

载人月球着陆器人机协同下降避障GNC系统设计

杨巍¹, 贾飞达¹, 张一^{1,2}

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100190; 2. 国防重点实验室, 北京 100190)

摘要: 提出了一种“自控为主、人控为辅、人机结合”的载人月球着陆器制导、导航与控制(Guidance, Navigation and Control, GNC)系统人机协同避障控制方案。通过构建避障安全点辅助选取算法、开发手控半自动避障控制模块、设计人控一键式应急上升方案以及优化人机交互界面, 实现了航天员在月面着陆过程中的自主决策支持。研究结果表明, 该系统能够有效提升月球着陆过程的可靠性和安全性, 满足载人月球探测任务需求。该方案为载人月面着陆下降任务提供了高可靠、高安全的GNC系统解决方案, 具有重要的工程应用价值。

关键词: 载人月球着陆器; 人机协同避障; GNC系统设计

中图分类号: V448.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2026)01-0079-09

DOI: 10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250023

引用格式: 杨巍, 贾飞达, 张一. 载人月球着陆器人机协同下降避障GNC系统设计[J]. 深空探测学报(中英文), 2026, 13(1): 79-87.

Reference format: YANG W, JIA F D, ZHANG Y. Design of human-machine cooperation obstacle avoidance GNC system for manned lunar lander[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2026, 13(1): 79-87.

引言

月面下降着陆过程是载人月球探测任务中最具挑战性和风险性的环节。载人月球探测任务需经历地球重力、零重力、月球重力3种不同重力环境, 增加了相关任务系统的技术研制难度。与无人探测任务相比, 载人月球探测任务需保障航天员的安全和舒适, 增加了系统的复杂性; 载人月球探测系统还需与航天员直接或间接交互, 增加了交互内容及交互关系, 系统间交互逻辑也变得更加复杂, 给任务实施的安全性带来了技术挑战; 载人着陆需实时适应月面复杂地形(如陨石坑、月石分布未知), 但地月通信延迟迫使宇航员主观快速判断, 而月尘附着与着陆冲击可能威胁生命维持系统。相比之下, 无人任务依赖自主算法完成全自动着陆, 无需考虑生命保障与实时人机协作, 技术复杂度相对较低。总之, 如何确保落月过程的高可靠和高安全性, 是载人月球着陆器制导、导航与控制(Guidance, Navigation and Control, GNC)系统设计的特点和难点^[1]。

目前为止, 唯一成功实施过载人登月任务的是20世纪70年代美国开展的“阿波罗号”(Apollo)登月工程, 距今已半个多世纪。受当时技术水平限制, “阿波罗号”登月任务在月面下降过程中, 无一例外都是由航天员手控完成最后阶段的避障和控制^[2-5]。随着科学

技术的进步, GNC自主避障技术逐渐成熟, 中国的“嫦娥三号”~“嫦娥六号”均采用了激光三维成像的自主安全点识别算法和避障方式。“嫦娥三号”根据软着陆和机动避障需求, 采用惯导为基础、辅助测距和测速修正的自主导航方法, 提出自适应动力学显式制导、无迭代多项式粗避障制导以及内外环结合的精避障制导, 在悬停段开始对着陆器下方区域进行高精度三维成像, 确定安全着陆点^[6-10]。“嫦娥五号”进一步提出光学粗避障和激光精避障的两级接力避障模式, 利用K均值聚类和概率模型选择安全落点和评价着陆安全性, 成功保障了月面采样任务的圆满完成^[11-13]。无人月球探测技术的顺利实施为载人月球探测奠定了良好基础, 近年来, 中国载人月球探测工程、美国“阿尔忒弥斯”(Artemis)计划^[14]、俄罗斯“月球-Glob”(Luna-Glob)计划^[15]、印度“加甘扬”(Gaganyaan)计划^[16]、日本载人登月计划^[17]等相继提出, 月球探测即将迈入新阶段。

由于“人”要素的加入, 载人月球探测系统面临更加严格的可靠性要求的同时, 也具备了当前探测器本身较缺乏的即时应变和决策能力。相比人类对于危险障碍的感知能力, 基于机器视觉的障碍识别还存在一定程度的不足, 缺乏应对非预期任务的能力。纯手动控制充分发挥人类灵活应对未知环境的能力, 但受限于宇航员生理负荷与操作误差, 在高风险场景下容错

性不足。而人机联合控制通过自动系统实时监测环境与风险,结合人类在突发状况下的经验决策,可在复杂场景中兼顾效率与安全性。因此,充分考虑机器视觉智能辅助和航天员主动控制相结合,本论文进行载人月球着陆器的人机协同避障GNC系统设计。首先,介绍人机协同避障GNC系统的组成和设计原则;然后,基于月面着陆过程特点和人控需求设计两种人机协同工作模式;其次,考虑着陆过程人控需求和约束,进行人机协同GNC系统设计,包括:①对于载人月球着陆下降过程,充分利用航天员的智能决策能力,同时结合机器视觉障碍检测技术,实现避障安全点辅助选择功能;②针对航天员手控功能,设计基于自动控制系统闭环的手控半自动方案,使航天员通过简单操作实现着陆器的姿态和飞行轨迹控制,降低操作复杂度;③考虑下降过程中由于环境、硬件、软件等妨碍安全着陆的情况,进行人控一键式应急上升设计,保障航天员的安全;④从仪表显示、操作的角度出发对显示控制方案进行设计,为航天员提供简洁友好的人机交互界面。最后,对本文主要研究内容进行总结。

1 人机协同避障GNC系统总体设计

1.1 系统组成

充分考虑人的因素在月球探测任务中的决策作用,月球着陆器人机协同下降避障GNC分系统的设计目标是:人控功能作为自控功能的辅助,在自控系统正常时不需要人控参与,只有当自控系统出现故障,通过人控功能为自控系统提供控制目标,由自控系统完成控制指令的解算和输出。即“自控为主、人控为辅、人机协同”,没有独立的人控系统,但是需要通过人机协同系统设计,实现人控功能。对于人控功能来说,航天员人控的操作,如安全点选择、操作着陆控制手柄、应急指令面板操作等都为自控系统的控制器提供控制目标,而具体指令的输出仍由自控系统控制计算完成。人机协同GNC系统的自控和人控关系如图1所示。

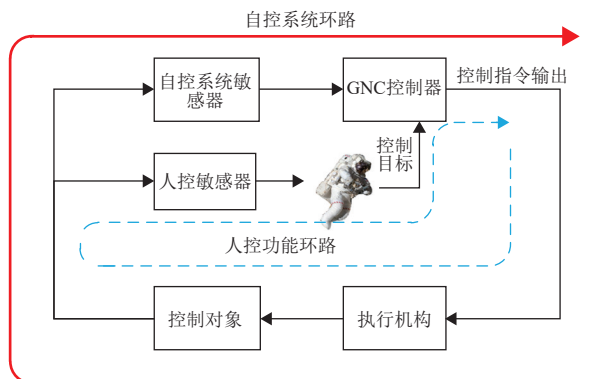


图1 自控系统与人控功能关系

Fig. 1 Functional relationship between autonomous system and manual control

1.2 系统设计原则

载人月球着陆器GNC分系统通过合理的冗余设计,无论是控制器(四机)、敏感器(冗余备份)还是执行机构(推力器分组),都保证了相当高的可靠性。人机协同功能主要为航天员提供必要的飞行状态监视信息,同时提供航天员介入控制的途径和条件,航天员可根据飞行任务要求在应急状况下对着陆器GNC控制进行必要的干预,人机协同控制方案和系统架构的设计原则如下:

- 1) 正常飞行任务中以GNC自动控制为主、人机协同控制为辅;
- 2) 人机协同控制功能应该尽量简单可靠,使航天员操作尽量少;
- 3) 人机协同控制功能应提供航天员完整可靠的显示信息,包括:姿态、姿态角速率信息、燃料剩余量信息以及着陆过程中的位置、高度、速度、姿态等信息;
- 4) 考虑到着陆器系统资源限制和应急任务特点,人机协同控制系统架构基于自动控制系统进行扩展设计,二者共用测量敏感器、控制计算机等硬件资源,同时人控功能有手柄、着陆监视仪等专用设备。

2 人机协同工作模式设计

相比“阿波罗号”着陆手动控制方案,中国载人月球着陆器的人机协同控制介入更早,从主减速开始至最终着陆的过程中,将人机协同工作模式分为监控模式和手动控制模式。

1) 监控模式

监控模式从主减速段就开始运行,在该模式下主要通过仪表显示设备将GNC分系统必要的状态信息显示给航天员,供航天员判断整个着陆器运行状态。在监控模式下人控系统不输出控制指令,着陆过程还是由自控系统完成,但是在航天员根据仪表显示信息判断出落点偏差过大或某些设备异常后,具备着陆点重新选择、单机切/入状态控制等介入手段干预自控系统运行。

2) 手动控制模式

与“阿波罗号”着陆手控方案类似,载人月球着陆器的手动控制模式的介入时机也被限制在进入接近段之后。航天员通过操作着陆控制手柄输出控制指令给GNC控制器计算机,计算机将控制指令解算为相应推力器动作指令,实现手动控制模式下的着陆器姿态控制。进入手动控制模式后,航天员可在仪表显示信息辅助下完成避障以及最终下降着陆任务。

载人月球着陆器的人机协同工作模式中的监控模

式还可用于在月面起飞准备过程中实现航天员起飞参数设置的功能(在应急起飞场景下,无法获取准确的

自主定位和起飞准备参数),两种人机协同工作模式总结如表1所示,原理如图2和图3所示。

表 1 人控系统工作模式及功能
Table 1 Working modes and functions of manual-control system

模式	控制权	主要功能	航天员控制手段
监控模式	自控系统输出控制指令并解算为喷气指令	1) 将GNC分系统运行状态通过仪表显示给航天员 2) 接收参数设置和系统组态的切换指令	1) 落点选择 2) 起飞参数设置(月面起飞时) 3) 敏感器/发动机的主备路切换
手动控制模式	由航天员输出控制指令,由GNC控制器解算控制指令并输出喷气指令	1) 将GNC分系统运行状态通过仪表显示给航天员 2) 解析着陆控制手柄输入指令,按设计控制率生成控制指令	1) 敏感器/发动机的主备路切换 2) 通过手柄直接控制着陆器六自由度运动 3) 主发动机机关 4) 手动触发应急上升

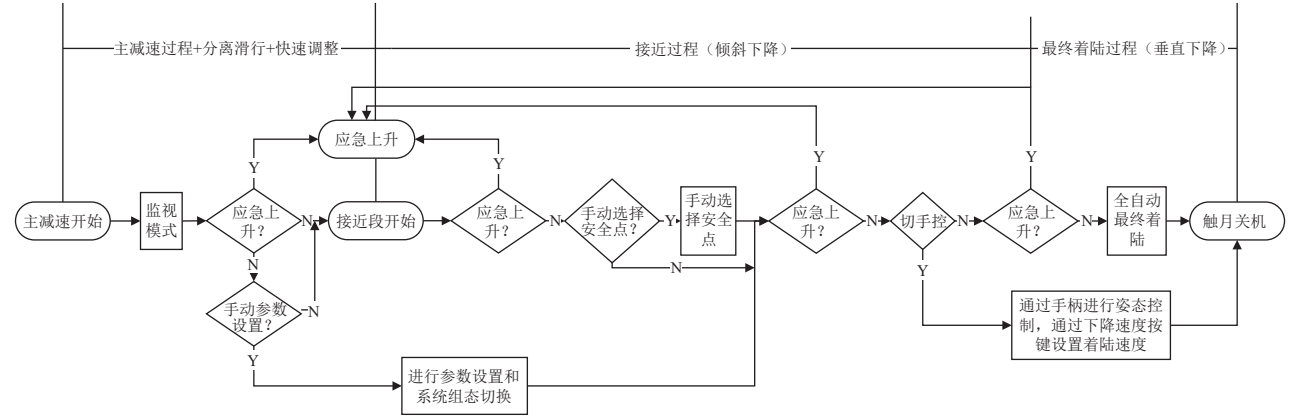


图 2 着陆下降过程中人机协同方案
Fig. 2 Human-machine cooperation during landing process

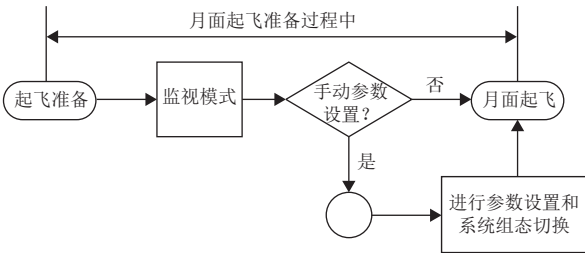


图 3 月面起飞准备过程中人机协同工作方案
Fig. 3 Human-machine cooperative work plan for lunar takeoff preparation phase

3 人机协同避障GNC系统方案设计

设计人机协同月面着陆避障GNC系统时,结合应用较为成熟的机器视觉技术与载人任务独有的手动控制方式,确保着陆过程安全可靠。系统充分利用人在复杂决策和灵活应对突发情况方面的优势,同时发挥机器的精准控制和实时监测能力,实现高效智能的月面着陆避障操作。

3.1 基于机器视觉避障安全点辅助选取

机器视觉技术是实现着陆避障功能的关键。通过避障敏感器对月面地形进行实时图像采集和分析,识别潜在的危险区域,如巨石、坑洼等。同时,着陆器根据当前的位置姿态和机动能力,计算出若干安全着

陆点。系统将安全点信息通过仪表实时反馈给航天员,为其提供安全着陆点辅助选取决策支持。

与“嫦娥五号”类似,月球着陆器根据工作阶段分为光学粗避障和激光三维精避障。光学粗避障敏感器工作在1.2 km高度,成像分辨率亚米级,利用光学图像的灰度和纹理避开着陆过程中的米级大型石块和陨坑,选择百米级尺度的安全区域。激光三维精避障敏感器在100 m高度成像,避开0.2 m大小的障碍,选取9.9 m × 9.9 m的安全着陆区。激光三维避障方案在“嫦娥五号”和“嫦娥六号”的基础上,根据极区地形特点,在安全点输出方面进行适应性调整。

在光学粗避障阶段,首先根据敏感器采集的避障图像进行灰度障碍统计,主要是对图像上过亮或者过暗的区域进行统计,寻找出亮度较为均匀的区域;然后进行纹理障碍统计,主要是对局部图像上纹理的起伏进行统计分析,最终输出安全概率最高的预选着陆区的中心指向。

在激光三维精避障阶段,对预选着陆区中心点坐标周围200 m区域进行坡度拟合和安全评估,选取平坦区域作为安全点供航天员选取,进行安全着陆。激光三维避障主要包括如下步骤:

- 1) 数据预处理:剔除野值、网格划分。

2) 坡度检测: 坡度拟合、同时剔除视场内坡度大于安全阈值的区域。

3) 粗糙度障碍累计: 对局部地形的坑包等粗糙度障碍进行评估, 对区域内偏离平面的测量值进行分析和累计。

4) 区域安全概率求解: 综合考虑坡度障碍和粗糙度障碍对安全概率的影响。

5) 综合安全概率评估: 将步骤4) 计算出的区域安全概率, 进行 5×5 网格的综合概率加权, 5×5 网格的加权系数服从二维高斯分布, 距离区域中心越近其安全概率权重越大, 距离中心点越远其安全概率权重越小, 使得选择的安全区中心远离显著的障碍。将中心点安全概率最大的点确定为安全区并得到总的的安全概率。

6) 安全点输出: 输出安全区域中心的矢量信息。

激光三维避障流程如图4所示。

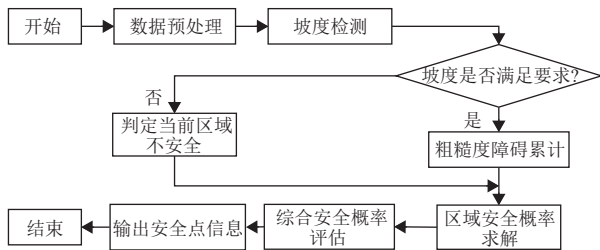


图4 激光三维避障算法流程图

Fig. 4 Flowchart of laser 3D obstacle avoidance algorithm

3.2 手控半自动方案设计

根据上述分析, 载人月球着陆器在下降着陆过程中以自控为主, 航天员作为故障时的备份保障, 故保留手控半自动控制模式, 允许航天员根据实际情况进行切换。下面对手控半自动方案进行定位阐述和详细设计。

1) 手动运动控制的定位

故障情况下, 作为自控系统的应急备份。手动运动控制是月球着陆器自动控制的应急备份, 能够在自动控制系统发生故障时, 切换至手动控制系统, 进行应急控制, 待自控系统恢复正常后, 视情况切回自动控制。

正常情况下, 提升航天员驾驶感。下降着陆过程中, 在确保系统与航天员安全的前提下, 手动运动控制可作为提升航天员驾驶感的一种控制方式。

2) 手动运动控制的设计原则

月球着陆器在进行手动运动控制设计时应遵循以下设计原则。

安全性原则。正常情况下航天员能够通过人控运动控制, 保证着陆器安全下降着陆; 在自控系统故障情况下(故障不足以影响航天员安全, 影响航天员安全时, 取消着陆, 进行应急上升), 起到自动控制系统的备份作用; 自控下降着陆与手控下降着陆二者之间有可靠的切换和相互间的故障隔离, 最终保证航天员安全。

简单性原则。手动运动控制设计简单有效, 尽量减少硬件和软件代价, 尽量减少航天员操作, 并可以在没有地面支持的条件下独立完成任务。

易用性原则。采用良好的人机工效, 手动运动控制应为航天员提供方便的监视与操作环境, 便于航天员进行闭环控制, 设计应满足工效学要求。

3) 手动运动控制的设计使用

月球着陆器下降着陆过程中, 使用手控运动控制时, 主要有以下半自动下降着陆功能。

模式切换设计。航天员能够通过手柄和仪表切换控制模式, 包括监视模式、手动控制模式。

坐标选取功能设计。在下降着陆过程中, 航天员根据仪表显示的偏差和设备状态信息, 判断出落点偏差过大或某些设备异常后, 可进行着陆点重新选择。

着陆器水平运动手动控制。第一种是速率控制姿态保持(Rate Command Attitude Hold, RCAH)模式, 即手柄的偏转或旋转角度对应着陆器的角速度指令。如图5所示。第二种是姿态指令速度保持(Attitude Command Velocity Hold, ACVH)模式, 姿态控制手柄偏转产生的是目标姿态, 手柄回零后飞行姿态不再倾斜, 水平速度得以保持。这种方案与RCAH方案的主要区别就在于姿控手柄的偏转代表的是指令姿态而不是姿态角速度。如图6所示。

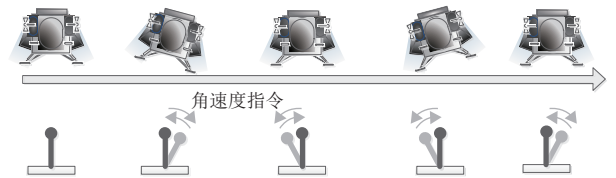


图5 RCAH方式实现平移

Fig. 5 Translation with RCAH method

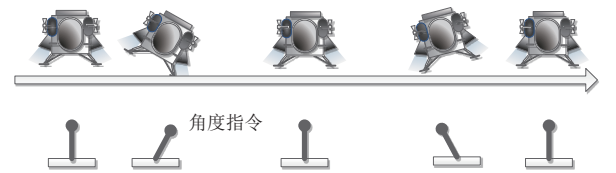


图6 ACVH方式实现平移

Fig. 6 Translation with ACVH method

通过分析可操作性, 初步设计按照滚动/俯仰采用ACVH方式控制, 航向(偏航)采用RCAH方式控制。滚动/俯仰采用ACVH方式的原因是控制比较简单, 便于操作; 航向采用RCAH方式的原因是, 航向角的变化范围可以达到 360° , 大角度长时间扭动手柄比较费力。

4) 着陆器垂直运动手动控制

垂直运动可采用两种方式实现: ①通过推杆调节目标下降速度, 控制系统自动跟踪目标下降速度; ②通过推杆, 直接控制下降发动机推力输出, 通过改

变推力大小来调整下降速度, 在该模式下, 垂向通道根据制导律计算目标推力大小, 并在仪表上显示出来, 供航天员参考。

5) 手动避障控制功能设计

航天员根据仪表显示信息和舷窗判断出障碍物, 通过手柄控制着陆器垂直运动和水平运动避开障碍物。

根据上述手动控制算法, 对不同通道控制指令下的手动运动控制过程进行了仿真验证。

设置着陆器的初始经度为 18.6° 、纬度为 7.49° 、高度为 30 m ; 初始横向速度和垂向速度为 0 , 处于悬停状态; 初始滚动角和俯仰角为 0° 、偏航角为 180° , 三轴角速度均为 $0^\circ/\text{s}$ 。

3.2.1 手柄控制滚动姿态倾斜进行平动

图7~9显示出滚动手柄偏转产生了对应的滚动角, 造成姿态倾斜。主发动机由此产生横向推力, 水平速度增加, 最终实现了水平位置的变化。

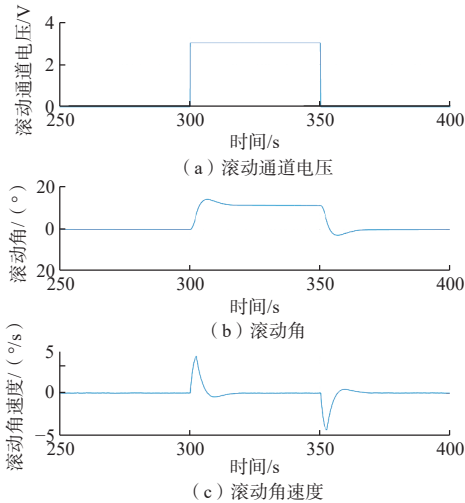


图 7 滚动通道手柄指令与姿态响应

Fig. 7 Roll channel stick command and attitude response

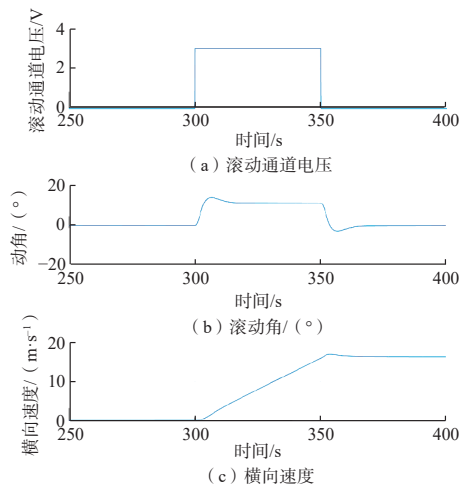


图 8 滚动通道手柄指令与横向速度响应

Fig. 8 Roll channel stick command and lateral velocity response

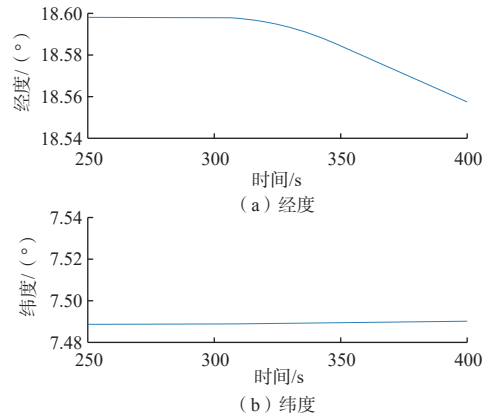


图 9 经纬度变化

Fig. 9 Variation of latitude and longitude

3.2.2 手柄控制俯仰姿态倾斜进行平动

图10~12显示出俯仰手柄偏转产生的俯仰角使主发动机产生横向推力实现水平位置的变化。

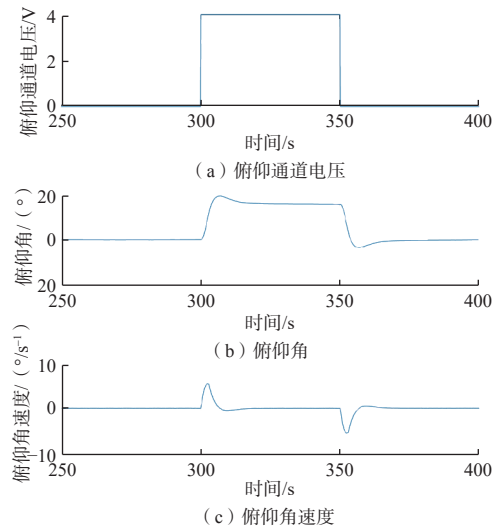


图 10 俯仰通道手柄指令与姿态响应

Fig. 10 Pitch channel stick command and attitude response

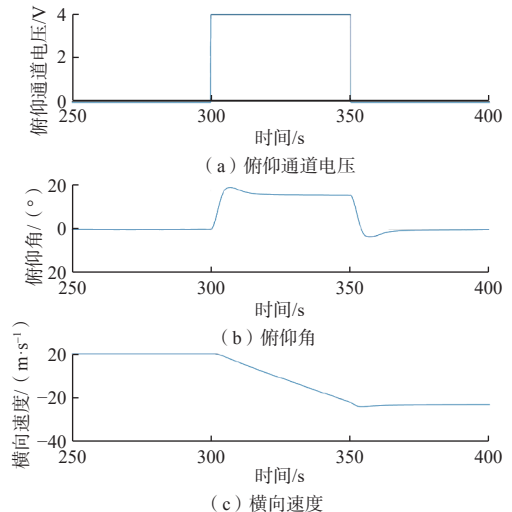


图 11 俯仰通道手柄指令与横向速度响应

Fig. 11 Pitch channel stick command and lateral velocity response

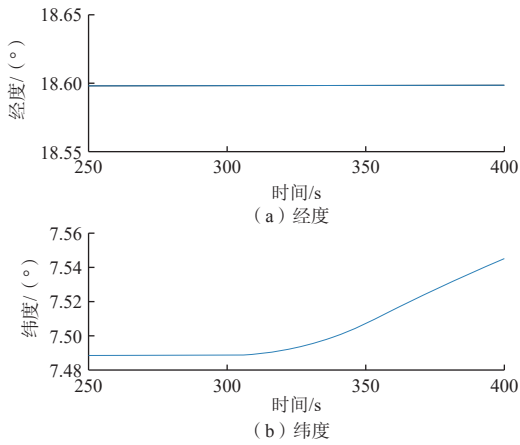


图 12 经纬度变化

Fig. 12 Variation of latitude and longitude

3.2.3 手柄控制航向调整

通过偏航角调整可以旋转着陆器面对的方向。姿态响应和着陆器经纬度变化如图13和图14所示。

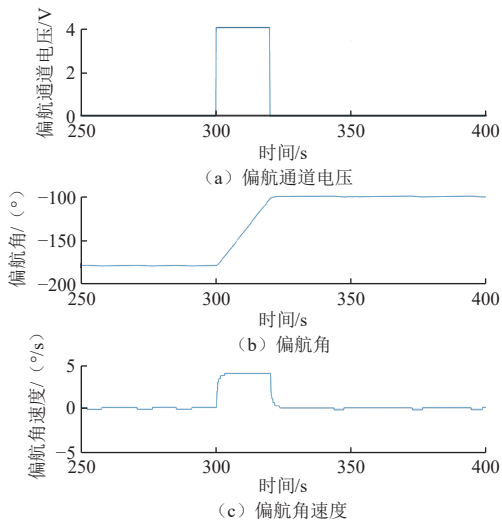


图 13 偏航通道手柄指令与姿态响应

Fig. 13 Yaw channel stick command and attitude response

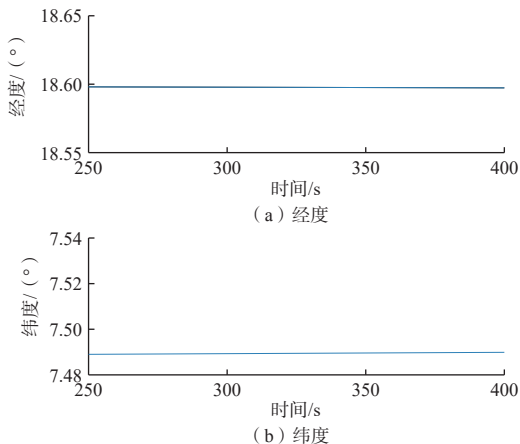


图 14 经纬度变化

Fig. 14 Variation of latitude and longitude

可以看出,与滚动和俯仰通道不同,偏航通道产生的是角速度跟踪指令,目的在于快速调整着陆舱在水平方向指向,而且偏航通道不会产生横向位移。

3.3 人控一键式应急上升

为应对突发情况,系统设计了人控一键式应急上升功能。当航天员发现着陆过程存在危险或异常情况时,只需按下应急上升按钮,系统将迅速启动上升程序,使着陆器脱离危险区域。应急上升过程中,系统将自动调整着陆器的飞行轨迹和姿态,确保安全返回环月轨道。

在一键式上升设计时,考虑到对于航天员驾驶着陆器纯手动控制上升入轨基本不可实现,而且代价大,存在以下难点:操控难度高,航天员需要通过手动控制多台姿控发动机,操控难度极大,难以控制着陆器姿态稳定,不利于安全;硬件系统代价大,需要增加每台发动机直连线缆和对应的发动机驱动控制单元。

对此,设计了“模式1:一键自动应急上升”和“模式2:航天员一键产生姿态指令,计算机控制喷气入轨”两种半自动方案。

模式1:如果姿态内环(发动机喷气指令)采用自动控制,制导指令由控制模块自动产生,则此时的方案展现的效果是一键自动应急上升,航天员只需要触发应急上升指令即可,具体入轨的运动控制,则不需要进行任何手动操作,而且能够精确入轨。

模式2:如果姿态内环(发动机喷气指令)采用自动控制,制导指令由航天员手动产生,则此时的方案展现的效果是航天员指定着陆器的飞行方向,计算机产生喷气指令控制其上升入轨,由于上升入轨需要非常精确的随高度变化的姿态指令,因此手动驾驶操作方式不能控制着陆器入轨,仅可通过航天员发送姿态指令短期内控制着陆器不坠地。

两种模式采用相同的姿态控制方式,制导指令产生方式对硬件的要求基本相同,区别主要在对航天员操作能力要求上。因此通过设计不同的软件分支,将两种制导指令产生方式均保留,后续使用过程中,根据航天员的训练情况和实际应用场景进行选取。具体使用优先级:优先采用模式1,即一键自动应急上升,以降低航天员任务压力并保证精确入轨,如果一键应急上升出现故障,则切换成模式2,即航天员发送着陆器的飞行方向,计算机产生喷气指令控制着陆器姿态模式,控制着陆器不坠地。

3.4 人机交互界面设计

友好的人机交互界面是航天员执行人机协同月球

着陆的重要保障。功能直观、易操作的交互界面能够确保航天员在紧张复杂的着陆过程中迅速、准确地执行各项指令, 提高任务的安全性和可靠性, 提升航天员的飞行体验。下面对人机交互界面的具体设计内容进行介绍。

1) 界面设计、分类、功能

人控着陆过程中, 仅凭航天员肉眼观察舷窗或舱外监视相机得到的月面信息范围有限, 且对于高度、角度等信息获取较为困难, 需要导航敏感器测量得到的导航信息进行辅助判断, 人机交互界面设计应将系统信息以直观的方式显示给航天员, 根据任务特点, 目前设计的显示页面分为五类, 如表2所示。

表 2 人机交互界面分类及功能

Table 2 Classification and functions of human-machine interaction interface

页面名称	显示内容	作用
平视显示页面	系统位置姿态基本信息	监视系统综合导航状态
飞行轨迹显示页面	实际和标称飞行轨迹	监视下降过程是否符合预期
着陆彩色监视仪页面	着陆彩色监视图像以及手柄控制信息	人工障碍识别
着陆图像导航敏感器图像显示页面	导航图像和模板图像, 以及匹配度信息	敏感器辅助障碍识别
地形障碍检测敏感器图像	DEM或等高线图	

2) 页面内容及使用场景

监视模式下, 航天员主要对自控系统运行状态进行监视, 主要关心系统位置姿态信息以及飞行轨迹信息, 航天员可观察平视显示页面和飞行轨迹显示页面, 页面设计如图15和图16所示。

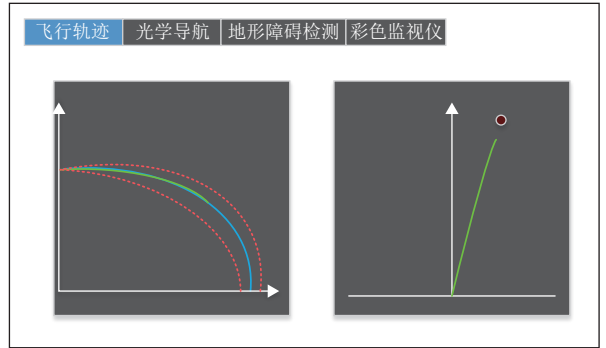


图 16 飞行轨迹显示页面示意图
Fig. 16 Schematic diagram of flight trajectory display page

飞行轨迹显示页面包括左右两个区域, 其中左区域表示航程-高程曲线, 绿色曲线实时更新, 蓝色曲线为标称曲线, 即为任务前根据标称轨道得到的预报结果, 红色虚线为在蓝色曲线基础上考虑各种扰动项的误差边界, 蓝色和红色曲线为固定状态, 飞行过程中只计算一次, 不进行更新。右区域表示星下点飞行轨迹, 纵轴表示沿下降轨道面方向、横向垂直下降轨道面方向, 红色圆圈表示目标着陆点位置、绿线表示已飞行轨迹。在空白区域以文字形式显示着陆器位置(经度、纬度、高度)、飞行速度(东向、北向、天向)、飞行姿态(偏航、俯仰、滚动)、角速度(本体三轴)、剩余推进剂等信息。

手控模式下, 航天员首先需要着陆彩色监视仪(实时视频图像)获取的月面成像信息, 如图17所示。

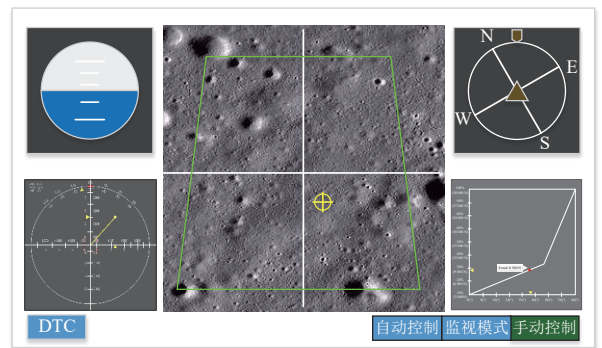


图 17 着陆彩色监视仪页面
Fig. 17 Landing color monitoring instrument display page

在人工障碍识别上, 航天员可参考着陆图像导航敏感器以及地形障碍检测敏感器生成的图像信息, 用以辅助避障决策, 如图18和图19所示。

GNC在着陆图像导航敏感器和地形障碍检测敏感器页面上标识出建议安全着陆点, 航天员可根据实际情况选择。

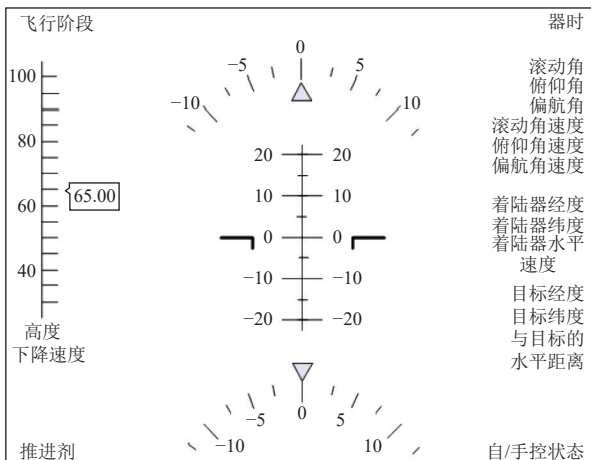


图 15 平视显示页面示意图
Fig. 15 Schematic diagram of head up display page

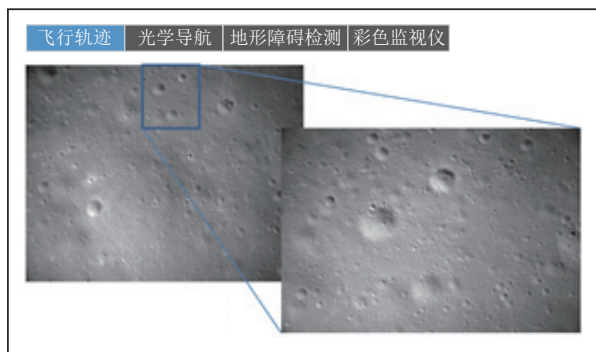


图 18 图像导航传感器显示页面
Fig. 18 Image navigation sensor display page

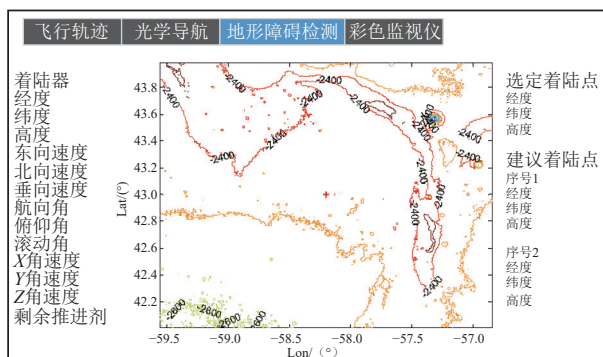


图 19 地形障碍检测传感器显示页面
Fig. 19 Terrain obstacle detection sensor display page

4 结 论

本研究针对载人月球着陆任务需求,研制了人机协同避障GNC系统,主要成果包括:①建立了监控/手动双模式工作架构,实现了自主控制与人工干预的协同;②开发了基于光学粗避障和激光三维精避障融合的避障系统,提高了着陆点选取精度;③设计了包含一键应急上升功能的人机交互界面,增强了操作安全性和便捷性。未来研究将重点发展智能自主决策技术,并优化人机协同控制策略,为后续深空探测任务提供支持。

参考文献

- 李骥,张洪华,张晓文,等.载人月球软着陆GNC技术研究[J].载人航天,2020,26(6):733-740.
LI J,ZHANG H H,ZHANG X W,et al. Research on GNC technology for crewed lunar soft landing[J]. Manned Spaceflight,2020,26(6):733-740.
- DUDA K R,JOHNSON M C,FILL T J. Design and analysis of Lunar lander manual control and modes[C]//Proceedings of IEEE/AIAA Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE,2009:1-16.
- HOAG D G. Apollo guidance and navigation: A problem in man and machine integration[C]//Proceedings of the 2nd Manned Space Flight Meeting. [S. l.]: NASA,1964.
- LINDQUIST O. Development of a manual thrust-vector-control mode for Apollo[J]. Journal of Spacecraft,1968,5(3):297-302.
- THOMAS J. Manned lunar lander design the project Apollo Lunar Module (LM)[C]//Proceedings of AIAA Space Programs and Technology Conference. Huntsville, AL: AIAA,1992:1-10.
- 黄翔宇,张洪华,王大轶,等.“嫦娥三号”探测器软着陆自主导航与制导技术[J].深空探测学报(中英文),2014,1(1):52-59.
HUANG X Y,ZHANG H H,WANG D Y,et al. Autonomous navigation and guidance for Chang'e-3 soft landing[J]. Journal of Deep Space Exploration,2014,1(1):52-59.
- 王大轶,李骥,黄翔宇,等.月球软着陆过程的自主导航和自主避障方法[J].深空探测学报(中英文),2014,1(1):44-51.
WANG D Y,LI J,HUANG X Y,et al. Autonomous navigation and hazard avoidance method for lunar soft landing[J]. Journal of Deep Space Exploration,2014,1(1):44-51.
- 张洪华,梁俊,黄翔宇,等.嫦娥三号自主避障软着陆控制技术[J].中国科学:技术科学,2014,44(6):559-568.
ZHANG H H,LIANG J,HUANG X Y,et al. Autonomous hazard avoidance control for Chang'e-3 soft landing[J]. Scientia Sinica Technologica,2014,44(6):559-568.
- 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.
ZHANG H H,LI J,GUAN Y F,et al. Autonomous navigation for powered descent phase of Chang'e-3 Lunar lander[J]. Control Theory & Applications,2014,31(12):1686-1694.
- 田林,戚发劼,果琳丽,等.载人月面着陆地形障碍探测与规避方案研究[J].航天返回与遥感,2020,35(6):11-19.
TIAN L,QI F R,GUO L L,et al. Study of terrain hazard detection and avoidance scheme for human lunar landing[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing,2020,35(6):11-19.
- 王立,刘洋,华宝成,等.嫦娥五号探测器自主着陆视觉避障方法与评价[J].宇航学报,2021,42(8):975-981.
WANG L,LIU Y,HUA B C,et al. Evaluation for Chang'e-5 visual autonomous hazard avoidance landing method[J]. Journal of Astronautics,2021,42(8):975-981.
- 郑永洁,王泽国.嫦娥五号探测器GNC系统设计[J].空间控制技术与应用,2021,47(5):68-74.
ZHENG Y J,WANG Z G. Chang'e 5 guidance navigation and control system design[J]. Aerospace Control and Application. 2021. 47(5):68-74.
- WANG L,LIU Y,HUA B C,et al. Evaluation for Chang'e 5 visual autonomous hazard avoidance landing method[J]. Journal of Astronautics,2021,42(8):975-981.
- BRIDENSTINE J. Artemis plan—NASA's lunar exploration program overview[EB/OL]. (2020-09-01)[2025-04-20]. extension://ngbkcglbmlglgl/djfcnhaijeccaccgfi/https://spacetraxaerospace.com/wp-content/uploads/2021/01/The-Artemis-Plan.pdf.
- 熊明华,刘永喆,宋轶姝.俄罗斯载人登月相关问题分析[J].国际太空,2016(8):47-55.
XIONG M H,LIU Y Z,SONG Y S. Analysis on relevant problems of Russian human lunar landing[J]. Space International,2016(8):47-55.
- ASTHA SINGH. Indian astronauts complete one-year training course for gaganyaan mission in russia[EB/OL]. (2021-03-23)[2025-04-20]. https://www.republicworld.com/india-news/general-news/indian-astronauts-complete-one-year-training-course-for-gaganyaan-mission-

in-russia.html.

- [17] NASA. Government of Japan formalize gateway partnership for artemis program[EB/OL]. (2021-01-12)[2025-04-20]. <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-governmentof-japan-formalize-gateway-partnership-for-artemis-program>.

作者简介:

杨巍(1983-), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 航天器控制系统设计。

通信地址: 北京市海淀区友谊路104号(100190)

电话: (010)68113973

E-mail: paceryang@163.com

贾飞达(1995-), 男, 工程师, 主要研究方向: 航天器轨道动力学与控制系统设计。本文通信作者。

通信地址: 北京市海淀区友谊路104号(100190)

E-mail: cocojfd0126@163.com

Design of Human-Machine Cooperation Obstacle Avoidance GNC System for Manned Lunar Lander

YANG Wei¹, JIA Feida¹, ZHANG Yi^{1,2}

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;

2. National Defense Science and Technology Key Laboratory, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, a human-machine collaborative obstacle avoidance control scheme for manned lunar lander GNC systems was proposed, built upon a framework of human-supervised autonomy. By constructing an obstacle avoidance safety point auxiliary selection algorithm, developing a hand-controlled semi-automatic obstacle avoidance control module, designing a human-controlled one-click emergency ascent scheme, and optimizing the human-computer interaction interface, astronauts' autonomous decision-making support during the lunar landing process was realized. The results show that the system can effectively improve the reliability and safety of the lunar landing process and meet the needs of manned lunar exploration missions. This scheme provides a highly reliable and safe GNC system solution for manned lunar landing and descent missions, and has important engineering application value.

Keywords: manned lunar lander; human-machine cooperative obstacle avoidance; GNC system design

Highlights:

- Design a human-machine cooperation obstacle avoidance GNC system based on a framework of human-supervised autonomy.
- Complete a detailed design of the system composition, principle, working mode, and specific scheme.
- Develop the auxiliary selection of obstacle avoidance safety points, manual semi-automatic obstacle avoidance control, human-controlled one-click emergency ascent scheme and human-machine interaction interface.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]