

主 审 鞠新春
主 编 杨 超

雷达对抗基础

LEIDA DUIKANG JICHU



电子科技大学出版社

主 审 鞠新春 主 编 杨 超

雷达对抗基础

LEIDA DUIKANG JICHU



电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

雷达对抗基础 / 杨超主编. —成都: 电子科技大学出版社, 2012. 8

ISBN 978-7-5647-0683-8

I. ①雷… II. ①杨… III. ①雷达对抗 IV.

①TN974

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 199993 号

内 容 提 要

本书基于雷达系统的基本原理和抗干扰技术, 以通俗的语言和直观的图表介绍了电子对抗的原理、措施和使用。本书包括 18 章内容和 2 章附录。第 1~第 8 章主要介绍了雷达的原理、组成、目标探测、跟踪和制导技术; 第 9~第 13 章主要介绍了雷达噪声干扰和欺骗干扰技术, 诱饵和箔条的使用; 第 14 章和第 15 章介绍了红外制导原理及对抗措施; 第 16 章介绍了雷达电子防护技术; 第 17 章和第 18 章介绍了雷达告警接收机和自卫干扰系统功能及使用; 附录中介绍了雷达对抗常用的基础知识和基本方程。

雷达对抗基础

主 审 鞠新春

主 编 杨 超

出 版: 电子科技大学出版社(成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 杜 倩

责任编辑: 李述娜

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 四川经纬印务有限公司

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张 15 字数 380 千字

版 次: 2012 年 8 月第一版

印 次: 2012 年 8 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-0683-8

定 价: 38.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83201495。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

编 委 会

主 审	鞠新春		
副主审	胡 颀	吴江洪	
主 编	杨 超		
副主编	邹时禧	苗秀梅	
技 校	游志军	刘重阳	周水楼
编 者	巩 强	刘国亮	徐 立
	王雁涛	闫晓峰	颜 雨
	吴雪峰	田增彬	王 磊
	鲜 敏	段国文	蒋卫锋
	周世群	李 明	徐黎明

前 言

随着雷达系统威胁的日益严峻，雷达对抗将在现代战争中发挥越来越重要的作用。本书基于雷达的基本原理和抗干扰技术，以通俗的语言介绍了雷达对抗的原理和措施。为了使读者深入理解雷达对抗的战术应用，本书还从雷达对抗的角度，有针对性地介绍了雷达和红外系统的探测、跟踪和制导技术。书中给出了大量的图表，以期读者直观、便捷地掌握雷达对抗的基本技术、战术及其局限性，有益于雷达对抗装备的监造、训练和使用。希望本书对雷达对抗装备的研究和使用人员有一定的参考价值。

本书在编写过程中得到了西南电子设备研究所和电子信息控制重点实验室的领导和专家的帮助，在此表示衷心感谢。

由于我们的专业技术水平有限，书中难免存在笔误乃至错误之处，敬请批评指正。

编 者

2012 年 4 月

目 录

第 1 章 雷达简介.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 历史.....	1
1.3 目标鉴别.....	2
1.4 综合防空系统.....	4
1.5 小结.....	7
第 2 章 射频信号特征.....	8
2.1 引言.....	8
2.2 频率.....	8
2.3 波长.....	8
2.4 极化.....	9
2.5 多普勒效应.....	11
2.6 电磁频谱.....	12
2.7 射频信号传播.....	13
2.8 小结.....	16
第 3 章 雷达信号特征.....	17
3.1 引言.....	17
3.2 脉冲宽度.....	17
3.3 脉冲重复时间.....	17
3.4 脉冲重复频率.....	18
3.5 接收机特征.....	19
3.6 占空比.....	19
3.7 峰值功率.....	21
3.8 平均功率.....	21
3.9 调制.....	21
3.10 小结.....	22
第 4 章 雷达组成.....	23
4.1 引言.....	23
4.2 脉冲雷达.....	23
4.3 连续波雷达.....	27

4.4	脉冲多普勒雷达.....	28
4.5	单脉冲雷达.....	29
4.6	小结.....	31
第 5 章	雷达原理.....	32
5.1	引言.....	32
5.2	距离测量.....	32
5.3	方位测量.....	35
5.4	仰角测量.....	38
5.5	分辨单元.....	39
5.6	速度测量.....	40
5.7	小结.....	42
第 6 章	雷达天线特性与扫描.....	43
6.1	引言.....	43
6.2	抛物面天线.....	43
6.3	卡塞格伦天线.....	44
6.4	相控阵天线.....	46
6.5	天线增益.....	48
6.6	天线方向图.....	49
6.7	圆周扫描.....	50
6.8	线性扫描.....	52
6.9	单向扫描.....	52
6.10	双向扫描.....	53
6.11	圆锥扫描.....	53
6.12	边扫描边跟踪.....	55
6.13	地形对雷达扫描的影响.....	57
6.14	小结.....	58
第 7 章	雷达目标跟踪.....	59
7.1	引言.....	59
7.2	距离跟踪.....	59
7.3	圆锥扫描跟踪.....	61
7.4	边扫描边跟踪.....	63
7.5	隐蔽接收扫描跟踪.....	66
7.6	单脉冲雷达跟踪.....	67
7.7	连续波雷达跟踪.....	69
7.8	脉冲多普勒雷达跟踪.....	72

7.9 小结.....	74
第 8 章 制导技术.....	75
8.1 引言.....	75
8.2 指令制导.....	76
8.3 半主动制导.....	78
8.4 主动制导.....	80
8.5 地面辅助寻的制导与通过导弹跟踪制导.....	81
8.6 防空高射炮.....	82
8.7 小结.....	83
第 9 章 雷达电子防护技术.....	84
9.1 引言.....	84
9.2 接收机保护.....	84
9.3 干扰信号规避.....	86
9.4 干扰信号利用.....	87
9.5 干扰信号压制.....	87
9.6 脉冲宽度鉴别.....	88
9.7 角度鉴别.....	88
9.8 带宽鉴别.....	89
9.9 多普勒频率鉴别.....	89
9.10 时间鉴别.....	90
9.11 小结.....	91
第 10 章 雷达干扰导论.....	92
10.1 引言.....	92
10.2 雷达干扰类型.....	92
10.3 雷达干扰使用.....	93
10.4 雷达干扰原则.....	95
10.5 小结.....	100
第 11 章 雷达噪声干扰.....	101
11.1 引言.....	101
11.2 噪声干扰效果.....	101
11.3 噪声干扰产生.....	103
11.4 阻塞式干扰.....	104
11.5 瞄准式干扰.....	104
11.6 扫频瞄准式干扰.....	105
11.7 覆盖脉冲干扰.....	106

11.8	调制噪声干扰.....	107
11.9	小结.....	108
第 12 章	雷达欺骗干扰.....	109
12.1	引言.....	109
12.2	假目标干扰.....	110
12.3	距离欺骗干扰.....	111
12.4	角度欺骗干扰.....	113
12.5	速度欺骗干扰.....	115
12.6	单脉冲欺骗干扰.....	119
12.7	地面弹射式干扰.....	123
12.8	小结.....	123
第 13 章	诱饵.....	124
13.1	引言.....	124
13.2	饱和诱饵.....	124
13.3	拖曳式诱饵.....	125
13.4	一次性有源诱饵.....	127
13.5	小结.....	128
第 14 章	箔条.....	129
14.1	引言.....	129
14.2	箔条特性.....	130
14.3	箔条作战使用.....	135
14.4	小结.....	139
第 15 章	雷达告警接收机及定位技术.....	140
15.1	引言.....	140
15.2	天线.....	140
15.3	接收机.....	141
15.4	信号处理器.....	143
15.5	辐射源识别数据库.....	144
15.6	视频告警.....	145
15.7	音频告警.....	146
15.8	界面控制单元.....	146
15.9	告警接收机的局限性.....	146
15.10	威胁目标定位技术.....	149
15.11	小结.....	152

第 16 章 雷达自卫干扰系统及作战使用	154
16.1 引言	154
16.2 接收天线	154
16.3 接收机	155
16.4 系统处理器	155
16.5 干扰技术产生器	156
16.6 发射天线	156
16.7 控制指示单元	157
16.8 作战使用	157
16.9 小结	158
第 17 章 红外线制导原理	159
17.1 引言	159
17.2 红外线特性	159
17.3 红外线辐射源	162
17.4 红外线导引头原理	163
17.5 红外线导引头类型	164
17.6 抗红外弹干扰能力	166
17.7 小结	171
第 18 章 红外对抗	172
18.1 引言	172
18.2 自卫式红外干扰弹	172
18.3 先进的红外干扰弹	173
18.4 红外干扰弹的投放	174
18.5 红外对抗战术	175
18.6 导弹告警系统	176
18.7 小结	177
附录 I 基础知识	178
1.1 物理单位与常数	178
1.2 分贝	181
1.3 雷达视距	185
1.4 多普勒频移	187
1.5 信号调制	190
1.6 功率密度	195
1.7 电压驻波比、反射系数、回波损耗与失配损耗	198
1.8 射频大气吸收与大气波导传播	201

1.9 雷达截面积.....	202
附录 II 基本方程	209
2.1 雷达方程.....	209
2.2 恒功率干信比方程.....	218
2.3 恒增益干信比方程.....	222
2.4 烧穿距离与交叉距离方程.....	224
参考文献.....	226

第1章 雷达简介

1.1 引言

“雷达”(RADAR)一词源于“无线电探测与测距”的英文缩写。正如其最初含义所表明的那样,无线电波用于探测目标是否存在和测定目标的距离(如图1-1-1所示)。

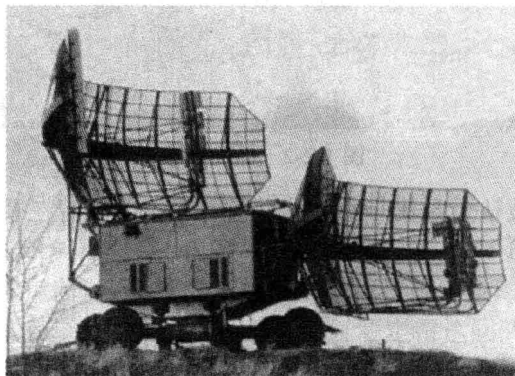


图 1-1-1 雷达系统

1.2 历史

100多年前,人类首次注意到物体对无线电波的反射效应。1903年,德国人利用无线电波的反射,对大海中的船只进行了探测(如图1-2-1所示)。1922年,马可尼在英国提出了同样的想法,但并没有引起官方的兴趣。这些早期试验是利用连续波的传输特性,依靠目标反射的电波来判断目标是否存在。连续波能够探测物体的存在。如果将发射的连续波限制在窄波束中,它就能提供目标的方位信息,但不能提供目标的距离信息。

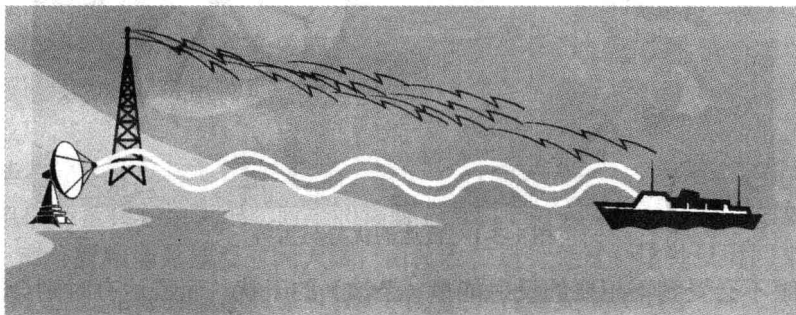


图 1-2-1 早期的连续波雷达试验

(1) 无法获取距离信息是一个非常严重的缺点,但最终通过对无线电波进行调制,发射一系列窄脉冲克服了这个缺点(如图 1-2-2 所示)。发射机发射的脉冲与接收机接收到脉冲之间的时间间隔可以直接用于测算距离。20 世纪 30 年代,美国、英国和德国开展了脉冲雷达的研发工作。由于与德国关系恶化,英国面临着被入侵的威胁,因此在 1935 年加大了对脉冲雷达的研发力度,研制并部署了由多个雷达站构成的“本土链”系统。在大不列颠战役中,这些雷达设施为英国飞行员提供了德国轰炸机编队规模和位置等重要信息。

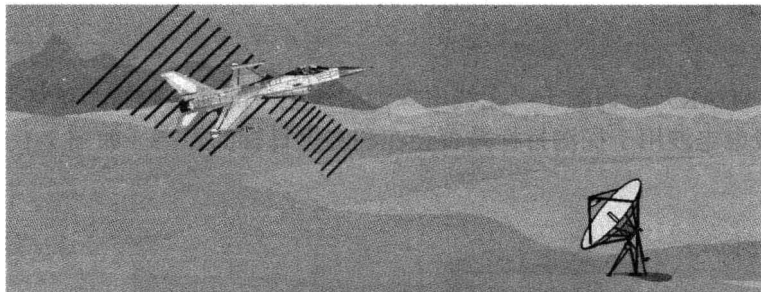


图 1-2-2 脉冲雷达

(2) “本土链”系统被认为是第一个综合防空系统。伴随着在军事和民用中的广泛应用,雷达的发展长盛不衰。

1.3 目标鉴别

雷达在军事和民用领域的广泛应用基于其相对人眼的天然优势(如图 1-3-1 所示)。首先,雷达比人眼“看”得远,而且能够更精确地确定与目标之间的距离。雷达基本上不受烟、雾、云的影响,在全天候条件下能够正常工作。此外,因为雷达发射的是自身的能量,并不依靠太阳光或其他外界辐射源,所以能全天 24 小时工作。不过同人眼相比,雷达也有一些劣势。首先,雷达不具备人眼所具有的分辨率。尽管雷达能够探测到一架飞机,但人眼能够识别出很多细节,包括形状、大小、颜色甚至标识等。在交战前无法对目标进行准确的识别,这些都突显出雷达的局限性。

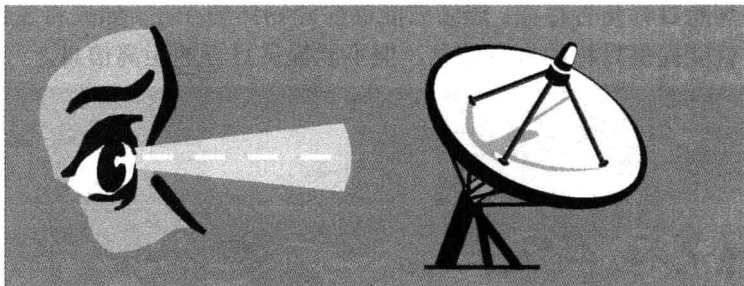


图 1-3-1 雷达的优势与劣势

其次,人眼不会受到不想要的反射能量(杂波)的干扰,而雷达有时则会遇到。虽然金属物是射频能量最好的反射体,但几乎所有物体都会反射部分射频能量。高山、树木、建筑

物、雨滴、飞鸟和箔条也都能对射频能量进行反射。因此雷达系统必须能够鉴别目标，将需要的目标回波从杂波中分离出来。目标鉴别要素包括距离、速度和角度（如图 1-3-2 所示）。

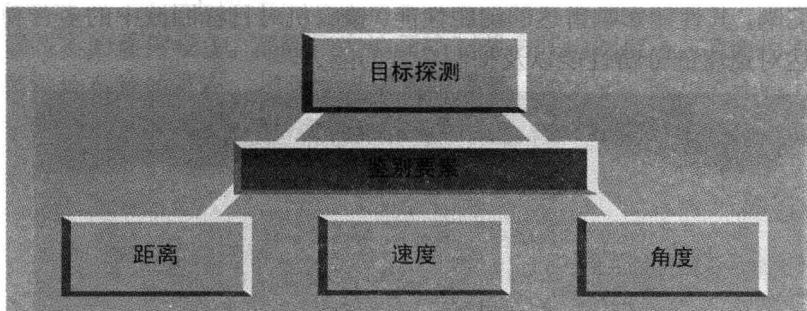


图 1-3-2 雷达的目标鉴别因素

（1）第一个目标鉴别要素是距离。射频电波往返的时间可以用于测量雷达到目标的距离。射频能量以光速（ $c=3\times 10^8\text{m/s}$ ）传播，目标距离可以用雷达距离方程式（1-3-1）算出。

$$R=\frac{t\times c}{2} \quad (1-3-1)$$

式中， c 为光速， R 为目标距离， t 为射频电波往返的时间。

（2）目标角度分辨是雷达系统的另一项重要性能。雷达系统为了能探测目标，其天线在发射和接收射频能量时必须指向目标。雷达系统精确确定目标角度的性能与天线水平波束宽度有关。如果雷达扫描是以正北为基准方向，那么可以测定雷达回波相对于正北的角度（如图 1-3-3 所示）。

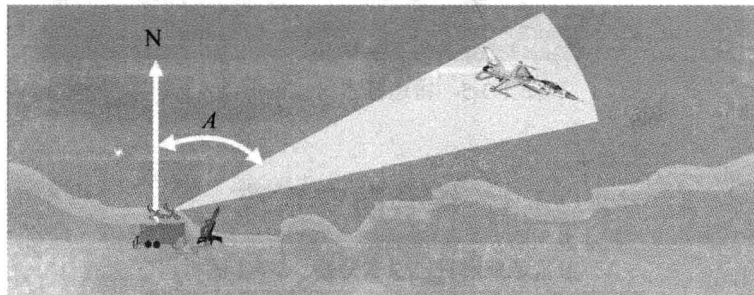


图 1-3-3 角度分辨

（3）速度分辨是连续波雷达和脉冲多普勒雷达的特殊性能。连续波雷达的发射机以一特定频率发射连续的射频信号（如图 1-3-4 所示）。反射信号的频率被运动目标改变了一定量，即发生了频移。这个频移称为多普勒效应，使雷达能够测量目标相当于雷达的速度。雷达接收机测量这个频率差，就能得出特定的径向速度。脉冲多普勒雷达能够在获得距离信息的同时测量多普勒效应。

（4）一个基本的脉冲雷达系统包括发射机、天线、接收机和同步器（如图 1-3-5 所示）。发射机产生的电磁能量传输至天线，向空间辐射。当这个射频能量被物体（诸如飞机、舰船或地面）阻挡，部分射频能量被反射回天线，由接收机进行处理。这种反射回来的射频能量称为回波，阻挡了射频能量的物体叫做目标。回波的存在表明探测到了目标。如果探测到的目标是期望目标，这个回波就称为目标信号。如果回波来自一个不期望的目标（比如地面），

那么这个回波就称为杂波。实际情况是，不期望的回波会导致对目标的探测困难。天线对射频能量的聚集能力对雷达角度的分辨性能有很大影响。同步器确定射频发射与接收到目标回波之间的时间间隔，其性能影响雷达的测距性能。接收机对目标回波中的多普勒频移的分析能力，决定雷达对速度的分辨性能以及抑制杂波的能力。

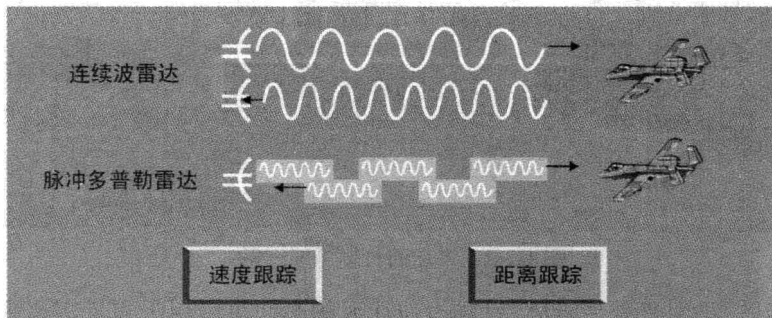


图 1-3-4 速度分辨

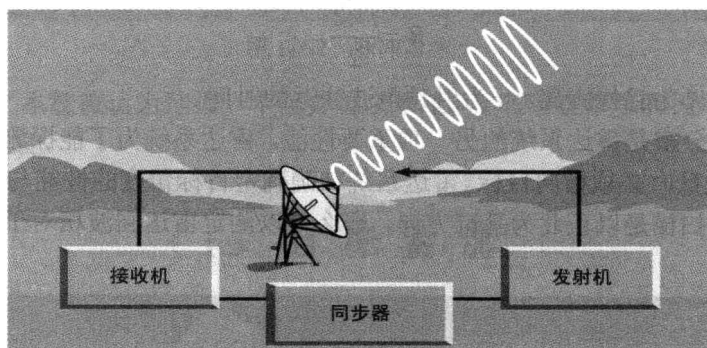


图 1-3-5 雷达基本组成框图

1.4 综合防空系统

雷达系统本身具有精确测量空中目标的距离、方位和速度的能力。雷达系统能够在几乎所有类型的天气，无论是在白天还是黑夜，并且能在远超过人眼能看到的距离上探测目标。军事指挥人员利用雷达的这些能力，通过部署雷达系统对高价值目标提供对空防护。防空雷达系统的主要任务就是对攻击目标进行预警并对威胁实施交战。

(1) 专门设计用于提供攻击预警的雷达系统被称为预警雷达（如图 1-4-1 所示）。这种雷达具有输出功率大、天线尺寸大、频率低的特点。这些特征也制约了预警雷达获得目标参数的精确性。预警雷达能够对飞机进行远距离探测并能最先对可能攻击的目标告警，为防空系统提供了第一道防线。

(2) 设计用于提供目标交战信息的雷达系统包括地面控制截击雷达、截获雷达、目标跟踪雷达和机载截击雷达。

① 地面控制截击雷达用于为空中截击装备提供足够精确的目标飞机的距离、方位和高度数据，引导空中截击装备对来袭飞机进行拦截和摧毁。为了提供这些数据，预警雷达可以

与专用的测高雷达协同部署和使用。这两种雷达系统的组合构成了地面控制截击阵地。较新型的地面控制截击雷达系统采用了相控阵天线和多普勒处理技术,能够提供所需的三维目标信息。任何能够提供三维目标数据的雷达系统或者这些雷达系统的组合,并配备能将信息传递给空中拦截装备的通信设备,都能作为地面控制截击阵地的装备。地面控制截击雷达系统可以作为预警雷达系统的补充,提供关键的攻击告警。

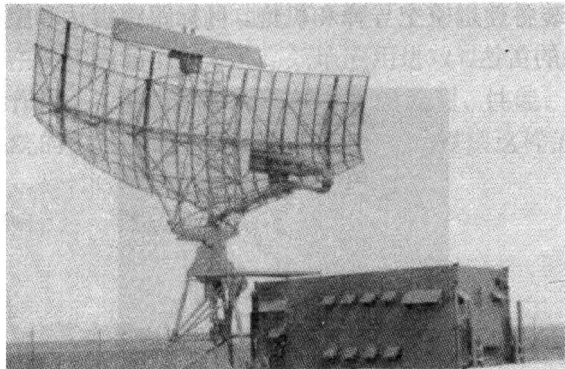


图 1-4-1 预警雷达系统

② 截获雷达系统是与地基目标跟踪雷达配套的地面控制截击雷达。截获雷达系统通常比预警雷达的探测距离近,工作频率高。该雷达系统为目标跟踪雷达提供精确的目标距离和方位数据,用于对目标的交战。截获雷达可以是一种独立的雷达系统(如图 1-4-2 所示),也可以与目标跟踪雷达配合使用(如图 1-4-3 所示)。

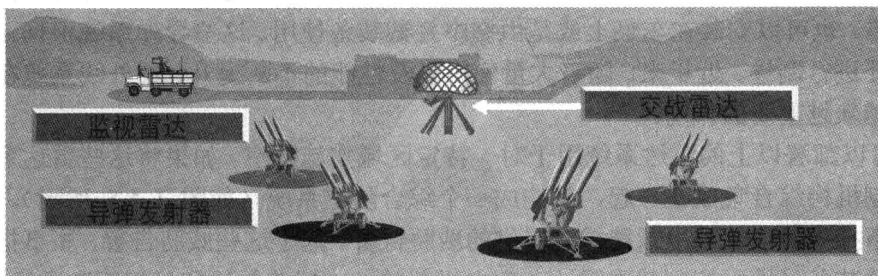


图 1-4-2 截获雷达与目标跟踪雷达



图 1-4-3 具有截获能力的目标跟踪雷达

③ 用于支持防空系统的目标跟踪雷达的主要任务就是为火控计算机提供连续的、精确

的目标参数。火控计算机利用这些数据引导导弹或防空高炮，摧毁来袭飞机。目标跟踪雷达利用多种跟踪技术，不断更新目标参数。它通常采用高频、窄波束，通过计算机信号处理，提高送给火控计算机的目标参数的精度。

④ 空中截击雷达系统是作战飞机使用的目标跟踪雷达，用于打击并摧毁空中目标（如图 1-4-4 所示）。该雷达系统频率高，使用先进的计算机处理技术，具备精确的目标跟踪能力，用于引导空中拦截装备使用空空导弹和机炮。目标跟踪雷达和空中截击雷达是与防空系统相关的最高威胁等级的雷达。



图 1-4-4 米格-29 战斗机

⑤ 与防空系统有关的另一个不断增长的致命威胁是红外线导弹。红外线导弹系统可以由人员携带，也可以安装在车辆上或是由空中拦截装备使用。这些导弹系统根据飞机独特的红外线特征进行制导。近年来，随着大量使用以及性能不断提升，红外线系统在防空系统中发挥着越来越重要的作用。

(3) 可以部署以上的雷达系统用于对一特定区域实施防空。如果将这些雷达系统通过一个指挥控制机构综合集成在一起，就构成一个综合防空系统（如图 1-4-5 所示）。指挥控制机构使军事指挥员能够利用预警雷达提供的威胁告警。基于这些威胁告警，军事指挥员能够分配相应的装备（地面控制截击雷达、空中拦截装备或截获雷达和目标跟踪雷达），对空中目标进行探测。如何分配装备是基于这些系统的不同能力及战术态势。这个分配过程能够使军事指挥员充分发挥其部队的作战能力，打击和摧毁来袭飞机。

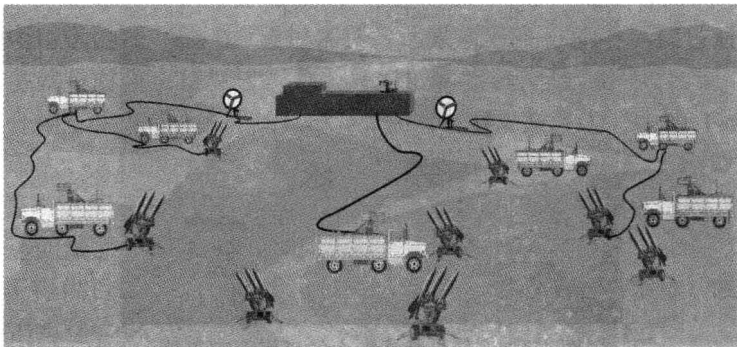


图 1-4-5 一种典型的综合防空系统