

# 探月足式飞跃机器人设计与控制\*

高峰<sup>1</sup>, 尹科<sup>1</sup>, 孙乔<sup>1</sup>, 肖涛<sup>2</sup>, 杨建中<sup>2</sup>  
姜水清<sup>2</sup>, 陈先宝<sup>1</sup>, 孙竞<sup>1</sup>, 刘仁强<sup>1</sup>, 齐臣坤<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院·上海·200240;  
2. 北京空间飞行器总体设计部·北京·100094)

**摘要:** 外星探测器依赖于探测装备完成探测任务, 国际上常采用着陆器和巡视器设计外星探测器。外星探测器质量直接影响着探测成本, 如果能把着陆器和巡视器融为一体, 设计出可在月面反复着陆和行走的飞跃器, 则能显著减小外星探测器的质量, 大幅减少外星探测的成本。由于人类还没有实现利用腿式机器人探测月球, 腿式月球探测飞跃器的开发可体现我国航天领域自主创新能力。依托北京空间飞行器总体设计部(航天五院总体部)与上海交通大学的合作项目“反复着陆器设计”, 开展了月面低空飞跃着陆行走四足和六足飞跃探测器初探。飞跃探测器方案采用并联式主动腿式机构, 具有在多种复杂地形上主动缓冲着陆和行走的适应能力; 设计并采用了一种新型高功率密度力控驱动单元; 进行了飞跃探测器的结构优化设计, 实现了轻量化; 针对着陆和行走过程中的控制问题, 提出了主被动复合缓冲设计思路和控制方法, 实现了飞跃器着陆过程的缓冲和身体稳定性, 具备多次缓冲、自主移动、可收拢展开、着陆姿态调整、复杂地形适应等多种功能。

**关键词:** 外星探测; 着陆器; 巡航机器人; 可反复着陆; 着陆巡航一体机器人

中图分类号: TP242.6

文献标志码: A

文章编号: 2096-5974(2020)04-0001-07

## Design and Control of Legged Leaping Robot in Lunar Exploration

GAO Feng<sup>1</sup>, YIN Ke<sup>1</sup>, SUN Qiao<sup>1</sup>, XIAO Tao<sup>2</sup>, YANG Jianzhong<sup>2</sup>, JIANG Shuiqing<sup>2</sup>,  
CHEN Xianbao<sup>1</sup>, SUN Jing<sup>1</sup>, LIU Renqiang<sup>1</sup>, QI Chenkun<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;  
2. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094)

**Abstract:** Space probes rely on detection equipment to complete the exploration task. Landers and rovers are often used to design space probes in the world. The weight of probes directly affects the detection cost. If the lander and the rover are integrated into one design called leaping robot that realizes repetitive landing and movement, which can significantly reduce the weight of probes and greatly reduce the cost of space exploration. Since humans have not yet achieved legged robots to detect the moon, the development of legged leaping robots in lunar exploration can reflect the independent innovation ability of China's aerospace field. Based on the cooperative project "design of repeated landers" by the General Department of the fifth Aerospace Academy and Shanghai Jiao Tong University, a preliminary study on the quadruped and hexapod leaping robot for lunar landing and movement is carried out. The legged leaping robot adopts a parallel active leg mechanism, which has the adaptability to actively buffer landing and walking on a variety of complex terrain. A novel high-power-density driving unit based on force controlling is designed and adopted. Through structural optimization design, the robot achieves lightweight. Aiming at the control problem of landing and walking, the design idea and control method of the active and passive hybrid buffer is proposed, which realizes the buffering and body stability in the landing. The legged leaping robot has multiple functions such

\* 收稿日期: 2020-06-30; 修回日期: 2020-07-21

基金项目: 自然科学基金-深圳联合基金项目(U1613208): 野外山林作业的移动机器人

作者简介: 高峰(1956—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为并联与步行机器人的设计与控制。

E-mail: fengg@sjtu.edu.cn

as repetitive landing, autonomous movement, retraction, deployment, adjustment of landing attitude, and adaptation of complex terrain.

**Keywords:** space exploration; lander; rover; repetitive landing; landing and rover robot

## 0 引言

外星探测器依赖于探测装备完成探测任务。国际上, 外星探测器常由着陆器和巡视器组成<sup>[1-2]</sup>。着陆器不能行走, 仅能携带巡视器在外星表面安全着陆; 巡视器只能用于在外星表面行走探测<sup>[3]</sup>。外星探测器的质量直接影响着探测成本, 其每千克的运载费用需数十万美元。如果能够把着陆器和巡视器融为一体, 设计出可在月面反复着陆和行走的飞跃器, 则可显著减小外星探测器的质量, 大幅减少外星探测的成本。发明和开发将着陆器和巡视器融为一体的、可在月面反复着陆和行走的飞跃器, 对月球和外星探测均具有明显的经济价值。由于人类还没有实现腿式机器人探测月球, 腿式月球探测飞跃器的开发可体现我国航天领域自主创新能力。

腿式月球探测飞跃器的开发依赖于设计技术。设计有两种方法: 一是已知装备构型, 分析机构的功能和性能, 然后完成结构和控制系统设计, 这是引进消化产品实现逆向设计的主要手段; 二是从无到有的创新方法, 即已知功能和性能要求, 综合出机构构型, 再完成结构和控制系统的设计, 是自主创新设计产品的正向设计方法, 如图 1 所示。

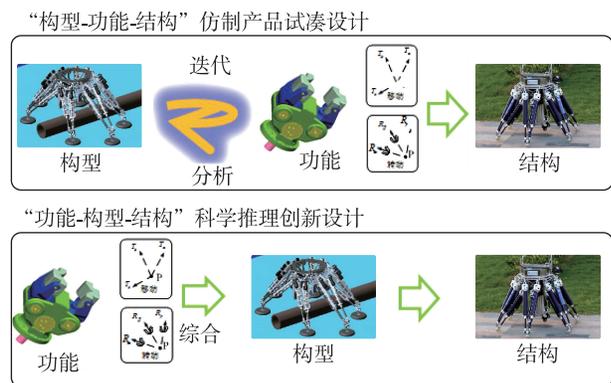


图 1 产品性能设计

Fig. 1 The design of product performance

设计是体现人类智慧和创造力的高级活动。设计的核心价值是发明出新产品。创新需要自信, 正如明末清初著名画家石涛所言“古人之须眉, 勿能生我之容貌”。自信是创新的重要基础。

设计既是科学, 又是艺术。科学是“发现”客观世界的规律, 机械工程就是在牛顿定律的基础上发展而来, 艺术是研究人脑主观世界对大自然的感性反映, 通过模仿表达情感。大自然创造每一条生命, 不仅给他“肢体”, 同时还给他“灵魂”。人类设计的机器人如果没有“灵魂”, 那只是一位好的设计师; 如果机器人具有“灵魂”(智能化), 那将富有极大的创造力, 是机械设计永远追寻的方向。科学是认知自然方法, 而技术是变革世界的工具。在当今的工程时代, 改造世界的工具是设计技术, 设计要体现“文化、品味和个性”三个要素。

大自然设计了两足、四足、六足、八足和蛇等。自然界给了万物肢体, 更创造了灵魂。机器人的智能来自肢体与“灵魂”的结合。大自然创造地球的同时, 还创造了一个月亮, 月球是大自然留给人类通往宇宙的一扇门, 如图 2 所示。

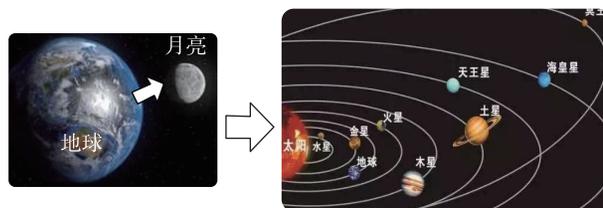


图 2 月球是人类探索太空的唯一桥梁

Fig. 2 The Moon is the only bridge for man to explore space

目前, 月球探测器由着陆器和巡视器组成, 如图 3 和图 4 所示。功能单一的着陆器搭载巡视器的发射方式代价高昂。目前, 着陆器均是采用被动缓冲设计, 吸能结构只能实现一次性使用。美国和苏联在 70 年代就开始研究轮式巡视器<sup>[4-6]</sup>。我国探月着陆器和月球车已经两次成功到达月球, 并于 2019 年 1 月 3 日首次到达月球背面, 实现了人类首次在该区域内的科学探测。我国玉兔号月球车的研制水平, 已进入国际先进行列<sup>[7-8]</sup>。虽然国内外已有许多月球和外星探测的着陆器<sup>[9-13]</sup>和巡视器<sup>[14-16]</sup>的研究成果, 但是还没有针对既能着陆又能行走的着陆和巡视一体化的探测器的研究。如果外星探测器既能着陆又能行走, 其便可利用自身携带的发动机, 在月面反复着陆和行走探测, 实现一次发射, 多次着陆和行走探测。这将明显

提高外星探测效率, 大幅降低探测成本。



图 3 外星探索着陆器

Fig. 3 The landers for space exploration



图 4 外星探测巡视器

Fig. 4 The rovers for space exploration

### 1 探月足式飞跃机器人机构设计

月球探测器实现多次着陆和行走探测飞跃机器人的设计挑战, 是如何在月面着陆动能大、缓冲时间短、装机质量限制严苛等条件下, 使反复着陆-行走月球飞跃器能在非结构化月面环境实现高频响主动缓冲着陆。完整的月面低空飞跃探测器包括飞船和着陆器系统两个部分。其中, 飞船搭载了主推进器、空中姿态调整模块、通信模块及各种探测仪器。另一方面, 着陆器系统为具有主动缓冲功能的着陆腿。该腿具有三个自由度, 分别通过三个伺服驱动电机进行控制, 可以自主伸长、缩短或折叠。

着陆-行走月球飞跃器机构的驱动希望将电机都安装在着陆腿髋关节上, 将“驱动器、电机、编码器和扭矩传感器”复合, 设计出“力-控”一体化伺服驱动单元。如图 5 所示, 通过匹配该伺服驱动的精度与动力学参数, 包括低惯量高精度大扭矩常数无框电机、高精度扭矩传感器、高功率密度集成驱动器等设计, 突破高能量密度、高刚度一体化伺服驱动设计技术, 使驱动单元体积小、质量小、驱动功率与自重比大, 通过内置驱动器使得力矩输出波动小、响应快、运动控制平稳, 开发出微型一体化驱动器。微型一体化驱动器实现了轻量化设计, 其自重为 1.3kg, 可提供持续 150Nm 和瞬时 200Nm 的输出力矩驱动能力。

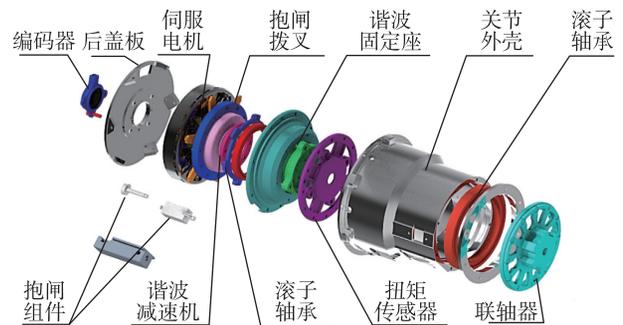


图 5 探月足式飞跃机器人复合驱动单元

Fig. 5 The compound driving unit of legged leaping robot for lunar exploration

新型腿式探测器通过主动控制实现着陆缓冲, 需要同时考虑运动和动力学特性, 以设计飞跃机器人腿的机构。如图 6 所示, 飞跃机器人的单腿机构采用了并联机构设计腿的主运动传动, 采用 3

只“力-控”一体化伺服驱动单元，实现轻量化、高能量密度及高频响特性，通过力矩传感器实现扭矩阻抗控制和高速主动缓冲。图 7 所示为设计和开发的探月四足和六足飞跃机器人着陆-行走机构系统。如图 8 所示，月球着陆缓冲飞跃器腿机构的系统开发需要实现主动控制着陆缓冲，必须通过动力学仿真和地面实验相结合的方式验证控制算法和着陆缓冲效果。

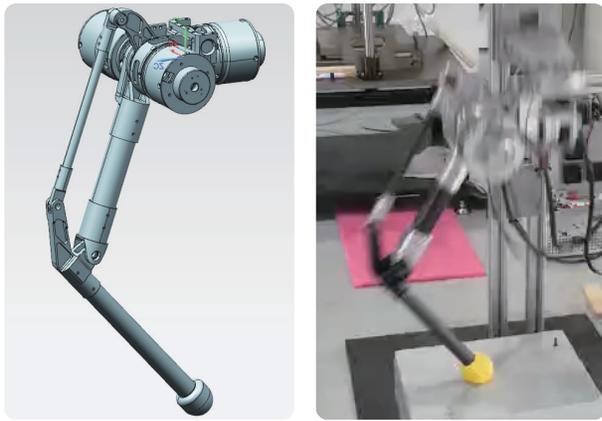


图 6 探月飞跃机器人腿的机构设计

Fig. 6 The leg mechanical design of legged leaping robot for lunar exploration



图 7 探月四足和六足飞跃机器人机构设计

Fig. 7 The mechanical design of quadruped and hexapod leaping robot for lunar exploration

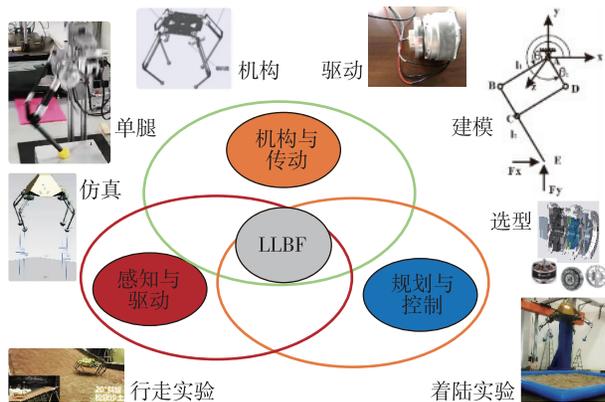


图 8 LLBF: 月球着陆缓冲飞跃器腿机构系统开发

Fig. 8 LLBF: The system development of leg mechanism of legged leaping robot

## 2 探月足式飞跃机器人动态控制仿真

着陆和行走探测飞跃机器人是新型腿式探测器，通过主动控制实现着陆缓冲，需要用动力学仿真和地面实验相结合的方式验证主动控制算法和着陆缓冲效果。在探测飞跃机器人的设计完成后，还需进行动力学仿真。动力学仿真是在样机制造之前，根据着陆器设计指标中的输入测试条件，对着陆器系统方案和控制算法进行仿真验证和优化，评估着陆器系统的性能是否满足要求。动力学仿真要建立仿真环境和确定着陆行走工况的顺序。动力学仿真可用于研究探测飞跃机器人设计的优劣，评估机器人系统的性能是否满足要求。在这里，将控制算法与动力学计算协同进行仿真。图 9 和图 10 所示分别为六足和四足探测飞跃机器人的着陆仿真。

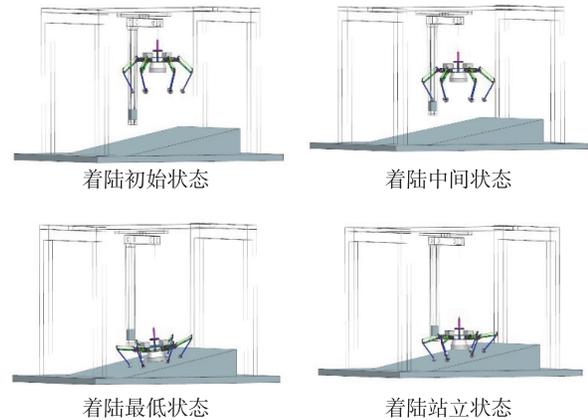


图 9 六足飞跃器着陆仿真

Fig. 9 The landing simulation of hexapod leaping robot

着陆工况是根据设计指标要求，设置不同的着陆仿真初始条件，包括负载、竖直下落速度、水平初始速度、水平速度与机身夹角方向、机身翻转角速度初值、翻转角速度与机身夹角等，对探测飞跃机器人着陆动作进行动力学仿真，来验证着陆性能和功能。表 1 列出了用于仿真的两种典型着陆初始条件，分别为垂直着陆和平抛着陆。工况 1 模拟机器人在着陆场上空调整姿态后，负载 120kg，在 2.1 (m/s) 的垂直下落初速度条件下，开始垂直下落着陆。仿真结果如图 10 所示。由图 10 可以看到，着陆器从高处下降触地后，四

条腿主动收缩, 以吸收着陆冲击能量。同时, 身体姿态稳定功能开始工作, 使着陆器身体保持水平, 不发生倾覆。关节扭矩仿真结果显示, 最大

关节扭矩为 108Nm, 与谐波减速器峰值扭矩 200Nm 相比, 安全扭矩裕量为 46.0%。整个着陆稳定过程的持续时间约为 1s, 总体满足设计要求。

表 1 着陆初始条件

Tab. 1 Initial landing conditions

工况序号	负载/kg	垂直下落速度/ (m/s)	水平速度幅值/ (m/s)	水平速度方向/ (°)	翻转角速度值/ [ (°) /s]	翻转角速度方向/ (°)
1: 垂直着陆	120	2.1	0	0	0	0
2: 平抛着陆	120	2.1	0.3	45	3	45

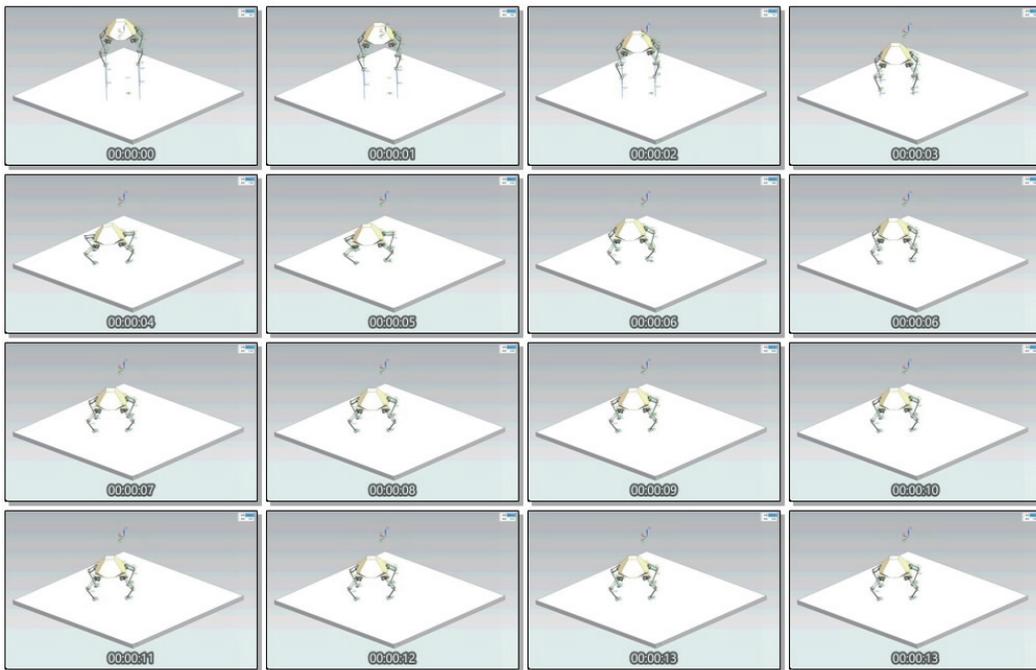


图 10 着陆缓冲过程仿真

Fig. 10 The simulation of buffering process in landing

### 3 探月足式飞跃机器人着陆控制地面实验

着陆和行走探测飞跃机器人地面实验是验证主动控制算法和着陆缓冲效果的必要手段。飞跃机器人腿的各个驱动关节都具有力矩传感器, 可用于实时辨识各腿足端月面接合力, 这是飞跃机器人实现主动柔顺着陆的前提。图 11 所示为飞跃机器人地面实验系统。利用该地面实验系统进行四足和六足飞跃机器人着陆实验, 如图 12 所示。实验条件为探测器在 2 米高度, 水平初速度为 0(m/s)和0.6(m/s)。在斜面、台阶等不同地形条件

下分别进行动力学实验, 记录关节力矩、机器人的身体位置, 考核系统的动力学参数和性能。

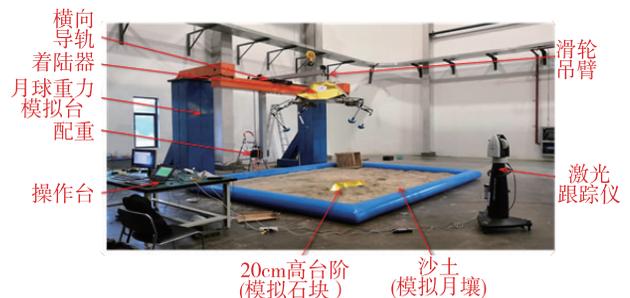


图 11 飞跃机器人地面实验系统

Fig. 11 The ground experiment system of legged leaping robot



图 12 探月四足和六足飞跃机器人着陆实验  
Fig. 12 The landing experiment of quadruped and hexapod leaping robot

在样机实验时,通过配重实现月球 $G/6$ 的重

力环境地面模拟,四足、六足着陆器位置、速度和加速度可以通过激光跟踪仪实现实时记录。电机的力矩可以检测地面的接触刚度。主动柔顺控制算法的实际缓冲效果可以通过实验进行验证。在四足着陆实验中,降落速度为  $2.1 \text{ (m/s)}$ ,系统总重为  $200\text{kg}$ 。腿式机器人如果能够登上月球,将是中国在航天领域的重大突破。图 13 所示为探月四足飞跃机器人的着陆实验,实验条件为负载  $180\text{kg}$ 、下落速度为  $2.1 \text{ (m/s)}$ ,水平速度为  $0 \text{ (m/s)}$ ,翻转角速度为  $1 \text{ (}^\circ/\text{s)}$ 。

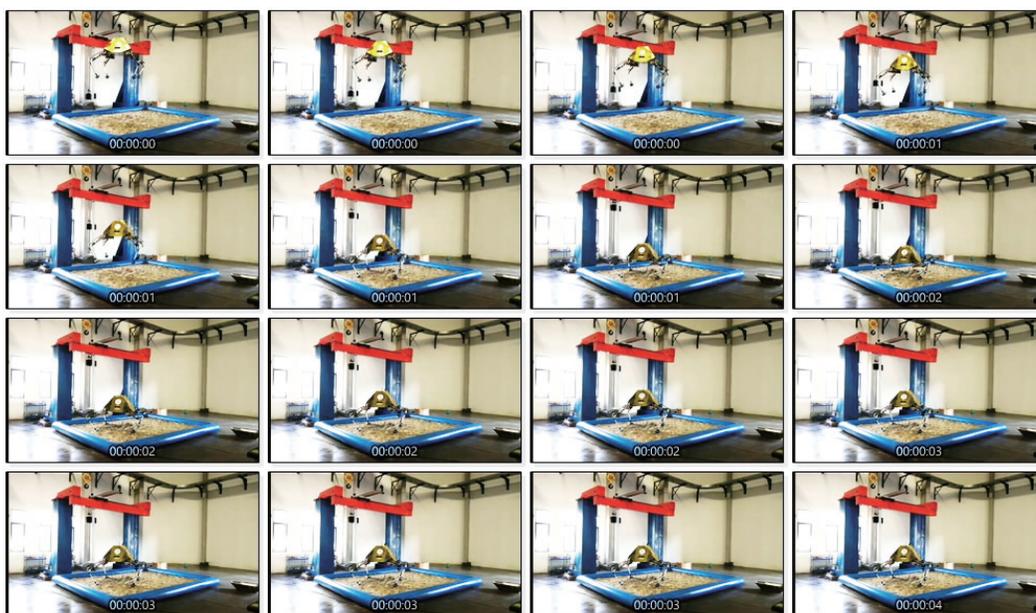


图 13 探月四足飞跃机器人着陆实验

Fig. 13 The landing experiment of quadruped leaping robot for lunar exploration

六足飞跃探测器与四足飞跃探测器相比,既具有更高的着陆可靠性和行走的快速性,又具备明显的安全稳定性和容错性。六足探测器可实现腿折叠和展开,这有利于在发射时减少占用空间,可实现五足、四足和三足容错着陆,安全性和容错性好。六足机器人在月球基地地面实验中心进行行走实验,完成细沙地形下基于视觉自主避障和  $20^\circ$  沙坡的上下行走。

## 4 结 论

本研究依托航天五院总体部与上海交通大学合作项目“反复着陆器设计”,针对月面低空飞跃探测器系统展开了针对四足和六足飞跃探测器的初步研究;采用并联式主运动腿式机构,使其具

有在多种复杂地形上主动缓冲着陆和行走的适应能力;针对着陆器的驱动系统,设计了一种新型高功率密度力控驱动单元;针对腿部结构件,进行了结构优化设计,实现了轻量化;针对着陆和行走过程的控制问题,提出了基于主被动复合缓冲原理的设计思路和控制方法,实现了飞跃器着陆过程的缓冲、身体稳定及在着陆后的稳定行走,具有多次缓冲、自主移动、可收拢展开、着陆姿态调整、复杂地形适应等多种功能。

腿式探测器距离走向月球还有很多问题需要探索,如月面跳跃、容错着陆行走算法、鲁棒及自主导航控制等。美国、俄罗斯已提出重返月球计划,并将在月球上建立月球站,新型探测器的设计开发将体现我国在空间技术前沿领域的自主

创新能力和国际竞争力。

### 参考文献 (References)

- [1] HUNTRESS W, STETSON D, FARQUHAR R, et al. The next steps in exploring deep space—a cosmic study by the IAA [J]. *Acta Astronautica*, 2006, 58 (6-7): 304-377.
- [2] LIN R F, GUO W Z, LI M, et al. Novel design of a legged mobile lander for extraterrestrial planet exploration [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2017, 14 (6): 1729881417746120.
- [3] LIN R F, GUO W Z, CHEN X B, et al. Type synthesis of legged mobile landers with one passive limb using the singularity property [J]. *Robotica*, 2018, 36 (12): 1836-1856.
- [4] TEAM R. Characterization of the Martian surface deposits by the Mars Pathfinder rover, Sojourner [J]. *Science*, 1997, 278 (5344): 1765-1768.
- [5] HEVERLY M, MATTHEWS J, LIN J, et al. Traverse performance characterization for the Mars Science Laboratory rover [J]. *Journal of Field Robotics*, 2013, 30 (6): 835-846.
- [6] WELCH R, LIMONADI D, MANNING R. Systems engineering the curiosity rover: A retrospective [C] //2013 8th International Conference on System of Systems Engineering. IEEE, 2013: 70-75.
- [7] 吴伟仁, 于登云. “嫦娥3号”月球软着陆工程中的关键技术 [J]. *深空探测学报*, 2014, 1 (2): 105-109.  
WU W R, YU D Y. Key technologies in the Chang' E-3 soft-landing project [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1 (2): 105-109 (in Chinese).
- [8] 彭兢, 柳忠尧, 张焯. 月球着陆器方案概念设想 (英文) [J]. *航天器工程*, 2008, (1): 6.  
PENG J, LIU Z Y, ZHANG H. Conceptual design of a lunar lander [J]. *Spacecraft Engineering* 2008, (1): 6 (in Chinese).
- [9] RINGROSE T J, TOWNER M C, ZARNECKI J C. Convective vortices on Mars: a reanalysis of Viking Lander 2 meteorological data, sols 1~60 [J]. *Icarus*, 2003, 163 (1): 78-87.
- [10] ARVIDSON R E, BONITZ R G, ROBINSON M L, et al. Results from the Mars Phoenix lander robotic arm experiment [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 114 (E1).
- [11] DESAI P N, PRINCE J L, QUEEN E M, et al. Entry, descent, and landing performance of the Mars Phoenix lander [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2011, 48 (5): 798-808.
- [12] PARKINSON R C. The use of system models in the Euro-Moon spacecraft design [J]. *Acta Astronautica*, 1999, 44 (7-12): 437-443.
- [13] OKADA T, SASAKI S, SUGIHARA T, et al. Lander and rover exploration on the lunar surface: A study for SELENE-B mission [J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37 (1): 88-92.
- [14] BARES J E, WHITTAKER W L. Configuration of autonomous walkers for extreme terrain [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1993, 12 (6): 535-559.
- [15] ARM P, ZENKL R, BARTON P, et al. Spacebok: A dynamic legged robot for space exploration [C] //2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019: 6288-6294.
- [16] WILCOX B H, LITWIN T, BIESIADECKI J, et al. Athlete: a cargo handling and manipulation robot for the moon [J]. *Journal of Field Robotics*, 2007, 24 (5): 421-434.



高峰,男,博士,上海交通大学讲席教授、博士生导师。国家973计划首席科学家,国家杰出青年基金获得者。主要研究方向为“并联与步行机器人的设计与控制”,在机器人的设计理论、新型机器人机构的发明、新型并联装备的样机/产品研制与开发等方面取得了有意义的成果,被全国机构学专业委员会评为2006年度唯一的中国机构创新奖获得者。担任美国ASME Mechanism & Robotics Committee委员、国际著名杂志Mechanism and Machine Theory、ASME Journal of Mechanical Design等的Associated Editor。曾出版学术专著3部,发表学术论文230多篇,其中SCI收录70多篇,获国家发明专利110多项。获省部级自然科学、科技发明和科技进步一、二等奖7项。曾获国家自然科学基金二等奖、美国机械工程师学会ASME达芬奇设计与发明奖、何梁何利科学与技术进步奖。