

采用遗传算法的模拟集成电路 参数最优设计^{*}

郑 力 新

(华侨大学电气技术系, 泉州 362011)

摘要 探讨单元模拟集成电路参数最优设计方法, 将此最优问题归结为约束化的非线性问题, 并用遗传算法求解. 事实证明, 采用该方法能更准确、更有效地解决此类问题.

关键词 模拟集成电路, 参数优化, 遗传算法

分类号 TN 431.106

随着集成电路设计和制造技术的不断发展, 人们已不满足于将分散的集成块拼凑成一个实用系统, 而是更加着眼于将整个系统集成在单一的芯片上. 由单板机到单片机的过渡就是一个典型的例子, 这种单片集成电路系统通常在同一芯片上含有数字电路和模拟电路. 模拟电路只占其中的一小部分, 但往往其设计难度最大、设计时间最长, 成为研制开发该芯片的主要成本. 单元模拟电路的设计是集成模拟 CAD^[1]的内核, 其设计要解决下面三个问题: (1) 拓扑网络选择; (2) 参数最优化; (3) 板面敷设. 目前, 模拟集成电路 CAD 在参数最优设计算法方面大多采用 Constrained Quasi-Newton Method (CQN), Sequential Quadratic Programming (SQP) 等算法. 这些算法要求有较好的迭代初值, 有的必须把系统约束方程转化为非约束方程来处理, 从而降低了求解的效率. 遗传算法的研究应用正受到人们的关注^[2], 大量事实表明它在解决约束化非线性最优问题上具有很强的适用性. 我们采用遗传算法对单元模拟集成电路参数的最优化问题进行了研究, 取得了较好的效果.

1 单元电路模型的建立

单元电路的基本组成是 CMOS 三极管. CMOS 三极管的制造长度 L , 宽度 W 及置偏电压 V_{bias} 等决定了三极管的特性, W, L 还决定了三极管的制造面积. 因此, 这些量成为集成电路设计的设计变量. 集成电路的设计目的, 是在满足一系列性能指标要求的前提下, 使集成电路的指定性能(如面积、频宽和功耗等)达到最优.

图 1 是个简单的共源串级型放大器单元电路原理图, 其电路最优设计模型可以是目标函数, 它为

$$\min_X (A_1(X) + A_2(X)).$$

基于性能指标约束条件为

$$g_{m1}(X)g_{m2}(X)r_{o1}(X)r_{o2}(X) = \text{GAIN},$$

$$I_{d1}(X)/C_L = \text{SLEWRATE},$$

$$g_{m1}(X)/2\pi C_L = \text{UGF},$$

KCL 约束条件为 $I_{d1}(X) = I_{d2}(X) = I$, KVL 约束条件为

$$V_{\text{bias}2} - V_{\text{gs}2} = V_{\text{ds}1},$$

$$V_{\text{bias}1} - V_{\text{gs}1} = V_{\text{ss}},$$

$$V_{\text{ds}1} + V_{\text{ds}2} = V_{\text{dd}} - V_{\text{ss}},$$

变量取值范围约束条件为

$$W_{\min} \leq W_1, W_2 \leq W_{\max},$$

$$L_{\min} \leq L_1, L_2 \leq L_{\max}.$$

这个模型的设计目的就是选择合适变量 $X(X = [W_1, W_2, \dots; L_1, L_2, \dots])$, 在满足约束条件的前提下使单元集成电路的面积达到最小.

上述例子比较简单, 但它代表了集成单元电路的总体设计概貌. 若用纯数学式子来描述的话, 可归纳为目标函数, 即

$$\min_X f(X).$$

基于不等式约束条件为 $g^i(X) \leq 0, i = 1, \dots, k$; 等式约束条件为 $h_j(X) = 0, j = k+1, \dots, l$; 变量取值范围约束条件为 $X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$. 变量 X 的各种函数的计算可以直接调用 CMOS 的模型模块 BSIM, 详见文 [3], 在此略去算式. 由于约束条件和目标函数大都是非线性方程式, 因此这类问题称为约束化非线性最优化问题.

2 遗传算法

遗传算法是一个强有力的求优算法. 它首先随机地产生一组潜在的解(X), 该解称为“染色体”, 解的集合称为“人口”, 解中的变量称为“基因”. 然后, 采用类似生物进化的过程(如染色体交叉、变异等)不断提高解的品质, 最后获得最优解. 我们为解单元电路参数最优化问题, 设计了如下的遗传算法.

2.1 染色体的产生及初始化

按单元电路变量 $X = [W_1, W_2, \dots; L_1, L_2, \dots]$ 的形式, 制造 pop_size 个染色体, 构成第一代人口, 即 $X_k = [x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kt}] (k = 1, 2, \dots, \text{pop_size}, t \text{ 为设计变量个数})$, 其中基因 x_{kt} 对应于电路具体的设计变量. 第一代人口的基因可以在各自的取值范围内随机产生, 但必须是合法的, 即要满足约束条件.

2.2 适应性评价函数的确立

为了评判染色体的优劣, 我们引入了适应性评价函数 $\text{Eval}(X_k)$, 即

$$\text{Eval}(X_k) = \begin{cases} f(X_k) & \text{当 } X_k \text{ 满足约束条件,} \\ M & \text{当 } X_k \text{ 不满足约束条件, } M \text{ 为大的正数.} \end{cases}$$

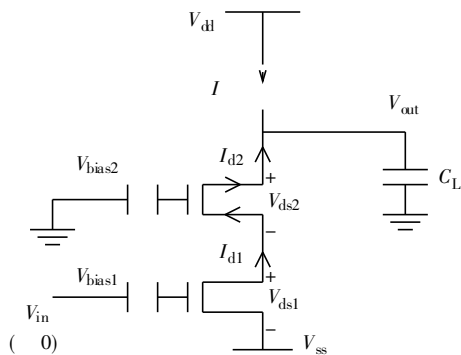


图1 共源串联型放大器

对最小值问题, 评价函数的值越小, 则该染色体的质量越好.

2.3 基因操作

通常基因的操作有交叉、变异和选择三种.

(1) 基因交叉. 采用算术交叉^[8], 即

$$X_j = cX_j^{\text{gen}} + (1 - c)X_i^{\text{gen}}; X_i = cX_i^{\text{gen}} + (1 - c)X_j^{\text{gen}},$$

其中 gen 代表第几代人口, c 为 $[0, 1]$ 范围的一个随机数.

(2) 基因变异. 随机地选择其染色体的某基因 x_{kj} , 然后在该基因的取值范围内, 任意随机地产生一个数来取代原有基因.

(3) 染色体选择. 原有的染色体(人口)称为父代, 经交叉变异后的染色体称为子代. 将它们都代入评价函数进行适应性的计算, 并按适应性大小顺序排列. 选出其中适应性最强的 pop_size 个染色体构成新一代人口, 这个过程称“适者生存”选择.

2.4 算法

(1) 全局参数的设定. 设定人口数为 pop_size , 交叉率 P_c , 变异率 P_m 和最大世代数 maxgen , 世代数初始值 $\text{gen} = 0$.

(2) 初期人口的产生. 方法同节 2.1.

(3) 适应性计算. 使 $\text{gen} = \text{gen} + 1$, 并计算父代染色体的适应性 $\text{eval}(X_k)$.

(4) 基因操作. (a) 交叉. 设交叉计数器 $\text{ccnt} = 0$, 从 $[0, 1]$ 范围内产生随机数 $r_k (k = 1, 2, \dots, \text{pop_size})$, 如果 $r_k < P_c$, 则选择 X_k 为交叉用; 使交叉用染色体配对进行交叉操作. 将接受交叉操作的染色体数记入 ccnt 中. (b) 变异. 设变异计数器 $\text{mcnt} = 0$, 从 $[0, 1]$ 范围内产生随机数 $r_k (k = 1, 2, \dots, t \times \text{pop_size})$, 如果 $r_k < P_m$, 则第 k 个基因进行变异操作, 并使 $\text{mcnt} = \text{mcnt} + 1$. (c) 适者选择. 计算子代染色体的评价函数 $\text{Eval}(X_k) (k = 1, 2, \dots, \text{ccnt} + \text{mcnt})$ 和父代染色体一同进行“适者生存”的选择, 形成下一代父代染色体(人口). 保留上述过程中最佳染色体 V^* , 即 $V^* = \arg \max \{ \text{Eval}(X_k), k = 1, 2, \dots, \text{pop_size} \}$, $\max \text{Eval} = \text{Eval}(V^*)$.

(5) 过程结束判定. 如果 $\text{gen} < \text{maxgen}$, 则回到(3)重复进行; 如果 $\text{gen} = \text{maxgen}$, 则输出 V^* 及 $\max \text{Eval}$, 结束求解过程.

3 数值实验实例

我们选择了常见的几个电路做了数值实验. 现仅以串级型两级 CMOS 放大器为对象说明结果. 该电路如图 2 所示, 它的主要性能指标约束方程为

$$g_{m2}(X) g_{m8}(X) R_{o1}(X) R_{o2}(X) \quad \text{GAIN},$$

$$2I_{M05}(X) / C_c \quad \text{SLEWART E},$$

$$2I_{M09}(X) / C_o(X) \quad \text{SLEWART E},$$

$$g_{m2}(X) / C_c \quad \text{UGF},$$

$$g_{m8}(X) C_c / (C_A(X) C_c + C_A(X) C_o(X) + C_c C_o(X)) \quad g_{m2}(X) / C_c \quad \text{相位裕度 } 45^\circ,$$

$$V_{dd} + V_{ds8} + V_{dsat6}(X) \quad \text{SWING},$$

$$V_{ss} + V_{ds9} + V_{dsat7}(X) \quad \text{SWING},$$

$$(I_{M03}(X) + I_{M04}(X) + I_{M08}(X)) (V_{dd} - V_{ss}) \quad \text{POWER},$$

其中 C_A 为 A 点的等效电容, V_o 为 o 点的等效电容, R_{o1}, R_{o2} 分别为一级和二级放大电路的输出等价阻抗. 求解变量为 CMOS 三级管的 W, L, V_{gs} 和 V_{ds} . KCL, KVL 等约束条件因篇幅有限略去. 整个方程式共有 40 个约束条件和 22 个变量. 在处理变量和约束方程过程中, 有下面 2 个问题值得注意.

- (1) 利用电路内的联系, 减少变量个数, 如 M Q3 和 M Q4 可以认为是完全匹配的; 又从系统零漂为零的假定出发, M Q4 的 V_{ds4} 等于 V_{gs4} .
- (2) 约束方程及变量在数量级上有所不同. 计算时, 一些地方需采用等效交换, 以减少计算误差. 如约束条件 $2I_{M Q9}(X)(C_o(X))^{-1} - SLEWRATE$, 有必要变换成 $2I_{M Q9}(X) - C_o(X) \cdot SLEWRATE = 0$, 这样可以避免分母数值过小的除运算产生的较大偏差.

采用遗传算法(GA), SQP 和 CQN 算法的数值实验结果比较如附表所示. 表中 G 为增益 (GAIN), S 为抖晃率(SLEW), E 为摆幅(SWING), f 为频宽(UGF), φ 为相位, C 为电容, A 为面积, P 为功率(Power), t 为 CPU 计算时间. 遗传算法的迭代过程如图 3 所示(30 次平均结果). 计算是在 NEC EWS4800/210 工作站上完成的.

附表 各算法实验结果比较(2 μm)

性能指标	期望值	GA	CQN	SQP	性能指标	期望值	GA	CQN	SQP
G/dB	86	90	85	88	C_c/pF	—	0.62	0.65	0.68
$S/V \cdot \mu\text{s}^{-1}$	10	21	13	16	C_L/pF	1	1	1	1
E/V	1	1.1	1.0	1.0	$A/\mu\text{m}^2$	—	2560	2957	3110
f/MHz	10	17.2	13.0	12.4	$P/\mu\text{W}$	—	432	580	614
$\varphi(^{\circ})$	45	50	50	48	t/s	—	20	9	13

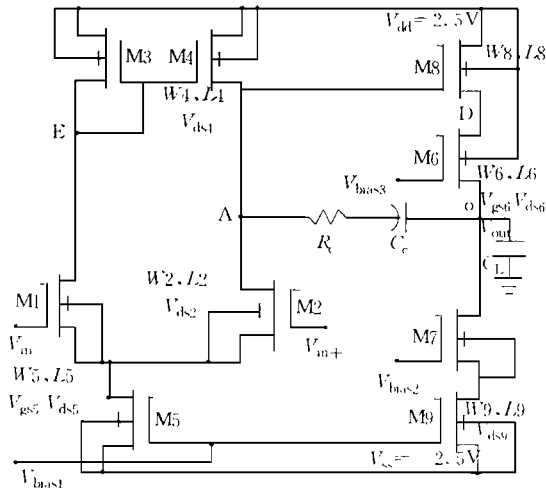


图 2 串级型两级 CMOS 放大器原理图

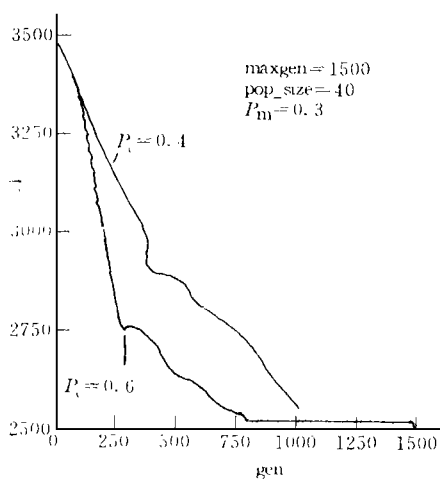


图 3 评价函数值趋势

4 讨论

从数值实验中, 我们可以得出如下结论.

- (1) 采用遗传算法求解单元电路最优参数设计问题, 虽然在速度上无优势, 但却能获得更

优解. 这是遗传算法本身的优点决定的, 既比其他方法更能找到全局最优解, 又不会过早地落入局部最优解中.

(2) 采用遗传算法求解, 对问题本身的条件要求得很宽松, 其收敛过程有很强的鲁棒性. 其他方法求解过程的好坏和问题本身有密切关系, 它要求求解者对问题和算法本身有较好的了解, 并在操作过程中采用适当技巧, 才能获得高的效率. 因此综合起来考虑, 遗传算法具有更高的效率和更广泛的适应性.

总之, 在集成电路最优参数设计中, 遗传算法不失为一种更有效的算法.

参 考 文 献

- 1 陈 芳. 模拟集成电路测试系统软件分析. 华侨大学学报(自然科学版), 1995, 16(3): 338 ~ 343
- 2 Mounir F, Bozena K K. FPAD: A fuzzy nonlinear programming approach to analog circuit design. IEEE Transactions on CAD of Integrated Circuits and System, 1995, 14(7): 785 ~ 793
- 3 Bing J S. BSIM: Berkeley short-channel IGFET model for MOS transistors. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1987, 22(4): 558 ~ 556
- 4 Gen M S, Cheng R W. Genetic algorithms and engineering design. New York: John-Wiley & Sons, 1997. 60 ~ 63

Parameter Optimization Design of Analog Integrated Circuit by Adopting Genetic Algorithm

Zheng Lix in

(Dept. of Elec. Tech., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract A discussion is devoted to parameter optimization design of cell analog integrated circuit. This optimization can be summed up as a constrained nonlinear problem and solved by genetic algorithm. As proved by the facts, this kinds of problem can be solved even more accurately and effectively by the author's method.

Keywords analog integrated circuit, parameter optimization, genetic algorithm