# 基于粒子群算法的多层介质透波性能优化

王传兵1\*,张利嵩1,李 翔1,岳 松1,吴秉横2

(1. 北京航天长征飞行器研究所 北京 丰台区 100076; 2. 上海海事大学信息工程学院 上海 浦东新区 201306)

【摘要】雷达罩多采用单层结构设计,但是其工作带宽较窄,难以适应宽频段的透波要求。对于大入射角情况下的透波要求,单层结构设计更是难以满足要求。随着雷达导引头的工作频率逐渐加宽,以及雷达导引头的宽扫描角要求,单层结构设计的雷达罩越来越难以满足要求。为了适应宽频带的透波要求,该文从介质平板透波性能分析出发,推导出多层介质平板的透波性能,并利用粒子群算法,设计出相应的优化适应度函数和目标函数。对多层介质平板的厚度在多频点、多入射角条件下进行优化设计,得出了可以满足宽频带、大入射角透波要求的多层介质平板结构。

关键词介质平板;多层;粒子群算法;雷达罩;透波优化

中图分类号 O441.4 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2019.04.004

# Wave Transmission Performance Optimization of Multi-Layer Dielectric Base on PSOA

WANG Chuan-bing<sup>1\*</sup>, ZHANG Li-song<sup>1</sup>, LI Xiang<sup>1</sup>, YUE Song<sup>1</sup>, and WU Bing-heng<sup>2</sup>

(1. Beijing Institue of Space Long March Vehicle Fengtai Beijing 100076;2. College of Information Engineering, Shanghai Maritime University Pudong Shanghai 201306)

**Abstract** A radome usually adopts single-layered structure design. However, its operating bandwidth is usually rather narrow, which is difficult to meet the requirements of broadband transmission. Moreover, for the case of larger incident angle of electromagnetic waves, the single-layered structure is difficult to meet the requirements. With the requirements of more widening of the operating bandwidth and more widening scanning range of radar seekers, the design of single-layered structure is rather difficult to meet the technical requirements. In order to meet the requirement of broadband transmission, this paper deduces the transmission performance of multi-layered dielectric plates based on the wave transmission analysis of dielectric plates. By using the particle swarm optimization algorithm (PSOA), the corresponding fitness function or target function is designed. The thicknesses of multi-layered dielectric plates are optimized under the condition of multi-frequency points and multi-incident angles. The results achieved can meet the requirements of broad band and large incident angle transmission.

Key words dielectric plates; multi-layer; particle swarm optimization algorithm; radome; wave transmission

雷达罩<sup>[1]</sup>是末制导飞行器<sup>[2]</sup>重要的组成部分,其 主要功能是保护安装在其内的雷达导引头的正常、 高效率工作,雷达罩的透波性能直接关系到雷达导 引头的作用距离和瞄准精度等指标。因此,具有良 好透波性能是雷达罩设计中的重要环节。

雷达罩透波性能设计通常是基于无限大介质平 板透波理论,对于工作带宽较窄或者特定频段的雷 达导引头来说,通常采用单层介质匹配设计,就可 以在相应的带宽内达到较好的透波性能。随着雷达 导引头的频段不断拓宽,出现了宽频带甚至超宽频 带雷达导引头,这就要求雷达罩需要适应更宽频带 的透波。对于更宽频带的透波要求,采用单层介质 平板透波设计方法难以满足宽带雷达透波的要求, 为此出现了多层结构雷达罩设计<sup>[3]</sup>。采用多层结构 设计,对于展宽雷达罩的工作带宽有较明显的效果, 这是由于采用多层罩设计使得电磁波在每一介质层 之间的反射达到了最小。

对于单层介质结构设计的雷达罩,只要在较窄 的工作带宽范围确定介质的厚度;而对于多层介质 设计,需要考虑每一层介质的介电性能变化以及结 构厚度是否匹配,还需要考虑每一介质层之间的反 射与透波等,这也是多层结构设计上的难题。对于

收稿日期: 2019-01-09; 修回日期: 2019-03-25

作者简介: 王传兵(1979-), 男, 高级工程师, 主要从事雷达罩设计与电性能测试方面的研究. E-mail: 2821675832@qq.com

多层介质平板透波设计来说,影响透波性能的因素 主要有材料的介电常数和损耗、介质平板的厚度、 电磁波入射角角度范围以及电磁波的频率等。因此, 多层介质匹配设计属于多因素多目标优化问题,解 决此类问题最常用的算法是遗传算法和粒子群算法 等。二者的共同点是都属于全局优化算法,适合于 求解多因素多目标的优化问题;不同点主要是粒子 群算法中的粒子具有记忆功能,不需要遗传算法中 编码、交叉和变异等操作,只是通过内部速度进行 更新,因而原理上更简单、更容易实现。

本文从单层介质平板的透波性能出发,推导出 多层介质平板透波性能变化,并利用基于粒子群算 法<sup>[4]</sup>,对多层平板透波性能进行优化研究,为多层 雷达罩的电性能设计奠定基础。

### 四端口网络矩阵分析介质平板透波 性能

#### 1.1 单层介质平板透波理论分析

对于单层介质平板<sup>[3]</sup>来说,电磁波入射到介质 平板表面时,将产生反射与透射。当介质平板表面 产生的反射波与介质平板另一侧表面所产生的反射 波幅度相同、相位相反时,电磁波的传输系数最大, 而此时介质平板的最佳厚度*d*可以表示为<sup>[3]</sup>:

$$d = \frac{n\lambda_0}{2\sqrt{\varepsilon - \sin^2\theta}} \tag{1}$$

式中, *d*为单层介质平板厚度; *n*为正整数, 称为半 波壁的阶数; λ<sub>0</sub>为电磁波长; ε为介质平板材料介 电常数; θ为电磁波的入射角。

从式(1)中可以得出,当入射角越大时,介质平 板厚度也越大,说明采用半波壁厚度设计的介质半 波难以适应多个入射角,即只能针对某一个入射角 时合适的。当电磁波的入射角变化范围较大,则需 要进行适应性的调整,以满足不同入射角下的均有 较好的透波性能。

#### 1.2 多层介质平板透波理论分析

对于如图1所示的多层介质平板来说,可以将其 看成为多个单层介质平板依次叠加。

为了分析电磁波经过多层介质后的透波性能, 可将每一层介质看成一个四端口<sup>[5]</sup>的网络,当N个不 同的介质板依次叠加在一起时,就等效为N个四端口 网络的级联,如图2所示。

对于每一层介质平板来说,认为其介质特性是 各向同性的,因此电磁波在每一层介质中的传播方 式是线性的,因而总级联网络的转移矩阵可以表示 为各分网络转移矩阵的乘积。

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^{n} \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix}$$
(2)

式中, n为介质平板的总层数。

$$\begin{cases}
A_{i} = D_{i} = \operatorname{ch}(j\gamma_{i} d_{i}) \\
B_{i} = Z_{ci} \operatorname{sh}(j\gamma_{i} d_{i}) \\
C_{i} = \operatorname{sh}(j\gamma_{i} d_{i})/Z_{ci} \\
\gamma_{i} = 2\pi/\lambda_{0}\sqrt{\varepsilon_{i} - \sin^{2}(\theta)}
\end{cases}$$
(3)

式中, $d_i$ 为第i层的厚度; $\varepsilon_i$ 为第i层的相对介电常数;  $\theta$ 为入射角; $Z_{ci}$ 为第i层的归一化等效阻抗。

$$Z_{ci} = \begin{cases} Z_{\prime\prime\prime} = \sqrt{\varepsilon_i - \sin^2 \theta} / \varepsilon_i \\ Z_{\perp} = 1 / \sqrt{\varepsilon_i - \sin^2 \theta} \end{cases}$$
(4)

从图1中的多层介质平板结构来看,平板两边都 是自由空间,因此当电磁波穿过多层平板,电磁波 的反射系数*R*<sub>N</sub>和透过系数*T*<sub>N</sub>可以表示为:

$$R_{N} = \frac{(A+B') - (C'+D)}{A+B'+C'+D} = |R_{N}|e^{-j\phi R_{N}}$$
(5)

$$T_{N} = \frac{2}{A + B' + C' + D} = |T_{N}| e^{-j\phi T_{N}}$$
(6)



图2 多层介质平板等效传输网络图

## 2 基于粒子群优化多层介质平板透波 优化

粒子群算法和遗传算法类似,都是一种基于种 群优化的方法,由Kennedy和Eberhart在1995年提出, 通过粒子之间的竞争与合作产生优化搜索。与遗传 算法不同的是,没有遗传算法所用的交叉以及变异, 而是粒子在解空间追随最优的粒子进行搜索,整个 搜索过程更新跟随当前最优解,在大多数情况下, 所有的粒子可以更快收敛于最优解。因此,本文采 用粒子群算法对多层介质平板透波性能进行优化。

#### 2.1 算法原理

假定在一个D维目标搜索空间中,存在N个粒子,对于某一个粒子来说,其位置可以表示为 x<sub>i</sub>(x<sub>i,1</sub>,x<sub>i,2</sub>,…,x<sub>i,D</sub>),同时粒子具有一定的速度在搜索 空间中飞行,其速度可以表示为v<sub>i</sub>(v<sub>i,1</sub>,v<sub>i,2</sub>,…,v<sub>i,D</sub>)。 在优化开始时初始化一组随机解(x<sub>i,1</sub>,x<sub>i,2</sub>,…,x<sub>i,N</sub>), 然后粒子再根据自己在解空间中的飞行经验以及粒 子群体的飞行状况动态地更新自己的速度与位置, 并根据相关函数和方法计算它的适应度值用以评价 解的好坏,且选出pbest(个体极值)和gbest(全局极值) 并记录它们的位置,再根据速度的更新式(7)和位置 的更新式(8)更新下一代粒子的速度与位置,通过迭 代寻找最优解。具体表述如下:

$$v_{i,d} = v_{(i-1),d} + c_1 * \operatorname{rand}() * (P_{i,d} - x_{i,d}) + c_2 * \operatorname{rand}() * (P_{g,d} - x_{i,d})$$
(7)

$$x_{i,d} = x_{(i-1),d} + v_{i,d}$$
(8)

式中, $P_{i,d}$ 为粒子群中个体极值(pbest)的第D维分量;  $P_{g,d}$ 为粒子群全局极值(gbest)的第D维分量; rand() 是介于0~1之间的随机值;  $c_1 和 c_2$ 是加速系数,为 正值, $c_1$ 表达的是粒子对自身记忆的依赖程度, $c_2$ 表 达的是粒子群体中的其他粒子对粒子*i*本身的影响。 它们使每个飞行粒子分别向pbest和gbest的位置靠拢。



图3 粒子群优化算法迭代框图

式(7)中第一部分代表粒子的本身记忆; 第二部 分代表粒子的"认知"部分,是粒子对本身的思考; 第三部分为"社会"部分,代表群体中粒子之间的 协作及粒子对群体共有信息认可的程度。粒子群算 法的工作方式主要基于以下的心理学假设:在寻求 共同认知的过程中,个体要保留自己的最佳信息, 同时也要考虑同伴的信息,当粒子感到同伴的信息 优于自己的信念时,也会动态地更新自己的最佳信 息。基于粒子群算法的流程如图3所示。

#### 2.2 适应度函数设计

适应度函数是粒子群遗传算法优化过程中判断 粒子及粒子位置优劣的依据,适应度函数值的大小 代表了粒子及粒子位置的优劣程度。在迭代过程中, 好的粒子及粒子位置被选中,差的粒子及粒子位置 被摒弃,以便在下一次的迭代过程中能够获得更好 的结果。

对于介质平板透波模型来说,将电厚度设为优 化变量,在电厚度的范围内分为若干个粒子,以便 对它们进行优化。从介质平板透波公式(1)可以看出, 电磁波的频率和入射角的不同都会影响介质平板最 佳厚度d,进而使得电磁波透过率T不同,因此可以 把各个频点和入射角的透过率中的最小值作为优化 目标,通过优化不同的电厚度,提高电磁波的最低 透过率,那么在整个频带范围内的频点对应的透过 滤也得到了提高;也可以把各个频点各个入射角的 透过率T的均值作为优化目标。

以最小值为优化目标的适应度函数:

fitness $(d_1, d_2, \dots, d_N) = \min |T(f, \theta)|$  (9) 以均值为优化目标的适应度函数:

 $fitness(d_1, d_2, \cdots, d_N) = mean |T(f, \theta)|$ (10)

式中,f为电磁波的频率; $\theta$ 是电磁波的入射角;T为电磁波透过率函数; $d_n$ 为要优化的参数变量。

对于多层介质平板透波来说,由于追求最大的 电磁波传输效率,因此目标函数可以选择为:

 $F(d_1, d_2, \cdots, d_N) = \max \left| \text{fitness}(d_1, d_2, \cdots, d_N) \right| \quad (11)$ 

将介质平板的厚度*d*<sub>n</sub>为决策变量,以降低电磁 波的反射率*T*为优化目标的最优化模型:

$$\begin{cases} \max T = F(d_1, d_2, \cdots, d_N) \\ D_{\min} \leq d_n \leq D_{\max} \end{cases}$$
(12)

式中, D<sub>min</sub>和D<sub>max</sub>分别为d<sub>n</sub>的最小和最大取值范围。

### 3 优化算例

#### 3.1 夹层结构

常见的夹层结构<sup>[6]</sup>主要有A夹层、B夹层和C夹 层。图4为三层结构介质平板组合示意图,每一层的 介电性能和厚度变化范围如表1所示。利用粒子群算 法,对夹层介质平板的电厚度进行优化设计,以达 到透波性能的最优。



图4 A夹层介质平板结构示意图

表1 夹层介质平板介电性能

材料	介电常数	介电损耗	厚度/mm
第一层	1.5~2.0	0.005	λ±2
第二层	3.1±0.1	0.005	$2\lambda \sim 4\lambda$
第三层	1.5~2.0	0.005	$\lambda \pm 2$

#### 3.2 优化结果

根据表1中的夹层结构和介电性能,采用粒子群 算法对每一层电厚度进行优化。由于材料的介电性 能和厚度范围均可在一定范围变化,因此优化算法 中维数D为5,种群数设为50,最大迭代次数设为 500,粒子加速系数均为0.5。目标函数为在0°~60° 的电磁波入射角范围内,在主动<sup>[7]</sup>f<sub>00</sub>~f<sub>00</sub>+0.3 GHz 频带范围功率损耗不大于3 dB,在被动<sup>[7]</sup>f<sub>01</sub>~f<sub>01</sub>+ 10 GHz频带范围内,功率损耗不大于5 dB。经过优 化后,每一个介质平板的厚度如表2所示。

表2 优化结果

夹层结构	第一层	第二层	第三层
优化厚度/mm	5.6	19.08	5.6
介电常数	1.7	3.15	1.7

表2中多层介质平板的透波性能如图5和图6 所示。

从图5和图6优化结果可以看出,采用粒子群算 法,对夹层平板厚度和介电常数进行优化,在主动 和被动频段范围内均满足相应的透波要求。





### 4 平板透波测试

为验证上述优化结果,本文制备了相应的平板 试验件,试验件尺寸为600 mm×300 mm,并搭建夹 层平板透波性能测试系统,平板透波测试原理<sup>[8]</sup> 如图7所示。

将发射天线<sup>[9]</sup>、接收天线<sup>[10]</sup>以及试验件放置同

一导轨上,发射天线发出的电磁波穿过试验件后被 接收天线接收,通过比较发射天线和接收天线的增 益<sup>[11]</sup>,即为平板的功率传输性能。



图7 平板透波测试原理图

平板透波测试系统<sup>[12]</sup>中的发射天线有透镜天线 和喇叭天线,接收天线有波导缝隙阵列天线和喇叭 天线,分别用于主动频段和被动频段的发射和接收。 试验件被固定在特制的工装上,试验件可以绕中心 轴旋转,以模拟电磁波的不同入射角。测试系统如 图8所示。



图8 多层平板测试系统

夹层的透波性能测试结果如图9和图10所示。

从图9和图10中的测试结果来看,测试结果与理论计算结果趋势一致,且数值相近,证明了理论计算的正确性。从理论计算和测试结果对比来看,理论计算出的插入损耗小,实测出的结果较大,这主要是理论计算时未考虑介质平板的损耗所产生的影响。但理论计算与实测结果总体吻合情况较好,从而验证了理论推导与优化设计的正确性。





### 5 结束语

本文基于粒子群算法,对于夹层结构平板在主 动频段和被动频段的透波性能进行了优化设计和分 析,并制备试验件进行了测试,可以得到以下几点 结论:

 对于单层介质结构难以满足宽频带的要求, 采用夹层透波结构设计,并采用优化算法,获得了 较为合理的结构组合; 3)本文采用的粒子群算法从随机解出发,通过 迭代寻找最优解,其特点是容易实现、收敛性快等, 适合多变量同时变化下的目标优化问题;

4) 对于有宽频带透波要求的雷达罩来说,采用 粒子群优化算法,可以快速找出多层匹配厚度设计, 为进一步与导引头天线的联合仿真分析提供了支撑。

#### 参考文献

- 彭望泽. 防空导弹天线罩[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
   PENG Wang-ze. Radome of air defense missile[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1993.
- [2] 马鹏飞. 弹头设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1999.
   MA Peng-fei. Warhead design[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1999.
- [3] 杜耀惟. 雷达罩电信设计方法[M]. 北京: 国防工业出版 社, 1993.

DU Yao-wei. The design method of electrical performance of radome[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993.

[4] 潘峰. 粒子群优化算法与多目标优化[M]. 北京:北京理 工大学出版社, 2013.

PAN Feng. Particle swarm optimizer and multi-object optimization[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013.

[5] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出 版社, 1994.

LIAO Cheng-en. Basis of microwave technique[M]. Xi'an: XiDian University Press, 1994.

- [6] 闫法强. 夹层结构天线罩材料的设计、制备及其宽频透波 性能[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
  YAN Fa-qiang. Design, fabrication and broadband characteristics of ceramic radome materials with sandwich structure[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [7] 袁乃昌, 莫锦军. 多频段天线罩功率传输系数的优化设计[J]. 电波科学学报, 1999, 14(4): 378-383.
  YUAN Nai-chang, MO Jin-jun. On optimizing the power transmission coefficient of multi-frequency radomes[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1999, 14(4): 378-383.
- [8] 贾蕾,李高生,曹群生. 某型机载宽频带天线罩电气性能 的测试研究[J]. 微波学报, 2012, 28(4): 48-51, 56. JIA Lei, LI Gao-sheng, CAO Qun-sheng. Test research on an airborne broadband radome electric property[J]. Journal of Microwaves, 2012, 28(4): 48-51, 56.
- [9] 谢处方. 电波与天线[M]. 北京: 人民教育出版社, 1966. XIE Chu-fang. Electric wave and antenna[M]. Beijing: People's Education Press, 1966.
- [10] 薛正辉. 阵列天线分析与综合[M]. 北京: 北京航空航天 大学出版社, 2011.
  XUE Zheng-hui. Angysis and synthesis of Antenna array[M]. Beijing: BeiHang University Press, 2011.
- [11] 陈顺生. 天线原理[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989. CHEN Shun-sheng. Autenna principles[M]. Nanjing: Southeast University Press, 1989.
- [12] 毛武军,李朝伟,崔炳喆. 天线罩测试系统设计[J]. 航空兵器, 2010(1): 40-43.
  MAO Wu-jun, LI Chao-wei, CUI Bing-zhe. Design of antenna radome test system[J]. Aero Weaponry, 2010(1): 40-43.

编辑税红