

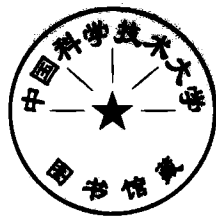
雷达截面与隐身技术

阮颖华 等编著

国防工业出版社

雷达截面与隐身技术

阮颖铮 等编著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

雷达截面与隐身技术/阮颖铮等编著. —北京: 国防工业出版社, 1998. 6

ISBN 7-118-01851-1

I. 雷… II. 阮… III. ①雷达信号-散射截面-基本知识
②隐身技术 IV. TN974

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 27194 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 12 $\frac{3}{8}$ 329 千字

1998 年 6 月第 1 版 1998 年 6 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 23.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

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出出版。

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

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

评审委员会

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

序 言

隐身技术，是现代军事上隐蔽自己以免敌人发现，借以增强突击能力或保护自身的重要手段。其中飞行体对雷达波的隐身，使一般雷达失去或降低探测能力、具有突出的意义。武器或飞行体的隐身性能，主要决定于它们对雷达波散射截面的大小，因而以各种方法缩减雷达截面，就成为研究隐身技术的主要目标。

本书首先从理论上对不同外形目标的电磁散射特性的分析出发，计算其雷达截面；进一步讨论多种缩减截面的原理和方法；其中包括对载体上的无线电天线的截面分析和隐身技术，这在其他著作中是很少提到的。书中还包括雷达截面的测量技术和测量的数据处理技术，这是进行实际工作时所不可缺少的重要知识。

本书理论联系实际，内容反映了我国在这一领域中做出的研究成果，有较高的学术水平和广泛的应用价值；相信本书的出版，对于在隐身技术领域方面工作的研究和工程人员，都可以起到很好的参考作用。

陈芳允

1996.8

前 言

1991 年海湾战争结果表明,现代战争首先是电子高科技的对抗,而雷达探测、目标的雷达截面和隐身技术,又是其最主要的对抗领域之一。国外在该学科技术领域已研制出多种具有低可探测性的隐身飞行器,如美国的 F-117A 隐身战斗攻击机、B-2 隐身轰炸机等,并已先后在多次局部战争中起关键作用。国内自 80 年代以来,也相继开展了各种专题研究,包括飞行目标的各种电磁散射机理,关键部件和整机的雷达截面分析,雷达截面的室外和室内测试技术,外形隐身和雷达吸波材料隐身技术等。本书根据作者在电子科技大学先后 9 次讲授研究生课程“雷达截面理论”的讲稿,经补充和修改而成。书中收集了国内外有关专家学者在该领域的研究成果和新近发表的有关论著,其中也包括作者所在课题组近年来的部分研究成果和论著。

本书内容包括目标的雷达截面理论和隐身技术,重点阐述雷达截面的计算方法,测试技术和减缩技术。全书共分七章:1. 绪论:雷达及其对抗,目标的雷达特征,反雷达隐身技术;2. 雷达截面基础:雷达截面的概念,简单形体的散射特征,复合目标的雷达截面,自然目标的雷达截面;3. 雷达截面分析方法:经典解法,积分方程解法,几何光学法,物理光学法,几何绕射理论,物理绕射理论,复射线理论,表面波的散射;4. 凹形结构的雷达截面分析:空腔结构的雷达截面,角形结构的雷达截面;5. 天线的雷达截面分析:天线的散射机理,反射面天线的雷达截面,阵列天线的雷达截面;6. 雷达截面减缩技术:雷达截面减缩原理,外形隐身技术,雷达吸波材料,频率选择表面,天线隐身技术;7. 雷达截面测量技术:雷达截面测量的目的和类型,雷达截面测量

的技术要求，室外雷达截面测量，室内雷达截面测量，数据处理。

本书内容新颖，系统性强，理论与实际并重，对于雷达、制导、电子对抗、军用目标特性、隐身技术、反隐身技术、电磁场与微波技术、航空航天技术等学科领域的科学研究人员、工程技术人员、高校教师和研究生等，都具有较好的参考价值。

本书由阮颖铮教授主编，参加本书编写和资料收集工作的还有冯林教授、邓书辉博士、殷红成博士、杜惠平博士、杨超博士、刘万明博士、周海京博士、林军博士等，全书插图和文字校核工作由邓筱玲同志完成。

本书初稿承蒙中国科学院院士、国防科工委科技委委员陈芳允教授审阅，并提出不少宝贵的修改意见；编写过程中得到中国科学院陈芳允院士和林为干院士、北京理工大学柯有安教授、西安电子科技大学汪茂光教授等老前辈的鼓励与指导；本书的出版得到国防科技图书出版基金的资助和国防工业出版社领导和同志们的大力支持，特此一并致谢。由于作者水平所限，书中错误难免，恳望读者不吝指正。

作者 1997 年 8 月

于电子科技大学（成都）

内 容 简 介

本书系统地讨论了雷达截面的基本理论、分析方法、减缩技术和测量技术。全书共分七章。第一章绪论,介绍雷达及其对抗,目标的雷达特征和反雷达隐身技术;第二章雷达截面基础,介绍雷达截面的概念,以及简单形体、复合目标和自然目标的散射特征;第三章雷达截面分析方法,包括经典解法、积分方程解法、几何光学及几何绕射理论、复射线理论、物理光学和物理绕射理论、表面波的散射等;第四章介绍以开口空腔和角反射器为代表的凹形结构的雷达截面分析;第五章分析天线的雷达截面和散射机理,着重讨论各种反射面天线和阵列天线的雷达截面;第六章雷达截面减缩技术,讨论各种隐身技术的原理和方法,包括外形隐身、雷达吸波材料、频率选择表面和天线隐身技术等;第七章介绍雷达截面测量的理论,室外和室内测量方法,以及测量数据的处理等。本书内容新颖,系统性强,理论与实际并重,可作为工程技术人员及高等院校研究生的参考用书。

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 雷达及其对抗	(1)
1.1.1 雷达概述	(1)
1.1.2 雷达方程	(2)
1.1.3 雷达对抗	(3)
1.2 目标的雷达特征	(6)
1.2.1 雷达截面理论分析	(7)
1.2.2 雷达截面测量技术	(9)
1.3 反雷达隐身技术	(10)
1.3.1 反雷达隐身技术的应用	(10)
1.3.2 反雷达隐身技术的途径	(11)
1.3.3 国外隐身技术的发展	(12)
第二章 雷达截面基础	(30)
2.1 雷达截面的概念	(30)
2.1.1 雷达截面的定义	(30)
2.1.2 雷达截面的特征	(33)
2.1.3 雷达截面的频率特性	(37)
2.2 简单形体的散射特征	(45)
2.2.1 球	(45)
2.2.2 扁椭球体	(48)
2.2.3 细长物体的行波散射	(51)
2.2.4 细导线	(52)
2.2.5 圆锥	(53)
2.2.6 平板	(53)
2.2.7 角反射器	(55)

2.2.8 简单形体分类	(57)
2.3 复合目标的雷达截面	(62)
2.4 自然目标的雷达截面	(65)
第三章 雷达截面分析方法	(67)
3.1 引言	(67)
3.2 经典解法	(69)
3.3 积分方程解法	(74)
3.3.1 电磁场积分方程	(75)
3.3.2 边界条件	(78)
3.3.3 未知电流求解过程	(79)
3.3.4 散射场	(82)
3.3.5 求解实例	(84)
3.3.6 与高频解法的比较	(89)
3.4 几何光学法	(92)
3.4.1 几何光学基本原理	(92)
3.4.2 高频场的几何光学求解	(95)
3.4.3 双重弯曲物体的雷达截面	(97)
3.5 物理光学法	(99)
3.5.1 物理光学积分公式	(99)
3.5.2 平板的散射	(102)
3.5.3 金属圆柱的散射	(104)
3.5.4 金属球的散射	(109)
3.6 几何绕射理论	(110)
3.6.1 几何绕射理论的基本假设	(110)
3.6.2 劈边缘的绕射	(111)
3.6.3 等效电磁流法	(118)
3.7 物理绕射理论	(120)
3.7.1 物理绕射理论的绕射系数	(120)
3.7.2 增量长度绕射系数	(123)
3.8 复射线理论	(125)
3.8.1 复源点场	(126)
3.8.2 复射线追踪和近轴近似	(128)

3.9 表面波的散射	(130)
3.9.1 表面行波的散射	(130)
3.9.2 表面蠕波的散射	(133)
3.9.3 表面导波的散射	(134)
第四章 凹形结构的雷达截面分析	(137)
4.1 引言	(137)
4.2 空腔结构的雷达截面	(138)
4.2.1 用导波模式法分析空腔结构的 RCS	(139)
4.2.2 用几何光学法分析空腔结构的 RCS	(143)
4.2.3 用高斯波束法分析空腔结构的 RCS	(146)
4.2.4 用复射线法分析空腔结构的 RCS	(149)
4.2.5 典型计算结果举例	(151)
4.3 角形结构的雷达截面	(155)
4.3.1 用物理光学法分析角形结构的 RCS	(156)
4.3.2 用复射线法分析角形结构的 RCS	(165)
4.3.3 用复射线法分析吸波涂层角形结构的 RCS	(168)
4.3.4 典型计算结果举例	(172)
第五章 天线的雷达截面分析	(183)
5.1 天线的散射机理	(183)
5.2 反射面天线的 RCS	(186)
5.2.1 单反射面天线的 RCS	(187)
5.2.2 柱形反射面天线的 RCS	(199)
5.2.3 双反射面天线的 RCS	(208)
5.3 阵列天线的 RCS	(215)
5.3.1 振子天线阵的 RCS	(215)
5.3.2 裂缝天线阵的 RCS	(222)
5.3.3 微带天线阵的 RCS	(229)
5.3.4 介质天线阵的 RCS	(241)
5.3.5 周期阵结构的 RCS	(248)
第六章 雷达截面减缩技术	(254)
6.1 雷达截面减缩原理	(254)
6.1.1 雷达截面减缩的意义	(254)

6.1.2	雷达截面减缩的一般原则	(255)
6.1.3	闪烁点的识别	(256)
6.1.4	雷达截面减缩的技术途径	(258)
6.2	外形隐身技术	(261)
6.2.1	外形隐身原理	(261)
6.2.2	舰船的外形隐身	(264)
6.2.3	飞行器的外形隐身	(266)
6.3	雷达吸波材料	(269)
6.3.1	吸波材料隐身原理	(269)
6.3.2	电吸收材料	(271)
6.3.3	磁吸收材料	(280)
6.4	频率选择表面	(285)
6.4.1	概述	(285)
6.4.2	频率选择表面的设计与分析	(289)
6.4.3	计算结果举例	(290)
6.5	天线隐身技术	(298)
6.5.1	天线系统的 RCS 系数	(298)
6.5.2	天线系统隐身途径	(300)
6.5.3	隐身天线实例	(306)
第七章	雷达截面测量技术	(314)
7.1	雷达截面测量的目的和类型	(314)
7.1.1	雷达截面测量的目的	(314)
7.1.2	雷达截面测量的类型	(316)
7.2	雷达截面测量的技术要求	(322)
7.2.1	远场测量条件	(322)
7.2.2	背景噪声的影响	(325)
7.2.3	目标支撑结构	(327)
7.2.4	目标与地面的干涉	(331)
7.3	室外 RCS 测量	(335)
7.3.1	室外 RCS 测量的特点	(335)
7.3.2	室外 RCS 测量设备	(336)
7.3.3	地面的影响	(339)

7.3.4 实际地面的反射系数	(342)
7.3.5 地面影响的消除	(345)
7.3.6 天线方向图的影响	(347)
7.4 室内 RCS 测量	(352)
7.4.1 室内 RCS 测量的特点	(352)
7.4.2 暗室吸波材料	(352)
7.4.3 暗室结构	(355)
7.4.4 紧缩场结构	(357)
7.4.5 室内 RCS 测量设备	(362)
7.5 数据处理	(370)
7.5.1 原始数据	(370)
7.5.2 平滑数据	(374)
7.5.3 统计数据	(376)
7.5.4 简化数据	(379)
7.5.5 仿真数据	(379)
参考文献	(382)

第一章 绪 论

1.1 雷达及其对抗

1.1.1 雷达概述

雷达是迄今为止最为有效的远程电子探测设备，它根据雷达目标对雷达波的散射能量来判定目标的存在并确定目标的位置。雷达的工作频段覆盖了 $3\text{MHz}\sim 300\text{GHz}$ 的频率范围，但绝大多数雷达工作在微波波段，特别是 X 波段 ($8\sim 12\text{GHz}$) 和 Ku 波段 ($12\sim 18\text{GHz}$)，它们是机载雷达最主要的工作频段。

从雷达出现到现在，雷达技术已有了巨大的改进和发展。在发射机方面，采用了高功率行波管、毫米波功率管和固态微波源；在接收机方面，固态技术改进了混频器并使低噪声放大器得以发展；在天线方面，大型相控阵天线已进入实用；在信号处理方面，已广泛使用小型快速数字计算机。现代雷达的功能已不仅能够发现目标并测定其位置（距离、方位、仰角或高度），而且能够跟踪目标，连续测量目标的位置和运动参数（速度、加速度、航向和航迹等）。雷达成像技术及其他目标识别技术，还可进一步确定目标的类型和数量；而先进的雷达组网技术，则可使各种来袭目标在数百乃至数千公里之外就处于被严密监视状态。因此，现代雷达技术对各种军用飞机、导弹、舰艇和坦克等目标构成了致命的威胁，成为当前最为有效的远程探测手段。

雷达探测的基本原理和最重要的系统特征可用雷达方程来描述。

1.1.2 雷达方程

雷达方程是描述雷达系统特性的最基本的数学关系。在雷达方程的完整形式中,计入了雷达系统参量、目标参量、背景影响(杂波干扰和噪声)、传播影响(折射和绕射)、传播介质(吸收和散射)等各种因素对雷达作用距离的影响。因此,雷达方程不仅对雷达系统和雷达部件的研制者有重要意义,而且对目标特性、隐身和反隐身技术研究来说,透彻了解雷达方程及其意义也是十分必要的。

假定雷达发射机有 P_t (W) 的功率输出,这个功率传送到效率为 1 的无方向性天线时,它在离天线距离 R 处的辐射功率密度 s_r 可简单地表示为发射功率除以平均扩散的球面积:

$$s_r = P_t / 4\pi R^2 \quad [\text{W/m}^2] \quad (1.1)$$

如果利用定向天线代替无方向性天线,则在空间一点的辐射功率密度会由于天线在该方向的功率增益 $G_t(\theta, \varphi)$ 而增大,这里 θ 和 φ 定义为主平面内偏离天线主波束轴线的角度。假定只讨论目标位于雷达主波束内这一最简单的情况,则与雷达相距为 R 的目标处的辐射功率密度为(假定目标位于主波束轴线上)

$$s_r = P_t G_t / 4\pi R^2 \quad [\text{W/m}^2] \quad (1.2)$$

式中, G_t 是发射天线的最大增益。

雷达截面(RCS)的严格定义将在下一章讨论,这里仅把 RCS 定义为某一个投影面积 σ ,并假定面积 σ 所截获的能量以各向同性方式辐射的功率等于目标朝向接收机所实际辐射的功率。因此,目标截获的功率为

$$P_T = s_r \sigma = P_t G_t \sigma / 4\pi R^2 \quad [\text{W}] \quad (1.3)$$

由于该功率各向同性辐射,因此在雷达接收天线处由目标散射的功率密度 s_r 为(假定接收天线与发射天线同极化)

$$s_r = P_T / 4\pi R^2 = P_t G_t \sigma / (4\pi)^2 R^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (1.4)$$

被雷达天线接收的功率 P_r 可简单地表示为天线处的功率密度 S_r 乘以接收天线的有效截获面积 A_c 。根据天线理论可知,增益