

黏土环境下六足机器人抬腿阻滞力学模型研究

张颢曦¹ 姜杰^{1*} 蒋刚² 李月¹ 郝兴安¹

1. 成都理工大学机电工程学院, 成都, 610059

2. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都, 610059

摘要:六足机器人在黏土环境下行走时常发生沉陷且脱困受阻,对其行走稳定性及能耗等方面均产生了负面影响。考虑黏土的黏附特性及抗剪特性,建立了六足机器人在发生沉陷时的抬腿阻滞力学模型,揭示了足端沉陷量与抬腿阻滞力之间的相关性。设计并搭建了足地力学实验平台,基于该平台进行了六足机器人在3种步态下的足地力学实验,获得沉陷量与阻滞力数据,并与理论模型计算结果对比,验证了力学模型的准确性。采用EDEM软件模拟黏土环境,进行足地接触仿真,揭示了黏土内部力学行为变化规律。对比仿真结果、力学模型预测结果和实验结果发现数据变化趋势基本一致。

关键词:六足机器人;黏土环境;足地接触力学模型;足地力学实验

中图分类号: TP242

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.09.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Mechanics Model of Leg Lift Retardation for Hexapod Robot in Clay Environment

ZHANG Haoxi¹ JIANG Jie^{1*} JIANG Gang² LI Yue¹ HAO Xing'an¹

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059

2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059

Abstract: Hexapod robots often sink and get stuck when walking in clay environment, which had a negative impact on the walking stability and energy consumption. The adhesion and shear resistance properties of clay were considered. A mechanics model of leg lifting block for a hexapod robot during foot sinking was established. The correlation between foot subsidence and leg lifting resistance was revealed, and the foot-ground mechanics experimental platform was designed and constructed. Based on this platform, foot-ground mechanics experiments were conducted on hexapod robots under three gaits. Data on sinking and blocking forces were obtained. The accuracy of the mechanics model was verified by comparing with the calculated results of theoretical model. Finally, EDEM software was used to simulate the clay environment and perform foot-ground contact simulations. The variation law of the internal mechanics behavior of clay was revealed. The comparisons of the results from simulation, mechanics model prediction and experiments show that the data change trends are basically the same.

Key words: hexapod robot; clay environment; foot-ground contact mechanics model; foot-ground mechanics experiment

0 引言

六足机器人具有卓越的机动性和灵活性,在野外非结构化路况环境中执行任务时具有明显优势^[1]。野外非结构化地面以黏土为常态,具有粒径小、压缩性大、承载力低的特点^[2]。六足机器人在黏土地面上行走时,具有一定抗压强度的黏土发生沉陷,机器人抬腿时会产生土壤黏附与抬腿阻滞等一系列力学行为,会直接影响整个机器人

的运动稳定性和能耗控制。深入研究六足机器人足端与黏土相互接触的力学行为对提高六足机器人的移动能力和稳定性具有重要意义。

现有足式机器人足地接触力学研究根据地面类型主要可分为基于结构化地面和基于非结构化地面两类。

结构化地面通常指岩石、混凝土等硬质固结地面。ZAPOLSKY等^[2]考虑刚性接触模型和库仑摩擦构建了逆动力学模型,并利用Stewart-Trinkle和Anitescu-Potra模型对接触力进行预测,从而提高机器人性能。MAHAPATRA等^[3]考虑冲击力影响构建足地碰撞模型,观测足端撞击地面瞬时的冲击力,分析机器人扭矩及整体功

收稿日期:2024-07-31

基金项目:国家自然科学基金(52327803);教育部联合基金(8091B022233);四川省科技计划重点研发项目(2022ZFG0347);四川省自然科学基金(2024NSFSC0817)

耗情况。娄文韬^[4]基于Impact接触模型对机器人足地碰撞进行分析,并通过主被动复合柔顺控制对机器人进行控制。COURREGES等^[5]提出了对数线性化的Hunt-Crossley接触模型,通过实验数据拟合和复杂的统计发现其效果优于传统Hunt-Crossley接触模型。上述部分典型地形的足地相互作用已有较为深入的研究,足地接触可以等效简化为刚体碰撞模型、切向摩擦力学模型和多刚体运动链的约束边界条件,可以合理设定或默认地面刚性无形变、足部触地即可获得足够支撑力、结构力学性能无衰减变化等前提条件开展研究。

非结构化地面通常指黏土、沙土等柔性地面。孙昊等^[6]对经典土力学Prandtl-Reissne理论进行修正建立了刚-散耦合动力学理论模型,发现足端体积与跳跃高度成良好的线性关系。刘逸群等^[7]结合地面力学与Rankine被动土压力理论建立足地动力学模型,并通过实验验证该模型的合理性。徐佳炜等^[8]利用拉格朗日-欧拉方法结合物质点追踪技术,对机器人足端沉陷过程中脚底土壤的流变情况进行仿真。陆培栋^[9]利用Terzaghi极限承载力模型及Bekker模型对六足机器人足端与沙土接触过程进行建模。在上述研究中,非结构化地面具有复杂的流变和触变特性,刚性地面力学模型不再适用。传统的土力学极限承载模型、车轮-地面接触力学模型、规则几何机构与颗粒介质接触的抵抗力学模型可提供一定参考,但适用性极其有限。目前,关于六足机器人在黏土环境下足端沉陷时的足地作用机理、足端提拉力学响应模型等方面的研究基础非常薄弱。此外,现有的仿真较少考虑颗粒流变特性及黏连特性,导致其在黏土环境下的仿真可靠性不足。

本文构建了黏土环境下的六足机器人的抬腿阻滞力学模型,旨在分析足端沉陷量与脱困时的阻滞力之间的关系,并通过实验与仿真验证了理论模型的有效性。

1 抬腿阻滞力学模型

本文采用常见的平底圆形足端作为研究对象。在黏土环境中,足端在垂直载荷的作用下往往会发生不同程度的沉陷,沉陷幅度取决于土体性质和足端载荷大小。当沉陷达到一定程度时,黏土会发生回填将足端埋置于土体中,使机器人抬腿受阻。

这种阻滞现象主要是由于土体的抗剪力 F_T 、足端正上方土体自重 F_G 、足端下方土体垂直黏附力 F_p 及足端侧面土体切向黏附阻力 F_l 共同作用。抬腿阻滞力学模型如图1所示,阻滞力 F_u 表达式如下:

$$F_u = F_T + F_G + F_p + F_l \quad (1)$$

其中抗剪力 F_T 受剪切应力 τ 与剪切面积 S 影响,设足端提拉过程中以角度 ψ 对上方土体进行线性剪切,抗剪力 F_T 表达式如下:

$$F_T = \tau S \sin \psi \quad (2)$$

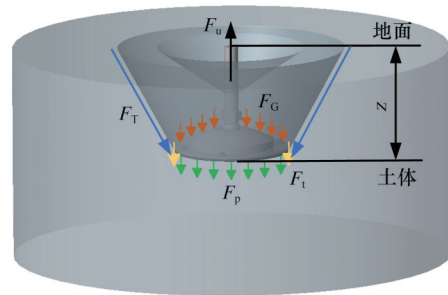


图1 抬腿阻滞力学模型

Fig.1 Model of leg lift block

通过足端直径 d 及足端沉陷量 z 对剪切面积 S 进行解算:

$$S = \frac{\pi \left(\frac{z}{\tan \psi} + \frac{d}{2} \right)^2}{\cos \psi} - \frac{\pi d^2}{4 \cos \psi} \quad (3)$$

剪切应力 τ 主要受摩擦强度 $\sigma \tan \varphi$ 和黏聚强度 c 两方面影响。本文采用应用最为广泛的Janosi剪切模型来解释^[10]。该模型对地形适应性强,常被用于分析软土地形中的受力情况,描述土壤受剪时的力学行为,表达式如下:

$$\tau = (c + \sigma \tan \varphi)(1 - e^{-j/K}) \quad (4)$$

式中: σ 为垂直压力; φ 为摩擦角; j 为剪切位移量; K 为剪切变形模量系数。

黏聚强度 c 及摩擦角 φ 通过对土壤进行直接剪切实验得到,垂直压力 σ 则需要对土壤上方受剪土体进行受力分析。在足端上方圆台剪切范围内的土体体积为

$$V = \frac{\pi \tan \varphi}{3} \left[\left(\frac{z}{\tan \varphi} + \frac{d}{2} \right)^3 - \frac{d^3}{8} \right] \quad (5)$$

而足端正上方土体圆柱土体体积为

$$V_1 = \frac{1}{8} \pi d^2 z \quad (6)$$

结合土壤容重 ρ 解算得到垂直压力为

$$\sigma = \pi \rho \sin \psi \left\{ \frac{\tan \psi}{3} \left[\left(\frac{z}{\tan \psi} + \frac{d}{2} \right)^3 - \frac{d^3}{8} \right] - \frac{d^2 z}{8} \right\} \quad (7)$$

在稳定承压过程中,考虑回填的黏附土体以摩擦角向内回填;足端在脱离土体后,足端上方黏附土体也以摩擦角形成土坡。最终通过解算,当

$z \geq 2d^2 \tan \varphi / 3$ 时,黏附在足端正上方土体自重 F_G 表达式如下:

$$F_G = \frac{\rho}{8} (\pi d^2 z - \frac{1}{3} \pi d^3 \tan \varphi) \quad (8)$$

土壤黏附力的形成是一个复杂的过程,涉及多种物理和化学作用,主要由于松束缚水形成的水膜介质产生。一般土壤黏附力由足端与土壤接触点分子引力、足端与土壤表面吸附阳离子之间的静电引力、足端与土壤颗粒接触位置由水形成的弯月面而产生的毛细管力、土壤溶液黏滞阻力、楔开压力、界面土壤发生黏闭形成的空气负压组成^[11-12]。

六足机器人与黏土垂直黏附力可简化为下述3种力的代数和:

$$F_p = F_c + F_v + F_g \quad (9)$$

式中: F_c 为足端与土壤颗粒接触位置由水形成的弯月面而产生的毛细管力; F_v 为土壤溶液黏滞阻力; F_g 为界面土壤发生黏闭形成的空气负压。

足端侧面与其黏附的土壤在提拉过程中也会产生运动阻力,这种阻力由正压力产生的摩擦与黏附力组成,其中黏附阻力项正比于接触面积,表达式为^[13]

$$F_t = A_2 C_a + W \tan \theta \quad (10)$$

式中: F_t 为切向黏附阻力; A_2 为接触面面积; C_a 为切向黏附; W 为垂直载荷; θ 为外摩擦角。

2 足-黏土接触实验

2.1 实验装置设计

本研究设计了一套全新的足地力学实验平台。该平台由双轴作动、运动控制、信号采集、动力和数据处理五大系统组成,如图2所示。通过双轴作动和运动控制系统完成机器人足端在黏土中的平移、下踩及提拉运动模拟,实现水平方向的精准移动和垂直方向的力的控制;通过信号采集



图2 足地力学实验平台

Fig.2 Foot-ground mechanics experiment platform

和数据处理系统实现机器人足地接触力学信号的实时采集,最终还原六足机器人足端与黏土之间的接触过程。

本设计中,垂直作动装置被视为实现力位控制的关键元件,固定在水平滚珠丝杠滑台上,并由伺服液压作动器驱动。由于黏土环境的力学响应应变率影响,动态载荷作用下,其强度和变形特性会发生变化,因此此装置内置活塞杆端力传感器和油压传感器,通过闭环反馈控制系统,有助于提供稳定动态载荷,实现多种步态的机器人足地接触模拟,适应更多土壤环境变化。通过精准的力位控制预测黏土不同力学行为,具体结构如图3所示。

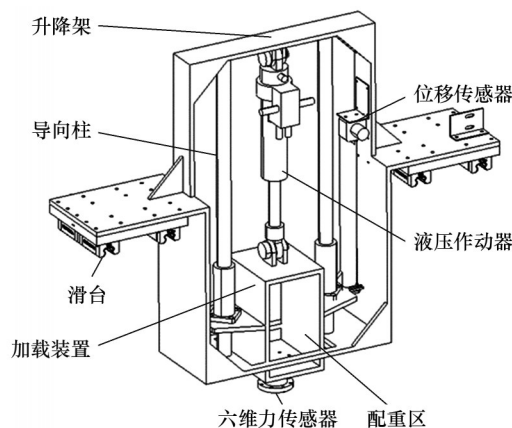


图3 实验平台垂直作动装置

Fig.3 Vertical actuator of experimental platform

实验台架分为上下两层。下层放置的土槽最小横向尺寸为700 mm,上层的实验台架安装了5 mm 导程、最大行程为1000 mm的滚珠丝杠滑台,配合86步进电机可实现最低1 mm/s的运行速度。该实验平台垂直方向最大负载可达300 kg,水平承载可达200 kg。两侧同步滑台与升降架连接,加载装置与导向柱可活动地连接。在液压作动器下方连接六维力传感器和足端,使足端具有足够的驱动力和承载能力,实现平稳运动和灵敏地换向。在实验过程中,通过读取六维力传感器采集足端受力情况,包括法向力 F_n 、切向力 F_t 、侧向力 F_s ,以及3个方向上的力矩 M_x 、 M_y 和 M_z 。同时还会读取拉线位移传感器数据,以采集足端的水平和垂直位移信息。这些数据的获取将有助于全面分析足端与地面的接触情况,并为研究机器人足地相互作用提供数据支持。

2.2 模拟土壤配置

由于本研究设计的六足机器人主要应用于青藏高原地区,所以在进行模拟土壤配置的过程中,

以青藏高原某地黏土为目标土壤,从目标土壤颗粒尺寸、矿物组成、含水率等方面进行模拟配置,以获得具有相似力学性能参数的土壤样品。

本文采用200目石英砂、400目和1250目伊利石粉按比例配置模拟土壤,并按照GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》采用环刀法对土壤容重进行检验,同时利用ZJ型应变控制式直剪仪对模拟土壤进行直接剪切实验,以得到模拟土壤的内聚力及摩擦角。在实验过程中,对土体垂直方向上分别施加50 N、100 N、150 N及200 N的压力,应变速率为0.8 mm/min,并统一采用剪切4 mm位置得到的强度参数。

土壤的力学性质及承载性能主要受黏聚力、摩擦角和容重等因素影响,因此将模拟黏土、目标黏土及其他典型土壤环境的物理力学指标进行对比,如表1所示。对比目标黏土环境与其他典型土壤环境的物理力学参数可以发现,目标黏土环境的承载性能相较于其他典型土壤环境较弱,对六足机器人行走稳定性影响显著;对比模拟黏土与目标黏土各项指标可以看出,其物理力学指标相似,模拟配置的土壤样品在物理性能上与目标黏土具有较好的拟合度,可以用于足地接触实验。

表1 目标土壤与模拟土壤参数对比

Tab.1 Comparison of parameters of target soil and simulated soil

参数	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	容重/(kN·m ⁻³)
目标黏土	5	16.4	18.6
模拟黏土	5	15.7	16.2
粉土 ^[14]	15	25	17.3
砂土 ^[15]	0	36	15.1

2.3 实验及结果分析

六足机器人在行走过程中需要各条腿精准协调配合、有序运动,才能确保良好的整机稳定性。根据六足机器人支撑相的数量,步态可以分为三足、四足、五足步态等。支撑相越少,足端压力越大,沉陷量越大。以一款满载状态下质量约为120 kg的六足机器人为例,设置足端的三级载荷为240 N、300 N、400 N,分别模拟五足步态、四足步态、三足步态3种不同的运动状态。

足与黏土接触实验中,采用直径75 mm的平底圆形足进行实验。考虑土槽边界效应影响,足端始终位于土槽中央位置,并且足端刚好接触土体表面时作为实验测试的起始位置。实验过程中,控制加载装置四级不同垂直载荷向下加载,直至足端不再沉陷且足端力稳定。随后,控制足端

以0.1 m/s的速度进行提拉,直至完全脱离土体。在整个实验过程中,采用固定在足端上方的六维力传感器和拉线位移传感器分别采集足端力及足端法向位移数据,最终完成实验。

为确保机器人足地实验的准确性,在进行实验之前,均需要对力传感器及位移传感器的零点值进行校准。校准的方法是在足端刚好没有接触地面和完全稳定沉陷时标定传感器,此时六维力传感器六个通道的度数应为0。每组实验需要重复5次,以确保实验结果的可靠性。在每组实验之后,需要对土体进行重新松动并加压,待压力稳定后进行下一组实验,以确保每组实验土体力学性能一致。

对足端力数据进行分析,发现在不同运动状态下,当足端稳定支撑后进行提拉时,阻滞力随时间变化呈现特定模式,如图4所示。可以发现,阻滞力会迅速上升到最大值,然后缓慢下降并最终突降为最小值。在三足步态、四足步态和五足步态的运动状态下,最大阻滞力分别为77 N、57 N和49 N。

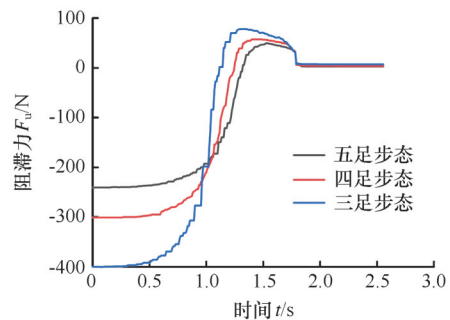


图4 阻滞力与时间的关系

Fig.4 The relationship between resistance and time

对各组实验结果中阻滞力达到最大值至发生突变之间的数据与抬腿阻滞力学模型进行分析,得到沉陷量-阻滞力误差棒曲线,如图5所示。误差棒表示理论数据与实验数据的偏差。由图5可知,三足步态、四足步态、五足步态实验结果与理论模型预测结果的平均误差分别为13%、9%、6%,有较好的预测效果。

3 足-黏土接触仿真实验

3.1 颗粒接触模型

本文采用离散元技术进行足地接触力学模型研究。首先选择合适的土壤颗粒接触模型。颗粒基础接触模型有很多^[16-18],其特性及适用场景如表2所示。

由于黏土具有一定粉粒及黏粒,颗粒间不仅存在摩擦力,还具有一定的黏聚性能。为尽量还

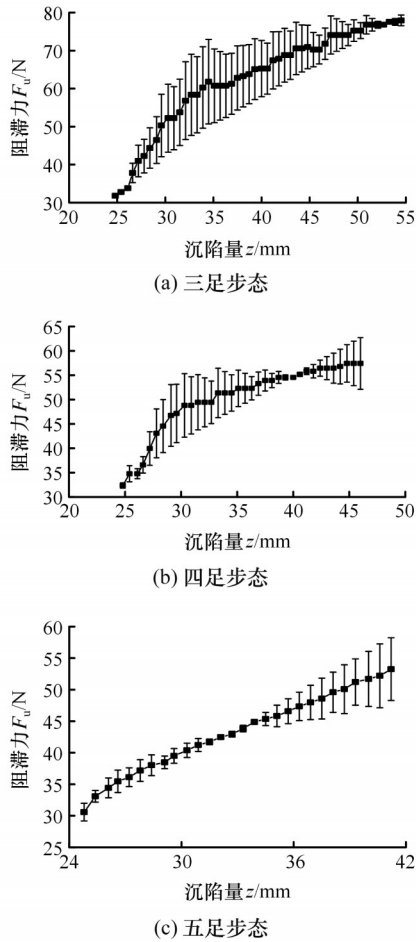


图5 阻滞力-沉陷量的关系(实验与理论误差)
Fig.5 The relationship between subsidence and settlement(errors of experiments and theories)

表2 接触模型特性及适用场景
Tab.2 Contact model characteristics and applicable scenarios

接触模型	黏性	压缩性	适用场景
Hertz-Mindlin	无	无	常规颗粒接触
Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion	有	有	黏弹塑性颗粒接触
Hysteretic Spring	无	有	受压后塑性形变颗粒接触
Hertz-Mindlin with JKR	有	无	粉体或湿颗粒接触
Bonding	有	有	破碎颗粒接触
Electrostatics	有	无	静电颗粒接触

原黏土内部及与足端接触的黏附作用,采用 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型。Hertz-Mindlin with JKR 接触模型是在 Hertz-Mindlin 接触模型的基础上进行改进的,引入了颗粒表面能。修正颗粒间的法向重叠性及相互作用参数后得到法向弹性接触力,计算式如下^[19]:

$$F_j = \frac{E^* D^3}{6R^*} - \sqrt{\pi \Delta \gamma E^* D^3} \quad (11)$$

式中: E^* 为当量弹性模量; R^* 为当量半径; D 为接触直径;

$\Delta \gamma$ 为接触颗粒表面能。

由于颗粒间发生黏连,故接触直径 D 增大,法向重叠量 δ 也随之增大:

$$\delta = \frac{D^2}{4R^*} - \sqrt{\frac{\pi D \Delta \gamma}{E^*}} \quad (12)$$

接触模型中使颗粒 i, j 之间相互连接的能量 $\Delta \gamma$ 表示为

$$\Delta \gamma = \gamma_i + \gamma_j - \gamma_{ij} \quad (13)$$

式中: γ_i, γ_j 为表面能; γ_{ij} 为界面能。

当两颗粒接触时也会发生黏连运动导致颗粒分开,此时所需的最大分离力为

$$F = \frac{3}{2} \pi \Delta \gamma R^* \quad (14)$$

3.2 颗粒参数标定

在对颗粒模型进行参数标定实验时,由于仿真黏土模型与实际黏土的物理参数存在差异且测量难度大,故需要通过参数标定来使实际颗粒与仿真颗粒的物理性能更接近。在参数标定过程中,需要确定的模型参数包括静摩擦因数、滚动摩擦因数和表面能。标定实验方法选用堆积角实验,其中目标参数为土壤的堆积角。通过分析颗粒体系的堆积角,可以推导出静摩擦因数、滚动摩擦因数和表面能等模型参数,从而进行参数标定。

通过综合参考各相关文献中的参数设定,本研究设置了3个滚动摩擦因数(0.1、0.2、0.3)、3个表面能(1 J/m²、2 J/m²、3 J/m²)以及3个静摩擦因数(0.38、0.53、0.78)来进行颗粒堆积的仿真测试。在每次测试中,记录了颗粒堆积时的角度参数。随后,应用 regress 函数进行多元线性回归分析,将实际观测到的堆积角度作为目标值,以确定最佳模型参数。经过分析和回归计算,得出了最优颗粒参数。最终设置的仿真土壤颗粒参数如表3所示。

表3 土壤颗粒参数

Tab.3 Soil particle parameter

参数	数值
颗粒粒径/mm	2
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	2600
泊松比	0.25
剪切模量/Pa	1 × 10 ⁷
恢复系数	0.75
静摩擦因数	1.16
滚动摩擦因数	0.29
表面能/(J·m ⁻²)	0.6

3.3 仿真实验及结果分析

基于所确定的颗粒参数建立颗粒工厂模型。首先在工厂内部堆积颗粒并在颗粒体系顶部加载

负载以保持其稳定。随后导入足端模型,将其置于颗粒床表面正上方,并确保与颗粒床表面紧密接触。足端施加垂直向下的压力分别为 400 N、300 N 和 240 N,直至足端稳定后,匀速提升足端直至脱离土体后结束实验,保持仿真环境中的足端及土槽尺寸与实际实验环境一致性。

土壤应力矢量分布情况如图 6 所示:①发生沉陷后的提拉初期足端下方土体被压实,黏附力主要以黏闭形成的空气负压、毛细管力、土壤溶液黏滞阻力等形式作用于足端底部,下方土体随足端向上运动,而上方土体被逐渐压密,开始相互剪切(图 6a);②足端继续提拉,垂直黏附作用由于下方土体脱落而消失,此时足端主要受土体剪切及切向黏附影响(图 6b);③随着提拉高度的增大,受剪土体的体积逐渐减少,剪切力也随之减小。同时,足端下方会形成一个空腔(图 6c);④最终导致足端脱离土体,阻滞力只剩下足端上方黏附土体的自重(图 6d)。此结果符合力学模

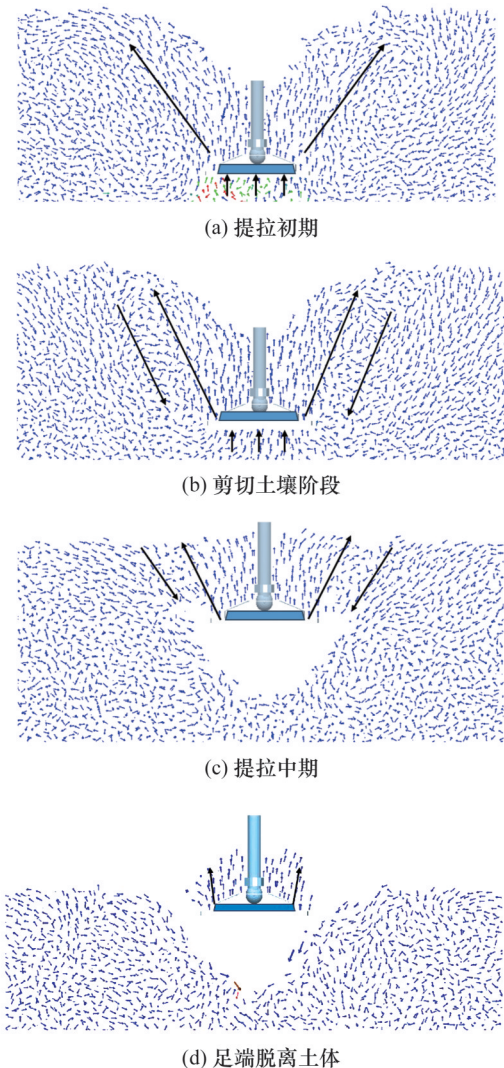


图 6 土壤颗粒应力矢量分布

Fig.6 Soil particle stress vector distribution

型预测及实验数据变化趋势。

将阻滞力数据的理论模型预测结果和仿真结果进行对比分析,得到沉陷量-阻滞力误差棒曲线如图 7 所示。误差棒表示仿真数据与理论数据的偏差。仿真分析中三足步态、四足步态、五足步态最大阻滞力分别为 78 N、61 N 和 47 N,阻滞力与沉陷量成正相关,与实验数据变化趋势基本一致。通过分析发现三足步态、四足步态、五足步态的仿真结果与理论模型预测结果的平均误差分别为 5%、7% 和 8%,这一结果进一步证明了理论模型具有较高的可靠性。

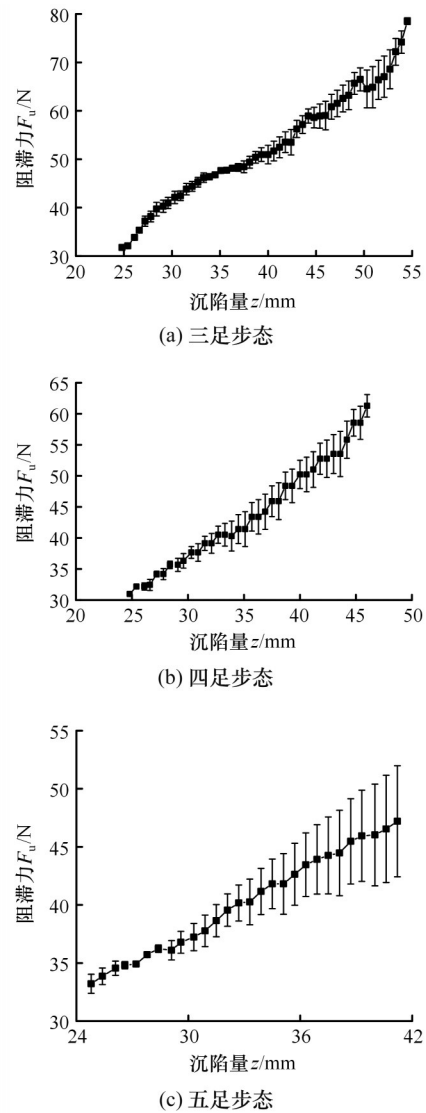


图 7 阻滞力-沉陷量的关系(仿真与理论误差)

Fig.7 The relationship between subsidence and settlement(errors of simulations and theories)

4 结论

本文以六足机器人平底圆形足端为研究对象,建立其在沉陷状态下的抬腿阻滞力学模型,通过自主开发高性能足地力学实验平台,完成多步

态足地相互作用实验及仿真。研究得出的结论如下。

1)通过对比理论模型预测结果与实验结果,得到六足机器人的三足步态、四足步态、五足步态3种不同状态下的阻滞力的预测平均误差,分别为13%、9%、6%,从而证明了理论模型的可靠性,为后续六足机器人在黏土环境中的稳定控制提供理论支撑。

2)利用离散元方法从微观角度深入分析足机器人足端与黏土接触过程的具体应力矢量分布变化,以新视角揭示了土体内部的复杂动态行为。将3种步态的理论数据与仿真数据进行对比分析,发现阻滞力变化趋势基本一致,且仿真数据与理论模型预测结果的平均误差分别为5%、7%和8%,进一步印证了理论模型的预测准确性。

参考文献:

- [1] 翟硕,虞拯,金波. 多足步行机器人液压控制系统研究现状与发展趋势[J]. 机器人, 2018, 40(6): 958-968.
ZHAI Shuo, YU Zheng, JIN Bo. Research Status and Development Trend of Hydraulic Control System for Multi-legged Walking Robot [J]. Robot, 2018, 40(6): 958-968.
- [2] ZAPOLSKY S, DRUMWRIGHT E. Inverse Dynamics with Rigid Contact and Friction[J]. Autonomous Robots, 2017, 41(4): 831-863.
- [3] MAHAPATRA A, ROY S S, PRATIHAR D K. Inverse Dynamics and Feet-terrain Collision Model for Optimal Distribution of the Contact Forces during Crab Motion of a Hexapod Robot [M] //CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future. New Delhi: Springer, 2016: 85-95.
- [4] 娄文韬. 液压驱动型机器人腿部足地交互数学建模及碰撞分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
LOU Wentao. Mathematical Modeling and Collision Analysis of Foot and Ground Interaction of Hydraulic Drive Robot[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2021.
- [5] COURREGES F, LARIBI M A, ARSICAULT M, et al. In Vivo and in Vitro Comparative Assessment of the Log-linearized Hunt-Crossley Model for Impact-contact Modeling in Physical Human-Robot Interactions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2019, 233(10): 1376-1391.
- [6] 孙昊,刘铸永,刘锦阳. 机器人单足系统沙土跳跃刚-散耦合动力学分析[J]. 力学学报, 2022, 54(12): 3486-3495.
SUN Hao, LIU Zhuyong, LIU Jinyang. Rigid-discrete Coupling Dynamic Analysis of Robot Monopodal System Jumping in Sand[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(12): 3486-3495.
- [7] 刘逸群,陆培栋,张志鹏,等. 松软地质上机器人足-地动力学建模与试验[J]. 机械工程学报, 2022, 58(5): 8-17.
LIU Yiqun, LU Peidong, ZHANG Zhipeng, et al. Modeling and Verification of Robot Foot-terrain Dynamics in Soft Geology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(5): 8-17.
- [8] 徐佳炜,何钢,胡鹏,等. 复杂脚底形状对机器人脚沉陷中挤土效应影响的研究[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(12): 1930-1936.
XU Jiawei, HE Gang, HU Peng, et al. Study on Soil Squeezing Effect of Complex Plantar Shape in Sinking of Robot's Foot[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(12): 1930-1936.
- [9] 陆培栋. 松软地质环境下机器人足-地作用力学模型与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
LU Peidong. Research on Model and Experiment of Foot-ground Interaction Mechanics of the Robot in Soft Geology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [10] JANOSI Z, ANAMOTO B. The Analytical Determination of Drawbar Pull as A Function of Slip for Tracked Vehicle in Deformable Soils[C]//The 1st International Conference on the Mechanics of Soil-Vehicle Systems. Torino, 1961:707-736.
- [11] 任露泉,陈德兴,陈秉聪. 土壤粘附研究概述[J]. 农业工程学报, 1990, 6(1): 1-7.
REN Luquan, CHEN Dexing, CHEN Bingcong. A Summary of Study on Soil Adhesion [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1990, 6(1): 1-7.
- [12] KITO K. 水表面张力对切向土壤黏附力的影响(摘选)[J]. 农业工程, 2012, 2(7): 80-82.
KITO K. Effect of Water Surface Tension on Tangential Soil Adhesion(Extracts)[J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(7): 80-82.
- [13] 宋春霞. 冻融作用对土物理力学性质影响的试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007.
SONG Chunxia. Experimental Study of the Freezethaw Effects on Physical and Mechanical Properties of Soils[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.