



当代
杰出青年
科学文库

军用目标雷达散射 截面预估与测量

庄钊文 袁乃昌 著
莫锦军 刘少斌



科学出版社
www.sciencep.com



庄钊文 男, 1958年6月生于福建泉州, 教授, 博导。1981年和1984年于国防科学技术大学分别获学士和硕士学位, 1989年于北京理工大学获博士学位, 现任国防科学技术大学电子科学与工程学院院长。发表学术论文120篇, 出版专著、教材10部, 获国家科技进步奖二等奖四项, 部委科技进步奖一等奖六项。目前主要从事信号处理、雷达目标识别及模糊信息处理等领域的研究。



袁乃昌 男, 1965年12月生于安徽无为, 教授, 博导。1994年于电子科学技术大学获博士学位, 现任国防科学技术大学电子科学与工程学院电子科学与技术系主任, 电磁场与微波技术专业学术带头人, 国家“百千万人才工程”第一二层次培养对象, 解放军总装备部“1162”人才工程第一层次培养对象。在国内外一级学术期刊发表学术论文100余篇, 出版专著、教材3部。目前主要从事目标与环境特性、超宽带技术及光子晶体等方面的研究。

ISBN 978-7-03-016763-7



9 787030 167637 >

定 价: 56.00 元

当代杰出青年科学文库

军用目标雷达散射 截面预估与测量

庄钊文 袁乃昌 著
莫锦军 刘少斌

科学出版社
北京



内 容 简 介

本书在介绍雷达散射截面(简称RCS)定义及相关概念、特点的基础上,从国防科研的实际需求出发,重点讨论军用目标RCS的各种常见理论预估方法和实验测量手段。鉴于RCS预估方法的多样性,本书分别在时域方法、频域方法和高频方法等三大类方法中各选最为典型的一种进行分析,以期读者能融会贯通,它们分别是时域有限差分法、矩量法和物理光学法。实验测量方面,主要介绍RCS测量校准方法、低散射背景技术、缩比测量相似律等内容,并给出几个典型稳态和瞬态散射测量系统方案。本书理论联系实际,展示了使用各种理论原理解决实际问题的方法和技巧,具有很强的实践意义。

本书可供在雷达系统、电子对抗、目标与环境特性、隐身与反隐身、目标识别、计算电磁学等领域从事研究和开发的科技人员参考,也可作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

军用目标雷达散射截面预估与测量/庄钊文,袁乃昌,莫锦军,刘少斌著. —北京:科学出版社,2007

(当代杰出青年科学文库)

ISBN 978-7-03-016763-7

I. 军… II. ①庄… ②袁… ③莫… ④刘… III. 军用雷达-散射截面-研究 IV. TN951

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第002005号

责任编辑:胡 凯 贾瑞娜 / 责任校对:包志虹

责任印制:赵德静 / 封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007年6月第一次印刷 印张:20 3/4

印数:1—2 000 字数:392 000

定价:56.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))



前 言

雷达散射截面(RCS)是雷达探测与识别、隐身与反隐身研究的重要基础,是现代军事对抗技术的主要内容。雷达散射截面可通过理论预估和实验测量两种手段获取。

RCS 理论预估的实质是求满足特定边界条件 Maxwell 方程组的解。对一些典型几何形状和结构相对简单的目标不难用解析方法得到严格的解析解,并给出合理的物理解释。当目标结构复杂时,解析方法往往无能为力,必须使用各种数值分析方法。事实上,RCS 预估是最近几十年计算电磁学发展的主要内容。

自 20 世纪 60 年代以来,已有不下几十种电磁场的数值分析方法被提出,并用来预估雷达目标 RCS。具有代表性的有:属于频域技术的有限元法、矩量法和单矩法等;属于时域技术的时域有限差分法、传输线矩阵法、时域有限元法、时域积分方程法等;此外,还有属于高频技术的几何光学法、物理光学法、几何绕射理论、物理绕射理论和等效电磁流方法等。其中,高频技术和频域数值方法均是点频(窄带)方法。高频方法早期曾被广泛应用于电磁散射和辐射等各种问题的求解,它们具有简单、高效的特点,但精度有限。随着计算机技术的发展,近年的研究重点是矩量法和时域有限差分法等各种低频数值计算方法,这些方法名义上虽然是“低频”的,但当前的计算机软、硬件水平已使它们能从容应对各种大型、复杂的电磁问题。

RCS 预估的各种方法已在众多论文、著作中有很好的讨论。本书的目的不是发展各种 RCS 预估方法,也不打算深入论述它们的优、缺点,而是试图给出使用它们来解决实际问题的手段,同时,鉴于 RCS 预估方法的多样性,只能在时域方法、频域方法和高频方法等三大类方法中各选最为典型的一种进行分析,以期读者能融会贯通。这三种方法分别是:时域有限差分法(FDTD)、矩量法(MOM)和物理光学法(PO)。其中,因为 FDTD 方法具有宽带散射特性分析能力,符合雷达领域的发展潮流,在本书中占了较大的篇幅,并唯一地专门安排了地面目标 RCS 预估的内容。穿插在各种预估方法中的是多种导弹、飞机、航空母舰等复杂军用目标模型的 RCS 预估和测量图表。

实验测量方面,本书主要介绍了 RCS 测量分类、校准方法、低散射背景技术、缩比测量相似律等内容,并分别给出几个典型的稳态、瞬态散射测量系统方案,以期读者对 RCS 测量方法有一个概貌性的了解。

本书是作者所在课题组多年科研积累的结晶。在此,我们要向先后与我们一

起工作过的众多同事和研究生们表示衷心的感谢，特别是张光甫、王禹、张国华、徐利军和李毅等同志直接参与了本书部分内容的整理和校对，本书饱含着他们的无私付出，借此机会，一并向他们表示衷心的感谢。

本书理论联系实际，展示了使用各种理论原理解决实际问题的方法和技巧，是作者多年来在这一领域研究工作的总结，具有很强的实践意义。但是，雷达散射截面预估与测量技术涉及方方面面的科学问题，发展也日新月异，加上作者水平有限，书中错漏之处在所难免，敬请读者不吝指正。

作 者

2006年5月于长沙



目 录

前言

第 1 章 雷达散射截面	1
1.1 雷达散射截面的定义	1
1.2 雷达目标散射频率分区	4
1.3 复杂目标散射机理	7
1.3.1 镜面散射	8
1.3.2 非镜面散射	12
1.3.3 不同散射贡献的量级比较	17
1.4 雷达散射截面减缩及其意义	17
1.4.1 雷达散射截面减缩	17
1.4.2 雷达散射截面减缩的意义	21
1.5 雷达散射截面预估与测量方法	24
1.5.1 雷达散射截面预估	24
1.5.2 雷达散射截面测量	27
参考文献	29
第 2 章 时域有限差分法预估 I——算法原理	31
2.1 FDTD 方法基本原理	31
2.1.1 FDTD 方程	31
2.1.2 FDTD 的数值稳定性	35
2.1.3 FDTD 的数值色散性	38
2.2 FDTD 散射计算基本模型及关键技术	39
2.2.1 散射计算基本模型	39
2.2.2 吸收边界条件	40
2.2.3 入射波的引入	45
2.2.4 近场到远场的变换	48
2.2.5 时域到频域的变换	51
2.3 共形 FDTD	52
2.3.1 阶梯近似误差及曲线边界处理方法的演变	52
2.3.2 共形 FDTD 实现方法	55
2.3.3 与阶梯近似的精度比较	57
2.4 可节省内存的 R-FDTD 及其在散射计算中的应用	58

2.4.1 R-FDTD 基本原理	58
2.4.2 对 R-FDTD 中导体处理方法的改进	61
2.4.3 R-FDTD 用于散射计算——方法一	64
2.4.4 R-FDTD 用于散射计算——方法二	67
2.4.5 小结	71
2.5 可节省时间的 ADI-FDTD 及其在散射计算中的应用	72
2.5.1 ADI-FDTD 公式	72
2.5.2 高阶 ADI-FDTD	76
2.5.3 ADI-FDTD 中基于辅助差分方程的 PML	81
2.5.4 ADI-FDTD 中的激励源及连接边界设置	86
2.5.5 ADI-FDTD 散射计算实例	88
2.5.6 ADI-FDTD 在等离子体仿真中的应用	89
参考文献	94
第 3 章 时域有限差分法预估 II——网格剖分	97
3.1 三维模型的计算机表示	97
3.2 基于实体模型的自动网格剖分技术	98
3.2.1 实体模型剖分的基本方法	98
3.2.2 用八叉树分区法提高剖分效率	99
3.2.3 剖分后模型的再显示	101
3.2.4 剖分实例	103
3.3 基于面元模型的自动网格剖分技术	105
3.3.1 剖分原理	105
3.3.2 剖分实现	106
3.3.3 多边形面元的处理	108
3.3.4 剖分实例	108
3.3.5 共形网格剖分	111
参考文献	114
第 4 章 时域有限差分法预估 III——典型算例	115
4.1 简单目标的宽带散射特性	115
4.2 复杂常规目标的宽带散射特性——导弹模型	118
4.3 复杂隐身目标的宽带散射特性——F-117A 模型	121
4.3.1 F-117A 高频散射特性	124
4.3.2 F-117A 低频散射特性	125
4.4 锯齿截断减缩非镜面散射的宽带分析	129
4.5 等离子体覆盖减缩目标散射的宽带分析	140
4.5.1 等离子体隐身技术及其隐身机理	140

4.5.2 非磁等离子体的 FDTD 迭代式——PLRC FD ² TD 方法	147
4.5.3 等离子体覆盖导体平板的 RCS 减缩	149
4.5.4 等离子体覆盖导体柱的 RCS 减缩	152
参考文献	156
第 5 章 时域有限差分法预估 IV——地面目标的特别处理	157
5.1 地面及地面上目标的散射模型	157
5.1.1 地面的电磁参数	157
5.1.2 起伏地面的模拟与光洁度判别	158
5.1.3 介质分界面的处理	161
5.1.4 地面的散射模型	163
5.1.5 地面目标的散射模型	165
5.2 色散介质 FDTD 方法	168
5.2.1 递归卷积法	168
5.2.2 分段线性递归卷积法	174
5.2.3 Z 变换方法	177
5.2.4 辅助差分方程法	179
5.3 吸收边界条件	181
5.4 入射波及其引入	186
5.4.1 锥形入射波	186
5.4.2 入射波的引入	187
5.5 近场到远场的变换	189
5.6 计算实例	190
5.6.1 地面的散射	190
5.6.2 地面上简单目标的散射	192
5.6.3 地面上复杂目标的散射	197
参考文献	199
第 6 章 矩量法预估	201
6.1 矩量法的基本原理	201
6.2 三角面元剖分和 RWG 矢量三角基函数	203
6.3 矩量法解积分方程	206
6.3.1 矩量法解电场积分方程	206
6.3.2 矩量法求解磁场积分方程和混合场积分方程	210
6.3.3 阻抗矩阵计算的优化	210
6.4 奇异性积分的处理	213
6.5 快速多极子和多层快速多极子方法	216
6.5.1 基本思想	217

6.5.2	快速多极子方法的原理与实现	218
6.5.3	多层快速多极子方法的原理与实现	221
6.6	快速多极子和多层快速多极子方法应用实例	223
6.6.1	内谐振散射问题	223
6.6.2	无限大导体平面上凹槽的散射	228
6.6.3	三维导体目标的散射	232
6.7	宽角度 RCS 快速计算	234
6.7.1	面积分方程	234
6.7.2	渐近波形估计技术	237
6.7.3	计算实例	238
	参考文献	240
第 7 章	物理光学法预估	242
7.1	散射场积分公式及物理光学近似	242
7.1.1	无源区散射场的积分公式	242
7.1.2	散射场的物理光学近似	245
7.2	Gordon 面元积分法求散射场	246
7.3	涂覆介质面元的散射	249
7.4	劈的散射	252
7.4.1	物理绕射解	252
7.4.2	增量绕射系数解	254
7.4.3	等效电流法	255
7.5	多次散射	256
7.5.1	二次反射场	257
7.5.2	绕射-反射场	257
7.6	复杂目标建模	258
7.6.1	简单几何体组合模型	258
7.6.2	面元模型	259
7.6.3	参数表面模型	260
7.7	面元模型的数据结构	261
7.8	可视化显示与消隐处理	262
7.8.1	可视化显示	262
7.8.2	消隐处理	264
7.9	基于图形学的高频 RCS 预估简介	267
7.9.1	目标显示及几何信息提取	267
7.9.2	RCS 计算	268
7.9.3	图形学 RCS 预估的局限性	268

7.10 复杂目标 RCS 预估实例——航空母舰	268
7.10.1 航空母舰的散射机制	269
7.10.2 物理光学面元法 RCS 计算程序检验	270
7.10.3 航空母舰舰体散射的面元法计算	272
7.10.4 海面对航空母舰 RCS 的影响	277
参考文献	280
第 8 章 雷达散射截面测量	282
8.1 RCS 测量误差模型与校准	282
8.1.1 单极化测量误差模型	282
8.1.2 单极化测量校准方法	283
8.1.3 全极化测量误差模型	284
8.1.4 全极化测量校准	286
8.1.5 RCS 测量中的低散射背景技术	289
8.2 缩比测量的电磁相似律	291
8.2.1 相似律的基本理论	291
8.2.2 非色散无耗电磁系统的相似律	294
8.2.3 色散有耗电磁系统的相似律	295
8.2.4 缩比测量对测试系统的要求	300
8.2.5 缩比测量对模型制作的要求	300
8.3 典型 RCS 测量系统	301
8.3.1 频域 RCS 测量系统	301
8.3.2 时域 RCS 测量系统	305
8.4 瞬态散射测量	309
8.4.1 瞬态散射的时域测量方法	309
8.4.2 频域最优补偿反卷积技术	313
8.4.3 典型目标瞬态散射测量结果与 FDTD 计算结果的比较	315
参考文献	319



第 1 章 雷达散射截面

1.1 雷达散射截面的定义

当物体被电磁波照射时, 能量将朝各个方向散射。散射场与入射场之和就构成空间的总场。散射能量的空间分布依赖于物体的形状、大小、结构以及入射波的频率等特性。能量的这种分布称为散射, 人们用散射截面来表征, 它是物体的一个假想面积。物体本身通常称为目标或散射体。

雷达散射截面(radar cross section, RCS)是基于平面波照射下目标各向同性散射的概念, 在给定方向上返回或散射功率的一种量度, 它用入射场的功率密度归一化。形式上, 雷达散射截面的定义式为^[1]

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{S_s}{S_i} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|H_s|^2}{|H_i|^2} \quad (1.1)$$

式中 S_s 和 S_i ——雷达接收机处散射波和目标处入射波的能量密度;

E_s 和 E_i ——雷达接收机处的散射电场和目标处的入射电场;

H_s 和 H_i ——雷达接收机处的散射磁场和目标处的入射磁场。

众所周知, 散射场是由于空间有散射体(目标)的存在而引起的, 所以空间的总场为入射场和散射场之和, 即

$$E_T = E_i + E_s \quad (1.2)$$

$$H_T = H_i + H_s \quad (1.3)$$

由式(1.1)可以看出, RCS 是一种极限, 是距离 R 趋向无穷大时得到的。但是, 因为假定入射波是平面波, S_i 、 E_i 和 H_i 均为常量, S_s 在远场条件下正比于 $1/R^2$, E_s 和 H_s 在远场条件下正比于 $1/R$, 实际计算时, 只需取 R 使雷达接收机位于目标散射的远区即可。式(1.1)同时表明, RCS 是单位立体角内目标朝接收方向散射的功率密度与从给定方向入射于该目标的功率密度之比的 4π 倍。

前面提到, RCS 是表征物体散射电磁波能力大小的一种度量, 是物体的一个假想面积。从以上定义不难看出, 雷达目标在给定方向散射的电磁能量可表示为目标 RCS 与入射功率密度的乘积。事实上, 入射平面波的能量密度为

$$S_i = \frac{1}{2} \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{H}_i = \frac{1}{2} Y_0 |\mathbf{E}_i|^2 \quad (1.4)$$

式中, Y_0 是自由空间导纳。

借鉴天线口径有效面积的概念, 目标截取的总功率为入射功率密度与目标等效面积(RCS) σ 的乘积, 即

$$P = \sigma S_i = \frac{1}{2} \sigma Y_0 |\mathbf{E}_i|^2 \quad (1.5)$$

假设功率是各向同性地向四周立体角散射, 则在距离目标 R 处的散射波能流密度为

$$S_s = \frac{P}{4\pi R^2} = \frac{\sigma Y_0 |\mathbf{E}_i|^2}{8\pi R^2} \quad (1.6)$$

散射波能流密度又可用散射场强 $\mathbf{E}_s$ 来表示, 即

$$S_s = \frac{1}{2} Y_0 |\mathbf{E}_s|^2 \quad (1.7)$$

由式(1.6)和式(1.7)两式可得

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}_s|^2}{|\mathbf{E}_i|^2} \quad (1.8)$$

式(1.8)中, 当距离 R 足够远时, 照射目标的入射波近似为平面波, σ 与 R 无关。与式(1.1)等效。

显然, 雷达散射截面(RCS)的量纲必然为长度的平方, 可以根据量纲是否为长度的平方判断公式正确与否。RCS 的常用单位是“ m^2 ”, 但有时也用“平方波长”来表示。

实际上, 目标的 RCS 可能很大, 大到成千上万平方米, 也可能很小, 小到几平方厘米, 变化范围太大, 表述起来不方便, 因此常用其对数形式表示, 二者之间的转换关系为

$$\text{RCS (dBsm}^2) = 10 \lg \left(\frac{\text{RCS } \text{m}^2}{1.0 \text{ m}^2} \right) \quad (1.9)$$

图 1.1 给出一些典型目标的 RCS 量级, 其中包括爬行波及行波的量级。在后续研究中将会发现, 当强散射源的散射被抑制后, 爬行波、行波这样的次散射源

便显得突出了。

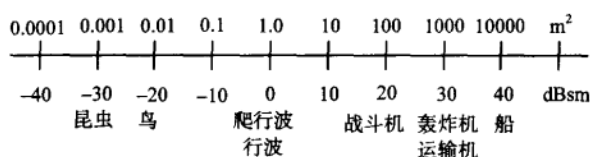


图 1.1 典型目标的 RCS 量级

RCS 是下列因素的函数。

- ① 目标结构。
- ② 电磁波的频率。
- ③ 入射场的极化形式。
- ④ 接收天线的极化形式。
- ⑤ 目标相对来波方向的角向位置。

因此, 一般来说, σ 可以表示为

$$\sigma_{ij}(\theta, \varphi) \quad (1.10)$$

式中 i 和 j ——入射场和接收天线的极化方向, 如水平极化和垂直极化;
 (θ, φ) ——在球坐标系下的视角。

由于目标的 RCS 不仅是雷达信号入射角的函数, 而且也是接收机方位角的函数, 因此就有了单站和双站之分。当源和接收机不在同一点时, 称为双站散射, 通常说的前向散射就是双站角为 180° 时的情况。当源和接收机位于同一点时, 如同大多数雷达工作时的情况那样, 则称为单站散射, 又叫后向散射。本文研究的主要就是这种情况。在许多测量系统中, 通常使用分离的发射天线和接收天线, 严格讲, 这种情况应该是双站的, 不过, 由于目标对两个天线的张角通常很小, 测量的结果和真正的单站情形差别不大。

多数情况下, 目标总的散射效果是很多部件散射共同贡献的结果, 为了在 RCS 计算中保持目标上各部件散射场之间的相位关系, 正确地表示干涉作用, 常常还用到另一种 RCS 表示方法, 即 RCS 的平方根, 定义为

$$\sqrt{\sigma} = \lim_{R \rightarrow \infty} 2\sqrt{\pi R} \frac{\mathbf{E}_s \cdot \hat{\mathbf{e}}_r}{E_0} e^{-jkR} \quad (1.11)$$

式中 $\hat{\mathbf{e}}_r$ ——接收机的电场极化方向;
 R ——目标到雷达接收机的距离;
 $\mathbf{E}_s$ ——目标的散射电场;
 E_0 ——入射波的电场强度。

这个定义体现了散射的相位和接收机极化的影响,是一个复数量,而式(1.1)所定义的 RCS 则是一个仅表示大小的纯实数。不同散射体的 $\sqrt{\sigma}$ 可以直接相加。

为了更好地描述目标散射的极化特性,人们还引入了极化散射矩阵的概念。电磁波的极化状态可以根据电场矢量 E 的方向确定。实际工作中常常根据电场矢量 E 与一个相对较长的目标(如导线)或水平面的相对关系来确定, E_h 、 E_v 分别表示平行极化和垂直极化。据此,通常按下式定义极化散射矩阵,即

$$\begin{bmatrix} E_h^s \\ E_v^s \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

式中, E_h^s 表示散射场的平行极化分量,依此类推;散射矩阵 $[S]$ 的每个元素都包含了相位及幅值的信息,如

$$S_{hh} = |S_{hh}| \exp(j\phi_{hh}) \quad (1.13)$$

对单站雷达有 $S_{vh} = S_{hv}$, 双站雷达则不存在这种关系。显然,散射矩阵元素与 RCS 的关系为

$$\sigma_{hh} = 4\pi R^2 |S_{hh}|^2 \quad (1.14)$$

式(1.14)显示,根据式(1.12)定义的极化散射矩阵是与目标和雷达间的距离 R 相关的,这个定义适合于理论计算,但不适合于绝对定标测量。利用式(1.11),不难引入与 R 无关而只与目标相关的极化散射矩阵 $[S^0]$, 满足

$$\begin{bmatrix} E_h^s \\ E_v^s \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{4\pi R^2}} [S^0] \begin{bmatrix} E_h^i \\ E_v^i \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

1.2 雷达目标散射频率分区

同一目标对不同的雷达频率会呈现不同的电磁散射特性。根据目标特征尺寸 a 与入射波波长 λ 的相对关系,可以将散射划分为瑞利区、谐振区、光学区三种散射方式,它们之间的关系如表 1.1 所示,其中, $k = 2\pi/\lambda$, 表示入射波的波数。

1. 瑞利区散射

这时波长较之散射体的尺寸大得多,散射是由感应偶极矩引起的,基本上是一个准静场问题,整个目标都参与了散射过程,目标的形状、细节对散射影响不大,重要的是体积。

表 1.1 三种散射方式的比较

散射分区	ka 大小	RCS 变化特点
瑞利区	$ka \ll 1$	$\sigma \propto \lambda^{-4}$, $\sigma \propto$ 体积的平方, σ 随 ka 光滑变化
谐振区	$ka \approx 1$	σ 随 ka 振荡
光学区	$ka \gg 1$	σ 随 ka 光滑变化, σ 与波长无关

确切地说,在瑞利区,RCS与目标体积的平方成正比,设定一个形状因子 F 来表述目标形状的影响,就可以得到一个估算瑞利区 RCS 的经验公式,即

$$\sigma = \frac{4}{\pi} k^4 V^2 F^2 \quad (1.16)$$

式中 V ——目标的体积;

F ——目标的形状因子;

k ——波数。

研究表明,球体的形状因子 $F=1$,与球体形状接近的光滑目标,形状因子也近似等于1,其RCS与极化及视角无关。对于任意目标,只要其中一个方向的尺寸远大于另一个方向上的尺寸,该目标的形状因子 F 就不等于1,其RCS是视角及极化的函数。

下面以球为例,证明该经验公式是可信的。

当 $ka=0.33$ 时,球的RCS精确解为 $\sigma=0.1\pi a^2$,而球的体积为 $V=4\pi a^3/3$ 。设形状因子 $F=1$,代入式(1.16)得

$$\sigma = \frac{4}{\pi} k^4 \left(\frac{4\pi a^3}{3} \right)^2 = \frac{64}{9} (ka)^4 \pi a^2 = 0.084\pi a^2 \quad (1.17)$$

可见,根据经验公式计算的结果与精确解十分接近。

2. 谐振区散射

这时波长和散射体的尺寸为同一数量级,散射体的每一部分对其他各部分都产生电气影响,散射场是这些相互影响的总效果,虽然小尺寸的细节不那么重要,但总的几何形状却是重要的。

一般来说,谐振区散射具有以下特点:

- (1) 目标的形状是关键因素;
- (2) 谐振区解析解很少;

(3) 没有适用的比较简单的求解方法。

除矩量法和时域有限差分法等数值计算方法外, 谐振区问题的求解方法还有脉冲响应法; 将光学区问题求解方法扩展到谐振区, 以 $1/ka$ 为参数进行高阶级数展开等。

3. 光学区散射

这时波长远小于散射体尺寸, 散射场主要由从各个独立的散射中心产生的回波叠加而成, 每一细小的几何结构均对总散射场产生影响。

在光学区, 适用的 RCS 估算方法有几何光学法、几何绕射理论、物理光学法、物理绕射理论等。

(1) 几何光学法(GO)是在光学基础上推广而来的, 它采用菲涅尔法则描述电磁波的传播过程。在应用时有一定的约束: 几何光学法要求目标的尺寸 L 远远大于波长, 即 $L \gg \lambda$; 几何光学法忽略了绕射的影响。它对应于“光学区”, 经常涉及的概念是射线、波前及镜面反射等。其中, 镜面反射的通用计算公式为

$$\sigma = \pi \rho_1 \rho_2 \quad (1.18)$$

式中, ρ_1 、 ρ_2 是目标表面反射点的两个主曲率半径, 正确计算这两个参数是应用该公式的关键。令 $\rho_1 = \rho_2 = a$, 便得到球的光学区 RCS 计算公式, 即

$$\sigma = \pi a^2 \quad (1.19)$$

利用光学近似计算镜面反射波的主瓣及旁瓣较为准确。但是, 当目标表面出现不连续的情况(如边缘、曲率、斜率突变)时, 光学近似失效。表面不连续可以引起诸如爬行波、行波等高阶散射, 当镜面散射波被有效抑制后, 爬行波、行波等将成为主要散射源。

(2) 几何绕射理论(GTD)没有牢固的理论基础, 主要依靠尖劈散射等典型结构的严格解来确定其绕射系数, 但在实际应用中却能给出满意的结果, 因此得到广泛的应用。几何光学法不能计算的边缘、尖端、拐角、切点和阴影区散射, 几何绕射理论都能得出比较好的结果。

(3) 物理光学法(PO)涉及积分计算, 是一种求解积分的方法, 与基尔霍夫(Kirchhoff)积分法和惠更斯(Huygens)原理相似。该方法考虑了电磁波射线的波动性, 因而能够计算因绕射和干涉现象引起的功率变化。

(4) 物理绕射理论(PTD)和几何绕射理论一样, 也是在 20 世纪 50 年代出现的一种求解边缘绕射场的高频近似方法, 它也是依靠尖劈散射等典型结构的严格解来确定其绕射系数的。与 GTD 不同的是, PTD 的解中保持了近似的物理光学结果, 并找出了一种校正方法, 使之能改善物理光学近似程度。