

月球大范围探测巡视器及 GNC 技术发展综述

王 平¹, 于晓强², 郭继峰²

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 哈尔滨工业大学航天学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 对月球大范围探测巡视器及相应制导、导航与控制(GNC)技术进行了综述。首先对月球大范围巡视探测需求进行分析,介绍了世界各国主要的月球大范围巡视器计划研究进展;其次针对月球大范围探测 GNC 技术研究现状进行了归纳整理,简要分析了进行月球大范围探测任务现存技术难点;最后为实现更加完备高效的月面大范围探测提出了月球大范围探测网构建设想,并分析了其构建目的、意义及关键技术。

关键词: 月球探测; 月面巡视器; 制导、导航与控制; 大范围探测网

中图分类号: V11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2022)05-0548-15

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2022.05.002

A Survey of Lunar Wide-range Exploration Rover and GNC Technology

WANG Ping¹, YU Xiaoqiang², GUO Jifeng²

(1. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China;

2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The lunar wide-range exploration rover and the corresponding guidance, navigation and control (GNC) technologies are reviewed. Firstly, the needs for lunar wide-range roving exploration are analyzed, and the research progress of such projects around the world is introduced. Secondly, the current research status of GNC technology for wide-range lunar exploration is summarized, for which the existing technical difficulties are briefly analyzed. Finally, we propose the idea of building a lunar wide-range exploration network for a more complete and efficient lunar surface exploration, and analyze the significance of its construction and key technologies.

Key words: Lunar exploration; Lunar rover; GNC; Wide-range exploration network

0 引 言

月球作为宇宙中距离地球最近的天体,因其具备极大的位置优势以及丰富的物质资源,是人类进行深空探测和太空探索的前哨站,也是迈向其他更远天体的试验场及中转站。从人类深空探测历史发展进程来看,正是通过对月球的一步一步探测行动开启了人类对宇宙深空探索的篇章,也逐渐掌握并验证了地外天体环绕、巡视、采样返回等深空探测技术,月球的科学探测对深空探测、航天技术等一系列科学领域具有非常深远的意义^[1]。2020 年随着嫦娥五号成功完成月球采样返回任务,中国六战六捷

的月球探测任务取得了举世瞩目的成就,在国际月球探测技术中处于领先地位,这不仅是科学技术水平及综合国力的有力证明,还对提高国际地位和影响力有重要意义^[2]。随着对月球的逐渐了解,月球资源的开发利用、月球基地的建立以及通过月球走向深空将是世界各航天大国未来主要的月球探测目标,各国也都对此制定了目标宏伟的月球探测计划^[3-7]。

在各国的探月计划中,月面巡视器作为月球探测任务的执行体和重要组成部分,是各国主要研究的对象,未来的月球巡视器会成为兼具全地形穿越、资源探索及利用、载人探测、大范围转移等能力于一

身的多功能综合巡视器。而月球探测区域也会从着陆点附近的小范围探测向大范围多点协同探测发展,巡视器的运动方式也从遥控式、指令式逐渐向自主化、智能化转变。大范围自主移动探测能力是月面巡视器未来实现月面巡视探测的基础能力,也是实现月面极地区域资源探测,月球表面广域采样返回以及月球基地建设等任务的关键能力,具有很高的科学价值和应用价值^[8-9]。

基于上述分析,本文针对月面大范围探测问题进行整理和总结,首先分析、介绍了月面大范围巡视探测需求及发展现状,然后调研总结了大范围探测 GNC 技术现状及难点,最后提出了月面道路拓扑网的建设构想,旨在为未来月球探测任务的发展建设思路提供参考。

1 月球大范围巡视探测需求及发展现状分析

1.1 月球大范围巡视探测需求分析

随着月球巡视探测任务从简单的巡视探测向更复杂的资源开发利用和月球基地建设推进,对于月球巡视器的能力需要也从局部小范围的探测向大范围探测转变,本节从各国的月球探测任务需求入手,分析未来月球大范围巡视探测需求,阐述研究月球大范围探测的重要意义和价值。

1) 月球基地建设需要

近年来,各航天大国重新认识到月球探测的重要意义,纷纷制定了各具特色的月球探测计划,掀起了新一轮探月热潮。美国公布了“阿尔忒弥斯”(Artemis)计划,作为“阿波罗”的孪生姐妹,短期目标是在 2024 年实现载人登月,长期愿景是在月球表面建立月球基地,提出要在月球南极建立一个称为“阿尔忒弥斯大本营”的持续战略存在,让未来几代人加以利用,是美国国家航空航天局(NASA)未来十年太空探索和载人航天计划的核心^[4,10]。欧洲航天局(ESA)、俄罗斯、日本、印度等国家和组织也宣布近期将开展月球探测任务,并把在月面建立月球基地、开展长期月球探测作为远期目标,月球基地建设正成为各国太空战略新的聚焦点^[5-7]。

作为月球基地建设的主要执行者和重要组成部分,可以长期运行并具备大范围探测能力的月面巡视器是月球基地建设的必需环节之一。月球基地的建设需要巡视器在月面进行基地选址可行性的勘

察,确认选址区域满足月球基地的着陆场、建设场、探测设施、通信设施、能源设施等不同设施的建设需要,同时还需要完成建设设备运输、部署安装等月面施工任务^[11-12]。而巡视器的移动能力是完成上述任务的基础,全地形、大范围移动能力是巡视器更好地完成月面基地建设的必要保证。

2) 月球资源探测需要

在基于当前的月球探测结果对月球形貌、构造和成分形成一般性认识后,各国提出的巡视器探测任务和目标开始聚焦于月球资源的原位探测与利用,尤其是针对极地水冰资源的探测。月壤中的水成分不仅可以为月球自身形成和演化过程提供重要演化记录,对检验和完善月球起源的大撞击假说有重要价值,还可以为太阳系物质演化提供关键信息。另外,对于深空探测来说,水资源不仅是维持生命的必需品,还可以分解为现代火箭推进所需的燃料(H_2 和 O_2),对未来月球基地建设计划与资源利用有重要价值^[13]。

对于月球资源的探测,虽然月球轨道飞行器可提供有关月球表面及其潜在资源的广泛信息,但巡视器在月球表面的巡视勘探对于验证这些观测结果,同时为利用月球上的挥发物及矿物等丰富资源提供技术验证更是至关重要。而具备大范围探测能力的巡视器可用来进行更广泛的月面探索,通过携带的各种仪器实现沿途不同地质及资源数据的收集记录,可为月球不同区域的地质演变及资源分布变化的探测及分析提供直接证据,为月球及其资源情况提供更为全面的视角。

3) 月球长期探索开发需要

2020 年 4 月,NASA 发布了《NASA 月球持续探索和发展计划》报告,概括描绘了围绕“阿尔忒弥斯”计划展开的探月思路,其中,提出了“可居住移动平台(Habitable mobility platform,HBV)”的建设构想,作为“阿尔忒弥斯大本营”建设的三个主要任务之一^[4]。HBV 的主要目标是实现大范围载人/自主移动探测,使月球的长期探索 and 开发成为可能。通过将具备大范围探测能力的巡视器部署至月球表面,可使航天员一次能够在月球表面生活数月,也可将探测半径扩大数百甚至数千公里,还能在月球表面执行模拟火星任务,为更大范围的行星探测提供技术支撑及验证。同时,具备大范围自主转移能力

的巡视器还可实现在不同月球着陆点或月球基地间的转移行动,通过在两次任务窗口内自主转移至下一登月任务着陆点,可极大提高月球探测效率,减少月球任务及发射成本,实现更加完备高效的月球探测。

1.2 月球巡视器发展现状分析

在阿波罗任务期间,航天员驾驶的巡视器曾帮助航天员完成多次月面巡视探测任务,证明了巡视器在月面探测任务中的重要价值,月球巡视器能力直接关乎月球表面开展大范围探测、运输、建设任务的成败。本节针对目前各国主要的巡视器系统及未来发展计划进行总结阐述,图 1 总结了各国主要月球巡视器的探测距离,包括已经成功实现月球巡视探测任务的巡视器和提出的未来研究计划。由图 1 可以看出各国未来的巡视器发展计划都将大范围移动探测能力作为月球探测的关键基础能力之一,下面将对主要的月球巡视器发展计划进行简要介绍。

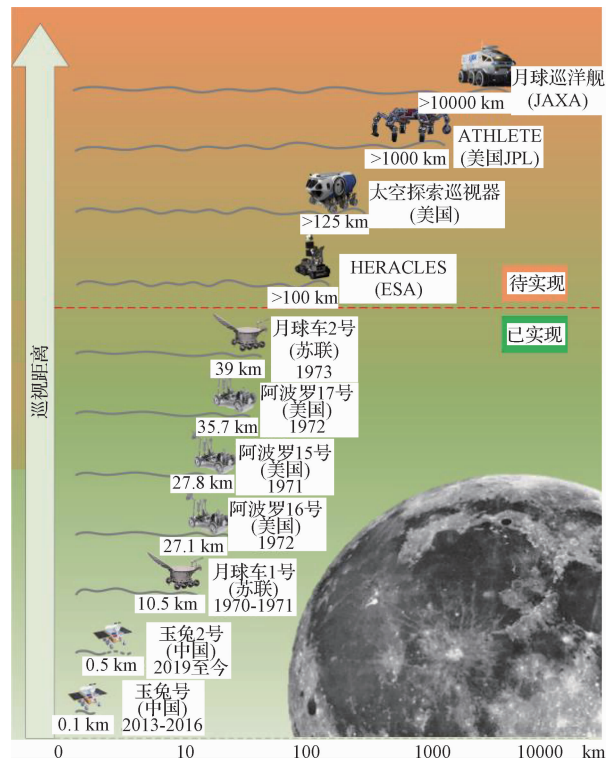


图 1 各国主要月球巡视器巡视距离

Fig. 1 Roving distance of major lunar rovers

1) 太空探索巡视器 (SEV)

NASA 于 2012 年提出新一代太空探索巡视器 (Space exploration vehicle, SEV) 的概念,其借鉴阿波罗任务期间的经验教训,并结合火星探测器的经验,

将帮助未来的探测机器人和航天员进行全新方式的太空探索、长期太空生存以及大量科学实验^[14]。SEV 是一种模块化概念巡视器,可以根据执行任务的不同而灵活设计。核心由一个加压客舱组成,该客舱可以与轮式底盘配对以形成用于行星表面探索的巡视器,也可以在太空中执行往返任务,例如服务卫星和小行星任务。

地面巡视型 SEV 是将客舱安装在轮式底盘上,底盘可 360° 旋转,每小时可向任何方向行驶约 10 km,并具备最大坡度 40° 的爬坡能力。其车轮可以侧向移动,允许车辆在转弯半径为零的情况下以任何方式向前和侧向行驶,可支持在崎岖地形上行驶。巡视型 SEV 的设计理念是极少需要或根本不需要维护,在其十年的使用寿命中,能够在行星表面行驶数千公里。该车架借鉴了越野赛车架的相关开发技术,并已在美国西南沙漠中进行过实地测试,并在粗糙的熔岩上行驶了 140 km。

同时,与不加压的阿波罗月球车不同的是,SEV 可以让航天员在不受航天服限制的情况下进行长途旅行。加压客舱带有一个行李箱,可以让航天员更快地穿上航天服,更快地出舱,以及进行多次短距离



(a) SEV 概念图



(b) SEV 地面试验

图 2 太空探索巡视器^[15]

Fig. 2 Space Exploration Vehicle^[15]

太空行走。

目前 SEV 的开发仍在继续,生产了称为“多任务太空探索飞行器”(MMSEV)的变体,并在 2013 年为可能的月球着陆器提供了增强型 MMSEV (AMMSEV)的机舱^[16],NASA 计划将其与“先进探索系统计划”下的其他项目一起开发。

表 1 SEV 基本参数

Table 1 Basic parameters of SEV

参数	数值
质量/kg	3000
长度/m	4.5
轴距/m	4
高度/m	3
车轮直径/cm	99
有效负载/kg	1000
最高时速/(km·h ⁻¹)	10
最远范围/km	125



(a) ATHLETE移动测试



(b) ATHLETE载物测试

图 3 全地形六角形外星探测者^[17]

Fig.3 ATHLETE^[17]

2)全地形六角形外星探测者(ATHLETE)

全地形六角形外星探测者(ATHLETE)是由美国喷气推进实验室(JPL)提出的全地形探测巡视器^[17]。ATHLETE 巡视器具有六个 6 自由度(DoF)足式肢体,每个肢体均附有 1 自由度车轮。ATHLETE 使用其车轮在稳定、平缓的地形上高效行驶,但每个足式肢体也可用作通用腿。在后一种情况下,车轮可以锁定并用作脚,以走出过于柔软、充满障碍物、陡峭或其他极端地形。ATHLETE 被设想为一种重型多用途车辆,可支持人类对月球表面的探索,以及从固定着陆器上卸下大件货物并进行长距离运输。

为证明这一概念,JPL 已经开发出几种原型车用于测试。第一代 ATHLETE 原型机宽 2.75 m,最大站立高度刚刚超过 2 m,质量约为 850 kg,在地球重力下的最大有效载荷承载能力为 300 kg。2005 年建造了两个相同的原型,其中一个仍在运行。

第二代 ATHLETE 原型于 2009 年构建,并由两个完全独立的三足机器人 Tri-ATHLETE 的协调系统实现。这套系统提供了一种简单明了的货物处理策略:两个 Tri-ATHLETE 停靠在货物的两侧,相对形成一个六臂对称车辆,共同移动和放置货物。这种策略集成了六足机器人概念的所有优点,并具有灵活性和模块化的额外优势。第二代原型机器人的最大高度约 4 m,在地球重力下的有效负载能力为

450 kg。该巡视器系统未来将从以下几个方面进行改进:

- (1)通过紧凑型存储实现在月球着陆器上进行自我部署;
- (2)通过在足式肢体末端装备不同的有效载荷及其基于足/轮式多种运动方式,可实现在安全的姿态角度下穿越几乎所有地形,包括垂直的岩面或沙质斜坡;
- (3)即使在最崎岖和最陡峭的地形上,也能实现可靠的自主移动通行;
- (4)具备“语音和手势”命令模式,以实现航天员与巡视器的高层面互动。

ATHLETE 六个 6 自由度的足式结构相比其他巡视器系统提供了更多的功能,它可爬升的坡度在硬表面(岩石)上可达 35°,在软表面(例如在月球上发现的月壤的软沉积)上可达 25°。JPL 计划要开发该系统在较崎岖的地形上行驶的能力,并将 ATHLETE 的速度提高到 10 km/h,比“勇气号”和“机遇号”等现存巡视器快 100 倍。ATHLETE 的目的是支持月面探测作业,一种假设的任务场景是由 ATHLETE 充当可移动的有人驾驶“月球基地”,能够穿越数千公里并可以随时停下研究探测

沿途重点区域。

表 2 ATHLETE 基本参数
Table 2 Basic parameters of ATHLETE

参数	数值
质量	850 kg
直立高度	2 m(第一代); 4 m(第二代)
有效负载	300 kg(第一代); 450 kg(第二代)
时速	10 km/h
最大可行坡度	35°(硬表面); 25°(软表面)
最远范围	>1000 km

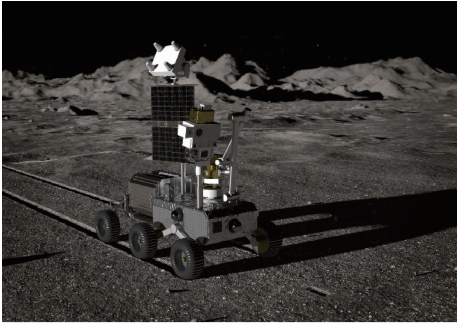
3)机械结构及能力人为增强型月球科学探测器(HERACLES)

机械结构及能力人为增强型月球科学探测器(HERACLES)是 ESA、日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)和加拿大航天局(CSA)合作研发的机器人运输系统,该系统将配备一台名为“欧洲大型后勤着陆器”(European large logistic lander,EL3)的着陆器、一个月面上升模块(Lunar ascent element, LAE)和一台巡视器。该系统计划支持“阿尔忒弥斯”计划,并利用月球“门户”(Gateway)空间站作为登月点进行月球探测^[18]。

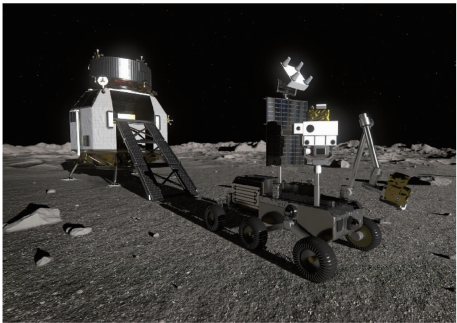
EL3 着陆器的着陆质量约为 1800 kg,并且能够运输 HERACLES 机器人巡视器,以探索、勘探潜在资源,并将高达 15 kg 的样本装载到上升模块上。巡视器计划将在月球的薛定谔盆地中穿越数千米,探索并收集更多样本,装载到下一个 EL3 着陆器上。上升模块每次都会返回 Gateway 空间站,由加拿大机械臂捕获,并将样品转移到“猎户座”飞船上,与返回的航天员一起运送到地球,然后将为上升模块加油,并与从地球派出的新下降模块配对。第二次和第三次着陆任务的有效载荷分别为 500 kg,可用于其他用途,如测试新硬件、演示技术和获得操作经验。第四次或第五次登陆任务将进行采样返回^[19]。

由加拿大航天局开发的 HERACLES 巡视器质量为 330 kg,并将配备放射性同位素发电系统提供动力,该系统将使巡视器行驶 100 km 以上,允许在漫长寒冷的月夜中运行。巡视器大部分时间将通过地球上的技术人员操控,在特殊环境中将由 Gateway 空间站上的航天员操控。目前的计划为:HERACLES 巡视器将在着陆后立即收集应急样本,然后它将沿大约 35 km 长的沿线从大约 10 个单独

的采样站采集样本,并将其带回到 LAE 上升模块。巡视器将配备一套科学仪器(预计组合有效载荷质量为 90 kg),这将使其能够全面研究采样位置和样本背景,以及横贯沿线的地质情况。在样品被放入 LAE 后,将开始进行表面移动性演示阶段,在此期间,巡视器将进行大于 100 km 的月球表面移动探测,巡视器机载仪器在移动时不断收集数据,为月球地质探测提供全新的视角,如探测区域的各种地形的风化层结构。



(a) HERACLES 巡视示意



(b) HERACLES 与 EL3 着陆器

图 4 机械结构及能力人为增强型月球科学探测器
Fig. 4 HERACLES

HERACLES 的主要目标包括:

- (1)通过实施、演示和验证载人登月、表面操作和返回的技术要素,为载人登月任务做好准备;
- (2)为科学实验创造机会,特别是月球采样返回;
- (3)获得科学和探索知识,尤其是有关月球潜

表 3 HERACLES 基本参数
Table 3 Basic parameters of HERACLES

参数	数值
质量/kg	330
器载仪器	3 台光谱仪和一个 1 m 的钻头
计划返回样本/kg	15
最远范围/km	>100

在资源的知识;

(4)为未来的火星任务创造机会来演示验证和测试技术和操作程序。

4)月球巡洋舰(Lunar Cruiser)

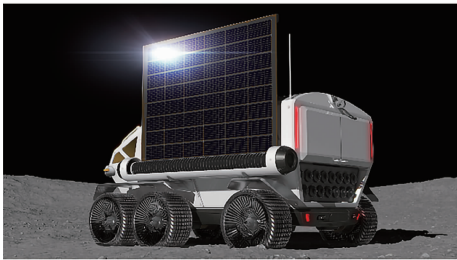
JAXA 和丰田汽车公司(Toyota)于2019年6月签署了一项联合研究协议,拟对载人加压月球车进行研究,该月球车拟采用氢动力燃料电池电动汽车技术,支持即使有少量的可用能源下的长期运行,其月球巡航距离将超过10000 km,以帮助人类进行更大范围的月球表面探测^[20]。该月球车将用于探索月球的极地地区,目的是调查利用月球资源(例如水冰)的可能性,以及获取能够探索巨大天体表面的技术。

JAXA 和丰田公司在研究计划中指出,载人加压月球车通常由2名航天员乘坐,但在紧急情况下最多可容纳4人。如果当前的概念设计正确,那么该月球车将非常庞大,至少长6 m,宽5.2 m,高3.8 m,有6个车轮,拥有约13 m³的居住空间。同时该月球车具备“空间机动性”概念,满足月面巡视所面临的诸多挑战,如月球表面充满陨石坑、悬崖和山丘的复杂地形,月球表面严酷的辐射和温度条件以及超高真空的空间环境。此外,该加压月球车也是对丰田氢能技术的一次出色测试,丰田公司计划使用清洁发电方法的燃料电池,可以通过仅排放水而产生具有高能量密度的大量能量,使其特别适合为月面巡视器提供动力。丰田长期以来一直在计划研发可持续发展的机动技术,涉及电动汽车和燃料电池汽车的混合,由于它们能够排放比吸入的空气更少的有害物质(例如颗粒物),这种所谓的“负排放”特征是该计划渴望进一步改进的一个特征,因此具有更大的潜力。

JAXA 和丰田汽车于2020年8月宣布将联合研究的载人加压月球车命名为“月球巡洋舰”(Lunar Cruiser),与丰田汽车著名的四轮驱动SUV“陆地巡洋舰”(Land Cruiser)命名方式一致,以代表其对加压月球车的质量、耐用性和可靠性的预期^[21]。原计划在2020财年制造测试零件及Lunar Cruiser巡视器原型,包括使用模拟仿真来确定行驶时的动力和散热性能,制造和评估原型轮胎,以及使用虚拟现实和全尺寸模型来考虑月球巡洋舰机舱中设备的布局。如果一切按计划进行,丰田和JAXA计划2024年左右构建并测试工程样机,2027年左右构建并测试飞行样机,2029年发射。



(a) Lunar Cruiser概念图



(b) Lunar Cruiser充电状态

图5 月球巡洋舰
Fig.5 Lunar Cruiser

表4 月球巡洋舰基本参数

Table 4 Basic parameters of the Lunar Cruiser	
参数	数值
尺寸(长×宽×高)	6 m×5.2 m×3.8 m
车内空间	13 m ³
计划负载	2人(紧急情况4人)
计划发射时间	2029年
最远范围	>10000 km

2 月球大范围探测 GNC 技术现状分析

随着无人系统智能化技术的逐步发展,月面巡视器的运动方式也从遥控式逐渐向自主化、智能化转变,具备自主探测能力可极大提高巡视器的探测效率。表6介绍了目前已成功运行的巡视器运动方式及相关参数,可以看出早期巡视器一般通过地球遥控或有人驾驶的方式运行,相机和激光测距设备只用来科学探测,不参与系统导航。而玉兔号巡视器首次实现了中国在月球表面的自主巡视探测,并获取了大量科学探测数据。对于巡视器的自主探测系统,巡视器的GNC技术承担着月面巡视器导航定位、月面地形重构、巡视器路径规划、运动控制等功能,是巡视器系统的“指控大脑”,是巡视器实现月面自主移动探测任务的重要环节之一^[22]。本章针对月球大范围探测GNC技术进行总结和阐述,并对大范围探测的难点进行总结分析。

2.1 大范围探测 GNC 技术现状

1) 导航定位技术

月球巡视器在月面非结构化、低纹理环境开展巡视与探测的过程中,必须具备精确导航与定位能力,以保证能够抵达预定目标,完成科学探测任务。月面巡视器的导航定位通常分为绝对定位与相对定位。绝对定位是确定巡视器在月球坐标系中的绝对

位置,常用的绝对定位方法包括天文导航、影像图匹配导航等^[23-24]。天文导航方法由于测量精度不足且具有局部不可见性,无法实时获得足够准确绝对航向和位置信息。而影像图匹配方法通过将高分辨率轨道传感器扫描图像与巡视器在线创建的局部地图相匹配,可以获得较为精确的定位信息。

表 5 已成功运行的巡视器运动方式及参数
Table 5 Motion modes and parameters of the successfully operated lunar rovers

巡视器	运动方式	器载传感器	运行速度/(km·h ⁻¹)
月球车 1 号	遥控式	遥控系统 + 摄影系统(1 主相机 + 2 辅相机)	平均 0.14
月球车 2 号	遥控式	遥控系统 + 3 相机 + 1 激光测距仪	平均 0.34
阿波罗月球车	有人驾驶	-	最大 13
玉兔号	遥控/自主导航	1 双目导航相机 + 1 双目全景相机 + 1 双目避障相机 + 1 测月雷达 + 1 红外成像光谱仪	最大 0.2
玉兔二号	遥控/自主导航	同上	最大 0.2

相对定位是利用巡视器自身传感器测量信息,获取相对于起始位置的相对位置,可以在一段时间内获得较高的定位和航向精度。常用的相对定位方法包括惯性导航和视觉导航,惯性导航是一种典型的相对定位技术,利用加速度计和陀螺仪跟踪目标相对于已知起点的位置和方向,但容易出现累积误差,且误差会随着时间的推移而逐渐增大。近年来,随着图像处理技术的飞速发展,基于机器视觉的月球车导航技术成为主要的导航方式,视觉导航可以通过感知外界环境和跟踪视觉线索(如相邻帧图像中的物体或地标)来实现自主定位^[25]。

针对大范围移动探测的精确导航定位技术,逐渐成为国内外研究的重点。超长距离穿越自主决策项目(ADE)是 ESA“欧洲空间开发和机器人活动路线图”(PERASPERA)项目战略研究集群框架内的五个空间机器人研究项目之一,目标是在行星模拟环境中演示一种高度自主的行星车系统,能够在探测潜在受关注科学目标的同时,以高可靠性实现长距离穿越^[26]。其中,“行星车导航”(Rover guidance, RG)系统负责长期的车载自主导航。RG 实现了一种新的导航体系结构,具备动态可重构的多模式自主导航方案和一个危险预防模块来保障安全性^[27]。RG 利用预处理的轨道数据以及局部感知的数字高程图来实现最大化行驶距离的自主导航,轨道数据被分割成多模式导航和长期路径规划器使用的不同等级。此外,该体系结构还提供了将不同来源的导航算法组合在一起的机会,以便在任务的

特定时期无缝地使用最合适的算法。虽然该项目仍在进行中,但已有的研究结果可实现在火星表面环境中安全穿越 1 km 的能力。

ESA StarTiger 计划中包括名为“Seeker”的自主远程导航系统,旨在开发火星探测器原型系统,能够在三天内自主探索数公里具有高度代表性的行星地形^[28]。Seeker 系统采用离散化粒子滤波算法将行星车自主形成的局部 DEM 图拼接,并与轨道器拍摄的全局 DEM 图进行匹配实现全局定位。同时,该系统开发了 DROID 运动转换算法以及 OVO 视觉导航算法实现了视觉里程计相对定位。该系统已进行了地面试验,一天内在具有高度行星代表性的地形上自主运行了 5.05 km,为未来火星/月球巡视器提供更强大的自主探测能力。

文献[29]提出了一种行星探测器的 GNC 体系结构,以实现快速和长距离的移动探测。该方案提出了一种两级结构,包括有效导航(低级)和全自主导航(高级)。有效导航模式可以在允许的地形中加快移动速度,而全自主导航模式可以减少长距离的定位漂移。导航模式的选择可以根据探测速度需求和地形困难程度动态选择,该体系结构为远程、低监督和快速的行星探测提供了解决方案,这两种导航水平都已在行星模拟实地测试活动中得到验证。

文献[30]提出了一种多帧里程补偿全局对准算法(MOGA)来解决月球车大范围运动的定位问题。该算法通过将从三维轨道高程图检测到的地形特征与基于月球车的 3D 激光雷达扫描的地形特征

相匹配,来进行月球车的全局定位,然后基于视觉里程计和倾角计/太阳传感器的方位测量信息,使用多帧最小二乘对齐技术利用特征位置、方向和里程计测量来细化位姿估计,提高了 MOGA 定位的精度和效率。最后进行了超过 10 km 的地面穿越试验,结果表明 MOGA 的定位估计值明显优于视觉里程测量法的估计值,可以实现对月球车的高精度远程自主定位。

2) 月面地形重构技术

月面地形重构技术是巡视器在月面进行科学探测和安全移动的必需技术,通过对巡视器所在周围月球表面复杂环境进行有效的感知和信息融合,完成月面图像处理、特征点匹配、三维关系解算、高程地形生成与三维场景重构等一系列操作,实现月面地形的重构与认知,为后续巡视器路径规划、月面地形的精确建模等提供数据支撑。三维立体重构是计算机视觉中的一个基本问题,尽管已经进行了几十年的深入研究,但仍是活跃的研究领域,目前已经有很多成果可以实现地面或行星环境的小规模立体重建。同时,另一个主流做法将地形重构与定位同时研究,即同步定位与建图技术(SLAM),该技术以增量的方式构建周围环境地图,并利用该地图来估计机器人自身的姿态。随着近年来图像处理技术的快速发展,视觉 SLAM 技术逐渐成为月球车定位与地形重构的首选^[31]。

由于月球光线变化较大、月面典型的非结构化及缺少纹理的地形环境以及月球车运动影响等因素影响,月面的地形重构需要密集的特征点提取与匹配才能保证地形重构精度,目前许多学者对上述问题进行了研究,典型算法包括:基于 BA (Bundle adjustment) 的实时 SLAM 算法,即并行跟踪与建图(PTAM)算法;使用直接方法构造大范围半稠密映射方法,即 LSD-SLAM^[32]、RGB-D SLAM^[33] 和 ORB-SLAM^[34] 等,这些方法都可实现一定范围内的高精度实时定位与建图。

针对月面大范围地形重构技术,由于月面复杂的地形环境及月球车有限的计算资源和传感器能力,实现高精度的大范围月面地形重构具有很高的挑战性,目前的研究及应用还在初步摸索阶段。节省用于自主导航的机器人技术(SPARTAN)项目是由 ESA 开发的机器人探测技术开发活动^[35],目标是开发适合火星/月球探测器使用的高效、低成本和精确的视觉导航算法。该项目采用了平面扫描局部

立体算法,可以对任意相机配置执行多图像立体匹配,并且通过现场可编程门阵列(FPGA)技术定制设计了行星车探测专用硬件系统,可以在计算功率要求、内存占用、通信需求、能源使用和速度方面提供更高效率的导航系统。试验结果表明该系统可以从三维重建精度、视觉里程计精度以及执行速度等方面满足 ESA 设定的大范围移动探测导航系统指标要求。

文献[36]提出了一种距离相关地形重构与路径规划技术,利用激光雷达提供的地形特征点云转换成数字高程图,并提出了一种扇形参考网格进行转换的方法,得到了柱面坐标下的高程图(C2DEM),这种转换方法实现了距离相关的多分辨率地形重构:靠近月球车的详细地形表示和远离月球车的稀疏表示,可以更好、更高效地反映点云数据的特征。然后实现了依靠 C2DEM 图的多代价路径规划,最后进行大范围转移试验验证了该方法的有效性。

文献[37]提出了一种用于行星探测的模块化、单目 SLAM 系统(PM-SLAM),该系统结合了生物学启发的视觉显著性模型(即语义特征检测)进行视觉感知,以提高在具有挑战性的行星探测环境中的鲁棒性,并引入了一种新型混合显著特征的生成方法,使用基于点的描述符来跟踪视觉显著性模型的结果,跟踪的特征用于通过 SLAM 滤波器进行的行星车和地图状态估计,从而形成适用于大范围移动的月球车自主导航系统,并克服了行星探测器固有的硬件限制。通过地面试验表明该系统具有比 ESA 开发的 Seeker 自主导航系统更好的性能表现。

3) 巡视器路径规划技术

路径规划技术作为月面巡视机器人躲避危险区域、实现月面巡视和安全到达目标位置等自主探测过程中最重要的环节之一,其规划结果直接影响了巡视器任务执行的效率与安全性。巡视器路径规划包括全局路径规划和局部路径规划。全局路径规划是根据轨道卫星拍摄形成的月球表面地形图规划一条从起点到终点的路径,该路径需要满足设定的全局最优性指标(如路径最短、能量最省等),且全局规划方法寻找最优解的计算复杂度很高,所以通常根据月面地形高程图离线执行。局部路径规划是根据巡视器车载传感器系统实时感知周围月面环境,对所经区域进行地形重构及可通过性分析,然后规划出满足月球车动力学约束的安全避障轨迹。

全局路径规划算法主要包括启发式算法(如遗传算法、蚁群算法等)、基于采样的算法(如RRT算法、PRM算法等)以及基于图搜索的精确式算法(如Dijkstra、A*等)。全局路径规划算法需要考虑月面地形条件(坡度坡向、粗糙度、阶梯值)、光照条件、通信条件以及巡视器本体约束条件等因素的影响,根据设计的最优代价策略生成指定区域指定分辨率的全局路径。针对月面大范围路径规划技术,目前的研究大多集中在对月面复杂环境约束的精确建模、考虑月球车车载计算机性能对大范围路径的轻量化处理以及如何加快大规模地图的路径搜索速度等。NASA提出的“阿塔卡马生命”(LITA)项目旨在开发高度自主的机器人科学和类行星环境中的大范围穿越技术,该项目提出了任务级路径规划概念,综合考虑了大规模的路径选择、路径和探测操作的时间约束以及预测性能量管理,比以往的导航规划方法在更高的抽象级别上运行,主要目标是弥合路径规划与任务规划与调度之间的层次差距^[38]。文献[39]分别考虑了月球车自身能力约束(距离代价、地形代价)和外部环境约束(光照代价),并分析了它们之间不同权重对路径的影响,并根据履带式和轮式月球车不同的运动特性,对规划路径进行了评估。文献[40]提出了一种基于月面数字高程地图的大范围自主探测快速安全路径规划算法,改进了A*算法的搜索机制以适用于月面大范围路径的快速搜索,并结合EDM地图设计了一种安全启发式函数,可使生成路径尽量远离危险区域,提高了巡视器自主探测的效率及安全性。

局部路径规划方法主要包括基于反应式的应激算法、基于可行区域分析的采样算法以及基于学习的智能规划算法。针对月面巡视局部路径的研究大多集中在月面地形可通过性判断、月球车避障方法以及基于传感器信息的路径生成策略等。文献[41]提出一种基于地形可通过性定量评价和目标可达的局部综合避障规划方法,在实现局部避障的同时保证目标可达,并成功应用于“玉兔号”和“玉兔二号”月球车自主导航中。文献[42]提出了一种可以预测地形风险的地形分类和路径规划算法,包括基于机器学习的地形分类,能够从图像中识别出潜在的危险,以及基于快速探索随机图(RRG)和A*搜索算法的风险感知路径规划器,它能够避免由地形分类器识别的危险,并明确考虑车辆的动力学约束。文献[43]提出了一种在崎岖地形下基于可

穿越性分析的RRT*算法,首先由激光雷达传感器捕获接近连续空间的点云数据形成环境地图,然后使用RRT*算法直接从LIDAR点云数据中采样,在RRT*的树形展开过程中考虑月球车的崎岖地形可通过性,最终该算法在各种实际地形数据中的仿真证实了该算法的有效性。

随着人工智能及机器学习技术的快速发展,基于学习的路径规划、障碍检测、可通过性分析等技术均受到了研究人员的广泛关注。文献[44]提出了一种基于学习的全局路径算法,设计并训练了一种新的双分支深卷积神经网络(DB-CNN),它可以直接从行星表面的轨道图像规划路径,而不需要执行环境映射,且算法不需要事先了解行星表面地形,实验结果表明,DB-CNN在全局路径规划方面比现有算法具有更好的性能。文献[45]提出了一种基于神经网络的轮式移动机器人局部路径算法。该方法利用单对角递归神经网络(RNN)优化支持的反应式导航算法的输出,使得在没有先验环境知识的情况下,能够实时规划避障路径,同时最小化到达目标的路径长度。该网络经过两步监督离线学习和在线权重调整过程训练,具有良好的泛化性能和收敛性。对于月面地形可通过性分析,文献[46]同时使用基于振动和基于视觉的传感器来并行实现地形分类,首先基于两个传感器获取的信息,利用支持向量机对地形进行分类,然后对彼此的分类器输出进行再训练,这种方法能够从稀疏数据集中获得更大程度的训练,以实现更远距离、更加准确的地形分析。

4) 巡视器运动控制技术

月面巡视器的运动控制技术是其成为能否安全完成巡视探测任务的关键,需要考虑月球特殊的地形地质条件,针对不同月球巡视器特有的车辆结构及运动方式,设计开发安全可靠的控制系统。月面巡视器的运动控制技术需要确保巡视器按路径规划结果准确可靠运动,以及考虑月面地形容易发生滑移、车轮侧滑等影响如何通过对巡视器的协调控制,减少车轮原地打滑、下陷等失稳情况的发生,提高巡视器在探测过程中的平稳性。因此,针对巡视器大范围探测的运动控制技术研究主要集中在准确的轨迹跟踪算法及月面巡视器的协调控制技术上。

月球车的轨迹跟踪算法主要包括基于PID、反馈控制、最优控制、滑模控制等的传统轨迹跟踪算法,以及基于神经网络学习的智能控制。传统控制算法主要通过对巡视器的精确建模,然后基于运动

模型设计相应的控制器,实现巡视器的轨迹跟踪控制。然而由于月球地形地质环境复杂以及巡视器存在强非线性、非连续约束,导致巡视器模型与控制器和真实模型存在差异,因此,目前已有研究提出可以采用自适应神经网络或基于学习等方式实现在无模型或者非完整模型下的轨迹跟踪控制。文献[48]提出了一种基于学习的非线性模型预测控制(LB-NMPC)算法,通过学习实现具有挑战性的越野地形下的高性能路径跟踪。LB-NMPC 算法使用简单的先验车辆模型和学习的干扰模型。扰动被建模为高斯过程(GP),作为系统状态、输入和其他相关变量的函数。GP 模型根据以往试验中收集的经验进行更新,使车辆能够在大规模、无 GPS 的环境中运行。文献[49]提出了一种基于概率模型预测控制(MPC)的强化学习框架,其将车辆模型不确定性纳入长期预测,从而减少模型误差的影响。然后使用 MPC 来寻找一个使预期长期成本最小化的控制序列,结果证明该方法不仅可以达到最先进的数据效率,而且提供了在受限环境中进行强化学习的一种原则性方法,非常适用于巡视器行星探测等试验数据稀少、模型不确定性强的问题。

巡视器的协调控制主要针对巡视器在月球松

软、易滑移地形上移动探测时容易发生空转或者滑动的问题,通过对各车轮的协调控制,克服车轮滑动,同时达到动力效率最大化,实现巡视器的安全稳定运行。文献[50]利用轮-土相互作用试验系统研究了月球巡视器车轮滑移下沉问题,分析了月球车牵引轮的滑移下沉机理,并对传统的轮土相互作用模型进行了改进,综合考虑了引起滑移沉降的各种因素,建立了随滑移率变化的沉降指数公式。建立了根据垂直载荷和滑移率计算车轮下沉量的数学模型。文献[51]提出了一种在车轮下沉和打滑情况下的路径跟踪控制问题,并采用基于逻辑的控制方案进行了求解,该方案的新颖之处在于其方法同时考虑了纵向和横向滑动分量,分别设计了考虑横/纵向滑移情况下的控制器,并给出了最优控制参数。文献[52]基于速度投影定理和准静态力学模型,建立了六轮月球巡视器的协调运动规划模型,以消除巡视器内部不必要的损耗,降低驱动能量,提高能源利用率。

2.2 大范围探测难点分析

表 6 总结分析了月面巡视器实现大范围探测所需的 GNC 技术与目前主要技术方式的对比,然后分别对其存在的主要问题及难点进行简要分析。

表 6 月面巡视器大范围探测 GNC 技术难点分析

Table 6 Analysis of GNC technical difficulties in wide-range exploration for lunar rovers		
技术项	目前主要技术方式	大范围探测存在难点
导航定位	显著特征地形匹配(全局)+视觉里程计导航(局部)	大范围转移途中会遇到特征稀疏区域,且局部导航误差会随距离累计导致定位精度较低
月面重构	视觉的三维立体重构+同步定位与建图技术	月面非结构化环境及长距离探测导致月面重建计算量大和实时性维护困难
路径规划	基于影像地图的全局规划+实时避障规划	大范围探测全局路径最优性及目标可达性保证,以及快速安全可靠的实时路径规划
运动控制	巡视器动力学精确建模+最优控制器设计	大范围移动过程中模型参数变化的自适应辨识以及月面特殊地形地质情况下实现安全可靠的协调控制

1)月面大范围导航定位技术难点

导航定位问题是月面大范围移动探测过程中的主要问题,目前针对月面大范围移动的导航定位问题通用的解决方法是使用巡视器扫描形成的局部地形与月球轨道器形成的全球地形进行匹配实现全局定位,然后使用视觉里程计实现小范围局部定位。而地形匹配需要较典型、明显的月面地形特征才能实现局部地形与全局地形的精确匹配。同时,月面颜色单一、特征相似、纹理较少等低纹理环境容易导致视觉系统形成的图像中可提取的视觉特征点少,特征点的描述子相似,误匹配严重,使基于视觉的局

部定位系统精度较低。因此,如何在月面地形特征相似、低纹理环境中实现典型地形特征匹配以及高精度视觉里程计是月面大范围移动精确导航定位技术的主要难点。

2)月面大范围地形重构技术难点

目前针对月面大范围地形重构技术的研究多集中在基于视觉的三维立体重构以及同步定位与建图技术。由于月球光线变化较大、月面典型的非结构化及缺少纹理的地形环境以及月球车运动影响等因素影响,需要密集的特征点提取与匹配才能保证月面地形重构精度。而月面非结构化环境的不规则性

会大大增加环境采样的需求,并导致地形重构计算量的急剧增加,计算量大和实时性维护是在大规模环境下三维重构面临的主要问题。同时,月球具有较大变化的光线环境会给传感器系统带来不稳定的视觉信息,如何描述感知信息的不确定性,以及如何基于信息的不确定性描述来进行地形重构,使巡视器可以适应月球动态环境的变化,也是需要解决的难点问题。因此,如何在月面复杂动态环境及月球车有限的计算资源和传感器能力条件下,实现高精度、实时的大范围月面地形重构是月面大范围探测面临的一个重要问题。

3) 月面大范围路径规划技术难点

对于月面巡视器来说,大范围移动探测过程中可能遇到的最大风险就是月面复杂地形中潜在的危险,如巡视器可能陷入柔软流动的类沙漠地质而无法前进,碰撞小型石块可能导致巡视器系统故障及损坏等。因此巡视器路径规划技术必须具备潜在地形风险的评估及躲避能力。目前针对月面大范围全局路径规划技术的已有研究,可依靠设定的路径安全性指标使巡视器避开大型障碍区域,但由于全局地图分辨率较大无法识别小型障碍并且无法辨识地质情况。而局部路径规划技术可实现小范围内的月面地形可通过性判断、基于传感器信息的避障路径生成等,但目前仅可实现很低速度的巡视器实时路径规划,无法满足大范围移动探测高速移动的任务需求。同时也要考虑巡视器车载计算机性能,对大范围路径的全局/局部规划算法进行轻量化处理实现路径的快速规划。综上,在考虑月面复杂环境的精确约束条件下,如何实现巡视器实时、快速、安全、可靠的路径规划,是月面大范围路径规划技术的主要难点。

4) 月面大范围运动控制技术

月面巡视器的运动控制技术需要在月球表面松软月壤以及复杂地形的影响下实现巡视器的稳定运动控制,确保巡视探测任务的安全可靠完成。针对大范围移动探测的运动控制技术,目前主要通过对巡视器动力学精确建模进而设计满足巡视器运动约束的最优控制器,而由于巡视器模型的强非线性、非连续特性,以及在大范围移动过程中发生的车轮损耗、车体结构变化导致的巡视器模型变化,都会使建立的巡视器模型与控制器和真实模型存在差异。因此需要针对不同巡视器结构及运动方式建立专用模型,并且可在大范围长时间运动过程中进行模型自

适应更新。同时还需要考虑巡视器易发生滑移、车轮侧滑、下陷等危险情况,研究巡视器的协同控制技术以提高巡视器在探测过程中的平稳性。因此,如何对巡视器进行精确建模并实现大范围移动过程中的模型自适应更新,以及在月面特殊地形地质情况下实现安全可靠的协调控制,是月面大范围运动控制技术面临的主要问题。

3 月球大范围道路拓扑网构建设想

由前文可以看出,巡视器具备在月球进行大范围探测能力是未来巡视器主要的发展方向,而目前月面巡视器的GNC技术在支持大范围探测方面还有诸多难点。为实现更加完备高效的月面大范围探测,本节提出了月球大范围道路拓扑网的构建设想,并针对其构建目的意义及关键技术进行简要分析。

3.1 月球大范围道路拓扑网构建目的意义分析

月球大范围道路拓扑网是指全月范围内互联互通的大范围转移路径网,类似于地球上构建的高速公路网,首先通过在月球上选取一定数量的网络节点(类似于地球上的城市作为路网节点),然后确定网络的拓扑结构,再规划出不同节点间的转移路径,即可完成大范围探测网的构建。构建大范围道路拓扑网的目的就是增加巡视器大范围移动探测的完备性及可靠性,确保大范围转移任务的成功执行。构建月球道路拓扑网具有以下深刻意义:

1) 月面大范围道路拓扑网构建完成后,由于月球地形环境基本不会发生变化,可长期用于巡视器大范围探测,达到一劳永逸效果。并且通过构建不同规模及不同密度的安全转移道路网,可用于实现不同范围、不同粒度的巡视器自主探测任务。

2) 对于月球大范围探测的导航定位问题,可通过在拓扑网各网络节点布置全局定位装置(如“阿波罗”计划放置的激光反射镜),利用月球轨道器或地球测量设备实现各节点的精准全局定位。巡视器在大范围转移过程中,每到达一个节点即可进行一次全局位置修正,消除转移过程中的局部定位累计误差,这样即可实现月面大范围探测过程中的导航定位。

3) 对于月球大范围探测的路径规划问题,传统方法在进行路径规划时,根据任务设定的最优性指标规划出一条由起点到终点的转移路径,这种方法缺少对目标点可达性的考虑。由于月面探测任务的高代价及高风险性,对路径的要求不再是路径最短

或时间最短,而是保证路径的安全性及目标的可达性,确保巡视器安全到达目标点是探测任务成功的必须条件,也是巡视器系统完备性的必要保证。大范围道路拓扑网可提高巡视器大范围转移系统完备性,在某条路径无法通行时,可快速提供其他备选路径,实现“条条大路通罗马”。并且通过道路拓扑网规划大范围转移路径规划速度明显高于直接在大规模地图上搜索转移路径,可基于道路网实现快速路径规划及重规划。

3.2 构建月面大范围道路拓扑网关键技术分析

对于在月面构建覆盖全月的大范围道路拓扑网,相比于地球构建的高速公路、铁路等路网,月面具体环境未知,因此需要依靠一定分辨率的高程图和影像图进行月面环境分析。而相比于地球的城市作为路网的中途节点,月球目前没有构建道路拓扑网所需的网络节点,需要设计节点选取策略,要保证网络节点尽量选在平坦区域,且分布均匀,确保网络的密度适中且覆盖完整。同时由于月球部分地区地形地貌十分复杂,如月背、两极等,因此需要保证道路网中路径的安全性,确保大范围转移路径的可行性和安全性。因此构建月面大范围探测网需要以下关键技术:

1) 月面环境综合分析技术

构建月面大范围探测网,首先要对月面环境进行深度综合分析,排除大型山脉、陡峭的环形山边缘等含有危险地形地质条件的区域,同时还要综合分析光照、通信、温度等多种环境信息,确定巡视器在月面可以安全行驶并满足任务约束的可行区域。通过对巡视器移动探测影响较大的地形地质信息、光照条件、通信条件等多维复杂约束条件进行深度分析,构建出全月范围内的月球环境数据中心,为月球大范围道路拓扑网的节点选取、拓扑结构确定、路径规划等提高全方位的环境数据支撑,进而为后续月球探测仿真模拟、着陆区选址、时空分析甚至月球基地建设等任务提供数据和技术支撑。

2) 道路拓扑网节点选取技术

在月球构建大范围探测网,必须要确定构建网络所需的网络节点位置及部署(如地球高速公路网以主要城市为节点),因此要在全月范围内选取一定数量的网络节点来完成探测网的构建。针对网络节点的位置选取,首先必须保证各网络节点之间的连通性,因此节点要选在可达区域内,还要尽量选择在具有较大探测意义以及较平坦安全区域,以确保

巡视器在沿大范围探测网移动时既有一定的探测价值同时确保巡视器的安全性。针对网络节点的数量及分布,要保证网络节点数量适宜且分布均匀,以确保大范围探测网良好的网络密度及覆盖性。此外,为满足不同范围、不同规模的月面探测需求,需要构建不同等级、不同规模的探测网,因此网络节点也需要据此设计不同等级探测网所需的选取策略,已实现更加鲁棒完备的月面探测。

3) 道路拓扑网构建技术

在构建大范围探测网所需的各网络节点选取完成后,接下来需要设计网络结构,网络结构直接决定了道路拓扑网的连接形式及功能特性。如何设计网络结构,使道路拓扑网的网络效率、网络连通性等拓扑特性达到最优,从而实现更加鲁棒、高效的大范围转移路径规划,是月面道路拓扑网构建的核心问题。同时,还需要研究各网络节点间的连接路径规划技术,需要综合考虑月面复杂的地形地质条件、光照条件、温度电磁条件等环境,规划出各网络节点间满足月面复杂动态约束条件的最佳路径规划技术,来确保网络节点间连接路径的安全可行,使大范围道路拓扑网真正成为月面大范围移动探测任务可以信任且长期使用的有效工具。

4 结束语

本文针对月球巡视器的大范围探测需求及相应 GNC 技术进行了分析和总结。首先从月球基地建设、月球资源探测及长期开发探索等方面对月球大范围巡视探测需求进行了分析,并总结介绍了世界各国提出的先进月球巡视器研究现状;然后针对月球大范围探测 GNC 技术进行调研总结,分别从导航、重建、规划与控制技术方面对实行月球大范围探测技术现状及现存难点简要分析;最后为实现更加完备高效的月面大范围探测提出了月球大范围道路拓扑网构建设想,并针对其构建目的意义及关键技术进行简要分析,为未来月球探测任务提供有价值的发展建设思路。

参 考 文 献

- [1] 卢波. 世界月球探测的发展回顾与展望[J]. 国际太空, 2019(1): 12-18.
LU Bo. Review and prospect of lunar exploration in the world [J]. Space International, 2019(1): 12-18.
- [2] 吴伟仁,刘继忠,唐玉华,等. 中国探月工程[J]. 深空探测学

- 报, 2019, 6(5): 405–416.
- WU Weiren, LIU Jizhong, TANG Yuhua, et al. China lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(5): 405–416.
- [3] LI C L, WANG C, WEI Y, et al. China's present and future lunar exploration program[J]. Science, 2019, 365(6450): 238–239.
- [4] SMITH M, CRAIG D, HERRMANN N, et al. The Artemis program: An overview of NASA's activities to return humans to the Moon[C]. 2020 IEEE Aerospace Conference, Montana, USA, March 7–14, 2020.
- [5] ESA. ESA STRATEGY FOR SCIENCE AT THE MOON [EB/OL]. (2019–05–23)[2021–10–29]. <https://exploration.esa.int/web/moon/-/61371-esa-strategy-for-science-at-the-moon>.
- [6] FAN W, YANG F, HAN L, et al. Overview of Russia's future plan of lunar exploration[J]. Science & Technology Review, 2019(16): 3.
- [7] SASAKI H, DIRECTOR J. JAXA's lunar exploration activities [R]. Vienna, Austria: Presentation at the 62nd Session of COPUOS, 2019.
- [8] 裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站[J]. 科学通报, 2020, 65(24): 2577–2586.
- PEI Zhaoyu, LIU Jizhong, WANG Qian, et al. Overview of lunar exploration and international lunar research station[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(24): 2577–2586.
- [9] 田亚骏, 张明, 林轻. 月面大范围探测功能需求分析及其研究现状[J]. 载人航天, 2020, 26(5): 649–655.
- TIAN Yajun, ZHANG Ming, LIN Qing. Analysis of function requirements in large-scale lunar surface detection and its research status[J]. Manned Spaceflight, 2020, 26(5): 649–655.
- [10] DUTCH M, EHRENFRIED V. Artemis lunar program: Returning People to the Moon[M]. Chichester, UK: SPRINGER, 2020.
- [11] 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.
- YUAN Yong, ZHAO Chen, HU Zhenyu. Prospect of lunar base construction scheme[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(4): 374–381.
- [12] 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, 33(12): 1840–1844.
- YU Dengyun, GE Zhijiang, WANG Naidong, et al. Supposal for structure form of lunar base[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(12): 1840–1844.
- [13] 杜宇, 盛丽艳, 张婧, 等. 月球水冰赋存形态分析及原位探测展望[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(6): 607–614.
- DU Yu, SHENG Liyan, ZHANG He, et al. Analysis of the occurrence mode of water ice on the moon and the prospect of in-situ lunar exploration[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(6): 607–614.
- [14] HOWARD R L. An alternate configuration of the multi-mission space exploration vehicle[C]. National Society of Black Engineers (NSBE) Aerospace Systems Conference, Los Angeles, USA, January 22, 2014.
- [15] NASA. NASA's Space Exploration Vehicle (SEV) [EB/OL]. (2012–08–21)[2021–10–29]. <https://www.nasa.gov/exploration/home/SEV.html>.
- [16] ABERCROMBY A F J, GERNHARDT M L, JADWICK J. Evaluation of dual multi-mission space exploration vehicle operations during simulated planetary surface exploration[J]. Acta Astronautica, 2013, 90(2): 203–214.
- [17] HEVERLY M. A wheel-on-limb rover for lunar operations [EB/OL]. (2008–02–26)[2021–10–29]. <https://trs.jpl.nasa.gov/handle/2014/41284>.
- [18] CZAPLINSKI E C, HARRINGTON E M, BELL S K, et al. Human-assisted sample return mission at the schrödinger basin, lunar far side, using a new geologic map and rover traverses[J]. The Planetary Science Journal, 2021, 2(2): 51.
- [19] LANDGRAF M, CAREY W, HIPKIN V, et al. HERACLES-exploring the Moon in an international context[C]. European Planetary Science Congress, Berlin, Germany, September 16–21, 2018.
- [20] TOYOTA. JAXA and Toyota reach agreement on consideration toward international space exploration [EB/OL]. (2019–03–12)[2021–10–29]. <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/27059582.html>.
- [21] JAXA. JAXA and Toyota announce “LUNAR CRUISER” as nickname for manned pressurized rover [EB/OL]. (2020–08–28)[2021–10–29]. https://global.jaxa.jp/press/2020/08/20200828-1_e.html.
- [22] 郭延宁, 冯振, 马广富, 等. 行星车视觉导航与自主控制进展与展望[J]. 宇航学报, 2018, 39(11): 1185–1196.
- GUO Yanning, FENG Zhen, MA Guangfu, et al. Advances and trends in visual navigation and autonomous control of a planetary rover[J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(11): 1185–1196.
- [23] 崔平远, 贾贺, 朱圣英, 等. 小天体光学导航特征识别与提取研究进展[J]. 宇航学报, 2020, 41(7): 880–888.
- CUI Pingyuan, JIA He, ZHU Shengying, et al. Research progress on optical navigation feature recognition and extraction technologies for small body exploration[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(7): 880–888.
- [24] 孙洪驰, 穆荣军, 李云天, 等. 月面着陆器 INS/CNS 深组合导航方法[J]. 宇航学报, 2020, 41(12): 1571–1578.
- SUN Hongchi, MU Rongjun, LI Yuntian, et al. INS/CNS deep-

- ly integrated navigation of lunar lander[J]. *Journal of Astronautics*, 2020, 41(12): 1571 – 1578.
- [25] LI H, ZHONG C. A machine vision based autonomous navigation system for lunar rover: The model and key technique[J]. *Sensor Review*, 2016, 36/4: 377 – 385.
- [26] OCÓN J, DRAGOMIR I, COLES A, et al. ADE: Autonomous decision making in very long traverses[C]. *International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (I-SAIRAS)*, California, USA, October 18 – 21, 2020.
- [27] MARC R, ROBERTS H, WECLEWSKI P, et al. An improved rover navigation system for long range traverses: Surpassing 1km per Sol in planetary exploration[C]. *The 71st International Astronautical Congress (IAC)*, Virtual Event, October 12 – 14, 2020.
- [28] WOODS M, SHAW A, TIDEY E, et al. Seeker—autonomous long-range rover navigation for remote exploration[J]. *Journal of Field Robotics*, 2014, 31(6): 940 – 968.
- [29] AZKARATE M, GERDES L, JOUDRIER L, et al. A GNC architecture for planetary rovers with autonomous navigation[C]. *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Paris, France, May 31 – August 31, 2020.
- [30] CARLEP J F, FURGALE P T, BARFOOT T D. Long-range rover localization by matching LIDAR scans to orbital elevation maps[J]. *Journal of Field Robotics*, 2010, 27(3): 344 – 370.
- [31] WANG Y, ZHANG W, AN P. A survey of simultaneous localization and mapping on unstructured lunar complex environment[C]. *AIP Conference Proceedings*, Vladivostok, Russia, September 18 – 22, 2017.
- [32] ENGEL J, SCHÖPS T, CREMERS D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM[C]. *European conference on computer vision*, Zurich, Switzerland, September 5 – 12, 2014.
- [33] ENDRES F, HESS J, STURM J, et al. 3-D mapping with an RGB-D camera[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2013, 30(1): 177 – 187.
- [34] MURARTAL R, MONTIEL J M M, TARDOS J D. ORB-SLAM: A versatile and accurate monocular SLAM system[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(5): 1147 – 1163.
- [35] KOSTAVELIS I, NALPANTIDIS L, BOUKAS E, et al. Spartan: Developing a vision system for future autonomous space exploration robots[J]. *Journal of Field Robotics*, 2014, 31(1): 107 – 140.
- [36] ISHIGAMI G, OTSUKI M, KUBOTA T. Range-dependent terrain mapping and multipath planning using cylindrical coordinates for a planetary exploration rover[J]. *Journal of Field Robotics*, 2013, 30(4): 536 – 551.
- [37] BAJPAI A, BURROUGHS G, SHAUKAT A, et al. Planetary monocular simultaneous localization and mapping[J]. *Journal of Field Robotics*, 2016, 33(2): 229 – 242.
- [38] TOMPKINS P, STENTZ A, WETTERGREEN D. Mission-level path planning and re-planning for rover exploration[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2006, 54(2): 174 – 183.
- [39] SUTOH M, OTSUKI M, WAKABAYASHI S, et al. The right path: Comprehensive path planning for lunar exploration rovers[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2015, 22(1): 22 – 33.
- [40] 于晓强,郭继峰,赵毓,等. 月面巡视机器人快速安全路径规划[J]. *航空学报*, 2021, 42(1): 277 – 283.
- YU Xiaoqiang, GUO Jifeng, ZHAO Yu, et al. Fast and safe path planning for lunar rover[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(1): 277 – 283.
- [41] 邢琰,刘祥,滕宝毅,等. 月球表面巡视探测自主局部避障规划[J]. *控制理论与应用*, 2019, 36(12): 2042 – 2046.
- XING Yan, LIU Xiang, TENG Baoyi, et al. Autonomous local obstacle avoidance path planning of lunar surface exploration rovers[J]. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(12): 2042 – 2046.
- [42] ONO M, FUCHS T J, STEFFY A, et al. Risk-aware planetary rover operation: Autonomous terrain classification and path planning[C]. *2015 IEEE Aerospace Conference*, Montana, USA, March 7 – 14, 2015.
- [43] TAKEMURA R, ISHIGAMI G. Traversability-based RRT* for planetary rover path planning in rough terrain with LIDAR point cloud data[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2017, 29(5): 838 – 846.
- [44] ZHANG J, XIA Y, SHEN G. A novel learning-based global path planning algorithm for planetary rovers[J]. *Neurocomputing*, 2019, 361: 69 – 76.
- [45] ALSAGBAN M, DHAOUADI R. Neural based autonomous navigation of wheeled mobile robots[J]. *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 2016, 10(2): 64 – 72.
- [46] OTSU K, ONO M, FUCHS T J, et al. Autonomous terrain classification with co-and self-training approach[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, 1(2): 814 – 819.
- [47] 邓宗全,范雪兵,高海波,等. 载人月球车移动系统综述及关键技术分析[J]. *宇航学报*, 2012, 33(6): 675 – 689.
- DENG Zongquan, FAN Xuebing, GAO Haibo, et al. Review and key techniques for locomotive system of manned lunar rovers[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(6): 675 – 689.
- [48] OSTAFEWICZ J, SCHOELLIG A P, BARFOOT T D, et al. Learning-based nonlinear model predictive control to improve vision-based mobile robot path tracking[J]. *Journal of Field Robotics*, 2016, 33(1): 133 – 152.
- [49] KAMTHE S, DEISENROTH M. Data-efficient reinforcement learning with probabilistic model predictive control[C]. *Internation-*

tional Conference on Artificial Intelligence and Statistics, Lanzarote, Canary Islands, April 9 – 11, 2018.

[50] DING L, GAO H, DENG Z, et al. Wheel slip-sinkage and its prediction model of lunar rover[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(1): 129 – 135.

[51] KHAN H, IQBAL J, BAIZID K, et al. Longitudinal and lateral slip control of autonomous wheeled mobile robot for trajectory tracking[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2015, 16(2): 166 – 172.

[52] DING T, HOU X, XUE P, et al. Coordinated motion control model of a six-wheeled rocker lunar rover[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(8): 1 – 17.

作者简介:

王 平(1981-),男,博士,高工,主要从事载人深空探测、行星表面活动与驻留、任务规划等方面的研究。

通信地址:北京市海淀区友谊路 104 号(100094)

电话:(010)68111719

E-mail: dandanping917@163.com

郭继峰(1977-),男,博士,教授/博士生导师,主要从事智能感知与自主规划、智能无人系统等方面的研究。本文通信作者。

通信地址:哈尔滨工业大学一区 345 信箱(150001)

电话:(0451)86412766

E-mail: guojifeng@hit.edu.cn