

星球车技术发展综述

贾阳¹, 孙泽洲¹, 郑旻¹, 李海飞¹, 陶灼¹, 张天翼², 田鹤²

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 吉林大学机械与航空航天工程学院, 长春 130025)

摘要: 在深空探测任务中, 巡视探测是一种重要的探测形式。作为一种能够在固态星球表面移动, 完成探测、采样、运载等任务的航天器, 星球车具有扩大星球表面精细探测范围、克服着陆精度影响、降低航天员工作负荷等多种作用。对月球车、火星车等星球车的技术发展进行回顾, 重点介绍了中国星球车移动技术、导航与控制技术、自主与智能技术、热控制技术、地面试验验证技术、遥操作技术等发展的情况, 并对星球车技术发展趋势进行了分析。

关键词: 星球车; 移动; 导航控制; 智能; 地面试验

中图分类号: V423.6

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2020)05-0419-09

DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2020.20200031

引用格式: 贾阳, 孙泽洲, 郑旻, 等. 星球车技术发展综述[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(5): 419-427.

Reference format: JIA Y, SUN Z Z, ZHENG Y, et al. Overview on development of planetary rover technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(5): 419-427.

引言

巡视探测是深入开展地外天体科学探测活动的重要方式, 其最大特点是在地外天体巡视区域内, 有选择地对科学目标开展探测活动, 有利于提高探测效率, 扩大探测成果。巡视探测方式既可以独立开展, 也可以与采样返回等其它方式结合, 发挥不同探测方式的组合优势, 实现探测成果的最大化。在巡视探测任务中, 探测器又被称为星球车。

本文对月球车、火星车等星球车的关键技术发展进行回顾, 重点介绍了中国星球车型号研制中移动技术、导航与控制技术、自主技术等发展的情况, 并对星球车技术发展趋势进行分析。

1 星球车发展历程

星球车必须能够适应地外天体表面环境, 在星球表面移动, 携带科学探测仪器开展探测等活动, 因此也被称为巡视探测器。星球车的作用主要包括: 拓展科学探测范围; 满足科学仪器移动探测的需求; 运动到感兴趣的科学探测目标位置, 克服着陆精度的影响, 解决科学探测目标实现与工程实施着陆点选取之间的矛盾。根据执行任务的目标天体不同, 星球车也常被称为月球车、火星车等。

根据星球车的实际用途以及是否载人进行简单分

类, 如表1所示。按照是否载人, 可以分为载人星球车和无人星球车; 按照其用途, 可以分为用于研究、运输、挖掘, 或者作为移动中继站、移动式掩体等。美国“阿波罗”(Apollo)计划中所采用的月球漫游车(Lunar Roving Vehicle, LRV)由宇航员操纵, 属于有人参与、用于运输的星球车, 主要作为拓展航天员活动范围的运载工具; 苏联的“月球车号”(Lunokhod)、美国的火星车“索杰纳号”(Sojourner, 又译“旅居者号”)、“火星探测漫游者”(Mars Exploration Rover, MER)、“好奇号”(Curiosity)等和中国的月球车“玉兔号”属于无人、用于研究的星球车, 这类星球车具有移动性、适应性、自主性和功能性等4个基本特点。

按照重量, 又可以将星球车分为小型(小于100 kg)、中型(不小于100 kg, 小于1 000 kg)、大型(不小于

表1 星球车的分类

Table 1 Classification of planetary rovers

分类	研究用	运输用	挖掘用	中继站	掩体
无人	采用遥控或自动控制	√	√	√	—
	采用外置控制台	—	√	√	—
载人	具有开放座舱	—	√	√	—
	具有密封座舱	√	√	—	√

注: “√”代表已经使用的或被认为最有可能采用的方案。

1 000 kg)。除美国Sojourner火星车属于小型星球车外,已经实施的巡视探测任务均采用的是中型星球车。

成功执行任务的月球车包括20世纪70年代苏联的2辆无人月球车、美国的3辆LRV,以及中国的2辆“玉兔号”月球车。“玉兔1号”于2013年底抵达月球正面虹湾地区,“玉兔2号”于2019年1月3日开始在月球背面南极-艾特肯盆地的冯·卡门撞击坑开展巡视探测,已经成为在月面工作时间最长的月球车。

成功执行任务的火星车包括美国的Sojourner、MER(包括“勇气号”(Spirit)和“机遇号”(Opportunity))、“好奇号”(Curiosity),共4辆火星车,其中Opportunity在火星表面工作了15年。

2 星球车技术难点

星球车作为一种能够在地外天体表面运动的航天器,综合了航天器、智能机器人等技术领域的最新研究成果。迄今只有美国、苏联、中国在月球或者火星成功实施过巡视探测任务,印度的月球车因着陆失败没有正常开展月面探测工作。2020年美国、中国等国家均发射了火星车,目的是进一步开展火星表面巡视探测。

星球车的任务可以概括为:适应目标天体表面的各种环境,携带科学仪器开展移动探测活动,并将探测数据传回。主要功能包括:

- 1) 适应任务全过程的力学环境和空间环境。
- 2) 着陆后安全到达星球表面。
- 3) 具备与地形条件相匹配的前进、后退、转向、爬坡、越障等能力。
- 4) 通过环境感知,了解探测器周围环境信息,规划路径并运动至目标位置。
- 5) 对感兴趣的科学目标进行就位探测。
- 6) 建立测控与通信链路,接受指令,并将探测结果传出。

与典型的航天器相比,星球车的设计难度主要表现在以下几个方面。

1) 环境恶劣。任务目标天体表面的环境情况并不确知,在地面进行考核验证时,如何确定环境条件存在困难,对环境效应的认识常常并不充分。

月球车设计过程中,需要重点考虑的环境因素包括:着陆点月面温度在 $-180\sim+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间变化^[1-2],正午时月表红外辐射热流密度与太阳辐照的热流密度相当,给整器散热面的选择带来限制,也给舱外设备的热设计带来巨大困难;月尘对机构的密封设计、光学镜头防静电设计、太阳能电池电路设计、热控散热面参数选择等有很大影响,需要了解月尘的密度、沉降规

律、带电特性等,使月球车具备较强的环境适应能力;需要实现月壤、月面地形地貌、 $1/6\text{ g}$ 重力等环境的地面综合模拟,对月球车进行严格的设计验证。

2) 技术跨度巨大。星球车是一种全新的地外天体移动探测平台,新研设备通常占70%~80%以上,研制星球车的技术跨越比较大。

在“玉兔号”月球车的系统设计中,根据月面环境,以及月球车的月表通过性要求和设计约束,开展了大量仿真分析与地面试验,优化车轮、悬架的形式及设计参数;采取双目立体视觉技术,实现环境感知,采用适宜度分析、避碰检查等多种技术,遥操作与自主相结合,实现路径规划;利用两相流体回路和同位素热源,实现月夜生存;采用光照自主唤醒等技术,实现月球车的月夜休眠及月昼唤醒。在“玉兔号”的设计过程中,很多技术均属首次应用于航天领域。

3) 工作模式复杂。星球车在星球表面工作过程一般包括与着陆平台分离、星球表面测试段、星球表面工作段等多个阶段,在月球表面要经历月夜、月食,在火星表面则要经历日凌、火星沙尘暴等特殊的工作过程。

在任务分析的基础上,针对在月面对周围环境进行感知、表面移动、开展科学探测以及补充月球车能源等任务需求,为“玉兔号”月球车设计了感知模式、移动模式、探测模式和充电模式。考虑到任务实施过程中可能出现的复杂情况,还设计了安全模式;考虑月面光照变化规律,设计了月昼转月夜模式、休眠模式、月夜转月昼模式^[3]。

4) 资源约束严格。星球车设计中,资源约束十分严格,降低资源消费贯穿设计过程始终。

“玉兔号”月球车研制过程中,在系统层面采取了定向天线、全景相机、导航相机所需要的指向功能,集成在桅杆上统一实现,太阳翼同时肩负功率输出、月夜保温、极端温度条件遮阳功能,分时使用。单机设计层面采取的措施包括电子设备的集成、机构的轻量化、统一供电等措施。单机功能设计中,采取二次电源温备份等手段。在导线、插头选用,以及焊点质量控制等环节,更是做到了“克克计较”^[4]。

在载人月球车设计中,还需要考虑辅助驾驶能力、可维修能力、应急逃生能力等。

1) 辅助驾驶能力。月面环境复杂,航天员着服后受头部防护罩遮光和头部转动约束的影响,对周围环境的感知能力降低,需要载人月球车能够辅助航天员感知周围环境。同时,为了确保航天员的安全和健康工作,需要对航天员的状态进行监测。

2) 可维修能力。载人月球车可维修性包括车轮解

耦,设备的主备份切换,部件的无工具安装、拆卸和系统自检技术等,包括:载人月球车蓄电池组更换方法、载人月球车基地充电方式、车轮故障隔离方式等。

3) 应急逃生能力。考虑航天员的安全,在月球车上设置逃生杆等逃生设备,当月球车出现故障无法继续行驶时,航天员手动卸下搭载的两台逃生杆,并借助月球车车轮组装成逃生装置,保障航天员安全返回。

载人火星车的设计理念与载人月球车相同,但重量约束更加严格。此外,星球车通常不具备自行着陆到星球表面的能力,一般由着陆器(或着陆平台)携带着陆到星球表面后,再利用转移坡道机构将星球车转移、释放到星球表面,其后星球车独立完成科学探测等规定的任务。

星球车的相机、太阳电池片等一般布置在顶面,如果车体倾覆,即使能够复位,也无法继续正常工作,所以必须保证星球车的安全。由于存在通讯时延,要求星球车在状态检测、危险感知、自主危险处置等方面具备较强的能力。

星球车的技术指标包括多个方面的定量要求,例如移动能力、导航与控制能力、测控能力、能源能力、科学探测能力、数据管理能力等。其中,星球车最具特点的技术指标是对移动能力、导航与控制能力的要求。移动方面的指标主要包括移动的最大速度、石块越障能力、行驶转弯半径、行驶里程、爬坡角度、静态稳定角度等。导航与控制能力主要包括静止状态定姿精度、动态定姿精度、紧急避障时间、紧急避障距离、最大自主行驶距离等。这些技术指标反映了星球车在任务执行过程中的综合能力,在对任务要求、技术基础等因素进行综合分析的基础上,通过仿真、试验等方法进行论证并确定。例如,星球车通过性指标确定过程中,常利用平均自由程分析方法。其含义是星球车在直线运动时遇到不可通过的障碍物时已经行驶的平均距离,美国Curiosity火星车在20%的石块分布地形中,平均自由程为48 m^[5],"玉兔1号"月球车的月面平均自由程为63.5 m^[6]。

3 星球车关键技术

星球车的主要关键技术包括:移动技术、导航与控制技术、自主与智能技术、热控制技术、地面试验验证技术、遥操作技术等。

3.1 移动技术

星球车的移动系统关系到星球车在星球表面地形下的通过能力,也关乎星球车的外观特征,需要重点关注。

前苏联在1970年发射的“月球17号”(Luna 17)探测器携带了历史上第一辆月球探测车“月球车1号”(Lunokhod 1)。Lunokhod 1是一辆8轮月球探测车,质量约为756 kg、长约2.94 m、宽约1.96 m,车体结构分为上下两部分,上部分是仪器舱,下部分是移动底盘,底盘对称装配8套扭力式独立悬架机构。Lunokhod 1可以爬上30°的斜坡,越过40 cm高的障碍和60 cm宽的沟壑,实际运动速度为0.14 km/h。

LRV为电动四轮独立驱动,独立转向车辆,每个车轮与结构通过双横臂悬架连接,可以承载两名航天员,每位航天员均可以驾驶。底盘结构包括前、中、后底盘3部分,发射阶段,底盘处于折叠状态,着陆后底盘展开。

美国先后开发的3代火星车均采用6个车轮独立驱动,前后共4个车轮独立转向的Rocker-bogie悬架系统,在多次任务中,这种非弹簧悬架系统优越的越障能力得到了证明,可以使探测车越过其车轮直径尺度的障碍。其中Curiosity火星车最大行驶速度144 m/h,能够越过高度75 cm的障碍物,直径50 cm的坑,设计行程为19 km,设计寿命为2年^[7]。

中国月球车研制过程中,提出了四轮变形轮、带有挖土功能的履翅可伸缩车轮等新型车轮,以及正反四边形悬架^[8]等新型悬架形式,综合考虑重量代价、可靠性等原因,中国的“玉兔号”月球车最终采用了六轮驱动,四轮转向的主副摇臂悬架形式。

中国的火星车同样采用6个驱动轮主副摇臂悬架形式,但是进行了主动化改进,形成了主动悬架形式^[9]。悬架由左右两侧主副摇臂悬架及差动机构组成,主、副摇臂之间铰接,并在铰接点处加装了离合器,根据需要可以锁死、松开主副摇臂之间的铰接,两侧悬架则通过车厢内部的差动机构相连,差动机构再与车体之间固定相连,利用夹角调节机构控制主摇臂长短臂绕差动轴转动^[10]。另外6个车轮均可独立转向。

火星车具有普通步态、蟹行步态、车体升降、蠕动步态、抬轮等等移动步态。其中,普通步态与被动主副摇臂悬架的功能相同,是火星车常用的步态,但增加了蟹行运动功能,主要用于避障和大角度上坡。其余步态为主动步态,用于特殊场合,包括落火后车体抬升、松软沙地车轮沉陷后蠕动脱困、车体着地抬轮脱困、故障轮抬离地面等应用场景,这使火星车的移动系统功能更加强大,但同时也更加复杂。

在星球车移动方面,技术进步体现在以下方面:

1) 提出星球车运动性能的评价方法,从承载能力、驱动性能、转向性能、复杂地形通过能力、稳定

性、技术成熟度及可靠性等方面对星球车的移动性能进行了综合评价,作为系统设计优化的目标。

2) 通过轮土试验,比较了各种车轮形态的性能,结合星球车的行驶性能分析结果,考虑星球表面地形特征,月球车车轮采用了弹性筛网轮,火星车车轮则采用实体胎面轮。

3) 采用直流无刷电机驱动,为了提高输出力矩,减速器的减速比较大,需采取多级行星减速器或者行星+谐波减速器的方式实现。

4) 在移动悬架方面,通过仿真与试验验证,重点研究了主副摇臂悬架和正反四边形悬架,综合重量等因素,月球车选择了六轮主副摇臂悬架,在火星车上将其发展为功能强大的主动悬架。

3.2 导航与控制技术

星球车要在目标天体自然地形环境中行驶并安全到达预先指定的工作点,必须具备危险与障碍识别、自身姿态与位置确定、目标位置确定、路径规划、运动控制,以及障碍规避等能力。星球车导航与控制系一般配置加速度计、太敏、陀螺等敏感器。

1) 环境感知的目的是对周围环境进行三维恢复,识别出障碍,服务路径规划和障碍规避,通常采用基于相机的被动视觉环境的环境感知方案,利用立体视觉匹配算法实现探测器周围地形三维恢复与重建。

2) 在三维恢复结果并与其它信息融合的基础上,结合星球车的通过能力,进行全局路径规划;开发基于可通过性分析或路径代价评价的局部自主避障算法,进行自主局部路径规划。

3) 在松软土壤的环境下,运动过程中存在滑移、滑转,为了适应地形,每个车轮的负载不同,为此开发了协调车轮驱动、转向的协调运动控制算法,以提高驱动效率并实现优化控制。

4) 根据太阳敏感器感知的太阳矢量方向,以及加速度计等传感器感知的重力矢量方向,实现车体姿态测量;此外,在运动过程中还需要结合陀螺信息输出动态姿态。

5) 星球车的绝对定位和相对定位一般采用基于车载视觉系统的图像匹配、基于里程计的航位推算、路标特征匹配等方法。

3.3 自主与智能技术

深空探测任务中目标天体距离遥远、环境复杂,导致星球车的操作控制方法与近地人造卫星存在很大的区别,需要考虑上传指令的时间延迟、星体间空间遮挡、数据传输速率低、长期可靠运行等因素。基于天上计算机软硬件资源,实现自主管理,并向智能控

制方向发展,是深空探测技术发展的一个重要方向。对更远的天体开展探测,星球车自主管理技术的需求也越来越迫切。这种迫切性表现在:与地球距离遥远,通信时延增大,控制实时性变差;时间延迟大与星球车控制实时性要求较高形成矛盾,导致任务执行效率变低。深空探测型号任务不断增加,也会导致地面深空站资源紧张,分时段进行跟踪测量也会导致探测效率的下降。星球车有效载荷,特别是成像设备在探测过程中产生大量的科学数据,大量数据的传输需求与距离遥远导致的数据传输速率下降的矛盾日益突出。星球车运行的环境复杂,出现故障等应急情况需要即时处理,才能确保星球车的安全。

因此,需要在星球车上构建系统级的自主控制系统,合理分配地面遥操作功能与航天器的自主功能,使星球车可以自主在轨完成任务规划、命令执行、故障诊断和故障处置等任务,也可根据从地面接收的任务级命令,展开生成一段时间内满足飞行约束和资源约束的指令序列;执行过程中还需要监测指令的执行情况,并根据不断更新的测量信息确定星球车的健康情况,并完成故障处理,甚至系统重构。

当星球车遇到复杂的无法处理的故障时,则设置星球车进入安全模式,并将当前的状态信息传送给地面站,等待地面工程师分析处理。

火星车仅执行简单的命令序列。Spirit和Opportunity火星车的主要工作模式是自主导航加遥操作。Curiosity火星车的主要工作模式是长距离自主导航加遥操作,在火星行走时的路径规划以及在采样过程中对机构的精准控制均由器上自主完成。

中国火星车的自主功能设计在借鉴国外技术成果的基础上有所创新,通过对火星车自主能力(包括自主能源、自主通信、自主探测、自主故障诊断)等方面的需求进行分析,提出采用移动智能体技术满足火星车任务需求的技术方案框架,如图1所示,主要由机构驱动控制层、导航控制层、智能规划层等3部分组成^[1]。

举例说明框架中具体功能的实现方案:深空探测任务为解决大量图像数据下传问题,必须在保证所需图像质量的前提下追求更大的压缩比,结合我国火星探测任务中火星车的约束条件,通过分析火星车图像数据压缩算法的需求,包括压缩性能、计算复杂度、硬件开销、传输特性及抗误码性能等方面的需求,开发了兼具渐进式传输、区块保护、兼容无损和有损压缩的图像压缩方案,适应巡视探测过程中不同的图像下传需求。

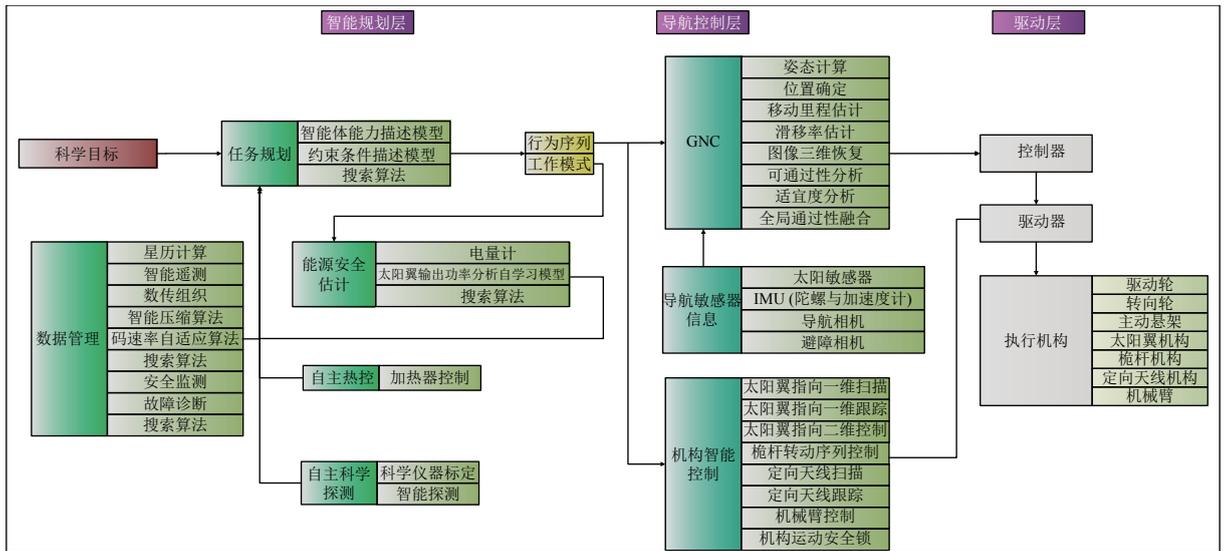


图 1 火星移动智能体方案框架
Fig. 1 Diagram of active suspension

深空探测任务中探测目标远、所处环境动态多变等特点，导致星球车的操作和控制与近地卫星存在很大区别，例如上传指令延迟、星体空间遮挡、低数据传输率、长期可靠运行等。基于星上计算机软硬件，实现自主管理与智能控制是深空探测技术发展的一个重要方向。

3.4 热控制技术

热控制技术包括热设计、热分析、热控硬件以及热试验等4个方面，星球车在热控制技术方面的技术进步体现在以下几个方面。

1) 月球车热设计面临着月球表面昼夜外热流较大变化，在月昼面临长时间高温下的热排散问题，在月夜又迎来在没有太阳能可利用的情况下如何保证探测器仪器设备温度的问题。针对高温问题，月球车采用了设备顶面布置方式，缩短了设备到顶板散热面的传输途径，在极端高温情况下利用太阳翼遮阳等方式加以解决；针对月夜低温问题，利用两相流体回路将同位素热源的热能在需要时引入舱内，保证设备的储存温度环境。

2) 月球车舱外设备种类多，热设计要求复杂，包括月午高温、月夜低温问题的应对。采取的热设计手段主要包括辐射与导热隔热、加热器主动控制，个别设备还采用了同位素热源，提高储存状态的温度^[12]。由于月面低温环境及鉴定温度拉偏等原因，月球车舱外设备在试验中需要实现-215℃的低温，传统方法液氮热沉辐射降温方式无法实现。为了满足舱外设备的低温储存试验的需要，采用20 K的气氦循环制冷手段代替液氮低温环境模拟方式，扩展了航天器空间环境模拟试验的低温端范围^[13]。

3) 在两相流体回路建模过程中，使用数学仿真分析、无因次相似分析、模型参数修正等方法，准确描述了在不同倾斜角度、1/6 g低重力、不同热源功率条件下的两相流体传热能力。在地面试验过程中，采用了扩大储液器直径和降低液位差等方法。

4) 火星车的热控制主要面临低温问题，采取舱内仪器集中安装，并根据工作模式安排设计了长期工作设备热舱和短期工作设备冷舱，规划热排散途径，最大程度节省能源损耗。考虑传统辐射隔热方式不适应火星表面低气压环境，研发了气凝胶材料实现设备舱保温，辅以设备间距控制，抑制自然对流的发展，实现气体滞止隔热。

5) 火星车为解决光伏发电、电加热控制温度过程效率较低的问题，开发了集热窗技术，白昼吸收热量并将能量存储于相变材料之中，夜晚材料凝固过程中放热，保证仪器始终处于合适的温度水平，达到温度波动消峰的目标。

3.5 地面试验验证技术

由于星球车与典型的航天器相比，具有较强的特殊性，在设计过程中，必须进行充分的仿真与地面试验验证工作，达到系统方案比较、关键技术需求分析、技术实现途径验证等目的。在研制过程中，星球车系统级试验一般包括以下几个方面。

1) 内场试验

内场试验的目的是测试星球车在模拟低重力、星壤和星表地形地貌环境下的移动、导航与控制性能，验证星球车工作模式和工作程序设计的合理性。

内场试验通常分为移动性能试验、导航与控制性

能试验、任务支持试验和自主驶离专项试验等试验项目,火星车内场试验如图2所示。

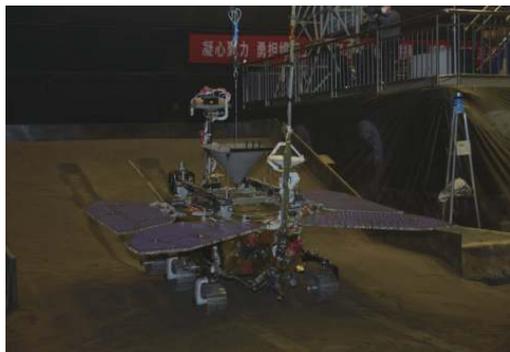


图2 内场试验
Fig. 2 Indoor test of rover

2) 外场试验

开展外场试验的目的是验证星球车的移动性能、导航定位、运动控制、路径规划、局部自主避障、遥操作、科学试验等功能,特别是在野外自然环境条件下星球车的环境感知能力,以及操控流程的正确性。

星球车外场试验的选址要求包括:试验区内场景单调,无明显植被覆盖,不存在较大的对比度差异;表层土壤干燥,覆盖尺寸合适的石块和细颗粒尘土,地形地貌与星球表面地形地貌分布尽量接近(可通过适当改造实现);视野开阔且无人工建筑等。

通过实地考察,并对考察地的地形地貌、气候等多方面资料加以分析,月球车外场最终选择在敦煌西北207 km的库姆塔格沙漠边缘,位于罗布泊东部,雅丹地貌的西侧。月球车外场试验如图3所示。

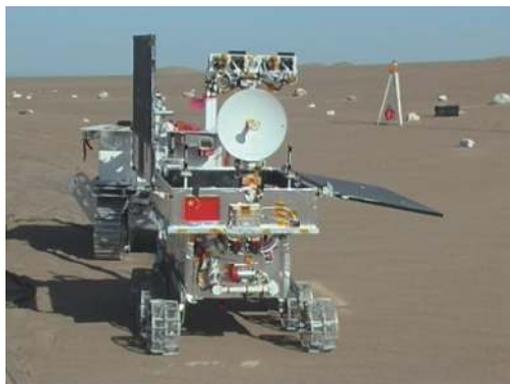


图3 外场试验
Fig. 3 Field test of rover

3) 组合面试验

针对飞行产品,为了在模拟低重力环境下测试星球车移动性能、导航与控制性能,在洁净厂房中进行组合面试验,通过设置障碍、斜坡等典型地形,测试星球车的系统性能,如图4所示。

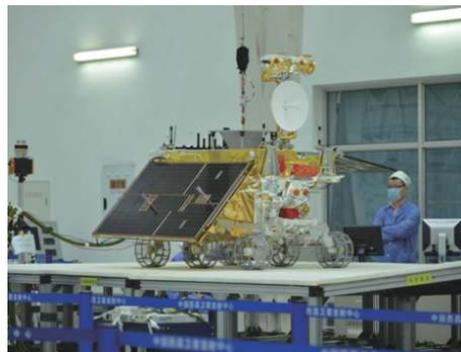


图4 组合面试验
Fig. 4 Composite surface test of rover

组合面试验共完成了静态测量、车轮转向测试、多电机直接控制行驶测试、GNC驱动行驶测试、驶离测试等试验项目。

星球车试验设计过程,在环境模拟方法方面的技术进步体现在以下方面。

1) 低重力模拟

星球车低重力模拟主要采用力平衡法,在主副摇臂上增加配重,调整吊丝受力点等,保证巡视器每个车轮与地面的作用力在平面行驶、爬坡、越障等各种动态情况下均与飞行试验时相同。通过精密的视觉定位、力控与二维随动,保证了低重力的模拟精度优于5‰。

2) 工程模拟土壤的制备与整备

月壤松软但相对均匀,火壤的机械特性类似于地球上密度适中的土壤,在星球车地面移动试验中,松软的土壤使牵引力变小。工程模拟土壤在制备过程中主要通过粒径级配比进行控制,在整备过程中主要通过淋洒、压实过程处理以满足内摩擦角、内聚力等参数。通常不需要考虑土壤的低重力模拟,因为土壤的物理力学参数更多地决定于其本构关系,而不是重力加速度。

国外研制过多种模拟月壤和火壤,国内为了满足工程需要,中国科学院、中国空间技术研究院、同济大学、吉林大学、中国地质大学、中国北方车辆研究所等均进行过模拟月壤或模拟火壤方面的研究工作,经过制备、整备后用于航天器系统试验或者与土壤相关的部组件试验^[4]。

3) 光照模拟

针对星球车环境感知测试的需求,应用多种光源的复合组阵技术,实现了大辐照面积下可见光谱段和红外谱段复合的0.2个太阳常数太阳辐照模拟。相对模拟地形光照高度角可在15°~75°连续可调,最大可覆盖20 m×20 m范围,满足导航相机、全景相机和避障相机等光学设备的成像需求。

4) 精密定位定姿方法

服务于星球车动态的、高精度的定位、定姿要求,以及高精度的地形测量要求,将iGPS、激光雷达技术引入星球车系统试验,以提高对位置、姿态以及微小形变的测量精度。在内场试验开始前对整備好的地形进行扫描,形成地形图,为星球车任务规划、地形恢复等提供比对基准地形。位置和姿态测量装置服务星球车试验过程中位置、速度、加速度、姿态等参数的测量。

5) 灰尘

月球车试验时,根据月尘颗粒直径分布和形貌特征,采用火山灰原料进行研磨和粒径级配的方法模拟月尘。采用淋洒等方法实现月尘的均匀沉降,部分试验中还模拟了月尘的运动速度。从工程实践结果看,月尘对太阳电池片、散热面工作的影响很小。

火星车会受到火星尘的影响。火星尘环境主要由着陆过程发动机羽流喷射、着陆冲击、火星车移动过程扬起和自然激扬这4个因素导致。火星尘对探测器的影响主要有:吸附在光学设备表面,使其成像性能下降;进入到机构内部,影响其正常转动;吸附在太阳电池阵表面,导致太阳电池阵的输出功率降低;黏附在热控涂层等表面,导致其吸收率、发射率等性能参数下降,改变探测器的温度水平和温度分布;在火星车释放过程中,如转移机构上附有火星尘,则会影响车轮与转移机构间的接触状态,改变摩擦力,对释放过程的安全性造成影响。因此,为了确保星球车正常工作,需要采取针对性的防尘措施,例如在敏感器表面上采取被动防尘措施,在太阳翼盖片表面设计微观形状,降低表面吸附能,减少尘土附着,或者在外力作用下使颗粒更容易脱离被吸附表面。

3.6 遥操作技术

地面任务支持与遥操作系统的研究与开发,也可以称之为遥操作技术的研究,主要包括绝对定位、相对定位、图像融合、任务整体与探测周期规划、机构(桅杆、太阳翼、机械臂、移动装置)规划、移动里程绘制与综合比较、路径规划、数学与物理仿真验证等技术^[15]。

着陆点定位是星球车开展后续科学探测任务的重要基础。利用降落相机获取的降落影像序列与轨道遥感获取的着陆区影像进行融合处理,实现高精度定位。

星球车上的双目相机将会对所处的环境进行环拍,数据下传至遥操作系统进行图像解码、融合拼接、三维地形重构和数字微分纠正与填充,形成正摄影像图和数字高程图。

巡视过程中的定位方法有多种,其中,应用较多的图像光束法平差技术,综合考虑了星球车的特点,利用移动过程中不同摄站的图像信息,以及轨道器影像、着陆影像进行联合定位^[16]。

以“玉兔号”月球车为例,在轨移动时里程计、惯性导航系统协同工作,可获取相机成像时刻月球车的摄站位姿信息。随着里程计、惯性导航系统的系统误差累积,以及车轮打滑等因素的影响,月球车位置信息精度下降。因此,提出了基于立体图像的导航定位算法。该算法的优点如下:计算简单快捷,不需要星球车的位姿遥测数据等先验知识,避免了视觉测程法中光束法平差方程式的构造和迭代计算;对立体相机的相对方位元素重新进行了计算,避免在受到环境、着陆冲击等因素的影响,相机参数发生变化时,仍采用地面检校值导致定位精度降低的情况。

定向天线的指向控制是一个关键环节,在系统任务层面需要考虑能源、数据量、通信窗口、遮挡等因素;双轴机构指向规划算法的设计,除了机构本身的运动学模型、关节转动范围、遮挡关系外,还需考虑时刻、星历、位置、姿态、天线安装执行误差等多因素的影响^[17]。火星车和地球之间的通信时延比月球车更长,约为3~23 min。月球车可以通过准实时的地面遥操作进行控制,而火星车的定向天线对地指向需由器上自主实施,器上要运行星历计算、机构指向计算等算法,并根据规划结果自主生成运动控制指令^[18]。

通过视觉手段获取轮地作用图像,估测车轮沉陷量也具有重要意义,根据车轮沉陷量及振动信号获取的信息进行当前位置土壤力学参数识别,根据不同位置的土壤力学参数变化趋势及前方地形信息,预测星球车到达前方各区域的沉陷量大小,构建包含沉陷量信息的语义地图。

基于视觉里程计的滑移率估计建立火星车滑移率预测模型,以不准确度和滑移率为行走性能的评价指标,得到转向角度和轮速的匹配关系,可以提高车辆转向准确度和行驶稳定性,进而实现火星车自主科学探测任务规划及行为规划。

星球车的任务执行过程是一个器地交互、地面持续支持的过程,技术难度大,具有距离远、任务复杂(模式多、约束多)、探测环境非结构化、地面任务支持频繁且持续时间长、需要进行伴飞仿真模拟验证等特点。

4 结论与展望

星球车相关技术已经过了50年的发展,美国的火

星车技术处于领先地位。我国通过“玉兔号”月球车的研制掌握了星球车相关关键技术,即将执行任务的火星车更将相关技术推动到较高水平,特别是在移动技术、热控制技术、智能与自主技术等方面形成了特色。

未来星球探测车的发展至少包括两个方面:结构形式更多样化,如基于仿生的腿式、跳跃式星球车,可以实现对常规轮式探测车不能到达的地带进行探测研究;功能增强,虽然结构形式变化不大,但是体积更大,在运动能力、稳定性、探测能力、容错性和智能性等诸多方面将会有显著提升,以完成更复杂的探测任务。

深空探测任务将向多样化和复杂化的方向继续发展,星球车的自主与智能需求越来越迫切,实现在长期无人干预情况下的系统级自主是星球车自主管理技术发展的重要方向。自主系统将重点突出科学数据的处理、科学现象的在轨发现、突发事件的自主跟踪探测等面向科学探测的自主功能。

参 考 文 献

- [1] 孙泽洲,贾阳,张焯,等. 嫦娥三号探测器技术进步与推动[J]. 中国科学:技术科学,2013,43(11):1186-1192.
SUN Z Z, JIA Y, ZHANG H, et al. Technological advancements and promotion of Chang'e-3 lunar probe mission[J]. *Technological sciences*, 2013, 43(11): 1186-1192.
- [2] 孙泽洲,张焯,贾阳,等. 嫦娥三号探测器地面验证技术[J]. 中国科学:技术科学,2014,44(4):369-376.
SUN Z Z, ZHANG H, JIA Y, et al. Ground validation technologies of the Chang'e-3 lunar spacecraft[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, 44(4): 369-376.
- [3] 申振荣,张伍,贾阳,等. 嫦娥三号巡视器及其技术特点分析[J]. *航天器工程*, 2015, 24(5): 8-13.
SHEN Z R, ZHANG W, JIA Y, et al. System design and technical characteristics analysis of Chang'e-3 lunar rover[J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(5): 8-13.
- [4] 张旺军,申振荣,李群智,等. 月球巡视器的系统设计优化方法研究[J]. *航天器工程*, 2014, 23(3): 4-11.
ZHANG W J, SHEN Z R, LI Q Z, et al. Study on system design and optimization method of lunar rover[J]. *Spacecraft Engineering*, 2014, 23(3): 4-11.
- [5] NASA. Mars exploration rover mission: science[EB/OL]. (2007-07-12) [2020-06-15]. <http://marsrover.nasa.gov/science/goal1-results.html>.
- [6] 李静文. 月面巡视区域地形与巡视器通过性统计分析[J]. 中国科学:技术科学,2015,45(7):773-778.
LI J W. Statistic analysis of exploration area topography and rover trafficability[J]. *Science China Technological Sciences*, 2015, 45(7): 773-778.
- [7] MARK M, JEFFREY B, EDWARD T, et al. Chapter 3, Surface navigation and mobility intelligence on the Mars exploration rovers[R]. [S. l.]: NASA Jet Propulsion Laboratory, USA, 2006.
- [8] 陈百超,王荣本,贾阳,等. 高通过性与平稳性月球车移动系统设计[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(12): 143-149.
CHEN B C, WANG R B, JIA Y, et al. Innovative locomotion system with high trafficability and cab smoothness for lunar rover[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(12): 143-149.
- [9] 邹大力. 主动悬架月球车移动系统建模与仿真技术研究[D]. 北京:北京空间飞行器总体设计部,2008.
ZOU D L. Study of modeling and simulating of active suspension lunar rover mobility system[D]. Beijing: Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, 2008.
- [10] 陶灼,陈百超,贾阳. 火星车主动悬架的几何参数优化[J]. *航天器工程*, 2016, 25(6): 48-54.
TAO Z, CHEN B C, JIA Y. Optimization of geometric parameters for Martian rover active suspension[J]. *Spacecraft Engineering*, 2016, 25(6): 48-54.
- [11] 王琼,贾阳,陶灼,等. 火星移动智能体技术探讨[J]. *航天器工程*, 2015, 24(4): 27-32.
WANG Q, JIA Y, TAO Z, et al. Discuss on Mars mobile agent technologies[J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(4): 27-32.
- [12] 刘自军,向艳超,斯东波,等. 嫦娥三号探测器热控系统设计与验证[J]. 中国科学:技术科学,2014,44(2):589-596.
LIU Z J, XIANG Y C, SI D P, et al. Design and verification of thermal control system for Chang'e-3 probe[J]. *Science China: Technological Sciences*, 2014, 44(2): 589-596.
- [13] 贾阳,申振荣,庞戎,等. 月面巡视探测器地面试验方法及技术综述[J]. *航天器环境工程*, 2014, 31(5): 464-469.
JIA Y, SHEN Z R, PANG Y, et al. A review of test method and technologies for lunar rover[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2014, 31(5): 464-469.
- [14] 贾阳,申振荣,党兆龙,等. 模拟月壤研究及其在月球探测工程中的应用[J]. *航天器环境工程*, 2014, 31(3): 241-247.
JIA Y, SHEN Z R, DANG Z L, et al. Lunar soil simulation and its application in lunar exploration program[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2014, 31(3): 241-247.
- [15] 贾阳,张建利,李群智,等. 嫦娥三号巡视器遥操作系统设计与实现[J]. 中国科学:技术科学,2014,44(5):470-482.
JIA Y, ZHANG J L, LI Q Z, et al. Design and realization for teleoperation system of the Chang'e-3 rover[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, 44(5): 470-482.
- [16] 彭松,贾阳,陈百超. 火星车绝对定位方法选择[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2016, 3(2): 140-144.
PENG S, JIA Y, CHEN B C. Selection of absolute positioning methods for Mars rover[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(2): 140-144.
- [17] 彭松,陈百超,张建利. 月面巡视器定向天线对地指向规划方法研究[J]. *航天器工程*, 2013, 22(3): 41-46.
PENG S, CHEN B C, ZHANG J L. Research on the method of lunar rover antenna direction planning[J]. *Spacecraft Engineering*, 2013, 22(3): 41-46.
- [18] 鞠小微,王岩,付春岭,等. 火星车的关键技术分析[J]. *国际太空*, 2020, 7: 23-26.

JU X W, WANG Y, FU C L, et al. Analysis on key technology of Mars rover[J]. Space International, 2020, 7: 23-26.

作者简介:

贾阳(1970-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向:星球车系统设计与试验验证。

通讯地址:北京5142信箱402分箱(100094)

电话:(010)68745267

E-mail:jiayangdoc@sohu.com

孙泽洲(1970-),男,研究员,主要研究方向:飞行器系统设计。

通讯地址:北京空间飞行器总体设计部(100094)

E-mail:sunzezhou1970@126.com

Overview on Development of Planetary Rover Technology

JIA Yang¹, SUN Zezhou¹, ZHENG Yang¹, LI Haifei¹, TAO Zhuo¹, ZHANG Tianyi², TIAN He²

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

2. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: Patrol detection is an important form of deep space exploration. The planetary rover, which can move on the surface of solid-state planet and complete the tasks of exploration, sampling and transit, has many functions, such as expanding the scope of fine detection on planet surface, overcoming the impact of landing accuracy, reducing the workload of astronauts and so on. The technical development of lunar rover, Mars rover and others are reviewed focusing on the development of locomotion technology, navigation control technology, autonomous and intelligent technology, thermal control technology, ground test verification technology, remote operation technology, and the development trend of rover technology is analyzed.

Keywords: planetary rover; locomotion; navigation control; intelligent; ground test

Highlights:

- Patrol detection is an important form of deep space exploration.
- The planetary rover has many functions, such as expanding the scope of fine detection on planet surface, overcoming the impact of landing accuracy, reducing the workload of astronauts and so on.
- The development of locomotion technology, navigation control technology, autonomous and intelligent technology, thermal control technology, ground test verification technology, and remote operation technology are analyzed.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 朱恬]