

# 行星探测机器人的研究现状与技术发展

黄佳雷,高一丹,叶志彪,翁艺航,葛如飞

(上海航天电子技术研究所,上海 201109)

**摘要:**行星探测机器人技术是空间技术当前和未来发展的热点之一,面临着广阔的发展空间。从行星探测空间机器人的研究背景、定义和发展阶段出发,对当前国内外行星探测机器人的发展概况进行了综述和总结,进而阐述了未来行星探测机器人技术发展必须面对的问题。

**关键词:**机器人;行星探测;样品采集;巡视探测;研究现状

**中图分类号:**TP242.4 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)02-0153-04

## Research Status and Technology Development of Planetary Exploration Robot

HUANG Jialei, GAO Yidan, YE Zhibiao, WENG Yihang, GE Rufe

(Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** As planetary exploration robot technology is one of the hot spots of space technology at present and in the future with broad development space, proceeding from the research background, definition and development stage of the planetary exploration of space robot, reviews and summerises the current domestic and oversea development situations of planetary exploration robots, and elaborates the problems inevitably faced in the future of planetary exploration robot technology as well.

**Keywords:** robot; planetary exploration; sample collection; roving exploration; research status

## 0 引言

随着太空探索步伐的逐渐加快,人类完成了从大气层到地外空间、从月球到火星的逐步开拓,无垠宇宙正成为人类另一个不断探索和生存的空间。宇宙空间特有的微重力和超洁净环境为人类提供了地球大气层内所没有的特殊材料的生产基地和科学实验场所,但太空环境复杂多变,其具有的超真空、强辐射、高温差等特点,给宇航员舱外作业带来高度危险性,不可避免地在宇航员生命保障系统的设计与维护上产生高昂成本。

行星探测机器人为行星探索打开了新的局面,使一些人类无法亲自完成的空间探索任务成为可能。行星探测机器人研制从20世纪60年代开始,其探测的方式有:飞过行星旁拍摄照片、在行星表面硬着陆、绕行星飞行以及在行星表面软着陆,包括执行行星表面巡视探测、样品采集、科学试验任务以及辅助宇航员完成行星探测任务。可以预见,随着航天科技的突飞猛进和世界各国对探索宇宙奥秘、开发利用宇宙资源的重视,人类的行星探测计划将紧锣密鼓进行,探测的目的和内容将更趋明确和完整,探测技术将更为先进,宇宙探测将步入飞速发展阶段<sup>[1]</sup>。

## 1 行星探测机器人的定义及发展阶段

### 1.1 行星探测机器人定义

行星探测机器人主要指在月球、行星、小行星等地外

天体上执行任务的空间机器人,其包括但不限于无人/载人巡视探测机器人、行星勘探机器人、行星表面建造机器人等。这些机器人通常以星表巡视器为基座,具有轮式或腿式移动系统,一般还配置操作机械臂。其执行的任务一般兼有移动和操作两个方面,如行星表面巡视、极端区域探测、样品采集、科学试验、星基地建设以及辅助宇航员探测等任务。行星探测机器人所处环境的特点包括真空或特殊大气、强辐射、沙尘、特殊地质条件、重力、特殊温度环境等。

### 1.2 行星探测机器人发展阶段

行星探测机器人的发展大致可以分为以下三个阶段。

1) 遥控空间机器人,该种类型的空间机器人完全根据操作员的指令工作,实现比较容易,但是操作人员的工作强度很大,且控制信号的接收延时使得系统稳定性较差<sup>[2]</sup>。

2) 共享控制机器人,此机器人具有将遥控操作和机器人的自主控制结合的特点。目前,该类型机器人的智能程度还不是很高<sup>[3]</sup>。

3) 自主空间机器人,该类型的机器人装备齐全,包含视觉、力觉、接近觉、触觉甚至听觉传感器系统,可以根据传感器系统检测到的外部环境变化,独立自主地进行任务规划,完成空间机器人的各种任务<sup>[4]</sup>。

目前,美国、俄罗斯、日本、欧洲都在进行自主的行星探测空间机器人的研究。随着集成电子技术、计算机技术以及人工智能技术的发展,具有能够执行高级指令的完全自主执行空间任务的空间机器人必将日臻完善。

## 2 国内外行星探测机器人发展概况

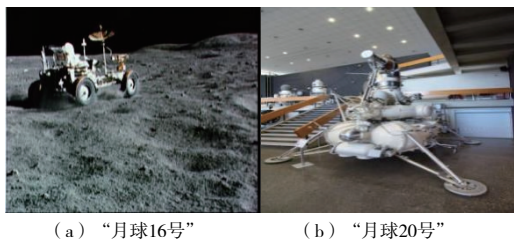
### 2.1 国外行星探测机器人发展概况

#### 1) 样品采集机器人

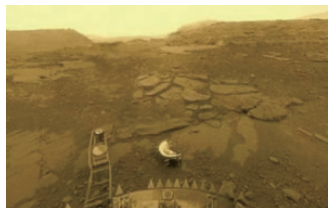
苏联研制的“月球 16 号”探测器于 1970 年 9 月发射升空,如图 1(a)所示的是人类第一个实现在月球上自动采样并送回地球的探测器,将首批 101 g 月壤带回地球<sup>[5]</sup>,标志着苏联开始新的一系列空间科学研究。

苏联“月球 20 号”于 1972 年 2 月发射升空,是继“月球 16 号”之后第二个登上月球并将月面样品发回地球的无人探测器。由于采集过程中遇上了玄武岩,“月球 20 号”只采集到了 55 g 的样本,大多为月岩颗粒。图 1(b)所示为“月球 20 号”探测器。

“金星 13 号”是苏联于 1981 年 10 月发射的金星探测器,并于 1982 年 3 月到达金星。降落金星表面后探测器运行了 127 min,创下了“航天器在金星上工作的最长时间记录”<sup>[6]</sup>。探测器把收集到的金星土壤样品送回舱内化验。图 1(c)所示为“金星 13 号”探测器降落金星表面拍摄的地表画面。



(a) “月球16号” (b) “月球20号”



(c) “金星13号”降落金星地表拍摄画面

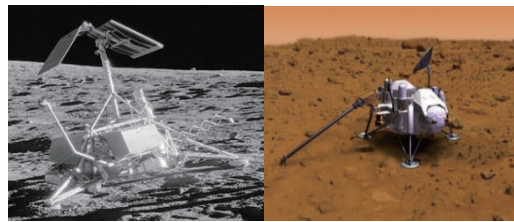
图 1 俄罗斯样品采集机器人

美国 NASA 于 1967 年 4 月将“勘测者 3 号”发射升空,如图 2(a)所示。该登陆器上 1.8 m 长的机械臂手挖了 4.5 m 深的坑,完成了月球土壤的采集工作,并对力测量信息进行了采集。

美国“海盗 1 号”火星探测器于 1975 年 8 月发射升空,成为全球首个成功登陆火星的探测器,如图 2(b)所示。它使用采样机构进行火星表面土壤采样<sup>[7]</sup>,检测火星上的微生物,并拍摄了大量火星表面照片。

美国“凤凰号”火星探测器于 2007 年 8 月发射升空,着陆火星表面后示意图如图 2(c)所示。安装在“凤凰号”探测车上的机械臂具有 4 个自由度,长约 2.35 m,能从坚硬的极区冻土表面钻取土壤样品。

欧空局“火星快车”无人探测器于 2003 年 6 月发射升空,所携带的猎兔犬-2 着陆器配备的机械手可以挖掘几十厘米深的火星表层土壤,并能对土壤颗粒进行分析,分辨出 180 种盐分、矿物质、水和有机物质,如图 3 所示。



(a) “勘测者3号” (b) “海盗1号”



(c) “凤凰号”火星探测器

图 2 美国的样品采集机器人

日本“隼鸟 2 号”小行星探测器于 2014 年发射升空<sup>[8]</sup>,并于 2018 年抵达小行星“龙宫”(1999 JU3)。“隼鸟 2 号”接近小行星示意图如图 4 所示,其拥有遥感、巡视、取样探测等功能。

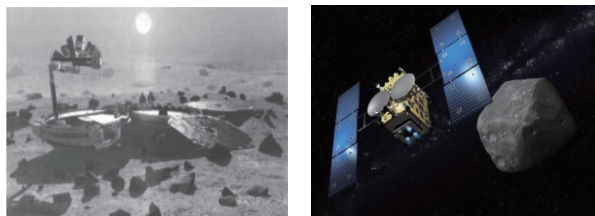
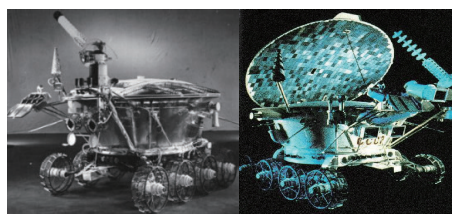


图 3 欧空局猎兔犬-2 图 4 日本“隼鸟 2 号”

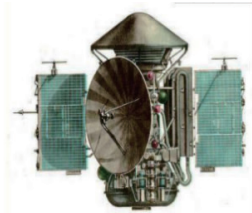
#### 2) 巡视探测机器人

苏联月球车-1/2(Lunokhod-1/2)分别于 1970 年和 1973 年成功发射升空,如图 5(a)和图 5(b)所示,标志着行星探测机器人进入实际应用阶段<sup>[9-10]</sup>。月球车 1 号和 2 号均采用 8 轮移动方式,主要任务都是对月壤进行物理学和化学分析,并收集月球表面照片。

苏联的 PROP-M 火星车搭载“火星 3 号”探测器于 1971 年 5 月发射升空,并成功软着陆于火星表面。这是世界上第一辆火星探测车<sup>[10]</sup>,其质量为 4.2 kg,用步行-雪橇式系统爬行。“火星 3 号”如图 5(c)所示。



(a) 月球车1号 (b) 月球车2号



(c) “火星3号”

图 5 俄罗斯的巡视探测机器人

由阿波罗 15 号飞船携带的“Apollo15”载人巡视器(LRV)是美国 NASA 研制的第一辆月面探测车,如图 6(a)所示,于 1971 年 7 月发射升空,成为世界上最早实现空间应用的载人月球车。巡视器是一个双座四轮的自动行走装置,由宇航员使用手控器控制 2 个转向电机与 4 个驱动电机,可向前、向后、转弯和爬坡等<sup>[11]</sup>。

美国“火星探路者”号飞船携带“索杰纳”号火星车于 1996 年 12 月发射升空<sup>[12]</sup>,如图 6(b)所示。这是人类历史上第一次在火星表面和地球系统以外的巡视探测,也是在火星上第一台真正从事科学考察工作的机器人车辆。

美国“勇气号”火星车于 2003 年 6 月发射升空,如图 6(c)所示。“勇气号”长 1.6 m、宽 2.3 m、高 1.5 m,重 174 kg,主要任务是对火星地表环境进行观察探测,极大地加速了对火星表面的研究进展<sup>[13]</sup>。

美国“机遇号”火星车于 2003 年 7 月发射升空,如图 6(d)所示。“机遇号”与“勇气号”结构相似,是一个 6 轮太阳能动力车。“机遇号”发现了火星上的第一个陨石、防热护盾岩,并且利用超过两年的时间研究维多利亚撞击坑<sup>[14]</sup>。

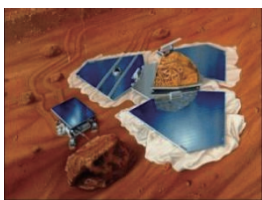
美国 NASA 在 2005 年研制了一种全地形 6 足地外探测器(ATHLETE)<sup>[15]</sup>,如图 6(e)所示。其主要通过改变腿式和轮式移动方式来应付各种复杂地形,是一种对行星表面地形适应能力极强的新型行星探测机器人。

美国“好奇号”火星探测器于 2011 年 11 月发射升空,如图 6(f)所示。它是世界上第一辆使用核动力驱动的火星车,采用摇臂转向架式移动系统来进行火星巡视探测<sup>[16]</sup>。

“毅力号”火星探测器是由美国喷气推进实验室研制,于 2020 年 7 月发射升空,如图 6(g)所示。“毅力号”主要任务是寻找火星上生命存在的证据,探测地质特征并测试新一代的探索装备,包括一架被命名为“Ingenuity”的 1.8 kg 重的小型直升机侦察器。这是人类首个登陆地外天体的飞行器,可以进行大量科学考察工作,提供更加清晰的图像,搜索更加崎岖艰险的地形。



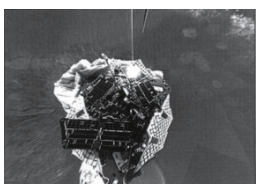
(a) “Apollo15”月球车



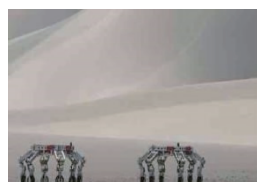
(b) “索杰纳”号火星车



(c) “勇气号”火星车



(d) “机遇号”火星车



(e) ATHLETE机器人



(f) “好奇号”火星车



(g) “毅力号”火星车

图 6 美国的巡视探测机器人

## 2.2 国内行星探测机器人发展概况

我国空间机器人技术研究约始于 20 世纪 80 年代,同欧美和日本相比还有不小的差距。国外的太空探索与空间技术的提升对我国空间战略环境造成严重威胁和严峻挑战。

由中国空间技术研究院牵头,联合哈尔滨工业大学、中科院沈阳自动化研究所等单位,于 2006 年研制出一种月球车原理样机,其配备的机械臂有 5 个自由度,最大工作范围为 0.8 m,最大负载为 2 kg<sup>[17]</sup>,如图 7(a)所示。由上海航天局牵头,联合哈尔滨工业大学、上海交通大学、沈阳自动化研究所、国防科技大学等单位,于 2007 年研制出了一种探月车原理样机,其机械臂有 5 个自由度,具有折叠和展开功能,如图 7(b)所示。

“嫦娥三号”探测器于 2013 年 12 月成功发射,实现了我国航天器首次在地外天体软着陆、无人自动巡视和月面科学勘测<sup>[18-19]</sup>。其携带的“玉兔号”月球车如图 7(c)所示,其搭载的机械臂长约 0.5 m,具有 3 个自由度,主要用于辅助探测分析月球表面土壤,其展开后的控制精度可达毫米级别。

“嫦娥四号”探测器是“嫦娥三号”的备份星,携带“玉兔二号”月球车于 2018 年 12 月成功发射升空,如图 7(d)所示。“嫦娥四号”的主要任务是继续对月球地质、环境、资源等方面进行科学探测,实现国际上空间探测器首次在月球背面软着陆和巡视探测<sup>[20]</sup>。

由中国空间技术研究院总研制的“天问一号”探测器于 2020 年 7 月发射升空,成功软着陆于火星表面,中国首次火星探测任务取得圆满成功。其携带的“祝融号”火星车开展巡视区环境感知、火面移动和科学探测,通过配置的地形相机、多光谱相机、次表层探测雷达、表面成分探测仪等 6 台载荷,对巡视区开展科学探测<sup>[21]</sup>。“祝融号”火星车如图 7(e)所示。

“嫦娥五号”探测器于 2020 年 11 月发射成功,由中国空间技术研究院总研制,成为我国第三个成功实施月面软着陆的探测器,实现了我国首次月球无人采样返回。“嫦娥五号”进行了约 19 h 的月面自动采样工作,采集了 2 kg 左右的月球样品返回地球,如图 7(f)为“嫦娥五号”探测器采样结束后月面起飞瞬间。



(a) 月球车原理样机



(b) 探月车样机

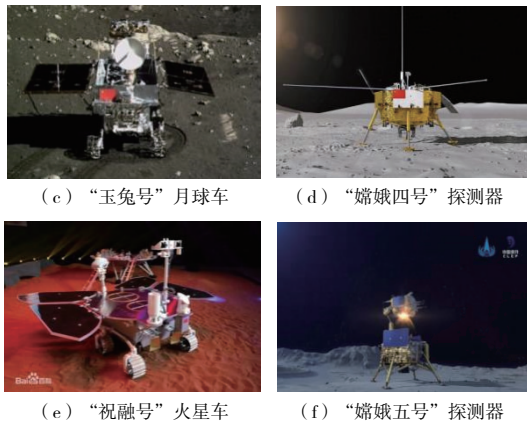


图7 中国的行星探测机器人

### 3 行星探测机器人技术发展

人类在空间探索领域的不断深入使得行星探测机器人未来的技术发展尤为迫切。逐渐复杂化的空间操作任务和新型的行星探测需求不断出现,对行星探测机器人的发展和应用提出了新的技术挑战。

1)耐空间环境及长寿命、高可靠设计技术。空间环境适应性设计需兼顾航天器发射段环境、轨道环境、行星表面环境等约束条件。此外,还需满足行星探测机器人无维护条件下长期服役的高可靠要求,通过冗余、裕度、降额等设计手段提高系统可靠性。

2)轻量化、高精度技术。在确保探测器性能的前提下需尽可能减重,实现轻量化要求。高比刚度、高比强度材料的应用是优先采用的设计方法,同时也需考虑空间机器人高精度要求。

3)遥测信号传输技术。行星探测机器人需要在感知、能源及计算能力有限等不利条件下,提供高实时性、高自主性的星表探测。

4)地面验证技术。特殊地外空间环境以及行星探测机器人的多自由度、复杂性任务都给地面验证带来了严峻挑战。如机器人必需的视觉和力觉传感器在地外星球上的可靠成像和稳定测量验证问题、行星探测机器人的低重力、真空、高低温、粉尘多因素耦合下的移动性能测试问题以及行星特殊环境采样操作验证问题等。

### 4 结语

人类空间探索范围的不断拓展使得行星探测技术得到迅速发展。本文从行星探测机器人的背景、定义、发展阶段等方面进行论述,分别从样品采集机器人和巡视探测机器人两方面进行国内外发展现状分析,对比国内外行星探测机器人的发展差距与不足,进一步阐述行星探测机器人的关键技术发展。机械、感知、控制、材料、力学、人工智能等多方面科技成果的充分利用,将促进空间机器人理论和技术的快速发展,使得行星探测机器人成为人类探索无

垠宇宙、利用空间资源的有力工具。

#### 参考文献:

- [1] 戚发轫. 中国载人航天发展回顾及未来设想——2010年空间环境与材料科学论坛大会讲话[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(1):1-4.
- [2] 刘晓峰. 空间机器人多体动力学及捕获问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [3] HERLANT L. Algorithms, implementation, and studies on eating with a shared control robot arm[Z]. [S.I.; s.n.], 2018.
- [4] SENDA K, MUROTSUYU, MITSUYAA, et al. Hardware experiments of a truss assembly by an autonomous space learning robot[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2002, 39(2): 267-273.
- [5] 刘进长, 辛健成. 机器人世界[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2000: 93-104.
- [6] 迟文成. 吉尼斯世界记录大全[M]. 沈阳: 辽宁少年儿童出版社, 2021: 15.
- [7] 蔡立英. 火星探测器舰队[J]. 世界科学, 2016(3): 19-21.
- [8] 杨宇光. “隼鸟2号”的巡天之旅[J]. 国防科技工业, 2020(1): 46-49.
- [9] 林益明, 李大明, 王耀兵, 等. 空间机器人发展现状与思考[J]. 航天器工程, 2015, 24(5): 1-7.
- [10] 江磊, 姚其昌, 何亚丽, 等. 星球车行走系统和它的研制者们——俄罗斯篇[J]. 机器人技术与应用, 2008(3): 17-19.
- [11] 李明泽, 於晓榛, 王捷. 星表移动机器人关键技术专利分析[J]. 中国航天, 2020(1): 66-71.
- [12] 卞毓麟. 人类为什么要探测火星? [J]. 创新时代, 2017(1): 8-10.
- [13] 李慧军, 惠平, 曹松, 等. “勇气”号巡车上的有效载荷及其控制系统[C]. 中国空间科学学会空间探测专业委员会第十七次学术会议论文集. 乌鲁木齐: [s.n.], 2004: 279-285.
- [14] 韩淋. 机遇号火星漫游器结束任务[J]. 空间科学学报, 2019, 39(3): 272.
- [15] BRIAN H W. ATHLETE: lunar cargo handling for international lunar exploration [C]// AIAA SPACE 2010 Conference & Exposition. Washington D.C.: AIAA, 2010: 1-7.
- [16] RANKIN A, MAIMONE M, BIESIADECKI J, et al. Driving curiosity: mars rover mobility trends during the first seven years[C]// 2020 IEEE Aerospace Conference. BigSky, MT, USA: IEEE, 2020: 1-19.
- [17] 李斌. 月球车车载机械臂的研究进展及关键技术探讨[J]. 机器人技术与应用, 2008(3): 29-32.
- [18] 蔡金曼, 东方星. 嫦娥-3取得阶段成果[J]. 国际太空, 2014(3): 68-69.
- [19] 吴伟仁, 周建亮, 王保丰, 等. 嫦娥三号“玉兔号”巡视器遥操作中的关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(4): 425-440.
- [20] 张雪松. 嫦娥四号为什么要在月球背面着陆? [J]. 军事文摘, 2016(2): 10-15.
- [21] 苏萌. 解读“天问一号”: 中国人为什么要探测火星? [J]. 世界科学, 2020(9): 36-39.

收稿日期: 2021-11-10