

深空探测车辆与我国月面巡视探测器研制进展

Research Development of Deep Space Detection Vehicles and Lunar Rover of China

北京航空航天大学 高峰 孙鹏 崔莹



高峰

北京航空航天大学教授,博士生导师。致力于车辆地面力学和非常规行走机构的研究,创新提出了机械传动步行轮、轮心补偿式步行轮、智能可变直径步行轮和全方位步行车辆等原理和装置,取得多项研究成果,发表地面力学和非常规行走机构的文章 30 余篇。

月面巡视探测器是一个技术高度集成的行走机构,涉及车辆工程、车辆-地面力学、多体动力学、信息处理及自动控制方法等若干现代科学基础理论及工程技术领域。此外,还包括热控、材料、电控、传感器、星际通讯等工程技术。

2007 年 10 月 24 日,承载着中国人千年奔月梦想的“嫦娥一号”月球探测卫星顺利发射升空,在长达 494 天的绕月飞行后嫦娥一号卫星成功受控撞月,探月一期工程圆满结束。在探月二期工程中,我国计划于 2013 年发射月球软着陆器,携带月面巡视探测器一起登陆月球,进行月面巡视勘察和就位探测。月面巡视探测器可以简称为巡视器或月球车,它是探月二期工程中探测器系统的最为重要的组成部分,通过对巡视器

关键技术的研究,可为我国的月球探测乃至未来的深空探测奠定技术基础^[1]。

巡视器是各种科学探测仪器的载体,具有在未知的复杂月面行走的能力,能进行各种科学探测并将探测数据传回到地球。本文对月面巡视探测器的发展历史、趋势以及我国目前的研究现状进行了介绍,分析了月面巡视探测器研制的关键技术,并对我国研制月面巡视器提出自己的建议。

国外深空探测车的发展概况

国外从 20 世纪 60 年代开始研制月球探测车,其中美国和前苏联在月球及行星探测车的研究方面处于世界领先地位。月球及行星探测车的发展可分为以下几个阶段^[2]:20 世纪 60 年代,美国与前苏联开发了有人与无人驾驶的月球探测车;20 世纪 80 年代,美国国家航空航天局(NASA)为完成火星取样返回任务研制了大型火星探测器,但最终放弃了该计划;20 世纪 90 年代开始,开发了一系列小型及微型月球及火星探测车。月球和行星探测车系统的设计受多方面的限制和影响,以火星探测车为例,经历了从早期的“火星漫游者采样并返回(MRSR)”到近期的“火星环境科学探测(MESUR)”的转变过程。由于着眼点不同、工作运行的环境不同(如月面和火星表面),导致最终的设计方案也有较大差异。下面重点介绍国外几种典型的轮式月球/行星探测车的设计特点。

1 Sojourner

Sojourner 探测车由 JPL 研制^[3]。Sojourner 的主要任务是验证在恶劣的火星环境中小型火星车的性能,它于 1997 年完成了一系列技术试验。Sojourner 提出了一体化轮系设计的思想,拥有 6 个独立悬挂的车轮,前后均装有独立的转向机构,移动系统采用摇臂-转向架式悬挂结构,能够在各种复杂地域行驶。

2 MER

探测车 MER 在 2004 年 1 月登陆火星,装备带有 6 个车轮的摇臂悬挂系统,比较适合火星表面碎石较多的地面环境,即使在高低不平的表面运动,也能够保证 6 个轮子都与地面接触,轮毂花纹增强了在柔软沙地和不规则岩石上的爬坡能力^[4]。轮子采用独立驱动,前后 4 个轮子独立转向,可以实现原地转向、偏航和曲线

运动。此外, MER 还设计了特殊的伸展装置,发射时,火星车处于收缩状态,大大节省了存储空间,提高了火星车抗冲击的能力。着陆后,火星车展开,增大了轴距和轮距,明显改善了火星车的稳定性,提高了火星车的通过能力。

3 Nomad

美国 CMU 机器人研究所研制了新一代月球车 Nomad^[5]。该探测车由可变形底盘、均化悬挂系统和自包含车轮组成,是一个具有独立驱动和导向能力的 4 轮结构,采用 2 个转向节的浮动边框架来平均车轮的受力,每个转向节分别作为左、右车轮的支撑结构。Nomad 有 3 种转向方式:差速转向、阿克曼(Ackerman)转向和原地转向。差速转向用于车体未展开和转向电机出现故障时,原地转向用于机器人被困时,而多数情况下采用阿克曼转向。该探测车的最大移动速度为 0.5m/s,于 1997、1998 年分别在智利的阿塔卡马沙漠和南极地区通过了实地测试。

4 Lunokhod

前苏联研制的月球车 Lunokhod 重 756kg,它的行走机构由 8 个弹性筛网轮组成^[6]。每个轮子有 3 个轮缘,每个轮缘通过 16 个轮辐与轮毂连接,金属网组成了月球

车的轮子,上面安装 16 个轮齿增加牵引力。筛网轮结构轻便,大的轮径和非连续车辙可以提高月球车在松软月壤上的通过性能。其车体结构分为上下两部分,上部分是仪器舱,下部分是自动行走底盘。仪器舱是由镁合金制成的密封舱,保证仪器设备工作时不受月面环境的影响。Lunokhod 可以登上 30° 的斜坡,越过 40cm 高的障碍和 60cm 宽的沟壑。

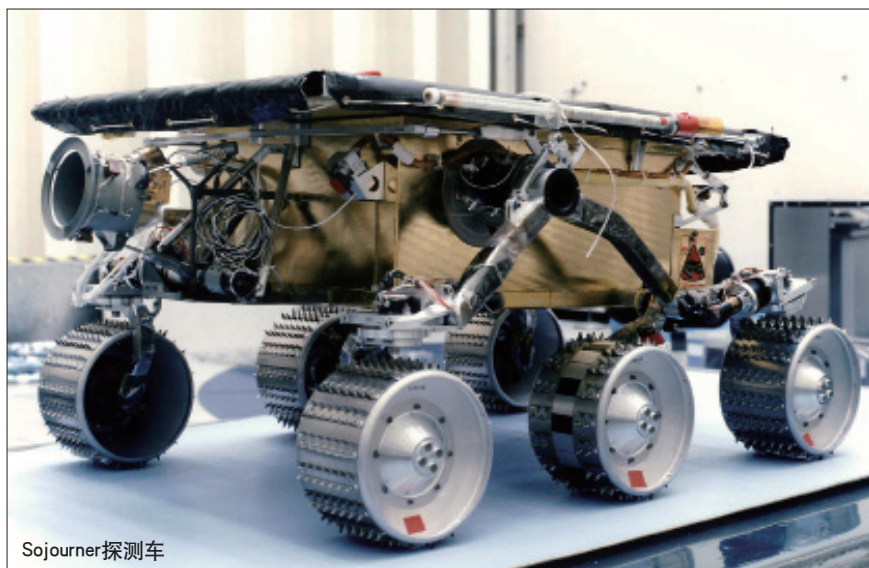
5 Lama

法国分析与系统实验室的机器人 Lama,6 个锥型轮独立驱动并连接于 3 自由度主动铰接悬架,车身可蜷曲起伏^[7]。马达和电池等置于轮中非转动部件中,铰接机构伸缩的特殊驱动使之具有 2 倍于轮径的越障能力。Lama 结构的缺陷是工作平台没有足够可利用的空间。

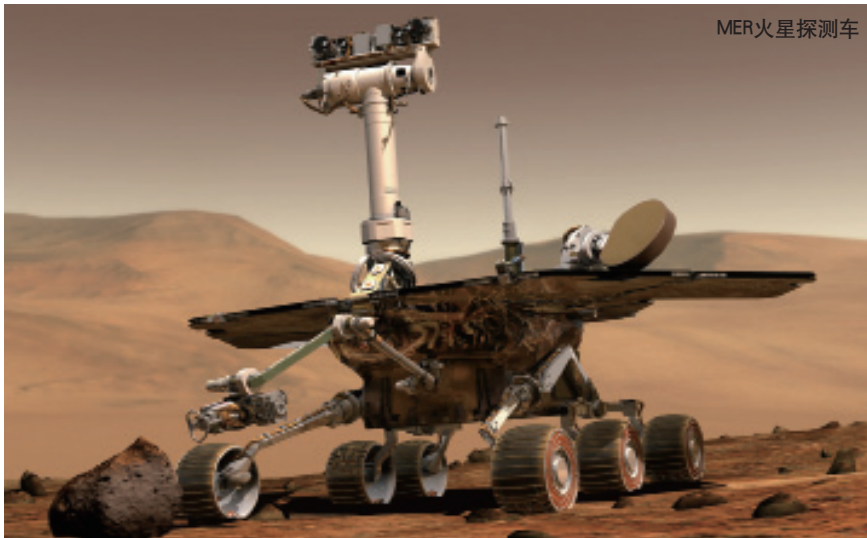
6 Micro 5

日本宇航科学研究所(ISAS)研制的 Micro 5 行星车^[8],采用五轮 PEGASUS 行走机构,其中 4 个角轮为驱动轮,中间轮为支撑轮,可绕横梁节点转动,并通过其转动来调整重力在各轮上的分配,从而提高车体的稳定性和越野性能。轮子皆由超声马达驱动,可越过 1.5 倍轮径的障碍。Micro 5 体积小,质量轻,能耗低。

国外的几种轮式探测车根据探



Sojourner 探测车



MER火星探测车

测目标的不同,其移动系统的设计特点也有所不同,火星探测车更为注重越障性能,月球探测车更为注重松软月面的通过性能。同为月球探测车,根据其执行任务和自身重力的不同,其车轮数量和结构也有所差异。

国内月面巡视探测器的研究进展

在探月工程的大背景下,我国国内的10余所高校和科研院所多年前就开展了巡视器的总体设计、移动系统、控制与导航、机构润滑与密封等相关工作的研究,为巡视器的研制开发奠定了基础。国内典型的月球车设计有以下几种:

1 MR-2

MR-2是由上海航天局联合国内数十家科研机构共同研制的月面巡视探测器^[9]。其采用独立驱动的6轮摇臂式行走机构,配备了一套自主视觉导航系统,可观察前方3m以内的地貌,通过计算建立三维立体地图,判断行进路径,遇到大于30°斜坡、高于25cm的石块,或者直径大于2m以上的撞击坑时,能够进行避让行走。

航天五院^[10]和哈尔滨工业大学^[11]也研制开发出6轮摇臂式巡视器,其结构类型与上海航天局的巡视器行走机构相似,运动原理基本相同。

2 菱形四轮三轴月球车

湖南大学自主研制的全新菱形布置4轮月球车,基于“四轮三轴”的设计思想,用最少数轮数实现了目前国内普遍采用的6轮移动系统所具有的三轴性能^[12]。离开任意一个车轮,其余3个轮子都能形成稳定的三角形支撑结构。该移动系统不仅具有6轮系统的基本行驶性能,并在转向、爬坡、越障方面性能更优越。

3 可变直径轮月球车

由北京航空航天大学提出并自主研制的4轮可变直径轮月球车采用特殊的可变直径轮配合差动悬架,可在多种地域环境下高效行走^[13]。通过控制轮径变化,使轮子在有轮缘和无轮缘之间转换,在松软地面上可提高通过性,减少滚动阻力,防止车身的沉陷;轮子收缩至圆轮时可实现在坚硬地表上的平顺行走。它集成了全地域行走、越障、姿态控制和可折叠的多种功能,实现了高通过性和轻型化的目标。

国内研究机构提出的巡视器设计方案的移动系统都有各自的优点,它们都综合考虑了巡视器的越障能力和松软月面的通过性能,结构上简单明晰。我国巡视器的移动系统的方案已经确定为六轮

摇臂式行走机构,原因在于这种行走机构的可靠性高,技术较为成熟,运行稳定。

月面巡视探测器研制的关键技术

月面巡视探测器是一个技术高度集成的行走机构,涉及车辆工程、车辆-地面力学、多体动力学、信息处理及自动控制方法等若干现代科学基础理论及工程技术领域。此外,还包括热控、材料、电控、传感器、星际通讯等工程技术。巡视器不仅要适应月面极端环境,还要把各种科学研究功能集于一身。

月面巡视探测器研制的关键技术包括总体方案及系统优化技术,巡视器的移动技术,定位、路径规划与控制技术,同位素温差电源及其相关技术,新型热控技术,测控通信技术,仿真与地面验证技术等。目前,包括航天院所和高等院校在内的研究机构针对这7项关键技术开展了全面的研究工作,取得了阶段性的进展。下面重点针对巡视器的移动技术和仿真与地面验证技术在进一步研究中的关键问题进行详细阐述。

1 巡视器的移动技术

移动系统设计时,要考虑巡视器运动的形态学,设计出适合复杂地形条件的移动机构,并对移动系统的动力性能和通过性进行深入研究,分析形状、尺寸、重量和功率等关键参数之间的相互关系,选取最优值,用以



北航可变直径轮月球车

改进巡视器的移动系统的性能。巡视器移动系统的发展趋势为,开发特殊的行走机构,配合可变形底盘,实现移动机构的高通过性和高效率。目前,我国巡视器的移动系统方案确定为6轮摇臂式行走机构,此种行走机构的特点是稳定性好,地形适应性强,越障能力好。在下一步的研发中,需要重点研究以下问题:

(1) 巡视器行走机构关键参数的确定。从巡视器形态学的角度入手,对巡视器的外形,结构尺寸,重量和功率等关键参数之间的相互关系进行研究。对巡视器行走机构的关键参数进行优化,改进巡视器的移动性能。结合月面特殊的环境条件,确定六轮摇臂式巡视器的关键参数。

(2) 巡视器行走机构多体动力学分析与仿真。采用多体系统力学的理论方法,处理在月面复杂条件下巡视器多自由度分析模型的建立和求解问题。对所设计巡视器的重要特性进行精确的定量分析,完成巡视器移动系统的性能预测,对移动系统进行测试评估,对原有的设计进行改进。分析的范围包括:运动学分析、静态分析、准静态分析、动态分析、灵敏度分析等。

(3) 行走机构的一体化轻量化设计。巡视器移动子系统应力求紧凑,体积小,质量轻,与之配套的驱动机构应具备良好的稳定性和较强的驱动能力,因此巡视器的各执行机构都可遵循模块化思想进行设计,形成相对独立的运动部件。

一体化驱动组件设计的概念是针对常规机器人的设计方法而提出的,是系统设计和建模的一种现代方法,可以有效解决常规机器人硬件系统由机器人本体和控制系统两部分组成,而产生的空间利用率低、抗干扰能力差、主控制器运算处理负荷沉重等缺点。在保证巡视器安全可靠的前提下,应尽可能优化机械系统结构,并把轻量化设计的思想贯穿巡视

器设计的始终。

2 仿真与地面验证技术

软着陆和巡视探测任务与典型的地球轨道航天器任务相比,具有较强的特殊性,所经历的环境与条件更加复杂多变。在设计过程中,必须进行仿真与地面试验验证工作,以达到总体方案比较、关键问题分析、技术可实现性验证等目的。着陆过程的轨道设计与控制、着陆冲击载荷、着陆后探测器的热环境、光照环境、测控通信链路等必须通过地面数学仿真的手段进行验证。巡视探测器的通过性、稳定性也需要在类似的月貌环境下进行地面验证,以确认其月面牵引能力、越过障碍的能力、规避障碍的能力、抗侧倾的能力、爬坡能力等技术指标是否达到要求。与巡视器移动性能相关的地面验证工作包括:

(1) 室内土槽模型试验。根据已知的月壤的物理力学特性,配置与真实月壤物理和力学特性近似的模拟月壤,做为轮土交互动力学研究的试验对象。利用室内土槽试验台,进行巡视器车轮-模拟月壤的交互试验,测量车轮的滑转率及牵引特性等参数,对比分析不同结构车轮和不同轮齿构型车轮的牵引性能,优化车轮的尺寸和结构,为月球车车轮设计提供试验数据参考。进一步对六轮摇臂式巡视器的单侧摇臂进行牵引特性的测试,检验巡视器的移动性能。

(2) 巡视器整车试验场试验。参考国外以及月球探测一期工程取得的成果,研究月球表面的环境条件,根据月球表面岩石的类别、月壤的物理机械特性、月面的地形地貌特征,建立一个模拟试验场。试验场能模拟月球表面的典型地形、月壤的松软程度和力学特性,试验场内制造若干人为的障碍物。在试验场内可进行巡视器整车的动力学、通过性试验,检验巡视器的动力性、越障离障性能、爬坡能力及路径规划能力等性能。

此外,整车地面试验场的另一功

能是在巡视器登陆月球后,对于复杂的地形,根据巡视器发回的月面场景照片,快速构造复制现场,进行人工路径规划并在地面试验场进行验证性试验,而后实时对巡视器进行远程控制,为巡视器的月面运行提供进一步的安全保障。

对我国研制月面巡视器的建议

国内数十家科研机构的月面巡视探测器的研制开发已开展多年,取得了多项科研成果,有较为深厚的技术积累。各家单位的工作各有侧重,拥有各自的特色和优势。目前,探月二期工程已正式立项,由中国空间技术研究院负责全面的领导和组织协调。建议抓总单位能够充分联合国内科研机构的研究力量,在巡视器的研发过程中建立良性竞争机制,充分利用现有的成熟的研究成果,大力协同,分工合作,依靠大团队的力量完成这项工作。

作为中国探月计划中令世人瞩目的一个重要组成部分,月面巡视探测器的研制应该把自主创新提到重要的位置,搞好关键技术的攻关,突破巡视器研制中的重点难点技术,保证巡视器能成功地完成月面探测任务。巡视器的研制对推进月球探测工程进展至关重要,并能带动相关技术发展,有利于提高我国国防实力和国际地位,并会对我国远期的火星探测等深空探测工程产生深远的影响。

美国已提出载人登月计划,要建立月面永久性基地,更好地利用月球资源,进行更广泛的科学研究。在无人探测器登月成功的基础上,我国月面巡视探测器的下一步研究将放在载人月面探测和工程车辆上,为长远深空探测目标做好技术储备。

注:本文有参考文献13篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向编辑部索取。(责编 侧卫)