

引用格式:

王嘉璐, 曾廷尉, 张倬玮. 向月球进发——面向大众的大规模月球登陆方案[EB/OL]. (2022-05-30) <http://home.ustc.edu.cn/~luiswang/done>.

向月球进发 ——面向大众的大规模月球登陆方案

王嘉璐^{1,*}, 曾廷尉¹, 张倬玮²

1. 中国科学技术大学 工程科学学院, 合肥 230027

2. 中国科学技术大学 生命科学学院, 合肥 230027

摘要: 为服务中国建设月球科研基地的战略规划, 提出了面向科学家、工程师等大众人群的大规模月球登陆方案。进行了中美两国载人航天及月球探测技术路线的调查, 报告了当前国际航天领域竞争的现状。依据预设的任务目标, 以基于技术可能、保证目标载量、降低经济成本为原则, 充分借鉴现有的月球登陆方案, 分析了设计过程中的主要难点, 提出了长期在轨、重复使用的设计思路, 提出了一种基于载人飞船长期在轨、运载火箭一子级重复使用的方案, 设计了一种新型载人飞船, 并将其命名为“望舒”, 同时进行了轨道设计与分析、火箭载荷要求与评估。对比研究表明, 单人单次往返月球的经济成本降低了95%, 说明本方案设计具有一定的应用价值。

关键词: 载人航天; 月球探测; 大规模; 飞船设计; 轨道设计

随着探月工作不断推进, 月球的科研、应用价值日渐显现。月球电磁干扰小, 月震相当微弱, 适合进行天文观测等科研活动; 月球物质和矿产资源丰富, 可弥补地球资源的不足。因此, 各国都加快了探月的进程。

美国通过实施“水星”计划 (Project Mercury), 掌握了载人天地往返的基本技术; 通过“双子星”计划 (Project Gemini), 掌握了载人登月所必须的舱外行走和交会对接技术; 最终通过“阿波罗”计划 (Apollo program), 实现了载人登月的目标。美国正在规划重返月球计划, 该计划经历了多次反复, 目前已基本成型, 其核心是位于环月轨道或地月L2点的载人空间站, 未来还将研制基于液氢液氧推进剂的大型单级可重复使用登月舱, 实现对月球表面的低成本造访, 并以此为基础建设月球基地^[1]。

中国也为此规划了中国月球探测工程 (China's Lunar Exploration Project, 别名嫦娥工

程), 提出无人月球探测、载人登月及建立月球基地的目标, 目前探月工程已完成“绕、落、回”三期目标^[2]。中国已经发起并且正在推进国际月球科研站 (ILRS, International Lunar Research Station) 计划^[3], 希望建设比较完善的、功能齐全的科考站。

建立月球基地, 将成为国际上特别是中美两国竞争的关键领域。同时, 随着科技与经济的不断发展, 大众对外部世界的好奇心及月球旅行的愿望不断增强。但不论是建设月球基地、相关人员登月作业还是大众月球旅行, 都需要降低经济成本、个体身体素质要求以及增加登陆规模, 这对载人航天技术提出了新的挑战。

本文参考了美国阿波罗计划和中国嫦娥工程, 旨在寻求一种面向大众的大规模月球登陆方案, 为未来解决这一问题, 特别是服务于国际月球研究站的建设与使用, 提供一定的参考。

定稿日期: 2022-05-30; 退修日期: 2022-06-02; 答辩日期: 2022-06-09

*通讯作者. E-mail: luiswang@mail.ustc.edu.cn

1 总体设计

1.1 任务目标与设计原则

基于建设月球基地、相关人员登月作业及大众月球旅行的设计背景，确定本方案的任务目标如下：通过载人飞船和轨道的研究、设计及优化，实现以30人为额定载量、以地球与月球间往返为路径的目标，并进行简单的理论评估，验证方案的可行性，展现方案的优化效果。

考虑到月球基地的建设和使用是一项长期、持续进行的项目，在此期间工作量、人员流通量较大，大众进行月球旅行无力承担过高费用，本方案需要在保证额定载量的条件下降低经济成本。同时，为了发挥实际作用，应该基于中国当前及将来十到二十年的技术水平，给出具有现实可能的方案。因此，确定了基于技术可能、保证目标规模、降低经济成本的原则。

1.2 设计思路

美国阿波罗计划采取了由John C. Hobolt团队提出的月球轨道交会方案^[4]。该方案中，由大型运载火箭运载指令/服务舱与登月舱。指令/服务舱携带从地球到月球并返回的燃料和生活必需品，以及进入地球大气层所需要的隔热板。进入月球轨道之后，登月舱与指令/服务舱分离，并降落在月球表面；指令/服务舱留在月球轨道。3名宇航员中的1名留在指令/服务舱中。登月完成之后，登月舱升级重新起飞，与指令/服务舱在月球轨道集合，并返回地球。在接近地球时抛掉服务舱，指令舱在气动力作用下减速并在进入低空时弹出降落伞进一步减速，最终降落在地面。

从技术上来看，John方案需要使用大型运载火箭，根据阿波罗11号数据资料，该火箭地月转移轨道运力达到45t，中国现有及在规划中的运载火箭^[5]无法满足需要。因此，在设计过程中，需要考虑减少载人飞船重量，或者飞船分多次发射后在轨组装。

从成本上来看，该方案所使用的运载火箭及载人飞船各舱段均为一次使用、不可回收，这很大程度上增加了成本。为此，提出一种可重复使用的设想。基于中国新一代载人运载火箭一子级采用新型垂直起降回收方案^[6]的设想，火箭一子

级在着陆阶段通过网系回收装置可实现软着陆。对于载人飞船，可以采用长期在轨道运行、持续重复使用的方式。

1.3 总体方案

阶段一：发射新一代运载火箭3次，运载航天飞船指令舱、服务舱、登月舱、推进剂进入地球停泊轨道，在轨组装载人飞船。

阶段二：发射长征五号B型运载火箭，运载发射舱并搭载登陆人员、生活物资进入地球停泊轨道，发射舱与航天飞船对接，完成人员、物资转移，随后发射舱脱离并保持轨道。

阶段三：载人飞船经地月转移轨道转移至月球卫星轨道，登月舱与航天飞船分离，载人着陆，实现人员登陆。

阶段四：登月舱搭载返回人员再次入轨，与载人飞船对接，转移人员后返回月球。

阶段五：人员随载人飞船经地月转移轨道返回地球停泊轨道，与发射舱对接，人员乘发射舱返回地球，载人飞船在轨等待下一批次任务。

2 载人飞船设计与分析

2.1 总体设计与功能分布

(1) 飞船命名与寓意

“望舒”出自屈原《楚辞·离骚》“前望舒使先驱兮，后飞廉使奔属。”意为让月的御者望舒做我的前驱，令风伯飞廉做我的后卫。其亦有迎取光明的含义。作为中国古代神话中为月驾车之神，以望舒为载人飞船命名，蕴含以望舒号作为大规模登月前驱，迎取大众登月未来之意。

(2) 飞船整体构型

“望舒”飞船（如图1所示）总长约19m，圆柱段直径约4.2m。由登月舱、指令舱、服务舱连接而成。登月人员通过往返舱与服务舱对接通道进入飞船（如图2所示）。

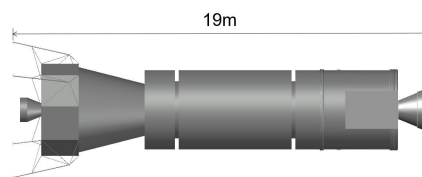


图1 “望舒”飞船



图 2 “望舒”飞船的对接

(3) 飞船功能分布

往返舱用于搭载人员进入48h近地轨道和携带人员返回地球。

指令舱为宇航员生活及工作的舱室，同时也是整个飞船的控制中心。

服务舱对整个载人飞船提供推进，姿态控制，生保，供电等服务保障作用。

登月舱为载送宇航员在月球轨道与月球表面之间往返的工具。

2.2 往返舱设计

(1) 往返舱构型

往返舱（如图3所示）整体形状呈圆台与半球叠加，最大外径约4m，最大高度约5m。

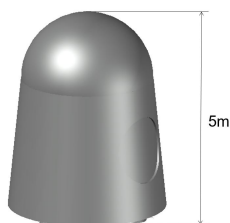


图 3 往返舱构型

(2) 往返舱结构

往返舱为宇航员往返太空时乘坐的密闭结构舱段。内部放置有着陆部件、回收设备和姿态控制发动机等。

往返舱重返地球时会与大气发生剧烈摩擦，因此在高温高压条件下，其仍保持高气密性。表面涂有烧蚀材料，在进入大气时通过材料热解融化等方式促进散热，避免高温烧蚀舱壁。同时为防止往返舱局部温度过高，其内部滚转调姿发动机令往返舱自转均匀受热。

往返舱进入大气时，气流变化使舱体难以维持固定姿态，为减小气流造成的扰动，往返舱上半设计为半球形，下半为圆台提高舱体稳定性。

2.3 指令舱设计

(1) 指令舱构型

指令舱（如图4所示）整体呈圆筒形，其最大外径约4.2m，最大高度约9m，组成部分，前舱高度约1.6m，生活舱高度约6m，后舱高度约1.4m。

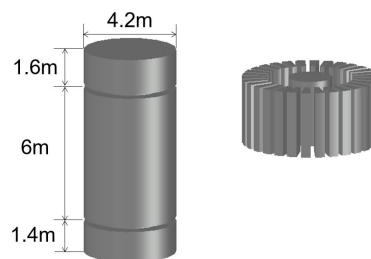


图 4 指令舱构型

(2) 指令舱结构

指令舱装载有飞船控制系统、生命保障系统等，其依据功能细分为3个部分。

前舱为驾驶舱，位于与登月舱相连端，配置制导导航系统以及船载计算机和无线电分系统。

生活舱为密封舱，位于指令舱中部。生活舱均分为上下两层，配置有卫生间等生活设施，存有供30名宇航员生活14天的必需品和救生设备。上层中心圆柱部分为公共区域，剩余部分均分为30等份，作为30名宇航员个人休息场所；下层同为公共区域供宇航员自由活动及部分区域可用于科研等工作。

后舱为设备舱，位于与服务舱相连端，其内部装有姿态控制发动机，各种仪器和贮箱。

2.4 服务舱设计

(1) 服务舱构型

服务舱（如图5所示）整体呈圆筒形，其最大外径约4.2m，最大高度为约6m。

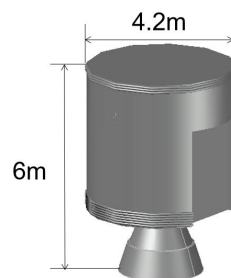


图 5 服务舱构型

(2) 服务舱结构

服务舱内部装有飞船重要设备。其内部配备有环境控制设备（如气源、电源），推进系统及通讯、电子设备等。其中主发动机用于轨道转移和变轨机动；姿态控制系统由火箭发动机组成。服务舱外部有辐射散热器、太阳能电池板等设备为飞船运行提供保障。

2.5 登月舱设计

(1) 登月舱构型

登月舱（如图6所示）上升段大致呈圆台形，下降段发射架为八面体有四条着陆支脚，总高度约7m，最大直径约4.5m。

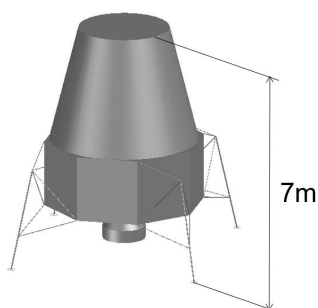


图 6 登月舱构型

(2) 登月舱结构

登月舱分为上升段和下降段。上升段由暂留舱、发动机、推进剂贮箱、仪器舱和控制系统等组成，下降段主要包含发射架，着陆支脚。登月舱上升段采用人货合运模式，可容纳30名宇航员保持坐姿^[7]。内部配有导航、控制、通信、生命保障和电源等设备。登月舱在返回月球轨道时通过火箭引擎推送，垂直起降。

2.6 干重与载重评估

为了评估载人飞船的干重，特提出一种简化模型，以阿波罗飞船的数据为参考，考虑到尺寸的调整、技术发展带来的器件重量缩减的影响，给出“望舒”飞船的估算干重。

其中，尺寸调整带来的影响，可以根据体积增减进行等比例缩减；技术发展带来的影响，可以选取相同种类、相同用途、制造时间不同的飞行器，分析它们的密度变化，给出重量缩减比例。因此，选取前苏联的月球车1号、中国的玉兔2号，两者分别制造于1970年、2019年，与阿

波罗飞船、“望舒”飞船设想使用时间相仿。

表 1 月球车1号、月兔2号尺寸与重量

月球车	长度/m	宽度/m	高度/m	重量/kg
月球车1号	2.2	1.6	1.35	756
玉兔2号	1.5	1.1	1.0	135

月球车1号、玉兔2号尺寸与重量^{[8][9]}如表1所示，计算可知玉兔2号较月球车1号密度减少50%，为保守估算，取重量缩减比例为30%。因此，可以估算“望舒”飞船各舱段干重，结果如表2所示。

表 2 “望舒”飞船各舱段估算干重

舱段	指令舱	服务舱	登月舱	往返舱	总计
估算干重/t	20	10	6	6	42

对于搭载的人员、物资和装备，人均体重计0.08t，人均生活物资计0.15t（食物0.05t，氧气、水资源0.10t），航天服每件计0.12t（共5件），冗余物资、装备计2.5t，飞船载重总计为10t。

3 轨道设计与分析

3.1 要求与约束条件

为完成预定目标，对轨道设计的要求和约束条件如下：

(1) 要求设计地球停泊轨道以供载人飞船完成在轨组装，在不影响组装的条件下应选择更高轨道，充分利用运载火箭的运载能力，减少飞船推进剂的消耗。

(2) 要求采用推进剂尽可能节约的地月转移轨道。

(3) 要求探测器在轨道机动和修正时必须是在测控站观测范围内，并且要求在发射和转移轨道阶段除本国的地面测控站和远洋测量船外，不需其他地面站的协作。

(4) 要求月球卫星轨道满足载人飞船长期在轨的要求，平衡飞船在轨推进剂消耗与登月舱登月推进剂消耗。

3.2 地球停泊轨道

考虑到载人飞船在轨组装的时间不宜过长，

否则会因为维护轨道增大推进剂消耗，地球停泊轨道的周期不能过大，这也可以增加后续长期使用的窗口期。但也考虑到增大轨道高度可以更充分地利用运载火箭的运载能力，减少载人飞船携带的推进剂。参考若干近地轨道后，选择嫦娥一号的调相轨道之一，即48h近地轨道^[10]，轨道参数如表3所示。

表 3 地球停泊轨道参数

半长轴a/km	离心率e	轨道倾角i/度	周期T/h
67000	0.9	31	48

3.3 月球卫星轨道

考虑到嫦娥一号的环月轨道、嫦娥五号舱段分离时的环月轨道高度均为200km，中国对这一高度处的长期在轨运行、飞行器在轨分离的经验、技术积累丰富，月球卫星轨道确定为200km高度的圆环月轨道，轨道参数如表4所示。

表 4 月球卫星轨道参数

半长轴a/km	离心率e	轨道倾角i/度	周期T/min
1938	0	0	127.6

3.4 地月转移轨道

为简化地月转移轨道的设计，仅确定这一轨道若干主要的特征参数。地球停泊轨道确定了近地点高度及近地轨道倾角，月球卫星轨道确定了近月点高度及环月轨道倾角，另一个特征参数是卫星在转移轨道上的飞行时间。飞行时间通常为3~5d，飞行时间越短所需要的能量越大，即近地点的速度及到达近月点所需的制动速度增量越大，消耗的推进剂也就越多，飞行时间为5d的轨道称为最小能量轨道。

至此，转移轨道主要的特征参数已经选定，结果如下：(1)近地点高度600km、轨道倾角31度；(2)近月点高度200km、轨道倾角0度；(3)飞行时间120h。

飞船到达近月点时的瞬时轨道是双曲线轨道，需要即时对飞船进行减速机动，否则飞船将飞离月球甚至进入行星际空间。飞船的减速机动分三次进行，第一次机动使其进入周期12h的椭圆轨道，第二次机动使其进入周期为3.5h的圆

轨道，第三次机动使其进入周期为127.62min、高度为200km的圆轨道。

另外，作一次加速机动从48h近地轨道近地点转移到近月点，所需的脉冲速度增量是0.192km/s；作三次减速机动将双曲线轨道变为最终的圆轨道，所需的脉冲速度增量是0.822km/s。

3.5 月球登陆与再返回轨道

登月及再返回可分为环月飞行、动力下降、月面工作、交会对接远程导引、近程导引、环月等待6个阶段^[11]。载人飞船在完成地月转移、近月制动后，进入200 km高度的圆环月轨道，然后指令舱/服务舱与登月舱实现分离，指令舱/服务舱保持在轨运行，登月舱择期完成环月降轨、动力下降，实现在月面预定位置的软着陆。待完成月面任务、后续任务启动后，择期返回圆环月轨道。返回过程中，登月舱从月面起飞，实施远程导引变轨机动，飞至210 km高度的圆环月轨道，与指令舱/服务舱完成交会对接。此外，在与登月舱对接前，指令舱/服务舱还要进行数次变轨机动，使得在对接时到达预定位置。

3.6 推进剂预算

上述的地球停泊轨道、地月转移轨道、月球卫星轨道，如图7所示。

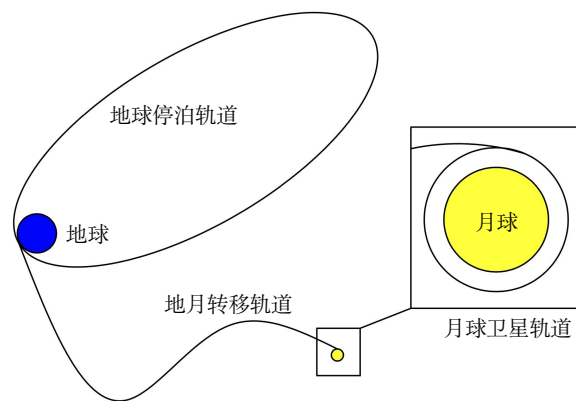


图 7 轨道设计结果

一定质量的推进剂可以提供的总速度增量的理论值可按下式^[10]计算

$$\Delta V = -I g \ln\left(1 - \frac{M}{M_0}\right) \quad (1)$$

式中 M_0 是飞行器总质量（包括消耗前推进剂的质量）， M 是消耗推进剂的质量。按照变轨发动机数据，比冲 I 取310s。于是可以计算地月转移所

需推进剂。对于月球登陆及再返回，可以参考嫦娥五号着陆器和上升器（着上）组合体在登月过程中消耗燃料与飞行器重量的关系。经计算，结果如表5所示。

表 5 推进剂消耗估算

项目	登月舱	“望舒”飞船	“望舒”飞船	总计
	载人登月及返回轨道	前往月球	返回地球	
推进剂/t	27	42.7	14.6	84.3

4 运载火箭载荷需求与评估

4.1 运载火箭载荷需求

对于新一代运载火箭，其48h近地轨道运载能力的3倍，需要不小于“望舒”飞船重量与推进剂重量之和，即126.3t。

对于长征五号B型运载火箭，其48h近地轨道运载能力，需要不小于人员、物资和设备重量与往返舱重量之和，即16t。

4.2 可行性评估

中国在规划的新一代运载火箭（代号为CZ-5DY），近地轨道运力达到50t；中国目前较常使用的长征五号B型运载火箭（代号为CZ-5B），近地轨道的运载能力达25t。这两种型号的运载火箭可以满足载荷需求。

5 方案评估

5.1 经济成本评估

完成单次地月往返，需要使用3枚CZ-5DY运载火箭，1枚CZ-5B运载火箭，1艘“望舒”飞船（其中返回舱不可重复使用）。根据相关资料^[12]及估计，确定CZ-5B运载火箭单枚发射成本为9亿元，CZ-5DY运载火箭单枚发射成本为25亿元，“望舒”飞船（除返回舱）单艘制造成本为60亿元，返回舱单舱制造成本为5亿元。

基于前文技术假设，CZ-5B、CZ-5DY运载火箭均可实现一级子火箭回收、重复利用，单枚发射成本可降低70%；“望舒”飞船（除返回舱）

可长期在轨、重复使用，暂定其服役时间为10到20年，可完成5个批次的地月往返任务。因此，本方案的单人单次地月往返成本约为1.21亿元。

5.2 经济成本比较

按照阿波罗计划，完成单次地月往返，需要使用1枚土星五号运载火箭，1艘阿波罗飞船。考虑到通货膨胀和技术发展带来的影响，土星五号运载火箭单枚发射成本约为3亿美元^[13]（约合20.1亿元，仅考虑通货膨胀的影响为12亿美元），阿波罗飞船单座位成本约为1亿美元^[14]（约合6.7亿元，仅考虑通货膨胀的影响为3.9亿美元）。所以阿波罗计划的单人单次地月往返成本约为4亿美元（约合26.8亿元）。

因此，与阿波罗计划相比，本方案单人单次地月往返成本降低了约95%。

6 结论

本文面向大规模月球登陆这一问题，提出了长期在轨、重复使用的设计思路，给出了包括飞船设计、轨道设计、火箭需求在内的方案，并据此进行了经济成本的评估与比较，主要结论如下：

1)运载火箭一子级可回收重复使用、载人飞船长期在轨的方法，可以很大程度上降低地月往返成本。

2)在航天活动中，方案设计要考虑到现实需要、技术水平、安全程度等，具体方案会影响实现特定目标的经济成本。

3)本方案仅考虑到人员的往返，并未涉及生活物资、生产资料的运送。在后续研究中，可以综合现实生产生活情况，给出更完善、更全面的地月往返方案，解决登月人员长期生存、作业的问题。

致 谢

衷心感谢李祝飞老师在我组进行课题研究及完成课题报告过程中提供的帮助。

参考文献

- [1] 杨宇光. 国际探月历程[EB/OL].(2018-12-10)[2022-05-28].
<http://www.cnsa.gov.cn/n6758968/n6758973/c6804702/content.html>.
- [2] 中国航天科技集团. 嫦娥 [EB/OL]. [2022-05-28].<http://www.spacechina.com/n25/n142/n353157/n353165/index.html>.
- [3] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 2021中国的航天 [EB/OL]. (2022-01-28)[2022-05-28].
<http://www.cnsa.gov.cn/n6758824/n6758845/c6813190/content.html>.
- [4] 张钟静. 阿波罗登月方案是如何决定的?[J]. 自然辩证法通讯,1982,(6):34-38.
- [5] 龙乐豪. 中国运载火箭技术的成就与展望[J]. 导弹与航天运载技术,2001,1(1):1-8.
DOI:10.3969/j.issn.1004-7182.2001.01.001.
- [6] 付毅飞. 中国新一代载人运载火箭或用新型垂直起降回收方案 [EB/OL]. (2022-02-24)[2022-05-28].
<https://m.gmw.cn/baijia/2022-02/25/35543746.html>.
- [7] 李宇飞,高朝辉,刘伟,等. 载人登月人货分运与人货合运模式对比分析[J]. 载人航天,2014(4):307-311.DOI:10.3969/j.issn.1674-5825.2014.04.005.
- [8] 中国航天科技集团. 最早的月球车——“月球车一号”[EB/OL]. (2007-08-07)[2022-05-30].
<http://www.spacechina.com/n25/n148/n272/n4787/c105391/content.html>.
- [9] 中国小康网. 嫦娥四号两器分离——玉兔二号在月背留下第一道痕迹[EB/OL]. (2019-01-04)[2022-05-28]. https://www.sohu.com/a/286671052_426502.
- [10] 杨维廉. "嫦娥一号"卫星的调相轨道设计[J]. 中国空间科学技术,2010,30(1):18-24.
- [11] 汪中生,孟占峰,高珊,等. 嫦娥五号月球轨道交会对接远程导引轨道设计与飞行实践[J]. 宇航学报,2021,42(8):939-952.
DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2021.08.001.
- [12] 知乎. 长征五号的发射成本比长三乙高多少? [EB/OL]. (2020-04-10)[2022-05-28].
<https://www.zhihu.com/question/386658729>.
- [13] 寻味美食记. 土星五号无法再复制, 人类历史上最强火箭, 美国怎么造不出来了? [EB/OL]. (2021-09-19)[2022-05-28].
https://www.sohu.com/a/490841237_121045029.
- [14] 资本实验室. 从载人成本看SpaceX的颠覆式创新及NASA的“慧眼识珠” [EB/OL]. (2020-07-09)[2022-05-28].
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1671714461510462592&wfr=spider&for=pc>.

Heading for the Moon

- A Large-scale Lunar Landing Scheme for the Public

WANG Jialu^{1, *}, ZENG Tingwei¹, ZHANG Zhuowei²

1. *School of Engineering Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*

2. *School of Life Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*

Abstract: A large-scale lunar landing scheme for scientists, engineers and other public groups, serving China's strategic planning of building a lunar scientific research base, is proposed. A survey was conducted on the technical routes of manned spaceflight and lunar exploration between China and the United States, and the current situation of competition in the international aerospace field was reported. This paper analyzes the main difficulties in the design process, and puts forward the design idea of long-term on orbit and reuse according to the preset mission objectives, based on the principle of technical possibility, ensuring target load and reducing economic cost, fully drawing lessons from the existing lunar landing scheme. It puts forward a scheme of the repeated use of the launch vehicle's first sub-stage based on long-term manned spacecraft in orbit and designs a new type of manned spaceflight named Wangshu. It carries out orbit design and analysis, launch vehicle load requirements and evaluation. The comparative study shows that the economic cost of a single person to and from the moon is reduced by 95%, which illustrates that the scheme design has certain application value.

Keywords: manned spaceflight; lunar exploration; large-scale; spacecraft design; orbit design