



嫦娥四号任务中继星“鹊桥”技术特点

张立华^{1*}, 熊亮¹, 孙骥¹, 高珊², 王晓磊³, 张爱兵⁴

1. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094;
 2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;
 3. 北京控制工程研究所, 北京 100094;
 4. 空间电子信息技术研究院, 西安 710100
- * E-mail: zlh70717@sina.com

收稿日期: 2018-11-09; 接受日期: 2019-01-17; 网络版发表日期: 2019-02-14

摘要 我国的嫦娥四号任务在世界上首次软着陆于月球背面开展科学探测, 中继通信是必须解决的一个关键问题。作为嫦娥四号任务的重要组成部分, 中继星“鹊桥”为工作在月球背面的着陆器和巡视器提供中继通信支持。不同于其他月球探测器, 鹊桥首次选择了绕地月L2平动点运行的晕(Halo)轨道以保证对月球背面的着陆器和巡视器提供连续的中继通信服务, 技术状态新, 研制难度大, 面临诸多技术挑战。本文对嫦娥四号中继星的任务特点进行了分析, 梳理了研制中面临的主要技术挑战, 包括使命轨道的选择和设计、中继通信系统方案选择、星上设备对低温环境的适应性等, 概括介绍了鹊桥的总体技术方案和飞行任务流程, 结合在轨飞行结果总结了鹊桥的主要技术特点和创新点, 并对月球中继通信卫星的未来发展进行了展望。

关键词 嫦娥四号任务, 地月L2平动点, 中继通信, 技术特点

1 引言

我国的探月工程在圆满完成了“绕、落、巡”任务后, 又有了新的目标, 那就是在世界上还从未有探测器涉足的月球背面。由着陆器、巡视器和中继星构成的嫦娥四号任务(代号“CE-4”, 图1)经过近两年的论证^[1], 于2016年1月获得了国家的立项批复, 开始了工程研制工作, 于2019年1月实现了人类航天器在月球背面的首次软着陆和巡视勘察探测。

由于在月球背面探测器无法与地面站直接进行通信, 中继通信成为嫦娥四号任务首先要解决的关键问题, 因此安排研制了一颗专用的中继通信卫星——鹊

桥, 并要先于着陆器和巡视器半年左右发射, 到达使命轨道, 搭建好地月之间的“鹊桥”, 为嫦娥四号探测器软着陆于月球背面提供中继通信保障^[2,3]。

2 鹊桥的任务特点和面临的技术挑战

着陆于月球背面开展科学探测并不是一件容易的事, 由于探测器落在月球背面将一直对地不可见, 首先面临的的就是中继通信的问题。早在20世纪60年代, 美国国家航空航天局(NASA)就组织研究机构、高校和工业部门针对月球中继通信卫星系统开展了深入的论证, 并提出了各种解决方案^[4,5]。进入到20世纪90年代,

引用格式: 张立华, 熊亮, 孙骥, 等. 嫦娥四号任务中继星“鹊桥”技术特点. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 138–146
Zhang L H, Xiong L, Sun J, et al. Technical characteristics of the relay communication satellite “Queqiao” for Chang’e-4 lunar farside exploration mission (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 138–146, doi: 10.1360/N092018-00375

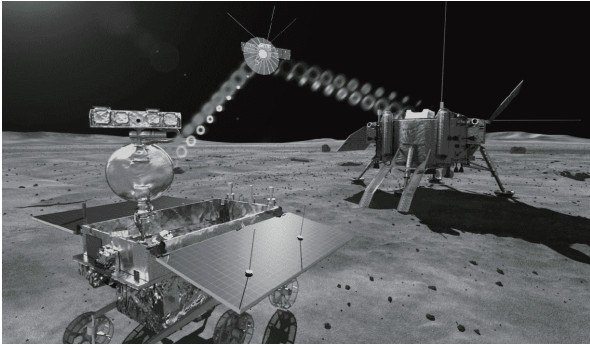


图1 (网络版彩图)嫦娥四号任务示意图

美欧又提出了多个针对月球背面和两极地区的探测任务, 如何解决中继通信的问题也是研究论证的重点^[6-10]. 尽管月球中继通信卫星的想法已提出并研究论证了很多年, 由于技术风险、研制经费等原因一直未能在工程上实现, 嫦娥四号任务则把50多年来的想法变成了现实, 中继星“鹊桥”成为世界上首颗月球中继通信卫星.

2.1 鹊桥的任务特点

根据嫦娥四号月球背面软着陆探测任务的需求, 鹊桥与运载火箭在地月转移轨道分离后, 需要利用自身的推进系统实现到地月L2平动点的转移, 完成绕地月L2平动点晕(Halo)任务轨道的捕获和修正, 并在该轨道上长期稳定运行; 鹊桥要提供月球背面的嫦娥四号着陆器、巡视器与地面站之间的前向/返向的实时和延时中继通信, 如图2所示. 卫星的在轨工作寿命要达到3年以上.

嫦娥四号中继星的主要任务特点如下:

(1) 中继通信为主. 要能够为嫦娥四号任务的着陆器和巡视器提供环月段、动力下降段以及月面工作段的中继通信支持, 是一个服务保障性的任务, 卫星的中继通信接口必须与着陆器和巡视器的已有状态相匹配.

(2) 兼顾科学探测. 在完成中继通信任务的同时, 为充分发挥卫星效益, 还要携带一些科学和技术试验载荷, 包括国际合作的科学载荷, 开展空间科学探测和技术试验.

(3) 任务轨道特殊. 为了保证与月球背面的着陆器和巡视器长期连续可见, 鹊桥运行在绕地月L2平动点轨道上, 将是世界上首颗采用绕地月平动点Halo轨道的卫星.

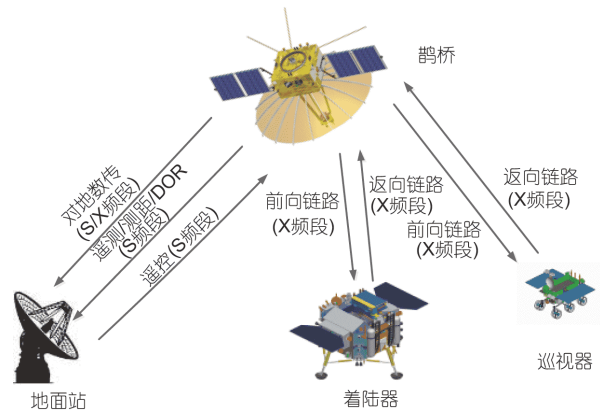


图2 (网络版彩图)鹊桥的中继通信与测控链路

(4) 可靠性要求高. 要为着陆器和巡视器提供中继通信保障, 能否可靠工作, 不仅仅影响鹊桥自身, 还直接影响整个嫦娥四号任务成败, 无论是中继通信载荷还是平台各分系统, 必须要绝对可靠.

2.2 鹊桥面临的主要技术挑战

鹊桥是针对嫦娥四号月球背面软着陆和巡视勘察探测任务而研制的一颗专用中继通信卫星, 运行轨道特殊, 技术状态新, 研制难度大, 面临诸多技术挑战, 主要包括以下5个方面.

2.2.1 适合月球背面中继通信任务的轨道选择和设计

为了对月球背面的着陆器和巡视器提供连续的中继通信保障, 鹊桥所选择的任务轨道非常特殊, 将运行在绕地月L2平动点的轨道上^[11]. 与日地系统相比, 地月系统平动点轨道的周期更短、第二主天体的轨道偏心率更大、太阳作为第三引力体的影响更强, 绕地月L2平动点运行的轨道类型很多, 包括Halo轨道和Lissajous轨道等, 每种轨道类型, 又可以有不同的振幅选择, 各种振幅的Halo轨道如图3所示, 因此, 建立高精度的动力学模型、选择和设计满足任务要求的轨道、制定有效的轨道维持控制策略等都面临挑战. 同时与日地平动点轨道相比, 航天器在地月平动点轨道的运行经验也很有限, 直到2010年, 美国ARTEMIS任务的两个航天器才首次进入了地月系统L1和L2平动点轨道, 但运行时间较短^[12]. 我国的嫦娥五号试验验证器也在完成预定试验任务后进入到绕地月L2平动点轨道进行了短期的飞行试验^[13,14]. 这三个飞行器采用的都是Lis-

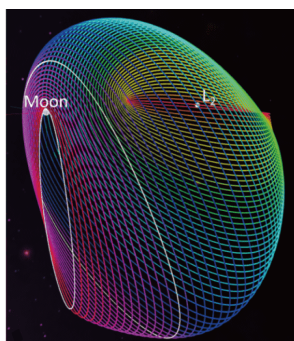


图3 (网络版彩图)绕地月L2平动点的各种振幅Halo轨道

sajous轨道, 鹊桥选择的则是Halo轨道, 轨道捕获和轨道维持控制的要求更高^[15,16].

2.2.2 中继通信系统方案的选择和设计

由于要与着陆器和巡视器的状态兼容, 鹊桥中继通信的各工作频段接近, 同时由于通信距离远, 卫星接收到的信号电平弱, 射频发射功率又比较大, 根据任务要求, 包括对地数传链路、中继返向链路, 中继前向链路在内的各个通信链路还有同时工作的要求, 电磁环境复杂, 必须在设计上解决好电磁兼容问题。

鹊桥的中继通信模式复杂, 通信链路工作在多个频点和多种码速率下, 最低的码速率只有0.7 kbits/s, 同时由于距离远, 信噪比也比较低, 中继通信返向链路接收到的信号电平均为-140 dBm. 如何在低码速率、低信噪比、多普勒变化条件下进行连续可靠的解调也是中继通信系统必须攻克的难关, 对电路设计、算法选择都提出了较高的要求, 需要设计出能够适应多种码速率、并且在各种条件下都能可靠工作的捕获与跟踪算法。

2.2.3 大口径高增益中继通信天线的研制

中继通信天线的尺寸直接决定了中继通信链路的性能, 特别是接收着陆器和巡视器数据的返向链路能力, 主要由天线的性能决定. 因此, 在满足各方面约束条件的情况下, 应尽可能采用大口径的高增益天线. 由于鹊桥运行在绕地月L2平动点Halo轨道上, 离嫦娥四号着陆器和巡视器的最远距离达到79000 km, 并且受着陆器和巡视器的发射功率以及天线口径的限制, 为了保证中继通信链路的性能, 鹊桥必须选择大口径的高增益通信天线。

受制于整星重量的约束, 中继通信天线在实现大口径和高增益的同时, 还必须做到重量轻. 已有的成熟产品无法同时满足这些要求, 因此必须研制新的天线产品. 中继通信天线是鹊桥完成中继通信任务最关键的一个部件, 并且是整星的单点环节, 必须确保可靠解锁, 顺利展开, 在轨型面稳定, 性能指标达标. 在研制过程中要采取有效的设计措施, 并针对天线的解锁释放、展开锁定、型面精度等关键环节开展充分的仿真分析和地面试验验证。

2.2.4 天线指向的精准跟踪控制

嫦娥四号任务的中继通信链路工作在超远距离下, 为确保中继通信链路畅通, 对中继通信天线的增益要求高, 天线的可用波束范围较窄, 必须控制在 0.2° 范围内. 由于中继通信天线尺寸大, 天线自身带二维驱动机构进行指向跟踪控制的代价较大, 无法满足重量约束条件, 因此在不使用指向调节机构的前提下, 解决好中继通信天线的高精度指向跟踪控制问题。

卫星入轨后, 由于热变形等因素影响, 中继通信天线实际的在轨指向存在不确定性. 如何评价天线的在轨指向状态, 也是需要解决的一个关键问题. 卫星在轨运行时要能够有办法对天线指向进行准确测试和评价, 必要时还能够对指向偏差进行修正。

2.2.5 对长阴影导致的低温环境的适应性

鹊桥在使命轨道上运行过程中, 会经历数次持续较长时间的阴影. 星上部分设备, 特别是安装在散热面上的大功率设备和远离星体的部件, 在阴影期间, 会面临严酷的低温环境条件, 如图4所示, 中继通信天线上远离星体的一些肋、张力绳、金属网等部件的温度会降到 -200°C 以下. 一方面在热设计和卫星工作模式设计上要有针对性的措施, 另一方面还必须在地面进行充分的试验验证, 确保星上设备能够安全度过长阴影。

上述技术问题的解决是完成好嫦娥四号中继通信任务的关键, 特别是鹊桥的研制还面临着可靠性要求高、重量约束严等多方面的限制条件, 必须在深入分析嫦娥四号中继通信任务特点的基础上, 综合权衡, 统筹兼顾, 确定合理可行的解决方案。

此外, 鹊桥不同于以往探月工程任务的探测器, 它还是一个短周期、低成本的项目, 要求在不到30个月

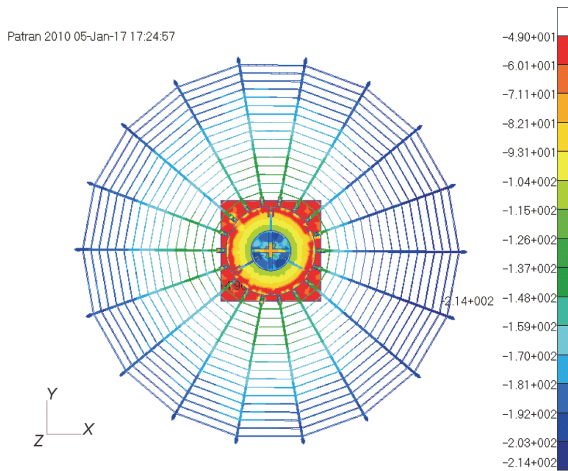


图4 (网络版彩图)长阴影期间的卫星温度水平

的时间内,完成卫星的全部研制工作,总体技术方案的确定也要综合考虑这些因素,在确保质量和可靠性的前提下,优化总体技术方案和研制技术流程,保证按期完成任务。

在鹊桥的研制过程中,解决了大口径高增益可展开天线研制、地月平动点轨道设计和中继通信天线高精度指向控制等技术难点问题,采用了诸多新技术、新设计和新产品,确定了满足任务需求和各方面约束条件的总体技术方案,并严格按照计划节点要求完成了卫星的研制、发射和在轨测试任务,在国际上首次实现了月球背面探测器与地面站间的中继通信,为嫦娥四号任务的按期实施奠定了基础。

3 鹊桥的总体技术方案和飞行任务流程

3.1 总体方案概述

鹊桥基于中国空间技术研究院的CAST100小卫星平台研制,该平台集成度高,能够较好地满足整星重量要求,鹊桥的发射重量为448.7 kg,太阳电池阵最大输出功率约800 W。卫星本体为长方体构型,本体尺寸为1.4 m×1.4 m×0.85 m,卫星结构采用铝蜂窝夹层板式结构形式(图5)。

鹊桥由平台和载荷两部分组成,其中载荷包括中继通信、天线、科学与技术试验载荷3个分系统;平台由星务管理、制导导航与控制(GNC)、测控、电源、结构与机构和热控6个分系统组成,鹊桥的系统组成如图6所示。

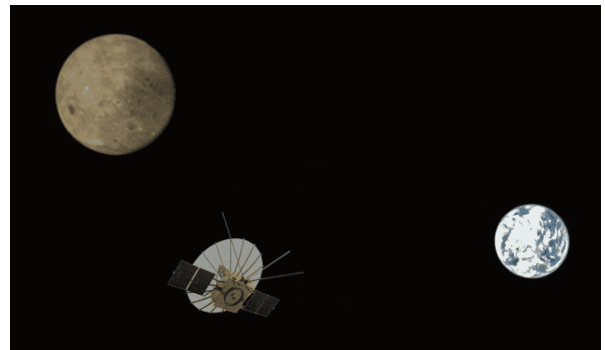


图5 (网络版彩图)鹊桥在轨运行状态示意图(图中的地月合影为鹊桥上的相机在Halo轨道上拍摄的)

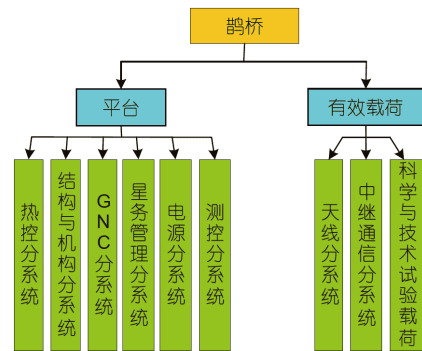


图6 (网络版彩图)鹊桥系统组成框图

GNC分系统采用了“星敏+光纤陀螺”定姿方式,整星零动量的姿态控制方式,能够对目标指向进行连续跟踪控制,指向控制精度优于 0.06° ,姿态稳定度优于 $0.005^\circ/s$ 。采用单组元推进系统,携带了105 kg无水肼推进剂,可提供超过550 m/s速度增量的轨道控制能力。配置了12个5 N发动机和4个20 N发动机,满足到绕地月L2平动点使命轨道的轨道转移、轨道捕获和在使命轨道上的轨道维持控制要求。

电源分系统采用面积为 3.8 m^2 的两个太阳电池阵和45 A h的高比能量锂离子电池组为星上设备供电,采用不调节供电母线及分散式的配电体制,非地影期间的母线电压可维持在 $(29.5 \pm 1) \text{ V}$ 。

对地测控采用统一S频段测控体制(USB测控体制),两台模拟应答机和两台数字应答机实现双点频异构备份,确保卫星能够在任意姿态下对地测控链路畅通,配置两台10 W固态放大器和六付低增益螺旋天线(其中四付接收天线,两付发射天线),上行码速率1000 bits/s,下行码速率2048 bits/s。

对月中继通信链路为X频段, 采用口径 Φ 4.2 m的高增益伞状抛物面天线; 中继通信的前向链路为PCM/PSK/PM调制方式, 采用两个20 W固态放大器, 对着陆器和巡视器的码速率均为125 bits/s. 反向链路采用二进制相移键控(BPSK)调制方式, 对着陆器的反向接收码速率有1.4, 50, 280和555 kbits/s 4种, 对巡视器的反向接收码速率有0.7, 140和285 kbits/s 3种. 对地数传采用S频段, BPSK调制方式, 配置了两台43 W功放和一副中增益螺旋天线, 码速率有1, 2, 4和10 Mbits/s可选; 在分时工作模式下, 对地数传链路还可以通过姿态机动使用对月的高增益抛物面天线实现X频段对地数据传输, 码速率为10 Mbits/s.

除了完成中继通信任务外, 鹊桥还具备一定的拓展应用能力, 一方面搭载的科学和技术试验载荷能够开展科学探测和技术试验任务, 另一方面, 卫星的设计寿命达到5年以上, 还有望对未来其他国家月球背面或两极的着陆探测任务提供中继通信服务.

3.2 在轨飞行任务流程

鹊桥的在轨飞行任务过程比较复杂, 包括地月轨道转移, 月球到地月L2点转移, L2点Halo使命轨道捕获, 在轨测试、天线指向标定、与着陆器和巡视器中继通信链路联试, 落月过程中的中继通信支持, 月面初始化和两器分离阶段的中继通信支持和两器在月面工作的中继通信支持等阶段.

2018年5月21日, 鹊桥由长征四号丙运载火箭在西昌卫星发射中心成功发射, 星箭分离后, 太阳能电池阵、伞状抛物面天线顺利解锁展开, 卫星建立了正常飞行姿态(图7).

2018年5月25日晚, 经过4天多的飞行后, 鹊桥到达月球附近, 在距月面约100 km处成功实施了近月制动, 四台20 N轨控发动机点火912 s后正常关机, 顺利进入月球至地月L2平动点的转移轨道. 6月14日, 中继星通过捕获控制, 最终进入绕地月L2平动点运行的Halo使命轨道. 本次捕获控制的成功实施意味着通过5次精准的轨道控制, 鹊桥成为世界首颗运行在地月L2点Halo轨道上的航天器.

鹊桥到达使命轨道后开始了在轨测试, 至2018年7月20日, 完成了全部在轨测试工作, 包括平台在轨测试, 有效载荷在轨测试, 中继通信天线指向测试标定, 与地面的着陆器和巡视器之间的中继通信链路测试等

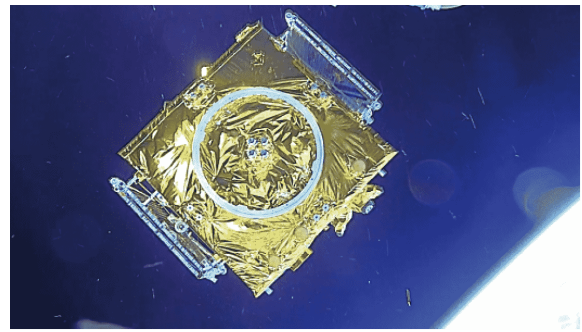


图7 (网络版彩图)鹊桥与CZ-4C火箭刚分离后的照片

内容. 着巡组合体发射进入环月轨道后, 又与着陆器和巡视器进行了4次中继通信链路的在轨测试, 测试结果表明, 鹊桥在轨工作状态良好, 各项功能和性能满足指标要求, 具备了为着陆器和巡视器提供中继通信保障的能力.

2019年1月3日, 在鹊桥的支持下, 嫦娥四号探测器成功着陆于月球背面的预选着陆区, 巡视器与着陆器成功分离, 鹊桥传回了落月过程的图像和世界第一张近距离拍摄的月背影像图, 并支持着陆器和巡视器完成了后续的月面行走、科学载荷开机等工作任务, 提供了稳定可靠的中继通信保障, 开启了人类月球探测新篇章.

4 鹊桥的技术特点和创新点

4.1 首次采用绕地月平动点运行的Halo轨道

为了能够与着陆器和巡视器实现连续的中继通信, 鹊桥采用了绕地月L2平动点运行的Halo轨道. 该种轨道自20世纪60年代由美国的Farquhar提出以来还没有在绕地月平动点运行的航天器上采用. 针对嫦娥四号中继通信任务需求, 设计了Z向振幅13000 km的南向Halo轨道, 并优化了轨道维持控制策略. 根据鹊桥轨道维持的在轨实施情况, 从6月14日进入使命轨道到12月14日的半年运行期内, 共进行了20次轨道维持, 平均9天维持一次, 平均每次维持的速度增量为0.39 m/s, 对应的推进剂消耗约80 g, 各次轨道维持控制均正常, 确保了鹊桥能够在使命轨道上稳定运行.

为了安全可靠地到达使命轨道, 在充分继承以往嫦娥任务轨道转移方案的基础上, 根据任务特点和推进系统配置, 制定了优化的轨道转移和轨道捕获控制

策略. 由于长征四号丙运载火箭发射入轨精度高, 鹊桥飞往月球的过程中仅进行了一次中途修正, 另外鹊桥各次轨道测量与控制的精度高, 原定的12次轨道控制只实施了5次, 共节省推进剂16.8 kg, 为延长鹊桥在轨运行寿命创造了条件.

鹊桥实际飞行结果表明轨道设计合理, 在该轨道上获取的长期运行经验对未来地月平动点的开发利用具有重要价值.

4.2 首个支持月球探测任务的专用中继通信系统

针对鹊桥中继通信工作模式多、电磁环境复杂的特点, 在设计上通过上下行隔离、前返向隔离、天线隔离等措施, 保证了中继通信系统电磁兼容, 并通过多项试验验证了系统电磁兼容性能满足要求.

针对中继通信任务需求, 研制开发了X频段20 W 固放、波导开关、下变频器、对月调制器、对月解调器等一批新产品, 采用再生转发方式, 构建了与着陆器和巡视器相匹配的集成高效的X频段中继通信系统, 在地月平动点轨道上得到成功应用.

为了解决中继返向链路在低信噪比、低码速率、多普勒变化条件下连续可靠解调的技术难题, 设计了高效、稳定的捕获与跟踪算法, 并开展了大量的仿真、测试和试验验证, 保证了低码速率下返向链路的稳定可靠解调. 巡视器落月后第一个月昼期间的中继通信链路在轨运行结果表明, 0.7 kbits/s低码速率下的返向链路解调稳定, 链路连续可靠, 表明该技术难点得到有效解决.

4.3 固网结合的高增益可展开天线首次在轨应用

结合远距离中继通信的任务需求和目前国内大口径天线的研究基础, 鹊桥最终选择了固网结合的可展开伞状抛物面天线技术方案. 该天线展开状态下的口径为4.2 m, 增益达到45 dB, 是迄今国内外深空探测任务中所采用的最大口径通信天线, 如图8所示. 该天线发射时收拢, 入轨解锁后采用弹簧机构展开.

在研制过程中针对该天线解锁展开的可靠性、型面精度保证、低温环境的适应性等关键环节开展了充分的仿真分析和地面试验验证, 卫星发射后, 天线顺利解锁展开, 在轨测试和两器落月后的中继链路工作结果表明, 天线性能满足任务要求. 该天线性能优、重量轻, 在未来的深空探测及其他航天任务中具有非常

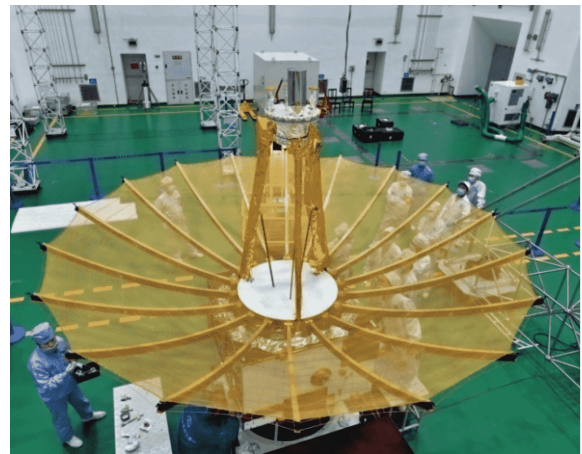


图8 (网络版彩图)卫星发射前的中继通信天线展开测试

广阔的应用前景.

4.4 采用单组元推进系统实现了大速度增量轨道控制

轨道转移控制是鹊桥顺利到达使命轨道的关键环节, 与以往的探月任务不同, 鹊桥采用了单组元的肼推进系统实现了近月制动等需要大速度增量的轨道控制, 星上共配置了4台20 N推力轨控发动机, 正常情况下4台发动机同时工作, 故障情况下2台工作也能完成任务, 同时5 N推力的姿控发动机还能起到一定的备份作用, 工作组合多, 与以往嫦娥任务采用的单个大推力轨控发动机方案相比, 完成轨道转移任务的可靠性大大提高.

在近月制动中, 鹊桥的4个20 N发动机连续点火时长超过900 s, 为单组元发动机在轨最长连续点火时间, 顺利完成了轨道控制任务. 为了提高轨道控制精度, 采用了分段式的轨控方式, 当剩余速度增量大于0.3 m/s时, 采用20 N发动机工作, 否则采用5 N姿控发动机调制控制方式, 控制结果表明, 近月制动控制的速度误差小于0.02 m/s.

4.5 实现了中继通信天线的高精度指向控制和在轨标定

由于中继通信天线自身难以使用指向调节机构, 为了解决天线高精度指向跟踪控制的难题, 在设计上巧妙利用了Halo使命轨道的特点, 通过卫星平台的指向控制来实现中继通信天线对着陆器和巡视器的高精

度指向, 在研制过程中对影响天线指向精度的各种因素进行了详细的分析, 对关键环节进行了量化控制, 并开展了充分的仿真分析和试验验证, 确保了天线指向精度满足 0.2° 的要求。

首次在轨实现了对高精度天线指向的精确测试标定, 卫星入轨后, 采用上海天马站的65 m射电天线对中继通信天线指向进行了标定, 卫星按照螺旋/十字交叉方式进行扫描, 星上通过中继通信前向链路发送单载波信号, 地面进行功率测量, 根据接收到的电平信号, 结合卫星姿态数据得出了天线指向偏差。鹊桥在不同轨道位置下的标定测试结果表明, 中继通信天线的指向精度在 0.1° 以内, 共进行了7次标定测试, 指向偏差的均方根值为 0.061° , 实际在轨飞行结果表明, 在着巡组合体环月、落月以及两器月面工作过程中, 中继通信天线指向均满足要求, 保证了中继通信链路的畅通。

4.6 再生伪码测距技术首次在轨应用

再生伪码测距技术具有消除无线电信号上行链路噪声的特性, 能够增强测距信号下行链路有效功率, 相比传统的透明转发测距技术有明显的优势, 非常适合低信噪比条件下的深空探测任务使用。美国和欧洲的深空探测器中已经采用了再生伪码测距技术, 能够使接收到的测距信号功率谱密度提高约30 dB。鹊桥的USB数字应答机是我国首台S频段全数字化深空任务应答机, 首次实现了再生伪码测距功能, 大大提高了测距能力, 测距灵敏度从 -115 dBm提升到 -140 dBm以上, 为未来的深空任务应用奠定了技术基础。

4.7 3D打印产品首次在轨应用

为了满足严格的整星重量约束条件, 鹊桥在减重方面开展了很多卓有成效的工作, 除了零配重的构型布局设计、应用轻小型化产品、采用铝镁合金机箱等传统的减重措施外, 部分星上设备支架还采用了3D打印的新技术手段(图9)。鹊桥的3D打印产品采用拓扑优化构型, 通过与轻量化设计技术结合, 减重效果显著。以星敏传感器支架为例, 采用传统设计的支架重量为0.46 kg, 采用3D打印设计的支架重量仅为0.19 kg。3D打印技术的在轨飞行验证, 对未来的应用有重要意义。

4.8 将进行最远距离的激光测距

鹊桥上搭载了由中山大学研制的大尺寸空心角锥

反射镜, 将在使命轨道上与地面站之间进行超远距离的激光测距试验^[17]。以往最远距离的激光测距为地月之间的激光测距, 此次地月L2平动点轨道上将进行最远48万km的激光测距试验, 星地配合, 验证远距离激光测距的关键技术。

4.9 低频射电探测国际合作科学载荷有望取得新的科学成果

鹊桥上还装载了由荷兰内梅亨大学和ISIS公司等单位联合研制的低频射电探测仪(NCLE)(图10), 能够在射电甚长波段进行天空背景的探测, 包括来自地球、太阳、太阳系大行星以及来自银河系的低频射电辐射, 获取100 kHz~80 MHz的宇宙低频射电数据, 研究宇宙低频射电的时间和频谱变化特征。将鹊桥获取的低频射电探测数据与欧洲的地面低频阵列观测系统(LOFAR)获取的数据进行干涉测量, 有望取得新的成果, 并为未来的黑暗时代和宇宙黎明时期低频射电探测奠定技术基础。

4.10 一系列高集成度的轻小型化新产品成功实现首飞, 未来应用前景广阔

为我国火星探测器研制的新一代惯性测量敏感器

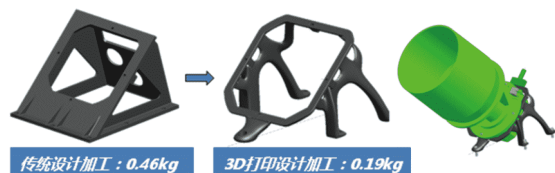


图9 (网络版彩图) 3D打印的星敏传感器支架



图10 (网络版彩图)中国和荷兰合作的低频射电探测仪载荷

首先在鹊桥上得到了应用, 该产品集成了光纤陀螺和石英挠性加速度计, 采用了多项轻量化设计措施, 在保证精度指标的前提下, 整机重量和尺寸大幅减小。

中继通信链路采用了X频段R型波导开关, 以往均为进口产品, 鹊桥采用了五院西安分院自主研发的产品, 成功实现了首飞。基于多芯片封装(MCM)技术的新型频率源和小型化电源模块也首次在轨应用, 产品集成度高, 性能指标先进, 未来将得到广泛应用。

5 月球中继通信卫星的未来发展展望

随着月球探测的蓬勃发展, 未来会有更多的探测器涉足对地永久或长时间不可见的月球背面以及两极地区, 中继通信是完成这些月球探测任务的重要保障条件。

今后的月球探测任务将对中继通信提出更高的要求, 覆盖范围要更广、通信速率要更高、实时性要更强、支持用户要更多, 运行寿命要更长。

由于未来的月球探测任务所获取的科学数据会越来越多, 月球中继通信卫星必须要具备远距离大容量数据传输的能力, 要通过激光链路等新的技术手段实现高码速率的数据传输。通过建立环月轨道、地月平动点轨道等多种轨道卫星组成的星座系统, 最终形成全月面、全时段的覆盖能力。月球中继通信卫星系统要具备较强的灵活性和适应性, 链路参数能够根据使用环境和用户需求动态调整, 并能够根据新的任务需

求灵活配置, 使中继通信链路和使用环境和用户需求达到最佳匹配, 提高中继通信链路的利用率。月球中继通信卫星系统的建设, 也必须考虑到国际联网能力、互操作性、通用性的要求, 能够为国际和商业用户提供有效的服务。

月球中继通信卫星的发展还要放在整个深空任务通信体系中来考虑, 统筹兼顾, 协调发展。未来的中继通信能力还要与导航定位能力统筹考虑, 共享平台资源, 形成综合服务能力, 为无人探月任务和载人登月任务提供更全面的信息保障。

6 结束语

嫦娥四号任务实现了人类航天器在月球背面首次软着陆和巡视勘察探测, 鹊桥也首次在绕地月L2平动点轨道上实现了月球中继通信, 意义重大, 举世瞩目。在鹊桥的研制过程中解决了一系列技术难点, 确定了合理可行的总体技术方案, 制定了优化的飞行程序, 在轨测试和实际飞行结果表明, 鹊桥的各项功能和性能满足任务需求, 为着陆于月球背面的着陆器和巡视器提供了稳定可靠的中继通信保障。

鹊桥的成功在轨运行开辟了月球中继通信的新领域, 对支持我国探月工程后续任务中继通信卫星系统的发展具有重要意义, 同时也为未来基于地月平动点轨道构建新型航天器系统, 拓展应用领域奠定了良好的技术基础。

参考文献

- 1 吴伟仁, 王琼, 唐玉华, 等. “嫦娥四号”月球背面软着陆任务设计. *深空探测学报*, 2017, 4: 111–117
- 2 Tang Y, Wu W, Qiao D, et al. Effect of orbital shadow at an Earth-Moon Lagrange point on relay communication mission. *Sci China Inf Sci*, 2017, 60: 112301
- 3 Wu W, Tang Y, Zhang L, et al. Design of communication relay mission for supporting lunar-farside soft landing. *Sci China Inf Sci*, 2018, 61: 040305
- 4 Farquhar R W. Lunar communications with libration-point satellites. *J Spacecr Rockets*, 1967, 4: 1383–1384
- 5 Neuner G E. Lunar communication satellites. In: *AIAA Communication Satellites Systems Conference*. Washington, 1966
- 6 Oleson R, McGuire M L. COMPASS final report: Lunar relay satellite (LRS). NASA/TM-2012-217140. Cleveland: Glenn Research Center, 2012
- 7 Burns J O, Kring D A, Hopkins J B, et al. A lunar L2-farside exploration and science mission concept with the Orion Multi-Purpose Crew Vehicle and a teleoperated lander/rover. *Adv Space Res*, 2013, 52: 306–320
- 8 Mimoun D, Wiczeorek M A, Alkalai L, et al. Farside explorer: Unique science from a mission to the farside of the moon. *Exp Astron*, 2012, 33: 529–585
- 9 Parker H K J, Born G H, Demandante N. A lunar L2 navigation, communication, and gravity mission. In: *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist*

- Conference. Keystone, 2006. 21–24
- 10 Hamera K, Mosher T, Gefreh M. An evolvable lunar communication and navigation constellation concept. In: 2008 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, 2008
- 11 高珊, 周文艳, 梁伟光, 等. 地月拉格朗日L2平动点中继星轨道分析与设计. 深空探测学报, 2017, 4: 122–129
- 12 Folta D, Sweetser T. ARTEMIS mission overview: From concept to operations. In: AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. Girdwood, Alaska, 2011
- 13 Liu L, Li J. CHANG'E-5T1 extended mission: The first lunar libration point flight via a lunar swing-by. *Adv Space Res*, 2016, 58: 609–618
- 14 刘磊, 唐歌实, 胡松杰, 等. 月球探测再入返回试验后续飞行方案研究. 宇航学报, 2015, 36: 9–17
- 15 Pavlak T, Howell K. Strategy for long-term libration point orbit stationkeeping in the earth-moon system. In: AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference. 2011
- 16 Folta D C, Pavlak T A, Haapala A F, et al. Earth–Moon libration point orbit stationkeeping: Theory, modeling, and operations. *Acta Astronaut*, 2014, 94: 421–433
- 17 何芸, 刘祺, 田伟, 等. 地月第二拉格朗日点卫星激光测距技术研究. 深空探测学报, 2017, 4: 130–137

Technical characteristics of the relay communication satellite “Queqiao” for Chang’e-4 lunar farside exploration mission

ZHANG LiHua¹, XIONG Liang¹, SUN Ji¹, GAO Shan², WANG XiaoLei³ & ZHANG AiBing⁴

¹ DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China;

² Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

³ Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China;

⁴ Academy of Space Information Systems, Xi'an 710100, China

Chang’e-4 (CE-4) is a mission that probes land softly on the farside of the Moon to perform scientific exploration for the first time in the world. The relay communication for the lander and the rover on the lunar farside to maintain contact with the Earth stations during their landing and surface operation is a key problem to be resolved. As an important part of Chinese Chang’e-4 farside exploration mission, Queqiao relay communication satellite provides relay communication support for the lander and the rover on the lunar farside. Different from other spacecraft for lunar mission, a Halo orbit around the Earth-Moon libration point 2 is used first in the world to provide a continuous communications links to the lander and the rover on the farside of the Moon. A series of technical challenges have to be faced. Based on the analysis to the mission characteristics and mission requirements, the technical difficulties are identified and solutions for these problems are given, including selection and design of mission orbit, the relay communication system design trade-off, onboard instruments’ adaptability to the very low on-orbit temperature environments, etc. The system design overview and flight profile of the Queqiao are given in this paper. Technical characteristics and technical innovation of the Queqiao satellite are summarized. The future technical development prospect or lunar relay communication missions is also given in this paper.

Chang’e-4 lunar exploration mission, Earth-Moon libration point 2, relay communication, technical characteristics

doi: [10.1360/N092018-00375](https://doi.org/10.1360/N092018-00375)