

文章编号: 1673-4599(2010)01-0005-04

# 隐身结构机翼 RCS 分析与优化设计

李宏信, 沈海军

(南京航空航天大学 航空宇航学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 以前缘内部填充吸波材料的隐身结构飞机机翼为研究对象, 采用矩量法对其向前的雷达散射截面(RCS)进行数值分析; 根据代理模型优化策略, 对上述机翼隐身结构中的吸波材料厚度与劈角的选取进行RCS特性分析与优化。研究表明, 和全金属机翼相比, 隐身结构机翼具有更好的隐身特性; 经过优化设计, 可在典型方位上显著降低翼面结构RCS, 提高了原隐身结构的吸波性能。

**关键词:** 隐身结构; RCS; 代理模型; 矩量法; 优化设计

中图分类号: V271 文献标识码: A

## The Optimization Design of the Wing with Low Detectable Structure

LI Hong-xin, SHEN Hai-jun

(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,  
Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The low detectable wing with the leading edge filled with absorbing materials is investigated, and the forward Radar Cross Section (RCS) is analyzed with the method of moment. By using the surrogate model based strategy, the thickness and wedge-angle of the filled absorbing materials are optimized. The results show that, in comparison with the metal wing, the wing with low detectable structure has better stealth characteristics, and the RCS of the optimized wing with low detectable structure is reduced obviously on typical location, i.e., the optimized wing has better absorb capability of electromagnetic waves.

**Key words:** low detectable structure; RCS; surrogate model; method of moments; optimal design

军用飞机的隐身性能是其生存力的一个重要指标, 外形隐身以及隐身材料的应用是飞机隐身的重要措施。然而, 单独应用外形隐身技术和隐身材料不能同时兼顾飞机的飞行性能和周围环境对其的影响, 因此采用两者结合的隐身结构便成为解决这个问题的另一种重要途径<sup>[1]</sup>。

隐身结构是一种结合低可探测外形飞机的复杂

曲面形状和部位, 由非金属结构材料与吸波材料、透波材料及其他材料共同构成的承载复合吸波结构<sup>[2]</sup>, 这样就可以使减小飞行器电磁散射的手段扩展到整个机体, 在满足外形和结构要求的前提下扩大了隐身材料的应用范围。

现在, 隐身结构已应用于飞机的复合材料机翼(尾翼)前缘、翼尖等雷达强反射部位。由于这些部位

内部通常都有一定的空间,因此通过优选这些部位内部的结构几何形状以及填充材料的电磁参数,可以使探测雷达电磁波在结构内多次传输,并得到最大限度的消耗。研究结果表明,隐身结构可以大大缩减飞机机翼的雷达散射截面(RCS)<sup>[9]</sup>,具有良好的雷达隐身效果。

为了充分提高隐身结构的吸波能力,本文采用矩量法及三次多项式响应面代理模型,针对一种应用于机翼前缘的典型隐身结构进行优化设计。本文工作对飞机机翼的隐身设计具有重要的参考价值。

## 1 隐身结构机翼模型与数值分析方法

本文进行优化设计的是一种典型的隐身结构机翼,见图1。翼型采用NACA0015,弦长603 mm,展长280 mm;机翼前缘蒙皮采用常见的石英玻璃纤维或芳纶复合材料,可近似为透波材料;蒙皮厚度取2 mm,介电常数 $\epsilon'$ 取2.08,损耗角正切 $\tan\delta$ 取0<sup>[9]</sup>。机翼金属盒段为主承力件,盒段前壁板处粘贴三角形铝箔劈尖,在计算时金属材料可作为理想电导体(PEC)。前缘蒙皮内部与劈尖之间填充3层吸波材料,填充层角度与劈尖角度一致,按照阻抗渐变式设计,电特性逐层变化,这样既保证了机翼的气动外形,又合理的利用了机翼前缘有限空间。

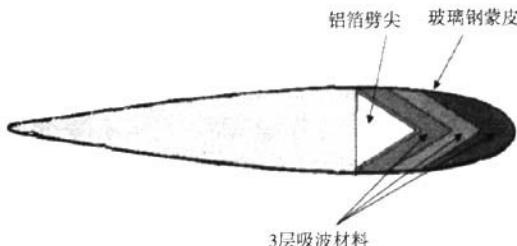


图1 机翼前缘隐身结构方案

本文将采用矩量法(Method of Moment, MOM)对上述隐身结构进行数值模拟,矩量法是离散积分方程数学表达形式的离散化方法,由于积分方程自动满足辐射边界条件,因而尤为适合求解如散射和辐射等开域问题<sup>[9]</sup>。和传统的处理电小和中等电尺寸问题的积分方程和微分方程方法相比,对于RCS问题,MOM及其快速算法具有精度高、未知量少等优点,成为这一类方法的首选。

本文应用基于MOM方法的电磁分析软件FEKO对隐身结构进行数值分析<sup>[9]</sup>。FEKO提供了包括矩量法(MOM)、快速多极子方法(MLFMM)等多

种核心算法,从算法上提供了电大尺寸问题求解的途径,并且具有强大的建模和后处理功能。FEKO还提供循环和分支控制语句和开放的输入输出文件,为二次开发提供了基础。

## 2 隐身结构与全金属机翼的RCS对比分析

利用结构内部几何与填充吸波材料电磁参数的可调整性,经过一定的优化可以得到隐身效果良好的机翼。已有的研究表明,吸波电磁参数对隐身结构的电磁散射特性影响很大,同时,吸波材料厚度和劈尖角度的变化也对隐身结构的雷达RCS有一定的影响<sup>[9]</sup>。鉴于此,我们在进行隐身结构机翼的优化设计时,以劈尖角度,3层吸波材料的第一层和第三层的厚度3个参数为设计变量,其中3层吸波材料的电磁参数分别为 $\epsilon_1'=1.29, \tan\delta_1=0.23, \epsilon_2'=1.34, \tan\delta_2=0.26, \epsilon_3'=1.66, \tan\delta_3=0.40$ 。吸波材料采用发泡泡沫塑料,其电磁参数可通过添加适量的碳粉进行调节。 $\epsilon_1', \epsilon_2', \epsilon_3'$ 分别为3种填充材料的介电常数, $\tan\delta_1, \tan\delta_2, \tan\delta_3$ 分别为它们电磁损耗角正切。

本文在给定入射波频率(1 GHz)下,考察机翼前方方位角内隐身结构的RCS缩减效果;入射波为平面正弦波,入射方位见图2。

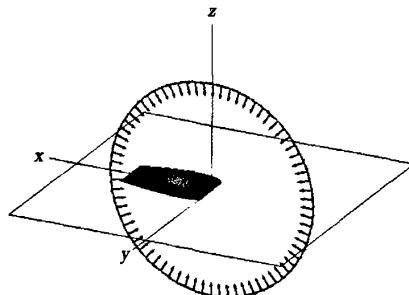


图2 入射方位图

为了初步考察所采用隐身结构对机翼的RCS缩减的效果,首先对全金属机翼和一个采用隐身结构的机翼的电磁散射特性进行了计算。图3给出了全金属机翼和隐身结构机翼的向前电磁散射特性计算结果。计算中,单元为FEKO根据频率自动划分,最小单元长度为波长的1/10,单元总数约5 400个,隐身结构机翼的初始几何尺寸为:劈尖62.78°,机翼前缘3层填充材料厚度均为38 mm。

从图3可以看出,隐身结构机翼前缘个别方位角上的RCS值比全金属机翼高外,绝大部分方位角上的RCS值都显著低于金属结构机翼,这说明,隐身结构对机翼前缘的RCS具有良好的缩减作用。

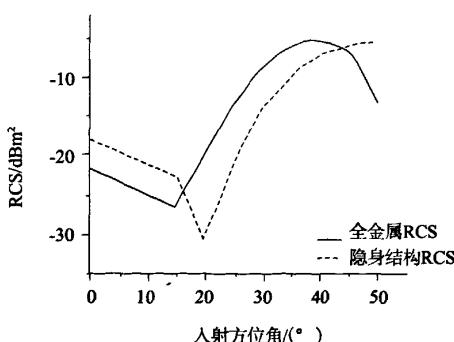


图3 前缘方位角的RCS

### 3 隐身结构机翼的RCS优化设计

#### 3.1 优化设计的目标函数

- 本文将对3层吸波材料厚度、劈尖角度进行优化, 优化目标为考虑前向入射扇区内(-20°~20°)隐身结构的RCS最小, 优化方位入射角见图4。本文以5°为步长, 计算扇区内结构的RCS。在-20°~20°内选取典型的方位上RCS的加权和为目标函数。

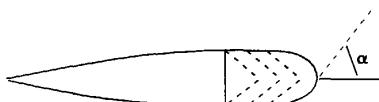


图4 入射方位示意图

隐身结构电磁散射特性优化问题的数学表达式为:

设计变量:  $x_1, x_2, x_3$

$$\text{目标函数: } \min \sum_{i=1}^n \sigma_i W_i / S_i$$

约束条件:  $45^\circ \leq x_1 \leq 90^\circ; 15^\circ \leq x_2 \leq 60^\circ; 15^\circ \leq x_3 \leq 65^\circ$

式中:  $x_1, x_2, x_3$  分别为劈尖角度、第一层填充材料厚度和第三层填充材料厚度;  $\sigma_i$  为第  $i$  个人射方位角上隐身结构的RCS;  $W_i$  为加权系数;  $S_i$  为比例因子, 本文中  $W_i$  和  $S_i$  均取1。

#### 3.2 优化策略

本文采用基于代理模型的优化策略。代理模型是一种包含试验设计和近似算法的建模技术, 在设计优化过程中用代理模型替代原有的分析模型, 可以提高仿真优化的寻优效率, 降低算法的计算成本<sup>7</sup>。构建代理模型一般分为3个步骤: 首先采用某种方法产生设计变量的样本点; 其次用分析模型对样本点进行计算, 获得一组输入输出数据; 最后用拟合

方法拟合获得的输入输出样本数据, 构建近似模型, 并对此模型进行可信度评估。

本文采用拉丁超立方抽样方法确定48个隐身结构样本方案; 然后用FEKO软件对48个隐身结构机翼样本方案进行了RCS计算, 并得到48组隐身结构机翼电磁散射特性的输入输出数据; 然后根据这些数据构造了机翼RCS特性的代理模型, 这里代理模型采用三次多项式响应面; 最后, 基于获得的响应面, 采用多岛遗传算法寻求机翼隐身结构几何尺寸的最优解。上述流程中的代理模型建立以及优化问题均在优化设计软件Insight<sup>®</sup>中实现。

#### 3.3 优化结果与分析

在给定的频率下, 对前向入射扇区(-20°~20°)的9个典型方位(-20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20)的雷达散射特性进行优化分析。扇区典型照射方位均采用响应面模型<sup>10</sup>, 图5为本文建立的三次响应面模型之一, 模型经过4次迭代, RCS响应面与样本点FEKO计算结果的最大误差小于2 dBm<sup>2</sup>。

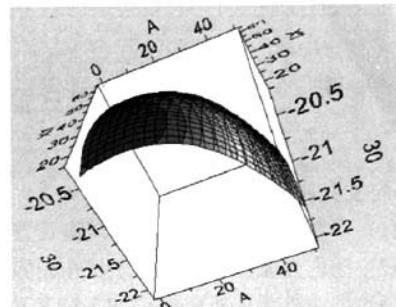


图5 三次响应面模型

经计算, 前向入射扇区的优化设计结果为: 劈尖角度为49.1°, 第一层填充材料厚度为60.0 mm, 第三层填充材料的厚度为34.507 mm。优化前后RCS对比见图6。

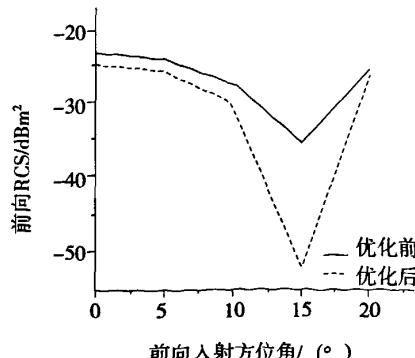


图6 优化前后的RCS

这里需要说明一点：考虑到机翼翼型上下的对称性，图6仅显示了0~20°角度的区间。

从图6可以看出，前向入射区域内，经过优化设计后，使得隐身结构机翼绝大多数方位的RCS值都分别显著降低，即具有了更好的雷达隐身特性。

## 4 结 论

采用矩量法及多项式响应面代理模型，针对一种典型的隐身结构机翼前缘进行了优化设计。研究表明，隐身结构机翼和全金属机翼相比具有良好的向前隐身特性；经过优化设计可显著降低隐身结构机翼的RCS，进而提高隐身结构机翼的吸波性能。

## 参 考 文 献

- [1] 杨乃宾, 章怡宁.复合材料飞机结构设计[M].北京:航空工业出版社, 2002.
- [2] 黄爱凤, 余雄庆, 姚卫星.翼面隐身结构电磁散射特性的数值模拟[J].航空学报, 2005, 26, (4): 422-425.

- [3] 聂毅, 余雄庆.翼面隐身结构电磁散射特性稳健优化设计研究[J].航空学报, 2007, 28(Z1): 104-108.
- [4] 黄爱凤.飞行器翼面隐身结构电磁散射特性设计优化[D].南京:南京航空航天大学, 2005.
- [5] 盛庆新.计算电磁学要论[M].北京:科学出版社, 2004.
- [6] 贾云峰.FEKO在雷达散射截面计算中的应用[J].中国制造业信息化, 2008, (2): 59-61.
- [7] Barthelemy J F M, Haftka R T. Approximation concepts for optimum structural design-a review [J]. Structural Optimization, 1993, (5): 129-144.
- [8] Koch P N, Evans J P, Powell D. Interdigitation for effective design space exploration using i-SIGHT [J]. Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002, 23(2): 111-126.

## 作 者 简 介

- 李宏信(1986—),男,硕士研究生,主要研究方向:飞行器设计,隐身设计研究。  
沈海军(1971—),男,博士,副教授,主要从事飞行器设计、结构力学等方面的研究工作。

## 尖兵之翼—第三届中国无人机大会暨展览会征文启动

### 1 征文范围及内容

- (1) 我国无人机行业的产业政策及管理方式探讨;
- (2) 国内外无人机的发展现状和趋势;
- (3) 国内外无人机研发中的新技术和新方法(无人机系统总体技术、平台总体综合设计技术、动力装置技术、飞行控制与管理、导航技术测控与数据链技术、武器化技术等等);
- (4) 无人机的飞行控制指挥及空域管理;
- (5) 微型无人机技术;
- (6) 无人机未来面临的主要任务、关键技术及发展建议;
- (7) 民用无人机相关技术及应用前景。

### 2 投稿要求

- (1) 内容新颖、主题明确、能够反映作者近期的研究进展及成果, 资料分析类必须有作者的独立见解;
- (2) 未在公开出版物或全国性学术会议上发表过, 文责自负;
- (3) 投稿需附单位保密审查证明, 证明本篇投稿不涉及本单位、相关单位以及国家的秘密。

### 3 联系方式

地址: 北京市海淀区西四环北路15号依斯特大厦709 (100195)

联系人及电话: 王小霞 陈运 010-88587506/07 传真: 010-88587416 88464089

E-mail: uav2010@yahoo.cn

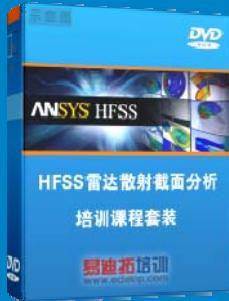
## 雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

### ● 更多培训课程：

#### ● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

#### ● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

#### ● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>

专注于微波、射频、天线设计人才的培养

**易迪拓培训**

官方网址: <http://www.edatop.com>

淘宝网店: <http://shop36920890.taobao.com>