电特性要求以及元件各参变量的容差范围。

若设计变量为 $\bar{X}$ ,非设计指标电特性 $g_i(\bar{X})$ 则约束条件为

$$\begin{aligned} g_i(\bar{X}) &= 0 \quad i = 1, 2, \dots, l; \\ x_i - a_i &= 0 \\ b_i - x_i &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, n; \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $a_i, b_i$ 为设计变量的容差值。

## 2.5 权系数调节方法

在多目标线性加权法中,权系数的自适应方法是比较关键的问题。因为它直接影响到在非劣解集中寻优的成功与失败。下面给出一种在电路优化设计中较为实用的一种权系数调节方法。

依据电路设计要求,对设计性能指标确定允许裕量,这里称为基本误差单位,用 $\Delta F_1, \Delta F_2, \dots, \Delta F_p$ 分别表示 $F_1(\bar{X}), F_2(\bar{X}), \dots, F_p(\bar{X})$ 的基本误差单位,权系数用 $\bar{W} = [W_1, W_2, \dots, W_p]^T$ 表示。

若迭代次数为 $k$ ,当 $k = 0$ 时,则有

$$\bar{X}^{(0)} = [x_1^{(0)} x_2^{(0)} \dots x_n^{(0)}]^T$$

$$F(\bar{X}^{(o)}) = [F_1(\bar{X}^{(o)}), \dots, F_p(\bar{X}^{(o)})]^T$$

$$\bar{W}^{(o)} = [F_1(\bar{X}^{(o)})/\Delta F_1, \dots, F_p(\bar{X}^{(o)})/\Delta F_p]^T \quad (12)$$

由(12)可得权系数的一般形式

$$W_i^{(k)} = F_i(\bar{X}^{(k)})/\Delta F_i \quad (13)$$

权系数自适应过程,可分几种情况讨论。

(1) 当对任意的  $i, F_i(\bar{X}) > \Delta F_i, F_i(\bar{X})$  上升时,说明这项设计指标偏离要求较远,  $W_i > 1$  增大,寻优方向对  $F_i(\bar{X})$  加大权重值。

(2) 当对任意的  $i, F_i(\bar{X}) > \Delta F_i, F_i(\bar{X})$  下降时,说明该项设计指标已经满足了预先确定的允许裕量,即达到设计要求,  $W_i < 1$  减小,寻优方向对  $F_i(\bar{X})$  降低权重值。

(3) 当对任意的  $i, F_i(\bar{X}) = \Delta F_i$  时,该项设计指标已经进入非劣解集中,即基本满足设计要求,还需寻求满意解,  $W_i = 1$ ,保持原有的寻优方向。

(4) 当  $F_i(\bar{X}) \leq \Delta F_i, (i = 1, 2, \dots, p)$  时,说明各项设计指标进入非劣解集,由于可能出现多解,而引起寻优迭代速度下降或振荡现象。为了避免这种现象,可以将基本误差单位确定为有一定梯度的数值。实际应用时,先确定主要设计指标的允许容量,然后依次按比例确定其它设计指标的允许容量。这样可以保证在非劣解中,依照有利于主要设计指标方向寻求满意解。

### 3 实例应用

如图所示电路为射放入大电路,电路中元件值为优化前标称值,设计性能指标有三项:单位输入时的输出幅值  $A$ ,白噪声输出幅值  $N$ ,频带宽度  $B$ 。优化前,三项指标分别为  $A = 10 \text{ dB}, N = 4.77 \text{ dB}, B = 135 \text{ MHz}$ 。期望设计指标为  $A = 10 \text{ dB}, N = 4 \text{ dB}, B = 150 \text{ MHz}$ 。

优化过程如下:

(1) 求出电路各参变量值对三项设计指标的灵敏度,最好选取可变参量元件,否则计算结果无法实现。

(2) 根据(1)的结果,取  $\delta = 10^{-4}$ ,求出设计变量,  $U_2 = \{R_1, R_2, R_5, R_8, RES\}$

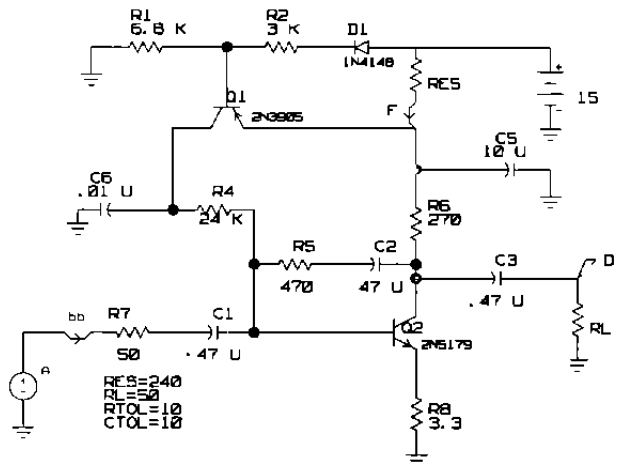


Fig. 1 Radio frequency amplified circuit

(3) 确定设计变量的边界条件, 这里取放大缩小 10 倍标称值, 为边界条件, 如  $R_1 = 6.8\text{k}\Omega$ ,  $R_1$  的边界约束为  $690 < R_1 < 68\text{k}\Omega$

(4) 确定基本误差单位, 将主要设计指标定为放大倍数, 即  $A$ ,  $\Delta A = 1\text{ dB}$ 。另外二项分别定为  $\Delta N = 0.1\text{ dB}$ ,  $\Delta B = 1\text{ MHz}$ , 对应设计指标的权系数  $W_A^{(k)} = (A^{(k)} - 10) / 1$ ,  $W_N^{(k)} = (N^{(k)} - \Delta) / 0.1$ ,  $W_B^{(k)} = (B^{(k)} - 150) / 1$

(5) 采用 EDA 软件的解算器计算。

(6) 计算结果:  $R_1 = 12.6\text{ k}$ ,  $R_2 = 2.2\text{ k}$ ,  $R_5 = 510$ ,  $R_8 = 3.1\text{ k}$ ,  $\text{RES} = 290$ ,  $A = 10\text{ dB}$ ,  $N = \Delta\text{dB}$ ,  $B = 160\text{ MHz}$ 。

## 4 结 论

模拟电路优化设计, 由于采用方法不同, 同种解算器可能产生多种结果。上述提出的方法, 在实际应用中效果较好, 并且优化的可靠性和效率较高, 可以帮助设计者提高优化设计的质量和速度。

### 参 考 文 献

[1] 吴兆汉, 万耀青, 机械优化设计, 北京: 机械工业出版社, 1986, 61-65

## Method of Construction and Realization on Optimized Model of Analogue Circuit

He Bin

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

### Abstract

According to theory of optimized design, a practicable method on optimized design of circuit is proposed and can improve efficiency of optimized design.

**Key words:** Analogue circuit, Optimization

何 斌 男, 1961 年 7 月生, 1990 年毕业于北京理工大学研究生院自动控制专业, 获硕士学位。现为助理研究员, 主要从事 EDA 方面的工作。