

電子工業出版社

雷达散射截面

—预估、测量和减缩

〔美〕E. F. 克拉特等 著

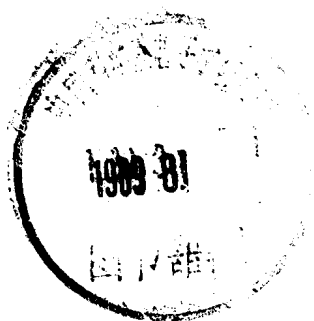
阮颖铮 陈海等 译

阮颖铮 校

雷达散射截面

—预估、测量和减缩

〔美〕 E. F. 克拉特等 著
阮颖铮 陈海等 译
阮颖铮 校



电子工业出版社

8510731

DOK/2

内 容 简 介

本书从电磁散射理论和雷达工程实际出发,对目标的雷达散射截面(RCS)进行了完整、系统和深入地讨论,并着重讲述了雷达截面的基本概念,各种电磁散射机理,各种分析计算和测试方法,以及降低目标雷达截面的各种技术途径。全书共分十四章,包括:引言;雷达基础;电磁散射概论;精确预估技术;高频RCS预估方法;雷达散射截面的概念;雷达截面减缩;多层介质散射的分析;雷达吸收体;雷达吸收体测量技术;RCS测量的要求;室外RCS测试场室内RCS测试场;数据分析和简化。

本书内容新颖,题材广泛,讲述深入浅出,理论联系实际。不仅可供雷达与电子对抗、电磁场与微波技术、目标与环境特性、隐身与反隐身技术等有关专业的研究生和本科生作为教学用书,而且对航空、航天、造船、兵器、机械、电子、材料等学科和工业部门的教学、科研和工程技术人员亦有重要的参考价值。

雷 达 散 射 截 面

——预估、测量和减缩

(美) E·F·克拉特 等著

阮颖铮 陈海 等译

阮颖铮 校

责任编辑:王昌铭

电子工业出版社出版 (北京海淀区万寿路)

书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京顺义李史山胶印厂印刷

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 14 字数: 363.7千字

1988年11月第一版 1988年11月第一次印刷

印数: 1—2000册 定价: 5.50元

ISBN7-5053-0383-X/TN144

译者序

雷达散射截面（简称雷达截面）是雷达探测技术与反雷达隐身技术的一个重要特征。目前国内尚未公开出版这方面的专著，我们将这本“雷达散射截面——预估、测量和减缩”翻译出来，希望能有助于这一领域的教学和科学研究。

本书由成都电讯工程学院电磁场工程系部分教师集体翻译。参加本书翻译工作的有：阮颖铮、陈海、韩晓英、聂在平、陆亿洸、冯林、何玲、钟庆丰、王月清、康洁、蒋正平。全书译稿由阮颖铮教授负责校审，并由陈海副教授负责文字、符号和术语的统一。由于译者水平有限，译文中错误难免，恳望读者不吝指正。

译者

1987年10月

原 序

雷达截面这个术语及其缩写 RCS 是雷达系统领域中多数科学家和工程师们所熟悉的，但对其他人来说，它似乎是由雷达波束搜索到的物体或目标的一个模糊的特征。他们也许已经知道或听说过，这个奇特的面积并不一定是物体的几何面积；如果不是，那它又是什么呢？雷达这一名称本身也许会使人们回想起在大学里所学的那些困难的电磁课程，因此，对某些人来说，雷达截面的概念就显得神秘和难以捉摸。

为使那些对本门学科确能胜任的科学家和工程师们了解这些看来是新的和不熟悉的技术，佐治亚技术研究所于 1988 年 1 月开设了一个短期课程：雷达截面减缩。该课程不仅讨论了什么是雷达截面，还讨论了如何减小它。这一学术讲座提供了一本超过 700 页的讲义，本书就是以该讲义为蓝本的。

读者将会发现，本书不打算作为一个应有尽有的述评或专题论文，那样会影响我们的目的，因为我们希望初学者了解那些可以很快成为一门非常复杂学科的内容。至于要求更详细地了解这一学科的读者，若干有价值的书籍都深入地研究了各种预估和测量方法。此外，这些书多数是经典著作，比本书包括的信息要多得多。读者可在每章末所列的参考文献中找到许多这样的书籍和论文。

按照我们的目的来介绍 RCS 的特点而不考虑其复杂性，则本书可分为五个篇章。第一、二章包括背景材料；第三至五章介绍散射概念并提出有用的 RCS 预估方法；第六章给出简单物体和复合物体 RCS 特点的实例；第七至九章陈述雷达截面减缩方法；第十至十三章讨论测量吸收体特性和目标散射特性的方法，第十

四章考察识别目标散射机理的一些实际途径。

读者将了解到，在这个领域内一直保持着技术上的进展，今后将继续如此。甚至在出版本书期间，测量和预估方法也还正在修改和完善。此外，从国家安全的角度出发，雷达截面的测量、预估和减缩技术的某些问题也不能在本书中涉及。因此这本书就不可能象作者所期望地那样详细和完善。尽管如此，我们认为本书仍可满足工程界的需要，希望读者同意这一点。

Eugena F. Knott

John F. shaeffer

Michael T. Tuley

1985年6月

致 谢

本书是在许多人的帮助下出版的。作者感谢佐治亚技术研究所雷达和仪表实验室的领导者E. K. Reedy博士鼓励我们完成出版并给予精神上的和其它方面的支持。此外，我们还要感谢我们的文书Cecelia Edwards, Helen Williams 和Patricia Winn, 通过她们多次的文字处理才把我们那些零碎的散乱文章变成了通顺易懂的教本。

目 录

第一章 引言	E. F. Knott	1
1.1 概述		1
1.2 雷达系统		2
1.3 电磁学		4
1.4 RCS (雷达截面) 现象		6
1.5 吸收材料		8
1.6 测量		10
1.7 小结		12
第二章 雷达基础	M. T. Tuely	13
2.1 引言		13
2.2 雷达发展史		13
2.3 雷达波段		15
2.4 雷达系统的基本单元		17
2.5 雷达系统实例		23
2.6 雷达方程		33
2.7 雷达检测		35
2.8 电子对抗		43
2.9 小结		45
第三章 电磁散射概论	J. F. Shaeffer	47
3.1 引言		47
3.2 雷达截面		47
3.3 散射分布		51
3.4 电磁理论		63
3.5 小结		81
第四章 精确预估技术	J. F. Shaeffer	84
4.1 引言		84
4.2 经典解法		84
4.3 积分方程解法		90

4.4	与高频解法的比较	106
4.5	小结	110
第五章	高频 RCS 预估方法 E. F. Knott	112
5.1	概述	112
5.2	几何光学	115
5.3	物理光学	118
5.4	几何绕射理论	129
5.5	一致性渐近理论	133
5.6	等效电流法	135
5.7	物理绕射理论	139
5.8	增量长度绕射系数	145
5.9	表面行波	147
5.10	小结	151
第六章	雷达散射截面的概念 E. F. Knott	156
6.1	定义	156
6.2	简单形状的特征	160
6.3	散射形状的分类	176
6.4	复合形状	179
6.5	自然目标	183
6.6	小结	185
第七章	雷达截面减缩 E. F. Knott	188
7.1	背景	188
7.2	RCSR 的四种基本方法	189
7.3	RCSR 的数字博弈	193
7.4	闪烁点的识别	196
7.5	RCSR 的一种方法——整形	206
7.6	一些民用	215
7.7	小结	217
第八章	多层介质散射的分析 M. T. Tuley	219
8.1	引言	219
8.2	垂直入射波在多层平板介质上的散射	222
8.3	斜入射波在多层平板介质上的散射	224
8.4	多层平面介质上散射波的矩阵法	226

8.5	多层柱形介质上的散射	228
8.6	近似的反射分析法	231
8.7	小结	234
第九章	雷达吸收体 M. T. Tuley	236
9.1	引言	236
9.2	Salisbury 屏幕和 Dallenbach 层	237
9.3	多层电介质吸收体	244
9.4	磁性 RAM	249
9.5	电路模拟吸收体	254
9.6	混合 RAM 和雷达吸收结构 (RAS)	262
9.7	非镜面 RAM	263
9.8	小结	264
第十章	雷达吸收体测量技术 E. F. Knott	269
10.1	概述	269
10.2	传输线法	271
10.3	自由空间法	289
10.4	其它方法	296
10.5	小结	305
第十一章	RCS 测量的要求 E. F. Knott	308
11.1	测量目的	308
11.2	RCS 测量的类型	311
11.3	远场测量条件	317
11.4	大圆剖面和圆锥剖面	321
11.5	目标支撑结构	323
11.6	目标与地面的干涉	329
11.7	小结	334
第十二章	室外 RCS 测试场	337
12.1	概述	337
12.2	测量设备	337
12.3	地面的影响	242
12.4	天线方向图的影响	346
12.5	地面反射系数	353
12.6	无源杂散干扰和多径效应的减小	356

12. 7	地面影响的消除	358
12. 8	场址选择的其它考虑	360
12. 9	测试场实例	362
12.10	小结	370
第十三章	室内 RCS 测试场 E. F. Knott	372
13. 1	概述	372
13. 2	暗室吸波材料	373
13. 3	暗室结构	378
13. 4	仪器	383
13. 5	室内 RCS 测试场实例	390
13. 6	小结	396
第十四章	数据分析和简化 J. F. Shaeffer	399
14. 1	引言	399
14. 2	复合目标的高频散射	399
14. 3	假设目标的 RCS 估值	403
14. 4	圆柱 - 尖拱体的散射图	407
14. 5	数据简化和表示	410
14. 6	小结	429
附录 A	数学回顾 J. F. Shaeffer	431
A. 1	矢量数学	431
A. 2	矢量场源	434
A. 3	标量格林定理	437
A. 4	矢量格林定理	438

第一章 引言

E. F. Knott

1.1 概述

本书将广泛介绍雷达目标的回波特性,旨在让工程技术人员、科学技术人员和管理人员熟悉一个新的不熟悉的领域,尽管其中许多知识在雷达广泛应用的第二次世界大战前就已存在。现代武器系统除了要满足通常的要求,如速度、重量和载重量外,还要达到一定的雷达截面指标。要把雷达截面指标结合到新的或现有的系统中,需要各个领域的工程技术人员的通力协作,我们希望能促进这种合作,并从电磁学的角度揭示系统设计中一些手段和技巧的重要性。

本书将从下述五个方面来论述:

- 背景材料
- 电磁学
- RCS 现象
- 吸收材料
- 测量

背景材料包括在本章(第一章)和第二章中。因为雷达回波的机理严格说来是电磁学现象,所以用了三章的篇幅(第三章到第五章)来讨论电磁学理论和 RCS 预估技术;来自简单目标的回波实例将在第六章给出。对人造目标的回波特性进行控制具有重要的现实意义和战术意义,两种基本的控制方法是使用外形技术和吸收材料。第七章讨论外形的影响,雷达吸收体的分析和设计将在第八章和第九章中讨论。材料和 RCS 的测量将在第十一至十

三章讨论，第十四章将讨论数据分析和显示。

1.2 雷达系统

RADAR（雷达）这个字首组字，产生于第二次世界大战中，由于太新颖了，1945年的许多字典都未收入它，它代表 radio detection and ranging（无线电探测和测距）。雷达一词自40年代引入以来，现在已变得家喻户晓了。由于种种原因雷达最初用来取代可见目标的探测，雷达波通过大气层时的衰减远小于光波，而且其低频信号可以进行超视距传播，这就有可能远在肉眼看到目标之前，雷达早就发现目标了。在夜间，当周围没有光线照射到目标时，雷达也能很好地工作。

雷达自身能发射能量，并不依赖于其他光源照明目标，因而，它是主动器件，而不是被动的探测装置。事实上，雷达的主要优点就在于它能记录能量到达目标及返回来的时间。

雷达利用已知的电磁波传播速度来测量到目标的距离。光的速度是每秒 186,282 英里，更便于记忆的数是每纳秒 11.8 英寸，在 1.6% 的误差范围内，可取作每纳秒 1 英尺。考虑到传播两次（到达目标再返回），到目标的距离 R 可简单写为：

$$R = c \Delta t / 2$$

式中 c 是光速， Δt 是从发出能量脉冲到雷达接收到回波的时间间隔。因此，雷达是一种计时装置。

然而，只是距离并不能确定目标的位置，还必须测得两个方向角，并且有很多可行的测量方法。幸而，由于大多数雷达天线的性质，可以简单地由测量天线的指向来确定。如果天线装在有两个转动轴的支架上（例如：方位角和俯仰角），这两个角就可以由固定在旋转支架上的仪器测出，由距离和这两个方向角就可以确定目标的位置。

在很多情形下，目标是在很低的水平面上，此时就没有必要

测量仰角。此外，在某些情况下，在目标与雷达之间传播的电波将随着距离的增大而缓慢地向下弯曲，这时天线的仰角并不代表目标的真实仰角。这种弯曲是由于大气的折射率随着高度的增加逐渐减小的缘故。这种弯曲称为折射。

象眼睛和其他光学系统一样，雷达天线被精心设计为在某一特定方向比其他方向灵敏得多，这使得发射的能量更集中在目标上，而接收的灵敏度也更高。当天线尺寸增大时，方向性也将增强，聚束的能量比平时大 1000 至 100,000 倍并不是罕见的。

相控阵是天线的另一种常见形式。它们由一大组基本天线单元所组成（例如偶极子或波导开槽），每一单元都由分配网络馈电。改变单元之间的间距和相对相位，能使阵列的总辐射从一个方向扫描到另一个方向，而阵列本身没有任何机械运动。由于这种扫描是电动的，所以可以达到很高的扫描速度。

雷达是否扫描，依赖于它的用途。低频雷达是典型的远程系统，常用于超视距警戒和搜索。因为低频天线尺寸很大，通常是永久性的和固定的安装。近程警戒系统工作在高频段，通常在方位上扫描。有些扫描除了方位角外，还有上下点头的俯仰扫描叠加在很慢的方位角扫描上。扫描雷达可以安装在陆地上、船上和飞机上。

火力控制雷达在空间跟踪目标，因此，跟踪系统除了距离跟踪外，还必须包括角度跟踪。计算机通常是这种雷达的组成部分，以便从跟踪过程中取出轨迹信息，并向火炮或其它火力系统提供发射信息。末制导雷达由于必须装在相对狭小的导弹中，所以比较小巧，因为重量和空间的限制，现在已趋向于利用更短波长的设备。

由于雷达及其使命的多样性，要逐一加以罗列和讨论是不可能的。因此，第二章中讨论的系统只是一般性的，并且仅给出了几个例子。最简单的系统是动目标显示雷达（MTI），其输出只显示出运动的目标，警察用的雷达就是一个例子。这种雷达发射

连续波能量，采样发射信号作为本地振荡信号，并与接收到的目标信号混合。这种“混合”作用所产生的信号，其频率是发射频率和目标反射频率之差，唯一可以使这两个频率产生差别的原因是目标的运动。在这种情形下，差频正比于目标朝向或离开目标的速度分量。

除了连续波（CW）雷达系统外，雷达应当是脉冲式的，因为它需要在发射能量脉冲后，静“听”回波。另外，脉冲工作的方式可以把很高的能量在很短的时间内辐射出去。脉冲雷达通常只有 0.1% 到 0.5% 的时间“开机”，因此大部分时间它都在听候回波。

1.3 电磁学

我们生活在充满了电磁（EM）波的环境中，而雷达系统的微波频率仅占了电磁波波谱的很小一部分。但是，这些电磁波，无论是光波、无线电波、或是微波，都遵守同样的物理定律。制约电磁波特性的这些定律是 1900 年以前建立起来的，这要归功于赫兹、法拉第、安培、库仑和麦克斯韦等人的开拓性贡献。

早期的实验者纯粹出于好奇，而象贝尔和爱迪生这样的发明家则利用已知的现象并从事和他们切身利益相关的研究。每一个人都做出了自己的贡献，但只有 J.C. 麦克斯韦总结了这些实验者的结果并建立了现代电磁理论的基础。通过其他人的努力得以扩充的麦克斯韦著名的四个方程是这一理论的基础，就象拉维尔-斯托克斯方程是流体力学的基础一样。

我们关心的只是在时间和空间都呈简谐振荡的 CM 波，对这种波麦克斯韦方程取特殊的形式。在远离辐射和反射波源的地方，电场和磁场互相垂直都垂直于传播方向。在简谐变化过程中，电场和磁场二者都在同一时间和地点达到最大值，也在同一时间和地点变为零。

当EM波入射在物体上时，将在物体中及表面上感应起振荡电荷和电流。对于理想导体这一特殊情况，感应的电荷和电流只出现在表面。在微波频段，甚至象钢铁这样的不良导体，也可近似成理想导体。因此，既使一个薄钢壳，只要它是闭合的，在其内部就不会有感应场和电荷。

既使物体是电介质，虽然可以在其内部维持感应电荷和电流，也只须考虑物体表面的感应电荷和电流。如第三章所述，空间任意点的电场和磁场都可以用物体表面的感应电流和电荷的积分来表示。尽管这个结论对于无源区域是众所周知的，但是，不必知道内部电荷和电流的分布就可以计算散射场这点还是值的注意的。

由于目标表面感应场的辐射在观察点产生的总场由入射场和散射场组成。一般说来入射场总是已知的，为了求得物体的散射场，只需从总场中减去入射场。这是通常的。

不那么简单的则是要求出感应电荷和电流，的确，这正是问题的关键，因为如果电荷和电流分布知道了，积分即使不能用解析法算出，也能用数值法求得。求感应场是个难点，但是有时积分方程能化为一组易于求解的齐次线性方程。

然而，由于计算机存储器的限制，这种解法仅能用于尺寸不大于波长的物体。如果能利用目标的某些特殊性质，如旋转对称性或无限长物体的二维特性，则物体尺寸的限制可以放宽到10个波长。这种求感应电荷和电流的方法称为矩量法，并且物体上的场必须以 $\lambda/10$ 左右为步长取样。每一段和其他各段的相互作用得到一个方阵，将其求逆就可得到解。

另一种求解物体散射场的方法只适用于远场，这就是所谓的切平面近似。因而得到所谓的物理光学描述，它可以给出大量有用的信息。应用这种方法时，我们首先要在物体表面找出局部积分路径。在切点上作一无限大切平面，并规定局部场的切向分量等于切点处物体确实是扩展成无限大平面时的场值。

切部场的切向分量可由几何光学理论求得，它简单地利用两

种不同媒质的无限大平界面上的已知边界条件。这种方法所处理的物体通常是金属，但有时也可用于电介质材料。它已成功地用于薄膜，如肥皂泡和树叶。

利用切平面近似，我们能够计算出表面积分，注意此时求表面感应场的难点已完全避免了。实际上假设局部曲率半径足够大，这样的感应场和具有同样入射角的无限大平面上的感应场可近似认为相等。

只在极少数情形下，表面积分才可以精确地计算出来，即使这样，也不要忘了积分本身仍是近似的。如果物体是平板，积分很容易；但即使是圆锥，积分也立即变得很复杂，正如第五章所述。通常，除了很对称的物体外，双弯曲表面是没有精确解的，只有利用最陡下降法。

1.4 RCS(雷达截面)现象

无论哪种情形，物理光学积分的结果都可给出重要而有用的结论。对于平板上垂直入射情况，它可得出正确结果，并且对偏离镜面（垂直）方向几度的区域，其结果也是足够精确的。事实上，由该理论给出实用结果的角区域依赖于平板的电长度。

然而还有另一种分析方法也可以应用，这就是几何绕射理论（GTD）。为了导出 GTD 方法，J. B. 克勒尔把表面对单根射线反射的几何光学法扩展表示为由边缘绕射形成的一个射线锥。这个射线锥仍然保持着几何光学的性质，绕射线将以入射线和边缘夹角相同的角度离开边缘。同时，该理论还能用于求解边缘上的感应电流，这样就可以扩展散射场的角度（非镜面）范围。更为重要的是，GTD 有内在的极化依赖关系。这种关系在物理光学和几何光学中是不存在的。

对平板的结果进行考察，将找出对散射分类的线索。平板垂直入射回波正比于平板的面积平方和频率的平方。对于这个特