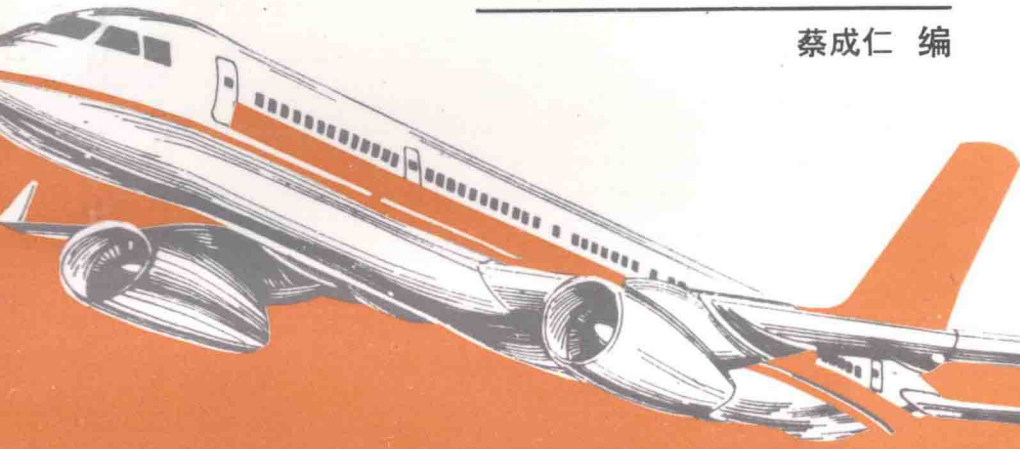
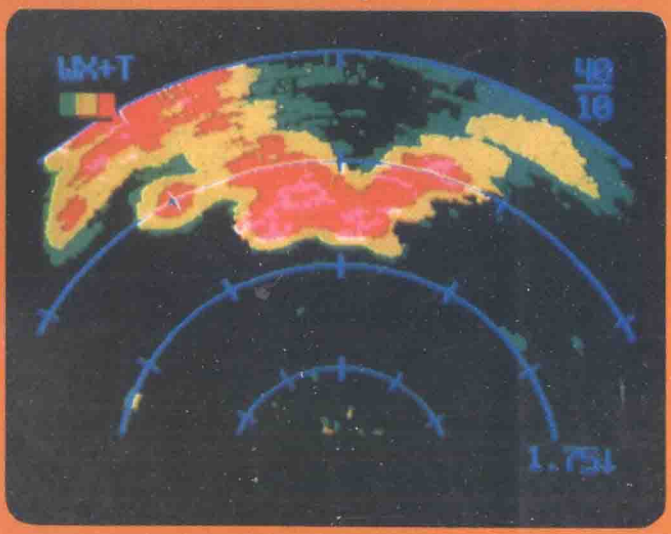
彩色气象雷达

现代飞机电子设备知识丛书

XIANDAI FEIJI DIANZISHEBEI ZHISHI CONGSHU

蔡成仁 编





需要全本请访问 www.ertongbook.com

现代飞机电子设备知识丛书

彩色气象雷达

蔡成仁　编

国防工业出版社

(京)新登字 106 号

内容简介

本书主要介绍现代机载彩色气象雷达的功用、基本工作原理、典型功能电路的结构、使用和维护知识。第一章为概述；第二章说明气象雷达探测气象目标和观察地形的基本原理；第三～五章着重介绍全相参收发机、平板天线、彩色显示器的结构和基本工作原理；第六章概略介绍气象雷达的使用和维护知识。

本书可供飞行人员、机务维护与修理人员、航空部门管理与技术人员以及大专院校相关专业学生阅读参考。

现代飞机电子设备知识丛书

彩色气象雷达

蔡成仁 编

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 毫米 32 开本 印张 9⅝ 246 千字

1992 年 9 月第一版 1992 年 9 月第一次印刷 印数：3 000 册

ISBN 7-118-01023-5/V・85 定价：12.70 元

《现代飞机电子设备知识丛书》

编辑委员会

主任委员

李　钊

副主任委员　陆家沂　莫　及　王维民　李振达
刘得一　钦庆生

委　　员(以姓氏笔划为序)
马士忠　王长昇　王章锜　李　煊(常务)
陆芝平　祁元福　杨颂伟(常务)　张永生
张德馨　周其焕　周宝魁　周瑞琏
郑连兴　高　柱(常务)　翟建平　蔡成仁
黎廷璋

主编单位　中国民用航空局运航司
中国民用航空局科教司
中国民航学院
中国民用航空局第一研究所

责任编辑　何曼庆

出版说明

随着近代电子技术的迅速发展，现代飞机采用了大量新型的先进电子设备。近几年，我国民航使用了许多新型现代飞机，为了帮助从事航空电子技术的广大工程技术人员系统地了解和学习现代飞机电子设备所涉及的新知识、新理论和新技术，为了适应广大航空电子技术爱好者对新技术的了解和自学的需要，我们组织编写了这套《现代飞机电子设备知识丛书》。

本丛书不同于一般现代航空电子技术专著，也不同于民航院校的教科书，而是一套较通俗易懂的丛书，着重于内容的科学性、知识性、趣味性、启发性和实用性，主要介绍现代飞机上所采用的具体设备和系统的功能、作用、原理和结构。考虑到实际工作的需要，本丛书保留了少量英制单位，全书的单位一律采用中文名称。

本丛书约 24 分册，各册内容独立，自成体系，陆续分册出版。

本丛书将为目前从事航空电子设备的科研、设计、制造、使用和维修工作的广大专业人员提供适合其工作特点的理论参考书，可作为大、中专院校有关专业的师生在开阔视野方面的一套参考读物。本丛书还可供在航空部门工作的其他同志阅读。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

序　言

自本世纪初人类首次实现了具有动力并可由人控制的飞行以来，民用航空已获得了惊人的发展。

我国民航在实现社会主义现代化进程中，其发展速度为国际民航界所瞩目。1984～1987 年航空运输总周转量和旅客运输量年递增率分别为 30.0%和 33.2%。近年我国民航事业为适应国民经济建设的需要，推进技术装备现代化，加快民航生产力发展，先后淘汰了一批适航性差的老旧飞机，增添了一批现代化飞机。仅在 1985～1988 年 4 年间，就新增大、中型运输机 126 架。

这些现代飞机的电子设备有了飞跃的发展，普遍采用了计算机、数据传输和屏幕显示等新技术，实现了自动飞行控制。这就对民航广大技术人员提出了更高的要求。

科技的发展，经济的振兴乃至整个社会的进步，都取决于劳动者素质的提高和大量合格人才的培养。科学技术的进步和管理水平的提高，将从根本上推动我国民航事业的现代化建设进程。我希望这套《现代飞机电子设备知识丛书》的出版，对促进我国民用航空事业的发展起到有益的作用。

3/8-1989

前　言

雷达的种类繁多，用途各异，其中，机载气象雷达的基本功用是探测航路上的雷暴雨、湍流、冰雹等恶劣气象区域。飞行员根据气象雷达所提供的平面位置显示图像，可及时操纵飞机沿安全的路径避绕各种危险区域。

由于气象雷达对保障飞行的安全和平稳舒适具有重要意义，因而在近代得到了迅速的发展，系统的性能不断提高，产品的更新换代迅速。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。本书主要介绍彩色气象雷达。

本书在说明机载气象雷达的系统功能和基本原理的基础上，依据最先进的典型气象雷达，着重介绍了现代气象雷达中所应用的新技术、新器件。本书对全相参雷达收发机、平板缝阵天线、彩色显示器的电路结构和数字信号的处理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。

目前，中国民航及其他部门所使用的机载气象雷达大多是从国外引进的。为照顾有关人员的阅读习惯，在书末附录一中列出了部分美英技术文献中所使用的逻辑符号及代号与国家标准的对照关系。

本书由张德馨、张嘉声、王继魁、司清选等同志校审，他们提出了重要的修改和补充意见。在编写中还得到了高柱、宫德深、刘文语、张清泰、邓忠、李清等很多同志的帮助。在此向编委会、参加本

书校审和热心支持本书编写工作的所有同志表示衷心的感谢。

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，但深入介绍工作原理的资料较少，国内也缺乏具体介绍这类设备的资料。由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，敬请读者批评指正。

1991.12

目　录

第一章　机载气象雷达系统 …… (1)
1.1　气象雷达的功用 …… (1)
1.1.1　探测雷雨和湍流等危险气象区域 …… (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　气象雷达的基本组件与系统配置 …… (6)
1.2.1　气象雷达系统的基本组件及安装位置 …… (6)
1.2.2　气象雷达系统的组件配置 …… (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 …… (21)
1.3　机载气象雷达的技术进展 …… (23)
1.3.1　机载气象雷达发展简史 …… (23)
1.3.2　民用机载气象雷达展望 …… (27)
1.4　典型气象雷达设备及其技术特性 …… (27)
1.4.1　PRIMUS－90 彩色气象雷达系统 …… (27)
1.4.2　WXR－700 型数字式彩色气象雷达 …… (31)
1.4.3　PRIMUS－708 彩色气象雷达 …… (36)
1.4.4　PDR－4A 雷达系统 …… (41)
第二章　气象雷达对目标的探测与定位 …… (44)
2.1　气象雷达对气象目标的探测 …… (44)
2.1.1　气象雷达探测气象目标的基本原理 …… (44)
2.1.2　降雨率与回波强度 …… (46)

2.1.3 对冰雹区域的探测 …… (49)
2.1.4 湍流及其检测 …… (49)
2.1.5 机载气象雷达对各种气象目标的探测能力 …… (51)
2.2 机载气象雷达的地形识别 …… (52)
2.2.1 气象雷达识别地形的基本原理 …… (52)
2.2.2 影响地物回波强度的因素 …… (56)
2.2.3 地物与水面回波图像的特点 …… (59)
2.3 目标距离测定 …… (60)
2.3.1 天线波束扫掠与平面位置显示 …… (60)
2.3.2 距离测定 …… (61)
2.3.3 距离显示原理 …… (62)
2.3.4 距离标志 …… (64)
2.3.5 距离分辨力 …… (65)
2.4 目标方位测定 …… (67)
2.4.1 方位测定与天线的方向性 …… (67)
2.4.2 天线瞬时方位的传送与控制 …… (67)
2.4.3 方位分辨力 …… (69)
第三章 气象雷达发射机与接收机 …… (71)
3.1 气象雷达发射信号与气象雷达性能 …… (72)
3.1.1 气象雷达发射信号及其参数 …… (72)
3.1.2 气象雷达性能与气象雷达方程 …… (76)
3.2 主振放大式雷达发射机 …… (79)
3.2.1 主振放大式发射机的特点 …… (79)
3.2.2 电路组成与发射信号的产生 …… (81)
3.2.3 频率源与倍频链 …… (83)
3.2.4 脉冲调制与脉冲宽度的微型计算机控制 …… (87)
3.2.5 脉冲功率放大器 …… (93)
3.2.6 收发转换开关与微带线 …… (97)
3.3 单级振荡式发射机 …… (104)
3.3.1 电路结构与性能特点 …… (104)
3.3.2 磁控管振荡器 …… (106)

3.3.3 脉冲调制器 …… (110)
3.4 气象雷达接收机 …… (115)
3.4.1 气象雷达接收机的电路结构与技术性能 …… (115)
3.4.2 高频电路 …… (119)
3.4.3 本机振荡器与自动频率控制(AFC)系统 …… (121)
3.4.4 中频与检波电路 …… (124)
3.4.5 自动增益控制(AGC)与灵敏度时间控制(STC) …… (126)
3.5 数字信号处理电路 …… (128)
3.5.1 概述 …… (128)
3.5.2 数字滤波器的基本原理 …… (129)
3.5.3 距离滤波器 …… (131)
3.5.4 方位滤波器 …… (132)
3.6 湍流检测 …… (136)
3.6.1 湍流的定义与门限 …… (136)
3.6.2 湍流的多普勒检测原理 …… (137)
3.6.3 湍流检测电路的组成和功用 …… (140)
3.6.4 多普勒处理电路的基本工作原理 …… (141)
第四章 气象雷达天线 …… (148)
4.1 天线的组成与技术特性 …… (149)
4.1.1 天线的组成 …… (149)
4.1.2 天线的方位扫掠 …… (154)
4.1.3 天线的俯仰运动 …… (157)
4.1.4 雷达罩 …… (160)
4.2 平板天线及其波束特性 …… (161)
4.2.1 平板天线 …… (161)
4.2.2 平板天线的基本原理 …… (163)
4.2.3 平板天线的方向性 …… (165)
4.2.4 抛物面天线及其与平板天线的简单比较 …… (171)
4.3 方位扫掠系统 …… (172)
4.3.1 方位系统的组成 …… (172)
4.3.2 微处理器对天线方位扫掠的控制 …… (173)

需要全本请访问 www.ertongbook.com

4.3.3 扫掠驱动信号放大电路 …… (175)
4.3.4 扫掠步进电机 …… (177)
4.3.5 扫掠增量监测器与扫掠零位监测器 …… (179)
4.3.6 方位电机的力矩控制 …… (182)
4.4 天线俯仰稳定系统 …… (183)
4.4.1 天线俯仰稳定运动的特性 …… (183)
4.4.2 俯仰系统的组成 …… (190)
4.4.3 中央处理器对天线俯仰系统的控制 …… (191)
4.4.4 姿态基准 …… (192)
第五章 气象雷达显示器 …… (196)
5.1 气象雷达显示器的组成与工作概况 …… (197)
5.1.1 气象雷达显示目标的基本方式 …… (197)
5.1.2 显示器的电路组成与结构 …… (197)
5.1.3 气象雷达显示器所能显示的信息内容 …… (202)
5.1.4 信号处理与显示的基本过程 …… (206)
5.2 彩色显示原理 …… (210)
5.2.1 显像管 …… (210)
5.2.2 三基色原理 …… (217)
5.2.3 电子束的聚焦 …… (219)
5.2.4 电子束的偏转 …… (221)
5.2.5 电子束的扫描 …… (223)
5.3 气象数据的数字处理 …… (228)
5.3.1 气象数据字 …… (228)
5.3.2 气象数据处理电路的组成与功用 …… (235)
5.3.3 气象数据存储器 …… (236)
5.3.4 扫掠平均 …… (242)
5.3.5 彩色译码 …… (244)
5.4 扫描变换电路与中央处理器 …… (245)
5.4.1 扫描变换的基本原理 …… (245)
5.4.2 坐标变换电路 …… (246)
5.4.3 中央处理器及其相关电路 …… (248)

5.4.4 中央处理器的简单工作过程 …… (256)
第六章 气象雷达的使用与维护 …… (259)
6.1 气象雷达的性能监控与自检 …… (259)
6.1.1 气象雷达的机内测试电路 …… (259)
6.1.2 气象雷达的自检方式及自检图形 …… (262)
6.1.3 在 EHSI 上的气象雷达自检及状态通告信息 …… (265)
6.1.4 中央维护计算机与气象雷达的地面检测 …… (271)
6.2 气象雷达的使用 …… (275)
6.2.1 显示距离的选择 …… (275)
6.2.2 天线俯仰调节 …… (276)
6.2.3 增益调节 …… (280)
6.2.4 气象回避 …… (280)
6.2.5 观察地形 …… (282)
6.3 气象雷达的微波辐射与地面通电 …… (284)
6.3.1 最大允许照射电平 …… (284)
6.3.2 微波辐射保护 …… (284)
6.3.3 气象雷达地面通电的其他注意事项 …… (285)
附录一 逻辑符号对照表 …… (287)
附录二 气象雷达装机表 …… (288)
附录三 缩略词对照表 …… (289)
参考文献 …… (293)

第一章　机载气象雷达系统

1.1　气象雷达的功用

在繁忙的航空港，一架架满载旅客的大、中型客机在引擎的轰鸣声中飞向四面八方。不难想象，由于不同地区气象情况的变化，在万里航路上飞机可能飞越茫茫云海，也可能会飞到雷雨交加或者气流激烈扰动的区域。正是凭借性能优越的机载彩色气象雷达等一系列先进的电子设备，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，安全舒适地把旅客(或货物)送往目的地。融汇着当代电子技术精华的现代机载气象雷达和其他航空电子系统，使人的视觉、听觉等感知功能和计算、判断能力得到了成千上万倍的扩展和增强。

雷达，是英文词组 Radio detection and ranging 的缩写 Radar 的音译，意为无线电探测与测距。现代雷达的应用十分广泛，但各种不同用途雷达的基本原理都是相同的，即通过发射微波信号，从而接收由目标反射的回波来探测所需要的目标，并在发现目标的同时，确定目标的空间位置或者进一步计算目标的其他参数。

机载气象雷达是雷达中的一种，本书所提的雷达均为机载彩色气象雷达。它除了可以探测航路上的危险气象区域外，还可用于观察地形并实现其他一些功能。现代机载气象雷达可实现的功能有以下几个方面：

(1)　探测航路前方扇形区域中的降雨区、冰雹区等气象区域；

(2)　探测夹带雨粒的湍流区域；

(3)　观察飞机前下方的地形；

(4)　发现航路上的突立山峰等障碍物；

(5) 显示由其他系统输入的文字或图形信息；

(6) 用作雷达导航信标。

1.1.1 探测雷雨和湍流等危险气象区域

一、雨区探测

众所周知，雷雨区中心及其周围，特别是降雨量突变的区域，不仅雷电交加，而且气流的变化十分剧烈。机载气象雷达的基本功用，就是探测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，以使飞行员操纵飞机避开这些危险区域。

现代民用飞机的速度可达900公里/小时或更高，在短短的几小时中，飞机将飞越数千公里。俗话说，天有不测风云，尤其在雷雨季节，某些地区的气象情况复杂多变，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，气象雷达则能随时将飞机前方的气象状况用清晰的图像呈现在飞行员的眼前，使飞行员对前方数百海里内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，如图1-1(见书末)所示。大雨区域(降雨率超过12毫米/小时)的图像为红色，以表示该区域具有一定的危险性；中雨区(降雨率在4～12毫米/小时之间)的图像为黄色，这是人们常用来提醒注意的颜色；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——荧光屏上的该区域不产生辉亮图像。

图1-1下部的曲线表示不同距离处的降雨率。该曲线表明大约在飞机前方22～55海里范围内的降雨率已超过红色电平(12毫米/小时)，这与荧光屏上20～60海里距离标志圈之间的红色图像相对应。由图还可知，一般肉眼可见的云区是不产生雷达图像的，即机载气象雷达不能探测不降雨的云区。

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，不但会产生强烈的颠簸，使机翼、尾翼等部分承受巨大的载荷，而且会造成飞机操纵的困难，危及飞行安全。因此，飞行中总要十分小心地避开湍流区域。在装备 P—90 等常规雷达的飞机上，飞行员只能通过观察雨区的图像，凭经验来判断是否存在湍流，大致估计湍流区域的位置，但很难做出准确、及时的判断。而性能完善的 WXR—700X 等现代气象雷达则能可靠、有效地探测出危险的湍流区域，并用醒目的紫色（或品红色、绛红色）图像直接表示出危险的湍流区域的位置，以提醒飞行员注意避绕，因而对保障飞行安全是十分有益的。图 1-2 (*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、小雨区的红、黄、绿三色图像外，在－40°～＋20°、22～40 海里范围内还存在较明显的紫色湍流区域。在一些其他型号的雷达显示器中，用白色图像来表示湍流区域，同样也是醒目的，如图 1-2 (*b*)（见书末）所示。

由此可知，彩色气象雷达所提供的显示图像，不仅能直观地把目力所不能见的前方航路及其左右扇形区域中各降雨区的强度及危险的湍流区呈现在飞行员的眼前，而且还形象地表示出这些降雨区及湍流区的纵深分布情况及它们相对于飞机的距离与方位，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通常可达 320 海里（即 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，以安全避绕危险气象区域，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，也可以把气象雷达称作航行雷达（苏式）。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具有何等重要的意义。

需要说明的是，机载气象雷达所能有效探测的仅仅是那些含

有大大小小水滴的“湿性”气象目标，如各种程度的降雨区，夹杂雨粒的湍流区，表面覆盖有薄薄水膜的冰雹、潮湿的雪花等等；而对那些“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，机载气象雷达是不能有效探测的。

气象雷达探测各类气象目标的原理和特性，将在 2.1 节中予以介绍。

1.1.2 观察飞机前下方的地形

除了探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，会在彩色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图形，即可十分方便地判明飞机的地理位置。

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 1-3 所示。被雷达波束照射到的山峰可在荧光屏上形成鲜明的图像，以使飞行员及时觉察到。此外，在相邻高度层上飞行的大型飞机，一般也能形成目标回波。

气象雷达的这一特性，对在雾天、低云层等能见度差的情况下，或夜航的飞机以及在地形复杂的山区飞行和起降的飞机来说，都具有重要的意义。但是，必须强调指出，气象雷达的基本功能是

需要全本请访问 www.ertongbook.com