

文章编号 1005-0388(2009)01-0095-04

一种飞翼布局无人机的 RCS 研究^{*}

刘春阳^{1,2}☆ 焦永昌¹ 张朋² 张福顺¹ 张麟兮²

(1. 西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 西北工业大学第 365 研究所, 陕西 西安 710072)

摘要 对一种飞翼布局无人机(UAV)模型的雷达散射截面(RCS)进行了理论仿真估算和微波暗室测量。在仿真估算中采用了一种物理光学法(PO)十等效电磁流(MEC)法的混合高频计算方法, 分别针对目标表面散射和目标边缘散射场进行计算。得出的理论结果与真实测量结果基本相符, 证明在解决电大尺寸模型的 RCS 估算时以这种方法计算具有较高的可信度, 能够满足仿真要求。

关键词 无人机; 物理光学法; 等效电磁流法; 雷达散射界面

中图分类号 TN011 文献标志码 A

Research on RCS of a UAV formed in flying wing configuration

LIU Chun-yang^{1, 2}☆ JIAO Yong-chang¹

ZHANG Peng² ZHANG Fu-shun¹ ZHANG Lin-xi²

(1. National Laboratory of Antenna and Microwave Technology,

Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China; 2. Institute No. 365

Northeastern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

Abstract The RCS of a UAV model is researched by testing in anechoic chamber and simulation computing. A mixed algorithm PO+MEC is provided. Physical optics calculation (PO) is used to compute the surface scattering of targets, and the method of equivalent currents (MEC) is used to compute the wedge scattering of targets edge. According to this algorithm, the RCS computation results of the UAV model obtained basically agree with the testing results. It proves that the algorithm used here is effectual for disposing large electrical model.

Key words unmanned air vehicle(UAV); physical optics(PO); method of equivalent currents(MEC); radar cross section(RCS)

引言

为了保证无人机(UAV)能够安全作业, 必须进行隐身设计工作, 在 UAV 的方案论证阶段就必须使用一种较为准确的 RCS 估算手段同气动相结合的办法来进行设计。考虑到 UAV 作为一种复杂的电大

尺寸模型可采用高频计算方法, 比如利用物理光学法(PO)计算模型表面散射场, 另外模型边缘散射场的影响可采用等效电磁流(MEC)方法^[1,2,4,5]计算得出。本文从 UAV 模型分析入手, 采用 Ku 波段的雷达电磁波仿真, 并将仿真估算的结果同对模型在微波暗室测量的结果进行了对比分析, 认为采用 PO+MEC 混

* 收稿日期: 2008-03-26.
(2006F15)

基金项目: 06 年西北工业大学科技创新基金(2006CR11); 陕西省自然科学基础研究计划

合算法对 UAV 进行仿真估算对 UAV 的隐身设计具有一定指导意义。

1 UAV 模型总体介绍

经过总体的方案优化设计和风洞吹风对比试验,本文所研究的 UAV 三维模型如图 1 所示。



图 1 UAV 模型三维视图

在具体的研究分析中只关心模型的电磁散射特性,要求模型在各个连接和拐角处尽可能的平滑连续,以便最终所计算和测试的数值结果尽可能真实地反映出模型的原始特征。

2 模型计算方法分析

整个目标模型的电磁散射总场数学模型可由下述公式说明

$$\mathbf{E}_{\text{all}}^s = \mathbf{E}_{\text{PO}}^s + \mathbf{E}_{\text{MEC}}^s \quad (1)$$

从公式(1)中我们可以看出,整个模型的散射场由两部分组成,即由物理光学法算出模型表面的散射场的(\mathbf{E}_{PO}^s)和模型本身结构所形成的边缘绕射场($\mathbf{E}_{\text{MEC}}^s$),而整个散射总场就是这两部分矢量叠加所形成的结果。

根据 RCS 的理论定义我们可以得出总散射场的 RCS 数学模型为^[1,2,6]

$$\sigma = 4\pi \lim_{r \rightarrow \infty} r^2 \frac{|\mathbf{E}_{\text{all}}^s|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} \quad (2)$$

假设由 PO 模型计算的部分由 N 个单元组成,由 MEC 模型计算的单元由 M 个单元组成,这样总的 RCS 值可表示为

$$\sigma_{\text{all}} = 4\pi \lim_{r \rightarrow \infty} r^2 \frac{\left| \sum_{i=1}^N (\mathbf{E}_{\text{PO}}^s)_i + \sum_{j=1}^M (\mathbf{E}_{\text{MEC}}^s)_j \right|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} \quad (3)$$

2.1 物理光学法计算^[1~3]

对于电大物体的表面散射场采用 PO 方法计算就是对整个表面的感应场进行近似积分求和^[1]。其算法的核心就是将目标采用平面面元分解,将整个目标物体的外壳结构用许多平面单元来拟合而整个散射场的值就是每个面元散射场值的总和。根据 Stratton-Chu 散射场积分方程表达式我们可以得出万方数据

表面散射场为

$$\mathbf{E}^s = -jk\Phi_0 \int_s s \times [\mathbf{n} \times \mathbf{E} + Z_0 s \times (\mathbf{n} \times \mathbf{H})] \times \exp[jkr \cdot (i-s)] dS \quad (4)$$

式中, k 为自由空间的传播常数; $\Phi_0 = \exp(jkr)/4\pi R$ 为远场格林函数; s 为散射方向的单位矢量; n 为表面的法向量; E 为表面单元感应出的电场分量; Z_0 为自由空间的波阻抗; H 为表面单元感应出的磁场分量; r 为从局部源到表面单元 dS 的位置矢量; i 为入射波单位矢量。

考虑到理想导体切向分量

$$\mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0 \text{ 以及 } \mathbf{n} \times \mathbf{H} = 2\mathbf{n} \times \mathbf{H}_i \quad (5)$$

式中, \mathbf{H}_i 为表面单元 dS 处的入射波磁场矢量,由 PO 方法得到的散射场表达式为

$$\mathbf{E}_{\text{PO}}^s = -j2kZ_0\Phi_0 \int_{S_1} s \times [s \times (\mathbf{n} \times \mathbf{H}_i)] \times \exp[jkr \cdot (i-s)] dS \quad (6)$$

式中, S_1 为入射波束照射部分。对于上式中散射场的积分求解文献[3] 中已有论述,Gordon 利用三角形平面单元来拟合整个目标区域,将式(6)中的散射场数学模型变为

$$\mathbf{E}_{\text{PO}}^s = \sum_N -j2kZ_0\Phi_0 \exp[jkr \cdot (i-s)] \times \frac{1}{|W|^2} [T_1 + T_2 + T_3] \quad (7)$$

$$\text{其中 } T_n = (W^* \cdot \Delta a_n) \operatorname{sinc}\left(\frac{k}{2}W\Delta a_n\right) \times \exp\left[\frac{jk}{2}W(a_n + a_{n+1})\right] \quad (8)$$

图 1 中的 UAV 模型经过我们利用三角形平面单元剖分后变为如图 2 所示的结构。采用三角型面元来拟合整个模型后,在每个面元上利用式(7)计算出散射场,另外按照 PO 方法的理论假设物体表面上只有被入射波直接照射到的区域才能产生感应电流形成散射场,因此一项十分重要的工作就是根据入射波与目标位置的几何关系来判定该面元上的遮挡关系^[4],利用每个三角面元的位置关系判断出整体目标的遮挡关系才能最终求得由 PO 法解出的散射场值。



图 2 UAV 模型剖分图

2.2 等效电磁流法分析^[1,2,4,5,10,11,12]

采用等效面磁流法计算边缘绕射场可以很好地解决在一致绕射理论(UTD)和几何绕射理论(GTD)中的散焦区场问题。MEC 方法的核心思想是假设在模型边缘表面各处都存在某种线电流 I_e 和线磁流 I_m ,由它们产生的绕射场可表示为

$$E_{\text{MEC}}^s = -jk\Phi_0 \int [I_m(s \times t) + Z_0 I_e s \times (s \times t)] \times \exp(jkr \cdot s) dt \quad (9)$$

式中, t 为沿边缘方向的单位矢量。根据几何绕射理论中的相关知识,A Michaeli 于 1984 年^[5,6]给出了线电流 I_e 和线磁流 I_m 的表达式为

$$I_e = j \frac{2(t \cdot E_i) D_e}{k Z_0 \sin^2 \beta_i} \quad (10)$$

$$I_m = -j \frac{2(t \cdot H_i) D_m}{k Y_0 \sin^2 \beta_i} \quad (11)$$

在(10)、(11)式中 β_i 、 β_s 分别是在电磁流处的局部边缘切向 t 与入射方向 i 和散射方向 s 所成的夹角; D_e 、 D_m 是绕射系数。如果考虑到交叉绕射的影响(10)式可变为^[1]

$$I_e = j \frac{2(t \cdot E_i) D_e}{k Z_0 \sin^2 \beta_i} + j \frac{2(t \cdot H_i) D_{em}}{k \sin^2 \beta_i} \quad (12)$$

式中, D_{em} 为交叉绕射系数^[1]。

3 估算与测试实验

为了得到一个尺寸较大飞行器的气动参数和隐身数据,一般在设计前期制作相关比例的模型,本文的 RCS 估算和测试工作就是利用某型 UAV 的模型展开的,模型参数为:翼展 2.86 m、机身长 0.93 m、高 0.43 m。在计算和测试时以 UAV 模型水平放置为俯仰 0°,机头方向为方位 0°。由于估算和测试数据较多,本文只列举和讨论 UAV 模型俯仰 0°(模拟匀速平飞状态)在频率 $f = 15$ GHz(Ku 波段)、垂直极化情况的数据。测试暗室净空尺寸为 25 m × 15 m × 15 m;环境温度为室温(25°C),测试天线选择 Ku 波段的方形喇叭口天线,垂直极化,参见图 3、4。

估算和测试结果的曲线如图 5 所示,将数据进行统计,给出了典型暴露方向的平均值,包括进入战区($0^\circ \pm 30^\circ$)、侧向暴露($90^\circ \pm 30^\circ$)、飞离战区($180^\circ \pm 30^\circ$)及全方向暴露($0^\circ \sim 180^\circ$)4 种情况,见表 1、2,平均值可以作为 RCS 的特征数据用以描述无人机在某一定角度范围的隐身性能。



图 3 微波暗室中的测试模型图

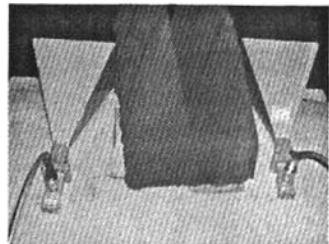


图 4 微波暗室 RCS 测试天线

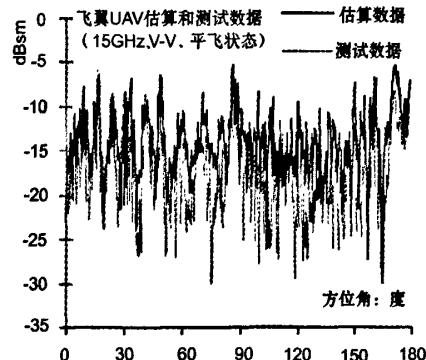


图 5 模型的测试值与理论估算值的比较图

表 1 UAV 估算 RCS 统计参数(15GHz)

计算角度范围 (°)	最大值 (dBsm)	平均值 (dBsm)	平均值 (m²)
$0^\circ \pm 30^\circ$	-5.647	-10.932	0.081
$90^\circ \pm 30^\circ$	-5.423	-15.501	0.028
$180^\circ \pm 30^\circ$	-4.334	-13.358	0.046
$0^\circ \sim 180^\circ$	-3.582	-13.397	0.046

表 2 UAV 测试 RCS 统计参数(15GHz)

测试角度范围 (°)	最大值 (dBsm)	平均值 (dBsm)	平均值 (m²)
$0^\circ \pm 30^\circ$	-8.599	-13.562	0.044
$90^\circ \pm 30^\circ$	-8.795	-18.246	0.015
$180^\circ \pm 30^\circ$	-6.833	-15.468	0.028
$0^\circ \sim 180^\circ$	-6.833	-16.082	0.024

从结果可以看出,由于对 UAV 外形采用翼身融合设计,飞机侧向(90°)的 RCS 较小,而机头方向 RCS 值稍偏大。对于执行侦察任务的 UAV 来说,在离作战区域一定距离以盘旋状态飞行模式,基本上侧向暴露为主,符合使用要求。

5 结 论

本文完成了一种 UAV 模型的 RCS 模拟估算和测试工作,从得到的工程测量结果与理论模拟估算结果对比分析,计算值比测试结果偏高 3dB 左右,对于一个电大尺寸的飞行器 RCS 估算来说,理论估算值与工程测量结果基本相符。说明了本文在理论计算时所采用的 PO+MEC 的方法是具有较高可信度的,基本可以作为无人机隐身设计前期的理论指导方法。

参考文献

- [1] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [2] Nazih N Youssef. Radar Cross Section of Complex Targets[J]. IEEE Proceeding, 1989, 77(5): 722-734.
- [3] GORDON W B. Far field approximation to the Kirchhoff-Helmholtz representation of the scattered field[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1975, 23(7): 590-592.
- [4] GORDON W B. High frequency approximations to the physical optics scattering integral[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1994, 42(3): 427-432.
- [5] MICHAELI A. Elimination of infinities in Equivalent Edge current's part I: fringe current components[J]. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1986, 34(7): 912-918.
- [6] MICHAELI A. Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation[J]. IEEE, Trans. Antennas propagate, 1984, AP-32(6): 252-258.
- [7] AIVESL M A, PORT R J, REZENDE M C. Simulations of the Radar Cross Section of a Stealth Aircraft [C]. IEEE, 2007 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC 2007), 2007, 409-412.
- [8] MALLAHZADEH A R. RCS Computation of Airplane Using Parabolic Equation [C]. IEEE, APMC2005, Proceedings, 2005 252-264.
- [9] WONG S K. Radar Cross-Section Measurements of a Full-Scale Aircraft Duct/Engine Structure [J]. IEEE, Transaction on Antennas and Propagation, 2006, 54(8): 2436-2441.
- [10] 徐云学, 龚书喜. 基于 MATLAB 的电大尺寸目标 RCS 计算系统研究[J]. 电波科学学报, 2007, 22(2): 266-270.
- [11] XU Yunxue, GONG Shuxi. RCS computation for electrically large target based on MATLAB software[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(2): 266-270.
- [12] 万顺生, 等. 一种翼身融合体飞行器外形的 RCS 计算与实验[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(4): 485-487.



刘春阳 (1965—), 男, 吉林人, 西北工业大学高级工程师, 西安电子科技大学博士生。主要从事电磁场计算、无人机隐身、无人机天线和无人机测控技术研究等工作。



焦永昌 (1964—), 男, 山西人, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 长期从事天线理论、设计、工程与测量方面的科研和教学工作。先后应邀赴日本、香港做高级访问学者。近年来, 共发表学术论文 70 余篇, 其中 40 余篇被 SCI、EI 检索, 主持和参加国家自然科学基金等多个科研项目, 曾获国家级和省部级科技奖 4 项。



张朋 (1978—), 男, 陕西人, 博士, 工程师, 主要研究方向为无人机测控、无人机隐身和雷达成像研究等。

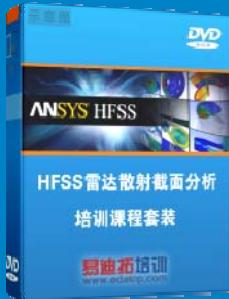
雷达散射截面（RCS）分析培训课程

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/>