

复合型雷达吸波材料结构优化设计的数值计算

李超¹ 沈卫东¹ 邵锦萍¹ 宋思洪¹ 崔方²

(1 解放军重庆通信学院军事目标特征控制实验室,重庆 400035)

(2 山东省军区人民武装学校,济南 250022)

文 摘 基于多层复合型雷达吸波材料的设计要求构造了多目标优化的模型,将基本遗传算法(SGA)改进为自适应-混合遗传算法(MAHGA),通过数值计算为多层雷达吸波材料的结构优化提供了依据,依据计算结果制备了多层复合雷达吸波材料并进行了反射率和电磁参数测试实验,实验结果与计算结果吻合较好,复合材料具有良好的吸波性能,在8~18 GHz低于-10 dB的带宽可达7.8 GHz,最大衰减量为-34.6 dB,总厚度为3.5 mm。

关键词 遗传算法,多目标优化,雷达吸波材料

Numerical-Calculation Method in Optimizing Design for Structure of Multi-Layer RAM

Li Chao¹ Shen Weidong¹ Shao Jinping¹ Song Sihong¹ Cui Fang²

(1 Laboratory for Characteristic Controlling of Military Object in Chongqing Communication College, Chongqing 400035)

(2 PLA Army School in Shandong, Jinan 250022)

Abstract The multi-object optimization model was formed based on the requirements of design for multi-layer compositing RAM. The basis was provided for structure optimizing of multi-layer RAM by numerical calculating based on Mended Hybrid-Adaptive Genetic Algorithm (MAHGA) which was improved from Simple Genetic Algorithm (SGA). The multi-layer RAM was made according to the result of calculating, the experiment of its electromagnetic parameters was conducted, the result was consistent with that of numerical calculating. The capability of radar wave absorbing was proved well. The maximal reflection of compositing materials for radar wave is -34.6 dB with the width of 7.8 GHz below -10 dB in 8 - 18 GHz, and the thickness of compositing material is 3.5 mm.

Key words Genetic algorithm, Multi-Object optimization, RAM

1 前言

高技术战争条件下,信息的获取和反获取成为敌我双方较量的焦点,高效的隐身性能对提高装备的战场生存力具有重要的意义。雷达是当今军事侦察手段中最有效、应用最广泛的一种,因此军事目标实现雷达波段的隐身意义重大,而雷达吸波材料是雷达隐身技术的重点,各国对雷达吸波材料的研究较早,发展较快,为了实现多波段兼容隐身,对结构型雷达吸波材料的研究逐渐增多,结构型雷达吸波材料分为多层复合结构和夹层结构,该类型吸波材料兼具良好的吸波和承载能力,是21世纪隐身武器材料发展的主流。为使军事装备具有良好隐身性能的同时不影响

机动性能,要求吸波材料向着质量轻、厚度薄、频带宽、吸收强、成本低的方向发展,采用结构优化设计可实现吸波材料保持良好吸波性能的同时,减小厚度,减轻质量,有效利用材料性能,降低成本,具有重要的现实意义。本文应用传输线理论计算多层吸波材料反射率,并结合吸波材料的质量和厚度建立了多目标优化模型,通过改进标准遗传算法,高效、准确地获得了结构优化设计方案。

2 多层复合型雷达吸波材料反射率的计算

吸波材料吸收雷达波实际上是高频电磁场与有耗电介质相互作用问题。研究这类问题一般有两种方法,即以电磁波动方程入手求解空间各点电磁场

收稿日期:2008-06-05

作者简介:李超,1984年出生,硕士研究生,主要从事多波段兼容隐身材料的设计和应用研究

的“场方法”和从等效电路概念出发求解电路中各点电压、电流的“线方法”，传输线理论正是应用线方法，通过计算多层雷达吸波材料的等效电阻电路，求得材料对特定频率的发射率。

按照传输线理论，有 n 个结构层且背衬全反射面的吸波材料，其第 k 层对垂直入射电磁波的输入阻抗为：

$$Z_k = \frac{Z_{k-1} + j \operatorname{th}(\gamma_k d_k)}{1 + j Z_{k-1} \operatorname{th}(\gamma_k d_k)} \quad (1)$$

式中， Z_k 为第 k 层的特征阻抗， γ_k 为第 k 层的传播常数， d_k 为第 k 层的厚度。

$$\gamma_k = \sqrt{\mu_k - \epsilon_k} \quad (2)$$

$$\gamma_k = i \cdot 2 \pi f \cdot \sqrt{(\mu_k - \epsilon_k)(\epsilon_k - i \sigma_k)} / c \quad (3)$$

雷达波由自由空间垂直入射材料表面时，其电压反射因数可以表示为：

$$\Gamma = \frac{Z_n - Z_0}{Z_n + Z_0} \quad (4)$$

功率反射因数为：

$$R = 20 \lg |\Gamma| = 20 \lg \left| \frac{Z_n - Z_0}{Z_n + Z_0} \right| \quad (5)$$

底层采用理想良导体材料时，底层与相邻吸波层界面处的输入阻抗 $Z_0 = 0$ 。通过迭代可求出多层复合雷达吸波材料特定频率和厚度下的功率反射因数。

3 多目标优化设计模型的建立与求解

多于一个的数值目标的最优化问题就是多目标优化问题，多目标优化问题一般的数学模型可描述为：

$$\begin{cases} V - \min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T \\ s.t. & x \in X \\ & x \in R^m \end{cases} \quad (6)$$

式中， $V - \min$ 表示向量极小化，即向量目标函数中的每个子目标函数都达到极小化。实际情况下由于目标函数的相互矛盾，这样的结果很难达到，因此多目标优化问题得到的大多是 Pareto 解（非劣解）。

遗传算法（GA）是一类借鉴生物界适者生存、优胜劣汰的遗传机制演化而来的随机优化算法，在处理多目标优化问题方面，与传统优化方法相比具有搜索效率高，收敛快，不易陷入局部最优解，适应性强等优点。适用于精度要求较高的多目标优化问题。其一般运行流程图见图 1。

遗传算法的性能主要由五个要素决定，分别为参数编码、初始种群的设定、适应度函数的设计、操作设计和控制参数的设定。基本遗传算法（SGA）常采用

二进制编码、随机数生成初始种群、基于归一化适应度函数的轮盘赌选择法、固定交叉、变异率等，由于算法本身对具体问题适应性的限制，往往造成计算过程早熟、搜索后期振荡，结果偏向局部最优解等现象。为了克服基本遗传算法的缺点，主要从初始种群设定、操作设计两个方面进行改进，结合适应度函数的优化使得算法本身更具灵活性和适应性。

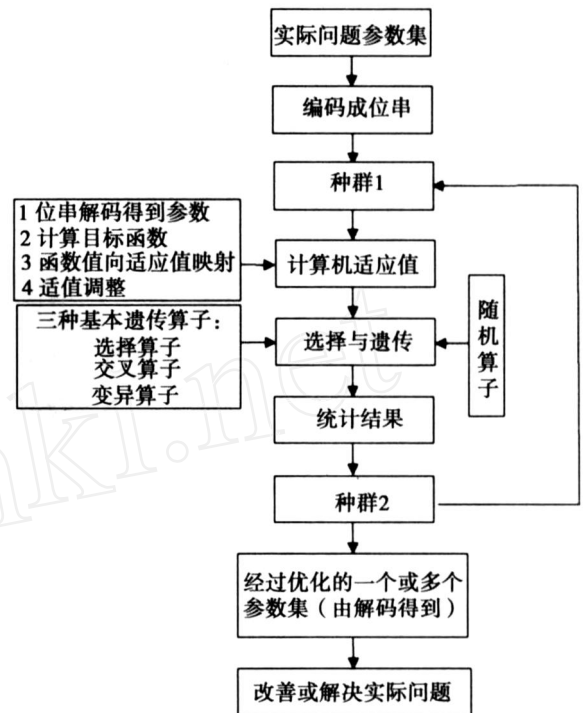


图 1 遗传算法一般运行流程图

Fig 1 Flow chart of normal operating process of MAHGA

3.1 改进型自适应 - 混合遗传算法的设计

初始种群状态对遗传算法的计算结果和计算效率具有重要的影响，要得到全局最优解，应使初始种群的个体在解空间中尽量分散，该算法划分可行域并在各分域中利用正交矩阵生成个体组成初始种群，克服了随机数生成法的个体分布不均匀问题，为了实现种群多样化，引入了个体的相似度（个体编码中相同位数的个数，大于编码位数一半时，认为两个个体相似），以高适应度个体为准，逐步删除群体中相似的个体，最终得到低相似度、分布均匀的种群。初始种群的生成算法流程见图 2。

交叉和变异算子对保持进化过程中种群的多样性具有重要作用，动态自适应的交叉和变异算法有助于避免早熟收敛和陷入局部最优解。该算法根据种群的阶段进化状态，动态自适应的设定交叉和变异强度，将进化过程分为稳定遗传和突变两个阶段，在稳定遗传阶段强交叉弱变异，在突变阶段弱交叉强变

异,一般稳定遗传阶段位于进化过程的前中期,进化后期由于个体变化弱化,甚至不变时,则应进入突变阶段,以个体的进化相似度作为划分两阶段的标准。交叉、变异过程采用了小范围竞争择优的方法。

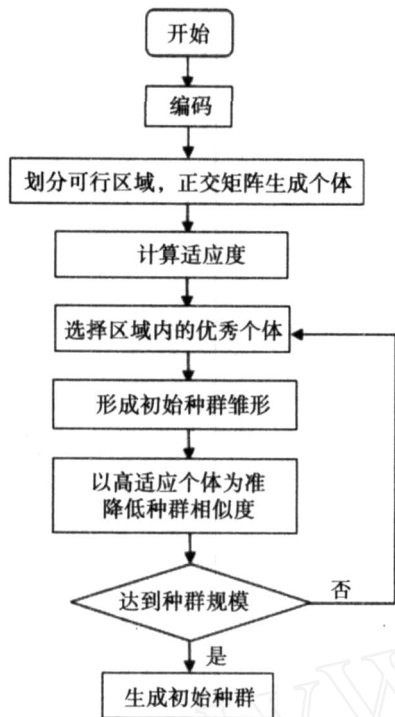


图 2 改进型自适应-混合遗传算法的初始种群生成算法流程图

Fig 2 Flow chart of initiating species colony of MAHGA

选择算子影响着遗传算法中种群进化的进程,从而限制着搜索范围,为了解决“轮盘赌”引起的“早熟收敛”和“搜索迟钝”等问题并得到全局最优解,选择算法主体采用并列选择方法,并结合共享函数的小生境技术和最优遗传方法,具体算法可描述为:

- (1)平均划分种群后,分配给各子目标函数并计算子群个体的适应度;
- (2)按最优个体直接遗传的选择算法在各子群中选择优势个体生成新子群;
- (3)合并子群,计算种群个体的小生境数,保留群体中小生境数小的个体;
- (4)判断新种群规模,若达到指定规模,进行自适应交叉和变异,否则转(2)。

改进型自适应-混合遗传算法的基本流程符合基本遗传算法的一般流程,运行过程可参见图 1。

为了消除接近收敛阶段的振荡现象,对个体适应度的进行了改进,采用当前子代的相对适应度,有效地解决了振荡现象,同时避免了进化初期强势个体在遗传过程中的垄断效应,有助于降低陷入局部最优解的可能性。

$$f = \frac{f - f_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (7)$$

式中, f 为相对适应度, f_{\min} 、 f_{\max} 分别为个体适应度、当前子代个体适应度最小值和最大值, 为自适应变量,防止分母为零或相对适应度过大。

3.2 多层雷达吸波材料结构优化设计模型的建立

基于对多层复合结构型雷达吸波材料“薄、轻、宽、强”的设计要求,建立了多目标函数向量。

$$\min F = \begin{cases} f_1(x) = \min [\text{ref}(f, \sum_{i=1}^n d_i)] \\ f_2(x) = - \max [\sum_{j=1}^m R_j(f, \sum_{i=1}^n d_i)] \\ f_3(x) = \min (\sum_{i=1}^n \rho_i d_i) \\ f_4(x) = \min (\sum_{i=1}^n d_i) \end{cases} \quad f_{\min} < f < f_{\max} \quad (8)$$

式中, $\text{ref}(f)$ 表示各层厚度给定情况下在 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 频率范围内的反射率 R , (f) 表示各层厚度给定情况下在 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 频率范围内 $R < -10$ dB 的带宽, $f_3(x)$ 、 $f_4(x)$ 分别为材料的面密度和厚度评价函数, ρ_i 、 d_i 为第 i 层吸波材料的密度和厚度。

适应度函数的合理性很大程度上影响遗传算法求解的效率和结果的优劣,为使结果更优,需对适应度函数进行优化设计。基于在实现宽带强吸收同时尽量减小材料质量和厚度的设计原则,采用权重系数法和共享函数相结合的方法为各子目标函数的赋权值,同时结合每个个体的函数值在子群中所排的位置以及函数值作为个体的适应度。其适应度可表达为:

$$\text{fitness}_{ij} = \frac{r_i f_{ij}}{\sum \text{num}_{ij}} \quad i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中, fitness_{ij} 表示第 i 个子群中第 j 个个体的适应度, r_i 表示第 i 个子函数的权重, f_{ij} 表示第 i 个子函数下第 j 个个体的函数值, num_{ij} 表示第 i 个子群中第 j 个个体的函数值所排的位置。

3.3 多层复合雷达吸波材料结构优化设计的数值求解

设计了四层复合结构型雷达吸波材料,结构和材料如图 3 所示。



图 3 四层复合雷达吸波材料结构图

Fig 3 Structure figure of four-layer composite RAM

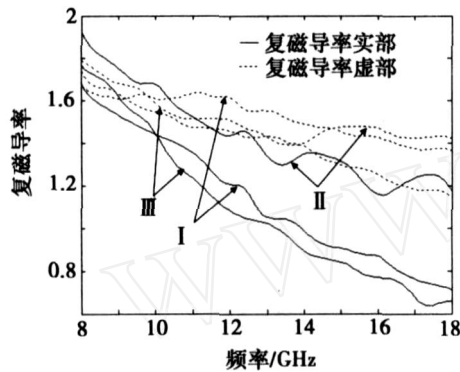
其中反射层采用 1 mm 全模碳纤维增强环氧树脂基复合材料,其它各层可在表 1 的三种材料中任选一种,各层材料选择方案及厚度,由优化计算结果确定。

表 1 材料种类及组成

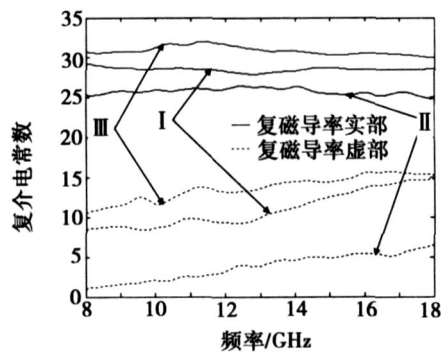
Tab 1 Varieties and components of materials

材料种类	基体材料	吸波剂
材料 1	环氧树脂 / 玻璃纤维	镀二氧化硅羰基铁粉、纳米镍粉
材料 2	环氧树脂	短切碳纤维、短切铜纤维、羰基铁粉
材料 3	环氧树脂	材料 2 吸波剂中掺入镀镍石墨粉

用 Agilent 8722 ES 测试了三种复合材料在 8 ~ 18 GHz 的电磁参数,见图 4 (、 、 表示材料的种类)。



(a) 复磁导率频谱特性曲线



(b) 复介电常数频谱特性曲线

图 4 三种吸波材料复磁导率、复介电常数频谱特性曲线

Fig 4 Frequency characteristic curves of frequent characteristic permeability of three RAMs

基于材料的电磁参数,运用改进型自适应 - 混合遗传算法计算得到了四层复合吸波材料各层材料选择及厚度的最佳方案,并对比了最优方案与次优方案的反射率计算结果,如图 5 所示。最优与次优方案的材料选择方案及厚度如表 2 所示。

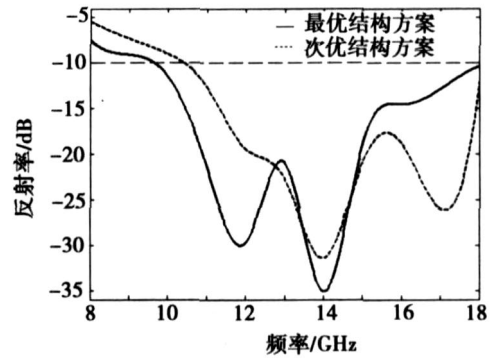


图 5 最优与次优方案的反射率计算结果对比

Fig 5 Comparison of calculated result of reflection of best and second best design scheme

表 2 最优、次优方案的组分材料种类及厚度

Tab 2 Varieties and thickness of components materials of best and second best design scheme

方案种类	匹配层材料种类及厚度 /mm	吸收层材料种类及厚度 /mm	过渡层材料种类及厚度 /mm
最优	材料 1 /1.52	材料 2 /0.61	材料 3 /0.42
次优	材料 2 /1.23	材料 1 /0.47	材料 3 /0.58

3.4 结果分析

如图 6 所示,改进型自适应 - 混合遗传算法具有较强的自适应能力,求解过程稳定,收敛快。用该算法计算所得的最佳材料结构方案下的材料反射率最大衰减量为 - 35.2 dB,低于 - 10 dB 的带宽可达 10.3 GHz,总厚度为 3.55 mm。依据最优方案制作四层复合吸波材料测试样板,采用弓形法测试其反射率,实验结果与计算结果吻合较好。测试结果图 7 表明复合吸波材料在 8 ~ 18 GHz 的频率范围内低于 - 10 dB 的带宽可达 7.8 GHz,最大衰减量为 - 34.6 dB,总厚度为 3.5 mm,具有厚度薄,质量轻,宽带强吸收的特点。

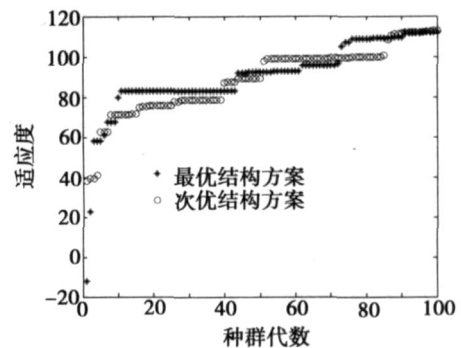


图 6 最优与次优方案下遗传算法的运行过程

Fig 6 Calculating process of MAHGA of best and second best design structure

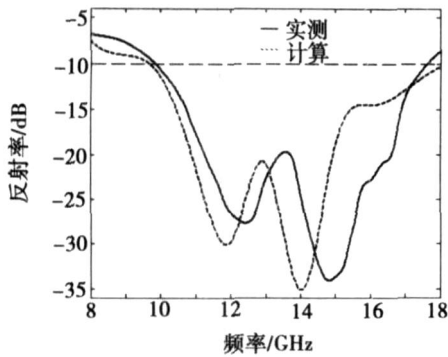


图 7 实验测试与数值计算数据对比图

Fig 7 Comparison of experiment and calculating result

4 结论

基于雷达吸波材料“薄、轻、强、宽”的设计要求,建立了多目标规划模型,对复合型雷达吸波材料的结构进行优化。将基本遗传算法改进为自适应-混合遗传算法,从种群初始化、遗传过程等方面,克服了基本遗传算法的最优解局部化、求解过程震荡等缺点,改善了运算效率和求解精度。通过计算,得到了吸波

材料的最优设计方案,确定了各层的组分材料及厚度。依据最优方案制备了实验样板,通过对比测试和数值计算结果,证明基于改进型自适应混合遗传算法的数值计算比较准确,其结果可以用作指导复合型吸波材料的结构优化设计,对降低结构设计实验成本和提高设计效率具有重要的现实意义。

参考文献

- 1 Michielssen E. Design of lightweight, broad-band microwave absorbers using genetic algorithms. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1993; 41(6~7): 1 024 ~ 1 031
- 2 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用. 北京:国防工业出版社, 1999
- 3 康青. 新型微波吸收材料. 北京:科学出版社, 2006
- 4 唐宏,赵晓鹏,邢丽英等. 多层吸波材料的数值优化设计. 微波学报, 2003; 19(3): 55 ~ 58
- 5 刘列等. 薄、轻、宽吸波涂层的优化设计. 宇航材料工艺; 1996; 26(4): 8 ~ 11
- 6 朱立群,古璟. 薄型多层雷达吸波材料结构设计与发展. 表面技术, 2007; 36(3): 49 ~ 52

(编辑 任涛)

(上接第 3 页)

参考文献

- 1 赵克熙. 原苏联芳纶复合材料研究进展及其在固体发动机壳体上的应用. 宇航材料工艺, 1995; 25(5): 8 ~ 19
- 2 郑锡涛等. 湿热老化对复合材料层压板强度的影响. 航空学报, 1998; (4): 462 ~ 465
- 3 郭宝春等. 湿热老化对氰酸酯树脂/酚醛环氧树脂混合物结构与性能的影响. 复合材料学报, 2002; (3): 6 ~ 9
- 4 Hutapea P, Yuan F G. The effect of thermal aging on the mode-inter laminar fracture behavior of a high-temperature M7/LaRC-RP46 composite. Composites Science and Technology, 1999; 59: 1 271 ~ 1 286
- 5 胡保全,牛晋川. 先进复合材料. 北京:国防工业出版社, 2006
- 6 于春茂,魏月贞等. AFMOC-纤维组成结构与结晶的研究. 合成纤维工业, 2000; 23(1): 45 ~ 48
- 7 陈平,王德中. 环氧树脂及其应用. 北京:化学工业出版社, 2004
- 8 李成功等. 航空航天材料. 北京:国防工业出版社, 2002
- 9 Li Rongbao. Moisture absorption and hygrothermal aging in a bismaleimide resin and its carbon fiber composites. Doctor paper of Macromolecular Science and Engineering in The University of Michigan, 2001
- 10 Yang H H, John Wiley, Sons. Kevlar Aramid Fiber 1992
- 11 Kazuto Tanaka, Kohji Minoshima, Witold Grela et al. Characterization of the aramid/epoxy interfacial properties by means of pull-out test and influence of water absorption. Composites Science and Technology, 2002; 62: 2 169 ~ 2 177
- 12 Sala G. Composite degradation due to fluid absorption. Composites: Part B, 2000; 31: 357 ~ 373
- 13 王晓洁. 湿热老化对高性能复合材料性能的影响. 固

体火箭技术, 2006; 29(4): 301 ~ 304

- 14 Cervenka A J, Bannister D J, Young R J. Moisture absorption and interfacial failure in aramid/epoxy composites. Composites Part A, 1998; 29: 1 137 ~ 1 144
- 15 孙红霞. 复合材料的湿环境下的性能研究. 天津工业大学硕士学位论文, 2005
- 16 杨亚文. 碳纤维环氧树脂复合材料的吸湿行为. 机械制造, 2005; 43(486): 71 ~ 72
- 17 Sereira Z, Adda Bedia E A, Tounsi A. Effect of temperature on moisture absorption in a bismaleimide resin and its carbon fiber composites. Composite Structures, 2006; 72: 383 ~ 392
- 18 毕冬冬,潘智存. 聚对苯二甲酰对苯二胺纤维在热处理时的二次结晶. 高分子学报, 1991; (1): 64 ~ 70
- 19 迟倩萍,韩丽华,张淑萍. Amos 环氧 FRP 模压板耐库存和湿热性能的研究. 纤维复合材料, 2003; (2): 40 ~ 41
- 20 张亚娟,齐暑华. 复合材料老化方法研究进展. 工程塑料应用, 2002; 30(1): 39 ~ 41
- 21 王俊,揭敢新. 高聚物的老化试验装备环境工程. 装备环境工程, 2005; 2(3): 47 ~ 53
- 22 朱诚身. 聚合物结构分析. 北京:科学出版社, 2004
- 23 芦艾,王建华. 高分子材料库存条件下性能变化研究方法. 四川化工与腐蚀控制, 2000; 3(4): 34 ~ 37
- 24 古尼耶夫 M. 聚合物基复合材料的寿命预测. 材料工程, 1994; (2): 21 ~ 24
- 25 肇研,梁朝虎. 聚合物基复合材料自然老化寿命预测方法. 航空材料学报, 2001; 21(2): 55 ~ 58
- 26 肇研,梁朝虎. 聚合物基复合材料加速老化规律的研究. 航空工程与维修, 2001; (6): 37 ~ 39

(编辑 吴坚)