

月球车轮与月面相互作用的两种仿真模型比较与应用

杨艳静, 樊世超, 向树红
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 文章进行了月球车单个车轮和模拟月壤相互作用的初步研究, 并将两种不同轮下分布模型得到的单轮力学性能仿真分析的结果和土槽试验结果进行了对比, 从中选出合适的模型对车轮的牵引性能进行仿真计算。根据试验结果, 利用动沉陷量-滑转率之间的线性关系获得了动沉陷系数, 然后对不同垂直载荷、不同表面形状车轮牵引力的变化规律进行了预测, 并进行了相应的试验验证。

关键词: 月球车; 车轮月面相互作用; 数值仿真

中图分类号: V476.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2009)03-0206-04

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2009.03.002

1 引言

月球车在将来的深空探测活动中扮演着重要的角色, 需要在月面进行长距离巡视勘查, 进行月表环境和月岩的现场探测或采样等各种高难度的科学考察, 其面临的环境条件非常严酷, 因此月球车运动性能的预测和优化对其稳定运行有着重要的意义。月球表面的土壤通常较为松软, 月球车车轮容易发生滑转, 从而造成牵引性能下降。为了保证月球车有较好的移动性能, 需要对车轮和土壤的相互作用进行研究。

近年来有不少学者采用各种方法对车轮-土壤的相互作用进行研究, 其中包括有限元法、离散元法和半经验法。在各种方法中, 半经验方法以计算速度快、编程容易而被广泛应用, 同时也出现了许多用半经验方法对车轮-土壤相互作用进行模拟的软件, 如 ROAMS、RMPET、ASSTM 和 ORSIS 等。

本文对软件中经常采用的松软土壤和车轮相互作用半经验仿真的两种方法进行了比较研究, 并将仿真得到的牵引力和单轮土槽试验测量得到的数据进行了对比。

2 车轮力学仿真模型

2.1 轮下应力分布

在土力学中, 轮下土壤的应力特性被分为法向

的承压特性和切向的剪切特性。常用的土壤法向应力模型有两种, 一种是 Bekker 模型^[1], 另一种是得到较多应用^[2,3]的黄祖永模型^[4]。

(1) 根据 Bekker 模型, 最大应力发生在最大沉陷处, 其表达式为

$$\sigma(z) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi \right) z^n, \quad (1)$$

其中: σ 为压力; b 是接触面宽度; z 为沉陷量; n 称为沉陷指数, k_c 和 k_ϕ 称为内聚力模量和摩擦内聚力模量, 其中的参数可以通过试验确定。

车轮的沉陷量分为静沉陷 z_s 和动沉陷 z_d 两部分, 静沉陷是由车轮重量引起的沉陷, 而动沉陷是由车轮滑转引起的沉陷, 总沉陷量可表示为

$$z = z_s + z_d, \quad (2)$$

其中静沉陷可表示为

$$z_s = \left[\frac{3W}{(k_c + bk_\phi)\sqrt{2r}(3-n)} \right]^{\frac{2}{2n-1}}, \quad (3)$$

而动沉陷与滑转率和车轮形状、重量及土壤承载能力有关, 目前没有准确的计算方法。在 ASSTM 中模拟车轮沉陷时, 需要事先通过试验校正以准确地模拟动沉陷^[5]。对于表面光滑的车轮来说, 根据试验观测, 沉陷量和滑转率 s 成正比^[6], 可表示为

$$z_d = a_0 s, \quad (4)$$

收稿日期: 2008-12-04; 修回日期: 2009-05-11

基金项目: 中国空间技术研究院自主研发项目

作者简介: 杨艳静 (1981-), 女, 博士研究生, 研究方向为月球车与模拟月壤相互作用仿真。联系电话: (010) 68746683。

其中： a_0 称为动沉陷常数，它依赖于车轮的接地面形状和土壤性质，可通过试验确定。

$$\sigma(\theta) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi\right)r^n (\cos \theta - \cos \theta_f)^n \quad \theta_m \leq \theta < \theta_f; \quad (5)$$

$$\sigma(\theta) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\phi\right)r^n \left\{ \cos \left[\theta_f - \frac{\theta - \theta_f}{\theta_m - \theta_f} (\theta_f - \theta_m) \right] - \cos \theta_f \right\}^n \quad \theta_f < \theta \leq \theta_m. \quad (6)$$

最大应力发生的位置与滑转率及土壤特性等参数有关， θ_m 为最大应力角，可表示为

$$\theta_m = (c_0 + c_1 s) \theta_f. \quad (7)$$

这里 c_0 、 c_1 称为最大应力角常数，根据文献[4]， $c_0 \approx 0.4$ ， $0 \leq c_1 \leq 0.3$ ； θ_f 为接近角，定义为

$$\theta_f = \cos^{-1}(1 - z/r). \quad (8)$$

而离开角 Q_f 通常和车轮形状有关，可表示为

$$\theta_f = \cos^{-1}(1 - \lambda z/r), \quad (9)$$

其中 λ 为离开角常数。

松软土壤上行驶的刚性轮下的剪切应力一般都按 Janosi 提出的剪切应力-变形方程

$$\tau = (c + \sigma \tan \phi)(1 - e^{-j/K}) \quad (10)$$

确定，其中： c 为土壤内聚力； ϕ 为土壤内摩擦角； K 为剪切弹性模量； j 为剪切位移^[6]。

2.2 作用在车轮上的牵引力、垂直反力和驱动扭矩

有了轮下应力分布，假设车轮的下陷表面和土壤完全接触，根据力的平衡，将应力沿接触面积分就可以得到牵引力 F_x 、垂直反力 F_z 和驱动扭矩 T 。

$$F_x = rb \int_{\theta_f}^{\theta_t} (\tau(\theta) \cos \theta - \sigma(\theta) \sin \theta) d\theta; \quad (13)$$

$$F_z = rb \int_{\theta_f}^{\theta_t} (\tau(\theta) \sin \theta + \sigma(\theta) \cos \theta) d\theta; \quad (14)$$

$$T = r^2 b \int_{\theta_f}^{\theta_t} \tau(\theta) d\theta. \quad (15)$$

下面将对基于 Bekker 模型和黄祖永模型建立的车轮-土壤相互作用模型进行对比研究和试验验证，选出合适的模型用于车轮牵引性能预测。

3 土槽试验验证

3.1 试验设备和参数

为了对车轮-土壤相互作用的仿真模型进行验证，本文利用土槽装置进行了带履齿车轮和不带履齿车轮的土槽试验^[7]。试验中通过安装在车轮上的传感器和电位计可记录力、力矩和沉陷量等数据。

(2) 黄祖永定义的法向应力分布模型可用下式描述：

试验车轮的尺寸和土壤参数如表 1 所示。

根据动沉陷和滑转率的线性关系，首先通过试验确定动沉陷系数 a_0 ，在试验中通过控制台车速度和车轮角速度来控制滑转率在 0~0.8 之间变化，测量出车轮重力为 100N 时对应不同滑转率的沉陷量；通过对试验数据进行直线拟合，得到动沉陷系数 a_0 为 0.015。

表 1 车轮和土壤参数
Table 1 Wheel and soil parameters

参数名称	取值
车轮半径 r/m	0.175
车轮宽度 b/m	0.1
履齿高度 h/mm	12
土壤粘聚力 c/kPa	0.8
土壤内摩擦角 $\phi/(\circ)$	34.8
土壤密度 $\gamma/(kg \cdot m^{-3})$	1580
内聚力模量 $k_c/(kN \cdot m^{-(n+1)})$	0
摩擦力模量 $(kN \cdot m^{-(n+2)})$	1.37×10^3
垂直载荷 W/N	100/200/300
沉陷指数 n	1
最大应力角常数 c_0	0.4
最大应力角常数 c_1	0~0.3
离开角常数 λ	0~0.05
剪切弹性模量 K/mm	5~20

3.2 仿真结果和试验结果对比

有了动沉陷系数，用第二节中的模型和表 1 中的参数，即可得到垂直反力和牵引力随滑转率的变化曲线，根据式(14)用两种模型计算得到的垂直反力随滑转率的变化曲线如图 1(a)所示（即模型 1 采用 Bekker 定义的法向应力分布，模型 2 采用黄祖永定义的法向应力分布）。

从图 1(a)中可以看出，当滑转率较大时，用两种模型估计出的垂直反力都高于实际值，原因可能有两个方面，一是计算中没有考虑三维效应，二是高滑转率下车轮与地面的相互作用非常复杂，轮下某些可能没有与车轮发生接触的土壤微元在计算中也被认为对垂直载荷有贡献。

图 1(b)是用两种模型预测出的垂直载荷为 100N 时的牵引力与试验的对比图,从图中可以看出在滑

转率低于 0.2 时两种模型预测出的驱动力和试验结果吻合得较好,而高滑转率下则存在较大的偏差。

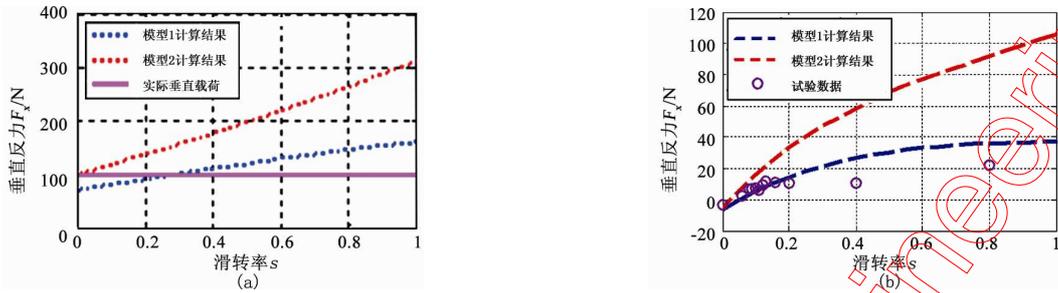


图 1 垂直反力和牵引力计算结果和试验结果对比($W=100N$)

Fig. 1 Comparison of simulation and experiment results of vertical reaction load and drawbar pull vs. slip ($W=100N$)

相比之下,采用黄祖永提出的模型得到的计算结果与试验结果符合得更好一些。下面利用黄祖永的模型对不同垂直载荷、不同外形车轮的牵引力进行预测。

起附加的阻力,该阻力目前还没有公认的计算方法^[8],计算模型未考虑这一阻力项。

4 不同垂直载荷下不带履齿车轮的牵引性能

另外计算结果和试验结果都显示,在滑转率大于 0.5 以后,牵引力曲线开始变得平缓或开始下降,这是因为此时随着滑转率的增大,动沉陷不断增加,从而引起滚动阻力增加,从图 2(b)中可以看出即使增大驱动扭矩也不能使牵引力增大,从而导致驱动效率降低。在图 2(a)中还可以观察到同样滑转率下,车轮垂直载荷增加时所获得的牵引力并没有增加。

图 2 给出了不同垂直载荷下不带履齿车轮牵引力和驱动扭矩的计算和试验结果,从图中可以看出:滑转率较小时,不同垂直载荷下牵引力的计算结果和试验结果吻合较好,而滑转率较大时,计算结果偏大,这是因为高滑转率下产生的动沉陷会引

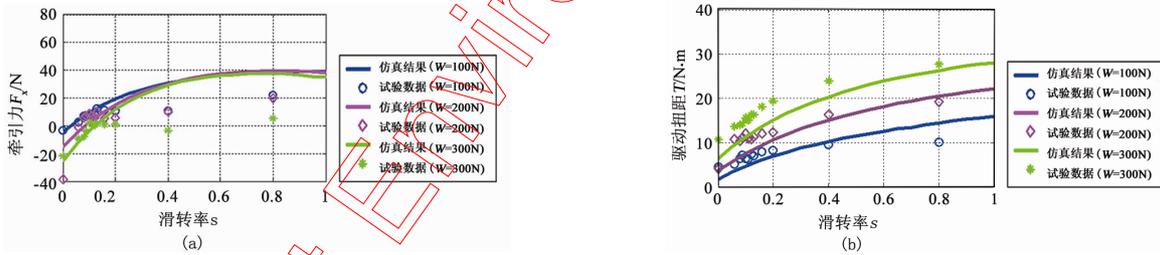


图 2 不同垂直载荷下车轮牵引力和驱动扭矩的试验结果和仿真结果

Fig. 2 Comparison of simulation and experiment results of drawbar pull and driving torque vs. slip under different wheel loads

5 不同外形车轮的牵引力的仿真结果和试验结果

带履齿车轮的试验结果和计算结果,可以看出,计算结果和试验结果都反映了同样滑转率下,通过在车轮上增加履齿可获得更大的牵引力。

图 3 给出了不同垂直载荷下带履齿车轮和不

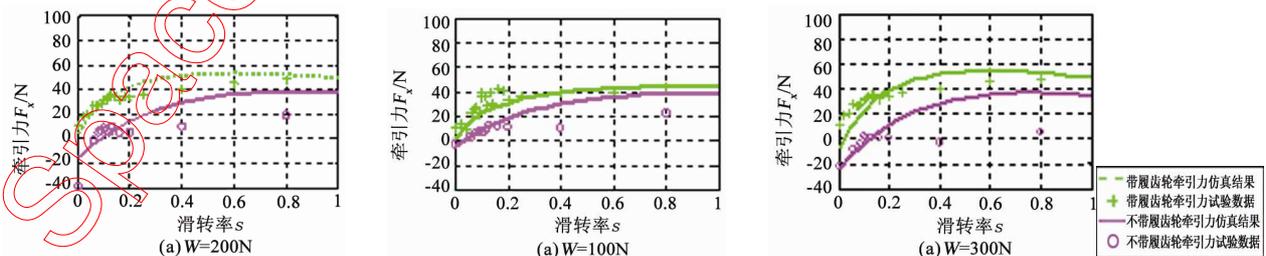


图 3 不同垂直载荷下带履齿车轮和不带履齿车轮牵引力的试验结果和仿真结果

Fig. 3 Comparison of simulation and experiment results of drawbar pull vs. slip of lugged wheel and smooth wheel at different loads

6 结论

通过对轮下应力分布两种模型比较研究,发现黄祖永提出的模型能更好地预测车轮的牵引性能。本文用该模型对不同垂直载荷、不同形状车轮的牵引性能进行了分析,得到以下结论:

(1) 为了预测车轮的牵引性能需要将试验沉陷量作为输入量,得到动沉陷和滑转率之间的关系;

(2) 对不带履齿车轮来说,在同样的滑转率下,垂直载荷增大时,车轮不能获得更大的牵引力;

(3) 在同样的垂直载荷作用下,带履齿车轮在同样的滑转率下可以获得更高的牵引力;

(4) 当滑转率大于 0.5 以后,即使增大驱动扭矩,牵引力也将保持平稳或者减小,因此为了较高的驱动效率,应保持车辆在较低滑转率下行驶。

此外,目前的模型仅在滑转率较小时能较好地预测车轮的牵引性能,为了提高预测的精度还应展开进一步的研究。

参考文献 (References)

- [1] [美] 贝克. 车辆地面系统导论[M]. 车辆-地面系统导论翻译组, 译. 北京机械工业出版社, 1978
- [2] Yoshida K, Ishigami G. Steering characteristics of a rigid wheel for exploration on loose soil[C]// Proc of 2004 IEEE Int Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004: 3995-4000
- [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: 1-13
- [4] Wong J Y, Reece A R. Prediction of rigid wheel performance based on the analysis of soil-wheel stresses-part 1, performance of driven rigid wheels[J]. Journal of Terramechanics, 1967, 4(1): 81-98
- [5] Bauer R, Leung W, Barfoot T. Experimental and simulation results of wheel-soil interaction for planetary rovers[C]// IEEE/RSJ International Conference, 2005
- [6] 张克健. 车辆地面力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002
- [7] 樊世超, 向树红, 冯咬齐. 刚性轮与模拟月壤相互作用初步研究[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(2): 107-113
- [8] 刘聚德. 车辆沙地行驶理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996

明星档案

“北斗”卫星导航系统首发星:

类别: 地球静止轨道卫星。

用途: 卫星导航系统。

研制单位: 中国空间技术研究院。

卫星设计寿命: 8年。

发射时间: 2009年4月15日0时16分。

发射地点: 西昌卫星发射中心。

运载火箭: “长征3号丙”运载火箭。

运行追踪: 火箭发射后 25 min, 星箭分离, 卫星准确进入近地点/远地点为 200 km/35 974 km、倾角 20.5° 的轨道; 4月20日17时06分, 通过4次变轨, 成功进入地球静止轨道, 准确定点于 84.6° E 赤道上空, 并成功开通星上有效载荷。