

行星轮式月球车移动系统的关键技术*

高海波 邓宗全 胡 明 王少纯

(哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001)

摘要：为提高月球车的越障能力，重点考虑提高车轮的越障能力，成功研制了一种采用扭杆弹簧和磁弹簧减振器并联悬架，且每个行星车轮独立驱动的月球车。在行星车轮不翻转过障条件下，推导了月球车两个前行星车轮同时越障时可以爬过的垂直障碍高度与车辆参数的关系，并进行了 ADAMS 仿真。对行星轮式月球车进行了动力学分析，确定了行星车轮的等效地面不平度函数，并在此基础上建立了 7 自由度月球车振动系统模型，根据模型的计算结果确定了扭杆弹簧刚度和减振器阻尼的最佳参数范围。同时，进行了月球车爬坡试验和垂直越障能力试验研究，还模拟月球的低重力环境进行了整车的低重力试验。

关键词：月球车 越障能力 动力学分析

中图分类号：V476.3

0 前言

我国是世界上重要的航天大国之一，月球探测及行星探测已成为我国航天领域的一个重要研究课题，而月球探测将是我国向行星探测迈出的第一步，它将为我国进一步开展深空探测奠定基础。由于月球高真空、强辐射和大温差的环境，进行月球表面探测的困难和危险性很大，而月球车可以代替宇航员从事危险性大的工作，提高月球表面作业的安全性、可靠性，减小月球探测、开发的风险和成本。

国外开发行星探测车系统已有多年的历史，特别是美国和前苏联在这方面已有成熟的经验^[1]。移动系统是探测车系统的重要组成部分，移动系统工作的稳定性和性能的好坏直接影响着行星探测车的使用性能和作业寿命。到目前为止，所研究的移动系统按其行走方式主要分为：履带式、轮式^[2]和腿式^[3]。理论分析和试验结果表明，履带式和腿式移动系统不适合用于月球车。为适应复杂的月面环境，月球车的轮式移动系统均采用各轮独立驱动、弹性悬挂方式，工作起来方便灵巧，同心性和转向性均较好。轮式移动系统中轮的类型主要有：刚性轮、筛网轮、金属弹性轮、椭圆轮、半球轮和无毂轮等^[4]。

国外采用轮式结构的行星探测车都是通过悬架来提高其越障能力，而没有考虑车轮本身的越障能力。从提高月球车的越障、离障能力，并且着重

从提高车轮越障能力这一角度出发，结合悬架设计，设计了行星轮式月球车。对所研制的行星轮式月球车的关键技术，即：机械系统总体结构、越障能力分析、动力学分析及试验研究等，进行了论述。

1 月球车机械系统总体结构

图 1 为行星轮式月球车外观图。该车为 4 轮结构，其机械系统主要由三大部件组成：车架、悬架(由扭杆弹簧和磁弹簧减振器并联构成)和行星越障轮。空载质量为 40 kg，外形尺寸约为 90 cm×373 cm×353 cm，在平直路面上的移动速度为 0.32 km/h。



图 1 行星轮式月球车外观图

1.1 行星车轮

每个行星车轮都是独立驱动的，图 2 为行星车轮原理示意图。由中心齿轮 1、过渡齿轮 2、驱动齿轮 3、车轮、电动机和系杆 H 组成。具体工作原理为：由电动机驱动中心齿轮 1 转动，来带动过渡齿轮 2 和驱动齿轮 3 进行转动，驱动齿轮 3 与车轮固接，从而带动车轮转动。

* 国家自然科学基金资助项目(50375032)。20050217 收到初稿，20050907 收到修改稿

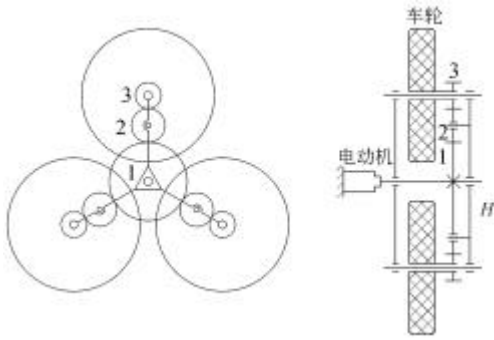


图 2 行星车轮原理示意图

行星车轮在移动时任意两个车轮着地，对于采用四个行星车轮的月球车来说，实际上相当于八轮驱动。行星轮式月球车在平坦地面移动时，利用车轮快速驱动，其效率与普通轮式车辆相同。由于行星车轮中的三个车轮都是驱动轮，因而有效地利用了行星车轮的附着质量，而且较多的驱动车轮增加了车轮与地面的接触面积，降低了接地比压，从而提高了行星车轮在松软地面的通过能力。驱动轮系随着地面对车轮作用力的不同，相应地演变成定轴轮系或行星轮系^[5]。

行星车轮不需要复杂的辅助机构来实现平面上运动与越障运动之间转换，因此作业时具有很高的可靠性，特别适合用在人类难以到达环境下作业的作业器上。所以，采用行星车轮的月球车能够适应凹凸不平、表层土壤松软的月球地表环境。

1.2 扭杆弹簧悬架

前苏联发射到月球上的 1 月球车和 2 月球车都应用了扭杆弹簧悬架，加之扭杆弹簧悬架和扭杆弹簧具有很多优点，所以本设计的月球车也采用了扭杆弹簧悬架。扭杆弹簧悬架按扭杆弹簧布置形式可分为横向和纵向布置，前者扭杆弹簧长度受到车身宽度的限制，后者的扭臂长度受到车架宽度及轮距的限制，设计采用的是扭杆弹簧横向布置的形式。

另外，扭杆弹簧悬架受到冲击后，将产生振动，故悬架还应包括减振器，使振动迅速衰减。

1.3 磁弹簧减振器

现有的减振器主要以液体或气体作为介质进行减振，有着严格的密封要求。月球表面昼夜温差大，而且又是高度真空环境，所以这类减振器不可能用于月球车，而磁弹簧减振器是利用永久磁铁构成的磁弹簧以及导体中涡流的阻尼作用实现可调节减振的一种非线性减振器^[6]。设计所采用的磁铁的最高工作温度可达 180℃，能够适应月球环境。另外，使用磁铁不需要提供额外的能源，也没有严格的密封要求，所以磁弹簧减振器能够很好地适应月

球环境。

如图 3 所示，磁弹簧减振器的工作原理为：三块永久磁铁的磁极两两相对地安装在如图 3 所示的位置，下磁铁 7 固定在下磁铁安装座 8 中，下磁铁安装座 8 与扭杆摇臂相连，活动磁铁 6 在两个固定磁铁的排斥力作用下停在中间，活动磁铁又通过活塞杆 1 与车架相连，从而实现扭杆弹簧与磁弹簧减振器的并联。上下磁铁之间距离可以通过调整上磁铁 5 的位置来调整，这样就可以改变磁弹簧减振器的刚度。图 3 中除了磁铁以外的其他零件均是用非导磁材料制造的，以便减少漏磁，最大限度地利用磁铁的能量。这种减振器的优点是体积小，安装方便，可以用于任意方向和任意频率机械振动的动力吸振。

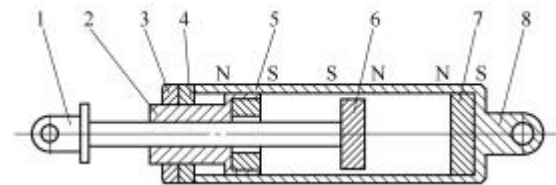


图 3 磁弹簧减振器示意图

1. 活塞杆 2. 上磁铁安装座 3. 锁紧螺母 4. 上盖
5. 上磁铁 6. 活动磁铁 7. 下磁铁 8. 下磁铁安装座

2 越障能力分析

垂直障碍是月球车遇到最为苛刻的障碍，因此，其越过垂直障碍的能力最能说明越障能力的强弱。由于月球车在越过垂直越障时车速较低，可在行星车轮不翻转越过垂直障碍的情况下，用静力学平衡方程求得月球车可以爬过的垂直障碍物高度与车辆参数间的关系^[7]，得到行星车轮翻转越过障碍的条件。

2.1 爬过垂直障碍的能力

在此，以两个前行星车轮遇到垂直障碍为例，推导其爬过垂直障碍的能力。图 4 为硬路面情况下的受力模型。由图 4 可知，前行星车轮碰到垂直障碍时有下列平衡方程

$$\begin{cases} N_1 \sin \alpha + F_{t1} \cos \alpha + \sum_{i=2}^4 N_i = G \\ N_1 \cos \alpha - F_{t1} \sin \alpha + \sum_{i=2}^4 F_{fi} - \sum_{i=2}^4 F_{ti} = 0 \\ \frac{D}{2} \sum_{i=1}^4 F_{ti} + G(L_b + \frac{b}{2}) - N_2 b - N_3 L - \\ N_4(L+b) - \frac{D}{2} \sum_{i=2}^4 F_{fi} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 N_1 ——垂直障碍作用于前行星车轮轮 1 上的反作用力

- N_2, N_3, N_4 ——轮 2、3、4 的地面反作用力
- F_{t1} ——轮 1 越障时的驱动力
- F_{t2}, F_{t3}, F_{t4} ——轮 2、3、4 的水平驱动力
- G ——月球车质量
- F_{f2}, F_{f3}, F_{f4} ——轮 2、3、4 的滚动阻力
- D ——行星车轮中车轮直径
- L_b ——月球车质心到前行星车轮中心的水平距离
- b ——行星车轮中前轮和后轮中心的水平距离

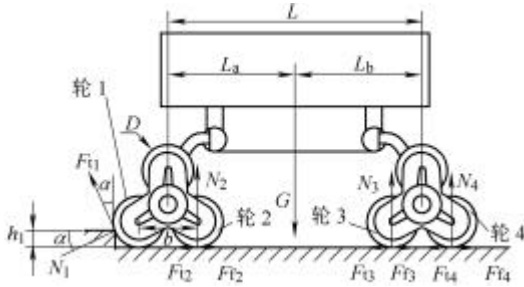


图 4 两个前行星车轮同时垂直越障力学模型

行星车轮在越障时，轮 1 和轮 2 是同一个电动机驱动的，因而转矩是平均分配的，且轮 1 和轮 2 上的纵向附着系数 f 相同，则有

$$F_{t1} = F_{t2} = \min(N_1, N_2)j \quad (2)$$

为求得两个前行星车轮同时越障时可以爬过的垂直障碍高度 h_1 ，设作用在轮 1 和轮 2 上的垂直方向作用力相等，作用在前轴和后轴上的水平驱动力相等，即在硬路面条件下有

$$\begin{cases} f = 0 \\ N_1 \sin \alpha + F_{t1} \cos \alpha = N_2 \\ F_{t3} + F_{t4} = F_{t2} + F_{t1} \sin \alpha - N_1 \cos \alpha \end{cases} \quad (3)$$

计算时可分如下两种情况。

(1) 当 $N_1 < N_2$ 时

$$N_2 = N_1 \sin \alpha + N_1 j \cos \alpha \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(1)中的第二方程，并考虑到 $F_{t1} = F_{t2} = N_1 j$ ，得

$$\cos \alpha = j + j \sin \alpha \quad (5)$$

(2) 当 $N_1 > N_2$ 时

$$N_2 = N_1 \sin \alpha + N_2 j \cos \alpha \quad (6)$$

即
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\sin \alpha}{1 - j \cos \alpha} \quad (7)$$

将式(3)、(6)代入式(1)中的第二方程，并考虑到 $F_{t1} = F_{t2} = N_2 j$ ，得

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\cos \alpha}{j + j \sin \alpha} \quad (8)$$

联立式(7)、(8)，有

$$\cos \alpha = j + j \sin \alpha \quad (9)$$

由此可见，无论 $N_1 < N_2$ ，还是 $N_1 > N_2$ ，其越障能力均可用式(9)表示，由图 5 中的几何关系可知

$$\sin \alpha = 1 - 2 \frac{h_1}{D} \quad (10)$$

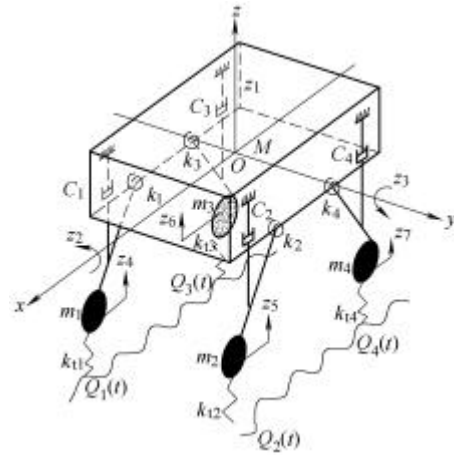


图 5 7 自由度月球车模型

将式(10)代入式(9)解得

$$h_1 = \frac{j^2}{j^2 + 1} D \quad (11)$$

若轮 1 能够越过垂直障碍，那么轮 2 也能顺利地越过该障碍。

同理，可以推导出两个后行星车轮可以爬过的垂直障碍高度 h_2 和单个行星车轮可以爬过的垂直障碍高度 h_3

$$h_2 = h_3 = \frac{j^2}{j^2 + 1} D \quad (12)$$

在行星车轮爬过垂直障碍的前提下，两个前行星车轮、两个后行星车轮同时越障及前行星车轮或后行星车轮单独越障能力只与附着系数 f 及车轮直径 D 有关，而与月球车其他参数无关，而且理论推导表明三者的越障能力相同。

对月球车爬过垂直障碍的能力进行了 ADAMS 仿真分析，结果表明：在相同的附着系数条件下，ADAMS 仿真结果都小于理论推导的计算结果，但相对误差均在 10% 以内，证明理论推导结果比较可靠；另外，从仿真结果可以看出，月球车单个行星车轮爬过垂直障碍的能力要稍强于两个后行星车轮同时爬过垂直障碍的能力，而两个后行星车轮爬过垂直障碍的能力要稍强于两个前行星车轮爬过垂直障碍的能力，但是三者之间相差很小，几乎可以看作相等。

2.2 极限垂直障碍高度

当行星车轮遇到的垂直障碍高度大于 h_i 时，就需要行星车轮翻转来越过障碍，所能越过垂直障碍的极限值 H_{\max} 可用下式表达

$$H_{\max} \leq r + 2R\sin 60^\circ$$

式中 r ——行星车轮中车轮的半径

R ——行星车轮中系杆的半径

将 $r=6.5\text{ cm}$ 、 $R=8.4\text{ cm}$ 带入上式，得 $H_{\max}=21\text{ cm}$ 。

从月球车可以越过垂直障碍的极限高度能够看出，行星轮式月球车具有很强的越障能力。

3 动力学分析

月球车经常要移动在不平地面上或遇到各种地面障碍，车轮上受到各种各样的随机激励，结果使月球车各部分包括承载系统产生随机振动，它能使月球车移动平顺性变坏，并使各部件受到随机载荷而产生疲劳，影响这些部件的使用寿命，所以研究承载系统的振动是月球车系统动力学中一项重要内容。这里主要介绍地面不平激励引起的随机振动。

3.1 行星车轮的等效地面不平度函数的确定

通常把路面相对于基准平面的高度 q 沿道路走向长度的变化 $q(l)$ 称为路面不平度函数。

在进行月球车动力学分析时，由于行星车轮与普通车轮的区别，其地面不平度函数的确定也不同于普通车轮。将每个行星车轮的着地前轮及后轮的两个地面不平度函数输入转化为整个行星车轮的一个地面不平度函数输入，并将转化后的地面不平度函数称为行星车轮的等效地面不平度函数。

月球车移动在不平的地面上，当 $t = t_1$ 时刻，一个行星车轮前轮的地面不平度函数为 $q_1(t_1)$ ，后轮的地面不平度函数为 $q_2(t_1)$ ，以下简称为 q_1 、 q_2 ，根据行星车轮的几何特点，式(13)即为计算出的行星车轮等效地面不平度函数的表达式^[8]

$$\begin{cases} q = \frac{R}{2b} \left[\sqrt{b^2 - (q_1 - q_2)^2} + \sqrt{3} |q_1 - q_2| \right] - \frac{R}{2} + q_2 & q_1 > q_2 \\ q = \frac{R}{2b} \left[\sqrt{b^2 - (q_1 - q_2)^2} + \sqrt{3} |q_1 - q_2| \right] - \frac{R}{2} + q_1 & q_1 < q_2 \end{cases} \quad (13)$$

动力学分析时微分方程两边要进行 Fourier 变换，而从式(13)来看， q 的 Fourier 变换表达式将非常复杂，而且也不可能将 q 的 Fourier 变换表达为只与 q_1 或 q_2 的 Fourier 变换有关的表达式。因此，需要对推导出的等效地面不平度函数进行修正，才能进行月球车动力学分析。

设
$$Q = \frac{q_1 + q_2}{2} - A \quad (14)$$

式中 Q ——修正后的行星车轮等效地面不平度函数(mm)

A ——与附着系数有关的修正常数(mm)

将通过式(14)计算出的数值与通过式(13)计算出的数值进行了相对比较，其最大相对误差为 5.0%，可见修正公式是合理的。另外，还用 ADAMS 软件对行星车轮的等效地面不平度函数进行了仿真分析，仿真结果也表明修正公式是合理的。

3.2 7 自由度振动系统建模

3.2.1 主要参数

图 5 为 7 自由度月球车振动系统模型，其中 $Oxyz$ 坐标系为右手系， O 位于车身质心， x 为移动方向。

- 图中 m_i ——非悬架质量， $i=1,2,3,4$
 k_i ——扭杆弹簧刚度， $i=1,2,3,4$
 c_i ——减振器阻尼， $i=1,2,3,4$
 k_{ti} ——行星车轮径向刚度， $i=1,2,3,4$
 Q_i ——等效地面不平度函数， $i=1,2,3,4$
 m ——满载时的悬架质量
 z_1 ——车身质心垂直位移
 z_2 ——车身绕 x 轴转角
 z_3 ——车身绕 y 轴转角
 z_{i+3} ——非悬架质量 m_i 的垂直位移， $i=1,2,3,4$
 非独立自由度
 $z_{(i+3)0}$ ——悬架 i 与车身连接处垂直位移， $i=1,2,3,4$

其他主要参数

- I_x ——车身对 x 轴转动惯量
 I_y ——车身对 y 轴转动惯量
 L ——前后行星车轮轴距
 B ——左右行星车轮轮距
 L_1, L_2 ——车身质心到右、左悬架与车身连接处的水平距离
 L_3, L_4 ——车身质心到前后悬架与车身连接处的水平距离

3.2.2 微分方程

若记：等效输入矢量 $Q = (Q_1 \ Q_2 \ Q_3 \ Q_4)^T$ ，输出矢量 $Z = (z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4 \ z_5 \ z_6 \ z_7)^T$ 则可将振动微分方程写成^[9]

$$m\ddot{Z} + c\dot{Z} + kZ = k_1 Q$$

式中 m, c, k —— 7×7 质量、阻尼、刚度矩阵
 k_1 —— 7×4 行星车轮刚度矩阵

3.3 输出二阶导数和悬架动挠度的方均根值

输出二阶导数的方均根值同输出二阶导数的自功率谱密度 $G_{z_i z_i}$ 的关系为

$$s_{z_i}^2 = \int_0^{+\infty} G_{z_i z_i}(f) df$$

为了保证月球车的操纵稳定性，还应计算悬架

的动挠度，4 个悬架的动挠度定义为

$$f_i = z_{(i+3)0} - z_{i+3}$$

由于悬架动挠度 $f_i (i=1, \dots, 4)$ 是 $z_i (i=1, \dots, 7)$ 的线性组合，为减少计算量，利用已算出的 z_i 的方均根值进行计算。将上式两边分别平方，得到 4 个悬架动挠度的方均根值

$$\begin{cases} E(f_1^2) = E(z_1^2) + L_1^2 E(z_2^2) + L_3^2 E(z_3^2) + E(z_4^2) \\ E(f_2^2) = E(z_1^2) + L_2^2 E(z_2^2) + L_3^2 E(z_3^2) + E(z_5^2) \\ E(f_3^2) = E(z_1^2) + L_1^2 E(z_2^2) + L_4^2 E(z_3^2) + E(z_6^2) \\ E(f_4^2) = E(z_1^2) + L_2^2 E(z_2^2) + L_4^2 E(z_3^2) + E(z_7^2) \end{cases}$$

3.4 动力学分析的计算结果

动力学分析的目的是为了减小车身在三个振动方向的振动加速度和悬架的动挠度，以便提高月球车的移动平顺性和操纵稳定性。

通过计算表明，要想同时得到较小的 z_1 、 z_2 和 z_3 加速度方均根值及悬架动挠度方均根值，四根扭杆弹簧的刚度应相同、四个减振器的阻尼也应相等，并且刚度和阻尼应有一个合理的数值范围，所以初步确定刚度和阻尼为： $20 \text{ (N} \cdot \text{m)/rad} \leq k_1=k_2=k_3=k_4 \leq 45 \text{ (N} \cdot \text{m)/rad}$ ， $100 \text{ N/(m} \cdot \text{s}^{-1}) \leq c_1=c_2=c_3=c_4 \leq 175 \text{ N/(m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

图 6 为 E 路面输入的情况下 k_i 、 c_i 在此数值范围内变化时 z_1 的加速度方均根值的变化情况。当 $k_i=20 \text{ (N} \cdot \text{m)/rad}$ 、 $c_i=175 \text{ N/(m} \cdot \text{s}^{-1})$ 时，车身在垂直方向的加速度方均根值最小，数值为 0.094 m/s^2 ；当 $k_i=45 \text{ (N} \cdot \text{m)/rad}$ 、 $c_i=100 \text{ N/(m} \cdot \text{s}^{-1})$ 时，车身在垂直方向的加速度方均根值最大，数值为 0.220 m/s^2 。

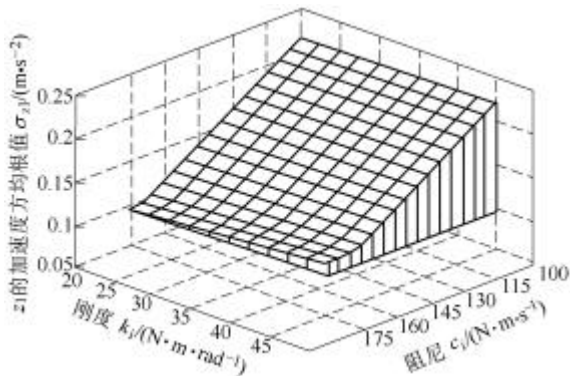


图 6 z_1 的加速度方均根值与刚度、阻尼的关系

图 7 为 E 路面输入的情况下 k_i 、 c_i 在此数值范围内变化时悬架动挠度方均根值的变化情况。当 $k_i=45 \text{ (N} \cdot \text{m)/rad}$ 、 $c_i=175 \text{ N/(m} \cdot \text{s}^{-1})$ 时，悬架动挠度方均根值最小，数值为 6.53 mm ；当 $k_i=20 \text{ (N} \cdot \text{m)/rad}$ 、 $c_i=100 \text{ N/(m} \cdot \text{s}^{-1})$ 时，悬架动挠度方均根值最大，数值为 6.56 mm 。

通过上面的计算，可以确定扭杆弹簧刚度和减

振器阻尼的合理参数范围，从而进一步减小车身在三个振动方向的振动加速度和悬架的动挠度，即： $30 \text{ (N} \cdot \text{m)/rad} \leq k_1=k_2=k_3=k_4 \leq 35 \text{ (N} \cdot \text{m)/rad}$ ， $160 \text{ N/(m} \cdot \text{s}^{-1}) \leq c_1=c_2=c_3=c_4 \leq 175 \text{ N/(m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

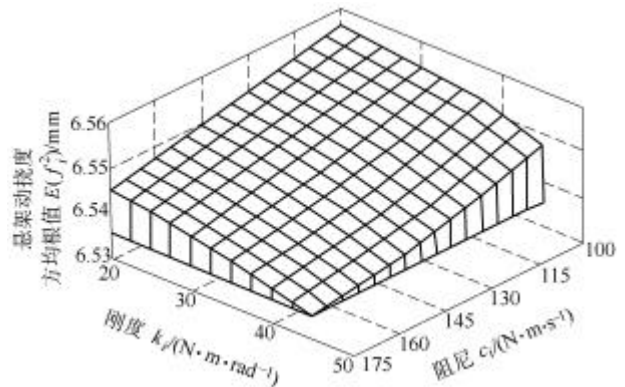


图 7 悬架动挠度方均根值与刚度、阻尼的关系

4 试验研究

4.1 地球重力条件下的越障能力试验

为检验月球车的越障能力，进行了爬坡试验和垂直障碍的越障能力试验研究。试验过程中采用红砖作为地面和台阶障碍，以便保证水平地面和台阶障碍具有相同的附着系数。

4.1.1 爬坡试验

用细木工板作为斜面，同时在地面和木板上摆两行红砖作为路面，木板的背面用角钢加固，以防止木板由于砖块和月球车的重力而产生弯曲变形。

根据测得的车轮与红砖地面附着系数，月球车在红砖路面情况下可以爬上坡度为 21° 的斜坡，但试验结果为 18.5° 。月球车实际能够爬上的坡度低于理论计算数值，主要原因是：行星车轮中电动机的功率是针对月球的低重力环境选取的，而试验是在地球重力条件下进行的，所以此时月球车的驱动力不足。

4.1.2 垂直障碍的越障试验

月球车能够遇到的凸起障碍大多是有一定坡度或是比较平滑过渡到一定高度的岩石或土丘，最为苛刻的凸起障碍就是垂直障碍，所以月球车越过垂直障碍的能力最能说明其越障能力的好坏。

对于障碍高度为一砖厚(红砖的厚度约为 54 mm)和两砖厚的垂直障碍，进行了行星车轮的翻转越障试验，行星车轮都能够顺利的翻转越过这两种高度的垂直障碍。

由于月球车的驱动力只能适应低重力环境，对于地球重力环境来说驱动力不足，因此也就没有做行星车轮极限越障高度的试验。

4.2 低重力模拟试验研究

为检验所研制的行星轮式月球车对月球低重力环境的适应能力，模拟月球的低重力环境进行了整车的低重力试验。试验装置见图 8。

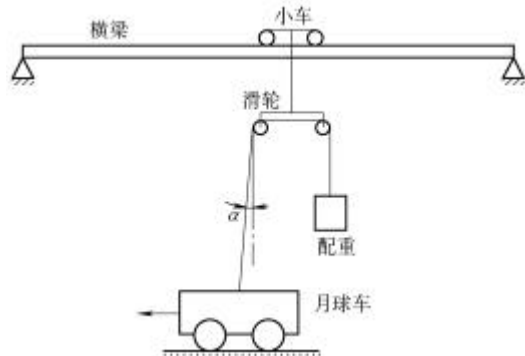


图 8 低重力模拟试验装置原理图

取配重为月球车质量的 $5/6$ 。由于月球车向前运动，使得将月球车向上拉的钢丝与竖直方向形成夹角 α ，通过计算可以得出，当 α 小于 5° 时，月球车即可带动横梁上的小车沿横梁前进。另外，在试验过程中设法保证配重不进行摆动，以消除摆动对实现低重力条件造成的影响。这样，月球车受到的垂直向上的拉力将在很小的范围内变化，确保了低重力环境的实现。

5 结论

(1) 提出并设计了行星轮式月球车。设计工作的重点为月球车的移动系统，为满足移动系统减振及越障两方面的要求，采用扭杆弹簧和磁弹簧减振器并联形式的悬架及行星车轮。

(2) 对月球车越过垂直障碍的能力进行了理论分析和 ADAMS 仿真。在行星车轮不翻转越障的情况下，得出月球车两个前行星车轮同时越障时可以爬过的垂直障碍高度只与车轮直径和附着系数有关。在行星车轮翻转越障的情况下，得出月球车可以越过的最大垂直障碍高度。

(3) 确定了行星车轮的等效地面不平度函数，为行星轮式月球车的振动动力学分析奠定了理论基础。建立了 7 自由度行星轮式月球车振动系统分析模型，根据模型的计算结果确定了扭杆弹簧刚度和减振器阻尼的最佳参数范围。

(4) 试验结果表明，行星轮式月球车具有较强的越障能力。

参 考 文 献

1 Weisbin C R, Rodriguez G. Autonomous rover technology for mars sample return. In: Proc. of the 5th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Autom-

ation in Space, 1999: 1~9

- 2 Roll R, Winnedal M Van, Richter L. Development of a european micro-robot for planetary surface exploration. In: Proc. of the ASCE Specialty Conf. on Robotics for Challenging Environments, 1998: 174~180
- 3 Hirose S. Design of Lunar and Mars Rovers in Tokyo Institute of Technology. Design Engineering, 1998, 33(12): 449~454 (In Japanese)
- 4 Bekker M G. The development of moon rover. Journal of the British Interplanetary Society, 1985, 38(4): 537~543
- 5 张海洪, 谈士力, 龚振邦. 全方位越障机构的设计. 机械设计与制造工程, 2000, 29(3): 12~13
- 6 龚余才. 稀土磁弹簧吸振器特性的研究. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(3): 376~381
- 7 陈吉清, 兰凤崇, 王予望, 等. 前轮驱动车轮越障能力的计算机模拟及试验研究. 有色金属, 1996, 48(2): 1~6
- 8 高海波, 邓宗全, 胡明, 等. 月球车用行星车轮等效地面不平度函数的研究. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(2): 183~186
- 9 雷雨成. 汽车系统动力学及仿真. 北京: 国防工业出版社, 1996

KEY TECHNOLOGY OF MOVING SYSTEM OF LUNAR ROVER WITH PLANETARY WHEEL

Gao Haibo Deng Zongquan Hu Ming
Wang Shaochun

(School of Mechanical and Electrical Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: In order to improve lunar rover's passing obstacle capability, especially to consider its wheel's passing obstacle capability, a new lunar rover which adopted parallel suspension system with torsion bar spring and magnetic spring absorber and independent planetary driving wheel is designed and manufactured. The relation between vertical obstacle height and rover parameters is inferred when two front wheels of planetary wheel of lunar rover passes obstacle under the condition that planetary wheel is not overturning. And it is simulated by ADAMS. Dynamics analysis of lunar rover is completed. Planetary wheel equivalent flatness function is determined and 7-DOF rover vibration model is set up based on it. Then the best parameter range of torsion bar spring stiffness and absorber damp are determined. Slope moving test and vertical obstacle passing test research are given. Simulating lower gravity of moon environment, the rover's low gravity test is done.

Key words: Lunar rover Passing obstacle capability
Dynamics analysis

作者简介: 高海波, 男, 1970 年出生, 博士。主要研究方向为宇航空间机构及控制。

E-mail: gaohaibo@hit.edu.cn