

月球车轮地相互作用力学模型解耦及其应用

丁 亮, 高海波, 邓宗全, 陶建国, 熊历冰

(哈尔滨工业大学 机器人技术及系统国家重点实验室, 150080 哈尔滨, liangding@hit.edu.cn)

摘 要: 针对高度耦合的月球车轮地相互作用力学积分模型很难在实际中应用的问题, 采用应力分布线性化、忽略比重较小的耦合项等方法, 推导了解耦的封闭解析模型. 利用轮地相互作用测试平台, 对具有不同尺寸和不同轮刺的 6 种车轮进行试验. 基于解耦模型研究了土壤参数的辨识方法, 对轮地作用过程中的 8 个未知参数进行了辨识, 并利用试验数据验证了该方法的合理性. 由于辨识的参数对于简化误差具有补偿作用, 解耦解析模型可以对挂钩牵引力、驱动阻力矩、沉陷量、滑转率等进行精度较高的预测, 进而可以较好地应用于月球车的动力学仿真和控制算法设计.

关键词: 月球车; 轮地相互作用力; 解耦; 参数辨识

中图分类号: O39, U489

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)01-0056-06

Wheel-soil interaction mechanics model for lunar rover: decoupling and application

DING Liang, GAO Hai-bo, DENG Zong-quan, TAO Jian-guo, XIONG Li-bing

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China, liangding@hit.edu.cn)

Abstract: Aiming at the difficulties of applying highly coupled integrated model for wheel-soil interaction mechanics, a closed-form decoupled analytical model is derived by linearizing stress distribution and ignoring the coupled term with small proportion. Six kinds of wheels with different dimensions and wheel lugs were used to do experiments with wheel-soil interaction testbed. The soil parameter identification method is researched based on the decoupled model to estimate the eight unknown wheel-soil interaction parameters, and the method is verified by the experimental data. Due to the compensation role of identified parameters, the decoupled analytical model can predict the drawbar pull, resistance moment of driving, wheel sinkage and slip ratio with high precision, which makes it reasonable to be applied to dynamics simulation and control algorithm design of lunar rover.

Key words: lunar rover; wheel-soil interaction mechanics; decoupling; parameter identification

我国的“嫦娥”1号绕月探测任务已经取得圆满成功,并预计于2013年左右发射月球探测车进

行月面巡视勘察.月球表面崎岖不平的地形环境对月球车提出了很多新的挑战,轮地相互作用地面力学可以分析车轮受力情况,进而应用于月球车地面开发阶段和探测阶段,以提高月球车探测性能,使其能更好地适应复杂环境^[1-2].

土壤力学参数辨识是进行地面力学应用的基础,也是星球探测的重要科学目标之一^[3].然而,星球车轮地作用模型是具有众多参数的积分耦合方程组^[4-5],求解非常复杂,并且利用这些耦合方程组对众多土壤参数同时进行辨识非常困难.美

收稿日期: 2009-06-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975059/61005080);
国家高技术研究发展计划资助项目(2008AA04Z202);
机器人技术与系统国家重点实验室自主研究项目
(SKLRS200801A02);哈工大重点学科实验室开放基金
课题(HIT.KLOF.2009060/2009061);教育部高等
学校学科创新引智计划(B07018).

作者简介: 丁 亮(1980—),男,博士,讲师;
邓宗全(1956—),男,教授,博士生导师.

国 MIT 的 K. Iagnemma 等^[6]、英国的 S. Hutangkabodee 等^[7]和我国的崔平远教授等^[8]都进行了模型的简化和解析方程式推导,并将其应用于土壤内聚力和内摩擦角等部分参数的辨识。

上述解析模型是基于传统地面车辆的轮地作用力学模型进行推导得到的,并且解析方程式仍然高度耦合,即方程组中的每一个方程都包含了土壤的几乎全部参数,模型中参数的相互影响,限制了进行土壤参数辨识的全面性和辨识算法的鲁棒性。

本文在改进的能够反映月球车车轮滑转沉陷和轮刺效应的轮地相互作用模型^[4]基础上,推导简化的解耦解析模型,利用该模型对土壤参数进行全面辨识,并采用月球车轮地相互作用模拟试验数据进行验证,进一步分析基于辨识参数的简化模型在月球车的仿真和控制过程的应用方法。

1 月球车轮地相互作用力积分模型

月球车驱动车轮与月壤相互作用受力分析如图1所示。 z 为车轮沉陷量; θ 为轮地作用角, θ_1 为进入角, θ_2 为离去角, θ_m 为最大应力角, θ'_1 为土壤变形起始角; ω 为车轮转动角速度; v 为车轮前进线速度; W 和 f_{DP} 为车体通过轮轴作用于车轮上的力, W 为负载, f_{DP} 为前进阻力; T 为电机驱动力矩; r 为车轮半径; b 为车轮宽度; h 为轮刺高度; $R = r + h$ 为车轮最大外圆半径。

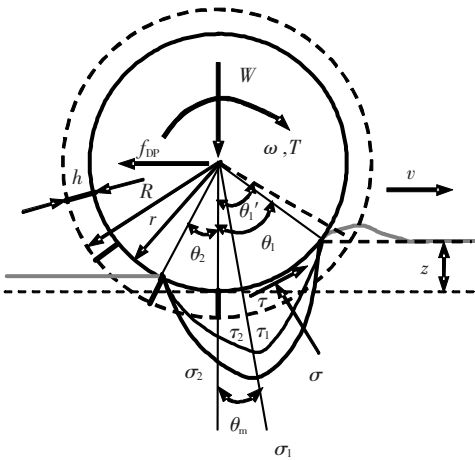


图1 月球车轮地相互作用力学示意图

松软月壤对车轮的作用力表现为连续的应力形式,包括正应力 $\sigma(\sigma_1, \sigma_2)$ 和剪应力 $\tau(\tau_1, \tau_2)$ 。对应力分布进行积分,可以得到公式(1),并用于进行法向支持力 F_N 、挂钩牵引力 F_{DP} 和驱动阻力矩 M_R 的计算。当车轮稳定运行时,分别与车轮负载 W 、电机驱动力矩 T 和前进阻力 f_{DP} 平衡:

$$\begin{cases} F_N = rb \left[\int_{\theta_2}^{\theta_m} \sigma_2(\theta) \cos \theta d\theta + \int_{\theta_m}^{\theta_1} \sigma_1(\theta) \cos \theta d\theta \right] + \\ r_s b \left[\int_{\theta_2}^{\theta_m} \tau_2(\theta) \sin \theta d\theta + \int_{\theta_m}^{\theta_1} \tau_1(\theta) \sin \theta d\theta \right] = W, \\ F_{DP} = r_s b \left[\int_{\theta_2}^{\theta_m} \tau_2(\theta) \cos \theta d\theta + \int_{\theta_m}^{\theta_1} \tau_1(\theta) \cos \theta d\theta \right] - \\ rb \left[\int_{\theta_2}^{\theta_m} \sigma_2(\theta) \sin \theta d\theta + \int_{\theta_m}^{\theta_1} \sigma_1(\theta) \sin \theta d\theta \right] = f_{DP}, \\ M_R = r_s^2 b \left[\int_{\theta_2}^{\theta_m} \tau_2(\theta) d\theta + \int_{\theta_m}^{\theta_1} \tau_1(\theta) d\theta \right] = T. \end{cases} \quad (1)$$

式中: b 为车轮宽度; r_s 为车轮的等效剪切半径, $r_s = r + \lambda h$ ($0 \leq \lambda \leq 1$),这是一个等效的平均半径,相当于在该半径处,与车轮固结到一起的土壤和地面土壤发生相对移动。轮地作用的重要状态变量滑转率 s 也采用该半径定义:

$$s = (r_s \omega - v) / r_s \omega.$$

根据 Wong - Reece 正应力分布模型^[9]和 Janosi 剪应力计算模型^[10],同时考虑车轮的轮刺效应和滑转沉陷^[4],可得到式(2)~(9):

$$N = n_0 + n_1 s. \quad (2)$$

$$\theta_1 = \arccos[(r - z) / r]. \quad (3)$$

$$\theta_m = (c_1 + c_2 s) \theta_1. \quad (4)$$

$$\theta_2 = c_3 \theta_1. \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sigma_1(\theta) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) [z(\theta)]^N = \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) r^N \times \\ (\cos \theta - \cos \theta_1)^N, \quad \theta_m \leq \theta \leq \theta_1; \\ \sigma_2(\theta) = \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) r^N \left\{ \cos \left[\theta_1 - \frac{\theta - \theta_2}{\theta_m - \theta_2} \times \right. \right. \\ \left. \left. (\theta_1 - \theta_m) \right] - \cos \theta_1 \right\}^N, \quad \theta_2 \leq \theta < \theta_m. \end{cases} \quad (6)$$

$$\theta'_1 = \arccos[(r - z) / R_j]. \quad (7)$$

$$j(\theta) = r_s [(\theta'_1 - \theta) - (1 - s)(\sin \theta'_1 - \sin \theta)]. \quad (8)$$

$$\tau(\theta) = [c + \sigma(\theta) \tan \phi] \{1 - \exp[-j(\theta) / k]\}. \quad (9)$$

式中: k_c 为土壤内聚力模量; k_φ 为摩擦变形模量; c 为内聚力; φ 为内摩擦角; k 为剪切变形模量; c_1 和 c_2 为最大应力角系数; c_3 为离去角系数。半径 $R_j \in [r, r + h]$,在较低滑转率下沉陷量较小, R_j 近似为 R ,随着滑转率增大, R_j 近似为 r 。

模型中的未知月壤参数主要有10个: k_c 、 k_φ 、 n_0 、 n_1 、 c 、 φ 、 k 、 c_1 、 c_2 和 c_3 。

2 解耦解析模型研究

2.1 应力简化方法分析

令

$$\tau_m = D(c + \sigma_m \tan \varphi), k_c/b + k_\varphi = K_s,$$
$$D = 1 - \exp\{-r_s[(\theta'_1 - \theta_m) - (1-s)(\sin \theta'_1 - \sin \theta_m)]/k\},$$
$$\sigma_m = K_s r^N (\cos \theta_m - \cos \theta_1)^N.$$

参照文献[5]中的方法,可以将轮地作用应力线性化:

$$\begin{cases} \sigma_1(\theta) \approx \sigma_m(\theta_1 - \theta)/(\theta_1 - \theta_m), & \theta_m \leq \theta \leq \theta_1; \\ \sigma_2(\theta) \approx \sigma_m(\theta - \theta_2)/(\theta_m - \theta_2), & \theta_2 \leq \theta < \theta_m. \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \tau_1(\theta) \approx \tau_m(\theta_1 - \theta)/(\theta_1 - \theta_m), & \theta_m \leq \theta \leq \theta_1; \\ \tau_2(\theta) \approx \tau_m(\theta - \theta_2)/(\theta_m - \theta_2), & \theta_2 \leq \theta < \theta_m. \end{cases} \quad (11)$$

由于车轮进入角 θ_1 通常不会太大,并且当 θ 的数值接近 θ_1 时,正应力和剪应力都接近为零,因而 $\cos \theta$ 与应力的乘积也可以考虑进行线性化.

令 $\sigma'_m = \sigma_m \cos \theta_m, \tau'_m = \tau_m \cos \theta_m$, 则有:

$$\begin{cases} \sigma_1(\theta) \cos \theta \approx \sigma'_m(\theta_1 - \theta)/(\theta_1 - \theta_m), \\ \sigma_2(\theta) \cos \theta \approx \sigma'_m(\theta - \theta_2)/(\theta_m - \theta_2); \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \tau_1(\theta) \cos \theta \approx \tau'_m(\theta_1 - \theta)/(\theta_1 - \theta_m), \\ \tau_2(\theta) \cos \theta \approx \tau'_m(\theta - \theta_2)/(\theta_m - \theta_2). \end{cases} \quad (13)$$

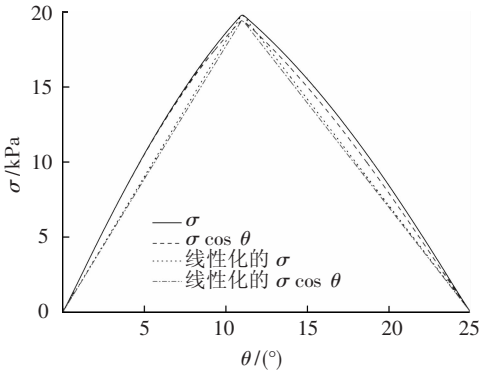
为了验证线性化的误差,采用不同的车轮尺寸进行数值分析. 选取的典型状态参数为: $\theta_1 = 35^\circ, s = 0.4; \theta_1 = 25^\circ, s = 0.2; \theta_1 = 15^\circ, s = 0$. 分析表明,应力的简化误差随着沉陷指数的减小而增大,由于沉陷指数随着滑转率的增加而增大,当滑转率为 0 时,正应力和剪切应力的最大线性化的相对误差达到最大值,为 15% 左右. 同时,式 (12) 和 (13) 的简化误差分别与式 (10) 和 (11) 的简化误差接近,数值相差不超过 1%. 由于式 (10) 和 (11) 的线性化方法已经得到了较多应用,并且文献[5]对沉陷指数为 0.5 ~ 1.6 的土壤验证了其合理性,因而式 (12) 和 (13) 的简化方法也是合理性的. 图 2 为 $\theta_1 = 25^\circ, s = 0.2$ 情况下的应力分布及简化结果.

2.2 轮地作用模型解耦分析

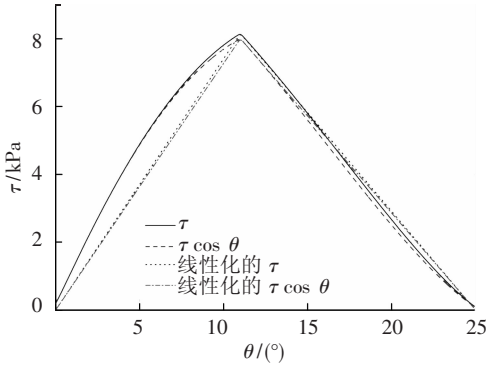
根据轮地相互作用力学模型,在滑转率给定的情况下,垂直载荷 W 决定了土壤对于车轮的正应力 σ ,剪切应力 τ 则是正应力的函数,同时,剪应力的垂直分量对于车轮也具有一定的支撑作用. 车轮的挂钩牵引力由正应力和剪切应力的水平分量共同决定,驱动阻力矩则取决于剪切应力.

图 3 描述了集中力/力矩与应力分布的关系,可以看出,剪切应力对于支撑力的作用是导致模型耦合的关键因素,土壤的所有参数都参与了集中力和力矩的运算,使得根据测量的集中力和力矩进行模型参数的辨识极其困难,因而限制了模型的应用.

根据式(9),由于月壤内聚力相对较小, $\tan \varphi$ 项一般 < 1 , 因此剪切应力小于法向正应力. 分析式(1)可以发现,剪切应力乘以 $\sin \theta$ 为其垂直分量,考虑到 θ 的数值通常比较小,而且在 θ 取最大值 θ_1 时,剪切应力为 0, 因此可以考虑将 $\sin \theta$ 简化为 0, 以消除剪切应力部分对于垂直载荷的作用. 数值分析表明,忽略剪切应力对于垂直载荷的影响所引起的最大误差也仅为 15% 左右.



(a) 正应力 σ 分布



(b) 剪切应力 τ 分布

图 2 月球车轮地作用应力分布及简化结果

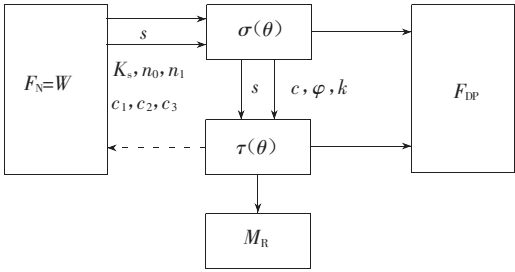


图 3 集中力/力矩与应力的关系

对轮地作用模型同时进行解耦和应力分布线性化,可能会导致误差累加. 但是,通过参数辨识的方法得到的轮地作用参数对于模型误差具有修正作用,如果简化模型能够从根本上反映轮地作用力学问题,将辨识参数带入简化模型进行轮地作用的相关预测和计算能够保证精度,不足之处是辨识得到的参数与真实的土壤参数之间会存在差别.

2.3 轮地作用封闭解析解耦模型

将简化的应力分布结果带入式(1),可以得到集中力的计算公式:

$$F_N \approx rb(\theta_1 - \theta_2)\sigma_m \cos \theta_m / 2, \quad (14)$$

$$F_{DP} \approx r_s b \cdot (\theta_1 - \theta_2) \tau_m \cos \theta_m / 2 - rbA\sigma_m,$$

$$M_R \approx r_s^2 (\theta_1 - \theta_2) \tau_m / 2.$$

其中 $A = \left(\frac{\sin \theta_m - \sin \theta_1}{\theta_1 - \theta_m} + \frac{\sin \theta_m - \sin \theta_2}{\theta_m - \theta_2} \right).$

进一步推导可得

$$F_{DP} = M_R \cos \theta_m / r_s - 2AF_N / [(\theta_1 - \theta_2) \cos \theta_m], \quad (15)$$

$$M_R = Dr_s^2 [bc(\theta_1 - \theta_2) / 2 + F_N \tan \varphi / (r \cos \theta_m)]. \quad (16)$$

式(14) ~ (16) 分别为计算垂直载荷、挂钩牵引力和驱动力矩的解耦解析表达式. 式(15) 中的挂钩牵引力为土壤参数 c_1 、 c_2 和 c_3 的函数,反映了驱动力矩和法向支持力对于牵引力的作用. 在 c_1 、 c_2 和 c_3 已知的情况下,式(14) 中的法向支持力和式(16) 中的驱动阻力矩分别为关于土壤的承压特性参数和剪切特性参数的函数,同时,该式反映了法向载荷和土壤内聚力对于车轮的驱动阻力矩的作用.

3 月球车轮地相互作用力学试验

采用针对月球车开发的车轮-土壤相互作用测试平台(如图4所示)进行车轮-土壤相互作用测试试验.可测试参数包括前进力矩、挂钩牵引力、转向力矩、侧向力、沉陷量等.试验时,可以利用软件方便地设置车轮半径、垂直载荷、车轮移动速度、滑转率以及车轮转向速度等信息.



图4 车轮-土壤相互作用测试平台

试验,中采用3种不同尺寸的车轮:车轮1半径 $r = 135\text{ mm}$,宽度 $b = 165\text{ mm}$;车轮2半径和车轮1相同,宽度为 110 mm ;车轮3半径为 157.4 mm ;宽度为 165 mm . 车轮1和2轮刺数为24,车轮3

的轮刺数为30,车轮周围均布高度为 15 mm ($W_{i1}, i = 1, 2, 3$)或 10 mm ($W_{i2}, i = 1, 2, 3$)的轮刺,能够保证形成稳定剪切.

松软干沙具有与松软的星球土壤相似的地面力学特性,因此经常被研究人员用于星球车地面力学试验.本研究以细沙为原料,通过剔除杂质、通风干燥、过筛、烘烤等步骤制作模拟月壤.采用传统地面力学中发展起来的压板试验和剪切试验进行土壤的参数测定.测得的土壤参数如表1所示,模拟月壤参数 K_φ 比真实月壤大,说明实际月壤更加松软一些,其余参数非常接近,模拟月壤基本可以反映实际月壤和车轮的作用情况.

表1 模拟月壤的土壤参数

n	$K_c / (\text{kPa} \cdot \text{m}^{-(n-1)})$	$K_\varphi / (\text{kPa} \cdot \text{m}^{-n})$	c / kPa	$\phi / (^\circ)$
1.10	15.6	2 407.7	0.25	31.9

试验中,车轮的前进速度为 10 mm/s ,滑转率设定为 0 、 0.05 、 0.10 、 0.20 、 0.30 、 0.40 、 0.50 、 0.60 .滑转率的设定采用车轮最大外圆半径,然后利用 r_s 进行了修正.试验中垂直载荷设定为 80 N .

试验数据的采样周期为 0.15 s ,每次试验可测得几百个关于沉陷量、挂钩牵引力、驱动力矩和垂直载荷的原始数据.取中间比较稳定的数据并绘制测试曲线,同样的试验重复进行 $2 \sim 3$ 次,以确保试验的重复性和一致性,如果不同试验数据结果相差较大,则增加测量次数.利用 Matlab 编写的 GUI 程序进行数据处理,求取均值.对上百次试验测得的原始数据进行处理,可以得到各个车轮的垂直载荷、挂钩牵引力和驱动力矩随滑转率变化的曲线.

4 解耦解析模型在月球车中的应用

4.1 轮地作用力学参数辨识

根据式(4) ~ (6) 和式(14),如果测得土壤作用于车轮的挂钩牵引力、驱动力矩、法向支持力以及车轮的沉陷量,则可以对参数 c_1 、 c_2 和 c_3 进行辨识.通常认为星球车车轮和松软土壤相互作用的离去角比较小,将其简化为 0 ,因此,将参数 c_3 假设为 0 ,以降低参数辨识的复杂度和不确定性,只对 c_1 和 c_2 进行辨识.

将式(2) 和 σ_m 的定义式带入式(14),可得

$$F_N = (rb/2)(\theta_1 - \theta_2)K_s r^{n_0+n_1s} \times (\cos \theta_m - \cos \theta_1)^{n_0+n_1s} \cos \theta_m. \quad (17)$$

式(17) 中的未知土壤参数只有 K_s 、 n_0 和 n_1 ,在车轮宽度固定的情况下,无法对 k_c 和 k_φ 分别进行辨识,而且其必要性也不大,因此只辨识组合沉陷模

量 K_s 和沉陷指数 n_0, n_1 .

将 D 带入式(16),得

$$M_R = r_s^2 [bc(\theta_1 - \theta_2)/2 + F_N \tan \varphi / (r \cos \theta_m)] \times \{1 - \exp(-r_s[(\theta'_1 - \theta_m) - (1-s)(\sin \theta'_1 - \sin \theta_m)]) / k\}.$$
 (18)

式(18)中的未知土壤参数为剪切参数 c, φ 和 k , 可以利用该式实现对土壤剪切参数的辨识.

在进行参数辨识过程中,需要测量的输入量包括车轮的挂钩牵引力、驱动力矩、法向支持力以及车轮沉陷量、车轮滑转率等参数,对于探测过程中的月球车,这些参数均可以通过力学分析或者测量的方法实时获取^[6].

采用单轮测试系统获取的试验数据进行参数辨识方法验证,利用最小二乘法进行数据拟合,得到未知参数的最佳估计值.

表2为各个车轮的参数辨识结果. 参数 K_s 的值与初始值相差不大,说明参数 n_0 和 n_1 可以起到很好的拟合作用,因此,月球探测过程中,可以根据月壤的 k_c 和 k_φ 指定 K_s 的典型值;利用 n_0 和 n_1 计算得到的 N 最小值为 0.73,滑转率为 0.6 时, N 的最大值约为 1.5,与沙土和月壤的沉陷指数相当;参数 c 与测量值接近;参数 k 值为 8.6 ~ 11.2 mm,较为合理; φ 值比测量值偏小,主要是由于简化模型存在误差所致,也可以理解为,拟合得到的 φ 值对于简化误差具有较大的补偿作用.

表 2 参数辨识结果								
车轮	c_1	$-c_2$	$K_s /$ (kPa · m ⁿ)	n_0	n_1	$c /$ kPa	$\varphi /$ (°)	$k /$ mm
W11	0.458	0.416	2 499	0.772	1.293	0.18	27.7	11.2
W12	0.353	0.265	2 499	0.866	1.054	0.34	25.5	10.1
W21	0.471	0.361	2 499	0.828	1.097	0.60	25.9	10.6
W22	0.386	0.159	2 450	0.914	0.824	0.74	24.2	9.0
W31	0.460	0.395	2 499	0.727	1.302	0.50	26.1	9.2
W32	0.365	0.204	2 499	0.805	1.124	0.19	26.0	8.6

数据拟合的最大相对误差不超过 5%, 具有较好的拟合度,说明简化的解耦解析模型能够准确地反映轮地作用力学问题;如果不采用反映车轮滑转沉陷和轮刺效应的式(2)和式(7),拟合误差超过 10%,并且得到的拟合参数也明显偏离常见沙土的参数. 采用未经优化的 Matlab 程序,在普通 PC 机上进行参数辨识的运算时间为毫秒级,因而可以支持在线实时辨识.

4.2 模型在月球车动力学仿真中的应用

在松软崎岖的月球环境中进行月球车仿真时,垂直载荷 W 和车轮的滑转率 s 是不断变化的,仿真

环境可以实时提供其数值. 根据辨识得到的轮地作用力学参数和给定的 W, s 信息,可以对车轮的沉陷量、挂钩牵引力和驱动力矩进行预测,并提供给整车动力学模型,进而仿真整车运动.

首先,将不同滑转率下测量的载荷平均值作为车轮法向载荷,利用式(17)进行进入角预测,代入式(4)获得车轮的沉陷量;将进入角和垂直载荷代入式(18)可以计算车轮的驱动阻力矩;然后利用式(15)计算挂钩牵引力. 预测结果如图 5 所示. 当 $s > 0$ 时,相对误差 < 10%.

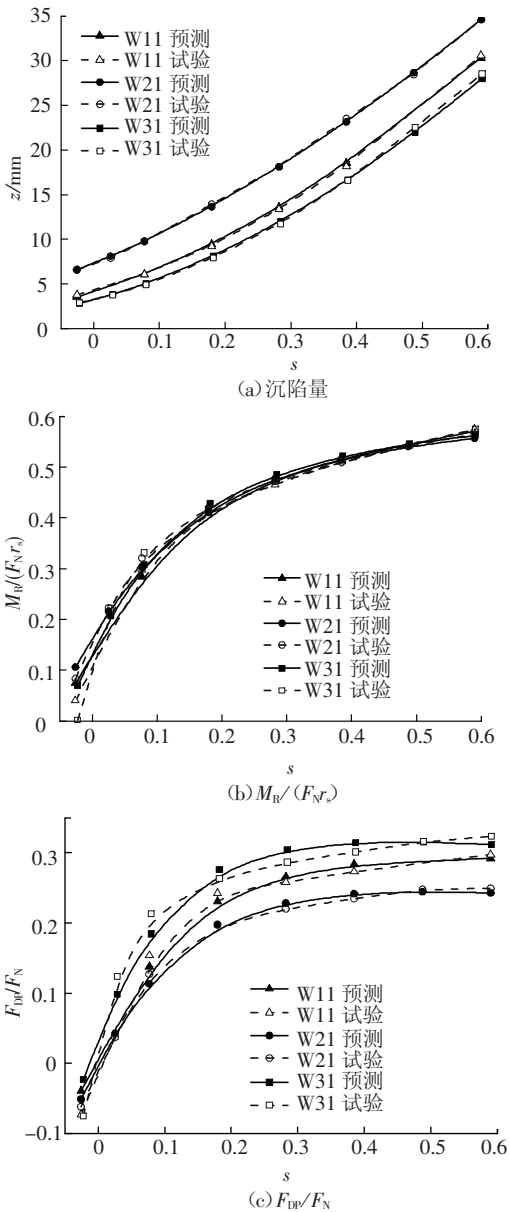


图 5 基于辨识参数的轮地作用力和沉陷量

4.3 模型在月球车控制中的应用

在月球车的控制过程中,可以结合轮地相互作用力学模型进行力矩控制,还可以对滑转率这一重要状态变量进行实时估计,基于滑转率进行

控制策略设计,并对运行过程中的车轮滑转进行补偿,以保证路径跟踪精度.

利用准静力学分析的方法对垂直载荷进行估计,根据电机反馈电流可以计算电机的驱动力矩.联合式(17)和(18),可以根据垂直载荷和驱动力矩对车轮的进入角和滑转率进行估计.图 6 为车轮 W11 的滑转率估计结果,与试验设置滑转率非常接近.

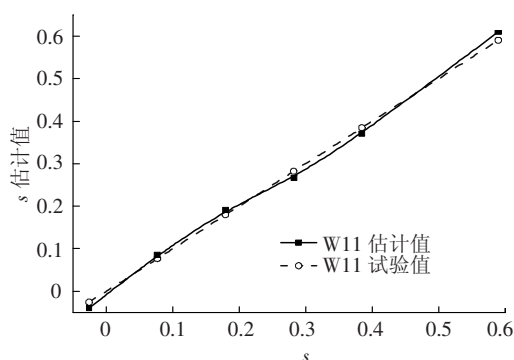


图 6 车轮 W11 的滑转率估计结果

5 结 论

1) 基于本文提出的轮地相互作用模型简化方法推导了月球车轮地相互作用的解耦封闭解析模型.

2) 模型简化误差在土壤参数辨识过程中得到了补偿,尽管这些辨识结果与真实土壤参数存在一定差别,但是将其应用于轮地相互作用力/力矩以及沉陷量的预测,误差 $< 10\%$,并且当车轮滑转率 < 0.5 时,可以效地对其进行实时估计,为进行月球车的实时动力学仿真和控制算法设计提供了新的解决方案.

3) 研究结果也可以应用于类似环境中的地面车辆和火星车等移动机器人.

参考文献:

[1] 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.

- [2] YOSHIDA K, HAMANO H. Motion dynamics of a rover with slip-based traction model [C]//Proc IEEE Int Conf Robotics & Automation. Piscataway: IEEE Robotics and Automation Society, 2002: 3155–3160.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] IAGNEMMA K, KANG S, 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.
- [7] HUTANGKABODEE S, ZWEIRI Y H, SENEVIRATNE L D, *et al.* Performance prediction of a wheeled vehicle on unknown terrain using identified soil parameters [C]//Proc 2006 IEEE Int Conf Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Robotics and Automation Society, 2006: 3356–3361.
- [8] 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): 245–247.
- [9] WONG J Y, REECE A R. Prediction of rigid wheel performance based on analysis of soil-wheel stresses, part I: performance of driven rigid wheels [J]. Journal of Terramechanics, 1967, 4 (1): 81–98.
- [10] JANOSI Z, HANAMOTO B. Analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicle in deformable soils [C]// Proc 1st International Conference of ISTVS. Torino: International Society for Terrain-Vehicle Systems, 1961: 707–726.

(编辑 杨 波)