

基于遗传算法的共源级放大器优化设计

张 瑛^{1,2,3}, 马凯学³, 巴 京¹, 张长春^{1,2}, 张 翼^{1,2}

(1 南京邮电大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210046; 2 南京邮电大学 射频集成与微组装技术国家地方联合工程实验室, 江苏 南京 210046; 3 电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 共源级放大器是模拟集成电路中最基础也是最重要的电路之一。针对共源级放大器的设计优化问题, 在对放大器的工作原理进行理论分析的基础上建立了多目标设计优化的数学模型, 并利用归一化方程改进了多目标的适应度函数, 进而采用遗传算法对多目标优化模型进行求解, 最终实现了对共源级放大器设计的优化。基于标准 $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺对优化方法的有效性进行了仿真实验验证, 实验结果表明所提出的建模和优化方法能够快速而准确地进行模拟集成电路中放大器的辅助设计优化。

关键词: 共源级放大器; 遗传算法; 多目标优化; 适应度函数

中图分类号: TN47

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)12-0066-05

Design of a Non-Uniform Distributed Power Amplifier

ZHANG Ying^{1,2,3}, MA Kai-xue³, BA Jing¹,
ZHANG Chang-chun^{1,2}, ZHANG Yi^{1,2}

(1 College of Electronics Science&Engineering, Nanjing University of Posts&Telecommunications, Nanjing 210046, China; 2 National & Local Joint Engineering Laboratory for Radio Frequency Integration and Micro Assembly Technology, Nanjing University of Posts&Telecommunications, Nanjing 210046, China; 3 School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The common-source amplifier is one of the most basic and important parts of analog integrated circuits. To optimize the design of common-source amplifier, the mathematical model of multiobjective optimization is built based on the theoretical analysis of its operational principle, and the normalized equation is applied to make the fitness function more applicable. Genetic algorithm is used to solve the multiobjective optimization model, and the optimization of the common-source amplifier design is completed finally. The simulation experiment is made to verify the validity of the optimization method based on the standard $0.18\ \mu\text{m}$ CMOS technology, and the simulation results show that the proposed modeling and optimizing method can provide fast and accurate optimization for the design of amplifiers in analog integrated circuits.

Key words: common-source amplifier; genetic algorithm; multiobjective optimization; fitness function

1 引言

模拟集成电路的主要功能是对模拟电信号进行放大以及运算等处理, 由于设计中需要对电路的增益、带宽、功耗以及驱动能力等各项性能指标进行综

合考量, 因此设计难度较大, 要求电路设计者拥有丰富的设计经验与扎实的理论知识。

遗传算法是计算机科学人工智能领域中用于解决最优化的一种搜索启发式算法, 是解决多目标优化问题的有效方法, 而其在电路设计优化问题方面也已得

收稿日期: 2016-03-09; 修回日期: 2016-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(61106021); 中国博士后科学基金面上项目(2015M582541); 江苏省高校自然科学基金面上项目(15KJB510020)

到了应用. 譬如美国航空航天局的喷气推进实验室研究人员 Koza 等人采用遗传编程(Genetic Programming, GP)的方法使得电路能够像生物进化过程一样不断地优化电路设计^[1-3]. 然而为了保证仿真软件在电路优化过程中的精确度,GP 需要大量的程序设计者配合电路设计者一起不断修改完善编译的程序,往往一个放大器元件的进化就要耗费工作站数日的工作时间. 此外,西安电子科技大学的赵曙光等人提出了一种能够进行多目标适应度评估、自动调整遗传参数的新的自适应遗传算法,从而优化了对模拟电路进化设计^[4, 5]. 东南大学的郑维山等人提出了一种以遗传算法作为全局搜索的算法,通过建立性能评估器对混频器进行电路优化设计,在设计过程中通过将搜索空间限定法与罚函数法相结合提高了电路的优化速度^[6, 7].

共源级放大器等基本放大器结构简单,却是所有模拟电路模块中最重要的组成部分之一. 针对共源级放大器进行多目标设计的优化,将低频增益、带宽、转换速率和电流损耗等四个设计目标同时进行了考虑,用归一化方程对多目标的适应度函数进行改进,解决了电路中每个性能指标量纲不一致的问题,同时将每个性能指标函数都将被约束在相同的变化范围之内,进而实现了多个电路性能指标设计要求下的共源级放大器的多目标设计优化.

2 共源级放大器基本原理

空载情况下的共源级放大器电路原理图如图 1 所示,其中 R_D 为漏极偏置电阻. NMOS 管通过自身的跨导传输特性将输入的栅源电压转换成漏级的输出电流,而漏级输出电流流过负载电阻就会产生输出电压.

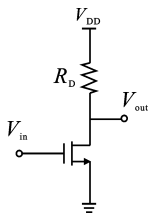


图 1 共源级运算放大器图

当输入电压 V_{in} 增大至 NMOS 管的导通电压 V_{TH} 时, NMOS 管 M 开始导通, 若忽略沟道长度调制效应, 则晶体管的漏极电流 I_D 为

$$I_D = \mu_n C_{ox} W (V_{GS} - V_{TH})^2 / (2L) \quad (1)$$

相应的输出电压 V_{out} 为

$$V_{out} = V_{DD} - a (V_{in} - V_{TH})^2 \quad (2)$$

式中, $a = R_D \mu_n C_{ox} W / (2L)$, μ_n 为电子迁移率, C_{ox} 为栅极电容密度.

由式(2)可知,随着输入电压 V_{in} 的增大, V_{out} 随之减小,直到 $V_{in} = V_{out} + V_{TH}$ 时, NMOS 管处于临界饱和状态,当输入电压 V_{in} 进一步增大时, NMOS 管将进入线性区,放大器的增益会显著下降,出现较严重的非线性失真. 因此为了使 NMOS 管处于饱和状态,根据式(2)可以计算得到输入电压 V_{in} 的最大取值 $V_{in, max}$ 为

$$V_{in, max} = V_{TH} + (\sqrt{1 + 4aV_{DD}} - 1) / (2a) \quad (3)$$

共源级放大器的小信号交流等效电路模型如图 2 所示,当 NMOS 管处于饱和状态时,可以得到放大器的电压增益 A_v 为

$$A_v = \frac{\partial V_{out}}{\partial V_{in}} = -g_m R_D \quad (4)$$

式中, $g_m = \mu_n C_{ox} W (V_{in} - V_{TH}) / L$.

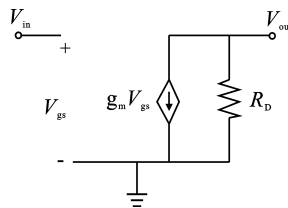


图 2 共源级放大器小信号模型

放大器的带宽反映了放大器能够有效放大的信号的最高频率,一般定义为增益幅值下降 3 分贝(幅值变为原来的 0.707 倍)时对应的频率为放大器的上限频率. 共源级放大器的带宽 BW 可以用输出端等效电阻与等效电容的乘积来近似,其表达式为^[8]

$$BW = \frac{1}{2\pi R (C_{db} + C_{gd})} \quad (5)$$

式中, R 为等效电阻, C_{db} 和 C_{gd} 分别为输出端漏端和衬底、栅极之间的等效电容.

放大器的转换速率的反映了放大器的驱动能力,其定义为闭环条件下输入阶跃信号时输出端测得的电压上升速率. 共源级放大器的转换速率 SR 可表示为漏级电流与输出端等效电容的比值,即

$$SR = \frac{I_d}{C_{db} + C_{gd}} \quad (6)$$

3 电路设计优化问题建模

模拟集成电路中放大器的设计指标往往不止一个,其对应的数学模型为多设计参数条件下的多目标优化问题. 共源级放大器的主要性能指标包括电压增益 A_v , 电流损耗 I_d , 3 dB 带宽 BW, 转换速率 SR. 为了提高放大器的增益和带宽,以及减小电路版图面积,放大管的沟道长度 L 一般设置为最小值

(标准 0.18 μm CMOS 工艺情况下该最小值为 0.18 μm),因此设计参数主要包括 MOS 管的栅源级电压 V_{gs} ,负载电阻 R_{L} ,MOS 管的宽 W .

因此,共源级放大器的设计优化问题可以建模为

$$\min f(V_{\text{gs}}, R_{\text{D}}, W) = \omega_1 A_{\text{v}} + \omega_2 I_{\text{D}} + \omega_3 BW + \omega_4 SW$$
$$\text{s. t. } \{V_{\text{gs}} < V_{\text{in,max}}\} \tag{7}$$

式中, ω_i 为各子目标对应的权重系数,电压增益 A_{v} 、电流损耗 I_{d} 、3 dB 带宽 BW 和转换速率 SR 可分别通过式(1)、式(4)、式(5) 和式(6) 计算得到,约束条件是为了保证晶体管处于饱和状态.

4 基于遗传算法的电路设计优化

遗传算法起源于 20 世纪 60 年代,最早由美国 Michigan 大学的 Holland 教授提出,它是通过模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种新型优化搜索算法,目前已广泛应用在人类科技发展的各个领域.

当采用遗传算法对共源级放大器电路进行优化时,由于电路中每个性能指标的量纲不一致,单纯采用增加权重的方式无法对综合性能进行合理评估,因此引入归一化方程

$$g_i(x) = [1 - \exp(-f_i(x)/f_{\text{ai}}(x))] \tag{8}$$

式中, $f_i(x)$ 表示电压增益 A_{v} 、电流损耗 I_{d} 、3 dB 带宽 BW 和转换速率 SR 四个性能指标中的任意一个, $f_{\text{ai}}(x)$ 为种群中所有个体的适应度 $f_i(x)$ 的算术平均值. 式(8) 的模型将每个性能指标对应的适应度值都约束在 (0,1) 区间之内,从而实现遗传算法对电路综合性能的合理评估. 相应的共源级放大器电路设计优化的数学模型为

$$\min f(V_{\text{gs}}, R_{\text{D}}, W) = \sum \omega_i g_i(V_{\text{gs}}, R_{\text{D}}, W)$$
$$\text{s. t. } \{V_{\text{gs}} < V_{\text{inmax}}\} \tag{9}$$

采用遗传算法对共源级放大器的设计进行优化的算法流程图如图 3 所示,其中几个关键优化步骤的处理方式如下:

(1) 产生初始化群体. 由于待设计参数 V_{gs} 、 R_{L} 和 W 均为取值连续的变量,无法直接应用遗传算法进行优化,因此使用二进制编码方式对电路中的变量进行量化处理. 根据设计经验,将 V_{gs} 的取值范围设置为 0.5 ~ 0.7 V, R_{L} 的取值范围设置为 500 ~ 5 000 Ω , W 的取值范围设置为 1 ~ 21 μm . 综合考虑数值计算的精度和复杂度,以及电路设计的实际应用要求,分别用 8 位二进制数来表示 V_{gs} 、 R_{L} 和 W 三个待设计参数,即它们的

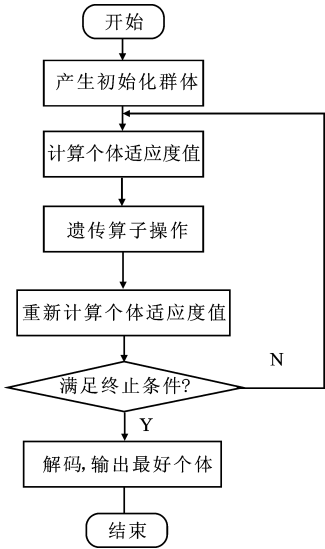


图 3 遗传算法流程图

变化步长分别为 0.2 V/256, 4 500 Ω /256 和 20 μm /256. 将 V_{gs} 、 R_{L} 和 W 三个变量看作三个基因,它们共同构成了种群中的染色体.

(2) 计算个体适应度值. 计算个体适应度值是首先将 V_{gs} 、 R_{L} 和 W 三个变量通过二—十进制转换为十进制数,再通过式(1)、(4)、(5)、(6) 分别计算出各个主要性能指标,最后根据适应度函数计算出群体每个染色体的适应度值.

(3) 遗传算子操作. 遗传算子包括选择算子、交叉算子、变异算子,是模拟进化过程产生下一代新样本的重要步骤,此处采用单点交叉的轮盘赌方式的选择算子.

5 仿真结果

基于 cadence 电路仿真平台,采用标准 0.18 μm CMOS 工艺进行电路性能的仿真,并采用 C 语言编程实现了遗传算法对共源级放大器电路设计的优化. 为验证算法的有效性,设置了两种不同的设计目标,第一种设计(设计一)偏重于提升放大器的电压增益,第二种设计(设计二)偏重于提升放大器的带宽性能. 两种设计的具体权重设置如表 1 所示. 为进行比较,两种设计中遗传算法的主要参数设置均设置为一样,即种群数均为 50,最大进化代数均为 250,变异率均为 0.01,交叉率均为 0.6.

设计一和设计二中电压增益 A_{v} 、电流损耗 I_{d} 、3 dB 带宽 BW 和转换速率 SR 四个性能指标的优化结果如图 4~7 所示, V_{gs} 、 R_{L} 和 W 三个待设计参数的优化结果如图 8~10 所示.

从仿真结果中可以看出,设计一中放大器的电压

增益在算法迭代了约 100 代左右后稳定在 9.64 倍,而电流稳定在 26 mA,带宽稳定在 5.1 GHz,转换速率稳定在 26.6 V/ μ s,此时 V_{gs} 为 0.62 V, W 为 14.1 μ m, R_L 为 5 000 Ω . 算法优化过程中,电压增益不断地增加,与之对应的带宽不断降低,符合电路设计中的折中原理. 对于同样的放大器电路,在一定功耗和带宽约束条件下以增益最大化为设计目标,人工设计结果为 V_{gs} 为 0.6 V, W 为 13 μ m, R_L 为 5 000 Ω ,较人工设计而言,遗传算法的优化结果更加精确.

表 1 不同设计目标的优化设置和结果的比较

设计名称	电压增益的权重	电流损耗的权重	3 dB 带宽的权重	转换速率的权重	电压增益的优化结果	电流损耗的优化结果/mA	3 dB 带宽的优化结果/GHz	转换速率的优化结果/(V/ μ s)
设计一	0.6	0.1	0.2	0.1	9.64	26	5.1	26.6
设计二	0.3	0.1	0.5	0.1	2.1	29	31.5	35

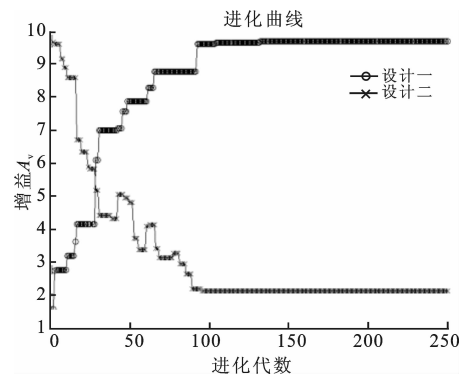


图 4 电压增益的优化

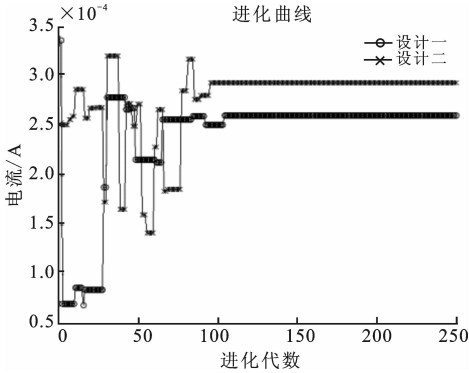


图 5 电流损耗的优化

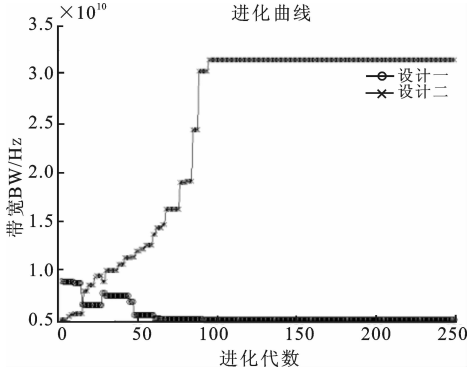


图 6 工作带宽的优化

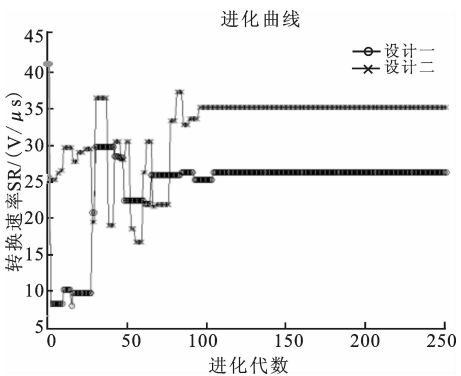


图 7 转换速率的优化

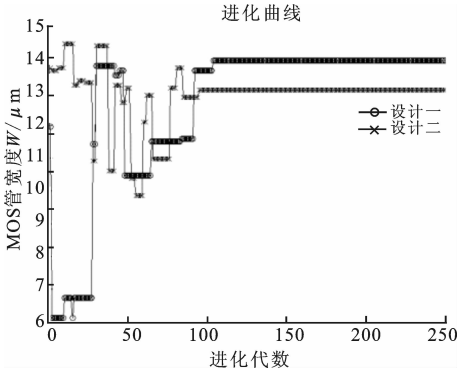


图 8 参数 W 的变化

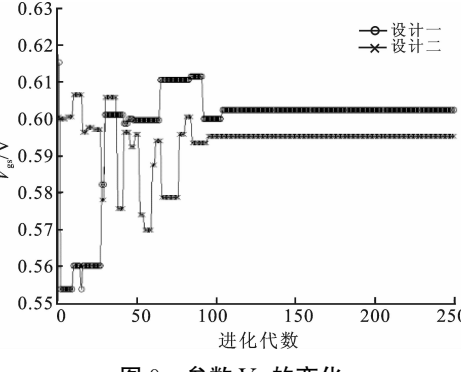


图 9 参数 V_{gs} 的变化

从仿真结果中可以看出,设计二中放大器的电压增益在算法迭代了约 100 代左右后稳定在 2.1 倍,而电流稳定在 29 mA,带宽稳定在 31.5 GHz,转换速率稳定在 35 V/ μ s,此时 V_{gs} 为 0.59 V, W 为 13 μ m, R_L 为 950 Ω . 与设计一比较,显然电压增益和带宽的权重的变化使得两个设计结果出现显著的不同,设计二的电压增益下降较多,换来了更大的工作带宽.

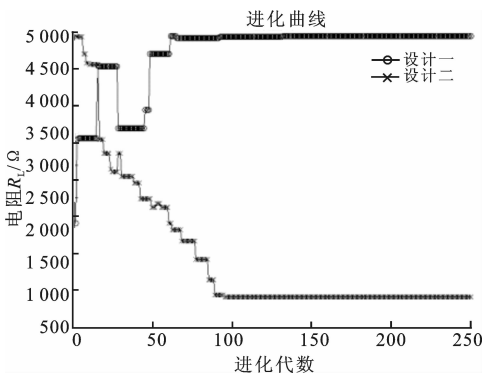


图 10 参数 R_D 的优化

6 结束语

共源级放大器是模拟集成电路中最基础也是最重要的电路. 通过对共源级放大器的基本工作原理进行分析, 建立了共源级放大器优化设计的数学模型, 并将遗传算法应用于共源级放大器电路的多目标设计优化中, 以此完成了对于低频增益、带宽、转换速率、电流等四个性能指标的多目标电路优化设计. 仿真实验结果表明遗传算法可以有效提高模拟集成电路设计的效率和准确性.

参考文献:

[1] Koza J R, Jessen Y, Keane M A, et al. Use of conditional developmental operators and free variables in automatically synthesizing generalized circuits using genetic programming [C] // Proceedings of the 2nd NASA/DOD Workshop on Evolvable Hardware. Washington DC, USA: IEEE, 2000: 5-15.

[2] Koza J R, Keane M A, Streeter M J. The importance of reuse and development in evolvable hardware [C] //

Proceedings of The 2003 NASA/Dod Conference on Evolvable Hardware. Chicago, USA: IEEE, 2003: 33-42.

[3] Koza J R, Keane M A, Streeter M J. Routine high-return human-competitive evolvable hardware [C] // Proceedings of the 2004 NASA/DoD Conference on Evolution Hardware. Seattle, USA: IEEE, 2004: 3-17.

[4] 赵曙光, 刘贵喜, 王军宁, 等. 基于自适应遗传算法的模拟电路自动设计方法 [J]. 电子学报, 2004, 32(4): 680-683

[5] 赵曙光, 刘贵喜, 杨万海. 利用自适应遗传算法实现模拟电路自动设计 [J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2003, 30(3): 298-301

[6] 唐守龙, 郑维山, 吴建辉. 一种新的 CMOS 混频器电路优化设计方法 [J]. 电路与系统学报, 2008, 13(2): 72-78.

[7] 郑维山, 彭艺频, 张萌, 等. 一种新的 CMOS 模拟单元电路设计方法 [J]. 应用科学学报, 2006, 25(2): 150-153.

[8] 毕查德. 拉扎维. 模拟 CMOS 集成电路设计 [M]. 陈贵灿, 程军, 张瑞智, 等译. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.

作者简介:

张 瑛 男, (1980-), 博士, 副教授. 研究方向为射频与微波集成电路设计. E-mail: zhangying@njupt.edu.cn.

马凯学 男, (1973-), 教授, 博士生导师. 研究方向为在卫星通信、软件无线电、基于 CMOS, MEMS, GaAs MMIC, LTCC 等射频微波毫米波电路与系统设计及封装.

巴 京 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路的智能优化设计.

张长春 男, (1980-), 副教授. 研究方向为无线和高速有线收发器相关的模数混合集成电路设计、射频集成电路设计及其它专用集成电路相关的设计.

张 翼 男, (1985-), 讲师. 研究方向为高速模数转换电路设计.

(上接第 65 页)

[2] Sombra A, Valdez F, Melin P, et al. A new gravitational search algorithm using fuzzy logic to parameter adaptation [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation. Cancun, Mexico: IEEE, 2013: 1068-1074.

[3] Amoozegar M, Rashedi E. Parameter tuning of GSA using DOE [C] // Computer and Knowledge Engineering (CCKE). Mashhad, Iran. 2014 4th International Econference on. IEEE, 2014: 431-436.

[4] Shams M, Rashedi E, Hakimi A. Clustered-gravitational search algorithm and its application in parameter optimization of a low noise amplifier [J]. Applied Mathematics & Computation, 2015, 258(6): 436-453.

[5] 赖丽萍, 聂瑞华, 汪疆平, 等. 基于 MapReduce 的改

进 DBSCAN 算法 [J]. 计算机科学, 2015, 9(S2): 396-399.

[6] Daniel J, Christian B, Thomas C. Analysis of Constraint Handling Methods for the Gravitational Search Algorithm [C] // Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. Beijing, China: IEEE, 2014.

作者简介:

秦 岭 男, (1980-), 硕士, 讲师. 研究方向为从事计算机应用技术、计算机控制自动化等方向的研究.

陶文雯 (通讯作者) 女, (1991-), 硕士研究生. 研究方向为优化算法、机器学习. E-mail: 15251740828@163.com.