

嫦娥三号探测器技术进步与推动

孙泽洲, 贾阳*, 张焯

北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

* E-mail: jiayangdoc@sohu.com

收稿日期: 2013-07-31; 接受日期: 2013-09-17

国家中长期科技发展规划重大专项资助项目

摘要 嫦娥三号探测器的任务目标是实现我国在地球以外天体的首次软着陆和巡视探测, 在探测器研制技术特点分析的基础上, 分析了各项关键技术已取得的突破, 以及嫦娥三号的技术推动作用.

关键词
探测器
技术进步
技术推动

1 引言

探月工程属于我国中长期科技发展规划重大专项, 分“绕、落、回”三期工程实施. 探月工程二期工程中将通过嫦娥三号探测器实现我国首次在地球以外天体实施软着陆和巡视探测的目标, 是航天技术发展的又一个里程碑. 月球软着陆探测与自动巡视勘察是我国航天活动的全新领域, 涉及探测器、运载火箭、发射场、测控、地面应用等系统, 必须突破月球软着陆技术、月面巡视技术、月夜生存技术、测控通信技术、综合电子技术、月球探测科学及仪器技术等系统层面的关键技术.

嫦娥三号探测器的科学探测项目主要包括月表形貌与地质构造调查、月表物质成分和资源勘察、日一地一月空间环境探测与月基天文观测^[1].

从航天技术进步与技术推动的角度看, 月球软着陆探测具有重要意义, 工程技术目标可概括为以下3点^[2].

1) 突破月球软着陆探测、巡视勘察技术及其他相关技术. 包括地月飞行轨道技术、月球软着陆技术、月面巡视勘察技术、遥操作技术、测控通信技术、

月面特殊环境下探测器的热控与电源技术等.

2) 研制和发射月球探测器. 根据任务需求, 探测器系统包括着陆探测器、巡视探测器, 并携带相关的科学探测仪器.

3) 建立月球探测航天工程基本系统. 包括研制月球软着陆探测器、月面巡视探测器, 建设深空测控通信网, 改进地面应用和数据处理系统, 改进运载火箭和发射场, 形成配套的月球探测工程系统.

2 嫦娥三号探测器简介

嫦娥三号探测器经过地月转移段、环月段和动力下降段的飞行, 在月表选定的区域实施软着陆, 着陆器开展就位探测, 巡视器开展巡视勘察, 并把探测数据传回地面. 嫦娥三号探测器是全新的航天器, 是我国第一次在地球以外的天体上进行就位和巡视探测. 嫦娥三号探测器飞行过程如图1所示, 软着陆过程如图2所示.

嫦娥三号探测器包括月球软着陆探测器(简称着陆器)和月面巡视探测器(简称巡视器)2个部分, 如图

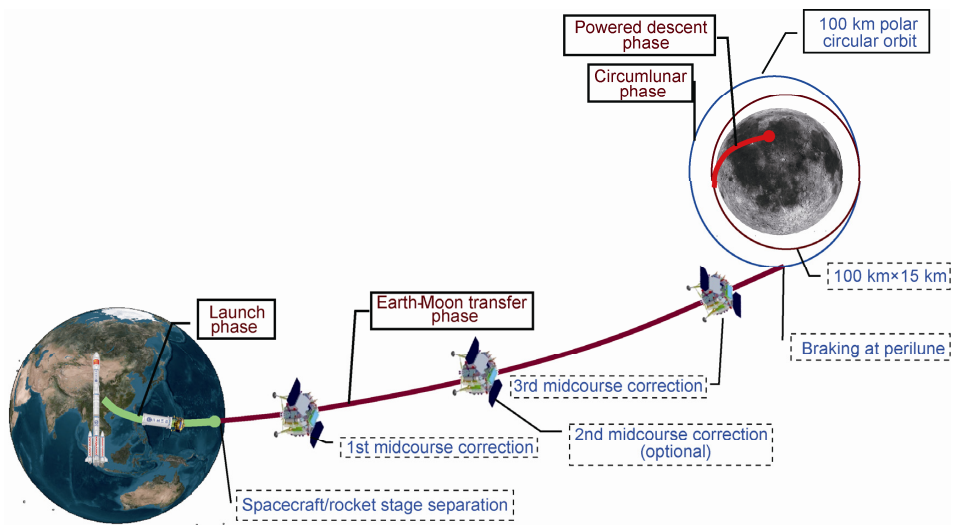


图1 嫦娥三号探测器飞行过程

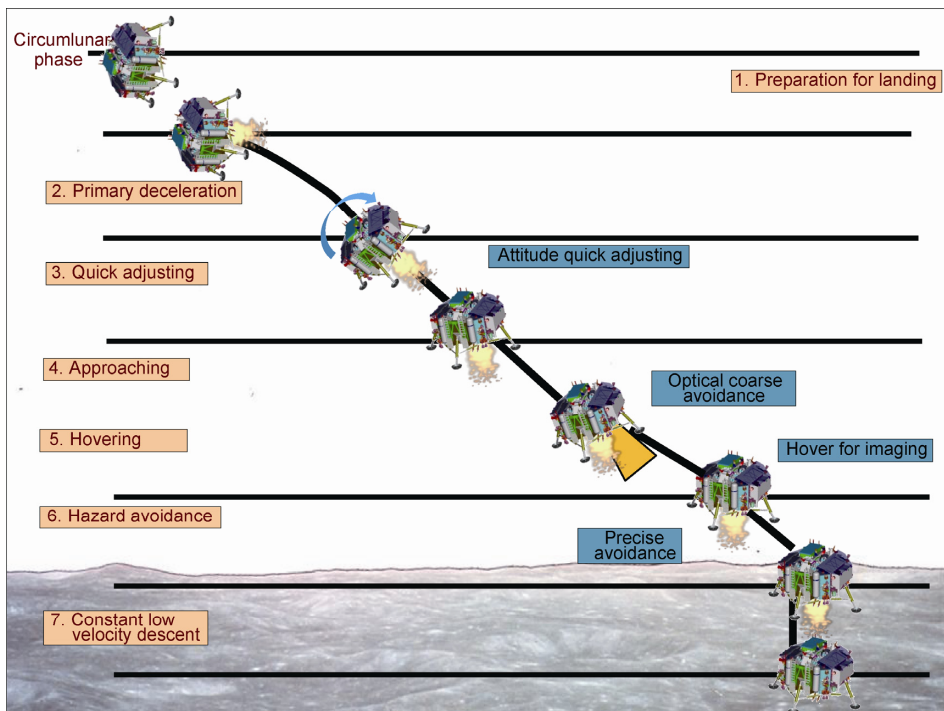


图2 嫦娥三号探测器软着陆过程

3 所示. 着陆器包括推进、着陆缓冲等 11 个分系统. 月昼期间, 在能源、热控和测控通信的保障下, 利用月基光学望远镜、极紫外相机和地形地貌相机开展科学探测工作. 巡视器包括移动等 9 个分系统. 月昼期间, 在能源、热控和测控通信的保障下, 实现月面巡视探测, 利用测月雷达、红外光谱仪、全景相机、粒子激发 X 谱仪开展科学探测工作. 月夜期间, 2 个探

测器进入月夜休眠模式, 基于同位素热源(RHU)和两相流体回路, 实现月夜生存. 如图 4 所示.

3 嫦娥三号探测器任务特点分析

与嫦娥一号、嫦娥二号相比, 嫦娥三号探测器的技术跨度大, 设计约束多, 具有以下任务特点.

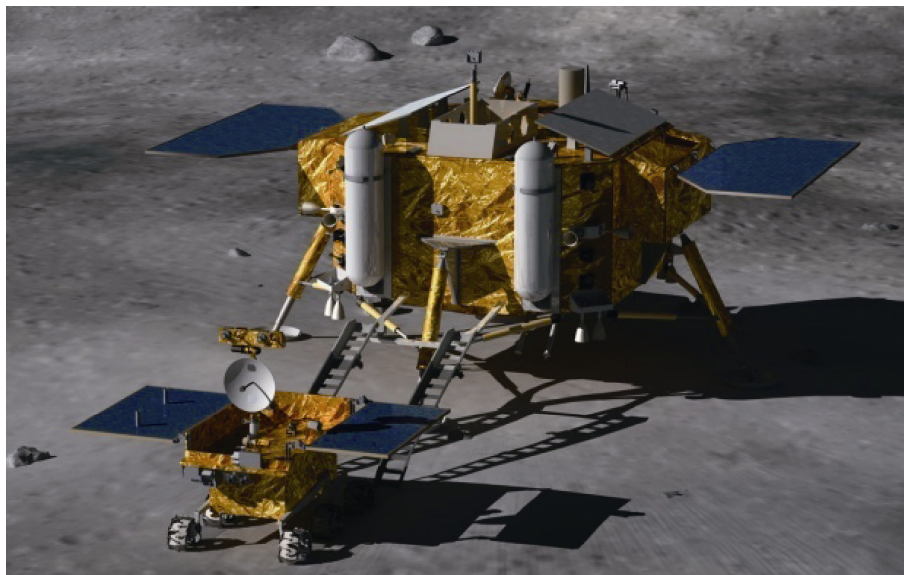


图3 嫦娥三号探测器

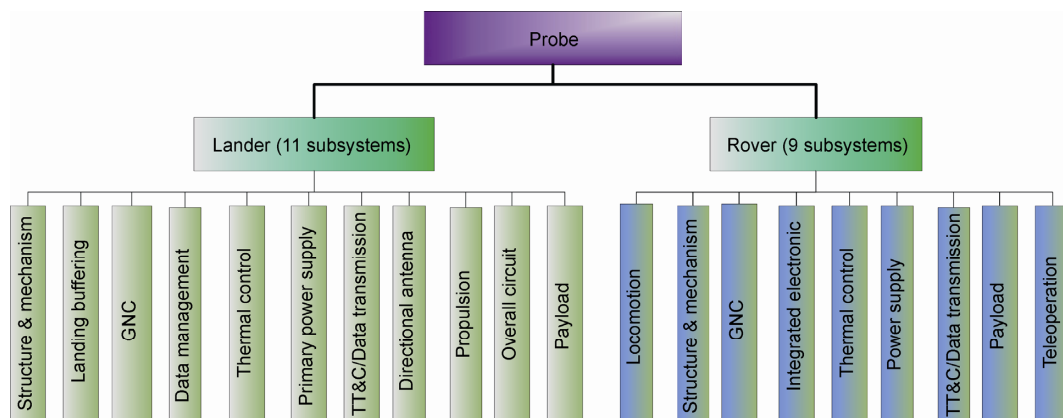


图4 嫦娥三号探测器组成

3.1 月面环境的不确定性

在对嫦娥一号、嫦娥二号探测结果进行分析, 以及对国外资料进行调研的基础上, 形成对月面环境, 尤其是对着陆点环境的认识, 包括月面形貌、热流与温度、空间粒子辐照环境等, 对着陆冲击、发动机羽流等诱导环境的研究也有了明确的结论. 但是由于着陆点分布、月面形貌细节、月尘影响等因素, 还存在不确定性, 需要探测器设计具有一定的环境适应能力裕度.

3.2 着陆的减速

由于月球表面无大气, 无法利用气动减速的方

式实现软着陆, 探测器需靠自身推进系统减小约 1.7 km/s 的速度, 在此过程中要进行探测器姿态的精确调整, 保证探测器与月表的法向相对速度减至小于 3.8 m/s, 并着陆在预定区域; 为保证着陆过程可控, 还需探测器的推力可调, 对推进系统的设计提出了很高的要求.

3.3 着陆段的自主导航控制

月球软着陆的动力下降过程时间较短(约 700 s)、速度变化大(1.7 km/s), 无法依靠地面来实施制导、导航与控制, 需探测器利用基于对月测速、测距和地形识别的传感器自主实现. 月球表面地形复杂, 为保证探测器着陆后不翻倒、不陷落, 需 GNC 系统具备一

定的地形识别和自主避障能力。

3.4 着陆冲击的缓冲

着陆在月面时, 着陆器撞击月面会形成较大的冲击载荷, 必须设计相应的着陆缓冲系统, 吸收着陆的冲击载荷, 保证探测器不翻倒、不陷落, 并为探测器工作提供牢固的支撑。

3.5 月面热控保障

月球表面光照条件变化大, 昼夜外热流变化大, 且维持时间长。对于月昼, 面临着高温下的热排散问题; 对于月夜, 面临着没有太阳能可利用情况下如何保证探测器仪器设备温度的问题。

3.6 月面移动

巡视器工作的月面覆盖着厚度不等的月壤层, 并存在大小不等的月坑和岩石, 其物理力学特性和月表地形都与巡视器移动性能直接相关, 如何选择移动系统构形参数, 开展地面移动性能试验, 保证巡视器月面移动能力, 是巡视器总体设计必须解决的难题。

3.7 月面巡视过程的自主导航与遥操作控制

巡视探测要求巡视器能够在月面安全行驶, 到达指定位置, 需要解决月面环境感知、障碍识别、局部路径规划及多轮运动协调控制等技术难题; 与以往航天器在轨测控工作模式不同, 巡视器月面工作过程是一个器地信息交互、地面持续支持的过程, 开发满足巡视任务需要的地面任务支持与遥操作系统也是必须解决的难题。

3.8 地面试验方法与技术

为了在地面进行充分的试验验证, 除了典型的空间环境模拟、发射段力学环境模拟外, 还必须突破月面特殊环境模拟技术。重点是在各种系统试验、流体回路试验、机构性能试验中开展的 1/6 g 低重力的模拟, 软着陆冲击试验、月面移动试验中月壤的模拟、光照环境模拟, 机构等性能试验中月尘环境的模拟, 舱外设备月夜储存环境的模拟等。

4 嫦娥三号探测器技术进步分析

嫦娥三号探测器是一个全新的航天器, 其研制

的总体思路是: 瞄准当今世界发展水平, 高起点地确定探测器的功能与性能; 充分继承和采用几十年来航天已具有的技术; 针对新领域中所遇到的新问题, 完全自主地进行技术上的原始创新、集成创新, 突破月球软着陆和月面巡视的核心关键技术。通过大量的设计分析、关键技术攻关和地面验证试验, 关键技术已经基本突破。

4.1 多学科总体优化设计

优化设计的思想表现在以下几方面。

1) 采用系统论和系统工程的方法进行综合设计, 实现探测器系统整体功能优化。全面建立了月球引力场模型、月球红外模型、月表地形地貌模型、月壤物理特性模型、月尘模型、月表电磁波传输模型、发动机羽流场模型, 构建了系统仿真设计分析平台。在此基础上完成系统设计的仿真分析和验证。

2) 在系统集成设计方面进行了大胆的尝试, 通过电子设备的集成设计将系统配电管理、机构控制、温度控制、火工品管理、自主管理、遥测遥控、数据复接等功能集成到数据管理分系统和综合电子分系统实现。

3) 通过桅杆的功能复用、导航相机和全景相机的异构备份、器地和器间测控数传信道的异构备份等优化设计方案, 简化了系统硬件配置, 提高了系统的可靠性。

4) 探测器总体设计过程中的设计思想、设计工具、设计方法有力地促进了航天器的总体设计水平的提高。

4.2 制导、导航和控制技术

制导、导航和控制方案在方案设计和设计技术方面均突破了较多技术难点, 大量单项技术创新和集成技术创新贯穿于分系统整个研制过程, 其进步主要体现在以下 3 方面。

1) 在控制方案方面, 将着陆过程分解为 7 个任务阶段, 采用常推力燃料次优显式制导、4 次多项式制导等制导方式完成了 7 个任务阶段的制导律设计, 依据当前制导任务主要控制对象特性, 在时间、燃料约束下有重点地实现着陆制导, 实现着陆悬停、避障和缓速下降至月面。

2) 利用多信息融合技术, 采用惯性导航配以测距测速修正的导航方案设计; 自主开发了基于光学

图像和三维高程数据的障碍识别算法,采用光学成像粗避障与激光三维成像精避障的接力避障策略;采用 10 N+150 N 推力器联合控制的 PID+PWM 姿控算法,实现着陆过程的姿态控制.在导航、制导、避障和姿态控制等方面大量控制方法和策略均为国内首次应用,推动了航天器制导、导航和控制技术的发展.

3) 在技术设计方面,首次突破高精度大动态激光测距技术和微波测距测速技术,同时,使激光、微波体制导航敏感器非合作目标测量技术在航天领域实现工程应用,带动了激光和微波测量技术的发展.

4.3 推进技术

推进技术的主要进步体现在以下 3 点.

1) 着陆器推进分系统采用恒压挤压式双组元统一系统.通过系统流阻匹配技术、防晃防旋技术、系统减压调节技术,解决了系统并联均衡排放、液体防晃、大流量变工况下系统稳定工作等一系列推进系统设计难题.

2) 解决了大长径比无焊缝铝合金内衬成形、变厚度变型面膜片制造、碳纤维缠绕等问题,研制出高压气瓶和金属膜片贮箱等产品,丰富了同类产品的型谱.

3) 为解决着陆减速问题,研制出我国第一台航天器用高比冲高控制精度的变推力发动机,发动机利用针栓式流量调节装置分别对氧路、燃路和冷却路的流量进行精确控制,实现推力连续可变,推力变化范围 1500~7500 N,推力控制精度 7.5 N,其突破的大变比流量调节、自适应调节喷注器、大直径薄壁喷管旋压等技术对我国液体火箭发动机及相关技术的发展起到了很大的带动作用.

4.4 着陆缓冲技术

着陆缓冲技术的进步点表现在以下几方面.

1) 综合比较不同构型着陆缓冲机构的优缺点,从减小系统重量,提高着陆稳定性,利于巡视器释放等因素考虑,着陆缓冲机构采用“悬臂式”的构型设计.

2) 着陆缓冲机构包括主支柱、多功能辅助支柱、单功能辅助支柱、足垫、压紧释放装置,在主、辅支柱中有相应的主、辅缓冲器.缓冲器通过安装在其内部的缓冲元件来吸收冲击能量.

3) 通过压紧释放与展开锁定装置与辅助缓冲器

的集成设计,解决了压紧释放与展开锁定难题.

4) 通过研制新型常温超塑性材料,该材料的延伸率超过 70%,解决了拉伸吸能缓冲难题,推动了材料科学的发展.

5) 总结出一套复杂机构的地面仿真分析方法和地面试验验证方法.

4.5 热控制技术

航天器的热控制技术主要表现在热设计、热分析、热控硬件以及热试验 4 个方面,嫦娥三号的热控制技术进步主要表现在以下几方面.

1) 热设计的重要进步是针对月夜长时间无阳光照射而引起的月夜生存问题,首次采用了在月表低重力辅助下,将舱外同位素衰变产生的热能借助两相流体回路引入舱内,维持舱内设备的生存温度条件.

2) 嫦娥三号探测器舱外设备种类多,热设计要求复杂,既包括对发动机工作引起的传导、辐射、羽流热效应的防护,又包括月午高温、月夜低温问题的应对.采取的热设计手段主要包括多层(含普通型、中温型、高温型)隔热、加热器主动控制,个别设备还采用了同位素热源,以提高储存状态的温度.

3) 除传统的热控硬件外,嫦娥三号探测器国际首次采取了重力辅助两相流体回路,引入同位素热能解决月夜生存难题,着陆器还采用了可变热导管等热控硬件,丰富了航天器热控制的硬件产品.两相流体回路建模过程中,采取了数学仿真分析、无因次相似分析、根据实验数据进行数学模型修正等技术手段,准确刻画了在不同倾斜角度、1/6 g 低重力、不同热源功率条件下的两相流体传热能力,并通过了试验验证.热控系统针对两相流体回路的地面试验,研究了 1/6 g 低重力模拟方法、月面倾斜角度等效方法、外热流模拟方法、热试验条件下的工作模式切换方法等,服务于在地面实现热设计的验证.

4) 探测器系统级热平衡试验包括着陆器、巡视器,两器联合 3 种试验状态,结合奔月、环月、动力下降、月面工作、月夜生存等不同阶段的控制需求,开展了稳态、瞬态热平衡试验.

4.6 移动技术

在移动技术方面主要的技术进步表现在以下几点.

1) 通过月面环境条件下的地面力学建模分析,提

出巡视器运动性能的评价方法,从承载能力、动力性能、转向能力、通过能力、稳定性、技术的成熟度、可靠性等方面对巡视器的移动性能进行了综合评价。

2) 车轮方面,通过试验比较了各种车轮形态的性能及月面环境适应性,结合巡视器的行驶性能如动力性、通过性和稳定性等分析结果,决定采用弹性筛网轮。

3) 综合考虑月面环境适应性及轻小型化要求之后,采用直流无刷电机。由于车轮电机功率有限,但巡视器对越障和爬坡时所需的力矩要求较高,减速器的减速比较大,采取多级行星减速器实现。同时还完善了无刷电机的驱动控制技术。

4) 移动悬架方面,通过仿真与试验验证,重点研究了主副摇臂悬架和正反四边形悬架^[3],从重量角度考虑,选择了六轮主副摇臂悬架。

5) 在对主副摇臂按照月面移动过程车轮分压关系进行配重后,采用悬索方法实现 1/6g 低重力和接地压力的模拟。

4.7 自主导航与遥操作控制

巡视器在自然地形环境中正常行驶并安全到达预先指定的工作点,是巡视器导航与控制系统的的主要任务。因此,必须具备在环境中识别危险与障碍、确定自身姿态与位置、辨别目标位置、规划到达目标位置的路径、沿规划路径移动,以及检测和避障障碍等能力。

1) 环境感知技术用于对巡视器周围自然环境进行三维恢复,识别障碍,为地面遥操作、路径规划和避障提供地形信息。主要采用了基于 CCD 相机的被动视觉环境感知方案,以立体视觉的匹配算法为核心实现地形三维恢复与重建。

2) 采用基于立体视觉的局部自主避障算法,完成自主局部路径规划,利用导航相机获得的周围环境信息,在地面完成三维恢复和信息融合,进而完成地面路径规划。

3) 巡视器在松软的月表环境下运动,存在严重的滑移、滑转,为了适应地形,每个轮子分配的负载不同,因此,研究了协调车轮的驱动、转向的协调运动控制算法,优化驱动效率,实现能量优化控制。

4) 在月面复杂的自然环境下,巡视器的定位较地面无人自主车辆、移动机器人等的定位具有更大的难度,开发了基于车载视觉系统的图像匹配定位、基于

里程计的航位推算法、路标特征匹配法等定位方法。

4.8 地面试验技术

由于嫦娥三号探测器与典型的航天器相比,具有较强的特殊性,在设计过程中,必须进行充分的仿真与地面试验验证工作,达到总体方案比较、关键技术问题分析、技术途径验证等目的。

采用低重力模拟、月面反射特性模拟、月壤模拟制备、二维快速随动、基于立体视觉和激光的高精度测量等技术,构建了着陆悬停试验场、巡视器内场和外场等试验设施,总结出一系列试验方案和试验方法,嫦娥三号开展了大量试验验证工作,其中系统级专项试验包括 6 项:以 GNC 分系统与推进分系统的协调工作能力验证为目的的悬停避障缓速下降试验;以考察着陆速度、着陆姿态对着陆稳定性影响为目的的着陆稳定性试验;以验证着陆器主结构在典型工况下抗冲击性能为目的的着陆冲击试验;以典型月面地形下巡视器移动性能测试为目的的组合同场试验;以巡视器移动性能、导航控制性能测试为目的的内场试验;在西北沙漠地区开展了以巡视器遥操作程序验证为目的的外场试验^[4]。

4.9 科学探测技术

研制测月雷达、月基光学望远镜和极紫外相机等科学探测仪器,首次实现月球浅层结构剖面探测、天文变源亮度的长期观测和地球等离子体探测等科学探测任务。

5 技术推动

嫦娥三号探测器在月球软着陆和巡视探测方面的技术突破,为我国月球探测二期工程的顺利实施奠定了坚实的基础,嫦娥三号探测器的研制对于航天及相关学科的发展起到的推动作用,概括为以下 3 个方面。

5.1 有力地促进了航天技术的发展

在航天器总体设计、制导导航和控制系统设计、推进系统设计、热控系统等方面的技术突破和技术成果,提高了航天器的设计水平;通过综合电子、轻小型机构、导航传感器、变推力发动机、两相流体回路等大量的新型高性能产品的攻关研制,全面地

推动了航天器通用技术的发展; 通过新材料、新工艺、新器件的应用, 从基础的层面推动了航天技术的发展.

5.2 有力地促进了多学科技术的进步

月球软着陆技术和巡视探测技术是高新技术的集成, 是机械技术、电子技术、材料技术、信息技术、制造技术等多项技术的综合反映, 对月球探测技术进行深化、转化, 将在无人装甲车辆、医疗、家庭服务、安全检查、危险环境自动化作业等广泛的领域得到应用, 从机械、电子、信息等多方面促进国民经济

的发展.

5.3 推动我国科技自主创新能力的提升

以嫦娥三号探测器为核心的月球探测二期工程是一项规模宏大的复杂系统工程, 它的实现将使我国在相关技术领域取得重大突破, 形成一大批具有自主知识产权的创新成果, 从总体上提升我国的科技自主创新能力和核心竞争力, 带动相关产业发展. 同时凝聚和培养一大批结构合理、素质过硬、处于世界科技前沿的高层次人才, 为国家人才创新工程提供有力支撑.

参考文献

- 1 叶培建, 张焱, 饶伟. 积极应对深空探测的技术挑战. 航天器工程, 2006, 15: 1-7
- 2 叶培建, 彭兢. 深空探测与我国深空探测展望. 中国工程科学, 2006, 8: 13-18
- 3 贾阳, 陈建新, 申振荣, 等. 月面巡视探测器. 航空制造技术, 2007, 12: 44-47
- 4 贾阳, 王琼, 王芳, 等. 月面巡视探测器外场试验方法. 航天器环境工程, 2012, 29: 602-607