



月球与行星探测测控系统建设与发展

于志坚, 李海涛

Review on Development History of TT&C System of China's Lunar and Planetary Exploration Projects

YU Zhijian and LI Haitao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210125>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国深空测控系统建设与技术发展

Development and Future of China's Deep Space TT&C System

深空探测学报(中英文). 2018, 5(2): 99-114

中国探月工程

China Lunar Exploration Program

深空探测学报(中英文). 2019, 6(5): 405-416

深空微波测距测速现状及发展建议

Development of Deep Space Radio Ranging and Velocity Measurement Technology

深空探测学报(中英文). 2018, 5(2): 140-146

VLBI技术研究进展及在中国探月工程的应用

Research Progress of VLBI Technology and Application to China Lunar Exploration Project

深空探测学报(中英文). 2020, 7(4): 321-331

中国月球探测任务轨道确定技术及发展综述

A Summary of Orbit Determination Technology for Chinese Lunar Exploration Project

深空探测学报(中英文). 2019, 6(3): 203-209

我国深空探测任务电源系统发展需求

Research on Power System Development of Chinese Deep Space Exploration

深空探测学报(中英文). 2020, 7(1): 35-40



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

月球与行星探测测控系统建设与发展

于志坚^{1,2}, 李海涛³

(1. 太原卫星发射中心, 太原 030031; 2. 中山大学, 广州 510006; 3. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 全面回顾了我国探月工程“绕”“落”“回”三步走战略顺利实施17年, 测控系统从近地走向深空的发展历程和建设成就。探月一期工程突破了远距离测控技术; 探月工程二期率先建设两个深空站, 初步建成深空测控网; 探月工程三期建成了阿根廷深空站, 形成了完整的深空测控能力。目前中国深空测控系统已成为世界上三大全球布局的深空测控网之一, 具备了独立支持月球与深空探测任务的能力。伴随着以首次火星探测任务为代表的行星探测工程的实施, 中国深空测控系统在规模和性能上进一步增强任务支持能力。

关键词: 探月工程; 测控系统; 深空探测; 火星探测

中图分类号: V55

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)06-0543-12

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210125

引用格式: 于志坚, 李海涛. 月球与行星探测测控系统建设与发展[J]. 深空探测学报(中英文), 2021, 8(6): 543-554.

Reference format: YU Z J, LI H T. Review on development history of TT&C system of China's lunar and planetary exploration projects[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8(6): 543-554.

引言

2020年12月17日凌晨, 携带月壤的“嫦娥五号”返回舱成功着陆在内蒙古四子王旗预定着陆区, 标志着中国探月工程“绕”“落”“回”三步走圆满收官。深空测控能力正是在实施月球与深空探测的过程中逐步建设和发展起来的。

自2004年正式启动实施探月工程^[1]以来, 中国深空测控系统从无到有, 历经17载逐步发展壮大。探月工程一期利用服务于地球轨道卫星任务的航天测控网完成了40万km以远目标测控任务, 实现了远距离测控技术的突破; 探月工程二期建设了两个深空站, 初步具备了独立实施深空探测任务测控支持的能力; 在探月工程三期中, 建设了位于南美洲的阿根廷深空站, 从而具有了全球布局功能体系完备的深空测控能力。中国深空测控系统已成为世界三大全球布局深空测控网之一, 具备独立支持月球与深空探测任务的能力。中国行星探测工程的第一个任务——首次火星探测任务中, 建设了喀什深空测控天线阵系统, 进一步增强了测控系统能力。截至目前, 深空测控网先后圆满完成了“嫦娥一号”“嫦娥二号”“嫦娥三号”、探月工程三期再入返回飞行试验器、“嫦娥四号”“嫦娥五号”历次探

月工程和“天问一号”任务的测控支持, 为探月工程“绕”“落”“回”三步走的顺利实施、首次火星探测任务圆满成功做出了重要贡献。

深空测控系统作为实施深空探测任务的地面基础设施, 是制约工程顺利推进的核心关键因素之一。通过探月工程三步走的实施, 更加凸显了测控系统的重要地位和作用。做好顶层规划、分阶段投入、分步骤建设、逐步形成和增强任务支持能力的发展思路证明是中国深空测控系统发展的最佳路线。

1 探月工程一期: 突破远距离测控技术

1.1 “嫦娥一号”任务测控系统设计

探月工程一期又称为绕月探测工程, “嫦娥一号”任务由“嫦娥一号”卫星系统、运载火箭系统(“长征三号”甲运载火箭)、发射场系统(西昌卫星发射中心)、测控系统(S频段航天测控网、VLBI测轨分系统)和地面应用系统(密云、昆明接收站、应用中心)组成。测控系统是绕月探测工程的一个重要组成部分, 负责“长征三号”甲运载火箭发射和“嫦娥一号”卫星整个飞行任务期间的轨道测量、遥测监视、遥控操作、飞行控制以及“嫦娥一号”卫星科学探测期间任务计划的实施与操作管理等任务, 并通过高精度的测

定轨,为地面应用系统的科学探测处理提供保障^[2]。

在实施绕月探测工程之前,大部分卫星距离地面都在4.2万km以内,个别卫星离地面的最远距离8万km,属于“近程”测控范围。在绕月探测工程中,“嫦娥一号”卫星距离地面最远可达约40万km,是地球同步静止轨道卫星距地面距离的10倍以上,属于“远程”测控范围。远程测控给深空航天测控网带来了极大的挑战^[3]。

在“嫦娥一号”任务时,中国还未建设深空测控设施,受绕月探测工程时间周期和投入经费限制,不允许新建具有大口径天线的深空测控设备。工程总体经过论证确定以现有地球轨道卫星测控系统为基础,通过适当升级改造和补充建设,来满足“嫦娥一号”任务的测控需求,并为开展国际联网合作创造条件。地面测控系统在已有测控设备的基础上进行技术挖潜和改进,解决了40万km的远距离测控难题。

根据天地一体化测控系统设计,地面测控系统将当时天线口径最大的3套S频段统一测控系统(Unified S-Band, USB)设备用于“嫦娥一号”任务的S频段测控支持,分别是喀什测控站、南宁测控站和“远望三号”航天测量船上的12 m口径USB。在“嫦娥一号”卫星初样研制阶段,星上S频段测控全向发射天线技术指标无法达到设计要求,导致天地下行链路无法满足最初的任务要求。为解决这一问题,测控系统提出了设计建设18 m接收天线与原有USB上行链路配合使用的方案。最终,工程总体决策先建设两套18 m口径S频段接收天线,与原有USB系统配合使用。同时为扩大测控覆盖率,在上行测控链路余量满足任务要求的情况下,测控系统决定调整原来使用喀什和南宁测控站的总体设计方案,将18 m接收天线分别建在喀什和青岛测控站,与原有的喀什12 m USB和青岛10 m USB组成联合系统,如图1和图2所示。

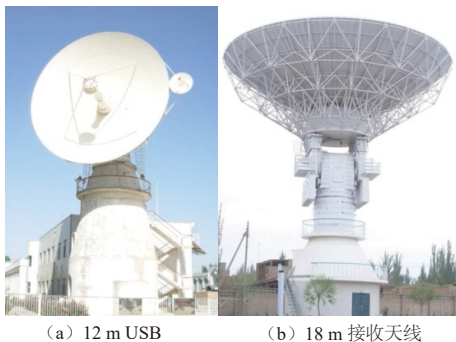


图1 参加“嫦娥一号”任务的喀什12 m USB和18 m接收天线
Fig. 1 Kashi station 12 m USB and 18 m receiving antenna for Chang 'E -1 mission



(a) 12 m USB (b) 18 m 接收天线
图2 参加“嫦娥一号”任务的青岛10 m USB和18 m接收天线
Fig. 2 Qingdao station 10 m USB and 18 m receiving antenna for Chang 'E -1 mission

针对40万km的远距离测控要求,“嫦娥一号”卫星的星载测控设备采用了“全向与定向天线结合、发射机功率增强、遥测信息速率可变、遥测信道卷积编码”等多项技术措施;地面测控系统在USB设备的基础上,采用了“增配18 m单收天线系统、USB窄带跟踪测量技术、遥测信道卷积译码”等多项技术措施,共同提高天地链路性能,以满足任务要求。

针对“嫦娥一号”任务测定轨需求,测控系统首次将射电天文观测网的甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)技术引入到测控系统,测轨分系统采用了USB+VLBI综合测定轨技术,提高了测定轨精度^[4]。“嫦娥一号”任务VLBI测轨分系统包括新疆乌鲁木齐25 m天线、北京密云50 m天线、云南昆明40 m天线和上海佘山25 m天线,乌鲁木齐至上海的基线长度为3 249 km,乌鲁木齐至昆明的基线长度为2 477 km,昆明至佘山的基线长度为1 920 km^[4]。该系统利用“嫦娥一号”卫星发射的下行X频段专用信标和S频段测控信号,实现对卫星空间角位置的高精度测量。天文VLBI测量系统在数据传输和数据处理方面采用的是事后处理方式,通常测量两周后才能提供处理后的时延和时延率结果。为满足地月转移阶段能够中途修正和近月制动前后的快速短弧段测定轨需求,对VLBI的信息传输和数据处理系统进行改造,升级为准实时测量系统,升级后的系统实现了在对目标进行测量后10 min内,将测量处理结果传送到北京航天飞行控制中心。

2007年,测控系统还利用在轨飞行的欧洲空间局(European Space Agency, ESA)的“SMART-1”环月探测器(如图3所示),对测控系统的40万km远距离测定轨能力进行了全面的测试验证。



图3 ESA环月飞行的Smart-1探测器
Fig. 3 ESA Smart-1 spacecraft orbiting the Moon

为实现地月转移轨道的全程覆盖，测控系统与ESA开展了测控联网，利用在法属圭亚那的库鲁测控站15 m测控设备提高了奔月飞行段测控的可靠性，在环月飞行段利用其在澳大利亚西部的的新诺舍35 m深空站提供备份测控支持，如图4所示。中欧双方采用CCSDS（Consultative Committee for Space Data Systems）空间链路扩展协议（Space Link Extension, SLE）^[5-6]，实现了中国航天测控网与ESA测控网的互联互通，首次与外国航天机构实现了“中心至测站”和“中心至中心”的大规模、长弧段联网工作模式，开创了我国航天测控国际合作的新阶段。



(a) 新诺舍 35 m (b) 库鲁 15 m

图4 参加“嫦娥一号”任务的国际联网ESA新诺舍35 m和库鲁15 m站
Fig. 4 ESA New Norcia 35 m station and Kourou 15 m station for Chang 'E-1 mission

“嫦娥一号”卫星任务的地面测控系统实现了由中国西部的喀什USB站、东部的青岛USB站和布设在西太平洋海域的“远望三号”航天测量船（如图5所示），



图5 参加“嫦娥一号”任务的“远望三号”航天测量船
Fig. 5 Yuanwang-3 space tracking ship participating in Chang 'E-1 mission

ESA在南美洲法属圭亚那的库鲁15 m的S频段测控站、澳大利亚西部新诺舍的35 m深空站，以及智利大学的9 m的USB站所组成的任务系统，通过统一时间系统、通信和数据传输系统将“嫦娥一号”任务的测控站点联成一个有机的整体，完成了对“嫦娥一号”卫星发射段、调相轨道段、地月转移轨道段、月球捕获轨道段和环月轨道段等各个飞行阶段的测距、测速、遥测和遥控任务，测控覆盖率达到了98%以上。

1.2 “嫦娥一号”任务测控支持

2007年10月24日18时05分，搭载着中国首颗探月卫星“嫦娥一号”的“长征三号”甲运载火箭在西昌卫星发射中心点火发射。“嫦娥一号”任务中，地面测控站通过S频段双向测控链路完成了对卫星的测距、测速、遥测和遥控任务。当卫星高度达到距离地球2万km时，VLBI测轨分系统开始对卫星进行全程跟踪测量（包括转移轨道段、奔月轨道段、卫星制动和入月轨道段及环月段），VLBI测轨数据在6 min内发送至北京航天飞行控制中心^[7]。卫星到达环月轨道后，经过约1.5 a的探测，获取了月球表面三维立体影像、完成了月球表面有用元素的含量和物质类型分布特点的分析，开展了月壤厚度和地月空间环境探测，2008年11月，“嫦娥一号”卫星完成全部预定任务，随即转入扩展任务阶段。2009年3月1日，“嫦娥一号”卫星在地面控制中心的操作下完成了在月面的硬着陆^[8]。“嫦娥一号”任务的圆满成功，标志着中国探索浩瀚宇宙的步伐开始迈向月球和更远的深空，实现了中国航天领域迈向深空探测历史性的突破，是中国航天史上一次具有里程碑意义的重大任务。

在探月工程一期，测控系统实现了将中国航天测控距离从8万km延伸到40万km，并首次将中国射电天文观测网引入测控系统，在地月转移和环月飞行轨道的测定轨、飞行控制等方面积累了工程经验，同时也带动产生了一批深空测控技术攻关成果^[9]，为探月工程二期的顺利实施以及测控系统启动中国深空测控网的设计和建设奠定了良好的基础。

2 探月工程二期：初步建成深空测控网

2.1 二期工程测控系统设计

在探月工程一期“嫦娥一号”任务实施过程中，测控系统始终是关注的焦点之一，经过任务实施已经达成“要实施后续的月球和深空探测工程，必须建设中国深空测控网”的普遍共识。深空测控网是指专门用于深空航天器测控和数据传输的专用测控网，通常由多个

深空测控站组成, 配有大口径抛物面天线、大功率发射机、极高灵敏度接收系统、信号处理及高精度高稳定度时间频率系统, 可完成对距离地球200万km以远深空航天器的测控任务^[9-10]。

作为支持航天工程任务的国家重大基础设施, 深空测控网的设计必须立足现实、着眼长远、统一规划、逐步发展。为克服地球自转影响, 实现对深空探测器的连续测控覆盖, 深空测控网的布局通常是在全球范围内经度上间隔约120°布站, 确保对距离地球表面在3万km以上的探测器进行连续测控覆盖。综合考虑跟踪弧段和天线性能等因素, 深空站的站址纬度通常选择在南北纬30°~40°之间^[11]。综合考虑中国国土面积的实际情况和研制建设周期等因素, 中国深空测控网的规划建设3个深空站, 其中分别在中国最东部和最西部各建设一个, 第3个在南美洲建设。纬度上在考虑中国国土地理布局实际的前提下还需兼顾实际跟踪弧段和天线性能, 最终确定选择在南北纬30°~45°之间。按照中国深空测控网的长远发展规划, 在探月工程二期测控系统研制建设中, 率先设计建设两个深空测控站以及配套网管中心和信息传输网络, 初步构建深空测控网。

历经近2 a的深空站站址遴选, 最终确定了中国西北部喀什和东北部佳木斯地区站址。所选深空站的站址基本上都处于远离微波中继通信干线、移动通信基站、高压线、高等级公路和电气化铁路的山区, 以避免外界电磁环境抬高接收系统噪声底所导致的接收灵敏度恶化; 还充分利用了站址周围的地形遮蔽条件, 进一步降低外界电磁干扰对深空站的影响, 也避免了深空站大功率发射信号对外界环境的电磁辐射影响^[9]。

佳木斯深空站(北纬46° 29' 37", 东经130° 46' 12"), 位于中国黑龙江省佳木斯市东南约45 km桦南县境内。站址所处的区域, 属于完达山支脉的低山丘陵地区, 地势东北高、西南低, 周边低山的海拔都在300~400 m左右, 与山谷的相对高程差在100 m左右, 66 m口径的天线布设其中, 形成了较好的遮蔽条件, 如图6所示。该地区气候属温带大陆性季风气候, 春季干旱风大少雨, 夏季温热多雨, 秋季降温急剧多早霜, 冬季寒冷漫长。在该站建设了一套具备S/X双频段测控能力的66 m深空测控设备(综合考虑气象等因素暂未考虑Ka频段), 于2013年建成并投入使用^[12]。

喀什深空站(北纬38° 26' 34.7", 东经76° 43' 40.3"), 位于新疆维吾尔自治区喀什市以南约130 km莎车县境内。站址所处的区域位于昆仑山北麓、帕米

尔高原脚下, 塔克拉玛干沙漠西缘。站址西南方向是连绵高耸的昆仑山脉, 周边的山峦与站址的高差也都在100 m以上, 遮蔽条件良好, 如图7所示。该区域属温带大陆性干燥型气候, 四季分明, 气候干燥, 日照时间长, 水分蒸发量大。在该站建设了一套具备S/X/Ka三频段测控能力的35 m深空测控设备^[12], 于2013年建成并投入使用。



图6 佳木斯深空站66 m测控设备

Fig. 6 Jiamusi deep space station 66 m TT&C equipment



图7 喀什深空站35 m测控设备

Fig. 7 Kashi deep space station 35 m TT&C equipment

佳木斯和喀什深空站最大程度利用了中国国土的东西向跨度优势, 实现了对月球及深空探测器60%以上的测控覆盖率, 如图8所示。两个深空站的建成优化了干涉测量布局, 可与VLBI天文观测网联合开展干涉测量, 延长东西基线, 利于改善测角精度, 增加干涉测量网的冗余度, 如图9所示。

在大口径天线深空测控设备研制建设过程中, 突破了收发一体多频段波束波导馈电系统、超低噪声低温制冷场放、极微弱信号超窄带接收机、副面实时调整与阵风扰动修正等一系列核心关键技术。天线技术与美国、ESA等所属深空站基本处于同一水平, 在技术体制上完全兼容现行和CCSDS等国际主流标准^[3]。

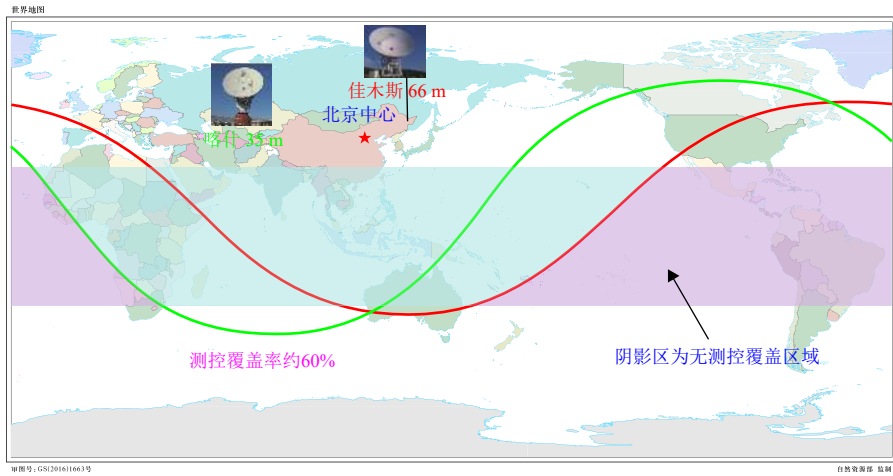


图 8 探月工程二期建设的佳木斯66 m和喀什35 m深空站测控覆盖示意图
 Fig. 8 Coverage of Jiamusi and Kashi deep space stations at the second phase of Lunar exploration

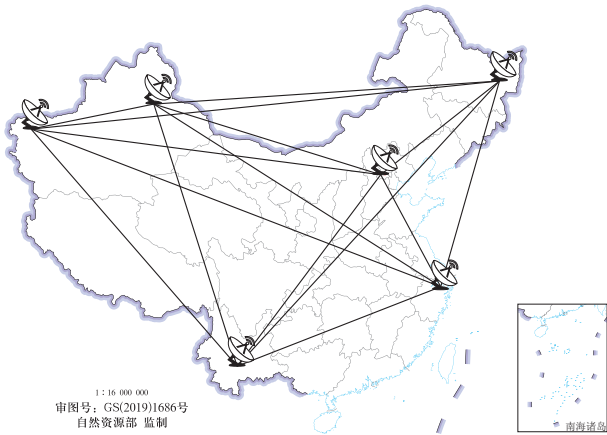
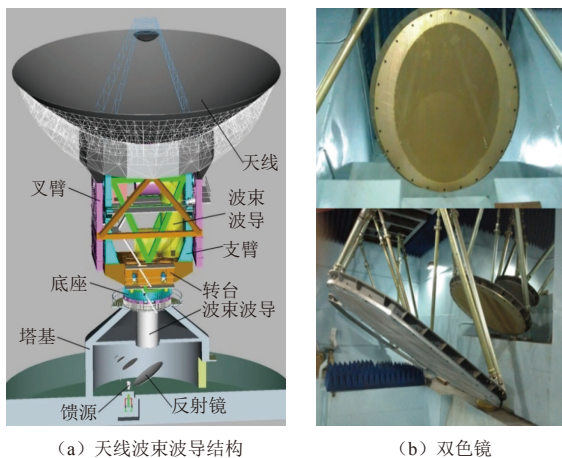


图 9 中国深空站和VLBI天文观测网形成的联合干涉测量网布局示意图
 Fig. 9 The layout of the joint interferometric network formed by the China deep space station and the VLBI astronomical observation network

深空测控设备天伺馈系统采用了自主设计制造的35 m/66 m大口径赋形卡塞格伦天线和波束波导馈电系统，结构如图10所示，满足了多频段工作、较高的系



(a) 天线波束波导结构 (b) 双色镜

图 10 35 m深空测控天线结构^[13]

Fig. 10 Structure of 35 m deep space TT&C antenna^[13]

统G/T值和高指向精度等要求。采用波束波导技术，实现了将体积较大的馈源及其他电子设备移到地面，便于安装和维修，利于部分器件采用低温制冷技术，为提高系统G/T值、降低噪温创造了条件，同时也减小了大功率发射馈线的损耗^[12]。

深空测控设备采用的S/X频段10 kW速调管发射机，如图11所示，主要由S/X频段速调管、高功率电源、冷却设备、输出微波网络、控保与监控等部分组成。由国产单注速调管作为末级放大器，输出功率大于10 kW，带宽大于95 MHz（-1 dB），实现了整个工作频带免调谐和功放设备输出功率0.1 dB步进的精确控制。针对深空测控系统10 kW S/X频段速调管高功放工作时发热量大，采取了液冷和风冷相结合的冷却方式。



(a) S频段发射机



(b) X频段发射机

图 11 佳木斯66 m深空测控设备10 kW发射机^[13]

Fig. 11 Jiamusi 66 m deep space TT&C equipment 10 kW transmitter^[13]

高频接收分系统对S/X/Ka射频进行低噪声放大和变转换,其设备可以满足双目标、双点频左右旋同时接收的需求。配置国产S/X/Ka三频段低温接收机,深度冷却低噪声放大器,有效降低低噪声放大器的噪声温度,S段接收机噪温小于18 K(常温60 K),X频段接收机低噪温小于20 K(常温90 K)^[12],如图12所示。

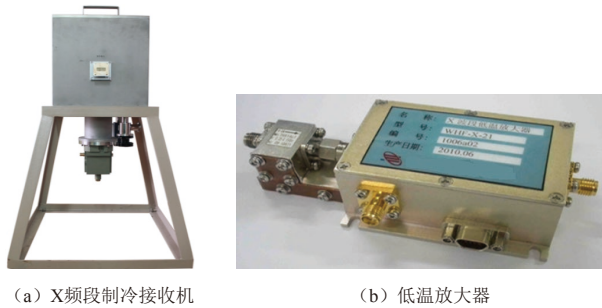


图12 深空测控设备^[12]
Fig. 12 Deep space TT&C equipment^[12]

经过探月工程二期的测控系统研制建设,中国航天测控能力已经从月球延伸到距离地球200万km以远的深空,成为继美、俄和欧洲之后少数具备独立深空测控能力的国家之一,极大地促进了中国相关领域基础工业的发展,特别是在大口径精密天线的设计与制造、大功率微波发射器件、低温超导致冷等领域尤为显著,相关技术达到国际先进水平^[3]。

在“嫦娥一号”任务取得圆满成功,作为“嫦娥一号”备份星的“嫦娥二号”就改作为工程二期的技术先导星,主要任务是为“嫦娥三号”实现月面软着陆开展部分关键技术试验,并继续进行月球科学探测和研究,其中包括了X频段深空测控技术验证。为满足“嫦娥二号”X频段测控技术试验的需求,需在规划建设两个深空测控站建成之前就具备X频段测控支持能力。因此,测控系统结合“嫦娥二号”任务和后续探月工程任务需求,将“嫦娥一号”任务建设的两套18 m口径的S频段接收天线升级改造为S/X双频段全功能测控设备,用于支持“嫦娥二号”S频段常规测控任务和X频段测控技术试验。这两套18 m S/X双频段测控设备系统于2008年11月启动研制,2010年9月初完成安装联试并进行入网验证,设备各项指标均达到设计要求。

2017年2月,为集中统一管理月球与深空测控设备,在喀什深空站建成之后,部署在喀什测控站的18 m S/X双频段测控设备搬迁至莎车县的喀什深空站场区,如图13所示。



图13 搬迁至喀什深空站场区的18 m S/X双频段测控设备
Fig. 13 18 m S/X -band TT&C equipment relocated to Kashi deep space station site

2.2 二期工程测控任务支持

2.2.1 “嫦娥二号”任务测控支持

2010年10月1日两套18 m S/X双频段统一测控系统首次投入使用,作为主用测控设备支持“嫦娥二号”卫星的S频段测控任务,10月3日首次支持了“嫦娥二号”X频段测控技术试验^[14-15]。

2011年,喀什35 m和佳木斯66 m深空测控设备基本建成,初步具备全功能测控和数传能力。此时,“嫦娥二号”卫星已完成各项既定的工程和科学探测目标,2011年8月25日“嫦娥二号”到达了日地拉格朗日L2点(简称日地L2点)^[16-17],进行了为期10个月的科学探测;喀什35 m和佳木斯66 m深空测控设备从2011年10月开始为“嫦娥二号”卫星提供测控支持,期间先后检验了两套深空测控设备对深空探测器的S频段遥控、遥测、数传和干涉测量数据采集等功能,验证了其双向测距、测速数据和天线指向控制等精度,并对相关的技术指标进行了系统测试。2012年12月13日,成功支持了“嫦娥二号”首次近距离飞越探测“图塔蒂斯4179”(Toutatis)小行星的再拓展任务。此后喀什35 m和佳木斯66 m深空测控设备一直负责“嫦娥二号”卫星的测控支持,最远跟踪“嫦娥二号”卫星约1亿km,2014年最终因卫星下行信号消失,与地面失去了联系。

2.2.2 “嫦娥三号”任务测控支持

“嫦娥三号”探测器于2013年12月2日发射,于14日安全着陆在月球虹湾着陆区,实现了中国首次在地外天体上同时进行原位和巡视探测。从2013年12月开始,喀什35 m和佳木斯66 m两套深空测控设备正式参加“嫦娥三号”任务。两套深空测控设备首次利用X频段完成了探测器地月转移、环月、动力下降、月面工作段的各项测控任务,期间获取的双向和三向测距测速、差分单向测距、同波束干涉测量等数据为高精度测定轨、动力下降轨迹监视和探测器月面绝对和相对位置确定等提供了高精度的测量数据。深空测控设备实现了X频段测控,测量数据精度相比S频段提高了

3~5倍。截止目前，两套深空测控设备仍在持续为“嫦娥三号”着陆器提供各项测控支持^[18]。

VLBI测轨分系统上海天马65 m天线于2012年建成使用，从“嫦娥三号”任务开始，上海主用天马65m天线，佘山25 m天线作为备用^[19]。在“嫦娥三号”任务中VLBI测轨分系统首次实现了处理系统自动消除模糊度，提供实时 Δ DOR处理数据的能力，并确立了5 min射电源和探测器快速差分观测的测量模式^[20]。

3 探月工程三期：形成完备的深空测控能力

3.1 三期工程测控系统设计与建设

探月三期要实现月面自动采样返回的工程目标，着陆器和上升器在月面工作阶段需要连续的测控覆盖支持，而探月工程二期测控系统建设的两个深空站60%的覆盖率无法完全满足任务需求。早在三期工程立项之前的2010年1月，测控系统就启动了南美深空站的选址工作。经过多次深入论证和海外选址勘察，最终于2012年6月确定在南美阿根廷西部内乌肯省萨帕拉地区新建中国深空测控网的第3个深空站。

阿根廷深空站（南纬38° 11' 28.90"，西经70° 8' 58.20"），位于南美洲阿根廷西部内乌肯省萨帕拉市以

北约80 km，站址所处的区域位于南美洲巴塔哥尼亚高原的北缘，地势由西向东逐步降低。站址西面是高耸的安第斯山脉，周边群山环绕，与站址的高差在200 m以上，遮蔽条件良好，如图10所示。该区域气候介于温带大陆性和高原山地之间，有温季和干季之分。夏季热且大部分为晴天，冬季寒冷且大部分为多云天气，全年干燥多风。在该站建设了一套具备S/X/Ka三频段测控能力的35 m深空测控设备，如图14所示，2017年建成并投入运行^[12]。



图14 阿根廷深空站35 m测控设备^[12]

Fig. 14 Argentina deep space station 35 m TT&C equipment^[12]

阿根廷深空站建成后，与中国两个深空站构成全球布站完整的深空测控网，对深空航天器的测控覆盖率提高到了90%以上，如图15所示。

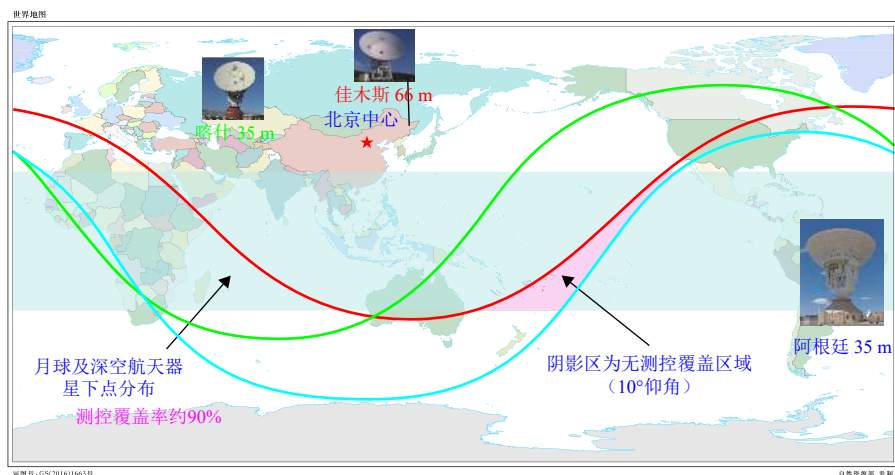


图15 中国深空测控网10°仰角测控覆盖示意图

Fig. 15 Coverage of China deep space TT&C network at 10° elevation

为满足返回段测控并兼顾环月交会对接段双目标测轨需求，在纳米比亚站新建了18 m S/X双频段测控设备如图16所示，并配置干涉信号采集终端与已有的2套18 m S/X双频段设备形成了全球布站的18 m测控子网。上述系统的建成使中国成为继美国和欧洲之后，第3个全球布站深空测控网的国家，深空探测任务的测

控覆盖和多目标测控支持能力得到了进一步提升。新建阿根廷深空站35 m和纳米比亚18 m测控设备后，进一步扩大了中国深空测控干涉测量覆盖范围，与ESA联网可进一步优化基线几何构型，提高测量精度，其布局如图17所示。



图 16 纳米比亚站18 m S/X双频段测控设备
Fig. 16 18 m S/X band TT&C equipment of Namibia station

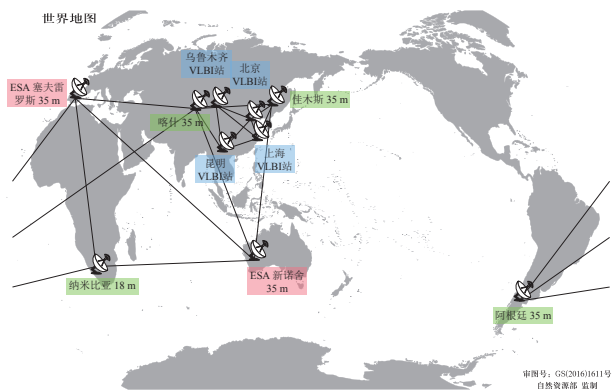


图 17 新建阿根廷深空站35 m、纳米比亚18 m测控设备后与ESA联网的深空干涉测量基线几何构型

Fig. 17 The interferometry baselines formed by Chinese deep space network with cooperation of ESA international network after the construction of Argentina deep space station 35 m and Namibia 18 m TT&C equipment

针对探月工程三期再入返回器第一次再入黑障区飞行状态监视,并为返回器提供是否成功跳起判据的要求,测控系统对“远望三号”航天测量船的雷达和光学设备进行了升级改造,并将其布设于索马里以东的印度洋海域。为能够实现对返回器首次出黑障后的快速捕获,新研制了S频段宽波束引导设备和机动式多波束测控设备分别布设在卡拉奇和西藏阿里地区。同时为增加返回器二次再入前后的测控覆盖,新研制了X频段相控阵再入测量雷达,布设在新疆若羌地区。上述升级改造和新研制设备与原有的载人航天神舟飞船返回段测量设备共同构成了较为完善的月球返回任务再入测量链^[21]。

根据“嫦娥五号”探测器月地转移段末期对轨道器和返回器分离点的测定轨精度需求,测控系统设计了利用阿根廷35 m、纳米比亚18 m和ESA所属马斯帕拉玛斯15 m共3套X频段测控设备进行三站接力测距的方案,利用3个测站的三角几何状分布,在时间域上实现测量几何的有效改善,以保证分离点的轨道预报精度,确保返回器能够进入标称再入走廊。月地转移段末期和再入返回段测控站布局如图18所示。

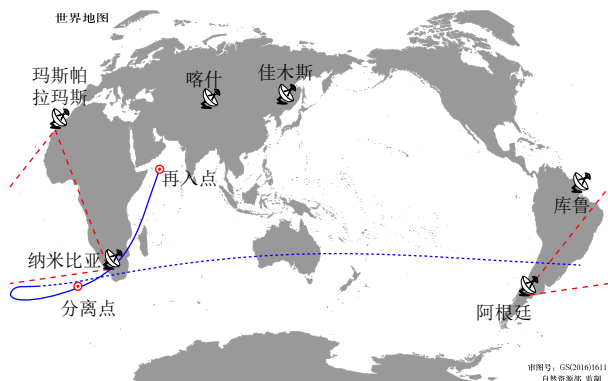


图 18 “嫦娥五号”任务三站接力测量系统布局示意图^[18]
Fig. 18 Schematic diagram of three-station relay measurement system layout for Chang'E-5 mission^[18]

3.2 三期工程测控任务支持

3.2.1 “嫦娥四号”任务测控支持

2017年底,阿根廷35 m深空测控设备建成并在2018年5月21日发射的“嫦娥四号”中继星“鹊桥”任务正式投入使用,喀什35 m和佳木斯66 m深空测控设备共同为“鹊桥”提供了S频段测控支持,这也是中国深空测控网首次全网执行测控任务。

2018年12月8日,“嫦娥四号”探测器成功发射,深空测控网的全部3个深空站为探测器任务提供了全程X频段测控通信支持。

“嫦娥四号”探测器^[19-24]于2019年1月3日成功着陆于月球背面的预选着陆区——冯·卡门撞击坑(Von Karman Crater),成为世界第一个在月球背面实现软着陆和巡视探测的探测器,实现了世界上首次月球背面探测器与地球之间的中继通信。“嫦娥四号”任务首次全面检验了深空测控网全网协同工作和稳定可靠运行、多频段与多目标联合测控等能力,为深空网后续对更远深空探测器提供测控支持提供了坚实的技术基础和宝贵的经验。

3.2.2 “嫦娥五号”任务测控支持

在“嫦娥五号”^[25-27]任务中,测控系统主要以中国近地航天测控网、深空测控网、再入返回测量链为主,辅以VLBI测轨分系统,并开展了必要的测控国际联网,共同完成全任务过程的测控支持。中国深空测控网的3个深空站和3个18 m测控站悉数登场,全力以赴支持探月工程收官之战,系统布局如图19所示。

在环月飞行段,着上组合体与轨返组合体实现两两分离后,需要确保对着上组合体和轨返组合体双目标的同时测控。为了满足这一需求,统筹考虑两个组合体目标的测定轨精度和遥控指令上注要求,测控系统对可用测控资源进行了合理调配:由佳木斯深空站66 m、喀什深空站35 m和阿根廷深空站35 m的3套深空

测控设备承担对着上组合体的X频段测控任务；由青岛站、喀什站和纳米比亚站3套18m测控设备承担对轨

返组合体的X频段测控任务；VLBI测轨分系统在该阶段的观测目标为着上组合体。

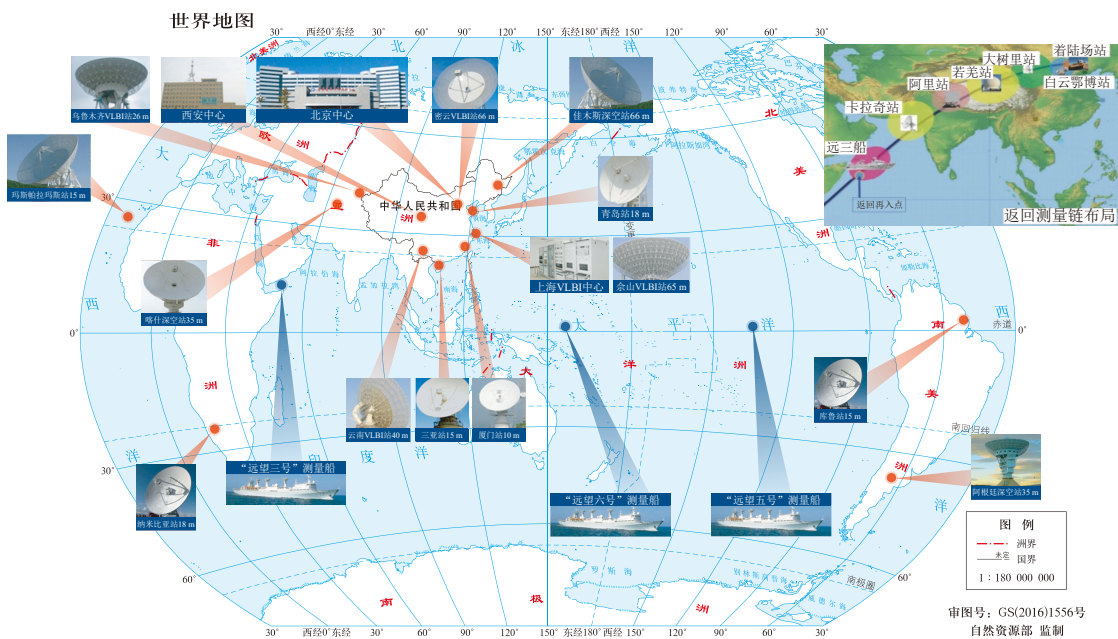


图 19 “嫦娥五号”测控系统示意图^[26]

Fig. 19 Schematic diagram of TT&C system for Chang'E-5^[26]

在交会对接段，测控系统需要利用有限的测控资源确保上升器和轨返组合体各自的测定轨精度。“嫦娥五号”任务的交会对接是上升器作为目标，轨返组合体主动对接上升器，对上升器的测定轨精度要求较高。为满足上述要求，在上升器月面上升后，3个深空站和VLBI测轨分系统全部跟踪上升器，3套18 m测控设备全部跟踪轨道器，通过这种测站资源分配方式满足了交会对接段远程导引交班点定轨精度要求。

轨道器与返回器分离前，利用阿根廷35 m深空站、国际联网的欧空局玛斯帕拉玛斯15 m站和纳米比亚18 m站对轨返组合体按照分时接力模式进行双向测距测速，将3 h的测控弧段均匀分配给上述3个测控站，从而实现定轨精度优于单站持续跟踪3 h效果。

返回器再入过程的连续跟踪测量，是确保实现对返回器顺利回收的关键。在索马里以东的印度洋海域“远望三号”航天测量船，利用光学测量、雷达测量成功获取了一次再入过程的飞行轨迹，并获取返回器一次再入最低点的外测数据。卡拉奇站宽波束引导设备和在西藏阿里地区的车载多波束设备负责完成返回器一次出黑障后的捕获跟踪。卡拉奇宽波束引导设备的捕获范围达到了18°，车载多波束设备的捕获范围达到了20°，均能覆盖返回器正常弹道偏差下的散布范围。新疆、青海、甘肃和内蒙古等地的地面雷达对返回器

二次入黑障前一直到返回器开伞期间全过程实施了连续不间断的可靠跟踪测量，并为后续对返回器的搜索回收提供了可靠的落点预报，确保了对返回器的顺利回收。

2020年12月17日“嫦娥五号”返回器携带1 731 g月球样品安全着陆于四子王旗预选着陆区，首次实现中国地外天体采样返回。

在“嫦娥四号”和“嫦娥五号”任务中，全球分布的3套18 m S/X双频段测控设备与3个深空站形成了互补和冗余，对多目标测控支持发挥了非常重要作用。未来通过在阿根廷深空站补充建设1套18 m S/X双频段测控设备，可以形成接近连续测控覆盖的18 m测控子网，不但可解决月球与深空探测任务发射和早期轨道段的X频段快速捕获跟踪问题，提高测控系统执行任务的可靠性，而且还可进一步扩大18 m测控子网的覆盖范围，增强系统使用的灵活性。

4 首次火星探测：增强深空测控能力

4.1 构建首个深空测控天线组阵系统

在2020年实施的首次火星探测任务中，中国深空测控网的测控通信支持距离进一步延伸到4亿km。相比于月球探测任务，火星探测测控距离增大了约1 000倍，而无线电信号的传播衰减是与距离的平方成反比

的,会引起巨大的信号衰减。探测器发射相同功率的信号,相比于月球探测任务,在火星距离地球最远点时,地面只能收到原来信号的1/100万。为提升深空探测通信能力,需对已有深空测控通信基础设施进行补充建设和改造,并实现大口径天线组阵接收技术的工程应用^[28]。因此在喀什深空站建设了3个35 m口径新天线,与原有的1个35 m天线组成天线阵系统,如图20所示。通过天线组阵接收技术,使得喀什深空站在X频段深空任务接收能力达到了与佳木斯深空站66 m深空测控设备相当的水平,从而实现了更强更远的测控能力^[29]。



图20 喀什深空站天线阵系统布局

Fig. 20 Antenna array system layout of Kashi deep space station

组成天线阵系统的各个35 m天线未来均可以升级为独立的35 m深空测控设备,可实现喀什深空站点更多任务的测控通信支持。

4.2 “天问一号”任务测控支持

“天问一号”探测器于2020年7月23日在海南文昌由“长征五号”运载火箭成功发射,2021年2月10日成功实施火星捕获,成为中国第一颗人造火星卫星,2月24日探测器进入火星停泊轨道,开展了为期约3个月的环绕探测,为顺利着陆火星奠定了基础。2021年5月15日7时18分,“天问一号”探测器成功着陆于火星乌托邦平原南部预选着陆区,首次火星探测任务着陆火星取得圆满成功,成为第2个成功着陆火星的国家。2021年11月8日,“天问一号”探测器环绕器成功实施第5次近火制动,准确进入遥感使命轨道,开展火星全球遥感探测。

在“天问一号”任务过程中,中国深空测控网全力提供测控支持,3个深空站的全部6套大口径深空天线全部投入使用,圆满完成了“天问一号”探测器各个任务阶段的遥测、遥控和轨道测量。首次实现4亿km距离的测控通信^[29],为后续行星探测任务实施奠定了良好的测控技术基础和飞行控制经验。

喀什深空站建设的天线阵系统将是中国深空测控网的标准配置,未来每个深空站都将建有约4个左右的

大口径天线,每个天线既可以单独工作,又可以与其他大口径天线以组阵模式共同接收深空航天器下行数据,成倍提高数据接收能力。每个深空站都可以同时支持多个任务,也可将所有天线进行组阵支持单个重要任务或有高速数据接收需求的任务。

5 结束语

伴随着中国探月工程“绕”“落”“回”三步走战略的顺利实施,17年来中国深空测控系统从无到有,已经形成了独立自主、功能完备的深空测控能力。中国航天测控支持能力,从近地空间迈向了更遥远的深空。测控系统秉承统一规划、分步建设的思路,实现了测控系统的跨越式发展。随着未来探月工程四期和以小行星探测为代表的后续行星探测工程的实施,中国深空测控系统也将不断发展壮大,也必将从规模和技术性能上迈向世界一流行列。

参 考 文 献

- [1] 叶培建,黄江川,孙泽洲,等.中国月球探测器发展历程和经验初探[J].中国科学:技术科学,2014,44(6):543-558.
YE P J, HUANG J C, SUN Z Z, et al. The process and experience in the development of Chinese lunar probe[J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2014, 44(6): 543-558.
- [2] 李海涛,张波,董光亮,等.保驾护航的地面测控系统[J].航空知识,2008(1):41-42.
- [3] 董光亮,李海涛,郝万宏,等.中国深空测控系统建设与技术发展[J].深空探测学报(中英文),2018,5(2):99-114.
DONG G L, LI H T, HAO W H, et al. Development and future of China's deep space TT&C system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(2): 99-114.
- [4] 李海涛,李赞.测控系统总设计师解读嫦娥首次奔月[EB/OL].(2021-11-10). <https://zhuannan.zhihu.com/p/88293301>.
- [5] Management Council of the Consultative Committee for Space Data Systems. Space link extension—return all frames service specification[M]. Washington, DC, USA: CCSDS, 2016.
- [6] 孙威,董光亮.“空间链路扩展”在中国航天测控网中应用的探讨[J].载人航天,2005(2):59-63.
- [7] 钱志瀚.“VLBI技术在中国的发展历程及其在航天工程中的应用[EB/OL].(2019-10-08).http://www.shao.ac.cn/ann70/gzdt/201910/t20191008_5404073.html.
- [8] 陈明,唐歌实,曹建峰,等.嫦娥一号绕月探测卫星精密定轨实现[J].武汉大学学报,2011,36(2):212-217.
CHEN M, TANG G S, CAO J F, et al. Precision orbit determination of CE-1 lunar satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(2): 212-217.
- [9] 吴伟仁,董光亮,李海涛,等.深空测控通信系统工程与技术[M].北京:科学出版社,2013.
WU W R, DONG G L, LI H T, et al. Engineering and technology of deep space TT&C system[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [10] 李海涛.深空测控通信系统设计原理与方法[M].北京:清华大学出

- 出版社,2014.
- LI H T. Principles and design methods of deep space TT&C system[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2014.
- [11] 李海涛,王宏,董光亮. 深空站站址纬度选择问题的分析[J]. 飞行器测控学报,2009,28(1): 1-6.
- LI H T, WANG H, DONG G L. Selection of latitude for a deep space station[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2009, 28(1): 1-6.
- [12] 吴伟仁,李海涛,李赞,等. 中国深空测控网现状与展望[J]. 中国科学:信息科学,2020,50(1): 87-108.
- WU W R, LI H T, LI Z, et al. Status and prospects of China's deep space TT&C network[J]. Science in China(Information Sciences), 2020, 50(1): 87-108.
- [13] 董光亮,李国民,王新永. 中国深空网:系统设计与关键技术(III) S/X/Ka三频段深空测控通信系统[M]. 北京:清华大学出版社,2016.
- DONG G L, LI G M, WANG Y X. China deep space network: system design and key technology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016.
- [14] 吴伟仁,李海涛,董光亮,等. 嫦娥二号工程X频段测控技术[J]. 中国科学:技术科学,2013,43(1): 20-27.
- WU W R, LI H T, ZHANG Z, et al. Research on overall technology of TT&C for lunar exploration[J]. Aerospace Shanghai, 2021, 38(2): 76-86.
- [15] 吴伟仁,黄磊,节德刚,等. 嫦娥二号工程X频段测控通信系统设计与试验[J]. 中国科学:信息科学,2011,41(10): 1171-1183.
- WU W R, HUANG L, JIE D G, et al. Design and experiment of X-band TT&C system for the project CE-2[J]. Science in China(Information Sciences), 2011, 41(10): 1171-1183.
- [16] 吴伟仁,罗辉,谌明,等. 面向嫦娥二号日地拉格朗日L2点探测的深空遥测数传系统设计与试验[J]. 系统工程与电子技术,2012,34(12): 2559-2563.
- WU W R, LUO H, CHEN M, et al. Design and experiment of deep space telemetry and data transmission system in libration points 2 exploring[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(12): 2559-2563.
- [17] 吴伟仁,崔平远,乔栋,等. 嫦娥二号日地拉格朗日L2点探测轨道设计与实施[J]. 科学通报,2012,57(21): 1987-1991.
- WU W R, CUI P Y, QIAO D, et al. Design and performance of exploring trajectory to Sun-Earth L2 point for Chang'E-2 mission[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(21): 1987-1991.
- [18] 吴伟仁,于登云. “嫦娥3号”月球软着陆工程中的关键技术[J]. 深空探测学报(中英文),2014,1(2): 105-109.
- WU W R, YU D Y. Key technologies in the Chang'E-3 soft-landing project[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(2): 105-109.
- [19] 黄勇,李培佳,胡小工. VLBI月球定轨和月面定位技术及其应用[J]. 深空探测学报(中英文),2020,7(4): 340-346.
- HUANG Y, LI P J, HU X G. Contribution of VLBI for the orbit determination to Chinese Lunar exploration project[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 340-346.
- [20] 吴伟仁,王广利,节德刚,等. 基于 Δ DOR信号的高精度VLBI技术[J]. 中国科学D辑:信息科学,2013,43(2): 185-196.
- WU W R, WANG G L, JIE D G. High-accuracy VLBI technique using Δ DOR signals[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2013, 43(2): 185-196.
- [21] 黄磊,李海涛. 嫦娥五号任务复杂多目标条件下的测控支持[EB/OL]. (2021-11-2). <https://zhuanlan.zhihu.com/p/309667108>.
- [22] 吴伟仁,于登云,王赤,等. 嫦娥四号工程的技术突破与科学进展[J]. 中国科学:信息科学,2020,50(12): 1783-1797.
- WU W R, YU D Y, WANG C, et al. Technological breakthrough and science achievement of Chang'e-4 project[J]. Science in China(Information Sciences), 2020, 50(12): 1783-1797.
- [23] 叶培建,孙泽洲,张焯,等. 嫦娥四号探测器系统任务设计[J]. 中国科学:技术科学,2019,49(2): 124-127.
- YE P J, SUN Z Z, ZHANG H, et al. Mission design of Chang'e-4 probe system[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2019, 49(2): 124-127.
- [24] 吴伟仁,王琼,唐玉华,等. “嫦娥4号”月球背面软着陆任务设计[J]. 深空探测学报(中英文),2017,4(2): 111-117.
- WU W R, WANG Q, TANG Y H, et al. Design of Chang'E-4 lunar soft-landing mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(2): 111-117.
- [25] 李赞,李海涛,张哲,等. 月球探测任务测控系统总体设计技术研究[J]. 上海航天(中英文),2021,38(2): 76-86.
- LI Z, LI H T, ZHANG Z, et al. Research on overall technology of TT&C for lunar exploration[J]. Aerospace Shanghai, 2021, 38(2): 76-86.
- [26] 胡浩,裴照宇,李春来,等. 无人月球采样返回工程总体设计——嫦娥五号任务[J]. 中国科学:技术科学,2021,51: 1275-1286.
- HU H, PEI Z Y, LI C L, et al. Overall design of unmanned lunar sampling and return project—Chang'e-5 mission[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2021, 51: 1275-1286.
- [27] 李培佳,黄勇,樊敏,等. 嫦娥五号探测器交会对接段定轨精度研究[J]. 中国科学:物理学力学天文学,2021,51: 119508.
- LI P J, HUANG Y, FAN M, et al. Orbit determination for Chang'E-5 prober in rendezvous and docking[J]. Scientia Sinica(Physica, Mechanica & Astronomica), 2021, 51: 119508.
- [28] 耿言,周继时,李莎,等. 中国首次火星探测任务[J]. 深空探测学报(中英文),2018,5(5): 399-405.
- GENG Y, ZHOU J S, LI S, et al. Review of first Mars exploration mission in China[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(5): 399-405.
- [29] 李赞,李海涛. “天问一号”火星探测任务中的深空天线阵系统[EB/OL]. (2021-11-10). <https://zhuanlan.zhihu.com/p/165968055>.
- 作者简介:
于志坚(1960-),男,研究员,博士生导师,曾任绕月探测工程测控系统首任总设计师、载人航天工程测控通信系统总设计师,主要研究方向:航天测控系统总体设计工程。
 通讯地址:北京朝阳区北苑小街10号(100012)
 电话:15331885508
 E-mail: yzj-bittt@sina.com
李海涛(1973-),男,研究员,探月工程“嫦娥四号”任务和首次火星探测工程任务测控系统总设计师,主要研究方向:航天测控系统工程、深空测控通信技术。**本文通讯作者**。
 通讯地址:北京市5131信箱13分箱(100094)
 电话:(010)66361118
 E-mail: lihaitao@bittt.cn

Review on Development History of TT&C System of China's Lunar and Planetary Exploration Projects

YU Zhijian^{1,2}, LI Haitao³

(1. Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030031, China; 2. Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;

3. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In this paper, the author gives a comprehensive review of the achievements made by China in the construction of deep space TT&C system, combining with the development of the TT&C system from near earth to deep space during the 17 years since the successful implementation of the three-step strategy of “circling, landing and returning” of China’s lunar exploration project. From the breakthrough of long-distance TT&C technology in the first phase of the lunar exploration project, to the initial completion of the deep space TT&C network of two domestic deep space stations in the second phase of the lunar exploration project, to the completion of the Deep space station in Argentina in the third phase of the lunar exploration project, a complete deep space TT&C capability was formed. Today, China’s deep space TT&C system has become one of the three global deep space TT&C networks in the world, and is capable of independently supporting lunar and deep space exploration missions. In the future, China’s deep space TT&C system will continue to develop and grow in accordance with the principle of unified planning and step-by-step construction, which will further enhance China’s support capacity for deep space TT&C.

Keywords: Lunar exploration project; deep space TT&C system; deep space exploration; Mars exploration

Highlights:

- A comprehensive review of China's deep space TT&C system development history during the 17 years is provided in detail.
- The TT&C support for all the missions of China's Lunar exploration program are introduced.
- Some system design methods and concepts of Lunar exploration missions' TT&C system are also introduced.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]