

文章编号: 1001- 2486(2009) 01- 0109- 05

# 六轮月球车移动机构分析与综合\*

罗自荣, 尚建忠, 张志雄

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 针对六轮月球车, 对国内外空间探测机器人的移动机构的构型进行分析和综合, 通过构型创新、构型组合等手段提出了 125 种新型六轮移动机构。进一步利用虚拟样机软件 ADAMS12.0 和控制仿真软件 Matlab6.5 平台, 从方案创新、方案组装、方案优化三个层次对月球车机械系统和控制系统进行综合评价与优化, 得到优化方案及其优化参数。选择了一种方案进行了分析和参数优化, 并试制了物理样机, 取得较好效果。

**关键词:** 月球车; 移动性; 机构综合; 优化设计

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** A

## Analysis and Composition of Lunar Rover Locomotion Mechanism

LUO Zi-rong, SHANG Jian-zhong, ZHANG Zhi-xiong

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Under the background of creative research of six wheeled lunar exploration robot, and based on the analyses of the locomotion mechanisms of foreign space exploring robots, one hundred and twenty five kinds of creative schemes are proposed by mechanism creation and composition. ADAMS12.0 and Matlab6.5 are used to evaluate and optimize the mechanical and control system of lunar exploration rover at the levels of scheme creation, scheme composition and scheme optimum. Several optimized schemes and their parameters are obtained. Finally, an optimized scheme is chosen to produce a physical lunar rover with good performance.

**Key words:** lunar rover; mobility; mechanism synthesis; optimum design

轮式机器人移动机构具有高速高效的性能, 在相对平坦的地形中具有相当的优势, 同时可以通过选择合适的悬架系统来适应凹凸不平的地形, 目前已经成功地用于行星探测, 如 1997 年的“索杰纳”, 2003 年的“勇气号”和“机遇号”。

空间探测轮式机器人按车轮的数量可以分为四轮、五轮、六轮和多轮等类型。四轮机器人具有代表性的是美国卡内基梅隆大学开发的 Nomad 机器人<sup>[1]</sup>, 五轮机器人具有代表性的是由日本航宇中心 (ISAS) 和梅基大学等研制开发的 Micro5, 六轮机器人具有代表性的是美国喷气推进实验室设计的 MFEX (Microrover Flight Experiment) 小型漫游车<sup>[2]</sup> (Rocky 系列是从 MFEX 演化而来的新型火星漫游车)、FIDO 和前苏联 MARSOKHOD 火星探测车<sup>[3]</sup> 等, 多轮机器人具有代表性的是前苏联的 LUNOKHOD 八轮月球探测车<sup>[4]</sup>。国内哈尔滨工业大学<sup>[5]</sup>、上海交通大学<sup>[6]</sup> 和国防科技大学<sup>[7-8]</sup> 等十几家单位参与了月球车的研究工作, 提出了一些具有创新性的月球车移动机构, 但总体上处于初步研究阶段。本文以六轮月球车为研究对象, 通过对国内外轮式空间探测机器人的移动机构进行分析和综合, 采用构型创新、构型组合等手段提出多种新型移动机构。

### 1 六轮月球车移动机构分析

综合国内外研究, 轮式月球车移动机构实际上可视为由轮系、悬架、车体通过运动学、动力学约束联

\* 收稿日期: 2008- 08- 30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (602346030)

作者简介: 罗自荣 (1974-), 男, 讲师, 博士生。

系起来的多体系统。采用模块化设计思想,将月球车划分为轮系、悬架和车体三大模块。

### 1.1 轮系

轮系的主要构型有普通轮系( $w_1$ )、外行星轮系( $w_2$ )、履带轮系( $w_3$ )和内行星轮系( $w_4$ ),如图1所示。美国“火星车”(Rocky系列机器人)采用的轮系即为普通轮系,哈尔滨工业大学研制的一款月球车采用了外行星轮系,履带轮系和内行星轮系为本文研究中提出的两种新型轮系。

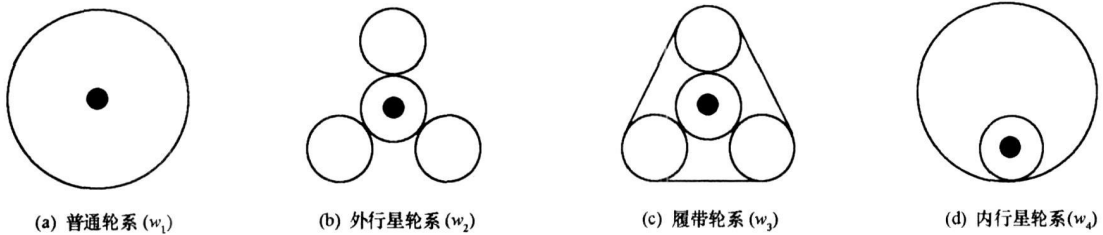


图1 轮系的主要构型

Fig. 1 Wheel mechanism

普通轮系通常采用包容结构,对直线牵引、转向驱动、检测等功能模块进行一体化设计与制造,减少质量和增强可靠性。与普通轮系相比,外行星轮系的优点是越障能力强,且有一定的地面自适应能力,但转向只能通过差速实现,不如普通轮系灵活。

履带轮系结合了履带轮和外行星轮的优点,能较好地适应沙地环境,其越障原理与外行星轮类似,如图2所示,当履带轮遇到障碍时,履带转速减缓,行星轮驱动整个履带轮绕轮轴中心翻转,从而克服障碍,其转向也通过差速实现,由于采用了履带,转向比外行星轮系灵活。

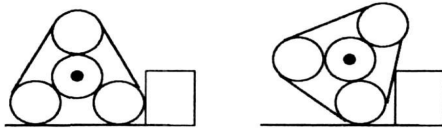


图2 履带轮系越障原理

Fig. 2 Over-obstacle principle of track wheel

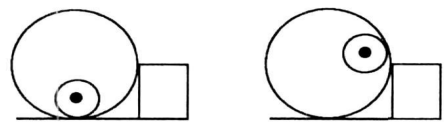


图3 内行星轮系越障原理

Fig. 3 Over-obstacle principle of inner planetary wheel

内行星轮系的越障原理如图3所示,当大轮受阻后,小轮沿大轮内壁攀升,当轮轴中心高于障碍,大轮便可越过障碍。与普通轮系相比,这种轮系的最大特点是具有很强的越障能力,转向也很灵活,但其转向和直线牵引的控制特性不如普通轮系。

### 1.2 悬架

悬架系统可分主动悬架系统与自适应悬架系统二类,目前研究主要以自适应悬架为主。

图4(a)所示为美国Rocky系列探测器机器人采用的六轮摇臂悬架( $s_1$ ),由主摇臂和副摇臂组成,当在不平路面上行驶时,通过主摇臂和副摇臂的摆动,达到地面自适应、增强越障能力和行驶平顺性的目的。

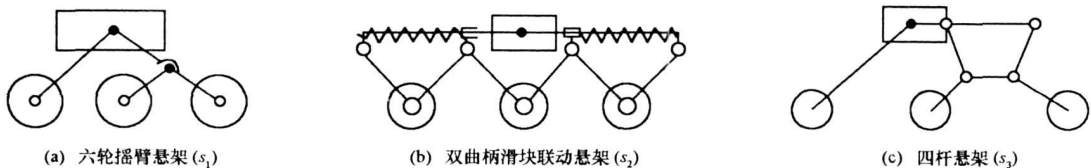


图4 悬架的主要构型

Fig. 4 Suspension mechanism

图4(b)和图4(c)为本文提出的两种新型悬架系统。双曲柄滑块联动悬架( $s_2$ )的越障原理和地面自适应原理如图5所示,图中按从左至右的顺序依次为前轮、中轮和后轮,该悬架的特点是通过曲柄滑块机构将轮胎竖直方向的位移转化为滑块水平方向的位移,因而具有较好的平顺性。四杆悬架( $s_3$ )通

过采用平面四杆机构将主摇臂和副摇臂的瞬时转动中心  $O$  下移至地面以下,从而增强越障能力,其越障原理如图 6 所示,图中按从左至右的顺序依次为前轮、中轮和后轮。

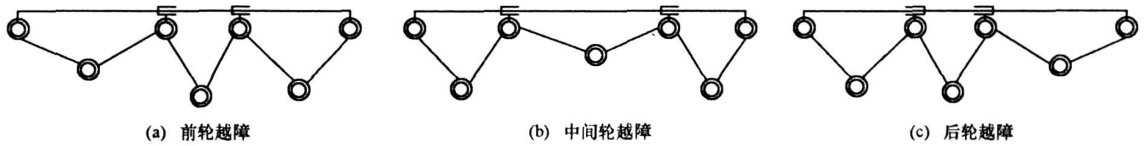


图 5 双曲柄滑块联动悬架越障原理

Fig. 5 Over-obstacle principle of two-crank-slider mechanism suspension

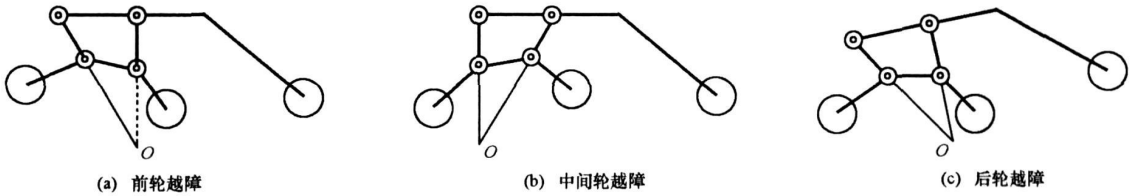


图 6 四杆悬架越障原理

Fig. 6 Over-obstacle principle of four link suspension

### 1.3 车体

六轮月球车一般采用整体式车体,主要构型如图 7 所示,包括刚性车体 ( $b_1$ )、弹性车体 ( $b_2$ ) 和差速车体 ( $b_3$ ) 3 种构型。刚性车体与车架固联后,左右车架不能相对车体运动,自由度为 0。弹性车体采用扭杆弹簧,扭簧中间部位与车体固联,两端可相对车体转动,且具有减振作用。差速车体采用差速轮系与左右车架固联,工作时,左右车架作为输入,由于差速轮系的作用,车体的俯仰为左右车架俯仰的一半,起到良好的均化作用。

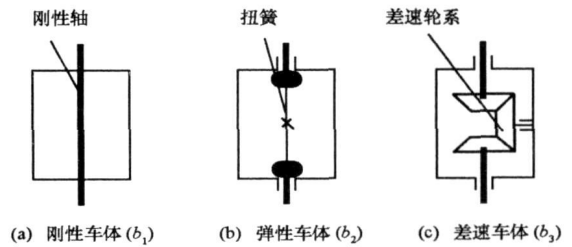


图 7 车体的主要构型

Fig. 7 Vehicle mechanism

## 2 六轮月球车移动机构综合

六轮月球车移动机构综合可通过轮系、悬挂和车体等构型的组合实现。假设轮系、悬挂和车体各构型之间的连接方式均为固联,则六轮月球车移动机构  $R_i$  的构型组合可记为

$$R_i = (W_i, B_i, S_i) \quad W_i \subset W; B_i \subset B; S_i \subset S$$

式中,  $W$  为轮系的集合  $\{w_1, w_2, w_3, w_4\}$ , 构型数量  $L = 4$ ;  $B$  为车体的集合  $\{b_1, b_2, b_3\}$ , 构型数量  $M = 3$ ;  $S$  为悬挂的集合  $\{s_1, s_2, s_3\}$ , 构型数量  $N = 3$ 。

构型组合时,轮系、悬架和车体一般选择集合中的一种构型,理论上可得到同构组合方案的数量:

$$Num1 = L \times M \times N = 4 \times 3 \times 3 = 36$$

在 36 种移动机构同构组合设计方案中,目前已存在方案 1 种,其余 35 种为创新方案。图 8 所示为同构组合设计的 3 种方案。



图8 同构组合设计移动机构

Fig. 8 Isomorphic composition design of locomotion mechanism

另外,在构型组合时,为了满足一定的移动性能指标,有时轮系选取多于一种构型,但通常采用对称配置,这样还可得到异构组合方案的数量:

$$Num_2 = (C_L^2 + C_L^3) \times M \times N = (C_4^2 + C_4^3) \times 3 \times 3 = 90$$

式中,  $C$  为组合运算符。

目前采用这种异构组合设计的移动机构还没有,因此,90种组合方案均为创新方案。图9所示为异构组合设计的3种方案。



图9 异构组合设计移动机构

Fig. 9 Isomeric composition design of locomotion mechanism

综合上述分析,通过构型创新和构型组合,可得到六轮月球车创新设计方案125种。

### 3 实例及其物理样机

通过构型创新和构型组合,得到六轮月球车多种创新方案,进一步利用虚拟样机软件ADAMS12.0和控制仿真软件Matlab6.5进行综合评价与优化,得到相对较优的设计方案。综合评价与优化的核心是移动性能评价,包括几何通过性、抗翻稳定性、行驶平顺性、能耗特性、越障性能等指标的评价优化,重点为两个方面,其一是机电系统的优化,目标是获取最佳的性能参数;其二是控制算法的优化,获取月球车最佳控制特性。通过二种优化得到月球车优化参数和性能指标,作为方案选择的依据。这样,通过方案创新、方案组装和方案优化三个层次的评价与优化,可以得到较佳的月球车设计方案与设计参数。

双曲柄滑块联动月球车由车体、左悬架、右悬架和轮系4部分组成,其构型表达式为 $(w_1, b_3, s_2)$ ,实例化后的双曲柄滑块悬架如图10所示。其显著特点是车架共包括两套曲柄滑块机构,连杆通过滑块连接到主摇臂,并可以在主摇臂上滑动,两滑块之间采用弹簧阻尼联接,进一步减振。通过滑块在主摇臂上的滑动,三个车轮之间的相对高度发生变化以适应地形,将车轮的竖直位移转化为滑块的水平位移。

经过移动性能综合分析与评价,得到优化后的整车模型及参数,如图11所示。此时,当双曲柄滑块月球车通过220mm高的障碍物时,车体质心起伏是65.94mm,车体俯仰角变化范围是 $30.09^\circ$ ,如图12所示,体现了良好的平顺性。

根据评价与优化结果,综合考虑可折叠、结构复杂性、加工工艺和可靠性等因素,研制了物理样机,如图13所示。样车场地试验表明,样车具有良好的行驶平顺性、越障性能和控制特性,并实现了可折叠功能。主要移动性能指标(速度0.1m/s,越障0.20m,爬坡 $30^\circ$ )与虚拟样机分析结果相似,达到了预期效果。

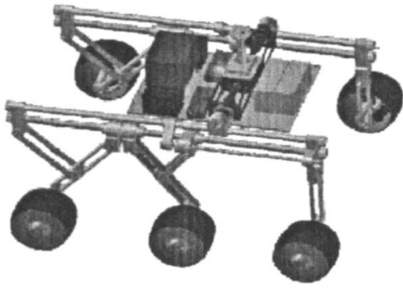


图 10 双曲柄滑块联动月球车

Fig. 10 Two-crank slider suspension based lunar rover

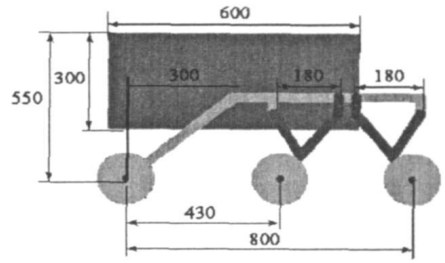
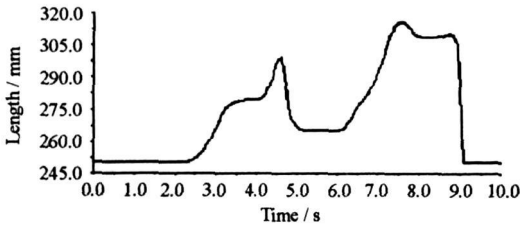
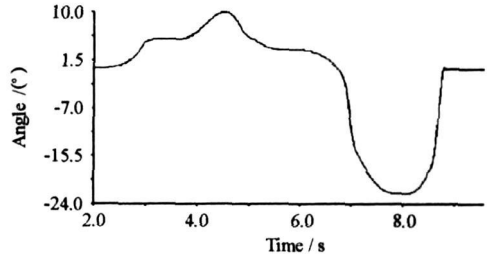


图 11 优化后的整车模型

Fig. 11 Optimized rover model



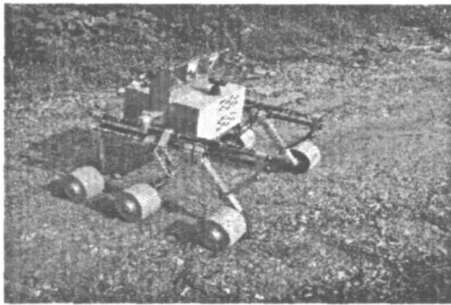
(a) 车体质心起伏变化曲线



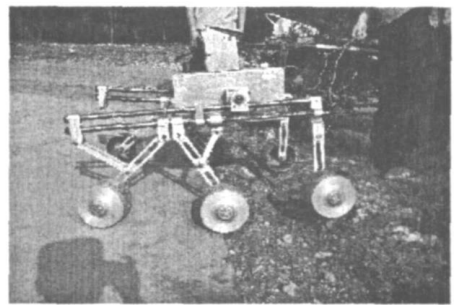
(b) 车体俯仰角变化曲线

图 12 平顺性曲线

Fig. 12 Driving placidity curve of the rover



(a) 物理样机



(b) 场地试验

图 13 物理样机及试验

Fig. 13 Physical prototype and test

## 4 结论

对国内外轮式空间探测机器人的移动机构的构型进行了分析和综合,通过构型创新、构型组合等手段提出 125 种新型移动机构。基于虚拟样机软件 ADAMS12.0 和控制仿真软件 Matlab 6.5 开发了月球车移动性能综合评价与优化软件,从方案创新、方案组装、方案优化三个层次支持月球车机械系统和控制系统的综合评价与优化,对同类移动机器人设计具有参考价值。通过仿真分析,得到多种设计方案及其优化参数,并选择了其中的一种方案,试制了物理样机,取得了预期效果。

## 参考文献:

- [1] Wetgreen K D, Bajna D, Maimone M, et al. Developing Nomad for Robotic Exploration of the Atacama Desert[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1999, 26: 127-148.
- [2] Shirley D L. Mars Pathfinder Microrover Flight Experiment — a Paradigm for Very Low Cost Spacecraft[J]. Acta Astronautica., 1995, 35: 355-365.
- [3] Carrier W D. Soviet Rover Systems[C]//AIAA, Space Programs and Technologies Conference, Huntsville, AL, Mar., 1992, 9: 24-27.
- [4] James Z J, McKissock D B, Woytach J M. Exploration Rover Concepts and Development Challenges[C]//1st Space Exploration Conference: Continuing the Voyage of Discovery, Orlando, FL, USA, 2005.
- [5] 邓宗全,高海波,胡明,等.行星越障轮月球车的设计[J].哈尔滨工业大学学报,2003,35(2):203-213.
- [6] 刘方湖,马培荪,曹志奎.五轮铰接式月球机器人的运动学建模[J].机器人,2001,13(6):481-492.
- [7] 尚建忠,张新访,罗自荣,等.主动自适应悬架机器人概念样机及其配置模型与方法[J].国防科技大学学报,2006,28(2):93-96,101.
- [8] 尚建忠,罗自荣,张新访.两种轮式月球车悬架方案及其虚拟样机仿真[J].中国机械工程,2006,17(1):49-52.