

现代气象 雷达系统

现代航空电子丛书

蔡成仁 / 编著



国民航出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代气象雷达系统/蔡成仁编著. —北京: 中国民航出版社, 2002.7

ISBN 7-80110-441-2

I. 现…

II. 蔡…

III. 航空气象预报-气象雷达

IV. V321.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 060964 号

现代气象雷达系统

蔡成仁 编著

出版	中国民航出版社
社址	北京市朝阳区光熙门北里甲 31 号楼 (100028)
发行	中国民航出版社 新华书店经销
电话	(010) 64290477
印刷	北京华正印刷厂
照排	中国民航出版社激光照排室
开本	850 × 1168 1/32
印张	9.5
字数	228 千字
版本	2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

书号	ISBN 7-80110-441-2/V·154
定价	25.00 元

(如有印装错误, 本社负责调换)

前 言

现代化的民用飞机普遍应用先进的航空电子系统来改进和提高飞机的整体性能。这些机载电子系统广泛应用现代计算机、数据传输和电子显示等现代科学技术的最新发展成果，使航空电子系统的性能达到一个新的水平。其中，机载气象雷达的技术更新更为迅速。

雷达的种类繁多，用途各异。机载气象雷达的基本功用是探测航路上的雷暴雨、冰雹、湍流、风切变等恶劣气象区域。飞行员根据气象雷达所提供的飞机前方空中危险气象区域的平面位置图像，可及时地选择安全的路径避绕各种危险的气象区域，以保障飞行安全和飞行的经济性、舒适性。

由于气象雷达对保障飞行安全和舒适性具有重要意义，因而在近代得到了迅速的发展，产品的更新换代迅速。航空电子界总是迅速而又集中地采用现代电子科技的最新成果和先进技术，不断改进系统的性能。现代机载彩色气象雷达的电路结构、所采用的电路器件以及工作原理等都与传统的产品有很大的不同。

自《彩色气象雷达》一书出版以来，机载气象雷达的性能又有了很大的提高。目前，先进的机载气象雷达已具备前视风切变检测能力。本书依据最先进的前视风切变气象雷达，介绍现代气象雷达中所应用的新理论、新技术，对前视风切变探测、全相参雷达收发机、平板缝阵天线和雷达数字信号处理等电路的原理以及微型计算机技术在气象雷达中的具体应用等方面作了重点介绍。

本书对气象雷达的使用原理及维护知识作了简略的介绍。书中所介绍的方法及数据是原理性的，在使用或维修气象雷达时，应依据有关设备手册所规定的程序进行。

本书在编写中参考了 Boeing、Collins、Honeywell、Alliedsignal 等公司关于机载气象雷达的大量技术资料，得到了很多专家和同仁的帮助。在此向热心支持本书编写工作的专家和同仁表示衷心的感谢。

当前，国外厂商不断研制出新型的机载气象雷达，这些新产品所采用的新电路、新器件、新技术日益增多。由于编者水平有限，敬请专家和读者指正。

编者

目 录

第一章 气象雷达系统概述

1.1 机载气象雷达系统的功用	1
1.1.1 雷达对雷雨和湍流等危险气象区域的探测	2
1.1.2 观察飞机前下方的地形	4
1.1.3 发现航路上的山峰等空中障碍物	4
1.1.4 气象雷达显示器的辅助信息显示	5
1.1.5 气象雷达导航信标	5
1.2 气象雷达系统的组件与配置	6
1.2.1 机载气象雷达系统的基本组件	6
1.2.2 气象雷达系统的系统配置	13
1.2.3 气象雷达与电子飞行仪表系统	15
1.2.4 小型飞机上的两组件彩色气象雷达系统	18
1.3 典型机载气象雷达系统的技术特性	19
1.3.1 WXR-700 型数字式彩色气象雷达	19
1.3.2 WXR-700 (FLW) 风切变检测雷达	23
1.3.3 RDR-4A 雷达系统	24
1.3.4 RDR-4B 前视风切变检测雷达	26
1.3.5 PRIMUS-90 彩色气象雷达系统	27
1.3.6 PRIMUS-708 彩色气象雷达	31
1.3.7 P-708A 湍流检测雷达	36

第二章 气象雷达的基本工作原理

2.1 气象雷达对气象目标的探测	38
2.1.1 气象雷达探测气象目标的基本原理	38
2.1.2 气象目标的特性	40
2.1.3 降雨区域的回波强度	41
2.1.4 冰雹的回波特性	43
2.1.5 机载气象雷达对各种气象目标的探测能力	44
2.2 气象雷达的地形观察	45
2.2.1 气象雷达观测地形的基本原理	45
2.2.2 影响地物回波强度的因素	48
2.2.3 地物与水面回波图像的特点	52
2.3 雷达测距原理	53
2.3.1 天线波束扫掠与平面位置显示	53
2.3.2 目标距离测定	54
2.3.3 距离分辨力	56
2.4 雷达测定目标方位的基本原理	56
2.4.1 天线的方向性与目标方位测定	57
2.4.2 方位分辨力	57
2.5 雷达的工作频率	58
2.5.1 雷达频段	58
2.5.2 雷达频率的选择	60

第三章 气象雷达发射机的基本工作原理

3.1 雷达发射机概述	61
3.1.1 雷达发射电路的结构特点	61
3.1.2 两种雷达发射电路体制	62

3.2	雷达信号与雷达方程	63
3.2.1	气象雷达发射信号及其技术参数	63
3.2.2	基本雷达方程	68
3.2.3	气象雷达方程	70
3.2.4	雷达性能指数与最大作用距离	71
3.3	主振放大式雷达发射机	72
3.3.1	主振放大式发射机的特点	72
3.3.2	主振放大式发射机的框图工作原理	75
3.3.3	频率源与倍频链	77
3.3.4	脉冲调制与脉冲宽度的微机控制	82
3.3.5	脉冲功率放大器	88
3.3.6	收发转换开关	93
3.3.7	微波带状线	97
3.4	单级振荡式雷达发射机	98
3.4.1	电路结构与性能特点	98
3.4.2	磁控管振荡器	101
3.4.3	脉冲调制器	105

第四章 气象雷达接收机

4.1	雷达接收机的技术参数	110
4.1.1	接收机的最低可检测信号电平	110
4.1.2	接收机的噪声系数	111
4.1.3	接收机的动态范围	112
4.2	雷达接收机的基本工作原理	112
4.2.1	雷达接收机框图工作原理	112
4.2.2	雷达接收机的微波电路	115
4.2.3	中频与检波电路	116
4.2.4	自动增益控制 (AGC)	117

4.2.5	灵敏度时间控制 (STC)	118
4.2.6	雷达数据处理电路	120
4.3	P-90 雷达接收机	127
4.3.1	电路结构	127
4.3.2	微波电路	128
4.3.3	自动频率控制 (AFC) 系统	129
4.3.4	中频与检波电路	131

第五章 湍流与风切变探测雷达

5.1	湍流及其探测原理	134
5.1.1	湍流的定义与门限	135
5.1.2	湍流的多普勒探测原理	138
5.2	湍流探测雷达的基本工作原理	141
5.2.1	湍流探测时的发射脉冲编码	141
5.2.2	湍流探测电路的组成	142
5.3	气象雷达探测风切变的基本原理	144
5.3.1	风切变的特性	144
5.3.2	风切变探测原理	147
5.4	风切变探测雷达的工作方式与信号格式	149
5.4.1	工作方式	149
5.4.2	风切变探测的有效范围	152
5.4.3	风切变探测雷达的信号格式	155
5.5	风切变探测雷达的基本工作原理	158
5.5.1	基本工作原理	158
5.5.2	雷达数据处理	163
5.5.3	风切变探测的数据处理	172
5.6	典型风切变探测雷达的性能特点	175
5.6.1	WXR-700 (FLW) 风切变探测雷达	175

5.6.2 RDR-4B 前视风切变探测雷达	178
------------------------------	-----

第六章 气象雷达天线

6.1 天线的组成与技术特性	185
6.1.1 天线组件的组成	185
6.1.2 天线的方位扫掠	190
6.1.3 天线的俯仰运动	191
6.1.4 雷达罩	194
6.2 平板天线及其波束特性	195
6.2.1 平板天线	196
6.2.2 平板天线的基本原理	197
6.2.3 平板天线的方向性	199
6.3 方位扫掠系统	204
6.3.1 方位系统的组成	204
6.3.2 微处理器对天线方位扫掠的控制	206
6.3.3 扫掠驱动信号放大器	207
6.3.4 扫掠步进电机	208
6.3.5 扫掠增量监测器与扫掠零位监测器	210
6.4 天线俯仰稳定系统	212
6.4.1 天线俯仰稳定运动的特性	213
6.4.2 俯仰系统的组成	217
6.4.3 中央处理器对天线俯仰系统的控制	219
6.4.4 姿态基准	220

第七章 气象雷达显示器

7.1 气象雷达显示器的组成与工作概况	222
7.1.1 显示器的电路组成与结构	222

7.1.2	气象雷达显示器所能显示的信息内容	226
7.1.3	信号处理与显示的基本过程	228
7.2	彩色显示原理	231
7.2.1	显像管	231
7.2.2	三基色原理	236
7.2.3	电子束的聚焦	238
7.2.4	电子束的偏转	238
7.2.5	电子束的扫描	239
7.3	气象数据的数字处理	243
7.3.1	气象数据字	243
7.3.2	气象数据处理的基本原理	251
7.4	扫描变换电路	254
7.4.1	扫描变换的基本原理	254
7.4.2	坐标变换电路	255
7.5	中央处理器	256
7.5.1	中央处理器的基本功用	256
7.5.2	中央处理器的简单工作过程	257

第八章 气象雷达的使用与维护

8.1	气象雷达的性能监控与自检	260
8.1.1	气象雷达的机内测试电路	260
8.1.2	气象雷达的自检方式及自检图形	263
8.1.3	在 EHSI 上的气象雷达自检及状态通告 信息	268
8.1.4	中央维护计算机与气象雷达的地面检测	274
8.2	气象雷达的使用	278
8.2.1	显示距离的选择	278
8.2.2	天线俯仰调节	280

8.2.3	增益调节	284
8.2.4	气象回避	285
8.2.5	观察地形	287
8.3	气象雷达的微波辐射与地面通电	289
8.3.1	最大允许照射电平	289
8.3.2	微波辐射保护	291
8.3.3	气象雷达地面通电的其他注意事项	291

第一章 气象雷达系统概述

1.1 机载气象雷达系统的功用

人们常说“天有不测风云”，不稳定大气的对流运动所形成的积雨中的上升和下降气流运动强烈、多变，能迅速地生成雷电、暴雨、冰雹、龙卷风等恶劣气象状态，甚至在积雨云的下方也会突然出现猛烈的下冲气流。由于气象变化的不确定性和不同地区气象情况的变化，在万里航路上飞机既可能飞越茫茫云海，也可能会遇到对飞行安全具有严重威胁的雷雨区域或气流激烈扰动的区域。“黑云压城城欲摧”，生动地说明了恶劣天气的危害性。机载气象雷达系统正是人们为防范气象风险，保证飞行安全而应用现代科学技术成果而研制的航空系电子系统。正是由于气象雷达对保障飞行安全具有十分重要的作用，人们一直不遗余力地不断对系统进行改进、更新，使气象雷达的性能在近 20 年来得到了本质性的提高。目前装备飞机的最新气象雷达系统，除了能探测雷雨等气象区域外，已经实现了对风切变、湍流的有效探测，进一步提高了在各种气象条件下的飞行安全性。正是凭借性能优越的机载气象雷达等一系列先进的航空电子系统，使飞行员能够“眼观千里，耳听八方”，驾驶飞机绕过各种危险的气象区域，安全、准确、舒适地把旅客和货物送往目的地。

目前所应用的机载气象雷达除了可以探测航路上的危险气象区域外，还可用于观察飞机前下方的地形或实现其他一些功能。

1.1.1 雷达对雷雨和湍流等危险气象区域的探测

一、雨区探测

众所周知，在雷雨区的中心及其周围区域，不仅风雨交加，电闪雷鸣，而且气流的变化十分剧烈。特别是在降雨量突变的区域，情况往往更为严重。机载气象雷达的基本功用，就是检测飞机前方航路上的雷雨区等危险气象区域，确定其强度、距离及方位，以使飞行员能够在飞机进入这些危险区域之前，及早操纵飞机避开这些危险区域，保障飞行的安全。

要想依靠地面的气象预报来准确掌握万里航路上的气象动态是十分困难的。然而，气象雷达却能实时地将飞机前方数百公里范围内的气象状况用清晰、鲜明的彩色图像呈现在飞行员的眼前，使飞行员对前方扇形区域中的气象状况一目了然。

在彩色电视机中，图像的颜色是反映物体原来的颜色的。彩色气象雷达则与此不同，它是用象征性的颜色来表示降雨率不同的区域的。大雨区域（降雨率超过 12 毫米/小时）的图像为红色，以表示该区域具有较大的危险性；中雨区（降雨率在 4 ~ 12 毫米/小时之间）的图像为黄色，这是人们通常用来提醒注意的颜色，表示该区域具有一定的危险性；小雨区（降雨率在 4 毫米/小时以下）用绿色图像来表示，其意为安全；微雨（降雨率小于 1 毫米/小时）或无雨区在荧光屏上则为黑色——荧光屏上的对应区域不产生辉亮图像。

二、湍流探测

先进的现代彩色气象雷达不仅能把飞行员的视线延伸到几百公里的远方，探测出视觉可见的降雨区域，而且还能探测出与降

雨区相伴随的、肉眼所不可见的湍流区域。湍流区域中的气流运动急速多变，方向变化不定。飞机一旦进入这种湍流区域，不但会产生激烈的颠簸，使机翼、尾翼等部分承受巨大的载荷，而且会造成飞机的操纵困难，危及飞行安全。因此，飞行中总是十分小心地避开湍流区域。20 世纪 80 年代之前，在装备 P-90、RDR-1F、PTICH-2AM 等常规雷达的飞机上，飞行员只能通过观察雨区的图像，通过图像的特征凭经验来判断是否存在湍流，大致推测湍流区域的位置，但很难作出准确、及时的判断。而自从划时代的性能完善的湍流检测雷达问世之后，利用这类现代气象雷达则能可靠、有效地探测出危险的湍流区域，并用醒目的品红色（或紫色）图像直接标示出危险的湍流区域的位置，以提醒飞行员注意避让，因而对提高飞行的安全性具有十分明显的作用。图 1-1 (a)（见书末）是 WXR-700X 雷达的 WXI-711 显示器上所显示的湍流图像。此时雷达工作于“气象和湍流（WX + T）”方式，在荧光屏的左上角显示有蓝色的“WX + T”字样。WXI-711 显示器是用紫色图像表示湍流区的，屏幕上除了显示出大、中、小雨区对应的红、黄、绿三色图像外，在 $-40^{\circ} \sim +20^{\circ}$ 、22 ~ 40 海里范围内还存在较明显的紫色湍流区域。在 PRIMUS-708 雷达的显示器中，则用白色图像来表示湍流区域，同样也是十分醒目的。

由此可知，彩色气象雷达所提供的显示图像，不仅能直观地把飞行员目力所不能见的前方航路及其左右扇形区域中的降雨区的强度及危险的湍流区呈现在飞行员的眼前，而且还可形象地表示出这些降雨区及湍流区相对于飞机的距离与方位以及纵深分布情况，使飞行员能一目了然地掌握前方航路上的气象状况。气象雷达所能探测的范围可达 320 海里（592 公里）。观察这一气象目标的平面分布图像，飞行员就可以选择最恰当的航路，以安全避让危险气象区域，并使飞行平稳舒适。因此，通常把机载气象雷

达的这种功能称为气象回避功能。由此可以理解，机载气象雷达及其性能的不断完善与提高，对于保障飞行的安全与舒适性具有何等重要的意义。

需要说明的是，机载气象雷达对那些“干的”冰雹、“干性”降雪、不伴随降雨的湍流及一般的云雾，由于其所产生的雷达回波通常十分微弱，所以是不能有效探测的。

1.1.2 观察飞机前下方的地形

除了检测空中的气象目标外，气象雷达还能提供飞机前下方地貌的平面图形，这就是机载气象雷达的第二种基本工作方式——地图（MAP）方式。由于地面的城市、河流、海洋、山峰等对雷达波的反射程度的差异，通过雷达处理后，就可在雷达显示器上形成颜色不同的地貌图像。同样，地貌图像的颜色也是象征性的：江、湖、河、海对雷达电波的反射能力较差（1级电平），其图像用代表水面的绿色或青色（蓝绿色）表示；一般陆地的反射能力稍强（2级电平），以黄色模仿大地的颜色；大型城市中的工矿企业及大型桥梁含有大量的金属结构，其反射能力较强（3级电平），用红色或紫色图像来表示，以易于识别。而丘陵、山地对电波的反射程度明显高于周围的平原；江、河、湖、海对电波的反射状况与陆地不同，因而可以显示出清晰的轮廓图形，如海岸线、河流、岛屿等等。观察荧光屏上的这些地貌特征图形，即可十分方便地判明飞机当前所处的地理位置。

1.1.3 发现航路上的山峰等空中障碍物

在飞机的离地高度较低时，或者在飞机的下滑进近过程中，飞机前方的突立山峰也会被雷达波束照射到，如图 1-2 所示。被雷达波束照射到的山峰可在荧光屏上形成明显的图像，以使飞行

员及时觉察到。此外，在相邻高度层上飞行的近距离大型飞机，一般也能形成目标回波。



图 1-2 雷达波束照射到突立的山峰

气象雷达的这一特性，对在黑夜、浓雾、低云层等能见度很差情况下飞行的飞机，以及在地形复杂的山区飞行和起降的飞机来说，具有重要的意义。但是必须强调指出，气象雷达的基本功能是检测大面积的气象降雨区，它对山峰、相遇飞机的探测能力和所显示的相应图像及位置的准确程度，是不能满足地形回避和防撞要求的。因此，决不可把气象雷达所显示的图像作为地形回避和空中防撞的依据。

1.1.4 气象雷达显示器的辅助信息显示

除了提供气象雷达本身所检测到的空中气象目标或显示飞机前下方的地貌特征图像外，气象雷达显示器还可以像一般的计算机终端一样，显示由其他机载系统所提供的文字或图像信息，例如由防撞系统输入的图像与文字信息、快速检查单、导航数据资料等。

1.1.5 气象雷达导航信标

PRIMUS-500 (SPERRY 公司)、RDR-1400 (BENDIX 公司) 等气象雷达除了具备气象检测和观察地形功能外，还具有雷达导航

信标功能。这些雷达装备在小型飞机或直升机上，与地面或海上钻井平台上的雷达信标台相配合，可以提供简易的导航定位功能。

1.2 气象雷达系统的组件与配置

1.2.1 机载气象雷达系统的基本组件

气象雷达是现代飞机必不可少的重要设备，因而国内外主要电子厂家竞相研制生产，各种新型气象雷达不断研制成功并装备飞机。不同型号的气象雷达系统所包括的组件可能不同，它们在各型飞机上的配置也有单系统、双系统等多种形式。

气象雷达系统的基本组件为收发组（R/T）、天线组（ANT）、显示器（IND）和控制盒（CONT）。

有的飞机上的气象雷达系统是由三个基本组件及波导等附件组成的，如图 1-3 所示。这种雷达系统不设置单独的控制盒，系统的控制元件装在显示器的面板上，使系统更为紧凑，使用更为方便。

图 1-3 中的垂直陀螺用于向气象雷达提供俯仰和倾斜信号，它不是雷达系统的组件。现代飞机上则利用惯性基准组件 IRU 向雷达系统提供数字式的俯仰和倾斜信息。

一、收发组

气象雷达的发射电路和接收电路组装在一个完整的组件中，称为收发组（或收发机）。收发组为 8MCU 的模块化组件。图 1-4 是一种典型的彩色气象雷达收发组（WRT-701X），重量约 12 千克。在收发组的前面板上，装有计时器（左上角）、超温指示器、