

一种扭转式载人月球车及其高速移动性能研究

马龙宇^{1,2}, 王慎泉³, 蒋松¹, 付宏文¹, 张崇峰^{2,4}, 时军委^{1,2}

(1. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109; 2. 空间结构机构技术国防重点实验室, 上海 201109;

3. 中国航天员科研训练中心, 北京 100094; 4. 上海航天技术研究院, 上海 201109)

摘要: 针对阿波罗载人月球车在崎岖月面行驶车身晃动幅度过大, 车轮离地时有发生的问题, 分析月面地形路谱对车身纵向、横向以及对角车轮跳动差的需求, 在总结月球车、火星车以及地面车辆提高接地性措施的基础上, 提出一种前后车身可相对扭转的载人月球车, 通过相对扭转对车轮跳动进行补偿。仿真对比了两种载人车在不同路面下的高速移动能力、平顺性、通过性以及稳定性, 对比研究表明: 该扭转式载人车在交叉正弦路面具有更高的行驶速度, 在随机路面同等行驶速度下具有更高的平顺性, 在低速越障、过坑能力等方面也具有明显优势, 车身扭转自由度明显增加了载人月球车对崎岖路面的适应性。

关键词: 载人登月; 月球车; 车身扭转; 越障

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2023)09-1392-09

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2023.09.012

Research on a Torsional Manned Lunar Rover and its High Speed Mobility Performance

MA Longyu^{1,2}, WANG Shenquan³, JIANG Song¹, FU Hongwen¹, ZHANG Chongfeng^{2,4}, SHI Junwei^{1,2}

(1. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China; 2. National Defense Key Laboratory of Space Structure and Mechanism Technology, Shanghai 201109, China; 3. Astronauts Research and Training Center, Beijing 100094, China; 4. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Aiming at the problem that the suspension travel of manned lunar rover does not meet the needs of the runout differences of the rugged lunar surface, the requirements of the lunar terrain road spectrum on the body's longitudinal, transverse and diagonal wheel runout are analyzed. Based on the summary of measures to improve the grounding performance of lunar rovers, Mars rovers and ground vehicles, a manned lunar rover with reversible body is proposed, and the wheel runout is compensated by relative torsion. Simulations are conducted to compare the high-speed mobility, ride comfort, passability and stability of the two manned vehicles on different road surfaces. The comparative study shows that the proposed reversible vehicle has higher driving speed on crossed sinusoidal road surface, higher ride comfort on random road surface at the same driving speed, and has obvious advantages in low speed obstacle crossing and pothole crossing ability. The torsional freedom of the vehicle body significantly increases the adaptability of the wheel to the rugged road surface.

Key words: Manned lunar landing; Lunar rover; Body twist; Obstacle crossing

0 引言

载人月球探测工程将打开中国航天事业的新篇章^[1]。载人月球车是提高月球探测效率的重要装备, 在恶劣的月球环境中具有高速、大范围移动能

力, 保障航天员安全、高效地完成探测任务^[2]。载人月球车的发展史可以追溯到20世纪60~70年代的阿波罗计划, 时至今日, 月球车的研究经历了3个时期, 但绝大多数载人月球车还仅仅停留在概念阶段^[3-4], 只有3辆为阿波罗计划服务的载人月球车

(LRV)成功登月并进行了月面实地驾驶^[5-6]。LRV的使用极大提高了阿波罗计划的探索效率。在阿波罗15号的3次舱外活动中,航天员驾驶LRV在哈德利里尔地区行驶了28 km,同时收集了77 kg的月球样本,几乎是阿波罗14号任务的2倍。在阿波罗16号上,航天员使用LRV探索了笛卡尔陨石坑附近的月球表面,总共收集了97 kg的月球样品。该地区比预期的更加崎岖,如果没有LRV,阿波罗16号只能完成不到5%的探测任务。阿波罗17号上,航天员在返回登月舱的途中,驾驶LRV以17 km/h的速度下山,创造了新的“月球速度纪录”^[7]。LRV在阿波罗15~17号任务中的应用使航天员的活动半径从数百米扩大至超过5 km,活动里程增加至近10倍,样品采集量也成倍数增加,这其中LRV的快速移动能力是决定性因素^[5,7]。然而在阿波罗16号LRV的驾驶中发现,当月球车在月面高速行驶时,由于受到月面低重力与崎岖地形的影响,车身呈现大幅低频颠簸现象,车轮离地情况时有发生^[8]。这种不安全的现象使得航天员无法完全发挥LRV的性能,阿波罗16号LRV在平坦月面的速度仅为设计最大速度的一半,大大影响了航天员的活动范围与探测效率。车轮的频繁离地还容易影响稳定性,月球车变得难以控制,甚至还会引发车辆的倾覆,危及航天员的生命安全。因此,提高LRV在月面崎岖地形上行驶的稳定性与综合移动性能具有重要意义。

目前提高载人月球车移动性能的重点通常在于移动系统的改进。为了增强行驶能力,中国北方车辆研究所提出一种轮履复合式载人月球车,将传统轮式载人月球车的后轮改为履带系统,通过多体动力学与离散元(MBD-DEM)耦合仿真技术验证其具有良好的越障能力和移动通过性^[9]。上海理工大学基于鸟巢结构设计了一种新构型载人月球车车轮,有良好的承载能力与越障能力^[10];NASA打破传统观念设计的新型月球车Chariot引入了主、被动悬架双重调节模式,能根据不同的月面提供不同的悬架性能,同时,双六轮移动系统大大增加了车轮接地面积,提高了车辆地面附着性^[11-12]。这些方案针对月球车的崎岖地形适应性进行了有益尝试,但同时也存在一些挑战。例如,移动系统结构过于复杂难以保证其可靠性、技术不够成熟等。

地球表面同样存在着大量崎岖地形,如矿区、高原、山路和地下空间等。这些地形对车辆的通过性能也有极高的要求。因此,研究人员着重设通过计车辆构型和底盘移动系统的构型来提高车辆的环境适应性以及移动性能,例如,履带式全地形车具备较高的环境适应性,能够在恶劣的气候和地形环境下正常行驶^[13],轮式铰接自卸车则可以在崎岖复杂的路面行驶,同时保证所有车轮与地面接触以维持整体稳定性和通过性^[14],而越野汽车则具备良好的动力性和高机动性^[15],这些经验也为载人月球车提高月面适应性提供了有益参考。

本文对月面路谱与车轮跳动量的关系进行了深入分析,阐述了LRV腾空现象的本质原因。借鉴轮式铰接自卸车^[14]的思路,设计了一种前后车身可相对转动的扭转式月球车,在悬架跳动行程的基础上通过前后车身的相对扭转对车轮跳动进行了补偿,使之能够满足崎岖月面起伏高度差对车轮跳动量的需求。建立了整车多体动力学模型,对车辆高速移动能力、平顺性、通过性以及稳定性进行了仿真分析。对比研究表明,扭转式载人车在交叉正弦路面具有更高的行驶速度,在随机路面同等行驶速度下具有更高的平顺性,在越障、过坑、稳定性等方面也具有明显优势。这种移动系统构型为提高载人月球车的通过性和地形适应性提供了新思路。

1 月面地形路谱与车轮跳动差需求分析

1.1 月面地形路谱

整个月球表面总体上可分为月海和高地两大地貌单元。月海是月面上宽广的平原,约占月表面积的17%。高地是指高出月海的地区,面积约占月表面积的83%。月球表面覆盖有不同尺寸和形状的石块和陨石坑,陨石坑使得月面坑坑洼洼崎岖不平。NASA将月面分为崎岖月面与平坦月面^[16],其空间频率规律如图1所示,在阿波罗着陆点区域的观测与数据统计中发现,陨石坑每100 m²中大约就有10个直径1~3 m的陨石坑。根据嫦娥四号探测器对着陆区域次级坑的统计,发现陨石坑的深度与直径成正比的线性关系,且绝大多数的深径比在0.10~0.16之间,边缘高度不超过直径的0.06,因此月面的凹坑密度高且整体平缓^[17]。

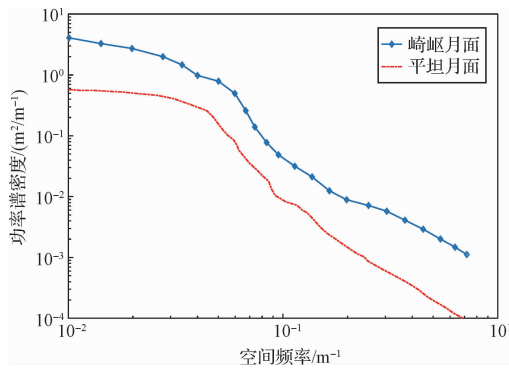


图1 月面空间功率谱密度曲线

Fig. 1 Curves of lunar space power spectral density

首先,根据车速将图1中的功率谱密度(PSD)曲线转换为频域的PSD曲线。接下来,对该频域PSD曲线进行逆功率谱(INVPSD)分析,将其转换为时域上的信号。最后,根据行驶时间,将该信号进一步转换为横轴表示行驶距离、纵轴表示路面起伏的曲线。在图2、图3中,生成的月面行驶距离与月面起伏的曲线和图1中平坦月面与崎岖月面地形的功率谱密度曲线分别对应,图2表示平坦月面起伏,标准差为 $\sigma = 140$ mm;图3表示崎岖月面起伏,标准差为 $\sigma = 317.5$ mm。

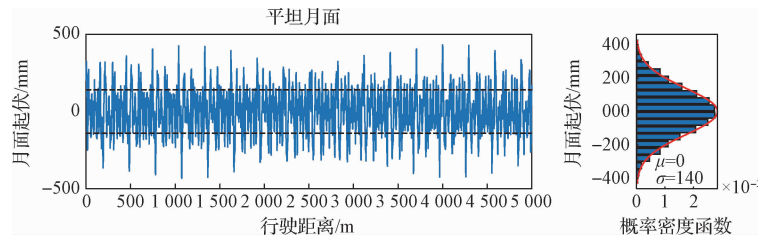


图2 平坦月面几何与统计特性

Fig. 2 Geometric and statistical characteristics of lunar flat terrain

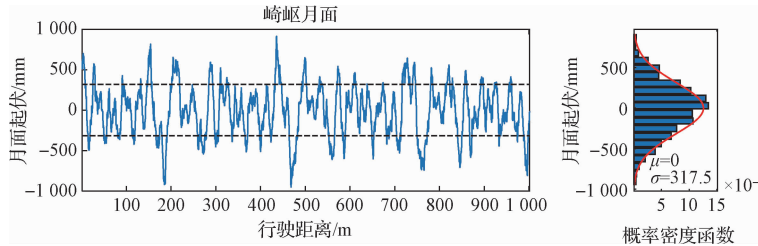


图3 崎岖月面几何与统计特性

Fig. 3 Geometric and statistical characteristics of lunar rugged terrain

图2~图3的曲线可分别用函数 $h = f_r(\lambda)$ 和 $h = f_s(\lambda)$ 来表示,其中 h 为月海崎岖和平坦地区的起伏高度, λ 为崎岖和平坦月面的水平位置,下标 r 和 s 分别表示崎岖和平坦地形。

1.2 地形输入与车轮跳动特征分析

由于月球表面地形没有铺装,其地形起伏呈现出各向同性的特征。车辆在月面行驶时,由于轴距、轮距及对角轮距的影响,沿车身纵向、横向以及对角线方向车轮的地面位移输入的差异可用式(1)来表示。图4是月球车整车示意图, $z_{lf}(x, y)$, $z_{rf}(x, y)$ 表示左右前轮的地面位移输入, $z_{lr}(x, y)$, $z_{rr}(x, y)$ 表示左右后轮的地面位移输入。以右后轮接地点为参考点,4个车轮的月面起伏高度表示为

$$\begin{cases} z_{rr}(x, y) = f_{r/s}(\lambda) \\ z_{rf}(x, y) = f_{r/s}(\lambda - l) \\ z_{lr}(x, y) = f_{r/s}(\lambda - 2d) \\ z_{lf}(x, y) = f_{r/s}(\lambda - \sqrt{(2d)^2 + l^2}) \end{cases} \quad (1)$$

以右后轮接地点为地面位移输入的原点,可以得到另外3个车轮的位移输入差表达式:

$$\begin{cases} \Delta z_{lon} = z_{rf} - z_{rr} = f_{r/s}(\lambda - l) - f_{r/s}(\lambda) \\ \Delta z_{lat} = z_{lr} - z_{rr} = f_{r/s}(\lambda - 2d) - f_{r/s}(\lambda) \\ \Delta z_{dia} = z_{lf} - z_{rr} = f_{r/s}(\lambda - \sqrt{(2d)^2 + l^2}) - f_{r/s}(\lambda) \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δz_{lon} , Δz_{lat} , Δz_{dia} 分别表示车身纵向、横向以及对角方向的位移差。

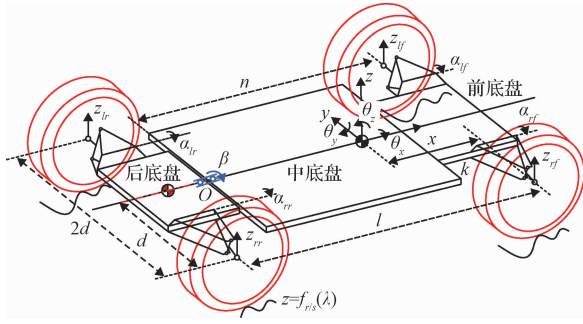


图4 月球车布局与坐标系

Fig.4 Lunar rover layout and coordinate system

通过计算得到的地形起伏曲线与概率密度函数如图5所示,该结果是基于月海较平坦地区的地形分布情况。不同月面起伏差的标准差统计结果如表1所示。

LRV 悬架跳动范围为 $-101.6 \sim 152.4$ mm,能够适应的最大轮间路面位移差为 254 mm,能够满足表1中平坦月面3个方向 2σ 的轮间跳动量需求,以及纵向、横向2个方向的轮间 3σ 跳动量需求,但不满足对角车轮的 3σ 跳动量需求,行驶时靠车身的略微俯仰、侧倾或二者组合来补偿不足;满足崎岖月面 σ 需求,不满足 2σ 需求,远不满足 3σ 需求,这样车身俯仰或侧倾角幅度很大,车速较高时对角车轮容易腾空离地,不利于安全行驶和车速的进一步提高。

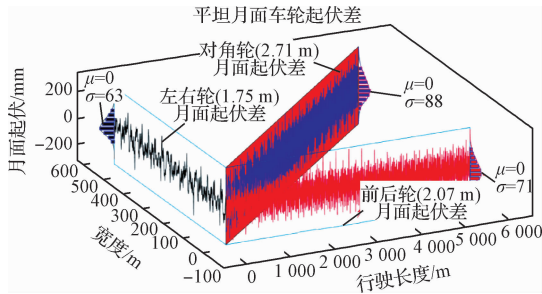


图5 平坦月面车轮起伏差

Fig.5 Difference in wheel undulation on flat lunar surface

表1 不同月面车轮间起伏差的标准差统计表

Table 1 Statistics of standard deviation for the fluctuation difference between wheels on different types of lunar surface

单位:mm		
	平坦月面($\sigma, 2\sigma, 3\sigma$)	崎岖月面($\sigma, 2\sigma, 3\sigma$)
纵向	71, 142, 213	163, 326, 489
横向	63, 126, 189	145, 290, 435
对角	88, 176, 264	196, 392, 588

2 扭转车身对车轮跳动的补偿分析

2.1 LRV 悬架

如图6所示,LRV 采用了双横臂悬架结构,在车身坐标系下, z 轴为垂直方向, y 轴为侧向,满足右手定则。悬架系统的上下横臂几乎具有相等的长度,因此可以近似视为平行四边形四连杆机构。因此,当月球车在月面上行驶时,路面激励将会引起悬架上下横臂绕固定点的转动,即上横臂绕点 A 旋转的角度与下横臂绕点 C 旋转的角度相等,即 $\alpha = \alpha'$ 。随着横臂的旋转,车轮会随之上下跳动。车轮的垂直位移可以表示为

$$Z_p = b \sin \alpha \quad (3)$$

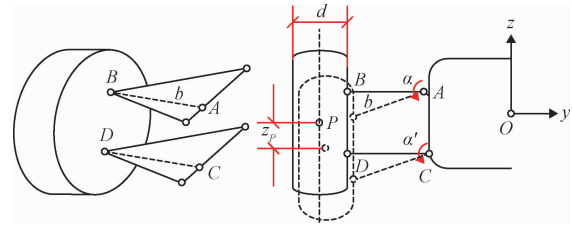


图6 LRV 的悬架车轮结构模型

Fig.6 Suspension and wheel structure model of LRV

2.2 车身扭转对车轮跳动的补偿

如图7所示,扭转式月球车在LRV的基础上参考轮式铰接工程车结构^[14]和悬浮式前驱动桥^[18]释放了后底盘与中底盘之间沿车身纵向轴线的转动自由度。当月球车遇到障碍或陨石坑时,车身可以通过扭转来使横臂旋转一个角度,进而带动车轮在垂直方向上产生位移,增加轮胎与障碍物或陨石坑底部之间的接触面积。同时,这也可以增大车轮的垂直行程,使车轮更容易与障碍物或陨石坑底部接触。图7中扭转式月球车车轮的垂直位移表达式为

$$N'_p = b \sin \alpha + d \sin \beta \quad (4)$$

由式(14)可以看出,扭转式月球车可以将其车身视为一个横臂,通过扭转车身可以额外提高车轮的行程 $d \sin \beta$ 。

图4中4个悬架绕固定点转动的角度为 α_{lr} , α_{lr} , α_{rr} , α_{rr} , 车身俯仰角、侧倾角、横摆角分别为 θ_x , θ_y , θ_z , 从车的角度对应式(2)为

$$\begin{cases} \Delta z'_{lon} = d[\sin(\theta_x + \beta) - \sin \theta_x] - l \sin \theta_y + b(\sin \alpha_{rr} - \sin \alpha_{lr}) \\ \Delta z'_{lat} = 2d \sin(\theta_x + \beta) + b(\sin \alpha_{rr} + \sin \alpha_{lr}) \\ \Delta z'_{dia} = d[\sin(\theta_x + \beta) + \sin \theta_x] - l \sin \theta_y + b(\sin \alpha_{rr} + \sin \alpha_{lr}) \end{cases} \quad (5)$$

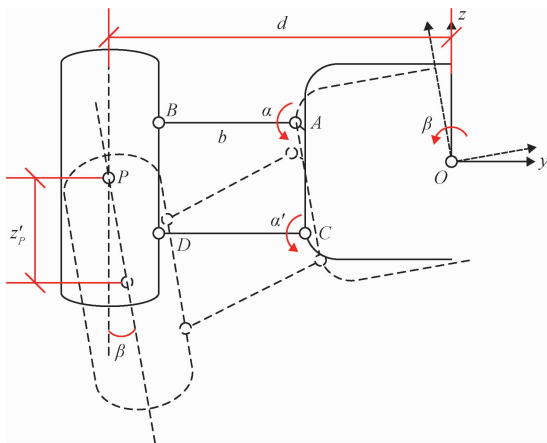


图7 车身扭转对车轮跳动的补偿

Fig.7 Compensation of vehicle body torsion for wheel runout

上述公式中包含了车身姿态角、扭转角、悬架旋转角3个部分对车轮跳动量的贡献。在满足式(2)的前提下,设计目标是使车身姿态的补偿量最小化。对于崎岖路面来说,悬架参数的调整范围是不够的,因此采用扭转车身来实现对车轮跳动量的较大补偿,这是扭转车身对车轮跳动的补偿机制。根据式(5)可知,扭转角度 10° 可以带来573 mm的车轮跳动增量,并结合悬架的动行程,基本上可以满足表1中崎岖月面的 3σ 跳动量的要求。

3 月面移动性能仿真分析

3.1 车身扭转对车轮跳动的补偿

为了对比扭转车身与非扭转车身的性能差异,首先建立LRV整车多体动力学模型,在该模型的基础上增加后底盘相对中底盘的扭转自由度,按表2设置仿真工况并对比两种模型的仿真结果。

1) 模型一:整体式LRV

LRV具体参数如表3所示,整车主要由底盘系统、移动系统、驾驶台等7个系统组成。底盘系统包括前底盘、中间底盘以及后底盘,而底盘通过移动系统与月壤接触,移动系统主体分车轮、悬架、转向等

表2 仿真对比工况表

Table 2 Simulation comparison working conditions

序号	工况	对比参数	目的
1	交叉正弦波路面	最高车速	对比最高车速
2	随机路面	车身偏航距离 车轮动载荷 RMS	对比稳定性/ 接地性
3	越障过坑	越障高度过坑宽度	对比通过性
4	单侧坡道行驶	循迹性指数	对比通过性

多个子系统。为对比描述方便这里定义阿波罗LRV为固定车身。

表3 LRV模型参数

Table 3 Model parameter of LRV

参数	数值
空车质量/kg	208
总质量/kg	688.1
轴距/mm	2 286
轮距/mm	1 828.8
轮径/mm	810
满载离地间隙/mm	356
巡航速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	10
长×宽×高	3.1 m×1.83 m×1.14 m

2) 模型二:扭转式LRV

由于驾驶员是参照前车身或前轮方向来判断车身航向的,扭转式月球车在LRV模型的基础上,释放了后底盘与中间底盘的中间交界处的转动自由度,旋转副限位角度为 $\pm 10^\circ$,其余与LRV模型一致,为对比描述方便这里定义扭转式LRV为扭转车身。

3.2 交叉正弦波路面

为了对比分析扭转式月球车与LRV在高密度连续陨石坑地形上行驶性能,本文选择存在相位差的正弦路面来模拟复杂的起伏月表,正弦路面的高度以平坦和崎岖月面纵向跳动差(如表1中的 σ , 2σ , 3σ)来设置,横向的高度差通过左右轮的正弦路面相位差来体现。根据文献[17]可知大多数陨石坑的深径比为0.1~0.16,根据陨石坑的深径比来设置正弦路面的波长,交叉正弦波路面如图8所示。

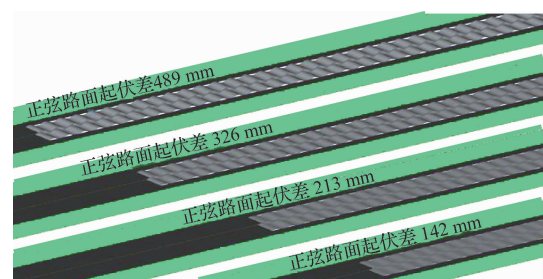


图8 交叉正弦波路面

Fig.8 Cross sine wave road surface

以任一车轮离地为判断标准,对比扭转与固定车身构型的最高车速,仿真结果见表4。

表 4 不同构型的最高车速
Table 4 Maximum vehicle speed for different configurations
单位: $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$

月面类型	月球车构型	路面波形幅值		
		σ	2σ	3σ
平坦月面	固定	22	13	4
	扭转	30	17	6
崎岖月面	固定	9	2	—
	扭转	13	6	2

由表 4 可以看出,扭转车身明显提高了交叉正弦波路面的最高车速,在崎岖月面情况下,扭转车身的优势特别明显。在 3σ 崎岖月面情况下类似地面车辆的交叉轴试验,固定车身已必有 1 个车轮离地,而扭转车身还能在车轮不离地的情况下以 2 km/h 的车速通过。

3.3 随机路面

利用分形随机算法,结合月面撞击坑和石块的数学分布统计模型^[19],实现了月球地表数字地形的生成。在此基础上,采用 Adams 软件中的 *.rdf 路面文件来建立月球表面地形模型,如图 9 所示。随后,对固定车身与扭转车身在随机路面上的移动性能进行了仿真比较。

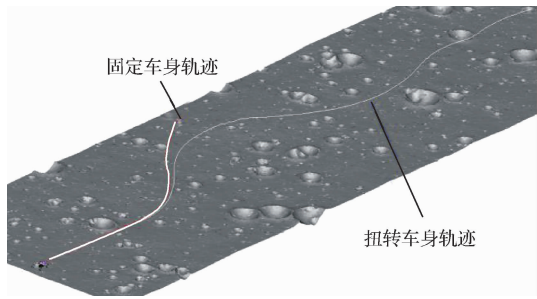


图 9 月面随机地形
Fig. 9 Random terrain on the lunar surface

图 9 显示,大范围移动时,在给定转向规律情况下,扭转车身的轨迹跟踪性比固定车身更好。进一步地,建立自动转向地形轨迹跟踪器^[20],使固定车身行驶轨迹与扭转车身基本一致,如表 5 所示,统计了 4 个车轮的动载荷均方根(RMS)值。结果表明,在图 9 的随机路面下,以 5 km/h 行驶 1 km 距离,扭转车身的车轮动载荷 RMS 值较小,车轮离地次数更少,这主要归因于扭转自由度改善了车轮的接地性能。对车轮的滑转率进行分析,发现车轮的滑转率得到改善,具体数值对比如表 6 所示,滑转率的改善

可以提高牵引效率,进而能提高经济性,降低规定行驶里程对电能的需求,降低电池重量。

表 5 平坦随机路面行驶 1 km 车轮动载荷 RMS
Table 5 RMS of wheel dynamic load for 1 km on

载荷方向	构型	random flat road surface				单位: N
		左前轮	右前轮	左后轮	右后轮	
垂向	固定	187.4	189.5	366.3	377.5	
	扭转	131.9	130.1	250.9	293.8	
切向	固定	37.5	37.9	73.2	75.5	
	扭转	26.5	25.9	50.1	58.9	
合力	固定	224.8	227.5	439.5	452.9	
	扭转	158.4	156.1	300.9	352.6	

表 6 平坦随机路面行驶 1 km 车轮滑转率 RMS
Table 6 RMS of wheel slippage rate for 1 km on

轮胎	random flat road surface			
	左前轮	右前轮	左后轮	右后轮
固定	4%	2.3%	3.7%	2.4%
扭转	3.7%	2%	3.6%	2.1%

根据图 10,在较平坦的月海区域以 5 km/h 匀速直线行驶 80 m 工况下,固定车身的侧向最大位移为 6.61 m,而扭转车身的侧向最大位移仅为 0.55 m,优化比例为 91.7%。在 10 km/h 匀速工况下,固定车身的侧向位移为 10.15 m,而扭转车身的侧向位移为 4.45 m,优化比例为 56.16%。月球车的直线行驶侧移量与操纵指向稳定性有关,是载荷均匀性的外在表现。侧移量越大指向稳定性越差,这给航天员增添了额外的操纵负担,容易感觉到疲劳、紧张,大大影响探测效率。

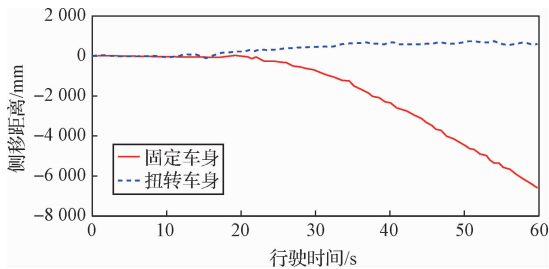


图 10 平坦随机路面的侧移距离
Fig. 10 Lateral travel distance on flat random road surface

3.4 越障、过坑

越障、过坑能力是载人月球车在复杂非结构路面上行驶通过性的重要指标。这些能力与滚动阻力系数、附着力系数、轮胎滚动半径紧密相关,并与车

身自由度有关。本研究旨在比较固定车身和扭转车身的越障、过坑能力。因此,在相同的月面路谱、滚动阻力系数、附着力系数和轮胎滚动半径的基础上,进行了最大越障高度、最大过坑宽度的对比仿真。此外,还比较了在相同障碍情况下的驱动力矩。障碍、坑壑参数如图 11 所示。

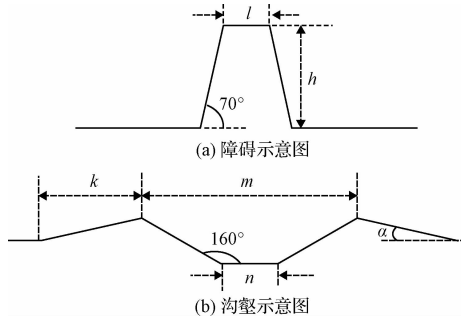


图 11 障碍与沟壑

Fig. 11 Obstacles and gullies

以 0.1 km/h 低速行驶,假设驱动力矩不受限制,对比了双人满载时两种车身构型的最大越障和过坑能力,结果见表 7。在固定车身情况下,当单边越过 570 mm 高度的障碍时,相应的后轮离地,车身只受单侧轮的驱动,因此会产生绕障碍轮中心的旋转运动,导致越障失败,质心水平二维运动轨迹如图 12 所示。而在扭转车身情况下,由于车身扭转会产生车轮的跳动补偿,从而可越过更高的障碍。

表 7 不同构型的最大越障、过坑能力对比

Table 7 Comparison of maximum capabilities for obstacle and pit crossing of different configurations

工况	固定	扭转
单边越障最大高度/mm	570	660
单边过坑最大直径/m	4.5	5.5

在单边过坑时,如果车轮单独进入坑内,固定车身的情况下,与坑内对角的的车轮会翘起而离地,在爬坑时容易导致车身绕坑内车轮中心做圆周运动。而在扭转车身的情况下,由于车身扭转会引起车轮的跳动补偿,扭转车身能够克服更深的坑洞,也就是说,车轮能够在更深的坑里行驶而不会离地,如图 13 所示。

在速度 0.5 km/h、越障高度为 250 mm、过坑宽度为 400 mm 的工况下,对两种车身构型的驱动力矩进行比较,结果如表 8 所示。在越障方面,两种构型的驱动力矩基本相同。但是在过坑方面,扭转车身的车轮载荷更为均匀,因此其过坑能力更强。

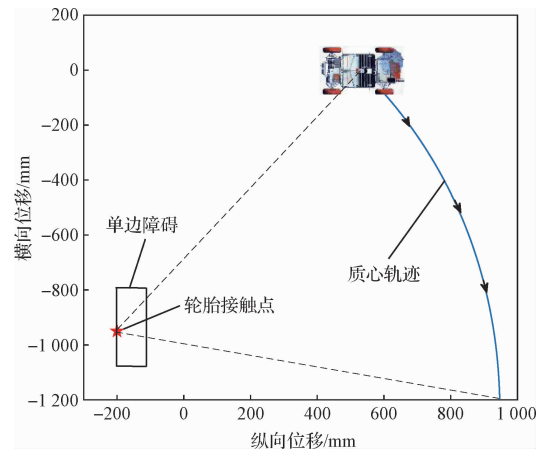


图 12 质心水平二维运动轨迹

Fig. 12 Horizontal two-dimensional motion path of the center of mass

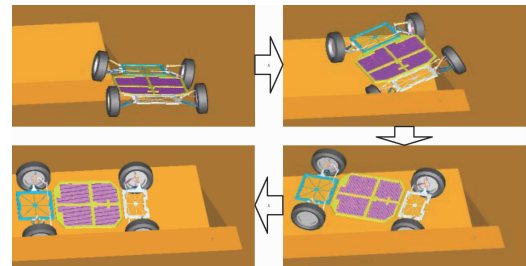


图 13 单边过坑示意图

Fig. 13 Diagram of crossing a pit on one side

表 8 越障过坑力矩数值

Table 8 Torque values for obstacle crossing and pit crossing

工况	构型	扭转力矩/(N·m)		固定力矩/(N·m)	
		前驱动	后驱动	前驱动	后驱动
越障	单边	55	89	57	89
	双边	50	131	50	131
过坑	单边	30	44	34	57
	双边	33	87	35	87

3.5 单侧坡道行驶

坡道行驶指数(Ramp travel index, RTI) 又称循迹性指数,是考察越野车通过能力的一项重要指标,指越野车辆单侧轮驶上 20°斜坡,直至任一车轮离地,车辆行驶距离除以轴距再乘以 1 000 可以得到具体量化数值,指数数值越大表明通过性越好,具体参数如图 14 所示。

本文将固定车身和扭转车身进行 20°坡道行驶对比,从表 9 中可以看出扭转车身的坡道行驶指数远大于固定车身,这说明扭转车身的转动延长了悬挂的行程,保证轮胎最大程度的接触到地面,明显提

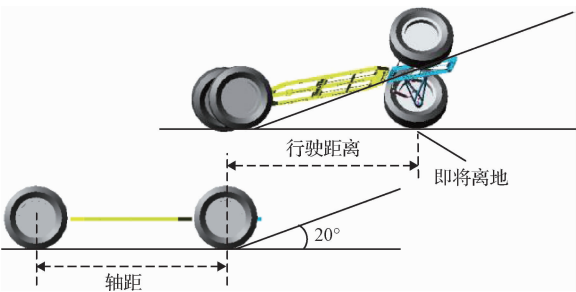


图 14 RTI 具体参数示意图
Fig. 14 Schematic diagram of RTI parameters

高月球车的循迹性。

表 9 坡道行驶指数
Table 9 Ramp travel index

	扭转车身	固定车身
坡道行驶指数 (RTI)	1 837.3	920.3

4 结 论

本文首先提出了月面路谱对车身纵向、横向以及对角车轮跳动差的概念,这是根据阿波罗文献中的资料得出的。针对 LRV 悬架行程不满足崎岖月面跳动差需求的问题,提出了一种车身可扭转的载人月球车构型,并对比研究了两种载人车在不同路面条件下的高速移动能力、车轮动载荷波动情况、低速越障过坑能力以及单侧爬坡行驶性能。

研究表明:相对于固定车身的载人月球车,扭转式车身在交叉正弦路面下具有更高的行驶速度,在随机路面同等行驶速度下具有更高的平顺性,在低速越障、过坑时能力更强,单侧爬坡指数测量下具有更高的循迹能力;在相同的越障过坑情况下,两者力矩基本一致。综上所述,该扭转式载人月球车是一种更优的选择,可提高载人车在崎岖月面上的高速移动和通过性能力。

致 谢

感谢航天科技集团公司空间结构机构技术国防重点实验室对本文研究的大力支持。

参 考 文 献

[1] 张崇峰,许惟扬,王燕. 载人月球探测月面活动发展设想[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(3): 109 – 118.
ZHANG Chongfeng, XU Weiyang, WANG Yan. Development ideas of manned lunar surface exploration [J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(3): 109 – 118.

[2] 邓宗全,范雪兵,高海波,等. 载人月球车移动系统综述及关

键技术分析[J]. 宇航学报, 2012, 33(6): 675 – 689.

DENG Zongquan, FAN Xuebing, GAO Haibo, et al. Review and key techniques for locomotive system of manned lunar rovers [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(6): 675 – 689.

[3] ZAKRAJSEK J, MCKISSOCK D, WOYTACH J, et al. Exploration rover concepts and development challenges [C]. The 1 st Space Exploration Conference: Continuing the Voyage of Discovery, Orlando, USA, January 30 – February 1, 2005.

[4] 范雪兵,高海波,丁亮. 载人月球车概念设计[C]. 中国宇航学会深空探测技术专业委员会第七届学术年会, 哈尔滨, 2010 年 8 月 14 日.

FAN Xuebing, GAO Haibo, DING Liang. Conceptual design of manned lunar rover [C]. The 7th Annual Conference of Deep Space Exploration Technical Committee of Chinese Society of Astronautics, Harbin, August 14, 2010.

[5] BURKHALTER B B, SHARPE M R. Lunar roving vehicle: historical origins, development and depolyment [J]. Aas History, 1998, 22: 227 – 261.

[6] JOHNSON K A. High-speed dynamic response for lunar rovers [C]. The 17th Biennial International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, Seattle, USA, April 19 – 23, 2021.

[7] CONNORS M M, EPPLER D B, MORROW D G. Interviews with the Apollo lunar surface astronauts in support of planning for EVA systems design [R]. Mountain View, USA: Ames Research Center, 1994.

[8] GENTA G. Design of planetary exploration vehicles [C]. ASME the 8th Biennial Bonference on Engineering Systems Design & Analysis, Torino, Italy, July 4 – 7, 2006.

[9] 江磊,齐迎春,邓秦丹,等. 轮履复合式载人月球车移动性能仿真分析[J]. 车辆与动力技术, 2020(3): 1 – 6, 48.
JIANG Lei, QI Yingchun, DENG Qindan, et al. Simulation and analysis of the moving performance of the wheel-track combined manned lunar rover [J]. Vehicle & Power Technology, 2020 (3): 1 – 6, 48.

[10] 王婷,王振军. 基于鸟巢结构的载人月球车车轮设计与性能分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(12): 71 – 76.
WANG Ting, WANG Zhenjun. Design and performance analysis of manned lunar rover wheels based on bird's nest structure [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021, 59(12): 71 – 76.

[11] BLUETHMANN B, HERRERA E, HULSE A, et al. An active suspension system for lunar crew mobility [C]. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, March 6 – 13, 2010.

[12] HARRISON D A, AMBROSE R, BLUETHMANN B, et al. Next generation rover for lunar exploration [C]. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, March 1 – 8, 2008.

[13] 曲学春,姚丁元,张云. 国外履带式全地形车发展现状[J]. 国外坦克, 2014(3): 32 – 39.
QU Xuechun, YAO Dingyuan, ZHANG Yun. Development status of tracked all-terrain vehicles abroad [J]. Foreign Tank,

- 2014(3): 32–39.
- [14] 张杰山,王点,董磊. 铰接式自卸车的历史与演变[J]. 矿业装备, 2016(9): 26–29.
ZHANG Jieshan, WANG Dian, DONG Lei. History and evolution of articulated dump truck [J]. Mining Equipment, 2016(9): 26–29.
- [15] 孙文,李晨阳,王军年,等. 越野车复合型悬架平顺性的研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(1): 105–114, 122.
SUN Wen, LI Chenyang, WANG Junnian, et al. Research on ride comfort of an off-road vehicle with compound suspension [J]. Automotive Engineering, 2022, 44(1): 105–114, 122.
- [16] MOORE H, PIKE R, ULRICH G. Lunar terrain and traverse data for lunar roving vehicle design study[R]. Washington, D. C., USA: National Aeronautics and Space Administration, 1969.
- [17] 阳梅萍,岳宗玉,邸凯昌,等. 基于全景相机数据的嫦娥四号着陆区次级坑统计分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(3): 720–729.
YANG Meiping, YUE Zongyu, DI Kaichang, et al. Statistical analysis of secondary craters in the Chang'e-4 landing area based on panoramic camera data[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2021, 40(3): 720–729.
- [18] 周迅,岳艳艳,李勇. 拖拉机悬浮式前驱动桥的应用研究[J]. 拖拉机与农用运输车, 2011, 38(2): 13–16.
ZHOU Xun, YUE Yanyan, LI Yong. Application research of tractor suspended front axle [J]. Tractor & Farm Transporter, 2011, 38(2): 13–16.
- [19] 邵斌澄,缪天缘,周永辉,等. 一种面向4 WID-4 WIS载人月球车的控制系统[J]. 载人航天, 2021, 27(3): 350–358.
SHAO Bincheng, MIAO Tianyuan, ZHOU Yonghui, et al. A control system for 4 WID-4 WIS manned lunar rover[J]. Manned Spaceflight, 2021, 27(3): 350–358.
- [20] 李琳辉,郭景华,张明恒,等. 越野智能车转向及驱动协调控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(1): 89–94.
LI Linhui, GUO Jinghua, ZHANG Mingheng, et al. Coordinated control of steering and driving in off-road intelligent vehicle[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(1): 89–94.

作者简介:

马龙宇(1995-),男,工程师,主要从事多体系统动力学与控制、星球车移动系统仿真等方面的研究。

通信地址:上海市闵行区元江路3888号上海宇航系统工程研究所

电话:18916320030

E-mail: malongyv2022@qq.com

张崇峰(1968-),男,博士,研究员,主要从事航天器对接技术、航天器机构设计、载人航天器总体设计等方面的研究。

通信地址:上海市闵行区元江路3888号上海宇航系统工程研究所

电话:13916314429

E-mail: zhcf008@139.com

时军委(1976-),男,研究员,主要从事空间展开机构、对接机构、操控机构以及移动机器人动力学与控制等方面的研究。本文通信作者。

通信地址:上海市闵行区元江路3888号上海宇航系统工程研究所

电话:13816324875

E-mail: shijunwei805@qq.com