

基于单轮试验的高速星球车动力学 仿真保真度优化

贾志成¹, 金敬福¹, 董新桔¹, 韩丰地², 江 晟², 齐迎春¹, 邹 猛¹

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 长春理工大学空间光电技术研究所, 长春 130022)

摘 要:为提高高速星球车动力学仿真对行驶场景和状态的还原度,提出了一种基于单轮试验的整车动力学仿真方法。该方法将星球车单轮试验数据嵌入整车仿真中,以优化仿真保真度。首先,结合星球车动力学建模理论,分析了轮地接触力精度对整车动力学仿真的影响;其次,通过对星球车车轮进行受力分析,明确了挂钩牵引力、摩擦因数等试验-仿真的关联参数;再次,围绕关联参数系统地设计了单轮试验测量方案,确定基于单轮试验的整车动力学仿真原理和流程;最后,为验证该方法的有效性,基于高速星球车样机开展了单轮试验测试以获取参数,并进行整车仿真测试。仿真结果表明,该方法能更好地还原高速星球车起步加速、车身偏航等行驶状态和车轮受力变化,能有效提高整车动力学仿真结果的准确性。

关键词:地面力学;高速星球车;车轮试验;动力学仿真

中图分类号:V476 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)09-2874-09

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250326

Fidelity optimization of high-speed planetary rover dynamics simulation based on single-wheel experiment

JIA Zhi-cheng¹, JIN Jing-fu¹, DONG Xin-ju¹, HAN Feng-di², JIANG Sheng², QI Ying-chun¹, ZOU Meng¹

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Institute of Space Optoelectronic Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to improve the reduction of driving scene and state in dynamic simulation of high-speed planetary rover, a rover dynamic simulation method based on single-wheel experiment is proposed. This method embeds the single-wheel experiment data of the planetary rover into the vehicle simulation to optimize the fidelity. Firstly, combined with the theory of planetary rover dynamics modeling, the influence of wheel-ground contact force accuracy on vehicle dynamics simulation is analyzed. Secondly, through the force analysis of the planetary rover wheel, the experiment-simulation associated parameters such as drawbar pull and friction coefficient are defined. Thirdly, the single-wheel experiment measurement scheme is systematically designed around the associated parameters, and the vehicle dynamics simulation

收稿日期: 2025-04-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52475019, 52075217).

作者简介: 贾志成(2000-), 男, 博士研究生. 研究方向: 高速无人星球车设计及控制.

E-mail: jiazc22@mails.jlu.edu.cn

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

principle and process based on single-wheel experiment are determined. Finally, in order to verify the effectiveness of this method, a single-wheel experiment was carried out based on the high-speed planetary rover prototype to obtain the parameter data, and the vehicle simulation test was carried out. The simulation results show that this method can better restore the driving state of high-speed planetary rover such as start acceleration, body yaw and wheel force change, and can effectively improve the accuracy of rover dynamics simulation results.

Key words: terramechanics; high-speed planetary rover; wheel experiment; dynamic simulation

0 引言

随着深空探测领域的快速发展,无人星球车已成为行星表面科学探测的核心移动平台^[1]。现有星球车受限于低移动速度与高任务能耗,难以满足火星表面大范围采样、月球基地建设、复杂地形穿越等潜在任务需求^[2]。近年来,高速星球车因其高效的探测能力及较大的巡视范围备受关注^[3,4]。然而,行星表面高速行驶容易导致滑转、沉陷、侧向失稳等风险。因此,研究高速星球车的动力学特性,对确保车辆在不同地形条件下的行驶稳定性和机动能力至关重要^[5,6]。基于此,亟须建立高保真度的动力学分析方法,以支撑高速星球车设计及其控制系统的开发。

尽管整车样机试验可以直观地反映星球车动力学特性,但在实际开展过程中存在成本高、可重复性差、场地条件要求高等诸多问题^[7]。基于多体动力学的整车仿真技术成为研究高速星球车动力学特性的有效替代方案。潘冬等^[8]针对我国火星车的主动悬架式移动系统,建立了系统动力学模型,并进行了仿真验证。高大伟等^[9]采用多体动力学方法,对六轮摇臂-悬架关节式星球车建立了整车动力学模型,并进行了仿真测试。相关研究人员开始考虑提升动力学仿真保真度的方法。徐鸿等^[10]建立了离散元-多体动力学耦合模型和接触算法,对月球车在月壤上的行驶过程进行动力学仿真。Zhang等^[11]为研究金属筛网轮与月球崎岖地形的相互作用,建立了离散元-多柔性体动力学模型。Zhang等^[12]在多体动力学框架中,使用离散元仿真快速校准地面力学模型,以提高仿真保真度。Zhu等^[13]为研究载人月球车在低重力环境下的驱动性能,建立了离散元-有限元耦合仿真系统。但动力学与离散元、有限元等进行耦合仿真的方法不仅需要大量的计算量,且通过离散元或有限元方法表征的轮壤关系与真实场景仍存

在一定的差距。

单轮试验是目前研究轮地相互作用的主要手段之一。相较于整车试验,单轮试验具备成本低、可重复性强等优势^[14]。单轮试验通过在可控试验环境下测量星球车车轮在不同地形、载荷和速度条件下的力学响应,可以有效提取轮地相互作用的关键参数(如挂钩牵引力、剪切力、沉陷量等)^[15]。特别是在松散介质(如月壤、火星土壤)环境下,轮地作用涉及复杂的非线性力学特性,单轮试验为揭示这些机理提供了直接的数据支持。因此,单轮试验不仅是研究星球车动力学的重要试验手段,也是优化轮地相互作用模型、提升仿真精度的基础。

从上述研究中可以看出,仅依赖整车动力学仿真难以真实反映高速星球车在松软、崎岖行星表面上的行驶状态。同时,尽管单轮试验为地面力学分析提供了重要的数据支持,但目前将其与整车动力学仿真结合的研究仍较少。因此,为了提高高速星球车仿真的保真度,本研究提出了一种基于单轮试验的整车动力学仿真优化方法。该方法将星球车单轮试验数据有效嵌入整车仿真模型中,以提升动力学保真度,使其更接近实际场景。本研究可为深空探测高速星球车的设计与性能预测提供理论支撑与技术工具。

1 高速星球车动力学分析

1.1 星球车常规动力学分析

星球车移动系统主要由车体、悬架和车轮组成。在进行高速星球车动力学分析时,可以通过定义广义坐标 $\boldsymbol{q}^{\text{gen}} = [\boldsymbol{P}_b^T \quad \boldsymbol{Q}_b^T \quad \boldsymbol{Q}_s^T \quad \boldsymbol{Q}_w^T]^T$ 描述其运动状态。其中,各组坐标分别为车身位置、车身姿态、悬架各部分角度、各车轮角度,具体可表示为:

$$\begin{cases} P_b = [x_b & y_b & z_b]^T \\ Q_b = [\psi_b & \theta_b & \varphi_b]^T \\ Q_s = [\phi_{s1} & \cdots & \phi_{sN^s}]^T \\ Q_w = [\varphi_{w1} & \cdots & \varphi_{wN^w} \theta_{w1} & \cdots & \theta_{wN^w}]^T \end{cases} \quad (1)$$

车体、悬架和车轮的速度关系可结合具体的悬架结构和运动学关系推导。星球车的整车动能可表示为:

$$T = T_b + T_s + T_w \quad (2)$$

式中: T_b 、 T_s 、 T_w 分别为车体、悬架和车轮的动能。

以悬架为例,其动能可表示为各部件转动和平动动能之和,具体形式为:

$$T_s = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N^s} (\dot{\phi}_{si}^T I_{si} \dot{\phi}_{si} + m_{si} \mathbf{v}_{si}^T \mathbf{v}_{si}) \quad (3)$$

式中: I_{si} 、 m_{si} 、 $\mathbf{v}_{si}$ 分别为悬架中各部件的转动惯量、质量和速度; N^s 为部件总数量。

星球车整车势能 V 也可表示为:

$$V = m_b g z_b + \sum_{i=1}^{N^s} m_{si} g z_{si} + \sum_{j=1}^{N^w} m_{wj} g z_{wj} + \sum_{p=1}^{N^p} \frac{1}{2} k_p z_p^2 \quad (4)$$

式中: k_p 、 z_p 分别为星球车悬架或车轮中使用的弹性部件的刚度和压缩量。

弹性部件能起到缓冲减震的作用,在高速星球车设计中尤为重要^[16]。

星球车系统的广义力可表示为:

$$F^{\text{gen}} = J_w^T F_w - \sum_{p=1}^{N^p} c_p \dot{z}_p + J_{\text{drive}}^T F_{\text{drive}} \quad (5)$$

式中: F_w 为行驶地形对车轮的作用力; J_w^T 、 J_{drive}^T 均为用于坐标转换的计算矩阵; c_p 为弹性部件的阻尼系数; F_{drive} 为星球车中各驱动部件提供的驱动力。

根据拉格朗日方程:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}^{\text{gen}}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q^{\text{gen}}} + \frac{\partial V}{\partial q^{\text{gen}}} = F^{\text{gen}} \quad (6)$$

可将高速星球车常规动力学分析整理为:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + K(q) = J_w^T F_w - \sum_{p=1}^{N^p} c_p \dot{z}_p + J_{\text{drive}}^T F_{\text{drive}} \quad (7)$$

1.2 轮地接触力精度的影响

在进行高速星球车常规动力学仿真时,通常会将车轮与行驶地形的接触力简化为刚体间的力学作用。这会导致仿真力值 F_w 与真实星球车行

驶状态 $F_{w^{\text{act}}}$ 存在一定的偏差 ΔF_w :

$$F_w = F_{w^{\text{act}}} - \Delta F_w \quad (8)$$

该偏差会对星球车动力学仿真结果的有效性和准确性造成影响,且在高速星球车仿真中表现得更加明显,主要原因如下:①高速行驶状态下,星球车车轮与松软星壤间的地面力学作用更加复杂;②高速星球车车轮通常是针对整车结构和工程需求设计的,特殊性较强。

根据星球车车轮受力情况,轮地接触力偏差主要涉及:

$$\Delta F_w = f(\Delta F_{wDP}, \Delta F_{wN}, \Delta F_{wS}, \Delta \eta_w) \quad (9)$$

式中: F_{wDP} 为车轮的挂钩牵引力; F_{wN} 为法向支撑力; F_{wS} 为侧向力; η_w 为轮地接触角。

为了降低轮地接触力偏差,提高星球车动力学仿真的保真度,通常采用以下方法:

(1)建立轮地接触力理论模型,在动力学仿真中对星球车车轮受力进行实时计算并赋值。但地面力学理论模型建立难度大、精确性低。

(2)利用离散元或有限元技术进行耦合仿真,还原行星土壤松软、变形的特性。但该方法存在仿真土壤参数标定困难、仿真过程计算量大且耗时长的问題。

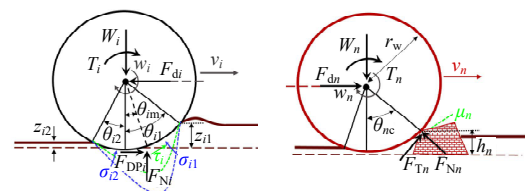
基于单轮试验数据降低轮地接触力偏差的方法具有仿真还原性强、计算量小的优点。但是,该类方法需要具备单轮试验硬件条件,且需要开展前期试验测量。同时,该类方法通用性较差,需要对被仿真的高速星球车车轮进行针对性的单轮试验。

2 基于单轮试验的整车仿真

2.1 试验-仿真关联参数

行星表面主要地形为松软星壤和崎岖石块,根据星球车车轮行驶地形种类 E_w 不同,车轮受力分析也存在差异,如图 1 所示。

车轮 i 在星壤行驶时,车轮受力可表示成如下形式。



(a)星壤行驶(软土-星球车车轮) (b)越障行驶(硬石-星球车车轮)

图 1 星球车车轮受力分析

Fig. 1 Force analysis of planetary rover wheel

$$\begin{cases} F_{Ni} = r_w b_w \left\{ \int_{\theta_{i1}}^{\theta_{i2}} \sigma_{i1}(\theta) \cos \theta d\theta + \int_{\theta_{i2}}^{\theta_{im}} \sigma_{i2}(\theta) \cos \theta d\theta + \int_{\theta_{i2}}^{\theta_{i1}} \tau_i(\theta) \sin \theta d\theta \right\} \\ F_{DPi} = r_w b_w \left\{ \int_{\theta_{i2}}^{\theta_{i1}} \tau_i(\theta) \cos \theta d\theta - \int_{\theta_{im}}^{\theta_{i1}} \sigma_{i1}(\theta) \sin \theta d\theta - \int_{\theta_{i2}}^{\theta_{im}} \sigma_{i2}(\theta) \sin \theta d\theta \right\} \end{cases} \quad (10)$$

式中: r_w 、 b_w 分别为车轮结构和尺寸参数 R_w 中的半径和宽度; θ_{i1} 、 θ_{i2} 分别为在松软地面上的进入角和离开角, 与车轮沉陷量 z_w 有关; θ_{im} 为软土-车轮接触应力达到最大值的角位置。

根据相关研究^[17], 其影响因素主要为:

$$z_w = f(R_w, W_w, P_s, s_w) \quad (11)$$

式中: W_w 、 P_s 、 s_w 分别为车轮的载荷、星壤的参数、车轮的滑转率。

车轮的滑转率由行驶速度 v_w 和角速度 ω_w 定义, 即:

$$s_{wi} = \begin{cases} \frac{r_w \omega_{wi} - v_{wi}}{r_w \omega_{wi}}, & r_w \omega_{wi} \geq v_{wi}, 0 \leq s_{wi} \leq 1 \\ \frac{r_w \omega_{wi} - v_{wi}}{v_{wi}}, & r_w \omega_{wi} < v_{wi}, -1 \leq s_{wi} \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(10)中, σ 、 τ 分别为车轮与星壤间的剪切应力和法向应力, 根据地面力学理论可表示为:

$$\begin{aligned} \sigma_{i1}(\theta) = & \begin{cases} \left(\frac{k_c}{b_w} + k_\varphi \right) r_w^{n_s} (\cos \theta - \cos \theta_{i1})^{n_s}, & \theta_{im} \leq \theta \leq \theta_{i1} \\ \left(\frac{k_c}{b_w} + k_\varphi \right) r_w^{n_s} \left[\cos \theta_{i1} - \left(\frac{\theta - \theta_{i2}}{\theta_{im} - \theta_{i2}} \right) (\theta_{i1} - \theta_{im}) \right] - \cos \theta_{i1}, & \theta_{i2} \leq \theta < \theta_{im} \end{cases} \\ \tau_{im} = & [c_s + \sigma(\theta) \tan \varphi_s] \cdot \\ & \left[1 - \exp \left(\frac{-r_w [(\theta_{i1} - \theta) - (1 - s_w)(\sin \theta_{i1} - \sin \theta)]}{K} \right) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\left[1 - \exp \left(\frac{-r_w [(\theta_{i1} - \theta) - (1 - s_w)(\sin \theta_{i1} - \sin \theta)]}{K} \right) \right] \quad (14)$$

式中: k_c 、 k_φ 、 n_s 、 c_s 、 φ_s 均为星壤参数 P_s 中的力学性能参数。

星球车车轮 n 与障碍石块的作用力可以用弹簧阻尼模型表示, 即:

$$F_{N_n} = k_n z_n^e \quad (15)$$

$$F_{T_n} = \mu_n F_{N_n} \quad (16)$$

式中: k_n 为火星车车轮与硬石的相对刚度; z_n 为轮地接触变形量; e 为轮地之间的力变形系数; μ_n 为车轮与硬石的切向摩擦因数。其中, k_n 、 z_n 、 e 均与车轮自身特性 R_w 和石块特性 P_r 相关。

此外, 图1中 θ_{nc} 为轮地作用角, 会影响车轮受力的作用方向。

综合上述分析, 影响星球车车轮地接触力的主要因素, 即本研究中需要考虑的试验-仿真关联参数可汇总为:

$$P_{ES} = \begin{cases} f(R_w, W_w, P_s, s_w, v_w), & E_w = \text{soil} \\ f(R_w, W_w, P_r, \mu_n, \theta_{nc}), & E_w = \text{stone} \end{cases} \quad (17)$$

需要注意的是, 由于高速星球车车轮行驶速度 v_w 的提升会造成轮地作用波动, 并影响 s_w 值, 因此将其作为独立的关联参数。在本研究中, 为避免仿真分析过于复杂, 不考虑车轮侧向力、车轮载荷波动和车轮重复通过对地面状态的影响。

2.2 单轮试验测量

2.2.1 测量原理

现有单轮试验台通常使用多维力和扭矩传感器测量被试车轮在不同试验条件下的轮地接触力值^[14]。常见的星球车单轮试验台方案如图2所示。以图2(a)为例, 通过改变载荷配重的质量, 可以调整被试车轮的试验载荷; 通过采集安装在驱动电机后端的六维力传感器数据, 可以解析获得被试车轮的受力状态。

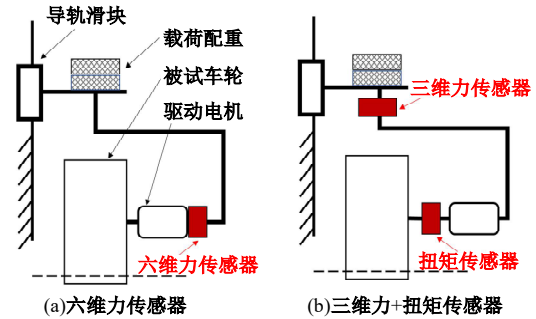


图2 单轮试验台方案

Fig. 2 Single-wheel experiment bench scheme

以安装六维力传感器的单轮试验台为例, 其测量原理如图3所示。

2.2.2 基于关联参数的测量方案

结合式(17), 可将关联参数测量方案设定为: 根据高速星球车工程和仿真需求, 确定被试车轮参数 R_w 和星球车行驶地形类型, 并计算各车轮载荷 W_w 。软土测试: 对车轮 R_w 施加载荷 W_w , 在模拟星壤 P_s 上测量不同 s_w 、 v_w 条件下的挂钩牵引力

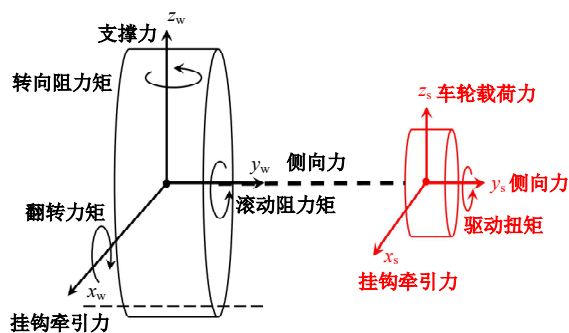


图 3 单轮试验测量原理

Fig. 3 Measurement principle of single-wheel experiment

F_{wDP} 。硬石测试:对车轮 R_w 施加载荷 W_w ,在模拟行星岩石 P_r 上测量 $\theta_{nc}=0$ 时的轮地摩擦因数 μ_n 。需要注意的是,通常认为车轮-石块为刚体接触,轮地接触角 θ_{nc} 并不影响摩擦因数 μ_n 的值,并且常规动力学仿真软件可以体现行驶过程中轮地接触角的实时变化。因此,在单轮试验中无需将其作为试验变量。

2.2.3 试验流程

软土测试:①安装被试车轮 R_w ,铺设并整備模拟星壤 P_s ,施加固定载荷配重 W_w ;②设置车轮前进速度 v_w 和车轮滑转率 s_w ;③启动车轮试验,采集并记录试验数据后重新整備模拟星壤;④在相同的车轮前进速度 v_w 下,改变车轮滑转率 s_w 并重复试验,直到获取该速度时车轮不同滑转率 s_w 下足够的的结果;⑤改变车轮前进速度 v_w ,并重复步骤②~④,直到获取在各种 v_w 时车轮不同滑转率 s_w 下足够的的结果。

硬石测试:①安装被试车轮 R_w ,水平铺设模拟行星岩石材质的石板 P_r ,施加固定载荷 W_w ;②设置车轮前进速度 v_w ,设置车轮滑转率 $s_w=1$,即车轮为纯滑移状态;③开始车轮试验,采集并记录试验数据,计算车轮-石板的摩擦因数 μ_n (包括静摩擦因数和动摩擦因数)。

需要注意的是,由于试验参数设置为离散值,因此软土测试后需对试验数据进行处理和拟合,以获取连续的试验结果和关联参数间的函数关系,便于仿真时的实时计算。函数关系可表示为:

$$F_{wDP} = f(v_w, s_w) \quad (18)$$

2.3 整车动力学仿真

图 4 为基于单轮试验数据的高速星球车整车动力学仿真流程图。图中步骤可通过常规动力学仿真软件实现,从而将星球车单轮试验数据有效

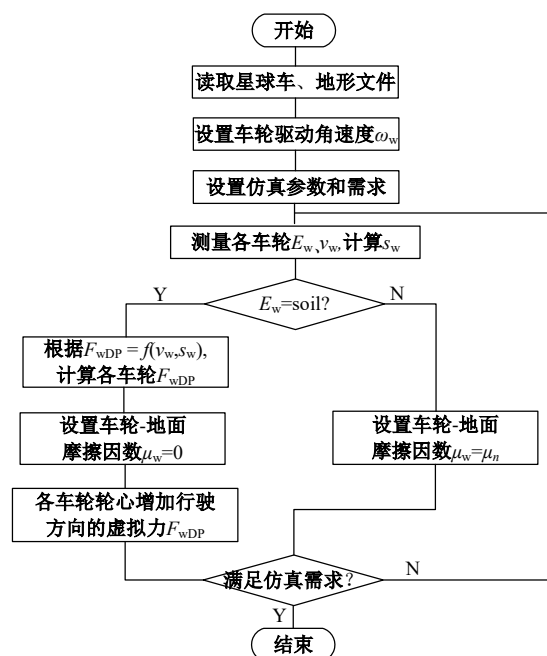


图 4 整车动力学仿真流程图

Fig. 4 Flow chart of vehicle dynamics simulation

嵌入实时的整车仿真中。

在进行整车动力学仿真时,各车轮正在行驶的地形类型 E_w 可通过建立带有地形属性的混合网格地形文件并实时测量各车轮的位置进行对照获取^[18]。在部分研究中,也可以采用实时测量各车轮轮心高度 h_w 变化的简单方法区分地形类型 E_w :当 $h_w > r_w$ 时,说明该车轮被抬起处于越障状态,此时 $E_w = \text{stone}$;反之,则 $E_w = \text{soil}$ 。

各车轮的实时前进速度 v_w 可通过实时测量轮心速度并计算其前进方向的分量获得。在本研究中,采用实时测量高速星球车车体速度 v_R 和旋转变角速度 ω_R 计算各车轮 v_w ,如图 5 所示。这种计算方式更符合工程应用场景,因为在实际工程中星球车位姿信息大多通过车身安装的惯性测量单

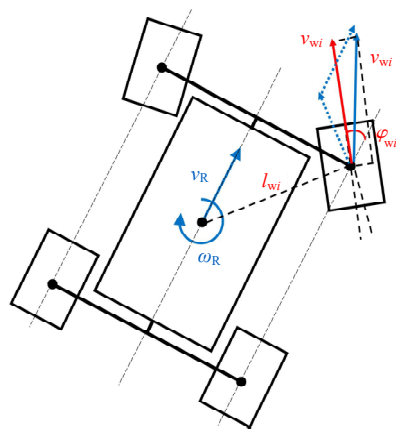


图 5 车轮前进速度计算方法

Fig. 5 Calculation method of wheel forward speed

元获取。在忽略悬架姿态对车轮前进速度的影响时,该计算关系可表示为:

$$v_w = \text{forward}(v_{wi}, \varphi_{wi}) = \text{forward}(v_R + \omega_R \times l_{wi}, \varphi_{wi}) \quad (19)$$

式中: $\text{forward}(v_{wi}, \varphi_{wi})$ 为绝对矢量速度为 v_{wi} 且转角为 φ_{wi} 的车轮在行驶方向上的速度分量。

3 单轮试验测试

本研究使用的单轮试验台如图6所示,其传感器安装采用图2(a)方案。试验过程中,通过控制直线导轨速度和驱动电机角速度调节被试车轮的滑转率。试验台土槽尺寸为 $1.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$, 内部可铺设 JLU-2b 系列模拟月壤或石板,以模拟各类星球车车轮的行驶场景,如图6(b)、(c)所示。JLU-2b 系列模拟月壤由吉林大学地面力学课题组研制,其变形指数为 1.06,内聚力为 1.82 kPa,内摩擦角为 32.7° 。

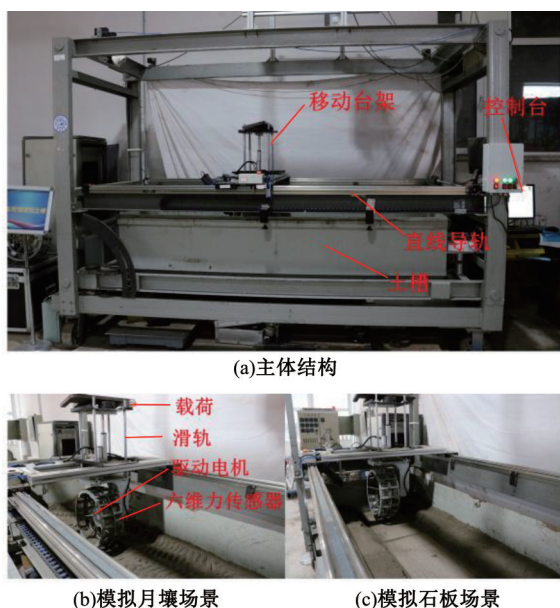


图6 单轮试验台

Fig. 6 Single wheel experiment bench

本研究使用的高速星球车车轮由课题组自主设计和制造,如图7所示。该车轮为刚性金属结构,由刚性轮毂、筛网轮面和非间断高鼓形轮刺组成。镂空处的筛网轮面可以减轻车轮重量;非间断高鼓形轮刺结构可以降低高速星球车行驶和转向时由轮刺造成的起伏和颠簸,同时较高的轮刺可以增强高速行驶时的牵引力。单轮试验所用车轮的直径为 400 mm,宽度为 150 mm,最大轮刺高度为 15 mm。

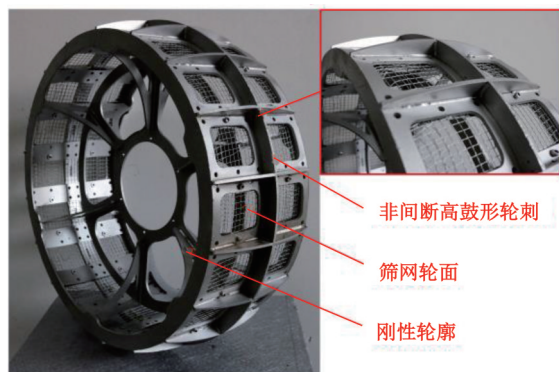


图7 被试高速星球车车轮

Fig. 7 The tested high-speed planetary rover wheel

根据动力学仿真需求,单轮试验包括车轮-模拟月壤试验和车轮-硬石板试验。根据常规无人星球车整车重量,设置被试车轮载荷为 200 N。车轮-模拟月壤试验用于测量星球车车轮在 $E_w = \text{soil}$ 时,不同前进速度 v_w 和车轮滑转率 s_w 下的挂钩牵引力,具体设置车轮前进速度分别为 20、40、60、80、100 mm/s,车轮滑转率分别为 -1、-0.8、-0.6、-0.4、-0.2、0、0.2、0.4、0.6、0.8;车轮-硬石板试验用于测量星球车车轮在 $E_w = \text{stone}$ 时的摩擦因数,设置车轮滑转率为 -1。在每次试验后,需要对土槽进行重新整备。

图8(a)为车轮-模拟月壤的单轮试验结果。当滑转率为正值时,车轮提供与前进方向相同的挂钩牵引力,且随滑转率的增大而增大。试验中,当车轮速度为 40 mm/s、滑转率为 0.2 时,车轮挂钩牵引力为 53.75 N;随着滑转率增大到 0.4,挂钩牵引力增大到 85.09 N。当滑转率为负值时,车轮提供与前进方向相反的挂钩牵引力,对星球车行驶产生阻力效应。试验中,当车轮速度为 20 mm/s、滑转率为 -0.8 时,挂钩牵引力为 -218.04 N。随着车轮前进速度增大,车轮受力呈现增大趋势:当滑转率为 0.2、前进速度为 80 mm/s 时,车轮挂钩牵引力为 55.44 N;当前进速度增大到 100 mm/s 时,挂钩牵引力为 58.26 N。

图8(b)为车轮-硬石板的单轮试验结果。试验中,缓慢拉动硬石板上的被试车轮,测量车轮在拉动方向的受力值(拉动速度为 1 mm/s,车轮载荷为 200 N)。在本研究试验条件下,测得拉动瞬间被试车轮最大受力为 -144.3 N,平稳移动时平均受力为 -99.1 N。结合车轮载荷计算可得,本研究中被试车轮与硬石地形的静摩擦因数约为 0.72,动摩擦因数为 0.50。

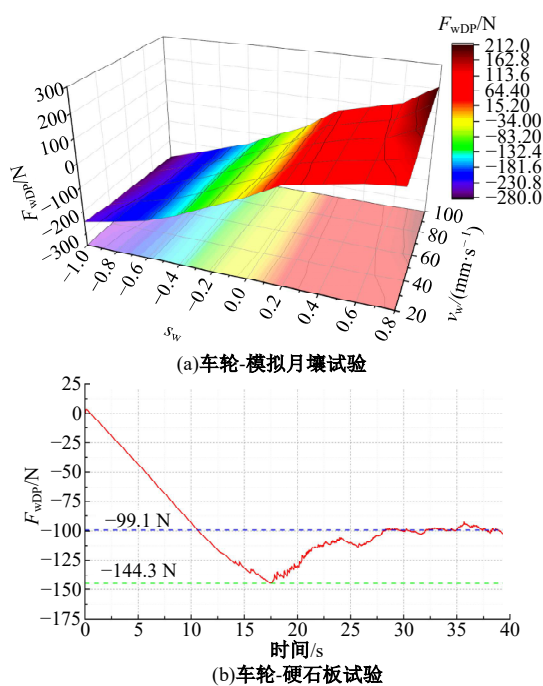


图 8 单轮试验结果

Fig. 8 Single-wheel experiment results

4 整车仿真测试

本研究用于整车仿真测试的高速星球车如图 9 所示。该星球车为吉林大学地面力学课题组自主设计的四轮高速无人星球车 JLU-HSR-II, 其移动系统由车身、前后摇臂、差动连杆和减震器组成, 可实现崎岖行星表面行驶时的全轮附着和缓冲减震。仿真中, 设置星球车前后轮距为 1 200 mm, 左右轮距为 950 mm, 整车质量为 80 kg。

整车动力学仿真采用 ADAMS 和 MATLAB 软件搭建的仿真系统, 以验证基于单轮试验的高速星球车动力学仿真方法的有效性, 具体原理如图 10 所示。其中, ADAMS 软件用于模拟星球车行驶场景和常规动力学接触关系; MATLAB 软件根据单轮试验结果数据和车轮行驶场景, 计算各车轮受力并将其赋值到 ADAMS 软件的实时动力学仿真中。在整车仿真测试中, 设置各车轮的转速为 $22.92^\circ/\text{s}$, 即在滑转率为 0 时车轮的前进速度为 80 mm/s; 设置 ADAMS 软件的仿真时长为 40 s, MATLAB 软件的车轮受力计算频率为 20 Hz。星球车行驶场景及地形设置如图 10 所示, 在星球车右侧车轮前方设置一块硬石地形, 其余部分为软土地形。仿真测试包括基于单轮试验的整车动力学仿真测试和常规动力学仿真对照测试。常规动力学仿真测试中, 设置星球车行驶地

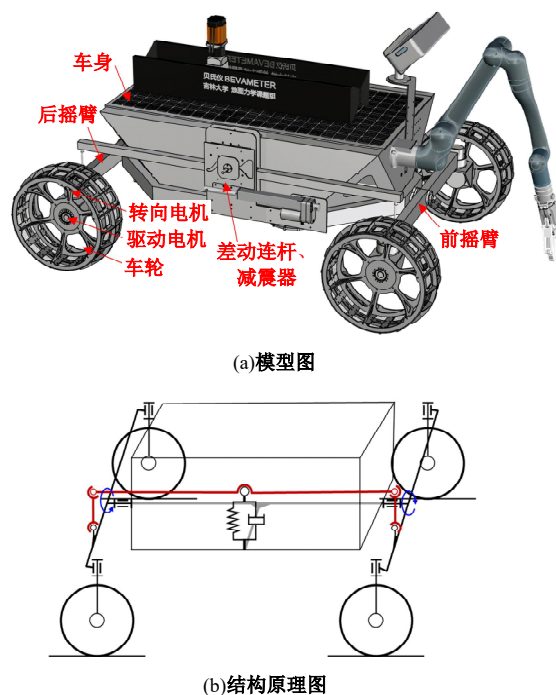


图 9 用于仿真测试的高速星球车

Fig. 9 High-speed planetary rover for simulation test

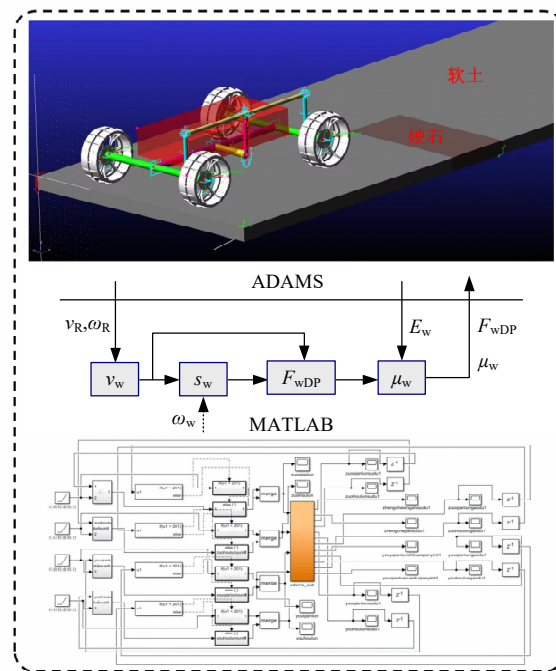


图 10 基于单轮试验的星球车整车动力学仿真

Fig. 10 Planetary rover vehicle dynamics simulation based on single-wheel experiment

形均为硬石地形, 车轮与地面为刚性接触。

整车动力学仿真测试中, 星球车整车状态如图 11(a) 所示, 主要包括前进速度和车身角速度。常规动力学仿真中, 开始阶段整车前进速度超过 80 mm/s 且不断波动; 在稳定后, 星球车以较稳定

的速度行驶,平均前进速度 $>79\text{ mm/s}$ 。可以看出,在常规动力学仿真中星球车几乎不与地面发生滑动。在基于单轮试验的整车动力学仿真中,星球车在开始阶段行驶速度从 0 mm/s 逐渐增大并趋于稳定;在稳定后,星球车前进速度约为 76 mm/s ,整车滑转率约为 0.05 。另外,在星球车行驶至软土和硬石的地形变化处时,整车前进速度增大到约 78 mm/s 。对于车身角速度,常规动力学仿真中较为稳定,星球车处于直线行驶状态。在基于单轮试验的整车动力学仿真中,当星球车的右前轮和右后轮从软土行驶到硬石地形时,车身角速度发生明显变化(最大值为 $0.45^\circ/\text{s}$)。这说明在基于单轮试验的整车动力学仿真中,地形状态变化会引发车身偏航现象。

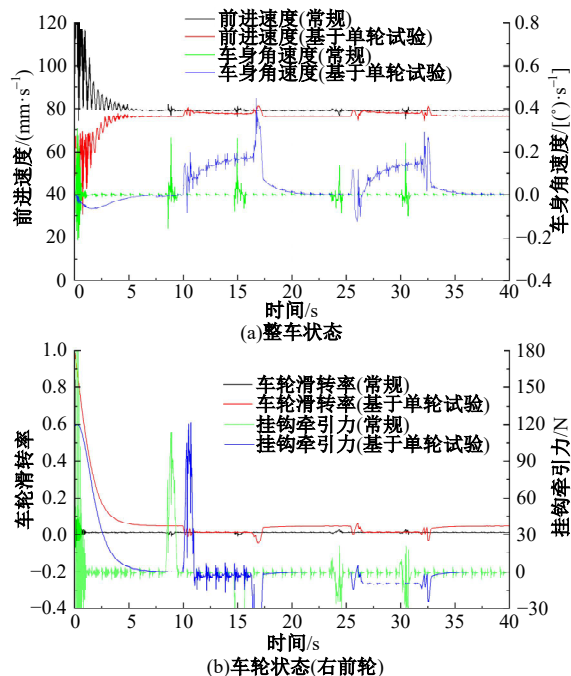


图11 整车仿真测试结果

Fig. 11 Vehicle simulation test results

整车动力学仿真测试中,星球车右前轮状态如图11(b)所示,主要包括车轮滑转率和挂钩牵引力。对于车轮滑转率,基于单轮试验的整车动力学仿真更能体现起步阶段和行驶地形变化时的车轮滑转率变化。由于实际星球车控制和仿真中车轮驱动角速度命令快速执行,在 $0\sim 5\text{ s}$ 起步阶段,星球车车轮从纯滑转状态逐渐降低滑转率并趋于稳定。同时,在单轮试验的仿真显示右前轮在硬石地形的滑转率低于软土地形,符合星球车行驶场景。对于挂钩牵引力,基于单轮试验的整车动力学仿真在起步阶段和软土地形行驶时力值

变化更平稳。在仿真测试的 $25\sim 33\text{ s}$,星球车右后轮从软土地形行驶到硬石地形,常规动力学仿真中右前轮受力变化不明显;而基于单轮试验的整车动力学仿真中,右前轮受力明显发生变化并稳定在 -9 N 左右,这是由于右后轮的推动使右前轮前进速度变大、滑转率降低。

根据上述测试结果可以看出,相较于常规动力学仿真,基于单轮试验的整车动力学仿真能更准确地还原高速星球车起步加速、车身偏转等整车行驶状态,并更好地反映出各车轮行驶地形变化和受力变化。以上测试验证了基于单轮试验的高速星球车动力学仿真方法可有效提升星球车整车仿真的保真度。

5 结束语

针对高速星球车移动系统,提出了一种基于单轮试验的整车动力学仿真优化方法。首先,结合星球车动力学建模理论,分析了轮地接触力精度对整车动力学仿真的影响,以及现有保真度优化方法的不足。其次,基于星球车车轮地面力学理论,确定试验-仿真关联参数,并系统性梳理了软土测试和硬石测试的单轮试验方法,建立了基于单轮试验的整车动力学系统仿真流程。最后,为验证该方法的有效性,使用高速星球车车轮和单轮试验台,开展了单轮试验测试,获取挂钩牵引力、摩擦因数等参数,并进行整车仿真测试。仿真结果表明,相比常规动力学仿真方法,该方法能更准确地还原高速星球车行驶状态和车轮受力变化,且具有针对性强、计算量小的优势。本研究结果可为高速星球车仿真优化、性能测试、控制开发等提供技术支持。

参考文献:

- [1] 贾阳,孙泽洲,郑旻,等. 星球车技术发展综述[J]. 深空探测学报, 2020, 7(5): 419-427.
Jia Yang, Sun Ze-zhou, Zheng Yang, et al. Overview on development of planetary rover technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(5): 419-427.
- [2] Sanguino T D M. 50 years of rovers for planetary exploration: a retrospective review for future directions [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017, 94: 172-185.
- [3] Lu R C, Gao H B, Liu Z, et al. Design methodolo-

- gy, synthesis, and control strategy of the high-speed planetary rover[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2024, 19(2): 245-256.
- [4] Rodríguez-Martínez D, van Winnendael M, Yoshida K. High-speed mobility on planetary surfaces: A technical review[J]. *Journal of Field Robotics*, 2019, 36(8): 1436-1455.
- [5] 曹剑飞, 梁常春, 王瑞, 等. 载人月球车稳定操控策略设计与优化[J]. *宇航学报*, 2023, 44(9): 1379-1391.
- Cao Jian-fei, Liang Chang-chun, Wang Rui, et al. Design and optimization of stable control strategy for manned lunar rover[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(9): 1379-1391.
- [6] 马龙宇, 王慎泉, 蒋松, 等. 一种扭转式载人月球车及其高速移动性能研究[J]. *宇航学报*, 2023, 44(9): 1392-1400.
- Ma Long-yu, Wang Shen-quan, Jiang Song, et al. Research on a torsional manned lunar rover and its high speed mobility performance[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(9): 1392-1400.
- [7] 党兆龙, 邹猛, 宋家锋, 等. 模拟火壤结壳及其力学性能[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2024, 54(8): 2393-2400.
- Dang Zhao-long, Zou Meng, Song Jia-feng, et al. Experimental on mechanical properties of simulated Mars soil crust and its crusting[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2024, 54(8): 2393-2400.
- [8] 潘冬, 李德伦, 袁宝峰, 等. 火星车系统动力学建模与仿真分析[J]. *深空探测学报*, 2020, 7(5): 437-444.
- Pan Dong, Li De-lun, Yuan Bao-feng, et al. Dynamics modeling and simulation analysis of Mars rover system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(5): 437-444.
- [9] 高大伟, 黄铁球, 邢琰. 六轮摇臂-悬架式星球车全动力学建模与分析[J]. *航天控制*, 2021, 39(1): 46-51.
- Gao Da-wei, Huang Tie-qiu, Xing Yan. Complete dynamics modeling and analysis of 6-wheel rocker-bogie rover[J]. *Aerospace Control*, 2021, 39(1): 46-51.
- [10] 徐鸿, 雷波, 刘锦阳. 月球车与月壤交互作用的离散元-多体动力学耦合建模[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(4): 239-249.
- Xu Hong, Lei Bo, Li Jin-yang. DEM-MBD coupled modelling and analysis for the mutual interaction of lunar rover and moon soil[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(4): 239-249.
- [11] Zhang K D, Zhang Y Q, Wu J L, et al. Three-dimensional MFB-Dem coupling simulation of flexible wire mesh wheel-soil over lunar rough terrain[J]. *Computational Particle Mechanics*, 2024, 12: 1349-1370.
- [12] Zhang Y M, Dai J P, Hu W, et al. Using high fidelity discrete element simulation to calibrate an expeditious terramechanics model in a multibody dynamics framework[J/OL]. [2025-03-25]. <https://www.semanticscholar.org/reader/8a0b8e0f8004548b720eabf75446c5d09ec20a74>
- [13] Zhu J Z, Zou M, Shen Y, et al. 3D DEM-FEM simulation of the flexible metal wheel-soil interaction in low gravity environments[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2022, 237(6): 1267-1278.
- [14] Chen L N, Zou M, Chen Z, et al. The applications of soil bin test facilities to terramechanics: a review[J]. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 2024, 35(3): 683-703.
- [15] Du J S, Huang T Q. A method for traction ability research of a rover wheel on mixed planet terrain with movable stones[J]. *Space: Science & Technology*, 2023, 3: No. 0018.
- [16] Rodríguez-Martínez D, Uno K, Sawa K, et al. Enabling faster locomotion of planetary rovers with a mechanically-hybrid suspension[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2024, 9(1): 619-626.
- [17] 袁野, 杨怀广, 丁亮, 等. 反映载荷影响的星球车车轮试验及模型研究[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(14): 263-271.
- Yuan Ye, Yang Huai-guang, Ding Liang, et al. Experimental study and modeling considering the influence of wheel load for planetary exploration rovers[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(14): 263-271.
- [18] 翟广龙, 黄铁球. 星球车刚性车轮在混合地形上牵引性能研究[J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(6): 1240-1248.
- Zhai Guang-long, Huang Tie-qiu. Exploring tractive performance of planetary rover's rigid wheels on mixed terrain[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, 38(6): 1240-1248.