

从KARST到FAST ——中国天眼的概念起源与决策过程*

李唐^{1,2†}

(1 中国科学院国家天文台 北京 100101)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 在大科学时代,大科学工程的建设日益复杂,设计者需综合考虑设备性能、技术储备、经费、风险、环境等因素才能进行合理决策.在国内外天文学发展的背景中,梳理了500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)概念形成的过程以及FAST团队在其中所做的决策,包括大望远镜中国方案的设想、先导单元的提出、主动反射面技术的采用等,并对决策过程进行了分析探讨.FAST诞生于我国与国际天文学发展的互动与融合进程,实现了从跟进到占据先机的转变,可为在相关基础薄弱的领域建设大科学工程提供参考.

关键词 大科学工程, FAST, 工程决策

中图分类号: P111; **文献标识码:** A

1 引言

“十一五”国家重大科技基础设施500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)是我国自主设计、建造的大型射电望远镜,也是世界最大的单天线望远镜.它位于贵州省平塘县的喀斯特(Karst)洼地之中,采用馈源索支撑系统和可变形的主动反射面^[1].巨型反射面由铺在索网结构上的4450个小单元拼接而成,依靠2225个促动器拉伸索网实现主动变形;6根长约600 m的悬索将馈源舱吊于反射面上方,形成光机电一体化馈源指向与跟踪系统.从20世纪90年代产生构想到2016年建成,FAST的发展主要经历了3个阶段:概念形成、预研究和工程建造.其中,概念形成阶段集中于FAST基本设计

构想的讨论;1999年首批大笔经费250万元^[2]⁴²⁴到位后开始的预研究阶段,则主要通过实物模型建造和仿真模拟,对各项关键技术进行试验.在FAST概念形成之时,科学活动已进入规模更大、合作更广泛^[3]、与社会联系更为紧密的“大科学(big science)时代”,科技决策也更加复杂.根据FAST工程档案以及对有关亲历者的访谈,本文梳理了FAST概念形成的过程,关注研究团队在其中的关键决策,可为未来在相关基础薄弱的领域建设大科学工程提供参考.

2 大科学时代的大科学工程

进入20世纪特别是第二次世界大战以后,科学研究活动日趋规模化和有组织化,资金投入、专

2022-01-17收到原稿,2022-03-16收到修改稿

*国家重点研发计划(2018YFA0404703)资助

†lt@nao.cas.cn

业教育、从业人员、知识产出的规模呈指数型增长^[4],以分散的个体性研究为主的小科学时代逐渐向大科学时代过渡。“大科学(big science)”的概念源于时任美国总统科学顾问委员会成员、橡树岭国家实验室主任Weinberg^[5]和物理学家Price^[6],其特征不仅在于规模巨大,如跨学科甚至跨国的大型科研团队、昂贵的巨型装置以及巨额研究经费,也在于组织形式的社会化。在大科学时代,科学被看作推动国家发展的强大力量。政府有计划地设立科研机构 and 科学委员会,并投入资金支持研究活动。随着公共财政对科研投入的加大,科学与社会的关系日益密切。对具体科学项目的支持力度会受到政治、社会因素的影响。作为大科学时代的产物,大科学工程的建设已变得非常社会化,与经济、工业、公众、政府等交织在一起。

大科学工程本质上是一种技术人工物。根据西蒙(A. Simon)的人工物理论,工程设计者要“考虑人工物应是怎样的,也就是什么样的人工物才能实现目的,发挥其作用”^{[7]585-586}。在对人工物功能和用途的分析中,他强调3个互相关联的要素:目标/目的、人工物的特性、人工物发挥作用的环境。人工物自身的物质结构与其周围环境之间存在张力,这同时会影响人们所期望的用途。事实上,工程设计就是详尽提供人工物内部的“物质和结构”,从而满足来自外部世界的要求或限制。工程设计中的决策性质(decisional nature)和所受的各种限制,是其区别于科学研究的两个特征,后者也是前者的原因之一。工程设计就是一个不断做出决策的过程^{[7]578-606}。

大科学工程以有效的科学探索为目标,即可被用于全新的科学研究。一种常见的发展策略是建造在某些性能指标上超越现有设备的科学装置,比如能产生更高能量粒子的加速器、可观测更暗弱天体的望远镜。与封闭在实验室内的科学设备不同,许多大科学工程暴露在自然和社会环境之中,其与环境的联系十分复杂。由于外界施加的诸多限制条件,大科学工程的规划者会面临一系列的决策,如科学目标的选取、侧重哪些性能、采用什么技术方案等。在造价、运行环境等因素的限制下,提升

性能需采用新的设计方法或技术。这意味着大科学工程的建设更多是一个发明的过程,即创造出新的技术人工物。创新意味着风险,失败的可能性总是存在。决策者需综合考虑经费、人才、技术储备、风险、自然和人文环境、相关学科的现状与未来发展等因素,权衡各种技术路线的利弊,在一些要素之间折中,从而制定出现实可行的方案。作为典型的大科学工程,FAST的建设也是一个不断决策的过程,这在概念形成阶段中尤为明显。

3 FAST概念形成的背景

3.1 20世纪的射电天文学与下一代望远镜的设想

1932年,美国工程师央斯基(Karl Jansky)接收到源自银河系中心的射电信号,这标志着射电天文学的发端。随着大科学时代的到来,射电天文学家 and 工程师在政府的支持下,陆续建造了一批大型射电望远镜。英国于1957年建成76 m口径洛弗尔(Lovell)望远镜,美国于1962年完成了位于绿岸(Green Bank)的91.5 m望远镜¹,德国的100 m埃费尔斯伯格(Effelsberg)射电望远镜在1972年竣工。1961年,澳大利亚建造的64 m帕克斯(Parkes)望远镜投入观测;它是南天区非常重要的射电望远镜,也是搜寻脉冲星的高效设备。在冷战背景下,美国工程师提出建造一种主要用于研究大气电离层的雷达。为了接收微弱的反射信号,雷达必须拥有巨大的反射面,这使它同时成为一面极为灵敏的射电望远镜。这样的巨型天线难以采用全可动设计。建造地点最终定为波多黎各(Puerto Rico)的阿雷西博(Arecibo)市,那里天然的喀斯特洼地能降低工程建造成本。建成后的阿雷西博望远镜(Arecibo Telescope, AT)采用口径305 m球反射面,观测时使用部分反射面,口径约200 m。外围3座高塔用悬索固定重达550 t的平台^[8],为克服球差而设计的馈源可在平台上移动至所使用反射面部分的对应位置。1963年,频率430 MHz的馈源安装完成。为提高工作频率以拓展研究范围,AT在1972年至1974年进行了第一次升级改造,原来的金属网天线改为金属面板。1997年在平台上加装了由两

¹该望远镜于1988年倒塌,后又建造了100 m口径绿岸望远镜(Green Bank Telescope, GBT),2000年落成启用。

面改正镜组成的系统, 从而实现了宽带和全偏振. AT的工作频段扩展为300 MHz–10 GHz, 线馈源也被传统馈源取代. 计算机技术的进步使综合孔径技术在60年代得以发展. 英国于1971年建成了基线长为5 km的综合孔径望远镜. 1980年, 美国国立射电天文台(National Radio Astronomy Observatory, NRAO)建造了当时世界上最先进的综合孔径望远镜—甚大阵(Very Large Array, VLA); 它由27面25 m口径天线组成, 最长基线36 km.

在20世纪最后十几年中, 天文学家已在构想下一代射电望远镜. 一个发展方向是用来探测中性氢分布、脉冲星和其他暗弱天体的米波-厘米波望远镜, 可进行暗物质、暗能量、引力波探测等研究. 1985年英国天文学家威尔金森(P. N. Wilkinson)提出, 在中性氢探测方面, 新一代射电望远镜的分辨率应超出VLA一个量级, 并拥有100倍于它的接收面积^[9]. 印度天体物理学家斯瓦鲁普(G. Swarup)所领导的团队努力推进巨型米波射电望远镜(Giant Metrewave Radio Telescope, GMRT)的建设^[10], 这一望远镜凸显大接收面积的优越性. 在1991年召开的国际天文学联合会(International Astronomical Union)大会上, 威尔金森、斯瓦鲁普、苏联天体物理学家帕里斯基(Yuri Parijskij)等人讨论了相关设想^[9]. 帕里斯基提出: 根据接收面积随时间的变化趋势, 为接续前辈们开创的进步, 需要发展 10^6 m²级的设备. 威尔金森初步考虑建造一种接收面积为1 km²、主要用于探测HI和脉冲星的射电望远镜; “规划一型接收面积达1 km²的阵列, 时机已经成熟”^[9].

3.2 中国参与发起“大望远镜计划”

由于诸多历史原因, 中国的射电天文学起步曲折, 其发展被“大跃进”、“文革”等事件多次打断^[11]. 虽然经过后续努力, 建成了由28面9 m口径天线组成的密云综合孔径射电望远镜(1984年)²、青海德令哈13.7 m毫米波望远镜(1990年)以及上海(1987年)、乌鲁木齐(1994年)两个25 m天线甚长基线干涉(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)

观测站, 并取得了一些研究成果, 但中小型设备与国际先进大望远镜的差距极大阻碍了研究水平的进步. 对国内科学家来说, 国外仪器的申请使用具有学术竞争等敏感点, 自主性和时效性较低. 中国的射电天文学家迫切需要先进的大型望远镜.

1993年5–6月, 荷兰天文学家斯特罗姆(Richard Strom)来中国进行学术访问. 通过交流, 王绶琯、南仁东、彭勃等人得知, 国外一些团队正在考虑建造下一代大型射电望远镜的计划, 并将在1993年9月的京都大会上讨论相关事项. 中国团队决定参与这一国际合作计划, 以期带动国内射电天文学的发展. 国际无线电科联(International Union of Radio Science, URSI)在9月如期召开第24届大会, 射电天文专门委员会组织了“第三个千年的射电望远镜”学术会议, 描绘21世纪射电望远镜的蓝图. 北京天文台的吴盛殷作为中国代表参会, 参加URSI大会的还有南仁东和上海天文台的叶叔华. 各国天文学家对未来的构想基本一致, 科学界的共识是必须在我们的电波环境被彻底毁坏之前, 用强大的望远镜回溯宇宙原初³. 英国、荷兰、中国等十国射电天文学家联合提出“大望远镜(Large Telescope, LT)计划”(LT后发展为现在的平方公里阵列(Square Kilometer Array, SKA)), 筹划建造接收面积达1 km²的巨型射电望远镜. 预期的科学目标雄心勃勃, LT技术复杂、风险高, 需要巨额投资, 国际合作因而是必要的. 会上决定组建LT工作组(LT Work Group, LTWG), 协调设计、选址、工程预研究以及经费筹集等, 每年将举行学术研讨会. 这标志着中国射电天文学家共同发起、参与国际合作的大科学工程. LT计划的发端以广泛的国际合作为基础, 拓展了LT未来的技术可能性; 这同时也意味着更多来自国际方面的竞争、约束和协作, 复杂的国际背景也成为LT中国概念先导项目FAST的特点之一.

²密云望远镜的建设曾得到访华的悉尼大学教授W. N. Christiansen的大力协助, 包括提供新元件和建议、推荐中国工程师去悉尼学习等, 详见文献[11–12].

³南仁东等. 国家重大科学工程项目建议: 500米口径球面射电望远镜—FAST. 北京: 中国科学院北京天文台, 2000: 13

4 大望远镜的初期探索

4.1 阿雷西博型单元的构想——灵感与地形

吴盛殷从京都回国后,向相关学者汇报了大会的基本情况.北京天文台决定成立LT计划课题组(Large Telescope project Group, LTG),最初的成员是南仁东、彭勃、吴盛殷等人.LTG面临的第1个问题是,是否应该争取将LT建在中国?对于射电天文学家来说,答案是肯定的.中国缺乏大型观测设备,且相关技术基础薄弱.倘若LT落户中国,便能在国际合作框架下,以较小的投入获得可观的收益.由此产生了第2个问题:中国是否有参与台址竞争的优势?鉴于国内当时的经济状况,政府无法直接投入巨额资金.但中国幅员辽阔、地形种类繁多、无线电环境相对宁静、劳动力廉价.团队需要结合现有条件,提供有吸引力的LT中国台址或技术方案.

对于LT的基本构型,一个自然的想法是已有诸多先例、由小型天线组成的阵列.小天线阵列需要广阔的平原,LTG考察了甘肃、青海和内蒙古等地区,以寻找适宜的台址.同时,一种新构想也逐渐成形.威尔金森在1991年发表的文章中提到,阵列的接收面积达 1 km^2 ,比AT大14倍,比VLA大75倍^[9].这使LTG想到, 1 km^2 的面积可由像AT那样的巨型球面构成.这一构型对地形的要求更为严苛.阿雷西博型(Arecibo-type)单元需要天然的喀斯特洼地.这种地貌经过长期演化,地质结构稳定,可大幅减少工程开挖量,从而显著降低造价;而且坑内不会积水,周围的群山作为自然屏障,也可以阻挡外界的无线电干扰^[13].经中科院遥感所聂跃平介绍,LTG得知贵州有大片的喀斯特地貌,具有作为台址的可能性.

1994年3月,LTWG在英国召开第一次工作会议(LTWG-1),对LT的科学目标和技术方案进行讨论,明确在科学目标的引导下,LT计划既要保证技术上的先进性,又要考虑经济上的可行性.根据科学目标可得出望远镜的性能指标,但经费会大大限制可行的技术路线.经估算,当时LT所允

许的每平方米天线造价约为200美元,远低于VLA(0.013 km^2 , 10000美元/ m^2)和GMRT(0.048 km^2 , 1000美元/ m^2)⁴.LTG提供了8个平原候选台址,还提出利用阿雷西博型单元组成阵列的建议.代表们对中国科学家的方案很感兴趣,希望LTG能进一步开展台址勘察.聂跃平在4月先行前往贵州,初步考察了两片洼地集中区,相关结果在8月举办的LTWG-2会议上得到展示.LTWG在会上大体确认了3种LT单元:(1)阿雷西博型球形反射面.(2)自适应相位阵.(3)由小抛物面天线组成的密集阵列,如用400面10 m天线构成的等效单元.其他方案因造价或技术限制而被排除.同年9月和11月,LTG成员对贵州进行实地踏勘、测试无线电环境干扰,发现贵州的喀斯特洼地在单坑尺度、数量、分布范围、无线电环境等方面均颇具优势.这一LT中国路线后被称为KARST计划(Kilometer-square Area Radio Synthesis Telescope project)^[14].

4.2 “大胆的设计革新”:馈源索支撑

AT是KARST方案的参考对象.这种球面天线的造价主要取决于主反射面和馈源支撑两大部分,后者所占的比重更高⁵.不同结构的主反射面造价差异不大,这说明降低成本基本依赖于馈源支撑系统的改进.LT需在亚角秒分辨率下达到亚mK灵敏度,“基本单元”(或极致密子阵)的孔径应为300–400 m.在LTG的规划中,KARST单元口径在300–500 m之间;若采用与AT馈源支撑相似的技术方案,平台的重量或将达到千吨甚至万吨,造价高昂.KARST计划的推进亟需馈源支撑系统的创新.1995年7月4–6日,LTG在北京天文台密云工作站组织了一批工程技术专家讨论LT相关方案.西安电子科技大学(简称“西电”)提出了几种馈源支撑设想;其中最具影响力的便是取消用于AT馈源支撑的钢结构,将一个“裸”的线馈源悬挂在主反射面上方,用索拖动定位,即馈源“无平台”支撑方案.这一设想最直接的优势在于减少了馈源支撑系统的重量,从而大幅降低造价.

⁴南仁东等.国际大射电望远镜(LT)争建建议书.北京:国际大射电望远镜中国推进委员会,1996: 14

⁵同上, p.53

密云会议结束后,西电团队进一步深化该方案,3个月后在LTWG-3贵州会议上做了正式报告。“裸”馈源的两端装有激光传感器,可由全站仪实时测定馈源的空间位姿;伺服驱动采用对悬索张弛主动控制的方式,代替AT的直接机械驱动。经计算,采用光机电一体化设计的馈源“无平台”支撑系统重量可降为约30 t,成本仅为前者的1/10,且避免了AT那样庞大的支撑平台对信号光路的遮挡。国外专家评价其为一种“大胆的设计革新”⁶。这意味着,光机电一体化的馈源索支撑方案在设计和技术上较为超前,虽具有一定风险,但有望成功。假如没有这一方案或能达到相似效果的替代品,KARST计划的造价将是难以承受的,甚至会导致该计划的夭折。此外,一些新的馈源支撑设计也在讨论中涌现;例如,在反射面中间立一根长杆,杆上搭有悬臂,线馈源利用悬臂移动。这些想法由于技术难度过大、造价高或无团队跟进研究等原因,均未能实施。

4.3 主动反射面方案的提出

根据LT的科学目标,基本单元需以较低造价实现大天区覆盖、一定的带宽和偏振能力。AT天区覆盖较小,天顶角仅为20°,阿雷西博型单元的天空覆盖范围必须扩大,尽管这类单元的天区覆盖难以与全可动天线达到同一水平。为克服球差而采用的线馈源只能在几个特定频段工作。在LTWG-3上,中国团队也曾提出可克服球差并实现宽带的相位阵馈源(Phased Array Feed, PAF)方案;比如西电的有源全频段线/面馈源方案,电子部14所提出的双反射面加相控馈源阵的设计思想⁷。但它们并不成熟。在概念探索初期,LTG能建立的合作关系网规模也有局限。“实践表明,设计简单而廉价的克服球差的宽带馈源是很困难的”^[15]。

1997年,邱育海在一次LTG组会上提出,球面与抛物面相差不大,阿雷西博型单元的主反射面可设计成主动模式,即球面的某一部分在用于观测时变形为抛物面。球差不复存在,因而可用常用的喇叭式馈源代替窄频带的线馈源,宽带和偏振问题迎刃而解。根据随后的分析,倘若望远镜的口径为

530 m,观测时使用300 m口径,则天顶角为32°;如选用560 m口径,其天顶角可增至40°,此时可观测天区可达60%以上^[15]。这一方案几乎完美解决了上述所有难点。问题是它现实可行吗?经计算,当焦距 $F = 0.467R$ (R 为球的曲率半径)时,可得300 m的可用(照明)孔径,此时球面与抛物面的最大差值仅为0.65 m^[15]—这说明两者形状相近,对球面进行变形以拟合抛物面在理论上是可行的。庞大的主反射面可由众多小型单元拼接而成。几乎同时,AT加装了用于克服球差的改正镜。初步估算表明,反射面变为主动式所增加的费用低于采用AT馈源改正镜的费用^[15]。主动反射面方案实质上进行了问题转化,将克服球差的问题从馈源系统转移至反射面部分。

5 3次转向与FAST概念的形成

5.1 基础性抉择:转向KARST计划

在LT/SKA早期讨论阶段,其技术路线大体分为两类:大口径小数目天线(Large Diameter Small Number, LDSN)和大数目小口径天线(Large Number Small Diameter, LNSD)。前者包括中国的KARST和加拿大的LAR (Large Adaptive Reflector),后者由美国的ATA (Allen Telescope Array)、荷兰的AAT (Aperture Array Tile)和澳大利亚的LLA (Lunenburg Lens Antenna)组成^[16]。之前提到,LTG最初致力于LNSD路线的选址,后提出KARST计划。LTG很快意识到LNSD中国台址前景黯淡,在1995年将其放弃,完全转向KARST计划研究。这一转变的原因主要在于3个方面:(1)资源不足:LNSD路线所需的平原地形在新疆、青海、甘肃、内蒙古等地均有分布,在广大地域上选址需要一个大型团队。LTG在成立之初仅有3-5位成员,且政府、中科院并未提供大量经费,其他单位的协助多依靠私人关系、“自带干粮”。既然贵州的大片喀斯特洼地已得到确证,将有限的财力、人力集中于一处是明智的选择。(2)国际竞争力:在LT/SKA台址确定之前,争取LT落户中国始终是LTG的核心目标。反观国际局势,美国、澳大利

⁶同上, p.53

⁷同上, pp.51-52

亚、荷兰均提出了自己的LNSD型方案. 美、澳都拥有广阔的平原地形, 无线电宁静度良好, 射电天文技术、人才储备雄厚, 语言文化相近. 倘若LTG继续LNSD路线的中国选址, 则除了劳动力廉价之外中国几乎再无优势. 中国的无线电宁静程度会因人口稠密, 随经济发展而恶化. KARST计划对地形的要求较为严苛, 贵州地貌得天独厚, 时任LTWG主席的布朗博士认为其“独一无二”⁸; 相比于美国的波多黎各, 贵州的喀斯特地形发育更好, 地震、飓风等自然灾害发生概率极小^[17]. 换言之, KARST的台址基本只能是贵州, 贵州台址是中国参与LT竞争的重要资本. 此外, 尽管KARST方案有一定局限(如视场和天区覆盖小), 但其技术较为清晰, 很可能以更低造价获得1 km²的接收面积, 达到预期的灵敏度. (3) 技术革新: 国内一些院所对阿雷西博型单元进行初步研究, 提出了建设性的创新技术, 光机电一体化馈源索支撑就是其中的典型. 这些方案的提出与深化使中国LT的总体图像清晰起来, 对转向起到了推动作用.

5.2 先导单元FAST

在LTG决定推进KARST计划后, 建设一面先导单元的想法浮现出来. KARST计划初期构想大致为: 由30余面直径约300 m的球面望远镜单元组成的阵列^[18]. 各单元包含馈源索支撑等新颖设计以降低工程造价. 创新与风险同在, 利用改型的阿雷西博型单元组阵也具有风险. LT最终方案的确定尚待时日, 为增强KARST计划的竞争力, 用于验证关键技术的先导单元是必要的. LTG清晰地认识到, 先导单元的作用不应局限于技术样机, 同时也是可进行有效科学研究的大型设备. 在这样定位的引导下, 望远镜的口径应在经费、技术允许的条件下尽量增大. 虽然200–300 m口径的单元可验证方案的可行性, 但其探测能力仅与已运行了30多年的AT持平, 难以有显著的科学产出. 若口径能增加到约500 m, 先导单元的灵敏度将比AT高2倍. 根据500 m的口径以及英文缩写KARST, 先导单元被命名为FAST^[14]. 威尔金森曾对AT评价道: “尽管其天空、频率覆盖受限, 但阿雷西博望远镜的科学产出彰显了其接收面积的优势, 它比最大的全可动抛

⁸同上, p.68

物面大5–10倍^[9].” LTG所关注的焦点正是FAST巨大接收面积带来的灵敏度优势. 此外, 在照明孔径一定的情况下, 口径的扩大还能增加天区覆盖, 进一步拉大相较于AT的性能优势.

无论LT/SKA是否采用KARST方案, 先导单元的部分性能指标都将大幅超越现有设备. FAST建成后将是世界上灵敏度最高的米波-厘米波射电望远镜, 为中国和国际天文事业的发展带来有力驱动. 作为LT中国方案的前导单元, FAST的科学目标与LT基本重合. 多国合作的LT由于“众口难调”进展缓慢, 中国若能先行建成FAST, 将占据科学发现的先机. 经专家初步研讨, 500 m口径在技术上有实现的可能. 从经费角度看, 这样一面望远镜的预计造价也是政府有可能接受的, 过大的口径将使成本难以承受. 后来, 主动反射面方案被确认, FAST预研究计划得到同行广泛支持, 先后获得中国科学院、国家科技部和国家自然科学基金委的项目经费. LTG和LT中国推进委员会(1995年LTG发起成立的统筹全国合作的非官方组织)的工作重点完全转向FAST预研究, 并在此基础上申请FAST作为国家大科学工程项目获得国家发改委立项, 同时尽量争取LT/SKA采用中国方案.

5.3 主反射面构型之争: 稳妥抑或激进?

在LTG初期的设想中, 阿雷西博型单元的反射面是固定式的. 在1997年邱育海提出主动反射面构想后, LTG内部产生了分歧. 反对方认为, FAST应继续采用成熟的固定球反射面, 支持方则坚持推进主动反射面方案. 相比于支持方, 反对方拥有丰富的工厂车间经验, 更关注风险问题; 尽管固定反射面会使FAST科学目标受限, 但FAST口径达到500 m, 考虑到中国的望远镜建造技术、工业实力和经费限制, 采用固定反射面和馈源索支撑创新的FAST本身已有较高风险性, 加入主动反射面会使风险激增. 与之相对, 支持方更强调创新设计带来的性能突破; 在专家评估的有较大实现可能之基础上, 应当推进主动反射面方案. 可以说, 这是技术创新与工程风险之间的权衡.

支持方开始寻求相关领域专家的支持. 作为中国射电天文学的奠基人, 王绶琯院士对FAST也格

外关注. 他认为先导单元应追求比AT更大的天区范围, 虽然风险较大, 但不妨尝试主动反射面方案; 邱育海^[15]关于主动反射面的文章在他的推荐下得以发表. 1997年6月, 在支持方成员陪同下, 王绶琯、叶叔华、陈建生3位中科院院士前往贵州实地考察, FAST的科学目标、台址以及地方支持得到了他们的认可. 王绶琯随即向自动控制专家、中科院院士杨嘉墀咨询主动反射面支撑结构所需的上千点实时控制能否实现, 杨嘉墀对其未来可行性持肯定态度^{[2]36-42}. 1997年秋, 彭勃访问德国, 与100 m埃费尔伯格射电望远镜总设计师冯·赫尔纳(Sebastian von Hoerner)讨论FAST概念; 赫尔纳对光机电一体化馈源索支撑和主动反射面两项技术创新给予了高度评价. 在一些立项申请受挫后, 王绶琯、陈建生、杨嘉墀、陈芳允4位中科院院士联名写信推荐包含主动反射面的FAST项目. 1998年2月, 时任中科院院长路甬祥在推荐信上批复, 支持FAST作为国家大科学工程候选项目. 3月, 邱育海等LTG成员访问英国, 正式向国际天文界宣介FAST概念, 其中的主动反射面构想得到诺贝尔奖得主、天文学家休伊什(A. Hewish)等英国科学家们的肯定, 主动反射面相关论文^[19]也得到休伊什推荐, 在国际天文学术刊物上发表. 在一些专家认可的基础上, 主动反射面方案被基本确认, FAST主反射面构型由固定式转为可动式.

转向KARST计划奠定了FAST概念形成的基础, 先导单元构想使国际合作的大科学工程发展为自主创新的“中国天眼”FAST. 当贵州喀斯特台址、馈源索支撑和主动反射面3个要素都得到确认后, FAST完整概念便形成了. 通过以南仁东为代表的FAST团队的努力, FAST概念经过预研究和建造被实体化. “中国天眼”FAST于2007年获得国家立项批复, 2011年3月开工建设, 最终在2016年9月落成启用. 启用时, 习近平主席发来贺信, 希望FAST团队“早出成果、多出成果, 出好成果、出大成果”. 目前, FAST运行状况良好, 已取得了一批突出的科学成果^[17]; FAST已成为新中国成立70年、改革开放40年的标志性大科学工程的成功建设样板之一. 2021年2月, 总书记考察贵州时指出:

⁹同上, p.68

“中国天眼”是国家重大科技基础设施, 是观天巨目、国之重器, 实现了我国在前沿科学领域的一项重大原创突破.

6 结语

FAST使中国射电天文学家拥有了先进的大型望远镜, 中国射电天文学在部分科学领域中具备了实现跨越式发展的基础和潜力. FAST的科学目标是先进的, 其源于国际前沿的LT计划. FAST概念衍生自LT中国概念KARST计划, 后者在国际竞争中着眼于发扬低成本和地形优势. FAST借鉴但未全盘复制AT, 以高灵敏度为突破点并扩大天区覆盖, 创新的同时降低了风险. FAST以创新的工程概念突破了造价 $\text{cost} \propto D^3$ (D 为几何口径)的关系, 开创了廉价建造巨型射电望远镜的新模式⁹. 可以说, FAST诞生于我国与国际天文学发展的互动与融合进程, 实现了从跟进到占据先机的转变.

对于馈源索支撑和主动反射面两项创新, 后者引起的争议远多于前者. 事实证明, 无先例可循的主动反射面的确具有高风险性. 在FAST的建造过程中, 反射面索网疲劳问题一度成为该项目的颠覆性危机^[20]. 一些研究表明, 在几个方案(如主动反射面和固定反射面)间进行选择时, 不存在现成的理性程序^{[7]657-663}; Simon^[21]认为, 这纯粹是经验性的. 团队决策中的不同个体拥有各自的评价准则, 准则间的协商(哪种方案更合适或谁作出让步)必然基于决策者的权衡. 设计者难以考虑到所有影响因素, 所选方案通常是尝试性的, 方案的成功亦具有偶然性. 在一些专家的支持下, 主动反射面被采纳并成功建造, 其成功也具有一定的偶然性. 在建造完成之前, 专家们和LTG未考虑到的因素肯定存在, 始料未及的突发情况需得到解决. 尽管很多先进的大科学工程在竣工前都饱受争议(如VLA曾被认为是“无法想象的”、“技术上不可行的”^[22]), 但相关专家的不同意见在概念讨论时还是颇有参考价值. 主动反射面方案反对方的担忧是合理的, 对团队后期的工作起到了警示作用. 国内外一些专家对主动反射面方案的肯定对LTG决策起到重要推进作用, 在一定程度上降低了创新的风险. 从科技

政策的角度看, 应把预制研究作为大科学工程建设中的独立阶段^[23], 给予专项资金支持; 在该阶段中探索新技术路线, 对其可行性进行验证, 且容许失败, 视情况决定是否立项建造. 这样能以相对较低的成本和风险鼓励创新. 工程设计者也应适当增加高风险方案的备用路线; 例如, 除了索网结构, FAST研究团队还曾试验以机械支撑结构实现主动变形的技术, 其作为备用方案可降低风险.

致谢 感谢中国科学院FAST重点实验室开放课题的支持.

参 考 文 献

- [1] 南仁东. 中国科学: 物理学力学天文学, 2005, 35: 449
- [2] 彭勃. 天眼工程. 上海: 上海科技教育出版社, 2021
- [3] 李建国, 曾华锋. 科学研究, 2011, 29: 1607
- [4] 吴博, 周利民. 科技管理研究, 2020, 40: 237
- [5] Weinberg A M. Science, 1961, 134: 161
- [6] Price D. 小科学, 大科学. 宋剑耕, 戴振飞, 译. 北京: 世界科学出版社, 1982
- [7] 安东尼·梅杰斯. 技术与工程科学哲学. 张培富, 译. 北京: 北京师范大学出版社, 2015
- [8] Altschuler D R. Single-Dish Radio Astronomy: Techniques and Applications, ASP Conference Proceedings, Vol. 278. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2002: 1
- [9] Wilkinson P N. IAU, 1991, 131: 428
- [10] Swarup G. IAU, 1991, 131: 376
- [11] Wang S G. RAA, 2016, 16: 001
- [12] 刘文霞, 李敏. 中国科技史料, 1999, 20: 48
- [13] 朱博勤. FAST工程勘察技术理论与实践. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2021
- [14] 彭勃. 中国国家天文, 2016, 10: 72
- [15] 邱育海. 天体物理学报, 1998, 18: 222
- [16] 彭勃, 柴晓明, 秦波, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2017, 47: 24
- [17] 张承民, 崔翔翰, 杨佚沿, 等. 科技导报, 2021, 39: 9
- [18] Peng B, Nan R. IAU, 1998, 179: 93
- [19] Qiu Y H. MNRAS, 1998, 301: 827
- [20] 姜鹏, 朱万旭, 刘飞, 等. 工程力学, 2015, 32: 243
- [21] Simon H A. The Sciences of the Artificial. Cambridge: MIT Press, 1996: 121
- [22] Kellermann K I, Bouton E N, Brandt S S. Open Skies. Cham: Springer, 2020: 334-336
- [23] 唐素琴, 李志红. 自然辩证法研究, 2008, 24: 62

From KARST to FAST: The Conceptual Origin of FAST and Its Decision-making Process

LI Tang^{1,2}

(1 National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)
(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT In the era of big science, the construction of large science projects is becoming more complex. Designers have to comprehensively consider factors such as instrument performance, technical reserves, funding, risks, and the environment to make a reasonable decision. On the basis of domestic and international astronomy, this paper sorts out the process of the formation of the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) concept and the decisions made by the FAST team, including the Chinese concept of the large telescope, the proposal of the prototype, and the adoption of the active reflector, etc. We also discuss the process of decision-making. FAST was born in the process of interaction and integration between Chinese and international astronomy development, and realized the transformation from following up to taking the lead. It can provide a reference for constructing future large science projects with limited foundations in terms of technology and funding.

Key words big science project, FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope), engineering decision