0254-6124/2008/28(4)-340-05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Tao Jianguo, Hu Ming, Gao Haibo, Deng Zongquan, Quang Qiquan. Modeling and measurement of rigid wheel-soil interaction for a lunar rover. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(4): 340~344

月球车刚性车轮与土壤相互作用的力学模型与测试*

陶建国 胡 明 高海波 邓宗全 全齐全

(哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001)

摘 要 基于车辆地面力学中土壤的承压、剪切特性以及土力学中被动土压力理论，建立了月球车刚性车轮在松软土壤上前进和转向的轮地作用力学模型；通过数值计算，分析了土壤参数变化及车轮运动滑转率变化对挂钩牵引力、驱动力矩和转向力矩的影响；设计了一套车轮性能参数测试系统，对所设计的一种刚性车轮在松软土壤上运动的力学特性进行了初步的实验测试，并与所建立的力学模型进行了验证分析.

关键词 月球车；刚性车轮；轮地作用；力学模型；测试系统

中图法分类号 V 44

Modeling and Measurement of Rigid Wheel-soil Interaction for a Lunar Rover

TAO Jianguo HU Ming GAO Haibo DENG Zongquan QUANG Qiquan

(*School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001)

Abstract Based on soil's press-sinkage and shear models of terramechanics and passive earth pressure of soil mechanics, mathematical models of wheel-soil interaction are constructed for a rigid wheel of lunar rover moving or steering on deformable soil. For analysis of effect of soil parameters and wheel slips to rigid wheel locomotion, the wheel's performance parameters on different soil are computed through these models, such as drawbar pull, moving torque and steering torque to different slips. A novel test-bed is set up to test wheel's performance parameters, and experimental results of a rigid wheel on the soil validate the effectiveness of presented models.

Key words Lunar rover, Rigid wheel, Wheel-soil interaction, Mechanic characteristic, Test-bed

1 引言

执行未来着陆探测任务的月球探测车应具有良好的地形适应性. 月球探测车的运动性能在很大程度上取决于探测车的车轮与月表土壤作用的力学特性, 因而对此进行深入研究非常重要. 美国 MIT 的 Shibly 和 Iagnemma 对车轮与土壤的作用性能及土壤参数的在线检测进行了大量的研究 [1],[2]. 加拿大 Bauer 等 [3] 使用德国汉堡大学开发的车轮土壤接触模型软件预测了车轮的挂钩牵引力、转矩等. Andrade[4] 使用有限元法建立了土壤变形过程的模型. Wanjii[5] 等使用土壤的粘弹性模型建立了车轮下面土壤的应力分布模型, 预测了车轮的性能. Reina 等 [6] 在准确检测车轮的滑转率和下陷深度方面做了改进, 取得了较好的效果.

本文将基于车辆地面力学和土力学的理论, 对

* 长江学者和创新团队发展计划 (IRT0423), 高等学校学科创新引智计划 (B07018) 和国家 863 计划 (2006AA04Z231) 共同资助
2007-09-28 收到原稿, 2008-04-03 收到修定稿

月球车刚性车轮与土壤相互作用的力学特性进行分析，建立相应的力学模型．基于此模型，分析和验证土壤参数对车轮力学性能的影响，并设计一套多功能车轮性能参数测试系统，对车轮与土壤相互作用的力学特性进行测试和对比分析．

2 车轮与土壤相互作用的力学模型

2.1 车轮滚动的力学模型

根据车辆地面力学的理论，我们将刚性车轮底面与土壤接触区域内的任意一点的作用力分解为切线方向的剪应力和法线方向的正应力，车轮的受力情况如图 1 所示．

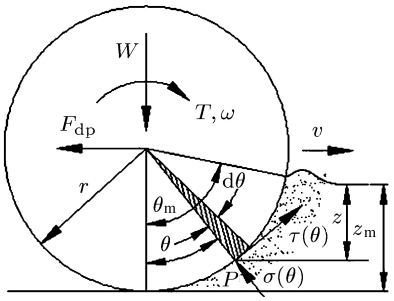


图 1 前进车轮与土壤作用模型

Fig.1 Model of onward wheel-soil Interaction

图 1 中 W 为施加在车轮上的重力， T 为车轮的前进转矩， $F_{\rm dp}$ 为车轮受到的挂钩牵引力， σ 为车轮底面在接触区域内任意一点 P 受到的正应力，τ 为车轮在该点受到的剪应力．根据 Bekker 的压力 - 下陷模型，正应力 σ 满足如下关系 [7]:

$$\sigma = \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi\right) z^n. \tag{1}$$

式中， k_c, k_φ, n 分别为土壤的内聚力模量、内摩擦模量和下陷指数； z 为压板下陷量； b 为压板与土壤接触面的短边长．

根据 Janosi 土壤剪切模型 [8], 剪应力 τ 满足如下关系：

$$\tau = \tau_{\max}(1 - {\rm e}^{-j/k}). \tag{2}$$

其中， k 为土壤的剪切变形模量， j 为剪切位移，$\tau_{\max}$ 为土壤的剪切强度，满足摩尔-库仑屈服准则：

$$\tau_{\max} = c + \sigma \tan\varphi. \tag{3}$$

其中， c 为土壤内聚力， φ 为土壤的内摩擦角． c 和 φ 可以通过剪切板试验获得．

由式 (2) 可以看出，车轮受到的剪应力 τ 与土壤的剪切位移 j 有关，而剪切位移 j 存在如下关系：

$$j = r[(\theta_{\rm m} - \theta) - (1 - s)(\sin\theta_{\rm m} - \sin\theta)]. \tag{4}$$

式中， r 为车轮半径； θ 为车轮接触点 P 处法线与铅垂线的偏角； $\theta_{\rm m}$ 为车轮的渐近角， s 为车轮的滑转率，通常定义为

$$s = (r\omega - v)/r\omega. \tag{5}$$

式中， ω 为车轮滚动的角速度， v 为车轮前进的线速度．

从以上的分析过程可以看出，车轮底面与土壤作用的正应力与剪应力的大小，随接触点 P 的位置不同而变化．根据图 1，对车轮可以给出水平和垂直方向的力平衡方程及对圆心的转矩平衡方程，有如下关系式：

$$W = rb\left[\int_0^{\vartheta_{\rm m}} \sigma(\theta)\cos\theta {\rm d}\theta + \int_0^{\vartheta_{\rm m}} \tau(\theta)\sin\theta {\rm d}\theta\right], \tag{6a}$$

$$F_{dp} = rb\left[\int_0^{\vartheta_{\rm m}} \tau(\theta)\cos\theta {\rm d}\theta - \int_0^{\vartheta_{\rm m}} \sigma(\theta)\sin\theta {\rm d}\theta\right], \tag{6b}$$

$$T = r^2 b\int_0^{\vartheta_{\rm m}} \tau(\theta){\rm d}\theta. \tag{6c}$$

通过以上各式，可求得车轮前进时的力学特性参量．

2.2 车轮转向的力学模型

车轮转向时受到的力矩可认为由两部分组成：一部分是由车轮底面和土壤之间的附着力引起的阻力矩 $T_{\rm s1}$，另一部分是由车轮侧面挤压土壤引起的阻力矩 $T_{\rm s2}$．

图 2 是假设以 ON 为转向轴线的车轮转向受力图．图 2 中 b 为车轮的宽度； r 为车轮的半径； $\theta_{\rm m}$ 为车轮的渐近角，其大小可以由式 (1) 确定； σ 为车轮底面的正应力，其大小可以由式 (3) 求出； $\tau_{\rm s}$ 为与正应力对应的车轮底面的附着力． $\tau_{\rm s}$ 与 σ 满足如下关系：

$$\tau_{\rm s}(\theta) = \mu\sigma(\theta). \tag{7}$$

其中， μ 为车轮与地面的附着系数．根据图 2，车轮转向时的底面附着阻力矩 $T_{\rm s1}$ 满足如下关系：

$$T_{\rm s1} = rb\int_0^{\theta_{\rm m}} \mu\sigma(\theta) r\sin\theta {\rm d}\theta. \tag{8}$$

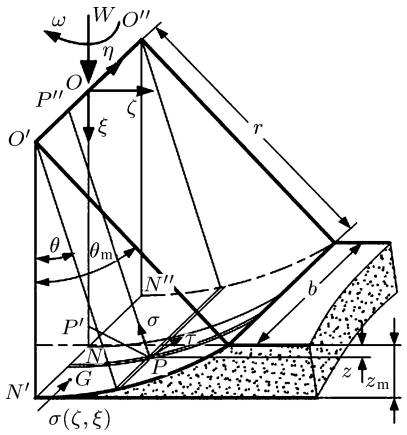


图 2 转向车轮与土壤作用模型

Fig.2 Model of steering wheel-soil interaction

车轮转向时，其侧面挤压土壤并使土壤剪切破坏从而产生压应力. 以轮轴上 O 点为原点，过 O 点的水平线和铅垂线分别为 ζ 轴和 ξ 轴，建立如图 2 所示的坐标系. 根据朗肯的被动土压力理论，并假设压应力沿水平方向线性分布，则车轮侧面与土壤接触区域内的任意一点 $G(\zeta,\xi)$ 处车轮受到的压应力为

$$\sigma_{\rm g}(\zeta,\xi)=\frac{\zeta[\gamma k_{\rm p}(\xi-r\cos\theta_{\rm m})+2c\sqrt{k_{\rm p}}]}{\sqrt{r^2-\xi^2}}. \tag{9}$$

式中， γ 为土壤的容重； $k_{\rm p}$ 为土壤的朗肯被动土压力系数，其大小为

$$k_{\rm p}={\rm tg}^2(45^\circ+\varphi/2), \tag{10}$$

则车轮受到的侧面挤压阻力矩 $T_{\rm s2}$ 为

$$T_{s2}=2\int_{r\cos\theta_{\rm m}}^{r}\int_{0}^{\sqrt{r^2-\xi^2}}\sigma_{\rm g}(\zeta,\xi)\zeta{\rm d}\zeta{\rm d}\xi. \tag{11}$$

车轮转向时的驱动力矩 $T_{\rm s}$ 应克服底面附着阻力矩 $T_{\rm s1}$ 和侧面挤压阻力矩 $T_{\rm s2}$, 有

$$\begin{aligned}T_{\rm s}=&rb\int_0^{\theta_{\rm m}}\mu\sigma(\theta)r\sin\theta{\rm d}\theta+\\&2\int_{r\cos\theta_{\rm m}}^{r}\int_{0}^{\sqrt{r^r-\xi^2}}\sigma_{\rm g}(\zeta,\xi)\zeta{\rm d}\zeta{\rm d}\xi.\end{aligned} \tag{12}$$

3 车轮力学特性参数的算例

为了分析土壤参数及车轮的滑转率对月球车车轮力学特性的影响，我们对车轮在不同土壤参数下的力学特性进行了计算. 这里采用三种有一定代表性的地表沙土，其特性参数如表 1 所示. 已知车轮及施加在其上的载荷总重 W 为 179 N, 车轮的直径为 256 mm, 宽度为 110 mm.

表 1 三种土壤的参数

Table 1 Parameters of three kinds of soil

	1#	2#	3#
c/(kPa)	1.0	0.5	0.4
φ/(°)	28	32	36
n	1	1	1
k_c/(kPa·m^{-n+1})	0.9	1.1	0.3
k_φ/(kPa·m^{-n})	1600	1750	1800
k/mm	20	17	12

利用表 1 中的土壤参数及前述各式可求出车轮的力学参量. 从式 (6) 可以看出，车轮总重 W 为车轮的渐近角 $\theta_{\rm m}$ 和滑转率 s 的函数，可采用迭代的方法计算出车轮在不同滑转率 s 时的 $\theta_{\rm m}$ 和 $z_{\rm m}$, 并将其带入到各力学参量计算式中，便求得在不同滑转率 s 下的挂钩牵引力 $F_{\rm dp}$、前进转矩 T 以及不同下陷深度 $z_{\rm m}$ 下的转向力矩 $T_{\rm s}$ 等.

根据计算结果，可得到三种土壤下车轮运动挂钩牵引力 $F_{\rm dp}$ 和滚动转矩 T 随滑转率 s 变化的关系曲线 (见图 3 和图 4). 同样，可计算得到三种土壤下车轮转向力矩 $T_{\rm s}$ 与下陷深度 $z_{\rm m}$ 的关系曲线 (见图 5).

从图 3∼5 可以看出，当滑转率 s 较小时，挂钩牵引力 $F_{\rm dp}$ 和滚动转矩 T 随滑转率 s 增加较快；但是，随着 s 的增大， $F_{\rm dp}$ 的增加速度逐渐减缓. 转向力矩随着下陷深度的增加而增大. 当土壤内摩擦角 φ 增大时，内摩擦模量 k_φ 变大，使车轮受到的土壤剪切力增大，则与之相关的挂钩牵引力 $F_{\rm dp}$ 、滚动转矩 T 和转向力矩 $T_{\rm s}$ 也随之增大.

4 车轮力学特性测试

4.1 测试系统概述

本文研制的车轮测试系统在参考了 MIT 的测试系统 [1],[2] 的基础上，增加了转向性能测试功能，能够测量出车轮的挂钩牵引力 $F_{\rm dp}$ 、车轮前进转矩 T 、车轮下陷量 $z_{\rm m}$ 以及车轮转向力矩 $T_{\rm s}$.

测试系统由测试台和数据采集系统组成. 测试台如图 6 所示. 其工作原理如下：将待测车轮安装于实验装置上，在滚动前进电机的驱动下，车轮在土槽中前进. 车轮前进的速度通过拖曳电机的角速

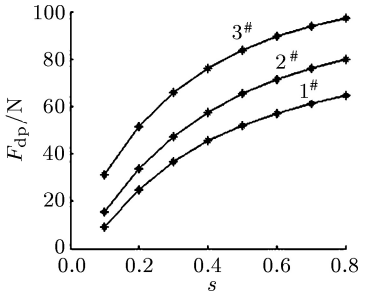


图 3 不同土壤参数及滑转率下的挂钩牵引力计算值

Fig.3 Calculated draw pull *vs.* soil parameter and slip ratio

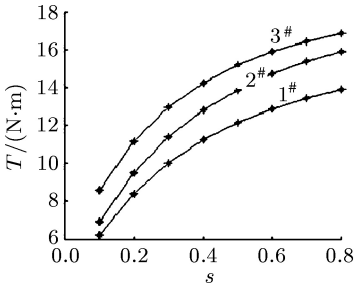


图 4 不同土壤参数及滑转率下的前进转矩计算值

Fig.4 Calculated moving torque *vs.* soil parameter and slip ratio

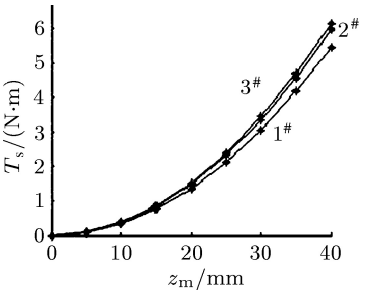


图 5 不同土壤参数及下陷深度下的转向力矩计算值

Fig.5 Calculated steering torque *vs.* soil parameter and sinkage

度间接测得，车轮滚动的角速度由驱动电机的码盘测得，这样车轮的滑转率便可以根据式 (5) 计算设定. 通过调节拖曳电机的转速和力矩从而给车轮施加不同的阻力，同时控制车轮滚动的角速度，可以使车轮在不同滑转率下运动. 系统中的扭矩传感器可测出车轮的前进转矩 T, 6 维力/力矩传感器可测出车轮的挂钩牵引力 F_{dp} 和车轮的转向力矩 T_s, 沉降位移传感器可以测出车轮的下陷量 z_m. 车轮及其负载的总重由 6 维力/力矩传感器测出，并通过加减砝码来调整.

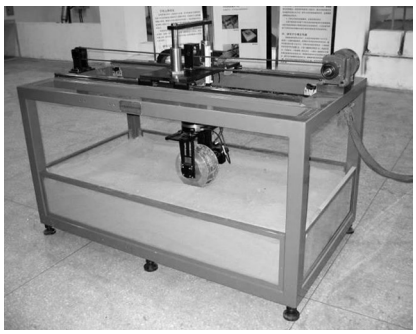


图 6 车轮与土壤作用特性测试台

Fig.6 Test-bed of wheel-soil interaction

数据采集系统需要完成前进驱动电机、拖拽电机以及转向驱动电机的控制，并能够采集扭矩传感器、位移传感器以及 6 维力/力矩传感器的数据. 数据采集系统包括硬件和软件两部分.

数据采集系统的硬件构成如图 7 所示. 图 7 显示， 6 维力/力矩传感器的信号由自带的采集系统接入计算机，扭矩传感器、直线位移传感器以及拖拽电机编码器的信号由数据采集卡 2 进行采集，并传入计算机. 计算机通过两个串口分别与前进驱动电机和转向驱动电机的驱动器相连，发送命令来控制前进驱动电机和转向驱动电机. 计算机通过数据采集卡 2 与拖拽电机的驱动器相连，数据采集卡 2 的一路 A/D 输出作为拖拽电机的控制信号.

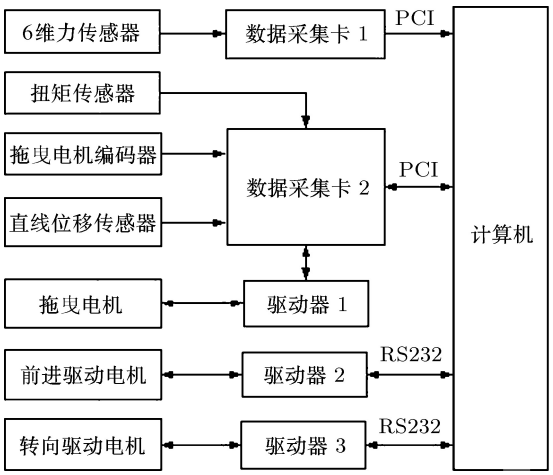


图 7 数据采集系统

Fig.7 Schematic of the control/data processing system

数据采集软件是在 Microsoft Visual C++ 中开发的一个终端软件，主要包括以下几个功能模块：(1) 系统各功能的分别调试及联调；(2) 发送前进驱动电机、转向驱动电机以及拖拽电机的运行控制命令，并反馈各电机的运行状态；(3) 采集 6 维力/力矩传感器、扭矩传感器以及直线位移传感器的检测数据，并进行显示和存储；(4) 实时监测系统运行的状态.

4.2 测试实验结果及分析

为了验证建立的车轮与土壤作用的数学模型，本文利用研制的车轮力学特性测试系统在实验土壤

上进行了初步的实验测试.

根据文献 [9] 可知, 月表土壤的内聚力 c 普遍值为 0.1~1 kPa, 内摩擦角 φ 普遍值为 35° ~ 50°, 容重 γ 普遍值为 0.9~1.9 g·cm^{-3}. 本文采用与月表土壤较相近的 3# 土壤为实验土壤, 其主要土壤参数见表 1. 此外, 土壤的容重 $\gamma = 15.65\,\mathrm{kN/m^3}$, 朗肯被动土压力系数 $k_\mathrm{p} = 3.82$. 车轮几何参数与前面算例相同.

通过反复实验, 测得了车轮在该实验土壤上运动时, 不同载荷和滑转率下的力学特性参量, 并根据测量结果绘制相应的关系曲线, 与模型计算值进行的比较如图 8 和图 9 所示.

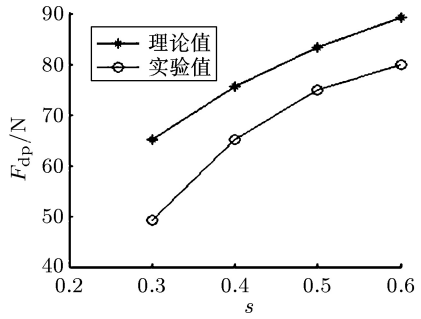


图 8 车轮挂钩牵引力与滑转率关系曲线比较

Fig.8 Draw pulls contrast *vs.* slip ratio of wheel

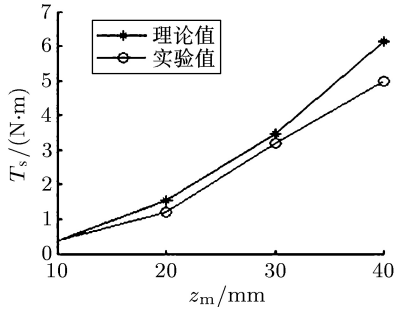


图 9 车轮转向力矩与下陷深度关系曲线比较

Fig.9 Steering torque contrast *vs.* sinkage of wheel

比较模型计算值与试验值可知, 挂钩牵引力 F_dp 的最大相对误差为 12.4%, 转向力矩 T_s 的最大相对误差为 19.8%. 从而说明, 所建立的模型基本正确. 在车轮滑转率较大或下陷深度较大时, 试验值较模型计算值减缓趋势更明显, 二者误差较大.

5 结论

应用地面力学相关理论和土力学中被动土压力理论, 建立了车轮在前进与转向两种运动状态下与土壤作用的力学模型. 利用所建模型, 以车轮在三种土壤上的运动为例, 计算了车轮的挂钩牵引力、前进转矩、转向力矩等参量. 计算结果表明, 土壤的内摩擦特性参量的增大会使挂钩牵引力、转矩、转向力矩明显增大, 滑转率的增加也会使车轮的这些参数增大. 利用研制的车轮力学特性测试系统在实验土壤上的试验, 初步验证了所建力学模型的正确性.

参考文献

[1] Shibly H, Iagnemma K. An equivalent soil mechanics formulation for rigid wheels in deformable terrain with application to planetary exploration rovers. *J. Terramech.*, 2005, (42):1~13

[2] Iagnemma K, Shibly K. On-line terrain parameter estimation for planetary rovers. *Proc. IEEE Int. Conf. Rob. Aut.*, 2002, (30):3142~3147

[3] Bauer R, Leung W. Experimental and simulation results of wheel-soil interaction for planetary rovers. In: Proceeding of 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Canada, 2005, 586~591

[4] Andrade G, Ben Amar F *et al.* Modeling Robot-Soil Interaction for Planetary Rover Motion Control. In: Proceeding of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Canada, 1998, 576~581

[5] Wanjii S, Hiroma T *et al.* Prediction of wheel performance by analysis of normal and tangential stress distributions under the wheel-soil interface. *J. Terramech.*, 1997, **34**(3):165~186

[6] Reina Giulio, Lauro Ojeda *et al.* Wheel slippage and sinkage detection for planetary rovers. *IEEE/ASME Trans. Mechat.*, 2006, **11**(2):185~195

[7] Bekker M G. Theory of Land Locomotion. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1956

[8] Janosi Z, Hanamoto B. Analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils. In: Proceeding of the 1st International Conference on Terrain-Vehicle Systems, Turino, 1961. 707~736

[9] Carrier W D, O lhoeft G R, Mendell W. Physical properties of the lunar surface. In: Heiken G H *et al* ed. Lunar Source Book. New York: Cambridge University Press, 1991. 475~594