

雷达

在天气导变中的应用

李子华 宫福久



气象出版社

雷达在天气导变中的应用

李子华 宫福久 编著

气象出版社

(京)新登字 046 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了雷达在云物理研究、人工降水和雹暴导变中的应用,简述了多卜勒雷达和雷达组网拼图新技术在天气导变中的应用前景。全书深入浅出,注重总结国内外先进的经验和最新的成果。

本书可供从事天气导变工作的技术、业务人员使用,也可供大气物理、大气探测等专业的科技人员、大专院校师生阅读和参考。

雷达在天气导变中的应用

李子华 宫福久 编著

责任编辑 林雨晨 终审 纪乃晋

封面设计 牛涛 责任技编 都平 责任校对 林雨晨

*

气象出版社 出版

(北京西郊白石桥路 46 号 100081)

北京昌平环球印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行 全国各地新华书店经销

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 4.625 字数: 120 千字

1994 年 6 月第一版 1994 年 6 月第一次印刷

印数 1—1200

ISBN 7-5029-1737-3 / P · 0689

定价: 5.30 元

前 言

王鹏飞教授早在《天气导变学发展的讨论》(1980)一文中就建议将“人工影响天气”这一学科名称,改变为“天气导变学”。因为新名称措辞简洁,含义丰富,能确切地体现该学科的内涵。本来这门学科,不是要人盲目地影响天气,而是有目的地去影响天气;不是要人违反天气自然演变规律去影响天气,而是要利用天气自然演变规律去影响天气。学科名称改变后,“导变”一词,有“利导、诱导、引导”三重意义,即采用天气演变规律,根据天气当时之势,以诱导之法因势利导之,引导天气向人们预期的方向演变。这里既强调方法性和现实性,也强调目的性。这是旧名称“人工影响天气”所不能表达的。采用新名称“天气导变”,人们可有意识地使用科学的方法、思想以促进该学科的发展。我认为王鹏飞教授的建议很有价值,因此本书采用了“天气导变”这个名词。

我国开展天气导变工作已有 35 个年头,大量研究和试验结果表明,在适当天气条件下通过正确的催化作业,可以增加降水,减少雹灾。但是在对当地云物理过程认识不足,监测、催化技术不高时,催化作业就有一定的盲目性。所以要提高天气导变科技水平,必须研究并开发一系列高新技术。雷达是对云体重要探测设备之一。我国在天气导变中应用雷达探测技术取得了丰富的经验。总结这些经验,培训一线工作人员,有利于专业科技队伍的建设。本书就是为此目的而写的。

本书是在 1988 年南京气象学院举办的人工影响天气训练班的讲义基础上作了一些修改和补充后编写而成的。全书共分五章。第一章介绍雷达探测云和降水的基础知识;第二章至第四章是本书的

重点,介绍雷达在云物理研究、人工降水和雹暴导变中的应用;第五章简述多卜勒雷达原理和雷达拼图新技术,这是考虑到我国天气导变中雷达技术发展趋势而写的。

本书在编写过程中,得到了广大学员的热情支持,也得到了许多朋友的鼓励与帮助,在此表示衷心的感谢。

本书出版希望能对从事天气导变工作的一线人员有所帮助。限于作者水平,书中错误难免,敬请读者指正。

作 者

1993年6月

目 录

第一章 雷达探测云和降水的基本原理	(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	(7)
§ 1.4 雷达气象方程	(12)
§ 1.5 云和降水粒子的散射	(16)
§ 1.6 大气、云和降水对雷达波的衰减	(22)
第二章 雷达在云物理研究中的应用	(27)
§ 2.1 云雨性质的识别	(27)
§ 2.2 云雨形成机制和物理过程的研究	(32)
§ 2.3 云雨结构的雷达研究	(38)
§ 2.4 云雨演变规律的雷达研究	(67)
第三章 雷达在人工降水中的应用	(80)
§ 3.1 雷达在制定人工降水计划中的应用	(80)
§ 3.2 雷达在监视天气系统中的应用	(82)
§ 3.3 雷达在选择催化云中的应用	(84)
§ 3.4 雷达在评定人工降水效果中的应用	(87)
第四章 雷达在雹暴导变中的应用	(96)
§ 4.1 雹暴天气的监测和警戒	(97)
§ 4.2 雷达识别冰雹云	(101)
§ 4.3 指挥作业	(115)
§ 4.4 防雷效果检验	(118)

第五章 雷达探测新技术的应用	(123)
§ 5.1 多卜勒雷达及其应用	(123)
§ 5.2 雷达组网拼图	(134)
参考文献	(138)

第一章 雷达探测云和降水的基本原理

当雷达波束投射到云或降水区时,云或降水粒子就产生散射现象。其中向后方散射的一部分散射波重新返回到雷达天线,经放大器加以放大,并在雷达显示器上显示出来,这就是雷达回波。这样就发现了云或降水的位置,并由雷达回波的变化得到云或降水系统的发生、发展、移动等情况。

本章将简要地叙述雷达探测云和降水的基本原理,读者学后可以对雷达回波有个基本的认识。如果要作更深的了解,可以阅读庄荫模和徐玉貌编著的《雷达气象》以及张培昌等编著的《雷达气象学》。

§ 1.1 雷达定位原理

雷达天线不仅能发射无线电波,而且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”,此波束有一定的方向和仰角,此时的雷达天线可称为定向发射天线。由于定向发射天线只能接收天线所指方位和仰角上的散射回波,因此,当雷达接收到云雨回波时,天线的方位和仰角就是云雨所在方位和仰角。

为了测定云和降水等目标物的距离,雷达发射电磁波不是连续的,而是每隔一定的时间作一次短时的发射,即发射脉冲波。根据速度、时间和距离之间的关系,考虑到脉冲波从发射到返回天线共传播了两倍于雷达到目标之间的路程,应有以下关系式

$$R = \frac{1}{2} c \Delta t \quad (1.1)$$

式中 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,其数值近似为 3×10^5 公里/秒; Δt 是从雷达开始发射无线电脉冲到雷达接收到脉冲回波之间的时间间隔。由(1.1)式可见,目标物的距离 R 和脉冲波往返所需时间 Δt 成正比,这样测距的工作就变成测时间间隔 Δt 的问题。如果目标物的距离为 300 公里,由(1.1)式可得到 $\Delta t = 2 \times 10^3$ 微秒。这样的时间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的时间,雷达采用了阴极射线管。

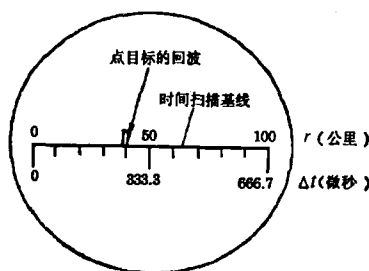


图 1.1 时间扫描基线和距离刻度

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波时,阴极射线管荧光屏上同时从左到右以一定的速率周期地扫描出一条明亮的表示时间的扫描基线,叫时间扫描线。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,扫描基线上的不同长度就表示了不同时间间隔 Δt 。这条扫描基线如果是在 666.7 微秒内完成的,则目标物的距离相应地为 100 公里。

为了在阴极射线管荧光屏上表示 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到回波信号控制,使对应于 Δt 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)。上述表示云和降水等目标的存在和回波强度的方法,前者称“幅度调制”方法,后者称“亮度调制”方法。

§ 1.2 雷达的基本组成部分

雷达由定时器、发射机、天线、天线传动装置、天线转换开关、接收机和显示器等几部分组成,见图 1.2。

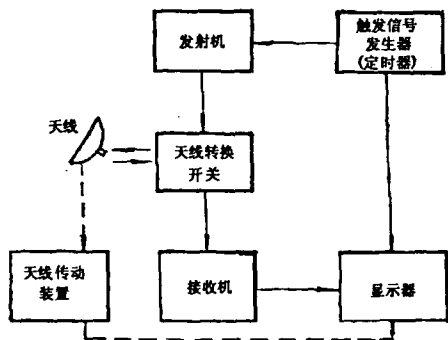


图 1.2 雷达的基本组成部分

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。

雷达天线的作用是定向地发射高频振荡脉冲和接收来自该方向的回波。气象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。

天线传动装置包括天线的转动系统和同步系统。天线的转动系统的作用是:①使天线绕垂直轴转动,以便探测平面上或漏斗面上云和降水的分布;②使天线在某一方向上作上下俯仰,以便探测这一方位上云和降水的垂直结构。天线同步系统的作用是:使阴极射线管上不同时刻的时间,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,从而使雷达荧光屏上出现的目标标志的方位、仰角就是目标相对于雷达的实际方位、仰角。

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;当发射机停止工作时,天线立即和接收机接通。因为雷达发射和接收的都是持续时间短(微秒量级)、间隔时间很长(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。

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,并变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,在雷达接收机中通常装有衰减器。衰减器的作用是逐挡地、定量地减小接收机的“增益”(即逐挡地减小接收机的“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。

显示器是把雷达探测到的云和降水的位置(方位、仰角和距离)、回波强度等显示出来的装置。前已述及,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,显示器可分为距离显示器、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几种。

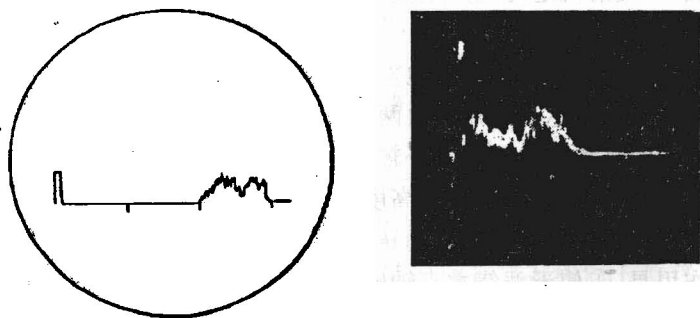


图 1.3 距离显示器

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、仰角上云和降水区的距离、宽度和回波强度,回波标志采用幅度调制。图 1.3 左图的距离显示叫 A 显,即直线扫描距离显示;图 1.3 右图的距离显示叫 R 显,它是一种时间基线被放大、展宽的直线扫描距离显示。由于 R 显示好比加了放大镜一样,用它可以得到更精确的读数。

平面位置显示器简称平显或 PPI。它能给出以雷达站为中心以某一距离间隔为半径的圆形区域内云和降水的分布。在这样显示器中,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,与此同时,时间基线随天线转动而同步地旋转。平显用亮度调制来表示目标物的存在,因此,雷达周围的云和降水区是一个亮区或亮斑。其亮度在一定范围内和回波强度有关。平显采用长余辉阴极射线管,它可以保证至少在天线旋转周期内回波能够保持,这样回波分布的完整图像就被显示出来(见图 1.4)。因此,PPI 显示可以提供云雨相对于雷达站的距离和方位,但没有提供回波高度的信息。

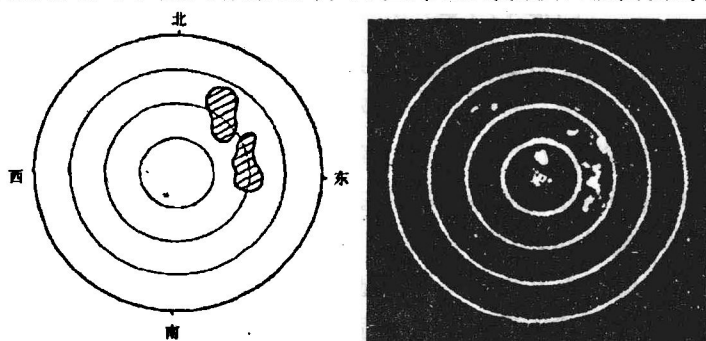


图 1.4 平面位置显示器

为了在一个给定的方位上研究云、雨的形成和垂直结构,采用了距离高度显示器。距离高度显示器简称高显或 RHI。通常天线被固定在一个方位上,并沿着垂直平面扫描,时间基线随天线的仰角同步地移动,并且在距原点某一距离上被相应距离上的回波所加亮。这样

就产生目标物的斜距和仰角的图像,实际上是斜距和高度的图像(见图 1.5)。RHI 显示器的缺点是天线的仰角被限制在譬如说 30° 角的范围内,在这种情况下,当回波的水平距离比其垂直高度的 $\sqrt{3}$ 倍还要近时,就不可能完整地观测到。为了更清楚地显示云和降水垂直结构,提高高度读数精度,在 RHI 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乎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,直观形象失真。

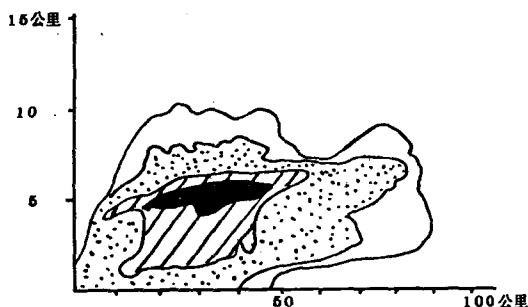


图 1.5 距离高度显示器

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。这种显示器简称为 REI, 它可以看到近距离天顶附近的云雨发展情况和结构。如图 1.6, 在作距离仰角显示时, 雷达天线一直扫描到天顶。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, 因此它不会引起回波的失真。

为了了解不同高度平面上的云雨分布, 了解降水发生发展的三度空间的情况, 有些雷达使用了“等高平面位置显示器”, 简称 CAPPI。

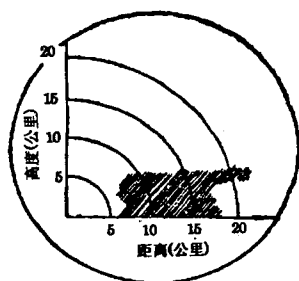


图 1.6 距离仰角显示器

§ 1.3 一些和探测性能有关的雷达参数

(1) 波长

波长是一个重要的雷达参数。气象雷达一般使用波长为 10 厘米到 3 厘米左右的微波波长。因为电波的波长短，云雨对电波的后向散射能力强，雷达容易探测到。而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。在微波范围内，不同波长的雷达的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雨，而波长为 1 厘米左右的雷达和毫米波雷达则只能探测到云。随着波长从 10 厘米向 3 厘米以下缩短时，电波在云雨中遭到削弱的程度迅速增加，影响雷达探测远处的云和降水。

通常用 λ 表示雷达波的波长，用 f 表示雷达波相应的频率，它们之间的关系是

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.2)$$

(2) 脉冲宽度

发射无线电脉冲波的持续时间叫脉冲宽度，脉冲波在空间的长度叫脉冲长度(如图 1.7)。

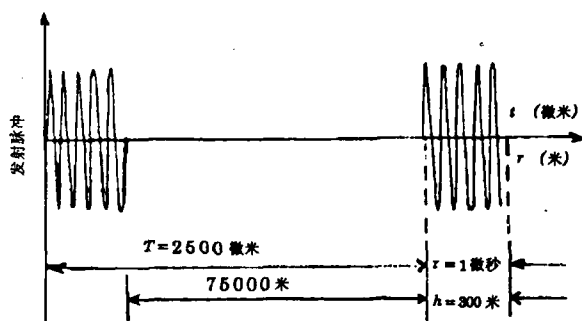


图 1.7 雷达脉冲波示意图

用 h 表示脉冲长度, τ 表示脉冲宽度, 则它们之间关系是

$$h = \tau c \quad (1.3)$$

711 雷达和 713 雷达的脉冲宽度分别为 1 微秒和 2 微秒, 利用 (1.3) 式可求得它们的脉冲长度分别为 300 米和 600 米。

脉冲宽度影响到雷达的最小探测距离。因为雷达在发射电波时不能接收回波, 并且雷达发射脉冲后, 天线转换开关转换成接收状态也需要一定的时间 t_B , 这样雷达不能接收回波的时间将为 $\tau + t_B$, 根据 (1.1) 式, 雷达的最小探测距离应该满足

$$R_{\min} = (\tau + t_B) \frac{c}{2} \quad (1.4)$$

脉冲宽度会在径向方向上引起远端回波区失真, 因而脉冲宽度决定了雷达径向距离分辨率。这是雷达发射的脉冲回波有一定的持续时间 τ , 在径向方向的一个点目标从发射脉冲的前沿接触到它以后, 连续在 τ 时间内都产生回波信号, 这样在显示器上点目标的回波将不是一个点而是向远处延伸了 $\frac{\tau c}{2}$ 长度。同样, 在显示器上降水区的回波其远端边缘将与降水区的边缘不一致, 比实际降水区边缘要多伸展出 $h/2$ 的范围。可以想象, 在径向方向上两个相距小于或等于 $h/2$ 的降水区, 它们的回波将连在一起, 不能区分。这就是说, 由脉冲长度

决定的径向距离分辨率是 $h/2$ 。

(3) 脉冲重复频率

脉冲重复频率是每秒钟雷达发射脉冲波的次数。两个相邻脉冲波之间的时间间隔叫做脉冲重复周期(T)。它们之间互为倒数关系

$$F = \frac{1}{T} \quad (1.5)$$

脉冲重复频率高,一定时间内接收到的回波信号多,荧光屏上显示的回波比较明亮清晰,有利于在短时间内得到比较准确的回波强度,有利于雷达的定量测量。但是脉冲重复频率高的雷达,其最大作用距离比较小。711 雷达的重复频率为 400 周/秒,它的最大探测距离设计为 300 公里;713 雷达的脉冲重复频率为 200 周/秒,它的最大探测距离设计为 600 公里。

(4) 脉冲功率和平均功率

脉冲功率(P_i)是指发射机发射脉冲波期间产生的高频功率也叫峰值功率。平均功率($\bar{P}_i$)是指脉冲功率在其重复周期内的平均值。即

$$\bar{P}_i = P_i \frac{\tau}{T} \quad (1.6)$$

711 雷达的 P_i 是 75 千瓦, $\tau = 1$ 微秒, T 为 2500 微秒,由(1.6)式得 $\bar{P}_i = 30$ 瓦。713 雷达 P_i 是 250 千瓦, $\tau = 2$ 微秒, T 为 5000 微秒,所以 $\bar{P}_i = 100$ 瓦。

其它参数相同的雷达,脉冲功率大,则来自云雨的回波比较强,因而探测弱目标,远目标的能力比较强。

(5) 波束宽度

波束宽度是表示雷达天线发射和接收电波能量的方向性的参数。因此,需先介绍雷达天线辐射的方向性图。

定向天线把发射机产生的高频能量集中向一个方向辐射。实际上只是在某一方向辐射最强,在其它方向辐射能量相对地弱一些。图

1.8 是定向天线辐射能量的方向图。

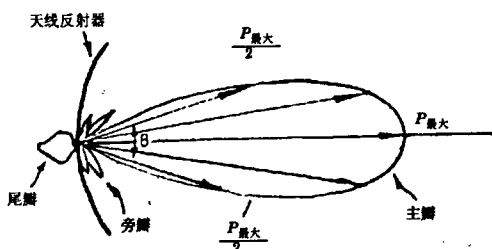


图 1.8 天线辐射方向图

图上用箭头线的长短来表示不同方向辐射能量的多少。将箭头线终止端连在一起，形成的辐射方向性图形如花瓣，一般叫做波瓣。辐射最强的波瓣叫主瓣，主瓣两侧还有一些弱小的波瓣叫旁瓣，或叫副瓣，主瓣相反方向上的小瓣叫尾瓣。

为了定量地表示天线辐射能量的定向程度，定义主波瓣上辐射能量为最大辐射能量一半的两个矢量之间的夹角 θ 为波束宽度。天线定向辐射能力强时， θ 角小，波束窄；相反，定向辐射能力差的天线， θ 角大，波束宽。

711 雷达和 713 雷达的天线都是旋转的抛物面反射器，它们的波束宽度基本对称。711 雷达的水平波束宽度为 1.5° ，垂直波束宽度为 1.45° ，713 雷达的水平波束宽度和垂直波束宽度都是 1.3° 。

波束宽度和波长以及抛物面天线直径 d 之间的典型关系是

$$\theta = 0.85 \frac{\lambda}{d} \quad (1.7)$$

由上式可见，在保证同样的波束宽度的情况下，3 厘米雷达的天线比 5 厘米、10 厘米雷达的天线要小一些。

像脉冲宽度对径向失真的影响一样，波束宽度会在切向方向上引起回波区边缘的失真，因而波束宽度决定了雷达切向分辨率。这是因为波束有一定的宽度，在切向方向上的点目标回波将不是一个点，