

Fengkuoxian
Leida Tance yu
Yingyong

风廓线雷达探测与应用

◎ 胡明宝 著



气象出版社
China Meteorological Press

风廓线雷达探测与应用

胡明宝 著



气象出版社

China Meteorological Press

内容简介

本书系统地介绍了风廓线雷达的探测原理、雷达探测模式设置、信号处理方法、目标谱峰检测、风廓线计算、数据质量控制方法等内容,并利用雷达长期的连续观测数据,研究分析了风廓线雷达的实际探测性能及其在天气监测中的应用。本书内容丰富,可供大气科学各专业本科生学习使用,也可供气象工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

风廓线雷达探测与应用/胡明宝著. —北京:气象出版社,2015.1

ISBN 978-7-5029-6089-6

I. ①风… II. ①胡… III. ①气象雷达-研究

IV. ①TN959.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 018149 号

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.qxcbs.com>

责任编辑:杨泽彬

封面设计:博雅思企划

责任校对:华鲁

印 刷:三河市鑫利来印装有限公司

开 本:720 mm×960 mm 1/16

字 数:262 千字

版 次:2015 年 1 月第 1 版

定 价:48.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:黄润恒

责任技编:吴庭芳

印 张:13

彩 插:2

印 次:2015 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

前 言

本书系统地介绍了风廓线雷达的探测原理、雷达探测模式设置、信号处理方法、目标谱峰检测、风廓线计算、数据质量控制方法等内容,并利用雷达长期的连续观测数据,研究分析了风廓线雷达的实际探测性能及其在天气监测中的应用。本书内容丰富,可供大气科学各专业本科生教学使用,也可供气象工作者参考。

本书的主要内容是作者与其团队,解放军理工大学气象海洋学院贺宏兵、李妙英、张鹏、艾未华、陈楠等老师和研究生肖文建、缪创、吴晶晶、张桎桎等,多年来针对风廓线雷达开展的研究成果。

特别感谢中国气象局郑国光研究员和南京信息工程大学张培昌教授,在作者攻读博士学位期间所给予的指导。两位老师帮助作者对研究内容进行了理论分析和结果凝练,给作者提出了很多好的建议,对论文进行了认真的审阅和修改。

江苏省气象局科研所夏文梅研究员、徐芬高工提供了多普勒天气雷达探测数据和地面观测资料。中国航天科工集团二院 23 所气象雷达事业部的贾晓星研究员、中电科集团 14 所李忱研究员、安徽四创电子股份有限公司陈少应研究员、北京敏视达雷达有限公司张建云研究员、北京爱尔达电子股份有限公司马大安研究员、何晓晶高工,提供了风廓线雷达的有关图片和指标。在开展气球比对观测试验时,得到了航天科工集团二院 23 所、四创公司有关人员和解放军某部张玉存、程杰等的支持和帮助,在此一并表示感谢。

本书不是关于风廓线雷达的全面论述,只是我们研究工作的总结和介绍,由于水平所限,不足和偏颇难免,欢迎读者批评指正。

作者

2015 年 1 月

目 录

前 言

第 1 章 风廓线雷达的发展	(1)
1.1 风廓线雷达的分类	(1)
1.2 风廓线雷达的发展	(2)
1.3 风廓线雷达的技术现状	(12)
第 2 章 风廓线雷达探测原理与工作模式	(16)
2.1 湍流简介	(16)
2.2 湍流散射理论	(22)
2.3 风廓线雷达探测	(27)
2.4 风廓线雷达信号与数据处理流程	(33)
2.5 风廓线雷达探测模式分析与设计	(35)
第 3 章 风廓线雷达谱分析方法	(40)
3.1 谱分析方法的发展	(40)
3.2 FFT 法谱分析	(42)
3.3 小波技术应用研究	(45)
3.4 最大熵法应用研究	(50)
3.5 数值模拟检验	(58)
3.6 本章小结	(66)
第 4 章 风廓线雷达目标检测方法	(68)
4.1 目标检测方法的发展	(68)
4.2 客观化目标检测法	(69)
4.3 综合识别法目标检测研究	(73)
4.4 检测效果分析	(85)
4.5 本章小结	(94)
第 5 章 风廓线计算与数据质量控制方法	(95)
5.1 数据质量控制方法的发展	(95)
5.2 一致性平均的研究	(96)

5.3	风廓线计算	(103)
5.4	数据质量控制方法研究	(109)
5.5	本章小结	(113)
第6章	风廓线雷达探测性能试验	(115)
6.1	长期运行稳定性分析	(115)
6.2	数据获取率分析	(117)
6.3	探测数据准确性分析	(121)
6.4	风廓线雷达自比对分析	(127)
第7章	风廓线雷达探测过境天气的分析与识别	(132)
7.1	基本原理	(132)
7.2	雷达探测图例分析	(133)
7.3	一次飑线天气过境分析	(143)
第8章	风廓线雷达探测风切变	(149)
8.1	风切变	(149)
8.2	风切变的计算	(150)
8.3	风切变的探测识别	(152)
第9章	风廓线雷达探测低空急流	(160)
9.1	低空急流及其定义	(160)
9.2	低空急流的统计分析	(162)
9.3	低空急流个例分析	(171)
第10章	风廓线雷达垂直速度资料的应用	(188)
10.1	垂直速度的计算	(188)
10.2	个例分析	(189)
10.3	统计分析与应用	(193)
参考文献		(197)

第1章 风廓线雷达的发展

1.1 风廓线雷达的分类

风廓线雷达(wind profiling radar)又称风廓线仪(wind profiler),是一种新型的测风雷达,能够无人值守 24 h 连续提供大气水平风场、垂直气流、大气折射率结构常数等气象要素随高度的分布,具有时空分辨力高、连续性和实时性好的特点,是进行高空气象探测的重要设备,是当前常规气球测风体制的重要补充,是开展天气预报和气象保障的新手段。

风廓线雷达的研究始于 20 世纪 60 年代(Atlas,1990),美国是最早开始风廓线雷达研究的国家。表 1.1 为较早出现的一些研究晴空大气的相干脉冲雷达系统(马振骅等,1986)。

表 1.1 早期部分风廓线雷达的主要参数

设备名称	安装位置	频率(MHz)	波长(m)	功率孔径积($W \cdot m^2$)	波束宽度($^\circ$)	天线结构	探测高度范围(km)
Jicamarca	秘鲁	49.9	6.01	2.0×10^{10}	1.0	偶极子阵列	≤ 100
Arecibo	波多黎各	430	0.75	7.0×10^9	0.17	馈源转动	$\leq 30, 60 \sim 100$
SOUSY	德国	53.5	5.61	1.3×10^8	10	八木天线阵	
Chatanika	阿拉斯加	1290	0.23	2.6×10^7	0.6	可操纵圆盘	≤ 25
Millstone	马萨诸塞州	1290	0.23	2.6×10^7	0.6	可操纵圆盘	≤ 25
Sunset	科罗拉多	40.5	7.36	9.0×10^6	5×9	偶极子阵列	$\leq 30, 60 \sim 100$
Platteville	科罗拉多	49.9	6.01	5.0×10^6	3×3	偶极子阵列	$\leq 20, 70 \sim 80$
Wallops	弗吉尼亚	430	0.75	3.1×10^6	2.9	可操纵圆盘	
Poker Flat	阿拉斯加	49.9	6.01	5.1×10^9	1.5	偶极子阵列	≤ 100

在几十年的发展过程中,风廓线雷达的名称和分类有多种。早期依据探测高度一般分为两类,即 MST(Mesosphere Stratosphere Troposphere) 风廓线雷达和 ST(Stratosphere Troposphere)风廓线雷达。MST 雷达主要用来探测中层、平流层和

对流层的风廓线,也有的文献中称 MST 雷达为 MU(Middle and Upper)雷达,而 ST 雷达则用于探测平流层和对流层的风廓线。按发射频率又分为 UHF(Ultra High Frequency)雷达和 VHF(Very High Frequency)雷达。目前比较统一的分类为:平流层风廓线雷达、对流层风廓线雷达和边界层风廓线雷达,其中对流层风廓线雷达根据最高探测高度又可分为对流层(I型,12~16 km)和低对流层(II型,6~8 km)。表 1.2 给出了各型风廓线雷达的大致的指标情况。

表 1.2 风廓线雷达分类和主要指标

	边界层风廓线雷达	对流层风廓线雷达	平流层风廓线雷达
工作频率(MHz)	900~1300	400~500	50~90
发射功率(kW)	≤5	≤40	≤500
天线尺寸(m×m)	≤3×3	≤12×12	≤100×100
高度范围(km)	0.05~3	0.25~16	1~30
高度分辨力(m)	50	250	1000
雨雪影响	大	有影响	小
可移动性	好	可以移动	差

1.2 风廓线雷达的发展

1.2.1 美国风廓线雷达

20 世纪 60 年代,美国开始对风廓线雷达理论进行研究,经过近 20 年的不断发展,到 20 世纪 80 年代初逐步趋于成熟。1980 年,美国国家海洋大气局环境研究院在科罗拉多州中北部建立了一个风廓线雷达试验网(Strauch,1984),共安装了 6 部风廓线雷达,其中 4 部为 49.5 MHz,可以探测到平流层;一部为 405 MHz 用于探测对流层;另一部为 915 MHz 的边界层风廓线雷达。经过 8 年的试运行和大量的对比试验,完善了雷达技术和数据处理方法,取得了第一手资料。在此基础上,1989 年 NOAA 环境研究院决定在美国中部建立一个由 31 部对流层风廓线雷达组成的业务实验网,布网采用 404 MHz 风廓线雷达(Weber,1990)。

美国的风廓线雷达不仅用于民用气象或机场天气监测等,还广泛用于军事领域。1988—1990 年,在新墨西哥州白沙导弹靶场组建“大气廓线探测设备研究中心”时,不仅建有气象铁塔和气球探空雷达,还建立了平流层、对流层和边界层的 4 部风廓线雷达,组成了一个完整的风廓线雷达高空气象探测体系,用于导弹试验的军事气象保障和相应的科学研究。这 4 部风廓线雷达的主要指标见表 1.3(Hinses,1993):

表 1.3 白沙靶场风廓线雷达装备情况

	平流层	对流层	边界层	近地面层
发射频率(MHz)	49.25	404.37	924.0	2900
发射功率(kW)	250	12	1	0.22
占空比(%)	5	5	5	100
天线面积(m ²)	15657	170	40	7×2
波束数	3	3	3	扫描
波束宽度(°)	3.3	4	10	2.7
测量参数	C ₀ ² 、风、温	风、温	风、温	C ₀ ² 、风、温
最大探测高度(km)	20	16	6	2
最小探测高度(km)	2	0.5	0.12	0.05
高度分辨力(m)	150	375	100	32

经过几十年的发展,美国的风廓线雷达技术日趋成熟,已经是商业化的产品。比较有代表性的是 LAP 系列风廓线雷达,最早是由 NOAA 的波传播实验室(WPL)开发的,研制成功后技术转让给雷声(Radian)公司生产,雷声公司是洛克希德-马丁公司的子公司,后来维萨拉(Vaisala)公司通过参股,成立维萨拉美国公司风廓线雷达分部,拥有 LAP 注册商标,成为风廓线雷达主要的生产和商业推广者,产品统一标识为 LAP-XM, XM 表示最大探测高度。主要产品为 LAP-3000、LAP-12000 和 LAP-16000 等(Vaisala, 2004)。

LAP-3000 是边界层风廓线雷达,可选配无线电声探测系统(Radio Acoustic Sounding System, 简称 RASS)。该风廓线雷达可无人值守对地面上方 3 km 高度范围内的水平风速和风向,以及垂直气流进行测量。图 1.1 所示为配备有 RASS 的 LAP-3000 边界层风廓线雷达,图中间为风廓线雷达天线,天线阵四边上的圆柱形物体为声波发射装置,共同组成 RASS,除了可探测风廓线外,还可附加探测气温廓线。

LAP-3000 风廓线雷达可工作在 915 MHz 和 1290 MHz 两种频率。915 MHz 天线系统由四个天线面板组成,这四个天线面板水平排成一正方形阵列。每个天线面板由微带单元构成,其尺寸为 1.23 m×1.23 m。1290 MHz 天线系统由九块 0.87 m×0.87 m 天线面板组成。微带单元数目根据频率而有所变化。全部天线面板用一玻璃纤维天线罩保护起来,天线阵四周装有杂波屏蔽挡板,从而减轻了地杂波的影响。

LAP-3000 代表了 20 世纪 90 年代中期边界层风廓线雷达的先进水平,不仅为 NOAA、NCAR(美国国家大气研究中心)、NASA(美国国家航空航天局)、DOD(美国



图 1.1 LAP-3000 边界层风廓线雷达

国防部)、DOE(美国能源部)等采用,而且出口到了世界很多国家。欧洲英、德等国家的风廓线雷达网中也采用了很多套 LAP-3000 风廓线雷达系统。

目前 LAP-3000 已销售 200 部左右,是 LAP 系列中销量最大的。中国科学院大气物理研究所、上海市气象局、香港国际机场和中国大陆民航机场都有引进。其中架设于北京中科院大气所的 LAP-3000 工作在 915 MHz,而架设在上海市气象局的则工作在 1290 MHz。

LAP-12000 是一种低对流层风廓线雷达,用于在晴空条件下探测地面以上 12 km 或更高高度的风廓线。LAP-12000 的 144 个八木天线以正方形方阵排列,不锈钢立柱埋在混凝土底座中,天线就安装在立柱之上,天线被排列成一个 12×12 的矩阵。图 1.2 是 LAP-12000 风廓线雷达,工作频率 50 MHz,天线阵占地 $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ 。

LAP-16000 是对流层风廓线雷达,主要用于对地面上 500 m 至 16 km 高空的风速和风向进行测量。根据需要,LAP-16000 风廓线雷达可配置无线声探测系统来探测约 6 km 高的温度廓线。图 1.3 所示为配备有 RASS 的 LAP-16000 风廓线雷达系统,图中天线阵四边上的圆柱形物体为声波发射装置。

该系统主要由天线阵、设备方舱及四个 RASS 声源组成。天线为同轴共线(CO-CO)相控阵天线,它由 120 个单元(2400 个偶极子)构成,天线面积约 $12.4 \text{ m} \times 12.4 \text{ m}$ 。

系统的发射机、接收机、数据处理系统等装在一个便于机动的设备方舱内。采用固态功率放大器,能够提供 6 kW 的峰值功率,具有 $3.3 \mu\text{s}$ (低模式)和 $20 \mu\text{s}$ (高模式)两种发射脉宽。接收机将大气回波信号进行数字化,然后送至数据处理系统。

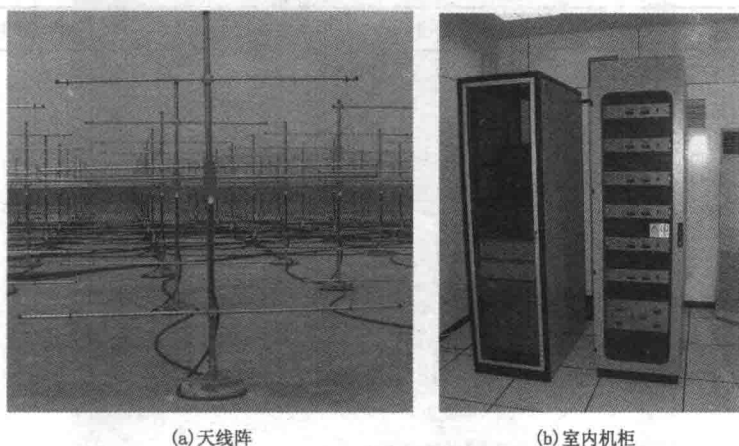


图 1.2 LAP-12000 低对流层风廓线雷达

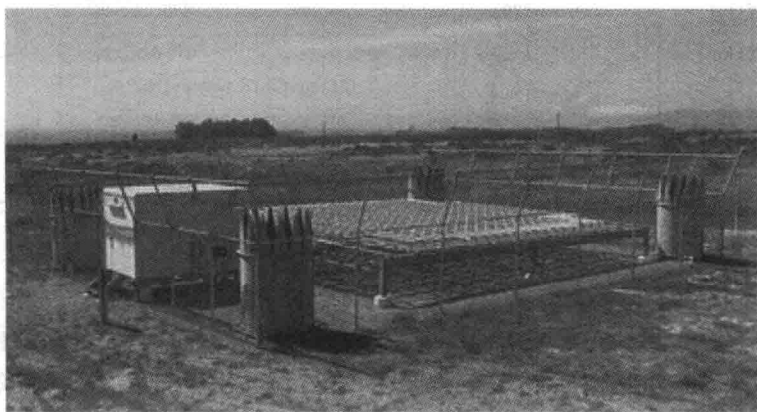


图 1.3 配备 RASS 的对流层风廓线雷达

LAP-16000 具有 449 MHz 和 482 MHz 两种工作频率,两种频率下工作参数一致。LAP-16000 已为 NOAA、NCAR(美国国家大气研究中心)、NASA(美国国家航空航天局)、DOD(美国国防部)、DOE(美国能源部)以及多所大学广泛使用。美国国家海洋与大气局在美国中部地区和阿拉斯加组建了一个风廓线雷达网,其中中部地区部署了 32 部 404 MHz 风廓线雷达,阿拉斯加部署了 3 部 449 MHz 风廓线雷达。另外还出口到了德国(频率为 482 MHz)和日本。表 1.4 为 LAP 系列风廓线雷达主要指标一览表(Vaisala,2004)。

表 1.4 LAP 系列风廓线雷达主要指标一览表

	LAP-3000	LAP-16000
最小探测高度(m)	120	250
最大探测高度(km)	3~5	12~16
最高高度分辨力(m)	60 (400ns 脉冲)	100 (700ns 脉冲)
风速精度(m/s)	<1	<1
风向精度(°)	<10	<10
平均时间(min)	3~60	3~60
发射功率(kW)	0.6	16
天线形式	微带	同轴共线
天线孔径(m ²)	2.7 (4 块天线板) 6.1 (9 块天线板)	143
波束宽度(°)	<4	<4
天线增益(dB)	26	35
测温最小高度(m)	120	250
测温最大高度(km)	1~2	2~6
测温精度(°C)	1	1
声源形式	抛物反射体	抛物反射体
声桶孔径(m)	1.2	1.8

1.2.2 日本风廓线雷达

日本在风廓线雷达方面开展的研究也很有特色,它们研制的 46.5 MHz 平流层风廓线雷达天线波束指向比较灵活,可以在 360°方位范围内每隔 5°、天顶角 30°以内每隔 1°可选(Fukao, 1985)。该设备建于 1985 年,为日本京都大学所有,号称是 VHF 频段风廓线雷达中最昂贵和最复杂的系统。图 1.4 为风廓线雷达俯视图。

风廓线雷达天线为一圆形八木天线阵,共有十字形八木天线段 475 个。1993 年,该雷达安装了实时数据处理系统,大大提高了设备的数据采集能力,可对高度在 80~110 km 的风速进行测量。

日本从 2000 年开始,建立了由 31 部边界层风廓线雷达组成的探测网,分布如图 1.5 所示,其主要技术参数见表 1.5。

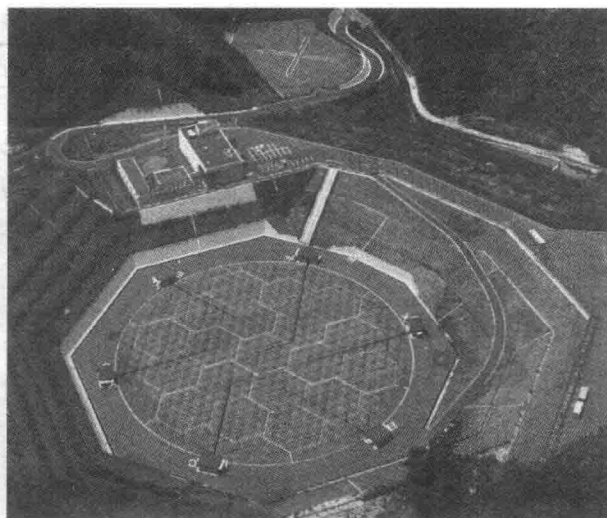


图 1.4 日本平流层风廓线雷达俯视图

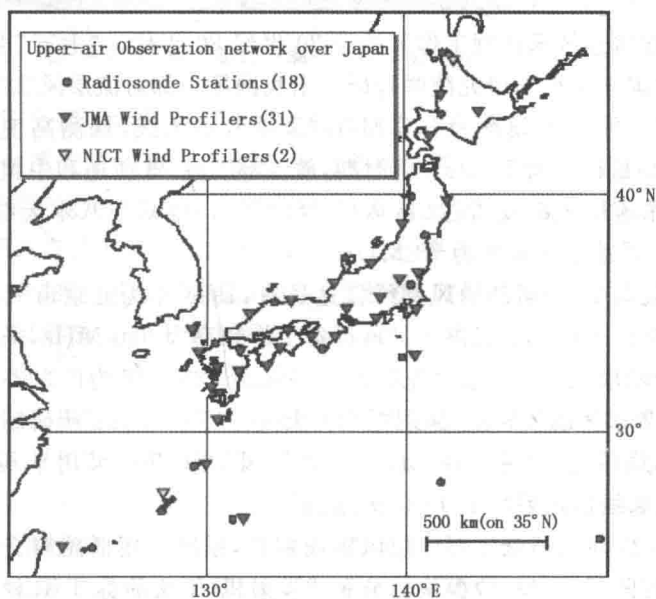


图 1.5 日本边界层风廓线雷达网(取自日本气象厅官网)

表 1.5 日本布网风廓线雷达主要参数

名称	参数值
发射频率(MHz)	1357.5
发射功率(kW)	1.8
天线增益(dB)	33
旁瓣电平(dB)	-40
波束宽度(°)	4
波束数	5
脉冲重复频率(kHz)	5、10、15、20
脉冲压缩(个)	8
高度分辨率(m)	100、200、300、600
主要输出数据	每 1 min 1 次谱矩, 每 10 min 1 次 u 、 v 、 w 、SNR

1.2.3 中国风廓线雷达

我国风廓线雷达技术研制工作开始于 20 世纪 80 年代。“七五”期间,航天部二院第 23 所与中国气象科学研究院联合研制出我国第一部对流层风廓线雷达(马大安等,1989),该雷达的工作频率为 365 MHz,采用八木天线,探测高度范围为 350~13000 m,风速测量精度为 1 m/s。同时期,航天部二院 23 所还和中国科学院大气物理所联合研制平流层风廓线雷达(吕达仁等,2003),也采用八木天线阵,天线占地 100 m×100 m,雷达工作频率为 78 MHz。

航天部二院第 23 所研制的风廓线雷达还有:1996 年为北京市气象局科研所研制的车载式低空边界层风廓线雷达。该设备工作频率为 930 MHz,采用微带平板式天线,主要用于城市大气边界层气象探测。1999 年,23 所又为广东省气象局研制了 926 MHz 的边界层风廓线雷达,采用抛物面天线。1999 年,23 所研制了组合式边界层/平流层风廓线雷达,其中 918 MHz 边界层风廓线雷达采用平板微带天线,48 MHz 平流层风廓线雷达采用 CO-CO 天线。

21 世纪初,23 所又研制了对流层风廓线雷达,系统采用低副瓣交叉极化半波振子固态有源相控阵天线、发/收模块化分布式发射机(下文简称 T/R 模块)、数字式中频接收机。工作频率为 445 MHz,天线为 9.6 m×9.6 m。采用低、中、高三种工作模式,提供 150~16000 m 高度范围内的风廓线。

2005 年,23 所为北京市气象局研制的低对流层风廓线雷达,提供 120~8000 m 高度范围内的风廓线,该设备的战技指标和技术体制与对流层风廓线雷达相当,只是天线要小一些,为 7 m×7 m。该设备为 2008 年北京奥运会气象保障系统的组成部

分,现已安装在延庆使用。2007年,23所为青岛市气象局研制了采用微带天线的边界层风廓线雷达,用于奥运会帆船赛的气象保障。

目前,23所已研制有边界层、低对流层、对流层、平流层风廓线雷达,图1.6为其研制的部分雷达产品图片。

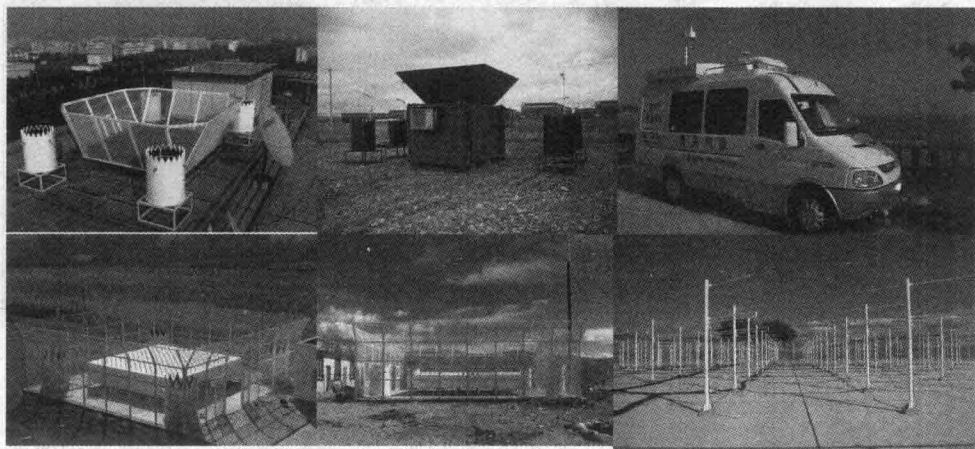


图1.6 23所研制的风廓线雷达部分图片(贾晓星提供)

中电科集团公司38所1995年开始研制风廓线雷达,并于2001年研制成功的边界层风廓线雷达系统是一套综合性低空气象探测系统,由风廓线雷达、RASS、微波辐射计和地面观测仪组成,可同时进行边界层风速/风向、温度、湿度和气压的测量(作者从事风廓线雷达的研究,就是从参与该雷达研制工作开始的)。该风廓线雷达主要由微带平面相控阵天线、固态发射机、接收机、监控系统、数字信号处理器和数据处理终端组成,可形成3个或5个固定波束指向,天线口径为 $2.4\text{ m} \times 2.4\text{ m}$ 。采用全固态发射机,可工作于极窄脉冲宽度。接收机为一次混频超外差全相参体制。信号处理由通用超大规模集成电路完成,参数设置灵活,处理模式多样。

2005年,38所和安徽四创电子股份有限公司为中国气象局研制了低对流层风廓线雷达,提供120~8000 m高度间的风廓线,为2008年奥运会青岛帆船比赛提供气象保障。系统采用分块式二维相控CO-CO阵列天线、分布式全固态发射机、数字中频接收机、单PCI插卡信号处理器、光纤数据传输和控制。

目前,38所和安徽四创电子股份有限公司已研制有固定式边界层、机动式边界层、舰载型边界层风廓线雷达和低对流层风廓线雷达,图1.7为其研制的部分雷达产品图片。

中电科集团公司14所在20世纪90年代开始风廓线雷达的研制工作。从2001年起采用有源相控阵体制为中国气象局研制风廓线雷达。2004年为中国气象局研



图 1.7 38 所研制的风廓线雷达部分图片(陈少应提供)

制成功低对流层风廓线雷达,可以连续提供高度范围 300~8000 m 的水平风廓线、垂直风廓线、大气折射率结构常数等气象要素。2005 年,车载边界层风廓线雷达参加“十运会”气象保障。

2007 年,14 所为中国飞行试验研究院研制对流层风廓线雷达,用于机场飞行气象保障。2009 年,14 所为中国气象局暴雨所(武汉)研制三台边界层风廓线雷达,组成国内第一个区域探测网,用于对暴雨的监测研究。2011 年,14 所又为武汉大学及中国科学院大气物理研究所研制平流层风廓线雷达,采用数字阵列体制和数字波束形成(DBF)技术。该雷达天线占地 100 m×100 m,用于观测 30 km 以下的风廓线,同时也具有对高度 60~100 km 的电离层风场、电子密度的观测模式。2012 年,对流层风廓线雷达出口到文莱斯里巴加湾国际机场。

目前,14 所已研制有边界层、低对流层、对流层、平流层风廓线雷达共 40 余套,图 1.8 为其研制的部分雷达产品图片。

北京爱尔达电子设备有限公司 1997 年交付第一套固定式边界层风廓线雷达,2002 年研制成功车载边界层风廓线雷达,五波束天线架设在车顶上,具有自动定北和倾斜订正功能,机动性好,适于应急气象保障。

目前,北京爱尔达公司已研制有边界层、低对流层风廓线雷达、对流层风廓线雷达,边界层风廓线雷达既有固定式,也有车载式和船载式。图 1.9 为其研制的部分雷达产品图片。

北京敏视达雷达有限公司 2006 年开始研制低对流层风廓线雷达(TWP8),采用无源、密封良好和可扩充的 CO-CO 天线,2007 年 5 月通过试验考核。2008 年 12 月

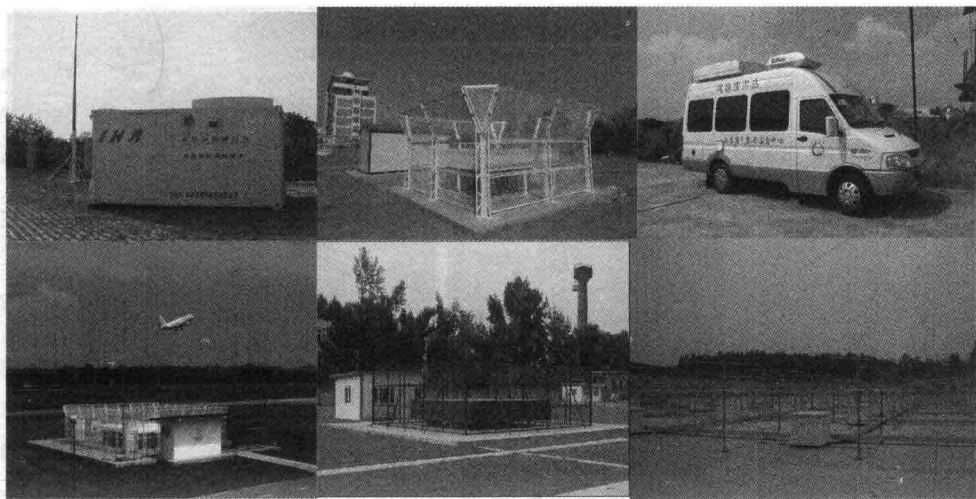


图 1.8 14 所研制的风廓线雷达部分图片(李忱提供)

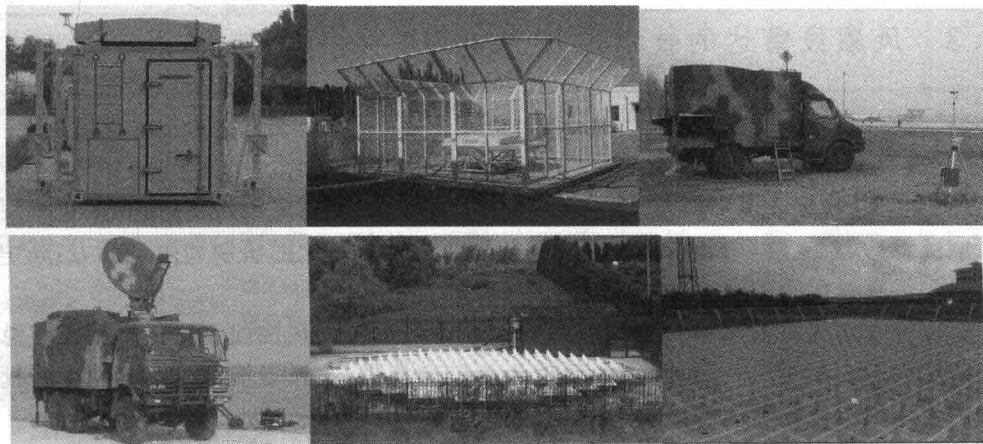


图 1.9 爱尔达研制的风廓线雷达部分图片(何晓晶提供)

北京敏视达公司竞标成功上海市气象局边界层风廓线雷达系统项目,开始研制固定式边界层风廓线雷达(TWP3),2009年5月完成交付验收。图1.10为敏视达研制的边界层风廓线雷达和低对流层风廓线雷达天线。

南京大桥机器股份有限公司2004年开始研制车载式边界层风廓线雷达,后来又研制了低对流层风廓线雷达,两型雷达均采用抛物面天线和集中式发射,主要差别在于天线大小。边界层风廓线雷达天线口径为1.6 m,而低对流层风廓线雷达天线口径达4 m,运输前必须先折叠,到达阵地实施展开后探测。中电集团成都第784厂于