

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.04.028

利用改进简化 PSO 优化设计多层吸波材料^{*}

周昊天^{**}, 吴志勇, 田雨波

(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 现有的粒子群优化算法(PSO)在传统多层平板吸波材料的优化过程中收敛速度慢, 寻优精度低。为了改善设计的收敛速度和寻优精度, 利用改进简化粒子群优化方法(ISPSO)在传输线法计算模型基础上对多层吸波材料进行了优化设计。优化设计结果表明, 在 0.8~6 GHz 范围内, 5 层吸波材料的反射系数在 -22.98 dB 以下, 得到的结果比现有文献好。

关键词: 吸波材料; 粒子群优化; 收敛速度; 优化设计

中图分类号: TN04 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2013)04-0518-04

Optimal Design of Multi-layer Absorbers Based on Improved Simple PSO Algorithm

ZHOU Hao-tian, WU Zhi-yong, TIAN Yu-bo

(School of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: In the optimization of traditional multi-layer absorbing materials, the existing Particle Swarm Optimization(PSO) algorithms have slow convergence and low accuracy. In order to improve the convergence speed and optimization accuracy, based on the multi-layer absorber computational model of the transmission line method, an improved simplified particle swarm optimization method(ISPSO) is applied to optimize the multi-layer absorbing materials. The simulation results show that the reflection coefficient is below -22.98 dB within 0.8~6 GHz. Compared with the original literature, the optimal results are excellent.

Key words: absorber; particle swarm optimization; convergence speed; optimal design

1 引 言

吸波材料是近年来的热门领域。研究开发宽频、轻薄、强吸收和稳定性好的新型微波吸收材料, 能够为通信畅通、信息保密、军事作战以及电磁兼容提供良好的技术途径与解决方法, 这将对生活、生产、国防建设产生重大的现实意义^[1]。使用智能优化算法优化设计吸波材料的研究为数不少, 吴盛辉等人将粒子群优化(PSO)算法应用于分层吸波材料的优化设计^[2], 肖怀宝等运用模拟退火算法研究混

合结构吸波材料^[3], 陈兴等人运用遗传算法设计微波吸波材料的结构^[4], 晁坤等人将微遗传算法应用于多层雷达吸波材料的设计^[5], 还将蚁群算法结合微遗传算法应用于吸波材料的设计^[6]等。总体来讲, 这些优化方法有的收敛速度比较慢, 有的搜索精度比较低, 得到的结果不是很理想。

文献[7]表明, PSO 方法和其他算法相比, 在进行吸波材料的优化设计中表现出方法简单、收敛速度快的优点。文献[8]给出了一种简化的粒子群(SPSO), 与传统的 PSO 相比, 在搜索速度和精度上有比较大的提高。本文对文献[8]中的 SPSO 算法进

^{*} 收稿日期:2012-08-15;修回日期:2012-11-26 Received date:2012-08-15;Revised date:2012-11-26
基金项目: 船舶工业国防科技预研基金项目(10J3.5.2);江苏高校优势学科建设工程资助项目
Foundation Item: The National Defense Pre-Research Foundation of Shipbuilding Industry (10J3.5.2); The Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions
^{**} 通讯作者:freemode@163.com **Corresponding author:** freemode@163.com

行了改进, 并采用该改进的 SPSO 算法对多层平板吸波材料进行了优化设计。

2 多层吸波材料的模型

图 1 给出了一种由 3 层媒质组成的吸波材料, 每一层的磁导率设为 μ_k , 介电常数设为 ϵ_k , 介质的厚度为 d_k , 则每一层的传播常数为

$$\gamma_k = i\omega \sqrt{\mu_k \epsilon_k} = i2\pi f \sqrt{(\mu_k \epsilon_k)/c} \tag{1}$$

其中, f 为频率, c 为光速。材料的归一化特性阻抗为

$$\eta_k = \sqrt{\mu_k / \epsilon_k} \tag{2}$$

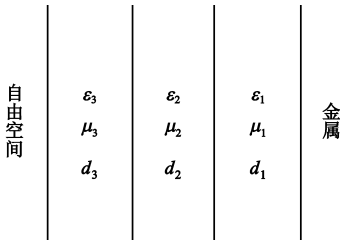


图 1 3 层吸波材料的结构图

Fig.1 The 3 layers of multi-layer absorbers structure

在计算反射系数的时候, 对于第一层的材料, 可以视为是第二层和底层金属输入阻抗为 Z_1 的一种介质, 有

$$Z_1 = \eta_1 \tanh(\gamma_1 d_1), k = 1 \tag{3}$$

第 $k - 1$ 层和第 k 层界面处的输入波阻抗关系为

$$Z_k = \eta_k \frac{Z_{k-1} + \eta_k \tanh(\gamma_k d_k)}{\eta_k + Z_{k-1} \tanh(\gamma_k d_k)}, k < n \tag{4}$$

三层吸波材料的反射系数计算式为

$$R(f) = \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \tag{5}$$

通常反射系数以 dB 来表示为

$$R = 20\lg |R(f)| \text{ (dB)} \tag{6}$$

吸波材料的优化设计可以定义为求解反射系数 R 在固定的频率范围内的最大值。

3 粒子群优化算法

粒子群算法是由社会心理学博士 James Kennedy 和电子工程学博士 Russell Eberhart 于 1995 年提出的^[9], 是继遗传算法之后, 产生的一种全新的智能优化方法。简化粒子群优化算法是由胡旺等人在文献^[8]中提出的, 该算法没有粒子的速度这一概念, 避免了人为确定参数 $v_{\max}$ 而影响粒子的收敛速度和搜索精度, 由此粒子群优化的方程可以简化为

$$x_{id}^{t+1} = \omega x_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}) \tag{7}$$

式中, 第 i 个粒子在第 d 维的位置表示为 x_{id} , 该粒子的历史最优点为 p_{id} , 整个粒子群当前的最优位置为 p_{gd} ; c_1 和 c_2 称为学习因子或者是加速系数, 一般为正常数; r_1 和 r_2 是在 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的伪随机数。

考虑到在标准粒子群优化算法中, 两个随机参数 r_1 和 r_2 是相互独立的, 如果这两项太大, 那么 p_{id} 和 p_{gd} 会过度影响粒子位置的变化, 如果两个参数太小, 那么 p_{id} 和 p_{gd} 都没有被充分地使用。 p_{id} 和 p_{gd} 不应当对于粒子的位置变化具有同等的作用。 本文将这个思想应用于简化粒子群优化算法, 提出了如下改进的简化粒子群算法:

$$x_{id}^{t+1} = r_2 \text{sign}(r_3) x_{id}^t + (1 - r_2) c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + (1 - r_1) c_2 (1 - r_2) (p_{gd} - x_{id}) \tag{8}$$

其中, $\text{sign}(r_3) = \begin{cases} -1, & \text{when } r_3 \leq 0.05 \\ 1, & \text{when } r_3 > 0.05 \end{cases}$, r_1 、 r_2 和 r_3 是在 $[0, 1]$ 区间内均匀分布的伪随机数。

式(8)根据粒子自身的惯性和经验来调整位置, 通过 r_2 这一参数可以调整自身的惯性或者是粒子群的经验对于粒子位置影响的比重。同时, 经验对于位置的影响又可以分为粒子自身的经验和其他粒子的经验, 通过参数 r_1 来调整自身的经验或者是社会的经验对于位置影响的比重。同时, $r_3 \leq 0.05$ 时, $\text{sign}(r_3)$ 为 -1 , 表明粒子可以以很小的概率反方向搜索。简化 PSO 算法优化过程的流程图如图 2 所示。

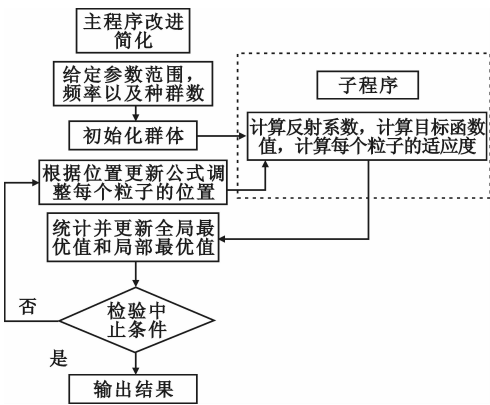


图 2 改进简化粒子群优化算法流程

Fig.2 The flow chart of improved simple particle swarm optimization

4 实验测试结果

为了比较标准粒子群优化算法和本文中给出的

改进简化粒子群优化方法的性能,对多层吸波材料进行了优化设计。优化过程中设定吸波材料的层数为 5 层,频率范围是 0.8 ~ 6.0 GHz,每层的厚度为 0 ~ 2 mm。因篇幅所限,实验中使用的材料参数请参见文献[10]。试验中两种算法各自独立运行 50 次,粒子个数为 20,迭代次数为1 000次。在标准粒子群优化算法中, $\omega = 0.8, c_1 = c_2 = 2$ 。在实验中,吸波材料优化设计的适应度函数定义为求解反射系数 R (dB)的最小值,表达式为 $R = 20\lg\{\max |R(f)|\}$,实际计算过程中每隔0.1 GHz取点进行计算。两种算法对比测试的结果如表 1 所示,其中第一列表示适应度函数的范围,后面二列表示标准 PSO 和改进简化 PSO 运行 50 次落在第一列所示的取值范围内的次数。从表 1 可以看出,改进简化 PSO 算法的成功率比标准 PSO 算法高,验证了这个改进方法的有效性。优化得到吸波材料的参数如表 2 所示。

表 1 实验运行结果比较		
Table 1 The results of comparison among experiments		
适应度函数范围	标准 PSO	改进简化 PSO
(- inf, - 22]	0	1
(- 22, - 20]	2	10
(- 20, - 18]	28	30
(- 18, - 16]	20	9

表 2 多层吸波材料的优化结果		
Table 2 The optimal result of multi-layer absorbers		
层数	材料类型	厚度/mm
1	4	1.862 0
2	2	1.522 2
3	3	0.264 6
4	5	1.324 3
5	15	0.570 7

图 3 给出优化后 5 层吸波材料的性能图形,可以看出在 0.8 ~ 6 GHz 范围之内,反射系数在 - 22.98 dB 以下,吸波效果较好,此时材料的总厚度在5.544 1 mm。为了对比方便,图 3 也给出文献[7]的优化结果,可以看出在设计频率范围内,反射系数在 - 21.2 dB 以下,可见本文的优化结果好于文献[7],尤其在低频段效果更明显。文献[7]优化后材料总厚度是4.932 8 mm,本文得到的材料厚度略有

增加。

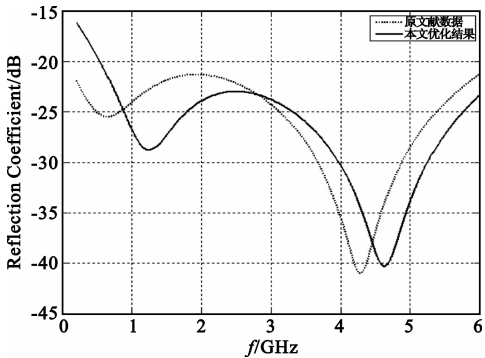


图 3 优化后的吸波材料结果
Fig.3 The optimal result of multi-layer absorbers

5 结 论

本文首先介绍了用传输线法计算多层吸波材料反射系数的方法,并且改进设计了一种简化粒子群优化方法,使用该算法对多层吸波材料进行了优化设计。在 0.8 ~ 6 GHz 的频率范围内对表 1 中的材料进行了优化设计,结果表明该算法得到了比文献[7]中更好的优化结果,验证了该算法在求解这类组合优化问题的可行性和有效性,为优化设计宽频、轻薄、强吸收和稳定性好的吸波材料提供了一种新的方法。此外,在更多层优化的情况下效果不明显,可以通过对算法增加变异来进行改进,还将在后续工作中进行。

参考文献:

[1] Fu Xiaoling. Research into Function of Absorbing Wave of Metallic Magnetic Ultrafine Powders [J]. Journal of Xi'an an Mining Institute, 1999, 19(1): 92 - 96.

[2] 吴盛辉,葛德彪,丁世敬,等. 分层吸波材料的 PSO 优化设计[J]. 电波科学学报, 2007, 22(2): 286 - 289.

WU Sheng-hui, GE De-biao, DING Shi-jing, et al. Optimization of multilayered absorbing materials using PSO [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(2): 286 - 289. (in Chinese)

[3] 肖怀宝,逯贵祯,关亚林. 模拟退火算法研究混合结构吸波材料特性[J]. 中国传媒大学学报, 2009, 16(3): 45 - 47.

XIAO Huai-bao, LU Gui-zhen, GUAN Ya-lin. Study of the Absorbing Materials by Simulating Annealing Method [J]. Journal of Communication University of China, 2009, 16(3): 45 - 47. (in Chinese)

[4] 陈兴,李相银,徐林华. 遗传算法设计多层微波吸收材料的结构[J]. 物理与工程, 2008, 18(2): 24 - 37.

CHEN Xing, LI Xiang-yin, XU Lin-hua. The structure of Multi-layered microwave absorbing materials designed by ge-

- netic algorithms[J]. Physics and Engineering, 2008, 18(2): 24 – 37. (in Chinese)
- [5] 晁坤, 刘运林, 杨儒贵, 等. 微遗传算法优化多层 ZnO 雷达吸波涂层[J]. 功能材料, 2007, 38(1): 63 – 66, 70. CHAO Kun, LIU Yun-lin, YANG Ru-gui, et al. Optimization of multilayered ZnO whisker radar absorbing coatings using microgenetic algorithm [J]. Journal of Functional Materials, 2007, 38(1): 63 – 66, 70. (in Chinese)
- [6] 晁坤, 刘运林, 杨儒贵. 蚁群算法结合微遗传算法优化设计多层雷达吸波涂层[J]. 功能材料, 2008, 39(6): 1052 – 1055. CHAO Kun, LIU Yun-lin, YANG Ru-gui. Combination of ant colony algorithm and microgenetic algorithm for multilayered radar absorbing coatings optimization [J]. Journal of Functional Materials, 2008, 39(6): 1052 – 1055. (in Chinese)
- [7] 刘鹤勇, 李明月, 高攸纲, 等. 基于 PSO 的多层平板吸波材料的优化设计[J]. 电波科学学报, 2009, 24(增刊): 95 – 99. LIU He-yong, LI Ming-yue, GAO You-gang, et al. Optimization of multi-layered microwave absorbing materials based on PSO [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(Suppl.): 95 – 99. (in Chinese)
- [8] 胡旺, 李志蜀. 一种更简化而高效的粒子群优化算法[J]. 软件学报, 2007, 18(4): 861 – 868. HU Wang, LI Zhi-shu. A Simpler and More Effective Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. Journal of Software, 2007, 18(4): 861 – 868. (in Chinese)
- [9] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C]// Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia: IEEE, 1995: 1942 – 1948.
- [10] Michielessen E, Sajer J M, Ranjithan S, et al. Design of lightweight, board-band microwave absorbers using genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1993, 41(6): 1024 – 1030.

作者简介:



周昊天(1987—), 男, 江苏常州人, 2010 年于苏州科技学院获学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为粒子群算法以及吸波材料;

ZHOU Hao-tian was born in Changzhou, Jiangsu Province, in 1987. He received the B.S. degree from Suzhou University of Science and Technology in 2010. He is now a graduate student. His research concerns the PSO algorithm and multi-layer absorbers.

Email: freemode@163.com

吴志勇(1987—), 男, 江苏南通人, 2010 年于南京理工大学紫金学院获学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为粒子群算法及天线阵去耦;

WU Zhi-yong was born in Nantong, Jiangsu Province, in 1987. He received the B.S. degree from Zijin College, Nanjing University of Science and Technology in 2010. He is now a graduate student. His research concerns the PSO algorithm and mutual coupling reduction of antenna array.

田雨波(1971—), 男(满族), 辽宁铁岭人, 教授、硕士生导师, 主要研究方向为智能计算技术应用于电磁学问题。

TIAN Yu-bo was born in Tieling, Liaoning Province, in 1971. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns intelligent computing technology applied in electromagnetic problems.