第57卷 第6期 天 文 学 报 Vol.57 No.6
2016年11月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Nov., 2016

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2016.06.001

FAST工程建设进展*

南仁东[1,2] 张海燕[1,2†] 张 莹[1] 杨 丽[1] 蔡文静[1] 刘 娜[1]
谢嘉彤[1] 张蜀新[1]

(1 中国科学院国家天文台 北京 100012)
(2 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210008)

摘要 “十一五”国家重大科技基础设施建设项目—500 m口径球面射电望远镜(FAST)工程, 是利用贵州天然喀斯特洼地作为望远镜台址, 建造世界第一大单口径射电望远镜—500 m口径主动反射球面射电望远镜, 以实现大天区面积、高精度的天文观测. FAST工程由中国科学院和贵州省人民政府联合共建, 于2016年9月25日竣工.

关键词 **射电天文**, **射电望远镜**, FAST工程
中图分类号: P111; **文献标识码**: A

1 引言

1993年, 国际无线电科联(URSI)京都大会上, 包括中国在内的10国射电天文学家联合发起了新一代射电“大望远镜”(Large Telescope, 简称LT)的倡议, 1999年易名为平方公里阵列(Square Kilometer Array, 简称SKA, 网址https://www.skatelescope.org/), 即接收面积为1 km^2的巨型射电望远镜, 它的灵敏度将比目前世界上最大的射电望远镜高2个数量级[1]. 这个将由多国合作建设的望远镜阵列, 总投资约10亿美元, 计划建设10 yr, 期望能在2020年后建成, 至少运行50 yr, 因此又被称为“21世纪的国际射电望远镜”.

1995年底, 以北京天文台(现国家天文台)为主, 联合国内20余家大学和研究所成立了LT中国推进委员会, 提出了利用中国贵州喀斯特(KARST)洼地, 建造球反射面即Arecibo型天线阵的KARST工程概念[2]. 此天线阵由30余面口径约300 m的球面天线组成, 它将分布于方圆数百公里的范围内, 具有1′至100 μas的多级分辨率, 将从本质上改善展源的射电天文成像能力. 中国科学家为进一步推进KARST概念, 提出独立研制一台新型的KARST单元—500 m口径主动球反射面望远镜, 即FAST[3−4].

2016-06-21收到原稿, 2016-10-13收到修改稿
*国家发展和改革委员会项目(发改高技[2007]1538号)资助
†hyzhang@nao.cas.cn

2 工程简介

2.1 FAST科学目标

FAST具有极其重大的科学意义. 它以接收面积为突破方向, 可观测的天体数目将大幅度增加, 可为科学家提供更多、更好的观测统计样本, 更可靠地检验现代物理学、天文学的理论和模型; 它将搜寻到更多的奇异天体, 其中蕴涵着大量新发现的机会. 它的研究涵盖广泛的天文学内容, 从宇宙初始混浊、暗物质暗能量与大尺度结构、星系与银河系的演化、恒星类天体, 到太阳系行星与邻近空间事件等的观测研究. FAST拟回答的科学问题不仅是天文的, 也是面对人类与自然的, 它潜在的科学产出也许我们今天还难以预测. FAST主要的科学目标包括: (1)巡视宇宙中的中性氢, 研究宇宙大尺度物理学, 以探索宇宙起源和演化; (2)观测脉冲星, 研究极端状态下的物质结构与物理规律; (3)主导国际低频甚长基线干涉测量网, 获得天体超精细结构; (4)探测星际分子; (5)搜索可能的星际通讯信号.

FAST在国家重大需求方面也有重要应用价值. 它可将我国空间测控能力由月球延伸至太阳系外缘, 将深空通讯数据下行速率提高几十倍. 脉冲星到达时间测量精度由目前的120 ns提高至30 ns, 成为国际上最精确的脉冲星计时阵, 为自主导航这一前瞻性研究制作脉冲星钟; 进行高分辨率微波巡视, 以1 Hz的分辨率诊断识别微弱的空间讯号. FAST可作为国家重大科学工程“东半球空间环境地基综合检测子午链(子午工程)”的非相干散射雷达接收系统, 提高分辨率和观测效率; 跟踪探测日冕物质抛射事件, 服务于空间天气预报[5].

2.2 FAST创新与突破

FAST与国际上已有的巨型单口径射电望远镜相比, 有3项主要特色: 利用贵州省境内喀斯特地貌中的天然洼坑作为台址(见图1); 洼坑内铺设数千块单元, 构成500 m球冠状主动反射面, 球冠反射面在射电源方向形成300 m口径瞬时抛物面, 使望远镜接收机能与传统抛物面天线一样处在焦点上; 采用轻型索拖动机构和并联机器人, 实现接收机的高精度定位.

携全新设计思路加得天独厚的台址优势, FAST突破了射电望远镜的百米极限, 开创了建造巨型射电望远镜的新模式. 它将拥有30个足球场大的接收面积, 成为国际上最大的单口径望远镜, 在10–20 yr内处于国际领先地位[6].



图 1 贵州省黔南州平塘县“大窝凼”洼地

Fig. 1 The Dawodang depression at Pingtang county, Qiannan state, Guizhou province

2.3 FAST工程建设目标与内容

FAST工程在贵州喀斯特洼地内铺设口径为500 m的球冠形主动反射面, 通过主动控制在观测方向形成300 m口径瞬时抛物面; 采用光机电一体化的索支撑轻型馈源平台, 加之馈源舱内的二次调整装置, 在馈源与反射面之间无刚性连接的情况下, 实现高精度的指向跟踪; 在馈源舱内配置覆盖频率70 MHz–3 GHz的多波段、多波束馈源和接收机系统; 针对科学目标发展不同用途的终端设备; 建造一流的天文观测站.

为实现上述建设目标, 我们需要完成以下6项主要建设内容: (1)台址勘察与开挖: 查清台址工程地质和水文地质条件, 开挖清理洼地, 使其满足望远镜建设的需要. (2)主动反射面: 建设上万根钢索和数千个反射单元组成的球冠型索膜结构, 口径约500 m, 球冠张角110° –120° , 抛物面变形的均方差为5 mm. (3)馈源支撑系统: 建设公里尺度的钢索支撑体系, 在馈源舱内安装并联机器人用于二级调整, 最终调整定位精度为10 mm. (4)测量与控制: 建设洼地基准网和基准站、激光全站仪和近景测量系统, 百米距离测量精度2 mm, 采用现场总线技术实现数千点自动控制. (5)接收机与终端: 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、低噪声致冷放大器、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. 配置多用途数字天文终端设备. (6)观测基地建设: 建立望远镜观测室、终端设备室、数据处理中心、各关键技术实验室、办公楼和综合服务体系等.

3 FAST工程建设进展

自2011年3月FAST开工报告批复以后, FAST项目正式进入工程实施阶段, 主体工程介绍如下.

3.1 台址开挖与边坡治理

在前期多年艰苦选址工作基础上, 从300余个候选洼地中选出了位于贵州省黔南苗族布依族自治州平塘县克度镇金科村大窝凼作为FAST台址.

台址勘察与开挖系统完成了地形图测绘、台址勘察、施工图设计、台址开挖及台址监测系统建设等主要工程任务. 2010年3月完成了台址详勘, 随后对台址岩土工程进行了专项勘察. 得到两项勘察报告后, 2011年3月台址开挖工作正式启动, 2012年12月, FAST台址开挖与边坡治理工程通过验收.

3.2 主动反射面系统

主动反射面系统主要由约500 m直径的圈梁, 6670根钢索构成的主索网, 4300块边长约11 m的三角形反射面单元, 2225根下拉索、地锚及促动器构成.

圈梁是FAST索网的支撑结构, 由承台基础、格构柱及环梁构成, 形成直径为500 m的圆周. 2014年9月11日, 圈梁制造和安装工程完工并通过验收(见图2).

FAST索网是世界上跨度最大、精度最高的索网结构, 也是世界上第1个采用变位工作方式的索网体系. 索网结构是FAST主动反射面的主要支撑结构, 是反射面主动变位工作的关键点. 索网制造与安装工程也是500 m口径球面射电望远镜工程的主要技术难点之一. 索网工程于2014年7月17日正式开始, 于2015年2月4日顺利完成合拢.



图 2 “大窝凼”FAST工程施工过程

Fig. 2 FAST construction at the Dawodang depression

FAST圈梁及索网工程获“中国钢结构协会科学技术奖”特等奖, 意味着FAST工程已经在上述关键技术难点方面实现实质性突破, 也为我国相关产业技术水平的提升作出重要贡献.

FAST反射面单元主要由面板单元、背架、调整装置、连接机构等组成, 有187个种类, 考虑到反射面单元为空间结构不能镜像, 实际种类为342种. 2015年8月2日, 第1块拼装检测合格的反射面单元在FAST工程现场成功吊装, FAST工程建设进入最后冲刺阶段, 2016年7月3日最后一片反射面板吊装完成, 标志着FAST工程主体工程的顺利完工(见图3).



图 3　FAST反射面板吊装完成

Fig. 3　Completion of FAST reflector installation

反射面液压促动器在上位控制系统的控制下, 通过液压促动器活塞杆的伸缩实现精确定位、协同运动, 通过调整下拉索下端的位置, 从而间接同步调整索网节点位置, 实时实现满足拟合精度的300 m口径瞬时抛物面, 实现天文观测的跟踪, 换源等运动要求. 2015年7月完成了全部促动器的制造、现场安装和调试工作.

3.3　馈源支撑系统

馈源支撑系统主要由6座百米高的支撑塔、6套公里尺度的柔性钢索体系及驱动装置、1个重约30吨的馈源舱和1座直径约20 m的舱停靠平台构成.

最先进入施工的6基馈源支撑塔是FAST馈源支撑系统的主体承载结构, 是钢索承载和驱动的依托支架, 并为塔顶导向滑轮提供足够刚性的支撑平台, 保证驱动钢索能够牵引馈源舱在预定轨迹上运动. 馈源塔制造与安装工程于2014年3月15日正式开始现场安装工作, 2014年11月30日通过竣工验收.

索驱动作为世界上在建的最大绳牵引并联机构, 是FAST工程的三大自主创新技术之一. 它由驱动机构、导向机构、缆索装置、控制系统、设备基础及其他附属设施组成. 2015年2月10日, FAST望远镜索驱动第1根支撑索安装成功. 2015年11月完成六索驱动机构的安装工作, 进入六索联调阶段.

馈源舱是馈源支撑系统的核心部件, 主要包括星形框架、AB轴机构、Stewart平台、多波束接收机转向装置、舱罩和其他附属设备/设施等. 2014年10月, 馈源舱的代舱开始在大窝凼现场进行安装, 随后配合索驱动的调试试验. 2015年3月, 代舱完成预验收. 代舱作为馈源舱的代替舱, 主要用于FAST的前期调试和试验. 2015年11月21日上午11时, FAST望远镜馈源支撑系统首次升舱成功, 这标志着FAST工程馈源支撑系统正式进入六索带载联调阶段.

3.4 测量与控制系统

测量与控制系统主要包括基础测量、主动反射面测控、馈源位姿测控及望远镜总控4个部分. 要求对FAST进行精确、快速、远距离的非接触测量和对主反射面进行实时控制.

测量基墩是FAST工程测量与控制系统的主体建筑. 通过在大窝凼洼地内建造24个伸出反射面的基墩, 为高精度测量仪器提供稳定可靠的安装平台, 完成对反射面节点位置和馈源舱位姿测量, 为反射面和馈源支撑控制提供测量数据. 该工程于2013年5月开始建造, 2014年10月16日竣工验收.

望远镜总控系统联系、协调和控制各子系统操作, 并监测各部件运行状态, 排除故障, 收集记录运行数据, 以及提供统一的时间标准. 馈源支撑整体控制系统的主要功能有馈源支撑测量数据处理、天文轨迹规划、馈源支撑整体控制和系统校时. 主动反射面控制系统主要目标是根据天文轨迹规划和测量数据, 通过调整促动器的伸长量控制反射面节点位置, 形成位置和面型准确的抛物面. 控制系统接收总控系统发来的天文观测指令及时钟信息, 并综合反射面测量和健康监测系统的数据实现对2225个促动器进行控制. 目前, 各分部工作全部完成, 正在进行系统联调.

3.5 接收机与终端系统

接收机与终端系统包括频率覆盖70 MHz–3 GHz的7套接收机及终端, 时间频率标准、数据传输、处理、存储和接收机监视及诊断系统.

2012年, 完成了中频信号光纤传输系统技术方案, 并开展了射频直接传输方案研究. 2013年, 开展了中频信号传输实验.

在低频宽带接收机方面, 通过与美国加州理工学院电子工程系多次讨论, 初步确定采用Caltech低频宽带接收机用于FAST工程低频宽带接收机建设. 覆盖频率范围为0.27–1.62 GHz. 它是FAST早期科学观测的主要接收机, 将用于中性氢、脉冲星等观测. 2014年6月19日, 国家天文台和美国加州理工学院签订研制合同. 2016年9月, 低频宽带接收机已安装在馈源舱下平台, 正在进行调试和试观测.

3.6 观测基地建设系统

观测基地建设是FAST望远镜建设、运行和维护的基础保障, 主要包括两个部分: 观测基地基本建设和公用及配套设施.

FAST工程台址进场道路全长约7 km, 2010年3月开始施工, 2011年7月全线通车, 完成进场道路一期施工. FAST工程观测基地于2011年完成了1:200地形图测绘, 2012年8月启动设计, 2015年10月顺利开工建设, 2016年9月完成主体建筑施工工程.

4 FAST工程展望

FAST工程于2016年9月25日竣工. 在FAST建设期间, 为给FAST运行作科学上的准备, FAST工程成立了科学部, 培养射电天文人才并进行早期科学目标研究, 以期在FAST建成后能由中国科学家主导取得重大成果[7−9].

具有中国独立自主知识产权的FAST建成后, 其灵敏度、天区覆盖面和测量精度将大大超越世界上已建成的其他射电望远镜, 与美国Arceibo望远镜相比, 综合灵敏度提升10倍, 届时将成为世界上口径最大、最具威力的单口径射电望远镜. FAST涵盖的天文学内容丰富, 从宇宙初始混浊、星系演化、恒星乃至太阳、行星与邻近空间事件等的观测研究, 都有非常强的竞争力, 其中脉冲星探测、中性氢和奇异暗弱天体成像等课题蕴藏着巨大的发现机遇. 作为一个多学科研究平台, 拟回答的问题不仅是天文的, 也是面对人类与自然的. 它还将在日地环境研究、深空探测和国家安全等方面发挥重要作用. FAST工程建设将推动中国众多高科技领域的发展.

参 考 文 献

[1] Schilizzi Richard T. Proceedings of the SPIE, 2004, 5489: 62
[2] 南仁东, 吴盛殷, 马駉, 等. 大射电望远镜(LT)国际合作计划建议书. 北京: 中国科学院北京天文台, 1994
[3] 南仁东, 任革学, 朱文白, 等. 天文学报, 2003, 44: 13
[4] Nan R D. ScChG, 2006, 49: 129
[5] 严俊, 南仁东, 王宜, 等. 500米口径球面射电望远镜(FAST)项目建议书. 北京: 中国科学院国家天文台, 2006
[6] Nan R D, Li D, Jin C J, et al. IJMPD, 2011, 20: 989
[7] 吴忠祖, Haynes M P, Giovanelli R, 等. 天文学报, 2015, 56: 112
[8] 李菂, 徐仁新, 朱明, 等. 973项目: 射电波段的前沿天体物理课题及FAST早期科学研究项目计划任务书. 北京: 中国科学院国家天文台, 2011
[9] 李菂, 徐仁新, 朱明, 等. 973项目: 射电波段的前沿天体物理课题及FAST早期科学研究项目中期总结报告. 北京: 中国科学院国家天文台, 2013

FAST Construction Progress

NAN Ren-dong[1,2] ZHANG Hai-yan[1,2] ZHANG Ying[1] YANG Li[1]
CAI Wen-jing[1] LIU Na[1] XIE Jia-tong[1] ZHANG Shu-xin[1]
(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012)
(2 Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract The Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) is a Chinese mega-science project to build the largest single dish radio telescope in the world. A unique karst depression in Guizhou province has been selected as the site to build an active reflector radio telescope with a diameter of 500 m and three outstanding aspects, which enables FAST to have a large sky coverage and the ability of observing astronomical targets with a high precision. Chinese Academy of Sciences and Guizhou province are in charge of FAST construction. The first light of the telescope was expected on September 25, 2016.

Key words radio astronomy, radio telescope, FAST