

# 月壤力学性质对月球车牵引性能影响的模拟<sup>\*</sup>

李因武 李建桥 邹 猛 任露泉

(吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室, 长春 130025)

**【摘要】** 采用离散元软件 PFC2D, 对月球车驱动轮在不同力学性质月壤上的牵引通过特性进行了数值模拟。研究采用线性接触刚度模型, 通过双轴试验反复调整颗粒细观参数建立月壤离散元模型, 其物理力学性质与真实月壤相似。在相同试验条件下, 模拟试验与土槽试验结果趋势一致; 模拟试验结果表明, 挂钩牵引力随颗粒间摩擦因数增加而增加, 当摩擦因数在 1 左右时增加趋于平缓; 挂钩牵引力随孔隙率增加而线性减少; 挂钩牵引力随粒径分布( $r_{\max}/r_{\min}$ )增加先增加, 当粒径分布大于 5 后减小, 挂钩牵引力随重力加速度增加而增加, 在 1/6 地球重力条件下, 滑转率 20% 时, 驱动轮的挂钩牵引力约为地球重力时的 77.3%。

**关键词:** 月球车 月壤 牵引特性 离散单元法

中图分类号: U461

文献标识码: A

## Simulation of Traction Ability of Lunar Rover with Different Mechanics of Lunar Soil

Li Yinwu Li Jianqiao Zou Meng Ren Luquan

(Key Laboratory for Terrain-Machine Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

### Abstract

Based on the results of the soil-bin test, the lunar soil traction characteristics were studied by DEM software PFC2D. The linear contact-stiffness model was used as DEM contact model for describing lunar soil and biax-test was used to adjust the micro parameters of particles. The results show that parameters of simulated lunar soil in this simulation are close to those of the lunar soil after adjusting the micro parameters. The paper researched the influence of the friction coefficient, porosity,  $r_{\max}/r_{\min}$  and gravity of the lunar soil to the traction ability of lunar rover. The results of the simulation test show that the draw bar pull (DP) increased with the increase of friction coefficient, the DP reduced with the increase of porosity, and the DP increased with the increase of  $r_{\max}/r_{\min}$  when the value of  $r_{\max}/r_{\min}$  is less than 5. The DP is increased with the increase of gravity and the DP is 77.3% of the primary value when the driving wheel passes the lunar soil with 1/6 of the gravity.

**Key words** Lunar rover, Lunar soil, Traction performance, Discrete element method

### 引言

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<sup>[1~2]</sup>。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。因此,研究在月面环境下月球车的牵引性能,对于研制高通过性能的月球车具有重要意义<sup>[3~6]</sup>。由于月面的重力为地球的 1/6、月壤含水率为零等原因,难以在土槽中对月壤进行微重力条件下的力学试验<sup>[1,7]</sup>,因此采用离散元软件 PFC2D 建立模拟月壤-车轮土槽系统。在与实验室土槽试

收稿日期: 2008-03-04 修回日期: 2008-05-05

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(50875107)、教育部科学技术研究重点资助项目(107035)和吉林大学“985 工程”资助项目

作者简介: 李因武,副教授,主要从事地面机器系统数值模拟与计算机仿真研究, E-mail: lyw@jlu.edu.cn

验对比的基础上,对微重力条件下就月壤颗粒间摩擦因数、孔隙率、粒径分布和重力加速度对月球车驱动轮牵引性能的影响进行模拟试验。

## 1 月壤离散元接触力学模型

### 1.1 线性接触刚度模型

月壤是指月球表面覆盖的土壤,其颗粒细小,根据其物理学性质,研究选用线性接触刚度模型来建立月壤离散元接触力学模型。任意两月壤颗粒接触力学模型如图 1 所示。图中,  $F_n^c$  为法向接触力,  $F_s^c$  为切向接触力,  $F^c$  为接触合力,变形发生在接触点处。使用力位移接触定律可以计算两颗粒相互作用的法向接触力为

$$F_n^c = k_n U_n N \quad (1)$$

式中  $k_n$ ——法向接触刚度

$U_n$ ——法向接触位移

$N$ ——单位法向量

切向接触力以增量的形式计算。当接触形成时,总的切向接触力初始化为零,然后每一个相对切向位移增量都会产生弹性切向接触力增量,新的切向接触力等于当前时步开始时存在的切向接触力与切向弹性接触力增量之和,即

$$F_s^c = F_{os}^c + \Delta F_s^c \quad (2)$$

其中  $\Delta F_s^c = -k_s \Delta U_s$  (3)

式中  $\Delta F_s^c$ ——切向接触力增量

$F_{os}^c$ ——前一时步切向接触力

$k_s$ ——切向接触刚度

$\Delta U_s$ ——相对切向位移增量

在线性接触刚度模型中,假定 2 个接触颗粒的刚度串联作用,所以法向接触刚度  $k_n$  和切向接触刚度  $k_s$  为

$$k_n = \frac{k_n^{[A]} k_n^{[B]}}{k_n^{[A]} + k_n^{[B]}} \quad (4)$$

$$k_s = \frac{k_s^{[A]} k_s^{[B]}}{k_s^{[A]} + k_s^{[B]}} \quad (5)$$

式中  $k_n^{[A]}$ ——颗粒 A 的法向接触刚度

$k_n^{[B]}$ ——颗粒 B 的法向接触刚度

$k_s^{[A]}$ ——颗粒 A 的切向接触刚度

$k_s^{[B]}$ ——颗粒 B 的切向接触刚度

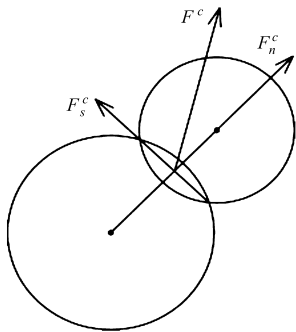


图 1 线性接触刚度模型

Fig. 1 Linear contact-stiffness model

### 1.2 模拟双轴试验

用离散元模拟双轴试验确定线性刚度接触力学模型的细观参数。模拟双轴试验是确定离散元颗粒接触力学模型细观参数的基本方法,能够有效地确定离散元模拟中基本宏观参数和细观参数之间的尺度定律。在模拟双轴试验中,使用上、下两个墙来模拟试样的加载板,左、右两个侧墙通过伺服机构控制移动速度来保持试验过程中恒定的围压,试样初始尺寸为  $120 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ,通过反复调整颗粒输入参数,直到模拟试验结果与月壤力学性质接近<sup>[8-9]</sup>。此时颗粒参数如表 1 所示。

表 1 月壤离散元模型参数

Tab. 1 Parameters of DEM model

参数	数值
密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.9
法向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	$1 \times 10^8$
切向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	$2.5 \times 10^8$
摩擦因数	0.75
颗粒半径/cm	0.05~0.125
初始孔隙率/%	21
重力加速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	1.63
法向临界阻尼比	0.84
切向临界阻尼比	0.62

## 2 模拟试验

### 2.1 模拟土槽-被试轮系统

图 2 为滑转率 10% 时,土槽-被试轮在二维离散元模拟中的情况。其中,土槽长为 1 600 mm,深为 300 mm;被试轮为有刺轮,直径为 250 mm,轮刺宽为 5 mm,高为 10 mm,轮刺数目为 18 个;离散元模拟月壤颗粒生成细观参数如表 1 所示。

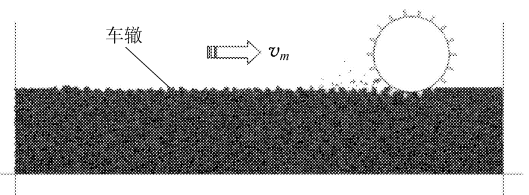


图 2 模拟土槽-被试轮试验系统

Fig. 2 Soil bin and the test wheel in simulation

土槽由标准墙按逆时针生成,内侧为有效的活动面;有刺轮由一般墙与标准墙组成,墙外侧为有效活动面,月球车轮向右滚动。

在被试轮开始转动之前,有 2 个阶段。第 1 个阶段,所有的模拟月壤颗粒都要被重力压缩,且在各个细观参数给定后实现内部平衡,这时被试轮的位置必须位于模拟月壤颗粒之上,且被试轮不与颗粒接触。第 2 阶段,被试轮垂直下落,落到月壤颗粒上,当驱动轮上载荷与月壤对被试轮的支撑力相等时,

被试轮向前滚动,试验正式开始,并记录所需数据。

### 2.2 验证试验

为验证离散元模拟的可靠性与准确性,进行了相应的实验室土槽试验,图3为自行设计的月壤-车轮土槽测试系统结构示意图。

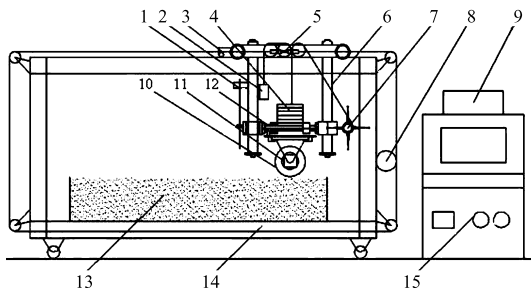


图3 月壤-车轮土槽测试系统结构示意图

Fig.3 Sketch map for soil bin test system

1. 垂直位移传感器
2. 配重
3. 水平位移传感器
4. 砝码
5. 水平阻力传感器
6. 行车台架
7. 升降装置
8. 阻力控制机构
9. EDC控制器
10. 被试轮
11. 驱动电动机
12. 压力传感器
13. 土槽
14. 支撑框架
15. 工控箱

试验中模拟月壤以火山灰为主要原料,并添加适量辅料,其物理力学性质为:含水率(1.9 ± 0.9)%,密度 2.9 g/cm<sup>3</sup>,内摩擦角 32.75°、凝聚力 1.79 MPa,压缩系数 0.19 MPa<sup>-1</sup>,平均直径 134.7 μm、中值粒径 97.4 μm,不均匀系数 5.16,曲率系数 0.937,孔隙比 1.02,变形模量 1 056 kN/m<sup>n+2</sup>,变形指数 1.3;剪切变形模量 1.2 cm。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。离散元模拟与土槽试验使用相同尺寸结构的被试轮,试验时轮上载荷 400 N,前进速度为 30 mm/s,滑转率控制在 0% ~ 80% 之间。在验证试验时,由于土槽试验是在地球重力条件下进行的,所以离散元模拟时月壤颗粒也是在地球重力条件下平衡的。图4为模拟值与试验值对比曲线,由图可知二者趋势一致,误差较小。

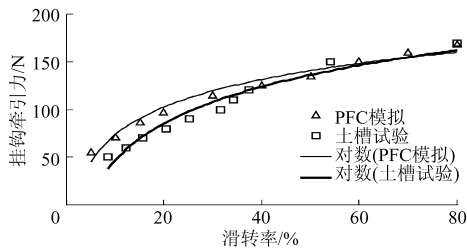


图4 模拟与试验结果对比

Fig.4 Comparison of the results between simulation and soil bin test

## 3 模拟试验结果与分析

### 3.1 模拟试验条件

月壤力学性质对月球车驱动轮牵引性能影响的

模拟试验时月球重力为地球重力的 1/6,驱动轮上载荷为 400 N,前进速度为 30 mm/s,滑转率分别为 20%、40% 和 60%。在模拟试验时改变如下月壤颗粒参数:颗粒间摩擦因数、粒径分布( $r_{min}/r_{max}$ )、重力加速度、初始孔隙率,在单因素试验时其他月壤离散元微观参数不变。

### 3.2 颗粒间摩擦因数

图5为月壤颗粒间摩擦因数对月球车驱动轮牵引性能影响,试验时颗粒摩擦因数分别取 0.25、0.5、0.75、1.0、1.25、12.5 和 75。

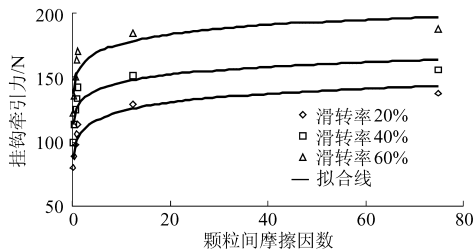


图5 颗粒间摩擦因数对牵引性能的影响

Fig.5 Influence of the friction coefficient on traction performance

由图5可知,随着摩擦因数的增加挂钩牵引力呈现增加趋势,但当摩擦因数大于1之后,增加趋于平缓。分析得出,挂钩牵引力增大是由于随着颗粒间摩擦因数的增加,月壤内摩擦角增加,从而引起抗剪强度增强,地面推力增大的缘故。

### 3.3 孔隙率

图6为孔隙率对月球车牵引性能影响,试验时孔隙率分别取 14%、16%、18%、20% 和 22%。

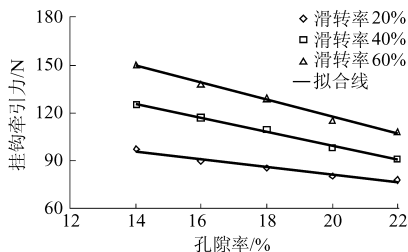


图6 初始孔隙率对牵引性能的影响

Fig.6 Influence of the porosity on traction performance

由图6可知,随着孔隙率的增加,挂钩牵引力线性递减。分析可知,这是由于随着孔隙率的增加,月壤的密实度降低,其承载能力和抗剪切能力下降,因此,滚动阻力增加,地面推力减小。

### 3.4 粒径分布

图7为月壤颗粒粒径分布( $r_{max}/r_{min}$ )对月球车牵引性能影响, $r_{max}/r_{min}$ 分别取 1、2.5、5、7.5 和 10。颗粒单元半径  $r$  的分布采用从  $r_{max}$  到  $r_{min}$  均匀分布。

由图7可知,随着  $r_{max}/r_{min}$  增加,挂钩牵引力

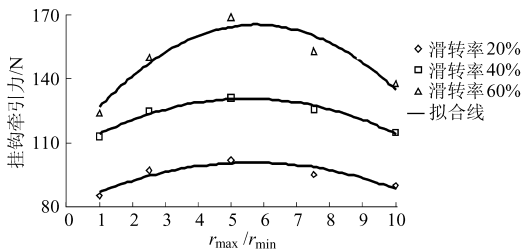


图7 粒径分布对牵引性能的影响

Fig.7 Influence of particle size distribution on traction performance

先增加,当  $r_{\max}/r_{\min}$  为 5 左右时开始随  $r_{\max}/r_{\min}$  的增加而减小。这是由于  $r_{\max}/r_{\min} = 1$  时颗粒分布均匀,颗粒间咬合力小,内摩擦角小;随着  $r_{\max}/r_{\min}$  的增大,粒径分布级配良好,颗粒间咬合较好,内摩擦角增大,抗剪强度增大。但随着  $r_{\max}/r_{\min}$  的继续增大,颗粒不均匀,级配不连续,因此颗粒间咬合减弱,内摩擦角减小,抗剪强度降低,地面推力减小。

### 3.5 重力

图 8 为重力加速度对月球车牵引性能的影响,其中重力加速度分别取 2、4、6、8 和 10  $\text{m/s}^2$ 。

由图 8 可知,随着重力加速度的增加,挂钩牵引力随之线性增加。分析可知,随着重力加速度的增加,月壤颗粒内部平衡后,密度就越大,其承载能力和抗剪切能力增大,因此沉降量减小,滚动阻力减小,地面推力增大。在月面环境下,滑转率为 20% 时,月球车驱动轮的挂钩牵引力约为其在地面的

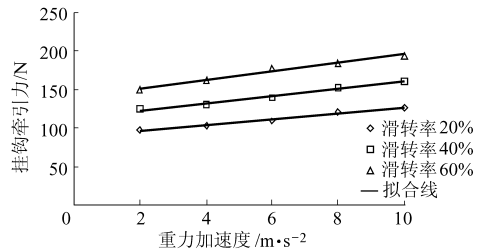


图8 重力加速度对牵引性能的影响

Fig.8 Influence of the gravity on traction performance

77.3%。

## 4 结论

(1) 选用线性刚度接触模型,通过离散元模拟双轴试验,建立了月壤离散元接触力学模型,确定了颗粒接触细观参数。

(2) 离散单元法根据离散物质本身的离散特性建立数值模型,在相同试验条件下,离散元模拟结果与实验室土槽试验结果趋势一致,表明离散单元法在分析离散性质的物质方面有极大的优越性。

(3) 挂钩牵引力随颗粒间摩擦因数的增大而增大,当摩擦因数在 1 左右时,挂钩牵引力增加趋于平缓;挂钩牵引力随空隙率的增加而线性降低;挂钩牵引力随粒径分布的增加先增加,当粒径分布大于 5 之后降低;挂钩牵引力随重力加速度的增加而增加,在月面环境下,滑转率为 20% 时,驱动轮的挂钩牵引力约为地面的 77.3%。

## 参 考 文 献

- 李建桥,邹猛,贾阳,等.月球车轮与月壤相互作用动力学模拟[J].农业机械学报,2008,39(4):1~4,23.  
Li Jianqiao,Zou Meng,Jia Yang,et al. Research on the interaction between lunar rover wheel and lunar soil by simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(4):1~4,23. (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[J].力学进展,2007,37(3):453~464.
- 邹猛,李建桥,贾阳,等.月壤静力学特性的离散元模拟[J].吉林大学学报:工学版,2008,38(2):383~387.  
Zou Meng, Li Jianqiao, Jia Yang, et al. Statics characteristics of lunar soil by DEM simulation [J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition,2008,38(2):383~387. (in Chinese)
- 陶建国,王林,吴凤久,等.月球车车轮与土壤相互作用的力学特性分析[J].机械设计与制造,2006(12):56~57.
- 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[J].吉林大学学报:工学版,2006,36(4):510~513.  
Li Jie,Zhuang Jide,Wei Dong, et al. Comparative traction performance tests between bionic camel foot tire and common tire [J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition,2006,36(4):510~513. (in Chinese)
- Iizuka,Kojiro,Sato,et al. Experimental study of wheeled forms for lunar rover on slope terrain[C]//International Workshop on Advanced Motion Control,AMC,9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control,2006:266~271.
- Caruso John J,Abel Phillip B,Zakrajsek James J. Gravity effects on lunar mobility and the human-robotic systems program [C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit,Reno,Nevada,2007:346.
- Itasca Consulting Group,Inc. PFC2D (Particle flow code in 2 dimensions)[M]. Version 3.0. Minneapolis,USA:ICG,2002.
- Li Jianqiao,Zou Meng,Ren Luquan,et al. Simulation of lunar regolith for vehicle-terramechanics research in laboratory[C]//Proceedings of the 10th European Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems. Budapest,2006.