

Research on Shape Stealth Technology of Military Aircraft

Guomin Lin

Xijing University, Xi'an
Email: gmlin@21cn.com

Received: Apr. 30th, 2014; revised: May 6th, 2014; accepted: May 14th, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The stealth technology is an important warrant to improve the defense penetration capability and attack capability of military aircraft while the shape stealth technology is one of the ways to realize stealth purpose. The concepts, the influence factors and the measure methods of radar cross section of military aircraft are introduced. The ways of reducing radar cross section, the principle of the shape stealth and technical measures of military aircraft are analyzed in detail. The latest research methods of stealth technology are predicted finally.

Keywords

Military Aircraft, Aircraft Shape, Stealth, Radar Cross Section (RCS)

军用飞机外形隐身技术研究

蔺国民

西京学院, 西安
Email: gmlin@21cn.com

收稿日期: 2014年4月30日; 修回日期: 2014年5月6日; 录用日期: 2014年5月14日

摘要

隐身技术是军用飞机提高突防能力和攻击能力的重要保证, 而外形隐身技术是军用飞机实现隐身目的的

主要途径之一。本文介绍飞机雷达散射截面、影响因素以及度量方法,详细分析了缩减飞行器雷达散射截面积的途径和飞机外形隐身设计应遵循的原则,分析了飞机外形隐身的测试求解方法,对隐身技术研究的最新方法予以预测。

关键词

军用飞机, 飞机外形, 隐身, 雷达散射截面

1. 引言

飞机隐身技术的开发与应用是航空武器技术发展的重要标志,是 21 世纪作战飞机提高突防能力和进攻能力的重要途径,隐身的目的就是降低飞机在战争环境中被发现的概率从而提高生存力[1]。隐身飞机的最大特色在于你看不见它;如果你能看见它,你击不中它;如果你能击中它,你也无法击落它;如果你能击落它,飞行员还活着[2]。飞机隐身设计就是在飞机设计的各阶段运用隐身技术来有效的控制和减小飞机的目标特征[3]。飞机外形隐身技术就是在一定的约束条件下设计飞机各部件和整机的外形,使它的 RCS 最小,主要理论依据来自各部件的电磁散射机理,目前采用的主要措施有[4]:① 采用翼身融合体,全埋式座舱和半埋式发动机,使机翼与机身、座舱与机身平滑过渡,融为一体;② 机翼采用飞翼、带圆钝前缘的 V 型大三角翼、低置三角翼、平底翼融合体以及活动翼结构等;③ 努力减少飞机表面容易造成散射的突起物、取消一切外挂武器和吊舱,将外挂设备全部置于机内;④ 借助机身遮挡强的散射源,将发动机进气口设在机身背部,进气道采用锯齿形;⑤ 座舱盖镀上金属镀膜,使雷达波不能透射入座舱内部;⑥ 采用倾斜双垂尾或 V 型尾翼;⑦ 采用尖形鼻锥;⑧ 改进天线罩,采用可收放天线等。

本文在介绍飞机雷达散射截面的基础上,详细分析了飞机外形隐身设计应遵循的原则,研究了飞机隐身的技术手段,预测了军用飞机外形隐身技术研究的最新方法。

2. 雷达散射截面

隐身技术就是雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)的减缩技术。RCS 是度量目标在雷达波照射下所产生回波强度的一种物理量。

2.1. 影响 RCS 的因素

RCS 的值主要取决于下列因素[5]:

1) 目标的物理特性。主要指目标材料的电性能。通过在飞机表面涂敷特殊的材料或飞机结构采用适当的电性能的材料,能有效地缩减飞机的 RCS。

2) 目标的几何外形。目标的几何外形与其 RCS 关系很大,可利用改变目标外形来控制 RCS。

3) 目标被雷达照射的方位。一般来说,目标的 RCS 随方位角变化剧烈。同一目标,由于照射方位不同,其 RCS 可以相差几个数量级。

4) 入射波的波长。波长对目标 RCS 影响很大。当入射波波长比目标尺寸大得多时,整个目标长度上的入射场的振幅和相位均无变化,称目标处于低频区;当入射波波长与目标的特征尺寸是同一数量级时,入射场的相位在整个目标长度上的变化很显著,称目标处于谐振区;当入射波波长与目标的特征尺寸相比很小时,目标上某一点对该目标其他点的散射场的贡献与入射场相比很小,称目标处于高频区。

由于绝大多数飞机都处于高频区,因此,对于一定的雷达系统和照射方位而言,RCS 的值主要取决于飞机的几何外形和材料的物理特性。

2.2. RCS 的单位和典型量值

由 RCS 的定义可知, 它的单位通常用平方米(m^2)来表示, 因目标的 RCS 随方位角变化剧烈, 故也常用 m^2 的分贝数(dB)来表示, 二者换算关系如公式(1):

$$r_{cs} = 10 \cdot \lg(RCS) \quad (1)$$

式中, r_{cs} 表示以 dB 为单位的雷达散射截面面积, RCS 表示以 m^2 为单位的雷达散射截面面积。表 1 列出了几种目标相对于某一波长和在某个方位区域内的 RCS 的典型值[6] [7]。

3. 飞机外形隐身设计原则

研究雷达探测隐身技术的目的就是减缩目标的 RCS。减缩目标 RCS 主要有三种途径:

- 1) 外形隐身技术。通过改变目标外形来降低目标的 RCS。
- 2) 材料隐身技术。采用雷达吸波材料来降低目标的 RCS。
- 3) 阻抗加载技术。飞机能自动根据接收雷达波的方向、频率来调整自身产生的电磁波来降低 RCS。

与飞机总体设计密切相关的是外形隐身技术。具有相同几何界面的目标, 由于电磁散射机理不同, 导致 RCS 差别很大(如图 1 所示)。通过改变飞机外形来减缩飞机 RCS 时, 应遵循以下原则: 改善飞机的总体布局以减少散射源; 变强散射源为弱散射源; 对强散射源进行遮挡; 控制散射方向, 使散射能量集中在雷达波威胁区域之外; 消除角反射器效应; 将飞机的雷达回波的主要能量控制在很窄方位内[8]。

3.1. 改善飞机的总体布局以减少散射源

飞机是一个很复杂的目标, 由多个部件组成。在雷达波照射下, 每个部件都会产生散射波, 形成多个散射源。由于飞机整机 RCS 是各散射源综合的结果, 通过减少飞机散射源的数量, 可降低其 RCS 值。在飞机设计中, 应设法减少部件数量和外挂物, 在机体表面尽量避免开口、缝隙、突起、凹陷和台阶, 使飞机表面尽量“干净”并保证机体表面的光滑和连续。

飞机有三种不同的基本形式: 正常式、鸭式和无尾式。从降低 RCS 的要求来考虑, 显然是选用无尾三角翼的形式最有利。如果将机身与机翼融为一体, 设计成完全无外露部件的飞翼的布局形式, 则对降低飞机的 RCS 更为有利。美国的 B-2 轰炸机就是按照这一原则设计成飞翼型的。

Table 1. Typical RCS values of targets

表 1. 几种目标的 RCS 的典型值

目标	RCS (m^2)	r_{cs} (dB)
昆虫	0.001	-30
鸟类	0.01	-20
人	1.0	0
F-117A	0.1	-10
B-2	0.01	-20
常规战斗机	10	10
B-1B	1.0	0
B-52	100	20
大型运输机	1000	30

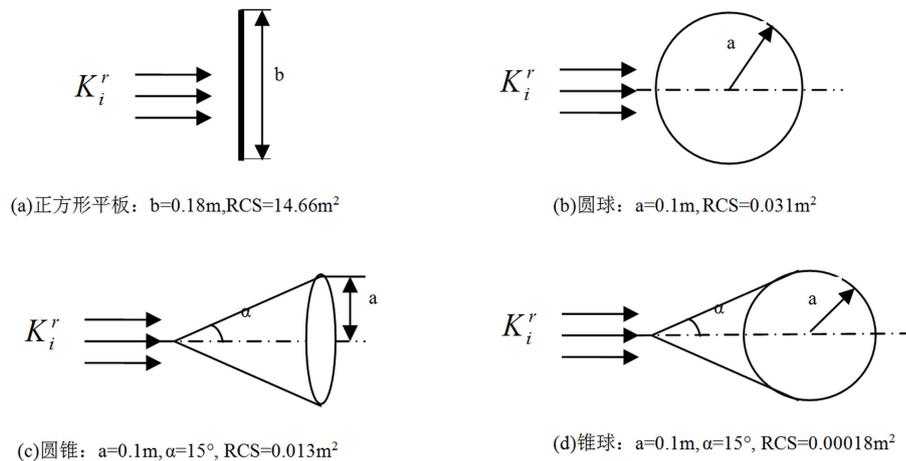


Figure 1. RCS comparison of objects with the same cross-sectional area

图 1. 几种几何截面积相同的物体的 RCS 比较

3.2. 变强散射源为弱散射源

在飞机的隐身设计中, 可通过修改飞机部件外形来减缩其 RCS, 从而提高飞机的隐身性能。通过对飞机部件外形的适当修改, 可以改变电磁散射的机理, 将强散射源改为弱散射源, 以降低飞机的 RCS。以椭球体为例, 经过适当的外形修改, 将椭球体的镜面反射转变为尖顶绕射, 可有效地降低目标的 RCS。在头部照射方位附近, 修改后的橄榄体的 RCS 比原椭球体的 RCS 要低 20 dBsm 以上。飞机的机身头部, 飞机的副油箱等部件的外形通常类似于椭球体, 通过对这些部件外形的修改, 能有效地降低它们的 RCS。同理, 尖劈形的机翼前缘的 RCS 要比圆柱形的机翼前缘的 RCS 小得多, 因为尖劈形机翼前缘所产生的边缘绕射与柱面形的机翼前缘所产生的镜面反射相比要弱得多[9]。

3.3. 对强散射源进行遮挡

在飞机的隐身设计中, 对于一些既不可避免又无法消除的强散射源, 则应设法对其进行遮挡。飞机通常由多个部件组成, 如果某一部件在某一雷达波照射区域内被其他部件所遮挡, 那么在该方位区域内, 这个部件对全飞机的 RCS 没有影响。因此, 如果能在主要的探测方位上, 用其中的一些部件对另外的强散射部件进行遮挡, 也是一种降低全机 RCS 的有效措施。例如, 将发动机短舱安排在机身的背部或机翼的后上方, 则对仰视雷达而言, 机身和机翼对发动机起遮挡作用。发动机短舱在有遮挡和无遮挡时 RCS 的变化情况如图 2 所示。用机身或机翼对发动机进行遮挡后, 大大地降低了全机的 RCS。B-2 就是采用背部式进气来提高其隐身性能。发动机压气机的导向器和转子是强散射源, 如果将进气道加长, 采用 S 形弯管进气道遮挡压气机, 使电磁波不能直接照射到压气机, 则可使其 RCS 降低。另外, 也可以利用金属栅网遮盖进气道。这种方法是在进气口加盖一个金属栅网, 栅网的网孔尺寸远小于雷达波长, 这样电磁波将从栅网上散射而不进入进气道。栅网的形体可以是凸面形的网或斜置平面网, 凸面形的网使电磁波分散各个方向散射以减小散射峰值, 斜置平面网可控制电磁波散射的方向, 将主要回波能量控制在雷达威胁区域之外的方向上。F-117A 就采用了斜置平面网来遮挡其发动机的。

飞机的座舱也是不可避免的散射源, 其中有飞行员和各种仪表设备, 座舱结构比较复杂, 形成一个空腔体。入射波经座舱盖后, 必然构成强反射。为了减弱其回波强度, 可以在座舱盖表面蒸镀上一层不透波的金属膜。遮挡住雷达波, 使其不能进入座舱内。这样的镀膜不影响舱盖的透明度, 既保证了飞行员的视野又降低了 RCS 值。

3.4. 使散射能量集中在雷达波威胁区域之外

对于特定的雷达系统，飞机在进行突防时，可将飞机的主要散射能量偏离雷达的照射区域(称为雷达的威胁区域)，从而降低飞机的后向散射能量，使飞机被雷达发现的概率降低。

目标的 RCS 随其外形和方位变化很大，可以通过改变目标的外形和被照射的方位来控制其散射方向，以减小目标在雷达威胁区域内的 RCS。例如，对于平板来说，当入射波垂直于平板来照射时，平板的 RCS 很大，但照射方向稍有变化时，平板的 RCS 急剧下降。因此，只要控制平板被电磁波照射的方位，就能大大降低其 RCS。雷达探测的范围一般在水平面上下 30° 范围内，F-117A 的外形就采用平板结构，把大多数平面设计成与垂直面夹角大于 30° 的平板结构，从而把该飞机的雷达散射波的主要能量控制在雷达威胁区域之外，极大地提高了飞机的隐身性能(如图 3 所示)。

3.5. 消除角反射器效应

由于角反射器在很大的方位角范围内都有很强的后向反射。为了减小飞机的 RCS 必须消除飞机上的

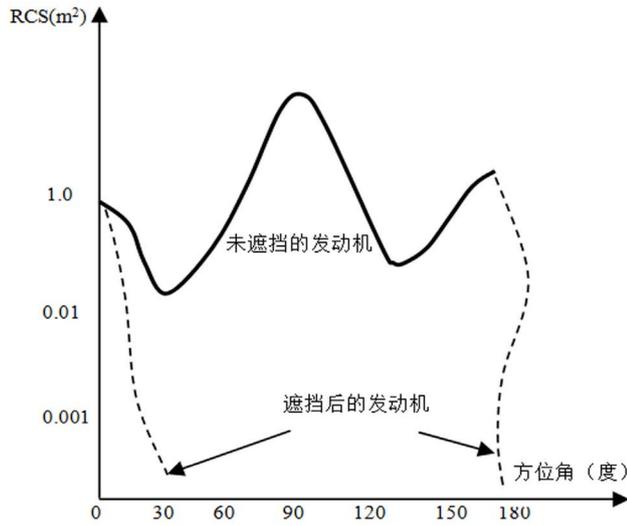


Figure 2. RCS curve of engine nacelle with blocking and without blocking
图 2. 有、无遮挡时发动机短舱的 RCS 曲线

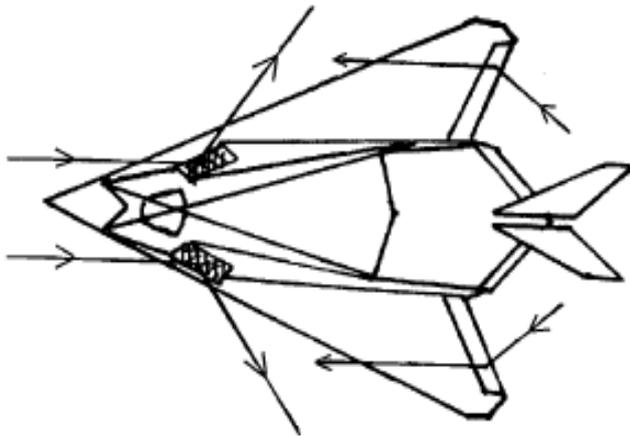


Figure 3. The plate type shape structure of F-117A
图 3. F-117A 的平板式外形结构

角反射器效应，常规飞机的垂直尾翼与水平尾翼互相垂直构成一个典型的角反射器，机身和机翼之间也可能存在角反射器。为了消除角反射器效应，只要将角反射器中的一个平面稍作倾斜，就可大大减缩其 RCS 值。例如 F-117A 和 F-22 采用的斜置尾翼布局和 B-2 采用的机身机翼融合体，可使飞机的 RCS 值成几何倍数的缩小。因此，从隐身设计角度来看，斜置尾翼和翼身融合体的布局具有显著的优点。

3.6. 将雷达回波能量控制在窄方位内

虽然通过采用一定的外形隐身措施能有效地减缩飞机的 RCS，但在某些方位上飞机总存在一些构成主要散射源的边缘或表面。为进一步减小飞机被雷达发现的概率，需将飞机的雷达回波的主要能量控制在少数很窄的方位内，使波峰之间的回波信号非常弱。由于回波峰值之间的 RCS 很小，与背景噪声难以区别，从而使敌方雷达接收不到连续的信号，难以确定飞机是一个实在的目标还是一个瞬变噪声。

B-2 隐身轰炸机的外形所有边缘的方向被设计成两个方向，就连进气道的唇口也设计成锯齿形状，以使唇口边缘方向与飞翼的前、后缘方向一致，当电磁波照射到飞机时，只有当入射波方向垂直于飞翼的前、后缘方向时，其 RCS 较大，其余方向上则很小。B-2 隐身轰炸机外形设计的意图就是将其 RCS 峰值在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 方位内控制在四个很窄的方位内。F-22 的外形设计也应用了这种隐身措施(如图 4 所示)。

4. 飞机外形隐身技术测试求解

飞机隐身的最主要的手段是外形隐身，其根本目的是研究目标对入射电磁波的反射特性。飞机外形隐身技术测试手段有实验测试、数值模拟、全波方法、积分方程求解等。

4.1. 实验测试

要进行精确实验测试，必须消除各种不利的误差。为此，可采用外场测试和微波暗室测试两种方法。

1) 外场测试。寻找一个开阔场地进行测试，入射波的品质容易保证，也比较容易测试目标的 RCS。其难点是无法消除环境误差。

2) 微波暗室测试。其基本原理就是在室内制造出一个纯净的电磁环境，将发送设备和接收设备架设到一起测试目标的 RCS。

4.2. 数值模拟

实验测试准确但局限性很大，如暗室不能建造得无限大；从实验测试的结果只知道 RCS 改变了，但无法精确判断目标对 RCS 的实际贡献。数值模拟方法可弥补这些缺陷。美国在隐身飞机设计中采用了几何绕射方法，我国现在用于目标 RCS 分析的成熟算法基于几何绕射或者物理光学法等近似方法[10]。

4.3. 全波方法

全波方法可精确地分析目标的电磁特性，它包括时域有限差分、有限元和积分方程等方法。从理论

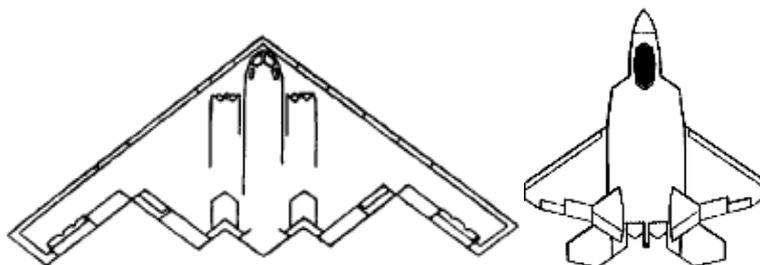


Figure 4. The control design along the shape edge direction of stealth aircraft
图 4. 隐身飞机外形边缘方向控制设计

上讲, 这些方法在求解电磁散射问题时不受电磁波频率的限制, 既适用于高频雷达波测试, 也适用于中低频雷达波测试。时域有限差分和有限元直接求解电场和磁场的场量。虽然在传递的过程中有误差, 但具有两种方法均比较直观、最后求解的都是稀疏矩阵、能够比较好的处理谐振问题、成本低等优点。

4.4. 积分方程求解

积分方程求解是针对电磁波在目标表面激发的感应电流和虚拟磁流。目标上不同部件之间的相互作用是通过格林函数来传递的, 不存在误差随目标尺寸增加而变大的问题。但有两个缺点[11]: 一是运算成本大, 因为它求解的是密集矩阵; 二是比较棘手, 在用积分方程在求解腔体问题时, 需要求解的是一个病态的密集矩阵, 计算起来比较繁琐, 计算工作量也比较大。

5. 飞机隐身技术研究发展趋势

隐身技术在未来的高技术战争中起着重要的作用, 直接影响着战局的态势。隐身技术的研究将从以下方面进行:

1) 进一步扩展隐身频段

目前, 隐身技术主要是针对厘米波雷达的, 但对其它波段的雷达隐身性能并不好。随着反隐身技术的发展, 防空雷达的工作频段将向毫米波、亚毫米波、红外、激光和米波段扩展。因此, 隐身频段也必须进行相应的扩展才能够很好的兼顾全频段隐身效果。

2) 加强特征测量技术

为了有效地控制目标的信息特征, 必须详尽地研究目标的信息特征, 因此将进一步重视发展目标信息特征测量技术, 提高测量精度。所采取的重要措施是建立可供隐身目标在逼真作战环境中进行测试和作战试验的试验场。未来的 RCS 测试场将以测量宽频带情况下的目标 RCS 为重点, 研究宽频带波形的目标响应。

3) 探索新的隐身机理

新的隐身机理, 主要技术措施有: 一是等离子隐身技术。试验证明, 包围飞机表面的等离子气体层, 对雷达波有特殊的吸收和折射特性, 使反射回雷达接收机的能量很少。二是应用仿生技术。研究发现, 海鸥与燕八哥的体积相近, 但海鸥的 RCS 却比燕八哥大 200 倍; 蜜蜂的体积小于麻雀, 但它的 RCS 反而比麻雀大 16 倍。仿生隐身机理值得深入研究。

4) 开发新型隐身材料

隐身材料是隐身技术发展的关键, 是隐身飞机不可缺少的物质基础。各国都在研制和开发新型隐身材料, 比较典型的隐身材料有两种: 一是纳米隐身材料, 它是指材料组分的特征尺寸在纳米级的材料, 具有极好的吸波特性; 二是智能型隐身材料, 它是一种具有感知功能、信息处理功能、自我指令并对信号作出最佳响应的材料和结构, 因而具有独特的隐身功能。

6. 结束语

为了提高军用飞机的生存力和突防能力, 实现“先敌发现, 先敌攻击, 先敌摧毁”, 飞机本身必须具有的超强的隐身能力。飞机外形隐身技术是最有效的隐身技术, 其效果占飞机总隐身效果的 80% 以上, 因此, 必须高度重视飞机隐身技术的研究工作, 特别是外形隐身技术的开发、应用, 以雷达散射截面研究为理论支撑, 采取各种措施以缩减雷达散射截面积, 使我军机在战场上游刃有余, 如入无人之境。

致 谢

本文能够发表, 首先得益于《国际航空航天科学》编辑老师和西京学院研究生部同事的大力支持;

同时也借鉴了参考文献中作者的学术成果；我的研究生尚苗、张文广两位同学也做出了一定的贡献，在此表示由衷的感谢！

参考文献 (References)

- [1] 桑建华 (2013) 飞行器隐身技术. 航空工业出版社, 北京.
- [2] 乙晓光 (2003) 隐形飞机及其克星. 兵器工业出版社, 北京.
- [3] 理查森 (1991) 现代隐身飞机. 科学出版社, 北京.
- [4] 贺媛媛 (2012) 飞行器隐身技术及发展. *飞航导弹*, **1**, 84-91.
- [5] 曹丽梅 (2012) 雷达隐身与反隐身技术发展综述. *现代导航*, **3**, 215-218.
- [6] 蔺国民 (2004) F-22“猛禽”战斗机综述. *飞机工程*, **1**, 9-14.
- [7] 蔺国民 (2004) 透视美国 B-2“幽灵”轰炸机. *飞机工程*, **2**, 13-16.
- [8] Hu, T.Y. and Yu, X.Q. (2007) Two-level optimization design approach for low RCS airframe shapes. *Aircraft Design*, **2**, 27-31
- [9] Lee, D.S., Gonzalez, L.F. and Srinivas, K. (2007) Multi objective design optimization of blended wing body UVA via advances evolutionary algorithms. AIAA-2007-36.
- [10] Anthony, A. (2003) Overview of design of experiments methods for computational simulations. *41st Aerospace Science Meeting*, Reno, 6-9 January 2003.
- [11] Timothy, W. (2010) Comparison of response surface and Kriging models for multidisciplinary design optimization. AIAA2982-4755.