

V218
1005

V218
1005-1

飞行器对雷达隐身性能 计算与分析

张 考 张云飞 著
马东立 丁林峰



一九九七年十二月廿七日



30765985

国防工业出版社

· 北京 ·

765985

图书在版编目(CIP)数据

飞行器对雷达隐身性能计算与分析/张考等著. —北京:
国防工业出版社, 1997.2

ISBN 7-118-01580-6

I. 飞… II. 张… III. 飞行器-隐身技术 IV. ①V218②
V418

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 01833 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7¼ 184 千字

1997 年 2 月第 1 版 1997 年 2 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 11.60 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

前言

飞行器隐身技术的成功应用,在航空发展史上,是继喷气推进技术的成功应用以后,又一次划时代的技术革命。自 1981 年隐身攻击机 F-117A 首次成功飞行以后,世界航空技术进入了一个新的历史阶段。在此以前,飞行器(作为一个载体)设计的努力方向,主要是气动特性的不断完善、结构效率及动力装置效能的不断提高。在此以后,不断降低可探测度已成为飞行器设计技术的一项新的追求。

降低飞行器可探测度的技术可统称为飞行器隐身技术。它是使飞行器被某些遥感装置很难发现,或发现后很难跟踪、瞄准的技术。

根据所对抗的遥感装置的类型,飞行器隐身技术可分为:雷达波隐身技术;红外(辐射)隐身技术;可见光隐身技术;声波隐身技术;电磁辐射隐身技术。其中前两项对提高飞行器的突防及空战生存率最为重要。

本书涉及的内容仅是对雷达波隐身技术部分,所讨论的问题是,飞行器在同雷达不同的对抗模式中,隐身性能的计算方法,以及利用这些方法定性、定量地分析提高飞行器隐身性能的方向及某些具体措施。

飞行器同雷达对抗的隐身性能,是指飞行器在空间任一方向上,在一定概率条件下,不被雷达发现,所能靠近雷达的最小距离。其主要内容包括:纵向逼近距离、隐身穿越的最小横距、尾向曝露距离及可探测范围图。如果应用雷达方程直接求解这些距离,只能是一种很粗略的大致估计,其结果有时甚至没有实际意义。因为,在作这样的估计时,雷达方程中表示目标 RCS(雷达散射截面)的

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允

曾铎

秘书长 刘琯德

委员 尤子平 朱森元 朵英贤

(按姓氏笔划为序)

刘仁 何庆芝 何国伟

何新贵 宋家树 张汝果

范学虹 胡万忱 柯有安

侯迁 侯正明 莫梧生

崔尔杰

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金出版委员会

基金出版委员会出版图书出版委员会

基金出版委员会出版图书出版委员会

基金出版委员会出版图书出版委员会

基金出版委员会出版图书出版委员会

基金出版委员会出版图书出版委员会

基金出版委员会出版图书出版委员会

基金出版委员会出版图书出版委员会

基金出版委员会出版图书出版委员会

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

因子 σ 通常被看作是与距离 R 及照射角度无关的一个变量。而实际上,飞行器在与雷达对抗的过程中,其 RCS 随着它与雷达间距离 R 的不断变化,照射角度也在不断变化,因而 RCS 也在剧烈地变化。在解决这一问题上,本书采用的方法是,通过绘制临界仰角图、临界俯角图及散射截面互等图来解决。这些图实际上是,将雷达检测一个目标所需的最小 RCS 随照射角度变化的曲线及该目标所能提供的 RCS 随照射角度变化的曲线画在同一坐标平面内或相互连系的两幅图内,通过比较所需的与所能提供的 RCS 之间的差值,实现各项隐身性能的分析与计算。其中,差值等于零的一点对应的照射角度或 RCS 具有特殊意义,称这样的角度及 RCS 为临界仰角、临界俯角及临界散射截面,这些参数是求解上述各项隐身性能的关键参数。对于飞行器设计者来说,这种方法是容易接受的。通常,飞行器设计者计算飞行性能采用的方法之一,是将飞行器保持平飞所需的功率随飞行速度变化的曲线及动力系统所能提供的功率随飞行速度变化的曲线画在同一坐标平面内,通过比较所需的与所能提供的功率之间的差值,完成各项飞行性能的计算。

临界仰角、临界俯角及临界散射截面不仅是求解各项隐身性能的关键参数,而且是指导隐身飞行器外形设计的关键参数。

临界仰角图、临界俯角图不仅是计算各项隐身性能的一种手段,而且还为飞行器隐身性能的改善、低 RCS 外形布局参数的确定、隐身材料的有效使用部位及隐身技术的研究方向,直接或间接地起到指导作用,对反隐身技术的研究方向也可给出一些有用的启示。

书中将飞行器突防及空战中同雷达之间可能发生的对抗模式归纳为三种,即在仰视照射下的对抗,在俯视照射下的对抗和在平视照射下的对抗,而且根据这三种对抗模式,分别讨论了飞行器隐身性能的计算方法。

雷达是否检测到了目标,是以一定的发现概率及虚警概率为条件的。飞行器是否处于隐身状态,也是以一定的发现概率及虚警

概率为条件的。那么,判断飞行器是处于隐身状态还是处于曝露状态,就需要一个概率界限。例如,发现概率小于某一数值,定为隐身状态,等于或大于此数值,就定为曝露状态。可是,至今还未看到国内外学术界对飞行器隐身状态的概率界限规定一个统一的指标。然而,不论将此概率界限定为多少,本书提供的隐身性能计算方法都能计算,而且各种计算方法均有算例作示范。

本书第一章及第四章由张考撰著;第二章由马东立和丁林峰撰著;第三章由张云飞撰著;第五章由张考、张云飞、马东立撰著;第六章由张云飞、马东立撰著。该书由张考筹划、指导并统稿。

本书自开始酝酿以来,在几年不断改进和充实过程中,得到北京航空航天大学毛士艺教授、周荫清教授、李少宏副教授、李景文副教授及航空航天部二〇七研究所戴朝明研究员的大力帮助,在此表示衷心感谢。

由于作者水平所限,书中错误及不妥之处在所难免,诚恳希望各方面专家提出批评、指正。

张 考

目 录

第一章 在雷达仰视作用下飞行器隐身性能的计算	1
§ 1-1 临界仰角法的基本概念及计算要点	1
§ 1-2 考虑大气折射影响的计算方法	8
§ 1-3 干涉区方向图传播因子 F 的计算	16
§ 1-4 过渡区方向图传播因子 F 的计算	25
§ 1-5 大气衰减因子 L_a 的计算	31
§ 1-6 系统噪声温度 T_s 的计算	32
§ 1-7 雷达系统特征常数 C_s 的计算	34
§ 1-8 不同发现概率时临界散射截面曲线的计算	37
§ 1-9 临界仰角图的绘制及临界仰角 θ_{cr} 的确定	43
§ 1-10 隐身性能的计算	49
第二章 在雷达俯视作用下飞行器隐身性能的计算	57
§ 2-1 PD 雷达方程的简化	57
§ 2-2 雷达系统特征常数 C_{s1} 和 C_{s2} 的计算	60
§ 2-3 PD 雷达临界散射截面曲线的计算	78
§ 2-4 对 MTI 雷达突防时 σ_{cr} 的计算	81
§ 2-5 隐身性能的计算	85
第三章 在雷达平视作用下飞行器隐身性能的计算	93
§ 3-1 散射截面互等法的概念	94
§ 3-2 雷达系统特征常数的计算	95
§ 3-3 在纯噪声中检测目标信号时 $\sigma_{cr}=h(R)$ 的计算	97
§ 3-4 在杂波加噪声中检测目标信号时 $\sigma_{cr}=h(R)$ 的计算	98
§ 3-5 表面杂波的计算	101
§ 3-6 $\sigma_{cr}=h(R)$ 曲线的计算步骤及散射截面互等图的绘制	103
§ 3-7 隐身性能的计算	108
第四章 飞行器隐身性能的空间特性	120

§ 4-1 减缩 RCS 的有效俯仰角	120
§ 4-2 有效俯仰角在可探测范围图上的反映	126
§ 4-3 减缩 RCS 的重点姿态角	130
§ 4-4 飞行器预期临界俯仰角及预期临界俯角的确定	137
第五章 飞行器若干低 RCS 外形参数的确定	143
§ 5-1 倾斜式双立尾主要外形参数的确定	144
§ 5-2 低 RCS 翼身融合体主要外形参数的确定	167
§ 5-3 通过重点姿态角确定某些低 RCS 外形参数	183
第六章 快速计算临界俯仰角及曝露距离的曲线	193
§ 6-1 雷达仰视作用	194
§ 6-2 雷达俯视作用	195
§ 6-3 雷达平视作用	196
参考文献	217

第一章 在雷达仰视作用下飞行器 隐身性能的计算

本章所解决的问题是:高于雷达天线 3000m 以上的飞行目标同雷达对抗时,隐身性能的计算方法。这种对抗模式不仅包括飞行器对陆基、海基雷达的对抗,也包括飞行器对机载雷达(预警机雷达及战斗机雷达)的对抗。

本章中包括的内容,除一部分是专门解决仰视照射状态的计算问题外,还包括了对仰视照射状态、俯视照射状态及平视照射状态通用或部分通用的一些计算问题,例如,考虑大气折射影响的计算方法、干涉区及过渡区方向图传播因子的计算、大气衰减因子的计算、系统噪声温度的计算等。

§ 1-1 临界仰角法的基本概念及计算要点

(一) 临界仰角法的基本概念

假设一个雷达目标从远方沿一恒定高度 h_t 飞近一部雷达,雷达天线的高度为 h_a (见图 1-1)。不难看出,目标相对于雷达天线之间的距离 R 在整个飞行过程中由大变小,当目标飞至雷达天线正顶上空时, R 变至最小值。在目标的飞行过程中,还有另一个不断变化的参数即目标相对于雷达波入射线的仰角 θ (见图 1-1~图 1-3。注意, X 轴为飞机水平基准线, X' 轴是飞机对称面与空间水平面的交线。空间水平面为过飞机重心且平行于地面的平面)。 θ 随 R 的变化可以用一个方程式加以概括,即

$$R = (a_e + h_t) \sin \theta \mp \sqrt{(a_e + h_a)^2 - (a_e + h_t)^2 \cos^2 \theta} \quad (1-1)$$

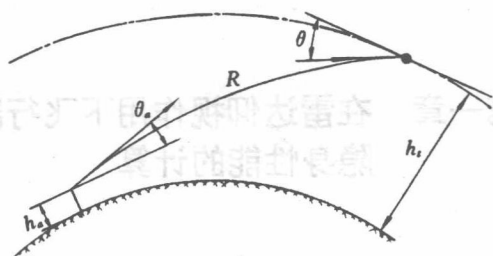


图 1-1 目标飞行过程中距离 R 及目标仰角 θ 的变化

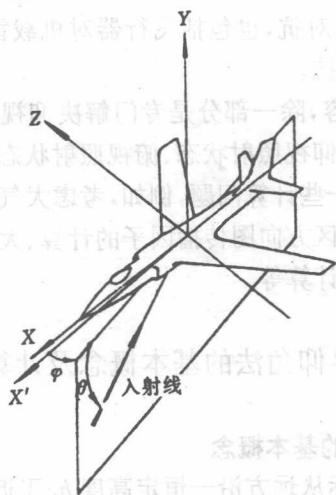


图 1-2 坐标系



图 1-3 X' 轴的定义

式中, a_e 为地球等效半径(见 § 1-2)。此式的推导见 § 1-10。

这是问题的一方面, 另一方面, 雷达的最大作用距离 $R_{\max}$ 同目标的散射截面 σ 之间存在着如下的关系:

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t \tau G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 k T_s D_0 C_b L_s L_a} \right]^{1/4} F \quad (1-2)$$

式中

$R_{\max}$ 为雷达最大作用距离;

σ 为目标的雷达散射截面;

P_t 为雷达发射机输出功率;

τ 为脉冲宽度;

G 为天线增益;

λ 为雷达工作波长;

$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{s/K}$, 为玻尔兹曼常数;

T_s 为系统噪声温度;

D_0 为最低可检测度因子;

C_b 为表示滤波器与信号波型匹配程度的系数, 在匹配情况下, $C_b = 1$, 不匹配, $C_b > 1$;

L_s 为系统损耗因子;

L_a 为大气损耗因子;

F 为方向图传播因子。

现在来设想一种特殊的雷达目标: 当这一目标沿一定高度 h_t 的航迹由远方逐渐逼近一部雷达的正顶时, 也就是当两者之间的距离 $R(\theta)$ 按照式(1-1)的规律由大逐渐变小时, 这一目标的雷达散射截面 σ 也逐渐变小。反之, 当此目标向着远离雷达的方向飞去时, 其散射截面 σ 就逐渐变大。其变小或变大时所遵循的规律就是时刻满足式(1-2)的要求。换句话说, 这种目标的雷达散射截面始终使探测它的雷达的作用距离处在最大作用距离上。把这种具有特殊性质的目标称为“临界目标”, 把它时刻变化的散射截面称为“临界散射截面”, 并用 σ_{cr} 表示。

临界目标在任何一部指定雷达照射下, 其临界散射截面 σ_{cr} 随

仰角 θ 的变化规律可表示为:

$$\sigma_{cr} = g(\theta) \quad (1-3)$$

式(1-3)可以设法由式(1-1)及式(1-2)求得。如果将式(1-3)绘成曲线,则其典型图形如图1-18所示。根据临界目标的定义, $\sigma_{cr}=g(\theta)$ 曲线上任一仰角 θ 对应的散射截面 σ_{cr} 都正好使照射它的雷达的探测距离处于最大作用距离上。也就是说,只要有任何一个目标,若其 σ 高于 $\sigma_{cr}=g(\theta)$ 曲线,则此目标就处在雷达的最大作用距离之内,即处于可探测范围内;若其 σ 低于 $\sigma_{cr}=g(\theta)$ 曲线,则此目标处于雷达的最大作用距离之外,即处于隐身范围之内。可见,在绘出 $\sigma_{cr}=g(\theta)$ 曲线以后,再将所讨论的飞行器的 $\sigma=f(\theta)$ 曲线也绘在同一坐标平面内(参见图1-15),则在一般情况下,可以得到两条曲线相交而成的两个交点。这两个交点对应的横坐标 θ_{cr1} 及 θ_{cr2} 称为“临界仰角”。同时包括 $\sigma_{cr}=g(\theta)$ 及 $\sigma=f(\theta)$ 的图称“临界仰角图”。不难看出,在两个临界仰角之间的区域内,所讨论的飞行器在各 θ 角上的 σ 值都大于相应 θ 角上的 σ_{cr} 值,因此,所讨论的飞行器处于可探测范围之内。在 θ_{cr1} 以左及 θ_{cr2} 以右的区域内,所讨论的飞行器在各 θ 角上的 σ 值都小于相应 θ 角上的 σ_{cr} 值,因此所讨论的飞行器处于雷达最大作用距离之外,即处于隐身范围之内。

图1-15只不过是方位角 $\varphi=0^\circ$ (见图1-2)时的一幅临界仰角图。为了全面计算隐身性能,还必须求出 $\varphi=10^\circ, 20^\circ, \dots, 360^\circ$ 等不同方位角上的临界仰角图,它们的形式与图1-15相似。

既然,临界仰角 θ_{cr} 反映了隐身区域的边界,那么,将各方位角上的 θ_{cr} 代入方程(1-1)并转换成地面上的投影距离,就可得到所讨论的飞行器在各方位上的曝露距离(目标同雷达间的距离小到此值就被发现),从而求出纵向逼近距离、可探测范围图等项隐身性能。

临界仰角是计算上述隐身性能的关键参数。临界仰角图不仅是确定临界仰角所必须的手段,而且还能为我们指出隐身飞机设计及隐身技术研究中的若干关键问题。

(二) 临界仰角法的计算要点

临界仰角法的目的主要是计算一架具体的飞行器在一部有代表性的具体雷达作用下的隐身性能。因此,用这种方法进行计算,必须具备两方面的数据:

(1) 所讨论的飞行器在不同 φ 角时雷达散射截面随仰角的变化关系,即

$$\sigma = f(\theta)$$

(2) 雷达对处于不同仰角时的目标的探测能力,即临界散射截面曲线为:

$$\sigma_{cr} = g(\theta)$$

关于所讨论的飞行器在不同 φ 角时的 $\sigma = f(\theta)$, 可以通过计算或模型测试,实物测试获得。这些问题不是本章的讨论范围。本章主要篇幅用来讨论 $\sigma_{cr} = g(\theta)$ 曲线的计算问题。

在方程(1-2)的右边,除 σ 以外的其它参数如果都同目标至雷达天线的距离 R 无关,那么只需将方程(1-1)与方程(1-2)联立(令 $R_{max} = R; \sigma = \sigma_{cr}$),就可直接写出 $\sigma_{cr} = g(\theta)$ 的代数式。但是,问题很不凑巧,方程(1-2)中的 F 、 L_a 及 T , 都是与 R 及天线仰角 θ_a (见图 1-4)有关的参数。在这种情况下,求解上述两个联立方程,就变为一个相当复杂的过程。这里的方法是先算出 $\sigma_{cr} = g(\theta)$ 曲线,然后用图解法或计算机迭代求得两条曲线的交点。

在计算 $\sigma_{cr} = g(\theta)$ 曲线的过程中,必须考虑大气折射对传播路径的方向及距离的影响,海面或地面的反射波对目标散射场的干涉作用,雷达信号在绕射区或半绕射区受到的衰减对雷达探测能力的影响。而这些问题的大部分都体现在方程(1-2)中衰减因子 L_a 及方向图传播因子 F 的计算过程中。

在 F 的计算过程中,难于处理的问题之一是确定所讨论的飞行器在突防过程中将要飞越什么样的海面状态(浪高多少、顺风还是逆风)及地面状态(地质状态、干湿程度、几何状况、植被状况等)。作为一个算例,本章选择了浪高 $H_{\frac{1}{3}} = 1.2\text{m}$ 的海面作为计算

F 的原始资料。

F 、 L_a 及 T_i 的计算需要按不同的目的与方法进行两次。

第一次计算 F 、 L_a 及 T_i 是先指定一个目标飞行高度 h_i ，将作用距离 R 、天线仰角 θ_a 作为这三个参数的变量。计算的目的是为了得到指定高度上的 $\sigma_{cr} = g(\theta)$ 。

第二次计算 F 、 L_a 及 T_i 是将 R 作为一个常数，即为雷达性能数据中给出的该雷达的最大作用距离 $\hat{R}_{max}$ 。这时，只将 θ_a 作为这三个参数的变量，也不再指定飞行高度 h_i 。计算的目的是为了找到使该雷达获得 $\hat{R}_{max}$ 的天线仰角 $\hat{\theta}_a$ 。因为，只有找到了 $\hat{\theta}_a$ 才能找到与 $\hat{R}_{max}$ 相匹配的 F 、 L_a 及 T_i 。找到这些相互匹配的参数是为了计算“雷达系统特征常数”。

第一次计算不能代替第二次计算，这是因为第一次计算中指定了目标飞行高度，而使一部雷达获得 $\hat{R}_{max}$ 的目标所在高度并不服从我们指定的高度。

将方程(1-2)中所有不随 R 及 θ_a 变化的参数合并成一个因子 C_i ，并从方程(1-2)中解出(参见式(1-64)、式(1-65))，则得：

$$C_i = \frac{\hat{R}_{max}^4 T_i L_a}{\delta F^4} \quad (1-4)$$

C_i 称为“系统特征常数”。式中， F 、 L_a 及 T_i 就是上述与 $\hat{R}_{max}$ 相匹配的三个参数； δ 是使该雷达获得 $\hat{R}_{max}$ 的目标散射截面。

接下去，可以通过式(1-5)求得某一发现概率时的 $\sigma_{cr} = g(\theta)$ ，即

$$\sigma_{cr(\hat{P})} = \frac{R^4 T_i L_a}{C_i(\hat{P}) F^4} \quad (1-5)$$

式中下标 $\hat{P}$ 表示雷达性能指标中为 $\hat{R}_{max}$ 规定的发现概率(比如 80%)； F 、 L_a 及 T_i 就是前述第二次对此三个参数计算所得的结果。由于这三个参数及 R 都是 θ_a 的函数，而 θ_a 与 θ 之间又存在着对应关系，所以通过上式可以算得发现概率为 $\hat{P}$ 时的 $\sigma_{cr(\hat{P})}$ 为：

$$\sigma_{cr(\hat{P})} = g(\theta) \quad (1-6)$$