0254-6124/2010/30(2)-160–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Ge Weiping, Liu Tun, Yuan Laohu, Zhao Zhiping. Research on control and experiment of a new lunar rover. *Chin. J. Space Sci.*, 2010, **30**(2): 160-164

新型月球车的控制及实验研究*

葛卫平 刘 暾 院老虎 赵志萍

(哈尔滨工业大学航天学院 哈尔滨 150001)

摘 要 由于月球复杂的地形环境, 月球车作为复杂多体系统, 其动力学行为和驱动控制具有很多特性, 对其的分析也较简单系统复杂得多. 本文给出了对月球车控制的动力学、运动约束和运动学设计的数学模型, 并以跨越沟壑为例, 说明了协调控制过程. 同时设计和研制了基于气浮的独轮实验装置, 用于模拟月球的重力环境, 并研究协调了控制中各个车轮运动学和动力学参数的合理范围.

关键词 月球车; 动力学; 约束; 协调控制

中图法分类号 V 524 TP 242.3

Research on Control and Experiment of a New Lunar Rover

GE Weiping LIU Tun YUAN Laohu ZHAO Zhiping

(*School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001)

Abstract Because of the complexity of the lunar environment, the lunar rover, as a complex multi-body system, has many characteristics in its dynamics behavior and its control. The analysis is more difficult than that of simple system. The mathematical models of lunar rover control, such as dynamics, motion constraints and kinematics, are presented in this paper. The harmonious control is explained by the sample of running across a ravine. For imitation of the lunar gravitational circumstances, a single wheel test device based on gas lubrication was designed. The range of the kinematic and dynamic parameters of each wheel can be determined by that device.

Key words Lunar rover, Dynamics, Constraints, Harmonious control

1 引言

行星车常为同轴对称静定结构, 越障和过沟能力较弱. 通过对美俄行星车构型及性能的分析, 提出了一种非对称构型 6 轮静不定结构的月球车 [1−3], 并在其上作了一些试验. 该月球车越障和过沟能力强, 且具有增强牵引力的能力.

2 月球车的结构

月球车的结构如图 1 所示. 图 1(a) 中①为车身; ②为车轮的悬挂装置, 在悬挂点处, 安装了扭簧, 像汽车悬挂弹簧一样, 给车轮提供支撑力, 悬挂装置可以绕悬挂点旋转, 改变悬挂角 β_i 的大小; ③为车轮. 图 1(a) 显示此月球车具有越过横沟的能力, 图 1(b)

* 国家 985 项目 (CAAZ98502005) 和航天创新基金项目 (011801-0) 共同资助

2009-02-24 收到原稿, 2009-11-02 收到修定稿

E-mail: ge.weiping@163. com

所示为试验过程.

图 2 所示为一般 6 轮月球车的构型, 表明其不具备跨越陡峭沟壑的能力. 图 3 所示为我们设计的月球车构型, 显示其可以爬越障碍和适应各类复杂的地形.

3 月球车控制的数学模型

月球车的简化计算模型如图 4 所示. 控制用数学模型包括动力学模型、运动的约束、土壤的约束和辅助方程式.

3.1 动力学模型

动力学模型包括质心运动方程、整车转动方程、悬挂装置和车轮转动方程、车轮驱动方程.

(1) 质心运动方程

$$\boldsymbol{a}_c m = \boldsymbol{G} + \sum_{i=1}^{6} \boldsymbol{P}_i. \tag{1}$$

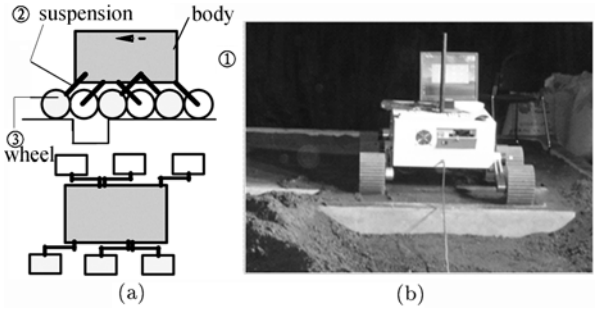


图 1 月球车的结构

Fig. 1 Structure of lunar rover

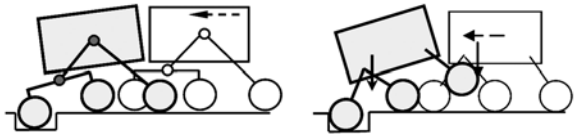


图 2 一般 6 轮车无法越过沟深超车轮半径的情况

Fig. 2 Normal six-wheel lunar rover can't run across ravine which is deeper than wheel radius



图 3 月球车跨越障碍和适应复杂地形的情况

Fig. 3 Lunar rover can run across obstacle and adapt to complicated topography

其中, $\boldsymbol{a}_c$ 为月球车质心加速度; $m, \boldsymbol{G}$ 分别为整车质量与重力; $\boldsymbol{P}_i$ 为土壤对第 i 车轮的作用力.

(2) 整车转动方程

$$\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{\omega} + \sum_{i=1}^{6}\boldsymbol{J}_{\Sigma i}\cdot\boldsymbol{\omega}_i + \sum_{i=1}^{6}\boldsymbol{J}_{\mathrm{b}i}\cdot\boldsymbol{\Omega}_i + \boldsymbol{\omega}\times\sum_{i=1}^{6}\boldsymbol{H}_i = \sum_{i=1}^{6}(\boldsymbol{R}_{\mathrm{d}i} - \boldsymbol{e})\times\boldsymbol{P}_i. \tag{2}$$

其中, $\boldsymbol{J}, \boldsymbol{J}_{\Sigma i}$ 分别为整车和悬挂装置对质心的转动惯量并矢; $\boldsymbol{J}_{\mathrm{b}i}$ 为车轮对自身质心的转动惯量并矢; $\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}_i, \boldsymbol{\Omega}_i$ 分别为整车、悬挂装置及车轮角速度; $\boldsymbol{H}_i$ 为 i 轮的动量矩; $\boldsymbol{R}_{di}$ 为质心到车轮土壤接触点矢距; $\boldsymbol{e}$ 为质心到瞬时转动中心的矢距. 式 (2) 是假设月球车转动角速度 $\boldsymbol{\omega}$, 车轮悬挂臂绕悬挂点的角速度 $\boldsymbol{\omega}_i$ $(i = 1, 2, \cdots, 6)$ 和车轮驱动角速度 $\boldsymbol{\Omega}_i$ $(i = 1, 2, \cdots, 6)$ 等均为小量, 略去它们的二阶以上小量后得到的近似关系式. 应注意的是, 与自由运动体不同, 整车的瞬时旋转中心并不是质心, 因为它受到地形的约束, 瞬时转动中心 c_0 (见图 4) 随地势和地形的不同而随时变动, 因此式中 $\boldsymbol{e}$ 是待求量.

(3) 悬挂装置和车轮绕悬挂点的转动方程

$$\boldsymbol{J}^*_{\Sigma i}\cdot\boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{J}_{i+}\cdot\boldsymbol{\omega}_i + \boldsymbol{J}_{\mathrm{b}i}\cdot\boldsymbol{\Omega}_i = \boldsymbol{M}_i^0 + \boldsymbol{L}_{ci}\times\boldsymbol{G}_i + \boldsymbol{L}_i\times\boldsymbol{g}_i + (\boldsymbol{L}_i + \boldsymbol{r}_{\mathrm{d}i})\times\boldsymbol{P}_i, \quad i = 1, 2, \cdots, 6. \tag{3}$$

这是略掉角速度二阶小量后的结果. 式中, $\boldsymbol{J}^*_{\Sigma i}$ 为悬挂装置和车轮绕悬挂点的转动惯量并矢, $\boldsymbol{J}_{i+}$ 为悬挂装置对悬挂点的转动惯量并矢, $\boldsymbol{M}_i^0$ 为车身提供给悬挂的力矩, $\boldsymbol{L}_i, \boldsymbol{L}_{\mathrm{c}i}$ 分别为悬挂点到轮轴及悬挂装置质心的矢量, $\boldsymbol{G}_i, \boldsymbol{g}_i$ 分别为悬挂装置及车轮重力, $\boldsymbol{r}_{\mathrm{d}i}$ 为土壤和车轮接触点的车轮半径.

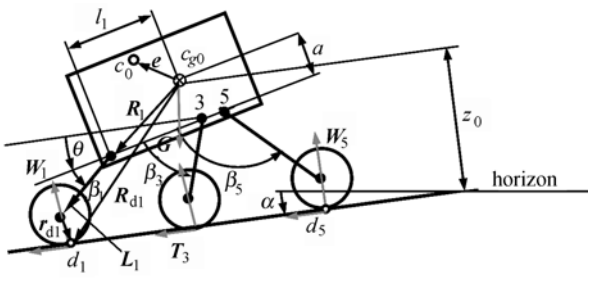


图 4 月球车的简化计算模型

Fig. 4 Sketch of computational model of lunar rover

(4) 车轮驱动方程

$$\boldsymbol{J}_{bi}\cdot(\boldsymbol{\omega}+\boldsymbol{\omega}_i+\boldsymbol{\Omega}_i)=\boldsymbol{M}_{\mathrm{b}}^{i}+\boldsymbol{r}_{\mathrm{d}i}\times\boldsymbol{P}_i,\quad i=1,2,\cdots,6. \tag{4}$$

这里也是略掉二阶小量后的结果. 式中, $\boldsymbol{M}_{\mathrm{b}}^{i}$ 为悬挂装置对车轮的力矩 (包括电动机的驱动力矩).

3.2 运动的约束

月球车运动时应遵守一定的约束条件, 车轮悬挂装置中心线与车纵轴夹角, 即悬挂角 β_i 与悬挂装置角速度 ω_i 应满足

$$\omega_i=\dot{\beta}_i,\quad i=1,2,\cdots,6. \tag{5}$$

车身姿态角与角速度的关系

$$\boldsymbol{C}_{\omega\varphi}\dot{\boldsymbol{\varphi}}=\boldsymbol{\omega}. \tag{6}$$

式中, $\boldsymbol{C}_{\omega\varphi}$ 为姿态角速度变换矩阵.

运动约束还包括几何或速度约束, 在所研究的运动控制中, 采用了如下速度约束:

$$\begin{aligned}&\boldsymbol{\omega}\times(\boldsymbol{R}_i-\boldsymbol{R}_1+\boldsymbol{L}_i-\boldsymbol{L}_1+\boldsymbol{r}_{\mathrm{d}i}-\boldsymbol{r}_{\mathrm{d}1})+\\&\boldsymbol{\omega}_i\times(\boldsymbol{L}_i+\boldsymbol{r}_{\mathrm{d}i})-\boldsymbol{\omega}_1\times(\boldsymbol{L}_1+\boldsymbol{r}_{\mathrm{d}1})+\\&\boldsymbol{\Omega}_i\times\boldsymbol{r}_{\mathrm{d}i}-\boldsymbol{\Omega}_1\times\boldsymbol{r}_{\mathrm{d}1}=0,\\&i=2,3,\cdots,6.\end{aligned} \tag{7}$$

这是以第一车轮为基础, 其他轮与之对比获得的速度约束条件, 共 5 个矢量式, 不过, 可取任意轮为对比的基础. 事实上, 速度约束与几何约束是一致的, 前者是后者的时间导数, 在动态问题分析中取速度约束更方便.

3.3 土壤的约束和辅助方程

土壤是可压缩的, 车轮又是可变形的. 如果考虑车轮的变形, 确定土壤作用力将十分复杂, 因此这里假设车轮与土壤接触时不产生变形. 图 5 是第 i 个车轮作用下土壤被压缩了 Δ_i 的情况.

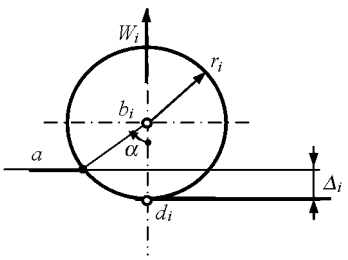


图 5 土壤的形变

Fig. 5 Distortion of soil

为了确切掌握土壤对车轮的作用力, 需要利用文献 [4–5] 给出的计算公式, 还需要知道土壤压陷和载荷关系半经验公式中的几个系数值. 这里采取了试验测定土壤压缩和剪切平均特性, 并取

$$W_i=b_i\Delta_i^{\frac{3}{2}}\alpha\sqrt{2r_i}\frac{1}{k_{\Delta i}}. \tag{8}$$

式 (8) 为垂直力的近似计算式. 式中, b_i 为车轮宽度, α 为车轮陷入土壤区的中心角, r_i 为车轮半径, $k_{\Delta i}$ 为土壤单位面积受单位力时产生的形变.

当车轮的周向作用力大于土壤所能提供的摩擦力时, 便会出现滚动滑移, 而当侧向摩擦力不足以提供要求的侧向力时, 会产生侧滑. 因此还得掌握土壤能提供的摩擦力 (土壤剪切力), 其是通过实测确定的.

当月球车的轮子超过 3 个时, 为静不定, 必须有辅助方程才能确定各轮的作用力. 法向力 W_i 可借助式 (8) 确定, 而周向力 T_i 和侧向力 $T_{\mathrm{c}i}$ 将通过下式求得

$$T_i=T_j\frac{W_i}{W_j},\quad T_{\mathrm{c}i}=T_{\mathrm{c}j}\frac{W_i}{W_j}. \tag{9}$$

4 运动学设计

如果希望月球车上某点 c (可以是任意点) 的平动速度为 $\boldsymbol{v}_c$, 铅锤方向角速度为 $\boldsymbol{\omega}$, 相当于以图 6 的 O 点为瞬时中心进行旋转运动, 根据这个要求即

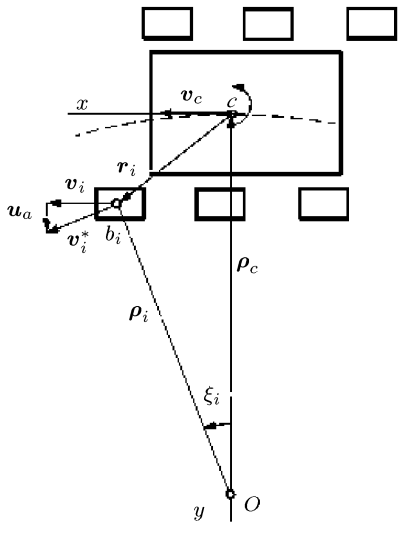


图 6 月球车的运动学关系

Fig. 6 Kinematic relationship of lunar rover

可求出各轮的速度和角速度. 对于第 i 轮, 其速度 $\boldsymbol{v}_i^*$ 等于角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 叉乘旋转中心 O 至 i 轮的矢距 $\boldsymbol{\rho}_i$, 即 $\boldsymbol{v}_i^* = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}_i$, 在月球车纵轴 x 方向的分量为 $v_i = \boldsymbol{v}_i^* \cos\xi_i$ (ξ_i 为 i 轮至瞬时旋转中心的中心角). 若 i 轮无转向功能, 它的角速度应为

$$\Omega_i = \frac{\boldsymbol{v}_i}{r_i} = \frac{\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{\rho}_i \cos\xi_i}{r_i}. \tag{10}$$

假如 i 轮具有转向装置, 且将车轮转向与 $\boldsymbol{v}_i^*$ 相同的方向, 则

$$\Omega_i = \frac{v_i^*}{r_i} = \frac{\omega\rho_i}{r_i}. \tag{11}$$

这样便将运动要求分配到各个车轮.

运动要求分解到各个车轮的过程是正问题. 但通常遇到更多的是, 已知或已有各个车轮的角速度 $\boldsymbol{\Omega}_i$, 寻求最终合成的运动, 这是逆问题. 一般遇到的逆问题比正问题要多, 求解也难得多. 这是因为月球车几乎都是多轮的, 从逆问题的角度说, 只要给定某一轮速度的大小、方向及另一轮速度的大小 (或方向) 三个条件, 月球车的运动便被完全确定, 另一轮速度的方向 (或大小) 和其余轮的运动参数都将随之被确定. 换言之, 6 个车轮, 速度共有 12 个大小和方向, 只能选择其中三个作为自由参数, 其数值可任意指定, 其余的是导出参数, 由自由参数确定. 这样确定的运动是正常运动. 不过大多数情况, 实际确定的车轮速度方向或大小都多于 3 个, 甚至全部车轮的速度都为客观条件所给定. 这种情况, 月球车的运动将是非正常的, 其标志是行走路线不准确, 同时出现大量不需要的车轮滚动滑动以及车的侧向滑移. 根据各车轮的转速确定非正常运动参数和轨迹, 校正月球车的路径, 是一项比较繁琐的任务.

5 运动的协调控制

所谓协调控制是指根据路径和姿态要求, 充分考虑到车轮转动的滑动和侧向滑移, 对月球车 6 个轮子速度 (转速) 及悬臂角 (抬高或降低) 的控制.

协调控制可以是闭环的、开环的和半闭 (开) 环的. 所谓闭环就是把路径和姿态测量装置包括到控制回路中进行全自动的控制; 开环则是完全没有这些测量装置时的控制; 半闭环处于它们中间, 虽有路径或姿态测量装置, 但不完全, 或不能全时工作, 或需要操作人员靠视觉和仪表的帮助参与控制. 这里进行的是后一种控制, 其原理如图 7 所示.

协调控制必须与第 3 和第 4 两节给出的数学模型求解同时进行, 越沟控制中共有地面对车轮的作用力、车的平动速度、转动姿态角和角速度、悬挂装置角度和角速度、车轮驱动角速度和力矩、瞬时转动中心位置等 54 个待求变量和 51 个方程式, 在给定两个车轮驱动角速度, 令侧向速度为零的条件下, 刚好可解.

以跨越横向陡峭沟壑为例 (见图 8). 图 8(a) 表示月球车的轮 1 (最前端左侧轮) 到达沟边缘时, 将轮 1 抬起. 此时, 因重量重新分配, 车的姿态会发生改变, 因此应同时调整其余 5 轮悬挂装置的角度, 使姿态角的变化维持在要求范围内. 随后, 月球车将以着地的 5 个轮子推动前进, 直至轮 2 达到沟的边缘. 图 8(b) 表示轮 2 到达边缘后, 轮 1 已越过沟壑, 于是放下轮 1. 此时又经历了重量的重新分配, 其他各轮再次调整悬挂角度. 图 8(c) 表示将轮 2 抬起, 同时经历与抬轮 1 类似的重量重新分配过程, 需调整有关轮的悬挂角度. 此后, 再次以 5 轮驱动前进, 如此重复进行, 直至车辆通过沟壑.

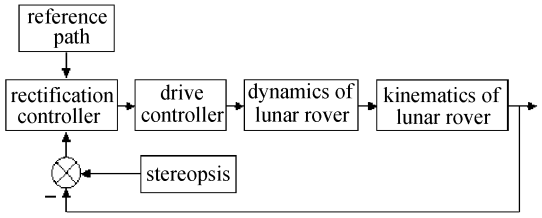


图 7 月球车半闭环控制原理

Fig. 7 Diagram of half closed control of lunar rover

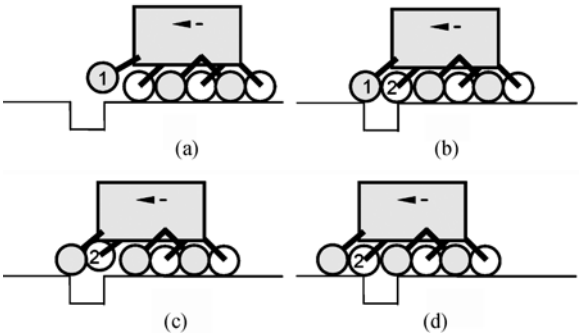


图 8 月球车跨越沟壑过程

Fig. 8 Running across ravine process of lunar rover

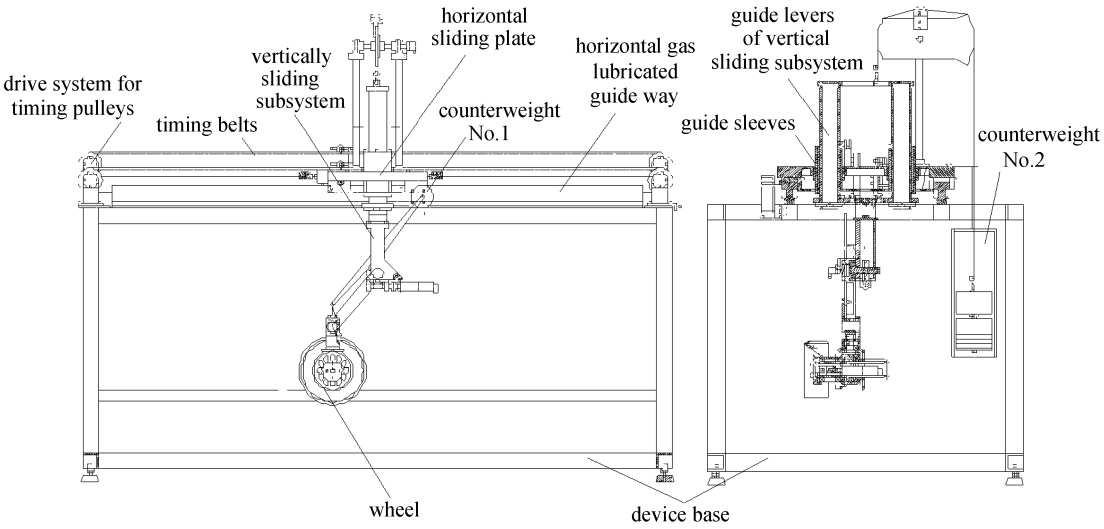


图 9 单轮实验装置

Fig. 9 Test equipment of single wheel

对于其他轨迹的运动, 控制原理与上例相似, 都要同时考虑对 6 个轮子和悬挂装置的控制, 才能达到最佳效果.

6 实验研究装置

上述分析表明, 月球车运动中每个车轮都将经受复杂的运动和受力过程, 在整车实验中很难对各种复杂环境进行全面分析. 因此建议采用如图 9 所示的单轮实验装置, 对各轮的复杂动力学过程, 包括车轮的打滑和侧向滑动进行详细分析. 美俄两国在正式把月球 (行星) 车送上星球之前, 也曾经做过类似的实验 [6−7].

7 结论

月球车的运动控制是十分复杂的过程, 必须考虑各独立驱动车轮及悬挂装置的协调动作, 既要根据地形、地势和土壤特性修正控制量, 又得判断车轮是否出现打滑现象, 或侧向滑移, 并采取相应措施. 本文提出了一种协调控制方法, 首先完成动作控制, 然后再计入打滑现象进行研究. 另外, 利用单轮实验装置可以研究协调控制中各个车轮的运动学和动力学参数.

参考文献

[1] Ge W P, Liu D. Several technical problems in lunar rover investigations. mechatronics and automation [C]. ICMA, 2009. 4616-4620

[2] Zhao Zhiping, *et al.* Study of a new kind of lunar rover driving and guidance system [C] //Proceedings of the 25th Chinese Control Conference (III). 2006. Harbin, China. pp.1633-1638. in Chinese (赵志萍, 等. 一种新型月球车驱动和导航系统研究// 第 25 届中国控制会议论文集 (下册), 2006, 哈尔滨. 1633-1638)

[3] Zhao Zhiping, *et al.* Dynamics model building of a lunar rover locomotion system [J]. *Chin. J. Space Sci.* 2005, **25**:11-16. in Chinese (赵志萍, 等. 一种月球漫游车行走系统的动力学建模 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(1):11-16)

[4] Zhang Kejian. Vehicle-Terramechanics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 114-125. in Chinese (张克健. 车辆地面力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 114-125)

[5] Bekker M G. Off-road Locomotion: Research and Development in Terramechanics [M]. Michigam: University of Michigam Press, 1960

[6] Karl Iagnemma, Hassan Shibly, Steven Dubowsky. A laboratory single wheel testbed for studying planetary rover wheel-terrain interaction [R]. Massachusetts: MIT Field and Space Robotics Laboratory, 2005

[7] Назаренко Б П. Основм éкспериментальбного исследования колёсных движителейпланетоходов [R]. 2006, Harbin