DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201707156

# 单一可动叶片车轮和砂土的交互作用力学特性

杨 扬,张 敏,孙 翊,刘 娜,蒲华燕

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

**摘 要**: 为评估本课题组研发的新型可动叶片车轮 ALW(Active Lugged Wheel)与土壤交互作用的力学特性,搭建了 ALW-土壤交互作用力学测量平台,测量了采用不同叶片运动轨迹的 ALW 机构与砂土间相互作用所产生的牵引力和垂直升力,将其与光滑车轮和单个叶片产生的土壤反作用力分别进行比较,辨识了车轮表面和叶片与砂土的耦合作用影响. 根据测量结果进一步分析了叶片倾斜角度和沉陷长度对土壤反作用力的影响,并通过最小二乘法构建了叶片沉陷长度与土壤反作用力相关性的数学模型. 结果表明:当车轮转角处于一定范围内时,ALW 产生的牵引力和垂直升力比光滑车轮和单个叶片产生的作用力的总和更大,因此推断车轮表面和叶片与砂土的耦合作用会影响砂土的变形形式,ALW 可以利用砂土的这种变形特性增大土壤反作用力;ALW 受到的牵引力和竖直升力与叶片的倾斜角度没有明显关系,而与叶片的沉陷长度呈二次函数关系,因此可以通过主动调节叶片的沉陷长度来提高 ALW 机构在软土上的运动性能.

**关键词**: 地面力学;砂地;轮式机器人;主动叶片;力学特性

**中图分类号**: TP242 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2018)07-0119-07

# Interaction characteristics between an active lugged wheel with a single lug and sand soil

YANG Yang, ZHANG Min, SUN Yi, LIU Na, PU Huayan

(School of Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract**: To evaluate the interaction characteristics between the soil and the Active Lugged Wheel (ALW) developed in our lab, an ALW-soil interaction testbed has been developed. The drawbar pull and the vertical force generated by the ALW mechanism in various trajectories are measured and compared with forces generated by a smooth wheel and a single lug, respectively, to identify the interference between the wheel rim and lugs. In addition, based on the experimental results, the effects of lug inclination angle and lug sinkage length on soil reaction forces are analyzed, and the relationship between the lug sinkage length and the soil reaction forces is established by the least square method. It has been confirmed that the ALW generates a larger soil reaction forces than the sums of the respective forces generated by the smooth wheel and the single lug as the wheel rotates within a certain range, thus the ALW can exploit the deformation property of the sandy soil to gain larger soil reaction forces due to the interference between the wheel rim and the lugs. Moreover, it has been found that the lug inclination angle has no regular influence on the soil reaction force, while both drawbar pull and vertical force are quadratic functions of lug sinkage. Thus, it is possible to improve the traveling performance of the ALW mechanism by adjusting the lug sinkage length.

**Keywords**: terramechanics; sandy terrain; wheeled robot; active lug; mechanical properties

执行行星探测、火山探测、地质调查等任务的移动机器人在覆盖有细粒的松散土壤表面运动时,经常因打滑、沉陷等原因失效,甚至导致任务失败[1-2]. 因此,研究人员开发了大量的新型运动机构以提高机器人的运动性能,包括轮式[3]、履带式[4]和复合机构式[5]等. 其中,轮式机器人由于其结构简单、可靠性强、效率高等特点,在实际中得到了广泛的应用.

将不同形状的叶片安装固定到运动模块的表面可以有效地提高移动机器人的性能[6]. 不仅如此,很多学者已经开发出一些新型机构来克服传统的固定叶片轮式机构的局限性. Chen 等人提出一种可动叶片轮式机构,可预先将叶片倾斜角度设定为一个期望值,并保持该角度在车轮滚动前进过程中恒定,取得了良好的运动性能[7-8]. 此外,文献[9]通过土壤力学建模分析,发现其开发的具有主动伸缩叶片的复合行走轮可提高机器人在松软地面上的运动性

**收稿日期**: 2017-07-26

**基金项目**: 国家自然科学基金(61403245);
上海高校青年东方学者(QD2016029);
上海市青年科技英才扬帆计划(17YF1406200);
上海市科委能力建设资助项目 (14500500400)

**作者简介**: 杨 扬(1986—),男,博士,讲师

**通信作者**: 刘 娜,liuna_sia@shu.edu.cn

能. 这些新型机构通过主动调节叶片的倾斜角度或沉陷长度,极大地改善了其在软土地面上的运动性能. 然而,在车轮滚动前进的过程中,随着叶片依次接触土壤,车轮的沉陷量、输出力和力矩会不可避免地产生波动[10],从而破坏机器人运动的稳定性,产生不必要的颠簸. 本实验室在先行研究中,提出了主动叶片轮式机构(ALW)的概念来克服传统的固定叶片轮式机构的缺陷[11],并通过试验验证了这种新机构在牵引力波动抑制方面的有效性.

通过调整叶片的轨迹,ALW 机构可产生恒定的牵引力和垂直升力并减少沉陷量和关节输出力矩的波动. 为此,必须确定叶片运动轨迹与土壤反作用力间的关系. 被动土壤压强理论是一种简单实用的土壤力学建模方法,已经成功用于计算湿土环境下叶片受到的土壤反作用力[12-13]. 但是,这种理论假设土壤表面必须平整,无法用于不平坦地面状况下的力学分析计算. 在前期研究中,本实验室测量了在不同运动轨迹下单一叶片受到的土壤反作用力[14],发现其受力情况与其水平位移、沉陷深度、移动方向角度和倾斜角度有关. 基于上述结论,本文将进一步根据试验结果分析叶片的运动轨迹对 ALW-土壤交互力的影响.

由于土壤变形状态比较复杂,很难通过理论建模的方法计算安装有叶片的轮式机构与土壤间的交互作用力,因此通常需要通过试验研究来评估叶片对机器人运动性能的影响. Sutoh 等人通过爬坡测试,分析了车轮表面的叶片数量对滑转率的影响[15],发现增加叶片数量可以在一定程度上提高行驶性能. Liu 等人通过单轮试验测试,给出了一组叶片参数设计的推荐值,如间距角、高度和厚度[16]. 此外,Ding 等人研究了叶片高度和数量对车轮转向性能的影响[17-18].

在先行研究文献[11,14]中发现,由于砂土的变形情况比较复杂,车轮的存在会显著改变叶片—土壤交互作用力的大小,很难找到合适的地面力学模型来估计 ALW—土壤的交互作用力. 本研究拟通过试验研究来进一步辨识车轮表面和叶片与砂土的耦合作用影响,并评估 ALW 机构与土壤交互作用的力学特性.

## 1 主动叶片轮

### 1.1 原型样机

主动叶片车轮 ALW 的概念最先在文献[11]中提出. 如图 1(a)所示,ALW 模块由一个车轮外壳和一组叶片构成,共三个自由度,其主要部件如下:

1)一个用于驱动轮壳转动的旋转关节;安装在轮框边缘的合页可被动绕其轴旋转;叶片可通过合页伸出或收回至轮壳内.

2)一个行星齿轮机构,其太阳轮和行星架各由一个电机驱动. 该机构可控制固定在行星轮上的叶片轴的运动. 太阳轮和行星轮的中心距 $L_A$ 等于行星轮与叶片轴的中心距 $L_B$,因此叶片轴可以被驱动至半径为 $R_W$ 的圆形工作空间内的任意位置(见图 1(b)).

$$R_W = L_A + L_B. \tag{1}$$

ALW 模块的轮壳、行星架和太阳轮分别由三台直流有刷电机(Maxon RE25,GP gearbox (72:1))通过其各自的传动链驱动,并通过三个绝对编码器(RE22, RLS; Slovenia)测量关节角位置信息. 当车轮滚动前进时,可通过主动调节叶片轴在轮壳内的位置来控制叶片的伸缩运动.

在评估多叶片 ALW 模块的性能之前,需要先确定装有单一叶片的 ALW 与土壤间的交互作用力学特性,以排除多叶片与土壤交互作用过程中的相互影响. 因此,本研究拟测量装配有单一叶片的 ALW 机构采用不同叶片运动轨迹时所产生的牵引力和垂直升力. 图 1(c)所示为一个用于实地试验的装配有单一叶片的防尘 ALW 原型样机,质量为 3.2 kg. 表 1 列出了 ALW 模块的主要参数.

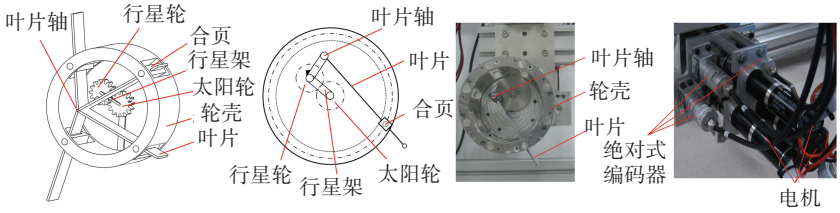



**图 1 可动叶片车轮机构[19]**

Fig.1 Active Lugged Wheel Mechanism[19]

**表 1 ALW 模块规格**

Tab.1 Specifications of the ALW module mm

| 叶片长度 | 叶片宽度 | 叶片厚度 | 外壳半径 | 外壳宽度 | 合页半径 | $L_A$ | $L_B$ | $R_W$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 96 | 63 | 2 | 56 | 113 | 50 | 20 | 20 | 40 |

### 1.2　ALW−土壤交互作用过程

在车轮滚动前进过程中，ALW 模块可以主动调整叶片轴的运动. 图 2 给出一个典型的 ALW−土壤交互过程实例：随着车轮从 0°旋转到 180°，可根据下述三个参数的变化将交互作用过程划分为三个阶段.

1）切换角度 $\theta_1$ 表示由阶段 I 进入阶段 II 的临界时刻的外壳旋转角度.

2）叶片倾斜角 $\alpha$ 定义为叶片与水平方向之间的夹角.

3）叶片沉陷长度 $l_s$ 定义为叶片尖端到叶片与水平地面交点间的距离[19].

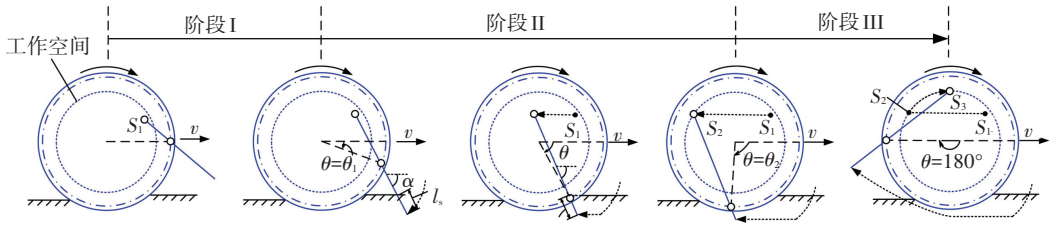



**图 2　车轮从 0°旋转到 180°，ALW−土壤一个完整交互作用过程中的叶片轨迹**

Fig.2　Lug trajectory within a complete ALW−soil interaction process as the wheel rotates from 0° to 180°

阶段 I：通过设定的切换角度、阶段 II 的初始叶片倾斜角度和初始沉陷长度三个参数值可计算出叶片轴的初始点 $S_1$. 在阶段 I 中，叶片轴一直被保持在 $S_1$ 处，随着车轮的转动叶片接触并插入土壤. 当外壳旋转角度 $\theta$ 达到设置的切换角度 $\theta_1$ 时，叶片进入阶段 II 的初始状态.

阶段 II：车轮由 $\theta_1$ 旋转至 $\theta_2$，可驱动叶片轴沿预先设定的期望轨迹 $S_1S_2$ 运动来提高 ALW 模块的运动性能，其中 $\theta_2$ 与 $S_2$ 可根据期望轨迹与叶片轴工作空间的联立约束方程求得.

阶段 III：叶片轴沿 $S_2S_3$ 逐渐移动至工作空间最高点 $S_3$ 处，叶片被逐渐抽离土壤.

因此，通过设计切换角度 $\theta_1$、倾斜角度 $\alpha$ 和沉陷长度 $l_s$ 可以获得叶片的期望轨迹，最后通过逆运动学模型[19] 计算对应的各关节角度.

通常情况下，车辆在松软土壤表面行驶时会发生打滑现象[20]，其程度由滑转率 $s$ 表示，其数值可根据车轮的水平移动速度 $v$、车轮半径 $R$ 和车轮角速度 $\dot{\theta}$ 的值计算得到：

$$s = (R\dot{\theta} - v)/R\dot{\theta}. \tag{2}$$

ALW 模块与土壤交互作用力学模型如图 3 所示. 当车轮沿水平方向以恒定的沉降深度和滑转率滚动前进时，轮缘与土壤任意接触点会受到法向力 $F_n^w$ 和切向力 $F_t^w$；叶片上任意一点 $C$ 会产生法向微位移和切向微位移，进而受到法向力 $F_n^L$ 和切向力 $F_t^L$. ALW 模块受到的土壤反作用力为叶片和轮壳表面受到的土壤反作用力之和. 由于土体变形比较复杂，本文采用试验研究来探究叶片 − 土壤交互作用力和车轮轮壳表面 − 土壤交互作用力对 ALW − 土壤交互作用力的贡献，以及叶片倾斜角度 $\alpha$ 和沉陷长度 $l_s$ 对 ALW − 土壤交互作用力的影响.

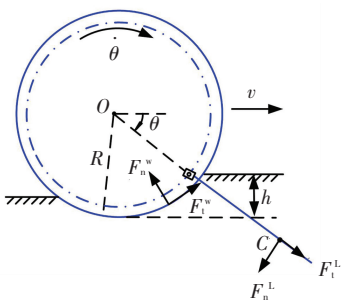



**图 3　ALW−土壤交互作用力学模型**

Fig.3　The ALW-soil interaction mechanics model

## 2　试验装置

### 2.1　试验概况和条件

试验中轮壳的沉陷量设定为 5 mm，轮壳以 30°/s 的角速度从 0°旋转到 180°，水平行驶速度设置为 20 mm/s，由式(2)可计算出滑转率为 0.3. 叶片在阶段 II 以恒定的倾斜角度和沉陷长度移动.

#### 2.1.1　三种车轮性能对比试验

为了评估轮壳和叶片对牵引力和垂直升力的影响，试验中测量了光滑车轮(SW)和笼式叶片车轮(CLW)产生的土壤反作用力，并将试验结果与采用相同叶片轨迹的 ALW 的受力情况进行比较. 如图 4 所示，SW 和 CLW 分别通过从 ALW 拆卸去除叶片和轮壳获得，因此三种车轮的半径和宽度相同. 试验中 CLW 和 ALW 采用相同的叶片轨迹，其运动参数如表 2 所示.

**表 2　CLW 和 ALW 的叶片运动参数**

Tab.2　Values of lug motion parameters adopted for CLW and ALW

| $\theta_1$/(°) | $\alpha$/(°) | $l_s$/mm |
|---|---|---|
| 20 | 50 | 11 |
| 20 | 60 | 15 |
| 30 | 70 | 15 |

2.1.2 ALW-土壤交互作用力测量

为了研究 ALW-土壤交互作用力的力学特性，本研究测量了在不同叶片倾斜角度和沉陷长度下 ALW 受到的牵引力和垂直升力. 试验中 $\theta_1$ 为 30°，$\alpha$ 分别取 50°，60° 和 70°，$l_s$ 分别取 10 mm，14 mm，18 mm，22 mm（阶段 II）.

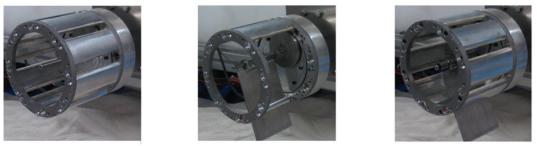


**图 4 三种车轮原型样机**

Fig. 4 Prototypes of three kinds of wheels

## 2.2 车轮-土壤交互作用力学测试平台

ALW-土壤交互作用力学测量试验在图 5 所示的长1 700 mm、宽 500 mm、高 800 mm 的测试平台上进行. 一个直流有刷伺服电机通过滚珠丝杠驱动搭载在两条水平导轨上的移动平台以期望的速度沿水平方向移动，同时使用一个增量式编码器（E6A2-CWZ3E，OMRON；Japan）测量丝杠的角位移. 试验车轮通过六轴力/力矩传感器（Delta SI-330-30，ATI；USA）连接到移动平台上. 在垂直方向上，当车轮沿直线轴承下降至期望沉陷量后，夹紧杆固定以保证车轮在旋转前进过程中保持恒定的车轮沉陷量. ALW 的三个关节角位置由三个绝对式编码器测量. 如图 6 所示，增量编码器和三个绝对编码器的信号通过安装于 PC 上的输入/输出数字卡（NI-6001，National Instrument；USA）以 166 Hz 的采样率进行数据采集. 根据编码器反馈的数据可求得叶片的真实运动轨迹. 力/力矩传感器测得的信号通过 A / D 卡（AD12-16（PCI），Contec；Japan）以相同的采样率采集. 试验用砂经过净化、筛选、通风和干燥处理，其凝聚力为 400 Pa，土壤摩擦角为 38.1°，土壤比重为1 480 Kg/m$^3$.

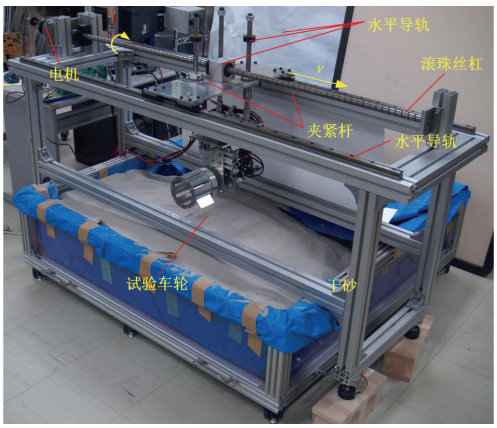



**图 5 ALW-土壤交互作用测试平台**

Fig.5 ALW-soil interaction testbed

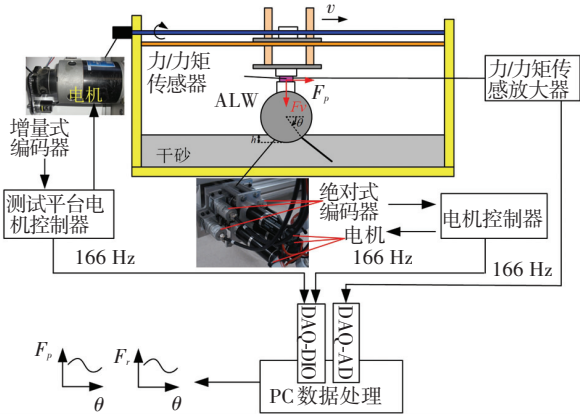



**图 6 数据采集系统**

Fig.6 Data acquisition

将力/力矩传感器测量得到的数据通过小波处理去除噪声，提取所需的力学信号[11]. 在所有试验中，每组试验参数对应的试验均重复 10 次，取其平均值作为试验最终结果.

# 3 三种车轮性能比较

## 3.1 试验结果

本节对 SW、CLW 和 ALW 的力学测量结果进行比较. 力的正方向定义如图 6 所示，正牵引力沿车轮的前进方向，而负的垂直升力可防止车轮下陷.

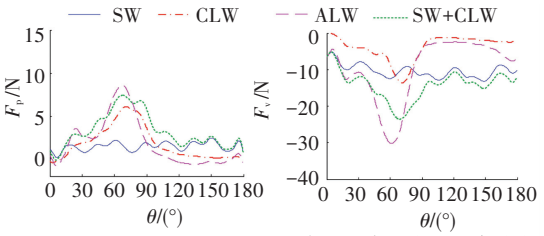
如图 7 所示，光滑车轮产生轻微的牵引力和垂直升力，它们由车轮表面与软土间的挤压和剪切作用产生. 在车轮表面安装叶片可以显著增加土壤的反作用力. 如图 7（b）所示，在相同运动参数（$\theta_1$ = 20°，$\alpha$ = 60°，$l_s$ = 15 mm）下，CLW 和 ALW 的最大牵引力分别比 SW 提高 200% 和 400%；与此不同，CLW 受到的垂直升力小于 SW. 试验结果表明叶片通过对土壤的剪切作用能够有效地增大牵引力，而轮壳可以产生更大的垂直升力以防止车轮沉陷. 因此，相较于在松软地面易打滑失效的光滑车轮和易发生沉陷的叶片型移动装置，ALW 机构可依靠其轮壳增大垂直升力从而克服车轮的沉陷，同时又通过叶片与土壤的交互作用进一步增大牵引力和垂直升力，更适合在松软地形环境中使用.

## 3.2 讨 论

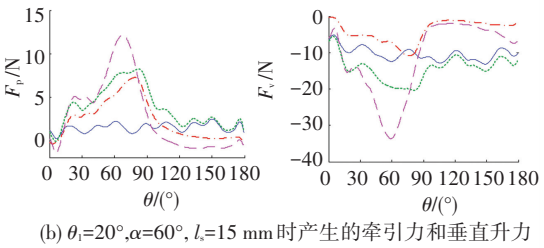
文中将 ALW-土壤交互作用力与 SW-土壤和 CLW-土壤交互作用力的总和进行比较来评估轮壳和叶片与砂土交互作用过程中的耦合作用（图 7）.

以图 7（b）为例，当 $\theta$ 处于 42° 到 78° 的范围内时，ALW 产生的牵引力和垂直升力比由 SW 和 CLW 产生的作用力的总和更大. 在 CLW-土壤交互作用试验中发现，叶片的刨掘作用会引起地面的隆起（图 8），地面隆起会显著影响叶片-土壤间的交互作

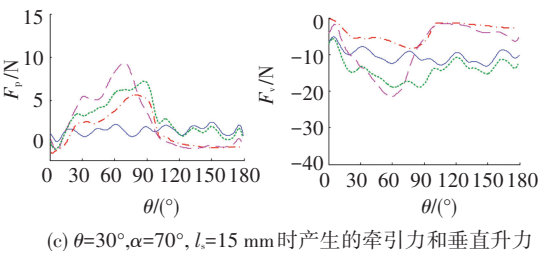
用[21]. 因此，本研究推断随着叶片在软土中的推动，叶片前方的地面趋于隆起，但是这种趋势会被刚性车轮外壳所限制，因此车轮和叶片之间的土壤会被压实. 这将增大作用在轮壳和叶片上的应力，并进一步增大移动机构受到的土壤反作用力. 由于干砂的这种变形特性，ALW 机构可以产生比其他运动机构更大的土壤反作用力. 然而，一旦车轮的旋转角度超过 78°，ALW-土壤交互作用力小于 SW 和 CLW 的总和，这是因为车轮底部的土壤被叶片刨掘后变得更加松软，这个不足可通过多叶片运动规划来克服.




(a) $\theta_1$=20°,α=50°, $l_s$=15 mm 时产生的牵引力和垂直升力



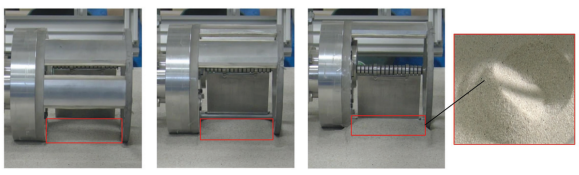

(b) $\theta_1$=20°,α=60°, $l_s$=15 mm 时产生的牵引力和垂直升力




(c) θ=30°,α=70°, $l_s$=15 mm 时产生的牵引力和垂直升力

**图 7　SW，CLW，ALW 以及 SW+CLW 产生的牵引力（左列）和垂直升力（右列）的比较**

Fig.7　Comparison of drawbar pulls (left panels) and vertical forces (right panels) generated by the SW, the CLW, the ALW, and the sum of SW and CLW



(a)　(b)　(c)

**图 8　车轮从(a)→(b)→(c)滚动前进过程中的地面隆起现象**

Fig.8　The phenomenon of ground swell as the wheel rolls from (a) → (b) → (c)

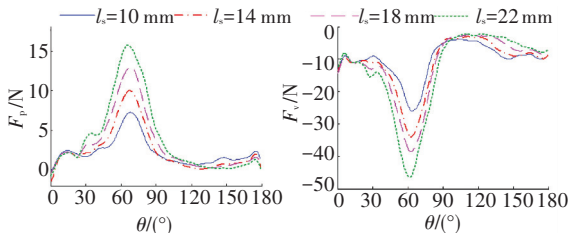
上述试验结果表明，ALW 机构可以利用轮壳和叶片对砂土变形的耦合作用来增加土壤反作用力. 但是这种复杂的土壤变形使得叶片型车轮-土壤交互作用力学模型的构建变得更加复杂. 目前大多数研究分别计算车轮轮壳-土壤和叶片-土壤的交互作用力，然后将其相加来估计机构-土壤的交互作用力. 这类建模方法虽然相对简单，但是忽略了轮壳和叶片的耦合作用影响，会降低预测模型的精度.

## 4　叶片运动轨迹的影响

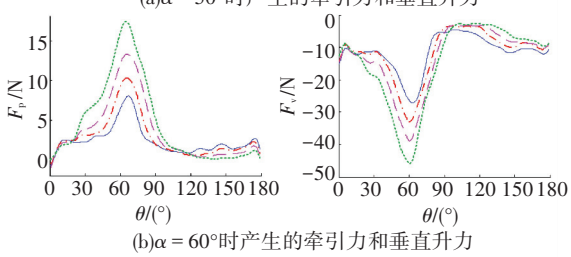
在先前研究中已经发现叶片的运动轨迹会显著影响叶片-土壤交互作用力[13]. 因此，通过调整叶片的运动轨迹，ALW 机构有望进一步提高其运动性能. 本章通过测量安装单一叶片的 ALW 机构在不同叶片运动轨迹下受到的土壤反作用力来分析叶片倾斜角度和沉陷长度的影响.

### 4.1　试验结果

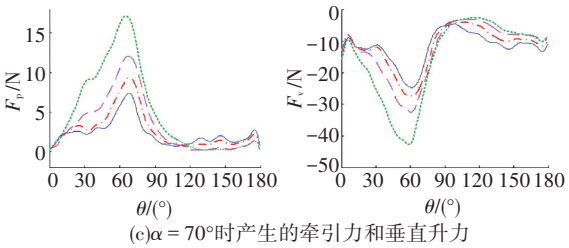
为了研究叶片的沉陷长度对土壤反作用力的影响，分别对叶片沉陷长度为 10 mm，14 mm，18 mm，22 mm 的情况下 ALW 所受的土壤反作用力进行了测量和比较. 如图 9 所示，ALW-土壤交互作用力表现出相似的趋势，沉降长度越长，所产生的牵引力和垂直升力越大.




(a)α = 50°时产生的牵引力和垂直升力




(b)α = 60°时产生的牵引力和垂直升力




(c)α = 70°时产生的牵引力和垂直升力

**图 9　倾斜角度为 50°，60°和 70°时，产生的牵引力（左列）和垂直升力（右列）**

Fig.9　Drawbar pulls (left panels) and vertical forces (right panels) at inclination angles α of 50°, 60°, and 70°

为了研究叶片倾斜角度对 ALW-土壤交互作用力的影响，在试验中其角度值分别设定为 50°，60°和 70°. 如图 10 所示，叶片的倾斜角度对 ALW 的牵引力和垂直升力无明显影响.

### 4.2 讨论

如图 9 所示,叶片沉陷长度越长,与土壤的接触面积就越大,从而增加了叶片-土壤交互作用力. 因此,通过调整叶片的沉降长度,可以控制 ALW 模块受到的合力.

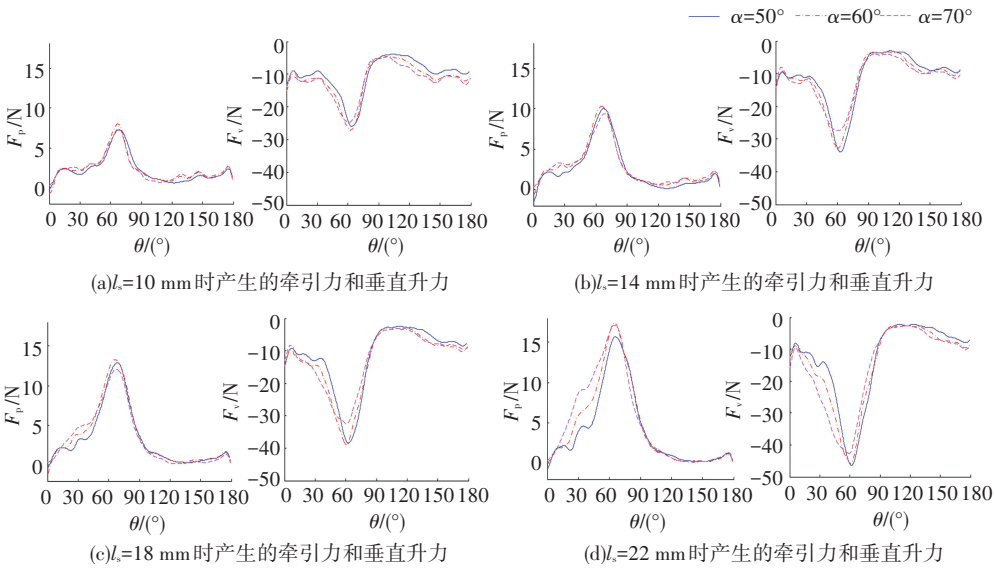
为了定量描述叶片沉降长度对土壤反作用力的影响,表 3 列出了各运动参数下测得的最大反作用力. 参考文献[14]的分析方法,在一定的倾斜角度下,沉降长度 $l_s$ 和最大牵引力 $F_p^{max}$、最大垂直升力 $F_v^{max}$ 之间的关系可通过下列二次函数近似:

$$F_P^{max} = K_1^{F_P} l_s^{\ 2} + K_2^{F_P} l_s + K_3^{F_P}, \quad (3)$$

$$F_v^{max} = K_1^{F_v} l_s^{\ 2} + K_2^{F_v} l_s + K_3^{F_v}. \quad (4)$$

式(3)和式(4)中各系数的拟合结果列于表 4. 如图 11 所示,通过比较拟合公式的计算结果与试验结果发现,在所有的倾斜角度下,最大的 $F_p$ 和 $F_v$ 是关于沉降长度 $l_s$ 的二次函数,即当叶片插入土壤越深,受到的反作用力增加速度越快.

然而,过长的叶片长度会增加车轮沉陷量、牵引力和垂直升力的波动[22],从而破坏机器人的运动稳定性. 因此,在相对松软的地面上,叶片应该更深地插入软土,并通过主动调节叶片轨迹抑制车轮沉陷量和土壤反作用力的波动[11];在相对坚实的地面上,车轮可通过其表面和地面之间的摩擦力产生足够的牵引力,此时叶片沉陷长度应尽量减小,从而减少土壤反作用力的周期性波动. 显然,ALW 机构可以通过主动控制叶片的运动轨迹实现上述功能,这将在今后的工作中讨论.




(a)$l_s$=10 mm时产生的牵引力和垂直升力 (b)$l_s$=14 mm时产生的牵引力和垂直升力

(c)$l_s$=18 mm时产生的牵引力和垂直升力 (d)$l_s$=22 mm时产生的牵引力和垂直升力

**图 10 沉陷长度为 10,14,18 和 22 mm 时,产生的牵引力(左列)和垂直升力(右列)**

Fig.10 Drawbar pulls (left panels) and vertical forces (right panels) at sinkage lengths ls of 10, 14, 18 and 22 mm

**表 3 各参数设置下测得的 ALW-土壤最大交互作用力**

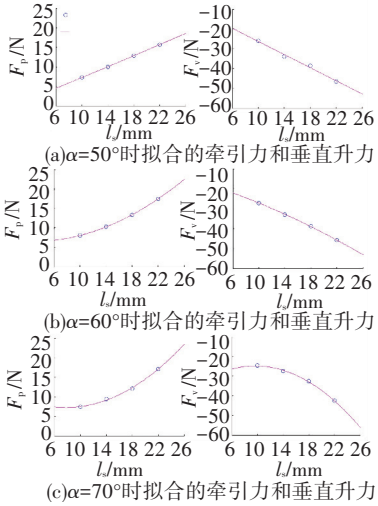
Tab.3 The maximum ALW-soil interaction forces at different parameter setting

| $l_s$ / | α = 50° | | α = 60° | | α = 70° | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| mm | $F_p$ /N | $F_v$ /N | $F_p$ /N | $F_v$ /N | $F_p$ /N | $F_v$ /N |
| 10 | 7.254 | −26.014 | 8.018 | −27.120 | 7.386 | −24.693 |
| 14 | 9.999 | −33.998 | 10.284 | −32.965 | 9.348 | −27.384 |
| 18 | 12.882 | −38.521 | 13.289 | −38.852 | 12.047 | −32.528 |
| 22 | 15.699 | −46.489 | 17.412 | −45.805 | 17.145 | −42.692 |

**表 4 公式(3)和(4)中各系数的拟合结果**

Tab.4 Coefficients of (3) and (4) determined by fitting to experimental data

| α/(°) | $K_1^{F_P}$ | $K_2^{F_P}$ | $K_3^{F_P}$ | $K_1^{F_v}$ | $K_2^{F_v}$ | $K_3^{F_v}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 | 0.001 | 0.669 | 0.434 | 0.000 | −1.656 | −9.819 |
| 60 | 0.029 | −0.148 | 6.619 | −0.017 | −0.994 | −15.495 |
| 70 | 0.049 | −0.768 | 10.256 | −0.116 | 2.258 | −35.726 |




(a)α=50°时拟合的牵引力和垂直升力

(b)α=60°时拟合的牵引力和垂直升力

(c)α=70°时拟合的牵引力和垂直升力

**图 11 倾斜角度 α 为 50°, 60°, 70°时,根据公式(3)、(4)拟合的牵引力(左列)和垂直升力(右列)**

Fig.11 Drawbar pulls fitted by (3) (left panels) and vertical forces fitted by (4) (right panels) at inclination angles α of 50°, 60°, and 70°

## 5 结　论

1）车轮表面和叶片与砂土具有耦合作用影响，因此 ALW 可以利用砂土的变形特性增大土壤反作用力.

2）ALW 受到的牵引力和垂直升力是关于叶片沉陷长度的二次函数，因此可通过调整叶片沉陷长度来改善 ALW 机构在软土地面上的运动性能.

3）ALW 受到的牵引力和垂直升力与叶片的倾斜角度没有明显的关系.

4）在未来的研究中，将探究多叶片 ALW 与软土的交互作用机理，并提出使 ALW 在软土环境中平稳行进的叶片轨迹在线生成方法.

## 参考文献


[1] YOUNG K. Mars rover escapes from the "bay of lamentation"[EB/OL][2006-06-06]. https://www.newscientist.com/article/dn9286-mars-rover-escapes-from-the-bay-of-lamentation/.

[2] LIU Jicheng, GAO Haibo, DENG Zongquan. Experimental analysis on effect of grouser circumferential angle on motion performance of lunar rover wheel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series),2011,18(1):131-137.

[3] AOKI T, MURAYAMA Y, HIROSE S. Development of a transformable three-wheeled Lunar Rover: Tri-Star IV[J]. Journal of Field Robotics, 2013, 31(1):206-223.

[4] WAKABAYASHI S, SATO H, NISHIDA S. Design and mobility evaluation of tracked lunar vehicle[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(3):105-114.

[5] NAGATANI K, KINOSHITA H, YOSHIDA K, et al. Development of leg-track hybrid locomotion to traverse loose slopes and irregular terrain[J]. Journal of Field Robotics, 2011, 28(6):950-960.

[6] KUBOTA T, KURODA Y, KUNII Y,et al. Small, light-weight rover "Micro5" for lunar exploration[J]. Acta Astronautica, 2003, 52(2-6):447-453.

[7] HERMAWAN W, OIDA A, YAMAZAKI M. The characteristics of soil reaction forces on a single movable lug[J]. Journal of Terramechanics, 1997, 59(34):23-35.

[8] HERMAWAN W, YAMAZAKI M, OIDA A. Experimental analysis of soil reaction on a lug of a movable lug wheel[J]. Journal of Terramechanics, 1998, 35(2): 119-135.

[9] BAUER R, LEUNG W, BARFOOT T. Experimental and simulation results of wheel-soil interaction for planetary rovers[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton: IEEE,2005:586-591.

[10] 全齐全.月球车车轮与土壤作用的力学特性测试系统的研制与试验[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
QUAN Qiquan.Development and experiment of test-bed of wheel soft interaction for lunar rover[D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2007.

[11] YANG Y, SUN Y, MA S. Drawbar pull of a wheel with an actively actuated lug on sandy terrain[J]. Journal of Terramechanics, 2014, 56(56): 17-24.

[12] GEE C, CHANCELLOR W. Pull and lift characteristics of single lugs on rigid wheels in wet rice soils[J]. Transactions of the Asae, 1976, 19(3):0433-0441.

[13] HERMAWAN W, YAMAZAKI M, OIDA A. Theoretical analysis of soil reaction on a lug of the movable lug cage wheel[J]. Journal of Terramechanics, 2000, 37(2): 65-86.

[14] YANG Y, SUN Y, MA S, et al. Characteristics of normal and tangential forces acting on a single lug during translational motion in sandy soil[J]. Journal of Terramechanics, 2014, 55(7): 47-59.

[15] SUTOH M, YUSA J, ITO T, et al. Traveling performance evaluation of planetary rovers on loose soil[J]. Journal of Field Robotics, 2012, 29(4): 648-662.

[16] LIU J, GAO H, DENG Z. Effect of straight grousers parameters on motion performance of small rigid wheel on loose sand[J].Information Technology Journal,2008, 7(8):1125-1132.

[17] DING L, DENG Z, GAO H, et al. Experimental study and analysis of the wheels' steering mechanics for planetary exploration wheeled mobile robots moving on deformable terrain[J]. The International Journal of Robotics Research, 2013, 32(6): 712-743.

[18] 丁亮，高海波，邓宗全，等. 基于应力分布的月球车轮地相互作用地面力学模型[J]. 机械工程学报, 2009, 45(7):49-55.
DING Liang, GAO Haibo, DENG Zongquan, et al. Terramechanics model for wheel-terrain interaction of lunar rover based on stress distribution [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45 (7): 49-55.

[19] YANG Y, SUN Y, MA S. Effect of lug sinkage length to drawbar pull of a wheel with an actively actuated lug on sandy terrain[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2014). Hongkong: IEEE,2014: 2932-2937.

[20] 谷侃锋，王洪光，赵明扬. 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 Kanfeng, WANG Hongguang, ZHAO Mingyang. Research on the wheel design of manned lunar rover vehicle based on experiment of driving performance [J]. Computer Simulation, 2008, 25 (6): 25-29.

[21] YANG Y, SUN Y, YAMAMOTO R, et al. Influence of moving direction on normal force acting on a single lug during translational motion in sandy soil[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014). Bali: IEEE,2014:425-430.

[22] SUTOH M, NAGAOKA K, NAGATANI K, et al., Evaluation of influence of surface shape of locomotion mechanism on traveling performance of planetary rovers[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2012). Paul: IEEE,2012:3419-3424.


（编辑　王小唯）