

月球基地建设方案设想

袁勇, 赵晨, 胡震宇

(上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘要: 随着月球探测的深入发展, 国内外众多月球探测方案和月球开发计划均将月球基地建设作为一个重要目标。月球基地建设将服务于后续无人月球探测和载人登月探测任务。通过月球基地的功能和意义分析, 对月球基地的选址约束、建设步骤和实施过程提出了初步构想, 并针对典型的探测站/器进行了分析。在此基础上, 根据我国运载能力, 提出了月球基地方案构想, 并对月球基地建设的若干关键问题进行了初步探讨, 可为后续月球基地建设提供参考。

关键词: 月球基地; 建设步骤; 选址约束; 关键问题; 运营技术

中图分类号: V467.3

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2018)04-0374-08

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2018.04.008

引用格式: 袁勇, 赵晨, 胡震宇. 月球基地建设方案设想[J]. 深空探测学报, 2018, 5(4): 374-381.

Reference format: YUAN Y, ZHAO C, HU Z Y. Prospect of lunar base construction scheme[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(4): 374-381.

0 引言

进入21世纪之后, 美、俄、欧、日等国家相继提出了各种探月计划。

2004年1月14日, 美国布什政府提出了“空间探索新构想”^[1], 明确了建立月球基地的计划。美国国家航空航天局(NASA)为重返月球制定了“星座计划”, 其目标是在2018年前, 最迟2020年运送航天员重返月球, 并在月球南极建立包括生活区、发电站和通讯系统在内的月球基地。2024年之后, 月球基地将完全建成, 航天员每次能在月球上驻留6个月。2009年5月奥巴马政府终止了已实施5年的“星座计划”, 其目的是调整美国的载人航天计划, 减低财政赤字, 创新未来载人航天概念, 研发具有革命性的新一代探索技术, 为美国未来载人航天可持续和经济可承受的发展模式奠定基础; 但“星座计划”中的载人“猎户座”飞船仍保留继续研制, “猎户座”飞船已于2014年12月完成首飞。“阿瑞斯”运载火箭被“太空发射系统”(Space Launch System, SLS)项目代替, SLS原预计于2017年首次试飞, 后延迟至2019年12月—2020年6月完成首飞。由于美国的政府更迭, 每届政府都有自己的航天政策, 最终重返月球, 并建立基地的计划没有完全实施。目前特朗普政府正在联合俄罗斯等多个国家着手建设“深空之门”月球轨道空间站^[2]。

俄罗斯于2007年8月公布了2040年前的航天发展计划, 包括研制新一代航天运输系统, 进行载人绕月飞

行, 并在2025年前实现载人登月, 在2027—2032年间建立永久性月球基地。

为开展太阳系和宇宙探测, 欧洲在2001年设立了“曙光”探测计划, 并于2004年2月3日正式公布。其首要目标就是制订和实施对太阳系进行无人和载人探索的长期计划。火星、月球和小行星都可能成为该项目下的探测目标。该计划的核心内容是欧洲国家参与的月球和火星的无人探测, 提出在2020—2025年实施载人登月, 建设月球前哨站, 开展月球探测和资源利用活动, 使其成为技术验证试验场, 通过派机器人和宇航员亲自登月来验证太空中的生命支持与居住技术, 为载人登陆火星进行技术验证。

2006年1月6日, 日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)公布了“太空开发远景规划”草案, 提出了未来20年日本太空开发的主要目标。同年4月JAXA向政府提交了总投资达570亿美元的“JAXA 2025年长期规划”, 内容重点是“月球探测与利用”和“太阳系探测”。其中“月球探测与利用”包括进行月球探测并建立月球基地, 计划在2015年前实现机器人探月, 主要完成月球的勘查和相关技术开发; 2025年前研制重复使用载人航天器, 实现载人登月和建立月球太阳能研究基地, 完成月球资源利用的技术积累; 2025年后, 将着手建立以月球表面为据点的月球空间活动基地。2006年8月, JAXA在东京国际会议上公布, 日本将建立月表基地的时间推迟至2030年。2010年6月, JAXA

在北京国际会议上进一步说明载人登月计划。载人登月分为两个阶段：第一阶段，2010—2015年机器人登月探测，2015—2020年高级机器人探测并返回；第二阶段，2020—2026年实现能模拟真人的机器人在月球上登陆和行走，2026—2030年进行人与机器人联合登月，并建立月球基地。

纵观国外月球探测的现状和规划，其发展脉络分为4个阶段：月球环绕探测、无人登月、载人登月、月球基地^[3]，其中月球基地可以分为无人基地和有人基地，或者将载人登月计划纳入月球基地建设。国内外研究机构对月球基地进行了大量的研究^[4-9]。由于建立月球基地需要的投资强度大，技术跨越性强，各国月球探测活动均受到资金和技术的困扰，月球基地的建设进度一般滞后于各个发布的建设路线图。

1 建设月球基地的意义

月球基地建设的重大意义表现在如下方面：

1) 月球基地具有较强的月面和空间探测能力，以月球基地为中心，在一定半径范围内，可以全面、系统地开展月球就位探测和空间探测，能够加深人类对月球以及宇宙空间的认识。

2) 月球基地可以作为月球资源开采、利用的试验站。 He^3 是一种清洁核聚变材料，一旦核聚变发电技术形成突破， He^3 有可能成为化石能源外的另一种燃料战略资源。通过月球基地的建设，进行月面 He^3 资源的勘察、开采、富集、存储试验，有望解决我国将来的能源问题， He^3 的勘测与开采具有重大的战略价值和经济价值。根据目前的月球探测，月球可能存在水冰资源，月球基地能够较为细致地对潜在有水的地区进行探测，确定是否有水。如果有水，确定其储量，并且进行试验性开采和利用。月球基地建设可以为将来建立月面资源利用的工厂、车间等生产设施提供技术积累和工程基础。

3) 利用月球自身的空间环境特性（月球自身拥有高真空、无大气遮挡、低重力等天然空间条件），在月面开展空间探测和环境试验以及特定产品的试验性生产，例如特种材料和药物等。月球基地能够开展月面生物圈建设，在一定封闭条件下，开展空间生态环境循环试验。通过月球基地的建设与试验，能够为人类星际旅行提供宇宙空间条件下封闭生物生态环境循环验证。

4) 月球基地能够支撑载人登月活动，为载人登月提供技术保障，为载人登月的选址提供参考，对载人登月的部分技术进行先期验证，月球基地建设甚至可

以与载人登月任务进行融合。

5) 月球基地建设是一项空间战略项目，在国际竞争和空间争夺中，为我国赢得战略主动，为中国梦的实现提供技术支撑和制度优势支撑。

2 月球基地的功能

月球是一个“死寂”的星球，月球表面没有大气运动等环流运动，除非月球表面受到空间流星体撞击，月球表面形态和物质成分不会改变。从探测的角度而言，对月球自身及表面的探测，没有时间维度的概念，只有空间维度的概念。在同一个地点对月球本身进行探测，任何时候探测结果都是相同的（相当于时间“停滞”），即固定式探测器对月表探测工作时间不需要很长，只需要完成探测地点本身的探测任务即可。如果要探测月球的不同信息，就需要在不同地域进行探测，相当于在空间维度进行探测任务拓展。对月球不同地域进行探测，需要从较大尺度进行，即不同探测点之间有较大距离，否则探测数据会“淹没于月表尺度的分辨率”，被认为是同一片区域。如果利用月球自转特性，对空间（对天）进行天文探测，探测器在任何时候都在天球不同矢量方向，此种探测类型从时间和空间的维度都进行了拓展。针对月球本身时间“停滞”的特点，月球基地建设和运营时需要在空间或时间维度进行拓展，只有这样才能够获得更多更大的成果。

月球基地的作用和功能一般可以分为以下部分：

1) 探测试验功能。开展对天观测、空间环境探测、月面科学探测，可以作为月面无人科研站。

2) 人员保障功能。保障航天员在月面的科研生产和生活，可以作为月面载人科研站。

3) 生产应用功能。作为月面资源开发和利用的工厂和试验室，成为生产应用型试验基地。

针对探测试验功能，月面对天观测和空间探测任务相对于近地空间探测器有一定优势，但劣势也非常明显。探测器部署在月面，不需要卫星平台，没有卫星的姿轨控寿命及燃料限制，探测器寿命较长；但是探测器部署到月面，工程较为复杂，并且着陆代价较高。综合比较，在月面部署对天观测和空间探测的探测器的代价远高于近地轨道部署空间天文望远镜和空间探测器。针对月面科学探测，将探测仪器部署在能够移动的探测平台（如巡视器、飞掠器），可在空间维度拓展探测能力，提高探测的效率和效益。

针对人员保障功能，月面科学试验室（月面载人科研站）中，航天员活动的舱室为充压环境，即一般

为0.95~1.0个大气压。在充压条件下，可以充分利用承压舱室的特点，进行月球基地建设。

针对生产应用功能，月面存在多种矿物资源，可以在月面开展矿物资源的开采和利用，在月面制氧，进行月面潜在的水资源开发，以及开展“月面生物圈”试验研究等科学任务。

3 月球基地建设分析

3.1 月球基地选址约束

月球基地不同于传统的月球探测器组合，必须具备充分的自持能力，有较强的能源、通讯、物资补给、设备维护维修、废弃物资处理、产品离场返回、系统运营等能力。月球基地建设的最终服务对象为航天员开展月面长期驻留、试验等科研活动。月球基地的选址要素如下：

1) 便于获得充足的能源

从能源的角度，月球极区存在部分永久阳照区，对于太阳能发电系统更为有利。

2) 有足够平坦的场地，便于物资着陆

若着陆精度为 $3\text{ km} \times 1\text{ km}$ ，以1倍的着陆精度余量计算，则需要 $6\text{ km} \times 2\text{ km}$ 范围的着陆场地。

3) 便于救援

若载人基地出现故障，航天员需要能够迅速脱离；就月面救援的便利性而言，月球基地选址的最佳位置为赤道或极区。这两类区域无论是从环月轨道到达，还是从月面起飞，轨道对窗口限制均较少。

4) 便于物资存储和开展试验

如果月球基地为生产型基地，主要生产物资为金属物资、水、氧气、氢气、氦气等产品。其中金属物资和水的存储相对较为容易；如果产品为氢气、氧

气、氦气等物资，通常存储方式为加压存储或液化存储。其中加压存储的代价太大，液化存储则需要较低的温度；故月球基地需要一个永久的低温区域。月球极区存在部分永久阴影区，对于月球潜在的水冰探测、月球资源利用制氧的产物（液氧）存储较为有利。永久阴影区的持久低温，可开展低温红外探测设备部署、低温超导试验、低温超导探测空间粒子环境探测等任务。超导环境对航天器电磁发射入轨较为有利。如果能够实现月面电磁发射，在月面将一定质量的返回器（百千克量级）不利用工质反推方式送入月地转移轨道，对于月球资源开采以及月球样品的返回将极为有利。

5) 便于人员和物资返回

不论是人员还是月球探测的样本都需要返回地球。月面极区和赤道地区的月球基地，对人员和物资返回轨道较为有利，轨道窗口约束较少。月球返回任务如果采用化学推进，需要大量推进剂。若所有推进剂需要地球运输至月面，代价高昂。为了航天员安全，对返回任务采用人货分离的策略；人员返回主要以技术成熟、可靠的传统常规火箭式返回；对于物资等返回方式最佳方案是采用电磁发射等不用推进剂的发射方式，电磁发射的最理想条件为超导电磁发射，需要一定的永久低温环境。

月球基地约束条件可能是相互矛盾的，在工程实践中，需要根据探测目标进行权衡取舍，确保基地选址科学可行。目前国内外载人月球基地建设选址方案主要集中于极区和赤道地区。

3.2 月球基地建设步骤

月球基地建设可以分为前期论证准备阶段、基地建设实施阶段、基地运营维护阶段，如图1所示。

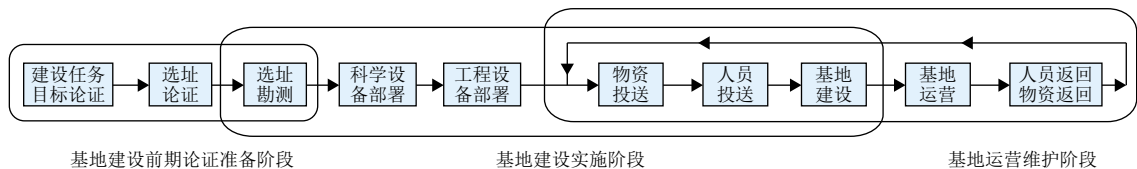


图1 月球基地建设步骤

Fig. 1 The construction steps for the lunar base

3.2.1 基地建设前期准备

月球基地的建设前期准备包括建设任务目标论证、选址论证、选址勘测。

建设任务目标论证为系统论证基地建设的科学目标、工程目标。此目标论证可以为月球基地建设的最小目标；随着建设的深入，可以进行补充科学任务和工程任务。

选址论证^[6]，选址是为确定实现科学目标和工程目标建设月球基地的承载载体。需要满足各种约束，若选址不当，将给后续运营带来缺陷或隐患，不利于后续任务拓展。

选址勘测是月球基地建设准备阶段的最后一步，也是月球基地建设阶段的先导。选址勘测将发射在轨探测器、月面巡视探测器、甚至月面穿透器对拟建设

基地的选址地点进行深入探测。发射在轨探测器可以在轨获取月面的表面宏观和微观的地形地貌、光照条件、表面温度、表面成分等。月面巡视探测器本身可以对选定的月球基地进行详细就位探测，对月面承载能力、工程施工条件、建设项目进行就地评估。月面巡视探测器本身就是月面建设的先导机器人，为后续科学探测器材、工程设备部署提供月面操作。若需对月面永久阴影区进行探测，还需要采用月面穿透器等探测器进行探测，对阴影区内的物质成分与在轨或月面探测器进行联合探测，以确定是否存在水冰等资源。

3.2.2 基地建设

1) 科学探测设备部署

月球基地需要进行科学探测，对于有时间维度的探测项目利用月球基地开展科学研究，主要包括天文探测、空间环境探测和月面探测任务。对月面探测设备一般部署在月面巡视探测器上。

2) 工程设备部署

工程设备主要包括月面工作机器人和月面施工机械。工程设备需要完成月面着陆场建设和科学探测站场地建设，确保后续建设物资到达后能够立即开展初步部署工作。月面工作机器人需要能够与月面巡视探测器相互维护维修，确保任务出勤率。

3) 物资投送

物资投送任务为月球基地建设的大规模实施阶段，主要投送的物资包括月面能源站、月球对地通讯站、航天员月面工作的先期保障物资、月面载人科研站、月球基地需要的物资存储设施，以及为后续保障航天员安全返回的上升器。物资投送需要解决月球基地无人阶段的物资保证和后续人员进驻后的生活保障、安全保障、科研保障。此阶段需要较长的建设周期。

4) 人员投送

月球基地建设到一定阶段后，需要将航天员投送到月球表面。航天员到达月面后完成“月面载人科研站”展开与部署，形成最终能够供航天员居住生活的月面工作站，并且在月面开展科学研究工作。

5) 基地建设

航天员进驻月球基地后，开展月球基地相关建设

与运营活动，开展复杂任务的基地建设，例如月面小型生产试验室，进而过渡到月面大型生产基地、月面永久阴影区低温试验系统。开展月面大型的电磁发射场建设等项目，便于通过电磁发射使飞行器进入空间，降低月面返回燃料消耗。

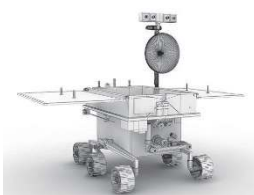
3.2.3 基地运营

此阶段为月面有人基地建成的条件下，逐步开展有序的科学试验、物资生产等科研与生产活动，包括开展月面制氧、月面水冰探测开采、月面生物圈建设、生物培养、月面 He^3 资源开采富集与存储等工作。人员返回与物资返回，针对人员返回采用常规飞行方式，从月面发射上升器使航天员进入环月轨道，并交会对接返回。月球基地运营初期，月面物资返回量相对较少，随着基地建设的扩大，物资返回频度可能高于人员返回频度，月面物资返回的最佳方式为非工质反推作用的电磁起飞方式。

3.3 典型探测器/探测站分析

3.3.1 月面机器人

月面机器人包括月面巡视探测器和月面工作机器人。月面机器人需要具备自我维护与维修能力，月面巡视探测器与工作机器人也可相互保障，即相互维护与维修，确保工作过程的可靠性，满足任务出勤率需求。月面巡视探测器主要用于搭载科学探测设备，执行月面移动和科学探测任务，如图2(a)所示。月面巡视探测器主要负责确认月球基地选址可用性，确认基地满足承载要求，对着陆场、返回发射场、通讯站、能源站、探测站建设和部署地点进行最终勘测确认。月面工作机器人主要负责探测设备月面运输、设备部署安装、月面工程施工等任务。图2(b)为月面运输、设备部署型月球车(机器人)，图2(c)为月面施工型机器人。由于受到着陆场大小限制，探测器着陆到月面燃料钝化后，月面工作机器人会将着陆器运输到指定的地方统一存放，否则由于着陆器不断着陆到着陆场，将导致着陆场难以容纳新的着陆器，或需要将着陆场面积不断扩大，导致设备运输距离不断增大。



(a) 中国“玉兔号”月球车



(b) NASA 月球车模型



(c) 月球施工机器人

图2 月面机器人

Fig. 2 Lunar Rovers and robots

3.3.2 月面载人科研站

月面载人科研站为航天员提供舒适的生活和工作环境,基本功能是维持站内一定的大气压力,保护航天员不受到空间宇宙射线的伤害,在月面环境温度下

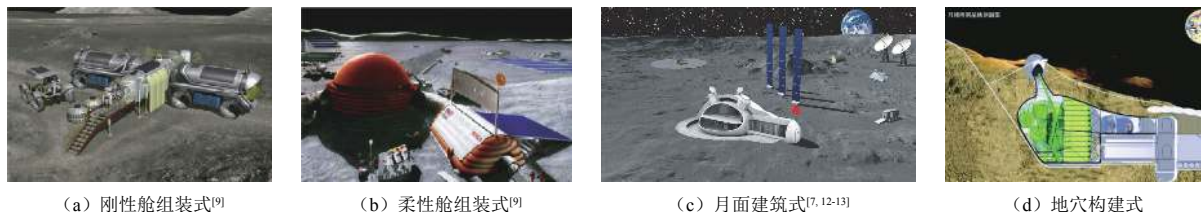


图3 月面载人科研站建筑形式

Fig. 3 The architectural configuration of a manned lunar base

月面载人科研站需要维持的一定的空气压力,其中刚性舱组装方案、柔性舱组装式科研站可以直接充入空气。月面建筑式和地穴构建式采用月面材料构筑,如果直接采用月面材料作为气密介质,鉴于“生物圈2号”试验结果(“生物圈2号”内的建筑物水泥吸收二氧化碳,影响到正常的碳循环,导致多数动植物无法正常生长或生殖)^[4],科研站内空气存在与月面材料相互作用的风险。故需要采用内衬气密结构,将会导致额外的材料消耗。

其中刚性舱结构采用金属结构,其功能与性能与国际空间站类似,采用不同刚性舱段对接而成,技术成熟。刚性舱结构能够防护一定量级的空间射线,使用寿命较长;由于受到运载火箭整流罩的限制,尺寸受到限制,在有重力条件下,航天员工作空间和工作使用面积受到限制。刚性舱构型月面载人科研站的规模受到运载能力和发射次数的限制。

柔性舱组装式类似于国际空间站的充气舱,运输折叠比大,能够实现气密功能,展开后的造型可设计性强,对于空间布局较为有优势。

月面建筑式需要在月面采用建筑材料或3D打印形式建造月面建筑,此种舱室结构可设计,但是需要解决月面建筑材料制备和生产的相关技术问题,并且需要在内部敷设气密内衬。

地穴构建式利用月面熔洞进行构建,优势为可以建在月表以下的恒温层。此种基地受到月面熔洞的限制,需要进行整形等工程施工,并且也需要气密内衬,建筑和选址难度大。

根据以上特点和结合月面任务需求,柔性舱组装式结构对于月面载人基地而言有一定优势;其不足在于空间辐射条件环境条件下,高分子聚合物的寿命不如金属刚性舱。为了阻挡月面辐照对充气舱室结构的影响,可采用一定厚度的疏松月壤对充气舱进行覆盖,根据充

维持一定的工作环境温度。国内外航天研究机构对月球基地提出了多种月球载人基地方案,比较典型的为刚性舱组装式^[9]、柔性舱组装式^[9-11]、月面建筑式^[7, 10-11]、地穴构建式,如图3所示。

气舱内的气压大小确定覆盖的厚度,覆盖厚度以能够有效阻挡宇宙射线为基准。通过月壤覆盖,有如下优势:

- 1) 阻止太阳光照对高分子聚合物寿命影响;
- 2) 阻止空间高能射线进入舱内,保护航天员和对电子设备进行防护;
- 3) 月壤厚度到达一定的尺寸后,可以隔绝舱内与舱外的热交换,形成一定的恒温区,简化热设计。

4 我国月球基地方案设想

月球基地内部探测站间能够相互协调,形成物资流、信息流、能源流的交互,形成 $n \times 1 > n$ 的协同效应。月球基地需要以下基本配置:能源站、通讯站、科学探测站、月面载人科研站、月面机器人、月面物资接纳系统(着陆场)、月面物资返回运输系统(发射场)等配置。其中一项或几项任务站可以合并实施。针对我国目前的运输能力,能够实现月球基地的运载火箭只有CZ-3B、CZ-5,以及研制中的CZ-9运载火箭。其中CZ-3B运输到月面的有效载荷(运输到月面的物资净重,不含着陆器等运输平台质量)不小于200 kg, CZ-5运输到月面的载荷不小于2 000 kg, CZ-9地月转移轨道发射能力不小50 t^[15],运输到月面的载荷不小于15 000 kg。

按照常规航天器寿命,以及可更换和可维护设备的可靠性,月球基地航天器连续工作寿命可设计为10~15年。月球基地各种设备,到达月球后,可根据任务需要开启或关闭,如果按照工作时间不超过1/3飞行时间计算,月球基地各种探测器可在月面服役30年以上。月球基地可据此安排的建设周期。

4.1 基地组成

月球基地建设需要兼顾无人阶段与有人阶段。月球基地的在建设时需要从整体进行策划。其中无人基地以月球探测、对天观测、空间探测为主;有人基地

主要以空间试验、物资生产等科研与生产活动为主，包括开展月面制氧、月面水冰探测开采、月面生物圈

建设、生物培养、月面He³资源开采富集与存储等的工作。月球基地的实施顺序和发射方式如表1所示。

表1 月球基地建设发射规模及寿命要求

Table 1 Requirements for the launching scale and life span for the lunar base

任务序号	探测器任务	运载火箭	是否有轨道器留轨	备注
1	月面巡视探测器	CZ-3B	无	
2	月面探测设备	CZ-5	无	含能源站、通讯站
3	月面工作机器人	CZ-5	无	2 000 kg物资落月
4	月面物资着陆场站建设			月面施工
5	月球起飞系统	CZ-9	有	轨道器携返回器留轨，着陆器携上升器着陆于月面
6	月面载人科研站	CZ-9	无	
7	载人登月	CZ-9	有	轨道器携返回器留轨，着陆器携上升器着陆于月面
8	月面永久阴影区低温试验系统	CZ-9	无	15 000 kg物资落月
9	月面物资生产与富集试验站	CZ-9	无	15 000 kg物资落月

月球基地的建设步骤如下：

第一阶段，发射着陆器携带月面巡视探测器着陆到月球基地选址的意向区域，执行选址勘测任务，利用巡视器进行详细勘察，确认月球基地选址的适当性。

第二阶段，发射着陆器到月面，着陆器携带科学探测设备、能源站和通讯站组件，除执行常规科学探测任务外，还承担月球基地能源站和通讯站任务，为后续建设提供基础设施保障。

第三阶段，发射着陆器携带月面工作机器人着陆到月面。

第四阶段，并不执行发射任务，主要利用发射到月面的机器人，对月面进行物资着陆场站建设和工程施工，并将已经发射到月球基地的探测器和着陆器通过电缆形成物理连接，构成具备能源流、信息流交换的系统，并对已经着陆到月球基地的设备进行维护，月面机器人承担不同探测器间的物资运输与交换。此时月球基地各探测器间初步具备物资流、信息流、能源流交互能力，月球基地雏形建成。

第五阶段，在月面部署月球起飞系统，主要是发射一套不载人的着陆器、上升器到月面，在环月轨道部署轨道器和返回器。在月球基地的着陆场，部署有关月面起飞的保障设施。此次任务的目的在于，在月球基地配置一套可用于值班待命的上升器，用于载人运行时的救援保障。

第六阶段，月面载人科研站建设，利用着陆器携带月面居住舱及相应的保障设备到月面，利用月面工作机器人，完成月面载人居住舱的部署。

第七阶段，载人登月，此阶将航天员进驻初步建成月球基地，开展科学研究工作。在载人登月时，航天员登月本身自带一套返回器，与月面前期着陆的返回器形成1:1备份关系，确保紧急时逃生救援使用。

第八阶段，向月面投送永久阴影区低温试验系统，充分利用月面阴影区的低温环境，开展超导领域科学研究，开展液氢、液氧、液氮等物质的低温存储试验，以及在低温环境中，部署高灵敏度的红外空间探测设备等。

第九阶段，向月面投送物资生产与富集试验站，开展月面物资原位利用研究与试验，包括原位制氧、金属冶炼，若月面存在水，水资源的开采和应用等活动，开展月面He³的开采、富集工作。

4.2 月面载人科研站建设

针对人员保障型月面载人科研站，按照NASA“人—系统”集合标准（NASA-STD-3000），建议对于4个月或更长任务周期的最小可居住体积约为20 m³/人。假设月面航天员的数量为3~6人，月面科学试验室需要60~120 m³的居住空间，再加上科学试验设备等设施，需要约100~150 m³容积空间，需要净面积约50~60 m²。如此大容积的试验室如果采用非折叠运输，会导致运载火箭整流罩难以容纳。对于载人月面试验室，折叠比较高的方案为柔性薄膜充气结构。月面载人科研站采用柔性充气舱结构，采用球冠型构型，直径12 m，穹顶高3 m的建造形式（见图4），展开投影面积110 m²、空间容积250 m³的充气舱结构，充气气压为0.95~1个大气压力，人员有效使用面积大于75 m²，有效使用空间为200 m³。舱体表面覆盖30 cm厚的月壤，月壤消耗量为40 m³，建筑时月壤卷扬高度不小于4 m，卷扬机侧悬臂跨度不小于7 m。为了确保载人舱室的气密性和漏气后的救援性，内部采用类似蜂窝状态分布隔断舱室，在某个舱室漏气的情况下，确保试验站柔性支撑结构的完整，防止被防护月壤压变形，便于及时修复漏气舱室。

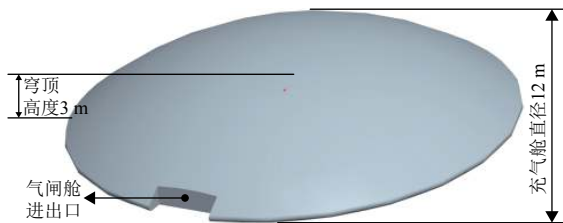


图4 月球基地采用柔性充气舱结构示意图
Fig. 4 Dome type flexible aerated cabin structure

5 月球基地建设的若干关键问题

5.1 月球基地总体规划

月球基地建设周期长,需要对月球基地进行综合统筹,从科学目标、工程目标、选址地点、实施步骤等方面进行充分规划。在总体规划中,需要完成对基地选址的初步论证,月球基地的规模界定、月球基地的物资补给方案确定、月球基地的运营方式初步确定。在月球基地的总体规划中,还必须考虑月球基地的可拓展性,为将来基地建成后,基地任务拓展预留足够的拓展空间,满足不断进步和发展的空间技术需求。

5.2 月球基地与载人登月关系

月球基地建设 with 载人登月活动是相互统一的关系,载人登月之前,月球基地项目的无人探测部分可以为载人登月进行选址、试验相关技术。载人登月项目可以为航天员进驻月球基地进行先期航天员月面工作能力的验证。如果可能,可以把载人登月项目与月球基地项目整合,统一实施。

5.3 月面设备部署与展开技术

月球基地涉及到众多的月面探测设备,需要从着陆器上卸下,从着陆场运输至预定部署地点,完成展开部署。过程中涉及到设备装卸、运输、组装、设备展开等工作项目。由于月球基地的通讯站、能源站和各种探测设备存在较为大量的操作,需要利用一个或多个月面机器人协同完成。在人员进驻后,将开展人、机、设备协同操作。月球基地众多探测站,需要完成探测站间的互联互通,形成信息流、能源流、甚至物资的相互连通,在基地设备部署的时候需要综合考虑。

5.4 月面载人科研站展开与建设

月面载人科研站建设需要考虑材料选择、舱室设计、展开折叠、密封设计等方面。载人科研站部署前,由月面工作机器人对部署场地进行平整;然后将载人科研站从着陆器上卸下,由着陆场运输至部署场地,最后进行充气展开。月面载人科研站充气展开后,对舱体进行月壤覆盖,最终完成舱室建设。舱室建设完成后,进行舱室设备的部署、连接调试,最终形成一个可供人员居住试验的人员站。

5.5 月球基地的运营技术

月球基地是继国际空间站后一个庞大的航天基础设施工程,需要部署的航天器数量多,任务相差大,工作复杂,建设周期长;并且不同航天器任务周期不同,比如着陆器主要完成着陆运输任务,在任务结束后,其本体将废弃。对于每个飞行器任务完成后,资源统筹利用是月球基地的一项重要项目。月球基地的运营技术主要包括以下方面:

1) 月球基地月面机器人操作技术

月面很多工作需要机器人来完成,单机器人操作,多机器人协同操作完成设施建设、设备展开、设备维护、设备维修更换等成为基地长期运营的关键。

2) 月球基地物流与物资保障技术

月球基地建设开始后,需要不断从地球补给物资、在月面储备关键备件。载人工作后,月球基地的物资补给成为基地正常运作的重要保障。优化补给方案成为节省基地运营费用和提高保障效率的关键技术之一。所以基地物流与物资保障技术是月球基地运营技术的重要组成部分。

3) 月球基地的废弃物资综合利用技术

地球向月球发射飞行器、飞行器完成月面着陆后,其飞行平台任务完成,可废弃。对于地月物资补给而言,代价十分昂贵,因而废弃的飞行器部件对于月球基地而言都是资源,需要综合考虑从着陆器卸下各种单机作为月球基地的备品备件;例如电池是月面能源站的储备物资,气瓶可作为月面气体介质的储箱,燃料储箱经过清洗后,可以作为月面制氧的氧气储罐等。对于任务顶层规划时需要预留改造接口和通用接口,便于后续废物利用。

4) 月面电磁发射技术

月球物资返回代价较高,利用月面环境建立超导条件,进行飞行器电磁发射,将小型飞行器直接发送到月地转移入口。电磁发射可以考虑直线加速和回旋加速等方式实现。

6 结束语

月球基地是我国继载人航天工程、导航系统工程、探月工程后,又一个大型航天工程,其工程规模大、投资强度高。为了提升月球基地建设的效益,在建设前期需要进行统筹规划、开展月球基地关键技术攻关,确保后期基地建设推进顺利。本文对月球基地建设方案及思路进行了初步探讨,可以为将来月球基地论证和建设提供参考。

参 考 文 献

- [1] WIKIPEDIA. Vision for space exploration[EB/OL].[2017-12-01]. https://en.wikipedia.org/wiki/Vision_for_Space_Exploration.
- [2] WIKIPEDIA. Lunar orbital platform-gateway[EB/OL].[2017-12-01]. https://en.wikipedia.org/wiki/Lunar_Orbital_Platform-Gateway.
- [3] 果琳丽. 载人月球基地工程[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2013.
GUO L L. Manned lunar base engineering[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2013.
- [4] 张焯, 胡智新. 无人月球基地总体初步设想[J]. 航天器工程, 2010(5): 95-98.
ZHANG H, HU Z X. A tentative idea for robotics lunar base[J]. Spacecraft Engineering, 2010(5): 95-98.
- [5] 邓连印, 郭继峰, 崔乃刚. 月球基地工程研究进展及展望[J]. 导弹与航天运载技术, 2009(2): 25-30.
DENG L Y, GUO J F, CUI N G. Progress and prospects of engineering for lunar bases[J]. Missiles and Space Vehicles, 2009(2): 25-30.
- [6] 李志杰, 果琳丽, 彭坤. 载人月球基地选址的几个基本因素[J]. 载人航天, 2015(2): 158-162.
LI Z J, GUO L L, PENG S. Research on site selection of manned lunar base[J]. Manned Spaceflight, 2015(2): 158-162.
- [7] 李志杰, 果琳丽, 梁鲁, 等. 有人月球基地构型及构建过程的设想[J]. 航天器工程, 2015(5): 23-30.
LI Z J, GUO L L, LIANG L, et al. Configuration and construction process of manned lunar base[J]. Spacecraft Engineering, 2015(5): 23-30.
- [8] 于登云, 葛之江, 王乃东, 等. 月球基地结构形式设想[J]. 宇航学报, 2012(12): 1840-1844.
YU D Y, GE Z J, WANG N D, et al. Supposal for structure form of lunar base[J]. Journal of Astronautics, 2012(12): 1840-1844.
- [9] HAYM B, LEONHARD B. Engineering of lunar bases[J]. Acta Astronautica, 2008(62): 277-299.
- [10] 屠永清, 寇广福. 球冠型充气膜结构月球基地的研究[J]. 工业建筑, 2007(A1): 519-522.
TU Y Q, KOU G F. Research on inflatable membrane structure of globe crest form for the Moon base[J]. Industrial Construction, 2007(A1): 519-522.
- [11] 匡松松. 充气可展式月球基地结构与热防护分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [12] 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(6): 1-10.
GUO L L, LI Z J, QI B, et al. An overall tentative plan and construction blueprint of manned lunar base[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014(6): 1-10.
- [13] 朱恩涌, 果琳丽, 陈冲. 有人月球基地构建方案设想[J]. 航天返回与遥感, 2013(5): 1-6.
ZHU E Y, GUO L L, CHEN C. Research on manned lunar base construction scheme[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2013(5): 1-6.
- [14] WIKIPEDIA. Biosphere 2[EB/OL].[2017-12-01]. https://en.wikipedia.org/wiki/Biosphere_2.
- [15] 秦旭东, 龙乐豪, 容易. 我国航天运输系统成就与展望[J]. 深空探测学报, 2016(4): 315-322.
QIN X D, LONG L H, RONG Y. The achievement and future of China space transportation system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016(4): 315-322.

作者简介:

袁勇(1981-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 航天器总体设计。

通信地址: 上海市闵行区元江路3888号805区三十一室(201109)

电话: 13764438014

E-mail: yuanyong@foxmail.com

Prospect of Lunar Base Construction Scheme

YUAN Yong, ZHAO Chen, HU Zhenyu

(Shanghai Institute of Aerospace System Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: With the further development of lunar exploration, the construction of lunar base is taken by many lunar exploration schemes and lunar development plans at home and abroad as an important goal. The lunar base will serve the future unmanned lunar exploration and manned lunar missions. The function and significance of the lunar base are analyzed. According to the carrying capacity of China's rockets, a scheme for the lunar base construction is put forward, which includes the preliminary concept of the location constraint, the construction steps and the implementation process of the lunar base. The typical detection station and devices of the lunar base are analyzed. Some key problems of the lunar base are discussed, which will provide reference for the construction of the lunar base in the future.

Key words: lunar base; construction steps; location constraints; operation technology; operation technology

High lights:

- The location constraints of lunar base are analyzed.
- The construction steps for lunar base are put forward.
- A scheme for the lunar base construction is put forward.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]