

与沉陷相关联的星球车挂钩牵引力模型研究*

丁亮亮¹ 肖杰^{1,2} 宗魏^{1,2} 刘殿富¹ 杨晓青¹ 邹猛³

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109; 2. 上海市空间飞行器机构重点实验室, 上海 201108;

3. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025)

摘要: 通过轮壤作用关系的线性化推导, 建立简洁的挂钩牵引力模型用于星球车在轨沉陷预估。以玉兔号月球车为例, 利用其车轮土槽试验进行了模型修正和验证, 从而建立了用于星球车在轨沉陷预估的模型, 验算得到修正后的挂钩牵引力模型的拟合值与土槽实测值的误差小于 9%。提出的模型可以为星球车在沉陷前进行预警评估, 也可为发生沉陷后的地面模拟脱困试验提供沉陷状态数据。该研究方法还可用于轮式机械在沙漠、滩涂等松软地面执行各种操作的快速沉陷预估。

关键词: 星球车 沉陷预估 土槽试验 沉陷量 挂钩牵引力

中图分类号: U461; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0037-06

引言

星球车沉陷是指星球车在一定载荷作用下通过各种星球表面(如松软月球、火星的路面、坡面、环形坑等)引起的下陷。2005年5月11日, 机遇号火星车陷在火星表面的一个松软的沙堆上, 危及它的科学探测使命^[1]。2009年5月, “勇气号”火星车也发生了车轮沉陷非常深的情况, 使车子难以移动^[2]。我国首辆月球车“玉兔号”在执行月面巡视探测任务过程中, 也遇到了类似沉陷量过大的情况。由于星球车沉陷对于其移动性能的影响是致命的, 当遇到会产生过度沉陷的星球表面地形时, 对于沉陷预估的研究是非常必要的。

早期的沉陷研究主要通过悬架关节设置高精度传感器来获得一个车轮相对另一个车轮的沉陷^[3]。美国麻省理工大学 Brooks 等提出运用视觉系统辨识相关参数估计沉陷及土壤参数值的设想^[4-6]。然而实际运用时受星球车传感器配置、悬架、视觉系统、能耗及计算速度等诸多方面的限制^[7-9]。目前沉陷理论研究表明, 不能孤立地将沉陷量作为判断通过性能的唯一指标, 因为沉陷量并不能反映车辆的通过性能^[10-16], 而需要将挂钩牵引力与沉陷一起联合考虑, 才能评估车辆所处环境的安全程度。星球车沉陷估算往往采用离线的方法, 星球车按照某一步骤在某一地区进行大量的行走试验, 数据通过传感器记录下来, 返回地面控制台进行

演算^[17]。演算时星球车继续在危险区域行走, 有可能造成过度沉陷, 因此建立简洁的在轨沉陷预估模型是必要的。

本文通过轮壤作用关系的线性化推导建立与沉陷量相关的挂钩牵引力模型用于星球车在轨的沉陷预估, 并利用车轮土槽试验数据进行模型修正和验证, 进行基于该模型的星球车沉陷干预方法研究。

1 轮壤作用力和沉陷量的关系

理论上基于轮下应力分布的挂钩牵引力 D_p 与车轮载荷 W 为^[18-19]

$$D_p = rb \int_0^{\theta_1} (\tau(\theta) \cos\theta - \sigma(\theta) \sin\theta) d\theta \quad (1)$$

$$W = rb \int_0^{\theta_1} (\tau(\theta) \sin\theta + \sigma(\theta) \cos\theta) d\theta \quad (2)$$

式中 r ——车轮半径 b ——车轮宽度

$\sigma(\theta)$ ——车轮底面在接触区域内任一点 P 受到的正应力(与地面垂线夹角为 θ)

$\tau(\theta)$ ——车轮在该点受到的剪应力

θ_1 ——车轮渐近角

车轮驱动受力如图 1 所示。

由式(1)可知, 通过星球表面土壤参数内聚力 c 和内摩擦角 φ 得到 σ 和 τ , 从而可计算出挂钩牵引力 D_p 。这些参数理论上是可以测量得到的, 但是在星球车在轨工作时实施起来比较困难。

挂钩牵引力的主要影响因素为: 土壤特征、车轮

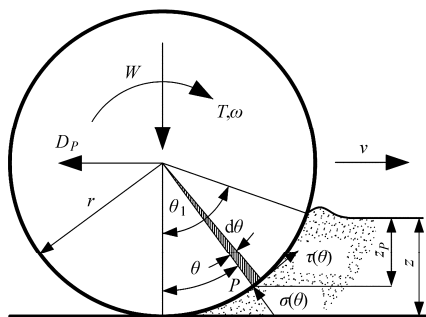


图1 车轮驱动受力图

Fig.1 Force diagram of wheel rolling

属性和操纵条件。一旦这些影响因素确定下来,各种轮壤作用的力、力矩以及沉陷量都可以通过计算获得。基于驱动力矩 T , 沉陷量 z 和挂钩牵引力 D_p 均是土壤特征、车轮属性和操纵条件的函数,因此本文建立三者间的关系,以便通过驱动力矩 T 和沉陷量 z 计算出挂钩牵引力 D_p 。

为建立上述关系,对式(1)进行线性化处理,设 θ_m 为车轮底面在接触区域内最大正应力 σ_{\max} 与最大剪应力 τ_{\max} 处,则当 $0 \leq \theta \leq \theta_m$ 时,有

$$\sigma_1(\theta) = \frac{2\theta}{\theta_1} \sigma_{\max} \quad (3)$$

$$\tau_1(\theta) = \frac{2\theta}{\theta_1} \tau_{\max} \quad (4)$$

当 $\theta_m \leq \theta \leq \theta_1$ 时,有

$$\sigma_2(\theta) = \frac{2(\theta_1 - \theta)}{\theta_1} \sigma_{\max} \quad (5)$$

$$\tau_2(\theta) = \frac{2(\theta_1 - \theta)}{\theta_1} \tau_{\max} \quad (6)$$

将式(3)、(4)与式(5)、(6)代入式(1),可得

$$D_p = \frac{2rb}{\theta_1} \left[\left(2\cos \frac{\theta_1}{2} - \cos\theta_1 - 1 \right) \tau_{\max} - \left(2\sin \frac{\theta_1}{2} - \sin\theta_1 \right) \sigma_{\max} \right] \quad (7)$$

式(7)中, τ_{\max} 和 σ_{\max} 可分别通过驱动力矩 T 和车载载荷 W 的计算获得

$$\tau_{\max} = \frac{2T}{r^2 b \theta_1} \quad (8)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\frac{\theta_1}{2r} W - \left(2\sin \frac{\theta_1}{2} - \sin\theta_1 \right) \frac{2T}{r^2 b \theta_1}}{2\cos \frac{\theta_1}{2} - \cos\theta_1 - 1} \quad (9)$$

将式(8)与式(9)代入式(7),可得

$$D_p = \frac{\left(2\cos \frac{\theta_1}{2} - \cos\theta_1 - 1 \right)^2 + \left(2\sin \frac{\theta_1}{2} - \sin\theta_1 \right)^2}{2\cos \frac{\theta_1}{2} - \cos\theta_1 - 1} \cdot$$

$$\frac{4}{\theta_1^2} \frac{T}{r} - \frac{2\sin \frac{\theta_1}{2} - \sin\theta_1}{2\cos \frac{\theta_1}{2} - \cos\theta_1 - 1} W \quad (10)$$

为避免过度沉陷,车轮沉陷 z 作业在 $0 \leq z \leq r/2$ 的区域内,因此有 $\theta_1 = \arccos(1 - z/r) < 60^\circ$, 所以

$$2\sin(\theta_1/2) - \sin\theta_1 \approx \theta_1^3/8$$

$$2\cos(\theta_1/2) - \cos\theta_1 - 1 \approx \theta_1^2/4$$

故式(10)可进行简化为

$$D_p = \left(1 + \frac{\theta_1^2}{4} \right) \frac{T}{r} - \frac{\theta_1}{2} W \approx \frac{T}{r} - \frac{\theta_1}{2} W \quad (11)$$

又因为 $\theta_1 \approx 2z/r$, 即式(9)可变换为

$$\frac{D_p}{W} = \frac{T}{rW} - \frac{z}{r} \quad (12)$$

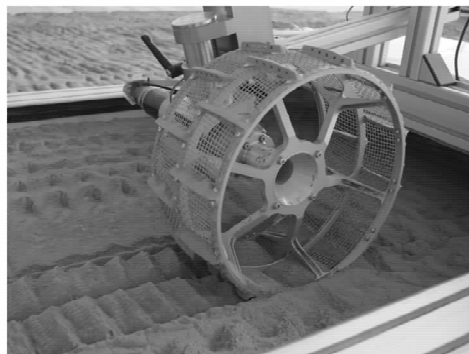
式(12)代表了挂钩牵引力 D_p 、驱动力矩 T 、负荷 W 和沉陷 z 四者之间的函数关系,可称为星球车挂钩牵引力模型,作为星球车沉陷预估模型时,其简单的特点使星球车进行在轨沉陷预估的实时性可以得到保证。

2 星球车挂钩牵引力模型修正

为验证式(12)模型的正确性,通过玉兔号月球车车轮的地面车轮土槽试验进行验证,见图2,玉兔号月球车筛网轮轮径为 300 mm, 轮宽为 150 mm, 24



(a)



(b)

图2 车轮土槽试验

Fig.2 Wheel soil-bin test

(a) 车轮台架试验装置 (b) 参试玉兔号月球车筛网轮

个棘爪在轮面均布,棘爪高度为 10 mm,土槽试验台为从瑞士华格公司引进的 LRET-1 型专用轮壤作用测试设备。

玉兔号月球车筛网轮分别在 3、7、10、15、20 kg 载荷条件下于吉林大学研制的 JLU-2 型模拟月壤^[20-21]上进行车轮土槽试验。

以月球车车轮在 3 kg 载荷下的试验结果为研究对象,运用式(12)对挂钩牵引力系数进行拟合,可以得到拟合值。车轮土槽试验测得的挂钩牵引力系数与拟合系数对比参见表 1。表 1 中上述两者存在差异,需要引入修正系数,以使拟合的误差最小。

表 1 月球车车轮在 3 kg 垂直载荷下土槽试验数据

Tab.1 Experimental data of wheel soil-bin test at 3 kg vertical load

序号	滑转率	沉陷系数	驱动系数	挂钩牵引力系数 K_{DP}	拟合值 K'_{DP}
1	0.060	0.076	0.197	-0.051	0.121
2	0.100	0.078	0.354	0.104	0.276
3	0.140	0.082	0.483	0.232	0.400
4	0.180	0.090	0.561	0.290	0.472
5	0.220	0.097	0.629	0.327	0.532
6	0.260	0.106	0.663	0.388	0.557
7	0.300	0.113	0.704	0.392	0.591
8	0.340	0.122	0.740	0.397	0.618
9	0.380	0.131	0.744	0.457	0.613
10	0.420	0.138	0.771	0.445	0.633
11	0.460	0.146	0.798	0.463	0.652
12	0.500	0.152	0.805	0.467	0.653
13	0.540	0.156	0.824	0.490	0.669
14	0.580	0.164	0.830	0.524	0.666
15	0.620	0.175	0.826	0.522	0.651
16	0.660	0.186	0.833	0.526	0.646

注:沉陷系数为 z/r ,驱动系数为 $T/(rW)$, $K_{DP} = D_p/W$, $K'_{DP} = T/(rW) - z/r$ 。

为获得其修正值,将式(12)改写为

$$\frac{D_p}{W} = C_1 \frac{T}{rW} + C_2 \frac{z}{r} + C_3 \quad (13)$$

为获得式(13)中参数 C_1 、 C_2 、 C_3 ,将式(13)改写成

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = \mathbf{B} \quad (14)$$

$$\text{其中 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \left(\frac{T}{rW}\right)_1 & \left(\frac{Z}{r}\right)_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{T}{rW}\right)_n & \left(\frac{Z}{r}\right)_n & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \left(\frac{D_p}{W}\right)_1 \\ \vdots \\ \left(\frac{D_p}{W}\right)_n \end{bmatrix}$$

为计算 C_1 、 C_2 、 C_3 ,则

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B} \quad (15)$$

将表 1 的数据代入式(15)可计算获得 3 个参

数的修正项 $\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ -0.2 \end{bmatrix}$,也即式(12)修正为

$$\frac{D_p}{W} = \frac{T}{rW} - \frac{z}{r} - 0.2 \quad (16)$$

其修正后的拟合值与试验值的对比如图 3 所示。

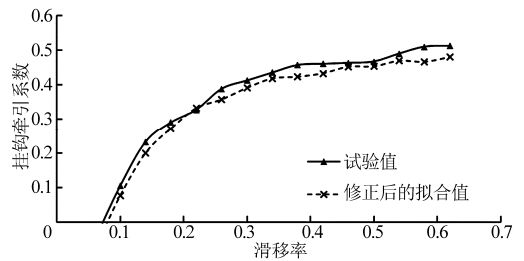


图 3 修正后的拟合值和试验值的对比曲线

Fig.3 Contrast curves of test value and fitted value corrected

与月球车车轮在 3 kg 载荷条件下类似,其余载荷条件下(7、10、15、20 kg)也要进行相应的修正,这里不再赘述。各载荷下修正结果如表 2 所示。

表 2 全载荷下模型的修正

Tab.2 Corrected function at all loads

序号	载荷/kg	修正后的挂钩牵引力模型
1	3	$\frac{D_p}{W} = \frac{T}{rW} - \frac{Z}{r} - 0.2$
2	7	$\frac{D_p}{W} = \frac{T}{rW} - \frac{Z}{r} - 0.15$
3	10	$\frac{D_p}{W} = \frac{T}{rW} - \frac{Z}{r} - 0.13$
4	15	$\frac{D_p}{W} = \frac{T}{rW} - \frac{Z}{r} - 0.13$
5	20	$\frac{D_p}{W} = \frac{T}{rW} - \frac{Z}{r} - 0.13$

各载荷下挂钩牵引系数的试验值与修正后的拟合值对比关系如图 4 所示,其中挂钩牵引力修正模型的拟合值与其土槽实测值的误差最大为 9%。

在各种加载条件下,修正系数 C_3 在 -0.20 ~ -0.13 之间,并且随着载荷 W 的增加,修正系数 C_3 呈增大趋势。且根据试验数据拟合求得 C_3 与载荷 W 的关系式为

$$C_3 = 4.026 \times 10^{-5} W^3 - 1.892 \times 10^{-3} W^2 + 2.876 \times 10^{-2} W - 0.2707 \quad (17)$$

各载荷下通过式(15)的计算值如表 3 所示,可

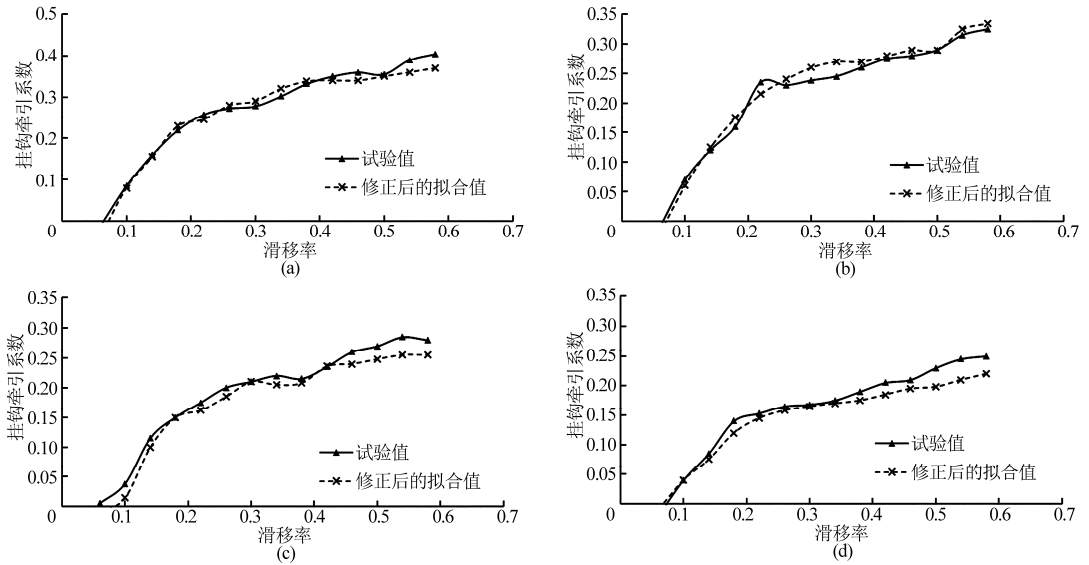


图4 其他载荷修正后的拟合值和试验值的对比曲线

Fig. 4 Contrast curves of test value and fitted value corrected at other loads

(a) 7 kg 垂直载荷 (b) 10 kg 垂直载荷 (c) 15 kg 垂直载荷 (d) 20 kg 垂直载荷

见其最大误差小于2%。

表3 各载荷下计算式拟合误差

Tab.3 Error of calculation mode at all loads

序号	载荷/kg	试验值	式(15)计算值	误差/%
1	3	-0.20	-0.200 4	0.19
2	7	-0.15	-0.148 3	-1.14
3	10	-0.13	-0.132 0	1.57
4	15	-0.13	-0.129 1	-0.69
5	20	-0.13	-0.130 2	0.15

因此,玉兔号月球车筛网轮在JUL-2型模拟月壤上牵引力系数函数可写为

$$\frac{D_p}{W} = \frac{T}{rW} - \frac{z}{r} + C_3 \quad (18)$$

3 利用沉陷预估模型进行沉陷干预

通过式(18)便可以定量地分析星球车的地形通过性与挂钩牵引力 D_p 、车轮力矩 T 与沉陷量 z 之间的关系,可以建立恰当的力矩阈值。分析式(18)可知,进行实时测控,需要得知的参数为:行驶过程中轮上的载荷、行驶过程中作用于车轮的驱动力矩和挂钩牵引力。

上述3个参数中,轮上载荷 W 可以根据星球车位姿及受力分析得到,驱动力矩 T 可以根据星球车在轨实测电机电流换算得到;至于挂钩牵引力,从地面各种形式车轮(图5)在3 kg垂直载荷条件下车轮台架试验的挂钩牵引系数与滑移率关系曲线结果来看,如图6所示,在高滑移率(即星球车发生过度沉陷, $z > r/2$)的情况下,星球车的挂钩牵引力基本变化不大,且在土壤参数、载荷条件已知的情况下,通

过地面车轮台架试验可得高滑移率情况下的挂钩牵引力。

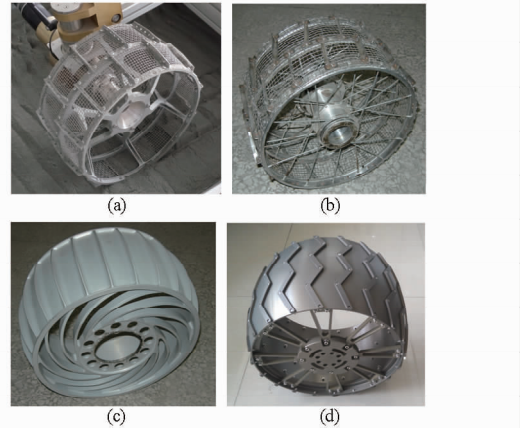


图5 试验车轮

Fig. 5 Soil-bin test wheel

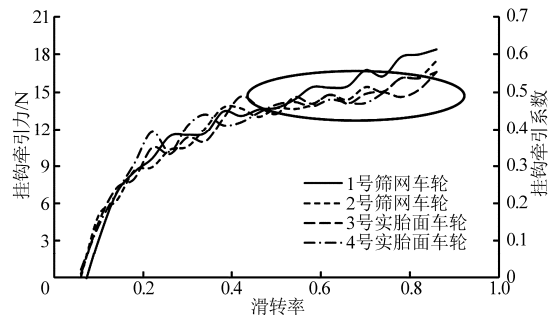
(a) 1号筛网车轮 (b) 2号筛网车轮
(c) 3号实胎面车轮 (d) 4号实胎面车轮

图6 牵引系数与滑移率关系曲线

Fig. 6 Curve of traction coefficient and sliding rate

综合上述分析可知,沉陷预先预警需要突破的关键技术主要为:挂钩牵引力、驱动力与沉陷量的关系研究,基于车体运动学与动力学模型的轮上载荷

估算研究,电动机电流与驱动力矩的关系研究和基于车体行为估算挂钩牵引力的方法研究。

由于星球车挂钩牵引力在大滑移率条件下基本变化不大,所以从已知星球土壤情况可以初估挂钩牵引力的最大值。通过式(16)沉陷估算函数可以计算出星球车发生沉陷时最大驱动电流 I_{\max} ,便于在轨数据判读,当星球车各驱动电流在轨遥测值接近计算的最大驱动电流 I_{\max} 时,即判定星球车有过度沉陷的危险,立即使星球车停止运动,重新规划星球车的运动轨迹,避免星球车过度沉陷。

若出现星球车过度沉陷的情况,也可以从遥测电流 I 的最大值,通过式(18)估计车轮最大沉陷量,便于地面模拟星球车过度沉陷时各车轮的沉陷状态,便于研究人员在地面模拟星球车的在轨沉陷状态,然后研究制定星球车的脱困策略。本方法还可

用于轮式机械在沙漠、滩涂等松软地面执行各种操作的快速沉陷预估。

4 结论

(1) 基于轮壤作用模型线性化理论分析,并通过车轮土槽试验结果修正,得出星球车沉陷预估模型为 $\frac{D_p}{W} \approx \frac{T}{rW} - \frac{z}{r} + C_3$,该模型直观而且简单,适合其在轨快速计算。

(2) 可以通过沉陷预估模型计算出星球车发生沉陷时的驱动电流阈值 I_{\max} ,便于星球车在轨数据判读预警。若星球车出现车轮过度沉陷的情况,也可以从遥测电流的最大值,预估此时的车轮沉陷量,便于地面模拟星球车的在轨沉陷状态。

参 考 文 献

- 1 Jeffrey J Biesiadecki, Eric T Baumgartner, Robert G Bonitz, et al. Mars exploration rover surface operations: driving opportunity at meridiani planum[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2006, 13(2): 63 - 71.
- 2 Leger P C, Trebi-Ollennu A, Wright J R, et al. Mars exploration rover surface operations: driving spirit at gusev crater[C] // Proceedings of the 2005 International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2005, 2: 1815 - 1822.
- 3 Shibly H, Iagnemma K, Dubowsky S. An equivalent soil mechanics formulation for rigid wheels in deformable terrain with application to planetary exploration rovers[J]. Journal of Terramechanics, 2005, 42(1): 1 - 13.
- 4 Iagnemma K, Shinwoo Kang, Shibly H, et al. Online terrain parameter estimation for wheeled mobile robots with application to planetary rovers[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2004, 20(5): 921 - 927.
- 5 Brooks C, Iagnemma K, Dubowsky S. Visual wheel sinkage measurement for planetary rover mobility characterization[J]. Autonomous Robots, 2006, 21(1): 55 - 64.
- 6 Halatci I, Brooks C A, Iagnemma K. Terrain classification and classifier fusion for planetary exploration rovers[C] // Proceedings of the 2007 IEEE Aerospace Conference, 2007: 1 - 11.
- 7 Ishigami G, Kewlani G, Iagnemma K. Statistical mobility prediction for planetary surface exploration rovers in uncertain terrain[C] // Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, 2010: 588 - 593.
- 8 王亮, 戴宪彪, 居鹤华. 一种基于单应的月球车车轮沉陷视觉测量方法[J]. 宇航学报, 2011, 32(8): 1701 - 1707.
Wang Liang, Dai Xianbiao, Ju Hehua. Homography-based visual measurement of wheel sinkage for a lunar rover[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(8): 1701 - 1707. (in Chinese)
- 9 Meirion-Griffith G, Spenko M. A modified pressure-sinkage model for small, rigid wheels on deformable terrains[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(2): 149 - 155.
- 10 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.
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. (in Chinese)
- 11 Ding Liang, Gao Haibo, Deng Zongquan, et al. Wheel slip-sinkage and its prediction model of lunar rover[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(1): 129 - 135.
- 12 金大玮, 李建桥, 党兆龙, 等. 滑转条件下月球车轮沉陷模型研究[J]. 航空学报, 2013, 34(5): 1215 - 1221.
Jin Dawei, Li Jianqiao, Dang Zhaolong, et al. Study on model for sinkage of lunar rover wheel under slip[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(5): 1215 - 1221. (in Chinese)
- 13 Iizuka K, Sato Y, Kuroda Y, et al. Experimental study of wheeled forms for lunar rover on slope terrain[C] // 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2006: 266 - 271.
- 14 Caruso J J, Phillip B A, Zakrajsek J J, et al. Gravity effects on lunar mobility and the human-robotic systems program[C] // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA, 2007.
- 15 邹猛, 李建桥, 张金换, 等. 月球车驱动轮牵引性能研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(1): 98 - 103.
Zou Meng, Li Jianqiao, Zhang Jinhuan, et al. Study on the traction performance for the driving wheel of lunar rover[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(1): 98 - 103. (in Chinese)
- 16 李因武, 李建桥, 邹猛, 等. 月壤力学性质对月球车牵引性能影响的模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 1 - 4.

- Li Yinwu, Li Jianqiao, Zou Meng, et al. Simulation of traction ability of lunar rover with different mechanics of lunar soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 1-4. (in Chinese)
- 17 Reina G, Ojeda L, Milella A, et al. Wheel slippage and sinkage detection for planetary rover[J]. IEEE / ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(2): 185-195.
- 18 Wong J Y. Theory of ground vehicles[M]. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2008.
- 19 Wong J Y. Terramechanics and off-road vehicle engineering[M]. 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2009.
- 20 赵振家, 邹猛, 张荣荣, 等. 月壤表层采样机土力学参数测试台及预估试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 288-291.
- Zhao Zhenjia, Zou Meng, Zhang Rongrong, et al. Preliminary tests and mechanical property test-bed of soil for lunar surface sampler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 288-291. (in Chinese)
- 21 李建桥, 邹猛, 贾阳, 等. 月面车辆系统试验用月壤模拟研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1957-1961.
- Li Jianqiao, Zou Meng, Jia Yang, et al. Lunar soil simulant for vehicle terramechanics research in labtory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1957-1961. (in Chinese)

Drawbar Pull Model of Planetary Rover Associated with Subsidence

Ding Liangliang¹ Xiao Jie^{1,2} Zong Wei^{1,2} Liu Dianfu¹ Yang Xiaoqing¹ Zuo Meng³

(1. Shanghai Aerospace System Engineering Institute, Shanghai 201109, China

2. Shanghai Key Laboratory of Spacecraft Mechanism, Shanghai 201108, China

3. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: There are many unexpected events when a rover is moving on a planet surface, and subsidence is one of the most fatal events which could result in the invalidation of the rover. It is very important to research subsidence prediction and intervention measures when encountering unpredictable excessive subsidence. Function relationship between wheel and soil is linearized to establish simple drawbar pull equation for subsidence estimation. “Yutu” lunar rover is taken as an example for revising equation by means of wheel soil-bin test and subsidence estimation function used to estimate subsidence online. Error between the calculation of the drawbar pull model and the measurement in soil bin test is less than 9%. The proposed model can be used to warn before the rover sinking, and provide the sinkage data for the earth-based simulation of breaking away from sink after the rover sinking. This method can also be used for rapid subsidence estimation when wheeled machinery performs various operations on the sand, beaches and other soft ground.

Key words: Planetary rover Subsidence estimation Soil-bin test Sinkage Drawbar pull