



高频段大型反射面天线 热变形补偿技术

王从思 王 娜 连培园 许 谦 著



科学出版社

高频段大型反射面天线热变形 补偿技术

王从思 王 娜 连培园 许 谦 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容包含了近年来大型微波反射面天线热变形调控方面的主要进展与研究成果,是关于高频段、大口径反射面天线变形影响因素与电性能调控方面的专著。本书从结构变形与电性能耦合的角度详细介绍了高频段陆基反射面天线热变形补偿技术体系中的温度传感器布局、温度场重构方法、天线结构热变形描述、电性能评估、馈源副面指向补偿调整、数据库构建与匹配、太阳入射角影响、温度传感器安装、表面温控涂层和温度采集软硬件系统等,通过多个实验天线和工程天线说明了热补偿技术的应用过程与效果。

本书可作为高等院校机械工程专业高年级本科生和研究生的学习资料,同时对从事相关科技研究的人员也有一定的参考价值,还可以作为天线结构设计和性能维护人员的工具书。

图书在版编目(CIP)数据

高频段大型反射面天线热变形补偿技术/王从思等著. —北京: 科学出版社, 2018. 9

ISBN 978-7-03-058262-1

I. ①高… II. ①王… III. ①反射面天线—热变形—补偿 IV. ①TN820.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 156339 号

责任编辑: 李 萍 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

河北鹏润印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 9 月第一次印刷 印张: 17

字数: 343 000

定价: 120.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

大口径反射面天线因其结构简单,具有高增益、窄波束的优点,被广泛应用于深空探测、射电天文、载人航天、通信导航等领域,是目前最常用的一类微波天线。随着深空探测和射电天文基础科学研究的深入,人们对反射面天线的性能要求更加苛刻,增大物理口径和提升工作频段是目前最有效的途径之一,而太阳照射引起的反射面变形会导致天线性能下降和波束指向偏转。当合理的天线设计和一定的温度控制措施不能满足性能要求时,需采用补偿技术来提升天线性能。

反射面天线因重力恒定不变,可以通过面板预调技术或结构补偿手段使天线保持高精度。日照热载荷作为陆基天线重要载荷之一,由于材料热胀冷缩的固有特性,其与重力及风荷的影响机制不同,无法通过结构刚度设计减弱对天线探测性能的影响。成本高昂且难以控制管理的天线罩和背架包裹隔离板都难以适用高频段和超大口径反射面天线,而传统的以反射面精度为目标的补偿调整策略则无法保障天线各项电性能得到改善,因此,开展微波反射面天线温度分布与探测效能的耦合建模、信息重构与性能补偿,是一个非常具有挑战性和强烈工程背景的应用基础课题。随着反射面天线工作频段、口径、指向精度等指标的提高,日照温度导致的结构热变形已成为制约天线探测性能提升的瓶颈,亟需针对日照环境特点研究影响机理和热变形补偿技术。

本书介绍了变形位移形面描述与天线机构移动调整等方面涉及的理论建模、优化布局、软件仿真、实验测试、应用效果,以说明十五年来微波反射面天线性能保障方面的主要进展与研究成果,希望成为一本集先进性和实用性于一体的微波天线工程应用工具书。书中详细给出了面板和背架温度传感器布局原则,比较了多种温度插值算法,确定了反射面天线温度场重构方法,提出了温度快速预估技术,构造了从结构网格到电磁网格的转换途径,说明了热变形反射面的拟合方法与性能近似原理,建立了反射面天线热变形的馈源副面主面调整系列方法,探讨了数据库匹配、温控涂层、传感器安装的技术要点,同时介绍了温度采集的软硬件系统架构与技术,为实际工程中天线环境因素模拟、传感器布局与电性能补偿提供了理论基础与技术方案,使反射面天线看得更清、更远、更准。

本书是在作者多年研究反射面天线热变形补偿技术的工作基础上整理、补充而成的。在该方向长期的研究工作中,团队中段宝岩院士,朱敏波、陈光达、黄进等老师,课题参与学生李江江、李辉、刘鑫、杨崇金、邓昌炽、郑富文、马维超、范培佩、郝尊瑞、孟文辉、肖岚、王浩、王守菲、雷震等从不同方面为本书成稿做出

了巨大贡献，同时，本书也得到了中国电子科技集团公司第三十九研究所周生怀、沈泉、毛佩锋、段玉虎、庞毅、蒋力、李红卫、雷志刚、张萍等，中国电子科技集团公司第五十四研究所郑元鹏、杜彪等，中国科学院新疆天文台项斌斌、刘志勇、陈卯蒸、聂俊、李锐等，中国科学院上海天文台刘庆会、沈志强等，美国加利福尼亚大学洛杉矶分校 Yahya Rahmat-Samii 教授，西安电子科技大学保宏、王伟、李鹏、宋立伟、李素兰、张洁等专家与老师的支持与帮助，在此一并表示深切的谢意！

在本书撰写过程中，作者实验室的全体博士和硕士研究生在书稿整理、图表绘制、程序编制、数据收集等方面都给予了大力的帮助，在此表示感谢。

由于作者的水平和能力有限，书中难免存在不足之处，真诚希望广大读者批评指正。

作 者

2018 年 6 月

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 反射面天线发展历史	2
1.3 国内外主要大型天线	4
1.3.1 国外主要反射面天线	5
1.3.2 我国主要反射面天线	8
1.3.3 国际主要面天线阵列	11
1.4 采用温控措施的典型天线	13
1.5 反射面天线热效应研究现状	15
1.6 反射面天线性能补偿方法	16
1.6.1 机械补偿方法	17
1.6.2 电子补偿方法	18
1.6.3 补偿方法对比	20
1.7 本书内容安排	20
第 2 章 热变形补偿方案与温度传感器布局	23
2.1 热变形补偿技术方案	23
2.2 温度传感器布局设计	24
2.2.1 面板传感器布局方案	26
2.2.2 背架传感器布局方案	31
2.2.3 布局方案验证	36
2.3 天线日照温度场特性分析	42
2.3.1 日照温度场影响因素	42
2.3.2 日照温度场特性分析	43
2.4 天线日照温度仿真与分析	45
2.4.1 实验天线模型	45
2.4.2 日照温度仿真边界条件	47
2.4.3 温度仿真与实验结果	51
第 3 章 反射面天线温度场计算及插值重构	62
3.1 热分析方法与软件	62

3.1.1	传热学理论	62
3.1.2	热分析软件	64
3.2	工程天线温度场计算过程	66
3.2.1	天线结构分析模型	66
3.2.2	天线热分析模型	69
3.2.3	热分析边界条件	71
3.2.4	温度场计算结果	74
3.3	反射面天线温度插值方法	77
3.3.1	插值基本原理	77
3.3.2	多项式插值方法	79
3.3.3	Kriging 插值方法	80
3.3.4	距离反比加权插值方法	80
3.3.5	Barnes 客观分析插值方法	81
3.4	插值方法特点与应用比较	82
3.5	基于插值的温度场重构应用与验证	84
3.5.1	重构验证方案与流程	84
3.5.2	线性温度场重构验证	85
3.5.3	实测温度场重构验证	87
3.6	基于测量和仿真数据的温度场预估	89
3.6.1	太阳照射工况	89
3.6.2	温度分布规律	90
3.6.3	温度预估流程	91
3.6.4	实验天线应用	93
第 4 章	反射面天线热变形描述与电性能计算	100
4.1	结构位移场获取方法	100
4.2	热变形软件计算命令	100
4.3	结构热变形快速算法	101
4.3.1	快速矩阵算法	101
4.3.2	热变形基向量矩阵	103
4.3.3	快速算法验证	103
4.4	变形反射面拟合方法	106
4.4.1	抛物面拟合方法	106
4.4.2	赋形面拟合方法	108
4.5	面板和背架温度对面形精度的影响	110
4.6	结构网格与电磁网格的位移信息传递	115

4.6.1	三角形网格高斯积分点选取	115
4.6.2	三角形网格二次曲面方程构造	117
4.6.3	三角形网格节点法矢量构造	119
4.6.4	结构网格细化生成电磁网格	120
4.6.5	工程案例应用与分析	121
4.7	反射面天线热变形对波束指向的影响	126
4.7.1	主反射面变形	126
4.7.2	馈源横向移动	127
4.7.3	副反射面移动	127
4.7.4	副反射面转动	128
4.8	变形天线电性能计算方法与应用验证	129
4.8.1	小变形反射面天线	129
4.8.2	大变形反射面天线	129
4.8.3	指数误差项分段线性逼近	130
4.8.4	电性能近似计算方法	134
4.8.5	电性能近似计算流程	137
4.8.6	小变形天线应用案例	138
4.8.7	大变形天线应用案例	140
第 5 章	热变形天线馈源位置和指向调整量计算	143
5.1	基于变形方向图的天线馈源调整量计算方法	143
5.1.1	最佳吻合与馈源三个位置	143
5.1.2	调整量反推模型及求解	144
5.1.3	工程案例应用与分析	146
5.2	基于馈源位姿误差的馈源调整量计算方法	150
5.2.1	馈源位置误差和指向误差	150
5.2.2	调整量反推模型及求解	151
5.2.3	工程案例应用与分析	153
5.3	馈源调整方法应用结论	159
5.4	天线伺服系统方位俯仰调整量计算方法	160
5.4.1	指向调整量计算方法	160
5.4.2	工程案例应用与分析	163
第 6 章	反射面天线热变形补偿数据库匹配调用	167
6.1	数据相似性描述方法	167
6.1.1	最小二乘法	167
6.1.2	特征匹配法	168

6.1.3	模式匹配法	168
6.2	补偿数据库三重匹配调用方法	169
6.2.1	温度数据均方根误差匹配	171
6.2.2	温度数据相似性区域匹配	171
6.2.3	温度数据关键性区域匹配	172
6.3	工程案例应用	173
6.3.1	天线结构与传感器布局	173
6.3.2	温度数据匹配计算过程	175
6.3.3	电性能校核	177
第 7 章	基于太阳入射角的天线热变形与电性能分析	179
7.1	面向大型天线的太阳入射角	181
7.1.1	太阳入射角定义	181
7.1.2	计算方法	181
7.1.3	应用案例	183
7.2	基于太阳入射角的机电热耦合分析方法	185
7.2.1	热分析软件概述	185
7.2.2	机电热耦合分析流程	186
7.2.3	天线结构模型与性能仿真	187
7.2.4	异构软件接口与数据传递	187
7.3	基于太阳入射角的天线温度场分析	188
7.3.1	反射面天线热辐射分析	188
7.3.2	热辐射分析结果与结论	191
7.4	基于太阳入射角的结构热变形分析	193
7.4.1	天线结构热变形模型	193
7.4.2	变形分析结果与结论	194
7.5	基于太阳入射角的天线电性能分析	196
7.5.1	面天线电磁建模	196
7.5.2	电性能分析结果与结论	197
7.6	面向大型天线的太阳辐射影响耦合分析软件	199
7.6.1	软件总体设计	199
7.6.2	软件开发环境	200
7.6.3	软件工作流程	200
7.6.4	软件界面设计	202
7.6.5	工程案例应用	203
第 8 章	温度传感器安装方式与误差校准	208
8.1	温度传感器安装方式实验	208

8.1.1	实验器材选用	209
8.1.2	实验条件确定	211
8.2	传感器探头安装方式影响分析	211
8.2.1	探头三重胶装贴合影响	212
8.2.2	贴合位置导热材料填充影响	215
8.3	阴阳面区域传感器安装影响分析	217
8.3.1	实验环境模拟	217
8.3.2	实验数据分析	217
8.4	温度传感器误差分析与校准方法	221
8.4.1	主要误差来源	221
8.4.2	误差修正策略	222
8.4.3	传感器校准方法	222
8.5	采集误差对天线变形和电性能的影响	224
第 9 章	天线反射面表面温控涂层影响分析	228
9.1	反射面天线温度控制方式	228
9.1.1	天线罩	229
9.1.2	背架包裹	230
9.1.3	温控涂层	232
9.2	表面温控涂层影响分析	233
9.2.1	桁架结构实验模型	233
9.2.2	实验工况介绍	235
9.2.3	实验数据分析	236
第 10 章	温度采集硬件系统与软件平台	239
10.1	温度采集硬件系统	239
10.1.1	系统整体架构	239
10.1.2	硬件系统选型	240
10.1.3	硬件安装连接	242
10.2	温度采集与热补偿软件平台	244
10.2.1	温度测量平台概述	245
10.2.2	软件平台关键技术	245
10.2.3	测温软件开发流程	246
10.2.4	软件平台界面设计	247
10.2.5	热补偿调整量计算流程	251
	参考文献	254

第1章 绪 论

1.1 引 言

从 20 世纪中期开始, 由于大型反射面天线可以很容易实现大口径、窄波束、高分辨率和高灵敏度, 反射面天线获得迅速发展, 数量快速增长, 并在各领域广泛应用^[1]。陆基、海基、星载等不同领域的反射面天线都在各自领域起着关键性的作用, 为天文观测、深空探测、卫星通信和军事国防等领域做出了贡献^[2]。进入 21 世纪后, 人们对深空探测领域的求知欲越加强烈, 各国通过对月球、火星等星体以及遥远区域的观测, 逐步揭开宇宙演变和生命进化的奥秘^[3,4]。但随着探测距离的增加, 反射面天线口径也随之越来越大, 同时, 工作频段不断提高, 且天线结构也越来越复杂, 天线设计、制造、运行维护的难度逐步变大^[5]。

我国近年来开展了载人航天、火星萤火计划和嫦娥探月等工程项目, 其核心在于如何有效地实现超远距离数据测控通信, 而大口径反射面天线正是其中的关键技术之一, 天线性能的优劣直接决定了测控通信的准确性和实时性。由于大型反射面天线在露天野外条件下工作, 环境较为恶劣, 除了重力自身作用会影响天线的使用性能, 在风、雨、雪以及温度等外界因素的作用下也会发生不同程度的结构变形, 进而导致天线的探测性能受到影响^[6-8]。对大型反射面天线而言, 自身重力变形是令其使用性能变差的主要因素, 这可通过结构保型设计和重力预调等方式进行调试, 最大限度降低重力变形对天线电性能的影响^[9-11]。在反射面天线运行过程中, 日照热载荷作为陆基天线重要载荷之一, 由于材料热胀冷缩的固有特性, 其与重力及风荷的影响机制不同, 无法通过结构刚度设计减弱对天线探测性能的影响^[12,13]。当合理的天线设计和一定的温控措施还不能满足性能要求时, 需采用补偿技术来提升天线性能。随着反射面天线工作频段、口径、指向精度等指标的提高, 日照温度导致的结构热变形已成为制约天线探测性能提升的瓶颈^[14,15], 亟需针对日照环境特点研究影响机理及热变形补偿技术。

因此, 本书针对高频段、大口径反射面天线变形影响因素与电性能演变机理, 从结构变形与电性能耦合的角度开展高频段陆基反射面天线热变形补偿技术体系研究, 通过温度传感器布局、温度场重构、电性能评估、馈源副面指向调整等, 实现对复杂热环境下天线探测性能的实时补偿。这些可为实际工程中天线环境因素模拟、传感器布局与电性能补偿提供理论方案与关键技术指导, 使反射面天线看得更清、更远、更准。

1.2 反射面天线发展历史

在 1937 年, 格罗特·雷伯 (Grote Reber) 在他家的后院建造了世界上第一台

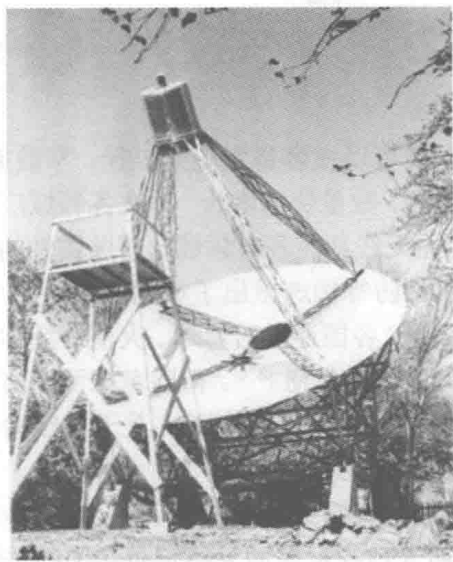


图 1.1 世界上第一台抛物面天线

抛物面无线电天线, 直径为 9.57m(图 1.1)。他第一次系统调查了从天空传来的无线电波, 并在 1940 年发表了首幅银河系的无线电辐射地图^[16], 这开启了射电天文学领域的研究, 同时也让反射面天线走进了人们的视野, 获得了越来越多的关注。

反射面天线作为常用的天线形式, 属于“孔径天线”的一种, 主要利用面板对电磁波的辐射效应来形成特定辐射方向图。由于反射面天线具有高增益、低噪声辐射、高可靠性以及增强的数据传输能力等特点, 且设计较简单、成本不高、馈电不复杂, 使它在射电天文、雷达、通信、遥测等领域得到了广泛应用。

反射面天线结构大体包括反射面主、副面结构, 背架等支撑结构, 以及馈源、方位俯仰架、转台等伺服系统。反射面天线常见的分类方法有以下几种^[17]: 按结构形式, 可分为正馈天线和偏馈天线; 按馈源数量, 可分为单馈源反射面天线、多馈源反射面天线以及阵列馈源反射面天线; 按曲面类型, 可分为卡塞格伦天线、格里高利天线、双弯曲反射面天线、抛物柱面天线以及双抛物面天线等。简单来说, 反射面天线的工作原理就是在接收状态时, 反射面接收到来自目标的电磁波, 并经反射面的反射将电磁波汇聚到馈源处, 再经过信号转换处理传到后端分析处理^[18]。若是发射状态, 则正好是与之相反的过程。

在早期, 天线的工作频段大多在短波或超短波, 天线发射或接收的电磁波波长很大, 天线口径不大, 应用领域并没有这么广阔。随着科学技术的发展, 天线技术不断进步, 不管是民用、商用还是军事应用, 反射面天线都在朝着大口径、高频段的趋势发展, 如应用于天文观测或卫星通信等方面的陆基大反射面天线。各大强国由于研究时间长, 技术领先, 建造了许多台大型反射面天线设备。世界上发展、建设大型反射面天线的国家主要为美国、俄罗斯、意大利、德国和英国等, 澳大利亚和日本等国也直接参与设计建造或间接投资^[19]。近年来, 许多发展中国家也投入了大量资金物力人力, 建造了一大批反射面天线, 逐步缩小了与发达国家的差距。世界上大型反射面天线的发展历史归纳如图 1.2 所示, 从 1937 年第一台反射面天

线发展至今,反射面天线已经发展了数十年的时间,而我国在这方面起步较晚,从20世纪80年代才开始。但近年来国家大力支持,经过众多相关专家和研究人员的不懈努力,我国在这一方面已经取得了长足的进步,反射面天线的设计及建造水平也得到了极大的提升。



图 1.2 大型反射面天线的发展历史

在近几十年的发展中,我国拥有了一批高性能的大型反射面天线,建立起了中国的甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 网 [20], 同时将深空探测站延伸到国外,如阿根廷萨帕拉 35m 深空站。目前,我国在上海建立的 65m 反射面天线、在新疆喀什修建的 35m 反射面天线以及在黑龙江佳木斯建立的 66m 反射面天线先后开始投入使用,在我国新疆喀什、黑龙江佳木斯以及在阿根廷萨帕拉建立的这三个深空站将构成我国三站联网的深空探测网,可以实现对深空航天器 90% 的测控通信空域覆盖,是我国将来的探月三期、载人登月、火星探测和其他深空探测任务取得成功的重要保障之一 [21,22]。达到世界领先水平的 FAST 500m 口径射电望远镜 [23] 和未来世界最大全可动的新疆 110m 口径射电望远镜 [24] 等更将会大力加速我国的深空探测与射电天文等方面的发展。

如今一些大型天线,如 GBT、LMT、SRT 等 [25-28], 其主面板是通过作动器来与背架连接的,这样可以通过作动器使天线表面能够进行实时调整,从而在很大程度上减少温度、重力等外界因素带来的表面变形影响,甚至副面也可以通过作动器来补偿天线受到外界因素影响所产生的副面变形、位置移动和方位偏转,以在一定程度上对天线电性能进行补偿。德国 Effelsberg 100m 天线应用变形副反射面和变形内史密斯镜 (Nasmyth mirror) 来进一步减小天线热变形所带来的影响 [29,30]。美国 GBT 100 ~ 110m 天线应用失焦全息术 (out-of-focus holography) 来对天线的热变形进行实时测量 [31,32], 而像西班牙 IRAM 30m 天线则通过一定数量的温度传感器,对天线温度场进行测量,再应用有限元来对天线的变形情况进行预测,进而提供必要的补偿信息 [33]。在这方面,相关技术的研究大多数一直由国外学者掌握着,而国内起步较晚且正在加紧研究中。其中,本书作者团队在大型反射面天线

机电耦合理论与工程应用方面进行了多年深入研究，已基本掌握了大型反射面天线热变形补偿的系列关键技术。

1.3 国内外主要大型天线

过去，地面大型反射面天线（简称为“大型天线”）通常指 10m 或 10m 以上的口径。随着现代科技的迅猛发展，天线设计制造和馈电技术大大升级，天线的大、中、小型应重新定义，本书将口径 10m 以下归为小型，10 ~ 30m 归为中型，30 ~ 100m 归为大型，大于 100m 归为超大型。目前，国内外已建成二十多部射电望远镜，形式繁多，有固定式单口径球面射电望远镜、非全可动标准抛物面射电望远镜、全可动赋形射电望远镜和射电望远镜阵列等。

反射面天线按照反射面数量主要分为单反射面天线和双反射面天线，按照反射面是否可调整又分为主动主反射面天线和非主动主反射面天线。国际上目前已经建成的大口径反射面天线相当多，表 1.1 给出了国内外典型射电望远镜天线的主要性能参数^[34~40]。本书将按天线落成工作时间的顺序，对国内外的主要大型反射面天线及大型天线阵的基本信息和技术参数进行简要的介绍。

表 1.1 国内外典型射电望远镜天线

名称	口径/m	总质量/t	频率/GHz	表面精度/mm	指向精度/($''$)	工作年份	备注
Jodrell Bank	76	3200	0.408 ~ 6	1	—	1957	英国
Parkes	64	1000	0.3 ~ 230	0.8	—	1961	澳大利亚
Arecibo	305	馈源舱 900	1 ~ 10	2	—	1963	美国、波多黎各
Effelsberg	100	3200	0.395 ~ 95	1	10	1972	德国；副面可调
Nobeyama	45	700	20 ~ 230	0.1	—	1982	日本
IRAM	30	—	—	0.055	1	1984	西班牙
GBT	100~110	7856	0.1 ~ 116	0.24	1.5	2000	美国
LMT	50	800	75 ~ 350	0.075	1.08	2008	美国、墨西哥
SRT	64	3000	0.3 ~ 115	0.15	5	2012	意大利
HUSIR	37	340	85 ~ 230	0.1	3.6	2013	美国；副面可调
CCAT	25	—	—	0.010	2	预计 2020	美国、智利
Sheshan	25	—	1.6 ~ 23	0.52	—	1987	中国上海佘山
Delingha	13.7	—	85 ~ 115	0.07	—	1990	中国青海德令哈
Nanshan	25	—	0.3 ~ 23	0.4	15	1994	中国新疆南山
Miyun	50	680	0.23 ~ 8.4	1	19	2006	中国北京密云
Kunming	40	360	2.3 ~ 8.4	1.2	30	2006	中国昆明凤凰山
Tianma	65	2640	1.25 ~ 46	0.3	3	2012	中国上海佘山
FAST	500	馈源舱 30	0.07 ~ 3	1 ~ 2	4	2016	中国贵州平塘
QTT	110	6000	0.15 ~ 115	0.2	2.5	预计 2025	中国新疆奇台

1.3.1 国外主要反射面天线

1957 年, 英国 Jodrell Bank 天文台 Lovell 射电望远镜天线建成^[41], 建设历时两年, 其主抛物面直径为 76m, 是第一台真正的大型可动反射面天线 (图 1.3)。在建成当年, 它以成功探测到苏联发射的人类第一颗人造卫星“伴侣号”(Sputnik) 而闻名^[42,43]。该天线总质量约 3200t, 其中反射体部分达到 1500 余吨, 主焦点处馈源的中心塔高度仅是天线主反射面直径的 30%。在 60 余年的观测期内, 天线经历了两次主要的修整和技术更新, 包括一次全新的、更准确、更大焦比的面板整体更换, 同时加入了全息摄影测量技术, 使得主面精度低于 1mm, 工作频率为 0.408 ~ 6GHz, 口径效率高达 85%。

1961 年, 位于澳大利亚新南威尔士州帕克斯、隶属于澳大利亚国家射电天文台的帕克斯 (Parkes) 射电望远镜建成^[44], 如图 1.4 所示。该射电望远镜因 1969 年接收到首次月球漫步的电视图像而闻名, 口径为 64m, 是南半球最大的全可动反射面天线, 各单块面板平均精度达到 0.23mm, 主面精度优于 0.8mm, 观测波长最短可达 1.3mm, 工作频率为 0.3 ~ 230GHz。它有 43 层楼高, 总质量为 1000t, 反射体质量为 700t。其巨大的收集面积使其成为发现脉冲星的利器, 据不完全统计, 已发现的 1800 多个脉冲星中约有 1200 个是由该射电望远镜发现的。

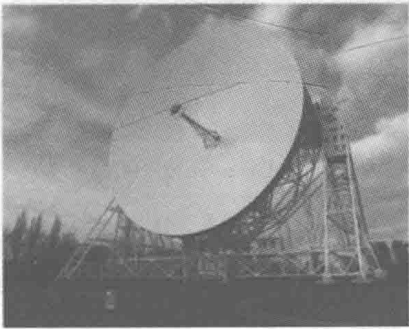


图 1.3 英国 Jodrell Bank 天文台 Lovell
76m 天线



图 1.4 澳大利亚帕克斯 (Parkes) 64m
射电望远镜

1963 年, 波多黎各 Arecibo 天文台的球面射电望远镜建成, 它是基于当地喀斯特地貌的天然洼地建造的, 主反射面直径为 305m, 如图 1.5 所示, 目前应用领域涉及射电天文学、高层大气物理学和雷达天文学等。由于该主面固定在山谷中不可移动, 天线的指向调节由馈源的位置变化和转动来调节, 馈源所在平台的结构十分复杂和庞大, 由三座支撑塔通过钢索悬吊在天线主面上方, 质量约有 900t。反射面板由 38778 块穿孔铝板组成, 通过钢索网络支撑, 工作频段为 1 ~ 10GHz, 主面精度为 2mm^[45]。

1968 年, 德国 Effelsberg 100m 反射面天线开始建设, 并于 1972 年 8 月建

成启用^[46], 其隶属于马克斯·普朗克射电天文研究所 (Max Planck Institute for Radioastronomy), 由 Krupp 和 MAN 两家公司合作研发, 是第一台利用 Von Hoerner 提出的保型设计思想^[47]建造的大型反射面天线, 在射电望远镜发展历史上占据了重要的地位, 同时也是一段时期内世界最大的全可动射电望远镜。该天线总质量为 3200t, 反射面为格里高利式, 主面俯仰轴距地面 50m, 主面口径为 100m, 副面口径为 6.5m, 焦径比为 0.3, 工作频率最高可达 95GHz, 表面精度约 1mm, 指向精度优于 $10''$, 工作波长为 9mm 时的口径效率为 23%。另外, 天线主面最内层的面板为铝质夹芯板构成, 但经过 10 年运行后, 由于面板的表面层与蜂窝夹芯由于其间的环氧树脂剥落, 直径在 80m 范围内所有面板被换为加筋铝板, 而其最外部的面板更换为布置了 7mm 空洞的加筋铝板。如图 1.6 所示, 该天线建在一个狭窄的深谷中可以使其避开无线电干扰并减少风荷的影响, 其安置在主面边缘的翻边可以减少地面辐射的影响。

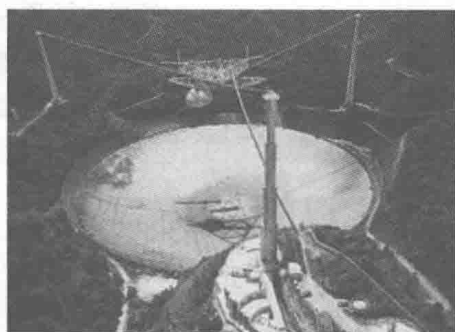


图 1.5 波多黎各 Arecibo 305m 天线



图 1.6 德国 Effelsberg 100m 天线

1980 年, 西班牙国家地理研究所 30m 射电望远镜开始建设, 其属于 IRAM 天线阵列的一部分, 是一个典型的单盘毫米波、亚毫米波抛物面天线, 也是工作在 0.8mm 波段最大的反射面天线, 并在 1984 年 5 月完成了第一次观测。如图 1.7 所示, 它凭借其 30m 的天线口径以及极好的灵敏度可以探测广大的宇宙天体, 如邻近的星系和星际星云等。天线主反射面均方根误差只有 $55\mu\text{m}$, 相当于人头发丝直径的长度, 指向精度约为 $1''$ ^[48-51]。

1988 年 11 月, 美国已建成的格林班克 (Green Bank) 天文台 91.5m 天线倒塌, 此时距德国 Effelsberg 射电望远镜开建已过去 20 年了, 美国天文学家决定也建造一架口径为 100~110m、性能为世界上最好的射电望远镜。1999 年, 美国国家射电天文台 (National Radio Astronomy Observatory, NARO) 在美国西弗吉尼亚州的格林班克建成了目前世界上最大的全可动反射面天线 Green Bank Telescope (GBT)^[52], 如图 1.8 所示, 同时它也是最大的偏置格里高利反射面天线, 以及工作在米波到毫米波段并排在世界首位的单口径射电望远镜。整个天线质量为 7856t, 整体主面精

度为 0.24mm，工作频率为 0.1 ~ 116GHz，工作波长为 3m ~ 2.6mm，指向精度补偿后可达 1.5"。另外，主反射面总体上是由 2004 块铝板拼接而成，由 2209 个作动器驱动，单块反射面精度达 68 μ m。由于 GBT 是偏置设计，馈源舱和副面由一个大型桁架臂来支撑，从而接收的电磁波不会受到自身结构的遮挡 [53]。

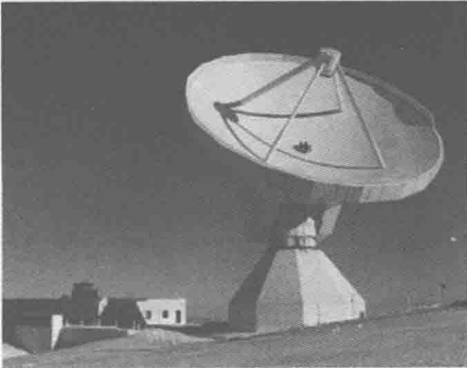


图 1.7 西班牙国家地理研究所 30m 天线



图 1.8 美国国家射电天文台 GBT
100~110m 天线

2008 年，墨西哥 LMT(Large Millimeter Telescope) 建成，在 2011 年使用红移搜索接收机在 3mm 波长上实现了第一次成功观测。它由 MAN 公司设计 [54,55]，隶属于墨西哥天体物理学、光学和电子国家研究所和美国马萨诸塞大学阿姆斯特分校。如图 1.9 所示，该天线建在墨西哥普埃布拉州的一座海拔 4600m 休眠火山，主面口径 50m，副面口径 2.5m，工作频率为 75 ~ 350GHz，其中主反射面采用主动面板，副反射面由三个作动器驱动 [56]。在中央风荷小于 5m/s 条件下，天线的指向精度优于 1"，在风、重力和温度梯度的典型变形影响下，天线表面特性经过校正后表面均方根误差仅为 75 μ m。可见，LMT 是在其工作的频段内当前主面精度指标最高的单口径大型反射面天线 [57]。

意大利国家射电物理研究所管理的 Sardinia Radio Telescope (SRT) 64m 口径天线如图 1.10 所示，其副面口径为 7.9m [58]。在 2001 年，VertexRSI 公司完成天线设计，2003 年与 MAN Technologie (后更名为 MT Mechatronics) 签订了天线架设合同，2012 年完成了测试和验收。它采用格里高利配置，赋形反射面，总质量接近 3000t，工作频率为 0.3 ~ 115GHz，指向精度为 5"。

美国麻省理工学院 MIT 林肯实验室的 Haystack Ultrawideband Satellite Imaging Radar (HUSIR) 是军事成像雷达，也可用于天文观测 [59]，如图 1.11 所示。HUSIR 的前身是 Haystack 37m 天线，建于 1964 年，最初表面精度为 885 μ m，经过多次升级，其等效表面精度达到了 200 μ m，其中最主要的升级就是使用了可变形副面。为了进一步提高天线性能，2010 年开始，对整个俯仰部分进行了更换，2013 年完工，表面精度提高到 0.1mm，指向精度为 3.6"，跟踪精度为 1.8"。HUSIR 能同