

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.031

# 基于振动的土壤挖掘阻力与耗能特性试验研究

王东伟 王家胜 尚书旗

(青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

**摘要:** 为了研究振动频率、振动方向等参数对振动式土壤挖掘降阻特性和耗能特性的影响,设计开发了振动式土壤挖掘阻力试验台。经理论分析、计算确定了振动挖掘机构运动参数。在土壤平均相对湿度为27%、平均土壤坚实度为2.2 MPa条件的室内土槽系统中,在挖掘深度150 mm、前进速度0.15~1.00 m/s、振动频率2~20 Hz的因素条件下,利用该试验台开展了土壤振动挖掘阻力和耗能特性试验研究。结果表明,振动式土壤挖掘能够有效降低工作阻力,其降阻率先随着振动频率增大而增大,在2~20 Hz频率段,前后方向振动和垂向振动振幅分别为13 mm和10 mm时,其最大降阻率分别可达到21%和25%。降阻率在10~14 Hz后增长速度变缓,表明该区间处于土壤的自振频率区间。前后方向振动下土壤挖掘降阻率和振动速度与前进速度的比值有关,当振动速度小于前进速度时,降阻率比较小,随着振动频率增加而缓慢增大;当振动速度大于前进速度后,在对应的频率点其降阻率会迅速上升,之后增长速度逐渐变缓。由于需要额外激振能量输入,两种振动方向的强迫振动式土壤挖掘综合耗能并不减少,在振动频率低于10 Hz下,耗能比范围在1~1.07,但超过10 Hz后,耗能比会随着振动频率增大以较快速度增加。振幅的增大能够使土壤挖掘阻力获得一定的降低,但同时振动挖掘耗能有较大的增加。

**关键词:** 土壤; 挖掘阻力; 耗能; 振动; 土槽试验

**中图分类号:** S225.7    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0267-06

## Experimental Research on Soil Digging Resistance and Energy Consumption Based on Vibration

WANG Dongwei WANG Jiasheng SHANG Shuqi

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

**Abstract:** In order to study the influence of vibration frequency, vibration direction and other parameters on the resistance reduction and energy consumption characteristics of vibrating agricultural soil digging, a vibration soil digging resistance test-bed was designed and developed. Through theoretical analysis and calculation, the motion parameters of the vibration digging mechanism were determined. In the indoor soil tank system with 27% soil moisture and 2.2 MPa soil firmness, under the test conditions of 150 mm digging depth, 0.15~1.00 m/s forward speed and 2~20 Hz vibration frequency, the experimental study on the characteristics of excavation resistance and energy consumption of vibration test soil was carried out by using the test-bed. The test results showed that the working resistance of the vibration soil digging can be effectively reduced. The resistance reduction was increased with the increase of vibration frequency, during the frequency of 2~20 Hz, the maximum resistance reduction rates of forward-backward vibration and vertical vibration can reach 21% and 25%, respectively. The increasing rate of resistance reduction was slowed down after 10~14 Hz, which indicated that the range was in the natural frequency range of soil. The resistance reduction rate of soil digging was related to the ratio of vibration speed and forward speed. When the vibration speed was less than the forward speed, the resistance reduction rate was relatively small and only increased slowly with the increase of frequency. When the vibration speed was greater than the forward speed, the resistance reduction rate would be risen rapidly at the corresponding

收稿日期: 2020-07-31 修回日期: 2020-09-12

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFD0702103)、山东省自然科学基金面上项目(ZR2017MEE016)、山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ009-7)和山东省农机装备研发创新计划项目(2017YF007, 2018YF005-02)

**作者简介:** 王东伟(1981—),男,教授,主要从事根茎类作物智能农机装备研究, E-mail: 303462564@qq.com

**通信作者:** 王家胜(1976—),男,教授,主要从事现代农机装备研究, E-mail: jiasheng0813@163.com

frequency point, after that, the growth rate was gradually slowed down. Due to the need for additional excitation energy input, the comprehensive energy consumption of forced vibration soil digging in two vibration directions was not reduced. Under the vibration of less than 10 Hz, the energy consumption ratio was in the range of 1 ~ 1.07, but when the vibration frequency exceeded 10 Hz, the energy consumption ratio would be increased rapidly with the increase of frequency. The increase of amplitude can reduce the resistance of soil digging, but the energy consumption of vibration digging would be increased greatly.

**Key words:** soil; digging resistance; energy consumption; vibration; soil bin tests

## 0 引言

花生、胡萝卜、薯类等根茎类作物果实生长在土壤中,机械挖掘收获过程中普遍存在工作阻力大、耗能高的问题。降低该类装备触土部件的挖掘阻力,不仅能够节能降耗,而且还可降低与之配套的拖拉机的功率要求,同时有利于减轻对田间土壤的压实。农业触土部件的降阻技术一直是该领域研究的重点。如文献[1-3]将仿生技术应用到土壤工作部件中,其降阻效果显著。王金武等<sup>[4]</sup>设计了一种用于胡萝卜收获的仿生降阻松土铲,挖掘阻力得到了一定降低。郝建军等<sup>[5]</sup>设计了一种楔形减阻旋耕刀,相比国标旋耕刀平均切削阻力下降10%以上。振动挖掘方式也是一种降低土壤挖掘阻力的有效途径。触土部件的振动形式分为自激振动和强迫振动。自激振动无需额外动力输入,是利用挖掘阻力大小的变化激励具有弹性的触土部件产生振动。研究表明,自激振动触土部件具有一定的降阻效果,通常能够降阻10%以上<sup>[6-11]</sup>。强迫振动挖掘方式则需要外界能量和振动机构驱动触土部件保持固定的频率和振幅振动。国内外学者针对不同部件结构 and 应用条件开展了相关研究<sup>[12-21]</sup>,当前研究多应用于土壤深松作业,因各触土部件结构型式和土壤工作条件不同,其降阻与节能效果均存在差异。

本文以根茎类作物挖掘铲为研究对象,考虑不同的振动频率、振动方向、前进速度等因素影响下,通过构建试验测试平台,试验测定并系统分析振动挖掘的降阻特性和耗能特性,获得各因素对挖掘阻力和综合能耗的影响关系,为根茎类作物触土部件的优化设计和参数匹配提供理论依据。

## 1 试验台设计

### 1.1 结构方案与原理

根据试验要求,试验台需具备测试土槽内土壤的挖掘阻力、能耗等功能,并且能够在一定范围内调节触土部件振动频率、振幅、振动方向、前进速度等因素值。为此,设计振动式土壤挖掘阻力试验台结构如图1所示。该试验台主要由液压系统、

多连杆振动机构、挖掘铲、力学测试系统、行走装置和计算机等组成。其工作原理为:试验台由土槽车牵引前进,同时土槽车输出动力经动力输入轴驱动液压泵工作,液压系统包括两条回路,一路驱动挖掘装置升降液压缸,另一回路驱动调速液压马达。调速液压马达经扭矩转速传感器驱动多连杆振动机构,带动挖掘铲振动。振动频率和振幅可分别通过改变调速液压马达的转速和更换不同偏心距的偏心轴曲柄来调节。利用扭矩转速传感器测试数据可计算出激振频率和激振耗能。振动挖掘装置与上支架连接,上支架经固定在机架上的滑轨可前后滑动,再由拉力传感器将上支架与机架连接,可测得挖掘阻力,利用阻力和前进速度可计算挖掘耗能。挖掘铲不同的安装位置对应不同的振动方向,挖掘铲I的振动方向与铲面平行,挖掘铲II的振动方向与铲面垂直。各传感器测得力学数据经数据采集卡输入计算机软件测试系统后显示和储存。

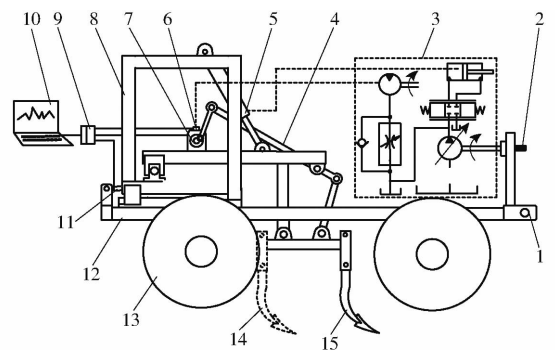


图1 振动式土壤挖掘阻力试验台结构示意图  
Fig. 1 Structural sketch of test bench for vibrating soil digging resistance

1. 牵引点 2. 动力输入轴 3. 液压装置 4. 多连杆振动机构
5. 升降液压缸 6. 扭矩转速传感器 7. 调速液压马达 8. 上支架
9. 数据采集卡 10. 计算机 11. 拉压力传感器 12. 机架
13. 行走轮 14. 挖掘铲I 15. 挖掘铲II

### 1.2 振动挖掘机构运动参数

振动挖掘机构是利用多连杆机构实现将液压马达的输出转动转换为挖掘铲的往复振动。其结构如图2所示。图中曲柄1、连杆2、摇杆3和机架杆4构成曲柄摇杆机构,当曲柄1与连杆2两次共线时分别为摇杆摆动的两个极限位置,所对应的摇杆3与机架杆4的夹角分别由余弦定理求得,即

$$\varphi_1 = \arccos \frac{l_3^2 + l_4^2 - (l_2 + r_1)^2}{2l_3l_4} \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \arccos \frac{l_3^2 + l_4^2 - (l_2 - r_1)^2}{2l_3l_4} \quad (2)$$

式中  $r_1$ ——曲柄 1 半径, mm  
 $l_2$ ——连杆 2 长度, mm  
 $l_3$ ——摇杆 3 长度, mm  
 $l_4$ ——机架杆 4 长度, mm  
 $\varphi_1$ ——极限 I 时摇杆 3 与机架杆 4 夹角, ( $^\circ$ )  
 $\varphi_2$ ——极限 II 时摇杆 3 与机架杆 4 夹角, ( $^\circ$ )  
 取  $r_1 = 5 \text{ mm}$ ,  $l_2 = 150 \text{ mm}$ ,  $l_3 = 400 \text{ mm}$ ,  $l_4 = 460 \text{ mm}$ ,  
 则由式(1)、(2)得到,  $\varphi_1 = 19.2^\circ$ ,  $\varphi_2 = 17.7^\circ$ 。

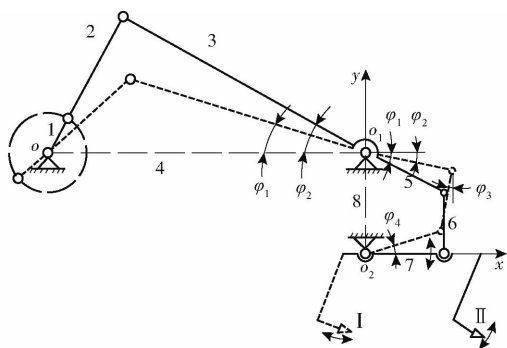


图 2 振动挖掘机构简图

Fig. 2 Schematic of vibration digging mechanism

摇杆 5、连杆 6、摇杆 7 及机架杆 8 构成双摇杆机构。其中摇杆 5 与摇杆 3 为同一杆, 两杆摆角相同。摇杆 5 长度  $l_5$ 、连杆 6 长度  $l_6$ 、摇杆 7 长度  $l_7$ 、机架杆 8 长度  $l_8$  构成的封闭矢量方程为

$$l_5 + l_6 = l_7 + l_8 \quad (3)$$

各矢量在  $x$ 、 $y$  轴上的投影方程为

$$\begin{cases} l_5 \cos \varphi_1 - l_7 = 0 \\ l_5 \sin \varphi_1 + l_6 - l_8 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

对于另一共线状态下, 由封闭矢量方程得矢量在  $x$ 、 $y$  轴上的投影方程为

$$\begin{cases} l_5 \cos \varphi_2 - l_6 \sin \varphi_3 - l_7 \cos \varphi_4 = 0 \\ l_5 \sin \varphi_2 + l_6 \cos \varphi_3 + l_7 \sin \varphi_4 - l_8 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中  $\varphi_3$ ——连杆 6 角度变化量, ( $^\circ$ )

$\varphi_4$ ——摇杆 7 角度变化量, ( $^\circ$ )

根据式(4)约束, 取  $l_5 = 200 \text{ mm}$ ,  $l_6 = 138 \text{ mm}$ ,  $l_7 = 188 \text{ mm}$ ,  $l_8 = 200 \text{ mm}$ , 代入式(5), 可求出  $\varphi_3 \approx 2^\circ$ ,  $\varphi_4 \approx 3^\circ$ 。

由图 2 可知, 挖掘铲在点 I 和点 II 的振幅分别为

$$A_I = l_{o_2I} \varphi_4 \pi / 360 \quad (6)$$

$$A_{II} = l_{o_2II} \varphi_4 \pi / 360 \quad (7)$$

式中  $A_I$ ——前后振动振幅, mm

$A_{II}$ ——垂向振动振幅, mm

$l_{o_2I}$ ——前后振动铲尖到支点距离, mm

$l_{o_2II}$ ——垂向振动铲尖到支点距离, mm

结合铲刀及铲柄结构参数, 可得  $l_{o_2I} = 400 \text{ mm}$ ,  $l_{o_2II} = 500 \text{ mm}$ , 与  $\varphi_4 = 3^\circ$  代入式(6)、(7)得  $A_I = 13 \text{ mm}$ ,  $A_{II} = 10 \text{ mm}$ 。在本机构中, 曲柄即是偏心轴, 曲轴半径即为轴的偏心距。因此, 只需更换不同偏心距的偏心轴就可实现挖掘铲振幅的调节。

## 2 挖掘阻力与耗能试验

### 2.1 试验设备与条件

试验在青岛农业大学室内土槽(槽长 35 m、宽 2 m)中进行, 由 TCC2.5 型电力四驱土槽车牵引自行研制的振动式土壤挖掘阻力试验台(图 3)。



图 3 土槽试验测试系统

Fig. 3 Soil tank test system

土槽车最大牵引力 15 kN, 行驶速度 0.5 ~ 10 km/h 无级可调; 动力输出轴转速 0 ~ 1 200 r/min 无级调节。试验采用 CYB-803S 型动态扭矩传感器, 扭矩范围 0 ~ 100 N·m, 转速范围 0 ~ 3 000 r/min, 综合误差 0.1%。工作阻力采用 TX-LS1 型拉压力传感器测量, 测力范围 0 ~ 5 000 N, 精度  $\pm 5 \text{ N}$ 。试验用挖掘铲为三角翼铲, 铲面两翼宽为 220 mm, 铲长 300 mm。其他仪器包括 10 m 卷尺, SL-TSC 型土壤紧实度仪等。土槽内土壤为壤土, 试验时保持平均土壤相对湿度为 27%、土壤坚实度为 2.2 MPa。

### 2.2 试验方法

选取土壤挖掘阻力和挖掘耗能作为试验指标, 选振动频率、振动方向、前进速度和振幅为试验因素。各因素取值如表 1 所示。

试验前, 首先制备土槽土壤, 土壤制备包括旋

表 1 试验因素

Tab. 1 Test factors and values

因素	数值
振动频率 $f/\text{Hz}$	2, ..., 18, 20
前进速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.15, 0.30, 0.50, 1.00
振动方向及振幅 $A/\text{mm}$	13, 18(前后); 10, 15(垂向)

耕、平整、浇水、压实等4个流程。制备后的土床利用土壤湿度计和土壤坚实度仪多点检测,满足要求的土壤湿度和坚实度后进行试验。所有试验挖掘深度设置为150 mm,铲入土角为22°。试验区长度取30 m,前后5 m为调试区,中间20 m为测试区。

测试系统记录试验过程中随时间变化的挖掘阻力、液压马达扭矩和转速、前进速度等数据,用以计算土壤挖掘耗能。土壤挖掘耗能计算式为

$$E_{\text{I}} = Rvt \quad (8)$$

式中  $E_{\text{I}}$ ——克服挖掘阻力耗能, J

$R$ ——挖掘阻力, N

$t$ ——时间, s

振动激励耗能计算式为

$$E_{\text{II}} = \frac{\pi Tnt}{30} \quad (9)$$

式中  $E_{\text{II}}$ ——振动激励耗能, J

$T$ ——液压马达输出扭矩, N·m

$n$ ——液压马达转速, r/min

试验区制备土床宽度1.2 m,每次制备土床可以通过横移挖掘铲重复2次试验。由于每次制备土床存在差异,为了保证对比试验条件的一致性,设置每次振动挖掘试验对应一次无振动挖掘试验进行对比,每一组对比试验在同一土床进行,计算对比试验的降阻率和耗能比。其中降阻率计算公式为

$$u = \frac{R_o - R_v}{R_o} \times 100\% \quad (10)$$

式中  $u$ ——降阻率, %

$R_o$ ——无振动挖掘阻力, N

$R_v$ ——振动状态下土壤挖掘阻力, N

耗能比计算公式为

$$e = \frac{E_v}{E_o} \quad (11)$$

式中  $e$ ——耗能比

$E_v$ ——振动状态下挖掘总耗能, J

$E_o$ ——无振动挖掘耗能, J

### 2.3 结果与分析

图4为前进速度为0.5 m/s时,激振频率8 Hz、振幅10 mm的垂向振动与无振动土壤挖掘阻力对比试验数据。可以看出,振动状态下挖掘阻力低于非振动挖掘阻力,经计算得到非振动下阻力平均值为1.32 kN,振动挖掘阻力为1.05 kN,阻力降低20.5%。图5为与该组对比试验相对应的激振扭矩测量值。将图4、5统计数据代入式(8)、(9)、(11)可求得耗能比为1.06,即该次对比试验中振动挖掘比非振动挖掘多耗能6%。

为了分析触土部件的振幅对土壤挖掘阻力和挖

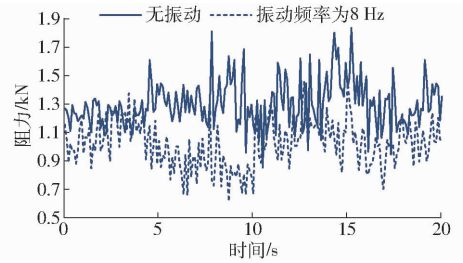


图4 挖掘阻力对比试验结果

Fig. 4 Comparison test data of digging resistance

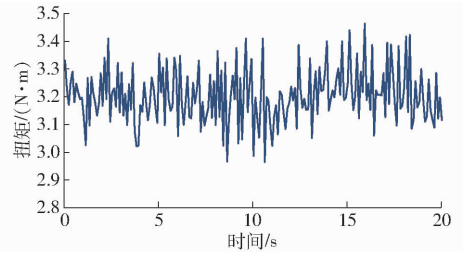


图5 激振液压马达扭矩变化曲线

Fig. 5 Torque of exciting hydraulic motor

掘耗能的影响,通过更换偏心轴,将触土部件的振幅增加为15 mm,上述其他参数保持不变,利用同样方法对试验数据计算统计求得降阻率和耗能比分别为24.3%和1.17。对比分析可以看出,振幅增大后,土壤挖掘阻力的降阻率由20.5%提高到24.3%,这对进一步降阻有一定帮助,但同时振动挖掘的耗能比也从1.06剧增到1.17,耗能增幅较大。

为了获得激振频率和振动方向对降阻和耗能特性的影响关系,按照上述方法可计算得到在前进速度为0.5 m/s、前后振动和垂向振动所对应振幅分别为13 mm和10 mm下,不同频率对应的降阻率和耗能比,如图6、7所示。

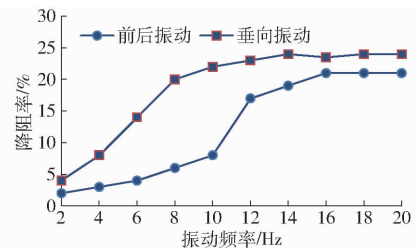


图6 降阻率-频率关系曲线

Fig. 6 Relationship between resistance reduction rate and frequency

由图6可知,两振动方向下,降阻率-频率曲线具有相似性,均是随着振动频率的增大而增大;但两者变化的规律存在差异,前后方向振动下,随着频率的增大,降阻率一开始增大缓慢,在10 Hz时,降阻率迅速增大,在14~16 Hz间达到21%,之后增大比较缓慢;垂向振动状态下,降阻率随着频率增大一开始就较快上升,在8 Hz后增大速度变缓,在该频段最大值达到25%。结果表明,垂向振动的降阻率

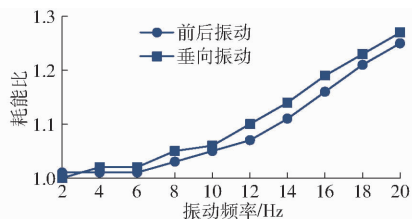


图7 耗能比与振动频率关系曲线

Fig. 7 Relationship between energy consumption rate and frequency

在整体上要高于前后振动的降阻率。

由图7可以看出,两种方向的土壤振动挖掘的综合能耗都高于无振动挖掘的耗能。在低于10 Hz振动下,耗能比基本低于1.07,但超过10 Hz后,耗能比以较快速度增加。由此看出,振动挖掘的综合耗能并不减少,而且随着频率的增加而增大。

由图8a可以看出,随着频率增大,4条降阻率曲线都存在到达某一频率“激增”的现象,在“激增”频率前,降阻率比较低,“激增”频率后,降阻率增加变得缓和。

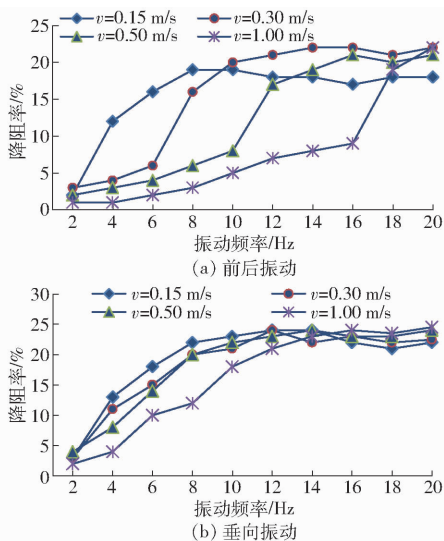


图8 不同速度下降阻率与振动频率关系曲线

Fig. 8 Relationship between resistance reduction rate and frequency at different velocities

由图8a还可以看出,前进速度小所对应的“激

增”频率小,前进速度增大所对应的“激增”频率也增大,基本呈线性比例关系。由此可知,前后往复振动下,土壤挖掘降阻率的激增跟振动速度与前进速度的比值有关,当振动速度大于前进速度时,由于在挖掘铲向后振动的半个周期内铲刃不与前方的土接触和冲击,综合阻力得到有效降低;而振动速度小于前进速度时,铲刃一直是切土状态,其降阻效果低于前者。

由图8b可知,4条曲线均随着频率的增大而增大,到达10~14 Hz区间后,降阻率的变化不再明显。这表明,在此频率区间,已经达到了土壤的共振频率,土壤共振会引起并加剧坚实土壤的快速破裂,从而导致挖掘阻力下降。

### 3 结论

(1) 设计了振动式土壤挖掘阻力试验台,计算分析了振动挖掘机构运动参数。利用该试验台能够测算不同振动频率和不同振动方向下土壤挖掘阻力和耗能。

(2) 开展了振动式土壤挖掘阻力和耗能特性试验研究,试验结果表明:振动式土壤挖掘能够有效降低工作阻力,其降阻率随着振动频率增大而增大,在2~20 Hz频率段,前后方向振动的最大降阻率可达到21%,垂向振动的最大降阻率可达到25%。

(3) 前后方向振动下土壤挖掘降阻率与振动速度与前进速度的比值有关,当振动速度小于前进速度时,降阻率比较小,随着频率增加而缓慢增大;当振动速度大于前进速度后,在对应的频率点其降阻率会迅速上升,之后增长速度逐渐变缓。

(4) 振动式土壤挖掘,由于需要额外激振能量输入,其综合耗能并不减少,而且其耗能会随着振动频率的增大而增加。特别是10 Hz以后,耗能以较快速度增大,而降阻率在10~14 Hz增速变缓,因此振动频率的设置范围可考虑小于14 Hz。振幅的增大能够使土壤挖掘阻力获得一定的降低,但同时振动挖掘耗能会有较大的增加。

### 参 考 文 献

- [1] 张金波, 佟金, 马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4):141-145. ZHANG Jinbo, TONG Jin, MA Yunhai. Design and experiment of bionic anti-drag subsoiler [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):141-145. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20140422&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140422&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.022. (in Chinese)
- [2] 张东光. 蚯蚓粘液脱附减阻机理和仿生沃土应用[D]. 长春:吉林大学,2016. ZHANG Dongguang. Drag-reducing mechanisms of earthworm mucus and bionic application on sub-soil liquid fertilizer [D]. Changchun: Jilin University, 2016. (in Chinese)
- [3] 杨玉婉, 佟金, 马云海, 等. 基于鼯鼠多趾结构特征的仿生切土刀片设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12):122-128. YANG Yuwan, TONG Jin, MA Yunhai, et al. Design and experiment of bionic soil-cutting blade based on multi-claw combination of mole rat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12):122-128.

- [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181215&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181215&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.015. (in Chinese)
- [4] 王金武,李响,高鹏翔,等. 胡萝卜联合收获机高效减阻松土铲设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(6):93-103. WANG Jinwu, LI Xiang, GAO Pengxiang, et al. Design and experiment of high efficiency drag reducing shovel for carrot combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6):93-103. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20200610&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200610&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.010. (in Chinese)
- [5] 郝建军,于海杰,赵建国,等. 楔形减阻旋耕刀设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(8):55-64. HAO Jianjun, YU Haijie, ZHAO Jianguo, et al. Design and test of wedge drag reduction rotary blade[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8):55-64. (in Chinese)
- [6] SOEHARSON O, RADITE P A. Analytical study of self-excited vibration on single degree of freedom vibratory-tillage[J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2010, 5(6):61-66.
- [7] WANG Jiasheng, JIANG Jinlin, ZHAO Shuai. Experimental reasearch on resistance reduction for carrot digging part with self-excited vibration[C]//Proceedings of ICMECA 2016, 2016.
- [8] BERNTSEN R, BERRE B, TORP T, et al. Tine forces established by a two-level model and the draught requirement of rigid and flexible tines[J]. Soil & Tillage Research, 2006, 90(1-2):230-241.
- [9] 邱立春,李宝筏. 自激振动深松机减阻试验研究[J]. 农业工程学报,2000,16(6):72-76. QIU Lichun, LI Baofa. Experimental study on the self-excited vibration subsoiler for reducing draft force[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(6):72-76. (in Chinese)
- [10] 周华,张文良,杨全军,等. 滑切型自激振动减阻深松装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(5):71-78. ZHOU Hua, ZHANG Wenliang, YANG Quanjun, et al. Design and experiment of sliding cutting self-excited vibration drag reduction subsoiling device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):71-78. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190508&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190508&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.008. (in Chinese)
- [11] 王云霞,张东兴,杨丽,等. 液压激振源自激振动深松机深松单体设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(11):40-48. WANG Yunxia, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of hydraulically self-excited vibration subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11):40-48. (in Chinese)
- [12] RAO G, CHAUDHARY H, SHARMA A. Optimal design and analysis of oscillatory mechanism for agricultural tillage operation[J]. SN Applied Sciences, 2019,1(8):19-25.
- [13] RAO G, CHAUDHARY H, SHARMA A. Design and analysis of vibratory mechanism for tillage application[J]. Open Agriculture, 2018, 3(1):437-443.
- [14] RAZZAGHI E, SOHRABI Y. Vibratory soil cutting a new approach for the mathematical analysis[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 159:33-40.
- [15] NIYAMAPA T, SALOKHE V M. Soil disturbance and force mechanics of vibrating tillage tool[J]. Journal of Terramechanics, 2000, 37(3):151-166.
- [16] SHAHGOLI G, FIELKE J, DESBIOLLES J, et al. Optimising oscillation frequency in oscillatory tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2010, 106(2):202-210.
- [17] SHAHGOLI G, SAUNDERS C, DESBIOLLES J, et al. The effect of oscillation angle on the performance of oscillatory tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104(1):97-105.
- [18] MURO T, TRAN D T. Regression analysis of the characteristics of vibro-cutting blade for tuffaceous rock[J]. Journal of Terramechanics, 2004, 40(3):191-219.
- [19] KOC A, KOPARAN C, BAIG A. Laboratory evaluation of high-frequency vibrations on soil cutting force[C]//Proceedings of ASABE 2017 Annual International Meeting, Spokane,2017.
- [20] 李霞,张东兴,王维新,等. 受迫振动深松机性能参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(21):17-24. LI Xia, ZHANG Dongxing, WANG Weixin, et al. Performance parameter optimization and experiment of forced-vibration subsoiler[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21):17-24. (in Chinese)
- [21] 王文明,王天元,郭兵,等. 基于振动减阻原理的旋转中耕机关键部件设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):35-45,135. WANG Wenming, WANG Tianyuan, GUO Bing, et al. Design and experiment of key components of rotary cultivator based on vibration reducing resistance principle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):35-45. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190304&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190304&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.004. (in Chinese)