

八轮扭杆摇杆摇臂月球车运动控制研究

禹鑫焱, 邓宗全, 高海波

(哈尔滨工业大学 机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 详细分析了八轮扭杆摇杆摇臂月球探测车轮子的运动情况和受力分析, 提出了5种轮子操作模式, 指出月球车在自由操作模式下的运动是比较理想的, 机构间的能量损耗是最小的。讨论了对于在复杂环境中轮式探测车的电机驱动模式的选择对探测车运动稳定性的影响。用轮子操作模式的观点分析了3种简单电机驱动模式下月球车在平坦和崎岖地形中的不同运动情况。根据八轮扭杆摇杆摇臂月球探测车的机构特点, 结合轮子操作模式, 利用月球车机构特征和速度匹配原理, 提出一种具有良好地形适应能力运动控制算法, 把它融合到了整个运动控制系统当中, 提高了月球车在崎岖地形中的运动性能。通过野外环境中的实验证明了运动控制模型的合理性和构建系统的可靠性。

关键词: 月球车; 电机驱动; 控制方法; 运动控制

中图分类号: V476.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2007)S1-0217-05

Research on motion control of the lunar rover with a torsion bar and rocker-bogie

YU Xin-yi, DENG Zong-quan, GAO Hai-bo

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

Abstract: This paper analyses the motion of an articulated lunar Rover with a torsion bar and two rocker-bogies and force acting to wheels, and presents five operation patterns of motion of the rover's wheel. The free-running operation pattern is perfect, and the power dissipation between mechanisms is minimum. The different mode of the motor has an influence on the stability of motion in various terrains. We analyze the motion of the lunar rover for the three simple-driving modes of the motor in the plane terrain and in the uneven terrain using operation patterns of the wheel. According to the mechanical configuration of the rover, operation pattern of the wheel, and principle of speed matching of wheels, we present a control algorithm which can fit various uneven terrains and merge it into the whole locomotion control system. Finally, the experiments in the outdoor prove that the control method is right and that the control system is stable.

Key Words: lunar rover; motor driving; control method; motion control

深空探测具有重大的经济和军事意义, 世界上航天大国纷纷制定了新的深空探测计划, 我国也把深空探测纳入航天长远规划, 并已开始实施“嫦娥”探月工程^[1,2]。对于探月工程二、三期规划的软着陆探测, 月球车是必不可少的装备^[3,4]。移动子系统是整个月球车的关键部分^[5], 是所有探测仪器的载体, 它的性能好坏直接影响着探测活动的执行和完成的质量。移动子系统的性能好坏一般有几个方面的影响: 1) 移动子系统本体结构构型; 2) 运动控制系统的设计; 3) 对于机构本身特点采用的控制算法。探测车多以轮式机器人作为本体结构, 轮式机器人一般采用多轮独立驱动, 运动控制系统的设计采用开环和闭环两种驱动模式, 在开环条件下, 利用机构本身的优势, 去适应地形的变化, 具有简单可靠等特点, 但是从能耗和功率方面考虑, 开环控制完全靠机构本身去调整, 故其能耗会增加。如果采用一些合适的传感器去判断机构所处状态, 加上适应机构特点的合理控制算法, 机器人的地形适应能力会更强, 例如越障能力, 爬坡能力以及减少打滑降低能耗等^[6,7]。八轮扭杆摇杆摇臂月球车属于关节式轮式移动机器人, 其本身机构特点适合于在复杂地形中行进, 运动控制系统具有开环和闭环两种功能, 控制算法中实时采集机构特征参数, 估计轮子与地面的接触角^[8], 判断轮子所处状态, 利用速度补偿原理, 提高运动

收稿日期: 2007-06-10

基金项目: 高等学校学科创新引智计划(111计划)资助(B07018)和长江学者和创新团队发展计划

作者简介: 禹鑫焱(1979-), 男, 哈尔滨工业大学博士研究生。

性能。

1 扭杆双摇杆摇臂月球车机构介绍

八轮扭杆双摇杆摇臂关节式移动机器人本体是一款月球车地面原理样车,该系统基于月球表面环境并采用模块化思想设计,机构特点能够被动地适应复杂地形。该移动机器人的基本组成和机构图如图 1 所示。该机器人机械本体结构由车体悬架基座和差速机构构成,车体悬架由两组摇臂和摇杆组成,每组摇臂和摇杆上由 4 个驱动轮和两个转向轮。车轮采用弹性筛网轮,提高了移动机器人在松软土地上的通过能力,减小了刚性车轮移动时产生的振动,提高了移动机器人移动的平稳性。漫游车的基本结构参数为:外形尺寸为 1500×850×620mm,车轮直径为 $\Phi 260$,自身重量为 120kg。

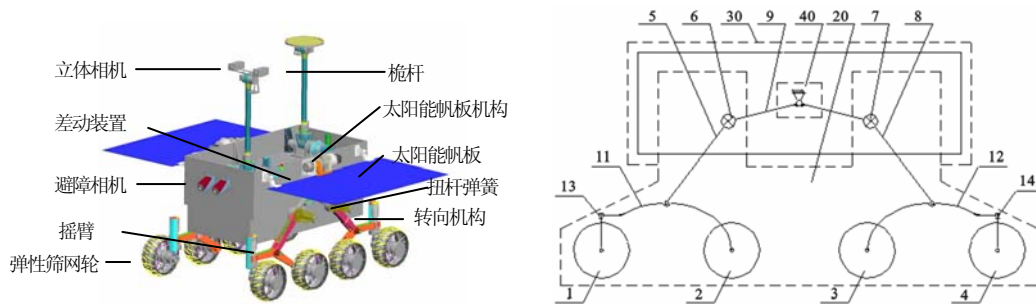


图1 八轮扭杆双摇杆摇臂移动机器人原理样机及机构简图

2 月球车的轮子操作模式分析

假定月球车整体运动时,每个轮子的运动情况可由该轮子上的力和速度来描述。且作用在轮子上的力和力矩在纵向和横向上的大小是不同的,并且由每个轮子的操作条件决定。任取一个独立驱动的轮子 i 作为研究对象,轮子 i 的受力分析如图 2 所示。在图中,轮子、驱动、土壤表面和机架之间的关系通过相应的力表示。作用轮子 i 上的驱动力矩为 M_{ki} (相对于单元接触面)。土壤对轮子的正向、切向和横向的作用力为 q_{ni} , q_{ti} 和 q_{ui} 。这些力作用在轮子上的等效力为 P_i 。等效力 P_i 投影到轮轴上分别为: P_{xi} , P_{yi} 和 P_{zi} 。

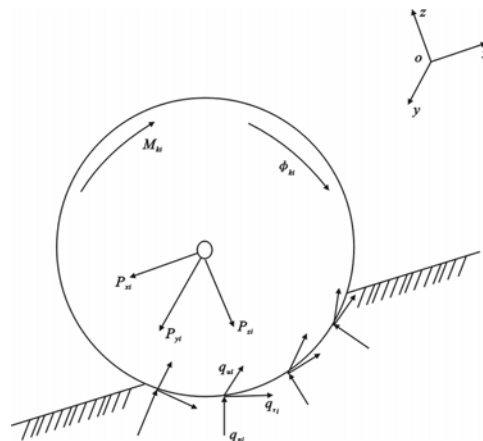


图2 独立驱动的单轮受力分析图

对此引入轮子操作模式的概念,轮子的操作模式是指,当月球车运动时,从力学和驱动情况看,轮子处于何种状态。通过对轮子受力分析,得 P_i 在 x 轴方向上的投影力 p_{xi} 起关键作用,通过 P_{xi} 可以判断多轮驱动之间各轮的相互影响(作用)和计算(估计)分配在轮子上的力的大小和操作模式。显然,当 $P_{xi}=0$ 时,各轮之间没有相互影响(作用);当 $P_{xi} \neq 0$ 时,对分析的这个轮子来说要么传递力给其他轮(驱动轮),要么从车体运动中获得驱动力(被驱动轮)。根据上面的分析可以得到单个轮子的 5 种操作模式:

1) 驱动模式,驱动轮: $P_{xi} < 0, M_{ki} > 0$; 2) 驱动模式,被驱动轮: $P_{xi} > 0, M_{ki} > 0$; 3) 被驱动模式: $P_{xi} > 0, M_{ki} = 0$; 4) 制动模式: $P_{xi} > 0, M_{ki} < 0$; 5) 自由运动模式: $P_{xi} = 0, M_{ki} > 0$ 。

其中 P_{xi} 的符号与坐标轴的 x 方向一致, M_{ki} 的方向与 $\dot{\phi}_{ki}$ 一致。

从轮子操作模式可以得到: 对于多轮独立驱动的月球车来说, 如果有轮子处于驱动模式下, 且又是驱动轮, 必然有其他轮子处于驱动模式下, 本身为被驱动轮, 或者必然有轮子处于被驱动模式下。反之, 也是成立的。当有轮子处在驱动模式, 或被驱动模式时, 必然机构之间存在作用力和反作用力, 有能量损耗在机构之间。当轮子处在自由模式下时, 各轮子间不存在作用力和反作用力, 也就没有由于多轮驱动速度不匹配而引起能量损耗在机构中。

3 控制方法研究

从上面的分析可知, 当轮子处在自由模式条件下时, 从消耗能量的角度来说, 机构损耗能量是最小的, 各轮之间也不存在作用力和反作用力; 从整车运动角度来说, 也就没有由于多轮驱动轮子速度不匹配而造成的轮子打滑。八轮扭杆摇杆摇臂月球车的机械本体结构是由两个主摇臂和差速器组成的, 每个主摇臂上有两个副摇杆, 每个轮子采用的是独立驱动, 不存在耦合关系。通过对单轮操作模式的分析, 电机的不同控制将会对月球车产生不同的运动效果, 且在运动过程中消耗的能量也是不同的。如果采用的控制方式不合理的话, 可能会造成各部分之间的驱动力变成阻力, 使该月球车的运动特性降低, 整体功耗增加。

3.1 运动控制系统构建

八轮扭杆摇杆摇臂月球车整个控制系统采用基于总线的网络分布式控制系统。控制结构根据月球车基本控制元素设计, 采用的电机驱动单元都为同一个控制模块(网络驱动器), 每个驱动模块基本配置为: 驱动两个直流电机, 采集 8 路的模拟量。这样做是为了模块化运动控制单元, 并且每个模块可以通过软件配置各种参数(PID 控制参数, 开环和闭环选择, 以及控制模式的选择等)。每个总线网络单元采用 TMS320F2407A 为控制核心, 以 LMD18200 作为驱动直流电机的功率放大电路, 用继电器信号控制力矩电机和关节制动器, 并且具有电流反馈作用, 以 CAN 通讯接口, 通过 CAN 接口与主控计算机和彼此之间进行数据交换。由于转向轮的驱动单元和驱动轮驱动单元在控制方式上有些不同, 转向轮的驱动主要是在速度控制的基础上引入了对转弯角度的控制。

网络驱动器中控制的对象主要是驱动轮和转向轮。驱动轮和转向轮均具有闭环控制和开环控制两种工作模式, 月球车可以根据地形切换这两种模式, 并且驱动器具有集成式简单控制方式: 1) 速度控制模式; 2) 电流补偿控制模式; 3) IXR 负载补偿模式。为了使设计的网络驱动器具有模块化, 参数可配置, 并且减轻主控计算机的负担, 把部分基本的控制算法放到了网络驱动器中。网络驱动器的具体控制算法包括: 1) 驱动轮的速度和位置闭环控制; 2) 角度传感器组成的位置闭环控制。另外由于地形的复杂性, 为了适应不同的地形需要, 在开环和闭环算法之间需要来回切换使用, 所有的上述控制算法可以通过配置参数的方法, 使其成为开环控制。

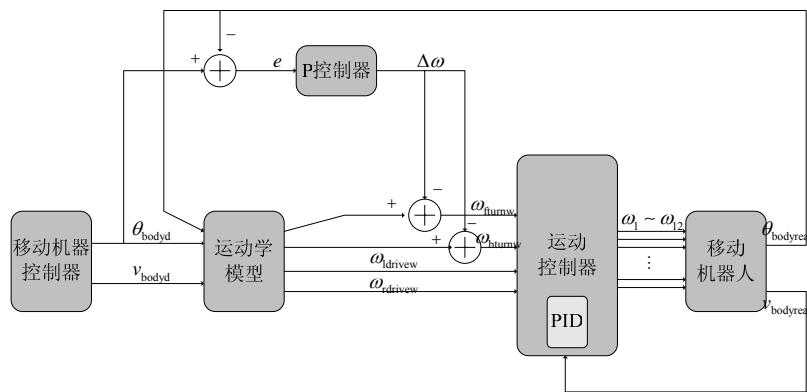


图3 月球车整体控制模型

月球车整体控制策略如图3所示, 月球车主控计算机负责处理接收指令, 并利用运动学模型, 以及相应的控制算法, 给每个驱动单元发送控制指令, 每个驱动单元再根据指令执行相应的程序。

3.2 简单控制模式研究

对八轮扭杆摇杆摇臂月球车的运动控制来说, 驱动轮的控制是关键。对一个多轮独立驱动的月球车来说, 在每个时刻可能每个车轮会处在不同的操作模式下, 由于地形的复杂性, 势必会使月球车悬架关节间产生阻力或

者拉力, 增加能量的损耗。先分析各简单控制模式对机构驱动造成的影响, 在这些简单的控制中并不考虑地形的变化给运动控制造成的影响。

(1) 速度控制模式。相当于不管地形的情况如何, 保持每个轮子的线速度始终不变; (2) IXR 补偿模式。相当于负载补偿控制模式, 即在低速运行的时候, 监测电机的负载自动通过增加电机电压维持恒定的速度。这种模式特别适合变负载的情况; (3) 电流控制模式(转矩控制模式)。相当于不管地形的情况如何, 保证每个轮子的输出转矩是不变的。

在试验中, 给每个轮子的初始速度都是一样的。通过试验发现: 在平坦地形中, 月球车在上面 3 种模式控制下产生的结果基本相同, 每个轮子电机的反馈电流基本一致, 每个轮子的 $P_{xi}=0$, $M_{ki}>0$, 说明轮子间的作用力为零, 月球车的各个轮子都处于自由滚动模式下; 在不平坦的地形中, 月球车在上面 3 种控制模式下产生的结果有很大差异: 1) 在速度模式下, 中间车轮的受力明显比其他两种控制模式下的, 而且轮子打滑的情况也比较多。很显然中间车轮的受力增加, 此时轮子处于非自由操作模式下, 即 $P_{xi} \neq 0$ 。(当前轮作用于摇臂的等效力大于后轮作用于摇臂关节的等效力时, $P_{xi}>0$, 反之, $P_{xi}<0$)。2) 在 IXR 补偿模式下, 月球车运动速度是可控的, 轮子打滑的现象也有所减少, 但是摇臂关节处还是有一定的受力。3) 在电流模式下, 轮子打滑的现象明显减少, 摇臂关节处的受力也减小, 但是速度变成了不可控, 也就是说, 在给定的输出的条件下, 如果地形情况变了, 速度也就变了。很显然, 在第 3 种情况下 P_{xi} 近似为零, 月球车的各个轮子处于自由操作模式下。

3.3 改进型控制算法

为了解决上面出现的现象, 对月球车运动模型作了如下详细分析。在图 4 中, 坐标系 XYZ 是月球车在一侧摇杆坐标系; θ_i 为第 i 驱动轮与地面对接触角, 摇臂驱动轮轮中心线速度与水平面的夹角分别为 α 和 β 。 v_1, v_2, v_3, v_4 分别为月球车一侧驱动轮轮子中心的线速度。

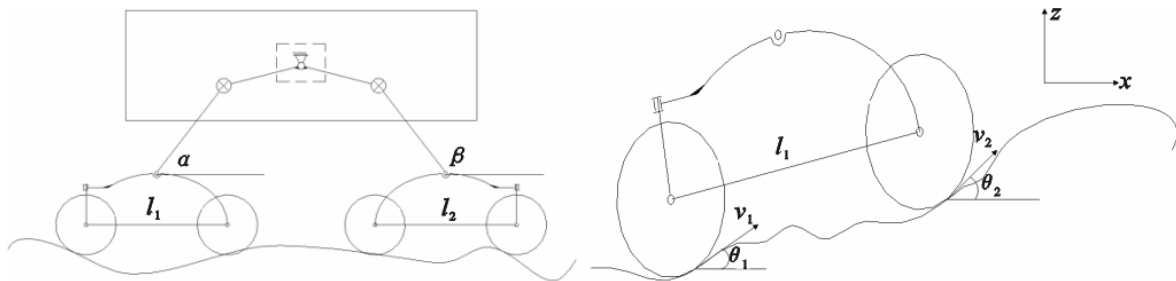


图 4 月球车崎岖地形轮地接触角分析示意图

从图 4 中可以看出, 4 个车轮的线速度向量长度是一样的, 但其在中心轴平面内的投影是不相同的 (XZ 是月球车运动轨迹平面)。当运行在不平坦的地形中时, 如果给定每个轮子的驱动速度一样的话, 有些轮子必定打滑, 或者说有轮子处在驱动模式或被驱动模式下, 导致功耗的提高, 爬坡或越障能力下降。因此, 可以采用速度补偿的方法来使每个轮子的驱动速度匹配。从图 4 中可知, 要使每个轮子的速度匹配, 必须使用轮子线速度与地面的夹角 θ_i , 也就是轮子与地面的接触角 θ_i 。车体同一侧轮子匹配的条件为: $v_1 \cos \theta_1 = v_2 \cos \theta_2 = v_3 \cos \theta_3 = v_4 \cos \theta_4$ 。为了满足车轮速度匹配的条件, 假定车轮与地面单点接触, 车轮与地面为刚性接触。先对一个摇臂进行分析, 从图示中可以得到如下方程

$$v_1 \cos(\theta_1 - \alpha) = v_2 \cos(\theta_2 - \alpha) \quad , \quad (1)$$

$$v_2 \sin(\theta_2 - \alpha) - v_1 \sin(\theta_1 - \alpha) = l \dot{\alpha} \quad . \quad (2)$$

首先对式(1)和(2)进行求解, 假定 v_1, v_2 给定, 可得到

$$\theta_1 = \alpha - q_1 \cos q_2, \quad (3)$$

$$\theta_2 = q_1 \cos(q_3/q_2) + \alpha, \quad (4)$$

其中, $q_1 = l\dot{\alpha}/v_1$, $q_2 = v_2/v_1$, $q_3 = \frac{1}{2q_1} \sqrt{2q_1^2 + 2q_2^2 + 2q_1^2 q_2^2 - q_1^4 - q_2^4 - 1}$,

利用上面的预测结果, 再进行速度匹配。

根据上面的分析可知, 在任何时刻, 4个轮子的有效线速度符合它们之间的运动学关系, 将消除轮子的打滑(但从实际情况来说, 消除打滑是不可能的, 只能说减少了轮子的打滑)或者说减少了能量的损耗。

采用的控制算法流程如下。控制算法根据轮子速度匹配的条件建立。通过实时测量月球车的姿态和驱动轮电机的速度, 计算轮子与地面的接触角, 然后调整每个驱动轮的速度, 使月球车适应地形的变化, 减小打滑及机构间能量的损耗。

(1) 首先假定车轮没有打滑, 给定的速度 $v_i = v_{\text{body}}$;

(2) 根据式(3), (4) 计算轮子与地面的接触角 θ_i ;

(3) 分别计算 $v_{ix} = v_i \cos \theta_i$, 并计算 $\Delta v_i = |v_{\text{body}} - v_{ix}|$;

(4) 如果 $\Delta v_i \leq \delta$ (为给定的误差允许值), 则继续执行(2) - (4), 如果 $\Delta v_i > \delta$, 则判断哪个车轮的 v_{ix} 超出

了 δ , 并使 $v_i = v_i + \Delta v$ (为增加的速度增量), 继续执行(2) - (4), 直到 $\Delta v_i \leq \delta$ 满足。

为了验证上述算法的正确性, 进行了仿真验证和初步试验验证, 机构间的能耗由于速度的匹配而减少, 当月球车在同样的沙地上运行相同时间时, 采用此控制算法比直接采用速度控制方式运行距离增加了5%。

4 结束语

分析八轮扭杆摇杆摇臂月球车的机构特点, 提出车轮在运动中的5种操作模式, 并利用操作模式对月球车的运动工况作了分析, 并通过试验研究, 对比了简单工作模式下月球车运动工况中的机构间能耗产生原因及利弊, 最后提出改进型算法, 仿真结果和试验证明该算法能够减少机构间的能耗问题, 减少车轮的打滑现象。

参考文献

- [1] 褚桂柏. 论我国深空探测技术的发展[J]. 航空工程, 2001, 10(3): 47-53.
- [2] 梁斌, 王巍, 王存恩. 开发我国月球车的初步设想[J]. 国际太空, 2003, (2): 22-25.
- [3] Lamon P, Krebs A, Lauria M, et al. Wheel Torque Control for a Rough Terrain Rover [C]// Proc of ICRA'2004. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 4682-4687.
- [4] Iagnemma K, Dubowsky S. Mobile Robot Rough-terrain Control (RTC) for Planetary Exploration[C]//Proc of DETC'2000. Baltimore, USA: ASME, 2000.
- [5] 高海波, 邓宗全, 胡明. 行星轮月球车移动系统关键技术[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12):156-161.
- [6] Peynot T, Lacroix S. Enhanced Locomotion Control for a Planetary Rover[C]//Proc of IROS'2003. USA: IEEE/RSJ, 2003: 311-316.
- [7] Balaram J. Kinematic Observers for Articulated Rovers[C]// Proc of ICRA'200. San Francisco, USA: IEEE, 2000: 2597-2604.
- [8] Iagnemma K, Dubowsky S. Vehicle Wheel-Ground Contact Angle Estimation: with Application to Mobile Robot Traction Control [C]//Proc of 7th ARK'2000. Slovenia: ASK, 2000: 137-146.