

八轮扭杆摇臂式月球车越障性能分析

邱雪松, 邓宗全

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对八轮扭杆摇臂式月球车的结构特点及已知的月面地形条件, 利用准静力学方法推导出了八轮扭杆摇臂式月球车结构尺寸与表征其越障性能的参量间的参数关系式。根据附着系数的物理意义, 分析并确定了由月球车主要结构参数表述的单位直径车轮越过垂直障碍高度的参数式。利用该参数式绘制单位直径车轮越障高度与各结构参数间的关系曲线, 对各轮的越障能力进行了综合评价, 得出了该车型越障能力由两前轮决定的结论。最后, 针对不同附着系数, 绘制两个结构参数同时改变时越障高度的变化曲线, 分析了两个主要结构参数对月球车越障能力的影响。在 ADAMS 中进行仿真验证, 其结果与理论越障高度的相对误差在 10% 以内, 证明了理论推导的可靠性。

关键词: 八轮月球车; 扭杆摇臂悬架; 越障通过性

中图分类号: TH135 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2007)S1-0213-04

Analysis of the climbing obstacle capability of the eight-wheeled lunar rover with the torsion-bar and rocker suspension

QIU Xue-song, DENG Zong-quan

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Considering the structural characteristic of the eight-wheeled lunar rover with the torsion-bar and rocker suspension and lunar terrain condition, the relationship between the structural dimension of the eight-wheel lunar rover with the torsion-bar and rocker suspension and the parameters for figuring the climbing obstacle capability is described by the quasi-static method. According to the meaning of the inserted coefficient, the climbing vertical obstacle height of the unit wheel diameter is gained by the primary structural parameters described. The curve between climbing vertical obstacle height of the unit wheel diameter and every structural parameter is obtained. The climbing obstacle capability of every wheel synthetically is evaluated. Finally the variation curve is obtained when the structural parameters changes at the same time as the different inserted coefficient. The effect of the two primary structural parameters working on the lunar rover climbing obstacle capability is analysed. The relative error between the height of simulation and that of theoretical calculation is below 10%, which verifies the reliability of analysis.

Key Words: eight-wheel lunar rover; torsion-bar and rocker suspension; climbing obstacle capability

自20世纪60年代美、前苏联起月球探测高潮以来, 各国科研机构相继研制出诸如轮式、腿式、轮腿式、履带式等各种型式的行星探测车移动系统。每种型式的移动系统都有其自身的优点与不足, 其中轮式移动系统因其效率高、易控制等特点成为研究最多、车型最全、应用最广的一类行星探测车移动系统。为适应由陨石坑及各种散布的石砾所构成的复杂月面地形, 每种车型的结构设计过程都要把良好的越障通过性能作为评价月球车移动系统性能好坏的必要技术指标, 这也是新车型研制过程中需解决的关键问题^[1-6]。而准静力学方法是进行越障性能分析的一种有效方法^[7-9]。八轮扭杆摇臂式月球车移动系统作为自主研发的车型, 通过对其进行越障通过性分析, 可确定其满足越

收稿日期: 2007-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375032); 国家“863”资助项目(2006AA04Z231); 高等学校学科创新引智计划(B07018)

作者简介: 邱雪松(1973-), 女, 哈尔滨工业大学博士研究生。

障要求的最佳结构参数取值范围。

1 八轮扭杆摇臂式月球车结构型式

八轮扭杆摇臂式月球车悬架的结构型式对称且分布于车体两侧,单侧结构型式如图1所示。其悬架以4组扭杆弹簧横向布置于车体内作为支撑,扭杆弹簧一端与车体固接,另一端与扭杆压臂固接,扭杆压臂与车体间可产生小幅度相对转动,同时八轮中每两轮通过摇臂共同铰接于同一扭杆压臂。该结构特点使重力在各车轮上能够均匀分配,并实现八轮自适应地形变化。该车采用八轮独立驱动,前后4轮独立转向的移动方式。

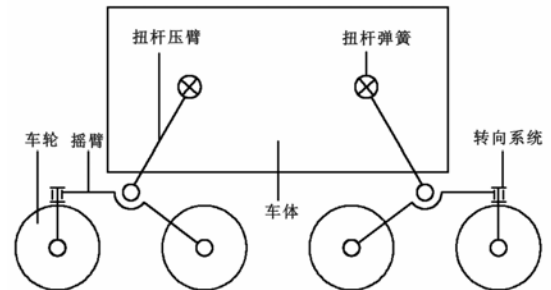


图1 八轮扭杆摇臂式月球车机构简图

2 越障通过性临界条件分析

2.1 两前轮同时越过垂直障碍

当两前轮同时越障时,由图2列写整车及前、后摇臂组件分离体的力及力矩平衡方程为

$$\begin{cases} N_1 \cos \alpha - \varphi N_1 \sin \alpha - \varphi(N_2 + N_3 + N_4) = 0; & G - \varphi N_1 \cos \alpha - N_1 \sin \alpha - (N_2 + N_3 + N_4) = 0, \\ G = G_c + 2G_b, & N_4 l / 2 - \varphi(N_4 + N_3)(h_0 + D/2) - N_3 l / 2 = 0, & \sin \alpha = 1 - 2h_y / D, \\ \frac{1}{2} GL - N_2 l - N_3(L-l) - N_4 L + \varphi(N_1 + N_2 + N_3 + N_4) \frac{D}{2} = 0, \\ N_1 \cos \alpha [(h_0 + \frac{D}{2} - h_y) - \varphi \frac{D+l}{2}] - N_1 \sin \alpha [\frac{D+l}{2} + \varphi(h_0 + \frac{D}{2} - h_y)] + N_2 \frac{l}{2} - \varphi N_2 (h_0 + \frac{D}{2}) = 0. \end{cases}$$

由上述方程组可得单位直径车轮越过障碍的高度与各结构尺寸参数之间的关系:

$$\begin{aligned} & (\frac{h_y}{D})^2 [(\varphi^2 D + 2\varphi l)^2 + (\frac{1}{2}\varphi D - \frac{3}{2}\varphi^2 l - \varphi h_0 - \frac{1}{2}\varphi^3 D - \varphi^3 h_0 + \frac{1}{2}l)^2] + \varphi^2 l^2 + \\ & \frac{h_y}{D} [-2\varphi^3 D l - 4\varphi^2 l^2 - (\frac{1}{2}\varphi D - \frac{3}{2}\varphi^2 l - \varphi h_0 - \frac{1}{2}\varphi^3 D + \frac{1}{2}l - \varphi^3 h_0)^2] = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

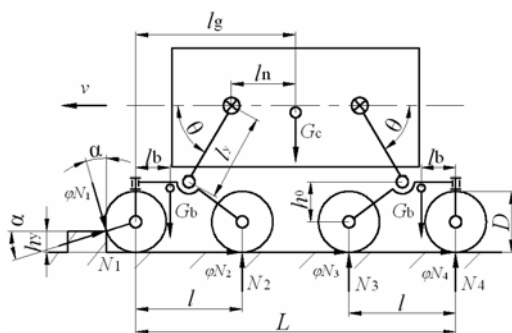


图2 月球车前轮越障受力分析

图2中:

N_i 为月面作用在车轮的支反力;

φN_i 为车轮与月面接触点处的驱动力;

G_c, G_b 为整车、摇臂组件重力;

l 为同摇臂上两车轮轴距;

L 为月球车处于水平状态时前轮与后轮轴心距离;

l_g, l_b 为前轮(或后轮)轴心到车体质心、摇臂质心的距离;

l_y, l_n 为扭杆压臂长及扭杆中心到车体质心距离;

h_0 为扭杆压臂与摇臂铰点到同一摇臂上两轮轴心连线距离;

h_y 为障碍高度; α 为障碍对前轮的支反力与水平面夹角; v 为移动速度; φ 为附着系数。

从 φ 的物理意义出发可知,随着 φ 值的增加,月球车的越障能力将越强,即 (h_y/D) 也随着增加。求解式(1)可得表征两前轮单位直径越障高度的参数式为

$$\begin{cases} (h_y/D)_2 = (-b - \sqrt{b^2 - 4ac})/2a, & \varphi \leq 0.52, \\ (h_y/D)_1 = (-b + \sqrt{b^2 - 4ac})/2a, & 0.52 \leq \varphi \leq 1, \end{cases}$$

其中, $a = (\frac{1}{2}\varphi D - \frac{3}{2}\varphi^2 l - \varphi h_0 - \frac{1}{2}\varphi^3 D - \varphi^3 h_0 + \frac{1}{2}l)^2 + (\varphi^2 D + 2\varphi l)^2$,
 $b = -(\frac{1}{2}\varphi D - \frac{3}{2}\varphi^2 l - \varphi h_0 - \frac{1}{2}\varphi^3 D + \frac{1}{2}l - \varphi^3 h_0)^2 - 2\varphi^3 D l - 4\varphi^2 l^2$, $c = \varphi^2 l^2$ 。

2.2 两中前轮同时越过垂障碍

分析方法同两前轮同时越障, 得到表征两中前轮单位直径越障高度的参数式为

$$\begin{cases} (h_y/D)_2 = (-b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4a_1c})/2a_1, & \varphi \leq 0.7, \\ (h_y/D)_1 = (-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c})/2a_1, & 0.7 \leq \varphi \leq 1, \end{cases}$$

其中, $a_1 = (\varphi h_0 + \varphi^3 h_0 - \frac{1}{2}\varphi D + \frac{1}{2}\varphi^3 D - \frac{3}{2}\varphi^2 l + \frac{1}{2}l)^2 + (\varphi^2 D - 2\varphi l)^2$,

$$b_1 = -(\varphi h_0 + \varphi^3 h_0 - \frac{1}{2}\varphi D + \frac{1}{2}\varphi^3 D - \frac{3}{2}\varphi^2 l + \frac{1}{2}l)^2 + 2\varphi^3 D l - 4\varphi^2 l^2$$
。

2.3 各轮越障能力评价

因两中后轮同时越障的分析方法及得到的关系式与两前轮同时越障的情况完全相同, 两后轮同时越障分析方法及得到的关系式则与两中前轮同时越障的情况完全相同, 故只需分析两前轮与两中前轮的越障能力与几何参数的关系即可。选取具有物理意义的越障高度参数式, 并固定其部分参数, 分别绘制两前轮与两中前轮的 h_y/D 与 φ 的关系曲线, 参见图3。

从图3可以看出, 在附着系数 φ 相同的条件下, 两前轮的越障能力较两中前轮的越障能力弱, 即整车的越障能力主要取决于两前轮的越障能力。故在后续的优化设计中, 只需考虑两前轮越障所需的参数条件。

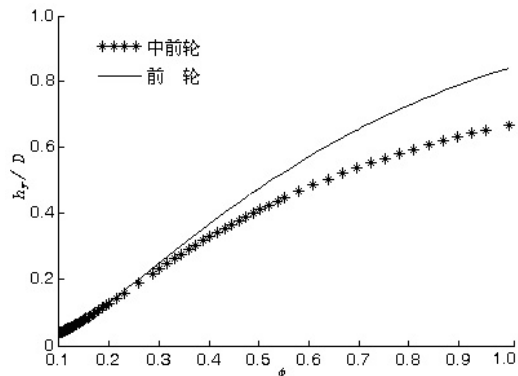


图3 各轮 (h_y/D) 与 φ 的关系曲线比较

3 各结构参数的综合影响

前面通过固定部分参数绘制曲线, 分析了各参数单独改变时对月球车越障能力的影响。这里针对不同的 φ 值, 且令 $10 \leq h_0 \leq 200, 300 \leq l \leq 500$, 分别绘制 h_0, l 两个参数与表征越障能力的 h_y/D 之间的关系曲线, 见图4。

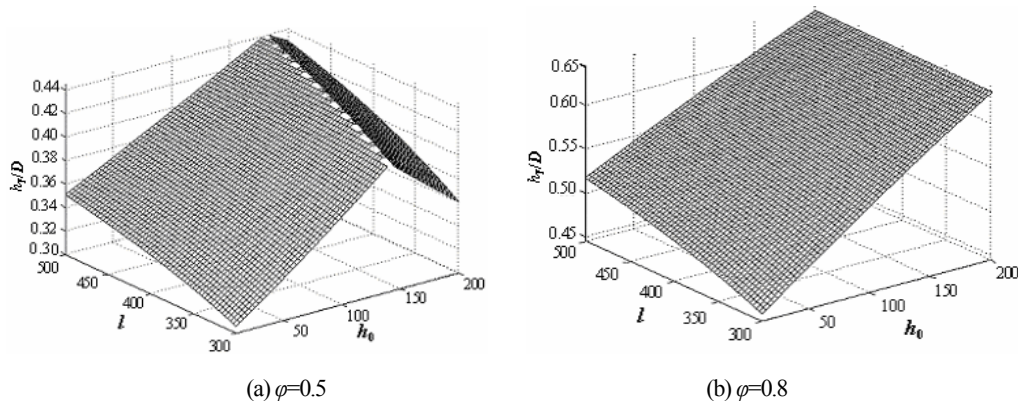


图4 h_y/D 与 h_0, l 间的关系曲线

通过对图4的分析, 可以得出如下几点结论:

(1) 当 $\varphi=0.5$ 时, h_y/D 随 h_0, l 的变化趋势相同。 l 越大 h_y/D 值越大。当 h_0 在130~180mm范围内取值时, 随着 l 的增加, h_y/D 出现一系列极值。当 h_0 值小于极值点上 h_0 的取值时, h_0, l 越大 h_y/D 值越大, 月球车越障与越沟能力越强。

当 h_0 值大于极值点上 h_0 的取值时, l 越大、 h_0 越小 h_y/D 值越大,月球车越障与越沟能力越强。因此, l 取值在许可范围内越大越好,而 h_0 取值则在可能的极值点上取值最好。

(2) 当 $\varphi=0.8$ 时, h_0 , l 越大 h_y/D 值越大,且不存在极值点,故在许可值域内 h_0 , l 的值应尽可能大以提高月球车的越障性能。

(3) 当车轮直径一定时, φ , h_0 , l 是影响月球车越障能力的主要因素。

4 仿真实验

由前述分析可以知道,在许可范围内 l 取值越大越好,而 h_0 值则在可能的极值点上取值最好。以此为依据确定月球车的主要结构参数值,并在ADAMS中建立仿真模型,通过变换障碍高度与附着系数,发现月球车可越过垂直障碍的最大高度与理论越障高度的相对误差在10%以内,因而理论推导是可靠的。又 h_y/D 值约为0.55,说明该车型具有较强的越障能力。其三维仿真模型参见图5。

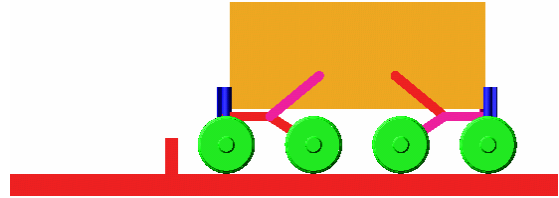


图5 三维仿真模型

5 结束语

建立了单位直径车轮可越过垂直障碍的高度与月球车各结构参数间的关系式,确定了两个重要参数 h_0 、 l 的取值范围,以此为依据确定月球车的主要结构参数,并在ADAMS中建立仿真模型进行验证,得出了最大越障高度与理论越障高度的相对误差在10%以内的结论,证明了理论推导的可靠性,为进一步结构设计奠定了基础。利用文中的分析方法,还可进一步分析月球车跨越壕沟的能力。

参考文献

- [1] 付宜利, 徐贺, 王树国, 等. 沙地环境移动机器人驱动轮的发展概况综述[J]. 机器人技术与应用, 2004,(4):22-29.
- [2] 胡明, 邓宗全, 高海波, 等. 摇臂-转向架式月球探测车越障通过性分析[J]. 上海交通大学学报, 2005,39(6): 928-932.
- [3] 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, 2005,12(41): 156-161.
- [4] Apostolopoulos D S. Analytical Configuration of Wheeled Robotic Locomotion[D] Pittsburgh: Carnegie Melon University, 2001
- [5] Lu Desheng, Hong Bingrong, Tang Haoxuan. Virtual Prototype Model for Lunar Rover Missions[J]. Applications of Digital Image Processing XXVII, 2004, 5558(2): 743-751.
- [6] Winterholler A, Roman M, Hunt T, et al. Design of a High-Mobility Low-weight Lunar Rover[C]//European Space Agency, (Special Publication) ESA SP, no.603, Proceedings of i- SAIRAS 2005 - The 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, [s.l.]: SAIRAS, 2005: 23-28.
- [7] Krebs A, Thueer T, Michaud S, et al. Performance Optimization of All-Terrain Robots: A 2D Quasi-Static Tool.[C]//Proc 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and systems. Beijing: IEEE, 2006: 4266-4271.
- [8] 雷雨成. 汽车系统动力学及仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997, 8:321-325.
- [9] 余志生. 汽车理论(第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.