

炮瞄雷达



吴祈耀 编

PAOMIAO
LEIDA

国防工业出版社

炮 瞄 雷 达

吴 祈 耀 编

國防工業出版社

前 言

为了普及雷达技术知识，编写了这本“炮瞄雷达”小册子。想通过它使读者对当前在军事上，特别是在现代防空中占有重要地位的高射炮炮瞄雷达，有较为系统的了解。书中对炮瞄雷达的任务、要求、工作原理、基本组成以及发展状况，都一一作了介绍。全书共有五章，前四章说明炮瞄雷达的过去和现在，最后一章说明炮瞄雷达的现在和不远的将来。但由于作者水平有限，技术上错误之处在所难免，欢迎读者批评指正。

目 录

第一章 概述	1
§ 1-1 炮瞄雷达在现代防空中的作用与地位	1
§ 1-2 炮瞄雷达的任务与要求	3
§ 1-3 炮瞄雷达的体制	8
第二章 圆锥扫描制炮瞄雷达	10
§ 2-1 雷达精确测距和实现距离跟踪的原理和方法	11
一、雷达发现目标和测距的原理	11
二、提高测距精度的方法	13
三、距离跟踪	17
§ 2-2 圆锥扫描雷达精确测角和实现角度自动跟踪的原理和方法	23
一、雷达的测角原理	23
二、圆锥扫描角度自动跟踪系统的工作原理	25
§ 2-3 典型的圆锥扫描制炮瞄雷达的基本组成及工作过程	31
一、典型的圆锥扫描制炮瞄雷达的组成及作用	31
二、简单工作过程	33
§ 2-4 圆锥扫描制炮瞄雷达各系统介绍	35
一、发射系统	35
二、天线馈电线系统	42
三、接收系统	46
四、测距系统	58
五、环视系统	69
六、天线控制系统	72
第三章 单脉冲制及隐蔽锥扫描制炮瞄雷达	82
§ 3-1 单脉冲角度自动跟踪雷达的工作原理及组成	83

一、幅度和差法单脉冲角跟踪系统工作原理	84
二、单脉冲雷达的组成及工作过程	87
三、单脉冲雷达的几个重要部件及电路介绍	89
§ 3-2 隐蔽锥扫角度自动跟踪雷达的工作原理	104
一、隐蔽锥扫角跟踪系统工作原理	104
二、隐蔽锥扫雷达的几个特殊部件	106
第四章 提高炮瞄雷达角度快速跟踪能力的原理和方法	109
§ 4-1 概述	109
§ 4-2 提高雷达角跟踪系统快速跟踪能力的原理和方法	114
第五章 炮瞄雷达的发展状况	128
§ 5-1 概述	128
§ 5-2 几种雷达体制的特点及工作原理	143
一、动目标显示 (MTI) 雷达	143
二、脉冲多卜勒雷达	150
三、频率捷变雷达	158
四、脉冲压缩雷达	164
§ 5-3 “三位一体”炮瞄雷达	174
§ 5-4 雷达新技术	184
结束语	188

第一章 概 述

§ 1-1 炮瞄雷达在现代防空中的作用与地位

高射炮炮瞄雷达（以下简称炮瞄雷达）是在第二次世界大战后期出现的。在当时的战争中，航空技术得到了迅速的发展，飞机的速度和作战性能不断提高，对地面的压制力量进一步加强，然而与之相对抗的地面防空力量，则由于防空武器命中率很低而显得比较薄弱。虽然当时工业最发达的美国采用了 SCR-268 雷达进行火力控制，但因其精度太差，命中率也不高。于是，提高地面防空能力成为战争中迫切需要解决的问题。正是由于战争的需要，当然也由于大战爆发后，新兴的雷达技术获得迅速发展，提供了技术上的可能性，于是共同促成了微波炮瞄雷达的产生。炮瞄雷达的产生和使用，大大提高了高炮的命中率，从而使地面防空火力系统的效能大为改观，显著的增强了地面防空能力。

下面简要介绍一下配置有高炮炮瞄雷达的地面防空火力系统的组成和工作过程。

地面防空火力系统主要由炮瞄雷达、指挥仪和数门高射炮组成（现代化的防空系统，一般还包括有地面防空导弹，将在最后一章叙述）。

其工作过程是，首先由具有较大作用距离的警戒雷达（目标指示雷达），早期发现敌人入侵的飞行目标（多在几百公里的范围内），并及时测定其坐标，为指挥所提供空情，同

时通过指挥所传给炮瞄雷达。当入侵敌机进入炮瞄雷达工作区域后，炮瞄雷达迅速捕住目标，并转入跟踪状态，同时连续测出目标的方位角、仰角（或称高低角）和斜距。目标的瞬时坐标通过电气传递系统自动传至指挥仪，指挥仪自动计算出目标的未来坐标，求出高炮的射击参数（如未来方位角、射角、引信爆炸时间等）并传至各高射炮。然后，借助于动力机构联动各门高射炮在方位角和射角上自动瞄准目标，并随着空中目标的移动而移动炮口。指挥员根据实战情况，在高射炮射程范围内，随时可下令对空射击。

图 1-1 是地面防空火力系统的简单示意图。图中示出两部电源站，分别为雷达、指挥仪和高射炮动力传动装置供电。六门（根据需要可增加或减少）高射炮配置在中央配电箱周围，中央配电箱除用电缆与电源站连接外，还用电缆与指挥仪相连接。

炮瞄雷达和上述配置炮瞄雷达的地面防空火力系统，从产生到现在已经有了三十余年的历史，三十年来炮瞄雷达在现代防空中一直处于重要地位。据统计，在二次世界大战后期和近十几年来世界上发生的几次局部战争中，被击落的敌方飞机，几乎有 90% 是地面防空部队击落的，被空中力量摧毁的飞机仅为 10% 左右（顺便指出，在六十年代以后的战争中，地面防空力量除高射炮外还包括了防空导弹的作用）。

当然，现代的炮瞄雷达与早期的炮瞄雷达相比，技术上有了很大提高，并采用了多种体制，抗干扰能力大大增强，战斗性能也有了较大改进。而且随着空中攻击技术的飞速发展，与之相应的防空技术和指挥防空武器的雷达，至今仍在继续不断地发展和提高着。

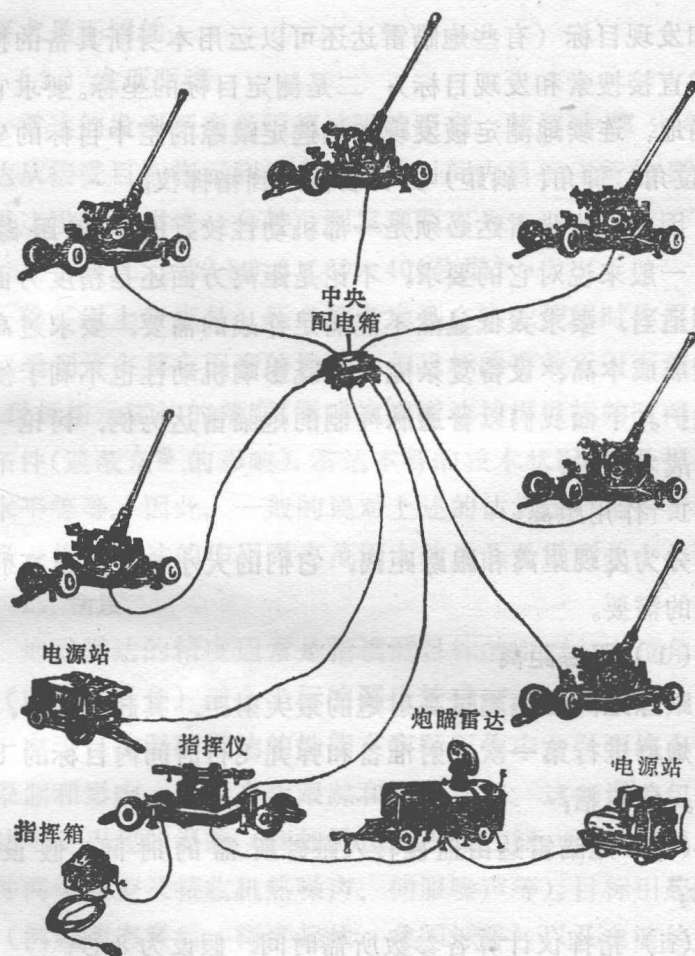


图1-1 地面防空火力系统示意图

§ 1-2 炮瞄雷达的任务与要求

由前面的介绍可知，高炮炮瞄雷达的主要用途是与指挥仪和高射炮组成地面防空火力系统。它在系统中的任务：一是搜索和发现目标，即根据警戒雷达的目标指示数据进行搜

索和发现目标（有些炮瞄雷达还可以运用本身所具备的搜索方式直接搜索和发现目标）；二是测定目标的坐标。要求它能准确地、连续地测定被发现和被选定跟踪的空中目标的坐标（方位角、仰角、斜距）并自动传送到指挥仪。

因此，炮瞄雷达必须是一部机动性较好的精密跟踪雷达。一般来说对它的要求，不论是距离方面还是精度方面都必须适当，要求太低显然不能满足作战的需要，要求过高则会造成成本高、设备复杂庞大，既影响机动性也不利于使用与维护。下面我们以前普通脉冲制的炮瞄雷达为例，讨论一下它的战术要求。

1. 作用距离

分为发现距离和跟踪距离，它们的大小都应满足高射炮射击的需要。

（1）跟踪距离

跟踪距离必须超过高射炮的最大射距，其超过部分，应等于炮群进行第一次齐射准备和弹丸飞行时间内目标的飞行距离。它包括：

（i）炮瞄雷达由监视转入跟踪所需的时间，假设为 10 秒；

（ii）指挥仪计算各参数所需时间，假设为 8 秒；

（iii）装填炮弹所需时间，假设为 2 秒；

（iv）弹丸飞行时间，假设为 20 秒。

此外我们再设所配高射炮射程为 10 公里，目标航速为 300 米/秒。由此可估算出跟踪距离为：

$$10 + 0.3 \times (10 + 8 + 2 + 20) = 22 \text{ (公里)}$$

由上可见，对于不同高射炮和指挥仪所配备的雷达，距

离要求是不同的。

(2) 发现距离

雷达的发现距离必须超过跟踪距离,其超过部分等于雷达从接受目标指示到捕捉目标的时间内目标飞行的距离。如果这段时间用去一分钟,则发现距离为

$$22 + 0.3 \times 60 = 40 (\text{公里})$$

除了以上考虑外,还必须考虑到在实际使用时作用距离还要受到许多其它因素的影响,如目标的有效反射面积的变化,目标指示雷达的精度(影响炮瞄雷达捕捉目标的时间),阵地条件(遮蔽角[●]的影响),雷达本身的技术状况,以及操作手的水平等等。因此,一般的说对上述的估算还必须给予一定余量。炮瞄雷达的作用距离范围大约为几公里到几十公里。

2. 精度

炮瞄雷达的精度通常是指被测目标的距离、方位角、仰角(或称高低角)三个坐标的测量精确度。

由于自动跟踪雷达的性能在实际工作中会受到许多因素的限制和影响,从而产生跟踪和测量误差。这些误差包括有雷达本身引起的误差(例如雷达的机械性能,调整情况,单脉冲网络误差及接收机热噪声、伺服噪声等),目标引起的误差(例如动态滞后,幅度起伏,角闪烁等),以及电波传播引起的误差等等。

由于跟踪误差具有统计特性,因此要用概率论的方法进行研究与分析。跟踪精度通常用系统误差与随机误差来表示。

● 在雷达阵地周围某一方位上,用雷达天线上的标定瞄准镜十字水平线,对准该方位上地物目标的顶端,此时测得的仰角即为该地物目标对雷达的遮蔽角。

炮瞄雷达是通过指挥仪控制高炮进行射击的，因此要求有较高的精度。具体的精度要求是根据一定的命中率，在雷达、指挥仪、高炮以及数据传递机构之间进行合理的误差分配后给出的。一般角精度约为 $0.5 \sim 2$ 密位；距离精度为 20 米左右。

精度问题比较复杂，影响因素除了雷达本身的设计与制造质量外，使用条件和操作技术也有着很大影响。例如当阵地周围地物较强时，就有可能使波束变形从而增大测角误差；当雷达工作在仰角很小的情况下时，就有可能由于地面对电波的反射造成波束分裂，使仰角误差加大或跟踪不稳；阵地如为斜坡，那么上斜坡就会影响雷达的低空性能。

3. 跟踪速度

由于现代战争空中攻击力量采用了低空快速入侵战术，为保证雷达在跟踪过程中不丢失目标，并尽可能使精度不下降，就要求提高炮瞄雷达的跟踪速度。优良的炮瞄雷达角跟踪系统，跟踪速度可高达 $90^\circ/\text{秒}$ 以上。

4. 分辨力

典型的炮瞄雷达通常是跟踪单个目标的，故一般都要求有较高的分辨力。所谓分辨力是指雷达能区分两个相邻目标的能力。由于两个目标既可能在距离上也可能在方向上处于相邻近的位置，所以又有距离分辨力和角度分辨力之分。

(1) 距离分辨力：当两个目标在同一方向时，雷达可以分别测定两个邻近目标的最小距离 ΔD (图 1-2)。

(2) 角度分辨力：当两个目标距离相同时，可以分别测定两个邻近目标间的最小角度 $\Delta\beta$ (图 1-3)。

5. 雷达的抗干扰能力

指雷达在自然干扰和人为干扰的情况下能正常工作的能

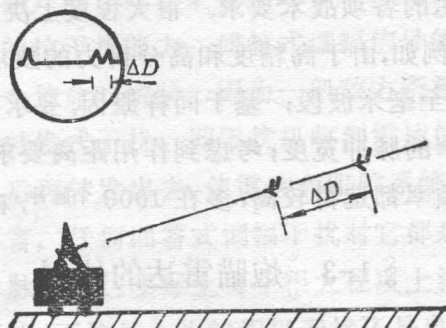


图1-2 距离分辨力

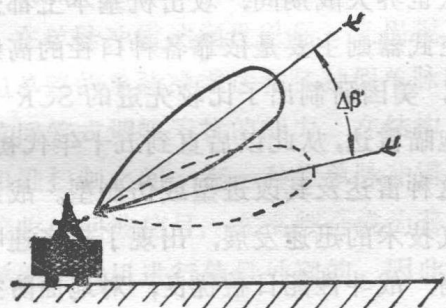


图1-3 角度分辨力

力，或指能在降低一定性能情况下继续工作的能力。在现代战争中，由于电子对抗技术的发展，雷达的抗干扰能力已成为十分突出的问题，抗干扰能力的优劣，直接影响到雷达在战争中使用的有效性。使炮瞄雷达进一步增加抗干扰能力，是今后炮瞄雷达的重要发展方向之一。

此外，作为战术要求，还有一些使用参数如重量、体积、电源、工作条件等方面的要求。炮瞄雷达通常都要求有较好的机动性。

右，而圆锥扫描只能达到波束宽度的 $1/50$ 左右。其次，单脉冲雷达有较好的抗干扰能力。回答式调幅信号的干扰对圆锥扫描雷达是一个致命的威胁，因为一般敌方所施放的角度欺骗干扰大都是转发式干扰，即干扰机收到雷达信号后，经过虚假调制，然后再转发出去，使雷达角跟踪系统产生误差。对单脉冲雷达而言，任何回答式调幅干扰对它都是无效的。不仅如此，单脉冲雷达实际上可在很大程度上消除任何形式的幅度调制干扰，不论是人为的积极干扰还是自然火花干扰。

单脉冲雷达相对于圆锥扫描雷达而言，具有造价高、结构比较复杂等缺点，因为它需要三套独立的接收机，而且要求较高。这样，在单脉冲雷达问世以后，又出现了将接收通道合并为双路和单路的单脉冲雷达和各种假单脉冲雷达。这些雷达也具备抗回答式调幅干扰的能力，在结构上的复杂程度介于单脉冲和锥扫制之间。有一种假单脉冲雷达，是通过把单脉冲天线接收的回波信号，在高频合成为普通的圆锥扫描信号后，由单路接收机进行信号处理的，因此我们又常称它为“隐蔽锥扫雷达”。

此外，为了适应现代战争中电子对抗的需要，要求炮瞄雷达具备较好的抗多种干扰的能力，因此近期的炮瞄雷达都不同程度的增加了抗干扰措施，采用了一些新的雷达技术成果。例如脉冲多卜勒技术的采用，可使雷达的速度鉴别率达到很高，能有效地区分开不同速度的目标，对固定的地物干扰和金属丝干扰具有良好的抑制效果。

下面我们将首先对典型炮瞄雷达的几种角跟踪体制进行一些系统介绍，对于炮瞄雷达的发展状况，新技术的采用以及抗干扰等问题，将在最后一章进行讨论。

第二章 圆锥扫描制炮瞄雷达

炮瞄雷达的根本任务就是保证高射炮的射击效果。因此炮瞄雷达的核心问题是解决如何连续的精确的测定目标的坐标问题，从而决定了炮瞄雷达必须是精密的角度自动跟踪雷达。

在目前的炮瞄雷达中，如前所述，应用较多的角跟踪体

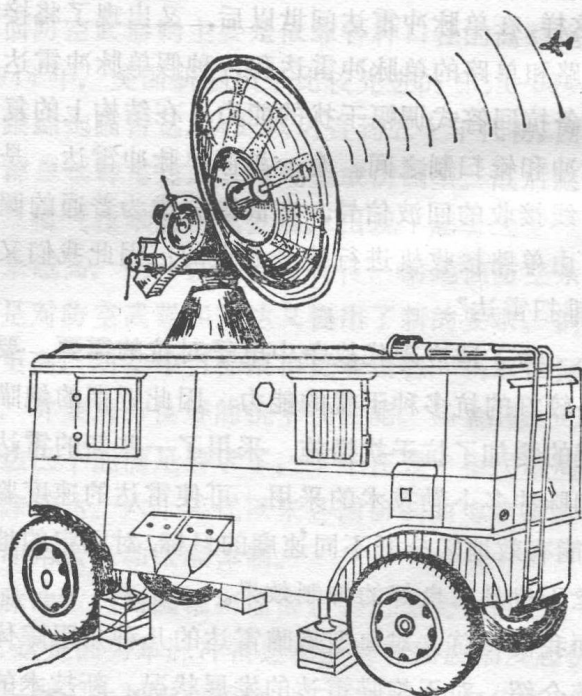


图2-1 圆锥扫描制炮瞄雷达战斗状态图

制有圆锥扫描制和单脉冲制；隐蔽锥扫描制也有应用。本章只讨论圆锥扫描雷达的角跟踪原理和方法，其它跟踪体制将在第三章中进行讨论。

关于炮瞄雷达实现精确测距的原理和方法，在一般炮瞄雷达中都是类似的，因此只在本章中详述，以后章节不再重复。

图 2-1 为典型圆锥扫描炮瞄雷达战斗状态图。

§ 2-1 雷达精确测距和实现距离跟踪的原理和方法

一、雷达发现目标和测距的原理

雷达能够发现目标，完全在于电磁波（以下简称电波）具有反射特性。当雷达发射出的电波遇到物体后，便会产生反射，反射回来的电波（称做“回波”）被雷达接收到，就知道空中有目标了。由于目标参数不同（如距离、大小、几何形状、性质……），反射的回波也就不同，这样根据回波的特征，通过一定的技术措施，还可判别出目标的类型、数目、坐标和速度等等。

雷达测距是利用电波在空间传播的速度是已知常数^①（ $c = 300000000$ 米/秒）这一特点来实现的。

雷达通常利用直线传播的电波。电波从雷达发出到目标，再被目标反射回雷达，所走路程为：

$$\text{路程}(D) = \text{电波速度}(c) \times \text{电波往返时间}(t)$$

① 这个常数实际是个近似值，1973 年在真空中测得的精确值为 $c = 299792456.2 \pm 1$ 米/秒。随着大气的改变它还会有小的变化，其变化值不超过 $3 \times 10^{-4}c$ 。

显然,电波所走路程是雷达与目标间斜距 D (即雷达与目标的直线距离)的二倍。

所以

$$D = \frac{c \cdot t}{2} = \frac{300(\text{米/微秒}) \times t(\text{微秒})}{2} = 150 t (\text{米})$$

由此可见,只要求得电波往返时间即可得目标斜距。由于这个时间通常都是以微秒计,故一般都是采用阴极射线管做为雷达显示器,从荧光屏上直接将距离指示出来。

在显示器上,扫描线的长度表示的是一定的时间。如果在定时器控制下,使得在扫描线起始扫描的同时,雷达发射出电波,此电波的一部分将漏入接收机,在显示器上形成主波,主波的位置就是扫描线的起点,也是电波发射的时刻,这样电波被目标反射后返回雷达所需的时间,正好是扫描线从主波前沿到该目标回波前沿所经历的时间,代入测距公式即可得目标斜距。

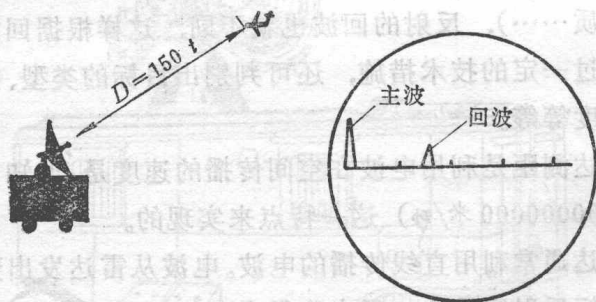


图2-2 测距原理示意图

图2-2所示的是普通雷达的距离显示器,显示器上的距离刻度,是将扫描线各点所表示的时间代入测距公式换算为相应的距离而给出的。例如第一个刻度点如果时间为66.7微

秒，那么它所代表的距离就是 10 公里。

如果扫描线每扫描一次所用的时间不变，则扫描线愈长，测定的时间就愈精确。在各种型式的扫描线中，圆形扫描线最长（称为 J 型显示器），因此某些炮瞄雷达就采用了这种型式做为测距显示器（参看图 2-3）。

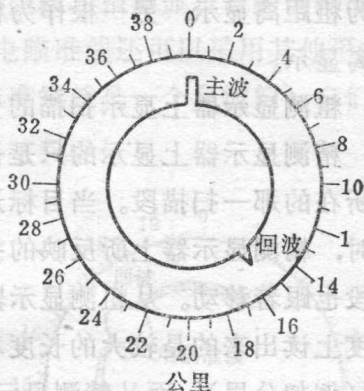


图2-3 J型显示器屏面图形

二、提高测距精度的方法

通过显示器的扫描线直接测定目标斜距的方法比较简便，是普通雷达广为采用的方法；但这种方法的精度不高。

测距误差的来源是多方面的：如扫描的非线性，电路参数的不稳定性，电波传播速度的微小变化等等，但最主要的误差因素还是读数误差（包括估计误差和视差等）。例如图 2-3 中回波在 15 公里和 16 公里之间，此时对目标的斜距只能估算出 15.8 公里或 15.9 公里，得不到更为确切的数值，这显然满足不了火炮射击所需要的精度（如 20 米左右）。为此，一般炮瞄雷达为提高测距精度，均采用了“双刻度读数系统”。具体的说，为提高精度，它采取了以下措施：

（一）采用精、粗双显示器配合测距

双刻度读数系统采用了精、粗两个显示器配合起来进行测距。在实际应用中，有的雷达用两个 J 型显示器，分别做粗测和精测用。有的雷达则采用了双时基 A/R 显示器（图 2-4 所示），它所用的示波管是双枪式的，产生两根扫描线，一根