

文章编号:1674-8190(2013)04-422-04

# 前缘吸波结构承载性能优化分析研究

袁伟,程普强

(中国航空工业集团公司 第一飞机设计研究院,西安 710089)

**摘要:**前缘吸波结构具有承载和吸波的双重功能,是隐身结构设计的重要研究方向之一。针对典型前缘吸波结构,利用零阶和一阶参数优化算法对其承载性能进行优化计算,获得透波蒙皮与吸波填充物的优化布置方案;提出提高前缘吸波结构承载效率的优化分析方法和途径,为隐身结构设计提供了重要参考。

**关键词:**吸波结构;承载性能;优化

中图分类号:V218

文献标识码:A

## Load Performance Analysis and Optimization of Leading Edge Absorbing Structure

Yuan Wei, Cheng Puqiang

(The First Aircraft Institute, Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China)

**Abstract:** Leading edge absorbing structure, which possesses both load bearing and wave absorption performances, is one of the important research topics on stealth structural design. Zero-order and first-order optimization algorithms are implemented for optimizing the load performance of a typical leading edge absorbing structure. The optimal configuration on transparent skin and absorbing filling is obtained. And the optimization analysis method and technical approach are presented for improving the load efficiency of leading edge absorbing structure. This optimization analysis scheme is valuable for stealth structural design.

**Key words:** absorbing structure; load performance; optimization

## 0 引言

机翼前缘是雷达波的强散射源之一,前缘吸波结构能够有效吸收雷达波,提高隐身性能;其多样化的结构布置方式也为前缘吸波结构能够兼顾高效承载提供了技术实施途径。目前针对前缘吸波结构的研究主要侧重于电磁参数获取<sup>[1]</sup>、电磁性能分析与优化<sup>[2-5]</sup>等方面,而对前缘吸波结构的力学行为、承载特性及其参数优化<sup>[6]</sup>方面的研究相对较少,尚未从吸波能力、承载能力及结构质量等多方面综合考察与分析此类吸波结构。因此,开展典型前缘吸波结构的承载性能分析与参数优化方法研

究是十分必要的,能够为吸波结构的多学科综合设计提供有力技术支持。

本文针对典型前缘吸波结构,根据其结构布置特点建立对应模型,主要包含透波蒙皮、吸波填充物和金属反射板结构。具体以刘红星、王海凤等<sup>[2-3]</sup>所研究的“V字型吸波填充物—金属反射板界面”前缘吸波结构形式为研究对象,如图1所示。

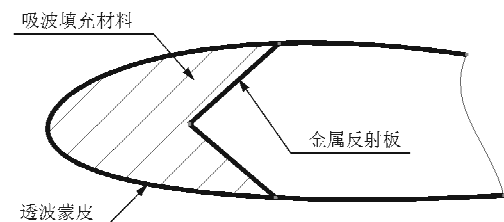


图1 典型前缘吸波结构示意图

Fig. 1 Typical leading edge absorbing structure

收稿日期:2013-05-10; 修回日期:2013-07-01

通信作者:袁伟,yuanweiw@126.com

针对上述典型前缘吸波结构形式,对鸟撞等冲击载荷的设计要求在结构设计中另行考虑,本文仅对气动载荷作用下的结构承载特性进行研究。在气动载荷作用下,前缘吸波结构的刚度要求比强度要求更难满足,因此,本文以结构刚度为约束条件,以透波蒙皮厚度和吸波材料填充量作为主要设计对象,优化结构参数以使质量最轻。通过上述研究,获得前缘吸波结构的优化设计方案,为吸波结构的承载性能优化与综合分析提供重要技术参考。

## 1 前缘吸波结构建模

### 1.1 模型介绍

选取 NACA2410 翼型作为研究对象,在 10% 弦线以前的部分布置前缘吸波结构。此处的前缘吸波结构分为三部分:最外层的透波蒙皮、中间的吸波填充物和最内层的铝合金反射板。为了更加真实地反映前缘吸波结构在气动压力作用下的承载特性,选取长为 200.0 mm 的前缘吸波结构进行建模分析,其结构尺寸如图 2 所示。10% 弦线处前缘吸波结构高度为 78.0 mm,最内层铝合金反射板厚度为 1.0 mm,其夹角为  $\theta$ 。

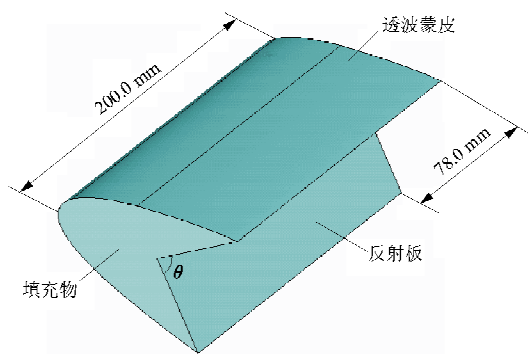


图 2 前缘吸波结构模型示意图

Fig. 2 Leading edge absorbing structure model

透波蒙皮上施加的气动力以 0.65 MPa 均布压力计入(实际气动力均布简化近似值),由于透波蒙皮和金属反射板与机翼前梁连接,因此将外蒙皮和反射板上下两边固支,约束情况如图 3 所示。为了更加准确地分析前缘吸波结构的承载性能,外蒙皮和反射板选用 8 节点壳单元模拟,吸波填充物选用 20 节点六面体单元模拟。

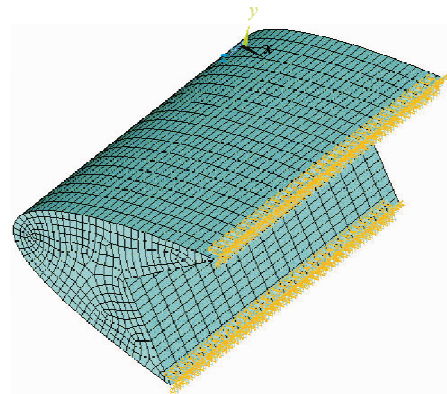


图 3 前缘吸波结构网格图

Fig. 3 Grid graph of leading edge absorbing structure

### 1.2 材料参数

前缘吸波结构所采用的透波蒙皮、吸波填充材料以及铝合金反射板的材料常数如表 1 所示。

表 1 前缘吸波结构材料常数

Table 1 Material constants of leading edge absorbing structure

材料种类	$E/\text{GPa}$	$\mu$	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$
蒙皮	10.750	0.20	2.15
填充材料	0.115	0.25	0.32
铝合金反射板	70.000	0.33	2.82

## 2 零阶和一阶参数优化算法步骤

结构参数优化的一般表述为

① 优化目标函数

$$f = \min\{f(x)\} \quad x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_i] \quad (1)$$

② 设计变量(上标  $u$  和  $l$  分别表示取值的上下限)

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

③ 状态变量

$$\begin{cases} g_i(x) \leq g_i^u & (i=1, 2, 3, \dots, m_1) \\ h_i^l \leq h_i(x) \leq h_i^u & (i=1, 2, 3, \dots, m_2) \\ w_i^l \leq w_i(x) \leq w_i^u & (i=1, 2, 3, \dots, m_3) \end{cases} \quad (3)$$

在优化计算过程中,零阶和一阶参数优化算法的步骤基本相同,只是零阶优化算法<sup>[7]</sup>仅需要因变量的数值,不需要其导数信息;而一阶优化算法<sup>[7]</sup>则需要使用状态变量和目标函数对设计变量的偏导数。它们的基本算法步骤大致可归纳如下:

(1) 明确目标函数、设计变量及其取值范围、状态变量及其取值范围；

(2) 对目标函数和状态变量进行近似化处理；

(3) 在每一步优化迭代中将目标函数、状态变量与设计变量的关系拟合成曲线或曲面；

(4) 采用罚函数法将上述约束极小化问题转换成无约束优化问题；

(5) 搜索无约束目标函数极值, 获得最优解。

本文采用的优化算法主要参考文献[7]的算法, 具体算法流程这里不再详述。

### 3 前缘吸波结构优化计算与结果分析

#### 3.1 优化模型

本文选择零阶和一阶参数优化算法分别对前缘吸波结构进行优化计算, 其中优化算法在 Matlab 7.0 编译环境中完成, 前缘吸波结构有限元建模和计算在 ANSYS 12.0 软件中完成。每次优化变量变化后均通过 Matlab 程序调用 ANSYS 软件重新建模和计算, 计算结果由 Matlab 程序从 ANSYS 软件的输出文件中读取后加以判断。

优化模型简述如下:

##### ① 优化目标

透波蒙皮和填充材料总质量最小。

##### ② 约束条件

透波蒙皮最大应变小于  $2\ 000\ \mu\epsilon$  (考虑刚度要求)。

##### ③ 优化变量

透波蒙皮厚度  $1.20\ \text{mm} \leq t \leq 3.60\ \text{mm}$  (最小步长为  $0.01\ \text{mm}$ )。

反射板夹角  $60^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$  (下限为所选吸波材料在常用雷达波段下基本的电磁性能要求, 上限为考虑前缘的系统布置所确定的最低要求; 最小步长为  $1^\circ$ )。

虽然一阶参数优化算法比零阶参数优化算法更为精确, 但是其计算较为复杂、收敛速度较慢, 所以本文采取的优化方案是: 先通过零阶参数优化算法获得最优解的取值范围, 再通过零阶和一阶参数优化算法确定最优值, 从而提高优化计算的效率。

#### 3.2 优化结果分析

在气动载荷作用下, 利用零阶和一阶参数优化算法分别对前缘吸波结构进行优化计算, 优化结果如表 2 所示。

表 2 前缘吸波结构优化结果

Table 2 Optimization results of leading edge absorbing structure

优化算法	初始蒙皮厚度/mm	初始反射板夹角/ $^\circ$	初始总质量/g	
零阶	2.00	140	506.55	
一阶	2.00	140	506.55	
本文	1.53	110	463.30	
优化算法	迭代次数/次	最优蒙皮厚度/mm	最优反射板夹角/ $^\circ$	最优总质量/g
零阶	39	1.53	110	463.3
一阶	25	1.51	105	454.5
本文	16	1.51	105	454.5

从表 2 可以看出, 采用一阶参数优化算法获得的最优解更为精确、合理。透波蒙皮的最优厚度取为  $1.51\ \text{mm}$ , 铝合金反射板夹角的最优值取为  $105^\circ$ 。

前缘吸波结构的零阶和一阶参数优化算法的具体迭代过程如图 4 所示。

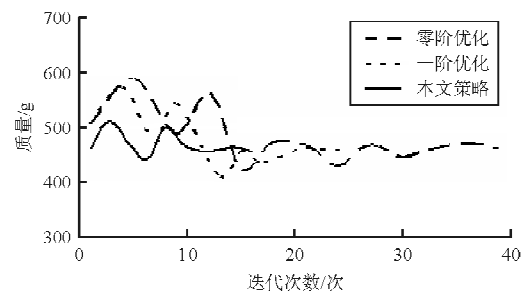


图 4 零阶和一阶参数优化过程对比

Fig. 4 Process comparison of zero-order and first-order optimization

从图 4 可以看出, 采用本文提出的优化策略 (以零阶优化结果作为一阶优化的初值) 具有较高的计算效率, 不但收敛速度快, 而且优化迭代曲线的振荡幅度小。

优化后的前缘吸波结构蒙皮的应变如图 5 所示, 图中虚线表示蒙皮变形前的位置。

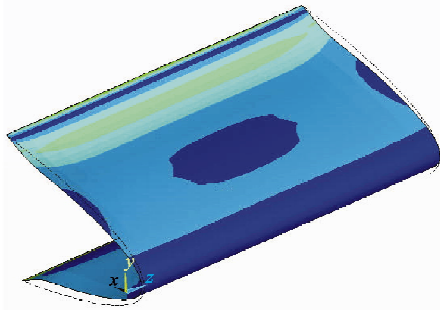


图 5 优化后透波蒙皮应变图

Fig. 5 Strain diagram of optimized transparent skin

从图 5 可以看出,在气动载荷作用下,接近蒙皮中心位置的应变最大,最大应变为  $1\ 994.6\ \mu\epsilon$ ,主要由于此处蒙皮结构获得的填充物刚度支持较弱。填充物的应变如图 6 所示,进一步印证了上述原因。因此在不改变透波蒙皮材质的前提下,可以选取比刚度较高的吸波填充材料,以降低前缘吸波结构的总质量,提高其承载效率。

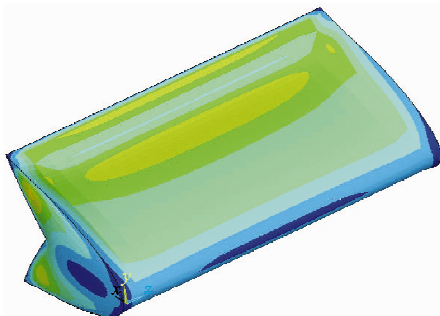


图 6 优化后填充物应变图

Fig. 6 Strain diagram of optimized filling

优化后的前缘吸波结构透波蒙皮应力如图 7 所示,由于固支边界的影响,最大应力发生在固支边界处,最大值为  $65.4\ \text{MPa}$ 。

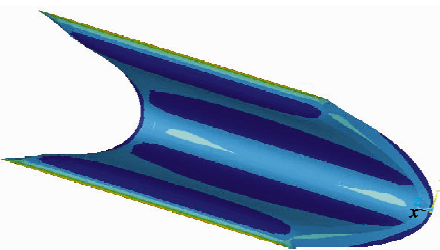


图 7 优化后透波蒙皮应力图

Fig. 7 Stress diagram of optimized transparent skin

优化后的前缘吸波结构填充物应力如图 8 所

示,最大应力发生在反射板夹角处,由于填充物本身弹性模量较小,所以最大应力也较小,仅为  $0.91\ \text{MPa}$ 。

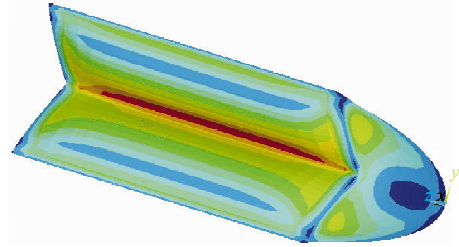


图 8 优化后填充物应力图

Fig. 8 Stress diagram of optimized filling

## 4 结 论

(1) 本文提出一种优化方案,即先通过零阶参数优化算法获得最优解的取值范围,再通过零阶和一阶优化算法确定最优值,该优化方案计算效率高、可行性好。

(2) 选取的吸波填充材料应与透波蒙皮材料相匹配,尽量使其刚度相当;选择比刚度较高的吸波填充材料,能够提高前缘吸波结构的承载性能。

## 参考文献

- [1] 苏东林, 齐万泉, 张伟, 等. 基于遗传进化算法反演吸波结构电磁参数[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(1): 71-74.  
Su Donglin, Qi Wanquan, Zhang Wei, et al. Getting parameters of absorbing structure based on genetic evolutionary algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(1): 71-74. (in Chinese)
- [2] 刘红星, 赵伯琳, 高正平. 吸波结构前缘翼面散射的快速分析[J]. 微波学报, 2004, 20(2): 35-39.  
Liu Hongxing, Zhao Bolin, Gao Zhengping. Fast scattering analysis of lossy material in front edge of metal wing[J]. Journal of Microwaves, 2004, 20(2): 35-39. (in Chinese)
- [3] 王海风, 徐志伟. 结构型吸波材料电磁特性的设计计算[J]. 机械科学与技术, 2008, 27(11): 1387-1391.  
Wang Haifeng, Xu Zhiwei. Design and calculation of electromagnetic characteristics of structure absorbent materials [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2008, 27(11): 1387-1391. (in Chinese)
- [4] Hossein Mosallaei, Yahya Rahmat-Samii. RCS reduction of canonical targets using genetic algorithm synthesized RAM [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(10): 1594-1606. (下转第 430 页)

- research of dynamic characteristics for the strap-on launch vehicle[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(3): 821-826. (in Chinese)
- [2] 黄怀德. 大型液体火箭动力学课题研究[J]. *导弹与航天运载技术*, 1999(3): 16-22.  
Huang Huaide. Research on dynamics of large liquid propellant rocket[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 1999(3): 16-22. (in Chinese)
- [3] 王毅, 朱礼文, 王明宇, 等. 大型运载火箭动力学关键技术及其进展综述[J]. *导弹与航天运载技术*, 2000(1): 30-37.  
Wang Yi, Zhu Liwen, Wang Mingyu, et al. Summary of some key technologies on dynamics of large launch vehicle[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2000(1): 30-37. (in Chinese)
- [4] 林宏, 罗恒, 潘忠文, 等. 运载火箭动特性有限元模型修正技术研究[J]. *载人航天*, 2011(6): 30-35.  
Lin Hong, Luo Heng, Pan Zhongwen, et al. Research on dynamic FEM model updating technique of launch vehicle[J]. *Manned Spaceflight*, 2011(6): 30-35. (in Chinese)
- [5] 王其政, 张建华, 马道远. 捆绑液体火箭跳振(POGO)稳定性分析[J]. *强度与环境*, 2006, 33(2): 6-11.  
Wang Qizheng, Zhang Jianhua, Ma Daoyuan. POGO analysis of cluster liquid rocket[J]. *Structure and Environment Engineering*, 2006, 33(2): 6-11. (in Chinese)
- [6] 潘忠文, 王旭, 邢誉峰, 等. 基于梁模型的火箭纵横扭一体化建模技术[J]. *宇航学报*, 2010, 31(5): 1310-1316.  
Pan Zhongwen, Wang Xu, Xing Yufeng, et al. A beam model based longitudinal-lateral-torsional integrated modeling technique for launch vehicle[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(5): 1310-1316. (in Chinese)
- [7] 潘忠文, 邢誉峰, 朱礼文, 等. 运载火箭动力学建模中液体推进剂模拟技术[J]. *中国科学: 技术科学*, 2010, 40(8): 920-928.  
Pan Zhongwen, Xing Yufeng, Zhu Liwen, et al. Liquid propellant analogy technique in dynamic modeling of launch vehicle[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2010, 40(8): 920-928. (in Chinese)

### 作者简介:

雷 羽(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:结构动力学。

赵美英(1962—),女,博士,教授,博导。主要研究方向:复合材料结构设计、飞行器结构设计。

杨虎军(1978—),男,博士研究生,研究员。主要研究方向:火箭总体设计。

(编辑:马文静)

### (上接第425页)

- [5] 周卫来, 赵惠玲, 万国宾, 等. 雷达吸波结构的 FGA 优化设计[J]. *电子测量技术*, 2007, 30(1): 59-62.  
Zhou Weilai, Zhao Huiling, Wan Guobin, et al. Design of broad-band radar absorbers using genetic algorithms[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, 30(1): 59-62. (in Chinese)
- [6] 陈明继, 裴永茂, 方岱宁. 夹芯型雷达吸波结构的多目标优化[J]. *应用数学和力学*, 2010, 31(3): 315-323.  
Chen Mingji, Pei Yongmao, Fang Daining. Multi-objective optimization design of radar absorbing sandwich structure[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2010, 31(3): 315-323. (in Chinese)
- [7] 郭彤, 李爱群, 费庆国, 等. 零阶与一阶优化算法在悬索桥模型修正中的应用对比分析[J]. *振动与冲击*, 2007, 26(4): 35-38.  
Guo Tong, Li Aiqun, Fei Qingguo, et al. Application comparison between zero-order and first-order optimization methods in model updating of suspension bridges[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(4): 35-38. (in Chinese)

### 作者简介:

袁 伟(1982—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构设计与分析。

程普强(1966—),男,研究员,副总设计师。主要研究方向:飞机结构设计与分析。

(编辑:马文静)