

多目标规划方法在隐身涂层设计中的应用

张 跃

(北京航空航天大学材料学院 北京 100083)

张明雪

(航天材料及工艺研究所 北京 100076)

文 摘 根据多层吸波涂层材料电磁波反射系数的传输线理论,通过建立涂层材料的介电及磁性参数数据库,采用多目标规划法,进行各层材料的选择及层厚的优化设计,为多层隐身涂层材料的研制提供强有力的设计工具。该研究开发的软件具有吸波材料参数数据库、全面搜索优化、部分选定优化、特定结构反射系数计算等功能。最大可分5个波段设定不同的设计指标,最大设计层数为6层。

关键词 隐身涂层,设计,多目标规划法,软件

Application of Multi-Objective Optimization Approach in the Design of Radar Absorbent Coatings

Zhang Yao

(Beijing University of Aeronautics & Astronautics Beijing 100083)

Zhang Mingxue

(Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology Beijing 100076)

Abstract Based on the transmission line theory of electromagnetic wave reflectance for radar absorbent multi-coatings, optimizing design was carried out for material species and thickness of each layer through a database of dielectric and magnetic parameters of candidate materials and approach of multi-objective optimization. A powerful tool was developed for designing radar absorbent multi-coatings. The developed software possesses the performance including database management, optimization with all search, optimization with partial selection and reflectance calculation for certain multi-coatings. It allows setting maximum five bands with different goals and designing maximum six layers.

Key words Radar absorbent coating, Design, Multi-objective optimization, Software

1 引言

吸波材料无论是在军事领域的隐身技术,还是在民用的电磁波防护领域都起着越来越重要的作用。多层吸波涂层具有许多优点,是吸波材料的主要形式之一。多层材料的吸波特性不仅与各层材料的介电和磁性参数有关,还与各层厚度以及各层的排列顺序有关,因此通过实验的方法是很难获得最

佳的隐身涂层,而有必要借助计算机进行辅助设计,指导该涂层的研究与开发,这样可以大大提高研究的效率和方向性,减少大量的实验摸索。

对多层吸波材料的微波反射系数的理论计算及涂层结构的优化设计已进行了大量的研究。材料的微波反射系数与各层材料的复介电常数及复磁导率、层厚、层的排列等因素有关的传输线理论已被广

收稿日期:2001-08-26

张跃,1958年出生,教授,主要从事陶瓷制备过程学、计算材料学、胶体学等方面的研究工作
宇航材料工艺 2001年 第6期

— 63 —

泛用于吸波计算^[1]。优化设计主要是在给定层数、最大厚度、频宽和最大反射率的条件下,对各层的层厚及其电磁参数进行优化设计^[2,3]。

本研究的目的是采用数据库和多目标规划法对已知介电和磁参数的涂层材料的排列组合及其各层厚度进行多目标优化计算,设计出多波段满足要求的多层吸波材料。

2 设计理论与方法

根据传输线理论,由 n 层材料构成的涂层,其电磁波反射系数为:

$$R = 20\lg \left| \frac{Z_n - 1}{Z_n + 1} \right|$$

其中 Z_n 为涂层第 n 层与空气界面的输入阻抗,它是该层厚度 d_n 、波矢 k_n 、特性阻抗 Z_n 以及下一层的输入阻抗 Z_{n-1} 的函数:

$$Z_n = \frac{Z_{n-1} + Z_n \operatorname{th}(k_n d_n)}{1 + Z_{n-1} \operatorname{th}(k_n d_n)}$$

$$k_n = j \sqrt{\mu_n} / c$$

$$Z_n = \sqrt{\frac{\mu_n - j\mu_n}{\mu_n - j\mu_n}}$$

式中, f 为雷达波角频率, c 为光速。第一层的输入阻抗 $Z_1 = Z_0 \operatorname{th}(k_1 d_1)$ 。由以上公式可知,当涂层的构成一定,各层材料的介电常数 (ϵ 、 μ)、磁导率 (μ 、 μ) 已知时,该涂层在各频率 (f_1, f_2, \dots, f_m) 下的反射率只是各层厚 (d_1, d_2, \dots, d_n) 的函数 $R_m(d_n)$ 。以 $R_m(d_n)$ 为目标函数,可以对变量各层厚 d_n 进行优化。由于 R_m 是关于各频率的函数向量,而且所设定的各目标值往往是不同的,所以这是一个多目标的优化问题。本研究采用 Gembicki 提出的 Goal Attainment 法^[4]。

$$\min_d \{ \sum_{i=1}^m R_m(d_n) - w_i g_i \}$$

其中, w 为松弛因子标量, w 为权重系数向量, g 为用户设计的目标值向量。

本研究采用 VB 和 MATLAB 编程语言相结合的

方法,用 VB 建立界面和数据库,优化计算则利用工程计算功能极强的 MATLAB,建立了多功能的多层隐身涂层优化设计软件。本设计平台是在材料数据库中自动选取、优化计算多层膜的微波反射率,设计满足要求的涂层结构,设计项目包括各层材质选取和层厚优化。主要优化设计流程如图 1 所示。

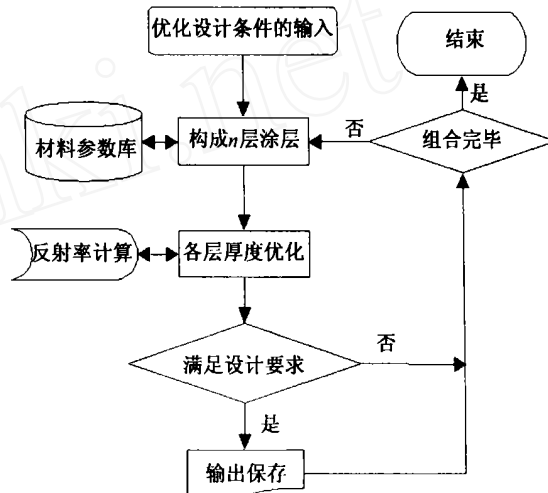


图 1 优化设计流程图

Fig. 1 Flow chart of the optimizing design

3 结果

本设计软件包括 4 个组成部分:材料数据库、全面搜索设计、选定设计、反射率计算。主界面(见图 2)也就是全面搜索优化界面,在该界面提供输入设计条件(包括所要设计的涂层的最大厚度和最大层数)、设计指标(各波段的起始和终止频率及其反射系数指标)和用于保存计算结果的文件名的窗口。

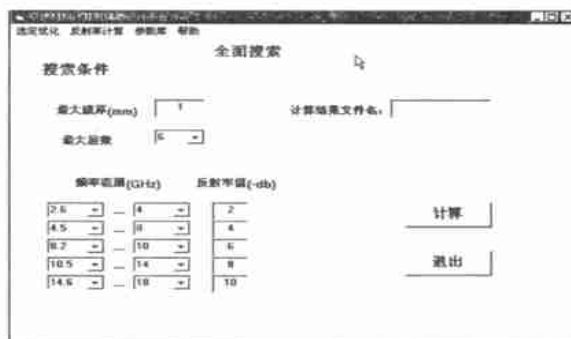


图 2 优化设计软件主界面

Fig. 2 Main interface

最大层数可在 1~6 中选择;频率范围为 2.6 GHz~18 GHz,频道之间可以是连续的,也可以是不连续的。当波段的终止频率低于 18 GHz 时,会自动出现下一个波段的窗口,直至最大 5 个波段为止。输入完各项条件后,单击界面中的【计算】按钮就开始搜索及优化。首先,在已有参数数据库中组合成所要层数的涂层材料组合,用优化模块对各层厚度进行优化,如果优化后的反射系数达到了各频率下的设计指标,则将该涂层结构及其性能输出纪录。输出文件为文本文件形式,可用 MS Excel 进行后处理。

图 3 是材料参数数据库界面,在该界面可以进行涂层材料的电磁参数的管理,包括数据的输入、修改、删除、查找、打印等功能。数据内容有材料名称和各频率时的复介电常数的实部和虚部、复磁导率的实部和虚部。上部左侧窗口内是材料名称,点击材料名称,在右侧窗口内显示该材料的参数,第一列为频率,第二、三列分别为介电常数的实部和虚部,第四、五列分别为磁导率的实部和虚部。

材料名称	F (GHz)	实部 (ε')	虚部 (ε'')	实部 (μ')	虚部 (μ'')
材料C3706-1#	2.6	61.32	11.52	4.31	2.39
材料C3706-3#	3	61.26	14.52	3.93	2.31
材料C3706-4#	3.5	58.81	15.89	3.66	2.26
材料C3812-3#	4	51.5	13.54	3.6	2.58
材料C3812-4#	4.5	51.06	14.23	3.22	2.53
材料C3812-5#	5	50.1	14.54	2.94	2.51
材料C3812-7#	5.5	49.2	14.91	2.71	2.47
材料C3812-8#	6	41.34	14.06	2.73	2.41
材料C3812-9#	6.5	40.65	14.39	2.52	2.34
材料C3906#	7	39.87	14.1	2.32	2.32
材料C0032#	7.5	39.24	14.36	2.17	2.25
材料C0211#	8	38.38	14.39	2.05	2.2
材料C0211#	8.2	38.96	14.72	2.09	2.29
材料C0211#	8.5	39.74	14.62	1.93	2.3
材料C0211#	9	39.84	14.97	1.79	2.17
材料C0211#	9.5	40.47	14.11	1.7	2.17

图 3 材料电磁参数界面

Fig. 3 Electromagnetic parameters interface

图 4 为选择优化界面。在该界面可以预先指定某一层或几层的材料名和/或层厚,优化只对未指定层厚的层进行。在图 5 的界面,进行已知结构的反射系数计算,构成涂层的材料名称可以在材料参数数据库中选取,所需计算的频率范围也可以在 2.6 GHz~18 GHz 内自由选择。输出文件也是文本文件形式,可用 MS Excel 进行后处理。

宇航材料工艺 2001 年 第 6 期

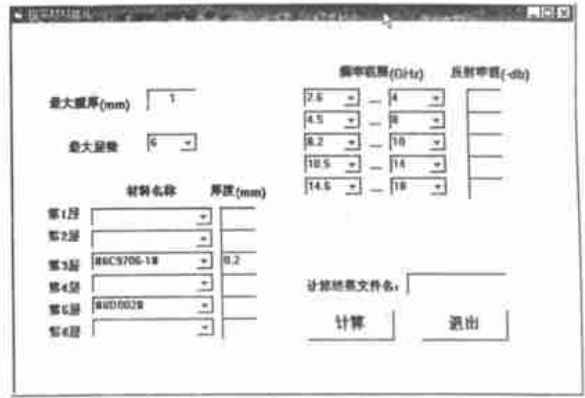


图 4 选择优化设计界面

Fig. 4 Choice optimization interface



图 5 反射率计算界面

Fig. 5 Reflectivity calculation interface

计算结果表明,多目标规划法在该优化设计中是极为有效的。特别是借助 MATLAB 及其优化工具,极大地提高了该软件的计算可靠性。结果表明 MATLAB 的多目标规划函数对于多层吸波材料的多频道优化设计是极为有效的工具。但是, MATLAB 的计算速度较低。例如,对于在 17 种材料的数据库中进行 3 层涂层的全面组合优化,涂层组合达 4 080 种,再对这些组合的各层厚度进行优化,这样的全面优化将需要几小时的计算。

计算结果以文本形式保存,其内容包括设计条件和计算结果两部分。设计条件包括设计界面中指定的最大层数、最大层厚以及各波段的起止频率和反射率指标。计算结果包括满足设计要求的涂层各层的材料名称、层厚、该涂层在各频率下的反射率以及该涂层的优化系数。优化系数是表征达到设计目标的程度,大于零时为未达标,负值的绝对值越大表

明达标的程度越高。因此,根据优化系数可以对满足设计要求的涂层设计按性能进行排序。利用 Excel 等数据处理软件可以对设计结果进行后期处理,例如可以排序、作图等。图 6 是涂层优化设计结果实例,该涂层显示了各满足设计要求的涂层反射率与频率的关系以及设计要求。

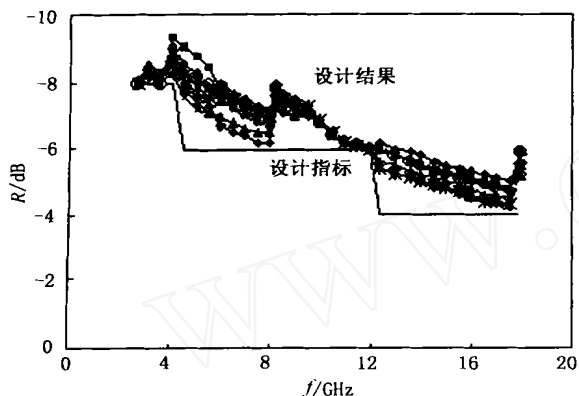


图 6 涂层优化设计结果实例
Fig. 6 Examples of design results

4 结论

多目标规划法是多层隐身涂层材料结构优化设计极为有效、便捷的方法。通过建立涂层材料的介电及磁性参数数据库,利用计算机在该数据库的基础上,对涂层构成进行组合,然后对所构成的结构进行各层厚度优化设计,从而多层隐身涂层的选材、排列、层厚设计可以完全由计算机来实现。该计算机软件为多层隐身涂层材料的研制提供强有力的设计工具。

参考文献

- 1 王相元,钱鉴,陆怀先等. 多层微波吸收材料的等效介质原理. 航天隐身技术. 航空航天工业部,1991:170
- 2 王相元,钱鉴,陆怀先等. 微波吸收材料的第二代计算机辅助设计概论. 航天隐身技术. 航空航天工业部,1991:176
- 3 廖绍彬,尹光俊. 吸波体的优化设计. 航天隐身技术. 航空航天工业部,1991:179
- 4 Gembicki F W. Vector optimization for control with performance and parameter sensitivity indices. Ph. D. Dissertation, Case Western Reserve Univ., Cleveland, OH, 1974

(上接第 50 页)

(2) 以 DA 改性剂改性芳基酚醛树脂,合成了新型高残碳酚醛树脂,其中以 DA1 改性剂的改性效果最佳,残碳率达 69.87%。DA 改性剂的最佳用量约为 0.2% (质量分数)。

参考文献

- 1 黄家康,岳红军,董永祺. 复合材料成型技术. 北京:化学工业出版社,1999:339~531
- 2 张衍,荆建芬,王井岗等. 高碳酚醛树脂的结构改性. 玻璃钢/复合材料,2001;(1):10
- 3 北京大学电子学教研组. 顺磁共振译文集,北京:科

学出版社,1975:67~68,74~89,139~146

- 4 张建中,孙存普. 磁共振教程. 合肥:中国科学技术大学出版社,1996:112~127
- 5 [日]石津和彦编,王者福,穆运转译. 实用电子自旋共振简明教程. 天津:南开大学出版社,1992:2~16,81,128~131
- 6 冯蕴深. 磁共振原理. 北京:高等教育出版社,1992:159~161,174~176
- 7 Landel R F. Chemistry in Space Research, American Elsevier Publishing, New York, 1972: 279
- 8 Lasic Z R.J. Thermophysics, 1992;6(1):55