

# 轮式月面巡视探测器月面牵引性能的预测

孙 鹏<sup>1</sup>,高 峰<sup>1</sup>,姚圣卓<sup>1</sup>,李 雯<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院,北京 100191;2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院,北京 100191)

**摘要:**通过室内土槽试验和颗粒流数值仿真相结合的方法对轮式月面巡视探测器的轮土交互作用、车轮的牵引特性和轮下土壤变形和破坏进行了深入探讨。以吉林省火山喷发物为原料进行了模拟月壤的配制。设计并制造了深空探测车车轮牵引特性试验台并进行了不同轮齿构型车轮的牵引特性试验,获得了基础性的试验数据。考虑月壤结构松散、颗粒细小、流动性强的离散特征,采用颗粒流法分析了地面重力场下探测车轮下模拟月壤的扰动破坏、土体内接触力的分布、颗粒速度矢量的变化,获得的车轮牵引特性参数与土槽试验数据进行了对比,进一步对车轮在月面环境下的牵引性能做出了预测。

**关键词:**车辆工程;月面巡视探测器;牵引性能;土槽试验台;颗粒流仿真

**中图分类号:**U461.5    **文献标志码:**A    **文章编号:**1671-5497(2010)04-0925-06

## Prediction of tractive performance of wheel on moon surface for lunar rover vehicle

SUN Peng<sup>1</sup>, GAO Feng<sup>1</sup>, YAO Sheng-zhuo<sup>1</sup>, LI Wen<sup>2</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The dynamics of wheel-soil interaction, the tractive performance and the soil transformation and failure beneath the lunar rover vehicle wheel were studied by means of the soilbin lab test combined with the particle flow simulation. A lunar soil simulant was prepared by volcanic eruption material in Jilin province, China. A tractive performance test bed for deep-space rover wheel was designed and manufactured. The tractive performance tests were performed for the wheels with different lug types and the basic test data were obtained. The lunar soil failure by turbulence, the distribution of the contact force in soil and the variation of particle velocity vectors beneath the wheel of lunar rover vehicle under the gravitational field on earth were analyzed by the particle flow code taking into account of the discrete characters of lunar soil such as loose structure, fine particle size and strong mobility. The obtained tractive characteristic parameters of the wheel were compared with the soilbin test data. Furthermore, the tractive performance of the rover wheel on moon surface was predicted.

**Key words:** vehicle engineering; lunar rover vehicle; tractive performance; soilbin test bed; particle flow simulation

**收稿日期:**2008-11-12.

**基金项目:**高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070006012);中国博士后科学基金项目(20090450277).

**作者简介:**孙鹏(1980-),男,博士后.研究方向:深空探测车辆地面力学. E-mail:buaa\_sunp@126.com

月面巡视探测器(以下简称月球车)的月面通过性是一个非常重要的问题,需要充分考虑月壤与月球车行走机构的相互作用<sup>[1]</sup>。考虑到月球重力和月表环境的复杂性,在地面环境下进行月球车牵引通过性能的验证试验是必不可少的。地面验证试验中,低重力环境的模拟非常困难,落塔、飞机抛物线飞行等方法成本极高、试验时间短,无法应用在试验中,文献[2]中提出的低重力模拟试验方法能够将月球车的重力减小为原重力的1/6,但没有考虑低重力条件对土壤自身可行驶性的影响。

作者拟通过室内土槽试验与颗粒流数值仿真相结合的方法对轮-土交互力学、车轮的牵引特性问题进行深入分析,探索月面探测车辆的地面验证试验方法,并为月球车月面牵引性能的预测提供新的思路。

## 1 室内土槽试验的准备

### 1.1 车轮牵引特性试验台

考虑到深空探测车结构精密、直径较小、外形多变的特点,设计研制了深空探测车车轮牵引特性试验台,试验台由土槽体、机械系统、传感器、数控系统4部分组成<sup>[3]</sup>。可以对不同结构车轮在不同牵引载荷工况下进行牵引性能的测试,以获得车轮挂钩牵引力 $F_d$ 、驱动转矩 $T$ 、车轮垂直下陷量 $z$ 、台车的水平速度 $v$ 等参数,并可以计算得到车轮的滑转率 $i$ 、驱动效率 $\eta_{TE}$ 等。

### 1.2 模拟月壤的配制与整备

本文轮土交互试验中使用的土壤介质为自行制备的模拟月壤,它以吉林省靖宇县内的新生代火山喷发物质为原料,经过除杂、机械粉碎和研磨、筛析处理等步骤制作而成,其物理和力学特性与Apollo14着陆点的低钛月海月壤<sup>[4]</sup>相似,可作为轮土交互试验的土壤介质,其物理和力学特性参数如表1所示。

表1 模拟月壤的物理力学特性参数

Table 1 Physical and mechanical properties of lunar simulant

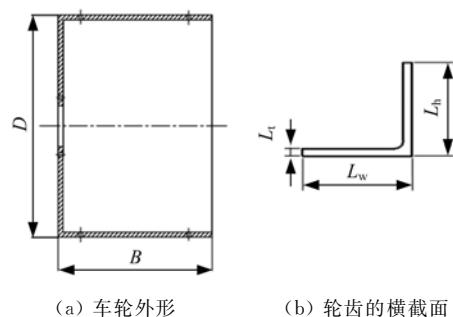
颗粒比重	2.77	压缩系数/MPa <sup>-1</sup>	0.052~0.229
最大容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.62	内聚力/kPa	0.47
最小容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.20	内摩擦角/(°)	42
含水率/%	0.4		

在土槽试验进行前,需进行土槽内模拟月壤的整备工作,重塑就位月壤的容重状态,使模拟月壤的承压和剪切特性参数与真实月壤力学特性参数相接近。

### 1.3 试验车轮

试验车轮外形和轮齿的横截面如图1所示,车轮材质为钢管材料,直径D为220 mm,轴向宽度B为160 mm。车轮的圆周面钻有安装孔,最多可以安装18个轮齿。车轮一端通过连接法兰连接,接受车轮安装轴传递过来的动力。

试验中可供安装的轮齿有多种,图1(b)为本文使用的薄齿a型轮齿,其齿宽 $L_w$ 为25 mm,齿高 $L_h$ 为25 mm,齿厚 $L_t$ 为2 mm,单个齿重 $m_c$ 为0.1289 kg。



(a) 车轮外形 (b) 轮齿的横截面

图1 车轮结构示意图

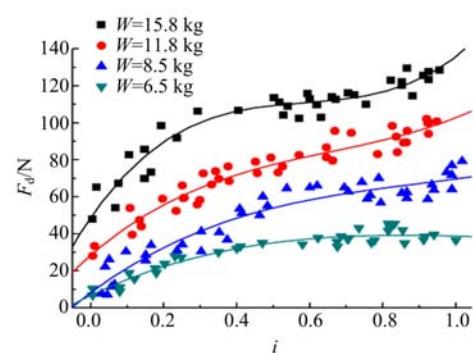
Fig. 1 Schematic diagram of wheel configuration

## 2 轮土交互试验结果分析

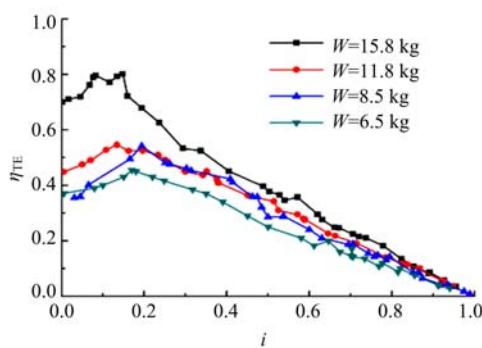
图2为薄齿a型车轮在变牵引载荷工况下的试验数据,车轮转速为5 r/min。

由图2(a)可知,增大轮上载荷W能够提高挂钩牵引力,使车轮的牵引通过性增强,这是因为具有较大轮上载荷的车轮对轮下土壤的压实作用更强,车轮的接近角与离去角范围内的土体密实度高,土颗粒排列紧密,提高了局部土体的抗剪强度,最终在宏观上体现为车轮的挂钩牵引力随着轮上载荷的增加而增大。

由图2(b)可知,车轮在低滑转条件下牵引效率较高,当滑转率达到0.2左右时,牵引效率达到最大值,滑转率超过0.2后,牵引效率几乎呈线性下降的趋势,这种线性下降的原因在于水平速度的快速下降。四种轮上载荷条件下,牵引效率的变化趋势相同,随着轮上载荷的增大,牵引效率的数值变化不大,仅仅在W=15.8 kg时低滑转率下牵引效率的数值有较大的提高。



(a)挂钩牵引力和滑转率的关系曲线



(b)车轮牵引效率与滑转率的关系曲线

图2 薄齿a型车轮的试验数据

Fig. 2 Test data of wheel for thin lug (a) type

### 3 车轮牵引特性的颗粒流仿真

月壤/模拟月壤因无水或含水量极低而表现出干摩擦特征,细小的颗粒受到车轮扰动后容易发生堆积扬尘等大位移运动。颗粒流法是离散元法的一种简化形式,适用于计算颗粒数目庞大的散体系统,已有学者<sup>[5-6]</sup>对颗粒流法在轮土交互作用中的应用进行了探索。

因为低重力条件在地面环境下很难模拟,本文考虑应用颗粒流仿真探测车轮在月面重力条件下的牵引性能。首先,对车轮在地面重力条件下进行轮土交互仿真,将仿真结果与土槽试验结果进行对比,以验证仿真分析的有效性,然后进一步对车轮在月面重力条件下的牵引性能进行预测。

#### 3.1 颗粒流细观分析模型及参数选取

颗粒间接触力学模型的建立、颗粒间法向和切向接触力方程以及车轮牵引性能参数的细观表达式的推导等内容详见文献[7]。

利用量纲分析与颗粒流双轴模拟压缩试验相结合的方法,获得了反映模拟月壤宏观力学特性的细观接触模型参数,如表2所示。

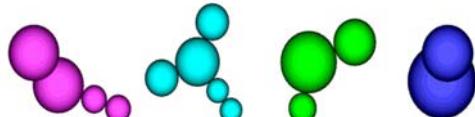
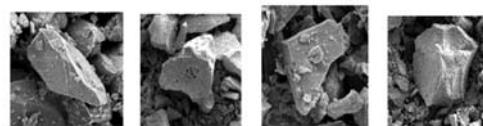
表2 模拟月壤的细观接触模型参数

Table 2 Contact model parameters of lunar simulant

颗粒基圆半径/mm	0.25~0.625	刚度系数/(N·m <sup>-1</sup> )	$5.0 \times 10^4$
孔隙率/%	0.25	摩擦因子	0.05
颗粒比重	2.77	黏性临界阻尼比	0.5

#### 3.2 模拟土槽环境的建立

对月壤颗粒形态的研究发现,其颗粒形态从球形到极端棱角状都有出现,其中,长条状、棱角状、次棱角状的颗粒形态更为常见。经过扫描电镜分析发现,配制的模拟月壤与真实月壤的颗粒形态的描述很接近,因此在颗粒流仿真分析中以扫描电镜中提取出来的长条形、棱角形、次棱角形和次圆形四种典型的模拟月壤颗粒形状(如图3所示)为参考,利用相互重叠的球单元对复杂的颗粒形状进行模拟。文献[8]较为详细地介绍了模拟月壤颗粒群系统生成的具体步骤。



(a)长条形 (b)棱角形 (c)次棱角形 (d)次圆形  
图3 模拟月壤的四种典型颗粒形状

Fig. 3 Particle shape of lunar simulant

利用墙单元建立模拟土槽的框架,在土槽框架内,采用分层粒径放大法建立了颗粒粒径逐层增大的三层颗粒群系统,这样在真实反映表层土壤颗粒与车轮接触的动力学特性的同时,减少了颗粒单元和接触对的数量,提高了计算效率。

#### 3.3 车轮参数及行驶条件

结合土槽试验中使用的车轮尺寸,进行车轮模型的参数化建模,图4为建立的车轮的参数化模型示意图,车轮模型的结构参数如表3所示,车轮的行驶条件如表4所示。

表3 车轮模型的结构参数

Table 3 Configuration parameters of wheel model

轮齿数/个	18	齿宽/mm	2
基圆半径/mm	110	轮齿倾角/(°)	$0, \pm 30, \pm 45$
齿高/mm	25	组成轮齿的球半径/mm	1

表 4 车轮的行驶条件

Table 4 Travel conditions of wheel model

角速度/(rad·s <sup>-1</sup> )	-1.0	车轮质量/kg	11.8
水平速度/(m·s <sup>-1</sup> )	不固定	重力加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	1.635, 9.81
滑转率	0~1.0	时间步长/s	$1.166 \times 10^{-6}$

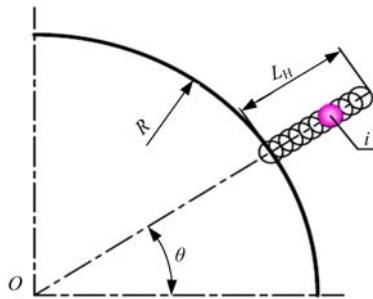


图 4 车轮几何模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of wheel geometrical model

### 3.4 颗粒流仿真与土槽试验的对比分析

通过地面重力场下颗粒流仿真结果与土槽试验数据的对比分析以验证颗粒流仿真的有效性。

图 5 为轮上质量载荷为 11.8 kg 的薄齿 a 型车轮在地球重力场下分别以 4 种滑转率运行了 30 万步后得到的轮下土壤的变形情况, 土壤颗粒的动态行为差异显著, 主要体现在: ①车轮以纯滚动运行时, 如图 5(a) 所示, 车轮的水平速度相对较大, 轮下土壤以受到车轮的压实作用为主, 受到的轮齿旋转扰动较少, 轮下车辙清晰可辨; ②车轮以 0.3 和 0.6 的滑转率运行时, 轮下土壤受到的扰动明显加剧, 土壤的剪胀和轮后土壤颗粒的扬尘现象逐步显现; ③车轮以 0.9 的滑转率运行时, 车轮水平移动速度很小, 车轮的旋转运动使得轮土局部土体发生明显的剪切破坏并形成清晰的破坏面, 在轮齿的旋转作用下, 齿间的土壤颗粒发生大位移运动, 造成车轮后部土壤的严重堆积, 无法形成清晰的车辙。将图 5 与轮土交互试验中的数

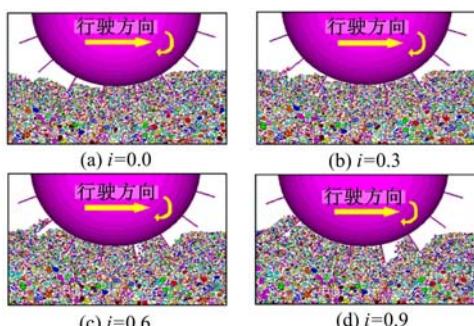


图 5 不同滑转率下轮下土壤状态

Fig. 5 Soil State under wheel at different slip ratio

字图像进行对比, 发现颗粒流分析结果能够较真实地反映运行车轮下土壤颗粒的动力学行为。

图 6 为挂钩牵引力-滑转率的颗粒流仿真的数据和拟合曲线与土槽试验数据的对比, 两者具有较为相似的变化趋势, 颗粒流仿真获得的数据点相比轮土试验略少, 其在低滑转率和高滑转率的数据点的离散性要强于轮土试验数据点。

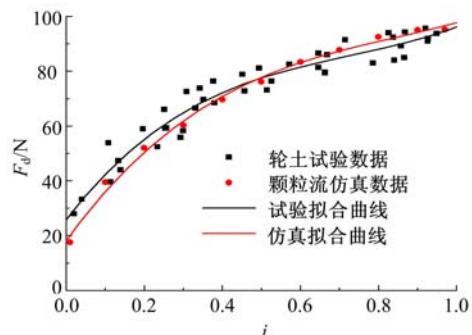
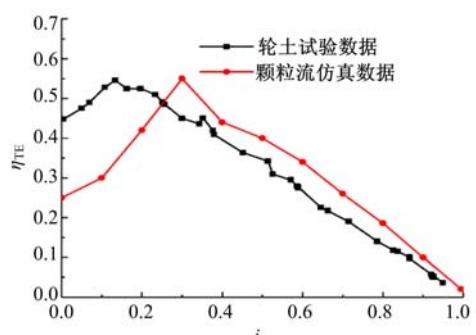
图 6 仿真与试验的  $F_d$ - $i$  曲线的比较Fig. 6 Curve of  $F_d$ - $i$  for simulation and experiment

图 7 为车轮牵引效率-滑转率的颗粒流仿真数据与轮土试验数据的对比, 两者的基本趋势都是先增大后减小, 轮土试验的曲线在  $i=0.15$  时达到最大牵引效率, 而颗粒流仿真曲线在  $i=0.3$  时达到最大牵引效率, 曲线整体比较接近, 对应较好。

图 7 仿真与试验的  $\eta_{FE}$ - $i$  曲线的比较Fig. 7 Curve of  $\eta_{FE}$ - $i$  for simulation and experiment

通过对薄齿 a 型车轮在地球重力场下的颗粒流进行仿真分析发现: ①颗粒流分析中轮下土壤的变形与破坏情况较为清晰地再现了轮土试验的实际情况; ②利用坐标变换和代数求和推导出的车轮宏观牵引性能参数的细观表达式可以合理地预测车轮的牵引特性, 与土槽试验数据较为接近; ③颗粒流仿真结果与土槽试验数据的良好对应说明了颗粒流法应用在轮土交互作用的分析中是可行的, 下一步可利用它对探测车车轮在月面环境

下的行走进行分析预测。

### 3.5 车轮在月面环境下牵引性能的预测

用颗粒流法分析车轮在月面行走时,其重力加速度为地球的1/6,土壤系统在低重力下固结,车轮垂直沉降稳定后开始水平运行。

图8是车轮在月面环境下分别以4种滑转率运行30万步后轮下模拟月壤的变形和接触力线的分布,可以从细观的角度解释车轮行驶阻力的

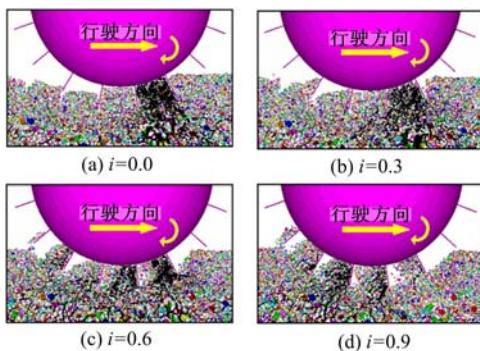


图8 模拟月壤的变形和接触力线

**Fig. 8 Distortion and contact force-line of lunar simulant**  
来源以及挂钩牵引力的变化。具体地说:①当车轮以0.1的恒定滑转率运行时,车轮的水平速度相对较快,模拟月壤对车轮的接触力主要分布在车轮运行的前方,车轮的压实阻力明显较大,因此产生的挂钩牵引力有限,滑转率为0.3时,接触力线变得相对稀疏,说明压实阻力有所减小;②当车轮以0.6的恒定滑转率运行时,接触力线的分布位置已经逐渐转移到车轮的正下方,压实阻力进一步降低,同时模拟月壤颗粒与轮齿的主动边接触紧密,有利于提高挂钩牵引力;③当车轮以0.9的恒定滑转率运行时,接触力线主要分布在车轮的后下部,轮齿的主动边仍旧与模拟月壤颗粒紧密接触,这样以来压实阻力进一步减小,挂钩牵引力进一步增大,而此时,车轮接近角附近的轮齿与模拟月壤颗粒的接触减弱,轮下形成大块不充分接触区域,使得车轮前部受到模拟月壤的支反力减少,车轮的质心向前部偏移并产生动态下陷以获得足够的支反力,这就是车轮产生动态下陷的细观机理。虽然滑转率增加会增大车轮的挂钩牵引力,但动态下陷会使车轮深陷土壤之中无法移动,此时发生大变形破坏的土壤已无力提供足够的牵引力使车轮继续移动。

图9为相同条件下,轮下模拟月壤颗粒的速度矢量图。易知:①随着滑转率的增大,受扰动的模拟月壤颗粒的速度矢量分布逐渐从车轮前方移

动到车轮后方;②滑转率较低时,车轮水平运动速度相对较快,轮下受扰动颗粒的速度矢量的方向较为复杂,大部分颗粒的速度矢量垂直于车轮基圆的外表面,反映出车轮对土壤的扰动主要以压实为主;③滑转率较高时,车轮水平速度相对较慢,以旋转运动为主,轮齿间模拟月壤颗粒的速度矢量方向垂直于车轮轮齿的主动边,并随着轮齿的旋转而发生大位移运动,部分颗粒会在惯性力的作用下被旋转的轮齿带起并粘着在轮齿表面,随着旋转角度的改变,被带起的模拟月壤颗粒在重力的作用下逐渐脱离轮齿,在车轮后方形成扬尘和土壤堆积。

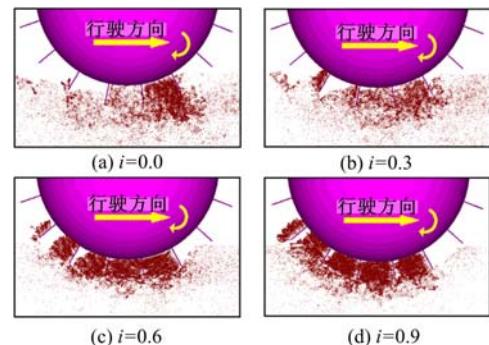


图9 模拟月壤的速度矢量图

**Fig. 9 Velocity vector of lunar simulant**

图10为薄齿a车轮在几种恒定滑转率下,挂钩牵引力随着行驶时间的变化曲线。可以看到,随着滑转率的增加挂钩牵引力的数值随之增大,变化的趋势与地面重力环境下的仿真结果一致,但对比图6的曲线可以发现,在滑转情况下,月面获得的挂钩牵引力要小于地面获得的挂钩牵引力,这与月球重力场下颗粒排列松散,土壤的剪切强度较低有关。

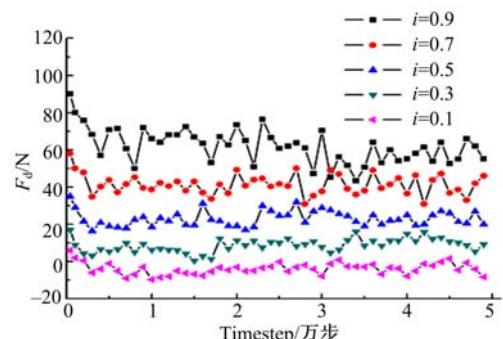


图10 月球重力场下的  $F_d$ -Timestep 曲线

**Fig. 10  $F_d$ -Timestep curve under lunar gravity**

图11为车轮牵引效率随行驶时间的变化曲线,可看到:①在固定滑转率下运行的车轮,其牵

引效率的数值较为平稳;②滑转率从 0.3 变化到 0.9 时,车轮的牵引效率的均值从 0.47 降低到 0.10;③图中没有绘制滑转率为 0.1 时的牵引效率曲线,因为其数值波动巨大,瞬态值和奇异点非常多,这与滑转率为 0.1 时,挂钩牵引力在 0 附近的不稳定波动以及车轮以较大水平速度运行时轮齿与模拟月壤的不充分接触有关。

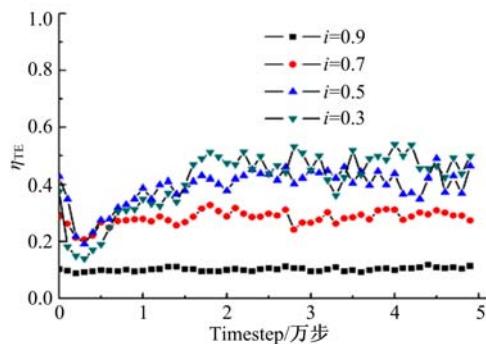


图 11 月球重力场下的  $\eta_{FE}$ -Timestep 曲线

Fig. 11  $\eta_{FE}$ -Timestep curve under lunar gravity

## 4 结 论

(1)设计搭建了深空探测车车轮牵引特性试验台,对薄齿 a 型车轮进行了牵引特性试验。试验结果显示:增大轮上载荷能够提高挂钩牵引力,车轮的牵引效率随着滑转率的增加呈现先增加后降低的趋势,在滑转率为 0.2 时,车轮牵引效率达到最大。

(2)利用颗粒流法进行了轮土交互的动力学分析,仿真分析结果显示:地球重力场下轮下土壤的变形与破坏情况与轮土试验的实际情况相似,获得的车轮宏观牵引性能参数与土槽试验数据取得了较好的对应,证明颗粒流法应用在轮土交互作用的分析中是可行的。

(3)模拟了车轮在月球重力场下的运动情况,分析了不同滑转率下轮下土壤的接触力线分布和位移矢量的变化情况,从细观的角度解释了车轮行驶阻力的来源以及挂钩牵引力的变化情况,从仿真结果可以看到,月面环境下土壤的抗剪强度相对较低,土壤的可行驶性较差,不利于探测车的月面行走。

## 参考文献:

- [1] 叶培建,肖福根. 月球探测工程中的月球环境问题[J]. 航天器环境工程,2006, 23(1): 1-11.  
Ye Pei-jian, Xiao Fu-gen. Issues about lunar environment in lunar exploration project[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(1): 1-11.
- [2] 高海波,邓宗全,胡明,等. 行星轮式月球车移动系统的关键技术[J]. 机械工程学报,2005, 41(12): 156-161.  
Gao Hai-bo, Deng Zong-quan, Hu Ming, et al. Key technology of moving system of luanr rover with planetary wheel[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 156-161.
- [3] 孙鹏,高峰,孙刚,等. 行星探测车车轮移动特性试验台设计[J]. 中国机械工程,2009, 20(5): 505-508.  
Sun Peng, Gao Feng, Sun Gang, et al. The design of travel characteristic test-bed of planetary rover wheel[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(5): 505-508.
- [4] McKay D S. The Lunar Regolith[M]. New York: Cambridge University Press, 1991.
- [5] 李建桥,邹猛,贾阳,等. 月球车与月壤相互作用动力学模拟[J]. 农业机械学报,2008, 39(4): 1-4.  
Li Jian-qiao, 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.
- [6] 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 Jian-qiao, 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.
- [7] 李雯,高峰,贾阳,等. 深空探测车单轮牵引性能的离散元仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(5): 524-528.  
Li Wen, Gao Feng, Jia Yang, et al. Numerical simulation of tractive performance for planetary rover vehicle wheel by discrete element method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 524-528.
- [8] 高峰,李雯,孙刚,等. 模拟月壤可行驶性的离散元数值分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(4): 501-504.  
Gao Feng, Li Wen, Sun Gang, et al. Numerical analysis on travelability of lunar soil simulant by means of distinct element method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(4): 501-504.