

基于车辙图像的 CE-4 月球车挂钩牵引力判别

胡震宇^{1,2}, 申彦^{2,3}, 王卫军^{1,2}, 罗小桃^{1,2}, 邹猛^{2,3}

(1. 上海航天系统工程研究所, 上海 201109; 2. 行星地面力学与工程仿生联合实验室, 上海 201109; 3. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要:为评估玉兔 2 号月球车月面行驶状态, 提出了一种基于滑转率信息的月球车挂钩牵引力评价方法。该方法以玉兔 2 号月球车车轮与其地面原型车为试验对象, 通过整车试验和土槽试验模拟玉兔 2 号月球车行驶状态, 以车辙信息、滑转率、轮上载荷作为输入参数, 建立了沉陷量-滑转率、车辙间距-滑转率标定模型, 并基于 Matlab 图像处理对滑转率进行识别。结果表明, 玉兔 2 号月球车在月面特定区域 D' 、 A' 、 B' 点行驶时的滑转率分别为 10.45%、12.96%、19.70%, 挂钩牵引力分别为 177.03、181.62、194.47 N。地面试验和反演计算结果表明, 玉兔 2 号月球车在以上区域行驶状态良好。

关键词:地面力学; 月球车; 月壤; 滑转率; 车辙

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)09-2474-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211193

Analysis of drawbar pull to CE-4 Lunar rover based on rutting image of wheel

HU Zhen-yu^{1,2}, SHEN Yan^{2,3}, WANG Wei-jun^{1,2}, LUO Xiao-tao^{1,2}, ZOU Meng^{2,3}

(1. Shanghai Aerospace System Engineering Institute, Shanghai 201109, China; 2. Joint Lab for Planetary Terramechanics and Bionics Engineering, Shanghai 201109, China; 3. Key Laboratory of Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to assess the lunar surface trafficability of YuTu-2 lunar rover, a kind of method of lunar rover drawbar pull evaluation based on slip ration information was proposed. The wheel of the Yutu-2 lunar rover and its ground prototype were used as the test objects, the YuTu-2's lunar drive was simulated by the whole vehicle test and soil trough test. With the input parameters of rutting information, slip rate and wheel load, the calibration models of sinkage-slip rate and rut spacing-slip rate were established, the slip rate was identified by Matlab image processing. The results showed that the slip rate of the YuTu-2 lunar rover traveled in the specified area of the lunar surface at locations D' , A' , and B' , respectively is 10.45%, 12.96%, and 19.70%, and the drawbar pull is 177.03 N, 181.62 N, and 194.47 N. The ground test and inversion calculation results reveal that YuTu-2 travels well in the aforementioned region and satisfies the design requirements.

收稿日期: 2021-11-14.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775233, 52075217); 吉林省科技厅重点项目(20200401144GX).

作者简介: 胡震宇(1973-), 男, 研究员, 博士. 研究方向: 飞行器机构和结构设计. E-mail: 13917151873@139.com

通信作者: 邹猛(1978-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 深空探测地面力学. E-mail: zoumeng@jlu.edu.cn

Key words: terramechanics; lunar rover; lunar soil; slip ratio; rutting

0 引言

月球车车轮直接与月壤接触,起到了承载、驱动、转向等作用。基于轮-壤相互作用力学关系,可反演获得月球车行驶过程中滑转率、沉陷等信息。车辙图像作为轮-壤相互作用的直观结果,一定程度上可以反映表层危害性。通过CE-4玉兔2号月球车车辙图像识别相关信息,不仅可为月球车性能评估、路径规划和地面模拟提供关键参数和依据,而且具有科学探测意义。

美国和前苏联都认识到分析月壤表层可通过性和力学参数的重要性,前苏联通过在Lunokhod月球车上搭载叶片式贯入仪测量月壤的承压和剪切特性^[1-3]。美国LRV月球探测器由宇航员携带贯入仪测量月壤阻力和推力特性,采用圆锥指数法快速评估相关区域通过性^[4]。

随着星球车自主导航技术的不断发展^[5-7],星壤力学参数原位测试由使用特定的仪器转变为依靠车轮与星壤接触的力学关系反演。例如,美国NASA索杰纳号利用车轮旋转剪切土壤,对火星土壤的内聚力和内摩擦角进行估测^[8,9]。勇气号和机遇号通过车轮与地面的相互作用进行相关地面力学试验,估算了相应星壤的内聚力和内摩擦角^[10,11]。此外,凤凰号通过机械臂挖掘试验反演火壤的力学参数^[12]。但受到计算能力和环境限制,以上方法的实时性和鲁棒性较弱。

目前,自主路径导航、航迹推算、地形分类已经应用于火星探测器的巡视探测中^[13,14]。麻省理工学院Iagnemma等^[15]提出了一种基于视觉的检测车轮沉陷的方法。密歇根大学Reina等^[16]基于边缘检测策略,提出了一种基于视觉的车轮沉陷估计算法,分析轮-地相互作用关系。此外,加拿大Carleton大学Cross等^[17]将神经网络应用到土壤力学参数估计中。

在国内,崔平远等^[18]提出了一种基于高斯-拉格朗日数值积分法和牛顿迭代法的月壤力学参数估计算法。李萌等^[19]提出了一种基于线性最小二乘法的月壤力学参数估计算法。薛龙等^[20]以车辙信息、滑转率、轮上载荷为输入参数,结合偏最小二乘判别方法估计了相关月壤力学参数。丁亮等^[21,22]从理论上描述了车辙的形成,并基于

车辙图像建立了滑转率与车辙间距的时域估计模型。李楠等^[23,24]基于车辙图像频域特征提出了一种滑转率估计方法。黄晗等^[25,26]、陈百超等^[27]以月球车筛网轮为研究对象,对其轮壤相互作用以及牵引特性进行了针对性研究。

本文通过图像透视变化法采集CE-4玉兔2号月球车在轨图像中的车辙数据,计算分析其滑转率;使用玉兔2号地面原型车在模拟月壤试验场进行模拟试验,模拟玉兔2号月球车在月面特定地点的行驶状态;构建了基于玉兔2号月球车筛网轮的滑转率模型,并通过地面模拟试验所获得的挂钩牵引力大小评估CE-4玉兔2号月球车的月面通过性。

1 轮-壤作用分析

1.1 月球车车轮

玉兔2号月球车筛网轮为鼓形弹性筛网轮,车轮直径 $D=300$ mm,宽度 $b=150$ mm,如图1所示。轮缘由3个轮圈组合,轮面由直径为0.6 mm的钛合金金属丝编制而成,中间轮圈直径大于两侧轮圈直径,两排轮刺交错且等间距地安置于相邻轮圈上,共计24个,轮刺设计为圆弧形,中间高度为10 mm,两端高度为7 mm,平均高度为8 mm^[28,29]。

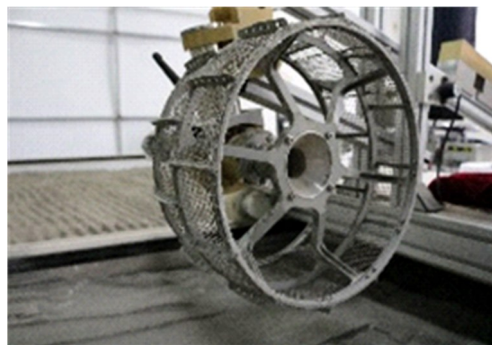


图1 月球车车轮

Fig. 1 Wheel of lunar rover

1.2 轮壤交互作用

根据Bekker^[30]所提出的轮壤交互作用理论,简化的刚性轮与土壤交互模型如图2所示。

车轮平衡方程可写为:

$$W = b \int_0^{\theta_0} \sigma r \cos \theta d\theta \quad (1)$$

$$R_c = b \int_0^{\theta_0} \sigma r \sin \theta d\theta \quad (2)$$

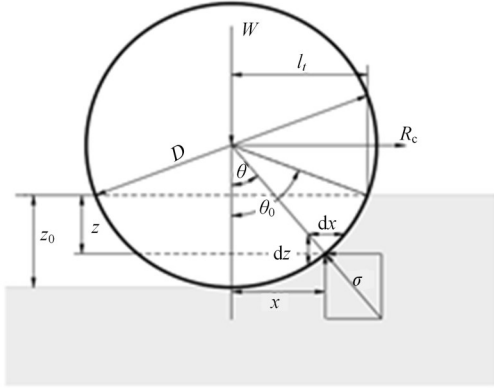


图 2 简化的车轮-土壤相互作用模型

Fig. 2 Simplified wheel-soil interaction model

式中： θ_0 为车轮与土壤的接近角； W 为垂直方向载荷； R_c 为压实阻力； σ 为径向应力； b 和 r 分别为车轮的宽度和半径。

根据 Bekker 承压模型^[30]，对式(1)积分后可得：

$$W = b \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) \int_0^{z_0} \frac{z^n \sqrt{D}}{2\sqrt{z_0 - z}} dz \quad (3)$$

为了获得车轮直径 D 、车轮宽度 b 、最大沉陷量 z_0 、作用在车轮上的垂直载荷 W 与土壤参数 n 、 k_c 、 k_φ 之间的关系，对式(3)积分，当 n 值小于 1.3 时，有：

$$W = \frac{b \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) \sqrt{z_0 D}}{3} z_0^n (3 - n) \quad (4)$$

变换后得：

$$z_0 = \left[\frac{3W}{b(3-n) \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) \sqrt{D}} \right]^{\frac{2}{2n+1}} \quad (5)$$

根据式(5)可以预测单个刚性车轮的纯滚动时的载荷-沉陷量关系。Bekker^[30]指出，当车轮滑移时，由滑移引起的沉陷量 z_s 为：

$$\begin{cases} z_s = 2hs \\ h \approx 1.2h_b \end{cases} \quad (6)$$

式中： h_b 为轮刺高度； s 为滑转率。

$$s = \left(1 - \frac{v}{r\omega} \right) \cdot 100\% \quad (7)$$

故沉陷量 z 为：

$$z = z_0 + z_s \quad (8)$$

1.3 行驶阻力和挂钩牵引力

车辆行驶时，车辙产生滚动阻力，对式(2)积

分可得：

$$R_c = b \left(\frac{z_0^{n+1}}{n+1} \right) \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) \quad (9)$$

当驱动轮滚动时，土壤的变形除了垂直方向的压实外，还有宏观上表现出的车轮向前形成的波浪状凸起(弓形波)，当车轮滚动时，要多消耗一部分功率推移隆起的月壤，车轮推移土壤引起的阻力称为推土阻力。Bekker^[30]利用系数 K_{pc} 、 K_{pr} 替换太沙基承载系数 N_c 、 N_γ ，得到基于太沙基承载公式的车轮推土阻力 R_b 计算公式为：

$$R_b = \frac{b \sin(\alpha + \varphi)}{\sin \alpha \cos \varphi} (cz_0 K_{pc} + 0.5z_0^2 \gamma_s K_{pr}) \quad (10)$$

$$K_{pc} = (N_c - \tan \varphi) \cos^2 \varphi$$

$$K_{pr} = \left(\frac{2N_\gamma}{\tan \varphi} + 1 \right) \cos^2 \varphi$$

$$\alpha = \arccos(1 - 2z_0/D) \quad (11)$$

式中： γ_s 为土壤容重； φ 为土壤内摩擦角。

根据式(9)(10)，可以计算月球车行驶阻力 F_{tot} 为：

$$F_{tot} = R_c + R_b \quad (12)$$

对整个车轮与月面作用接触面上的剪切应力的水平分量积分可得车轮附着力 H 为：

$$H = rb \int_{\theta_1}^{\theta_2} \tau(\theta) \cos(\theta) d\theta \quad (13)$$

积分后可得：

$$H = (cA + W \tan \varphi) \left[1 - \frac{k}{s\lambda} (1 - e^{-s\lambda/k}) \right] \quad (14)$$

式中： A 为车轮与模拟月壤的接触面积； λ 为接地面积的长度； v 为实际速度； ω 为车轮转速。

考虑到轮刺对土壤的作用力 F_p (见图3)，有：

$$H = (cA + W \tan \varphi) \left[1 - \frac{k}{s\lambda} (1 - e^{-s\lambda/k}) \right] + F_p \quad (15)$$

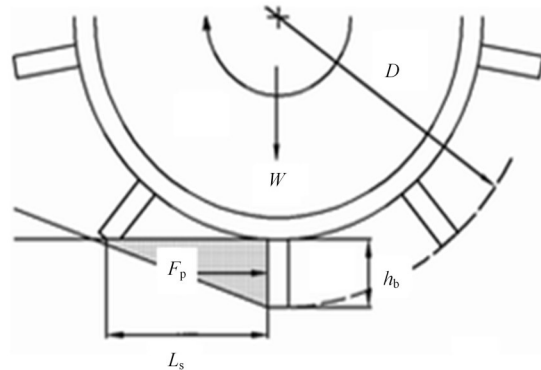


图 3 有轮刺刚性轮与土壤作用模型

Fig. 3 Interaction model of the spiked rigid wheel with soil

$$F_p = b \left(\frac{1}{2} \gamma_s h_b^2 N_\varphi + q h_b N_\varphi + 2 c h_b \sqrt{N_\varphi} \right) \quad (16)$$

$$N_\varphi = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (17)$$

式中: $q = W/A$ 为法向应力; φ 为土壤内摩擦角; c 为土壤内聚力。

根据地面对车轮的推力与车轮行驶阻力之差,即可求得挂钩牵引力 D_p 为:

$$D_p = H - F_{\text{tot}} \quad (18)$$

由式(8)(9)可知,月球车车轮沉陷量除了与车轮结构尺寸、土壤力学参数相关之外,还与滑转率呈线性关系。另外,由式(14)(18)可知,挂钩牵引力也与滑转率密切相关。

月球车在月面行驶时,不能直接获取挂钩牵引力,但通过图像处理可以直接获取车轮的滑转率和车辙深度。因此,本文将通过地面和月面对比试验的方式反演玉兔月球车的挂钩牵引力。

2 试验及结果分析

2.1 试验方法

为探究玉兔 2 号月面行驶状况,分析月球车的通过性,进行地面模拟试验。以玉兔 2 号备用筛网轮为试验对象,选用模拟月壤,获得梯度滑转率下的月球车车辙图像,将其作为对照分析在轨玉兔 2 号车辙图像,得到滑转率数据。

整车试验使用玉兔 2 号原型车移动系统,配置同玉兔 2 号一致的载荷,通过加载不同挂钩牵引力进行特定滑转率下的模拟试验,反演玉兔 2 号的月面行走状况,车辙图像反演试验流程如图 4 所示。

2.2 单轮土槽试验

通过单轮土槽试验,采集不同滑转率下的车

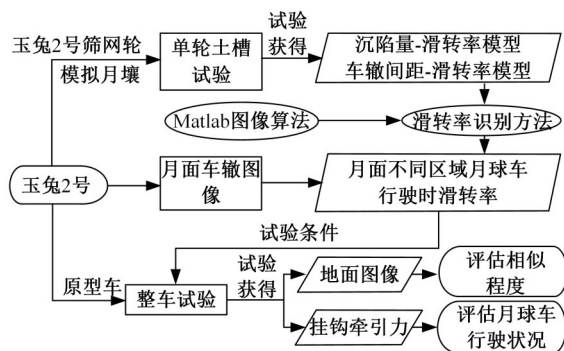


图 4 车辙图像反演试验流程

Fig. 4 Test process of rut image inversion

辙图像,获得车轮与月壤接触的标定数据。试验所用土壤为 SNJ-2 模拟月壤,力学参数如表 1 所示。

表 1 SNJ-2 模拟月壤力学参数值

Table 1 SNJ-2 lunar soil mechanical parameter values

类型	$k_c / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-(n+1)})$	$k_\varphi / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-(n+2)})$	n	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$	K / cm
SNJ-2	14	820	1.0	0.27	30.9	1.95
月壤	0~2.8	820	1.0	0~5.9	13~55	1.78

试验在上海宇航系统工程研究所月壤试验场进行,所用设备为 RUAG 土槽测试系统,如图 5 所示,该系统可通过设置车轮角速度和试验平台前进速度控制滑转率 s ,还可以通过调节游码位置控制轮地接触载荷 W ,驱动轴上配置扭矩传感器检测驱动力矩 M_R ,同时加载垂直方向位移传感器,精确检测车轮沉陷量 z ,测试所用车轮为玉兔 2 号月球车备用筛网轮。

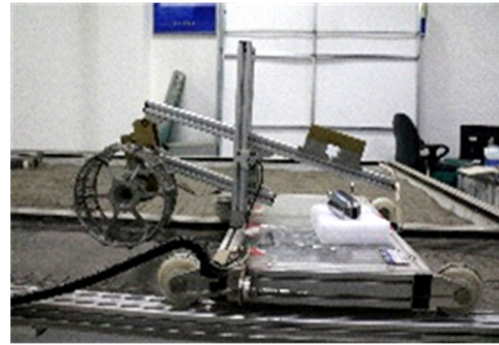


图 5 RUAG 土槽测试系统

Fig. 5 RUAG soil trough test system

试验时,车轮转速恒定为 200 m/h,设置不同试验台前进速度,得到不同的滑转率,依次进行 0%~90% 梯度下的试验。通过加载砝码的方式设定轮上载荷为 40 N,与玉兔 2 号月球车车轮载荷一致;通过相机采集车辙图像数据;通过扭矩和位移传感器实时采集沉陷量和车轮扭矩。

考虑重复通过对车辙深度和形貌影响,并且为确保标定数据的准确性,同一滑转率试验重复 3 次。试验共采集数据及车辙图像 30 组,以上图像和数据主要用于分析滑转率与车辙形貌的关系。

2.3 地面整车试验

为了再现月球车月面行驶状况,试验采用月球车移动系统原型车进行整车模拟,通过调整挂钩牵引力,采集特定滑转率下的移动系统的车辙信息,如图 6 所示。



图 6 整车牵引力试验

Fig. 6 Vehicle traction test

根据玉兔 2 号视觉载荷安装位置(见图 7),相机桅杆立于车体前方,镜头中心距车轮底部高度为 1605.5 mm。全景相机与导航左右目间距均为 270 mm,如图 8 所示。试验使用双目相机代替导航相机,原位置安装,保证地面模拟试验图像采集的一致性。

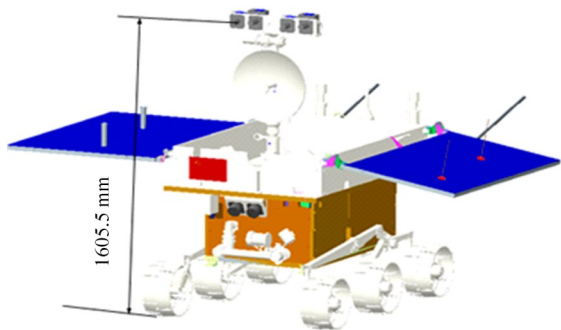


图 7 玉兔 2 号视觉载荷整体位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the overall position of YuTu-2 visual load

试验前,选取玉兔 2 号月球车在特定区域传回的车辙图像,分析车辙滑转率信息和导航相机拍摄时的位姿信息,如表 2 所示,控制车辆姿态和

表 2 玉兔 2 号月球车和导航相机姿态参数

Table 2 Attitude parameters of YuTu-2 rover and navigation camera

序号	输入条件	成像目标	支持中心规划结果	北京中心规划结果
1	巡视器处于 D' 点,姿态: 偏航 146.863°, 俯仰 -1.1°, 滚动 -0.35°	导航相机对休眠区域环拍	云台俯仰 -28°,桅杆偏航从 -170°到 -10°,间隔 -20°	云台俯仰 -29°,桅杆偏航从 -170°到 -10°,间隔 -20°
2	巡视器处于 A 点,姿态: 偏航 -90.348°, 俯仰 2.749°, 滚动 -1.048°	导航相机对 A' 点	云台俯仰 -32°,桅杆偏航从 -100°到 20°,间隔 20°	云台俯仰 -32°,桅杆偏航从 -100°到 20°,间隔 20°
3	巡视器处于 B' 点,姿态: 偏航 4.0543°, 俯仰 4.8095°, 滚动 -2.866°	导航相机对 C 点	云台俯仰 -28°,桅杆偏航从 -170°到 -10°,间隔 20°	云台俯仰 -29°,桅杆偏航从 -170°到 -10°,间隔 20°

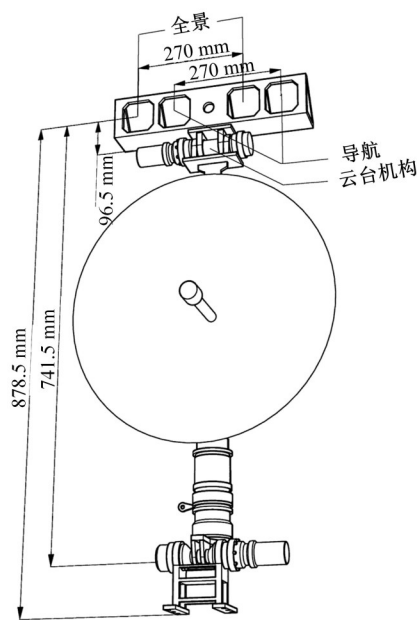


图 8 玉兔 2 号图像载荷具体安装位置

Fig. 8 Location of the navigation camera of YuTu-2

双目相机姿态,进行地面模拟试验。

试验时,通过标尺获取移动距离,用秒表计时,以此得到实际速度,试验车理论速度通过控制软件设定为 200 m/h,通过增大挂钩牵引力获取不同滑转率及车辙。

2.4 土槽试验结果分析

根据土槽试验,得到沉陷量与滑转率之间的关系,如图 9 所示。由图 9 可知,随着滑转率的增大,车轮沉陷量非线性增大,滑转率从 0.1 增至 0.5 时,沉陷量增加 8.46 mm;滑转率从 0.5 增至 0.9 时,沉陷量增加 25.58 mm。通过多项式拟合得到沉陷量 z (mm) 与滑转率 s 间的关系如下所示。

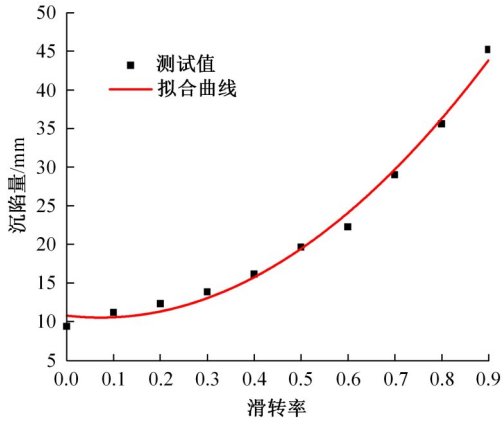


图 9 不同滑转率对应车轮沉陷
Fig. 9 Sinkage of different slip

$$z = 10.79 + 48.61s^2 - 10.79s \quad (19)$$

将表 2 模拟月壤参数代入式(5),计算得到沉陷量 $z_{0理论} = 8.9 \text{ mm}$;由单轮试验数据得到,当 $s = 0$ 时,沉陷量 $z_{0实} = 9.4 \text{ mm}$;对试验数据进行拟合,当 s 取 0 时,沉陷量 $z_{0拟合} = 10.79 \text{ mm}$ 。

试验数据表明,当车轮为纯滚动时(即 $s = 0$),理论计算与实际值接近,表明试验效果良好。但考虑滑移时,沉陷量 z 与滑转率 s 并非如式(6)所述,二者存在线性关系。由此表明,拟合公式(19)不具有普适性,但适合特定工况(筛网轮-月壤)的分析计算。

月球车月面行驶时,不能直接获取滑转率、车辙沉陷量,需要通过车辙进行识别。图 10 为车轮 3 次重复通过时不同滑转率下对应的车辙形貌。

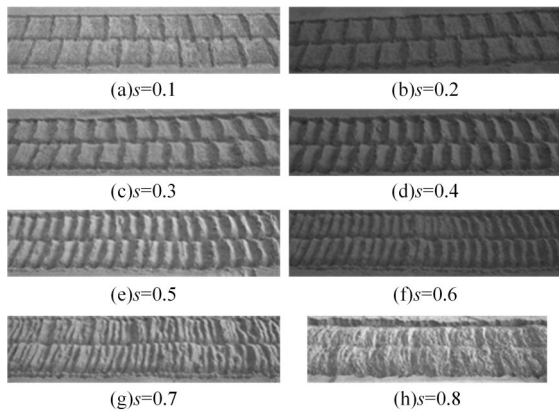


图 10 不同滑转率对应车辙图像

Fig. 10 Rutting images of different slip rates

基于 Matlab 图像处理识别车辙图像,提取车辙间距特征,得到不同滑转率对应的车辙形貌特征。

初始时,5 条直线位置是固定间距,为了计算

图中的车辙间距以及提高精准度,把 5 条直线用鼠标点选,并拖动到对应的相邻两个车辙轮刺痕迹上。拖动直线时,根据直线线段上的标识(1、2、3、4、5)顺序放置,如图 11 所示。然后双击直线,得到平均车辙间距。

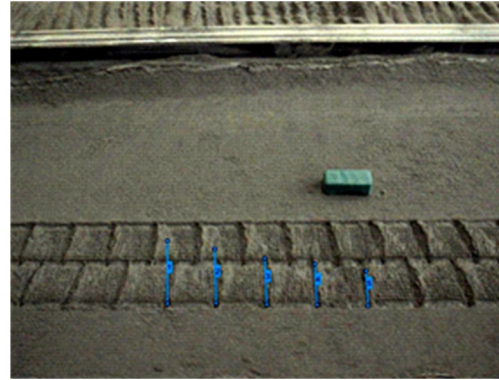


图 11 提取车辙间距特征

Fig. 11 Features of rut spacing

对图 10 所示不同滑转率图像进行识别,得到梯度滑转率下的车辙间距,如图 12 所示,车辙间距随滑转率的增大不断减小,呈线性关系。当滑转率在 70% 以下时,车辙形貌明显可见。当滑转率达到 80% 以上,车辙形貌已经完全被破坏,如图 10(h)所示。

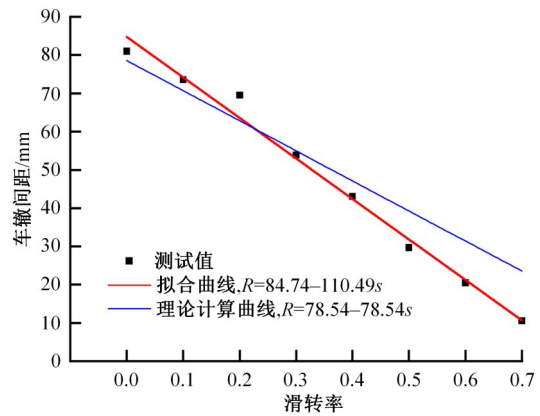


图 12 不同滑转率对应的车辙间距

Fig. 12 Rutting spacing of different slip rates

根据 1.1 节中已知轮刺数量和车轮直径,通过下式:

$$L = \frac{\pi d}{12} \quad (20)$$

计算得到相邻轮刺沿圆周距离 $L = 78.54 \text{ mm}$ 。根据试验数据得到,滑转率为 0 时,车辙间距 R_0 为 80.01 mm ,二者差距较小。

当车辙间距 R 和相邻轮刺距离 L 已知时,即可通过理论公式(21)求得滑转率 s :

$$s = \frac{L - R}{L} \quad (21)$$

式(21)可写为:

$$R = 78.54 - 78.54s \quad (22)$$

通过线性拟合得到车辙间距 R 与滑转率 s 间的关系如下所示:

$$R = 84.74 - 110.49s \quad (23)$$

由图 12 可得,随着滑转率的增大,式(22)与试验值差距增大,该式在低滑转率条件下较为准确 ($s < 0.2$)。在滑转率 $s > 0.2$ 条件下,根据式(22)所预测车辙间距远大于试验值,其主要原因是高滑转率下筛网轮的滑移使得车轮沉陷量较大,模拟月壤塌陷,车辙形貌一定程度上被破坏,理论公式(21)无法适用,需通过线性拟合对筛网轮和模拟月壤相互作用进行描述。

为了准确描述车辙间距 R 与滑转率 s 之间的关系,结合式(22)(23),以滑转率 $s = 0.2$ 为界限,采用两种计算方式进行计算,最终得到:

$$R = \begin{cases} 78.54 - 78.54s, & s \leq 0.2 \\ 84.74 - 110.49s, & 0.2 < s < 0.7 \end{cases} \quad (24)$$

通过单轮试验,定量描述 SNJ-2 模拟月壤沉陷量、车辙间距与滑转率间的关系,同时基于 Matlab 图像处理算法对车辙图像进行车辙间距识别,将结果代入式(24)中求得对应滑转率,从而进行整车试验。

2.5 整车试验结果分析

标准模型确定后,根据玉兔 2 号所传回图像进行整车模拟,整车姿态和双目相机姿态参考表 2 巡视器与云台变化角度信息。获得图像如图 13 所示。

为提高车辙特征识别的准确性,已知相机内外参数以及畸变参数,采用高点透视变换对整车试验照片和玉兔 2 号导航相机拍摄照片进行处理,如图 14 所示。

对处理后的图像进行车辙特征提取,如图 15 所示,每张图像采集 3 组数据,每组数据采集 5 个试验点,取平均值得到车辙间距值。得到 a_1, b_1, c_1 区域的车辙间距分别为 70.33、68.37、63.07 mm。根据式(24)得到玉兔 2 号月球车在 a_1, b_1, c_1 区域的滑转率分别为 10.45%、12.96%、19.70%。

地面模拟试验 a_2, b_2, c_2 区域,通过在整车后加挂砝码控制滑转率,进行多次试验测得 3 种滑转率下的挂钩牵引力为 177.03、181.62、194.47 N。

整车所进行的 3 组模拟地面试验在图像采集

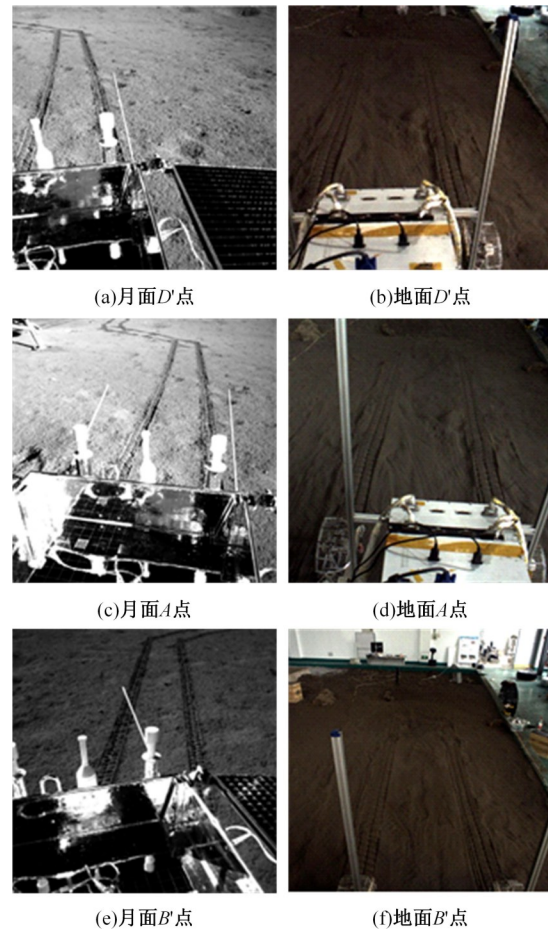


图 13 整车模拟试验

Fig.13 Vehicle simulation test

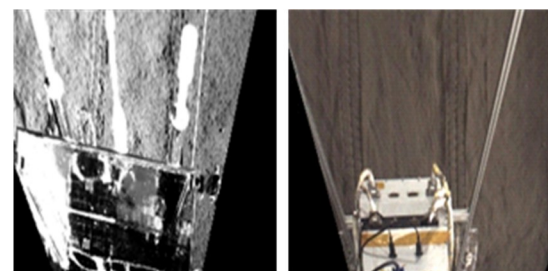


图 14 视角转换-A 点

Fig. 14 Perspective transformation-point A

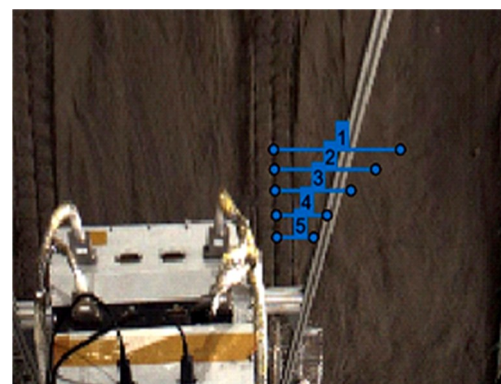


图 15 试验点采集

Fig. 15 Test site collection

和滑转率控制方面与实际保持一致,试验所用土壤根据已知月壤参数配置。因此,地面所测挂钩牵引力可以等效玉兔2号车辆牵引性能,在玉兔2号行走过程当中,当滑转率为10%~20%时,整车挂钩牵引力为177~194 N。

3 结 论

(1)通过土槽试验,建立了玉兔2号月球车车辙深度与滑转率、车辙宽度与滑转率的拟合关系模型。

(2)根据玉兔2号月球车车辙图像和计算模型,可知月面 a_1 、 b_1 、 c_1 区域月球车滑转率分别为10.45%、12.96%和19.70%。

(3)玉兔2号在月面行驶过程中,当滑转率为10%~20%时,整车挂钩牵引力为177~194 N。

参考文献:

- [1] Cherkasov I I, Shvarev V V. Soviet investigations of the mechanics of lunar soils[J]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1973, 10(4): 252-256.
- [2] Leonovich A K, Gromon V V, Rybakov A V, et al. Studies for lunar ground mechanical properties with the self-propelled lunokhod-1[R]. Moscow: Peredvizhnaya Laboratoriya na Luna-Lunokhod-1, 1971: 120-135.
- [3] Leonovich A K, Gromov V V, Rybakov A V, et al. Investigations of the mechanical properties of the lunar soil along the path of Lunokhod-1[R]. Berlin: COSPAR space research Ⅲ, 1972: 53-54.
- [4] Zacny K, Wilson J, Craft J, et al. Robotic Lunar Geotechnical Tool[M]. Honolulu: Earth and Space, 2010.
- [5] 韩鸿硕, 陈杰. 21世纪国外深空探测发展计划及进展[J]. *航天器工程*, 2008, 17(3): 1-22.
Han Hong-shuo, Chen Jie. 21st century foreign deep space exploration development plans and their progresses[J]. *Spacecraft Engineering*, 2008, 17(3): 1-22.
- [6] 崔平远, 徐瑞, 朱圣英, 等. 深空探测器自主技术发展现状与趋势[J]. *航空学报*, 2014, 35(1): 13-28.
Cui Ping-yuan, Xu Rui, Zhu Sheng-ying, et al. State of the art and development trends of on-board autonomy technology for deep space explore[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(1): 13-28.
- [7] 解杨敏, 季力, 魏祥泉, 等. 国内外行星表面巡视器自主导航技术研究[J]. *上海航天*, 2021, 38(1): 61-71.
Xie Yang-min, Ji Li, Wei Xiang-quan, et al. Domestic and overseas research status on autonomous navigation technology of planetary rovers[J]. *Aerospace Shanghai*, 2021, 38(1): 61-71.
- [8] Team R. Characterization of the martian surface deposits by the Mars pathfinder rover, sojourner[J]. *Science*, 1997, 278(5344): 1765-1768.
- [9] Moore H J, Bickler D B, Crisp J A, et al. Soil-like deposits observed by Sojourner, the pathfinder rover[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 1999, 104(E4): 8729-8746.
- [10] Sullivan R, Anderson R, Biesiadecki J, et al. Cohesions, friction angles, and other physical properties of martian regolith from mars exploration rover wheel trenches and wheel scuffs[J/OL]. [2021-11-02]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2010JE003625>
- [11] Arvidson R E, Anderson R C, Bartlett P, et al. Localization and physical properties experiments conducted by Spirit at Gusev crater[J]. *Science*, 2004, 305(5685): 821-824.
- [12] Arvidson R E, Bonitz R G, Robinson M L, et al. Results from the mars phoenix lander robotic arm experiment[J/OL]. [2021-11-03]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2009JE003408>
- [13] Ono M, Fuchs T J, Steffy A, et al. Risk-aware planetary rover operation: autonomous terrain classification and path planning[C]//2015 IEEE Aerospace Conference, Monoana, USA, 2015: 1-10.
- [14] Huang G. Visual-inertial navigation: a concise review[C]//2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Monteral, Canada, 2019: 9572-9582.
- [15] Iagnemma K, Kang S, Brooks C, et al. Multi-sensor terrain estimation for planetary rovers[C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics, and Automation in Space, NARA, Japan, 2003: No. 12273618.
- [16] Reina G, Ojeda L, Milella A, et al. Wheel slippage and sinkage detection for planetary rovers[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2006, 11(2): 185-195.
- [17] Cross M, Ellery A, Qadi A. Estimating terrain parameters for a rigid wheeled rover using neural networks[J]. *Journal of Terramechanics*, 2013, 50(3): 165-174.
- [18] 崔平远, 刘冰, 居鹤华. 月壤力学参数在线估计算法研究[J]. *计算机测量与控制*, 2008, 16(2): 245-269.
Cui Ping-yuan, Liu Bing, Ju He-hua. Research on mechanical parameters online estimation of lunar soil

- [J]. *Computer Measurement&Control*, 2008, 16(2): 245-269.
- [19] 李萌, 高峰, 孙鹏, 等. 月壤力学参数反求及试验验证[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(9): 1081-1805.
- Li Meng, Gao Feng, Sun Peng, et al. Mechanical parameters reverse estimation of lunar soil and experimental verification[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(9): 1081-1805.
- [20] 薛龙, 邹猛, 李建桥, 等. 基于轮地作用参数和 PLSDA 方法的月壤力学性能评估[J]. *航空学报*, 2015, 36(11): 3751-3758.
- Xue Long, Zou Meng, Li Jian-qiao, et al. Mechanical performance estimation of lunar soil using wheel-soil interaction parameter and PLSDA[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(11): 3751-3758.
- [21] Ding L, Gao H, Deng Z, et al. Slip ratio for lugged wheel of planetary rover in deformable soil: definition and estimation[C] //2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, ST. Louis, USA, 2009: 3343-3348.
- [22] 丁亮, 高海波, 邓宗全, 等. 基于应力分布的月球车轮地相互作用地面力学模型[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(7): 49-55.
- Ding Liang, Gao Hai-bo, Deng Zong-quan, et al. Terramechanics model for wheel-terrain interaction of lunar rover based on stress distribution[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(7): 49-55.
- [23] 李楠, 丁亮, 高海波, 等. 基于视觉检测技术的星球探测车车轮滑转率检测方法[C]//第三十二届中国控制会议, 西安, 2013: 3673-3679.
- [24] 李楠, 高海波, 吕凤天, 等. 车辙图像频域分析及星球车车轮滑转率估计方法[J]. *宇航学报*, 2016, 37(11): 1356-1364.
- LI Nan, Gao Hai-bo, Lv Feng-tian, et al. Wheel trace imprint image frequency domain analysis and rover wheel slip ratio estimation[J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(11): 1356-1364.
- [25] 黄晗, 许述财, 张金换, 等. 基于轮辙非接触测量的月壤非参数化识别方法[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2019, 49(2): 366-374.
- Huang Han, Xu Shu-cai, Zhang Jin-huan, et al. Non-parametric identification method for lunar regolith based on rut non-contact measurement[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(2): 366-374.
- [26] 黄晗, 李建桥, 陈百超, 等. 基于地面力学的筛网轮牵引通过性研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(增刊1): 464-470.
- Huang Han, Li Jian-qiao, Chen Bai-chao, et al. Traction trafficability of wire mesh wheel based on terramechanics[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(Sup. 1): 464-470.
- [27] 陈百超, 邹猛, 党兆龙, 等. CE-3月球车筛网轮月面沉陷行为试验[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2019, 49(6): 1836-1843.
- Chen Bai-chao, Zou Meng, Dang Zhao-long, et al. Experiment on pressure-sinkage for mesh wheels of CE-3 lunar rover on lunar regolith[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(6): 1836-1843.
- [28] 李建桥, 黄晗, 党兆龙, 等. 轻载荷条件下的筛网轮沉陷[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2015, 45(1):167-173.
- Li Jian-qiao, Huang Han, Dang Zhao-long, et al. Sinkage of wire mesh wheel under light load[J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2015, 45(1):167-173.
- [29] 黄晗. 深空探测车辆筛网轮牵引通过性研究[D]. 长春: 吉林大学生物与农业工程学院, 2017.
- Huang Han. Study on traction trafficability for wire mesh wheel of planetary exploration rovers[D]. Changchun: College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, 2017.
- [30] Bekker M G. Theory of Land Locomotion[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1956.