

庄荫模 徐玉貌 编著

雷达气象

国防工业出版社

2415.2
1 YH

雷 达 气 象

庄荫模 编著
徐玉貌

国防工业出版社

内 容 简 介

本书介绍天气雷达在气象、大气物理工作中应用的理论、工作方法和国内外的一些主要成果。

全书共十一章。第一章到第三章介绍雷达及其在气象、大气物理工作中应用的原理；第四章和第五章介绍雷达站的工作内容和方法；第六章到第十一章介绍应用雷达进行气象、大气物理探测研究的具体内容。

本书可供雷达气象、气象、大气物理工作者及高等院校有关专业师生参考。

雷 达 气 象

庄荫模 徐玉貌 编著

国防工业出版社 出版

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

850×1168¹/₃₂ 印张10³/₄ 插页1 274千字

1984年5月第一版 1984年5月第一次印刷 印数：0,001—2,350册

统一书号：15034·2586 定价：1.40元

TW29/01

前 言

雷达气象是利用雷达进行气象、大气物理探测研究的一门边缘性学科。它诞生于四十年代初。四十年来它在理论、应用和技术上得到了很大的发展。现在在军事、民用气象业务工作中和在气象、大气物理科研工作中已经得到广泛的应用。很多国家建立了天气雷达站网，天气雷达成为探测台风、监测局地强天气、进行短时间局地天气预报、提供现场气象服务、保证飞行安全等等的重要手段。

我国雷达气象工作开始于六十年代初。二十年来天气雷达站已经遍布全国各省市，很多省已经普及到地区。在科研方面也进行了很多工作，取得了不少研究成果。

雷达气象业务工作和科研工作在我国已经开展了二十年，但是，迄今没有一本反映我国情况，适合我国有关工作人员需要的雷达气象参考书。本书就是在这种情况下尝试编写的我国第一本《雷达气象》。根据上述特点，本书主要介绍天气雷达的原理和应用，对近年来发展较快的气象多普勒雷达的工作原理和应用也作了简略的介绍。由于本书较多地考虑了实际工作的需要，采用了很多国内的材料（主要参考了我国雷达气象会议资料和南京大学气象系训练班用《雷达气象》教材），它在结构和内容方面和国外已有的雷达气象方面的书籍有很大不同。

本书承石宗祥同志协助绘图。

作者水平有限，本书中可能有不少缺点错误，希望读者批评指正。

目 录

第一章 雷达工作原理	1
1-1 雷达定位原理	1
1-2 雷达的基本组成部分	3
1-3 一些和探测性能有关的雷达参数	11
1-4 多普勒雷达	21
第二章 雷达探测云和降水的原理 (一)	34
2-1 气象雷达方程	34
2-2 球形云、雨粒子的散射	43
2-3 冰水混合球的散射	50
2-4 非球形云和降水粒子的散射	52
2-5 反射因子 Z 和等效反射因子 Z_e	54
2-6 雷达定量测量降水和含水量	56
第三章 雷达探测云和降水的原理 (二)	65
3-1 距离衰减和大气、云、雨等对雷达波的衰减作用	65
3-2 波束充塞程度对雷达探测的影响	77
3-3 雷达的探测能力	80
3-4 大气折射及其对雷达探测的影响	91
第四章 天气雷达站的工作	98
4-1 雷达站阵地选择	98
4-2 地物阻挡图和等射束高度图	99
4-3 雷达的架设标定	100
4-4 雷达观测	107
4-5 回波顶高度的测定	116
4-6 回波强度的测定	122
第五章 天气雷达的校准——一些雷达参数的测定	131
5-1 波长 λ 的测量	131
5-2 最小可辨功率 (灵敏度) 的测量	133
5-3 发射功率的测量	136
5-4 有效天线增益的测量	138

第六章 雷达回波的识别	145
6-1 降水回波	145
6-2 云、雾的回波	157
6-3 地物回波	161
6-4 晴空大气回波	167
6-5 其它回波	173
第七章 雷达在云物理研究中的应用	176
7-1 云和降水形成的物理过程	176
7-2 对流云降水	178
7-3 层状云降水	186
7-4 云和降水的人工影响	189
第八章 降水天气系统的雷达探测	198
8-1 雷暴	198
8-2 龙卷	204
8-3 飑线	207
8-4 其它中尺度降水系统	214
8-5 西南涡	222
8-6 锋面	222
8-7 锋面气旋	231
8-8 带状回波的形成	234
8-9 雷达探测在天气分析预报方面的应用	238
第九章 雷达探测台风	251
9-1 台风的雷达回波	251
9-2 台风中心的雷达定位	256
9-3 利用回波特征判断台风强度	260
9-4 台风的风雨分布	264
9-5 台风路径的雷达预报	267
第十章 冰雹	270
10-1 冰雹云的识别	270
10-2 雹云结构	286
10-3 冰雹的短时间预报	293
10-4 人工防雹	296
第十一章 雷达探测暴雨	300
11-1 一些暴雨天气过程的雷达回波分析	300
11-2 雷达探测地形在暴雨过程中的增幅作用	329
11-3 暴雨的雷达监测	331

第一章 雷达工作原理

雷达利用目标物对雷达波的反射（或散射）来测定目标物的存在、位置和获取其它信息。天气雷达（我国也叫测雨雷达）利用降水粒子对雷达波的散射来得到降水和降水天气系统的发生、发展、位置、移动和性质等的情报。

本章主要介绍天气雷达的工作原理和影响雷达探测降水能力的雷达参数。由于近二十年来多普勒雷达在气象上应用的研究发展很快，本章对多普勒雷达的工作原理和主要应用也一併作了介绍。

1-1 雷达定位原理

雷达探测降水目标时，由雷达天线发出高频电磁波。当该电磁波遇到降水或某些云目标，一部分电磁波会被散射。雷达接收到从云雨区散射回来的回波信号，经放大器加以放大，并用一定方式显示出来，这样就发现了降水或云的存在。

1-1-1 雷达测方位和仰角的原理

雷达利用定向发射天线来确定目标或云雨区的方位和仰角。

像手电筒能把光线聚成很亮的一束光柱那样，雷达天线也能把发射出去的无线电波集中在一个很窄的范围内，形成所谓“波束”（和光柱一样，只是人眼看不见）。此波束有一定的方位和仰角。由于定向发射天线只能接收天线所指方位和仰角上的反射（或散射）回波，因此，雷达接收到目标或云雨回波时，天线所指的方位和仰角就是云雨所在的方位和仰角。

1-1-2 雷达测距原理

无线电波在均匀空间是以等速直线传播的。雷达根据从开始发射无线电波到接收到目标物回波的时间间隔，来测定目标与雷达之间的距离。

为了测定目标物的距离，一般雷达不是连续发射电磁波，而是每隔一定的时间作一次短时间的发射。这种短时间发射的无线电波叫脉冲波或简称无线电脉冲。电磁波在空间传播的速度极快，近似为 3×10^5 公里/秒。根据速度、时间和距离之间的关系，考虑到脉冲波从发射到反射（散射）回天线共传播了两倍于雷达到目标之间的路程，这样应该有关系式

$$r = \frac{1}{2} c \Delta t \quad (1-1)$$

这里， r 是探测目标和雷达之间的距离； c 是电磁波在空中传播的速度； Δt 是从雷达开始发射无线电脉冲到雷达开始接收到脉冲回波之间的时间间隔。

将式 (1-1) 中的 c 用 3×10^5 公里/秒代入，并取时间间隔 Δt 的单位为微秒（即 10^{-6} 秒），则式 (1-1) 变成

$$r = 0.15 \Delta t \text{ (公里)} \quad (1-1')$$

式 (1-1) 或式 (1-1') 是雷达测定目标物距离的基本公式。从式 (1-1') 可见，目标物的距离 r 和脉冲波往返所需的时间 Δt 成正比，这样，测距的工作就变成测时间间隔 Δt 的问题。例如：当雷达波从发射到反射回来的时间间隔 $\Delta t = 2 \times 10^3$ 微秒，对应的目标物的距离即为 300 公里。

一般雷达的探测距离为几十公里到几百公里，对应的时间间隔 Δt 极短，这样短的时间间隔用通常的计时器是无法测定的。为了能够准确地测量这样短暂的时间，并能模拟地显示目标的距离，雷达测距（即测时间）是用阴极射线管来实现的。

阴极射线管计时、测距的方法如图 1-1 所示。当雷达周期性地发射无线电脉冲时，阴极射线管荧光屏上同时从左到右以一定

的速率周期性地扫描出一条明亮的表示时间的扫描线，叫时间扫描基线。这里扫描基线的起点对应于雷达开始发射无线电脉冲的时间，由于电子束是以一定的速率从一端向另一端扫过去的，这样，时间扫描基线上的不同长度就表示了不同的时间间隔 Δt 。如图 1-1 所示，这条扫描线如果是在 666.7 微秒内完成的，则时间扫描基线从起点扫描到 midpoint 时，对应的时间间隔 Δt 将是 333.3 微秒。根据式 (1-1') 的关系，从发射至接收到回波之间的时间间隔 Δt 如为 333.3 和 666.7 微秒，目标的距离将相应地为 50 公里和 100 公里。于是根据式 (1-1') 的关系就可进一步把 Δt 的坐标转换成距离 r 的坐标 (如图 1-1)。

为了在阴极射线管的荧光屏上表示 r 距离处有云和降水等目标物的存在，当雷达接收到回波脉冲信号时，荧光屏上的时间扫描基线受回波信号控制，使对应于 Δt (也即距离为 r) 处的时间扫描基线向上偏移 (偏移量决定于信号强度) 或在 r 距离处出现其亮度决定于回波强度的亮点 (点目标)、亮斑 (面积目标)。这种用时间扫描基线的向上偏移来表示云和降水等目标物的存在和回波强度的方法叫“幅度调制”方法；用回波信号来控制、形成亮点或亮斑以表示云和降水等目标物存在和回波强度的方法叫“亮度调制”方法。

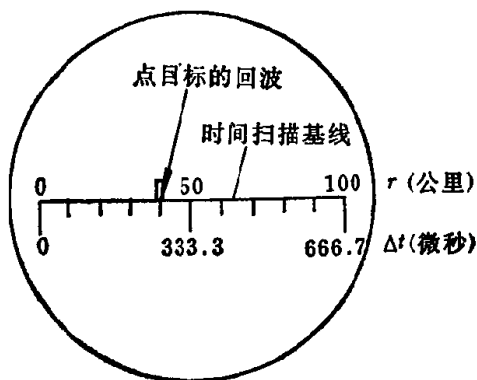


图 1-1 时间扫描基线和距离刻度

1-2 雷达的基本组成部分

根据上面介绍的雷达工作原理，雷达必须包括以下几个组成部分 (如图 1-2)：定时器、发射机、天线、天线传动装置、天线转换开关、接收机、显示器等。

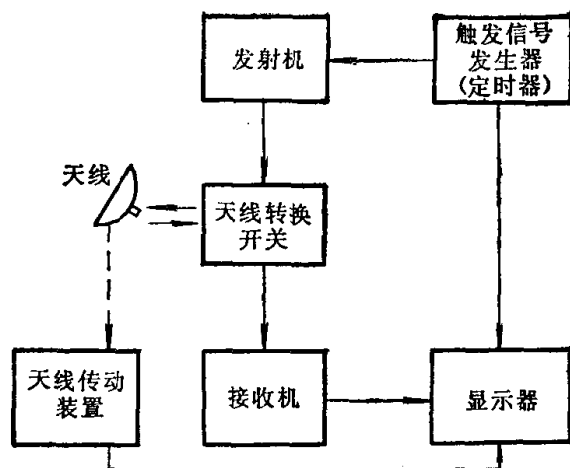


图1-2 雷达的基本组成部分

1-2-1 定 时 器

定时器是雷达的“指挥”中心。它实际上是一个频率稳定的脉冲信号发生器。定时器每隔一定的时间间隔发出一个脉冲信号，它触发发射机，使发射机定时地产生强大的高频振荡脉冲，并使阴极射线管同时开始作时间扫描。

1-2-2 发 射 机

在定时器的控制下，发射机每隔一定的时间产生一个很强的脉冲，通过天线发射出去。

1-2-3 天 线

雷达天线的作用是定向地辐射高频脉冲波和接收来自该方向的回波。为了保证精确地测定目标的方位和仰角，雷达天线必须高度定向地辐射和接收高频脉冲波。气象上使用的雷达天线一般由两部分组成：（1）天线辐射喇叭，它把发射机产生的高频脉冲能量向外辐射；（2）天线反射器，它把来自辐射喇叭的脉冲电波，以很小的张角高度定向地向外反射（见图1-3）。

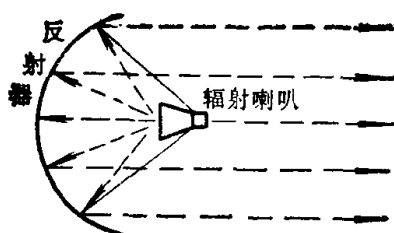


图1-3 雷达天线示意图

1-2-4 天线传动装置

天线传动装置主要包括两个部分，一部分是天线的转动系统，一部分是同步系统。天线转动系统的作用是：（1）使天线绕垂直轴转动，以便探测平面上的降水分布，或漏斗面上降水、云的分布；（2）使天线在某一方位上作上下俯仰，以便探测云和降水的垂直结构和演变。

天线同步系统（也叫伺服系统）的作用是：使阴极射线管上不同时刻时间扫描基线的方位、仰角和相应时间天线所指的方位、仰角一致（即同步），从而使雷达荧光屏上出现的目标标志（用亮点或垂直偏移表示）的方位、仰角就是目标相对于雷达的实际方位、仰角。

1-2-5 天线转换开关

因为雷达发射和接收的都是持续时间极短（微秒量级）、间歇时间很长（千微秒量级）的高频脉冲波，这就有可能使发射和接收共用一根天线。天线转换开关的作用是：在发射机工作时，天线只和发射机接通，使发射机产生的巨大能量不能直接进入接收机，从而避免损坏接收机；当发射机停止工作时，天线立即和接收机接通，微弱的回波信号只进入接收机。

1-2-6 接收机

雷达接收机的作用是将天线接收下来的微弱回波信号放大，

并转换成足够强的视频信号，送往显示器产生回波标志。

为了测定云和降水回波的强度，在天气雷达接收机中通常装有衰减器。衰减器的作用是能逐挡地、定量地减小接收机的“增益”（即逐挡减小接收机的“放大倍数”），使只有超过某一强度的回波信号能够在雷达显示器上显示出来，从而可以通过衰减器测量回波强度。

1-2-7 显 示 器

显示器是把雷达探测到的云、雨等目标及其相对于雷达的坐标位置（方位、距离、高度●）、回波强度等显示出来的装置。上面已经说过，雷达显示器一般是由阴极射线管构成的。

由于需要重点了解的情况不同，天气雷达使用的显示器有距离显示器，平面位置显示器，距离高度显示器，距离仰角显示器，等高平面位置显示器等等。

1. 距离显示器

距离显示器简称距显。它的特点是能够比较精确地显示某一方位、某一仰角上目标物（例如云和降水区）的距离、宽度范围和回波强度。

如图 1-4 所示的距离显示器，其工作原理和图 1-1 一样，只是上面的刻度直接表示距离（如 100 公里档，每格表示 10 公里；300 公里档，每格表示 30 公里）。距离显示器上的回波标志采用幅度调制。

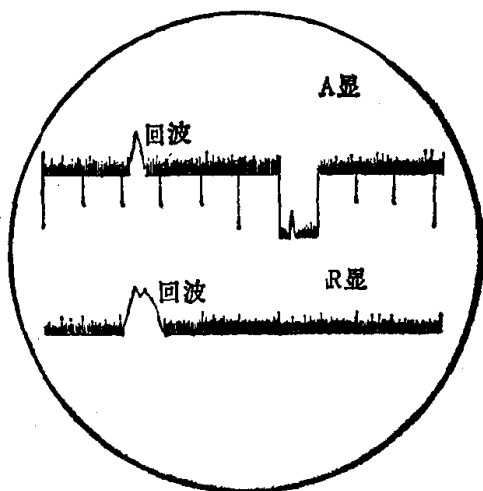


图1-4 距离显示器

图 1-4 上半部的距离显示叫 A 显。所谓 A 显即直线扫描距离

● 由仰角、距离决定。

显示（另外还有圆扫描，螺旋线扫描等的距离显示）。图 1-4 下半部的距离显示叫 R 显，R 显是一种时间基线被放大、展宽的直线扫描距离显示，它可以显示 0 ~ 300 公里范围内任意 10 公里区间内的回波位置、宽度范围和强度。由于 R 显好比加了放大镜一样，用它可以得到更精确的读数。

图 1-4 的距离显示器也叫 A/R 显示器。

距离显示器有不同的测距量程。如国产 713 雷达的距离显示器量程有 50、100、200、400、600 公里五档。

2. 平面位置显示器 (PPI)

天气雷达应用得最多的是平面位置显示器。平面位置显示器简称平显，也叫 PPI（英文 plan position indicator 的缩写）。如图 1-5，当天线仰角为 0° ，天线围绕铅直轴转动时，平面位置显示器表示的是波束扫描平面上的降水分布。

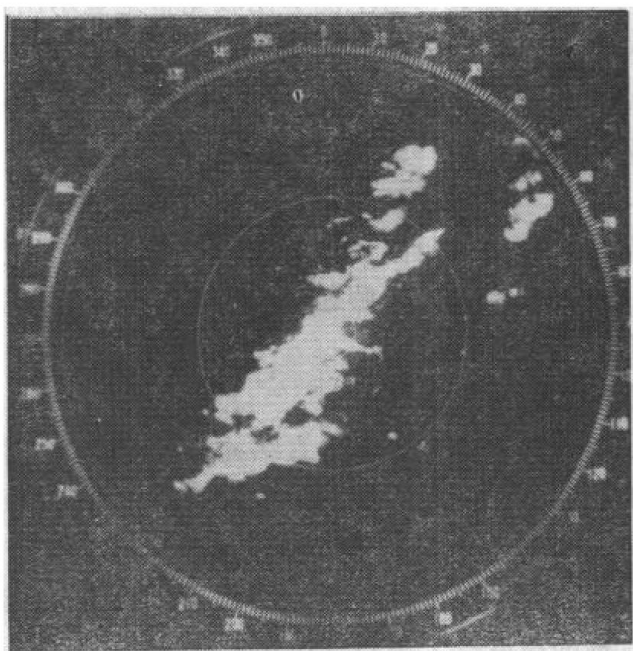


图1-5 平面位置显示器

在这种显示器中，阴极射线管中的电子束以一定速度迅速地从荧光屏中心向外作直线扫描（如 711 雷达以每秒 400 次的频率

作直线扫描，713雷达以每秒 200 次的频率作直线扫描），与此同时，直线扫描的方向不断地随着天线绕垂直轴转动时每一瞬间所处的方向同步地改变。

平面位置显示器不用幅度调制来表示目标物的存在，而是用亮度调制。这时时间基线除了其上的距离刻度标志比较明亮外，只有在云雨目标所在的距离上（即有回波时）才比较明亮。因此，雷达周围的云和降水区是一个亮区或亮斑。在亮度调制工作方式中，阴极射线管电子束中射向荧光屏的电子的多少，或荧光屏上表示有云雨等目标存在的回波亮斑的亮度在一定范围内和回波信号的强度有关。为了得到云雨区分布和范围的完整图像，平面位置显示器采用辉亮时间能维持较长的“长余辉”阴极射线管。这样，当波束扫过目标后，荧光屏上表示云雨目标的亮斑（回波标志）可以保留稍长的时间不致立即消失，从而当天线绕垂直轴旋转一周时平面位置显示器上能够比较完整地显示出雷达周围地区的云、雨分布（如图 1-5 所示），同时时间扫描基线上的距离标志（亮点）将在雷达荧光屏上描绘出一些圆形的等距离圈。

和距离显示器一样，平面位置显示器也有几个量程。如 711 雷达有 50、100、300 公里三个量程，713 雷达有 50、100、200、400、600 等距离档。近距离挡适于仔细观察云雨区的形态特征和内部结构；远距离挡可以了解远处的降水情况，了解更大范围内的降水分布。

3. 距离高度显示器 (RHI)

为了了解云、雨的形成和垂直结构情况，在天气雷达上还有一种常用的显示器——距离高度显示器。距离高度显示器简称高显或 RHI (range-height indicator)。图 1-6 是 711 雷达的距离高度显示器。在高显中，横坐标表示云、雨目标的斜距，纵坐标是云雨目标的高度。云雨目标仍用“亮度调制”显示。云和降水区和平面位置显示器上一样为一片亮斑。

云和降水的高度一般很少超过 20 公里，而探测距离却常为一两百公里，为了更清楚地显示云和降水的垂直结构，提高高度读

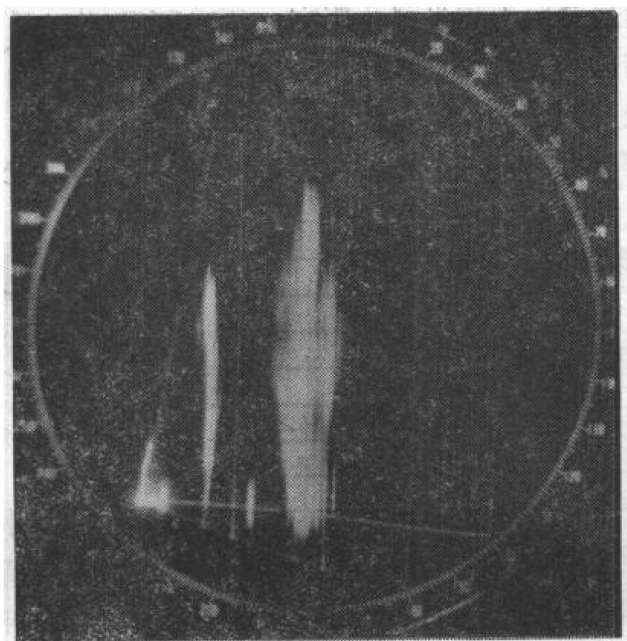


图1-6 距离高度显示器

数精度，在距离高度显示器上常把高度坐标放大五倍。但是这样做的缺点是使一块垂直尺度和水平尺度近于一样的对流降水显示成一个垂直范围为水平宽度五倍的高耸的对流回波，直观形象失了真。

由于测高误差随着距离的增大而增大，距离高度显示器只有50、100、200公里三个距离挡。

4. 距离仰角显示器 (REI)

距离仰角显示器同样是显示云和降水的垂直结构的显示器。由于上面所说的距离高度显示器只能在低仰角下使用，如711雷达和713雷达在作距离仰角显示时，天线的最大仰角只分别为 32° 和 29° 。这样的仰角看不到近距离天顶附近的云雨情况，为了解近距离天顶附近的云雨发展情况和结构，有些天气雷达（如国产713雷达）可以作“距离仰角显示”，这种显示器简称为REI (range-elevation indicator)。

如图1-7，在作距离仰角显示时，雷达天线一直扫描到天顶。

在距离仰角显示器上横坐标为距离，纵坐标为高度。这时垂直坐标尺度和水平坐标尺度一样，因此它没有距离高度显示器那样由于两个坐标尺度不一样而引起的失真。

5. 等高平面位置显示器 (CAPPI)

平面位置显示器只能在仰角为 0° 时得到降水目标的平面分布，仰角大于 0° 时得到的是一个远处高近处低的

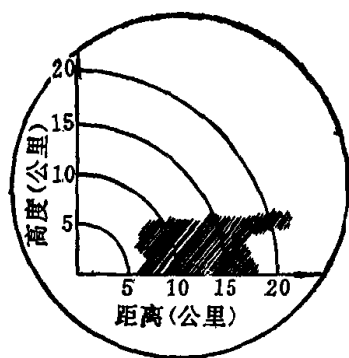


图1-7 距离仰角显示器

漏斗面上的云雨分布。为了了解不同高度上的云和降水分布，了解降水发生发展的三度空间情况，国外设计使用了所谓“等高平面位置显示器”，简称 CAPPI (constant altitude PPI)。等高显示器能够显示不同高度平面上的云雨分布。

图 1-8 表示了一种等高平面位置显示器的工作方法。为了得到不同高度平面上云和降水的分布图像，雷达天线每扫描一周后自动地抬高一次仰角，在天线进行扫描的过程中“闸门”电路只让一定高度上的（图 1-8 方框中的）回波信号通过（高度由操作

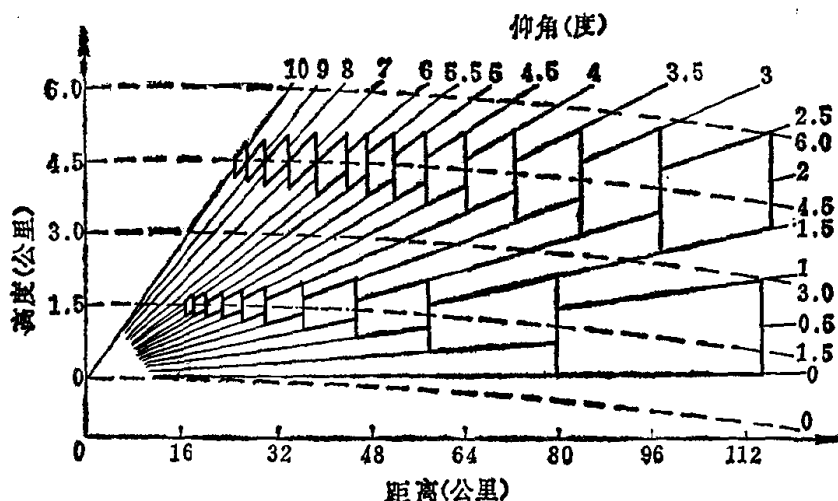


图1-8 等高平面位置显示器工作方法示意图

人员控制), 并进入储存装置储存起来。通过不断改变仰角可以得到指定高度上的云和降水回波的平面分布。在得到了指定高度上回波分布的全部信息后, 储存的信息立即被输送到荧光屏上以亮度调制的方式显示出来。这样就可以得到不同高度平面上的云雨回波分布。

如果没有等高平面位置显示器, 用不同仰角的平面位置显示器观测也能拼出不同高度上云和降水的回波分布, 得到三度空间的立体结构, 但是这样做需要花费很多人力和时间。

1-3 一些和探测性能有关的雷达参数

不同型号的雷达有着不同的性能参数, 具有不同性能参数的雷达, 探测云雨的性能不相同。下面介绍和探测云雨性能有关的主要雷达参数——波长、脉冲长度、脉冲重复频率、脉冲功率、水平波束宽度、垂直波束宽度、天线增益、接收机灵敏度等。

1-3-1 波 长

波长是一个重要的雷达参数。不同频率的无线电波有着不同的工作特性。人们常把无线电波分为长波、中波、短波、极短波、超短波、厘米波、毫米波或相应的称之为低频、中频、高频、极高频、超高频、微波等。

由于电波的波长短, 云雨对电波的反射(后向散射)能力强, 雷达容易探测到; 并且短波长雷达只要用比较小的天线就能产生比较高的定向能力。因此天气雷达一般使用波长为 10 厘米到 3 厘米左右的微波波段。

在微波范围内, 不同波长的雷达性能仍然有很大的不同。例如波长为 10 厘米的雷达通常只能探测到雨, 探测不到云。而波长在 1 厘米左右或波长更短的雷达则能够探测到云。但是, 随着波长从 10 厘米缩短到 3 厘米以下时, 电波在云雨中传播时遭到削弱的程度迅速增加, 影响雷达探测远处的云和降水。

目前天气雷达常用的波长有 10 厘米(如我国的测台雷达)、