0254-6124/2008/28(4)-335-05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Li Jianqiao, Zou Meng, Li Yinwu, Jia Yang, Peng Jianbo. Study on the influence of lunar wheel configuration for traction ability. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(4): 335~339

驱动轮结构参数对月球车牵引性能影响研究 *

李建桥[1] 邹 猛[1] 李因武[1] 贾 阳[2] 彭剑波[1]

[1](吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室 吉林 130022)

[2](中国空间技术研究院)

摘 要 研究在月球表面环境下月球车的牵引通过性能，对保证其正常探测工作具有重要意义. 根据牵引性能的评价指标，在模拟月壤-车轮土槽测试系统上对不同结构参数的驱动轮牵引性能进行对比试验. 结果表明，当增大驱动轮宽度和直径时，其挂钩牵引力和效率系数都呈增大趋势；增大驱动轮的轮刺高度，挂钩牵引力增大；当滑转率小于 20% 时，效率系数随着轮刺高度的增大而增大，而当滑转率大于 20% 时，效率系数随着轮刺高度的增大而减小；增大驱动轮轮刺密度时，其挂钩牵引力和效率系数随之先增大后减小.

关键词 牵引性能；月面力学；土槽试验；模拟月壤

中图法分类号 V 461

Study on the Influence of Lunar Wheel Configuration for Traction Ability

LI Jianqiao[1] ZOU Meng[1] LI Yinwu[1] JIA Yang[2] PENG Jianbo[1]

[1](*Key Laboratory for Terrain-Machine Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Jilin* 130022)

[2](*Chinese Academy of Space Technology*)

Abstract It is important to research the relationship on the vehicle-terramechanics in lunar surface circumstances for the lunar rover to work normally. Based on the indices of the traction performance, the comparative indoor test were made in simulated lunar soil for different configuration wheels. The test results show that, the drag bar pull and efficiency coefficient is increasing with the wheel width and diameter. The draw bar pull increased with the rug height, but the efficiency coefficient reduces when the slip radio is bigger than 20%. The draw bar pull and efficiency coefficient will reduce with the rug distribution increases when the rug distribution is more than 20%.

Key words Traction performance, Lunar-terramechanics, Soil bin test, Simulant lunar soil

1 引言

随着嫦娥一号探月卫星的成功发射，我国探月工程第二步“落月”部分的相关研究已经陆续展开. 其中，月面巡视探测器通常被称为月球车，是实现第二步“落月”的重要部分. 月球车是各种探测仪器的载体，其基本功能是具有在未知的复杂路面行走的能力，以满足科学探测考察的需要 [1]~[3]. 月球表面覆盖有一层粉尘状的月壤，其重力为地球的 1/6，这使得月面的可通过性能较差 [4]~[6]. 因此，深

* 教育部科学技术研究重点资助项目 (107035) 和吉林大学 “985 工程” 项目共同资助
2007-11-26 收到原稿，2008-01-03 收到修定稿

万方数据

入研究月面环境下的月球车驱动轮的牵引性能，对于研制高通过性能的月球车，从而保障和提高月球车探测工作的可靠性具有重要意义.

在自制的模拟月壤上通过实验室土槽试验，研究了驱动轮结构参数变化对挂钩牵引力和效率系数的影响规律，以期为月球车车轮的研制提供基础理论和设计参考.

2 驱动轮土槽试验

2.1 模拟月壤

采用吉林省辉南县境内的火山灰为主要原料，加工配制了模拟月壤. 其基本物理力学性质为：含水率 1.9%±0.9%，比重 2.9，内摩擦角 32.75°，凝聚力 1.79 MPa，压缩系数 0.19 MPa^{-1}，平均直径 134.703 μm，中值粒径 97.386 μm，不均匀系数 C_u 为 5.16，曲率系数 C_c 为 0.937. 其性质参数与 JSC-1 模拟月壤接近，并在月壤样本的变化范围之内 [7].

2.2 土槽-被试轮测试系统

作为研究车轮与地面相互作用关系的土槽测试系统是车辆-地面力学实验研究的必备专用设备，国际上许多月面探测车辆研制所需的基础参数和原理性模型试验，都是来自于专用土槽实验 [8]~[10]. 根据月面探测车辆的特点和车轮结构，研制了月壤-车轮土槽测试系统，其结构如图 1 所示.

测试系统采用土槽固定被试轮运动的形式，构建试验台架机械系统；采用变频调速电机，控制被试轮驱动力；采用直流伺服电机和 EDC 控制器，控制牵引阻力；通过传感器、测量仪器和软件系统，能够满足测量挂钩牵引力、沉降量、前进速度、车轮转速、驱动轮扭矩等基础参数；滑转率和效率系数通过计算获得，滑转率 λ 表达式为

$$\lambda = \frac{\omega r - v}{\omega r}. \tag{1}$$

其中，ω 为驱动轮角速度，v 为实际行驶速度，r 为驱动轮半径. 效率系数 T_e 的表达式为 [10]

$$T_e = \frac{F_{DP} v}{M \omega}. \tag{2}$$

其中，F_{DP} 为挂钩牵引力，M 为驱动轮扭矩.

2.3 被试轮

被试轮由铝合金铸造加工而成，结构如图 2 所示. 影响驱动轮通过性能的参数很多，其中轮直径、轮宽、轮刺高、轮刺分布密度是轮子设计的结构参数，也是驱动轮通过性能的主要影响因素. 研究采用改变其中的一个参数，考察该参数变化的影响. 这样，可以看到单独改变一个参数对驱动轮牵引性能的影响. 表 1 为被试轮的结构参数.

2.4 试验与数据获取

驱动轮在月面上的牵引性能，采用挂钩牵引力 F_{DP} 和效率系数 T_e 来进行评价. 其中挂钩牵引力可以采用压力传感器直接测量，而效率系数可以采用式 (2) 计算获得. 试验时，设定驱动轮转速和轮上载荷，滑转率通过控制牵引阻力获得.

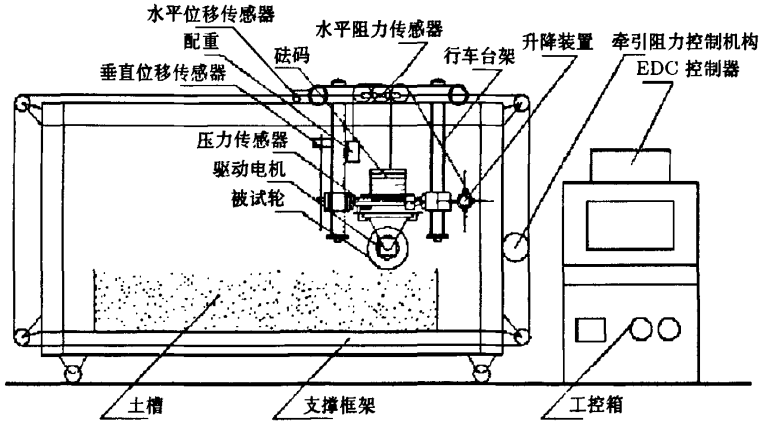


图 1 月壤-车轮土槽测试系统结构

Fig.1 Sketch map for soil bin test system

万方数据

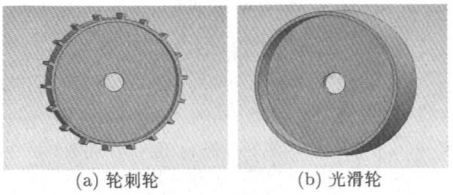

(a) 轮刺轮 (b) 光滑轮

图 2 被试轮

Fig.2 Wheels in test

表 1 被试轮结构参数

Table 1 Parameters of tested wheels

轮号	轮直径	轮宽	轮刺高	轮刺宽	轮刺数
	/mm				
1	250	100	10	5	18
2	250	150	10	5	18
3	250	200	10	5	18
4	200	100	10	5	18
5	300	100	10	5	18
6	250	150	5	5	18
7	250	150	10	10	36
8	250	150	20	5	18
9	250	150	10	10	18
10	250	150	0	0	0

图 3(a) 为 9 号轮挂钩牵引力-位移曲线. 试验时滑转率为 38%, 轮上载荷为 400 N, 转速为 4 r/min. 由图 3(a) 可知, 挂钩牵引力有明显波动, 这是由于轮刺是间隔的, 在滚动中轮下模拟月壤受力也产生周期性变化, 事实上轮轴产生不同程度的起伏, 轮子的挂钩牵引力 F_{DP} 也就有了周期性变化. 图 3(b) 为扭矩-位移曲线. 由图 3(b) 可知, 扭矩也随轮刺滚动进行变化.

3 结果与分析

3.1 轮宽对牵引性能的影响

通过试验得到如图 4(a) 所示的轮 1, 2, 3 的挂钩牵引力-滑转率变化曲线图. 滑转率为横坐标, 挂钩牵引力为纵坐标, 其中的离散点是试验所得到的数据, 实线为趋势线. 试验时, 轮上载荷为 300 N, 驱动轮转速为 4 r/min. 从图 4(a) 中可以看出挂钩牵引力在滑转率较小时, 由 10% 左右提高到 40%, 增长较快. 当滑移率增大到一定值时, 挂钩牵引力变化缓慢, 趋于一个常数稳定下来. 另外由图 4(a)

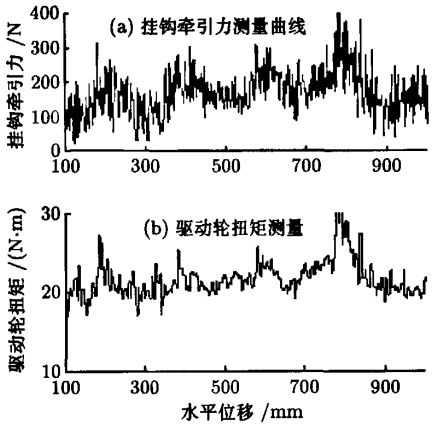


图 3 驱动轮牵引性能试验曲线

Fig.3 Traction performance data in soil bin test

还可知, 当车轮宽度增大时, 挂钩牵引力增大, 轮宽 150 mm 和 200 mm 的驱动轮最大挂钩牵引力比轮宽 100 mm 的分别提高 30% 和 60%.

轮 1, 2, 3 的效率系数-滑转率变化曲线如图 4(b) 所示. 由图 4(b) 可知, 效率系数在滑移率 $\lambda < 30\%$ 时很小, 但增长很快, 到滑移率 $\lambda = 30\%$ 左右时达到最大值, 然后减小, 直至滑转率为 80%. 另外由图 4(b) 还可知, 当车轮宽度增大时, 效率系数增大, 轮宽为 150 mm 和 200 mm 的驱动轮比轮宽为 100 mm 的驱动轮最大效率系数分别提高了 21.3% 和 44.3%. 以上分析表明, 随着驱动轮宽度的增大, 其可通过性能和效率均有提高.

3.2 轮径对牵引性能的影响

图 5(a) 为轮 1, 4, 5 的挂钩牵引力-滑转率变化曲线. 试验时, 轮上载荷为 300 N, 驱动轮转速为 4 r/min, 由图 5(a) 可知, 随着驱动轮直径的增大, 其挂钩牵引力呈增大趋势, 轮径为 250 mm 和 300 mm 的驱动轮最大挂钩牵引力分别比轮径为 200 mm 的驱动轮提高了 42% 和 114%.

图 5(b) 为增加驱动轮直径对效率系数的影响. 由图 5(b) 可知, 随着直径的增加, 效率系数呈现增加趋势, 轮径为 250 mm 和 300 mm 的驱动轮最大效率系数分别比轮径为 200 mm 的驱动轮提高了 47% 和 94%. 以上分析表明, 随着驱动轮直径的增大, 其可通过性和效率均提高.

3.3 轮刺高度对牵引性能的影响

图 6(a) 为增加轮刺高度对驱动轮挂钩牵引力的

万方数据

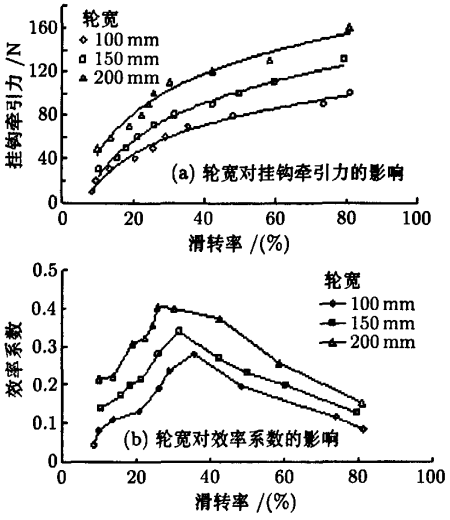


图 4 轮宽对牵引性能的影响

Fig.4 Influence of the wheel width for traction performance

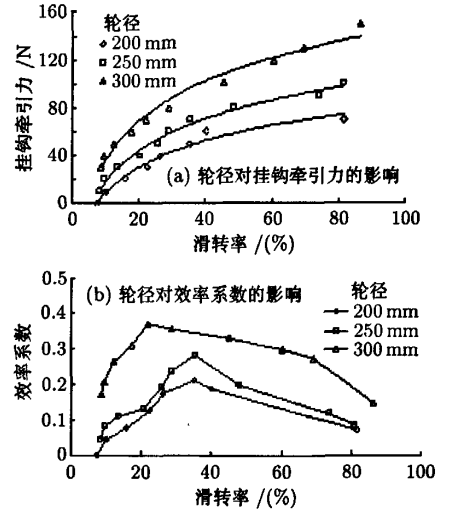


图 5 轮径对牵引性能的影响

Fig.5 Influence of the wheel diameter for traction performance

影响. 试验时, 被试轮采用 2, 6 和 8 号轮, 轮上载荷为 300 N, 转动速度为 4 r/min. 由图 6(a) 可知, 随着轮刺高度的增加, 挂钩牵引力呈增加趋势, 轮刺为 10 mm 和 20 mm 的驱动轮最大挂钩牵引力分别比轮刺为 5 mm 的驱动轮提高 20% 和 70%.

图 6(b) 为增加轮刺高度对效率系数的影响. 由图 6(b) 可知, 在滑转率小于 20% 时, 效率系数随着滑转率的增大而增大, 但当滑转率大于 20% 时, 效率系数随着轮刺高度的增大而减小. 以上分析表明, 随着轮刺高度的增大, 其可通过性增大, 但能量损耗有增加的趋势.

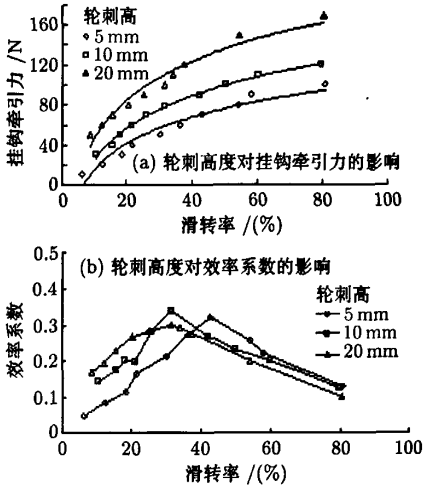


图 6 轮刺高度对牵引性能影响

Fig.6 Influence of the rug height for traction performance

3.4 轮刺分布密度对牵引性能的影响

定义轮刺分布密度为

$$p = \frac{wn}{\pi D} \times 100\%. \tag{3}$$

其中, w 为轮刺宽, n 为轮刺数目, D 为驱动轮直径. 试验时, 被试轮采用 2, 7, 9 和 10 号轮, 轮上载荷为 300 N, 转动速度为 4 r/min.

图 7(a) 为增加轮刺分布密度对驱动轮挂钩牵引力的影响. 由图 7(a) 可知, 随着轮刺分布密度的增加, 挂钩牵引力先增加后降低, 在 10%~20% 之间达到最大.

图 7(b) 为增加轮刺分布密度对效率系数的影响, 由图 7(b) 可知, 效率系数变化与挂钩牵引力变化相似, 即效率系数随着轮刺分布密度的增加先升高然后降低, 特别是轮刺分布密度为零 (光滑轮) 增加到轮刺分布密度为 11.5% 左右时效率系数增加明显, 当滑转率为 40% 时, 挂钩牵引力提高 364%, 效率系数提高 256.7%. 以上分析表明, 随着轮刺分布密度的增加, 其可通过性和效率先增加后降低.

轮刺分布密度超过 20% 左右之后, 在试验条件下, 由于模拟月壤颗粒附着在驱动轮之上, 并随之转动, 轮刺效应减弱, 因此牵引性能随之下降. 图

万方数据

8(a) 为轮刺分布密度为 45.8% 时模拟月壤的附着情况，图 8(b) 为轮刺分布密度为 11.4% 时模拟月壤的附着情况.

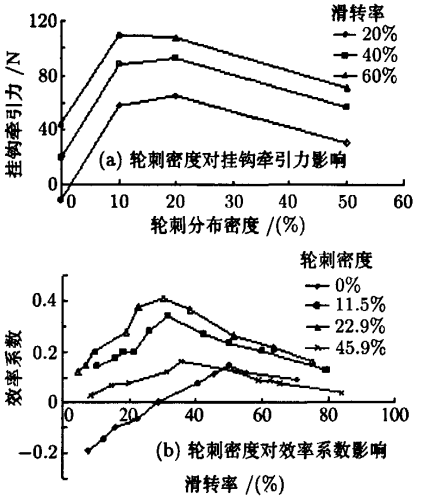


图 7 轮刺分布密度对牵引性能影响

Fig.7 Influence of the rug distribution for traction performance

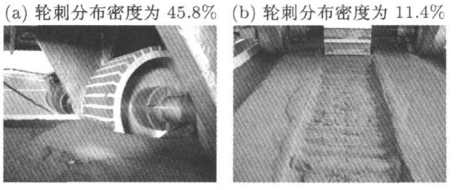


图 8 不同轮刺分布密度下模拟月壤颗粒附着情况

Fig.8 Adhesion of different rug distribution

4 结论

(1) 随滑转率 λ 的增加，驱动轮的挂钩牵引力增大，当滑转率由 10% 左右增长到 40% 左右时，挂钩牵引力增长较快，然后变化缓慢，趋于一个常数稳定下来. 对于效率系数，当滑转率 $\lambda < 30\%$ 时效率系数很小但是增长很快，到滑转率 $\lambda = 30\%$ 左右时效率系数达到最大值，然后减小.

(2) 增大车轮宽度和直径时，驱动轮的挂钩牵引力和效率系数都呈增大趋势.

(3) 增大轮刺高度时，驱动轮的挂钩牵引力增大；在滑转率小于 20% 时，效率系数随着轮刺高度的增大而增大，但当滑转率大于 20% 左右时，效率系数随着轮刺高度的增大而减小.

(4) 增大轮刺分布密度时，挂钩牵引力和效率系数随之先增大后减小，在 10%~20% 之间达到最大.

参考文献

[1] Tao Jianguo, Quan Qiquan, Zheng Zongquan *et al.* Analysis of wheel-soil interaction of rolling wheels with different diameters on a lunar rover. *J. Harbin Eng. Univ.*, 2007, **28**(10):1144~1150. in Chinese (陶建国, 全齐全, 邓宗全等. 月球车不等径车轮在土壤上滚动的力学分析与实验. 哈尔滨工程大学学报, 2007, **28**(10):1144~1150)

[2] Sun Gang, Gao Feng, Li Wen. Terra-mechanics and its application in planetary exploration. *Adv. Mech.*, 2007, **37**(3):453~465. in Chinese (孙刚, 高峰, 李雯. 地面力学及其在行星探测研究中的应用. 力学进展, 2007, **37**(3):453~465)

[3] Zou Meng, Li Jianqiao, Li Yinwu *et al.* Prediction model and experimental study on the interaction of rigid-wheel and lunar soil. *Trans. CSAE*, 2007, **23**(12):119~123. in Chinese (邹猛, 李建桥, 李因武等. 刚性轮-月壤相互作用预测模型及试验研究. 农业工程学报, 2007, **23**(12):119~123)

[4] Shi Xiaobo, Li Yunze, Huang Yong *et al.* Study on the simulation strategy of lunar dust/regolith environment effects. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(1):66~71. in Chinese (石晓波, 李运泽, 黄勇等. 月尘/月壤环境效应地面模拟方法研究. 空间科学学报, 2007, **27**(1):66~71)

[5] Zheng Yongchun, Wang Shijie, Liu Jianzhong *et al.* A review and prospect for developing of lunar soil siumlants. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **25**(1):70~75. in Chinese (郑永春, 王世杰, 刘建忠等. 模拟月壤研制的初步计划. 空间科学学报, 2005, **25**(1):70~75)

[6] Nakashima H, Fujii H, Oida A *et al.* Parametric analysis of lugged wheel performance for a lunar micro rover by means of DEM. *J. Terr.*, 2007, (44):153~162

[7] Li J Q, Zou M, Ren L Q *et al.* Stimulation of lunar regolith for Vehicle-terramechanics research in laboratory. In:Proceedings of the 10th European Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems. Budapest, Hungary, 2006

[8] Zou Meng, Li Jianqiao, Jia Yang *et al.* Research of the traction characteristic of the lunar rover. *J Test Meas. Tech.*, 2007, **21**:14~19. in Chinese (邹猛, 李建桥, 贾阳等. 月面探测车辆牵引通过特性研究. 测试技术学报, 2007, **21**(增刊):14~19)

[9] Li Jie, Zhuang Jide, Wei Dong *et al.* Comparative traction performance tests between bionic camel foot tire and common tire. *J. Jilin Univ.*, 2006, **36**(6):510~514. in Chinese (李杰, 庄继德, 魏东等. 沙漠仿生轮胎与普通轮胎牵引性能的对比试验. 吉林大学学报, 2006, **36**(6):510~514)

[10] Bekker M G. Introduction to Terrain-vehicle Systems. Michgan: University of Michigan Press. 1969

万方数据