

文章编号 : 1673-4599(2007)01-0027-05

基于二级优化的低 RCS 外形设计方法

胡添元 , 余雄庆

(南京航空航天大学 航空宇航学院 , 江苏 南京 210016)

摘要 :针对飞行器外形隐身优化问题 , 提出了一种流程简单 , 可同时优化外形轮廓和剖面形状的二级优化方法。这种方法将优化流程分为外形轮廓级和剖面形状级两个层次 : 外形轮廓级优化任务是将轮廓形状参数传递给剖面形状级 , 并对外形轮廓进行优化 ; 剖面形状级优化任务是对剖面形状进行优化 , 并将目标函数值返回外形轮廓级。二级优化的最终结果可获得最优的轮廓形状和剖面形状。以一个具有低 RCS 特征的飞行器机身为算例 , 验证了这种二级优化方法的可行性和有效性。

关键词 :隐身技术 ; 飞行器设计 ; 雷达散射截面 ; 优化

中图分类号 : V218 文献标识码 : A

A Two-level Optimization Design Approach for Low RCS Airframe Shapes

HU Tian-yuan , YU Xiong-qing

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

Abstract : This paper proposes a two-level optimization design approach to low observable aircraft configurations. The approach is simple in terms of flowchart and provides the ability to conduct both the contour and section optimization simultaneously. The approach is divided into two levels including contour optimization and section optimization : the contour optimization send the contour parameters to the level of section optimization to find the optimum contour ; and the section optimization is to find the optimum section shape for the given contour parameters and feedback the object function to the level of contour optimization. This two-level approach is able to find out the optimum shape including both the contour and section shape. A low radar cross section design optimization problem for a simple fuselage shape was used to verify the approach.

Key words : stealth technology ; aircraft design ; radar cross section ; optimization

雷达隐身技术的关键在于减小飞机的雷达散射截面 (RCS) , 从而降低敌方雷达的截获概率或使其探测距离大大缩短。雷达外形隐身技术是最有效的隐身措施之一。通过仔细设计飞行器的外

形 (包括轮廓形状和剖面形状) , 能有效地降低飞行器的 RCS 值。

为了探求最佳的外形隐身效果 , 优化方法在外形隐身中获得了广泛的应用。例如 , 张才文等

以气动力系数作为约束条件，以 RCS 均值最小作为目标函数，对飞行器隐身与气动外形的综合优化设计方法作了初步探讨^[1]。朱自强等提出了一种翼型高气动效率和低 RCS 同时优化的方法^[2]。李天等应用模糊优化理论，以重要的几何参数为设计变量，对飞机气动和隐身进行综合优化^[3]。高正红等从多学科优化的角度对飞机外形参数的气动/隐身一体化优化进行了研究^[4]。

要获得最佳的隐身外形，应该同时优化飞行器的外形轮廓和剖面形状，但目前对同时优化外形轮廓和剖面形状的研究还不够深入。本文提出了一种能同时对外形轮廓和剖面形状进行优化的二级优化方法，并以一个简单的具有低 RCS 特征的飞行器的机身为例，来验证该方法的可行性和有效性。

1 计算模型与优化问题

本节首先用参数化几何模型来描述具有低 RCS 特征的飞行器的机身外形，然后阐述 RCS 计算方法，最后给出低 RCS 外形优化问题的数学模型。

1.1 几何模型描述

根据具有低 RCS 特征飞行器的机身剖面形状，本文选取空间三次 Hermite 样条曲线构造机身剖面^[5]。曲线参数方程如下：

$$P(t) = [t^3 \ t^2 \ t \ 1] \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{P}(0) \\ \vec{P}(1) \\ \vec{R}(0) \\ \vec{R}(1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

空间三次 Hermite 样条曲线只需给定起点坐标 $\vec{P}(0)$ 和终点坐标 $\vec{P}(1)$ ，以及过起点的切矢量 $\vec{R}(0)$ 和过终点的切矢量 $\vec{R}(1)$ 便能唯一确定一条空间曲线。通过改变起点和终点坐标以及过起点和终点的切矢量，可改变曲线形状。对于简单的机身剖面形状，用 2 条三次 Hermite 样条曲线就可定义机身剖面形状。对于复杂的机身剖面形状，可用多条 Hermite 样条曲线来描述。在本文中将机身剖面形状分为上、下两部分，各用 2 条三次 Hermite 样条曲线分别描述机身控制剖面上部和下部形状，如图 1 所示。

在进行机身几何建模时，首先定义机身的外形轮廓，机身的外形轮廓参数见图 2。然后，选取 5 个剖面为机身控制剖面，在各个剖面之间采

用三次样条插值获得未知点的坐标，并将相应的点连接成光滑曲线，从而得到机身三维外形，如图 3 所示。

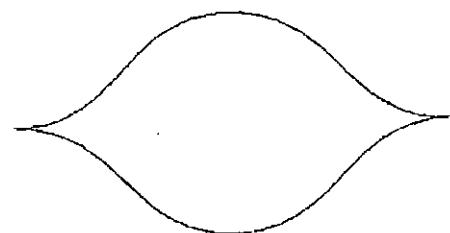


图 1 机身控制剖面曲线

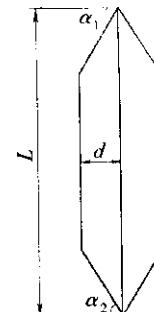


图 2 机身外形轮廓参数

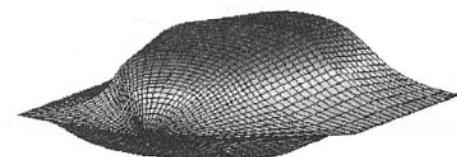


图 3 机身三维外形（弦向尺寸放大 4 倍）

1.2 RCS 计算模型

目前，常用高频区的 RCS 计算方法包括几何光学法、物理光学法、几何绕射理论和物理绕射理论等。本文采用板元加边缘的 RCS 计算模型^[6]，即板元散射场的计算采用物理光学法；边缘绕射场的计算采用等效电磁流法^[7]，然后再减去物理光学项的贡献，得到纯边缘的绕射场强度^[8]。

1.3 优化问题的描述

低 RCS 机身优化问题在数学上可表达为：

给定： f, θ, ϕ

寻找设计变量： $X_1 = \{\alpha_1, \alpha_2, d\}$

$$X_2 = \{\vec{R}_i(0), \vec{R}_i(1)\} \quad (i = 0, 1, \dots, 3; j = 1, \dots, 5)$$

使目标函数 $\bar{\sigma}$ 最小

并满足约束： $V_1 \leq V_i \leq V_u$

式中： f, θ, ϕ 分别为雷达波频率、照射俯仰角和方位角的范围； X_1 为描述机身平面形状的设计变量； X_2 为描述机身剖面形状的设计变量； i 表示过起点和终点的切矢量标号； j 表示控制剖面的编号； $\bar{\sigma}$ 为在照射俯仰角和方位角的范围机身平均 RCS 值； V_i 为机身第 j 个控制剖面的面积； V_l, V_u 分别代表面积的上、下限。

2 二级优化方法

2.1 基本思路

本文借鉴了多学科设计优化中的多级优化方法^[9]和结构优化中二级优化方法^[10]，提出了一种流程简单，适用于飞机外形低 RCS 设计的二级优化方法，以下简称二级优化。

二级优化的方法流程如图 4 所示。二级优化的基本思想是：将优化设计流程分为两个层次，即外形轮廓级和剖面形状级。剖面形状级只对剖面形状进行优化，它针对给定的外形轮廓，寻找出最优的剖面形状。外形轮廓级只对外形轮廓进行优化，它的任务是根据剖面形状的结果，寻找出最优的轮廓形状。二级优化的最终结果是同时获得最优的轮廓形状和剖面形状。

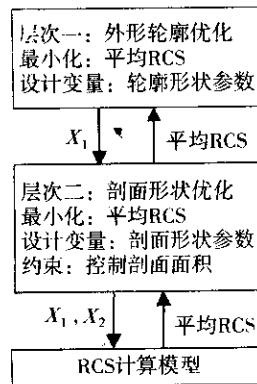


图 4 二级优化方法框架

根据二级优化思想，原机身低 RCS 问题转化为如下二级优化问题：

层次一：外形轮廓级优化

给定： f, θ, ϕ

寻找设计变量： $X_1 = \{\alpha_1, \alpha_2, d\}$

使目标函数 $\bar{\sigma}$ 最小

层次二：剖面形状级优化

给定： f, θ, ϕ, X_1

寻找设计变量： $X_2 = \{\vec{R}_i(0), \vec{R}_i(1)\}$

($i = 0, 1, \dots, 3; j = 1, \dots, 5$)

使目标函数 $\bar{\sigma}$ 最小

并满足约束： $V_1 \leq V_i \leq V_u$

这种方法的特点是将复杂的优化问题分解成 2 个层次，每个层次的优化问题较为简单，易于实现优化。

2.2 基于代理模型的二级优化方法

针对给定的外形轮廓，经剖面形状级优化能计算出最小的 RCS。如果外形轮廓设计变量很多，需要很多次剖面形状级优化，而且外形轮廓设计变量与剖面形状级优化计算出最小 RCS 之间的映射关系有可能是非光滑的，这使得基于梯度的优化算法难于寻找到最优解。为此，我们采用了基于代理模型的优化策略。

所谓代理模型^[11](Surrogate Models)是指计算量小、但其计算结果与高精度模型的计算结果相近的分析模型。在设计优化过程中，可用代理模型替代原有的计算模型，以克服计算量过大的问题，同时也能有效解决目标函数与设计变量之间存在的非光滑映射的问题。

构造代理模型一般需要 3 个步骤^[11]：首先，用某种试验设计方法产生设计变量的样本点；然后，用高精度分析模型(仿真软件)对这些样本点进行分析，获得一组输入/输出的数据；最后用某种拟合方法来拟合这些输入/输出的样本数据，构造出近似模型，并对该近似模型的可信度进行评估。

常用的试验设计方法包括全析因设计、正交设计、中心复合设计、均匀设计、拉丁超立方设计等。对于数值仿真而言，均匀设计和拉丁超立方设计更可取一些^[12]。对于拉丁超立方设计而言，样本点的个数一般为设计变量个数的 10 倍左右。

目前常用的代理模型有多项式响应面模型和 Kriging 模型。本文采用的是多项式响应面模型，多项式响应面模型具有良好的连续性和可导性，能较好的去除数字噪声的影响，极易实现寻优，而且根据多项式中各分量的系数的大小，可以判断各项参数对整个系统响应影响的大小，目前已经成为工程优化中比较有代表性的一种代理模型方法。

将代理模型与上述二级优化方法相结合，我

们提出了面向低 RCS 外形设计的基于代理模型的二级优化方法，如图 5 所示。首先在外形轮廓设计级进行试验设计(DOE)，产生若干组飞机轮廓形状方案，然后将每一种轮廓形状方案传给剖面形状设计级，剖面形状设计级针对每种轮廓外形方案进行剖面形状的优化，找到针对该轮廓形状的最好剖面形状，并将优化后的目标函数值返回外形轮廓设计级。外形轮廓设计级根据输入(轮廓形状)和输出之间(目标函数值)组成的样本点输入/输出数据库，建立代理模型，并且基于代理模型进行外形轮廓优化。

在这个方法流程中，代理模型用于替代剖面形状优化的功能，不但可以减少 RCS 分析模型的计算次数，还可以过滤掉输入(轮廓形状)和输出(目标函数值)之间的数值噪声。

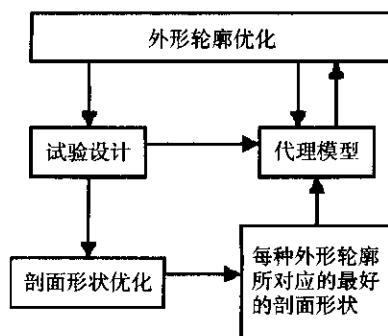


图 5 基于代理模型的二级优化方法的框架

3 优化结果及分析

本文应用第 2.2 节提出的基于代理模型的二级优化方法对第 2 节中定义的低 RCS 机身外形优化问题进行求解。

给定参数：假定俯仰角为 0° ，极化方式为垂直极化，机身长为 8 m。

设计变量：包括外形轮廓设计变量和剖面形状设计变量。外形轮廓参数设计变量，包括机头与水平线之间的夹角 α_1 ，机尾与水平线之间的夹角 α_2 ，半机身宽度 d 。3 个外形轮廓参数设计变量的变化范围分别为： $30^\circ \leq \alpha_1 \leq 60^\circ$ ， $30^\circ \leq \alpha_2 \leq 60^\circ$ ， $1 \text{ m} \leq d \leq 1.2 \text{ m}$ ；每个控制剖面有 8 个设计变量，5 个控制剖面共有 40 个设计变量。

$$\text{约束函数} : 0.6283 \text{ m}^2 \leq V_1 \leq 0.864 \text{ m}^2$$

$$1.2315 \text{ m}^2 \leq V_2 \leq 2.736 \text{ m}^2$$

$$2.0358 \text{ m}^2 \leq V_3 \leq 3.312 \text{ m}^2$$

$$1.2315 \text{ m}^2 \leq V_4 \leq 2.736 \text{ m}^2$$

$$0.6283 \text{ m}^2 \leq V_5 \leq 0.864 \text{ m}^2$$

目标函数：分两种情况计算目标函数。第一种情况的目标函数是在方位角 $0^\circ \leq \phi \leq 60^\circ$ (以机头方向为零度)范围内机身 RCS 的平均值；第二种情况的目标函数是在 $0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ 范围内机身 RCS 的平均值。

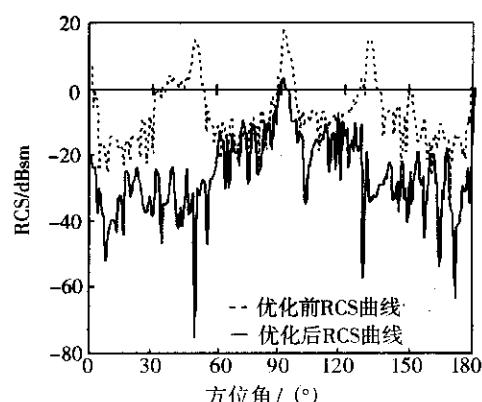
第 2 节中所述基于代理模型的二级优化流程是在 iSIGHT 优化平台上进行集成的。在本算例中，试验设计方法采用拉丁超立方法，外形轮廓级采用序列二次规划，剖面形状级优化方法也采用序列二次规划，代理模型采用二次响应面模型。

优化前后的比较见表 1。对于第 1 种目标函数，优化前的平均 RCS 为 -7.62 dBsm ，优化后平均 RCS 为 -33.46 dBsm ；对于第 2 种目标函数，优化前的平均 RCS 为 -8.71 dBsm ，优化后平均 RCS 为 -26.05 dBsm 。

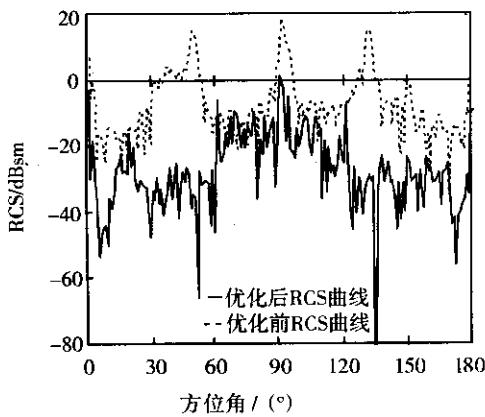
表 1 优化前后外形轮廓参数与平均 RCS 的比较

外形轮廓参数 与平均 RCS	优化前	优化后	
		(第 1 种情况)	(第 2 种情况)
α_1	30°	60°	60°
α_2	30°	52.8°	60°
d / m	1	1.1034	1.2
平均 RCS/dBsm	-7.62	-33.46	-
	-8.71	-	-26.05

优化前后机身的 RCS 随方位分布的对比如图 6 所示。针对第 1 种目标函数，优化后的机身外形见图 7；针对第 2 种目标函数，优化后的机身外形见图 8。为了能更清晰比较剖面形状，图 7 和图 8 中弦向的尺寸放大了 4 倍。



(a) 优化前后 RCS 分布的对比(目标函数 1)



(b) 优化前后 RCS 分布的对比(目标函数 2)

图 6 优化前后机身 RCS 分布的对比

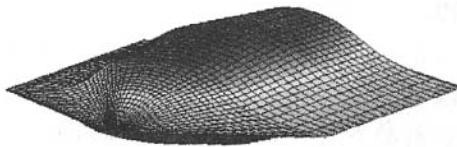


图 7 优化后机身外形(目标函数 1)

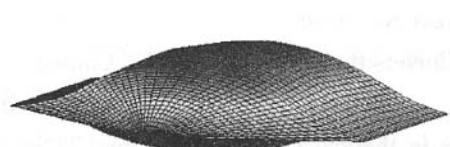


图 8 优化后机身外形(目标函数 2)

从优化后的结果可以看出：①对于第 1 种情况，在 $0^\circ \leq \phi \leq 60^\circ$ 范围内，RCS 的平均值比优化前降低约 25 dBsm。 α_1 变大使前向在扇形区域内板元的回波强度降低，机身控制剖面形状变得相对平坦，有利于减小后向散射；②对于第 2 种情况，在 $0^\circ \leq \phi \leq 180^\circ$ 范围内，RCS 的平均值比优化前降低了 20 dBsm，在整个方位上 RCS 均比较小，而且在后向散射最强的 900 方位上的 RCS 也得到了有效控制。

4 结 论

本文针对低 RCS 外形设计问题提出了一种基

于代理模型的二级优化方法。这种方法可同时对目标轮廓外形和剖面形状进行优化。算例表明，这种方法能有效地应用于低 RCS 目标外形轮廓和剖面形状同时优化问题，为飞机外形隐身优化提供了一种新方法。本文目的是验证二级优化方法在低 RCS 外形优化中的可行性，所选择的目标外形较简单，也没有考虑气动和结构的要求。进一步的研究工作将这种方法应用于更复杂的全机外形，并考虑气动性能和结构质量的影响。

参 考 文 献

- [1] 张才文, 屠立忠, 周建江. 飞行器隐身与气动外形综合优化设计初探[J]. 南京航空航天大学学报, 1996, 28(3): 303—308.
- [2] 朱自强, 朱一琨, 李海明. 翼型外形高气动效率/低可探测性的优化[J]. 航空学报, 1998, 19(6): 641—646.
- [3] 李天, 武哲, 李敬. 飞机外形参数的气动与隐身综合优化设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(1): 76—78.
- [4] 高正红, 夏露, 李天, 等. 飞行器气动与隐身性能一体化优化设计方法研究[J]. 飞机设计, 2003, (3): 1—5.
- [5] Trapp J C, Sobieczky H. Interactive parametric geometry design [R]. AIAA 99-0829, 1999.
- [6] Youssef N N. Radar cross section of complex targets[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(5): 722—734.
- [7] Michaeli A. Equipment edge currents for arbitrary aspects of observation[J]. IEEE Tran AP, 1984, 32(3): 252—258.
- [8] Knott E F. The Relationship between Mitzner's ILDC and Michaeli's equivalent currents[J]. IEEE Tran AP, 1985, 33(1): 112—114.
- [9] 余雄庆, 丁运亮. 多学科设计优化算法及其在飞行器设计中应用[J]. 航空学报, 2000, 21(1): 1—6.
- [10] Wang L G, Aryasomayajula H S R, Grandhi R V. A two-level optimization approach for the conceptual and preliminary design of airframe structures[R]. AIAA 98—4888, 1998.
- [11] Queipo N V, Haftka R T, Shyy W, et al. Surrogate-based analysis and optimization[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, (4): 1—28.
- [12] Giunta A A, Wojtkiewicz Jr S F, Eldred M S. Overview of modern design of experiments methods for computational simulations[R]. AIAA 2003—0649, 2003.

作 者 简 介

胡添元(1981—), 男, 吉林省吉林市人, 硕士研究生。

余雄庆(1965—), 男, 重庆人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 飞行器多学科设计优化和总体设计理论。

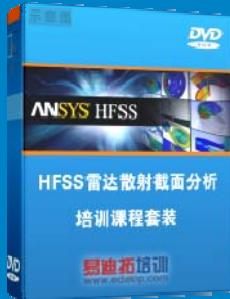
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

易迪拓培训(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/>