

用遗传算法设计宽带薄层微波吸收材料

甘治平, 官建国, 邓惠勇, 袁润章

(武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室, 湖北武汉 430070)

摘 要: 针对雷达吸波材料(RAM)的吸收频带宽和厚度薄的优化目标, 引入动态跟踪变量约束条件和可动态扩展编码长度等技术, 采用基本遗传算法建立了在任意给定的厚度范围内对电磁波的吸收达到特定的反射损耗值有最大合格带宽的多层 RAM 的优化设计方法. 并结合研制的实际吸波材料建立的电磁参数数据库优化设计出了宽带、薄层的涂敷型 RAM. 用本文建立的优化设计方法可以实现宽带薄层 RAM 的优化设计.

关键词: 微波吸收材料; 遗传算法; 优化设计

中图分类号: TN104 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 06-0918-03

Design of Broadband, Thin-Layer Radar Absorbing Materials Using Genetic Algorithms

GAN Zhi-ping, GUAN Jian-guo, DENG Hui-yong, YUAN Run-zhang

(State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: The optimized method to synthesize the multi-layered radar absorbing materials with a maximum bandwidth satisfied by a special value of reflection loss to electromagnetic wave in a given range of thickness is established using the simple genetic algorithms, into which both dynamically tracing variable restricting conditions and dynamically extending the coding length are incorporated for the first time. The thin multi-layered microwave absorbing coatings with a broad bandwidth over a given range of frequencies are obtained based on the database of electromagnetic parameters for the absorbers prepared in our lab. The optimized design method can be extended to synthesize thin-layered, lightweight, broadband and strong-absorbing radar absorbing materials.

Key words: radar absorbing materials; genetic algorithm; optimized design

1 引言

在目标表面上选择性地涂敷雷达吸收材料(radar absorbing materials, RAM)是降低目标雷达散射截面积, 实现隐身的主要技术途径. RAM 的吸波性能取决于 RAM 的构造及其电磁特性, 要得到吸波性能优越的 RAM, 必须针对 RAM 的电磁参数及其构造进行优化设计. 为此, 人们已先后发展了多种优化设计 RAM 的方法, 比较典型的有单纯形法、模拟退火法(Simulated Annealing, SA)、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)等. 但单纯形法^[1]对初始值有较大依赖性, 往往只能提供局部最优值; SA^[2]虽然不再依赖初始值, 且具有较强的局部搜索能力, 但其运算效率不高; 而 GA^[3,4]是一种基于生物遗传学和适者生存机制的全域优化方法, 它具有稳健、高效、无需求导等特点, 适于处理如 RAM 的优化这类多目标复杂系统的设计问题, 因此近年来在 RAM 的优化设计中得到了广泛应用^[5~10]和持续发展. 文献[7,8]基于几类典型材料, 以吸收频带宽为目标, 在给定厚度下对 RAM 进行了优化设计; 文献[9]针对实际材料, 以重量轻和吸收能力强为目标, 在给定各层最

大厚度的情况下, 获得了满意的设计; 文献[10]针对 2^i ($i=1, 2, 3, \dots$) 种实际材料, 以宽、强为目标, 获得了宽带低反射的 RAM.

处理涂敷型 RAM 的多目标优化设计的常规方法是采用权重系数变化法, 即赋予各个子目标函数不同的权重, 并以各个子目标函数的线性加权和作为多目标优化问题的评价函数, 从而将多目标优化问题转化为单目标优化问题. 迄今, 在 RAM 的优化设计中均是采用这一方法, 但这种处理无疑会弱化主要目标. 本文以实际材料的电磁特性为依据, 将可动态扩展编码长度和动态跟踪变量的约束条件等方法引入遗传算法中, 建立了吸收频带宽和厚度薄的涂敷型 RAM 的优化设计方法. 该方法能在不弱化吸收频带宽这一首要目标的前提下兼顾到涂层厚度薄等使用性能要求, 设计出宽带、薄层的微波吸收涂层材料, 优化结果可为 RAM 的研制提供指导.

2 优化策略

2.1 目标函数的构造

根据电磁波传输理论, 当频率为 f 的均匀平面电磁波垂

收稿日期: 2002-01-17; 修回日期: 2002-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(No. 29904005); 863 项目(No. 2002AA305302)

直射入图 1 所示的表面涂覆 n 层吸波材料的导体表面时,材料对电磁波的反射率为: $R = 20\lg | \Gamma | = 20\lg \left| \frac{z_{i(n)} - z_0}{z_{i(n)} + z_0} \right|$; 式

中: $z_{i(n)} = z_n \frac{z_{i(n-1)} + z_n \operatorname{th}(\gamma_n d_n)}{z_{i(n-1)} \operatorname{th}(\gamma_n d_n) + z_n}$ 为 n 层材料的输入阻抗, $z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ 为真空阻抗; $z_n = z_0 \sqrt{\frac{\mu_n}{\epsilon_n}}$ 为第 n 层材料的特性阻抗, $\gamma_n = j \frac{2\pi f}{c} \sqrt{\mu_n \epsilon_n}$ 为第 n 层材料的复传播因子, d_n 为第 n 层材料厚度; μ_n, ϵ_n 分别为第 n 层材料的相对复磁导率、相对复介电常数, c 为真空中的光速; $n = 1, 2, 3 \dots$; $z_{i(0)} = 0$;

反射率公式表明,材料对入射电磁波的反射率与每层材料的厚度、每层材料的电磁参数 (μ 、 ϵ)、以及入射电磁波的频率有关,即 R 是材料厚度 d 、材料 m 、入射频率 f 的函数,可表示为: $R = R(d_1, m_1, d_2, m_2, \dots, d_n, m_n, f)$ 。作为处理吸收强目标的微波吸收材料优化设计,可将目标函数界定为: $f(d_1, m_1, d_2, m_2, \dots, d_n, m_n, f) = 1 - R(d_1, m_1, d_2, m_2, \dots, d_n, m_n, f)$; 这也是目前相当流行的一种处理方式,其优化结果是得到吸收强的吸波材料。本文针对厚度薄和吸收频带宽的目标,构造如下的目标函数:

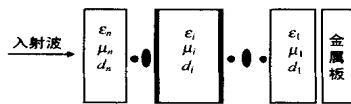


图 1 涂层结构与各层电磁参数

$$\max f(d_1, m_1, d_2, m_2, \dots, d_n, m_n) = \frac{(f_{\max}^* - f_{\min}^*)}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (1)$$

其中 f_{\max}^*, f_{\min}^* 分别表示在 $R \sim f$ 曲线上在 $f_{\max} \sim f_{\min}$ (GHz) 的频率范围内对应 $|R| \leq a$ (a 为特定吸收要求) 的频率段的最大频率和最小频率; $(f_{\max}^* - f_{\min}^*)$ 表示在 $f_{\max} \sim f_{\min}$ (GHz) 的频率范围内不低于 $|a|$ 吸收的反射带宽。 $f_{\max} \sim f_{\min}$ 为讨论的频率范围 (GHz)。将 $f_{\max} \sim f_{\min}$ (GHz) 频率范围分作 N_f 等分, 即将 $f_{\max} \sim f_{\min}$ (GHz) 频率范围离散化为频点集合 $\{f_i | f_i = f_{\min} + \frac{(f_{\max} - f_{\min})(i-1)}{N_f} \text{ (其中 } i = 1, 2, \dots, N_f, N_f + 1) \}$, 然后按照新

的频点体系, 计算出每个频点所对应的 R 值, 并与目标值 a 进行比较, 将所有满足反射损耗要求 ($|R| \leq a$) 的频点贮存起来, 这样, 在频点集合 $\{f_i | (i = 1, 2, \dots, N_f, N_f + 1) \}$ 中得到了一个子集 $\{f_j | |R(d_1, m_1, d_2, m_2, \dots, d_n, m_n, f_j)| \geq |a| (j = 1, 2, \dots, n_f) \}$, 该子集为满足吸波性能要求的频点集合, 它对应着在 $f_{\max} \sim f_{\min}$ (GHz) 频率范围内不低于 $|a|$ 吸收的反射带宽。经过这样的处理后, 式 (1) 等价于下式:

$$\max f(d_1, m_1, d_2, m_2, \dots, d_n, m_n) = \frac{n_f}{N_f + 1} \quad (2)$$

相应地, 个体 k 的适应度为: $f(k) = \frac{n_f}{N_f + 1}$ (其中 $k = 1, 2, \dots, PS$; PS 为群体大小); 这样一来, 频率范围问题可轻松转化为具体频点下的反射率的比较及频率计点问题, 从而可与实测的材料电磁参数结合起来。

2.2 算法的实施

式 (2) 确立的目标函数中的变量为: 各层材料 $\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 及各层厚度 $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$; 在这些变量中, 允许 $m_i = m_j (i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j)$, 即允许材料重复使用; 对厚度变量的约束条件为: $d_1 + d_2 + \dots + d_n \leq d_{\max}$, 即针对厚度薄的要求, 对涂层总厚度进行控制。

编码为: $D_1^1 \dots D_1^{Ndb} M_2^1 \dots M_2^{Nmb} \dots D_i^1 D_i^2 \dots D_i^{Ndb} M_i^1 M_i^2 \dots M_i^{Nmb} \dots D_n^1 \dots D_n^{Ndb} M_n^1 \dots M_n^{Nmb}$; 其中 Ndb 为厚度编码长度, 根据总厚度要求和厚度精度要求, 由式 (3) 确定; Nmb 为材料编码长度, 根据实际的材料数量 Nm , 由式 (4) 确定; $D_i^1 D_i^2 \dots D_i^{Ndb}$ 为第 i 层厚度的编码, $M_i^1 M_i^2 \dots M_i^{Nmb}$ 为第 i 层材料的编码。根据涂层层数 n , 编码的总长度 L 可作相应扩充, 为: $L = n(Ndb + Nmb)$

$$2^{Ndb-1} < \frac{d_{\max}}{d} + 1 \leq 2^{Ndb},$$

(d_{\max} 为 n 层材料的最大总厚度; d 为厚度精度;) (3)

$$2^{Nmb-1} < Nm + 1 \leq 2^{Nmb}, \quad Nm \text{ 为材料数量} \quad (4)$$

为保证优化的涂层总厚度不超过给定范围 ($0 \sim d_{\max}$), 在对厚度编码 $\{D_1^1 D_1^2 \dots D_i^{Ndb}\}$ 进行解码时, 对厚度的约束条件进行了动态跟踪, 跟踪的结果是第 i 层材料的厚度约束条件为

$0 \leq d_i \leq d_{\max} - \sum_{j=1}^{i-1} d_j (i = 1, 2, \dots, n)$; 相应地, 对第 i 层材料厚度编码 $\{D_1^1 D_1^2 \dots D_i^{Ndb}\}$ 的解码方法和第 i 层材料编码 $\{M_i^1 M_i^2 \dots M_i^{Nmb}\}$ 的解码方法分别由式 (5) 和式 (6) 给出:

$$d_i = \frac{d_{\max} - \sum_{j=1}^{i-1} d_j}{2^{Ndb-1}} \cdot \sum_{k=1}^{Ndb} (D_i^k \cdot 2^{k-1}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$m_i = \frac{Nm}{2^{Nmb-1}} \cdot \sum_{k=1}^{Nmb} (M_i^k \cdot 2^{k-1}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

由于对材料编码 $\{M_i^1 M_i^2 \dots M_i^{Nmb}\}$ 的解码结果 m_i 的精度要求为 1 (材料是以序号表示的), 因此需要对相应的解码结果进行圆整, 这样将会出现多 (染色体) 对应一 (表现) 的情形而有点降低优化效率, 但这种情形不会妨碍到优化结果。

确定了编码方式和解码方法后, 即可采用随机方法产生初始代, (采用随机方法的目的是保证初始代具有“自然界物种的多样性”), 然后按照优胜劣汰的进化规律, 对大小为 PS 的群体进行赌盘选择、单点交叉、随机变异等遗传操作, 直至终止条件。其中群体大小 PS 一般取为 $30 \sim 100$, 交叉概率 P_c 为 $0.6 \sim 0.9$, 变异概率 P_m 为 $0.01 \sim 0.1$; 个体 k 的遗传概率 P_k 根据个体 k 的适应度 $F(k)$ 来确定,

$$P_k = \frac{F(k)}{\sum_{i=1}^{PS} F(i)} \quad (7)$$

3 算例

根据上述优化策略, 结合我们研制的吸波材料, 建立了电磁参数、吸收剂密度、吸收剂体积分数等数据库, 编制了优化设计的 C++ 语言程序。在运行该程序时输入不同的变量约束条件, 通过执行遗传算法不断淘汰群体中适应度较低的个体, 并增补新的个体, 以保证群体持续进化, 并最终聚集到优化问题的最优点附近, 获得优化结果。例如, 对表 1 所示的若干真实材料, 设定特定吸收值为 8dB, 在不同的遗传环境下进

行优化设计,优化结果如表 2 和图 2 所示.可见,用该方法能设计并指导制备出宽带、薄层的微波吸收材料.

表 1 实测材料的电磁参数(f_i : 2, 2.08, 2.16, ..., 18)

材料	磁导率	介电常数
1 [#]	{3.13 - j2.24, 3.08 - j2.18, ...}	{17.04 - j0.59, 16.85 - j0.61, ...}
2 [#]	{2.90 - j1.56, 2.87 - j1.54, ...}	{26.44 - j7.96, 25.95 - j7.87, ...}
...
13 [#]	{1.58 - j0.56, 1.58 - j0.56, ...}	{34.67 - j22.72, 34.67 - j22.72, ...}
...
21 [#]	{1.93 - j0.56, 1.92 - j0.56, ...}	{8.33 - j0.13, 8.24 - j0.16, ...}

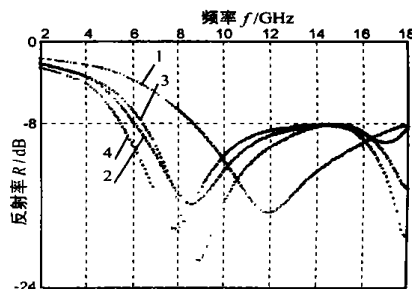


图 2 优化的微波吸收涂层的反射率与频率的关系

表 2 微波吸收涂层的优化条件及优化结果

约束条件			运行参数				优化结果	
n	$d_{\max}(\text{mm})$	d	P_s	P_c	P_m	N_e	最优个体(厚度 \ 材料)	最优表现(F)
1	1.0	0.01	100	0.9	0.05	100	0.95 \ 13 [#]	0.582(图 2.1)
2	1.5	0.01	100	0.9	0.05	100	0.89 \ 2 [#] + 0.56 \ 15 [#]	0.741(图 2.2)
3	1.5	0.01	100	0.7	0.01	100	0.04 \ 3 [#] + 1.01 \ 18 [#] + 0.45 \ 6 [#]	0.716(图 2.3)
4	1.5	0.01	80	0.8	0.005	100	0.87 \ 1 [#] + 0.51 \ 13 [#] + 0.03 \ 20 [#] + 0.08 \ 5 [#]	0.781(图 2.4)

注: P_s 为群体大小; P_c 为交叉概率; P_m 为变异概率; N_e 为终止代数

4 小结

构造了用遗传算法设计宽带薄层微波吸收材料的合理目标函数(1)和(2),真实地体现了微波吸收材料对特定反射损耗值合格带宽最宽这一设计目标;

在解码时通过动态跟踪厚度变量的约束条件来控制涂层材料总厚度,实现了在不弱化吸收频带宽这一主要目标的同时,兼顾到了微波吸收材料厚度薄的设计要求;

根据材料的实际数量和涂层厚度精度的要求,建立了动态扩展对应编码长度的方法,赋予了本设计在结合实际材料和具体要求等方面具有更大的自由度和更广泛的适用性.

本文建立的设计方法可推广应用于“薄、轻、宽、强”和低成本微波吸收材料的优化设计.如以目标函数(1)或(2)为基础,在解码时通过动态跟踪厚度变量的约束条件,可实现 RAM 对重量轻的要求;使用权重系数变化法,还可将 RAM 在成本等方面的要求以罚函数的形式加入目标函数中.

参考文献:

- [1] 袁杰,王荣国,等.多层吸波材料的计算机辅助优化设计[J].哈尔滨工程大学学报,2000,21(2):51-54.
- [2] Pesque J J, Bouche Daniel P, Mittra Raj. Optimization of multilayer antireflection coatings using an optimal control method [J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 1992, 40(9): 1789-1796.
- [3] Johnson J Michael, Rahmat-Samii Yahya. Genetic algorithms in engineering electromagnetic [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1997, 39(4): 7-21.
- [4] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [5] 倪维立,曾霖.遗传算法在电磁散射中介质涂覆部位优化上的应用[J].上海大学学报(自然科学版),1997,3(3):243-248.
- [6] Chambers B, Tennant A. Optimised design of jaumann radar absorbing materials using a genetic algorithm [J]. IEEE Proc.-Radar, Sonar Navig, 1996, 143(1): 23-29.

- [7] Michielssen Eric, Sajer Jean-Michel, Ranjithan S, R Mittra. Design of lightweight, broadband microwave absorbers using genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(6/7): 1024-1031.
- [8] Mosallaei Hossein, Rahmat-Samii Yahya. RCS reduction of canonical targets using genetic algorithm synthesized RAM [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(10): 1594-1606.
- [9] 张秀成,何华辉.遗传算法在涂层吸波材料设计中的应用[J].磁性材料及器件,1999,30(5):11-14.
- [10] Rao Kejin, Gu Yi. Designed of circuit analog absorber using genetic algorithm [J]. Journal of UEST of China, 2000, 29(1): 54-60.

作者简介:



甘治平 男,1969年1月出生于湖北天门,先后获取武汉工业大学无机非金属材料科学与工程专业工学学士和材料工程硕士学位,现为武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室材料科学博士研究生,目前主要从事微波吸收涂层材料的设计和制备工作,已获部级科技进步二等奖1项.



官建国 男,1969年9月出生于湖南,武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室教授、博士生导师,美国科学促进会会员,《Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition)》编委,浙江省纳米材料应用工程技术中心专家委员会委员,目前主要从事具有特殊电、磁功能的有机-无机纳米复合材料的设计、制备以及结构与性能的关系的研究.近年来,先后负责国家自然科学基金重点项目、军工专项和“863计划”项目等10余项国家级科研项目,在“Langmuir”、“Int J Modern Phys”、“J Macromol. Sci.”、“Polymer”、“Angew Makromol Chem”、“J Appl Polym Sci”、“高等学校化学学报”等国内外著名刊物上发表论文60余篇,出版专著1部,已获发明专利1项.