

月面松软地质环境下足式机器人足-壤滑移性能

钟世英^{1,2}, 岳茜茜^{1,2}, 凌道盛³, 周浩⁴, 韩润奇⁴, 丛波日⁵

(1. 山东建筑大学 土木工程学院, 济南 250101; 2. 建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 济南 250101;

3. 浙江大学 岩土工程研究所, 杭州 310058; 4. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094;

5. 山东高速集团有限公司创新研究院, 济南 250100)

摘要: 移动机器人作为月球探索的重要方式, 足端力是步态控制的重要参量。为研究足端花纹式设计在松散月壤环境中足-壤相互作用对足端抗滑移性能的影响, 分别对三角形、圆弧形和矩形3种足端花纹构型进行防滑性能研究。通过数值仿真研究了在相同竖向载荷界面对不同花纹构型的抗滑移性能, 并利用等效原则得到了各花纹构型抗滑移参数。结果表明, 足端花纹未完全刺入月壤前, 相同竖向载荷作用下圆弧形花纹的沉陷量最小, 矩形花纹次之, 三角形花纹沉陷量最大; 同时, 圆弧形花纹滑移量、应力峰值也最小; 足-壤接触面抗滑移模型在相同沉陷量时矩形花纹等效抗剪强度最大其等效摩擦角 33.44° 、黏聚力 2.58 kPa , 圆弧形花纹最小其等效摩擦角 30.16° 、黏聚力 2.48 kPa 。

关键词: 足式机器人; 足-壤间滑移性能; 摩擦角; 黏聚力; 有限元分析

中图分类号: TP242; TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)02-0190-09

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220036

引用格式: 钟世英, 岳茜茜, 凌道盛, 等. 月面松软地质环境下足式机器人足-壤滑移性能[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(2): 190-198.

Reference format: ZHONG S Y, YUE Q Q, LING D S, et al. Foot-soil slipping performance of footed robot in soft geology on lunar surface[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(2): 190-198.

引言

月球科研站是航天空间的战略部署^[1], 对长期开发利用月球资源、推动国家科技发展、实现科学突破具有重要的价值。月貌地质环境复杂, 在松散月壤条件下^[2], 月面降落装备的安全运移是月面探索首先需要解决的问题。足式机器人具有负载能力强、环境适应好等优势, 可提供良好的载荷运移能力^[3]。

足-壤相互作用是足式机器人足端抗滑移性能研究的关键, 目前主要集中在足-壤相互作用的力学模型、足端花纹设计、抗滑特性几个方面。文献[4]设计了有刺轮、无刺轮2种腿足部构型, 分析了月球车无刺轮刺足瓣与月壤的相互作用力特性, 建立了月球车有刺轮刺足瓣与月壤的相互作用模型, 并分析了足部构型参数对月球车驱动性能的影响。文献[5]以土壤承压、剪切特性及土力学被动土压力理论为基础, 建立了月球车刚性车轮在松软月壤前进和转向的轮地作用力模型, 分析了月壤参数及车轮运动滑转率变化对挂钩牵引力、驱动力矩和转向力矩的影响。文献[6]基于应用车辆地面力学理论, 建立了刚性车轮与松软月壤交互

的动力学模型, 研究了滑转率对月球车车轮挂钩牵引力、驱动效率及功率消耗的影响。文献[7]基于ABAQUS有限元软件进行数值模拟, 以足底水平方向所受的反作用力与垂直载荷之比为足底附着性能优化目标, 对足底结构优化设计, 得到了最优足底花纹倾角、高度和宽度。文献[8]针对不同恶劣路况行走情形, 设计出一种高适应足部, 并对3种不同足底花纹进行最优设计以适应崎岖不平的复杂路况。文献[9]对足式机器人足底与月面作用过程进行仿真, 基于Mohr-Coulomb建立了足底与月面相互作用的仿真模型, 并给出了足底附着性能评价指标附着系数 μ , 进行花纹优化设计。文献[10]针对轮式移动机器人纵向打滑, 状态滑动参数未知的轨迹跟踪控制问题, 建立了纵向打滑状态移动机器人的运动学模型。文献[11]针对6足机器人打滑问题, 对足端与月面相互作用进行力学分析, 并分析了影响6足机器人行走打滑的相关因素。现有文献表明轮式探测机器人避障和越障能力仍存在问题, 在地形较为复杂的松软地质环境下, 足式机器人相对于轮式机器人能适应复杂地形并能规避风险。以足式机器人为代表的

收稿日期: 2022-04-30 修回日期: 2022-07-11

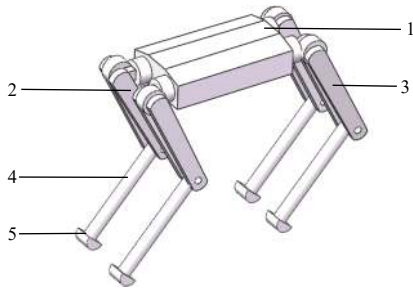
基金项目: 山东省自然科学基金(ZR202103070255)

足-壤接触模型与足-壤接触面处滑移性能等方面还有待深入研究。

本文开展了足式机器人足-壤接触面抗滑移性能研究, 设计了圆弧形、矩形和三角形3种花纹构型。采用有限元软件ABAQUS建立了各花纹构型足-壤抗滑移数值仿真模型, 分析了花纹构型与月壤接触面处的运动特性, 探讨了竖向载荷对足-壤抗滑移力学性能的影响, 并应用等效原理获得了各花纹构型足端等效摩擦角和黏聚力。

1 足式机器人足端设计

美国波士顿动力公司研制的Big Dog足式机器人机构如图1所示, 由机身和4个相同的腿部机构组成, 机身主要起联接、支承腿部机构的作用。其中机身与腿部机构之间通过髌关节连接并可自由旋转, 腿部机构包括大腿、小腿和足端, 大腿和小腿之间通过膝关节可以旋转、回转和伸缩。足端为半圆柱形足端, 是本文防滑优化设计的对象。



注: 1—机身; 2—髌关节; 3—大腿; 4—小腿; 5—足端。

图1 四足机器人整体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of overall structure of four-legged robot

足端花纹设计对机器人的爬行能力, 特别是抗滑特性具有重要影响。考虑抗滑移特性在复杂环境中的不同变化, 在半圆柱形足端设计3种类型防滑花纹: 三角形、圆弧形和矩形。

2 足-壤相互作用力模型

为揭示行走过程中足端与土壤相互作用的力学机制, 借鉴汽车地面力模型, 对机器人行走过程展开分析: 首先机器人足端触月与月壤表面接触, 然后足端下陷与月壤充分接触, 此时足端与月壤存在一定的接触面积, 随后发生小角度转动, 产生向前的剪切力^[1], 如图2所示, α 为转动角, τ 为向前的剪切力。

建立足-壤相互作用模型, 如图3所示, W 为机器人上部施加给足端的竖向载荷; T 为驱动器施加在足端的扭矩; F_V 为牵引力; F_n 为足端支撑力; F_τ 为足端剪切力; F_{DP} 为前进阻力; σ 为接触面的正应力; τ 为接

触面的剪应力; α_1 为进入角; α_2 为离去角; α_m 为最大应力角。

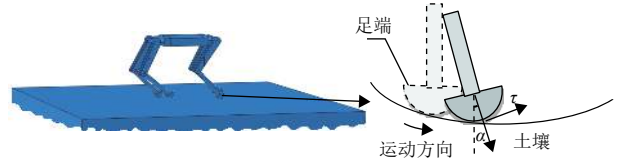
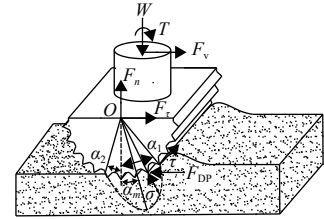
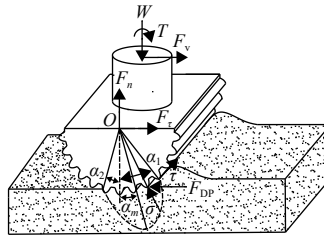


图2 足式机器人足端滑移过程示意图

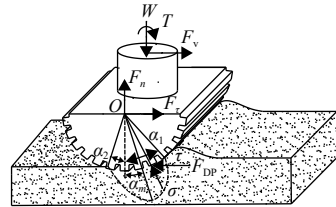
Fig. 2 Schematic diagram of slip process of foot end of foot robot



(a) 三角形花纹



(b) 圆弧形花纹



(c) 矩形花纹

图3 足-壤相互作用模型

Fig. 3 Foot-soil interaction model

当足端所受的垂直方向载荷一定时, 可将足壤转换成轮壤的相互作用^[11]。由于足端相邻花纹之间空间较小, 可完全被月壤填充, 以此形成连续的剪切作用, 可参照成熟的汽车地面力学理论计算模型^[4]。运用地面力学模型积分分析足端与月面的相互作用, 建立足端支撑力 F_n 与剪切力 F_τ 的表达式^[11]为

$$\begin{cases} F_n = -br \left[\left(\frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_m}{\alpha_1 - \alpha_m} + \frac{1 - \cos \alpha_m}{\alpha_m} \right) \sigma_m + \left(\frac{\sin \alpha_1 - \sin \alpha_m}{\alpha_1 - \alpha_m} - \frac{\sin \alpha_m}{\alpha_m} \right) \tau_m \right] \\ F_\tau = br \left[\left(\frac{\cos \alpha_m - \cos \alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_m} + \frac{\cos \alpha_m - 1}{\alpha_m} \right) \tau_m + \left(\frac{\sin \alpha_m - \sin \alpha_1}{\alpha_m - \alpha_1} - \frac{\sin \alpha_m}{\alpha_m} \right) \sigma_m \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中

$$\sigma_m = \left(\frac{k_c}{b} + k_\varphi \right) z^s \quad (2)$$

$$\tau_m = (c + \sigma_m \tan \varphi) \left(1 - e^{-\frac{m}{q}} \right) \quad (3)$$

其中: b 为足端与月面的接触宽度; r 为圆柱足端半径; k_c 为月壤的内聚变形系数; k_φ 为月面的摩擦变形系数; Z 为足端沉陷量; s 为沉陷指数; c 为月壤内部黏聚力; φ 为月壤内部内摩擦角; m 为月面的剪切形变量; q 为剪切变形的水平切线模量; σ_m 为接触面的法向应力; τ_m 为最大剪应力, 即抗剪强度。

3 有限元建模

在机器人运动仿真中, 以足端受力和运动为主, 可简化足端受力模型。本文运用有限元软件ABAQUS分别建立三角形花纹、圆弧形花纹和矩形花纹足端模型进行足-壤抗滑移性能分析。

3.1 材料参数

足端采用大刚度钛合金材料, 弹性模量 1.078×10^5 MPa, 密度 4.5 g/cm^3 , 土壤参数^[12]如表1所示。

表1 土壤参数
Table 1 Soil parameters

参数类型	土壤参数
杨氏模量/MPa	48.8
泊松比	0.3
内摩擦角/(°)	42.97
膨胀角/(°)	5
黏聚力/kPa	1.79
压缩系数	0.19
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1660

3.2 模型建立与网格划分

机器人网格划分为C3D8R(八结点线性六面体单元、减缩积分、沙漏控制), 足端模型为半径 $r = 0.074 \text{ m}$, 高 $h = 0.12 \text{ m}$ 的半圆柱, 3类花纹的凸起高度均为 0.004 m , 考虑冲击过程中足端相对于月壤为刚体, 较大的网格单元有利于提高计算效率, 可将三角形花纹足端网格单元设定为 30 mm , 圆弧形花纹的足端网格单元设定为 15 mm , 矩形花纹的足端网格单元设定为 30 mm 。

松软月壤网格类型为C3D8R(八结点线性六面体单元、减缩积分、沙漏控制) $L = 0.6 \text{ m}$ 的立方体, 网格单元为 60 mm , 为计算精确, 月壤模型中间进行局部加密, 加密区域 $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ 的立方体, 网格单元 10 mm , 如图4所示。

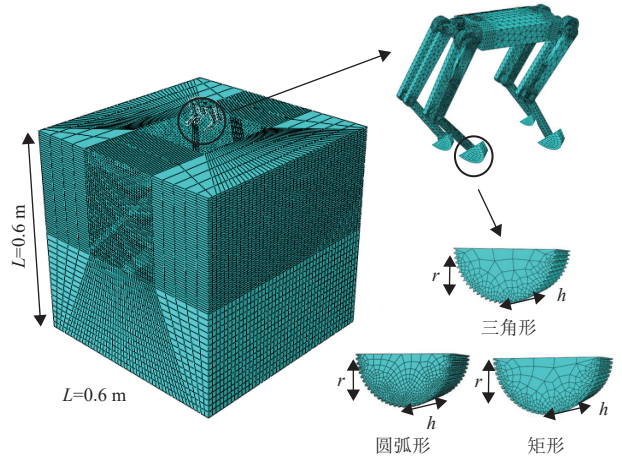


图4 有限元模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of finite element model

3.3 界面关系及边界设置

足-壤接触面参数参考文献[13]获得足-壤界面摩擦系数 μ_i 为 $0.58 \sim 0.64$, 本文足端材料为硬度较大的钛合金, 足端相对于松软月壤呈现刚性, 运动过程不考虑足端的变形^[11]。假定界面满足理想弹塑性屈服准则, μ_i 取为 0.60 。在月壤底面施加完全约束, 4个侧面施加 X 和 Z 向约束。

3.4 仿真过程与工况参数

为研究足端花纹抗滑移特性, 在竖向载荷作用下足端相对月壤产生水平向运动(水平速度 0.5 m/s), 仿真分析工况参数如表2所示。

表2 仿真分析工况参数

Table 2 Simulation analysis of operating parameters

花纹类型	荷载/kPa	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
三角形花纹	50	0.5
三角形花纹	100	0.5
三角形花纹	200	0.5
圆弧形花纹	50	0.5
圆弧形花纹	100	0.5
圆弧形花纹	200	0.5
矩形花纹	50	0.5
矩形花纹	100	0.5
矩形花纹	200	0.5

4 数值仿真结果

4.1 滑移受力性能分析

足-壤相互作用滑移量主要通过月壤剪切变形来指征。本文提取足-壤接触界面接触处3点(见图5)的均值, 得到足-壤界面的剪切应力 τ 与水平滑移量 δ 曲线 (τ - δ 曲线) 如图6所示。随着滑移量的增加, 具有明显

的峰值现象, 峰后剪切应力随滑移量的增加而降低, 最终趋于平稳。基于此可将应力-滑移 (τ - δ) 曲线划分为3个阶段, 即: 上升阶段、衰减阶段、平稳阶段。

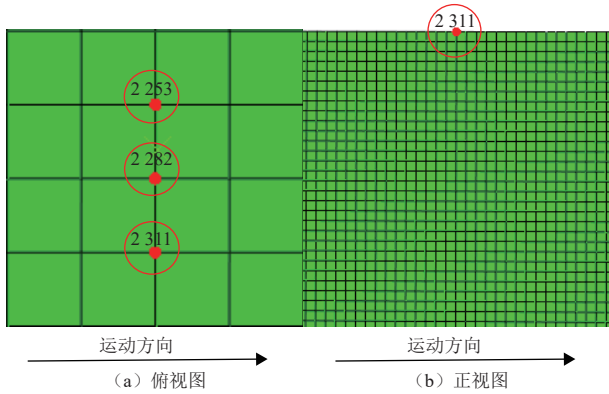


图 5 节点编号
Fig. 5 Node number

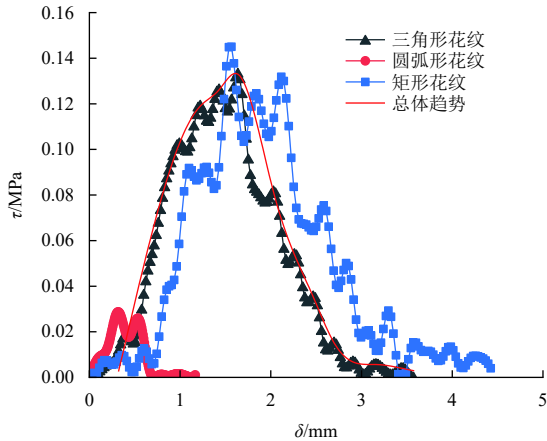


图 6 不同花纹应力-滑移 (τ - δ) 曲线
Fig. 6 Stress-slip (τ - δ) curves of different patterns

各阶段变化特征: ①上升阶段: 加载时期, 足-壤接触界面剪切应力与月壤滑移量呈非线性增长, 足-壤界面剪切强度逐渐达到峰值, 月壤的抗剪强度逐渐发挥出来, 该阶段施加的外力主要克服静摩擦力, 此时足端花纹和月壤之间的剪切应力逐渐发挥主导作用; ②衰减阶段: 水平速度作用时期, 足-壤接触面剪切应力达到峰值后, 随着滑移量的增大, 足-壤间剪切应力逐渐下降, 月壤的摩擦力和土粒的联结力主要提供剪切强度; ③平稳阶段: 经过大幅度剪切应力减退, 在滑移量达到一定程度后, 随着滑移量增加, 足-壤界面剪切应力基本保持恒定, 即月壤的摩擦力和土粒的联结力仍能提供微弱的抗剪强度。

当竖向载荷为 50 kPa 时, 三角形花纹的水平滑移量达到 3.5 mm, 应力峰值 0.13 MPa; 矩形花纹的水平滑移量达到了 4.5 mm, 应力可达 0.14 MPa; 圆弧形花纹的水平滑移量在 1.2 mm 左右, 应力可达 0.03 MPa。

需要对相同工况下 3 种花纹的情况进行说明, 圆弧形花纹存在较小的滑移量与应力。因为圆弧形花纹比其它 2 种花纹更加圆滑, 导致圆弧形花纹在刺入月壤时相对缓慢, 此时滑移过程中足端花纹与月壤的相互作用的花纹数较少, 应力和滑移量不如另 2 种花纹明显。

对三角形和矩形花纹而言, 在较小滑移量下, 矩形花纹比三角形花纹的剪切应力小; 当滑移量逐渐增大时, 矩形花纹比三角形花纹的剪切应力大。这表明在较小滑移时矩形花纹存在优势, 而在较大滑移时三角形花纹优势比矩形花纹明显。

4.2 竖向载荷对滑移性能的影响性

为研究竖向载荷 W 对各花纹滑移性能的影响, 分别选取 50、100、200 kPa 的竖向载荷, 不同竖向载荷的载荷-沉陷量 (W - Z) 曲线和应力-滑移 (τ - δ) 曲线如图 7~8 所示。

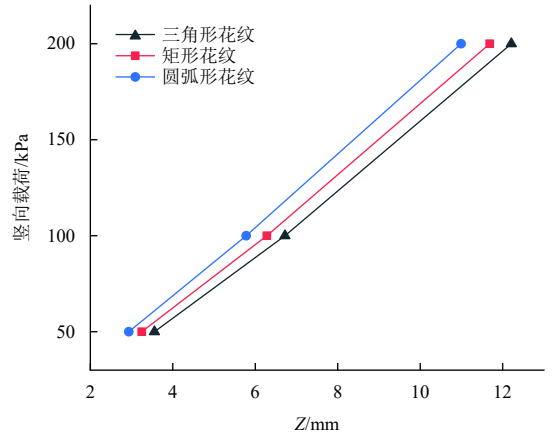
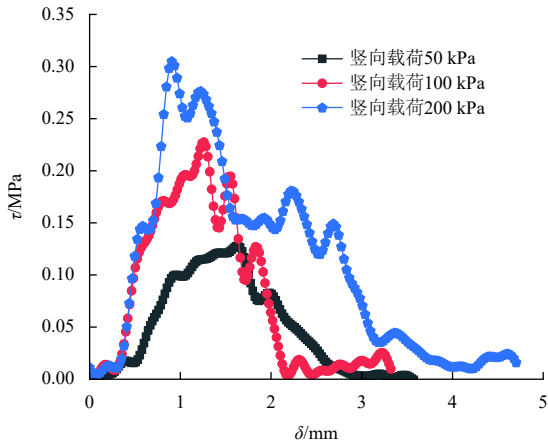


图 7 不同花纹载荷-沉陷量 (W - Z) 曲线
Fig. 7 Load-sinking (W - Z) curves of different patterns

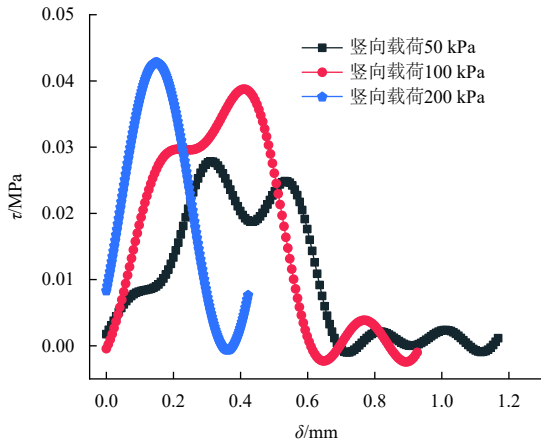
1) 随着竖向载荷 W 增大, 剪切应力峰值逐渐增大。当竖向载荷 W 较小时 (50 kPa), 三角形花纹、矩形花纹及圆弧形花纹的沉陷量分别为 3.554、3.247 及 2.934 mm, 均小于花纹高度 4 mm, 此时足端处花纹未完全刺入月壤, 足端底面和侧面花纹均与月壤发生相互作用; 随着竖向载荷 W 的增大, 沉陷量 Z 增大, 足端与月面的接触宽度 b 增大, 由式 (1) 可知足端支撑力 F_n 增强, 由式 (3) 可知足-壤界面间的剪切应力也随之增大。由图 8 可知, 竖向载荷 W 对足-壤接触面的剪切应力产生显著的影响, 但对滑移量影响不明显。

2) 剪应力峰值越大, 足端花纹刺入土壤深度越深, 与月壤作用花纹数越多, 足-壤相互作用越充分。

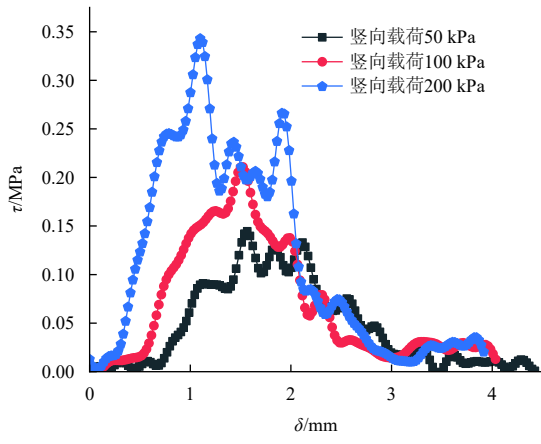
3) 三角形花纹的应力峰值对应的滑移量在 1~2 mm, 圆弧形花纹的应力峰值对应的滑移量在 0.2~0.6 mm, 矩形花纹应力峰值对应的滑移量在 1.2~2.2 mm。可见圆弧形花纹的滑移量明显低于其它 2 种花纹。



(a) 三角形花纹水平速度0.5 m/s



(b) 圆弧形花纹水平速度0.5 m/s



(c) 矩形花纹水平速度0.5 m/s

图8 不同花纹在不同竖向荷载下的应力-滑移(τ-δ)曲线
Fig. 8 Stress-slip (τ-δ) curves of different patterns under different vertical loads

4.3 简化竖向载荷的等效抗滑模型

为研究足式机器人行进过程中足-壤的相互作用, 建立简化的花纹-月壤物理力学计算模型, 3种花纹构型等效模型及简化后的无花纹半圆柱足端得到等效抗滑模型如图9所示。由于3种花纹的沉陷量不同, 则后续的等效摩擦角和黏聚力各不相同。

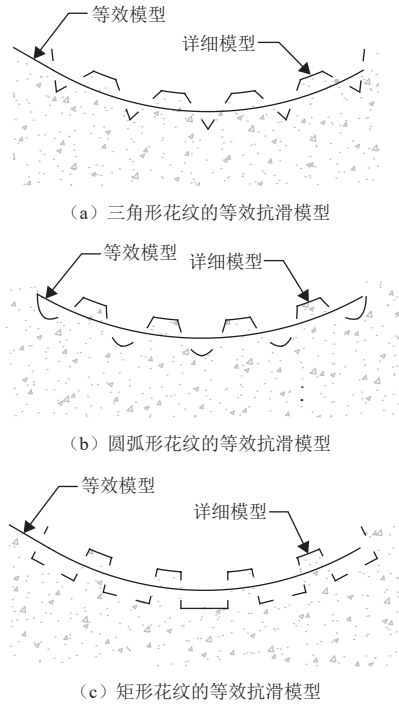


图9 等效抗滑模型
Fig. 9 Equivalent anti-slip model

为得到足-壤界面等效摩擦角和黏聚力, 首先获得足-壤间的摩擦角和黏聚力分布, 假定足-壤抗滑模型符合库伦定律^[14], 此时

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \tag{4}$$

其中: τ为抗剪强度; c为土的黏聚力; σ为法向压应力; φ为土的摩擦角。

其次分别对3种花纹进行不同竖向载荷剪切力学的仿真分析, 通过应力-滑移(τ-δ)曲线得到最大剪切应力, 即抗剪强度τ_m, 绘制如图10所示的抗剪强度与竖向载荷之间的关系。其中, 横轴和纵轴之间的夹角为摩擦角φ, 纵轴上的截距为黏聚力为c。

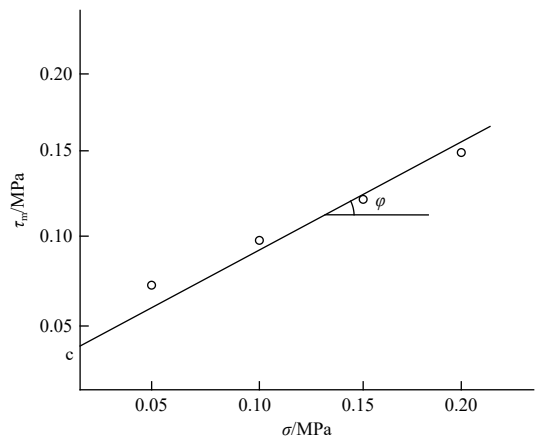
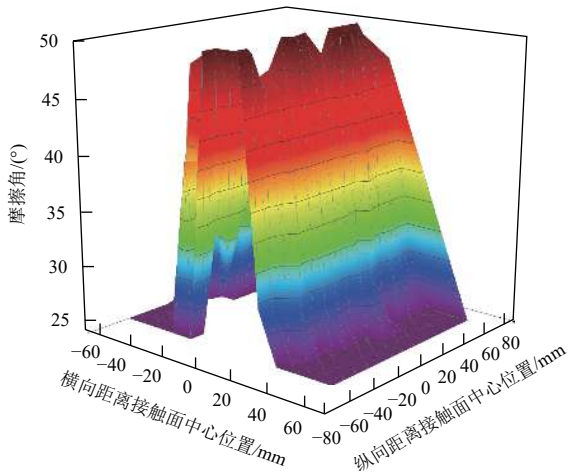


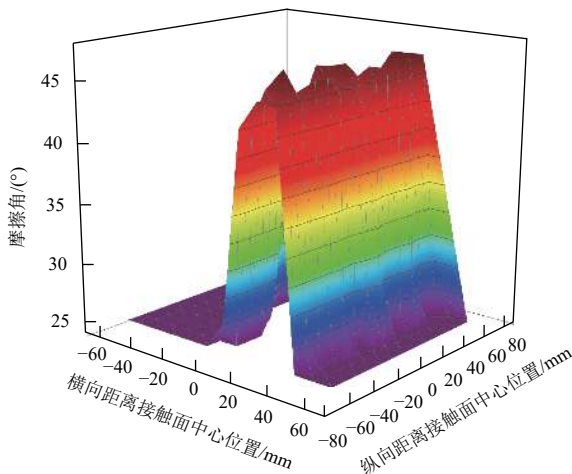
图10 应力-载荷(τ_m-σ)关系曲线
Fig. 10 Stress-load (τ_m-σ) relationship curve

4.3.1 足-壤相互作用等效摩擦角

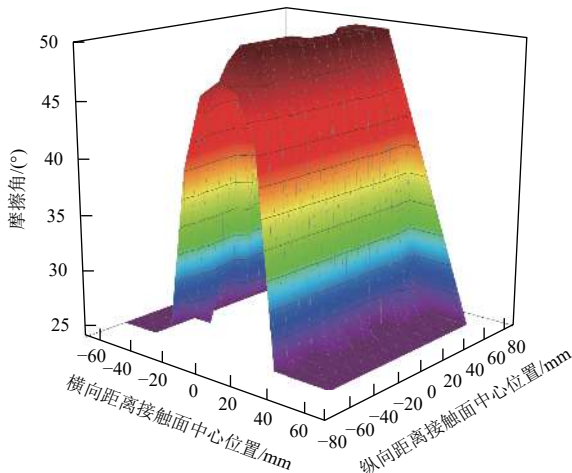
接触界面摩擦角分布如图11所示, 对摩擦角常值函数拟合如表3所示, 得到各类型花纹的等效摩擦角。



(a) 三角形花纹足-壤间摩擦角分布



(b) 圆弧形花纹足-壤间摩擦角分布



(c) 矩形花纹足-壤间摩擦角分布

图 11 各花纹足-壤接触面摩擦角分布

Fig. 11 Distribution of friction angle in foot-soil contact surface of each pattern

表 3 摩擦角和黏聚力汇总表

Table 3 Friction angle and cohesion summary table

等效值花纹类型	三角形花纹	圆弧形花纹	矩形花纹
$\varphi / (^\circ)$	32.85	30.16	33.44
c / kPa	2.49	2.48	2.58

从图11 (a) 可以看出, 三角形花纹的摩擦角分布呈“倒V”形, 其中, 花纹底端中心附近区域摩擦角较大, 离足端底部区域越远, 摩擦角越小。图11 (b) 为圆弧形花纹的摩擦角分布, 与三角形花纹相似, 大致呈现“倒V”形, 靠近花纹底端中心线处摩擦角最大, 并且逐渐向两侧减弱。图11 (c) 为矩形花纹接触面摩擦角的分布状况, 矩形花纹摩擦角的分布趋势与另2种花纹趋势相似, 呈“倒V”形分布, 足端底面中心处的摩擦角最大, 并且摩擦角沿足端边缘递减。这表明足端底面花纹为主要作用区域, 此时足端底面区域处花纹与土壤最先接触发生作用, 导致土壤接触面剪阻力发挥作用, 使得接触面处摩擦作用增大。

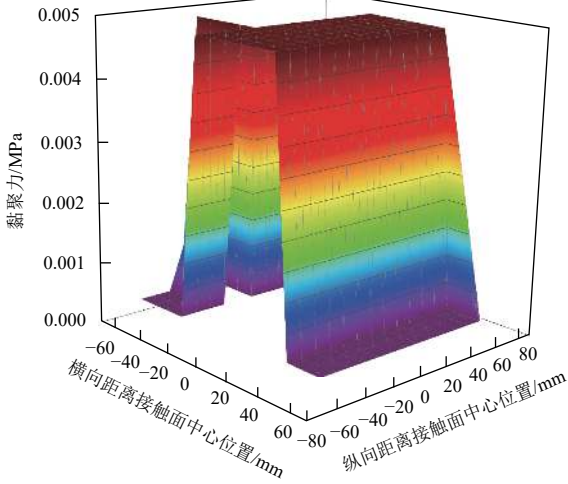
在剪切滑移过程中, 不同花纹的等效摩擦角不同, 这是由花纹的结构差异造成的。摩擦角拟合得到的各花纹等效摩擦角和黏聚力如表3所示。三角形花纹的等效摩擦角 32.85° , 圆弧形花纹等效摩擦角 30.16° , 矩形花纹等效摩擦角 33.44° 。这与文献[15]的金属-土壤摩擦角一般明显小于土壤的内摩擦角的结论一致。

足端为矩形花纹时, 等效摩擦角最大, 因为足-壤发生滑移时矩形花纹的抗剪强度最大; 圆弧形花纹等效摩擦角最小, 这是由圆弧形花纹的抗剪强度最小导致的。各类花纹等效摩擦角的不同是因为在竖向载荷作用下, 3类花纹刺入月壤的深度各不相同, 而行走过程主要靠足端底面或侧面花纹阻滑。各花纹沉陷深度不同, 等效摩擦角不同。

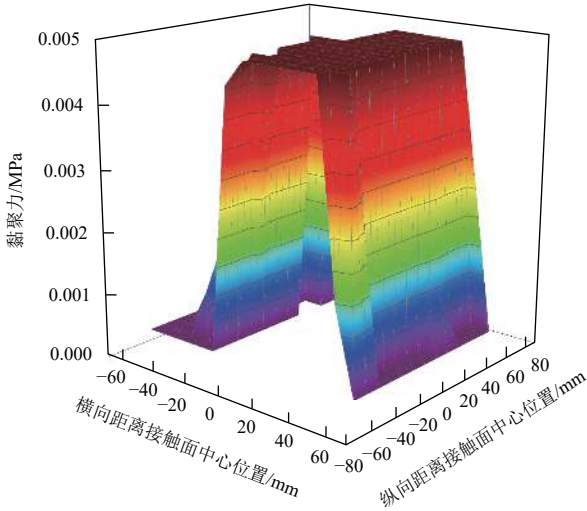
4.3.2 足-壤相互作用等效黏聚力

为得到足-壤间相互作用等效黏聚力, 首先获得足-壤接触界面的黏聚力分布, 如图12所示, 然后通过足-壤接触面的黏聚力进行常值函数拟合, 结果如表3所示, 最终得到各类型花纹的等效黏聚力。足-壤接触面的黏聚力分布如图12所示。图12 (a) 可知, 三角形花纹与月壤接触中心位置线附近区域黏聚力较大, 从整体来看, 黏聚力趋势可为中心位置向两侧边缘递减。图12 (b) 为圆弧形花纹下的黏聚力分布, 黏聚力分布趋势与三角形花纹相似, 接触面中心处黏聚力最大, 且两侧区域对称减小。图12 (c) 为矩形花纹黏聚力分布, 其变化规律与另2种花纹大致相同, 其黏聚力最大处为接触面中心区域, 并且两侧边缘处黏聚力逐

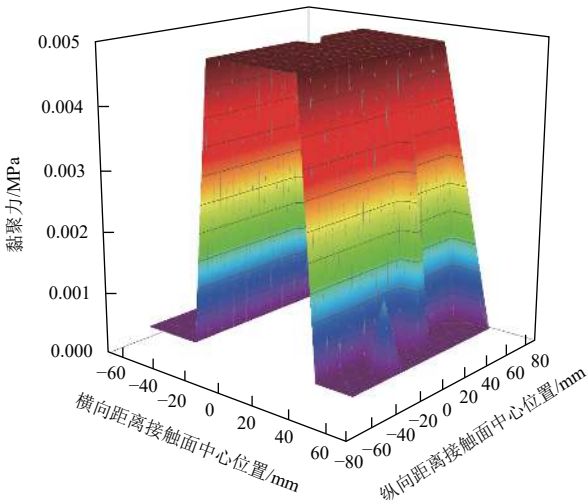
渐减小。由图12 (a) ~ (c) 可知, 3类花纹的黏聚力分布规律大同小异, 大致的趋势是中间大两端小。



(a) 三角形花纹足-壤间黏聚力分布



(b) 圆弧形花纹足-壤间黏聚力分布



(c) 矩形花纹足-壤间黏聚力分布

图 12 各花纹足-壤接触面黏聚力分布

Fig. 12 Cohesion distribution of foot-soil contact surface of each pattern

由表3可知, 三角形花纹的等效黏聚力2.49 kPa, 圆弧形花纹等效黏聚力2.48 kPa, 矩形花纹等效黏聚力2.58 kPa。矩形花纹等效黏聚力较大, 这是由于上部载荷 W 增大使得抗剪强度增大, 导致土粒间的粘结效应增大。圆弧形花纹的等效黏聚力最小, 这是因为圆弧形花纹的抗剪强度较小导致的。各花纹等效摩擦角和黏聚力分布趋势大致相同, 矩形花纹最大, 三角形花纹次之, 圆弧形花纹最小。

5 结论

本文基于足式机器人足-壤相互作用力模型研究了足端花纹设计对松散月面足-壤界面滑移性能的影响。设计了三角形、圆弧形和矩形3种足端花纹构型, 采用有限元仿真研究了3种足端花纹构型防滑性能, 由于花纹构型不同, 在相同载荷下, 相比于三角形花纹和矩形花纹, 圆弧形花纹滑移量、应力峰值最小; 随后针对3类花纹构型进行竖向载荷滑移性能分析, 仿真结果表明不同载荷的剪切应力存在差异, 且随着载荷的增大, 剪切应力峰值逐渐增大; 最后给出了足-壤接触面抗滑等效剪切模型, 通过对足-壤间摩擦角和黏聚力分布进行等值拟合得到了等效摩擦角和黏聚力, 实现了不同花纹构型对足-壤间抗滑性能的定量表达。利用足端花纹设计提高了足式机器人防滑能力, 为足式机器人足端花纹设计提供了可行的思路。

本文尚未考虑花纹间距对足-壤间滑移性能的影响, 在实际任务设计中可以将本文的结果作为参考。针对足式机器人足-壤滑移性能的问题, 实际设计中可通过花纹以提高抗滑能力; 同时本文足端花纹设计仅设计表面微结构, 对花纹间距和花纹排列组合形式有待后续进一步的研究。

参 考 文 献

[1] 杜希萌. 我国探月工程四期和深空探测工程将全面拉开序幕 [EB/OL]. (2019-01-15)[2022-12-14].https://china.cnr.cn/yaowen/20190115/t20190115_524482310.shtml.

[2] 甘晓. 中科院院士叶培建揭秘探月工程:2020年后将在月球建立科考站 [EB/OL]. (2018-10-23)[2022-12-14].<https://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2018/10/340123.shtml?id=340123>.

[3] 杨建中, 吴琼, 于登云, 等. 无人月球科考站构建与运行关键技术初探[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(2): 111-117.
YANG J Z, WU Q, YU D Y, et al. Preliminary study on key technologies for construction and operation of robotics lunar scientific base[J]. Journal of Deep Space Explortion, 2020, 7(2): 111-117.

[4] 汪永明, 孙应秋, 鲍传辉, 等. 月球车足部构型参数对其驱动性能的影响研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 37-44.
WANG Y M, SUN Y Q, BAO C H, et al. Study on the foot configuration parameters of lunar rover and it's influences on the

- driving performance[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(3): 37-44.
- [5] 陶建国,胡明,高海波,等.月球车刚性车轮与土壤相互作用的力学模型与测试[J].*空间工程学报*,2008,28(4):340-344.
TAO J G, HU M, GAO H B, et al. Modeling and measurement of rigid wheel-soil interacter for a lunar rover[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2008, 28(4): 340-344.
- [6] 谷侃锋,王洪光,赵明扬,等.滑转率对月球车车轮驱动力学特性的影响分析[J].*计算机仿真*,2008,25(6):25-29.
GU K F, WANG H G, ZHAO M Y, et al. Influence of wheel slip on the dynamic characteristic of lunar rover wheels[J]. *Computer Simulation*, 2008, 25(6): 25-29.
- [7] 王福吉,邹有阳,马建伟,等.重载足式机器人足底花纹结构优化设计[J].*一重技术*,2018,1(6):42-46.
WANG F J, ZOU Y Y, MA J W, et al. Optimization design of sole pattern structure for heavy-duty legged robot[J]. *CFHI Technology*, 2018, 1(6): 42-46.
- [8] 李军.重载机器人高适应性足部的设计与研究[D].大连:大连理工大学,2016.
LI J. The design and research of heavy-duty robot high adaptability foot[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [9] 邹有阳.六足机器人落脚点规划与足底花纹设计[D].大连:大连理工大学,2019.
ZOU Y Y. Landing point planning and foot pattern design of hexapod robot[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [10] 贝旭颖,平雪良,高文研,等.纵向打滑状态下轮式移动机器人轨迹跟踪控制[J].*中国机械工程*,2018,29(16):1958-1964.
BEI X Y, PING X L, GAO W Y, et al. Trajectory tracking control of wheeled mobile robots under longitudinal slipping conditions[J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(16): 1958-1964.
- [11] 杭建峰.六足机器人行走打滑的研究[D].绵阳:西南科技大学,2018.
HANG J F. Research on walking and slipping of the hexapod robot[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018.
- [12] 赵广生.月球车轮壤作用关系的刚柔结合仿真研究[D].长春:吉林大学,2012.
ZHAO G S. Rigid-flexible combined simulation research on the interaction relationship between wheel and soil of the lunar rover[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [13] 凌道盛,蒋祝金,钟世英,等.着陆器足垫冲击模拟月壤的数值分析[J].*浙江大学学报*,2013,47(7):1171-1177.
LING D S, JIANG Z J, ZHONG S Y, et al. Numerical study on impact of lunar lander footpad against simulant lunar soil[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2013, 47(7): 1171-1177.
- [14] 东南大学等合编.土力学[M].第三版.北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [15] 丁亮.月/星球车轮地作用地面力学模型及其应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
DING L. Wheel-soil interaction terramechanics for lunae/planetary exploration rovers: modeling and application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.

作者简介:

钟世英(1982-),女,副教授,主要研究方向:岩土工程防灾减灾。

通信地址:山东建筑大学土木工程学院(250101)

电话:13256116551

E-mail: zhongshiyi@sdjzu.edu.cn

凌道盛(1968-),男,博士,教授,主要研究方向:土动力学、计算土力学等。**本文通信作者。**

通信地址:浙江大学岩土工程研究所(310058)

E-mail: dsling@zju.edu.cn

Foot-Soil Slipping Performance of Footed Robot in Soft Geology on Lunar Surface

ZHONG Shiyang^{1,2}, YUE Qianqian^{1,2}, LING Daosheng³, ZHOU Hao⁴, HAN Runqi⁴, CONG Bori⁵

(1. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Key Laboratory of Structural Reinforcement and Underground Space Engineering, Ministry of Education, Jinan 250101, China;

3. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

4. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

5. Innovation Research Institute of Shandong High-Speed Group Co., Ltd, Jinan 250100, China)

Abstract: Mobile robot is the backbone of the way of the lunar exploration, its foot end force is an important parameter for gait control. In order to study the effect of foot pattern design on foot-soil interaction in loose lunar soil on the anti-slip performance of the foot end, the anti-slip performance of three foot end pattern configurations was studied: triangle, arc and rectangle. The anti-slip performances of different pattern configurations under the same vertical load were studied through numerical simulation, and the anti-slip parameters of each pattern configuration were obtained through the equivalence principle. The results show that before the foot end pattern is completely pierced into the lunar soil, the circular arc pattern has the smallest settlement amount under the same vertical load, followed by the rectangular pattern with the triangular pattern having the largest settlement amount pattern under the same vertical load. At the same time, the slippage and stress peak of the circular arc pattern are also minimal. Under the anti-slip model of foot-soil contact surface, the equivalent shear strength of the rectangular pattern is the greatest when the same amount of subsidence is the largest, the equivalent friction angle is 33.44° , and the cohesion force 2.58 kPa, the circular arc pattern is the smallest, and its equivalent friction angle is 30.16° and the cohesion force 2.48 kPa.

Keywords: foot robot; foot-soil slipping performance; angle of friction; cohesion; finite element analysis

Highlights:

- Three kinds of anti-skip patterns on the foot end of the foot robot were designed.
- The interaction model of multi-type pattern foot end and soft was established.
- Slipping force analysis on the foot-soil interface of footed robot.
- Equivalent anti-skip model based on pattern.
- Equivalent angle of friction and equivalent cohesion of soft soil at foot-soil interface under the influence of vertical load.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]