

载人登月舱月面着陆冲击问题分析

刘炳坤, 马红磊, 肖艳华, 王健全, 祝 郁

中国航天员科研训练中心, 北京

Email: liubk2005@126.com, accliubk@126.com

收稿日期: 2020年11月13日; 录用日期: 2020年11月27日; 发布日期: 2020年12月4日

摘 要

月面着陆冲击问题是载人登月工程面对的技术挑战之一, 保障着陆稳定性及减少冲击载荷是问题的关键。本文依据美国阿波罗登月舱公开的技术资料, 针对月面着陆冲击问题展开分析。概括介绍了宇航员参与的月面主动避障着陆; 简述了登月舱的缓冲结构以及着陆速度的设计包线, 并分析了登月舱内宇航员设置为站姿的原因及其冲击防护措施; 简单介绍了在地面上进行登月舱模拟月面着陆冲击试验的两种方法; 最后, 提出了该领域未来需要进一步研究的课题。

关键词

载人登月, 月面着陆, 着陆冲击, 月球重力

Analysis of Landing Impact Problem for the Manned Lunar Module Touching Down on the Lunar Surface

Bingkun Liu, Honglei Ma, Yanhua Xiao, Jianquan Wang, Yu Zhu

China Astronaut Research and Training Centre, Beijing

Email: liubk2005@126.com, accliubk@126.com

Received: Nov. 13th, 2020; accepted: Nov. 27th, 2020; published: Dec. 4th, 2020

Abstract

Landing-impact problem is one of challenges in the manned lunar exploration engineering, and the key technologies are how to keep the stability and decrease the impact load during the lunar

文章引用: 刘炳坤, 马红磊, 肖艳华, 王健全, 祝郁. 载人登月舱月面着陆冲击问题分析[J]. 国际航空航天科学, 2020, 8(4): 70-75. DOI: 10.12677/jast.2020.84009

module (LM) landing on the lunar surface. On the basis of the public documents of Apollo Program, the problems of landing impact at the lunar surface were investigated in detail. Firstly, an active obstacle avoidance landing on the lunar surface involving astronauts was simply summarized. Secondly, the legged construction of energy absorption, the landing velocity envelope and the reasons for astronauts being set up as standing position in the LM and impact protection were illustrated. Thirdly, the full-scale and 1/6-scale landing impact tests conducted on the ground to simulate the lunar gravity were depicted. Finally, we presented the research items which need study in the near future.

Keywords

Manned Lunar Exploration, Landing on the Lunar Surface, Landing Impact, Lunar Gravity

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

月面着陆是载人月球探测计划的重要环节,也是人类到达月球的重要标志。美国于 20 世纪 60 年代初至 70 年代实施了著名的“阿波罗”载人登月计划[1] [2],在 11 次飞行任务中,有 6 次载人登月,将阿姆斯特朗等 12 名宇航员成功送上月球。目前,我国已经成功实施无人月球探测计划,即“嫦娥工程”,为将来我国实施载人登月计划奠定了良好基础[3] [4]。载人登月工程极其复杂,面临的风险挑战和技术难度很大,到目前为止,也只有美国成功实现了载人登月。与无人月球探测器相比,对载人登月舱的缓冲性能和稳定性要求更高,必须确保着陆过程中宇航员的安全[1]。美国在“阿波罗”登月计划中曾经对登月舱的着陆缓冲系统进行了大量的理论和实验研究,最终确定了四腿支架缓冲构型,并采用铝蜂窝材料作为吸能材料[5]。国内在“嫦娥工程”研制阶段开展了大量的研究工作,确定了月球探测器着陆缓冲系统的结构形式,并验证了缓冲性能和着陆稳定性[6] [7]。为满足我国未来载人月球探测任务的需要,应树立以“人为中心”的理念,借鉴美国成功登月的经验,一方面要进一步优化登月舱着陆缓冲系统性能,降低冲击过载,满足宇航员安全要求;另一方面要加强舱内宇航员的冲击防护。本文依据美国阿波罗登月舱公开的技术资料,针对登月舱月面着陆冲击问题展开分析,目的在于借鉴国外成功的经验,为我国载人登月舱月面着陆缓冲系统的设计和性能试验提供参考。

2. 主动避开障碍着陆

月球表面的地形地貌对登月舱着陆稳定性及冲击载荷均具有重要影响。因为月球上没有类似地球的大气层,登月舱无法利用降落伞进行减速着陆,只能利用火箭发动机产生的反推力减速下降。我国的无人月球探测器采用先进的主动避障着陆技术(光学成像着陆区捕捉技术),成功地实现了在月球表面的软着陆。未来的载人登月舱由于有宇航员的参与,还可以增加手动操控系统,并与先前积累的主动避障技术相结合,使得登月舱更准确地在预定计划区域着陆或者根据实际情况选择在平坦区域着陆。上世纪的美国阿波罗登月计划时期,还没有主动避障技术,主要靠宇航员的肉眼观察,手动操作避开坑和岩石等不利着陆的区域。例如阿波罗 11 号着陆在相对平坦的区域(称谓静海),但在着陆点附近存在很多坑,直径从 1 英尺到 50 英尺不等。该区域坑的数量与坑的尺寸成反比,小尺寸坑的数量占多数。

舱内的宇航员可以看到远处有 20~30 英尺高的山脊,在着陆点北部几百英尺的地方是石头区域,这里的石头平均直径至少 2 英尺。在着陆的最后阶段,大量的精细的月球材料(月尘)被移开,大约在 100 英尺高度被明显地观察到流动的尘埃,但在下降处这股尘埃浓厚得几乎什么也看不清楚。这些被驱逐材料的路径平行于月球表面,并且以高速沿水平方向移动了很远的距离。这股尘埃的主要影响是部分地模糊或扭曲了宇航员对月球表面的观察,且给推测登月舱的水平速度带来了困难。这些月球表面材料的运动状态的变化是由于登月舱下降发动机的激扰引起的。登月舱着陆后,宇航员出舱并在其附近的月面上行走,留下了清晰可见的脚印,这表明月球表面是一种松软的有一定粘性的材料;旗杆可插入月壤的深度大约 7 英寸,说明月壤并非十分坚硬。对月壤样本的研究表明,月球的表面是一种浅灰色到褐灰色的尘埃,厚度大约八分之一英寸;下面是以厚约四分之一英寸的黑灰色软层,再往下是 2~6 英寸厚的黑灰色沙和淤泥材料,能保持住大约 70°的坡度;继续延伸往下是更加牢固和穿透阻力更大的月壤。月壤中分布着不规则的岩石碎片,有些碎片在表面,有些部分地埋在月壤里,有些沉积在里面。月壤 2~7 英寸的深度相对较柔软,这里的月壤容易被挖起来,并能提供较低的穿透阻力和较低的对插入杆的侧向支持力。这些软层的下面,材料对穿透的阻力显著地增加。实验测定:月壤材料的粘附性在 0.04~0.14 N/cm² 之间。通过估算得出阿波罗 11 号登月舱足垫处月壤平均的静态承受压强为 0.6~1.5 N/cm²,而此处月壤的下陷深度 1 到 3 英寸,这些数据在一定程度上表征了月壤的承载能力[8] [9] [10]。在有人参与的情况下,比无人主动避障着陆更为可靠,使得登月舱着陆在类似上述较平坦的月面上,月壤也不太坚硬,只要控制好登月舱的姿态和着陆速度,就能从根本上保证不会产生较大的冲击过载,同时也能保证着陆的稳定性。

3. 载人登月舱的缓冲结构设计

载人登月舱的功能不仅要保证宇航员在月面安全着陆,而且还要保证宇航员安全可靠地离开月球。因此,登月舱的设计采用多腿支架形式着陆。这种设计的好处在于:① 适应月面地形(坡度),具有抗倾覆稳定性,防止翻滚;② 既可以缓冲,又可以作为从月面点火上升的支架。如果登月舱翻倒,或者倾斜角度过大,则会引起灾难性事故(人回不到地球)。阿波罗登月舱最初的设计采用由五腿支撑,后来经过减重和稳定性的综合考虑修改为四腿支撑。为增加稳定性和缓冲性能,每个主着陆腿上联结有两个副着陆腿,并在主着陆腿末端设置有足垫。主、副着陆腿中均采用铝蜂窝作为缓冲吸能材料[5]。我国的无人月球探测器的着陆缓冲机构与此类似[6] [7]。以铝蜂窝为吸能材料的着陆缓冲器比液压式缓冲器、电/磁流变缓冲器等在月球恶劣环境(高低温、真空和低重力)下工作性能更稳定和可靠[11]。因此,载人登月舱着陆缓冲机构的设计应继承这种结构形式,但需要在有效载荷重量和缓冲性能之间权衡,开展优化设计,进一步降低冲击过载。

4. 载人登月舱月面着陆速度

月面着陆速度是影响着陆冲击的关键因素。着陆速度包括垂直速度和水平速度,不仅影响到冲击过载的大小,还影响登月舱的稳定性[12]。阿波罗登月舱的设计包络线如下[5]:舱的姿态是随机变量,登月舱纵轴和月球重力矢量的夹角小于 6°;绕各轴的角速度小于 2 deg/sec;当垂直速度 V_v 不大于 7 ft/sec 时,水平速度 V_h 最大为 4 ft/sec;当垂直速度 V_v 大于 7 ft/sec,但小于 10 ft/sec 时,水平速度 V_h 应满足下列关系: $V_h = 40/3 \sim 4/3 V_v$ 。阿波罗登月舱在着陆稳定性、冲击过载、地形坡度、主副支柱缓冲行程共同约束限制下的着陆速度包络线如图 1 所示。我国的载人登月舱的设计应借鉴上述速度包线,结合具体情况开展优化设计,通过多工况下着陆冲击动力学理论分析和实验验证,确保登月舱着陆稳定性和降低冲击过载。

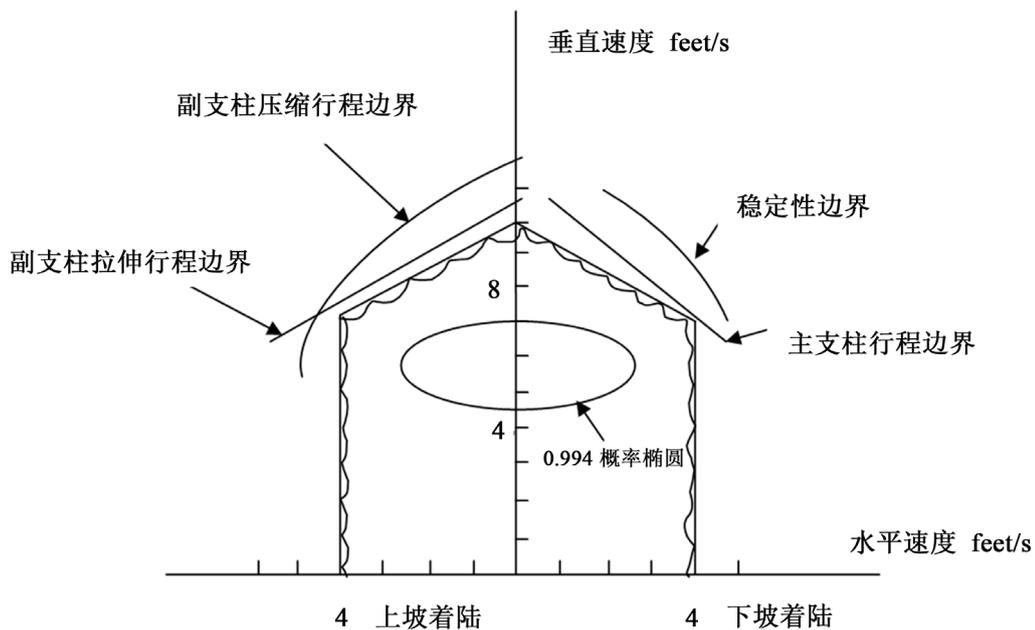


Figure 1. The maximum touchdown-velocity envelope
图 1. 着陆速度包络边界

5. 登月舱内宇航员的体位设置及冲击防护措施

不同于飞船中的座椅仰卧姿态，宇航员在登月舱中的体姿设置为站姿。这样的改变是基于下列两点考虑：① 便于观察着陆点周围的地形地貌；② 下降和上升阶段的加速度较小(均在 1 g 以下) [11]。美国 Apollo 登月舱与前苏联 L3 登月舱的宇航员均采用站姿。在正常软着陆情况下，由于着陆冲击载荷较小，这种姿态下着陆也能够保证宇航员安全性和可操作性，但在非正常情况下，需要采取冲击防护措施，避免在较大载荷下出现二次撞击损伤。在阿波罗登月舱内设置有一套适合站立姿态的宇航员着陆冲击防护束缚系统[13]。这套系统主要由绳索滑轮系统及恒力控制器组成，分布于站姿宇航员的两侧，在其腰部和航天服的锁扣相连接。它的功能是防止着陆期间过大的冲击载荷引起宇航员和周围介质的碰撞，避免碰撞损伤，但不影响登月舱下降期间宇航员的正常操作。我国载人登月舱内站姿宇航员约束系统的研究工作才处于起步阶段，上述约束系统的设计值得借鉴。

6. 月面着陆冲击模拟试验方法

载人登月舱的缓冲性能及着陆稳定性必须在地面进行模拟试验验证。一般采用两种方法：① 全尺寸模型模拟月球重力下的冲击试验；② 1/6 缩比模型地球重力下的冲击试验[14] [15] [16] [17] [18]。

第一种方法采用悬吊的登月舱模型在一个倾斜 9.5°的斜面上产生着陆冲击。由于月球重力是地球重力的 1/6，登月舱在一个倾斜 9.5°的斜面上的正压力恰好是其实际重力的 1/6。因此，实现了在地面重力下模拟月球重力的着陆冲击。此外，为了更真实地模拟月面上的着陆冲击，还需要把倾斜面材料的力学性质尽可能和月壤的性质相接近。

第二种方法是采用 1/6 的缩比模型舱在地球重力下进行冲击试验。这种模型的尺寸、质量、惯性应力、加速度等参数与原型均具有可比性，例如质量为原型的 1/6³，而加速度为原型的 6 倍。这种试验方法和全尺寸模型相比，具有试验成本低，操作方便等优点，但支柱中的蜂窝缓冲结构也要按照该比例制作，给模型加工带来一定的难度[5] [18]。

国内相关部门已经研制出了载人登月舱着陆缓冲装置的原理样机和部分验证试验[19],但在模拟月球重力环境下的着陆冲击性能验证试验还有待于探索。

7. 需要进一步研究的课题

① 月壤的模拟研究

国内优势研究单位正在开展月尘模拟物的研究[20],对月壤力学性质及模拟物的研究还比较缺乏。为了更好地在地球上开展模拟月面着陆冲击问题的研究,必须首先研究月壤的力学性能,研制能够模拟月壤力学性质的替代材料。

② 站姿着陆冲击过载损伤评估参考值研究

载人登月舱着陆安全性的评估,需要站姿人体着陆冲击过载损伤评估参考值(IARV)。过去的研究侧重于坐姿或仰卧姿着陆冲击生物效应及损伤阈值的研究,而对站姿着陆冲击的研究相对缺乏,也没有查到公开的研究资料。因此,未来需要开展系统的研究。通过研究确定站姿人体的 IARV 时,不仅要考虑正常着陆和非正常着陆,还要考虑人体测量学数据、登月航天服的影响及航天飞行失重因素的不利影响。

③ 月面着陆期间宇航员约束防护研究

针对非正常着陆工况,开展站姿乘员约束防护技术研究,防止二次碰撞损伤的发生。

基金项目

中国载人航天领域预先研究项目资助(020101)。

参考文献

- [1] NASA Mission Evaluation Team (1971) Apollo 11 Mission Report. NASA SP-238.
- [2] NASA (1969) Apollo 11 Preliminary Science Report. NASA SP-214.
- [3] 欧阳自远. 月球探测的进展与中国的月球探测[J]. 地质科技情报, 2004, 4(23): 30-34.
- [4] 栾恩杰. 中国的探月工程[J]. 中国航天, 2006(2): 3-7.
- [5] William, F.R. (1972) Apollo Experience Report: Lunar Module Landing Gear Subsystem. NASA TND-6850.
- [6] 曾福明, 杨建中, 朱汪, 等. 月球着陆器着陆缓冲性能研究[J]. 航天器工程, 2010, 19(5): 43-49.
- [7] 杨建中, 曾福明, 满剑锋, 等. 嫦娥三号着陆器着陆缓冲系统设计与验证[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(5): 440-449.
- [8] 叶培建, 肖福根. 月球探测工程中的月球环境问题[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(1): 1-11.
- [9] Costes, N.C., Carrier, W.D., Mitchell, J.K., *et al.* (1969) Apollo 11 Soil Mechanics Investigation. NASA SP-214, 85-121.
- [10] Jaffe, L.D. (1966) Lunar Dust Depth in Mare Cognitum. *Journal of Geophysical Research*, **71**, 1095-1103. <https://doi.org/10.1029/JZ071i004p01095>
- [11] 于建强, 董小闵, 林轻. 可重复使用着陆缓冲器性能及其特点分析[J]. 载人航天, 2018, 24(1): 107-112.
- [12] Walton, W.C. and Jr., R.W. (1964) Studies of Touchdown Stability for Lunar Landing Vehicles. *Aerospace Sciences Meeting*, New York, 20-22 January 1964, L-3771.
- [13] Fred, A.M. (1972) Apollo Experience Report: Crew Provisions and Equipment Subsystem. NASA Technical Note, NASA TND-6737.
- [14] 张则梅, 聂宏, 陈金宝, 等. 月球探测器着陆冲击试验及关键技术研究[J]. 宇航学报, 2011, 32(2): 267-276.
- [15] 王少纯, 邓宗权, 胡明, 等. 一种模拟月球着陆器低重力着陆试验方法[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(6): 989-992.
- [16] Thomas, C.B. and Donald, E.H. (1967) Operational Features of the Langley Lunar Landing Research Facility. NASA TN D-3828.

-
- [17] Ulesse, J.B. (1969) Full-Scale Dynamic Landing Impact Investigation of a Prototype Lunar Module Landing Gear. NASA TN D-5029.
 - [18] Ulysse, J.B. (1968) Evaluation of a Full Scale Lunar Gravity Simulator by Comparison of Landing Impact Tests of a Full-Scale and a 1/6-Scale Model. NASA TND-4474.
 - [19] 王永滨, 蒋万松, 王磊, 等. 载人登月舱月面着陆缓冲装置设计与研制[J]. 深空探测学报, 2016, 3(3): 262-267.
 - [20] 唐红, 张森森, 李雄耀, 等. CLDS-i 模拟月尘的基本性质及应用前景[J]. 载人航天, 2017, 23(1): 118-122.