

基于遗传退火算法的电路模拟吸波材料设计

王国成 徐乃昊 刘毅 高正平

(电子科技大学,成都 610054)

文 摘 相比传统吸波材料,电路模拟吸波材料可以很好地减小材料厚度、提高吸波性能,其设计通常使用遗传算法进行优化。针对传统遗传算法的诸多不足,对交叉和变异概率进行了改进、引入了模拟退火思想作为子代接受准则并增加了算法终止准则。其中,对交叉和变异概率的改进是最大创新点。改进后的遗传算法只需进化 100 代即得到最优解,平均反射率为 -15.0420 ,厚度为 1.43 mm ,均优于传统算法得出的结果。结果表明,改进后的遗传算法具有收敛速率快、不易陷入局部最优解等优点。

关键词 电路模拟吸波材料,遗传算法,模拟退火,电路屏,Boltzmann 准则

Design of Circuit Analogy Absorbing Materials Based on Simulated Annealing Genetic Algorithm

Wang Guocheng Xu Naihao Liu Yi Gao Zhengping

(uestc Chengdu 610054)

Abstract Compared to traditional radar absorbing materials, circuit analogy absorbing materials can be better to reduce the material thickness, to improve absorbing properties, often the genetic algorithm is used to optimize the results. For the disadvantages of the conventional genetic algorithm, crossover probability and mutation probability is improved, and the idea of “Simulated Annealing Algorithm” is introduced as the acceptance criteria of the offspring. The improved genetic algorithm only needs to evolve 100 generations to obtain the optimal solution, and the average reflectance is -15.0420 and the thickness of the material is only 1.425mm , which are better than the result of conventional algorithms. The results show that the improved genetic algorithm makes the convergence faster, and easy to avoid falling into local optimal solution.

Key words Circuit analogy absorbing materials, Genetic algorithm, Simulated annealing, Circuit panel, Boltzmann rule

0 引言

在传统吸波材料中插入电路屏,构成电路模拟吸波材料,是一种有效的吸波材料结构形式^[1]。电路屏如图 1 所示,在传输线模型中等效于集总电纳;电感屏呈现出电感性,电容屏呈现出电容性^[2-3]。吸波材料设计的任务是找出多层材料及电路屏的最优组合,使表面输入阻抗在工作频带内尽可能地接近空气的波阻抗。这可通过增加厚度以补偿频带内输入阻抗的差异来实现,而电路模拟吸收体可以在较小的厚度达到同样的性能^[4]。

该设计常用遗传算法进行优化,但传统的遗传算法存在如下缺点:

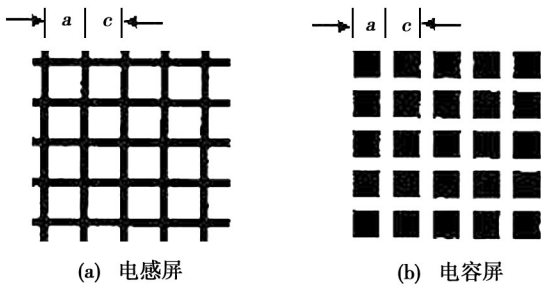
(1) 算法易“早熟”,一些优秀的基因片段可能过早丢失,导致算法探测能力不强,容易过早收敛,陷入局部最优解,这是传统遗传算法最为严重的问题^[5-6]。

(2) 变异后的子代直接作为下次进化的父代,可能导致算法收敛较慢,甚至难以收敛。

(3) 传统算法认为给定进化代数,当算法终止时,难以判断种群是否稳定、结果是否可信。

收稿日期: 2011-09-30

作者简介:王国成,1989 年出生,本科,研究方向为遗传算法、吸波材料。E-mail:wgch19890113@163.com



(a) 电感屏

(b) 电容屏

图1 电路屏结构

Fig.1 Circuit panel structure

针对传统算法的不足,研究者提出很多改进方法。如引入小生境技术^[7]、多种群进化^[6]、将神经网络算法与遗传算法相结合^[8]及提出了混合区间遗传算法^[9]、排序遗传算法^[10]等,这些改进均取得了较好的结果,但是收敛速率慢,算法太复杂。本文对传统算法的交叉和变异算子的概率进行了改进,并引入了模拟退火思想作为子代接受准则、增加算法终止准则,使得改进算法在不增加复杂度的情况下收敛速率

$$\begin{bmatrix} R \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + R_{0,1}} \begin{bmatrix} e^{-jg1t_1} & R_{0,1}e^{-jg1t_1} \\ R_{0,1}e^{-jg1t_1} & e^{-jg1t_1} \end{bmatrix} \frac{1}{1 + R_{1,2}} \begin{bmatrix} e^{-jg2t_2} & R_{1,2}e^{-jg2t_2} \\ R_{1,2}e^{-jg2t_2} & e^{-jg2t_2} \end{bmatrix} \frac{1}{1 + R_{2,3}} \times \\ \begin{bmatrix} 1 - Y_l/Y & -Y_l/Y \\ Y_l/Y & 1 + Y_l/Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-jg3t_3} & R_{2,3}e^{-jg3t_3} \\ R_{2,3}e^{-jg3t_3} & e^{-jg3t_3} \end{bmatrix} \frac{1}{1 + R_{3,4}} \begin{bmatrix} e^{-jg4t_4} & R_{3,4}e^{-jg4t_4} \\ R_{3,4}e^{-jg4t_4} & e^{-jg4t_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_4 \\ A_4 \end{bmatrix}$$

有金属衬底时, $B_4 = -A_4$ 。

当电路屏呈电容性时, Y_l 用 Y_c 代替, Y_l 、 Y_c 的值由文献[12]给出的经验公式确定。

进一步计算出反射率 = $20\lg |R|$

由传输线模型得出反射率计算式,常用遗传算法对其优化^[4,13],以使反射率在各频率点都比较低。

将模拟退火算法中的 Boltzmann 接受准则引入遗传算法,不但能较好地保留种群中的优良基因,还能使算法快速地收敛,寻求到全局最优解^[14-15]。

2 遗传算法改进

引进模拟退火思想改进后遗传算法流程图见图3。

(1)初始化参数:交叉概率 p_c , 变异概率 p_m , 种群规模 n (偶数), 初始温度 t , 结束温度 t_r , 降温系数 k 。随机初始化种群 $p = \{s_0, s_1, \dots, s_n\}$, s_i 代表一个染色体(个体或方案) $i = 1, 2, \dots, n_0$ 。

(2)解码,计算各染色体的适应度 $f(i)$ (反射率绝对值)。

(3)产生新的种群:轮盘选择法,选择 n 个父代,同一染色体可以重复选择;将父代分成 $n/2$ 组,进行组内交叉。

(4)交叉和变异:利用轮盘法,选择 n 个父代,进行交叉分组,对交叉后的个体进行变异。

更快、更易寻找到全局最优解,且能判断结果的可靠性。

1 等效电路模型

目前,在电路模拟材料研究的多种模型中,传输线模型比较简便、具有较高精度,应用广泛^[2,11]。图2示出一个4层电路模拟吸收体和它的等效电路图,其中材料2被插入的电路屏分割成两层。

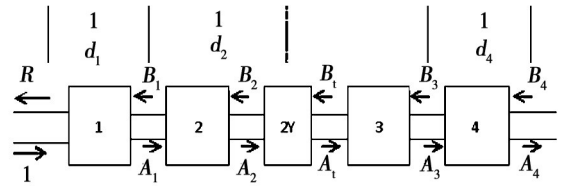


图2 等效电路图的二口网络

Fig.2 Two network of the equivalent circuit

借鉴文献[4]给出的表达式,对其进行改进和修正得到反射系数的矩阵表示如下:

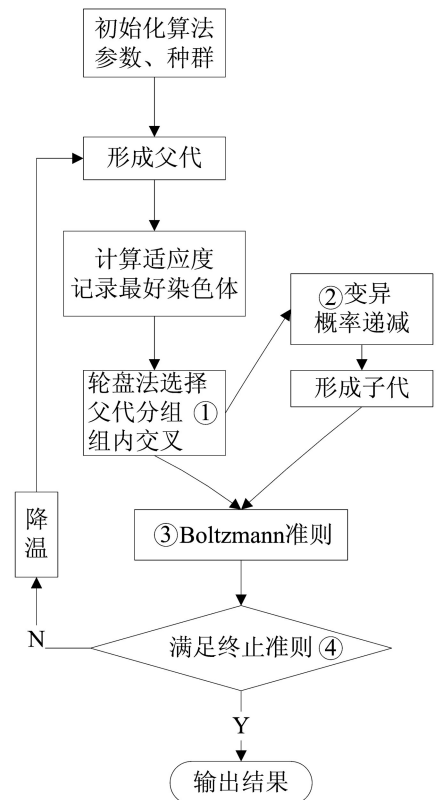


图3 改进算法流程图

Fig.3 Improved algorithm flow chart

①~④表示本文相对于经典的遗传算法所做的改进。

(5)对变异后的个体和父代一起进行退火选择,产生下一代 n 个个体;

(6)当前温度 $t_{n+1} = k \times t_n$, 当前代数加 1。判断种群是否仍在继续进化,确定是否终止算法。

2.1 交叉概率的改进

传统的遗传算法一般以较小概率进行交叉,以保留父代的优良基因,使种群得以稳定地进化。但是,对于每一代来说,种群多样性不够丰富,导致算法不能在更广的范围内去搜索新解,这就使得种群进化速率慢,必须进化足够多的代数才能寻求到最优解。

改进算法要求选择出来的父代以 100% 的概率交叉,这样大大提高了算法的探测能力,能更广泛地搜索新的超平面,使得更容易找到全局最优解。

当然,交叉的必然性,可能导致探测到的全局最优解丢失而不能遗传给下一代,使得算法收敛较慢甚至难以收敛。本文引入了“Boltzmann 接受准则”来解决这个问题。

2.2 变异概率的改进

对于变异,传统算法假定整个算法中变异概率相等。实际上,随着种群的进化,个体差异将会越来越小,发生变异的概率应该明显降低。而且,从算法收敛的角度,在种群进化的初始阶段,希望种群具有更丰富的多样性,变异概率应该较大;随着种群进化到后期,为保证种群的稳定性,变异概率相应减小,本文提出种群的变异概率随着进化代数的增加而减小,减小速度类比退火规律

$$p(T) = e^{5(T-1.5)}$$

式中, T 表示当前温度,可与代数相互转化,只是用温度表示更加方便。

进化初期的大概率变异,可能使探测到的全局最优解丢失而不能遗传给下一代,“Boltzmann 接受准则”能很好地解决这个问题。

2.3 基于“Boltzmann 接受准则”的退火选择

将变异后的个体和父代进行比较,按照模拟退火思想选择下一代个体;如果子代的适应性强于父代,则接受子代作为下一次进化的父代;如果子代的适应性弱于父代,则基于“Boltzmann 接受准则”^[16-17]以一定概率接受子代。

改进算法在未找到更优秀的解时,并不完全放弃劣解,而是以一定概率接受。这样既防止优良基因丢失,又保证算法能跳出局部最优解而寻求到全局最优解。

2.4 算法终止准则的改进

传统算法中,一般人为给定一个可接受的进化代数,以终止算法,对应的解作为最优解。但设定种群进化代数是一个难点:进化代数太少,种群尚未稳定,宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 3 期

解不够优秀;进化代数太多,可能在终止算法时种群早已达到稳定,后续计算未有实际作用,浪费时间,大量实验也表明,这种现象是经常发生的^[18]。

本文提出如下改进意见:

当连续 n (比如 10) 代进化的结果均没有改进,甚至退化时,认为种群达稳定,当前最优解即是全局最优解,结束算法。如果种群在可接受的进化代数仍未达稳定状态,则采用传统方法终止算法。

上述改进还能判断算法终止时种群是否已达稳定,算法是否是收敛的,便于确定结果的可信度。

3 结果比较

设计要求:模拟吸波材料层数:5 层;厚度要求:总厚度小于 2 mm。为使反射率在 2 ~ 18 GHz 的频率都尽可能低,优化的目标函数为文献[4]给出的平均反射率。

传统算法与改进算法结果比较见表 1。两算法人为设定可接受进化代数均为 500 代,如果将改进算法的终止准则用于传统算法,其进化代数为 207,也远大于改进算法。

表 1 两算法结果对比

Tab. 1 Results contrast of two algorithms

| 算法 | 平均反射率 /dB | 进化代数 | 吸波体厚度 /mm |
|------|-----------|----------|-----------|
| 改进算法 | -15.0420 | 100 | 1.425 |
| 经典算法 | -9.4500 | 500(207) | 1.400 |

从表中看出,两算法得出的厚度基本相同,均满足要求。但改进算法求得平均反射率明显比传统算法精确;且改进算法进化代数明显低于传统算法,收敛速率更快,进化代数 100 小于设定代数 500,证明算法受收敛的,结果较可信。

频带内各频率点反射率见图 4。

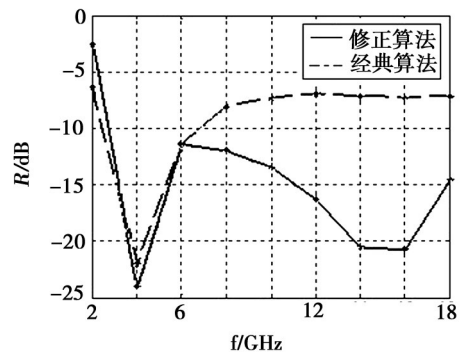


图 4 两种算法各频率下反射率

Fig. 4 Reflectivity of various frequencies of two algorithms

由图 4 可知,两算法在 2 ~ 6 GHz 得出的结果比较接近,但在 6 ~ 18 GHz,改进算法得出的结果明显

优于传统算法。

4 结论

本文将经典算法中交叉、变异概率进行了改进,并引入模拟退火中的“Boltzmann 接受准则”,对每次进化产生的子代进行一次选择,同时对算法的结束准则进行了修改。

相较于经典算法,改进算法具有以下明显优点:

- (1)新算法跳出局部最优解、寻求全局解的能力得以增强;
- (2)新算法收敛速率更快,计算效率更高;
- (3)新算法能准确地判断结果是否是收敛的,便于判断结果的可信度。

参考文献

- [1] 蒋诗才,邢丽英,张宝艳. 电路模拟吸波材料在结构吸波材料中的应用探索研究[J]. 材料工程,2003,7(2):23-25
- [2] 高正平,董恩昌,华宝家,等. 电路模拟多层雷达吸波材料的设计[J]. 宇航材料工艺,1996(2):20-23
- [3] 饶克谨,赵伯琳,高正平. 电路模拟吸波材料——原理、特性及设计方法[J]. 电子科技大学学报,1995,24(2):164-170
- [4] Rao Kejin, Gou Yi. Design of circuit analog absorber using genetic algorithm [J]. Journal of UESTC of China, 2000, 29(1):54-59
- [5] 王雪梅,王义和. 模拟退火算法与遗传算法的结合[J]. 计算机学报,1997,20(4):381-384
- [6] 周远晖,陆玉昌,石纯一. 基于克服过早收敛的自适应并行遗传算法[J]. 清华大学学报(自然科学版),1998,38(3):93-95
- [7] Jiang Fengguo. The hybrid genetic algorithm based on the niche's technology [C]//IEEE: Control Conference (CCC), 2010

[8] Yan Tai-shan. An improved genetic algorithm and its blending[C]//IEEE:Digital Object Identifier,2010

[9] Pengfei Guo, Xuezhi Wang, Yingshi Han. The enhanced genetic algorithm for the optimization design [J]. International conference on biomedical engineering and informatics, 2010(7): 2990-2994

[10] Yan Taishan. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2002,6(2):182-196

[11] Li Yanfei, Lu Guizhen, Piao Dazhi, et al. Research on low reflection material of double layer medium structure [J]. IEEE Electromagnetic Compatibility, 2007. EMC 2007

[12] Lee S W, Zarrillo G, Law C L. Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates [J]. IEEE Trans Antenna Propagat,1982, AP-30

[13] Eric Michielssen, Jean Michel Sajer, Ranjithan S, et al. Design of lightweight, broad-band microwave absorbers using genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques, 1993,41(6/7)

[14] 朱建丰,徐世杰. 基于自适应模拟退火遗传算法的月球软着陆轨道优化[J]. 航空学报,2007,28(4):806-812

[15] 吴志远,邵惠鹤,吴新余. 遗传退火进化算法[J]. 上海交通大学学报,1997,31(12):69-71

[16] 刘向群,仇越. 模拟退火算法和遗传算法在航空直流测速发电机优化设计中的应用与性能比较[J]. 航空学报,2000,21(6):561-563

[17] 韩松臣,石德平. 基于模拟退火算法的防空作战布局优化[J]. 航空学报,1999,20(5):478-480

[18] 王银年,葛洪伟. 求解 TSP 问题的改进模拟退火遗传算法[J]. 计算机工程与应用,2010,46(5):44-47

(编辑 任涛)