

## 载人登月任务中的控制技术展望 (特约)

史文华, 林海森, 赵小宇, 李佳宁, 王大轶

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

**摘要:** 人类探索宇宙的步伐从未停止, 走得更远是不懈的追求。早在 1969 年, 美国“阿波罗”11 号飞船就实现了人类首次登陆月球, 接下来又有 5 艘飞船成功登月。近些年, 以中国“嫦娥”工程为代表的无人月球探测计划成功实施, 使得月球探测再次被世人关注。在空间探索不断发展的背景下, 载人登月必将会在未来的某个时间再次登上舞台。着陆月球、月面活动、起飞上升等过程都离不开控制技术, 文中在介绍早期载人登月与近些年月球探测成果后, 分析未来我国载人登月任务的构想, 探讨其中至关重要的控制技术, 提出几点发展展望。

**关键词:** 载人登月; 月面活动; 控制技术; 发展展望

**中图分类号:** TP29      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20201007

## Prospect of control technology in manned lunar exploration mission(*Invited*)

Shi Wenhua, Lin Haimiao, Zhao Xiaoyu, Li Jianing, Wang Dayi

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The pace of human exploration of the universe has never stopped. To go further is the unremitting pursuit. As early as 1969, the "Apollo" 11 spacecraft of the United States realized the first landing of human beings on the moon, and then another five spacecraft successfully landed on the moon. In recent years, China's "Chang'e" project as a representative of the successful implementation of the unmanned lunar exploration program, making the lunar exploration once again by the world's attention. In the context of the continuous development of space exploration, manned moon landing will be on the stage again at some time in the future. The important processes of landing on the moon, lunar surface activity, take-off and ascent are all inseparable from the control technology. After introducing the early manned landing on the moon and the achievements of lunar exploration in recent years, this paper analyze the concept of the future manned landing mission in China, discusses the crucial control technology, and puts forward several development prospects.

**Key words:** manned lunar exploration; lunar surface activity; control technology; development prospect

收稿日期: 2020-01-15; 修订日期: 2020-02-25

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目 (61525301)

作者简介: 史文华 (1978-), 男, 高级工程师, 主要从事航天器体系设计与战略方面的研究工作。Email: nafer@126.com

## 0 引言

月球是距离地球最近的天体,是研究地球、地一月系和太阳系起源与演化的重要对象,是人类实现向外层空间拓展的理想基地,同时也是研究空间天文学、空间物理学、月球科学、地球与行星科学的理想场所。虽然人类早已实现登陆月球,但仅有几次屈指可数的短暂停留,使得人类对月球的了解仍然非常有限<sup>[1]</sup>。

从各航天大国月球探测发展规划来看,在完成无人月球探测之后,都将开展载人月球探测和载人月球基地建设任务,可见载人登月必将再次上演。为了登陆月球和返回地球,航天器的轨道、姿态以及运行都需要控制技术,同时从保护和服务航天员的角度出发,载人登月控制技术的需求更复杂、指标更高、难度更大,因此控制技术是未来载人登月的关键技术领域之一。简述月球探测的历程和现状以及未来月球探测规划与载人登月构想,分析载人登月控制技术体系要素,以及月面软着陆、月面活动、月面起飞上升过程中的控制技术及其趋势,探讨未来载人登月中控制技术的可能热点方向。

## 1 无人和有人月球探测的历程与现状

1959~1976年,美国和前苏联共发射了83个月球探测器,其中成功的有45个。1969年7月美国“阿波罗”11号飞船实现了人类的首次登月,随后,“阿波罗”12、14、15、16、17号和前苏联的“月球”16、20、24号相继进行了载人和无人登月取样,获得了共382 kg的月球样品和大量的科学数据<sup>[2]</sup>。

1994年,美国的“克莱门汀”和“月球勘探者”探测器成功发射,对月球表面及月球轨道环境完成了较为全面的勘察,拉开了重返月球的序幕<sup>[3]</sup>。此后,各国也纷纷开展了特色各异的月球探测活动,欧空局实施了“智慧1号(SMART-1)”环绕任务,日本实施了“月亮女神”环绕任务,正在研发“月亮女神-2”着陆器和巡视器,印度实施了“月船1号”环绕任务,正在开展“月船2号”软着陆和巡视任务。中国实施了“嫦娥”探月工程,制定了月球探测“绕”、“落”、“回”的阶段目标,已经成功发射“嫦娥”一号、二号、三号、五号飞行试验器和四号,共5个探测器,完成了“绕”、“落”两个步骤,实现了对月球正面、背面的着陆巡视探测以及绕月返

回再入地球。月球探测重新成为了空间探测的热点。

美国曾经实施过航天员重返月球的“星座”计划,后来被调整为更具挑战性的载人火星探测,原计划中的重型火箭、月球着陆器、载人飞船都被保留下来。俄罗斯规划了“月球-全球”、“月球-资源”两次着陆任务和“月球-土壤”采样返回任务,提出了月球基地、月球轨道站等计划。欧空局规划了包括月球极区着陆器、月球车乃至载人登月、建立月球前哨设施等任务在内的“曙光”深空探索专项计划,以及与俄罗斯合作的“月球极区采样返回”任务。日本规划了可验证载人技术的“月亮女神-X”极区采样返回任务,提出了机器人月球基地,通过国际合作实现载人登月等概念计划。

在各国的月球探测规划中,延续无人月球探测活动,并以无人月球探测作为后续载人登月的先导任务,成为主要共同点。值得注意的是,美国在“阿波罗”之前的无人月球探测项目主要针对认识月球以及为载人登月服务,而现阶段无人月球探测活动则主要围绕月球环境、资源探测,以及为月球基地建设提供各种基础设施保障等目标展开。

开展无人和载人月球探测,认识月球和开发月球资源,必然需要经历到达月球的着陆过程,而如何将着陆器和航天员安全送达月面指定着陆点,可靠的实现软着陆,制导控制技术尤为重要。再次开启的月球探测热潮中,月球基地建设、航天员月面活动,都需要月面移动和作业,月面复杂环境中的控制技术,将面临更多挑战。无人月面取样返回和航天员返回,都要进行月面起飞上升及准确进入地月返回轨道,此过程的控制技术是保证任务成败的关键。

## 2 月球探测规划与载人登月构想

在已掌握的地月转移轨道设计技术、环月探测技术、月面软着陆技术、月面巡视技术和月夜生存技术的基础上,考虑月球探测的延续性和技术储备需求,未来月球探测可分为四步,分别为无人月球站、机器人登月、载人登月以及月球长期基地工程<sup>[3]</sup>,如图1所示。载人登月任务的过程可以分为登陆月球、月面活动、上升返回<sup>[4]</sup>,典型任务过程如图2所示。

无论是近期的无人月球探测、中期的载人登月任务还是长期的月球基地建设,都离不开以月球软着陆、月面活动、月面起飞上升过程中的关键——控制技术。

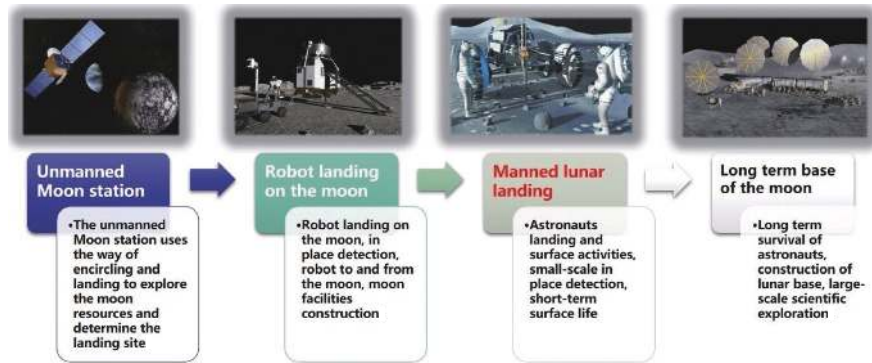


图 1 月球探测规划构想

Fig.1 Planning concept for lunar exploration

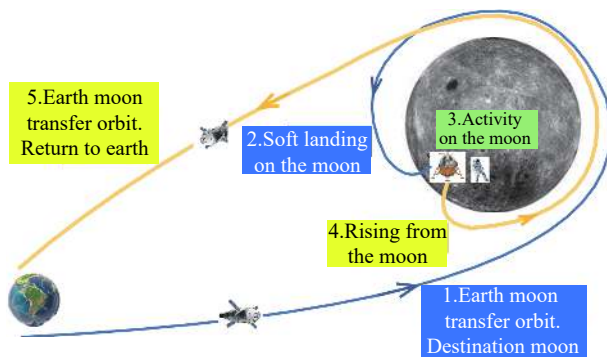


图 2 典型载人登月任务过程 (示意)

Fig.2 Typical processes of manned lunar mission (sketch)

### 3 载人登月中的控制技术及展望

载人登月控制技术内涵丰富、要素繁多,根据其技术特点、发展阶段和工程需求,大致可分为典型任务过程技术方向和共性基础技术方向。

#### 3.1 典型任务过程技术方向

月面软着陆、月面活动任务以及月面起飞上升,这些过程中的控制技术根据任务目标和控制对象的差异,有较大的不同。

##### 3.1.1 月面软着陆控制技术

软着陆是指着陆器在落向月面的过程中采用制动发动机进行减速,以使到达月面时的速度接近于零(一般为几米每秒),实现安全着陆的过程<sup>[5]</sup>。为了完成软着陆任务,着陆器需要从环绕轨道经霍曼转移轨道(100 km × 15 km)到达近月点,经过复杂的轨道机动,在一定的误差范围内,在预定的月球表面着陆点实施软着陆<sup>[6]</sup>。月球软着陆过程一般可分为 5 个阶段:主减速段,从近月点到距月面几千米高度,主要任

务是消除较大的初始水平速度,使着陆器速度减小到预定值并到达期望的着陆区域上空;调姿下降段,距月面高度从几千米到一百米左右,使着陆器到达预定高度的速度接近于零,姿态接近垂直向下;悬停避障段,距月面高度从一百米左右到几十米,姿轨控发动机工作使得着陆器处于悬停状态,成像传感器对着陆区域成像,控制系统选择安全着陆区域,通过水平和垂向控制使着陆器平移下降至所选着陆区域上方预定高度;缓速下降段,距月面高度从几十米到几米,按照一定的制导律控制着陆器的姿态,使得着陆器到达预定高度的速度接近于零,且保证着陆器在所选安全着陆区域上方;最终着陆段,距月面高度从几米到着陆到月球表面<sup>[7]</sup>。

在月球软着陆过程中,为了实时连续提供着陆器的位置、速度和姿态信息,惯性导航成为基本的导航手段。为了保证软着陆导航精度,需要利用着陆器相对月面的距离和速度测量信息修正惯性导航。因此,惯性导航配以测距测速修正成为月球软着陆的主要导航方式。对于月球软着陆的导航,着陆器相对月球表面的距离和速度是重要的观测量,前苏联的“月球”系列、美国的“勘测者”和“阿波罗”系列探测器都采用测距测速仪获取着陆器相对月面的距离和速度信息。

“阿波罗”系列飞船采用的是标称轨道制导方法进行软着陆,预先设定一条理想轨道,然后控制飞船沿着这个理想的轨迹飞行。在制动段和接近段,均采用多项式制导,根据飞船位置矢量和速度矢量的实时信息修正理想的制导律,该制导律是跟剩余时间、当前时刻位置和速度、期望位置速度加速度有关的函

数,而在悬停避障、缓速下降和最终着陆段采用的是宇航员人工控制方式。

我国“嫦娥三号”着陆器设计了基于惯性导航配以外部测距测速信息修正的自主导航和自主式、高精度分段减速悬停的软着陆控制方案<sup>[8]</sup>,开发了基于光学图像和三维高程数据自主接力避障控制算法,实现了路径优、燃料省、误差小、避障能力强的全自主避障软着陆控制。

经过“嫦娥三号”、“嫦娥四号”软着陆技术验证,我国航天器月面软着陆控制技术日趋成熟,未来载人登月中,着陆器实现全程自主月面软着陆控制的可能性非常大。梳理形成的体系要素如图 3 所示。

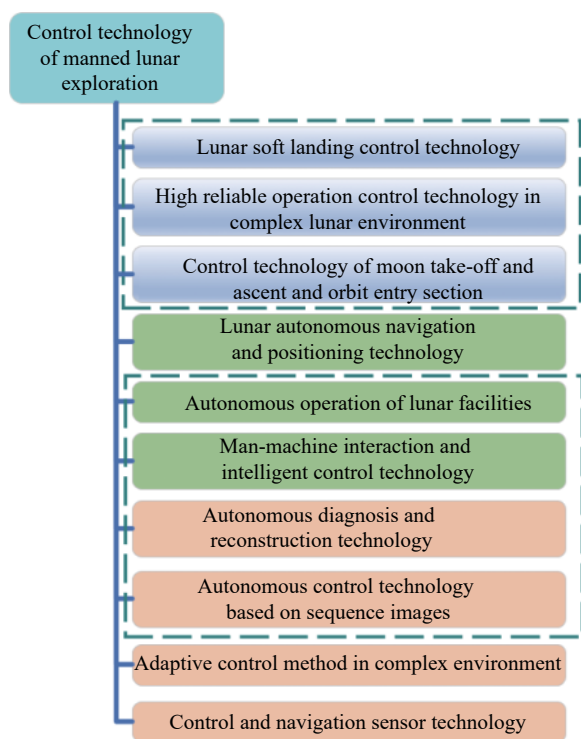


图 3 载人登月控制技术体系要素

Fig.3 Elements of manned lunar landing control technology system

### 3.1.2 月面高可靠运行控制技术

载人登月的月面活动,一般指以航天员为中心开展月面科学探测的过程,主要包括月面移动、观测记录、信息交互、操作设备、应急处置等,如图 4 所示。

航天员月面移动最常规的辅助工具就是月球车。1971~1972 年,美国发射的“阿波罗”15、16 和 17 号载人登月飞船,各自装有一辆折叠式载人月球车,均可在月面低重力、真空环境中行驶,从而扩大了

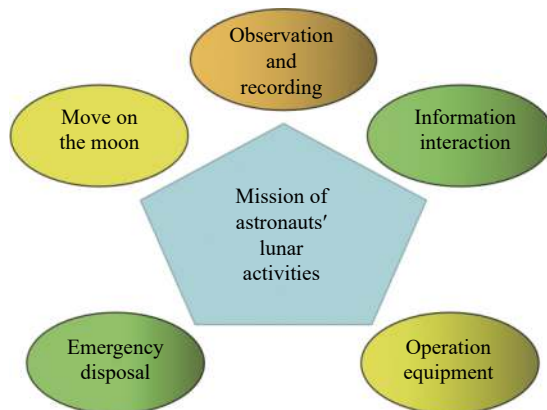


图 4 航天员月面活动任务组成

Fig.4 Composition of astronaut lunar surface activities

航天员的活动范围。

未来的载人登月,月面移动在航天员驾驶月球车行进的基础上,月球车自主行驶、人机交互将成为新的趋势,月面机器人、无人月球车等系统将发挥更大作用。月球车要在月面复杂地形行驶,但是由于车上动力有限,加上严重的时滞,会大大影响与地面或月面基地的通信,需要具备很强的自主性。要使月球车在一些未知的恶劣环境下保持高度自主,需要依托自主导航系统保证月球车在有限的遥控装置和较大时滞的条件下,仍能够安全运行。未来月面活动任务中的控制技术,将在移动装置运动控制的基础上,向自主运行及人机协同方向发展。

### 3.1.3 月面起飞上升控制技术

载人登月月面起飞上升是指航天员执行月球科学探测任务后,安全准确地将登月舱从月球表面起飞、调姿后进入环月轨道,并满足环月轨道交会对接初始条件的过程。载人月面起飞上升过程可以为 3 个飞行阶段:垂直起飞段、姿态调整段及射入段<sup>[9-10]</sup>。

由于登月舱在月面起飞时,没有精确姿态的发射塔来保证发射状态,只能借助着陆器作为简易发射塔来实施月面起飞。受月面地形条件等限制,着陆器所提供的起飞条件未必完全满足最佳发射要求。因此需要具备一定的轨道和姿态修正能力,同时需要制导、导航与控制系统、推进系统以及测控通信系统相互配合,才能正确的进入地月转移轨道和地球再入轨道<sup>[11]</sup>。由于地面无线电导航不能够满足月面起飞实时性的要求,所以需要通过自主方式来对月面起飞过程进行导航与控制<sup>[12]</sup>。

### 3.2 共性基础技术方向

针对载人登月控制技术的研究工作,应当注重前瞻性,并遵循系统工程的原则,把握规律、提早布局、重点研究。在分析载人登月任务过程及控制技术需求后认为,月面设施自主运行、人机交互协同智能控制、自主诊断重构、基于序列图像的自主控制等方向,将很可能成为未来载人登月控制技术中代表性强、特色鲜明、影响深远的热点方向:

(1) 月面设施自主运行技术:未来载人登月任务中,无人系统将占据更大比重、发挥更大作用,可为航天员提供更多支持、服务和保障。自动驾驶的月球车、协助航天员作业的月面机器人、自动化的科学探测设备等,都需要不同程度的实现自主运行。为此,应当面向自主运行技术,重点前瞻地开展自主控制、信息融合、智能处理、自主规划等技术研究;

(2) 人机交互协同智能控制技术:载人登月中丰富多样的科学探测活动和月面基地建设任务,需要航天员在月面实现更大范围的移动、完成更复杂的操作以及更高效的信息传递。人机交互与人机协同,将发生在多种航天员相关的任务场景中。具备在不同设施上运行的,实时性更强、速度更高、交互性更好的协同平台,将大幅度提升航天员在月面执行任务的能力;

(3) 自主诊断重构技术:自主诊断重构指的是月面无人系统无需地面干涉,仅靠自身携带的测量设备和计算机,自主地实现故障检测、故障隔离、故障辨识,并根据诊断结果,通过改变空间构型或控制算法等恢复全部或部分既定功能<sup>[13]</sup>。对于复杂且需要长时间稳定工作的载人登月系统,尤其需要强大的自主诊断与自主重构能力,以确保任务的顺利、可靠完成;

(4) 基于序列图像的自主控制技术:序列图像所包含的信息丰富,应用前景广阔。随着图像信息获取能力的长足进步,序列图像作为自主控制的信息来源变得更加便捷,基于序列图像的自主控制有可能对月面软着陆和月面活动带来革命性变化。同时,图像也是航天员最易理解的信息类型,更适合作为人机交互的信息形态。研究基于序列图像的自主控制技术,在载人登月中实现高效的图像获取、处理与传输,并完成自主控制,具有重要应用价值。

## 4 结 论

文中以未来的载人登月任务为背景,以其中的控制技术为对象,在介绍已有月球探测成就和发展规划的基础上,提出了我国载人登月中控制技术的体系要素,分析了典型任务过程控制技术重点及共性基础技术方向的潜在热点,开展了对月面设施自主运行、人机交互协同智能控制、自主诊断重构、基于序列图像的自主控制等技术方向的初步展望。

### 参考文献:

- [1] Guo Linli, Li Zhijie, Qi Bin, et al. An overall tentative plan and construction blueprint of manned lunar base [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, 35(6): 1-10. (in Chinese)  
果琳丽,李志杰,齐玢,等.一种综合式载人月球基地总体方案及建造规划设想[J]. *航天返回与遥感*, 2014, 35(6): 1-10.
- [2] Ouyang Ziyuan. Astrochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1988: 93-145. (in Chinese)  
欧阳自远. 天体化学[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 93-145.
- [3] Hou Jianwen, Zhao Chen, Chang Liping, et al. General conception of future lunar exploration [J]. *Manned Spaceflight*, 2015, 21(5): 425-434. (in Chinese)  
侯建文,赵晨,常立平,等.未来月球探测总体构想[J]. *载人航天*, 2015, 21(5): 425-434.
- [4] Zhou Wenming, Li Xiaopeng, Li Fuqiu, et al. Safety analysis of man-machine system in manned lunar landing mission and countermeasure studies [J]. *Manned Spaceflight*, 2019, 25(4): 525-533. (in Chinese)  
周文明,李孝鹏,李福秋,等.载人登月任务人-机系统安全性分析及对策研究[J]. *载人航天*, 2019, 25(4): 525-533.
- [5] Li Shuang, Tao Ting, Jiang Xiuqiang, et al. Review and prospect of the powered descent guidance and control technologies for lunar soft landing [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2015, 2(2): 111-119. (in Chinese)  
李爽,陶婷,江秀强,等.月球软着陆动力下降制导控制技术综述与展望[J]. *深空探测学报*, 2015, 2(2): 111-119.
- [6] Wang D Y, Huang X Y. GNC system scheme for lunar soft landing spacecraft [J]. *Advances in Space Research*, 2008, 42(2): 379-385.
- [7] Huang Xiangyu, Zhang Honghua, Wang Dayi, et al. Pinpoint autonomous navigation and control for lunar soft landing [J]. *Aerospace Control and Application*, 2012, 38(2): 5-9. (in Chinese)  
黄翔宇,张洪华,王大轶,等.月球软着陆的高精度自主导航与

- 控制方法研究[J]. *空间控制技术与应用*, 2012, 38(2): 5-9.
- [8] Zhang Honghua, Li Ji, Guan Yifeng, et al. Autonomous navigation for powered descent phase of Chang'E-3 lunar lander [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(12): 1686-1694. (in Chinese)  
张洪华, 李骥, 关轶峰, 等. 嫦娥三号着陆器动力下降的自主导航[J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(12): 1686-1694.
- [9] Allan Y L. Preliminary design of the guidance, navigation, and control system of the altair lunar[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2010: 1-61.
- [10] Larry D Kos. Altair descent and ascent reference trajectory design and initial dispersion analyses[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2010: 1-11.
- [11] Zhang Ya, Sun Yifeng. Attitude control technology in the rising phase of lunar surface[C]//Proceedings of the 9th Annual Meeting of Deep Space Exploration Technical Committee of China Aerospace Society, 2012: 136-141. (in Chinese)
- [12] Wang Weihua, Tan Tianle, He Liang. Initial alignment calibration off the lunar surface based on combination navigation [J]. *Manned Spaceflight*, 2014, 20(4): 296-300. (in Chinese)  
王卫华, 谭天乐, 贺亮. 基于组合导航的月面起飞自主对准技术[J]. *载人航天*, 2014, 20(4): 296-300.
- [13] Wang Dayi, Fu Fangzhou, Meng Linzhi, et al. Research of autonomous control technology for deep space probes [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(4): 317-327. (in Chinese)  
王大轶, 符方舟, 孟林智, 等. 深空探测器自主控制技术综述 [J]. *深空探测学报*, 2019, 6(4): 317-327.