

低成本翼面隐身结构的设计和 RCS 测试分析

聂毅, 余雄庆, 黄爱凤

(南京航空航天大学航空航天学院, 江苏南京 210016)

摘要: 针对某无人侦察机隐身性能的要求, 设计出两种低成本的翼面隐身结构方案。该翼面隐身结构由高透波率的蒙皮、内部吸波材料和金属承力结构组成, 它们既能满足承载要求, 又具有明显降低雷达散射截面(radar cross section, RCS)的特性。为了验证这两种方案在降低 RCS 方面的有效性, 在微波暗室里对这两种结构模型进行了 RCS 测试。测试结果表明: 与常规的金属翼面相比, 这两种方案能有效降低翼面的 RCS。

关键词: 隐身技术; 隐身结构; 雷达散射截面; 飞机结构

中图分类号: TN011; V212 **文献标识码:** A

Design and RCS analysis of a low cost wing structure with low observability

NIE Yi, YU Xiong-qing, HUANG Ai-feng

(Coll. of Aerospace Engineering, Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Two types of low observability wing structures are proposed for a stealthy unmanned air vehicle. Those two low observability wing structures consist of skins and internal materials, and are expected to have low radar cross section (RCS) with the considerations of stress and other requirements. The indoor RCS experiments are conducted to verify the effectiveness of the low observability wing structures in reducing the radar cross section. The results of the experiments indicate that the RCS of those two types of wing structures is reduced substantially compared to conventional wings. The conclusion is that the low observability wing structure is a promising means to reduce aircraft's RCS.

Key words: stealth technology; low observability structure; radar cross section; aircraft structure

1 引言

外形隐身和材料隐身技术是提高飞行器隐身性能的两种基本方法^[1,2]。但单纯的外形隐身和材料隐身技术都有其局限性。因为过分依赖于外形隐身技术会导致飞行器的飞行性能下降, 而吸波材料有效工作频段一般较窄, 如果要想进一步提高吸收率和拓宽频带, 要受到材料厚度和重量等方面的限制。因此, 单从外形和材料入手来提高飞行器隐身性能, 代价较大。

从飞行器设计观点来看, 如果把减少飞行器电磁散射的手段不仅仅限于机体表面形状和材料, 而将其扩展到整个机体结构(包括内部结构), 那么提高飞行器隐身性能的另一个思路是将机体上某些无法避免的强散射部位(如翼面前缘)设计成隐身结构。隐身结构, 是指由蒙皮和多种内部材料组成的, 能满足承载要求, 并具有明显降低雷达散射截面的结构。即它是一种既能满足外形和结构要求, 又能有效减少电磁波反射的多功能一体化结构。

从实现的可能性角度看, 由于飞行器结构具有一定的

结构高度和较大的结构空间, 通过优选结构几何形状和材料的电磁参数, 可使入射波在结构中多次反复传输和损耗, 最大限度地吸收电磁波, 从而获得较高的吸收率和较宽的有效工作频带。同时又能综合考虑外形、承载、重量等要求^[3]。这是任何单一的吸波材料(包括结构型吸波材料)所无法达到的。

隐身结构还可以放宽隐身外形的要求, 从而避免了过分依赖于外形隐身技术而导致的飞行器气动性能下降的缺点。因此, 隐身结构是一种综合考虑外形、结构、材料来降低飞行器雷达散射截面(radar cross section, RCS)的有效实用措施。

本文以某无人侦察飞机为背景, 设计出两种低成本的翼面隐身结构方案, 通过对这两种翼面隐身结构模型 RCS 的测量, 验证了这两种方案缩减 RCS 的效果。

2 两种低成本翼面隐身结构方案

为了降低某无人侦察飞机机翼面前缘的后向 RCS, 设计出两种低成本的翼面隐身结构方案。这里的低成本有两

层含义:①结构容易加工和装配;②所用材料容易获得,不昂贵;③维修保障费用低。

根据隐身结构的思想和低成本无人飞机的要求,设计出的两种翼面隐身结构方案如图 1 和图 2 所示。

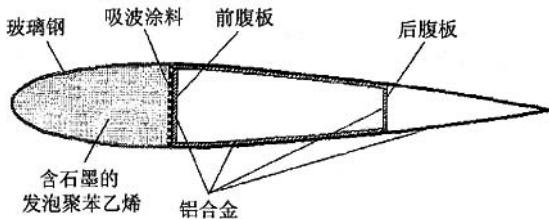


图 1 翼面隐身结构设计方案 1

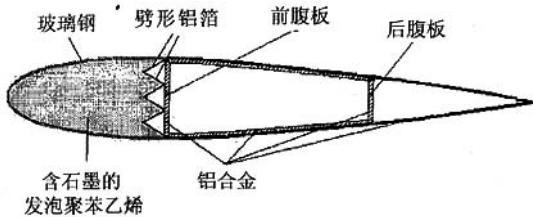


图 2 翼面隐身结构设计方案 2

结构 1 前缘段的蒙皮由透波性能好的玻璃钢制成,玻璃钢蒙皮厚 1.5 mm。主承力件为金属盒段,金属盒段主要承受剪力、弯矩和大部分的扭矩。金属盒段的前腹板上涂敷吸波材料,以降低金属腹板的电磁反射,吸波涂料采用南京大学电子科学与工程系研制的吸波涂料。当入射波频率 10 GHz 时,该吸波涂料的相对介电常数为 $\epsilon_r = 14.116$, $\epsilon_r = 0.824$, 相对磁导率为 $\mu_r = 2.8284$, $\mu_r = 2.204$ 。在翼面前缘和前梁腹板之间填充发泡聚苯乙烯和石墨的混合物,以吸收透过蒙皮的电磁波。发泡聚苯乙烯比重小,重量轻,对增加刚度也有一定的好处。将石墨按一定比例混合在发泡聚苯乙烯中,可改变发泡聚苯乙烯的电特性,使发泡聚苯乙烯和石墨的混合物具有电磁损耗特性。采用了南京大学电子科学与工程系研制的含有石墨的发泡聚苯乙烯。

结构 2 的基本结构与结构 1 相同,只是在盒段前腹板不涂吸波材料,而是贴上了重量很轻的劈形铝箔,用劈形的铝箔遮挡前梁腹板平面,从而将腹板的镜面反射转化为劈形边缘绕射,降低电磁散射强度,并可使电磁波在结构内部反复传输,被发泡聚苯乙烯和石墨的混合物充分吸收和损耗。这个方案主要是充分利用翼面内部结构形状来控制其电磁散射特征。

3 翼面隐身结构 RCS 测量和分析

为了验证这两种方案缩减 RCS 的效果,分别制作了翼面隐身结构 1 和结构 2 的 RCS 测试模型。为了将这两种翼面隐身结构与目前传统的全金属翼面结构进行 RCS 对比,还制作了全金属翼面 RCS 测试模型。三种模型的外形尺寸完全一致。翼面的剖面是 NACA0015 翼型,弦长

603 mm,展长 280 mm。

RCS 测量工作是在南京航空航天大学微波暗室里进行。电磁波频率为 9 375 Hz,入射方位定义见图 3 所示。我们关心的方位是前缘附近的方位,即 $\theta = 0^\circ \sim 30^\circ$ 。分别在水平极化和垂直极化情况下对三种模型的 RCS 进行了测量。测量结果见图 4 和图 5。

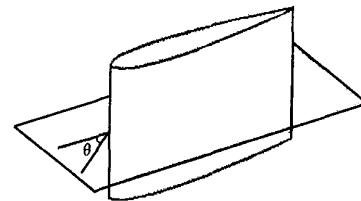


图 3 入射方位的定义

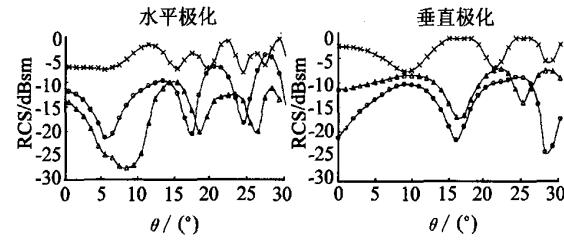


图 4 三种结构模型 RCS

测试结果 (水平极化)

图 5 三种结构模型 RCS

测试结果 (垂直极化)

从图 4、图 5 的测量结果和表 1、表 2 的统计分析看出:

(1) 水平极化时,在正前缘方位 $\theta = 0^\circ$ 时,翼面结构 1 和结构 1 的 RCS 分别比全金属翼面的 RCS 低 7 dBsm 和 5 dBsm。在前缘方位 $\theta = 0^\circ \sim 10^\circ$ 内,翼面结构 1 和结构 2 的平均 RCS 分别比全金属翼面的平均 RCS 低 15 dBsm 和 9 dBsm。在前缘方位 $\theta = 0^\circ \sim 20^\circ$ 内;翼面结构 1 和结构 2 的平均 RCS 分别比全金属翼面的平均 RCS 低 13 dBsm 和 8 dBsm。在前缘方位 $\theta = 0^\circ \sim 30^\circ$ 内;翼面结构 1 和结构 2 的平均 RCS 分别比全金属翼面的平均 RCS 低 12 dBsm 和 7 dBsm。另外,从表 1 还看出:水平极化时结构 1 的隐身性能好于结构 2 的隐身性能。

表 1 三种翼面模型在不同方位内 RCS 平均值的比较/(dBsm)(水平极化)

结构型式	方位/°			
	0	0~10	0~20	0~30
结构 1	-13.89	-21.37	-18.55	-17.26
结构 2	-11.91	-15.29	-13.84	-12.82
全金属	-6.99	-6.42	-5.88	-5.45

(2) 垂直极化时,在正前缘方位 $\theta=0^\circ$ 时,翼面结构 1 和结构 2 的 RCS 分别比全金属翼面的 RCS 低 8 dBsm 和 18 dBsm。在前缘方位 $\theta=0^\circ \sim 10^\circ$ 内;翼面结构 1 和结构 2 的平均 RCS 分别比全金属翼面的平均 RCS 低 5 dBsm 和 9 dBsm。在前缘方位 $\theta=0^\circ \sim 20^\circ$ 内;翼面结构 1 和结构 2 的平均 RCS 分别比全金属翼面的平均 RCS 低 7 dBsm 和 11 dBsm。在前缘方位 $\theta=0^\circ \sim 30^\circ$ 内;翼面结构 1 和结构 2 的平均 RCS 分别比全金属翼面的平均 RCS 低 6 dBsm 和 10 dBsm。另外,从表 2 还看出:垂直极化时,结构 2 比结构 1 更能有效地降低翼面的 RCS。

表 2 三种翼面模型在不同方位内 RCS 平均值的比较/(dBsm)(垂直极化)

结构型式	方位/°			
	0	0~10	0~20	0~30
结构 1	-11.39	-9.93	-10.94	-10.43
结构 2	-21.21	-14.32	-14.69	-14.39
全金属	-2.67	-4.76	-3.83	-3.73

(上接第 1582 页)

表 3 主成分的系数

	Z ₁	Z ₂	Z ₃
Y ₁	0.412 95	0.693 85	0.589 96
Y ₂	0.412 95	0.693 85	0.589 96
Y ₃	0.887 30	-0.160 43	-0.432 39
特征值	0.026 57	0.017 35	0.006 09
贡献率	0.531 31	0.346 98	0.121 71
累计贡献率	0.531 31	0.878 29	1.000 0

5 结 论

实现多元质量特性稳健设计的关键是既要确定多个质量特性整体波动的度量,又要建立方便、实用的实现途径。本文在提出多元质量特性稳健设计模型的基础上,建立了其整体波动的度量准则,利用内、外表直积法,通过仿真分析给出了实现多元质量特性稳健设计的实施过程。需要说明的是应该注意下面两个问题:一是关于可调因素问题:对于 n 元质量特性 $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T$, 记其均值向量 $E(Y) = [E(Y_1), E(Y_2), \dots, E(Y_n)]^T$, 设计目标值为 $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)^T$, 定义 n 维向量的离差为 $\delta = \sqrt{[E(Y_1) - T_1]^2 + \dots + [E(Y_n) - T_n]^2}$, 类似于单变量可调因素的选择,可找出对 SN 比无较大影响,而仅对 $E(Y_i)$ 有显著影响的设计因素作为可调因素。这样的可调因素可能有多个,应按照对质量特性 Y_1, Y_2, \dots, Y_n

4 结 论

本文针对某无人侦察机隐身性能的要求,设计出两种低成本的翼面隐身结构方案。通过在微波暗室里对这两种结构模型 RCS 的测量分析和统计分析,表明这两种结构确能有效降低其 RCS 值。其中,水平极化时结构 1 的隐身性能好于结构 2;而垂直极化时,结构 2 比结构 1 更能有效地降低翼面的 RCS。

由于在这两种结构中,吸波材料置于结构内部而不是在飞行器表面,受环境影响较小,因而有利于维修保障。其中,结构 2 由于不使用吸波涂料,可避免由于飞行器振动或涂料老化等原因引起的材料脱落问题,因此,结构 2 的维修保障费用更低一些。

参 考 文 献:

- [1] Brown A C. Fundamentals of low radar cross-sectional aircraft design [J]. *J. of Aircraft*, 1993, 30: 289~290.
- [2] Whiteford R. Design for stealth in fighter aircraft [M]. AIAA 96-5540. 1996 *World Aviation Congress*, Los Angeles, CA, 1996. 10, 21~24.
- [3] Guy T A, Sanger K B, Ruskowski Ed. Low cost composite fabrication methods applied to low observable structure [J]. AIAA-95-1156, 1995.

的重要程度以及可调因素相对应的 $E(Y_i)$ 的影响程度,选择对最重要质量特性的均值影响最显著的可调因素为第一优先级可调因素,以此类推,对可调因素进行优先级排序,按照该次序逐次调整,使 δ 尽可能小。二是关于确认性试验问题:对于已选择的最佳设计因素水平组合,可类似于单变量情况,必须进行确认性试验,以确保稳健设计的可行性。

参 考 文 献:

- [1] Nair V N. Taguchi's parameter design: a panel discussion [J]. *Technometrics*, 1992, 34(2): 121~161.
- [2] Robinson T J, Bortor C M, Myers R H. Robust parameter design: A review [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2004, 20(1): 81~101.
- [3] Ma Yizhong, Zhao Fengyu. An improved multivariate loss function approach to optimization [J]. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2004, 13(3): 318~325.
- [4] Myers R H. Response surface methodology-current status and future directions [J]. *Journal of Quality Technology*, 1999, 31(1): 30~74.
- [5] 马义中,李言俊. 复杂制造系统中波动源的探测和分离 [J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(1): 8~9. (Ma Yi-zhong, Li Yan-jun. Detection and isolation of the variation sources in a complex manufacturing system [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(1): 8~9.)

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/>