

东南土木
青年教师
科研论丛

FAST主动反射面索网 结构设计与施工研究

罗斌 郭正兴 姜鹏 著

Research on Design and Construction of
Cable-net Structure for FAST Active-reflector



东南大学出版社

FAST 主动反射面索网结构与施工技术研究

Research on Design and Construction Technology of
Cable-net Structure for FAST Active-reflector

罗 斌 郭正兴 姜 鹏 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

内容提要

500 m 口径球面射电望远镜(简称 FAST),是世界上最大的单口径射电望远镜,属于国家“十一五”重大科学工程项目。FAST 反射面由索网支承结构(面索、下拉索、周圈钢构)、反射面单元和促动器构成,其最大特点是主动变位,即通过促动器主动控制下拉索在面索网上形成 300 m 口径瞬时抛物面以汇聚电磁波,实现跟踪观测。

作者对索网支承结构展开了系列的工程理论和应用研究,主要内容为:①研究了 30 年天文观测时间内的面索应力循环疲劳次数,并以 500 MPa 应力幅下进行新型耐超高应力幅钢索的设计和试验研究;②基于索网为形控结构,提出了标准球面基准态优化分析方法,优化了拉索和周圈钢构的规格和预应力,并分析了若干关键因素对结构性能的影响,进行了模态分析、风振分析、断索分析、节点分析等;③提出了格构柱、周圈环桁架和索网的施工方法,分别为:悬臂抱杆高空拼装、分节段滑移安装和高空溜索滑移安装,并研究了溜索滑移施工分析和多误差影响分析的方法,确定了施工参数和控制指标;④基于 ANSYS 和 MATLAB 软件,建立了准实时 CAE 辅助控制平台,在望远镜调试、运行和维护时评估索网安全性。

图书在版编目(CIP)数据

FAST 主动反射面索网结构设计与施工技术研究/
罗斌,郭正兴,姜鹏著. —南京:东南大学出版社,2016.12

(东南土木青年教师科研论丛)

ISBN 978-7-5641-6825-4

I. ①F… II. ①罗… ②郭… ③姜… III. ①射电
望远镜-支撑-建筑设计-研究 ②射电望远镜-支撑-建筑
施工-研究 IV. ①TU244.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 268835 号

FAST 主动反射面索网结构设计与施工技术研究

著 者 罗 斌 郭正兴 姜 鹏

责任编辑 丁 丁

编辑邮箱 d. d. 00@163. com

出版发行 东南大学出版社

社 址 南京市四牌楼 2 号 邮编:210096

出 版 人 江建中

网 址 <http://www.seupress.com>

电子邮箱 press@seupress.com

经 销 全国各地新华书店

印 刷 江苏凤凰数码印务有限公司

版 次 2016 年 12 月第 1 版

印 次 2016 年 12 月第 1 次印刷

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 13.25

字 数 331 千

书 号 ISBN 978-7-5641-6825-4

定 价 55.00 元

本社图书若有印装质量问题,请直接与营销部联系。电话(传真):025-83791830

序

作为社会经济发展的支柱性产业,土木工程是我国提升人居环境、改善交通条件、发展公共事业、扩大生产规模、促进商业发展、提升城市竞争力、开发和改造自然的基础性行业。随着社会的发展和科技的进步,基础设施的规模、功能、造型和相应的建筑技术越来越大型化、复杂化和多样化,对土木工程结构设计理论与建造技术提出了新的挑战。尤其经过三十多年的改革开放和创新发展,在土木工程基础理论、设计方法、建造技术及工程应用方面,均取得了卓越成就,特别是进入 21 世纪以来,在高层、大跨、超长、重载等建筑结构方面成绩尤其惊人,国家体育场馆、人民日报社新楼以及京沪高铁、东海大桥、港珠澳桥隧工程等高难度项目的建设更把技术革新推到了科研工作的前沿。未来,土木工程领域中仍将有许多课题和难题出现,需要我们探讨和攻克。

另一方面,环境问题特别是气候变异的影响将越来越受到重视,全球性的人口增长以及城镇化建设要求广泛采用可持续发展理念来实现节能减排。在可持续发展的国际大背景下,“高能耗”“短寿命”的行业性弊病成为国内土木界面临的最严峻的问题,土木工程行业的技术进步已成为建设资源节约型、环境友好型社会的迫切需求。以利用预应力技术来实现节能减排为例,预应力的实现是以使用高强高性能材料为基础的,其中,高强预应力钢筋的强度是建筑用普通钢筋的 3~4 倍以上,而单位能耗只是略有增加;高性能混凝土比普通混凝土的强度高 1 倍以上甚至更多,而单位能耗相差不大;使用预应力技术,则可以节省混凝土和钢材 20%~30%,随着高强钢筋、高强等级混凝土使用比例的增加,碳排放量将相应减少。

东南大学土木工程学科于 1923 年由时任国立东南大学首任工科主任的茅以升先生等人首倡成立。在茅以升、金宝楨、徐百川、梁治明、刘树勋、丁大钧、方福森、胡乾善、唐念慈、鲍恩湛、蒋永生等著名专家学者为代表的历代东大土木人的不懈努力下,土木工程系迅速壮大。如今,东南大学的土木工程学科以土木工程学院为主,交通学院、材料科学与工程学院以及能源与环境学院参与共同建设,目前拥有 4 位院士、6 位国家千人计划特聘专家和 4 位国家青年千人计划入选者、7 位长江学者和国家杰出青年基金获得者、2 位国家级教学名师;科研成果获国家技术发明奖 4 项,国家科技进步奖 20 余项,在教育部学位与研究生教育发展中心主持的 2012 年全国学科评估排名中,土木工程位列全国第三。

近年来,东南大学土木工程学院特别注重青年教师的培养和发展,吸引了一批海外知名大学博士毕业青年才俊的加入,8 人入选教育部新世纪优秀人才,8 人在 35 岁前晋升教授或博导,有 12 位 40 岁以下年轻教师在近 5 年内留学海外 1 年以上。不久的将来,这些青年学

者们将会成为我国土木工程行业的中坚力量。

时逢东南大学土木工程学科创建暨土木工程系(学院)成立 90 周年,东南大学土木工程学院组织出版《东南土木青年教师科研论丛》,将本学院青年教师在工程结构基本理论、新材料、新型结构体系、结构防灾减灾性能、工程管理等方面的最新研究成果及时整理出版。本丛书的出版,得益于东南大学出版社的大力支持,尤其是丁丁编辑的帮助,我们很感谢他们对出版年轻学者学术著作的热心扶持。最后,我们希望本丛书的出版对我国土木工程行业的发展与技术进步起到一定的推动作用,同时,希望丛书的编写者们继续努力,并挑起东大土木未来发展的重担。

东南大学土木工程学院领导让我为本丛书作序,我在《东南土木青年教师科研论丛》中写了上面这些话,算作序。

中国工程院院士: 吕志涛

2011.12.23

前 言

500 m 口径球面射电望远镜(简称 FAST),是世界上最大的单口径射电望远镜,属于国家“十一五”重大科学工程项目。FAST 反射面由索网支承结构(面索、下拉索、周圈钢构)、反射面单元和促动器构成,其最大特点是主动变位,即通过促动器主动控制下拉索在面索网上形成 300 m 口径瞬时抛物面以汇聚电磁波,实现跟踪观测。由于 FAST 项目的世界级地位和对未来深空探索的深远影响,以及该工程的独创性和巨大规模,从项目提出至今的每一步,都受到世人瞩目,成为国人的骄傲。

在国家天文台主导下,有众多科研单位和企业参与到 FAST 项目中,在不同阶段和不同专业方向发挥各自的科技专长,为项目的持续推进和实施做出了贡献。就反射面索网支承结构,哈尔滨工业大学、同济大学和清华大学等都做了许多基础性的科研工作。2011 年 3 月,FAST 项目开始了先期的场地开挖,标志着工程进入实施阶段,但此时拉索的高应力幅疲劳问题成为 FAST 工程的关键技术瓶颈。经行业专家推荐和东南大学郭正兴教授的自荐,东南大学与国家天文台开始正式合作,涉及拉索材料、设计优化、施工和监控等多方面:2011 年,首先开展了“高应力幅耐疲劳 FAST 索网用钢索可行性试验研究”和“FAST 反射面索网支承结构一体化建模及疲劳性能评估”;2012 年,又开展了“FAST 反射面索网支承结构优化和施工技术研究”;2013 年至 2015 年,为索网施工实施提供了技术方案和分析;2014 年年底开始,与国家天文台又陆续开展了“FAST 反射面运行 CAE 辅助平台建设”和“基于力学仿真技术的 FAST 反射面准实时评估系统”等研究,现与国家天文台仍在持续合作中。近日,有幸受基金的资助,我们将近 6 年所做的 FAST 项目研究成果做一整理总结,出版本书。

本书由罗斌、郭正兴和姜鹏著,各章参编人员还有:第 1 章阮杨捷,第 2 章丁磊、张春水,第 3 章丁磊、张晨辉,第 4 章王凯、张春水,第 5 章肖全东、刘琪、谢国瑞、朱峰,第 6 章沈宇洲。

由于 FAST 索网结构工程的独创性和特殊性,6 年来的研究工作艰辛而充满激情。当我们带领研究团队努力及时完成国家天文台和施工企业的各项工作任务,每每受到赞许和鼓励时,更深切感受到:十多年始终如一地对索结构科研和工程的专注和积累,以及在众多大型工程实践中所凝聚的团队和工匠精神,是我们勇于挑战 FAST 工程的信心所在。当研究成果最终应用于工程实施中时,我们倍感欣慰。

在此,特向国家天文台南仁东研究员(FAST 总工程师兼首席科学家)致以敬意,南总丰富的学识,孜孜不倦的工作态度,认真推敲每一个细节的研究精神,朴实的生活态度,令我们十分感动,是我辈的楷模;感谢国家天文台 FAST 工程团队姜鹏研究员等的信任和支持;感

谢哈尔滨工业大学范峰、钱宏亮团队的基础性研究成果；感谢中国建筑科学研究院钱基宏研究员和东南大学仪器科学与工程学院倪江生教授的推荐；感谢同济大学和清华大学等科研单位对索网的早期预研究成果；感谢柳州欧维姆机械股份有限公司和江阴法尔胜缆索有限公司对耐超高应力幅拉索科研的支持；感谢东南大学建筑设计研究院孙逊总工及东南大学预应力团队的支持。在本书的编写和出版过程中，得到东南大学出版社丁丁同志的热心支持和帮助，谨在此深表感谢。

近日，喜闻 FAST 主体工程建设完成，倍感高兴，以此书为一份薄礼献给 FAST 项目。成书较为匆忙，难免有差错和偏颇之处，望读者谅解和指正批评，谢谢。

目 录

1 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 FAST 项目的功能和重要性	2
1.2.1 国际领先的射电望远镜技术	2
1.2.2 FAST 项目的系统构成	3
1.2.3 FAST 项目的重要意义	5
1.3 FAST 主动反射面系统	5
1.3.1 索网支承结构	5
1.3.2 反射面单元	6
1.3.3 促动器	6
1.3.4 防噪墙和挡风墙	6
1.3.5 健康监测系统	6
1.4 FAST 反射面支承结构的研究现状	7
1.4.1 主动反射面支承结构的形式选择	7
1.4.2 下拉索方案	8
1.4.3 面索网的网格形式	9
1.4.4 温度场	10
1.5 工程的重点和难点	10
2 基准球面态和工作抛物面态的找形分析	13
2.1 引言	13
2.2 FAST 主动反射面索网结构的基准球面找形研究	13
2.2.1 FAST 主动反射面索网结构模型分析	13
2.2.2 基于 FAST 特点的基准球面找形方法研究	15
2.3 FAST 主动反射面索网结构的主动工作抛物面变位研究	19
2.3.1 主动工作抛物面变位介绍	19
2.3.2 工作抛物面选取	20
2.3.3 主动工作抛物面变位的程序模块编制	21

2.3.4 主动工作抛物面变位的算例	22
2.4 小结	23
3 反射面索网结构疲劳分析和拉索疲劳试验研究	24
3.1 疲劳分析	24
3.1.1 基于 FAST 特点的疲劳统计方法研究	24
3.1.2 FAST 索网拉索的疲劳次数统计	26
3.1.3 FAST 索网疲劳统计的数据分析	29
3.2 新型钢索设计及超高应力幅疲劳试验研究	34
3.2.1 超高应力幅耐疲劳钢索的总体试验研究方案	35
3.2.2 基材钢丝的疲劳试验研究	36
3.2.3 现有钢绞线的疲劳试验研究	38
3.2.4 前期新型钢索的设计及组装件试验研究	40
3.2.5 后期单根钢绞线疲劳实验研究及钢索的设计	46
3.3 小结	48
4 FAST 反射面索网支承结构性能优化与分析	50
4.1 基于初始基准态的正高斯曲率索网形控结构设计方法	50
4.1.1 技术方案	50
4.1.2 具体实施方式	52
4.1.3 有益效果	54
4.2 FAST 标准球面基准态索网优化分析	55
4.2.1 FAST 拉索和连接节点的类型、规格和参数	55
4.2.2 FAST 索网优化分析模型及参数	57
4.2.3 FAST 工作和荷载条件	58
4.2.4 索网优化方法	59
4.2.5 优化原则和参数	59
4.2.6 FAST 标准球面基准态索网优化分析	60
4.2.7 设计温变 $\pm 25^{\circ}\text{C}$ 条件下抛物面工作态的索网验算	62
4.2.8 若干因素对索网的优化和性能的影响	64
4.3 滑动钢圈桁架优化设计	71
4.3.1 钢圈桁架优化设计条件和原则	71
4.3.2 标准球面基准态的滑动钢圈桁架优化设计	71
4.3.3 面索网工作应力幅	75
4.4 模态分析	77
4.4.1 分析方法	77

4.4.2 分析结果	77
4.5 风振分析	79
4.5.1 结构风振动力分析方法	79
4.5.2 分析参数	79
4.5.3 平均风静力分析	80
4.5.4 风振响应统计	81
4.5.5 设计极限风速	84
4.6 断索分析	86
4.6.1 断索分析方法和分析工况	86
4.6.2 断索分析结果	87
4.6.3 断索分析结论	92
4.7 钢桁架柱和钢圈桁架的节点设计	92
4.7.1 节点概况	92
4.7.2 钢桁架柱的节点	93
4.7.3 钢圈桁架的节点设计	95
4.8 索网连接节点	95
4.8.1 连接节点构造	95
4.8.2 连接节点承载力分析	98
4.9 小结	101
5 FAST 反射面索网结构施工技术	103
5.1 周围钢构的施工方法	103
5.1.1 工程概况	103
5.1.2 施工重点和难点分析	105
5.1.3 周围钢结构总体施工方法	105
5.2 索网的施工技术	107
5.2.1 索网施工特点	107
5.2.2 索网总体施工方案	108
5.3 索网施工理论与分析	117
5.3.1 理论分析概述	117
5.3.2 施工过程分析基本理论与方法	118
5.3.3 串联拉索沿导索空中累积滑移安装过程分析	124
5.4 FAST 反射面索网施工过程分析	131
5.4.1 对称轴处沿导索牵引安装区索网施工过程分析	131
5.4.2 支承塔架安装区塔架设计与施工过程分析	156
5.5 FAST 索网支承结构误差敏感性分析	163

5.5.1 误差类型 163

5.5.2 误差分布模型 164

5.5.3 多个随机误差的分析方法 164

5.5.4 误差效应分析方法 167

5.5.5 误差效应分析条件 167

5.5.6 独立误差效应分析 168

5.5.7 耦合误差效应分析(误差条件 11、12 和 13 的对比分析) 181

5.5.8 本节小结 184

5.6 小结 185

6 基于力学仿真技术的 FAST 反射面索网准实时评估系统 187

6.1 准实时评估系统的意义 187

6.2 准实时评估系统的功能 189

6.3 准实时评估系统的模块构成 190

6.3.1 模型处理模块 191

6.3.2 预运行分析模块 192

6.3.3 准实时跟踪分析模块 193

6.3.4 力学仿真系统介绍 193

6.4 图形用户界面介绍 195

7 结束语 198

参考文献..... 200

1 绪 论

1.1 背景

中国是世界上天文学起步最早、发展最快的国家之一,有大量观测资料,在星象观测中,天文仪器一直发挥着重要的作用。中国古代的天文仪器种类繁多,各个功用也不相同,主要有用来计时的工具、用来观测星象的工具、用来制定历法的工具等几种,具有代表性的有圭表、浑天仪(图 1-1)和简仪等。

千百年来人类只是通过可见光波段(图 1-2)观测宇宙,电磁波(又称电磁辐射)是由同相振荡且互相垂直的电场与磁场在空间中以波的形式移动,其传播方向垂直于电场与磁场构成的平面,能有效地传递能量和动量。电磁辐射可以按照频率分类,从低频率到高频率,包括无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X 射线和 γ 射线等。人眼可接收到的电磁辐射,波长在 380~780 nm 之间,称为可见光。只要是本身温度大于绝对零度的物体,都可以发射电磁辐射,而世界上并不存在温度等于或低于绝对零度的物体。实际天体的辐射覆盖了整个电磁波段。射电望远镜是在无线电波段观测天体,几乎可以全天候、不间断地工作。来自太空天体的无线电信号极其微弱,自 70 多年前射电天文学诞生以来,所有射电望远镜收集的能量还翻不动一页书,因此阅读宇宙边缘的信息需要大口径望远镜^[1]。

为了加快对宇宙探索的进程,提高中国的深空探测能力,积极参与国际竞争,中国天文界于 20 世纪 90 年代提出建造世界最大的单口径射电望远镜,它可以像一只庞大而灵敏的“耳朵”,用来捕捉来自遥远星尘最细微的“声音”,洞察隐藏在宇宙深处的秘密。

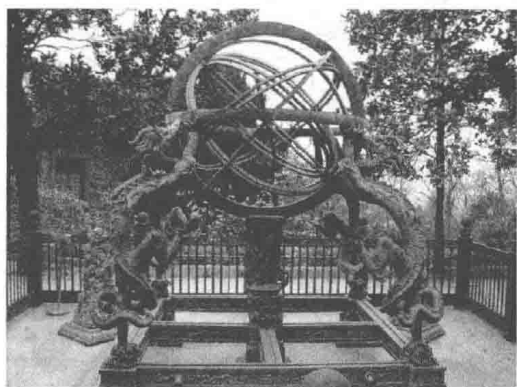


图 1-1 浑天仪

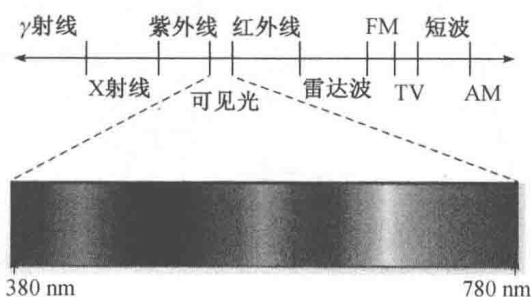


图 1-2 可见光波段

1.2 FAST 项目的功能和重要性

1.2.1 国际领先的射电望远镜技术

500 m 口径球面射电望远镜(简称 FAST)的天线口径为 500 m(图 1-3),采用柔性索网作为反射面支承结构,反射面板直接铺设在球面索网上,每个面索节点通过下拉索与地面促动器连接。该望远镜工作频率在 70 MHz~3 GHz 之间,分辨率可达到 $2.9''$,指向精度可达到 $8''$ 。与号称“地面最大的机器”德国波恩 100 m 望远镜(图 1-4)以及澳洲帕克斯天文台 64 m 望远镜(图 1-5)相比,其灵敏度提高约 10 倍。如果天体在宇宙空间均匀分布,FAST 可观测目标的数目将增加约 30 倍。与美国 Arecibo 300 m 望远镜(图 1-6)相比,Arecibo 的天线本身是固定在地面上的,随着地球的自转、公转,望远镜的中央指向会移动。而 FAST 主反射镜的每一块面板上加入实时主动控制技术,这样在观测的过程中,通过主动变形技术实时地把面板形成有效照明口径 300 m 的旋转抛物面。FAST 的观测灵敏度比 Arecibo 更高,而且 Arecibo 20° 天顶角的工作极限,限制了观测天区,特别是限制了联网观测能力。可以预测 FAST 将在未来 20~30 年保持世界一流设备的地位,并将吸引国内外一流人才和前沿科研课题,成为国际天文学术交流中心^[2]。

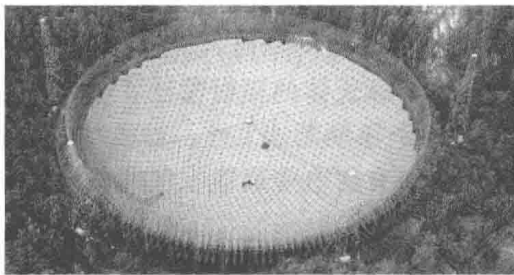


图 1-3 FAST 建成后工程效果图

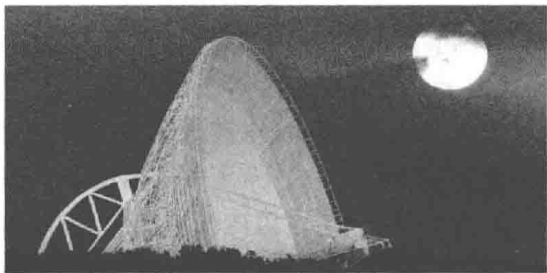


图 1-4 德国波恩 100 m 望远镜

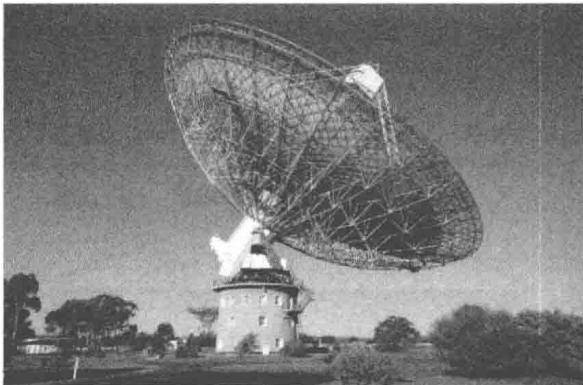


图 1-5 澳洲帕克斯天文台 64 m 望远镜



图 1-6 美国 Arecibo 300 m 望远镜

1.2.2 FAST 项目的系统构成

根据 FAST 独特的工作和工程特点,将它分为了六大系统:台址勘察与开挖系统、主动反射面系统、馈源支承系统、测量与控制系统、馈源与接收机系统、观测基地建设。

(1) 台址勘察与开挖系统:拟对选定区域的地形、工程地质和水文地质环境等进行工程详细勘察,对 FAST 主动反射面整体工程区域土石方进行开挖,以及对洼地排水通道进行设计等。

1994 年,中国科学家提出修建 500 m 单口径球面射电望远镜 FAST 这一想法,因为其口径超大,选址成了国家天文台首要待破解的难题。

1994 年底,北京天文台(现国家天文台)牵头 20 所院校,提出了“喀斯特工程”。准备从中国西南无数个喀斯特地貌的凹坑中,选出一个来建大望远镜。经过认真比对遥感图,确定了约 300 个候选的圆坑,经过走访又筛选出 80 个最圆的。贵州省黔南州平塘县克度镇金科村的一个圆形洼地——大窝凼(图 1-7、图 1-8),成为最有力的竞争者。“凼”,音 dàng,水坑的意思。



图 1-7 工程建设前的大窝凼洼地



图 1-8 平整场地后的大窝凼洼地

最终,FAST 台址选定在贵州省黔南布依族苗族自治州平塘县克度镇金科村的大窝凼洼地,此洼地位于北纬 25.647222° ,东经 106.85583° ,直径大约 800 m,东北距平塘县城约 85 km,西南距罗甸县城约 45 km。总体位于贵州高原向广西丘陵过渡的斜坡地带,地势总体上北高南低,区域内碳酸盐岩广泛分布,岩溶峰丘、洼地、落水洞极为发育,地形起伏不平,低山地形。大窝凼洼地的山梁最高为东南侧山头,标高 1 201 m,洼地的最低点标高 841 m,最大相对高差达 360 m。洼地地表岩溶洼地发育,地形起伏大,坡度较陡,地貌类型简单,局部山体陡峭,形成陡崖和悬壁。这个“大窝凼”是一个圆形天然喀斯特洼地,这样做可以减少土石方开挖量,另外该地段有着优良的排水性、无重大自然灾害记录。水在石灰岩上削出几百米直径的“凼”。凼的底部都会有一个至少浴缸大小的水洼,这是积水向下渗透的地方。天文学家们考虑到,喀斯特地质下,积水可以从坑底渗漏出去,不至于淤积和危害天线。不过 FAST 的天坑里,还是开掘了一条通到“隔壁”坑里的排水道。

在中国有人烟的地区,大窝凼附近算是电波稀少的了。在 FAST 工程附近的另一个凼——钻过几百米的漆黑山洞,突现一座世外桃源。天坑底部种着蔬菜和庄稼,几栋木房子,狗吠鸡鸣之外,万籁无音,令人心旷神怡。这里不通电线,最近一个乡镇在 5 km 外。射电望远镜正需要这么一处静土。附近的农民将为此搬迁。而科学家们希望减少周边人类活动,避

免电波风险。最灵敏的天线相当于最娇弱的耳膜，轻声耳语对它无异于大喊。因此，未来在 FAST 现场工作的科学家控制使用电器。FAST 的监听中心设在两道山以外。FAST 获取的信号通过光纤传输到监听中心，再传送到外界，全程不能用无线装置。

(2) 主动反射面系统:包括一个口径 500 m 由近万根钢索组成的反射面索网、反射面单元、促动器装置、地锚、周围钢结构等。反射面的索网安装在周围环形钢桁架上，它有 2 225 个连接节点，在面索网上安装 4 450 个反射面单元，面索网节点下方连接下拉索和促动器装置，促动器再与地锚连接，形成了完整的主动反射面系统，能够实现实时控制下拉索形成瞬时 300 m 口径抛物面的功能，见图 1-9 和图 1-10 所示。

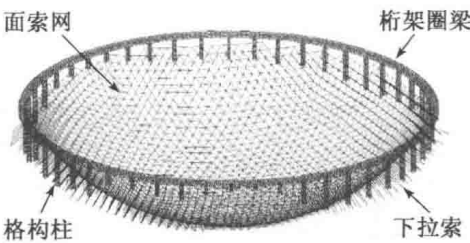


图 1-9 FAST 主动反射面索网支承结构示意图

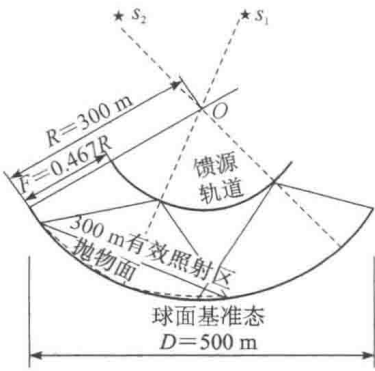


图 1-10 FAST 主动反射面工作原理示意图

(3) 馈源支承系统:在洼地周边山峰上建造 6 个百余米高的支承塔，安装千米尺度的钢索柔性支承体系(图 1-11)及其导索、卷索机构，以实现馈源舱的一级空间位置调整；制造直径 10 m 左右的馈源舱，在馈源舱内安装 Stewart 平台(精调并联机器人)用于二级调整；制造两级调整机构之间的转向机构，辅助调整馈源舱的姿态角。

(4) 测量与控制系统:建设 20 余个毫米级精度基准站组成的测量基准网，利用 10 余台全站仪，对反射面位形实时扫描；利用激光跟踪仪及激光跟踪系统实现对馈源舱实时反馈的控制；建设现场总线系统，调控反射面的主动变形；建设实时检测和健康监测系统。

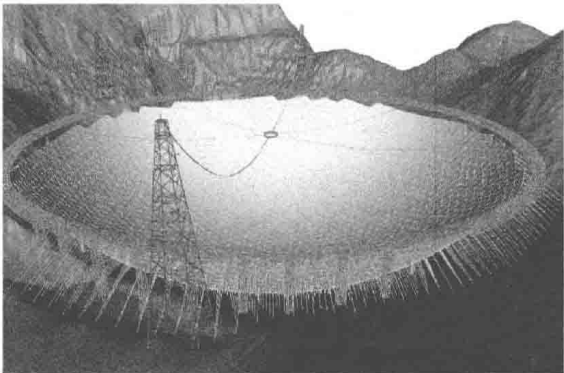


图 1-11 馈源支承系统效果图



图 1-12 馈源支承系统施工首次升舱

(5) 馈源与接收机系统(图 1-12):研制高性能的多波束馈源接收机，频率覆盖 70 MHz~3 GHz。研制馈源、低噪声制冷放大器、宽频带数字中频传输设备、高稳定度的时钟和高精度

的频率标准设备等。配置多用于数字天文终端设备。

(6) 观测基地建设:主要负责观测基地及辅助设施的建设(包括道路施工等),以确保高质量地支持望远镜的运行、观测和维护,并满足 FAST 工作人员的工作与生活需要。根据功能需要,观测基地的建筑计划包括综合楼、维修厂房和分散在基地及反射面周围的零星建筑等。

1.2.3 FAST 项目的重要意义

具有中国自主知识产权的 FAST,是世界上正在建造及计划中的口径最大、最具威力的单天线射电望远镜,其综合体现了我国高技术创新能力。“FAST”工程于 2007 年 7 月 10 日获得国家发改委立项批准,隶属于国家“十一五”重大科学工程项目。它将在基础研究众多领域,例如宇宙大尺度物理学、物质深层次结构和规律等方向提供发现和突破的机遇,也将在日地环境研究、国防建设和国家安全等方面发挥不可替代的作用。其建设将推动众多高科技领域的发展,提高原始创新能力、集成创新能力和引进消化吸收再创新能力。它的建设与运行将促进西部经济的繁荣和社会进步,符合国家区域发展总体战略。

可预测 FAST 将在未来 20 年至 30 年保持世界领先地位。FAST 所提供的机遇将把我国科学家带入射电天文学和深空探测通信的最前沿,使我国跻身世界射电天文强国的行列。同时,其主动反射面支承系统的设计与建造工程本身对于我国土木工程技术,尤其是空间结构技术的发展提供了一个巨大机遇和挑战。

1.3 FAST 主动反射面系统

主动反射面技术是利用计算机控制调节 FAST 球冠反射面在射电源方向形成 300 m 口径的瞬时抛物面,实现天体的自动跟踪观测,它克服了 Arecibo 望远镜(不动球面反射面)经反射的电磁波不能汇聚于一点的缺点,简化了接收机的设计,但也增加了反射面支承结构的设计难度。该系统的组成部分主要有:索网支承结构、反射面单元、促动器、防噪墙、挡风墙和健康监测系统。

1.3.1 索网支承结构

FAST 反射面索网支承结构由索网和周圈钢构构成,是本书的研究对象。

索网由面索网和下拉索构成,不仅支承反射面单元,而且通过促动器控制下拉索使面索网从基准球面变形到工作抛物面,以实现反射面的主动变位。面索网按照短程线型网格(图 1-18(e))划分方式编织成 500 m 口径、300 m 半径的球面,四周连接于周边环形桁架上,每个面索网节点连接下拉索使其作为稳定索和控制索,下拉索下端再与促动器连接,通过控制促动器实现反射面基准态和工作态的变位。

周圈钢构由环桁架圈梁和格构柱构成。环桁架圈梁的内径为 500 m,其内侧下节点与面索网连接,下侧支承在格构柱上。环桁架的一圈等标高,格构柱的高度跟随喀斯特地貌作相应变化。这种支承方案简化了面索边界的连接固定,且易于面索网格的划分;闭合的环桁架具有良好的平面内刚度,且通过改变不同高度格构柱的截面可以使得钢圈梁刚度相对均匀,总体来看结构形式相对简单,受力合理。

1.3.2 反射面单元

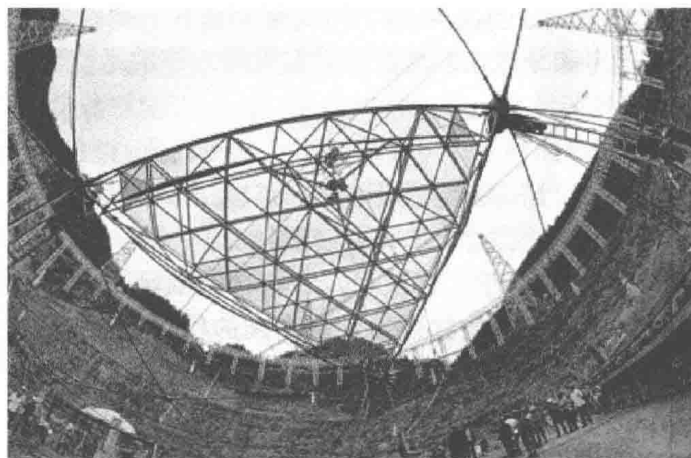


图 1-13 首个反射面单元现场

FAST 项目共需要建造 4 450 个反射无线电波的反射面单元(图 1-13)。每个单元为三角形结构,由背架、连接关节、调整螺栓和面板组成。背架和面板之间设置调整螺栓装置,用于面板单元装配阶段的面形调整。反射面单元为三角形结构,在单元的三个顶点上装有三个连接关节。它们安装在支承索网的节点上,形成位姿约束,并能在索网变形时,实现面板单元与索网之间的自适应滑动。

反射面单元结构由如下三部分组成:背架结构、檩条结构及反射面面板。面板采用厚 1.5 mm 的冲孔铝板,透孔率不小于 50%;背架全铝材料的空间网架结构,与索网节点连接部分采用不锈钢材料作为过渡件,以避免电化学腐蚀问题。

1.3.3 促动器

促动器是 FAST 反射面调整装置,由驱动装置(电动机减速组件)和执行机构(直线位移作动器)、信号装置(限位开关)等组成。促动器的下端铰接在地面支承装置上,上端通过下拉索铰接在面索网的下方。在主控系统控制下,促动器输出伸出或收缩动作并作用在面索网上,待面索网达到要求的形状位置时,促动器停止输出伸出或收缩动作,并由其内部的自锁机构固定输出位置,从而固定索网位置。

1.3.4 防噪墙和挡风墙

防噪墙位于圈梁结构上方,采用不锈钢钢丝网制成。支承结构采用两向正交正放桁架型网架,每隔一定距离设置一道平面外三角形钢支承。于支承结构上布设一定间距的横向檩条以铺设钢丝网,钢丝网边框采用镀锌角钢。

反射面四周设置挡风墙,挡风墙顶端与圈梁上表面平齐。随着山体地势的变化,挡风墙高度也相应改变。挡风墙体由彩钢板构成,其支承结构采用格构式桁架结构,每隔一定距离设置一道面外钢支承。于桁架结构上沿横向布设一定间距的檩条,彩钢板通过铆钉铆固于檩条结构上。

1.3.5 健康监测系统

FAST 反射面支承结构健康监测系统用于对 FAST 反射面上万个零部件的状态、安全和健康等进行监测,它包括传感器及数据采集子系统、结构分析及故障诊断系统、结构安全评定和时效性能诊断子系统、数据管理子系统和系统集成平台子系统等。