

非对称行星探测车行走系统的动力学仿真及运动性能分析

杜建军, 任明俊, 刘 瞰, 朱建军

(哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘 要: 为了提高探测车在崎岖路面中的运动性能, 提出了一种非对称轮式探测车行走系统. 该车具有整体式超静定结构, 6 个车轮通过悬挂装置与车身相连, 非对称分布于车体两侧, 悬架结构可以主动控制来提高探测车在崎岖路面中的运动性能. 采用牛顿—欧拉法建立了行走系统的动力学模型, 给出了几何和速度约束方程, 采用有限差分法求解由微分方程和代数方程构成的联合方程组. 对非对称构型探测车的运动性能进行了计算机仿真, 得出了一些运动规律. 原理样机试验表明, 该车具有较强的越障和过沟能力.

关键词: 探测车; 非对称行走系统; 牛顿—欧拉法; 动力学模型; 运动性能

中图分类号: TP24

文献标识码: B

文章编号: 1002-0446(2011)-01-0001-08

Dynamics Simulation and Motion Capability Analysis on the Mobile System for Asymmetric Planetary Rover

DU Jianjun, REN Mingjun, LIU Tun, ZHU Jianjun

(Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: A kind of asymmetric mobile system for wheeled rovers is proposed for enhancing motion performance in rough terrain. The rover has an integral and statically indeterminate structure with six wheels asymmetrically joined at the two sides by suspension mechanism. The suspension configuration can be actively controlled to improve the rover mobility in high challenging terrains. Newton-Euler method is adopted to establish dynamic model for the mobile system, and the geometry and velocity constraint equations are given. The equation system consisting of differential and algebraic equations is solved by finite difference method. Simulations are performed to study the dynamic performance of the asymmetric rover, and some motion laws are obtained. The strong obstacle-overcoming and ditch-passing capabilities of the rover are testified by experiments on the principle prototype.

Keywords: robotic rover; asymmetric mobile system; Newton-Euler method; dynamic model; motion capability

1 引言 (Introduction)

在行星探测活动中, 行星探测车扮演着极其重要的角色, 可以代替人类到危险、未知的环境中进行探测与考察. 由于行星表面的地形非常复杂, 遍布大小不等的岩石、沟壑等障碍物^[1], 所以对探测车行走系统提出了很高的要求. 目前已经出现的行星探测车的行走系统构型, 包括前苏联的 Lunokhod 系列月球车^[2] (8 轮超静定) 和 Marsokhod 火星探测车, 美国的 Sojourner 系列火星车^[3] (6 轮静定), 欧洲航天局的 Shrimp 探测车^[4] (6 轮连杆式静定), 日本的 Micro5 探测车 (5 点接触悬吊结构). 国内科研单位研制出正反四边形悬架月球车^[5]、五轮铰接式月球车^[6] 和行星轮式月球车等行走系统新构型^[7]. 但上

述车型都是基于车轮在车体两侧对称分布的构型, 车轮在车体两侧非对称分布的探测车构型还未见文献报道^[8-9].

国外在行星探测车的动力学仿真方面取得很多成果并且得到实际应用, 例如 WITS 和 ROAMS 仿真软件的成功开发^[10]. 国内在这方面也开展了一些研究, 例如采用 Adams 软件进行探测车动力学仿真^[5], 或进行运动学建模与运动收敛性分析^[11], 或采用虚拟样机进行动力学仿真^[12]. 由于 Adams 软件无法建立土壤的粘合度、密度等性能参数, 所以无法对松软土壤下的探测车进行动力学仿真. 另外, 在超静定车运动特性研究中, 如何将动力学方程与几何和速度约束方程很好地结合值得进一步研究.

通过以上分析, 提出一种车轮在车体两侧非对

称分布的探测车新构型,从而研究和探讨非对称构型的探测车的运动性能;针对这种构型采用牛顿—欧拉方法建立了完整的动力学模型,给出了几何和速度约束方程,在 Matlab 环境下采用有限差分法求解由微分方程(动力学方程)和代数方程(几何和速度约束方程)构成的联合方程组,得出了非对称构型探测车行走系统的一些运动规律,并通过行走实验进行了验证。

2 非对称探测车行走系统总体构型 (Overall configuration of the mobile system for asymmetric rover)

通过图 1 可以看出,6 轮静定车通过直壁沟壑与障碍的能力稍显欠缺,另外最关键的是一旦地形确定,静定车的各轮载荷就无法人为改变,如果某几个车轮陷入砂窝中就很难驶出(美国的“机遇号”火星车就发生过这种问题)。8 轮超静定车通过直壁沟壑与障碍的能力较强,还可通过抬压车轮来重新分配各轮的载荷,使没有陷入砂窝的车轮承受更大的载荷以提供更大的驱动力,从而驶出砂窝(为此须加装电机和抬压机构,但此机构可以和收拢车轮以适应整流罩的机构合二为一,并不会增加系统的冗余度)。但是 8 轮车的轮数多,增加了整车的重量,控制也复杂;如果 6 轮超静定车的过沟和越障能力

也满足要求,应该以 6 轮车为佳。但是由图 2 可见,传统的 6 轮超静定车的过沟能力也较差,而且抬轮越障时车身由于支承点少而容易失稳;另外,虽然通过调整 6 轮超静定车的偏航角能辅助增强越障过沟能力,但是控制比较复杂而且越障时车身滚转角变化较大,影响探测车的运动平稳性。

行星表面崎岖不平,即使车轮在车体两侧对称分布,左右两侧的车轮也会因所遭遇的路况不同而有不同的运动状态(例如左侧车轮打滑而右侧车轮不打滑,左侧车轮高而右侧车轮低等等)。因此车轮在车体两侧对称分布不再是探测车的必要条件,非对称构型探测车的运动特点和运动性能值得研究和探讨。基于此,提出了一种非对称 6 轮超静定探测车行走系统,如图 3 所示,车轮通过悬挂装置,非对称分布于车体两旁,6 个车轮的轴线交错分布,任意 2 个车轮轴都不在一条直线上,这相当于增加了车轴数(共有 6 个车轮轴在保持车体的平衡),为姿态控制提供了更多的选择方案,抬压车轮越障时更容易保证车身的平稳,而且提高了过沟能力(如图 3 所示)。利用扭簧解决了超静定承力问题,同时在摇臂与底盘连接处加装了电机和蜗轮蜗杆抬压机构,利用电机驱动蜗杆、蜗杆带动蜗轮以抬压摇臂;蜗轮蜗杆的自锁性能也使地形变化导致的摇臂自由旋转(当然要受到扭簧的制约)不会直接作用于电机。



图 1 6 轮静定车和 8 轮超静定车的越障过沟能力对比

Fig.1 Capabilities to traverse ditch and climb obstacle of statically determinate rovers with six wheels and statically indeterminate rovers with eight wheels

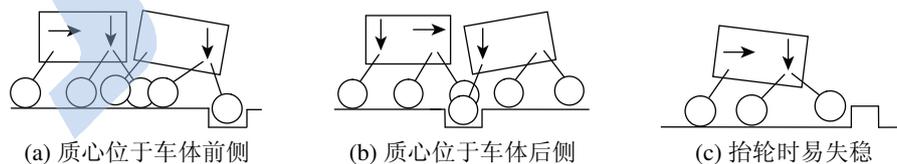


图 2 传统的 6 轮超静定车过沟和越障能力差

Fig.2 Conventional statically indeterminate rover with six wheels lacks of capability to traverse ditch and climb obstacle

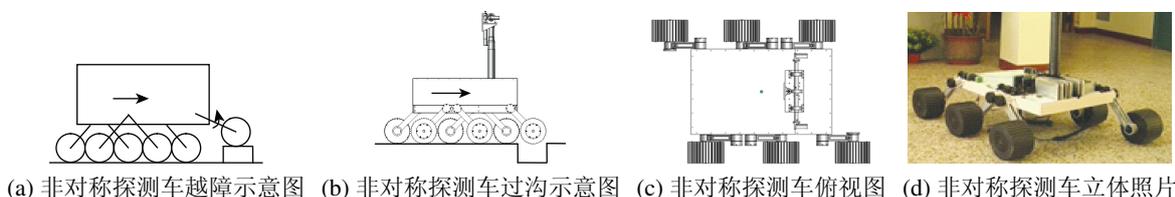


图 3 非对称探测车越障过沟和结构设计示意图

Fig.3 Diagram of climbing obstacle and traversing ditch and structure design of the asymmetric rover

3 探测车动力学模型 (Dynamic model of the rover)

3.1 符号定义

图4示出了系统的结构简图. 为了说明问题, 特定义如下符号: G_0 为车箱, G_i 为悬挂, B_i 为车轮; c 点为整车的质心, g_i 点为悬挂点, c_i 点为摇臂质心, b_i 点为车轮中心点, d_i 点为 B_i 轮与月面的接触点, R_{di} 为 c 点至 d_i 点的矢量, R_i 为 c 点至 g_i 点的矢量, L_i 为 g_i 点至 b_i 点的矢量, L_{ci} 为 g_i 点至 c_i 点的矢量, r_{di} 为 b_i 点至 d_i 点的矢量, 其中, $i = 1, 2, \dots, 6$. 矢量间有如下关系:

$$R_{di} = R_i + L_i + r_{di} \quad (1)$$

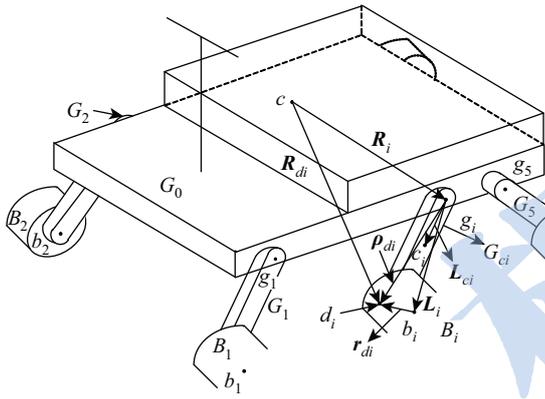


图4 非对称探测车系统模型示意图

Fig.4 System model diagram of the asymmetric rover

3.2 动力学分析

近期研究成果表明, 基于动力学的控制算法能在复杂地形中较好地实现探测车的运动控制. 但在复杂地形中建立动力学模型不仅非常复杂且难以计算求解. 在确定新构型探测车的基础上, 采用牛顿—欧拉法建立了探测车质心运动、绕质心转动、绕悬挂点转动、车轮驱动的动力学方程.

要完整地描述新构型探测车的运动状态需要 20 个变量. 这里以矢量形式给出, 分别为: 质心运动速度 V 、绕质心转动角速度 ω_c 、摇臂相对车体转动角速度 ω_i 、车轮相对摇臂转动角速度 Ω_i 、地面对车轮的作用力 P_i , 其中 $i = 1, 2, \dots, 6$.

至此, 探测车质心的运动方程式有如下形式

$$mV = G + \sum_{i=1}^6 P_i \quad (2)$$

式中, m 为探测车的质量, G 为探测车的重力矢量.

如认为 ω_c 和 ω_i 为 1 阶小量, 略去它们的乘积项, 然后再经过一系列推导, 则可以得到最终的探

测车绕其质心的转动方程为

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^6 \left[(J_i + J_{bi} + I_i + I_{1i} + I_{2i}) \cdot \dot{\omega}_i + J_{bi} \cdot \dot{\Omega}_i \right] \\ & = J \cdot \dot{\omega} - \sum_{i=1}^6 R_{di} \times P_i \end{aligned} \quad (3)$$

式中, m_i 为摇臂的质量, m_{bi} 为车轮的质量, J 为整车相对质心的惯量并矢, J_i 为摇臂相对于悬挂点 g_i 的惯量并矢 ($i = 1, 2, \dots, 6$), J_{bi} 为车轮相对于车轮中心的惯量并矢 ($i = 1, 2, \dots, 6$), $I_i = (L_{ci} \cdot R_i E - L_{ci} \cdot R_i) m_i$, $I_{1i} = (L_i \cdot L_i E - L_i L_i) m_{bi}$, $I_{2i} = (L_i \cdot R_i E - L_i R_i) m_{bi}$.

摇臂和车轮通过扭转弹簧联结于车体, 因此可以列写悬挂装置和车轮分离状态的力矩平衡条件. 对于 g_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) 点有转动动力学方程式:

$$\begin{aligned} M_i^o & = L_{ci} \times \ddot{Q}_c m_i + L_i \times \ddot{Q}_c m_{bi} + J_{i\Sigma}^* \cdot \dot{\omega} + \\ & J_{i+} \cdot \dot{\omega}_i + J_{bi} \cdot \dot{\Omega}_i + \omega \times H_{bi} - \rho_{di} \times P_i - \\ & L_{ci} \times G_i - L_i \times g_i \end{aligned} \quad (4)$$

式中, M_i^o 为悬挂电机经扭簧作用于摇臂的力矩, Q_c 为惯性参考系原点至整车质心 c 的矢量, g_i 为轮 B_i 的重力矢量, $J_{i\Sigma}^* = J_i + J_{bi} + I_i^* + I_{1i}^* + I_{2i}^*$, $J_{i+} = J_i + J_{bi} + I_{1i}^*$, $H_{bi} = J \cdot \Omega_i$, I_i^* , I_{1i}^* , I_{2i}^* 为 I_i , I_{1i} , I_{2i} 的共轭并矢.

对分离的车轮 B_i , 绕其中心点 b_i 取力矩平衡即为车轮驱动平衡方程式:

$$J_{bi} \cdot \left(\dot{\omega} + \dot{\omega}_i + \dot{\Omega}_i \right) = M_{bi}^i + r_{di} \times P_i \quad (5)$$

式中, M_{bi}^i 为车轮电机的输出力矩.

需要说明的是以上方程式中 $\dot{()}$ 、 $\ddot{()}$ 分别是相对 G_0 、 G_i 体的时间导数, $\dot{()}$ 是时间的绝对导数.

式 (2) ~ (5) 即为探测车在任意时刻任意状态下的基本动力学方程式.

3.3 运动学分析

要建立完整的动力学模型还需要分析探测车各变量之间的运动学关系, 包括探测车质心的平动和绕质心的转动. 其关系为

$$V = \dot{Q}_c \quad (6)$$

$$\omega = \psi + \vartheta + \phi \quad (7)$$

如图5所示, 图中定义了参考坐标系 e 和以探测车质心为原点的车体固联坐标系 G_0 , 其转换关系由 3 个欧拉角描述, 分别为偏航角 ψ 、俯仰角 ϑ 和滚转角 ϕ , 则车体固联坐标系 G_0 和参考坐标系 e 之

间有如下转换关系 (式中 c 代表 \cos , s 代表 \sin):

$$C_{G_0e} = \begin{bmatrix} c\vartheta c\psi & c\vartheta s\psi & -s\vartheta \\ s\varphi s\vartheta c\psi - c\varphi s\psi & s\varphi s\vartheta s\psi + c\varphi c\psi & s\varphi c\vartheta \\ c\varphi s\vartheta c\psi + s\varphi s\psi & c\varphi s\vartheta s\psi - s\varphi c\psi & c\varphi c\vartheta \end{bmatrix}$$

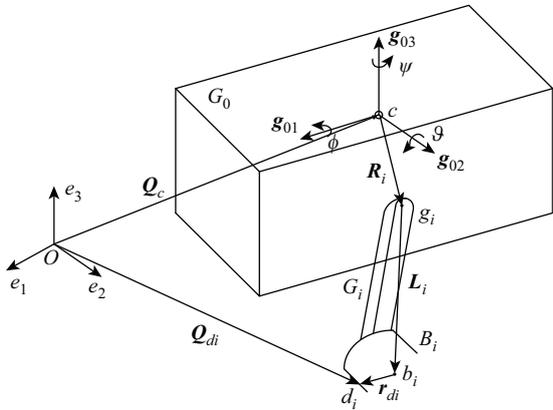


图5 探测车运动学关系示意图
Fig.5 Kinematics diagram of the rover

Q_c 为参考系原点到探测车质心的矢量, Q_{di} 为参考系原点至车轮 i 与地面接触点的矢量 ($i = 1, 2, \dots, 6$). 则它们之间有如下关系

$$Q_c = Q_{di} - R_i - L_i - r_{di}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (8)$$

如果对式 (8) 求时间的绝对导数, 则有

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_{di} - \dot{R}_i - \dot{L}_i - \dot{r}_{di}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (9)$$

式中, \dot{Q}_{di} 为车轮与地面接触点的瞬时速度, 如车轮打滑则为滑移速度, 如不打滑则为 0.

式 (9) 可推成如下形式

$$V = -(\Omega_i + \omega + \omega_i) \times r_{di} - \omega \times R_i - (\omega + \omega_i) \times L_i + \dot{Q}_{di}, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (10)$$

式 (8) 和 (10) 即分别为探测车在任意时刻任意状态下的几何约束和速度约束.

4 探测车运动仿真 (Motion simulation of the rover)

4.1 实验土壤特性参数的测定

探测车在松软的土壤里行走时 (见图 6), 会陷入土壤中 (车轮为刚性), 此时有效的驱动力 D_f 为

$$D_f = T \cos \theta - W \sin \theta \quad (11)$$

式中, T 为轮壤接触区的切应力合力, W 为轮壤接触区指向轮心的正应力合力.

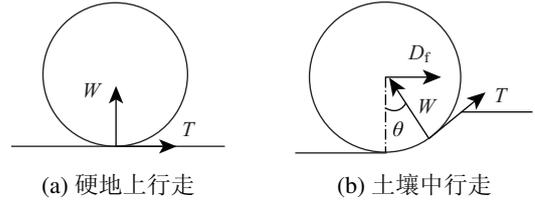


图6 探测车在硬地和土壤行走时车轮受力的不同
Fig.6 Difference of forces acted on wheels when moving on ground and soft soil

为此, 需要求得轮壤接触区的应力分布, 而应力分布与土壤特性参数有密切关系. 选取某火山喷发出的砂土作为实验用土壤, 车轮土壤接触区的正应力可以按照下式近似计算^[13]:

$$\sigma(z) = k_\phi z \quad (12)$$

式中, σ 为土壤正应力, k_ϕ 为土壤的内聚变形模量 (Pa/m), z 为土壤压陷量.

测得砝码在土壤中的压陷量 z , 以砝码重量和截面积得到土壤正应力 σ , 就可以得到 k_ϕ 值.

按照库仑法则, 土壤能够承受的最大切应力 τ_m 由下式决定 (超过 τ_m 车轮就会打滑)^[11]:

$$\tau_m = c + \sigma_m \tan \phi \quad (13)$$

式中, c 为土壤粘性系数 (Pa), ϕ 为土壤内摩擦角 ($^\circ$), σ_m 为土壤的最大正应力 (Pa).

对于砂质土壤, 土壤的粘性系数 c 接近 0, 故有 $\tau_m/\sigma_m \approx \tan \phi$, 即最大切应力与正应力的比值是内摩擦角 ϕ 的函数 (即滑动摩擦系数). 因此通过测定最大切应力与正应力的比值来判断车轮何时发生打滑. 应力测试实验如图 7 所示, 结果如表 1 所示.

表1 实验用土壤 (火山喷发出的砂土) 特性参数
Tab.1 Characteristic parameters of soil in experiments (from volcanic eruptive material)

	k_ϕ /(Pa/m)	τ_m/σ
松软土壤	1.12×10^6	0.46
被碾压过土壤	2.615×10^6	0.445

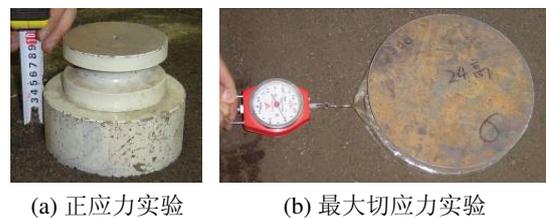


图7 实验土壤特性参数测试实验

Fig.7 Test of characteristic parameters of the soil for experiments

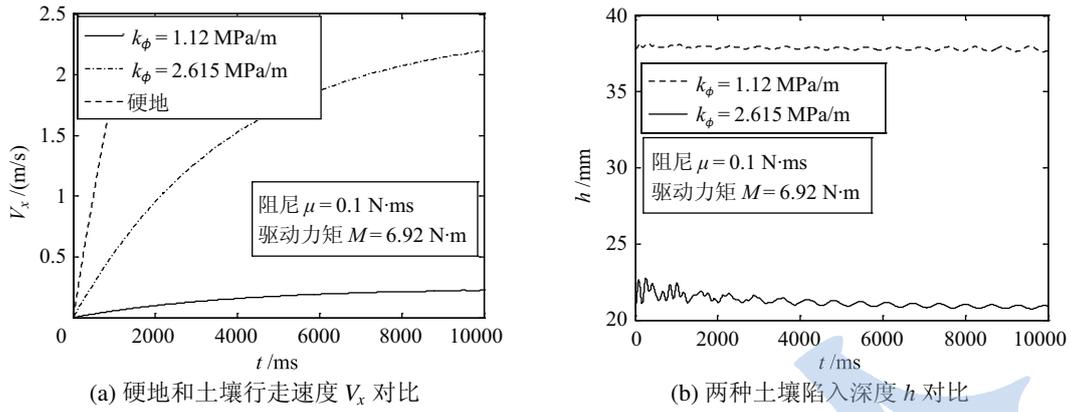


图 8 探测车平地行走动力学仿真

Fig.8 Dynamic simulation for the rover moving on flat ground

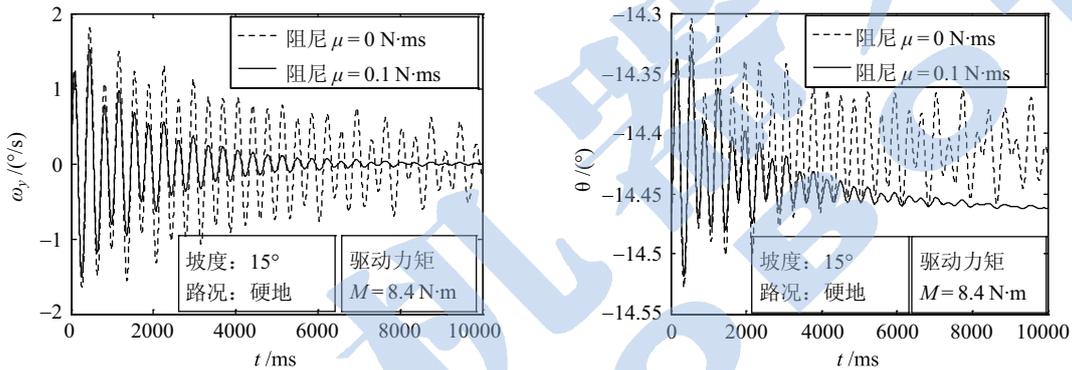
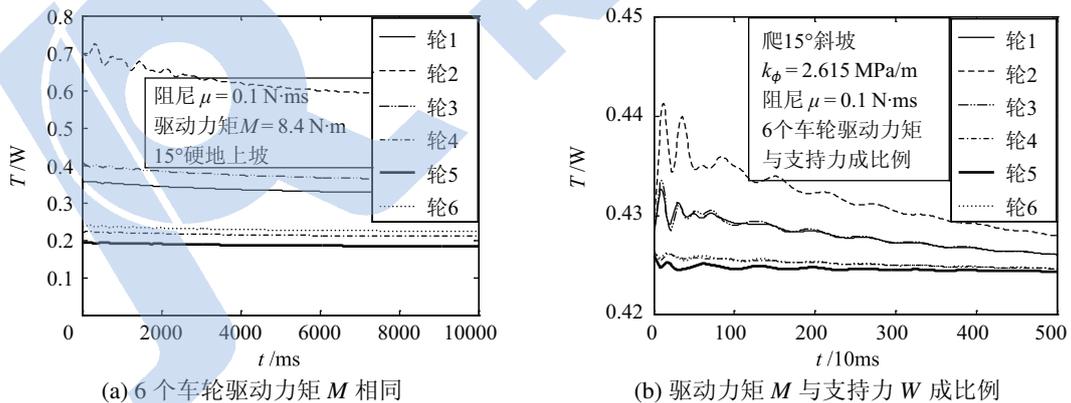


图 9 硬地爬坡时俯仰角速度 ω_y 和俯仰角 θ 仿真

Fig.9 Simulation of pitching angular velocity ω_y and pitching angle θ for rover climbing a hard slope



(a) 6 个车轮驱动力矩 M 相同

(b) 驱动力矩 M 与支持力 W 成比例

图 10 不同的控制方案下驱动力 T 与支持力 W 之比

Fig.10 Ratio of tractive force T to supporting force W for different control strategies

4.2 爬坡运动仿真

运用第 2 节建立的数学模型, 在 Matlab 环境下对探测车进行了动力学仿真. 首先对探测车在硬地、松软土壤和被碾压过的土壤中的行走情况进行了仿真, 如图 8 所示. 可见, 探测车在松软土壤中行走最“费力”, 而且在松软土壤中车轮压陷量大(注: 阻尼 μ 是指车轮轴承等的摩擦损耗力矩与车轮角速度的比值).

然后对探测车爬坡行走进行了仿真. 由图 9 可见, 车刚启动时, 车体有“颠簸”, 但随着时间延长逐渐平稳, 而且阻尼存在时能够很快稳定. 从俯仰角 θ 看出, 在爬坡时, 探测车处于“低头”状态(文中将上坡角度定义为负值).

由图 10(a) 可见, 如果给 6 个车轮相同的驱动力矩 M , 则爬 15° 斜坡时, 轮 2 的 T/W 就已经超过了土壤能够承受的最大切应力(此处以 T/W 近似代替

τ_m/σ), 所以轮 2 最容易发生打滑. 而如果根据地面对各轮支持力 W 的不同, 施加不同的驱动力矩 M , 即 M_i/W_i ($i=1, \dots, 6$) 为常值, 就可以避免打滑的出现, 从而提高爬坡能力, 如图 10(b) 所示.

为了实现上述功能, 只须在摇臂与底盘连接处安装角度测量装置, 测出摇臂相对于底盘的转角, 根据扭簧的刚度, 运用简单的静力平衡方程即可计算出地面对每个车轮的支持力 W_i , 然后按比例给定驱动力矩 M_i .

将这种方法推广, 当某一两个车轮发生打滑时, 可以将这一两个轮抬起, 将车身重量加载到其它未发生打滑的车轮上 (即增加未发生打滑的车轮的支持力 W), 从而可以给未发生打滑的车轮以更大的驱动力矩 M , 使探测车继续前进, 以避免探测车陷入“砂窝”. 这个特点是超静定车所具有的特点, 而这一点是静定车无法实现的, 因为静定车无法实现载荷的重新分配.

4.3 越障运动仿真

爬越一定高度的障碍物是探测车的一个重要功能. 对一般的车辆而言, 跨越高度超过车轮半径的

障碍物是十分困难的, 但文中的超静定车可以通过有效地控制摇臂角度 (即抬压车轮) 提高爬越高障碍物的能力. 非对称探测车因其结构特点, 既可有效地控制悬架机构同时又能使车体保持平衡.

为了和越障时探测车的姿态对比, 图 11 示出了探测车在平地时的各摇臂角度和车体姿态示意图, 表 2 示出了此时的摇臂角度和车体姿态 (轮 1、3、5 位于车体左侧, 轮 2、4、6 位于车体右侧, 摇臂角度初值是指扭簧处于自由状态时的角度).

通过文中的动力学计算, 表 3~5 分别给出了探测车的 6 个车轮爬越较高障碍物时的摇臂角度调整和姿态值, 这些调整是以探测车能够爬上障碍物并且车身姿态角变化最小为准则计算得到的.

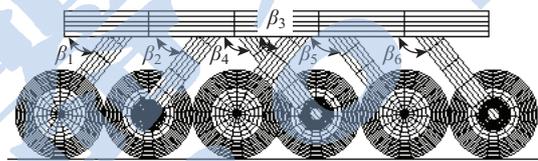


图 11 整车位于平地上各摇臂角度和车体姿态示意图
Fig.11 Diagram of attitudes and rocker angles for the rover on flat ground

表 2 探测车置于平地后摇臂角度值

Tab.2 Rocker angles for the rover on flat ground

	轮 1	轮 2	轮 3	轮 4	轮 5	轮 6
摇臂角度初值 $\beta_{i0}/(^\circ)$	62	62	62	118	118	119
置于平地后 $\beta_i/(^\circ)$	51	51	51	129	129	129
置于平地后质心高 z_c/m	0.378		俯仰角 $\theta/(^\circ)$	0	滚转角 $\phi/(^\circ)$	0

表 3 轮 1 爬越障碍时的摇臂角度调整和姿态

Tab.3 Rocker angle adjustment and attitudes when the first wheel climbing obstacle

	轮 1	轮 2	轮 3	轮 4	轮 5	轮 6
摇臂角度 $\beta_i/(^\circ)$	31.6	71.6	71.7	125.9	125.8	143
质心高 h/m	0.41	俯仰角 $\theta/(^\circ)$		-6.4	滚转角 $\phi/(^\circ)$	1.8

表 4 轮 2 爬越障碍时的摇臂角度调整

Tab.4 Rocker angle adjustment and attitudes when the second wheel climbing obstacle

	轮 1	轮 2	轮 3	轮 4	轮 5	轮 6
摇臂角度 $\beta_i/(^\circ)$	31	32	78	107	128	143
质心高 h/m	0.43	俯仰角 $\theta/(^\circ)$		-9.4	滚转角 $\phi/(^\circ)$	0.4

表 5 轮 3 爬越障碍时的摇臂角度调整

Tab.5 Rocker angle adjustment and attitudes when the third wheel climbing obstacle

	轮 1	轮 2	轮 3	轮 4	轮 5	轮 6
摇臂角度 $\beta_i/(^\circ)$	43	41	32	116	124	128
质心高 h/m	0.48	俯仰角 $\theta/(^\circ)$		-12	滚转角 $\phi/(^\circ)$	-3

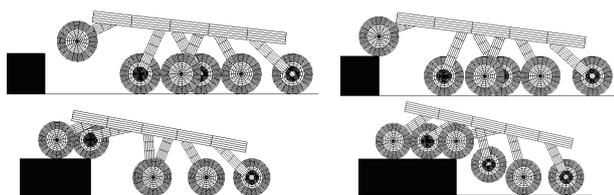


图 12 探测车爬越障碍仿真图

Fig.12 Simulation of climbing obstacle for rover

图 12 所示为探测车爬越高度为车轮直径的直壁障碍物的运动仿真（最关键的前 3 个车轮越障）。

从表 3 和图 12 中可以看出探测车爬越较高障碍物时，需要抬起前轮、下压后轮，这也显示了非对称结构的优点。因为相对于对称结构，新型探测车在爬越障碍过程中，只需要抬起一个车轮即可。这不仅使探测车在爬越过程中保持了较好的运动稳定性，也保留了更多的牵引能力。

4.4 过沟运动仿真

过沟能力和越障能力对探测车是同等重要的。如果直壁沟的宽度达到车轮直径大小并且沟很深，对于静定探测车来说过沟是很困难的。图 13 所示为

探测车跨越宽度达到车轮直径的 1.2 倍的直壁沟壑的运动仿真。

与越障一样，探测车同样需要抬起车轮协助车体过沟。非对称探测车，6 个车轮的轴线交错分布，相当于有 6 个车轮轴在保持车体的平衡。这样的结构不仅使得探测车的过沟能力得到了很大的提高，通过合理的运动规划也可以使行走系统的运动稳定性得到相当的保证。

5 探测车越障和过沟实验 (Experiments of crossing obstacle and ditch for the rover)

依据新构型的设计原理，加工装配了一台六轮超静定探测车，并在专门实验环境下进行了行走系统的实验。由于原理样车还未安装测量装置，所以主要针对探测车的越障过沟能力和被动适应复杂地形能力做了一系列实验，如图 14 所示。利用上述越障和过沟计算机仿真确定的参数调整行星车姿态进行实验，结果表明，新构型探测车具有较强的越障和过沟能力，同时证明了通过动力学仿真所做的摇臂调整的正确性。

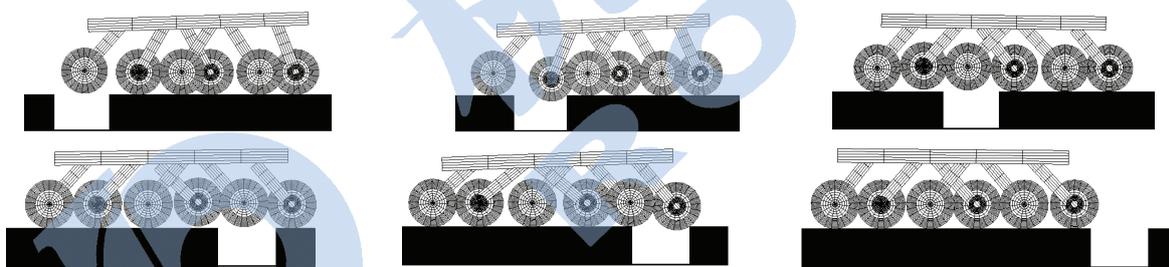
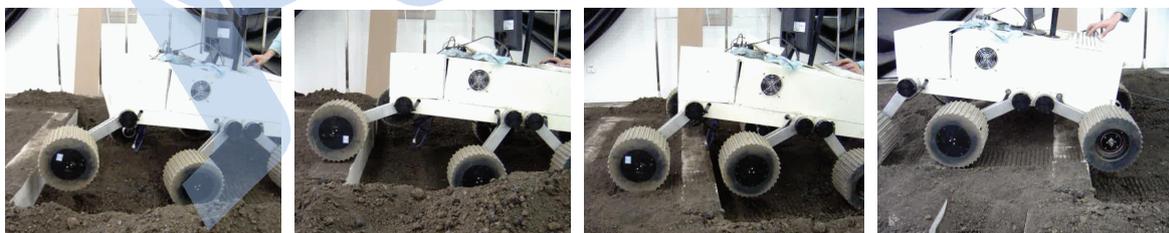


图 13 探测车跨越直壁沟壑仿真图

Fig.13 Simulation of crossing a vertical ditch for the rover



(a) 攀爬阶梯型障碍实验 (阶梯高度等于车轮直径)



(b) 过直壁沟壑实验 (沟宽度等于 1.2 倍车轮直径)

图 14 探测车越障过沟实验照片

Fig.14 Experiment photos of crossing obstacle and ditch for the rover

6 结论 (Conclusions)

提出了一种车轮在车体两侧非对称分布的探测车行走系统新构型,并研究了其运动性能.通过对新构型探测车的动力学分析、运动学分析,再结合几何、速度等约束条件,建立了非对称探测车行走系统的完整的动力学模型.在 Matlab 环境下进行了非对称探测车平地行走、爬坡、越障、过沟等运动仿真.基于非对称探测车,给出了一种避免打滑的驱动措施,给出了探测车爬越较高障碍物时的摇臂角度,介绍了姿态调整情况.样机实际行走实验证明了计算机仿真结果的正确性,同时表明非对称探测车具有较强的越障和过沟能力.本文的动力学模型亦可用于对称结构的超静定行星探测车.

参考文献 (References)

- [1] 邹永廖, 欧阳自远, 徐琳, 等. 月球表面的环境特征 [J]. 第四纪研究, 2002, 22(6): 533-539.
Zou Yongliao, Ouyang Ziyuan, Xu Lin, et al. Lunar surface environmental characteristics[J]. Quaternary Sciences, 2002, 22(6): 533-539.
- [2] Vinogradof P. Locomotive lab on the moon, Lunokhod-1[M]. Moscow: Sciences Press, 1971.
- [3] Hayati S, Volpe R, Backes P, et al. The Rocky 7 rover: A Mars sciencecraft prototype[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1997: 2458-2464.
- [4] Michaud S, Schneider A, Bertrand R, et al. SOLERO: Solar-powered exploration rover[C]//7th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation. Netherlands: ESTEC, 2002: 1-8.
- [5] 陈百超. 月球车悬架研究及动力学仿真 [D]. 长春: 吉林大学, 2006.
Chen Baichao. Study on suspension structure for lunar locomotive and dynamics simulation[D]. Changchun: Jinlin University, 2006.
- [6] 刘方湖, 马培菀, 曹志奎, 等. 五轮铰接式月球机器人的运动学建模 [J]. 机器人, 2001, 23(6): 481-485,492.
Liu Fanghu, Ma Peisun, Cao Zhikui, et al. Kinematic modeling of a five-wheel articulated lunar robot[J]. Robot, 2001, 23(6): 481-485,492.
- [7] 高海波, 邓宗全, 胡明, 等. 行星轮式月球车移动系统的关键技术 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 156-161.
Gao Haibo, Deng Zongquan, Hu Ming, et al. Key technology of moving system of lunar rover with planetary wheel[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(12): 156-161.
- [8] Wang Z Y, Ding X L, Rovetta A. Structure design and locomotion analysis of a novel robot for lunar exploration[C]//12th IFToMM World Congress. Besancon, France: 2007: 56-60.
- [9] 丁希仑, 石旭尧, Rovetta A, 等. 月球探测(车)机器人技术的发展与展望 [J]. 机器人技术与应用, 2008(3): 5-9.
Ding Xilun, Shi Xuyao, Rovetta A, et al. Development and prospect of lunar exploration rover[J]. Robot Technique and Application, 2008(3): 5-9.
- [10] Yen J, Jain A, Balaram J. ROAMS: Rover analysis modeling and simulation[C]//5th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space. Paris, France: European Space Agency, 1999: 249-254.
- [11] 王巍, 强文义, 梁斌. 月球机器人运动学建模与运动收敛性分析 [J]. 控制与决策, 2002, 17(6): 904-907.
Wang Wei, Qiang Wenyi, Liang Bin. Kinematics modeling and convergence analysis of a lunar robot locomotion system[J]. Control and Decision, 2002, 17(6): 904-907.
- [12] 骆训纪, 孙增圻. 月球漫游车仿真系统研究 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14(9): 1235-1238.
Luo Xunji, Sun Zengqi. Research on lunar rover simulation platform[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(9): 1235-1238.
- [13] Bekker M G. 地面车辆系统导论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1978.
Bekker M G. Introduction to terrain vehicle system[M]. Beijing: China Machine Press, 1978.

作者简介:

杜建军 (1974-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 机构动力学, 移动机器人, 气体润滑.

任明俊 (1981-), 男, 博士生. 研究领域: 移动机器人.

刘 瞰 (1932-), 男, 教授. 研究领域: 空间飞行器动力学, 气体润滑, 精密机械设计.