

# 防禦雷達 系統工程導論

國防工業出版社

# 防御雷达系统工程导论

〔美〕 J.N.康斯坦特 著

陈瑞源 王柳川 译

黄培康 校

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书系根据〔美〕J. N. 康斯坦特《Introduction to Defense Radar Systems Engineering》一书译出。主要从系统角度对防御系统用的雷达选定、设计及工程研制等总体规划问题进行了一定的论述。其特点是从目标特性分析出发对雷达的任务要求、雷达接收机、雷达系统的误差模型、雷达数据处理等问题逐一扼要地作了介绍。可供从事雷达工程的科技人员和大专院校师生参考。

### INTRODUCTION TO DEFENSE RADAR SYSTEMS ENGINEERING

〔美〕J. N. 康斯坦特 著

The Macmillan Press Ltd. 1972

\*

### 防御雷达系统工程导论

陈瑞源 王柳川 译

黄培康 校

\*

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

\*

850 × 1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 8<sup>7</sup>/<sub>8</sub> 223 千字

1977年12月第一版 1977年12月第一次印刷 印数：0,001—5,300 册

统一书号：15034·1593 定价：1.10元

## 译 者 序

现代防御雷达（反导防御系统的雷达）的系统设计，除了传统的雷达电子学问题之外，还涉及火箭弹道学、弹道测量、预测技术、再入物理、计算技术和数据处理等广泛的技术问题，对这些问题有一个初步的了解，对于理解防御雷达系统的特点，并对其有效性作出正确的评价是十分必要的。本书正是这方面的一本入门性书籍。尽管书中的材料并非新颖，对于各专业领域来说也是很基本的，但由于作者从其相互联系上来揭示防御雷达系统设计所关心的问题，因而对从事雷达工程的工人和技术人员是会有所助益的。当然有关专业的读者也可把它作为了解雷达系统问题的初步材料。

反导系统是苏美两霸核讹诈政策的重要组成部分，尽管他们投入了巨大的人力物力，但技术上并未过关。

我们遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”和“批判地吸收外国文化”的教导，翻译了这本书，供同志们参考。书中所反映出来的原书作者的资产阶级设计观点和为美帝技术能力吹嘘之处，请读者批判地阅读。

原书有的地方表述不够确切，并有不少错误，凡已发现的错误都已作了更正，由于译者水平所限，译述不妥之处在所难免，请读者批评指正。

# 目 录

引言 .....	9
一、目标特性 .....	12
1. 目标后向散射 .....	12
1.1 雷达散射截面的定义 .....	12
1.2 简单形状物体的雷达散射截面 .....	13
2. 目标识别 .....	19
2.1 特征信号分析 .....	20
2.2 再入尾流 .....	22
参考资料 .....	27
二、雷达检测 .....	29
1. 一般雷达方程 .....	29
2. 检测概率和虚警概率 .....	32
3. 目标检测 .....	35
4. 跟踪工作方式 .....	36
5. 干扰环境 .....	36
6. 箔条环境 .....	38
6.1 箔条闪烁 .....	40
7. 信标和遥测工作方式 .....	41
8. 核环境 .....	41
参考资料 .....	44
三、雷达接收机 .....	45
1. 雷达基础 .....	47
1.1 波形分析 .....	49
1.2 线性系统响应 .....	52
2. 雷达响应 .....	54
3. 最佳接收机 .....	57
4. 雷达波形 .....	60

5. 分辨力	62
6. 精度	64
参考资料	68
<b>四、雷达系统的误差模型</b>	<b>69</b>
1. 系统要求	69
1.1 数据精度	69
1.2 目标特性	70
1.3 目标弹道和动力学	71
1.4 跟踪的几何关系	72
1.5 分系统配置	72
2. 误差分析	72
2.1 误差分量	73
2.2 总的目标误差	75
3. 误差模型	76
3.1 误差输入	76
3.2 参数误差曲线	79
4. 位置和速度数据的平滑	81
5. 噪声降低	82
5.1 一般滤波方程	83
5.2 中点滤波	83
5.3 曲线拟合误差	85
5.4 计算时间	85
参考资料	86
<b>五、弹道式导弹的飞行弹道</b>	<b>87</b>
1. 球形不旋转地球	88
1.1 运动方程	90
1.2 命中方程	91
1.3 关机速度和角度	92
1.4 最小能量弹道	93
1.5 飞行时间	93
2. 发射误差引起的脱靶	95
2.1 纵向误差	95
2.2 横向误差	97
3. 旋转地球	98
4. 扁率修正	98

5. 弹道式导弹的制导 .....	99
5.1 特殊制导要求 .....	102
参考资料 .....	103
六、再入弹道 .....	104
1. 运动方程 .....	104
2. 近似弹道 .....	105
3. 再入误差引起的脱靶 .....	113
参考资料 .....	114
七、弹道预测 .....	115
1. 地心运动方程 .....	115
2. 截断误差 .....	116
3. 收敛性和预测坐标系 .....	118
4. 站中心运动方程 .....	120
5. 一般滤波方程 .....	122
参考资料 .....	124
八、雷达数据处理 .....	125
1. 雷达数据 .....	125
1.1 字的格式 .....	126
1.2 对计算机的一般要求 .....	127
1.3 计算程序 .....	128
2. 计算机的组成和控制 .....	129
2.1 计算机字的构造 .....	130
2.2 指令周期和执行周期 .....	130
2.3 操作序列 .....	131
2.4 定时 .....	131
3. 信号处理 .....	133
4. 数据处理 .....	138
4.1 一般滤波方程 .....	138
4.2 滤波 .....	139
5. 计算机技术 .....	148
5.1 解联立方程 .....	148
5.2 算法 .....	150
6. 自适应阵列数据处理 .....	154
参考资料 .....	155

九、反射器天线 .....	156
1. 反射器的概念 .....	156
1.1 扫描技术 .....	156
1.2 波束形成 .....	156
1.3 天线馈源 .....	157
1.4 反射器型式 .....	157
2. 反射器特性 .....	157
2.1 形状 .....	159
2.2 扫描 .....	160
2.3 孔径照射 .....	160
2.4 功率容量 .....	161
3. 反射器设计 .....	161
3.1 理想的反射器 .....	161
3.2 实际的反射器 .....	166
参考资料 .....	173
十、阵列天线 .....	174
1. 电扫描基本概念 .....	174
1.1 扫描技术 .....	175
1.2 波束形成 .....	177
1.3 天线馈电系统 .....	178
1.4 多波束阵列 .....	178
1.5 有源单元 .....	180
2. 阵列特性 .....	181
2.1 形状 .....	184
2.2 扫描 .....	185
2.3 孔径照射 .....	188
2.4 功率容量 .....	189
2.5 复杂性和成本 .....	190
3. 阵列设计 .....	192
3.1 理想的阵列 .....	193
3.2 实际的阵列 .....	200
4. 雷达设计问题 .....	210
4.1 雷达性能因素 .....	210
4.2 阵列雷达优缺点综述 .....	215
4.3 结论 .....	215
5. 自适应天线 .....	216



5.1 空间和频率滤波 .....	217
5.2 自适应阵列 .....	218
5.3 自适应信号处理机 .....	220
5.4 自适应空间滤波 .....	221
参考资料 .....	225
<b>十一、雷达系统设计 .....</b>	<b>227</b>
1. 雷达参数确定 .....	227
1.1 反射器天线 .....	228
1.2 环形天线 .....	230
1.3 龙伯透镜天线 .....	231
1.4 阵列天线 .....	233
2. 设计程序 .....	235
2.1 任务要求和雷达功能 .....	235
2.2 设计参数选择 .....	237
2.3 系统功能设计 .....	238
2.4 性能分析 .....	241
3. 拦截 .....	248
3.1 抛物线弹道 .....	248
3.2 导航三角形 .....	249
3.3 制导 .....	253
参考资料 .....	256
<b>附录 .....</b>	<b>258</b>
A1 RF电磁波的吸收衰减 .....	258
A2 RF电磁波的降雨衰减 .....	260
A3 电离层对RF电磁波的折射 .....	261
参考资料 .....	283

## 引 言

对于用一枚导弹拦截另一枚导弹的能力，不再有人怀疑了。然而人们最关心的是防御雷达系统在多目标环境下的工作能力。现代武器系统必须几乎同时完成对几百个导弹的拦截，而且同时还要对另外上千个来袭目标进行跟踪<sup>●</sup>。加之，在这种多目标遭遇的情况下，存在许多相互影响问题，这些问题使防御雷达的功能复杂化。

现代防御雷达系统的作用是检测、跟踪、识别或选择、分配和拦截敌方的导弹，它由六个主要分系统组成：

搜索雷达；

跟踪雷达；

数据处理设备；

导弹发射设备；

拦截导弹；

指挥和控制网。

搜索雷达获得关于来袭目标的最初信息，数据处理设备对这些信息进行分析，依次选出要跟踪的敌方导弹，同时分配跟踪雷达。然后由跟踪雷达提供目标位置和速度的极精确的信息。根据这些信息，数据处理设备选择一条最佳拦截弹道和与每个目标遭遇的拦截点，并进一步指定拦截器和雷达跟踪装置，然后由发射设备发射导弹，靠雷达跟踪装置和数据处理设备将拦截导弹导向目标。指挥和控制系统的作用是把各个分系统连接起来。

在多目标遭遇的情况下，有很多相互影响问题，使防御雷达

---

● 美苏目前能达到的反导弹防御系统的水平也只能同时跟踪几十个目标，识别和拦截能力更低。——译者

系统的基本功能复杂化，这些问题是：（1）交叉目标，使雷达跟踪复杂化；（2）同时拦截，它产生了数据处理设备的排队问题；（3）人为干扰、箔条和核爆炸一类干扰，致使环境混乱，并可能衰减雷达信号，从而给敏感装置和数据处理设备都增加了额外的压力。

要解决在多目标环境下工作的问题，就要采用与高速、大容量多数据处理机相关连的相控阵雷达，本书着重介绍这两方面的内容。

防御雷达经历了从低速机械扫描的单功能雷达到快速电扫描的多功能雷达的发展过程。有关搜索、识别、选择和跟踪目标，以及指定和控制跟踪装置及拦截导弹的功能，已经由多人单独操作的多雷达系统，发展成为自动操作的有联合功能的单一雷达。

防御雷达的发展从1938年安装第一部反飞机炮火控制系统（SCR-268雷达与探照灯联用）开始，它一直作为标准的反飞机炮火控制设备，直到1944年才为微波反射器雷达SCR-584所代替。这种雷达可以控制反飞机高炮，而不需要探照灯或光学角跟踪装置。

在五十年代期间运用的搜索雷达，有用作远程监视的CPS-6B、FPS-3雷达和FPS-6测高雷达。在防空方面，以前由操作员执行的识别和标绘飞机航迹等功能，在这期间都由象赛其系统所用的电子数字计算机来自动执行了。

雷达用于防御弹道导弹则从1956年奈基-宙斯系统的出现开始。它由四部雷达组成：截获雷达，识别雷达，跟踪雷达和与奈基-宙斯拦截导弹联用的拦截导弹跟踪雷达。

1962年出现了奈基-X系统，用来对付在突防技术方面的进展。这种系统只用了两部雷达，即多功能相控阵雷达和导弹场地雷达。虽然已经有了数量有限较快的斯普林特导弹，系统仍然采用低速宙斯导弹作为主要的拦截器。相控阵雷达也是第一次引进。

1967年出现了哨兵系统，有两部雷达：配远程斯巴坦拦截导弹用的PAR雷达，和配近程斯普林特拦截导弹用的MSR雷达。哨兵系统只能在少量目标环境下工作。哨兵系统的直接发展就是现在用于多目标环境下的卫兵系统。

在现时的卫兵系统中，引伸出了两种基本的防御概念：区域防御和终端防御。区域防御是用远程PAR雷达搜索、截获和跟踪来袭的弹道导弹，并在地球大气层外用远程斯巴坦导弹拦截来袭导弹。终端防御是用大容量近程MSR雷达精密跟踪来袭的弹道导弹，并在目标再入大气层，经大气过滤把它从诱饵、箔条和其它进攻欺骗装置分离出来后，用近程高加速度的斯普林特导弹进行拦截。一般说来，这两种类型的防御是互相补充的，并且重点在于为导弹进攻武器提供最佳的防御。

# 一、目标特性

威胁导弹（雷达目标）的两个基本特性——米制测量特性（Metric）和特征信号特性<sup>●</sup>，都可以从它的雷达回波获得。米制测量特性通过测量的距离、角度及其导数给出目标的位置。特征信号特性给出目标的大小和形状。当然，只有当雷达能探测到目标时，才能获得目标的米制测量特性和特征信号特性。因此在制定雷达防御方案时，威胁导弹的弹道和可见度都要涉及到。本章将讨论那些可以用雷达观测的目标特性，同时还将讨论如何解释从雷达信号中提取目标特征信号的问题。

## 1. 目标后向散射

在确定可见度时，主要是关心各种形状导弹的电磁后向散射特性。这些电磁数据为早期发现和识别导弹的雷达防御方案设计提供了设计依据。

### 1.1 雷达散射截面的定义

要对目标的雷达散射截面下定义，最好是研究一下雷达是怎样工作的。功率在发射机中产生，从天线辐射出去，通过介质传播到目标。然后被目标再辐射，反射回接收天线，传输到接收机进行检测和处理。假定在自由空间传播，于是

$$\text{在目标处的功率密度} = \frac{P_T \cdot G_T}{4\pi R_T^2} \text{瓦/米}^2$$

式中  $P_T$ ——平均发射功率，瓦；

$G_T$ ——发射天线增益；

---

● 米制测量特性系指反映目标位置、速度和加速度等的座标和轨道数据，通常是外弹道测量所需的。而特征信号是指与雷达目标形体和表面物理特性有关的雷达回波数据，通常是供目标识别用。——译者

$R_r$ ——目标和发射机之间的距离，米。

目标的再辐射功率是

$$\text{目标再辐射功率} = \frac{P_T \cdot G_T}{4\pi R_r^2} \cdot \sigma \text{ 瓦}$$

雷达散射截面就由后一方程定义。它就是等效反射面积，单位是米<sup>2</sup>。把雷达散射截面乘上在目标处的功率密度，就得到目标在接收天线方向的再辐射功率。

## 1.2 简单形状物体的雷达散射截面<sup>(1)~(6)</sup>

只有几种简单形状的目标<sup>●</sup>的雷达散射截面才是恒定的。对于比较复杂的目标，由于目标各部分的反射电磁波的干涉作用，雷达散射截面是起伏变化的。从不同方向观测目标的再辐射功率，受到这种干涉作用的影响。对于复杂形状的目标，雷达散射截面是目标形状、尺寸、照射频率和目标对雷达波束呈现的方向角的复杂函数<sup>●</sup>。

在图 1.1 中，作为  $ka$  的函数，对几种金属目标的雷达散射截面作了比较。式中  $a$  是目标的特征尺寸(在图中给出)， $k = 2\pi/\lambda$ 。球的数据是理论值；其它曲线的数据是实验值。在  $ka$  值略大于 1 时，球的雷达散射截面和垂直入射时薄圆盘的雷达散射截面有很大的差别，可是当  $ka$  为 1.0 左右时，除了振子以外，几种目标的雷达散射截面相差不到 4 分贝。而且当  $ka$  接近于 1 时，不同形状物体的雷达散射截面随目标方向角的变化，与对振子观测到的变化非常相似。

从图 1.1 看出，雷达散射截面对波长的依赖关系也是很明显的。在瑞利区内 ( $ka \ll 1$ ，波长  $\lambda$  远大于目标的特征尺寸  $a$ )，雷达散射截面随  $ka$  变小迅速减小；在光学区中 ( $ka > 2$ ，且波长  $\lambda$  小于目标尺寸)，雷达散射截面大致与  $\lambda^2$  成正比，并随观测频率的增高而减小；在谐振区 ( $ka$  在 1 和 2 之间)，对目标的入射

● 原文为点目标，不很确切。——译者

● 雷达散射截面还与发射波极化方向有密切关系。——译者

功率一定时,雷达散射截面和再辐射功率均为最大<sup>●</sup>。因此目标的电磁后向散射特性可以划分为三个区域:(1)瑞利区,在该区中,观测波长大于目标的所有尺寸;(2)光学区,在该区中,波长远比目标尺寸小;(3)谐振区,在该区中,波长与目标的尺寸可以比拟。我们在后面将会看到,在每个区域内计算雷达散射截面要用不同的方程式。

在瑞利区,已知许多物体的雷达散射截面按 $1/\lambda^4$ 变化。在另一个频率极端——光学区内,许多物体的雷达散射截面与频率无关。两个重要的例外是 $30^\circ$ 锥球和振子,在光学区内,这两种物体的雷达散射截面大致按 $\lambda^2$ 变化(见图1.1)<sup>●</sup>。

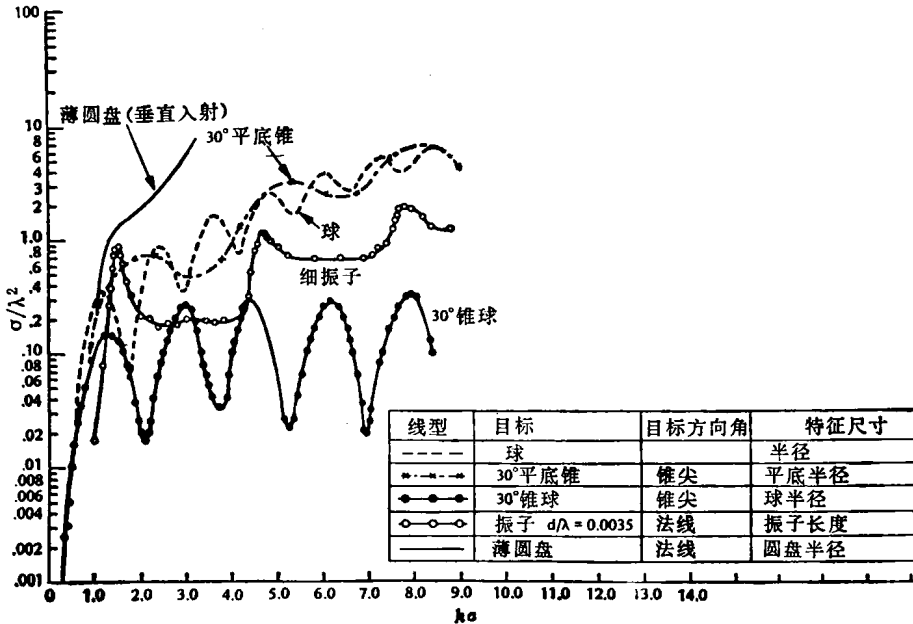


图1.1 各种形状物体散射面积的比较 [1]~[5]

- 这一段叙述是不确切的。不同形状目标雷达散射截面和 $ka$ (波长和目标特征尺寸)的关系是很复杂的,尤其在光学区和谐振区,没有简单的比例关系。另外,瑞利区、谐振区和光学区的划分对不同目标来说,划分的 $ka$ 值也不一样,一般说 $ka < 0.5$ 为瑞利区, $0.5 > ka < 20$ 为谐振区, $ka > 20$ 为光学区。——译者
- 光学区内大部分目标的雷达散射截面仍与频率有关,只有像球等形状才与频率无关。 $30^\circ$ 锥球和振子的雷达散射截面大致与波长一次方成正比。——译者

**瑞利区** 瑞利区的特点是工作波长大于物体的某些特征尺寸，一般是  $ka < 1$ 。在这个区域中，雷达散射截面与波长的四次方成反比。旋转物体的雷达散射截面（沿旋转轴方向观测）的一般方程式是

$$\sigma = \frac{4}{\pi} k^4 V^2 \left[ 1 + \frac{e^{-y}}{\pi y} \right] \quad (1.1)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ ——传播常数，

$V$ ——物体的体积，

$y$ ——一个纯数乘上长宽比，称形状指数。

长与在传播方向物体的最大尺寸相联系，宽与垂直于传播方向物体的最大尺寸相联系。表 1 给出了各种形状物体的体积  $V$  和数值  $y$ （沿物体的旋转轴方向观测）。

表 1 各种形状雷达目标的体积和形状指数

形 状	$V$ (体积)	$y$ (形状指数)
圆 平 板	$\pi a^2 h$	$\frac{h}{4 a}$
半 球	$\frac{2}{3} \pi a^3$	$\frac{1}{2}$
球	$\frac{4}{3} \pi a^3$	1
平 底 锥	$\frac{\pi}{3} a^2 h$	$\frac{h}{4 a}$
锥 球	$\frac{\pi}{3} a^2 h + \frac{2\pi a^3}{3}$	$\frac{h + 2 a}{4 a}$
圆 柱	$\pi a^2 h$	$\frac{3 h}{4 a}$

式中  $a$ ——半径，

$h$ ——高度。

应该指出，对于所关心的象再入飞行器这样的物体，数  $y$  总是大于 1。因此方程 (1.1) 括弧中的指数项可以忽略，那么如果用波长长的雷达来测量目标的雷达散射截面，就可以把物体的



体积确定出来。在瑞利区确定雷达散射截面的基本特征就是确定物体的体积。

如果不是沿对称轴，而是沿其它的方向来进行观测，这些物体大多数的雷达散射截面出现下降。在偏离轴线的方向上，这种变化是很慢的，在多数情况下，此方程 (1.1) 给出的值下降不会超过几分贝。

**谐振区和光学区** 在谐振区和光学区，工作波长接近或小于物体的某些尺寸。在这二个区域，对于所有的对称物体，都没有象瑞利区的方程 (1.1) 那样用物体的体积和尺寸表达的统一的雷达散射截面公式，当  $ka$  在 0.2 到 10 之间（谐振区）时，可以直接参考图 1.1 的有关数据获得  $\sigma/\lambda^2$  的数值。从图上可以看出，给定物体的雷达散射截面预计在 10 分贝范围内振荡。在谐振区，当垂直于传播方向的物体尺寸近似等于半波长的整数倍时，雷达散射截面出现最小值。这些观测结果对于锥球形状的物体尤为适用。对大量锥球数据进行的研究表明，它的最大和最小雷达散射截面（从鼻尖方向观测）实际上可以用如下的方程式近似表达出来：

$$\sigma_{\max} = 0.4\lambda^2$$

$$\sigma_{\min} = 0.01\lambda^2$$

对半锥角覆盖区为  $10^\circ$  到  $40^\circ$  左右的锥，这些方程的误差不超过几分贝。在谐振区，锥-球再入飞行器（如果从鼻尖方向观测）的平均雷达散射截面是：

$$\sigma_{\text{平均}} = 0.2\lambda^2$$

一般情况下， $3 < ka < 10$  为由谐振区向光学区过渡的范围。 $ka$  的具体数值取决于物体的形状。

在光学区，物体的雷达散射截面主要由它的表面状况和形状确定。物体表面的不连续性必然导致雷达散射截面增大。把图 1.1 中平底锥和锥球的雷达散射截面作一比较，就可以看出这一点。特别是当进入光学区时，平底锥的锥和底部连接区的不连